

Sistemas Estelares 2024

Cúmulos de galaxias

Prof. Gabriel Ferrero

Varias diapositivas fueron editadas a partir de las de la Dra. Claudia Scoccola

Cúmulos de galaxias

El 50% de las galaxias pertenecen a grupos de galaxias



Los grupos de galaxias y cúmulos son *las estructuras más grandes, ligadas gravitacionalmente*, que se han formado en el Universo, por el proceso de formación de estructuras. Constituyen las *regiones más densas* del Universo. En los modelos de formación de estructura por colapso gravitacional y agregación jerárquica, de materia oscura, *las estructuras más pequeñas colapsan primero y luego forman estructuras más grandes*, como los cúmulos de galaxias. Los cúmulos se formaron en los últimos *10 giga años* del Universo. Los cúmulos a veces se asocian en *super-cúmulos*.

Cúmulos de galaxias

- Los grupos tienen decenas de miembros, y en promedio tienen unos 0.3 Mpc de diámetro.
 - Cúmulos ricos: radio promedio ~ 3 Mpc.
 - Super-cúmulos: forman filamentos, contienen algunos cúmulos y muchos grupos. *No están en equilibrio hidrostático*. El radio promedio es del 30 Mpc.
- La Vía Láctea pertenece al grupo local.
- El grupo local tiene al menos 54 miembros.
- La galaxia más grande del grupo local es Andrómeda.

Grupo local: ~ 1 Mpc de radio.

Super-cúmulo local: Virgo (tiene un diámetro de 50 Mpc).

Grupo Local

Algunas galaxias satélites de la Vía Láctea:

- Sagittarius Dwarf Galaxy
- Large and Small Magellanic Clouds
- Canis Major Dwarf
- Ursa Minor Dwarf
- Draco Dwarf
- Carina Dwarf
- Sextans Dwarf
- Sculptor Dwarf
- Fornax Dwarf
- Leo I
- Leo II
- Ursa Major I Dwarf
- Ursa Major II Dwarf

Algunas galaxias satélites de Andrómeda:

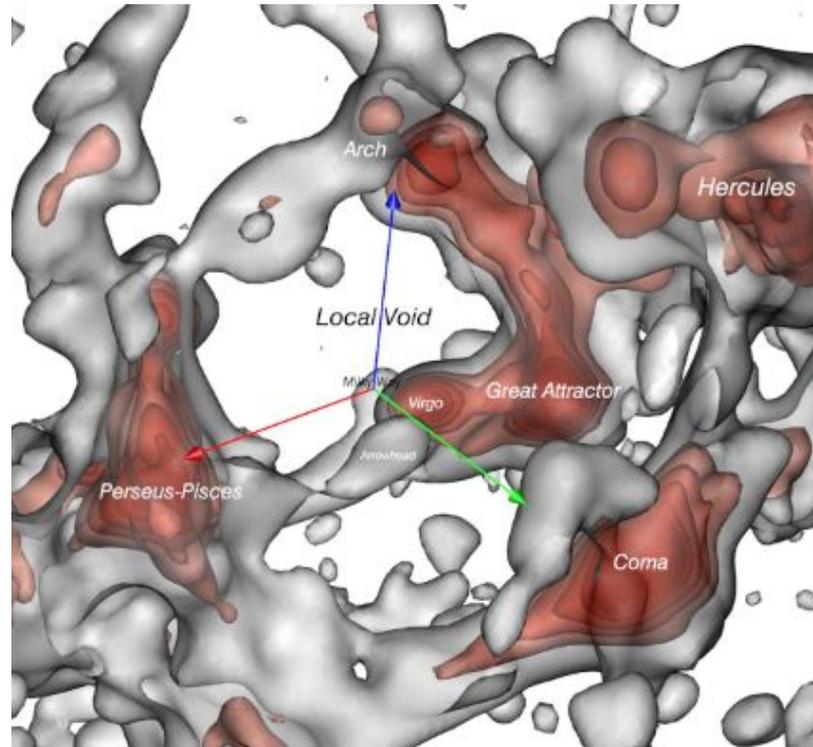
- M32
- M110
- NGC 147
- NGC 185
- Andromeda I
- Andromeda II
- Andromeda III
- Andromeda IV
- Andromeda V
- Andromeda VI
- Andromeda VII
- Andromeda VIII
- Andromeda IX
- Andromeda X
- Andromeda XI
- Andromeda XII
- Andromeda XIII
- Andromeda XIV
- Andromeda XV
- Andromeda XVI
- Andromeda XVII
- Andromeda XVIII
- Andromeda XIX
- Andromeda XX

- Triangulum Galaxy (third-largest galaxy in the local group)
- Pisces Dwarf (unclear if it is a satellite of the Andromeda Galaxy or the Triangulum Galaxy)

Grupo Local

Links interesantes: Estructura a gran escala local.

<https://www.universetoday.com/142923/meet-our-neighbour-the-local-void-gaze-into-it-puny-humans/>



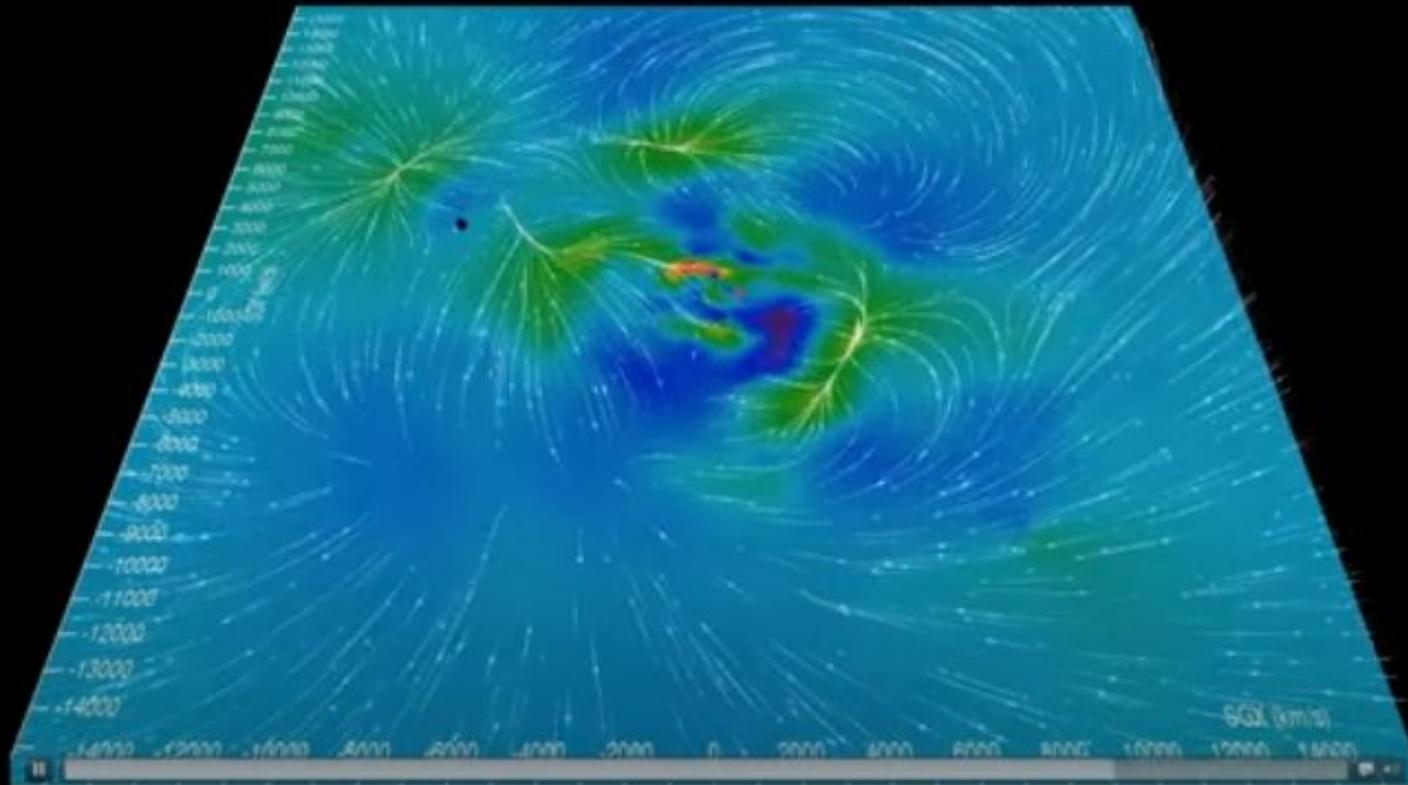
Una representación de la densidad (suavizada) de la estructura alrededor del Vacío Local. La Vía Láctea estaría en el origen del sistema de referencia con flechas roja, verde y azul (cada una con una longitud de ~ 6 Mpc). Estamos en la frontera entre una gran zona de baja densidad (“vacío” o *void*) y el cúmulo de alta densidad de Virgo. Crédito: R. Brent Tully

Grupo Local

Links interesantes:

Golden Webinars – **R. Brent Tully** - "*Galaxy Flows and the Formation of Large Scale Structure*" (en inglés, 1h 17m)

<https://www.youtube.com/watch?v=SR57uHobLpc>



Clasificación de cúmulos (según Bautz-Morgan)

Históricamente, se clasificaban así los cúmulos de galaxias:

- Un cúmulo tipo I está dominado por una galaxia brillante, grande y supermasiva (galaxia cD). Por ejemplo: cúmulos Abell 2029 y Abell 2199.
- Un cúmulo tipo II contiene galaxias elípticas cuyo brillo respecto al cúmulo es intermedio entre los cúmulos de tipo I y los de tipo III. El Cúmulo de Coma es un ejemplo de tipo II.
- Un cúmulo tipo III no tiene miembros sobresalientes, como el cúmulo de Virgo.

Cúmulos de galaxias

Medio intracúmulo:

Gas caliente, formado por hidrógeno y helio (gas primordial) y alguna contaminación por parte de las estrellas, llena todo el cúmulo.

Se estudia en Rayos X.

Catálogos de cúmulos:

- ABELL (1958)
- "A Catalog of Rich Clusters of Galaxies", Abell, G. O., Corwin, H. G. Jr., and Olowin, R.P. Astrophys. J. Suppl., 1989, vol 70, p1.
- Catálogo de Zwicky et al (compilado entre los años 1960/1968)
- The Updated Zwicky Catalog (UZC)
<https://arxiv.org/pdf/astro-ph/9904265.pdf>
- http://zmtt.bao.ac.cn/galaxy_clusters/catalogs.html



Abell 2199 es un cúmulo de galaxias en el catálogo de Abell, que tiene una galaxia central brillante NGC 6166 (una galaxia cD). Es un cúmulo de tipo I en la clasificación de Bautz-Morgan.



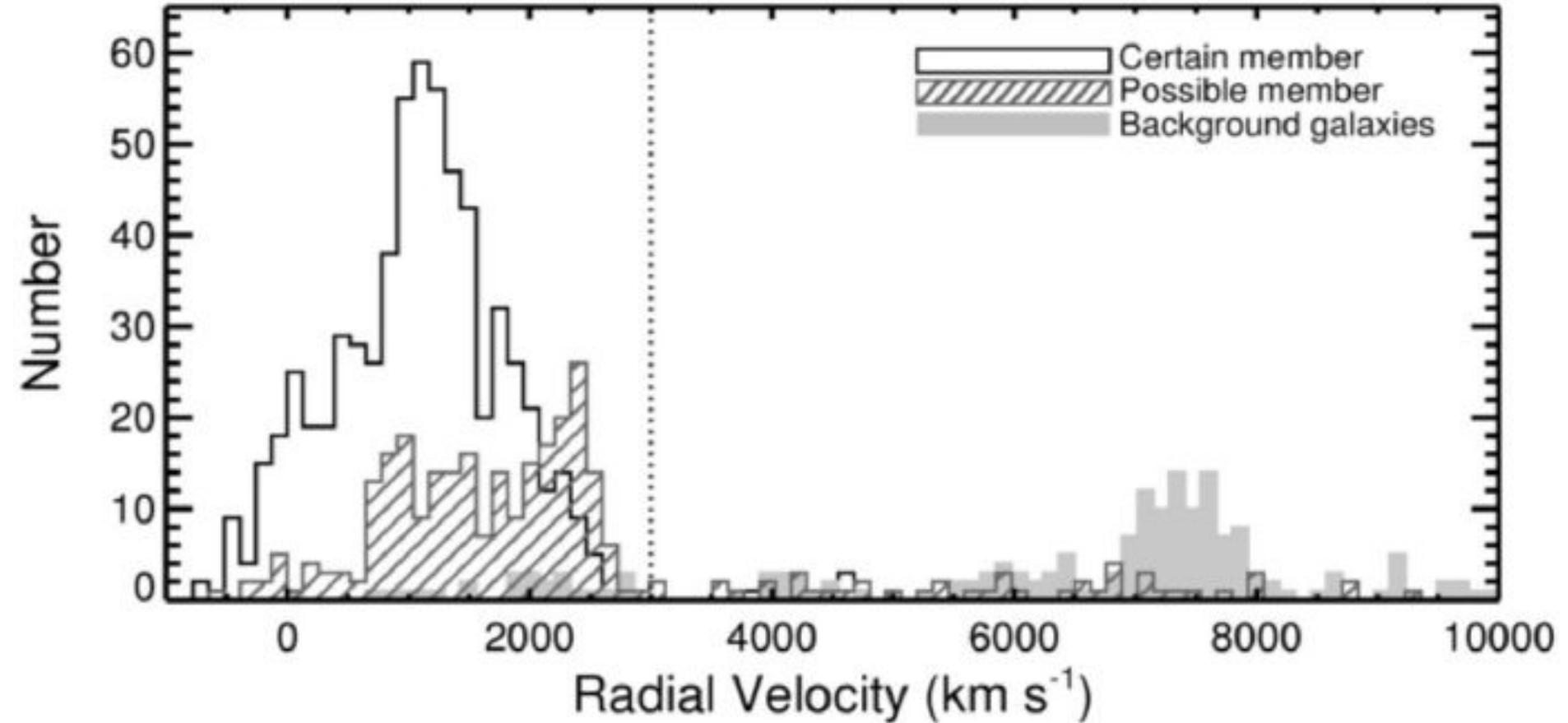
El cúmulo de Coma (Abell 1656) es un cúmulo de galaxias grande que contiene más de mil miembros identificados. Junto con el cúmulo de Leo (Abell 1367), es uno de los mayores cúmulos del supercúmulo de Coma.

Cúmulo de Virgo en la constelación de Virgo. Contiene aprox. 1300 miembros. Está en el centro del supercúmulo de Virgo, del cual el grupo local es un miembro de las afueras del supercúmulo. La masa del cúmulo de Virgo es de $1.2 \times 10^{15} M_{\odot}$ hasta 8 grados del centro del cúmulo, o hasta un radio de aprox. 2.2 Mpc.



Cúmulos de galaxias

Diagrama (histograma) de velocidad radial



Cúmulos de galaxias

Relación color - magnitud en galaxias tempranas (“Secuencia roja”)

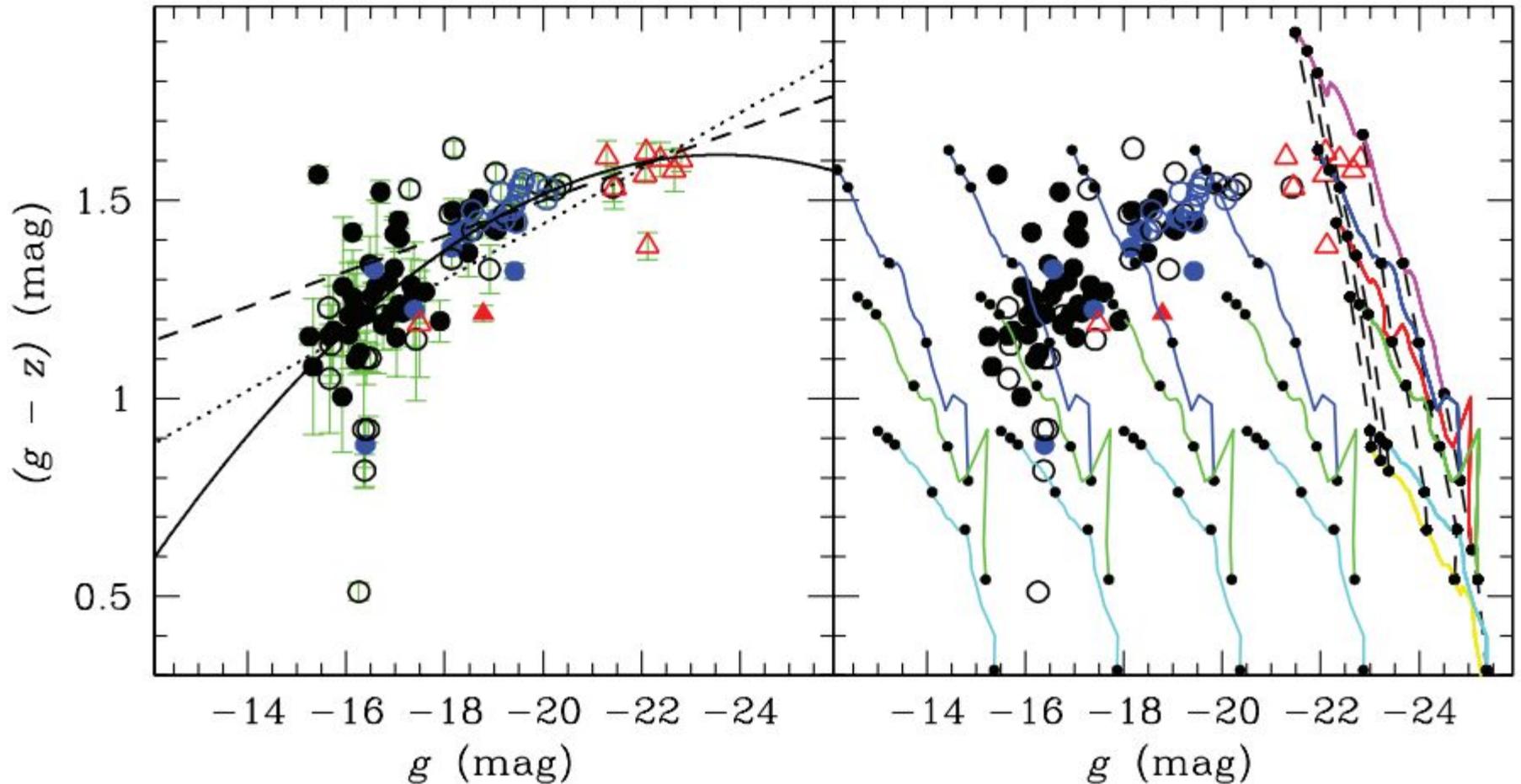


FIG. 123.—Color-magnitude diagram for the 100 galaxies that comprise the ACSVCS. Galaxies are color-coded as in Fig. 115. In the left panel, the data are plotted with error bars; the dashed and dotted lines corresponds to least-squares fits to galaxies fainter and brighter than $M_g = -18$ mag, respectively, while the curved line represents the best quadratic fit to the entire sample (see eqs. [31], [32], and [33]). The solid lines in the right panel show the prediction of the stellar population synthesis models of Bruzual & Charlot (2003). Models of constant metallicity and varying age are shown as solid lines for $[\text{Fe}/\text{H}] = -2.25$ (yellow), -1.65 (cyan), -0.64 (green), -0.33 (red), $+0.09$ (blue), $+0.56$ (magenta). Points along the isometallicity tracks corresponds to ages of 1, 2, 4, 8, 12, 15 Gyr (from left to right). Finally, from top to bottom, the g -band magnitudes have been scaled to a total mass $M = 10^{12}$, 10^{11} , 10^{10} , 10^9 , and $10^8 M_{\odot}$. All magnitudes have been extinction corrected.

Cúmulos de galaxias

Relación color - magnitud en galaxias tempranas (“Secuencia roja”)

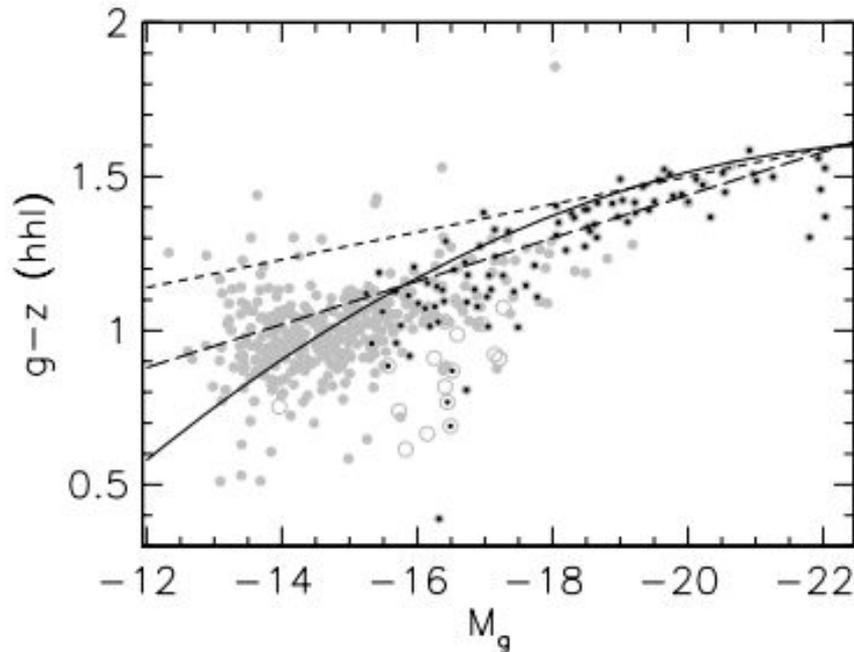


Figure 3. Comparison to the data of Ferrarese et al. (2006). Shown are all galaxies in our sample with gray symbols, again the blue-core dEs with open circles and the other galaxies with filled circles. Galaxies common to both samples are indicated by an additional black dot in the middle of the other symbol. The axes are changed in comparison to Figure 1 and colors are measured in smaller apertures (half of the half-light aperture, indicated by hhl on the y-axis) to most closely resemble their Figure 123. The black lines indicate their fits to their data, the short dashed and long dashed lines linear fits to a brighter ($M_g < -18$) and fainter subsample ($M_g > -18$), respectively. The solid line displays the parabola they fitted to the whole sample. There is a systematic offset of about 0.1 mag toward bluer colors of the color derived in our study in comparison to Ferrarese et al.

Cúmulos de galaxias

Relación morfología - radio

En los cúmulos de galaxias existe una relación entre el tipo morfológico de las galaxias y el radio cúmulo-céntrico (o su densidad proyectada).

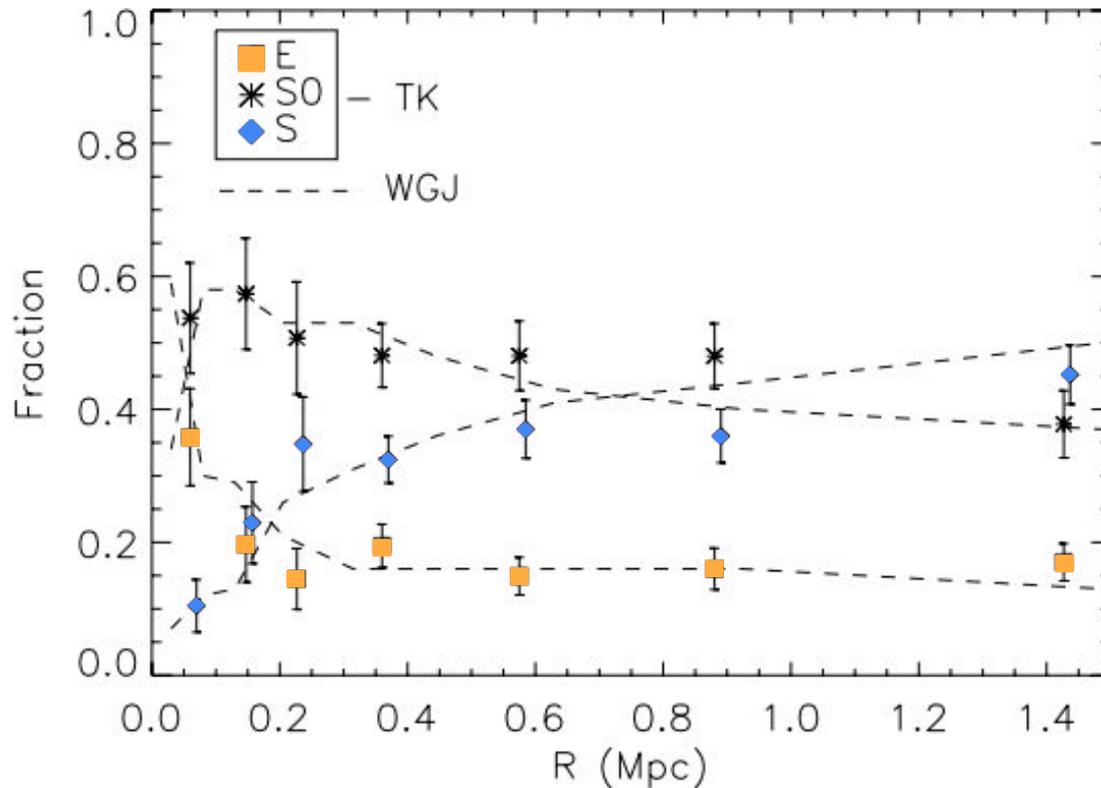


Fig. 2. The morphology-radius relation, expressed as the fraction of galaxies of different types for various projected distances (with $H_0 = 100 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$). The dashed lines were taken from Fig. 4 in WGJ, and the symbols represent our results.

Cúmulos de galaxias

Relación morfología - radio

En los cúmulos de galaxias existe una relación entre el tipo morfológico de las galaxias y el radio cúmulo-céntrico (o su densidad proyectada).

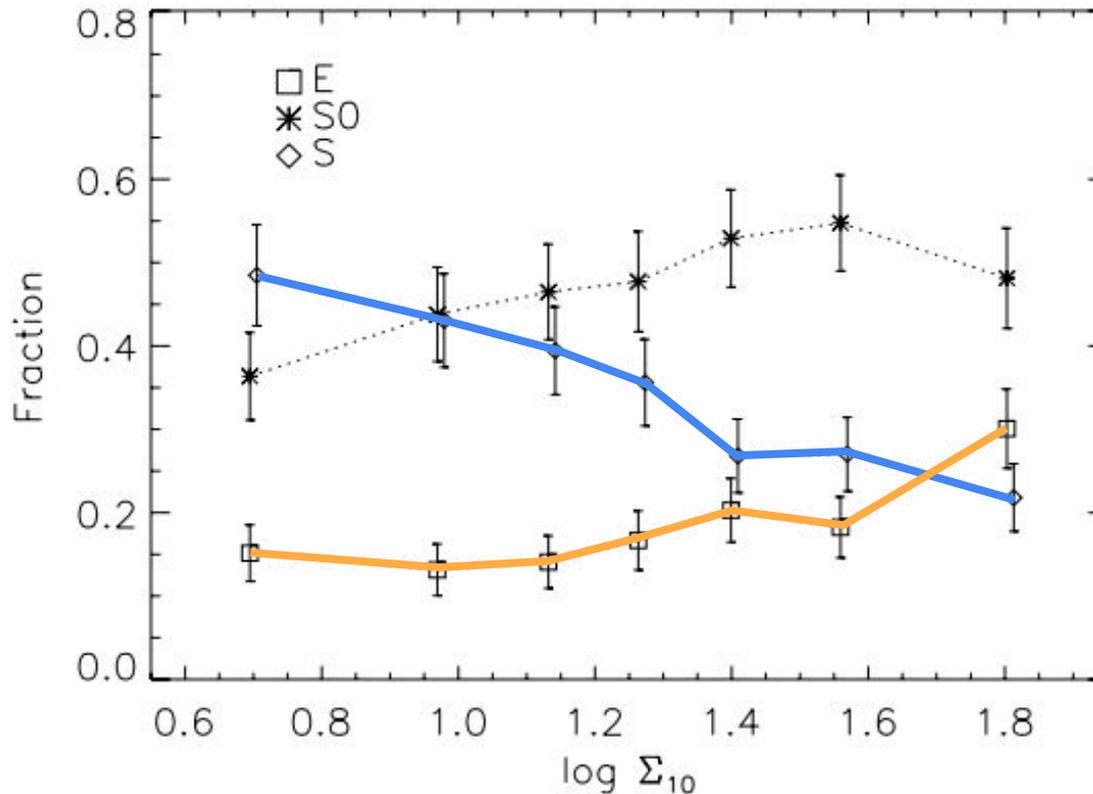


Fig. 4. The morphology-density relation in the traditional representation, i.e. as the variation of the fraction of galaxies of different morphological types with projected density Σ_{10} .

Σ_{10} : densidad proyectada derivada de las 10 vecinas más cercanas.

Cúmulos de galaxias

Determinación de masas: teorema del Virial

Se deduce que:

$$M = 5 R \sigma^2 / G$$

Cúmulo típico:

$$R \sim 5 \text{ Mpc}$$

$$\sigma \sim 1000 \text{ km/s}$$

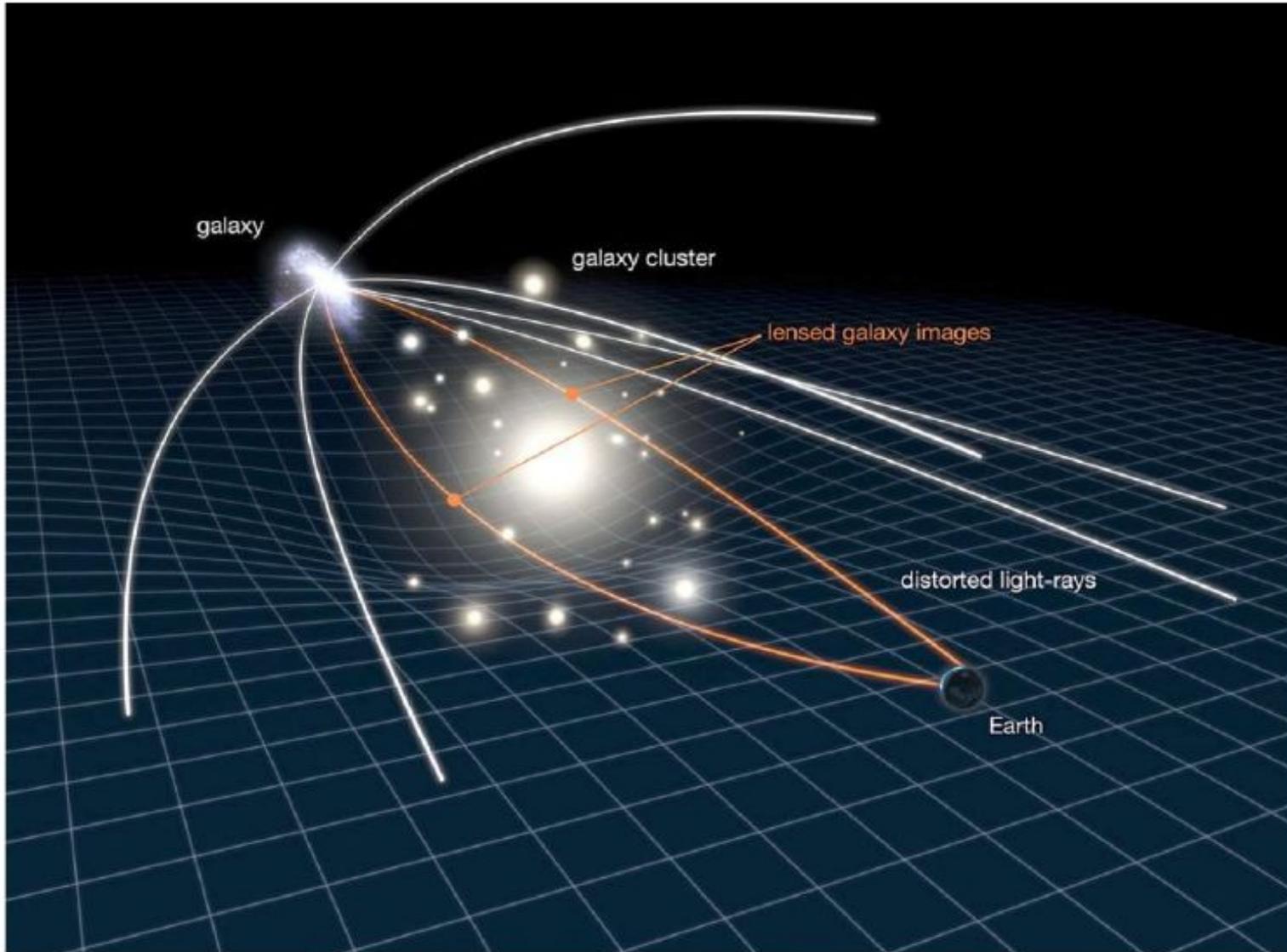
$$M = 5 \times 10^{15} M_{\text{sol}}$$

Si calculamos la masa a partir de la luz de las galaxias, obtenemos el 5% de la masa del cúmulo. El gas da cuenta del 20% de la masa del cúmulo.

El resto asumimos que es materia oscura.

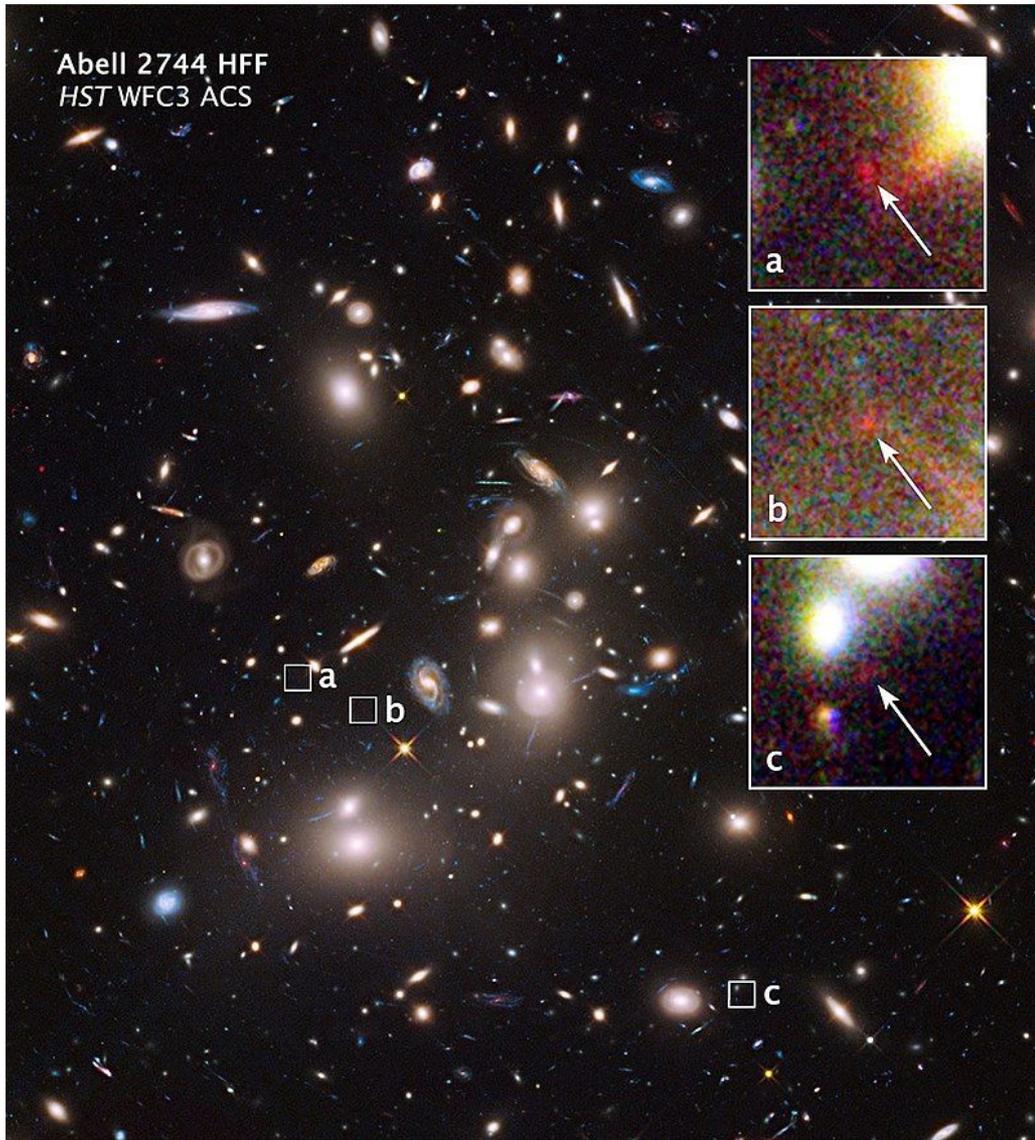
Las masas de los cúmulos se pueden medir también por su emisión en rayos X y se obtiene un resultado similar.

Cúmulos de galaxias



Otro método para estimar la **masa** de un cúmulo de galaxias es utilizar el efecto de **lente gravitacional**.

Efecto de lente gravitacional

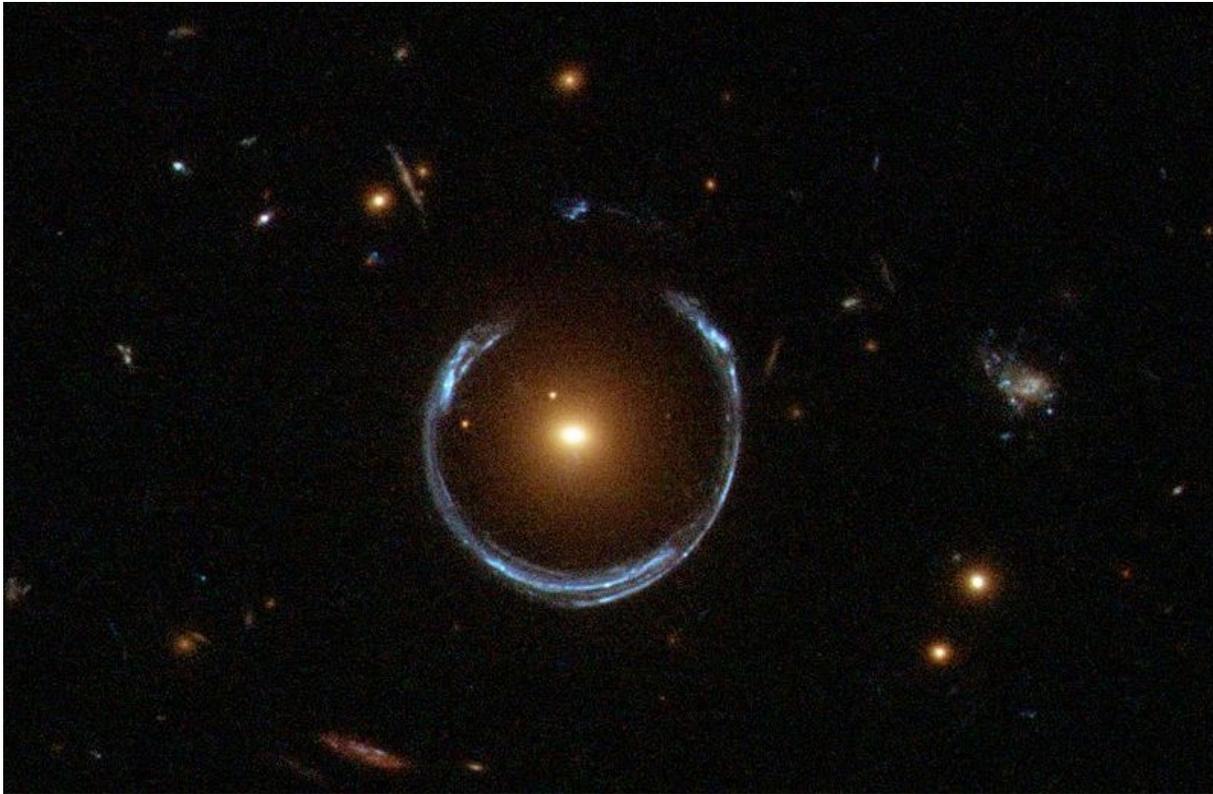


Cúmulo de galaxias Abell 2744. Se observan numerosos arcos producidos por galaxias distantes y galaxias a muy alto *redshift*.

Efecto de lente gravitacional

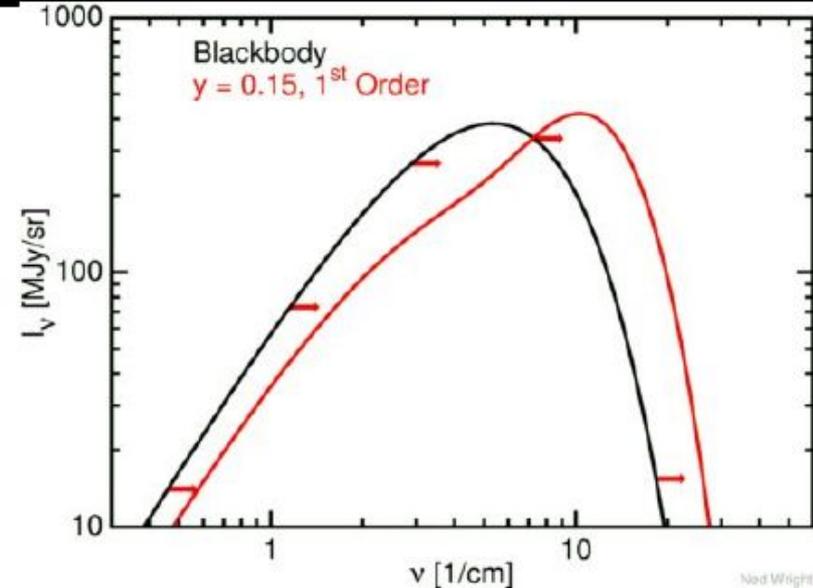
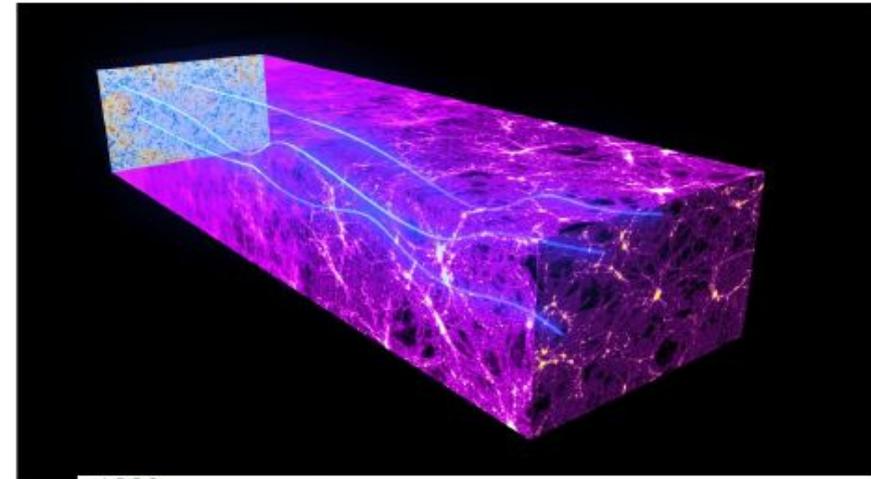
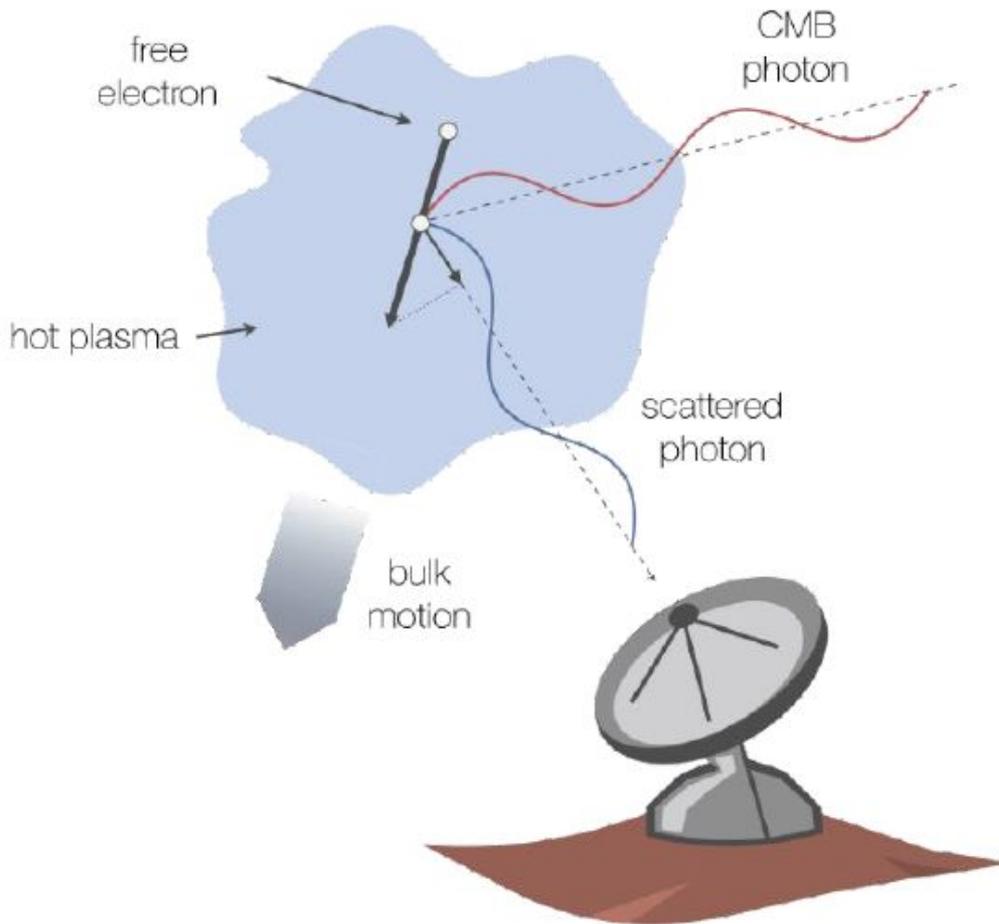
En el marco de la teoría general de la relatividad, el ángulo de deflexión θ de un rayo de luz al pasar cerca de un cuerpo de masa M situado a una distancia r de su trayectoria está dado por:

$$\theta = \frac{4GM}{c^2 r}$$



Determinación de distancias a cúmulos de galaxias

Efecto Sunyaev-Zeldovich

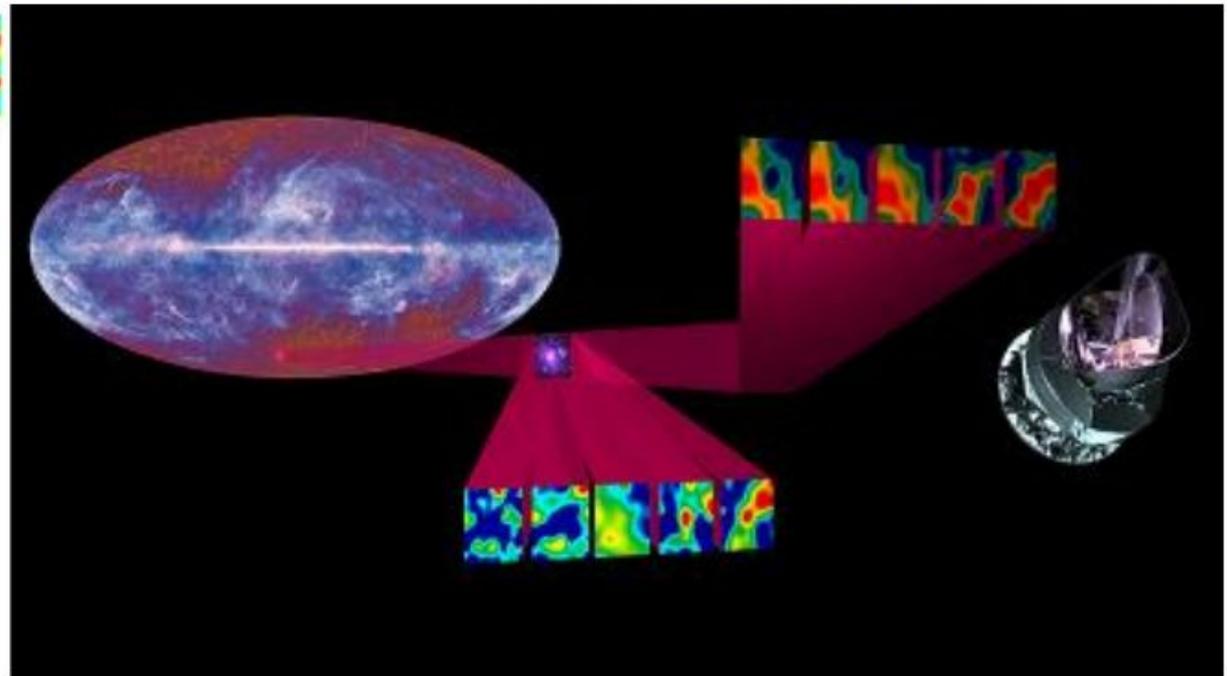
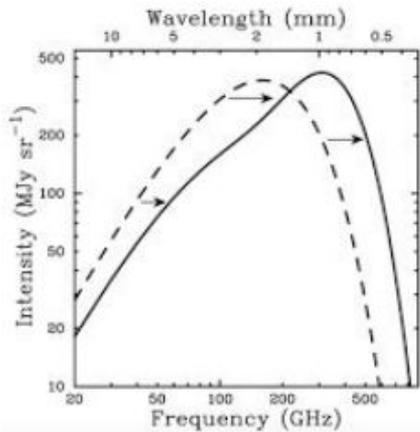
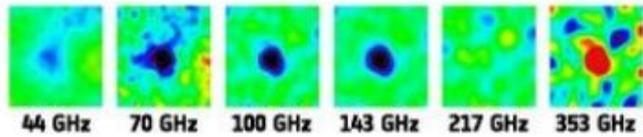
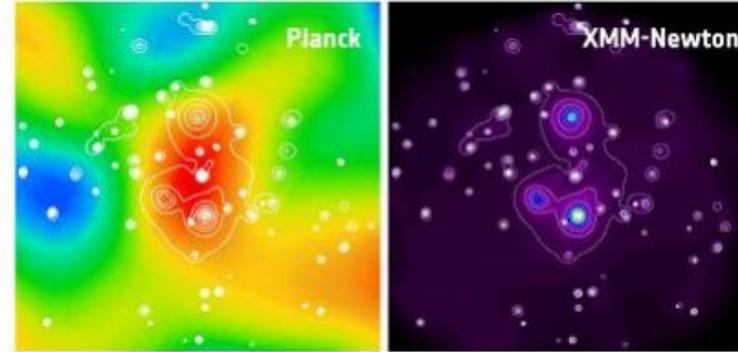


Cuando los fotones del fondo cósmico de microondas (CMB) atraviesan el gas caliente intra-cúmulo, su distribución espectral de energía se desplaza hacia energías mayores por efecto Compton inverso. Sunyaev & Zeldovich, *Comments Astrophys. Space Phys.* 4, 173 (1972)

Determinación de distancias a cúmulos de galaxias

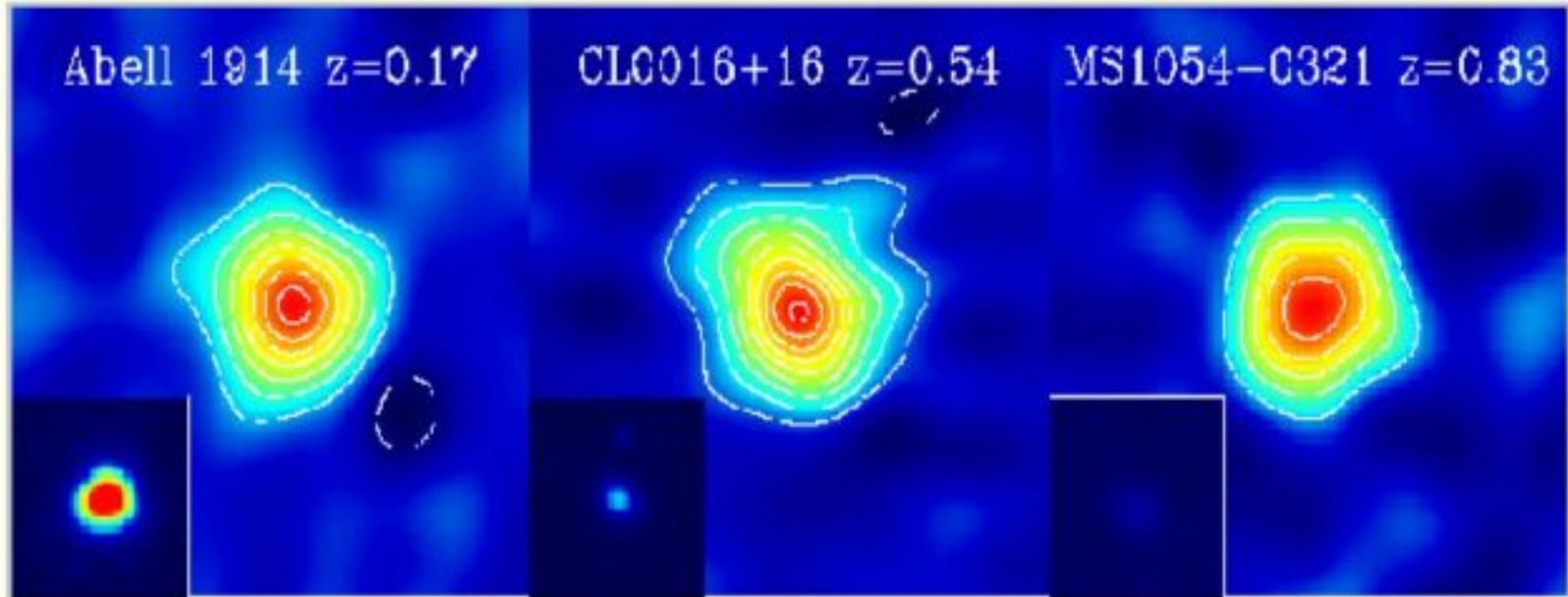
HUNTING GALAXY CLUSTERS WITH PLANCK – THE SUNYAEV-ZEL'DOVICH EFFECT

As the photons of the Cosmic Microwave Background traverse the Universe, they encounter different types of structures which affect their path and energy in various ways, producing a series of observable effects. In the case where the photons pass through a galaxy cluster, a particularly interesting effect ensues: the hot, ionised gas permeating these huge cosmic structures interacts with the photons and modifies their energy distribution in a characteristic way. This phenomenon, known as the Sunyaev-Zel'dovich Effect, represents a powerful tool for detecting galaxy clusters out to high redshift.



Determinación de distancias a cúmulos de galaxias

El efecto Sunyaev - Zeldovich (SZ) combinado con observaciones en rayos X se puede usar para determinar distancias a cúmulos.



Comparación del efecto SZ con observaciones de cúmulos. Se muestran imágenes del efecto SZ en tres cúmulos con diferentes redshifts (arriba) e imágenes en rayos X (recuadros). La emisión en X cae con el redshift, pero el efecto SZ no cambia mucho.

Determinación de distancias a cúmulos de galaxias por efecto SZ

“El análisis combinado de *datos en radio y en rayos X* proporciona un método para determinar directamente las distancias a cúmulos de galaxias. Los cúmulos de galaxias son las mayores estructuras colapsadas por gravitación que existen en el universo, con un plasma difuso caliente ($T_e \sim 10^7 - 10^8$ K) que llena el espacio intergaláctico. Los fotones del CMB que pasan a través de este plasma caliente tienen una probabilidad del 1% de sufrir dispersión Compton inversa con los electrones de alta energía, lo cual causa una pequeña **distorsión (~ 1 mK) en el espectro del CMB.** (...)

El mismo gas caliente emite rayos X, principalmente por *bremsstrahlung* térmico. El efecto SZ es una función de la presión integrada, $\Delta T \propto \int n_e^2 T_e dl$, donde n_e es la densidad electrónica numérica, T_e la temperatura del gas y l la longitud en la línea de vista. La emisión de rayos X es $S_x \propto \int n_e^2 \Lambda_{ee} dl$, donde Λ_{ee} es la función de enfriamiento de los rayos X. **La dependencia con la densidad, junto con un modelo del gas del cúmulo, permite determinar directamente la distancia al cúmulo.** Este método es independiente de la escala de distancias extragaláctica y proporciona distancias a cúmulos de galaxias a alto *redshift*.”

Determinación de distancias a cúmulos de galaxias por efecto SZ

En breve: las dependencias de S_X y ΔT_{CMB} tienen la forma:

$$S_X \propto \int n_e^2 \Lambda_{ee} dl = \int n_e^2 \Lambda_{ee} D_A d\theta$$
$$\Delta T_{CMB} \propto \int n_e T_e dl = \int n_e T_e D_A d\theta$$

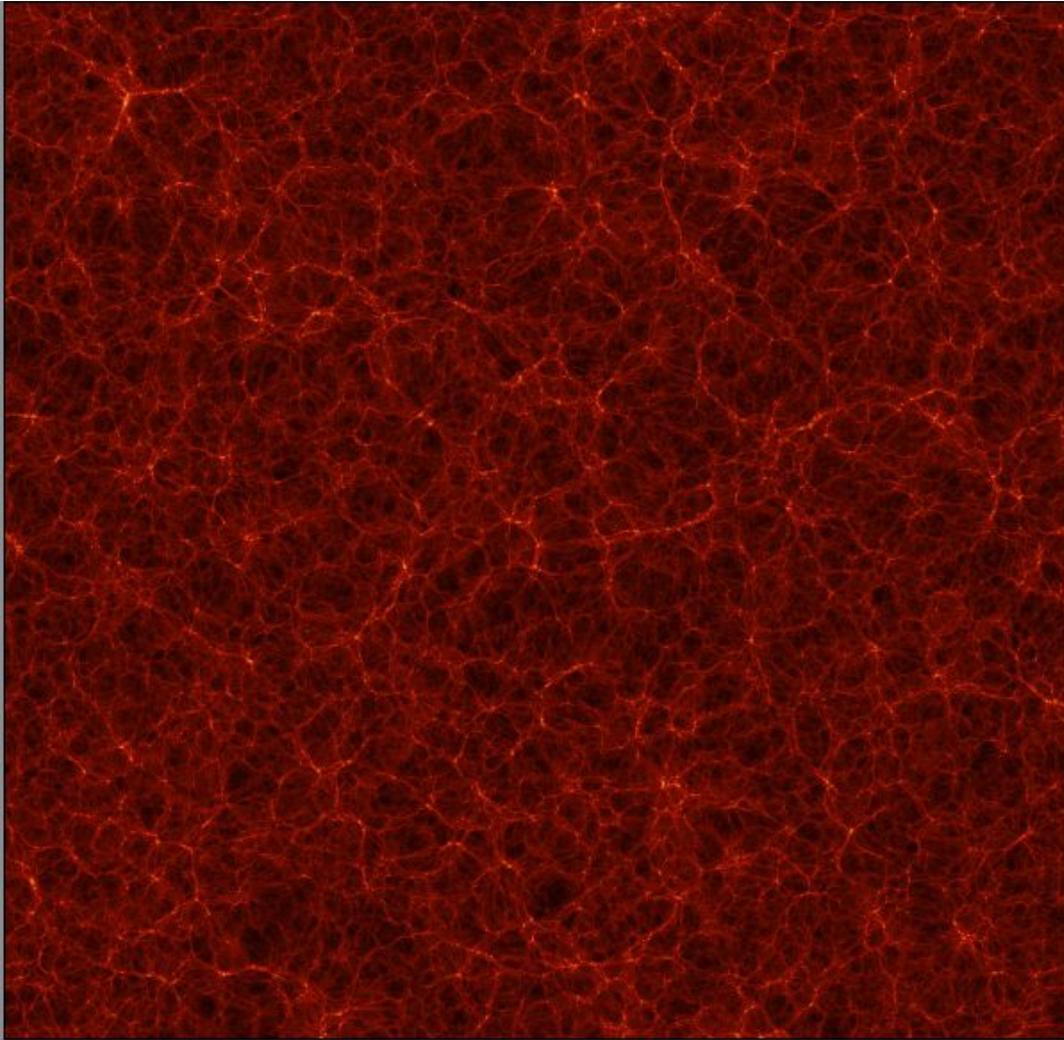
donde D_A es el diámetro angular del cúmulo y θ es el tamaño angular a lo largo de la línea de la visual. Los detalles del modelo del plasma se incluyen en las constantes de proporcionalidad. **D_A se puede deducir del análisis conjunto del efecto SZ y de los datos de rayos X, asumiendo una cierta geometría del cúmulo y relacionando el tamaño angular medido observacionalmente en el plano del cielo con el calculado a lo largo de la línea de vista.** Adoptando una simetría esférica los tamaños [en las dos direcciones] son iguales.

Diapositivas adicionales

Estructura a gran escala del Universo

Simulación **Big Bolshoi**

Caja de 1 Gpc de lado



<https://hipacc.ucsc.edu/Bolshoi/Images.html#bb0>

[Galaxias en halos \(video\)](#)

Formación de un cúmulo de galaxias - IllustrisTNG50

Explicación del video (de la siguiente filmina): Cómo se forman las galaxias? Las simulaciones numéricas nos permiten estudiar la evolución del Universo.

Esta simulación hidrodinámica del conjunto de simulaciones IllustrisTNG se llama TNG50.

La primera parte del video sigue la evolución del gas (mayormente hidrógeno) mientras

éste evoluciona para formar galaxias y cúmulos de galaxias desde el Universo temprano

hasta hoy. Los colores más brillantes indican el gas moviéndose más rápidamente.

A medida que el Universo evoluciona, el gas cae en los pozos de potencial, las galaxias se forman, giran, chocan y se fusionan galaxias, mientras que los agujeros negros se van formando en los centros de las galaxias y expelen el gas circundante a altas velocidades.

La segunda parte del video, sigue a las estrellas, y muestra como se forma el cúmulo de galaxias, con las galaxias miembros mostrando colas de mareas (tidal tails) y estelas estelares (stellar streams).

<https://apod.nasa.gov/apod/ap190226.html>

FALTA AGREGAR LINKS

700 kpc

$z = 0.13$

TNG50

