

ESTRUCTURA GALÁCTICA Y DINÁMICA ESTELAR

Referencia: Capítulo 7 de Binney & Tremaine (*Galactic Dynamics*)

Teoría Cinética, Aproximación de Fokker-Planck,
Cúmulos de Galaxias

Ecuación Maestra

En las últimas clases, hemos tratado de sistemas estelares **acolicionales**, con destaque a situaciones de **equilibrio** (E.B.A. estacionaria) y discusiones sobre la **estabilidad** de ese equilibrio (teoría de respuesta lineal a perturbaciones).

Caminaremos ahora hacia el estudio de sistemas **colisionales**. Recordemos que se comentó que, para esos sistemas, la derivada direccional no es nula, pero corresponde a:

$$\frac{Df}{Dt} = \Gamma(f)$$

donde $\Gamma(f)$ es el **operador encuentro** (y la ecuación, **Ecuación Maestra**). En ese caso, la densidad en el espacio de fase alrededor de una estrella cambia con el tiempo, en una tasa determinada por dicho operador.

La solución completa de esa ecuación es complicada, pero una solución aproximada puede ser dada por:

$$\Gamma[f] = - \sum_{i=1}^6 \frac{\partial}{\partial w_i} \{ D[\Delta w_i] f(\mathbf{w}) \} + \frac{1}{2} \sum_{i,j=1}^6 \frac{\partial^2}{\partial w_i \partial w_j} \{ D[\Delta w_i \Delta w_j] f(\mathbf{w}) \},$$

llamada **aproximación de Fokker-Planck** (ver sección 7.4 de Binney & Tremaine).

Efecto de encuentros

Los **encuentros** en un sistema estelar son muy importantes para la **evolución** de esos sistemas, manifestándose a través de diferentes mecanismos:

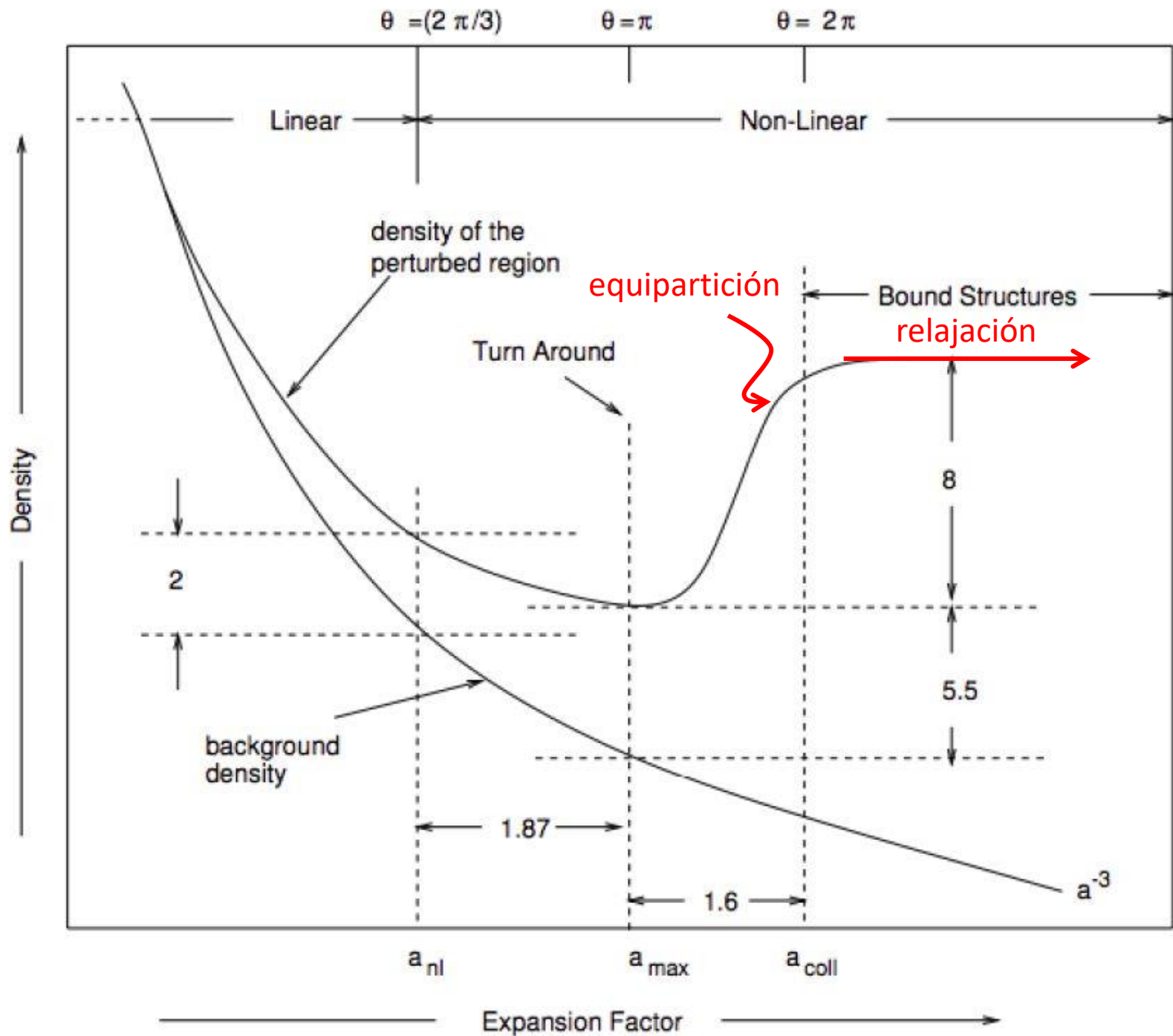
1) Equipartición:

A partir de la teoría cinética elemental sabemos que los encuentros tienden a producir una **equipartición** de la energía cinética: partículas de mayor energía pierden energía para partículas menos energéticas. En sistemas estelares, estrellas **masivas** que pierden energía **espiralan** hacia el pozo de potencial mientras que estrellas de **menor masa** tienden a sufrir una **difusión** hacia partes externas del sistema.

2) Relajación:

A cada encuentro, la órbita de una estrella puede ser ligeramente alterada (difusión en el espacio de fase), alejándola de sus condiciones iniciales y **aumentando la entropía** del sistema estelar. En otras palabras, se va perdiendo la **memoria** de las condiciones iniciales y caminando hacia un estado de menor información y más aleatorio. Ese proceso es importante para llegar al estado de **equilibrio** (virial) que discutimos para los sistemas acolicionales. El tiempo de relajación es dado (como vimos antes) por:

$$t_{\text{relax}} \approx \frac{0.1N}{\ln N} t_{\text{cross}},$$



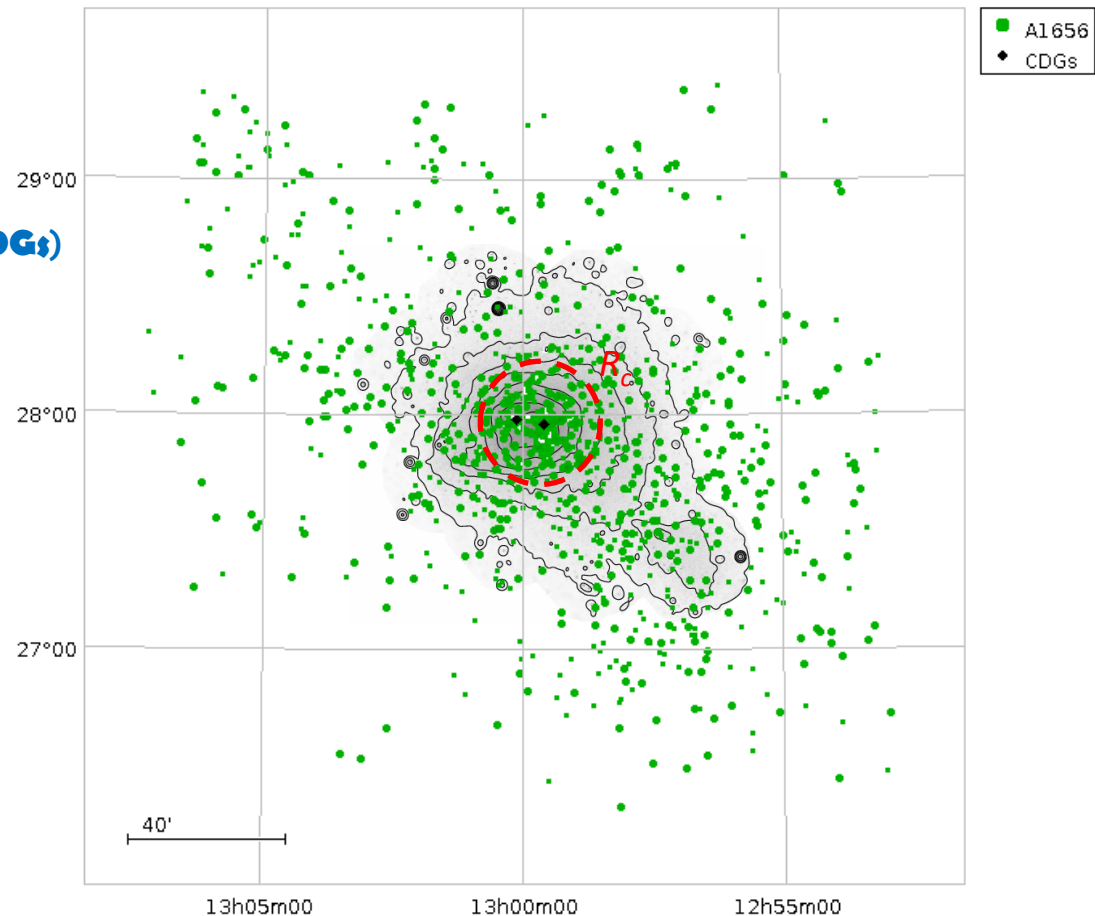
En la práctica, los sistemas estelares caminan hacia una estructura de un **core** (núcleo) pequeño y denso y una **halo** grande y poco denso.

ESTRUCTURA

Cúmulo de Galaxias típico

⇒ Core ($r < R_c \sim 0.28 h_{70}^{-1} \text{ Mpc}$)

- Galaxia(s) Dominante(s) Central(es) (**CDGs**)
- *Cool Core* (**CC**, **WCC**, **NCC**)



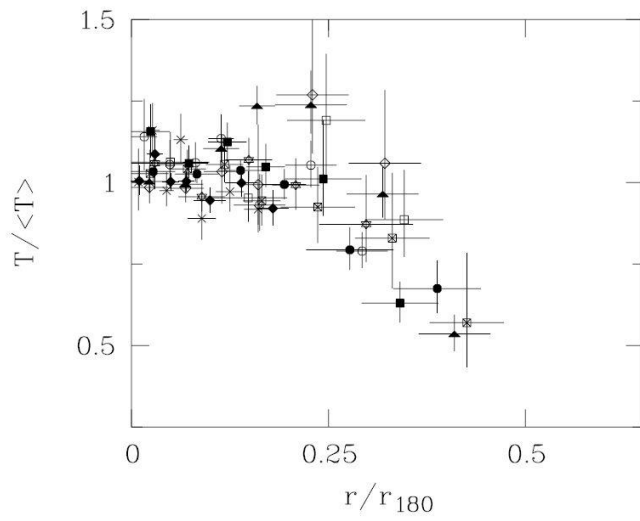


FIG. 3.—Temperature profiles (projected) for the non-CF clusters, plotted against radii in units of r_{180} . Clusters are related to symbols as follows: A119 (filled squares), A754 (filled triangles), A1367 (open circles), A1750 (open squares), A2256 (filled circles), A2319 (open lozenges), A3266 (crossed squares), A3376 (stars), A3627 (crosses), and Coma (filled lozenges).

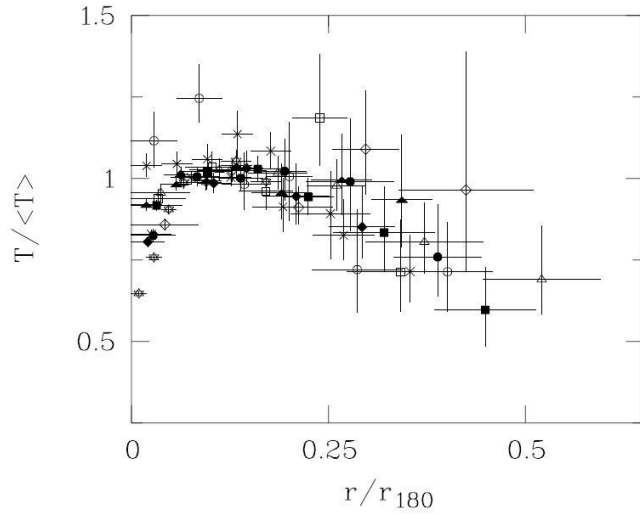
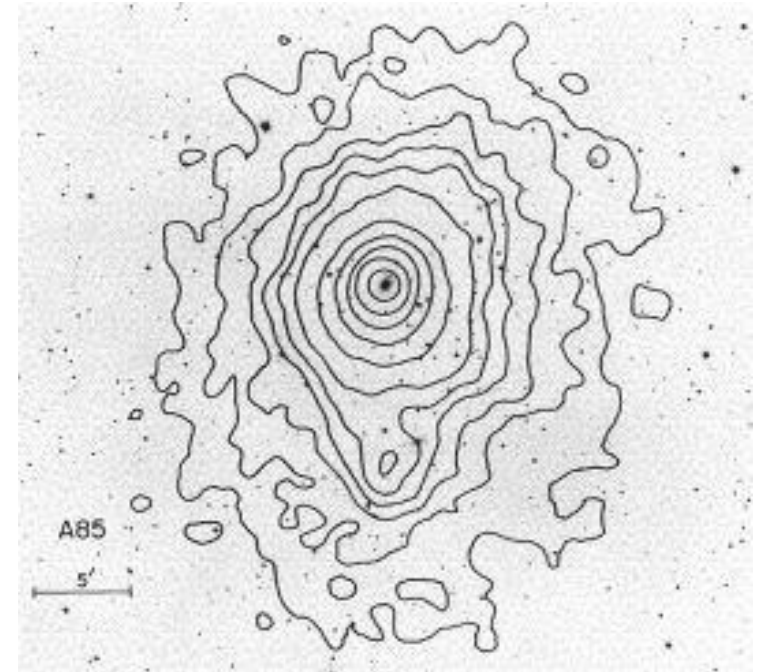
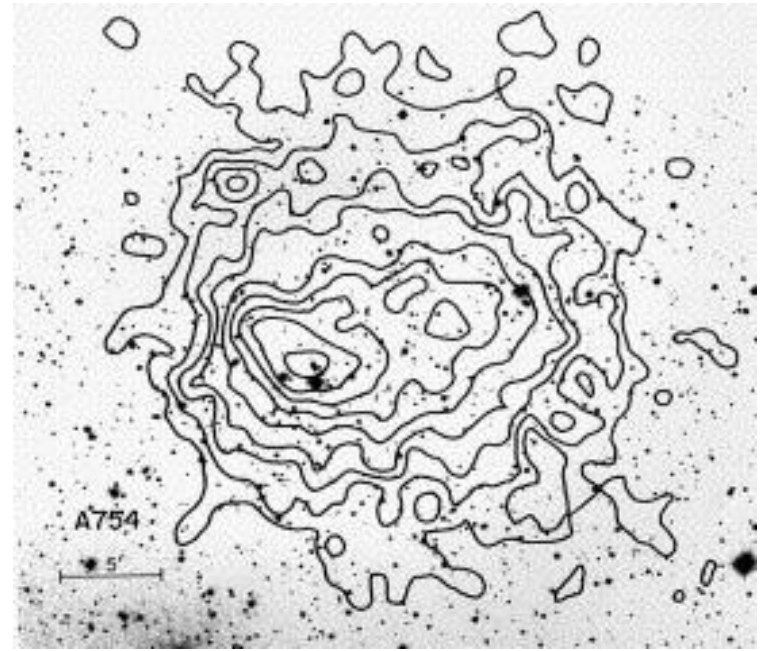


FIG. 4.—Temperature profiles (projected) for the CF clusters, plotted against radii in units of r_{180} . Clusters are related to symbols as follows: A85 (filled circles), A496 (filled lozenges), Perseus (stars), A1795 (filled squares), A2029 (open squares), A2142 (open triangles), A2199 (filled triangles), A3562 (open circles), A3571 (crosses), 2A 0335+096 (asterisks), and PKS 0745–191 (open lozenges).

[De Grandi & Molendi (2002), ApJ 567, 163]



[Jones & Forman (1999), ApJ 511, 65]

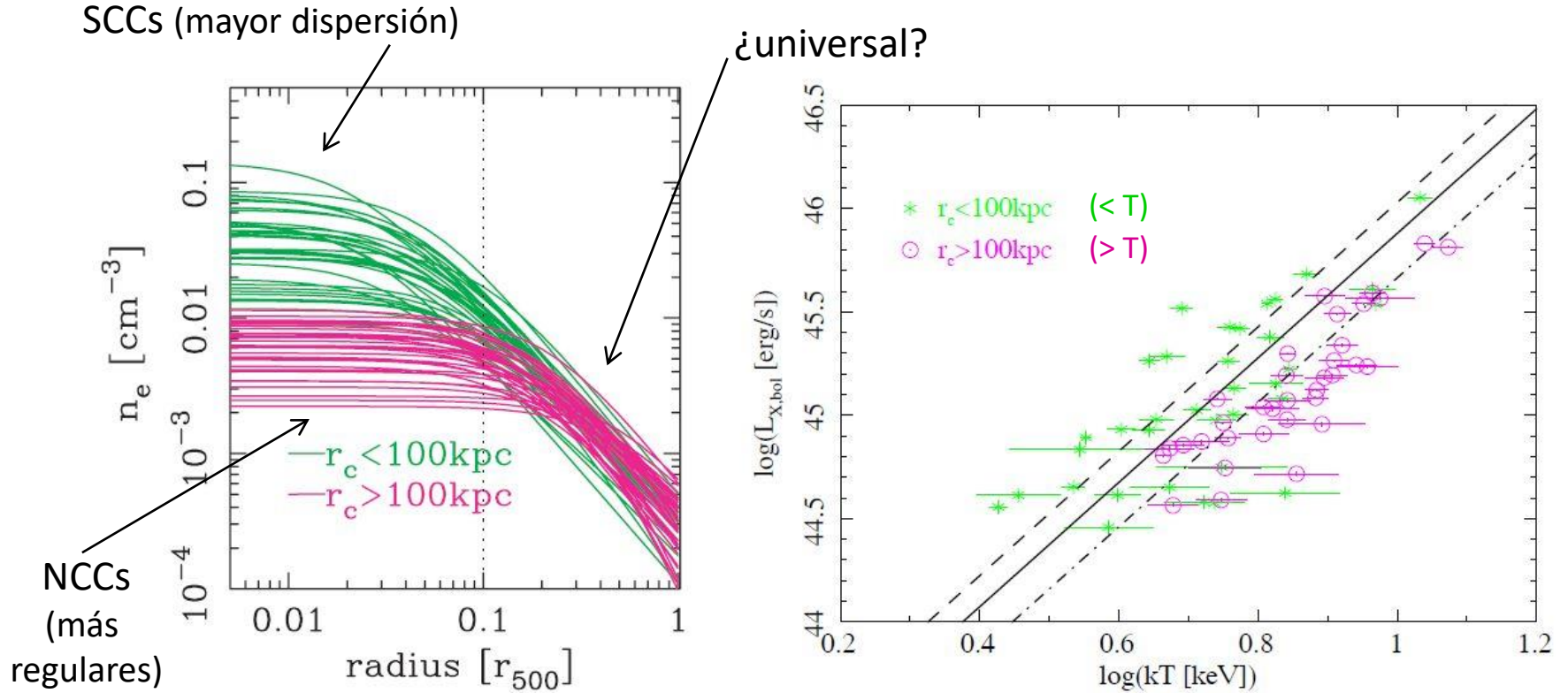


Fig. 4 (Left) Electron density profiles for 69 clusters. The best-fit density profiles derived with the single β -model are plotted, where the radius is normalized with r_{500} . $0.1r_{500}$ is indicated with the vertical dotted line, inside which the scatter is the most prominent. (Right) $L_X - T$ relation of clusters. A significant offset in the normalization factor of the $L_X - T$ relation between clusters with small ($r_c < 100$ kpc) and large core radii (> 100 kpc) is seen (Ota et al. 2006).

En la práctica, los sistemas estelares caminan hacia una estructura de un **core** (núcleo) pequeño y denso y una **halo** grande y poco denso.

ESTRUCTURA

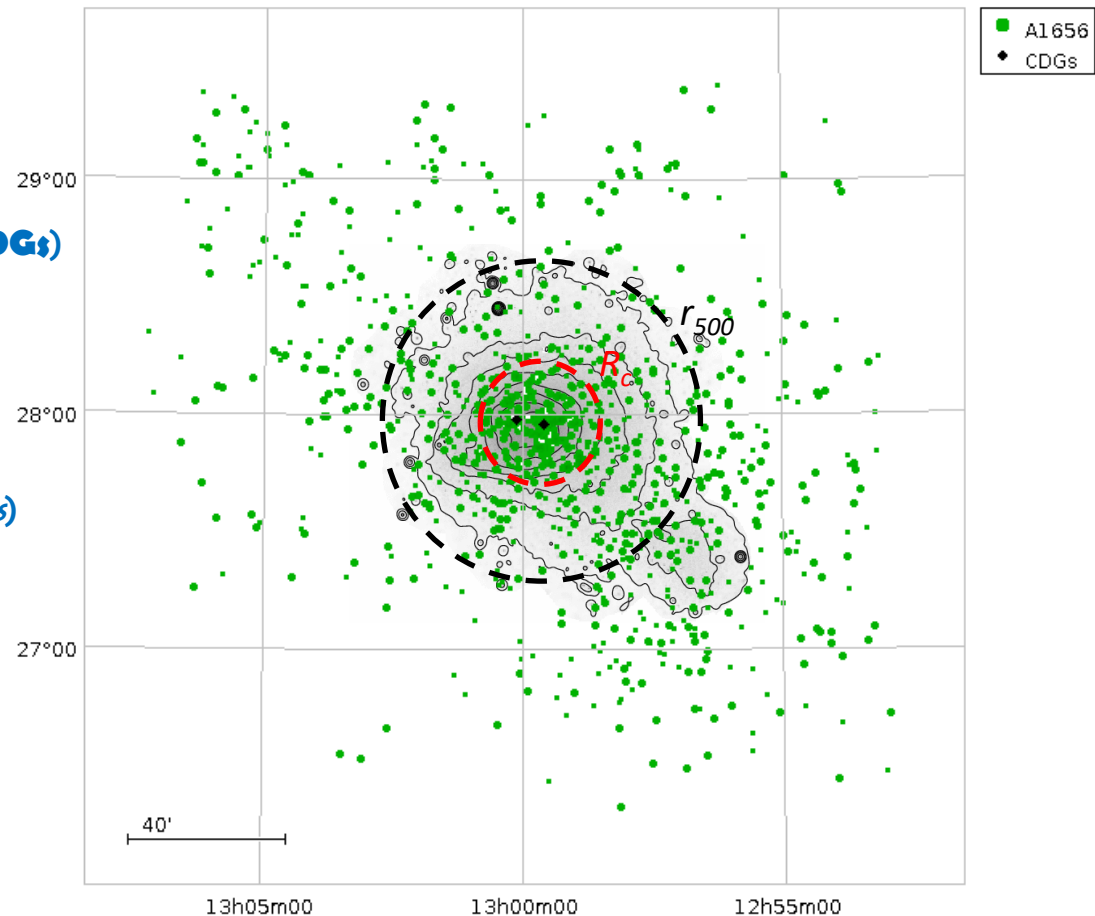
Cúmulo de Galaxias típico

⇒ Core ($r < R_c \sim 0.28 h_{70}^{-1}$ Mpc)

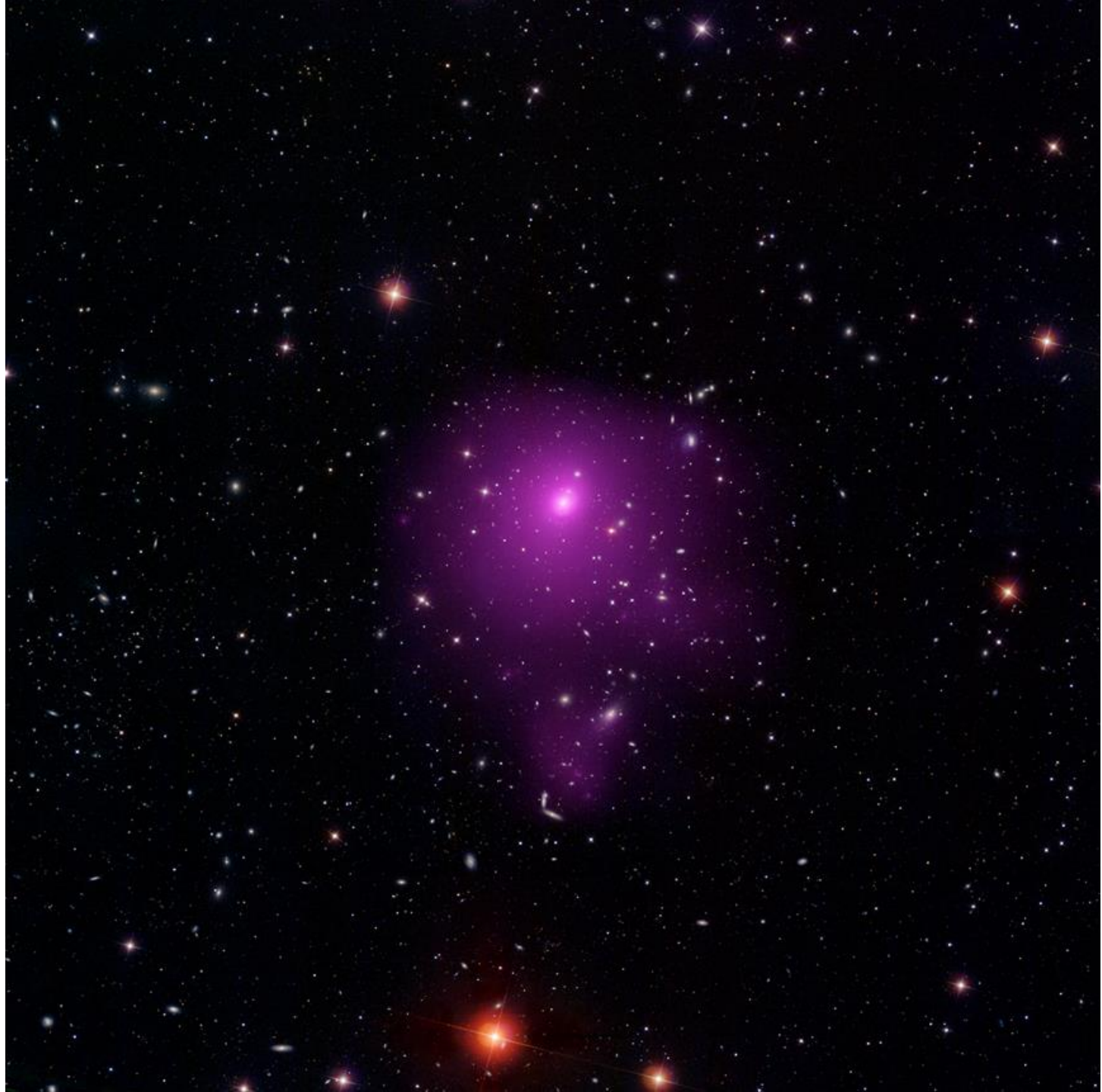
- Galaxia(s) Dominante(s) Central(es) (**CDGs**)
- *Cool Core* (**CC**, **WCC**, **NCC**)

⇒ Halo interno ($r < r_{500} \sim 0.95 h_{70}^{-1}$ Mpc)

- Subestructuras en **rayos-X**, frentes fríos y de choque, puntos calientes (*hot spots*)
- Halos y reliquias **radio**
- **Cavidades**



Abell 0085



SDSS + *Chandra*

Hot spots y frentes fríos

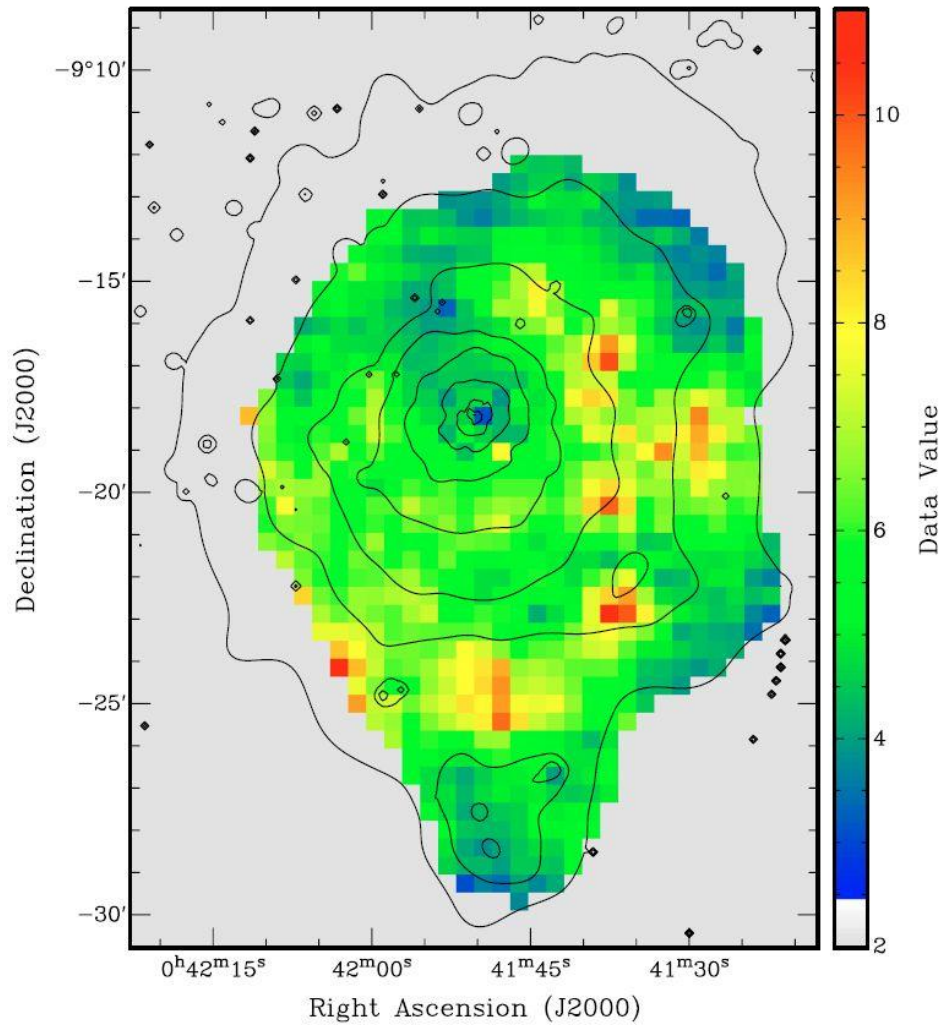
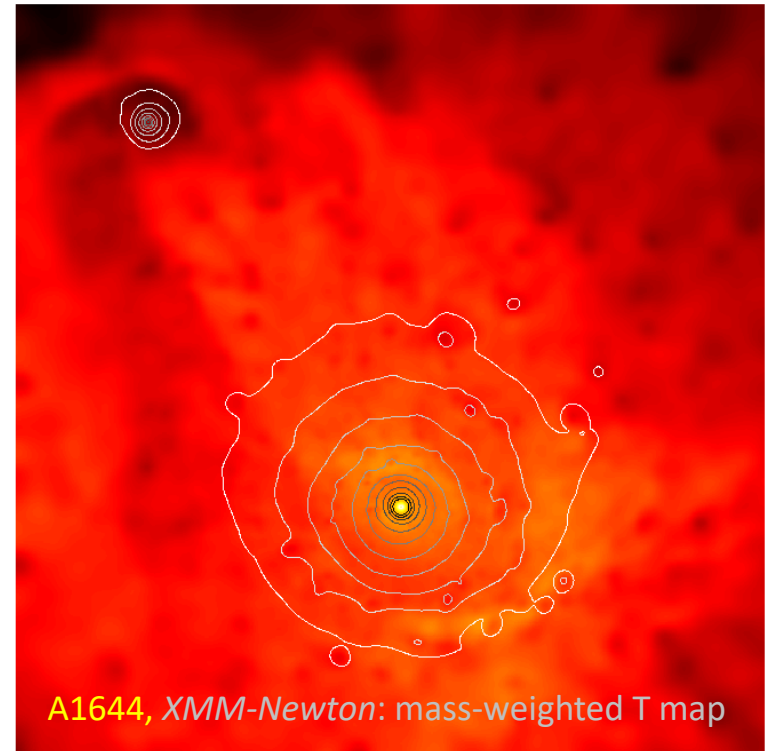


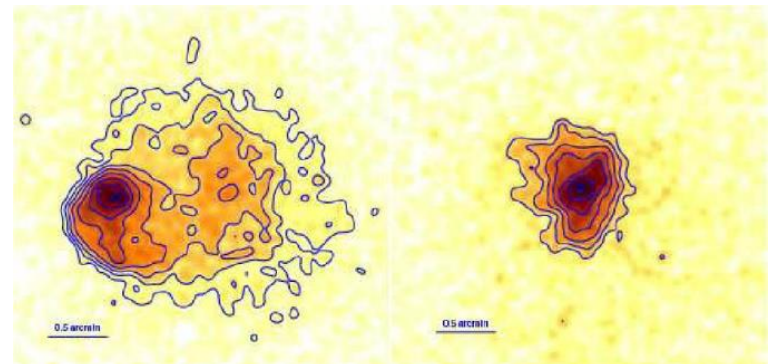
Fig. 3. Temperature map and XMM isocontours in the [0.5–8.0] keV band for Abell 85. The scale for the temperature is keV.

[Durret *et al.* (2005), A&A 432, 809]

[Reiprich *et al.* (2004), ApJ 608, 179]



A1644, XMM-Newton: mass-weighted T map

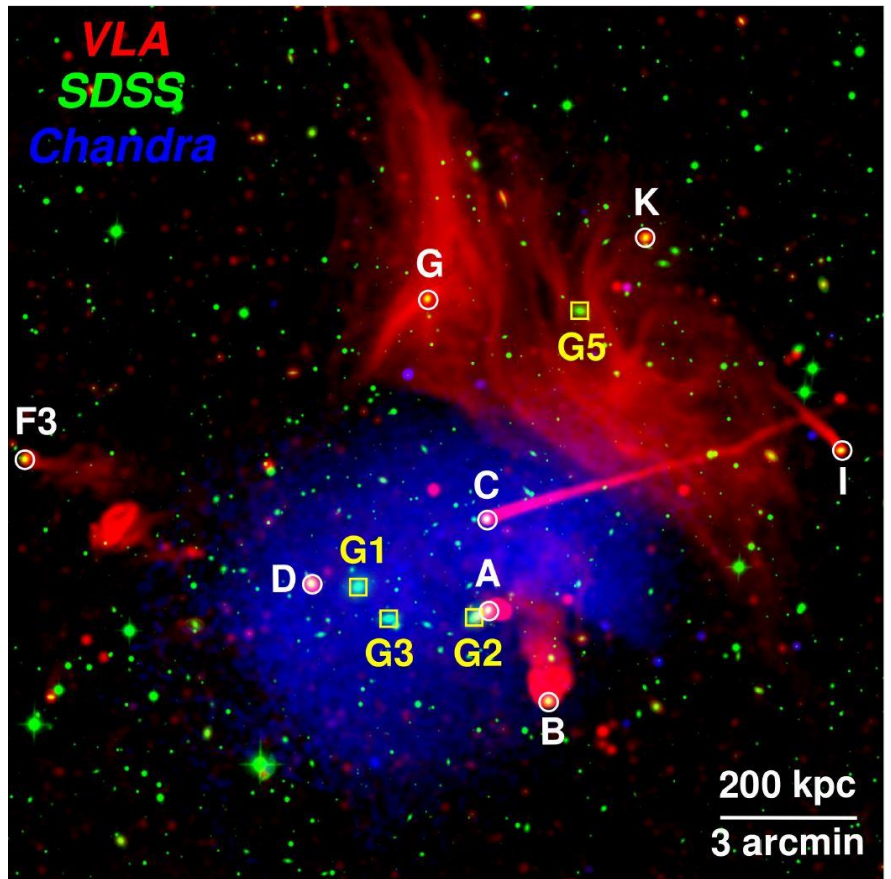
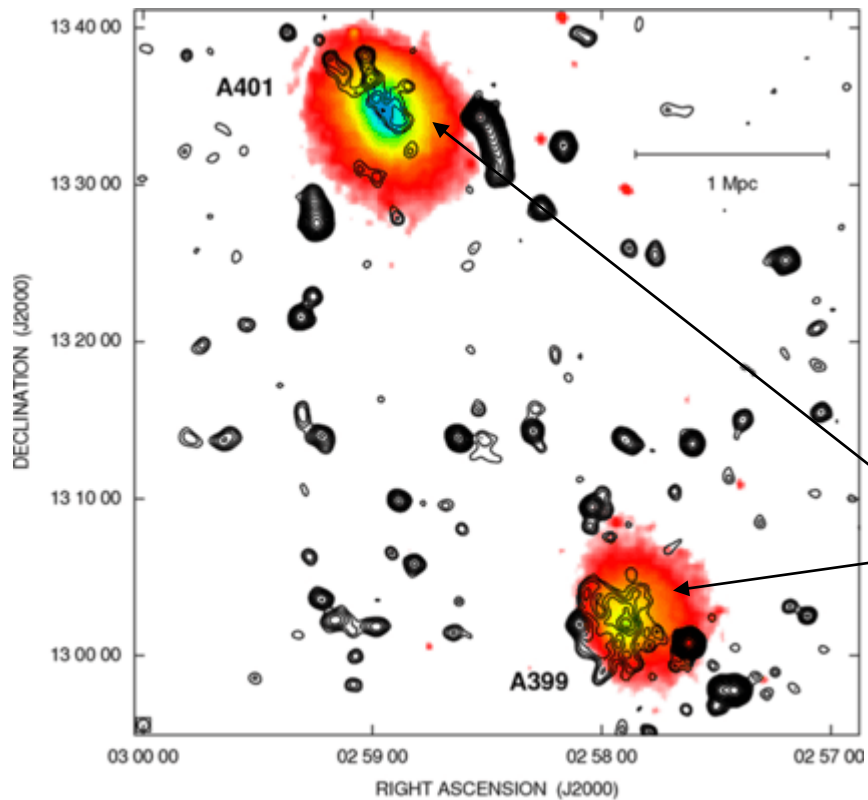


[Johnson *et al.* (2010), ApJ 710, 1776]

A2256

Halos e reliquias radio

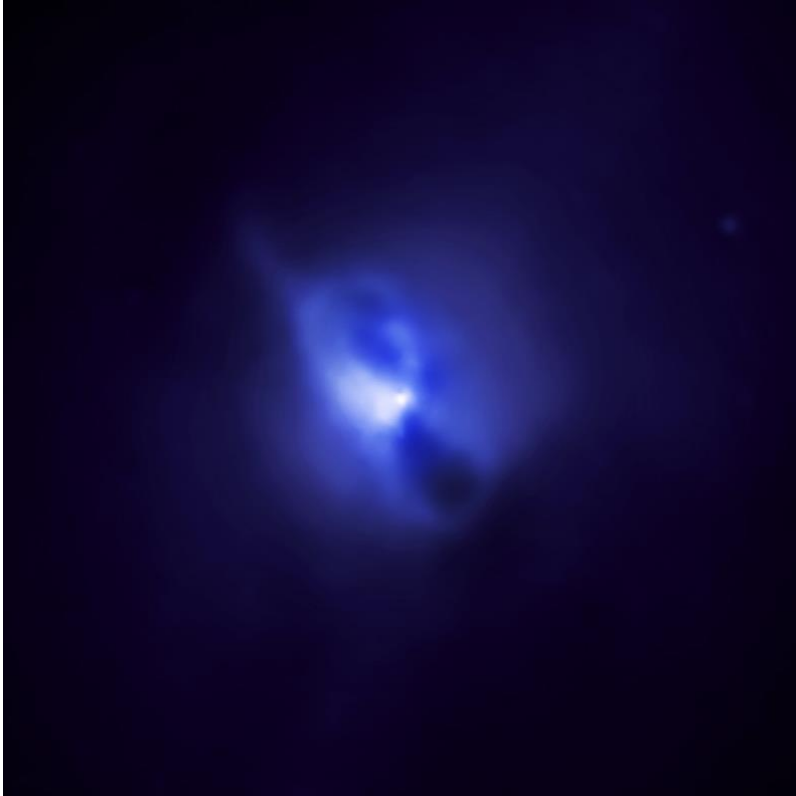
A399-A401



[Ge *et al.* (2020), MNRAS 497, 4704]

diffuse radio halos

[Murgia *et al.* (2010), A&A 509, A86]



Cúmulo *Hydra-A*:

azul: rayos-X (*Chandra*)

blanco: óptico (CFHT+DSS)

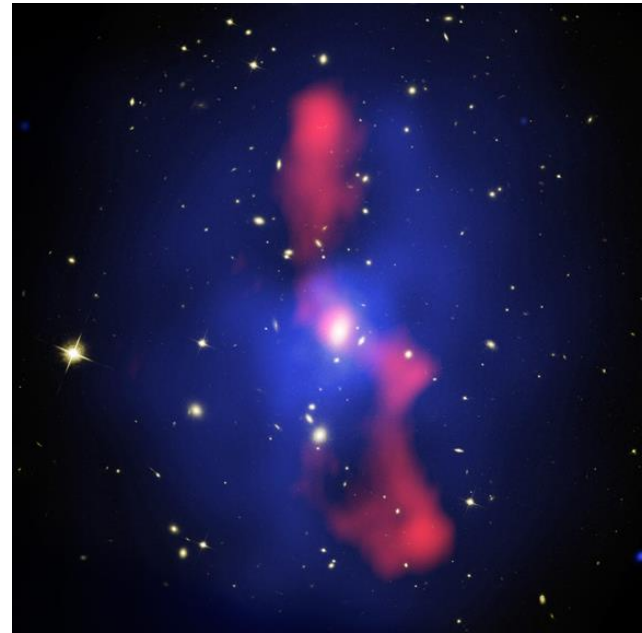
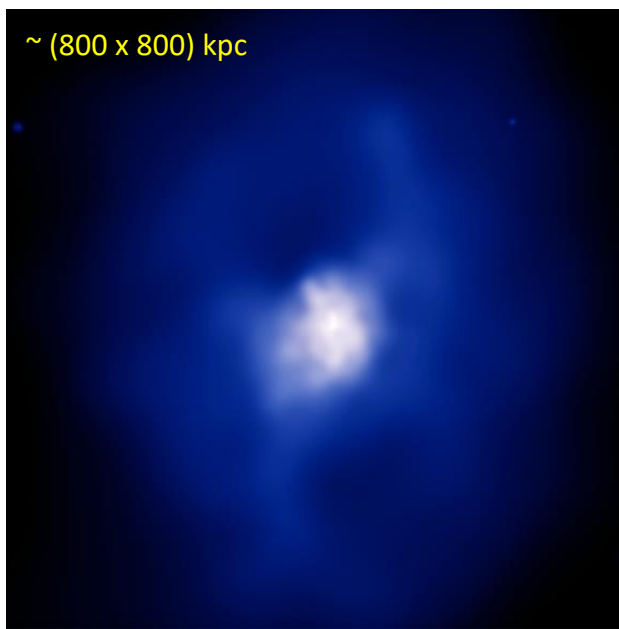
rojo: radio (VLA)

Cúmulo *MS0735.6+7421*:

azul: rayos-X (*Chandra*)

blanco: óptico (HST-ACS)

rojo: radio (VLA 330MHz)

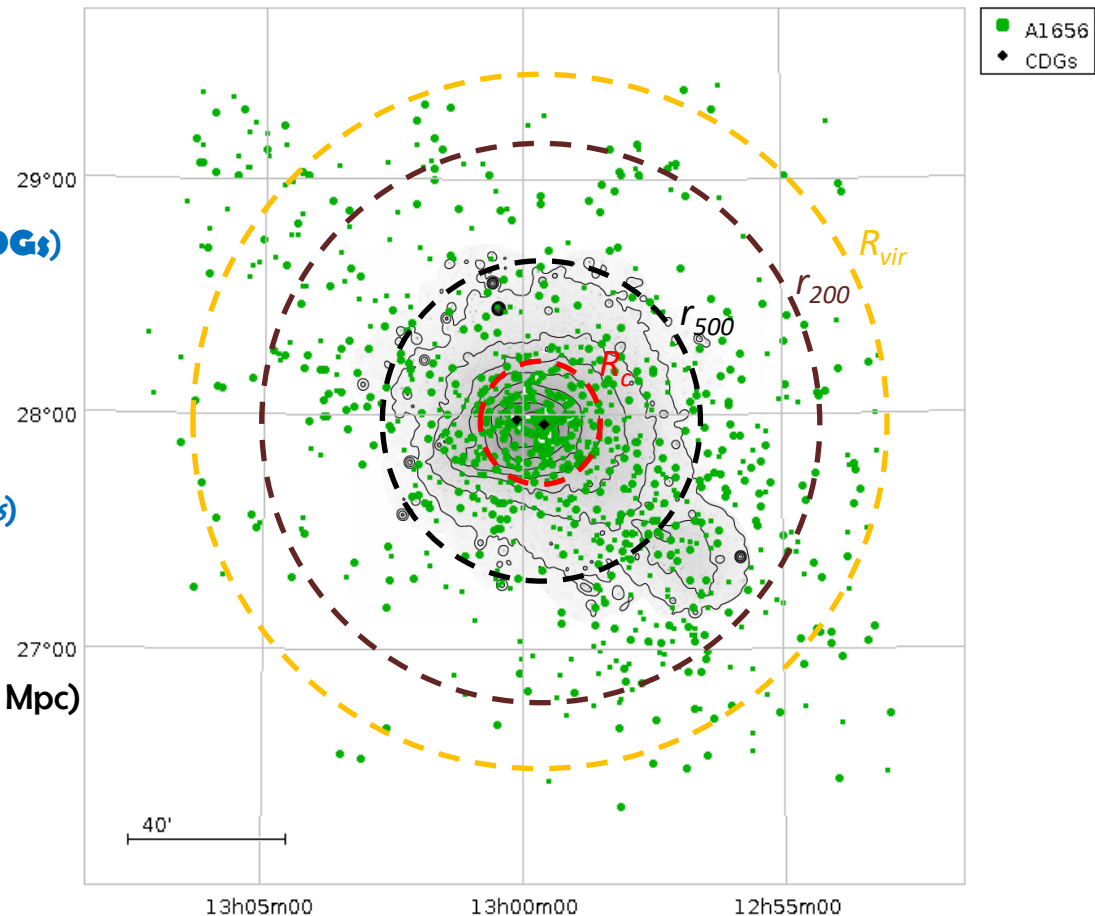


En la práctica, los sistemas estelares caminan hacia una estructura de un **core** (núcleo) pequeño y denso y una **halo** grande y poco denso.

ESTRUCTURA

Cúmulo de Galaxias típico

- ⇒ Core ($r < R_c \sim 0.28 h_{70}^{-1}$ Mpc)
 - Galaxia(s) Dominante(s) Central(es) (**CDGs**)
 - *Cool Core* (**CC**, **WCC**, **NCC**)
- ⇒ Halo interno ($r < r_{500} \sim 0.95 h_{70}^{-1}$ Mpc)
 - Subestructuras en **rayos-X**, frentes fríos y de choque, puntos calientes (*hot spots*)
 - Halos y reliquias **radio**
 - **Cavidades**
- ⇒ Halo externo ($r < R_{vir} \sim r_{100} \sim 1.3 r_{200} \sim 1.8 h_{70}^{-1}$ Mpc)
 - Subestructuras **ópticas**



Subestructuras en la distribución de galaxias

ROSAT (wavelets)

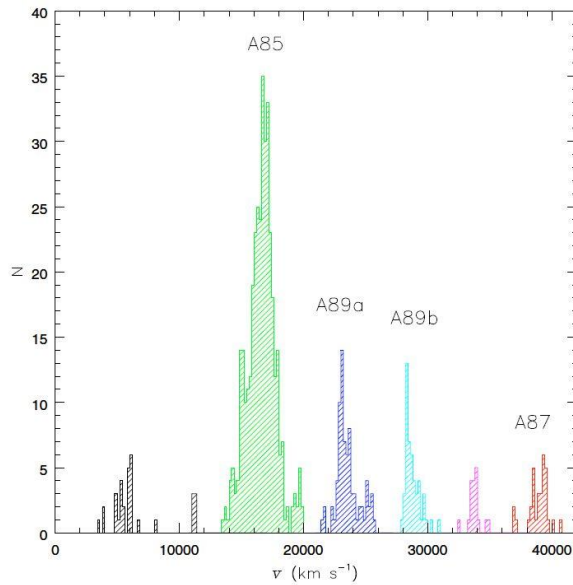
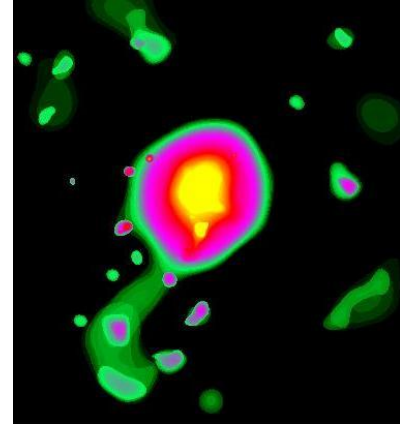


Fig. 1. Histogram showing the distribution of 574 velocities in the region of the A 85/87/89 complex. The most conspicuous concentrations are marked according to their cluster and/or group association.

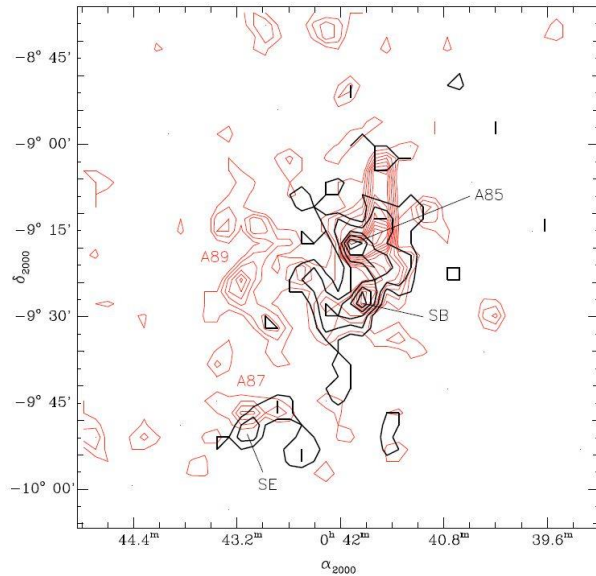
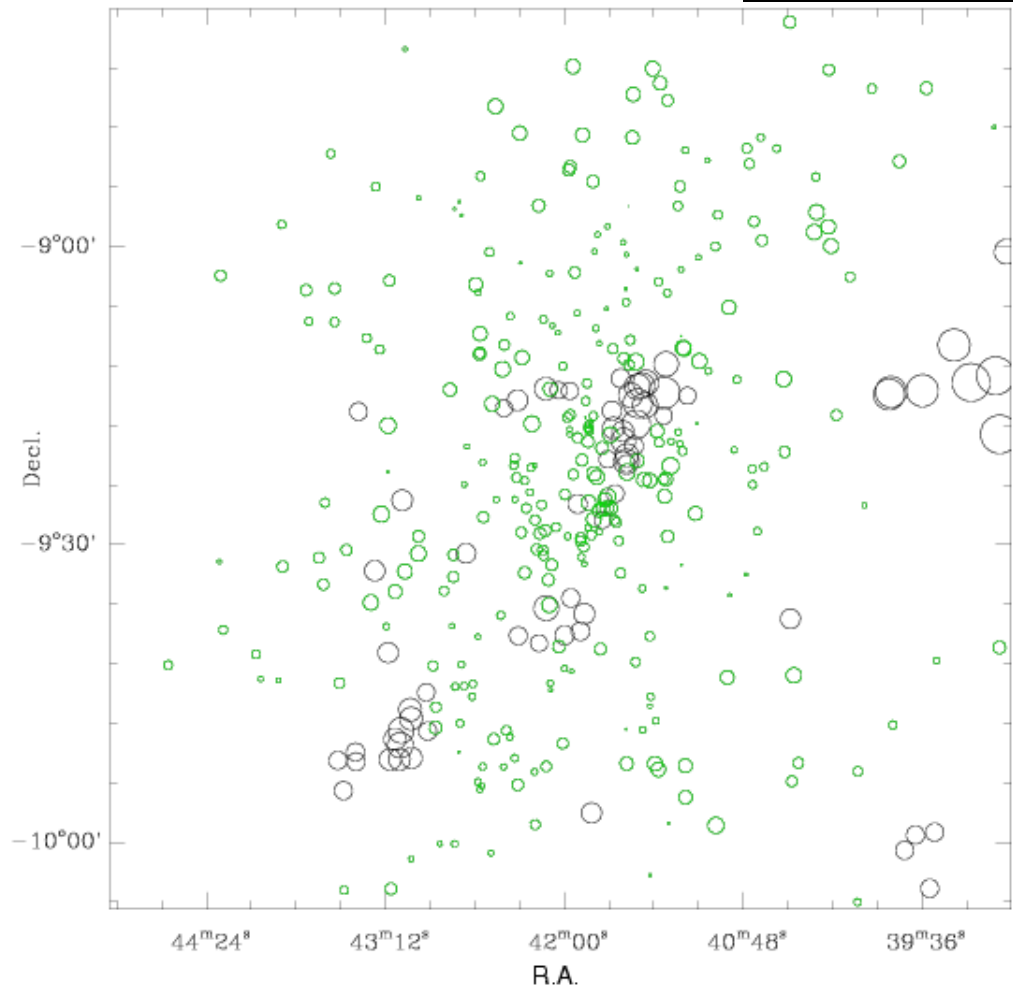
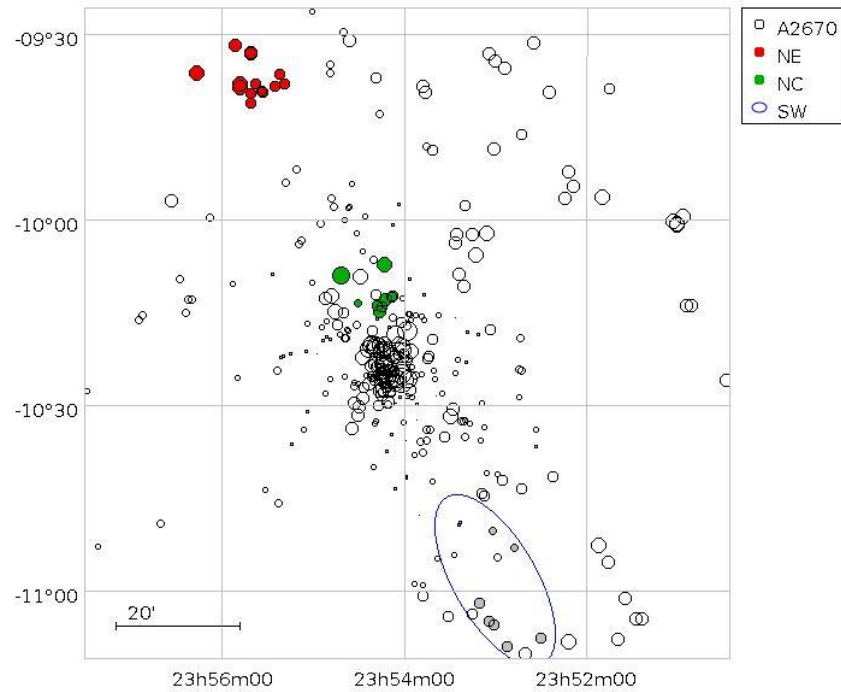
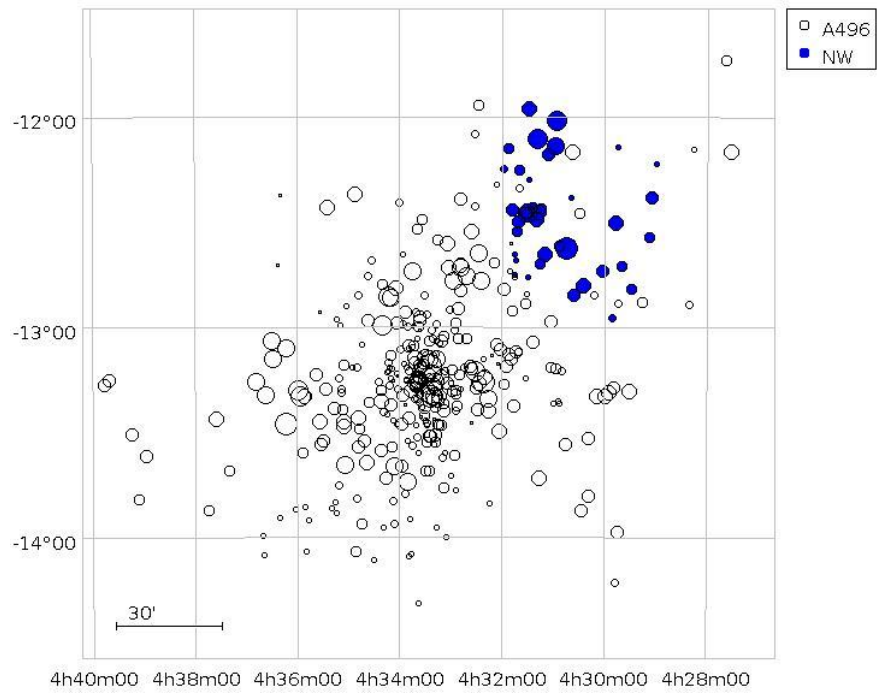
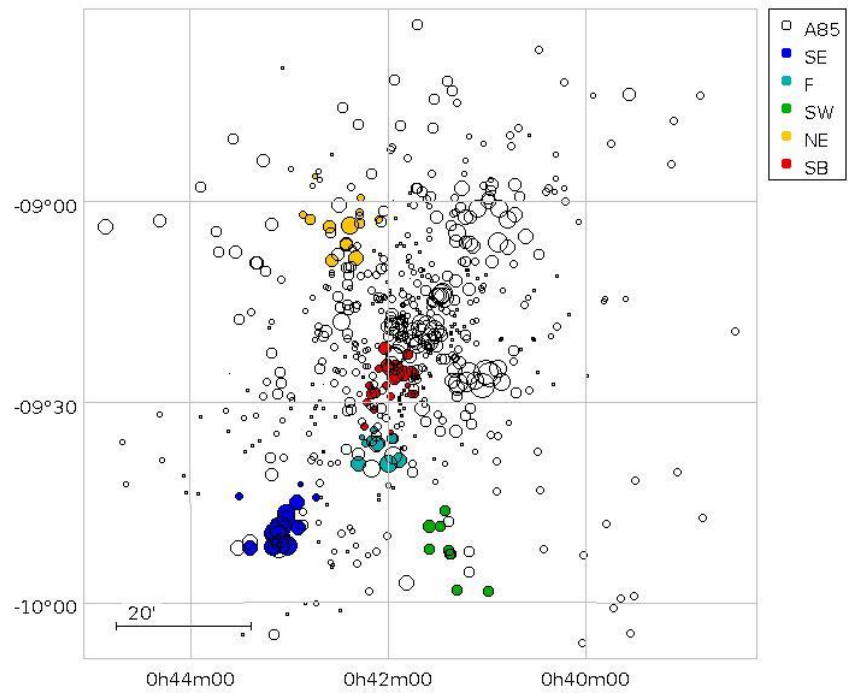


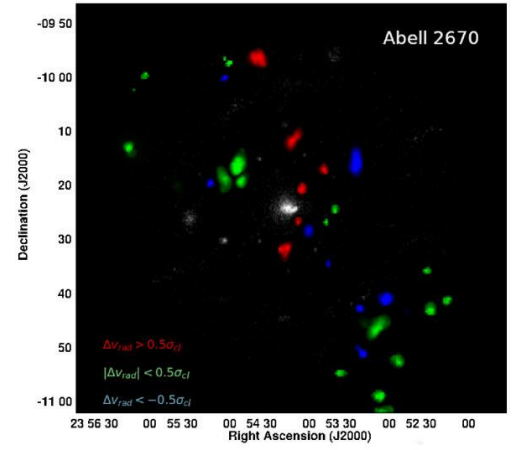
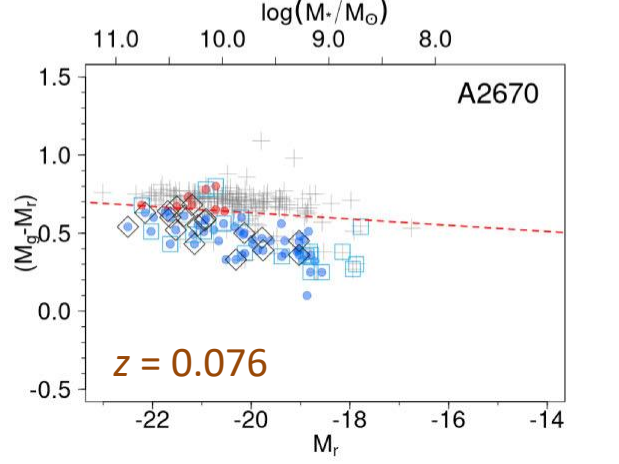
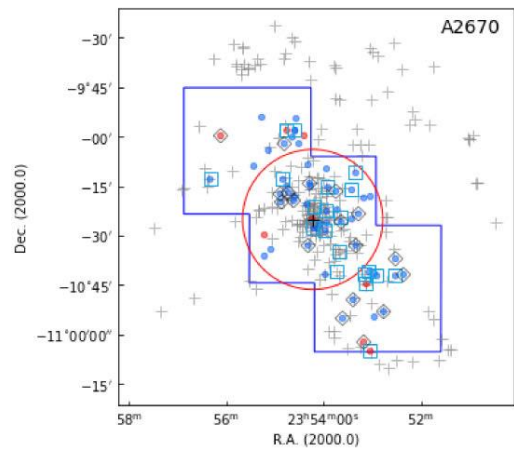
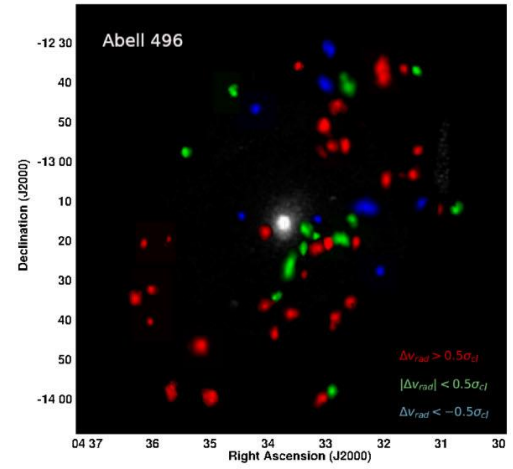
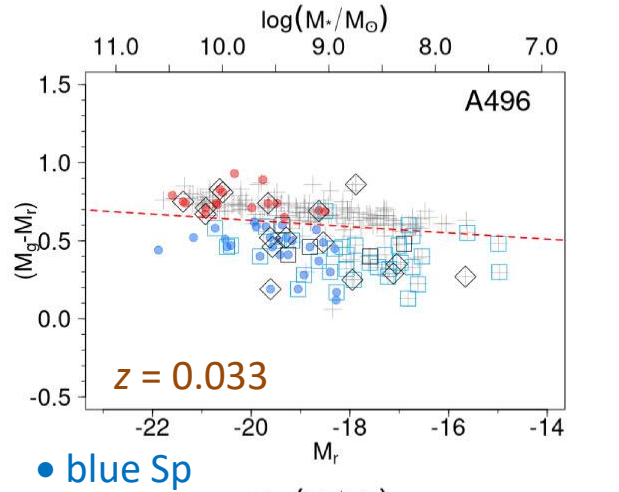
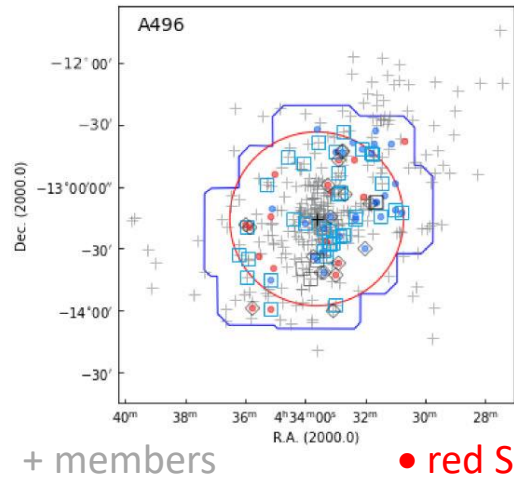
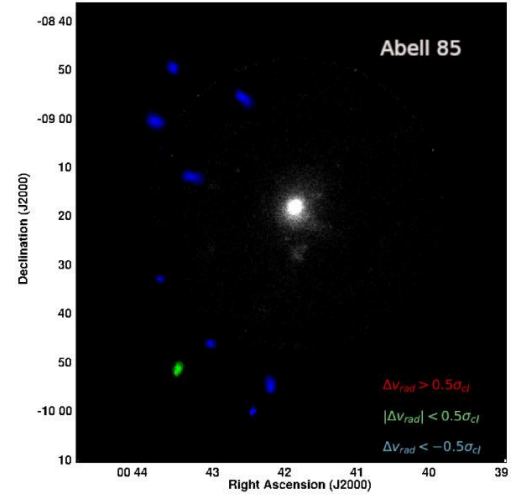
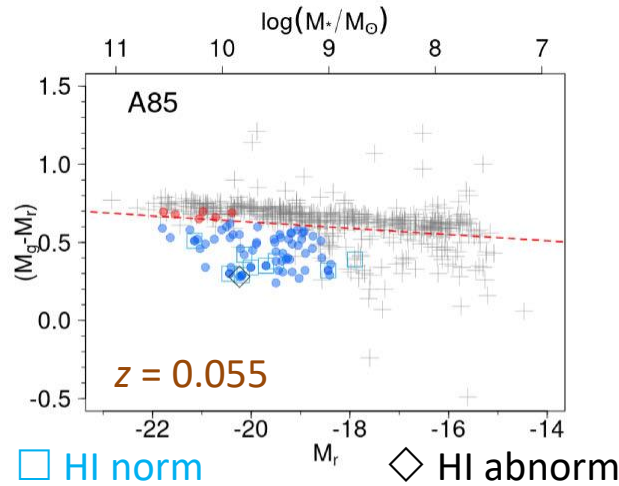
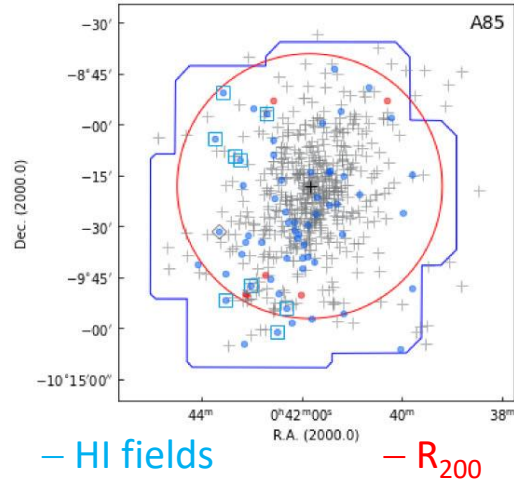
Fig. 3. Iso-density contours drawing the distribution of galaxies in the direction of A 85; red thin contours in the background correspond to all galaxies with magnitudes $b_j < 20.5$. Black thick contours indicate the distribution of the 367 members of A 85 (13 000–20 000 km s^{-1}). Main clusters and substructures of A 85 are indicated.



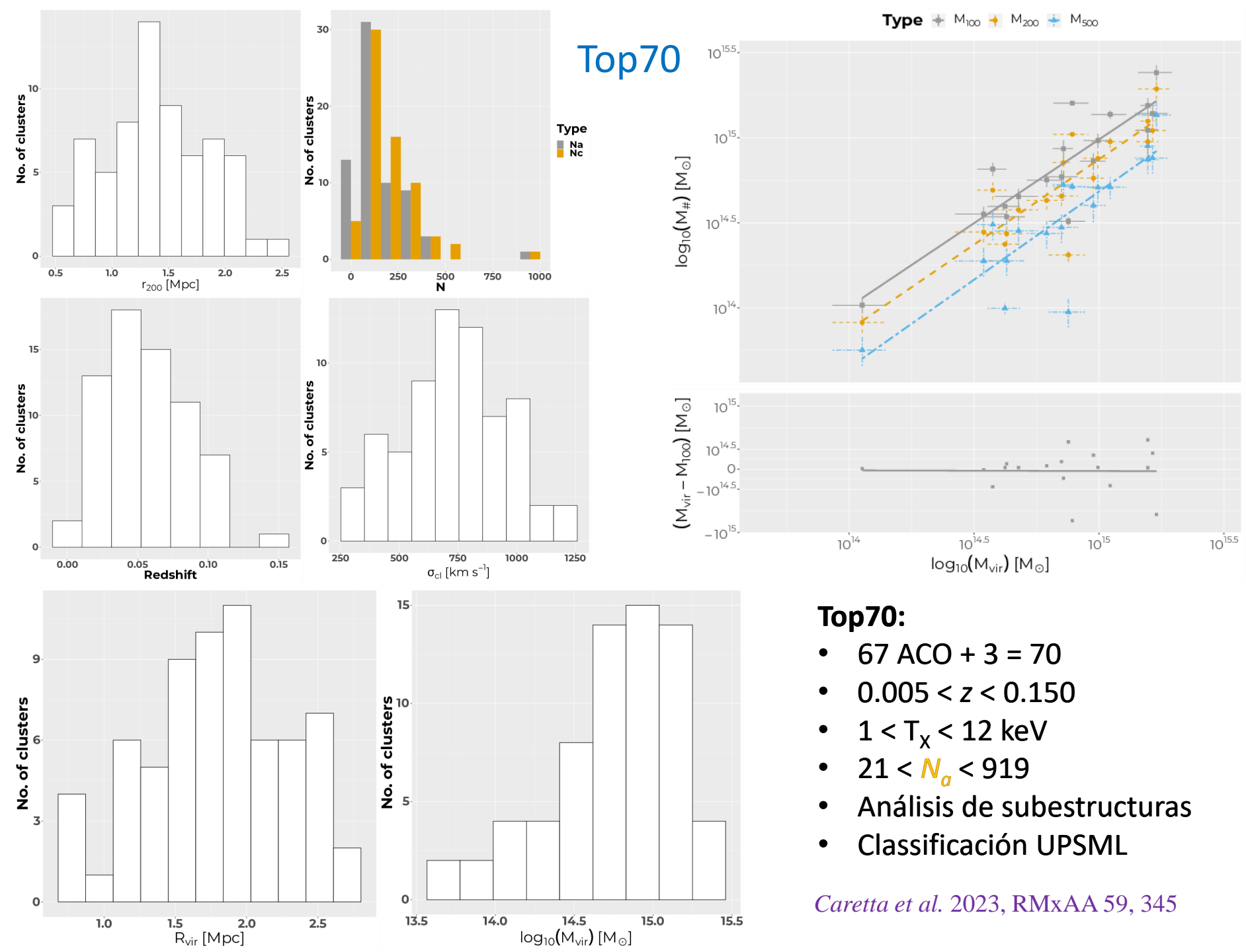
Bravo-Alfaro, Caretta et al. 2009, A&A 495, 379

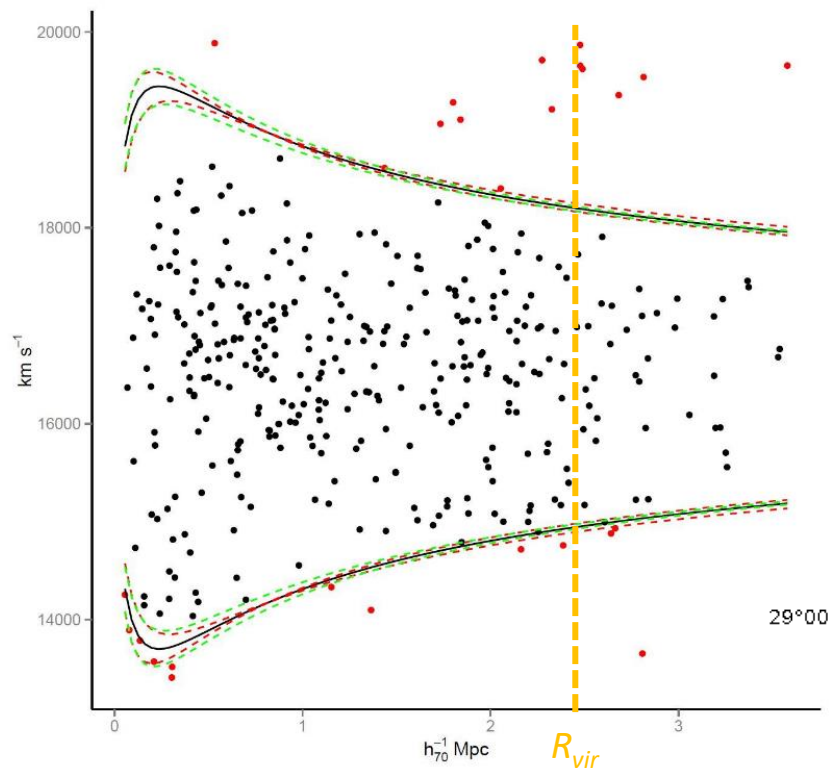
Caretta et al. 2008, MmSAI 79, 1201





Top70

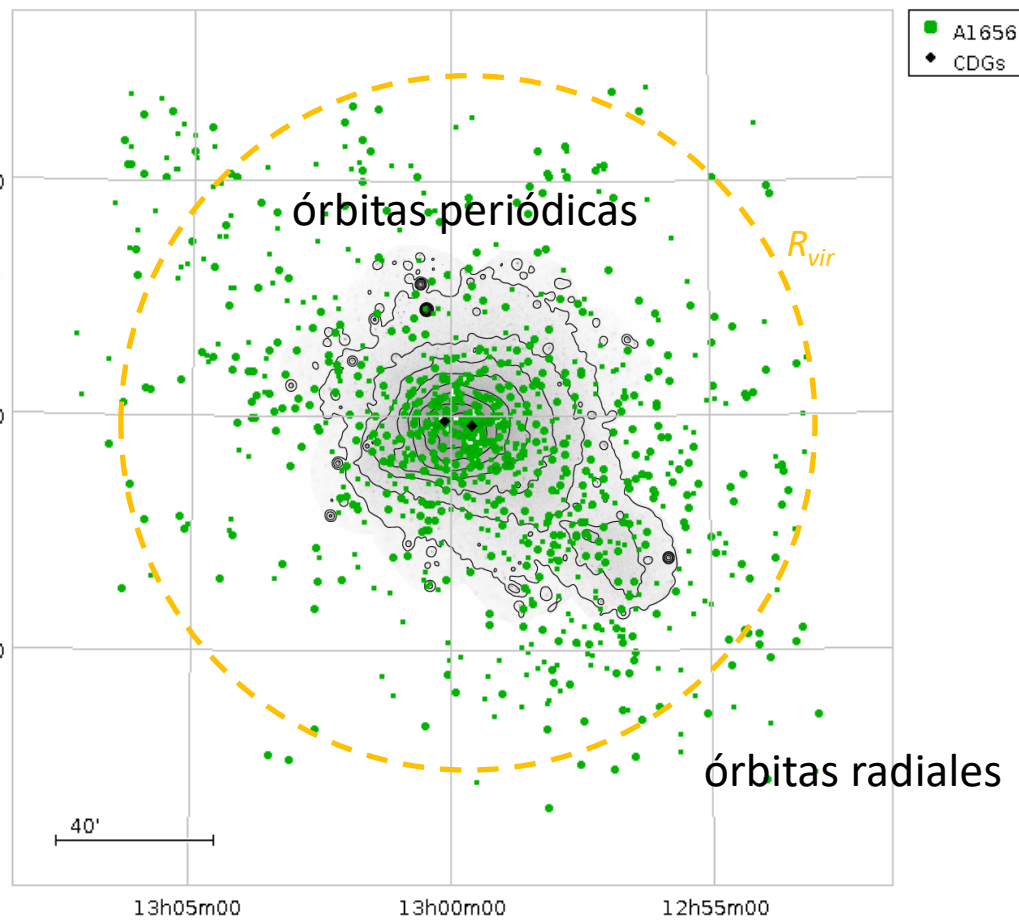




Región virial

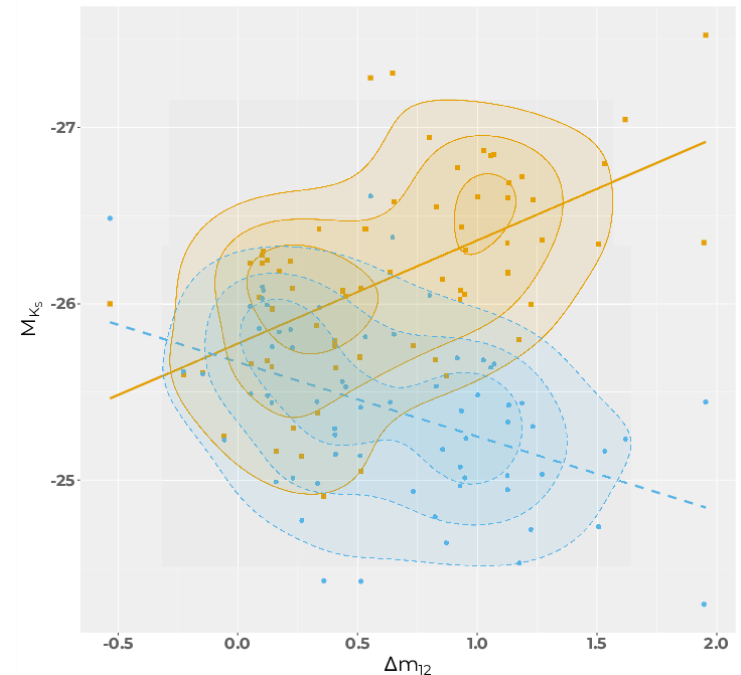
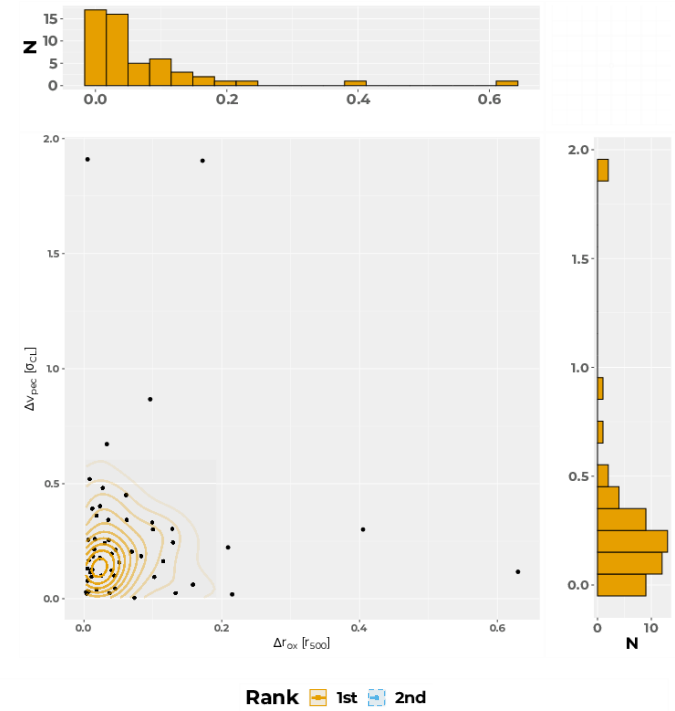
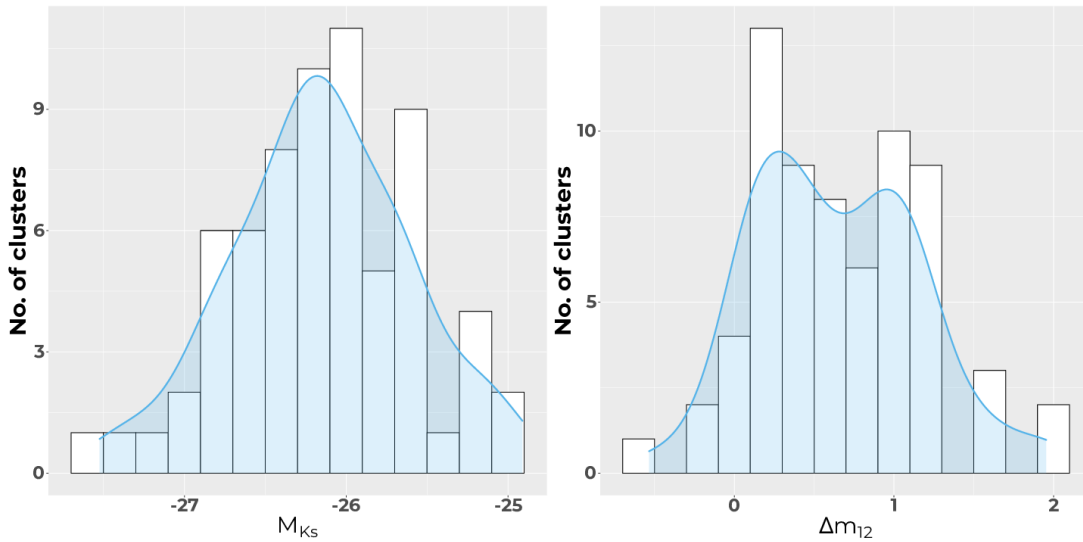
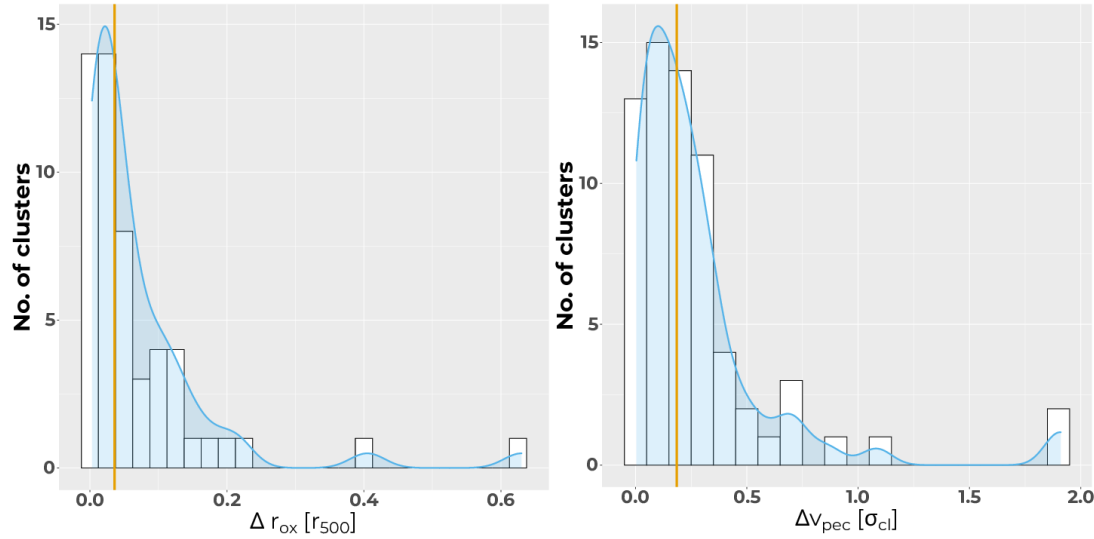
↑ diagrama del espacio de fase

distribución en el cielo

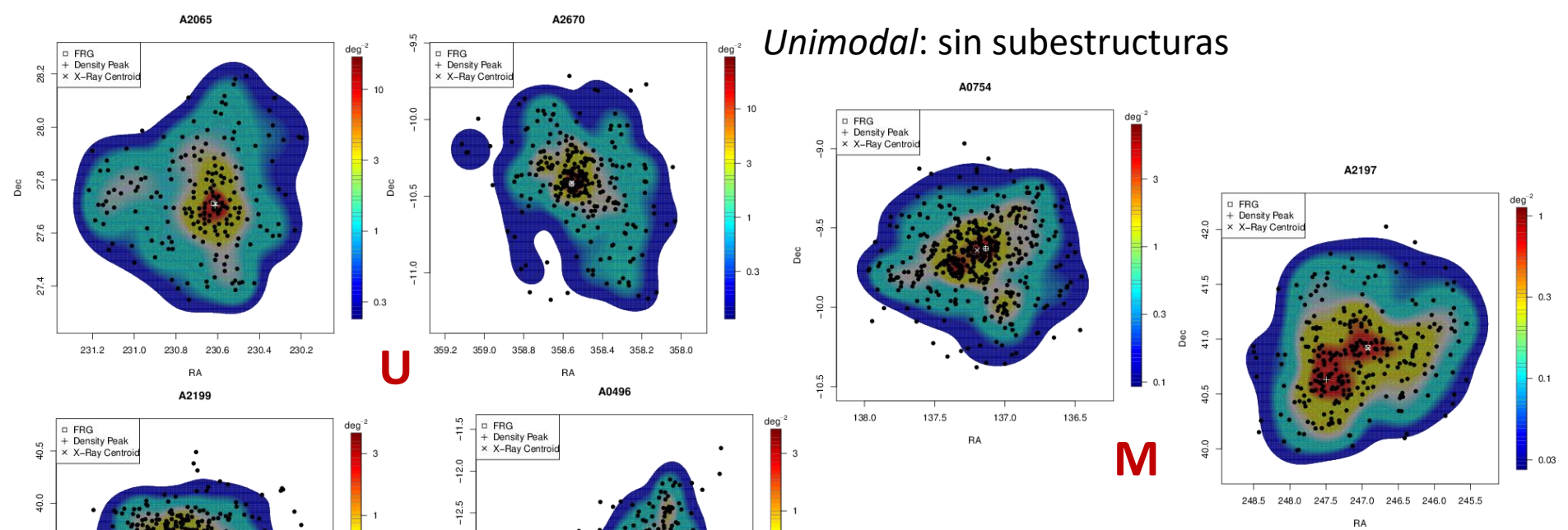


Indicadores de subestructuras:

distribución de galaxias (1D, 2D, 3D); emisión en rayos-X;
offset da CDG ($\Delta r_{\text{ox}} = r_{\text{ox}}/r_{500}$ y $\Delta v_{\text{pec}} = |v_{\text{pec}}|/\sigma_{\text{cl}}$); ...

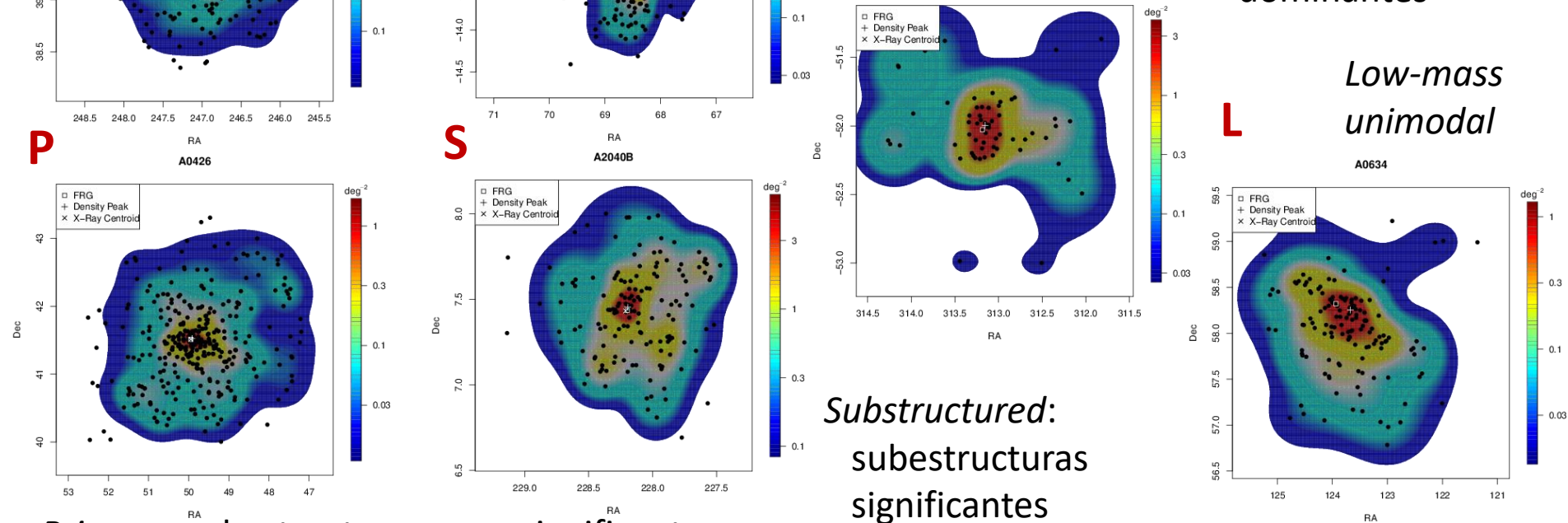


Unimodal: sin subestructuras



M

Multimodal: subestructuras dominantes



L

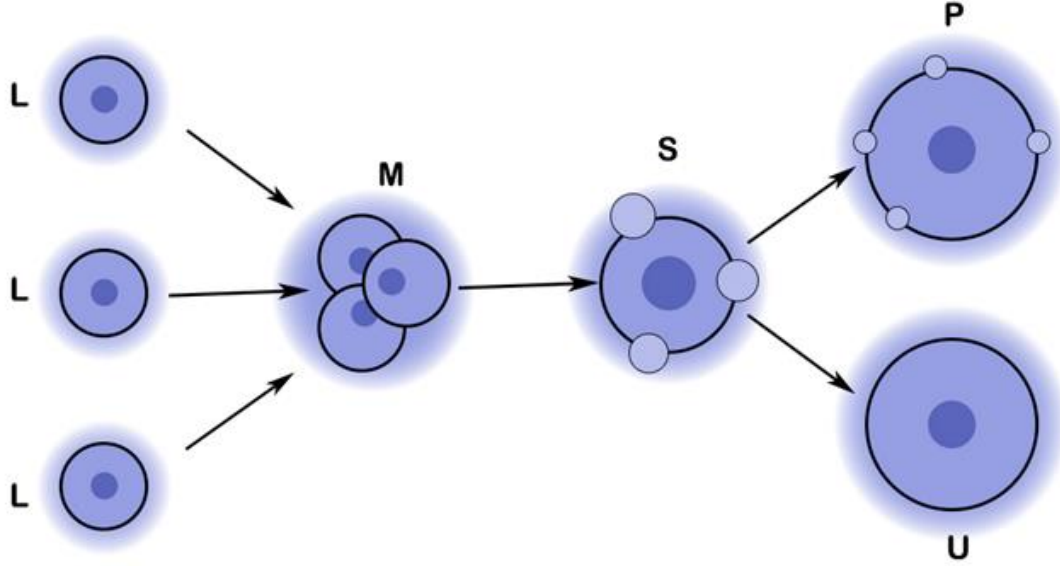
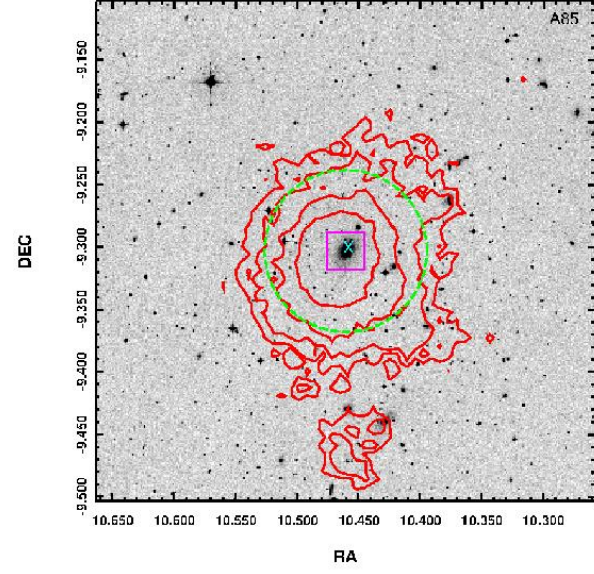
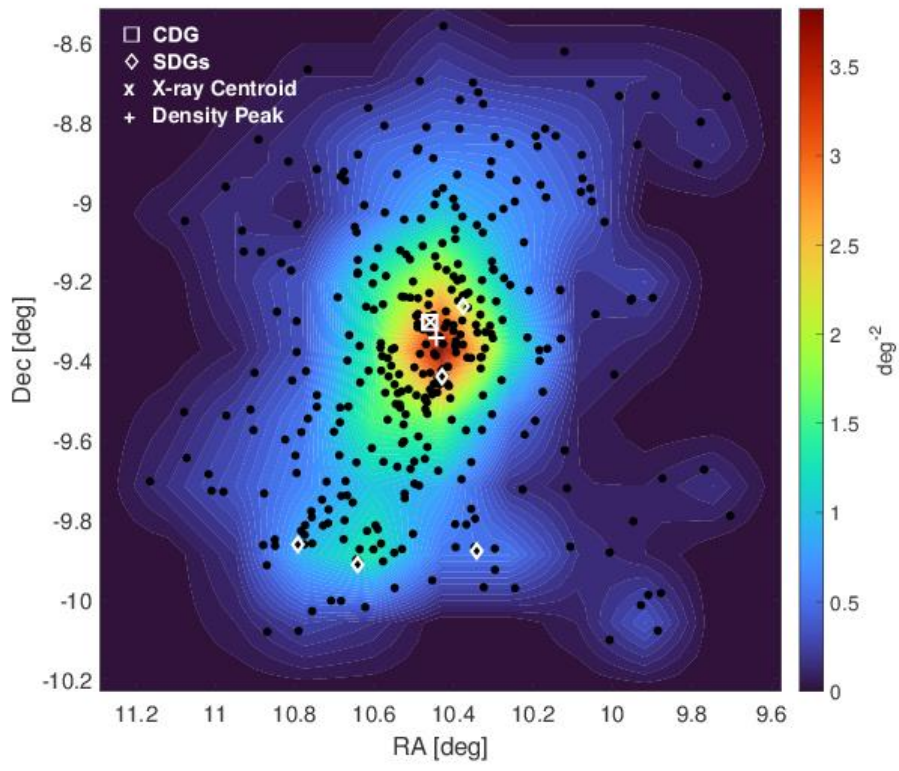
Low-mass unimodal

Substructured: subestructuras significantes

Primary: subestructuras poco significantes

P

S

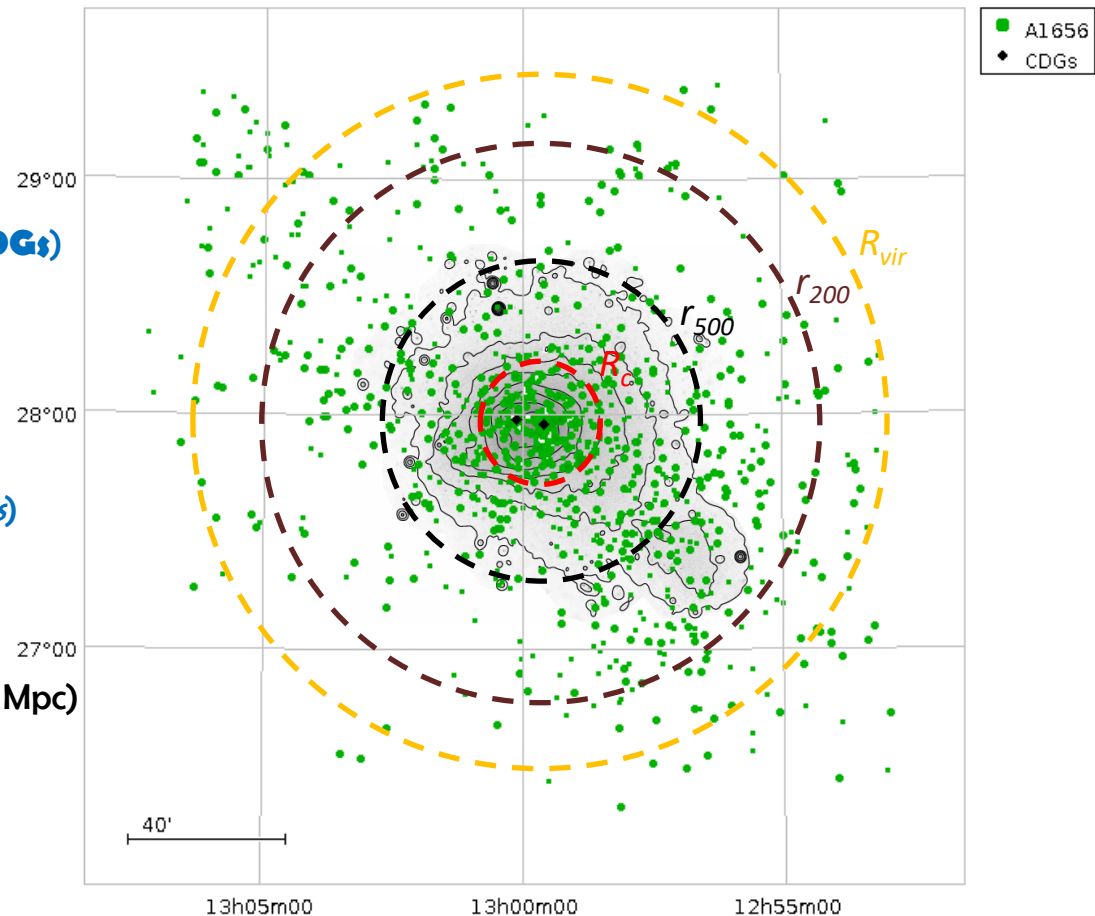


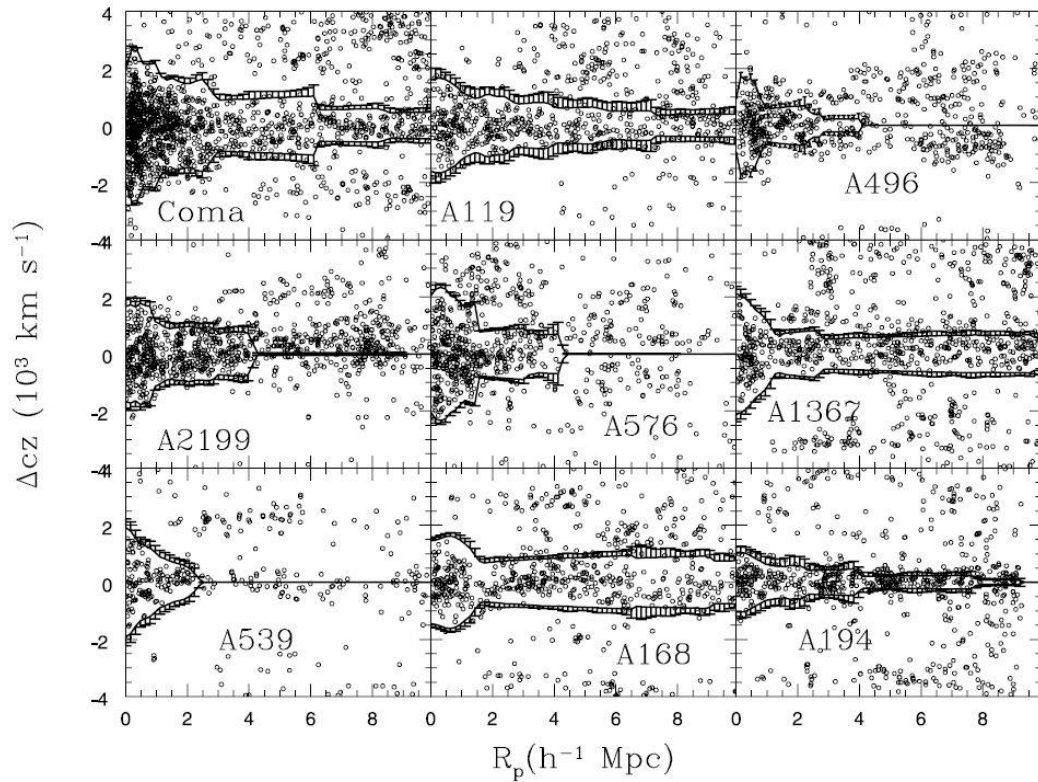
En la práctica, los sistemas estelares caminan hacia una estructura de un **core** (núcleo) pequeño y denso y una **halo** grande y poco denso.

ESTRUCTURA

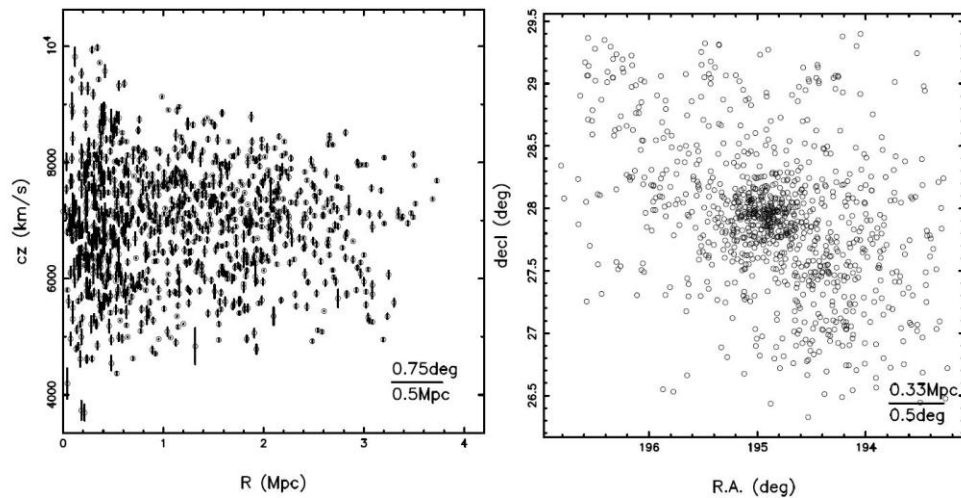
Cúmulo de Galaxias típico

- ⇒ Core ($r < R_c \sim 0.28 h_{70}^{-1}$ Mpc)
 - Galaxia(s) Dominante(s) Central(es) (**CDGs**)
 - *Cool Core* (**CC**, **WCC**, **NCC**)
- ⇒ Halo interno ($r < r_{500} \sim 0.95 h_{70}^{-1}$ Mpc)
 - Subestructuras en **rayos-X**, frentes fríos y de choque, puntos calientes (*hot spots*)
 - Halos y reliquias **radio**
 - **Cavidades**
- ⇒ Halo externo ($r < R_{vir} \sim r_{100} \sim 1.3 r_{200} \sim 1.8 h_{70}^{-1}$ Mpc)
 - Subestructuras **ópticas**
- ⇒ Región de acreción ($R_{vir} < r < R_{ta}$)
 - **caústicas**



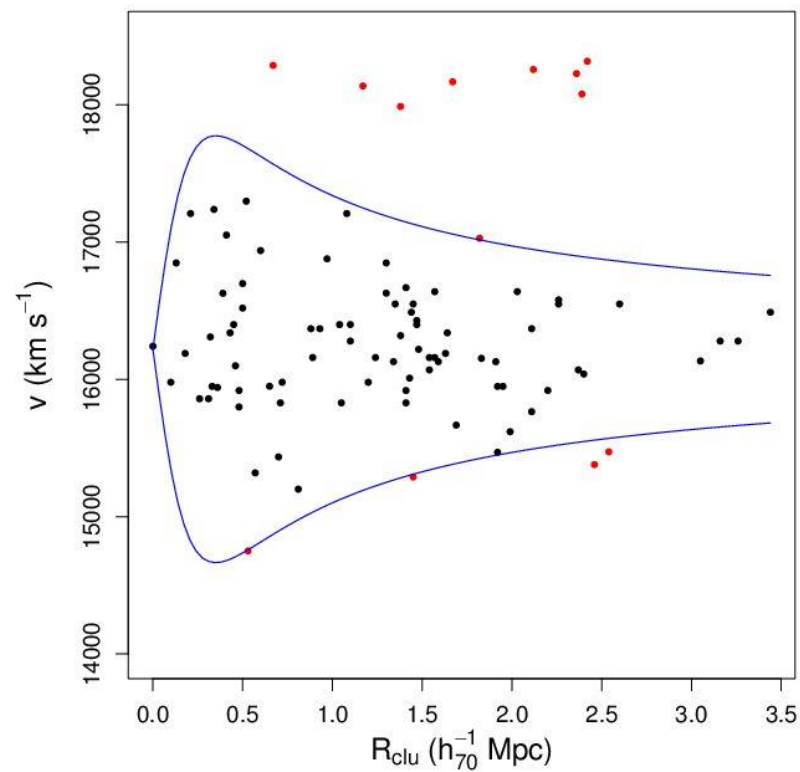


A&A 526, A105 (2011)



Zhang et al. 2011, A&A 526, A105

Rines et al. 2003, AJ 126, 2152



3) Escape:

La sucesión de encuentros puede dar suficiente energía a una estrella para que **escape** del sistema estelar. El caso extremo es que la pérdida de estrellas resulte en un estado final con tan solo 2 estrellas en orbitas Keplerianas. El **tiempo para la evaporación** del sistema es relativamente largo (véase Binney & Tremaine, sección 7.1):

$$t_{\text{evap}} = t_{\text{relax}}/\gamma \simeq 140 t_{\text{relax}}.$$

Ambarzumian (1938), *Ann. Leningrad State Univ.*, 22
Spitzer (1940), MNRAS 100, 396

4) Encuentros inelásticos:

Aunque la aproximación de estrellas por **masas puntuales** sea razonable en la mayoría de las situaciones, pueden ocurrir encuentros en que las estrellas pasan tan cerca que provocan **poderosos efectos de marea** o hasta **colisionen físicamente**. La disipación de energía en esos encuentros reduce la energía cinética total del par y pueden generar la formación de **sistema binarios** o hasta la **fusión** de las dos estrellas (produciendo una estrella masiva, consecuentemente de vida corta, aun en un sistema viejo de estrellas).

5) Formación de binarias por encuentro triplos:

Un encuentro aislado de dos estrellas no permite la formación de un **sistema binario** porque su movimiento relativo es siempre a lo largo de una **hipérbole**. Sin embargo, un encuentro involucrando **3 estrellas** puede dejar dos de las participantes en una órbita Kepleriana ligada. El tiempo necesario para que una estrella se convierta en parte de un sistema binario a través de un encuentro triple es:

$$t_3 \approx \frac{v^9}{n^2 G^5 m^5}.$$

Goodman & Hut (1993), ApJ 403, 271

(véase Binney & Tremaine, sección 7.1).

Esas (evaporación, encuentros triplos y colisiones inelásticas) no son la forma principal de formar sistemas binarios: en realidad la mayoría de los sistemas binarios son **primordiales**, es decir, ya se formaron así en pares o dentro de sus cúmulos de estrellas.

Otro punto importante es que la **energía de ligación de un sistema binario** es, en promedio, mayor que la energía cinética de una estrella típica de un cúmulo de estrellas, p. ej. Así, esas binarias pueden transferir mas energía a otros miembros del sistema en encuentros que estrellas aisladas.