

Astronomía Extragaláctica

Cap. 9: Cúmulos de galaxias y estructura a gran escala

Profesor: Favio F. Faifer & Sergio A. Cellone

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas
Universidad Nacional de La Plata, Argentina

curso 2024

Cap. 9: Cúmulos de galaxias y estructura a gran escala

- 1 Grupos y cúmulos de galaxias
- 2 El Supercúmulo Local
- 3 Estructura a gran escala

Cap. 9: Cúmulos de galaxias y estructura a gran escala

- 1 Grupos y cúmulos de galaxias
- 2 El Supercúmulo Local
- 3 Estructura a gran escala

Cúmulos: estructuras más densas y ricas

- $\gtrsim 50$ galaxias luminosas ($\mathcal{L} \gtrsim \mathcal{L}^*$)
- dominado por E y S0
- alta dispersión de velocidades
($\sigma_r \sim 700 - 1200 \text{ km s}^{-1}$)

Grupos: estructuras (en general) menos densas y con pocas galaxias (ej.: Grupo Local)

- menor número de galaxias
- poblados mayormente por espirales e irregulares
- baja dispersión de velocidades
($\sigma_r \sim 100 - 500 \text{ km s}^{-1}$)

Cúmulos: estructuras más densas y ricas

- $\gtrsim 50$ galaxias luminosas ($\mathcal{L} \gtrsim \mathcal{L}^*$)
- dominado por E y S0
- alta dispersión de velocidades
($\sigma_r \sim 700 - 1200 \text{ km s}^{-1}$)

Grupos: estructuras (en general) menos densas y con pocas galaxias (ej.: Grupo Local)

- menor número de galaxias
- poblados mayormente por espirales e irregulares
- baja dispersión de velocidades
($\sigma_r \sim 100 - 500 \text{ km s}^{-1}$)

Cúmulos: estructuras más densas y ricas

- $\gtrsim 50$ galaxias luminosas ($\mathcal{L} \gtrsim \mathcal{L}^*$)
- dominado por E y S0
- alta dispersión de velocidades
($\sigma_r \sim 700 - 1200 \text{ km s}^{-1}$)

Grupos: estructuras (en general) menos densas y con pocas galaxias (ej.: Grupo Local)

- menor número de galaxias
- poblados mayormente por espirales e irregulares
- baja dispersión de velocidades
($\sigma_r \sim 100 - 500 \text{ km s}^{-1}$)

Cúmulos: estructuras más densas y ricas

- $\gtrsim 50$ galaxias luminosas ($\mathcal{L} \gtrsim \mathcal{L}^*$)
- dominado por E y S0
- alta dispersión de velocidades
($\sigma_r \sim 700 - 1200 \text{ km s}^{-1}$)

Grupos: estructuras (en general) menos densas y con pocas galaxias (ej.: Grupo Local)

- menor número de galaxias
- poblados mayormente por espirales e irregulares
- baja dispersión de velocidades
($\sigma_r \sim 100 - 500 \text{ km s}^{-1}$)

Cúmulos: estructuras más densas y ricas

- $\gtrsim 50$ galaxias luminosas ($\mathcal{L} \gtrsim \mathcal{L}^*$)
- dominado por E y S0
- alta dispersión de velocidades
($\sigma_r \sim 700 - 1200 \text{ km s}^{-1}$)

Grupos: estructuras (en general) menos densas y con pocas galaxias (ej.: Grupo Local)

- menor número de galaxias
- poblados mayormente por espirales e irregulares
- baja dispersión de velocidades
($\sigma_r \sim 100 - 500 \text{ km s}^{-1}$)

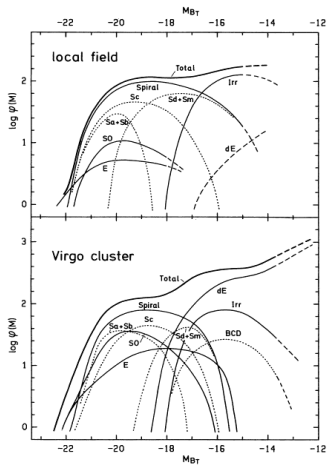
Cúmulos: estructuras más densas y ricas

- $\gtrsim 50$ galaxias luminosas ($\mathcal{L} \gtrsim \mathcal{L}^*$)
- dominado por E y S0
- alta dispersión de velocidades
($\sigma_r \sim 700 - 1200 \text{ km s}^{-1}$)

Grupos: estructuras (en general) menos densas y con pocas galaxias (ej.: Grupo Local)

- menor número de galaxias
- poblados mayormente por espirales e irregulares
- baja dispersión de velocidades
($\sigma_r \sim 100 - 500 \text{ km s}^{-1}$)

Funciones de luminosidad en grupos y cúmulos (Virgo)



Interacciones

Gas en grupos y cúmulos

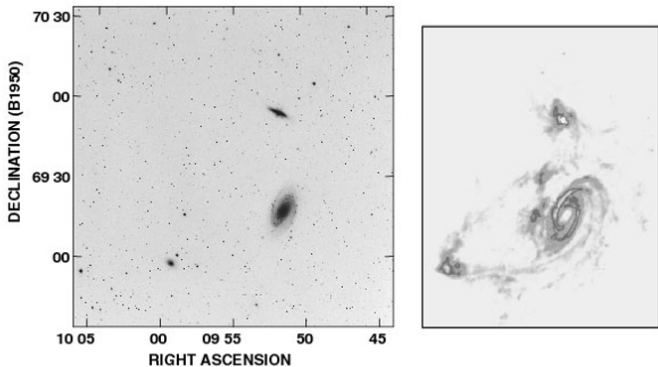
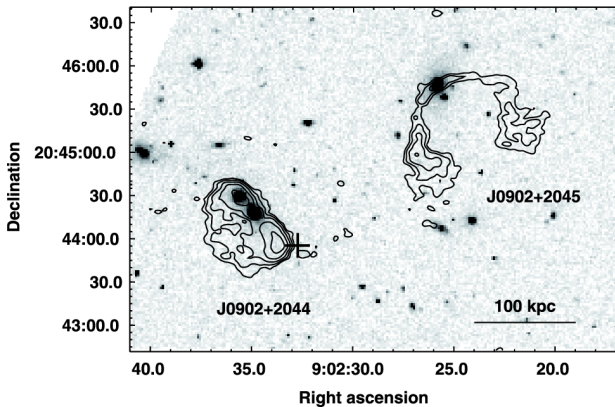


Fig 7.2 (M. Yun) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Interacciones

Gas en grupos y cúmulos



Galaxias jellyfish

Gas en cúmulos



Creditos: NASA, ESA, CXC.

$$\frac{Gm^2}{r_s} \geq \frac{mV^2}{2} \rightarrow r \leq r_s \equiv \frac{2Gm}{V^2}$$

Poniendo en esta ecuación los valores típicos de la zona solar: $V \sim 30$ km/s, $m = 0.5M_{\odot}$, se obtiene $r_s \sim 1$ UA.

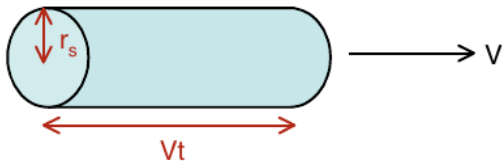


Figura tomada de George Djorgovsk.

Para que haya por lo menos un encuentro, deberá cumplirse que $n\pi r_s^2 Vt = 1$.
Despejamos t_s y calculamos para la vecindad solar:

$$t_s = \frac{1}{n\pi r_s^2 V} = \frac{V^3}{4\pi G^2 m^2 n} \approx 4 \times 10^{12} \text{ yr} \left(\frac{V}{10 \text{ km s}^{-1}} \right)^3 \left(\frac{m}{M_{\odot}} \right)^{-2} \left(\frac{n}{1 \text{ pc}^{-3}} \right)^{-1} \sim 10^{15}$$

Interacciones

Aproximación impulsiva y fricción dinámica

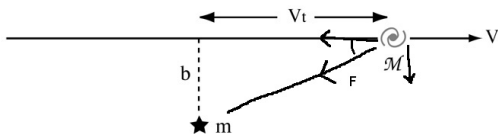


Fig 7.4 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

$$F_{\perp} = F \sin \theta = F \frac{b}{\sqrt{b^2 + v^2 t^2}} = \frac{GmM}{(b^2 + v^2 t^2)} \frac{b}{\sqrt{b^2 + v^2 t^2}} = \frac{GmM b}{(b^2 + v^2 t^2)^{3/2}}$$

$$\rightarrow F_{\perp} = M \frac{dv_{\perp}}{dt}.$$

$$\Delta v_{\perp} = \frac{1}{M} \int_{-\infty}^{\infty} F_{\perp}(t) dt$$

que usando

$$\int \frac{dx}{(a^2 + x^2)^{\frac{3}{2}}} = \frac{x}{a^2 \sqrt{a^2 + x^2}}$$

permite obtener

$$\Delta v_{\perp} = \frac{2 G m}{b v}. \quad (1)$$

La trayectoria de M se curva un ángulo:

$$\alpha = \frac{\Delta v_{\perp}}{v} = \frac{2 G m}{b v^2}.$$

Considerando conservación de la cantidad de movimiento ($m\Delta v_{\perp}^* = -\Delta v_{\perp} M$), y la ec. 1, la velocidad mutua es entonces:

$$\frac{2 G m}{b v} + \frac{2 G M}{b v} = \frac{2 G (m + M)}{b v} \ll v$$

$$b \gg \frac{2G(m + M)}{v^2}. \quad (2)$$

La energía cinética total en el movimiento perpendicular es:

$$\Delta \mathcal{T}_{\perp} = \frac{\mathcal{M}}{2} \Delta v_{\perp}^2 + \frac{m}{2} \Delta v_{\perp}^{*2} = \frac{\mathcal{M}}{2} \left(\frac{2Gm}{bv} \right)^2 + \frac{m}{2} \left(\frac{2G\mathcal{M}}{bv} \right)^2 = \frac{2G^2 m \mathcal{M} (m + \mathcal{M})}{b^2 v^2}. \quad (3)$$

Igualando ahora las energías cinéticas mucho antes y después del encuentro:

$$\frac{\mathcal{M}}{2} v^2 = \Delta \mathcal{T}_{\perp} + \frac{\mathcal{M}}{2} (v + \Delta v_{\parallel})^2 + \frac{m}{2} \left(\frac{\mathcal{M}}{m} \Delta v_{\parallel} \right)^2$$

Si $\Delta v_{\parallel} \ll v \Rightarrow$ despreciamos términos en $(\Delta v_{\parallel})^2$, y se obtiene que \mathcal{M} pierde velocidad:

$$-\Delta v_{\parallel} \approx \frac{\Delta \mathcal{T}_{\perp}}{\mathcal{M} v} = \frac{2G^2 m (m + \mathcal{M})}{b^2 v^3}. \quad (4)$$

$$t_{fric} \approx \frac{V}{|dV/dt|} \approx \frac{V^3}{4\pi G^2 M m n \ln \Lambda} \quad (5)$$

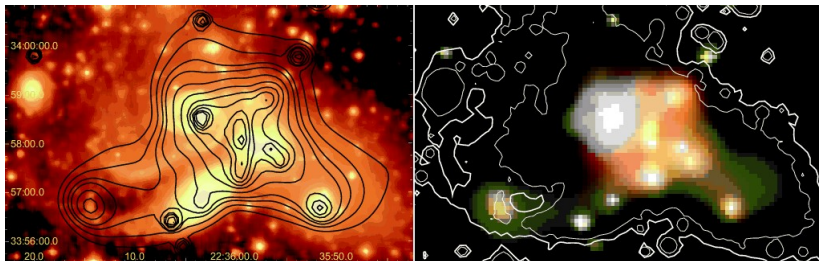
Grupos compactos

El Quinteto de Stephan



Grupos compactos

El Quinteto de Stephan



Fusiones

Las antenas



Fusiones

Los ratones



Fusiones en distintos grados de avance



Galaxy Collisions: Simulation vs. Observations

Images Credit: NASA, ESA; Visualization: Frank Summers (STScI); Simulation: Chris Mihos (CWRU) & Lars Hernquist (Harvard).

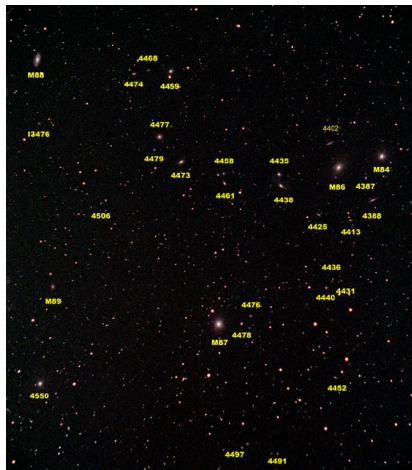
Cúmulos de galaxias

Cúmulo de Virgo



Cúmulos de galaxias

Cúmulo de Virgo



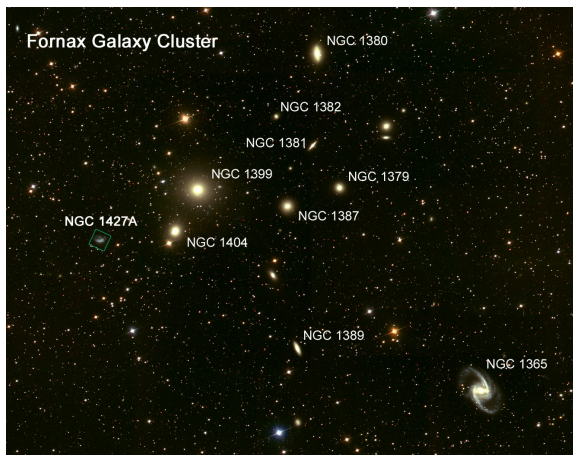
Cúmulos de galaxias

Cúmulo de Virgo: subgrupo M86 (y M84)



Cúmulos de galaxias

Cúmulo de Fornax



Cúmulos de galaxias

Cúmulo de Coma



Cúmulos de galaxias

Cúmulo de Coma



Cúmulos de galaxias

Cúmulo de Coma

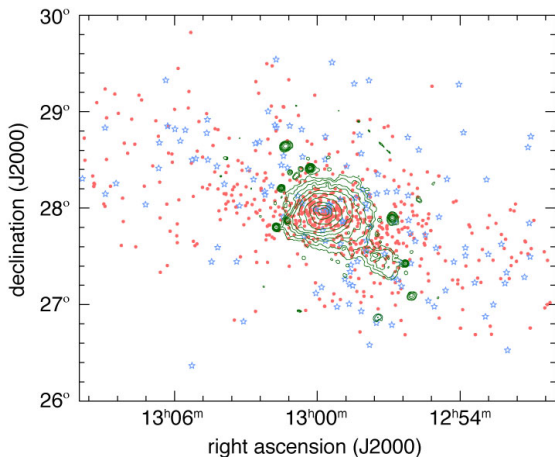


Fig 7.10 (M. van Haarlem) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Ej.: Coma tiene disp. de velocidades $\sigma_r \approx 1200 \text{ km s}^{-1}$ en su zona central, descendiendo a $\sigma_r \approx 700 \text{ km s}^{-1}$ para $R \gtrsim 1 h^{-1} \text{ Mpc}$.
Considerando una galaxia típica a $R \simeq 3 h^{-1} \text{ Mpc}$ del centro del cúmulo, el tiempo de cruce será:

$$t_{\text{cr}} = \left(\frac{4 h^{-1} \text{ Mpc}}{700 \text{ km s}^{-1}} + \frac{2 h^{-1} \text{ Mpc}}{1200 \text{ km s}^{-1}} \right) \frac{3.084 \times 10^{19} \text{ km Mpc}^{-1}}{3.156 \times 10^7 \text{ s/yr}} = 7.2 \times 10^9 h^{-1} \text{ años.}$$

Comparando con la edad del Universo $t_0 = 13.7 \times 10^9$ años, para $h = 0.71$:

$$t_{\text{cr}} \approx 5.1 \times 10^9 \text{ años} \sim 0.4 t_0.$$

Algunos cúmulos de galaxias pueden ser sistemas no relajados.

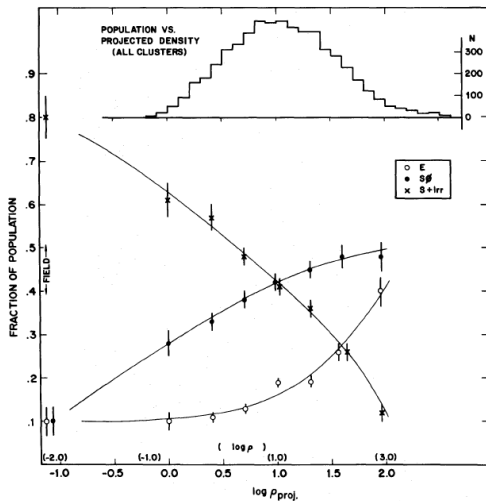
Los supercúmulos claramente no lo son.

El cúmulo de Virgo (Hubble & Humason 1931)

Nebulosas de todos los tipos excepto irregulares están representadas entre sus miembros, pero las elípticas y espirales tempranas son relativamente mucho más numerosas que entre las nebulosas de campo. La predominancia de tipos tempranos es una característica evidente de los cúmulos en general.

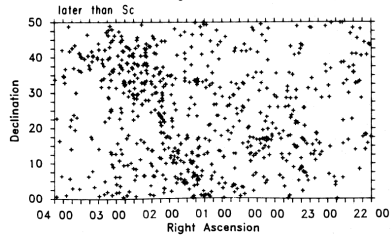
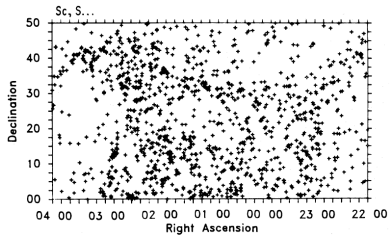
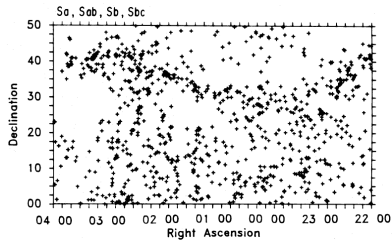
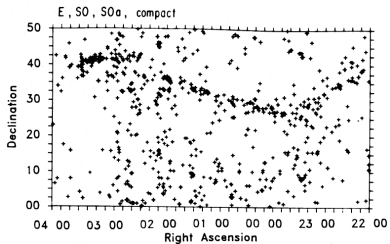
Relación morfología - densidad

Dressler 1980



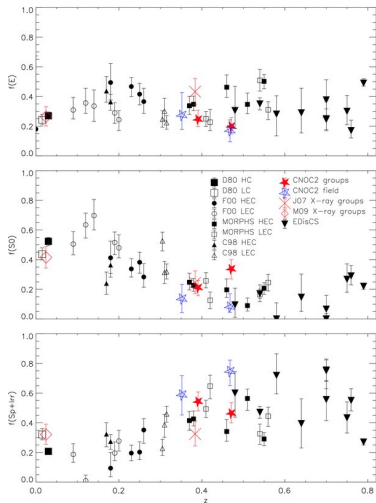
Relación morfología - densidad

Giovanelli et al. 1986



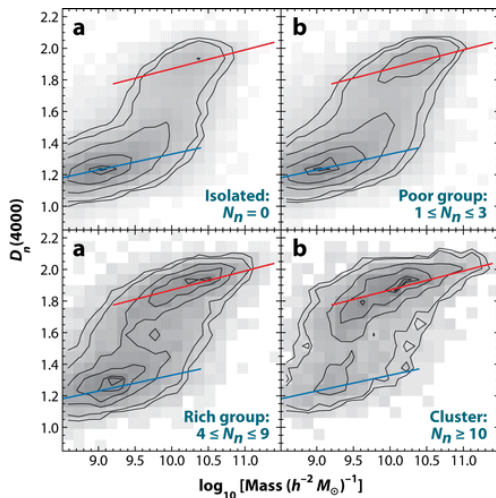
Relación morfología - densidad

Formación de galaxias S0



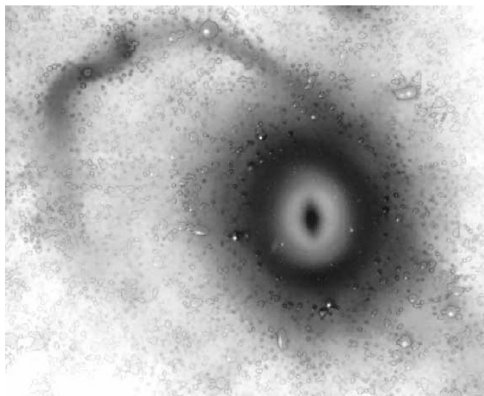
Relación morfología - densidad

Cuantificación con $D(4000)$



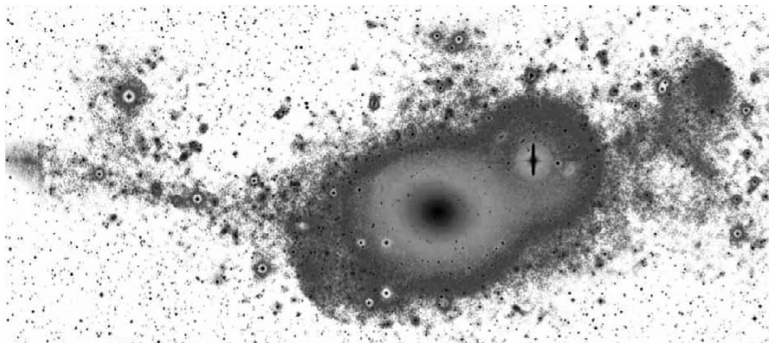
¿Al formarse, cómo “sabía” una galaxia E que iba a ir a parar a la zona central de un cúmulo?

Galaxias elípticas: ¿naturaleza, crianza, o fusión?



(P.A. Duc et al. 2011, IAU Symposium, Volume 277, p. 238-241)

Galaxias elípticas: ¿naturaleza, crianza, o fusión?



(P.A. Duc et al. 2011, IAU Symposium, Volume 277, p. 238-241)

Galaxias elípticas:

¿naturaleza, crianza, o fusión?

- Se las observa a altos z → formación en épocas tempranas.
- Las regiones centrales de las galaxias E son vieja, ricas en metales, y con valores de $[\alpha/Fe] > 0$ → se formaron rápidamente y bajo la acción de SN tipo II.
- No presentan significativa formación estelar actual.
- La tasa de fusiones mayores es baja → deberían existir galaxias masivas que no hayan experimentado fusiones.

En el caso particular de galaxias E masivas, se cree que las fusiones juegan un papel importante. Sin embargo, la idealización de que las E se forman de la fusión mayor de dos galaxias de disco (Toomre & Toomre 1972), en general no resulta aplicable (Ostriker 1980).

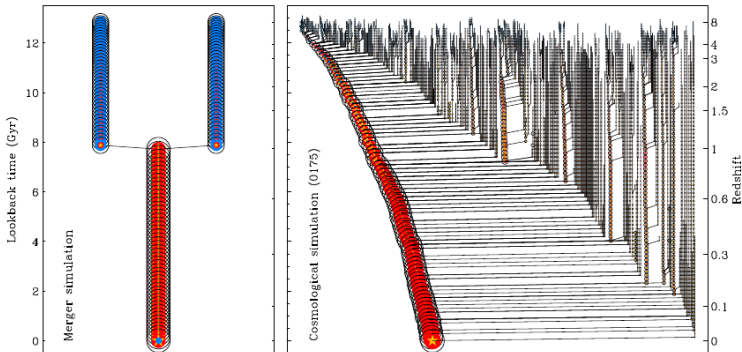
Galaxias elípticas:

¿naturaleza, crianza, o fusión?

- Se las observa a altos z → formación en épocas tempranas.
- Las regiones centrales de las galaxias E son vieja, ricas en metales, y con valores de $[\alpha/Fe] > 0$ → se formaron rápidamente y bajo la acción de SN tipo II.
- No presentan significativa formación estelar actual.
- La tasa de fusiones mayores es baja → deberían existir galaxias masivas que no hayan experimentado fusiones.

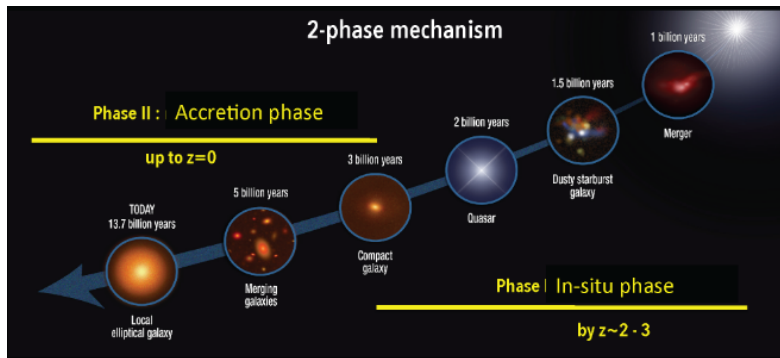
En el caso particular de galaxias E masivas, se cree que las fusiones juegan un papel importante. Sin embargo, la idealización de que las E se forman de la fusión mayor de dos galaxias de disco (Toomre & Toomre 1972), en general no resulta aplicable (Ostriker 1980).

Galaxias elípticas: El esquema de dos fases.



(Naab+ 2014)

Galaxias elípticas: El esquema de dos fases.



Forbes 2017 (Credit: NASA, ESA, S. Toft, A. Feild)

Cap. 9: Cúmulos de galaxias y estructura a gran escala

- 1 Grupos y cúmulos de galaxias
- 2 El Supercúmulo Local**
- 3 Estructura a gran escala

El Supercúmulo Local

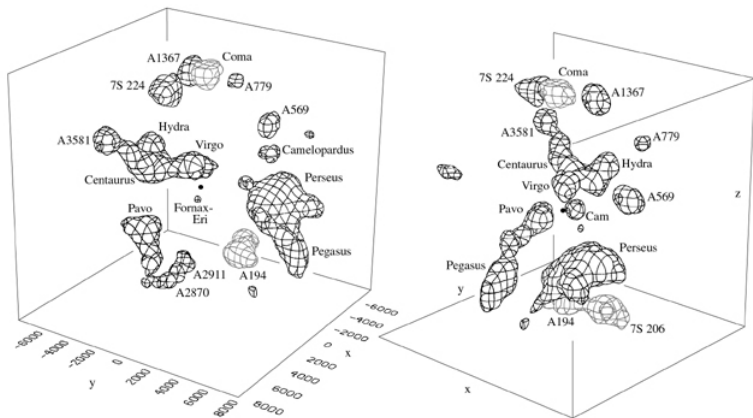


Fig 4.3 (M. Hudson) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

El Supercúmulo Local

Plano Supergaláctico

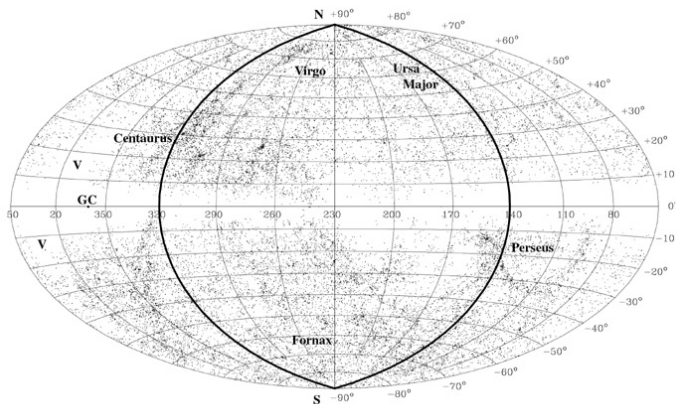
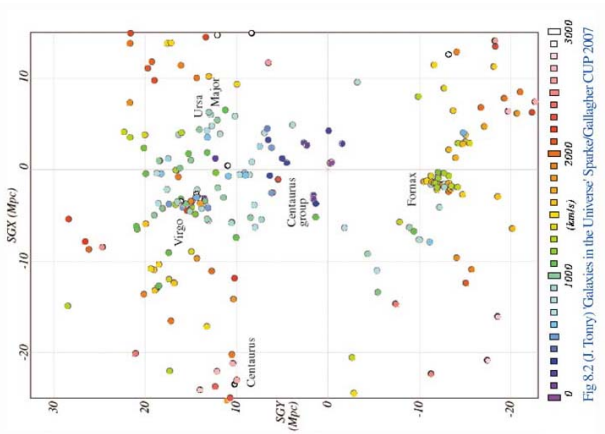


Fig 8.1 (Kolatt & Lahav) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

El Supercúmulo Local

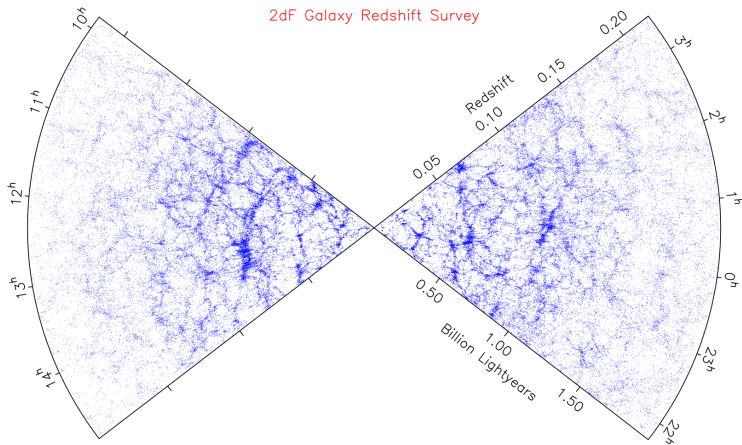
Galaxias E cercanas



Cap. 9: Cúmulos de galaxias y estructura a gran escala

- 1 Grupos y cúmulos de galaxias
- 2 El Supercúmulo Local
- 3 Estructura a gran escala**

Galaxias del 2dFGRS



Galaxias del 2dFGRS

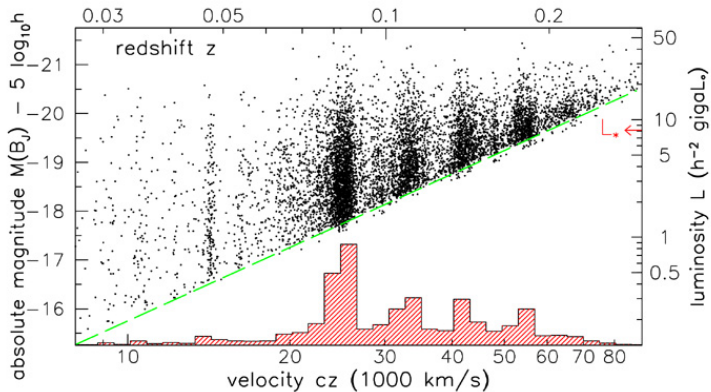
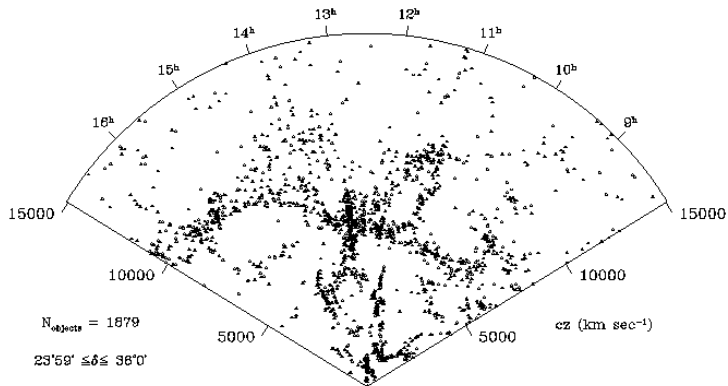


Fig 8.4 (2dF) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Diagramas de cuña

Cúmulos densos



Diagramas de cuña

Galaxias rojas y azules

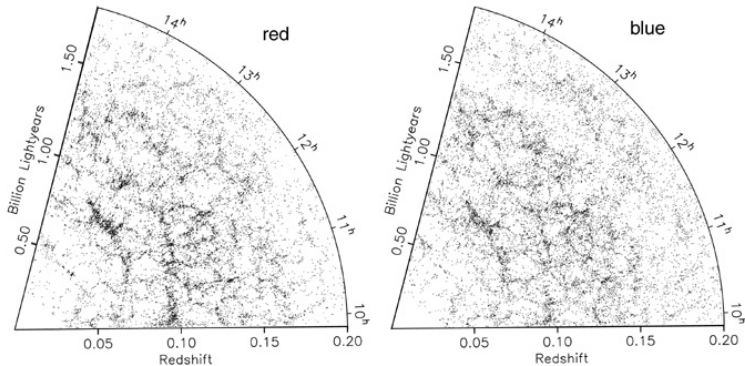
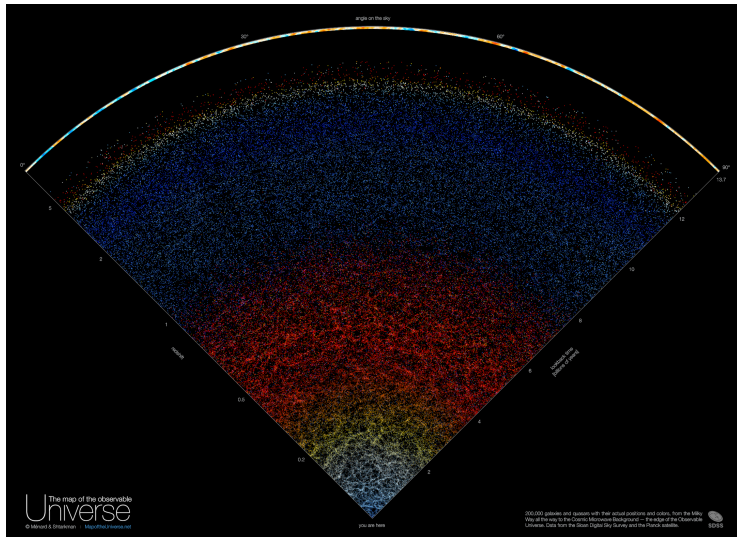


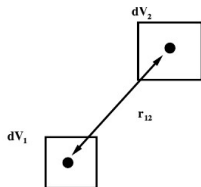
Fig 8.5 (2dF) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Diagramas de cuña

SDSS: 20 años de datos



Función de correlación de dos puntos



Caso Poissoniano:

$$\Delta P = n^2 \Delta V_1 \Delta V_2.$$

Caso con inhomogeneidades (clustering):

$$\Delta P = n^2 [1 + \xi(r_{12})] \Delta V_1 \Delta V_2.$$

Para escalas $r \lesssim 50 h^{-1}$ Mpc, se observa:

$$\xi(r) \approx \left(\frac{r}{r_0}\right)^{-\gamma}, \quad (6)$$

con $\gamma > 0$ y r_0 longitud de correlación.

Función de correlación de dos puntos

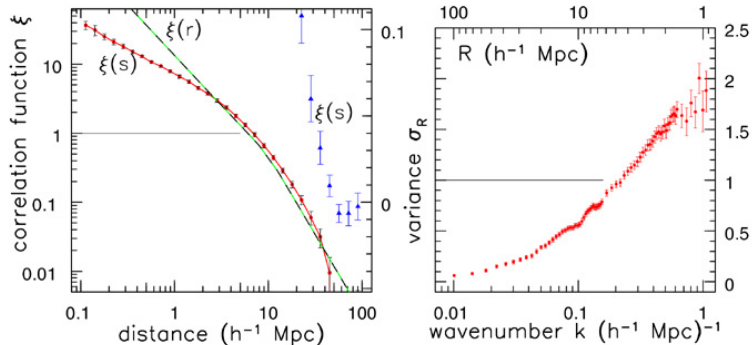
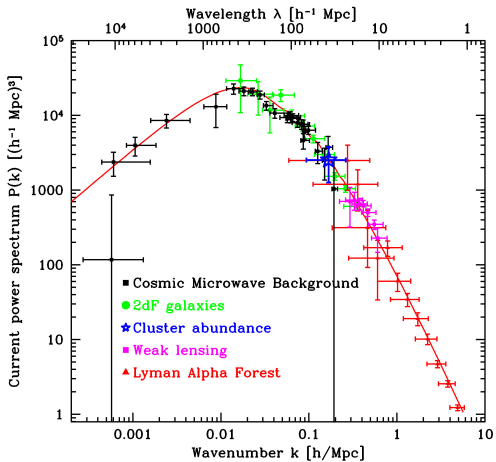


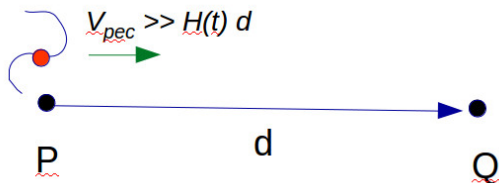
Fig 8.6 (Maddox, Cole) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Función de correlación de dos puntos



(Tegmark et al., 2002)

Movimientos peculiares



$$\frac{dv_{pec}}{dt} = -\frac{H(t)d}{d/v_{pec}} = -v_{pec} \frac{\dot{R}(t)}{R(t)}.$$

Integrando:

$$\int \frac{dv_{pec}}{v_{pec}} = -\int \frac{1}{R(t)} \frac{dR(t)}{dt} dt \Rightarrow \ln v_{pec} = -\ln R(t)$$

$$\Rightarrow v_{pec} \propto \frac{1}{R(t)},$$

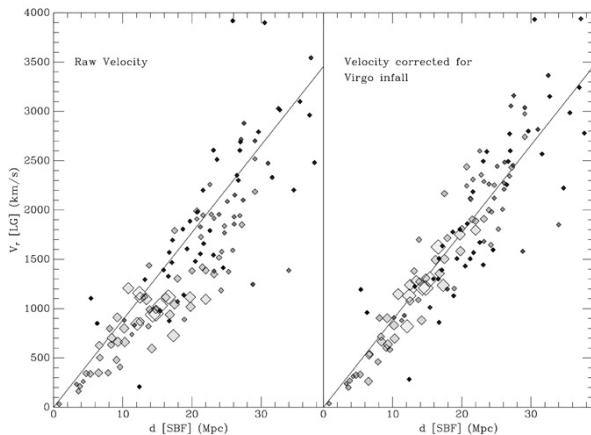
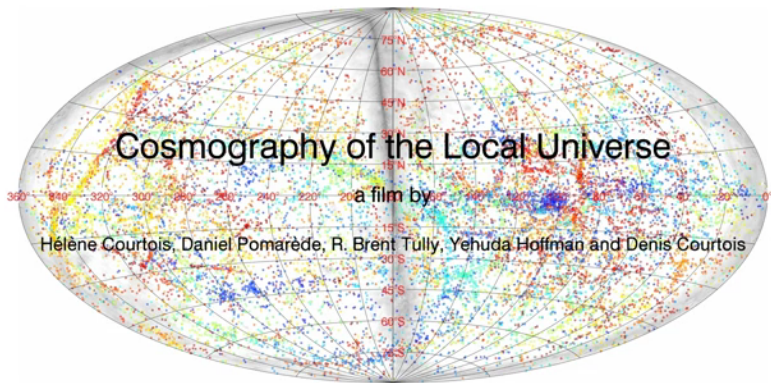


Fig 8.15 (J. Tonry) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Cosmografía del Universo Local



- *Galaxies in the Universe: An Introduction*,
Linda S. Sparke & John S. Gallagher III (Cambridge
University Press, 2nd. Edition, 2000).