

Astronomía Extragaláctica

Cap. 5: Galaxias elípticas

Profesor: Favio R. Faifer & Sergio A. Cellone

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas

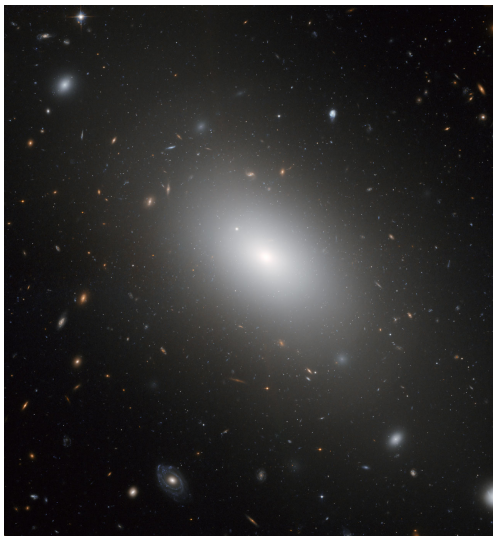
Universidad Nacional de La Plata, Argentina

curso 2023

- 1 Consideraciones generales
- 2 Sistemas no colisionales
- 3 Distribución de brillo superficial
- 4 Cinemática
- 5 El plano fundamental
- 6 Poblaciones estelares y material interestelar
- 7 Agujeros negros supermasivos centrales

- 1 Consideraciones generales
- 2 Sistemas no colisionales
- 3 Distribución de brillo superficial
- 4 Cinemática
- 5 El plano fundamental
- 6 Poblaciones estelares y material interestelar
- 7 Agujeros negros supermasivos centrales

Consideraciones generales



NGC 1132. Créditos: M. West (ESO, Chile), NASA, ESA and the Hubble Heritage (STScI/AURA)-ESA/Hubble Collaboration.

- isofotas regulares (circulares o elípticas)
- distribución suave de luz
- sin regiones de formación estelar y polvo
- casi sin HI
- sin discos prominentes

Esta simplicidad es solo aparente:

- las E cubren un rango enorme de \mathcal{L} ($10^5 - 10^{12} \mathcal{L}_{\odot}$) y concentración
- algunas rotan rápido, otras casi nada
- algunas serían oblongas, otras triaxiales
- algunas son fuertes emisores en X y/o continuo de radio

- isofotas regulares (circulares o elípticas)
- distribución suave de luz
- sin regiones de formación estelar y polvo
- casi sin HI
- sin discos prominentes

Esta simplicidad es solo aparente:

- las E cubren un rango enorme de \mathcal{L} ($10^5 - 10^{12} \mathcal{L}_{\odot}$) y concentración
- algunas rotan rápido, otras casi nada
- algunas serían oblongas, otras triaxiales
- algunas son fuertes emisores en X y/o continuo de radio

- 1 Consideraciones generales
- 2 Sistemas no colisionales**
- 3 Distribución de brillo superficial
- 4 Cinemática
- 5 El plano fundamental
- 6 Poblaciones estelares y material interestelar
- 7 Agujeros negros supermasivos centrales

- Tiempo de cruce (o tiempo dinámico): es el tiempo necesario para atravesar todo el sistema.

$$t_{cruce} = R/v = \left(\frac{R^3}{GM}\right)^{1/2} \quad (1)$$

- Tiempo de relajación: es el tiempo necesario para que los encuentros entre las partículas que componen el sistema borren completamente la memoria de las velocidades iniciales del sistema.

$$t_{relax} \sim \left(\frac{R^3}{GM}\right)^{1/2} \frac{N}{8 \ln N} = t_{cruce} \frac{N}{8 \ln N} \quad (2)$$

- Tiempo de cruce (o tiempo dinámico): es el tiempo necesario para atravesar todo el sistema.

$$t_{cruce} = R/v = \left(\frac{R^3}{GM}\right)^{1/2} \quad (1)$$

- Tiempo de relajación: es el tiempo necesario para que los encuentros entre las partículas que componen el sistema borren completamente la memoria de las velocidades iniciales del sistema.

$$t_{relax} \sim \left(\frac{R^3}{GM}\right)^{1/2} \frac{N}{8 \ln N} = t_{cruce} \frac{N}{8 \ln N} \quad (2)$$

- Para una galaxia E $\rightarrow t_{cruce} \sim 10^8$ años
($t_{cruce} < T_{Hubble}$)
- Para un CG $\rightarrow t_{relax} \sim 10^9$ años ($t_{relax} < t_{Hubble}$)
 \rightarrow sistema colisional.
- Para una E $\rightarrow t_{relax} \sim 10^{12}$ años ($t_{relax} > t_{Hubble}$)
 \rightarrow sistema no colisional!

- Para una galaxia E $\rightarrow t_{cruce} \sim 10^8$ años
($t_{cruce} < T_{Hubble}$)
- Para un CG $\rightarrow t_{relax} \sim 10^9$ años ($t_{relax} < t_{Hubble}$)
 \rightarrow sistema colisional.
- Para una E $\rightarrow t_{relax} \sim 10^{12}$ años ($t_{relax} > t_{Hubble}$)
 \rightarrow sistema no colisional!

- Para una galaxia E $\rightarrow t_{cruce} \sim 10^8$ años
($t_{cruce} < T_{Hubble}$)
- Para un CG $\rightarrow t_{relax} \sim 10^9$ años ($t_{relax} < t_{Hubble}$)
 \rightarrow sistema colisional.
- Para una E $\rightarrow t_{relax} \sim 10^{12}$ años ($t_{relax} > t_{Hubble}$)
 \rightarrow sistema no colisional!

- 1 Consideraciones generales
- 2 Sistemas no colisionales
- 3 Distribución de brillo superficial**
- 4 Cinemática
- 5 El plano fundamental
- 6 Poblaciones estelares y material interestelar
- 7 Agujeros negros supermasivos centrales

Elípticas gigantes: $\mathcal{L} \gtrsim \mathcal{L}^* \approx 2 \times 10^{10} \mathcal{L}_\odot (\equiv M_B \approx -20)$

Elípticas de luminosidad intermedia: $3 \times 10^9 \mathcal{L}_\odot \lesssim \mathcal{L} \lesssim \mathcal{L}^*$, o
sea $-20 \lesssim M_B \lesssim -18$

Elípticas enanas: $\mathcal{L} \lesssim 3 \times 10^9 \mathcal{L}_\odot$, o sea $M_B \gtrsim -18$.

Perfiles de brillo

NGC 1399 y G 675 (Abell 2572)

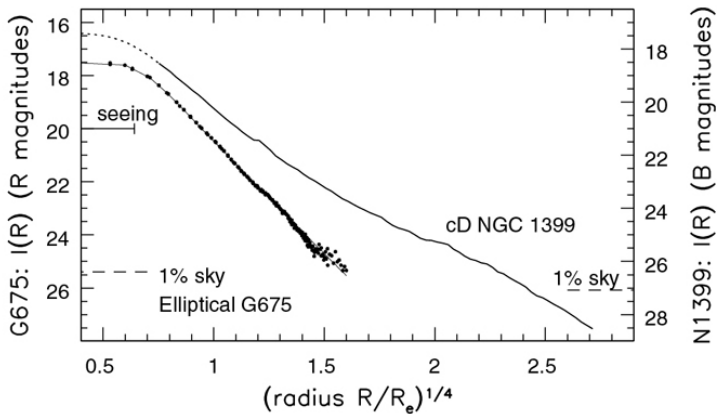


Fig 6.3 (Saglia, Caon) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

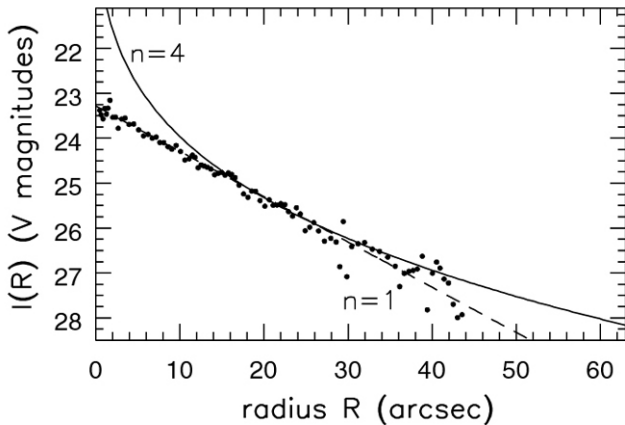


Fig 6.2 (H.Jerjen) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Perfiles de brillo: zona central

Perfiles “core” y “cusp” (o power law)

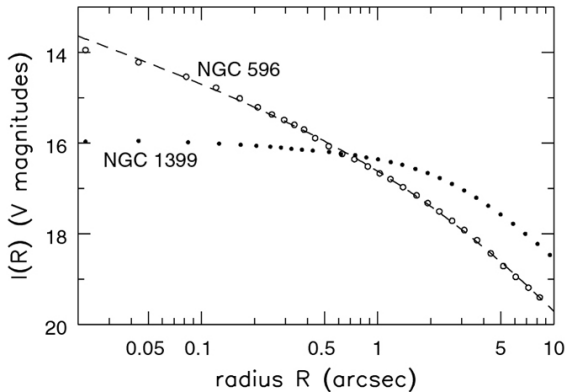


Fig 6.7 (T. Lauer) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Perfiles de brillo: zona central

Perfiles “core” y “cusp” (o power law)

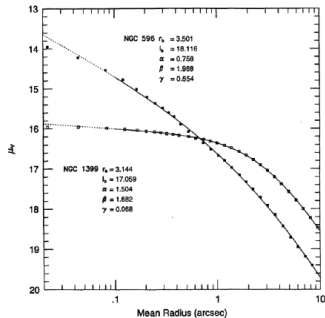
Perfil “Nuker” (Lauer et al., 1995)

$$I(r) = I_b 2^{(\beta-\gamma)/\alpha} \left(\frac{r}{r_b}\right)^{-\gamma} \left[1 + \left(\frac{r}{r_b}\right)^\alpha\right]^{(\gamma-\beta)/\alpha}$$

Perfil “Core-Sérsic” (Graham et al., 2003)

$$I(r) = I' \left[1 + \left(\frac{r_b}{r}\right)^\alpha\right]^{\gamma/\alpha} \exp \left[-b_n \left(\frac{r^\alpha + r_b^\alpha}{r_e^\alpha}\right)^{1/(an)}\right]$$

$$I' = I_b 2^{-\gamma/\alpha} \exp \left[b_n \left(2^{1/\alpha} r_b / r_e\right)^{1/n} \right]$$



(Lauer et al., 1995)

Galaxias dominantes - cD

M87



Fig 6.4 (CFHT/J.-C. Calzante-Costantini) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

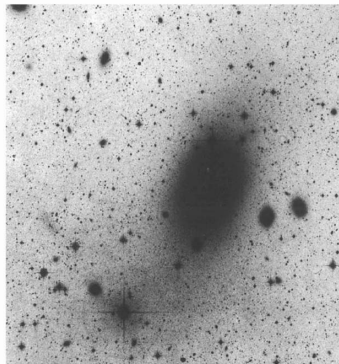


Fig 6.4 (D. Malin) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Galaxias dominantes - cD

M87



Fig 6.4 (CFHT/J.-C. Claudière/Coelum) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

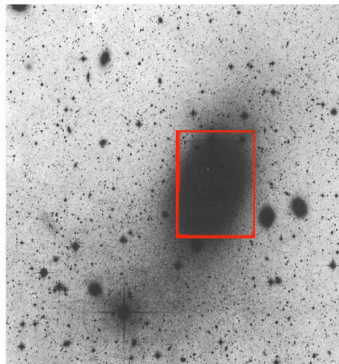
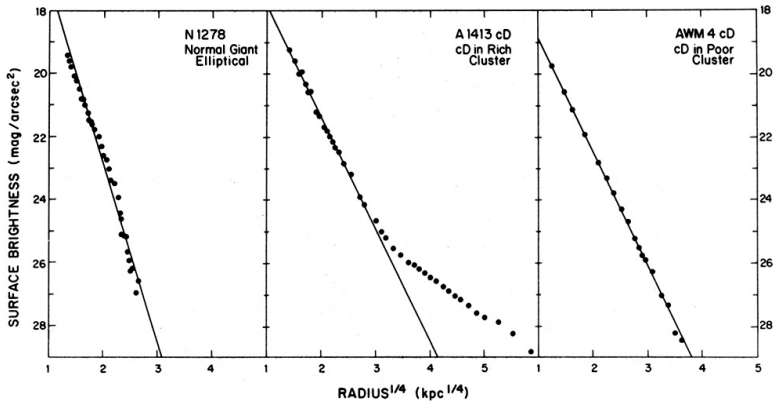


Fig 6.4 (D. Malin) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

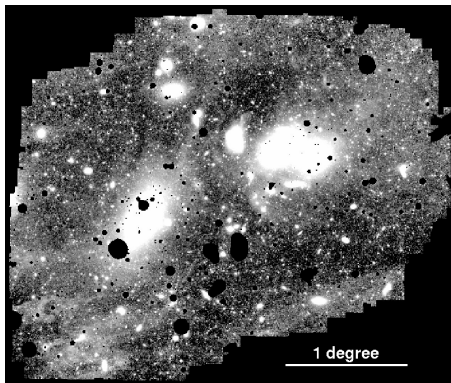
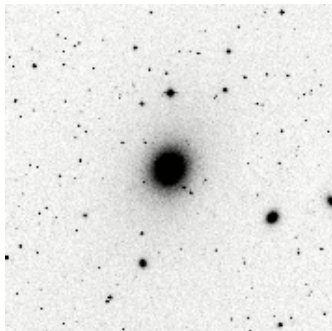
Perfiles de brillo galaxias cD

E normal - cD en cúmulo rico - cD en cúmulo pobre



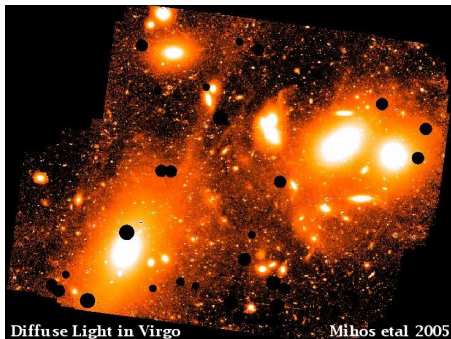
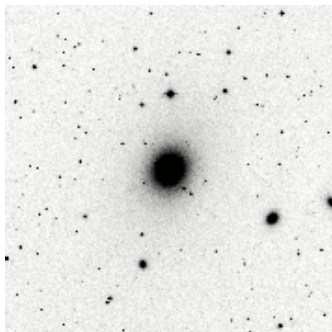
Luz intra-cúmulo

M87 - Virgo



Luz intra-cúmulo

M87 - Virgo



Galaxias elípticas: Rotación de isofotas

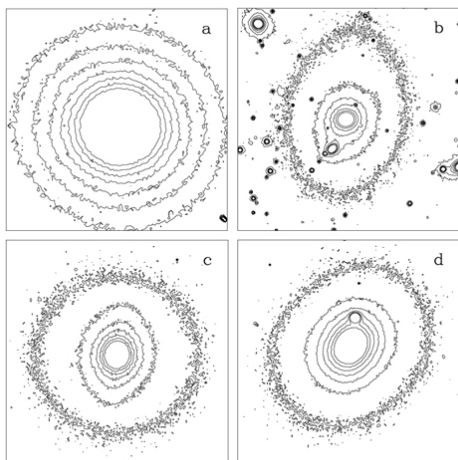


Fig 6.1 (R. de Jong) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Elipsoide:

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} + \frac{z^2}{c^2} = 1 \quad (3)$$

con $a > 0$, $b > 0$ y $c > 0$.

Esferoides: elipsoides de revolución, es decir, la superficie que se obtiene al girar una elipse alrededor de uno de sus ejes principales (z) $\rightarrow a = b$.

- Si $a > c$, se tiene un esferoide oblató (forma de lenteja).
- Si $a < c$, se tiene un esferoide prolato u oblongo (similar a una pelota de rugby).

Galaxias elípticas: Rotación de isofotas

- E de luminosidad intermedia ($M_B \gtrsim -20$)
→ $\langle q \rangle \approx 0.75 \Rightarrow 0.55 \lesssim Q \lesssim 0.7$ (si son oblongas).
- E de alta luminosidad ($\mathcal{L} \gtrsim \mathcal{L}^*$ o sea $M_B \lesssim -20$)
→ $\langle q \rangle \approx 0.85$. Muy pocas se ven circulares ($q \approx 1$)
⇒ ninguna distribución de elipsoides oblongos reproduce la distribución observada de $q \Rightarrow$ sistemas triaxiales.

Rotación de isofotas

Analogía en 2-D

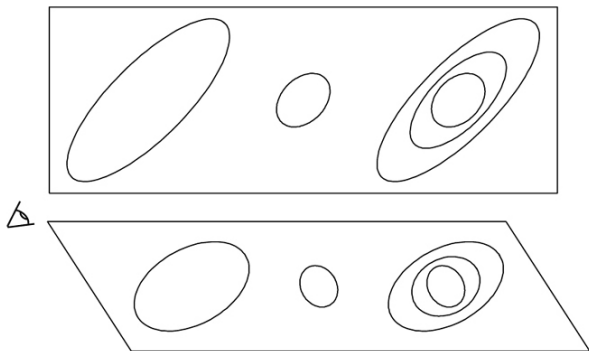


Fig 6.10 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

FIGURE 3. — Distribution of the ellipticity classes for all observed elliptical galaxies.

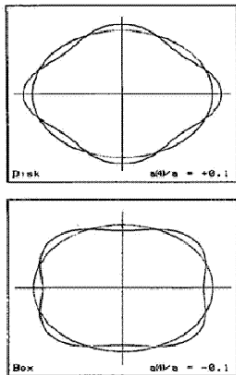


FIGURE 5. — Schematic drawing illustrating isophotes with $a(4)/a = +0.1$ and $a(4)/a = -0.1$.

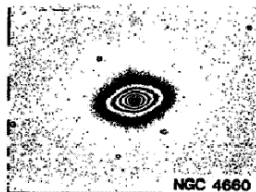


FIGURE 6. — R-image of NGC 4660, an elliptical galaxy with a disk-component in the isophotes ($a(4)/a \sim +0.03$).

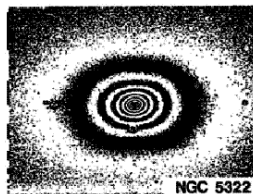
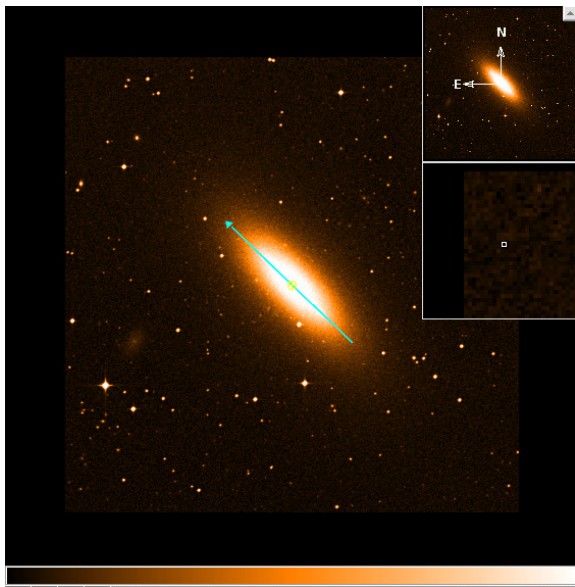


FIGURE 7. — R-image of NGC 5322, an elliptical galaxy with box-shaped isophotes ($a(4)/a \sim -0.01$).

- 1 Consideraciones generales
- 2 Sistemas no colisionales
- 3 Distribución de brillo superficial
- 4 Cinemática**
- 5 El plano fundamental
- 6 Poblaciones estelares y material interestelar
- 7 Agujeros negros supermasivos centrales

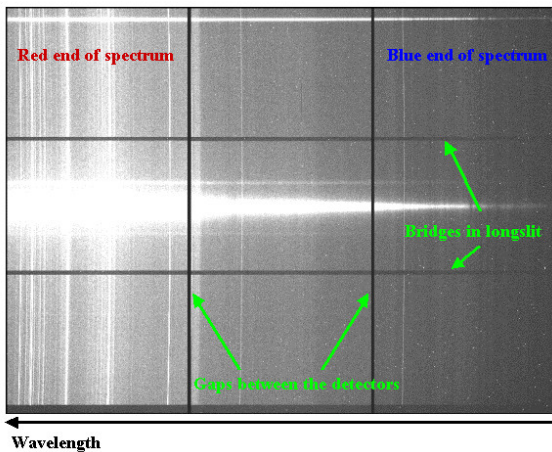
Espectro de ranura larga GMOS

NGC 3115



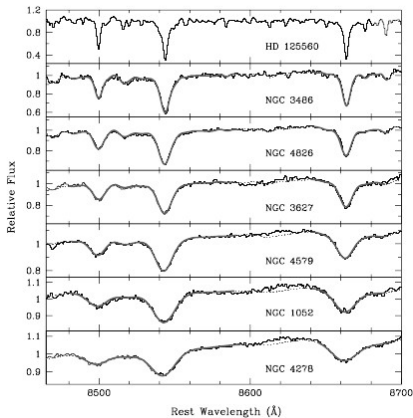
Espectro de ranura larga GMOS

NGC 1399



La dispersión de velocidades

Ensanchamiento de las líneas



(Barth et al., 2002, AJ, 124, 2607.)

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{\lambda}{2.35\sigma_\lambda}$$

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = \frac{c}{2.35\sigma_v}$$

$$R \gtrsim 5000$$

$$\Rightarrow \sigma_v \lesssim 25 \text{ km s}^{-1}$$

Curvas de v_R y σ_V

NGC 1399

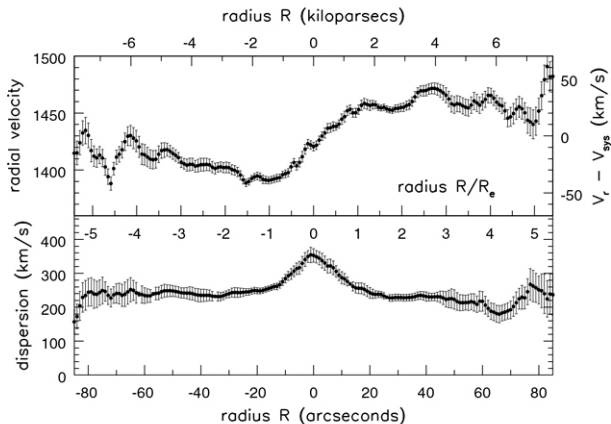
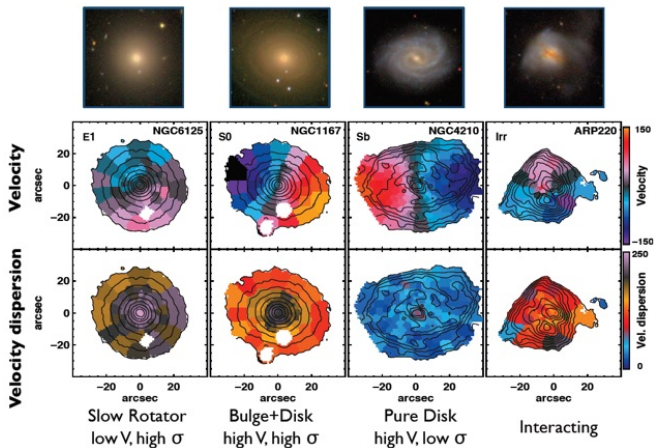


Fig 6.12 (A. Graham) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Espectroscopía de campo integral (IFU): CALIFA



$$2\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle + \langle \Omega_{xx} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{yy} \rangle + \langle \Omega_{yy} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle + \langle \Omega_{zz} \rangle = 0. \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{x}) = \rho(m^2), \text{ con } m^2 = \frac{x^2 + y^2}{A^2} + \frac{z^2}{B^2} \quad (A \geq B > 0),$$

$$\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle = \langle \mathcal{T}_{yy} \rangle, \quad \langle \Omega_{xx} \rangle = \langle \Omega_{yy} \rangle \quad (5)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} = \frac{\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle}{\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle} \approx \frac{\sigma_z^2}{\frac{1}{2} v^2 + \sigma_x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} \approx \left(\frac{B}{A} \right)^{0.9} = (1 - \epsilon)^{0.9}.$$

$$\frac{v_{\max}}{\sigma} = \left(\frac{v}{\sigma} \right)_{\text{iso}} = \frac{\pi}{4} \sqrt{2[(1 - \epsilon)^{-0.9} - 1]} \quad (7)$$

$$\left(\frac{v}{\sigma} \right)_{\star} = \frac{\left(\frac{v_{\max}}{\sigma} \right)}{\left(\frac{v}{\sigma} \right)_{\text{iso}}}$$

$$2\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle + \langle \Omega_{xx} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{yy} \rangle + \langle \Omega_{yy} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle + \langle \Omega_{zz} \rangle = 0. \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{x}) = \rho(m^2), \text{ con } m^2 = \frac{x^2 + y^2}{A^2} + \frac{z^2}{B^2} \quad (A \geq B > 0),$$

$$\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle = \langle \mathcal{T}_{yy} \rangle, \quad \langle \Omega_{xx} \rangle = \langle \Omega_{yy} \rangle \quad (5)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} = \frac{\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle}{\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle} \approx \frac{\sigma_z^2}{\frac{1}{2} v^2 + \sigma_x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} \approx \left(\frac{B}{A} \right)^{0.9} = (1 - \epsilon)^{0.9}.$$

$$\frac{v_{\max}}{\sigma} = \left(\frac{v}{\sigma} \right)_{\text{iso}} = \frac{\pi}{4} \sqrt{2[(1 - \epsilon)^{-0.9} - 1]} \quad (7)$$

$$\left(\frac{v}{\sigma} \right)_{*} = \frac{\left(\frac{v_{\max}}{\sigma} \right)}{\left(\frac{v}{\sigma} \right)_{\text{iso}}}$$

$$2\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle + \langle \Omega_{xx} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{yy} \rangle + \langle \Omega_{yy} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle + \langle \Omega_{zz} \rangle = 0. \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{x}) = \rho(m^2), \text{ con } m^2 = \frac{x^2 + y^2}{A^2} + \frac{z^2}{B^2} \quad (A \geq B > 0),$$

$$\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle = \langle \mathcal{T}_{yy} \rangle, \quad \langle \Omega_{xx} \rangle = \langle \Omega_{yy} \rangle \quad (5)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} = \frac{\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle}{\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle} \approx \frac{\sigma_z^2}{\frac{1}{2} v^2 + \sigma_x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} \approx \left(\frac{B}{A}\right)^{0.9} = (1 - \epsilon)^{0.9}.$$

$$\frac{v_{\max}}{\sigma} = \left(\frac{v}{\sigma}\right)_{\text{iso}} = \frac{\pi}{4} \sqrt{2[(1 - \epsilon)^{-0.9} - 1]} \quad (7)$$

$$\left(\frac{v}{\sigma}\right)_* = \frac{\left(\frac{v_{\max}}{\sigma}\right)}{\left(\frac{v}{\sigma}\right)_{\text{iso}}}$$

$$2\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle + \langle \Omega_{xx} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{yy} \rangle + \langle \Omega_{yy} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle + \langle \Omega_{zz} \rangle = 0. \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{x}) = \rho(m^2), \text{ con } m^2 = \frac{x^2 + y^2}{A^2} + \frac{z^2}{B^2} \quad (A \geq B > 0),$$

$$\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle = \langle \mathcal{T}_{yy} \rangle, \quad \langle \Omega_{xx} \rangle = \langle \Omega_{yy} \rangle \quad (5)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} = \frac{\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle}{\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle} \approx \frac{\sigma_z^2}{\frac{1}{2} v^2 + \sigma_x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} \approx \left(\frac{B}{A}\right)^{0.9} = (1 - \epsilon)^{0.9}.$$

$$\frac{v_{\max}}{\sigma} = \left(\frac{v}{\sigma}\right)_{\text{iso}} = \frac{\pi}{4} \sqrt{2[(1 - \epsilon)^{-0.9} - 1]} \quad (7)$$

$$\left(\frac{v}{\sigma}\right)_* = \frac{\left(\frac{v_{\max}}{\sigma}\right)}{\left(\frac{v}{\sigma}\right)_{\text{iso}}}$$

$$2\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle + \langle \Omega_{xx} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{yy} \rangle + \langle \Omega_{yy} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle + \langle \Omega_{zz} \rangle = 0. \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{x}) = \rho(m^2), \text{ con } m^2 = \frac{x^2 + y^2}{A^2} + \frac{z^2}{B^2} \quad (A \geq B > 0),$$

$$\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle = \langle \mathcal{T}_{yy} \rangle, \quad \langle \Omega_{xx} \rangle = \langle \Omega_{yy} \rangle \quad (5)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} = \frac{\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle}{\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle} \approx \frac{\sigma_z^2}{\frac{1}{2} v^2 + \sigma_x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} \approx \left(\frac{B}{A} \right)^{0.9} = (1 - \epsilon)^{0.9}.$$

$$\frac{v_{\max}}{\sigma} = \left(\frac{v}{\sigma} \right)_{\text{iso}} = \frac{\pi}{4} \sqrt{2[(1 - \epsilon)^{-0.9} - 1]} \quad (7)$$

$$\left(\frac{v}{\sigma} \right)_* = \frac{\left(\frac{v_{\max}}{\sigma} \right)}{\left(\frac{v}{\sigma} \right)_{\text{iso}}}$$

$$2\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle + \langle \Omega_{xx} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{yy} \rangle + \langle \Omega_{yy} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle + \langle \Omega_{zz} \rangle = 0. \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{x}) = \rho(m^2), \text{ con } m^2 = \frac{x^2 + y^2}{A^2} + \frac{z^2}{B^2} \quad (A \geq B > 0),$$

$$\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle = \langle \mathcal{T}_{yy} \rangle, \quad \langle \Omega_{xx} \rangle = \langle \Omega_{yy} \rangle \quad (5)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} = \frac{\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle}{\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle} \approx \frac{\sigma_z^2}{\frac{1}{2} v^2 + \sigma_x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} \approx \left(\frac{B}{A} \right)^{0.9} = (1 - \epsilon)^{0.9}.$$

$$\frac{v_{\max}}{\sigma} = \left(\frac{v}{\sigma} \right)_{\text{iso}} = \frac{\pi}{4} \sqrt{2[(1 - \epsilon)^{-0.9} - 1]} \quad (7)$$

$$\left(\frac{v}{\sigma} \right)_* = \frac{\left(\frac{v_{\max}}{\sigma} \right)}{\left(\frac{v}{\sigma} \right)_{\text{iso}}}$$

$$2\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle + \langle \Omega_{xx} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{yy} \rangle + \langle \Omega_{yy} \rangle = 0, \quad 2\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle + \langle \Omega_{zz} \rangle = 0. \quad (4)$$

$$\rho(\mathbf{x}) = \rho(m^2), \text{ con } m^2 = \frac{x^2 + y^2}{A^2} + \frac{z^2}{B^2} \quad (A \geq B > 0),$$

$$\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle = \langle \mathcal{T}_{yy} \rangle, \quad \langle \Omega_{xx} \rangle = \langle \Omega_{yy} \rangle \quad (5)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} = \frac{\langle \mathcal{T}_{zz} \rangle}{\langle \mathcal{T}_{xx} \rangle} \approx \frac{\sigma_z^2}{\frac{1}{2} v^2 + \sigma_x^2}, \quad (6)$$

$$\frac{\langle \Omega_{zz} \rangle}{\langle \Omega_{xx} \rangle} \approx \left(\frac{B}{A} \right)^{0.9} = (1 - \epsilon)^{0.9}.$$

$$\frac{v_{\max}}{\sigma} = \left(\frac{v}{\sigma} \right)_{\text{iso}} = \frac{\pi}{4} \sqrt{2[(1 - \epsilon)^{-0.9} - 1]} \quad (7)$$

$$\left(\frac{v}{\sigma} \right)_{\star} = \frac{\left(\frac{v_{\max}}{\sigma} \right)}{\left(\frac{v}{\sigma} \right)_{\text{iso}}}$$

$$Q^2 \operatorname{sen}^2 i + \cos^2 i = \begin{cases} q^2 & (\text{obl.}) \\ 1/q^2 & (\text{prol.}) \end{cases} \quad (8)$$

Para el caso oblató se puede escribir:

$$\begin{aligned} \left(\frac{b}{a}\right)^2 &= \left(\frac{B}{A}\right)^2 \operatorname{sen}^2 i + 1 - \operatorname{sen}^2 i = \left[\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 1\right] \operatorname{sen}^2 i + 1 \Rightarrow \\ \Rightarrow e^2 &= 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 = \left[1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2\right] \operatorname{sen}^2 i. \end{aligned}$$

Aparte,

$$e^2 = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 = 1 - (1 - \epsilon)^2 = 1 - (1 - 2\epsilon + \epsilon^2) \approx 2\epsilon \quad (\text{si } \epsilon \ll 1).$$

O sea:

$$2\epsilon \approx \left[1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2\right] \operatorname{sen}^2 i.$$

$$Q^2 \operatorname{sen}^2 i + \cos^2 i = \begin{cases} q^2 & (\text{obl.}) \\ 1/q^2 & (\text{prol.}) \end{cases} \quad (8)$$

Para el caso oblató se puede escribir:

$$\begin{aligned} \left(\frac{b}{a}\right)^2 &= \left(\frac{B}{A}\right)^2 \operatorname{sen}^2 i + 1 - \operatorname{sen}^2 i = \left[\left(\frac{B}{A}\right)^2 - 1\right] \operatorname{sen}^2 i + 1 \Rightarrow \\ \Rightarrow e^2 &= 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 = \left[1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2\right] \operatorname{sen}^2 i. \end{aligned}$$

Aparte,

$$e^2 = 1 - \left(\frac{b}{a}\right)^2 = 1 - (1 - \epsilon)^2 = 1 - (1 - 2\epsilon + \epsilon^2) \approx 2\epsilon \quad (\text{si } \epsilon \ll 1).$$

O sea:

$$2\epsilon \approx \left[1 - \left(\frac{B}{A}\right)^2\right] \operatorname{sen}^2 i.$$

Diagrama cinemático para rotadores isótropos

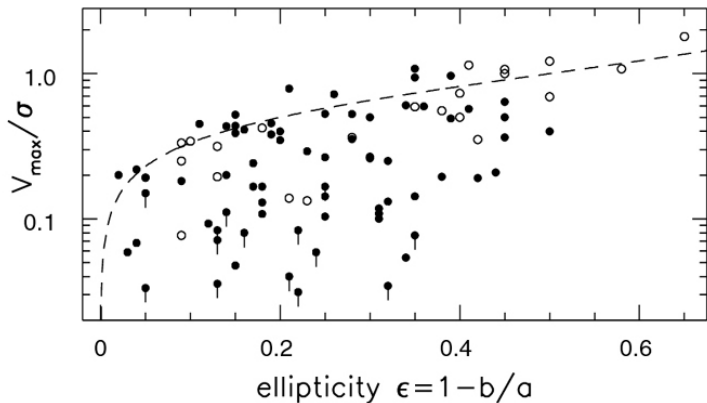


Fig 6.14 (R. Bender) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Relación entre cinemática y morfología

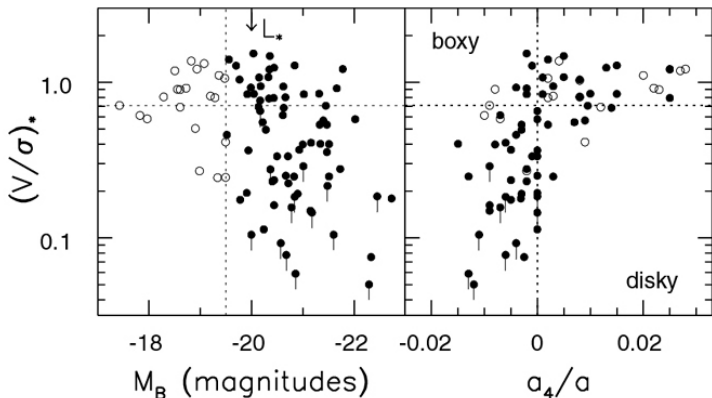


Fig 6.15 (R. Bender) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

- 1 Consideraciones generales
- 2 Sistemas no colisionales
- 3 Distribución de brillo superficial
- 4 Cinemática
- 5 El plano fundamental**
- 6 Poblaciones estelares y material interestelar
- 7 Agujeros negros supermasivos centrales

Relaciones fotométricas

Sistemas esferoidales

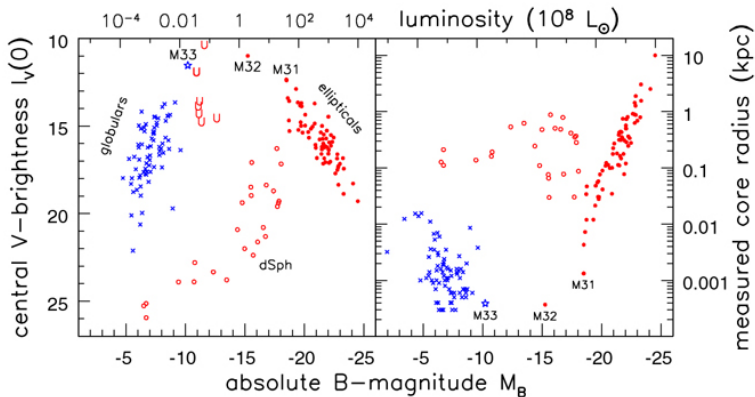
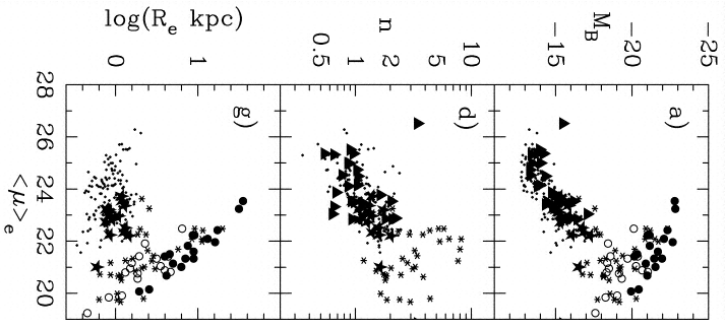


Fig 6.6 (Kormendy, Philipps) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

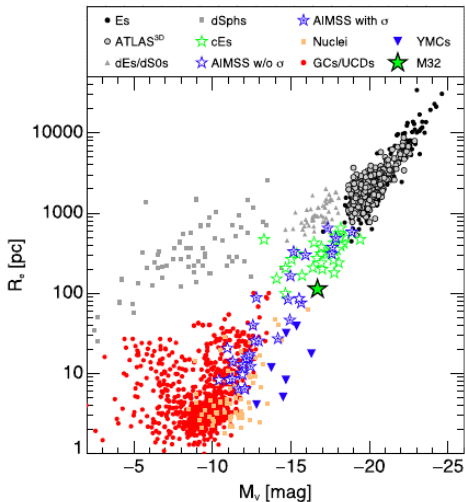
Relaciones fotométricas

Sistemas esferoidales



Relaciones fotométricas

Sistemas esferoidales



$$R_e \propto \langle I_e \rangle^{-0.83 \pm 0.08} \rightarrow \langle I_e \rangle \propto R_e^{-1.2} \quad (9)$$

$$\frac{\mathcal{L}}{2} = \pi \langle I_e \rangle R_e^2 \rightarrow \mathcal{L} \propto \langle I_e \rangle^{-\frac{2}{3}} \Rightarrow \langle I_e \rangle \propto \mathcal{L}^{-\frac{3}{2}}. \quad (10)$$

Las E brillantes y de \mathcal{L} intermedia tienen I_0 más débil y r_c mayor a mayor \mathcal{L} , mientras que las enanas siguen relaciones inversas.

$$R_e \propto \langle I_e \rangle^{-0.83 \pm 0.08} \rightarrow \langle I_e \rangle \propto R_e^{-1.2} \quad (9)$$

$$\frac{\mathcal{L}}{2} = \pi \langle I_e \rangle R_e^2 \rightarrow \mathcal{L} \propto \langle I_e \rangle^{-\frac{2}{3}} \Rightarrow \langle I_e \rangle \propto \mathcal{L}^{-\frac{3}{2}}. \quad (10)$$

Las E brillantes y de \mathcal{L} intermedia tienen I_0 más débil y r_c mayor a mayor \mathcal{L} , mientras que las enanas siguen relaciones inversas.

Relación Faber-Jackson

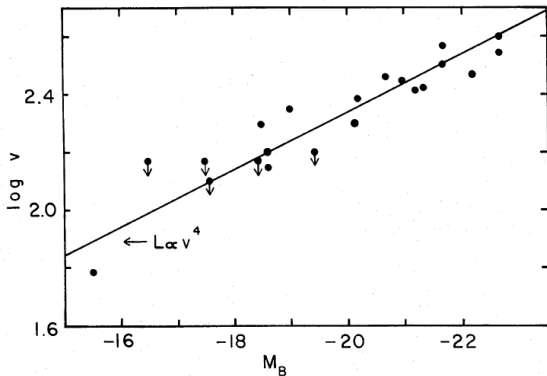
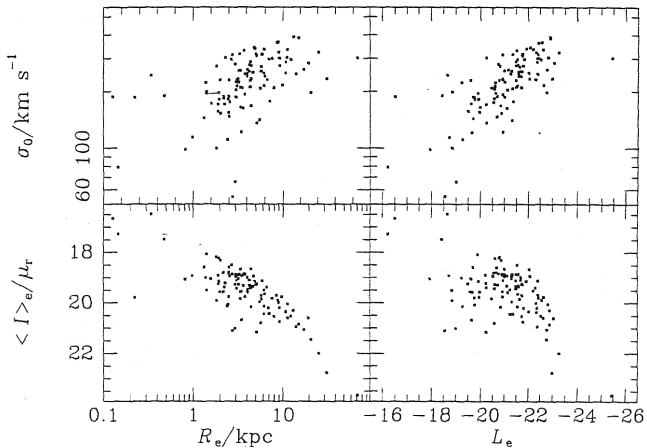


FIG. 16.—Line-of-sight velocity dispersions versus absolute magnitude from Table 1. The point with smallest velocity corresponds to M32, for which the velocity dispersion (60 km s^{-1}) was taken from Richstone and Sargent (1972).

$$\frac{\mathcal{L}_V}{2 \times 10^{10} \mathcal{L}_\odot} \approx \left(\frac{\sigma_0}{200 \text{ km s}^{-1}} \right)^4.$$

Plano Fundamental

Djorgovski & Davis (1987)



$$-0.65 \log(R_e) + 0.22 \langle \mu_e \rangle + 0.86 \log(\sigma_0) = 0. \quad (11)$$

$$\log(R_e) = 0.34 \langle \mu_e \rangle + 1.3 \log(\sigma_0). \quad (12)$$

$$\log(R_e) = -0.34 \times 2.5 \log \langle I_e \rangle + 1.3 \log(\sigma_0) = \log \left(\frac{\sigma_0^{1.3}}{\langle I_e \rangle^{0.85}} \right)$$

$$\Rightarrow (R_e)^{\frac{1}{1.3}} = \frac{\sigma_0}{\langle I_e \rangle^{0.65}} \Rightarrow \log(R_e) = 1.3 \log \left(\frac{\sigma_0}{\langle I_e \rangle^{0.65}} \right),$$

$$-0.65 \log(R_e) + 0.22 \langle \mu_e \rangle + 0.86 \log(\sigma_0) = 0. \quad (11)$$

$$\log(R_e) = 0.34 \langle \mu_e \rangle + 1.3 \log(\sigma_0). \quad (12)$$

$$\log(R_e) = -0.34 \times 2.5 \log \langle I_e \rangle + 1.3 \log(\sigma_0) = \log \left(\frac{\sigma_0^{1.3}}{\langle I_e \rangle^{0.85}} \right)$$

$$\Rightarrow (R_e)^{\frac{1}{1.3}} = \frac{\sigma_0}{\langle I_e \rangle^{0.65}} \Rightarrow \log(R_e) = 1.3 \log \left(\frac{\sigma_0}{\langle I_e \rangle^{0.65}} \right),$$

$$-0.65 \log(R_e) + 0.22 \langle \mu_e \rangle + 0.86 \log(\sigma_0) = 0. \quad (11)$$

$$\log(R_e) = 0.34 \langle \mu_e \rangle + 1.3 \log(\sigma_0). \quad (12)$$

$$\log(R_e) = -0.34 \times 2.5 \log \langle l_e \rangle + 1.3 \log(\sigma_0) = \log \left(\frac{\sigma_0^{1.3}}{\langle l_e \rangle^{0.85}} \right)$$

$$\Rightarrow (R_e)^{\frac{1}{1.3}} = \frac{\sigma_0}{\langle l_e \rangle^{0.65}} \Rightarrow \log(R_e) = 1.3 \log \left(\frac{\sigma_0}{\langle l_e \rangle^{0.65}} \right),$$

$$-0.65 \log(R_e) + 0.22 \langle \mu_e \rangle + 0.86 \log(\sigma_0) = 0. \quad (11)$$

$$\log(R_e) = 0.34 \langle \mu_e \rangle + 1.3 \log(\sigma_0). \quad (12)$$

$$\log(R_e) = -0.34 \times 2.5 \log \langle I_e \rangle + 1.3 \log(\sigma_0) = \log \left(\frac{\sigma_0^{1.3}}{\langle I_e \rangle^{0.85}} \right)$$

$$\Rightarrow (R_e)^{\frac{1}{1.3}} = \frac{\sigma_0}{\langle I_e \rangle^{0.65}} \quad \Rightarrow \quad \log(R_e) = 1.3 \log \left(\frac{\sigma_0}{\langle I_e \rangle^{0.65}} \right),$$

Relación Faber-Jackson y plano fundamental

galaxias E en el cúmulo de Coma y cúmulos a $z \geq 0.39$ (círculos llenos)

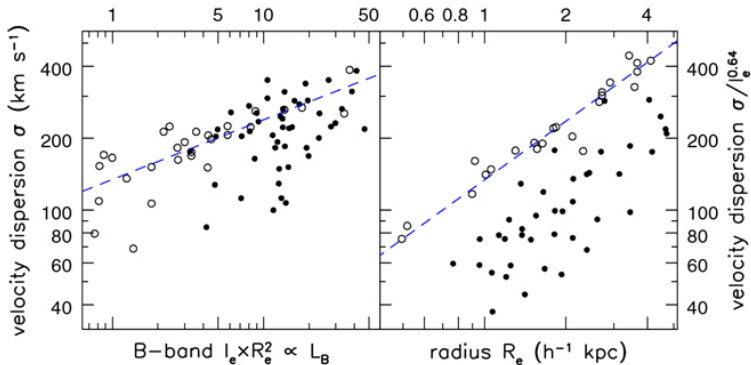
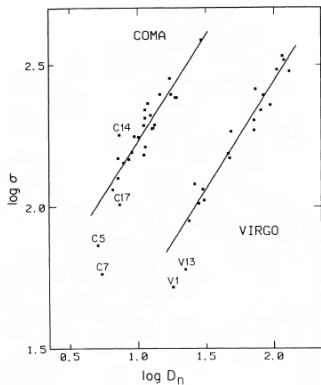
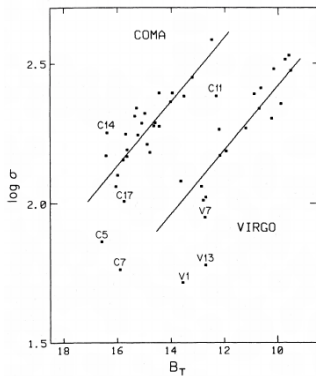


Fig 6.13 (T. Treu) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Plano Fundamental: relación $D_n - \sigma_0$

Dressler (1987)



$$\langle I_n \rangle = \frac{F \left(\frac{D_n}{2} \right)}{\pi D_n^2 / 4},$$

$$\langle I_n \rangle = 8 e^{b_4} b_4^{-8} I_e \left(\frac{R_e}{D_n} \right)^2 \gamma \left(8, b_4 \left(\frac{D_n}{R_e} \right)^{\frac{1}{4}} \right) \rightarrow D_n \propto R_e I_e^{0.8}$$

y usando ec.12 y $\langle \mu_e \rangle = -2.5 \log(\langle I_e \rangle) + \text{cte.}$ tenemos que $R_e = \langle I_e \rangle^{-0.85} \sigma_0^{1.3} + \text{cte.}$,
con lo cual:

$$D_n \propto \sigma_0^{1.3} \langle I_e \rangle^{-0.05}.$$

Plano Fundamental: relación $D_n - \sigma_0$

Dressler (1987)

$$\langle I_n \rangle = \frac{F\left(\frac{D_n}{2}\right)}{\pi D_n^2/4},$$

$$\langle I_n \rangle = 8 e^{b_4} b_4^{-8} I_e \left(\frac{R_e}{D_n}\right)^2 \gamma\left(8, b_4 \left(\frac{D_n}{R_e}\right)^{\frac{1}{4}}\right) \rightarrow D_n \propto R_e I_e^{0.8}$$

y usando ec.12 y $\langle \mu_e \rangle = -2.5 \log(\langle I_e \rangle) + \text{cte.}$ tenemos que $R_e = \langle I_e \rangle^{-0.85} \sigma_0^{1.3} + \text{cte.}$,
con lo cual:

$$D_n \propto \sigma_0^{1.3} \langle I_e \rangle^{-0.05}.$$

- 1 Consideraciones generales
- 2 Sistemas no colisionales
- 3 Distribución de brillo superficial
- 4 Cinemática
- 5 El plano fundamental
- 6 Poblaciones estelares y material interestelar**
- 7 Agujeros negros supermasivos centrales

Espectro UV-óptico-IR de una galaxia E

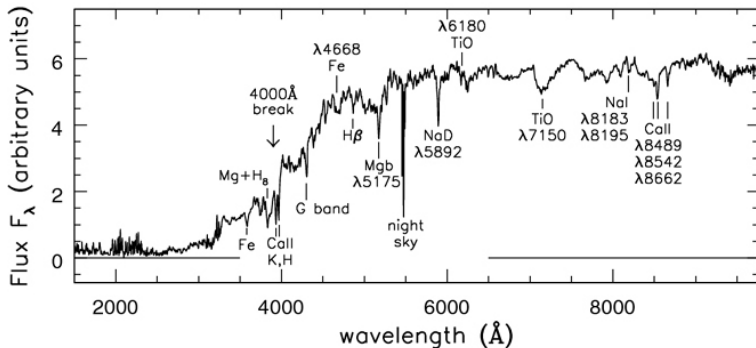


Fig 6.17 (A. Kinney) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Relación color-luminosidad

Virgo (círculos vacíos) - Coma (círculos llenos)

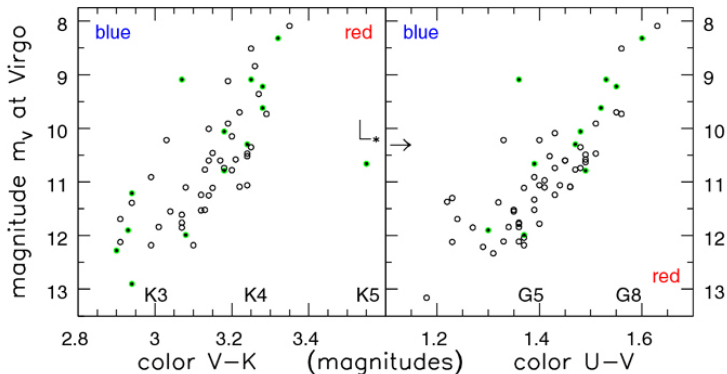
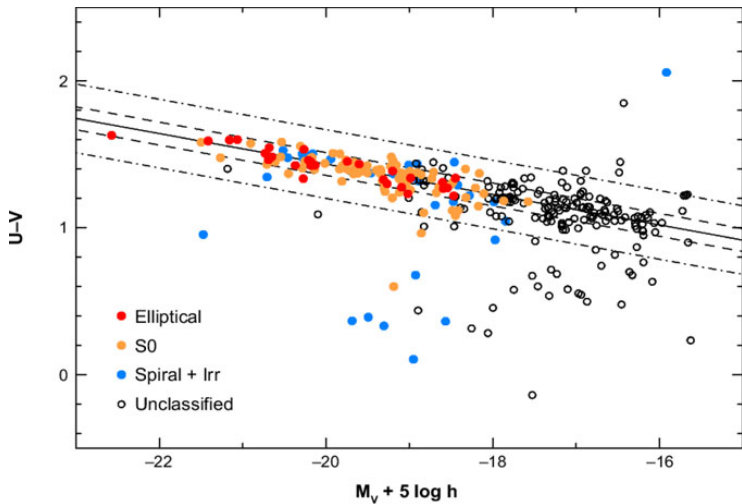


Fig 6.19 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

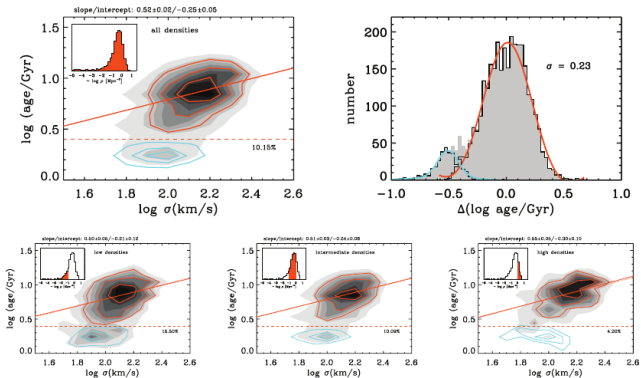
Relación color-luminosidad

Coma (Bawer et al., 1999)



Poblaciones estelares

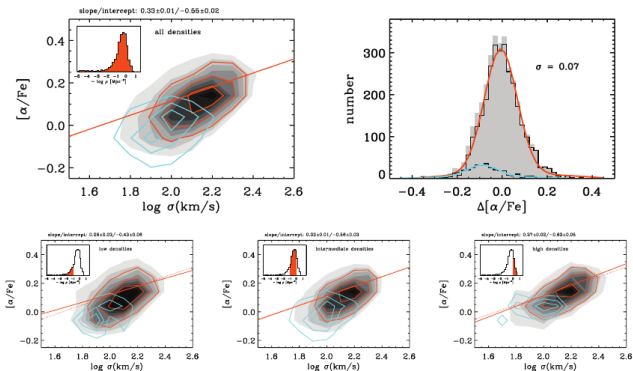
Parámetros SSP equivalentes pesados por luminosidad.



Edad vs. dispersión de velocidades de galaxias E en diferentes ambientes. Los valores son SSP equivalentes obtenidos en base a índices espectrales (Thomas et al. 2010).

Poblaciones estelares

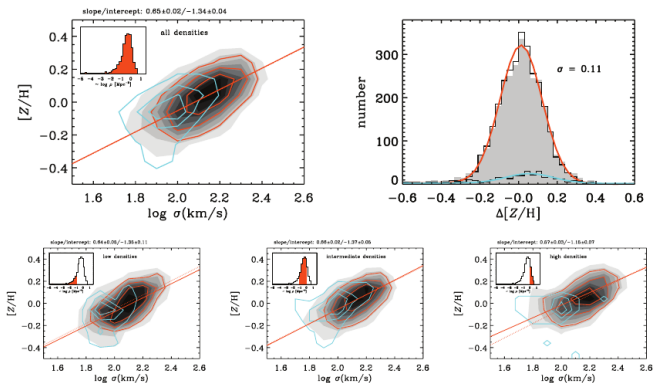
Parametros SSP equivalentes pesados por luminosidad.



$[\alpha/Fe]$ vs. dispersión de velocidades de galaxias E en diferentes ambientes. Los valores son SSP equivalentes obtenidos en base a índices espectrales (Thomas et al. 2010).

Poblaciones estelares

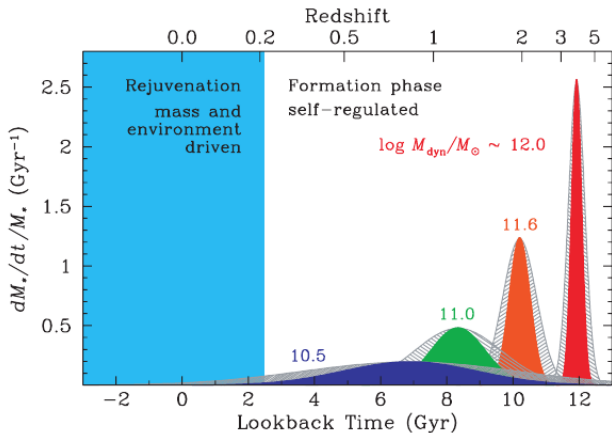
Parametros SSP equivalentes pesados por luminosidad.



$[Z/H]$ vs. dispersión de velocidades de galaxias E en diferentes ambientes. Los valores son SSP equivalentes obtenidos en base a índices espectrales (Thomas et al. 2010).

Poblaciones estelares

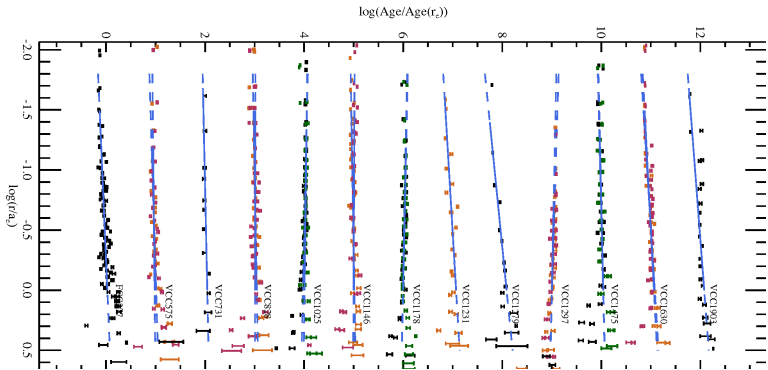
Parametros SSP equivalentes pesados por luminosidad.



Tasa de formación estelar en función del tiempo hacia el pasado, para galaxias E de acuerdo a sus masas (Thomas et al. 2010).

Gradientes de edad

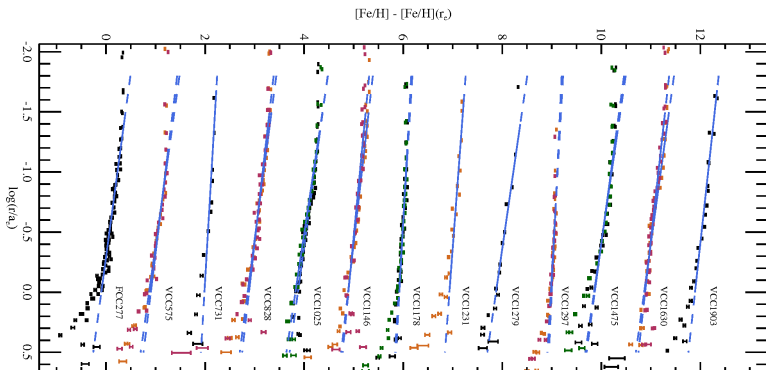
Virgo (Koleva et al., 2011)



Gradientes de edad normalizados a los valores para el radio efectivo (son valores SSP equivalentes).

Gradientes de edad y metalicidad

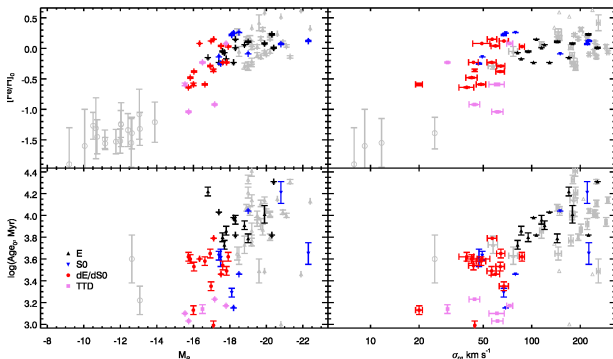
Virgo (Koleva et al., 2011)



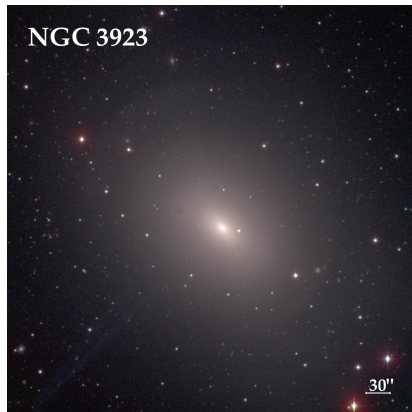
Gradientes de metalicidad normalizados a los valores para el radio efectivo, obtenidos a través de la técnica del ajuste espectral completo (son valores SSP equivalentes).

Edad y Metalicidad central

Virgo (Koleva et al., 2011)



[Fe/H] central (arriba) y log(edad central) (abajo) vs. la magnitud absoluta en el azul (izquierda) y vs. la dispersión de velocidades (derecha).



5-10 % de las galaxias elípticas muestran gas y polvo detectable: se originan en interacciones y fusiones.

Gas y polvo

NGC 3923 (Sikkema et al., 2007)

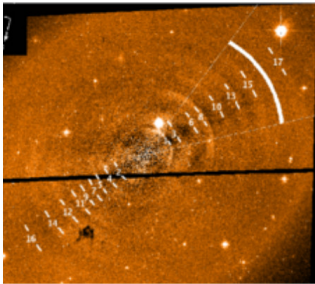


Fig. D.1. Residual image of GALPHOT for NGC 3923 in V with wedge. Note the large dust patch at the NE and faint dust lane within the wedge in the SW direction. The field of view is 202" x 202".

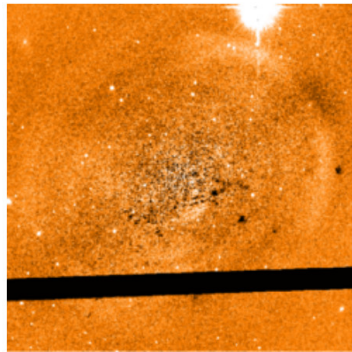
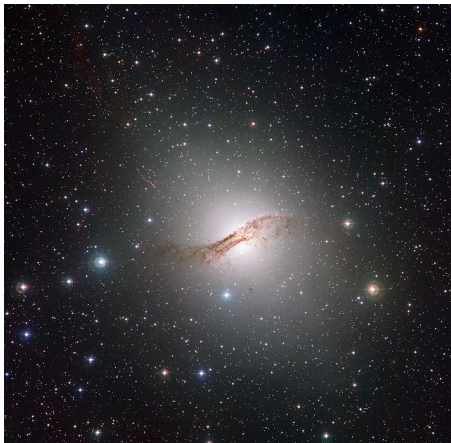


Fig. D.2. Inner region residuals of NGC 3923 in V (40x40 arc-sec). Several small dust patches are visible. The innermost shell visible was also detected by Prieur (1988) using ground based data. No more other inner shells are detected.

5-10 % de las galaxias elípticas muestran gas y polvo detectable: se originan en interacciones y fusiones.

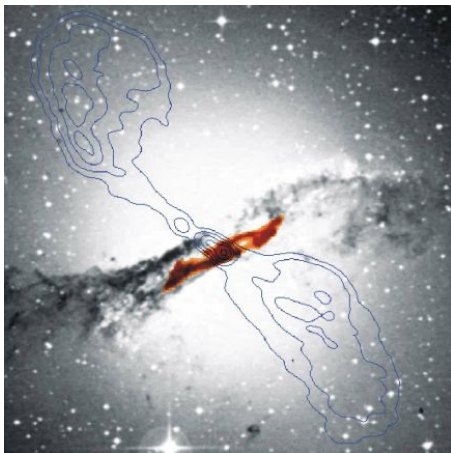
Gas y polvo

NGC 5128 (≡ radiofuente Cen A)



Gas y polvo

NGC 5128 (\equiv radiofuente Cen A)



Gas caliente

NGC 5044 (E. O'Sullivan & ESA)

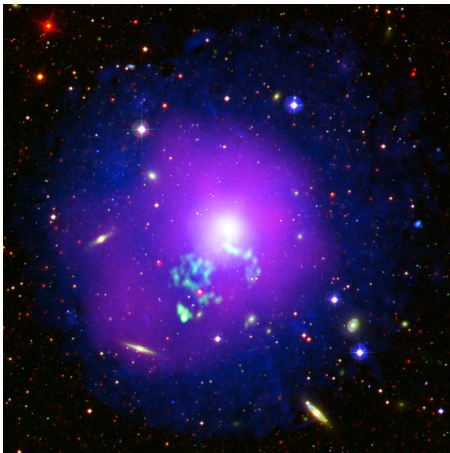


Imagen de la zona central del grupo NGC 5044. Combinación de imágenes óptica del Digitized Sky Survey, e IR y UV de los satélites WISE y Galex de la NASA. Azul: gas caliente observado por XMM-Newton. Púrpura: distribución de los átomos de Fe. Verde: emisión en radio proveniente del plasma (Giant Metrewave Radio Telescope).

Gas caliente en galaxias elípticas

NGC 4472 (Sarazin 1997).

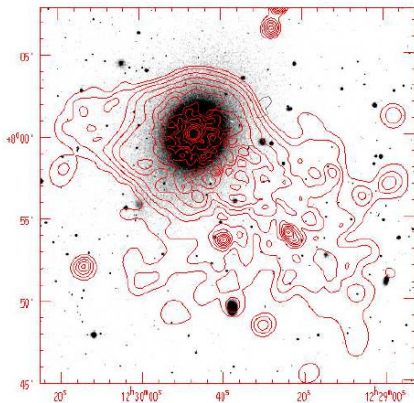


Figure 2. The ROSAT X-ray image of the Virgo elliptical NGC 4472 (Irwin & Sarazin 1996). Contours of the X-ray emission are superposed on a greyscale representation of the optical image.

Gas caliente en galaxias elípticas

$$T_{heat} = \frac{\mu m_p \sigma_*^2}{k_B} = 6.8 \times 10^6 \left(\frac{\sigma_*}{300 \text{ km seg}^{-1}} \right)^2 K$$

$T \sim 1 - 3 \times 10^7 K \Rightarrow$ emite en rayos-X (free-free)

E + luminosas: $10^9 - 10^{11} M_\odot$ de gas caliente hasta $r \gtrsim 30$ kpc.

E - luminosas: no pueden retener gravitatoriamente el gas.

Ej.: M87 emite $10^9 L_\odot$ en X.

Gas caliente en galaxias elípticas

$$T_{heat} = \frac{\mu m_p \sigma_*^2}{k_B} = 6.8 \times 10^6 \left(\frac{\sigma_*}{300 \text{ km seg}^{-1}} \right)^2 K$$

$T \sim 1 - 3 \times 10^7 K \Rightarrow$ emite en rayos-X (free-free)

E + luminosas: $10^9 - 10^{11} M_\odot$ de gas caliente hasta $r \gtrsim 30$ kpc.

E - luminosas: no pueden retener gravitatoriamente el gas.

Ej.: M87 emite $10^9 L_\odot$ en X.

Gas caliente en galaxias elípticas

$$\mathcal{L} = n_e n_p \Lambda(T) \quad (13)$$

$$t_{\text{cool}} \approx \frac{\frac{3}{2} (n_e + n_p) k_B T}{n_e n_p \Lambda(T)}. \quad (14)$$

n_e y n_p son las densidades de electrones y protones.

$\Lambda(T)$ es la función de enfriamiento.

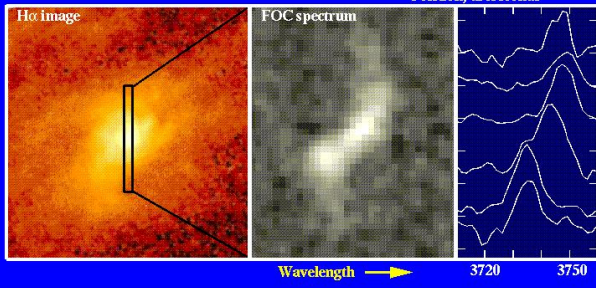
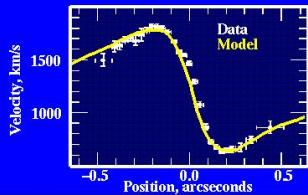
Para radiación libre-libre resulta ser $t_{\text{cool}} \propto n_e^{-1} T^{\frac{1}{2}}$ → en la zona central de las E el enfriamiento es eficiente!

- 1 Consideraciones generales
- 2 Sistemas no colisionales
- 3 Distribución de brillo superficial
- 4 Cinemática
- 5 El plano fundamental
- 6 Poblaciones estelares y material interestelar
- 7 Agujeros negros supermasivos centrales**

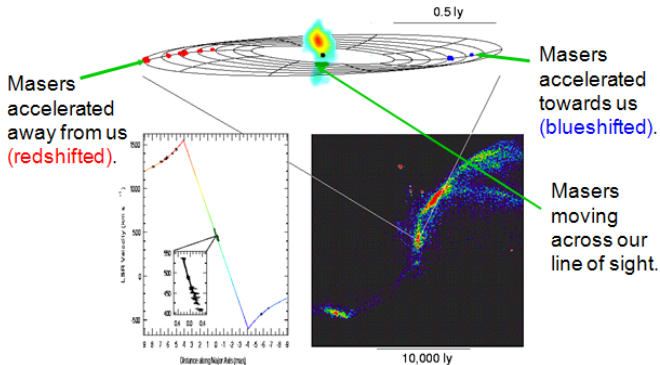
Curva de rotación de M 87

Velocity Profiles in the M87 Core

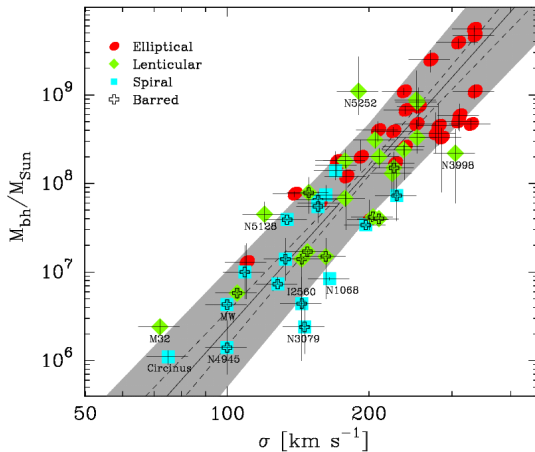
Model: central mass 3.2×10^9 solar masses



Curva de rotación de NGC 4258



Relación $M_{\bullet} - M_{\text{sph}}$



- *Galaxies in the Universe: An Introduction*,
Linda S. Sparke & John S. Gallagher III (Cambridge
University Press, 2nd. Edition, 2000).
- *Galactic Astronomy*,
J. Binney & M. Merrifield (Princeton University Press,
1998).