

# Astronomía Extragaláctica

## Cap. 4: Galaxias espirales y lenticulares

Profesor: Favio R. Faifer y Sergio A. Cellone

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

curso 2020

## Cap. 4: Galaxias espirales y lenticulares

- 1 Distribución de brillo superficial
- 2 La secuencia de las galaxias de disco
- 3 Distribución de poblaciones estelares
- 4 El gas
- 5 Cinemática - dinámica
- 6 La estructura espiral
- 7 Barras
- 8 El origen de las S0

# Cap. 4: Galaxias espirales y lenticulares

- 1 Distribución de brillo superficial
- 2 La secuencia de las galaxias de disco
- 3 Distribución de poblaciones estelares
- 4 El gas
- 5 Cinemática - dinámica
- 6 La estructura espiral
- 7 Barras
- 8 El origen de las S0

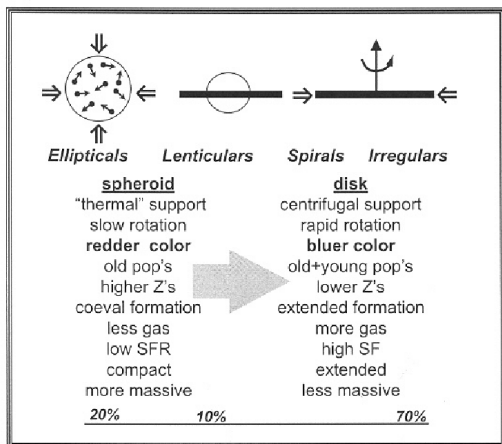
# Característica distintiva de las S y S0



Disco estelar notable y extendido



galaxias de disco



(Avila-Reese 2006)

$$M_B \lesssim -18$$



$$\cos^2(i) = \frac{(1 - \epsilon)^2 - q_0^2}{1 - q_0^2}$$

$\epsilon$ : elipticidad (medida)

$q_0 = 0.11 \rightarrow 0.20$ : achatamiento intrínseco

(Courteau, S. 1997, AJ, 114, 2402)

# Perfil de brillo superficial

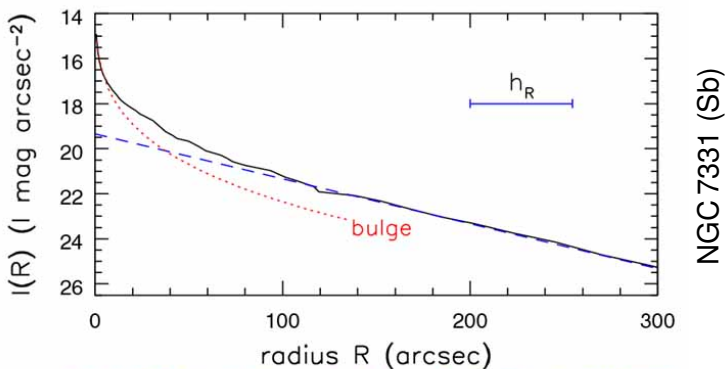


Fig 5.4 (R. Peletier) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



# Perfil de brillo superficial

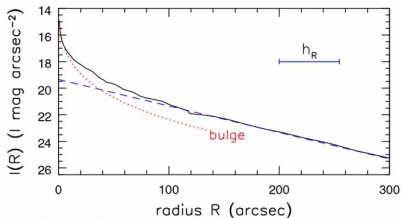


Fig 5.4 (R. Peletier) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



$$\text{banda } I \rightarrow \begin{aligned} \mu(r=0) &\simeq 15 \text{ mag arcsec}^{-2} \\ \mu(r=300'') &\simeq 25 \text{ mag arcsec}^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{\text{cielo}} &\simeq 19.9 \text{ mag arcsec}^{-2} \\ I(r=0) &\simeq 100 \times I_{\text{cielo}} \\ I(r=300'') &\simeq 0.01 \times I_{\text{cielo}} \end{aligned}$$

# Perfil de brillo superficial

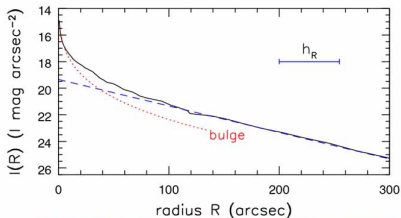


Fig 5.4 (R. Peletier) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

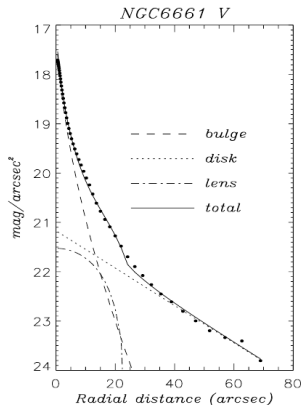
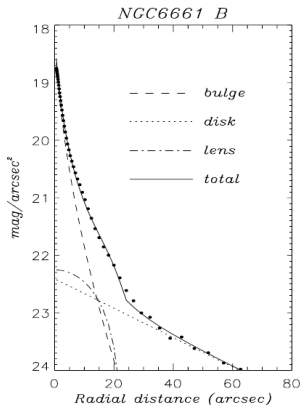


$$\text{banda } I \rightarrow \begin{aligned} \mu(r=0) &\simeq 15 \text{ mag arcsec}^{-2} \\ \mu(r=300'') &\simeq 25 \text{ mag arcsec}^{-2} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mu_{\text{cielo}} &\simeq 19.9 \text{ mag arcsec}^{-2} \\ I(r=0) &\simeq 100 \times I_{\text{cielo}} \\ I(r=300'') &\simeq 0.01 \times I_{\text{cielo}} \end{aligned}$$

# Componentes estructurales

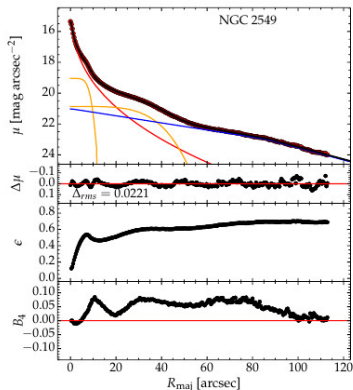
Bulbos, discos, lentes y barras



(Prieto et al. 2001, A&A 367, 405)

# Componentes estructurales

Bulbos, discos, lentes y barras



(Ciambur B., 2016, PASA, 33, 62.)

# Componentes estructurales

Lentes, barras elíptica y planas, anillos

$$I_{\text{lens}}(r) = I_{0,\text{lens}} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_{0,\text{lens}}} \right)^2 \right] \quad (r \leq r_{0,\text{lens}}).$$

$$I_{\text{bar}}(x, y) = I_{0,\text{bar}} \sqrt{1 - \left( \frac{x}{a_{\text{bar}}} \right)^2 - \left( \frac{y}{b_{\text{bar}}} \right)^2}, \quad (1)$$

$$I_{\text{bar}}(r) = \frac{I_{0,\text{bar}}}{1 + e^{\frac{r-\alpha}{\beta}}},$$

$$I_{\text{ring}}(r) = I_{0,\text{ring}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{r-r_{0,\text{ring}}}{\sigma} \right)^2}.$$

# Componentes estructurales

Lentes, barras elíptica y planas, anillos

$$I_{\text{lens}}(r) = I_{0,\text{lens}} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_{0,\text{lens}}} \right)^2 \right] \quad (r \leq r_{0,\text{lens}}).$$

$$I_{\text{bar}}(x, y) = I_{0,\text{bar}} \sqrt{1 - \left( \frac{x}{a_{\text{bar}}} \right)^2 - \left( \frac{y}{b_{\text{bar}}} \right)^2}, \quad (1)$$

$$I_{\text{bar}}(r) = \frac{I_{0,\text{bar}}}{1 + e^{\frac{r-\alpha}{\beta}}},$$

$$I_{\text{ring}}(r) = I_{0,\text{ring}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{r-r_{0,\text{ring}}}{\sigma} \right)^2}.$$

# Componentes estructurales

Lentes, barras elíptica y planas, anillos

$$l_{\text{lens}}(r) = l_{0,\text{lens}} \left[ 1 - \left( \frac{r}{r_{0,\text{lens}}} \right)^2 \right] \quad (r \leq r_{0,\text{lens}}).$$

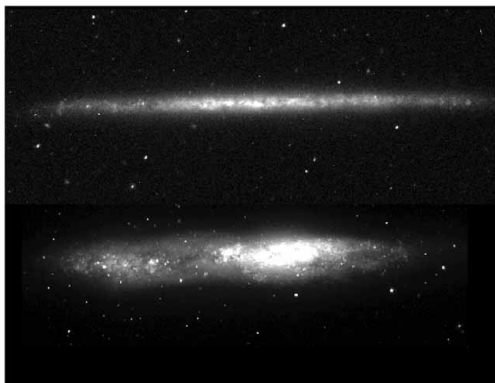
$$l_{\text{bar}}(x, y) = l_{0,\text{bar}} \sqrt{1 - \left( \frac{x}{a_{\text{bar}}} \right)^2 - \left( \frac{y}{b_{\text{bar}}} \right)^2}, \quad (1)$$

$$l_{\text{bar}}(r) = \frac{l_{0,\text{bar}}}{1 + e^{\frac{r-\alpha}{\beta}}},$$

$$l_{\text{ring}}(r) = l_{0,\text{ring}} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{r-r_{0,\text{ring}}}{\sigma} \right)^2}.$$

$$I(r, z) = I(r) e^{-\frac{|z|}{h_z}} \quad (h_z \approx 0.1 h_r)$$

Donde usualmente  $I(r)$  es una ley exponencial.



UGC 7321 (Sd)  
("superdelgada")

NGC 55 (SBm)

Fig 5.7 (Matthews, Ferguson)'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



(Freeman, 1970, ApJ, 160, 811)

$$\mu_0(B) \simeq 21.7 \text{ mag arcsec}^{-2}$$

para 28/36 galaxias S (RC)

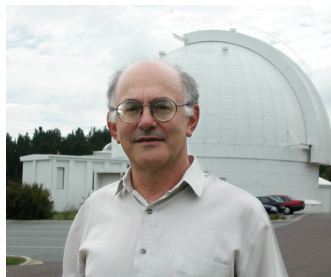


¿Astrofísica o efecto de selección?

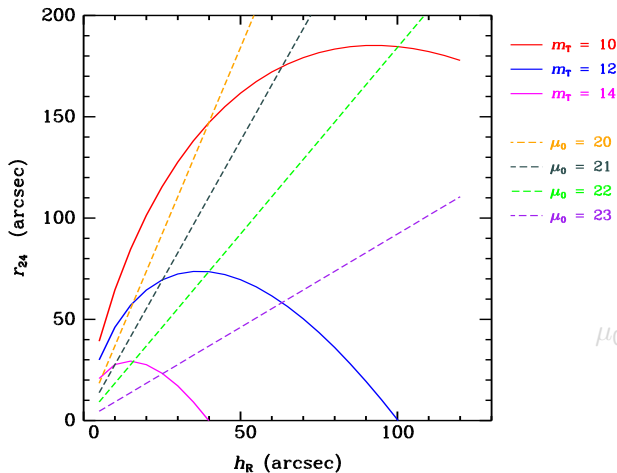
(Freeman, 1970, ApJ, 160, 811)

$$\mu_0(B) \simeq 21.7 \text{ mag arcsec}^{-2}$$

para 28/36 galaxias S (RC)



¿Astrofísica o efecto de selección?



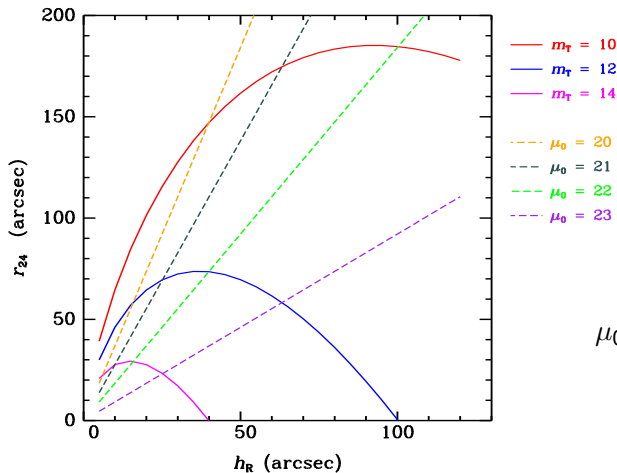
$$\mu_0 \lesssim 22 \text{ mag arcsec}^{-2}$$



$r_{24}$  es máximo

# El disco

La ley de Freeman



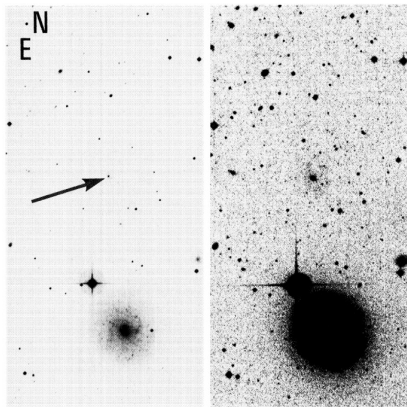
$$\mu_0 \lesssim 22 \text{ mag arcsec}^{-2}$$



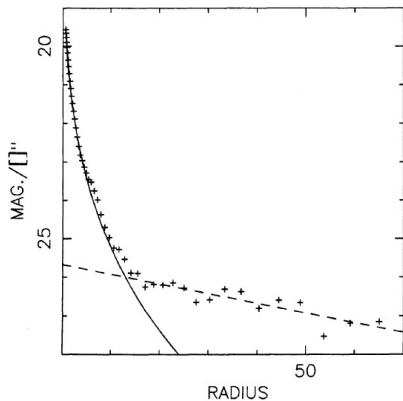
$r_{24}$  es máximo

# Espiraes LSB

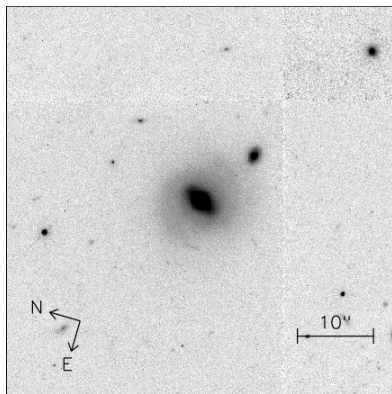
Malin 1



(Bothun, Impey, Malin, 1987, AJ, 94, 23)



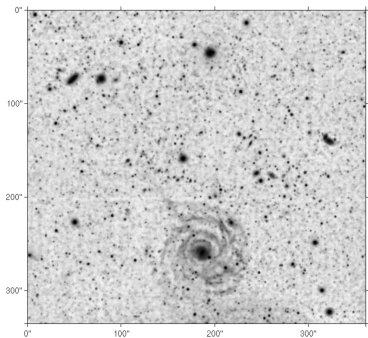
(Bothun, Impey, Malin, 1987, AJ, 94, 23)



(Barth, 2007, AJ, 133, 1085)

# Espirales LSB

## Malin 1 - Imagenes profundas de gran campo

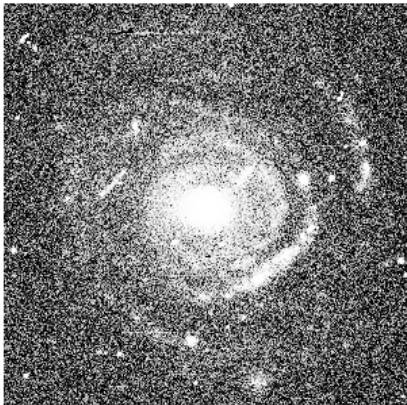


(Gaspar Galaz et al. 2015, ApJ,815,L29)

Combinación de imágenes  $g$  y  $r$  obtenidas con el telescopio Magallanes (6.5m). Se distinguen, y una clara estructura espiral, además de un posible "stream", el cual estaría indicando alguna interacción pasada (estructuras de hasta  $\sim 28 \text{ mag arcsec}^{-2}$ ). El diámetro de Malin 2, según este estudio es de 160 Kpc.

# Espiraes LSB

Malin 2





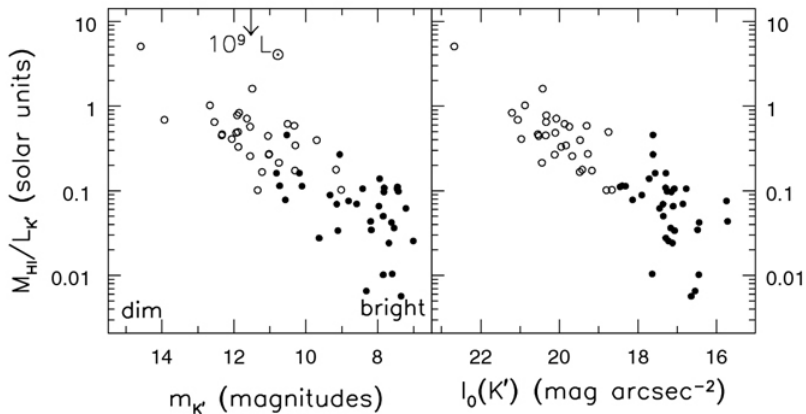
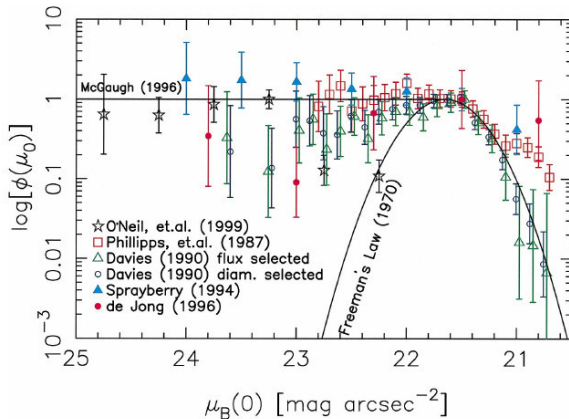


Fig 5.8 (M. Verheijen) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



Distribución de brillo superficial central en distintas muestras observadas (O'Neil & Bothun, 2000, ApJ, 529, 811).

Elipsoide; contenido estelar:

- población estelar vieja
- y de alta metalicidad



NGC 3115  
S0



M 104  
Sa



M 33  
Sc



SMC  
Im

# El bulbo

NGC 5054 (Sb) - NGC 1365 (SBbc)



ESO PR Photo 06a/99 (27 February 1999)

Barred Galaxy NGC 1365  
(VLT UT1 + FORS1)

© European Southern Observatory



## Cap. 4: Galaxias espirales y lenticulares

- 1 Distribución de brillo superficial
- 2 La secuencia de las galaxias de disco**
- 3 Distribución de poblaciones estelares
- 4 El gas
- 5 Cinemática - dinámica
- 6 La estructura espiral
- 7 Barras
- 8 El origen de las S0

a lo largo de la secuencia de Hubble:

- aumenta la s.f.r. (en el disco)
- decrece la fracción  $\frac{B}{D}$

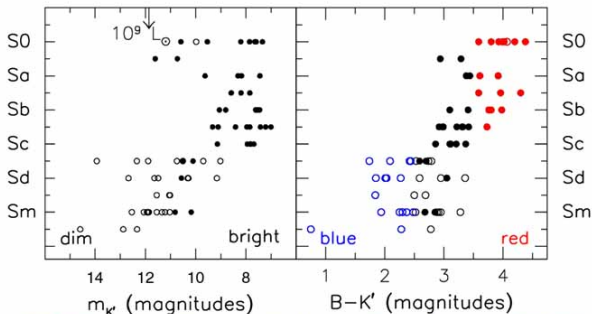
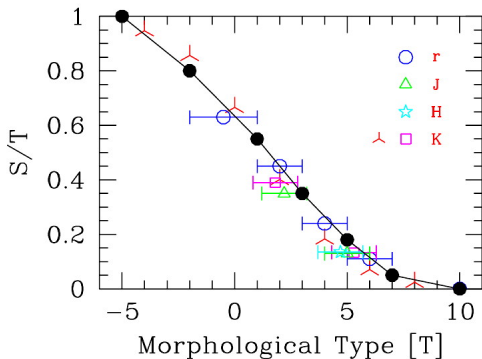


Fig 5.6 (M. Verheijen) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

a lo largo de la secuencia de Hubble:

- aumenta la s.f.r. (en el disco)
- decrece la fracción  $\frac{B}{D}$

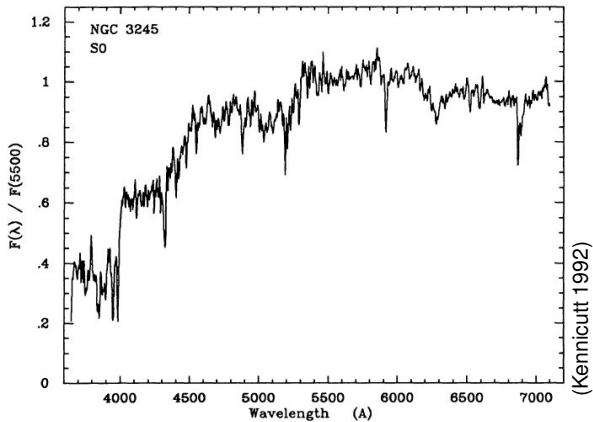


# La secuencia de galaxias de disco

| Característica                         | S0 – Sa  | Sd – Sm  |
|--|--|--|
| Brazos espirales                       | ≠ o apretados                                  | abiertos   |
| Color – TE                             | rojo: ★ G tardía                               | azul: ★ F tardía                                 |
| $B - V$                                | 0.7 → 0.9                                      | 0.4 → 0.8  |
| Estrellas jóvenes                      | pocas  | relativ. muchas                                  |
| Regiones HII                           | pocas, pequeñas                                | muchas, luminosas                                |
| Gas frío                               | poco   | mucho  |
| $\mathcal{M}(\text{HI})/\mathcal{L}_B$ | $\lesssim 0.05 \rightarrow 0.1$                | $\sim 0.25 \rightarrow > 1$                      |
| $\mathcal{L}_B$                        | $(1 \rightarrow 4)10^{10} \mathcal{L}_\odot$   | $(< 0.1 \rightarrow 2)10^{10} \mathcal{L}_\odot$ |
| $l_0$                                  | alto   | bajo   |
| $\mathcal{M}(< R)$                     | $(0.5 \rightarrow 3)10^{11} \mathcal{M}_\odot$ | $(< 0.2 \rightarrow 1)10^{11} \mathcal{M}_\odot$ |
| Rotación                               | $\frac{dV(R)}{dR}$ alta                        | $\frac{dV(R)}{dR}$ baja                          |
| B/D                                    | alta   | baja   |

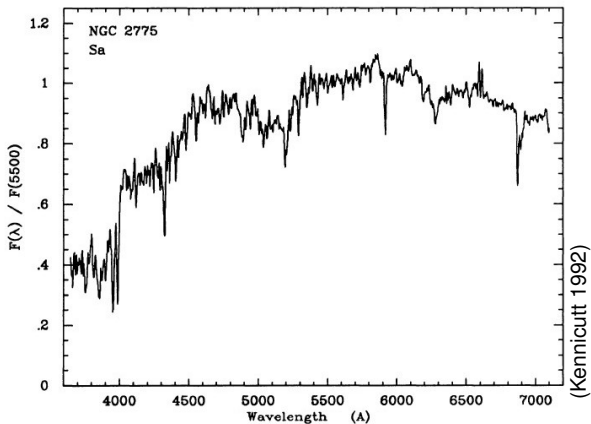


# Espectros ópticos

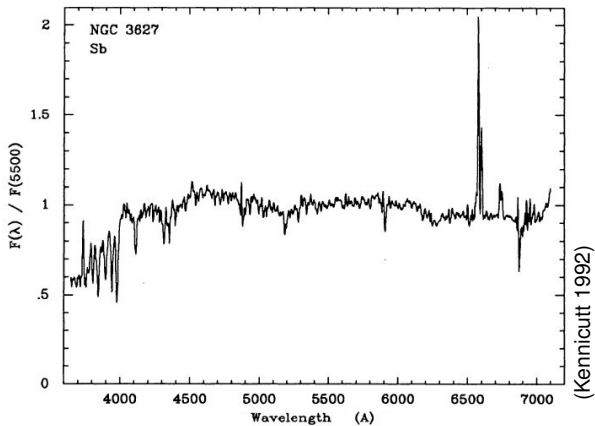


galaxia S0

# Espectros ópticos

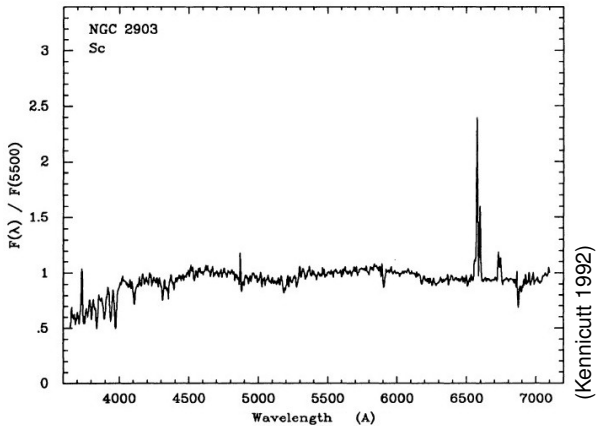


galaxia Sa



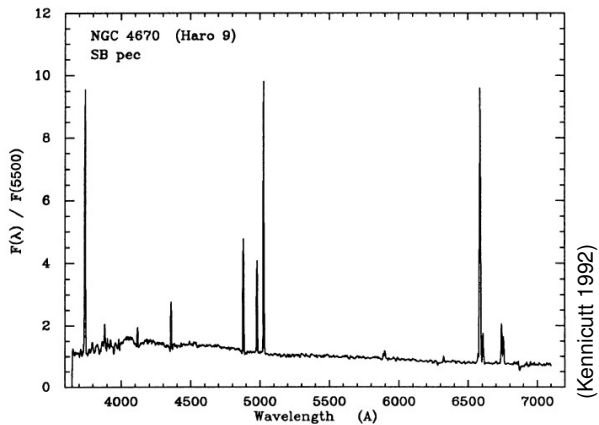
galaxia Sb

# Espectros ópticos



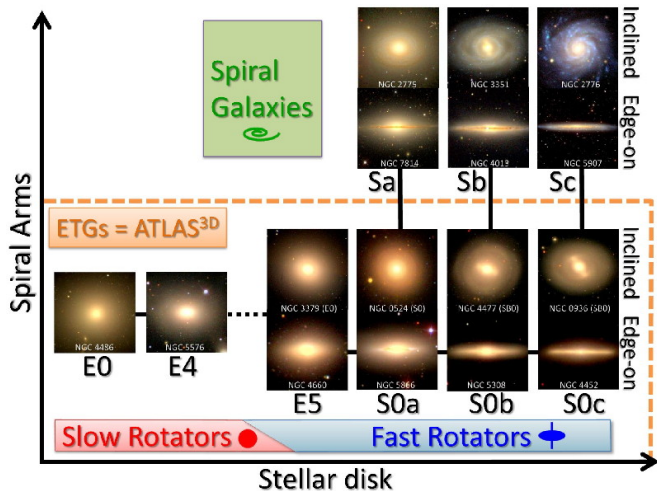
galaxia Sc

# Espectros ópticos



galaxia Sm

# Clasificación cinemática

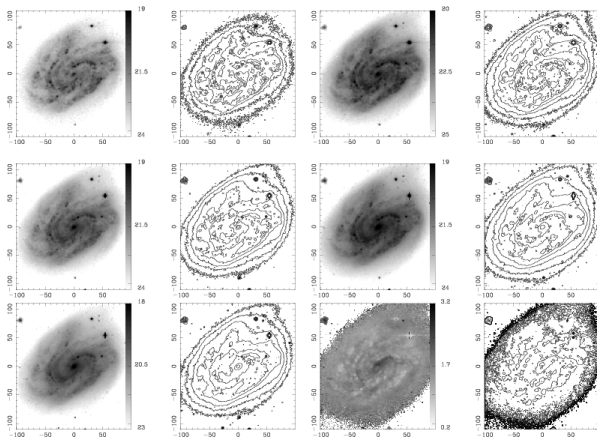


(Cappellari et al. 2011, MNRAS, 416, 1680)

## Cap. 4: Galaxias espirales y lenticulares

- 1 Distribución de brillo superficial
- 2 La secuencia de las galaxias de disco
- 3 Distribución de poblaciones estelares**
- 4 El gas
- 5 Cinemática - dinámica
- 6 La estructura espiral
- 7 Barras
- 8 El origen de las S0

# Distribución de poblaciones estelares



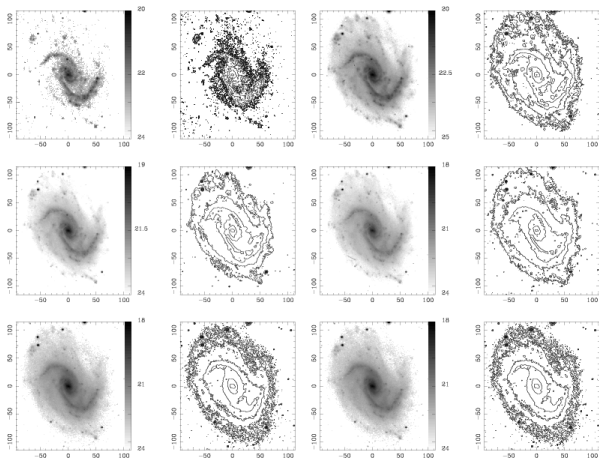
(del Río & Cepa, 2003, A&A, 400, 421)

|     |       |
|-----|-------|
| $U$ | $B$   |
| $V$ | $R$   |
| $I$ | $B-I$ |

NGC 157  
(SABbc)



# Distribución de poblaciones estelares



(del Río & Cepa, 2003, A&A, 400, 421)

|     |         |
|-----|---------|
| $U$ | $B$     |
| $V$ | $R$     |
| $I$ | $B - I$ |

NGC 895  
(Scd)

# Distribución de poblaciones estelares

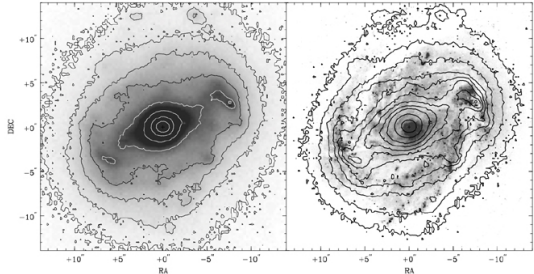
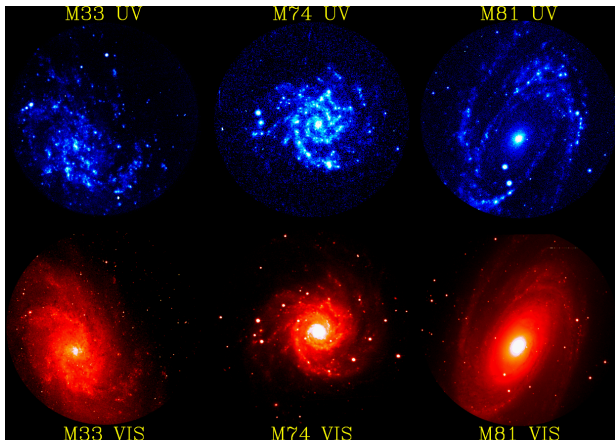


Fig 5.9 (J. Knapen) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

Región central de M 100 (NGC 4321) en óptico (HST, *izq.*) en banda  $K$  ( $2.2 \mu\text{m}$ ) (*centro*) y en  $H_{\alpha}$  (*der.*) + contornos  $K$ .

# Regiones de formación estelar

Observaciones en ultravioleta lejano



ultravioleta  
lejano

(UIT)

$\lambda = 1521 \text{ \AA}$

óptico

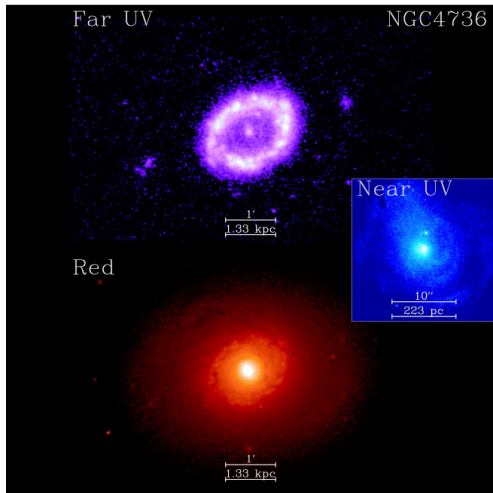
Scd

Sc

Sb

# Regiones de formación estelar

Observaciones en ultravioleta lejano



M 94  
(Sab)

FUV (UIT)  $\lambda = 1521 \text{ \AA}$   
NUV (HST)  $\lambda = 2300 \text{ \AA}$

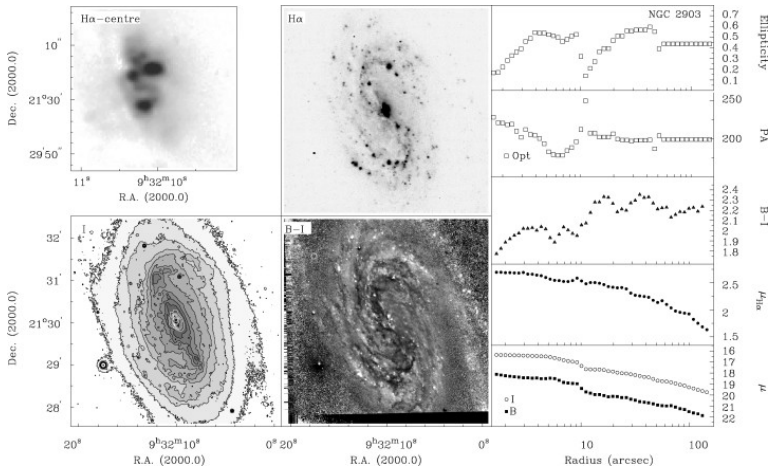
(Waller et al. 2001, AJ, 121,  
1395)

## Cap. 4: Galaxias espirales y lenticulares

- 1 Distribución de brillo superficial
- 2 La secuencia de las galaxias de disco
- 3 Distribución de poblaciones estelares
- 4 El gas**
- 5 Cinemática - dinámica
- 6 La estructura espiral
- 7 Barras
- 8 El origen de las S0

# Regiones de formación estelar

Emisión H $\alpha$

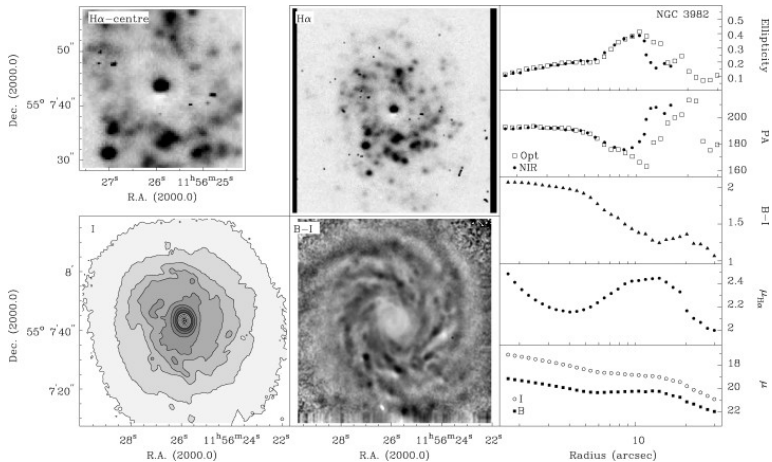


NGC 2903 (SBd)

(Knapen et al., 2002, MNRAS, 337, 808)

# Regiones de formación estelar

Emisión  $H\alpha$

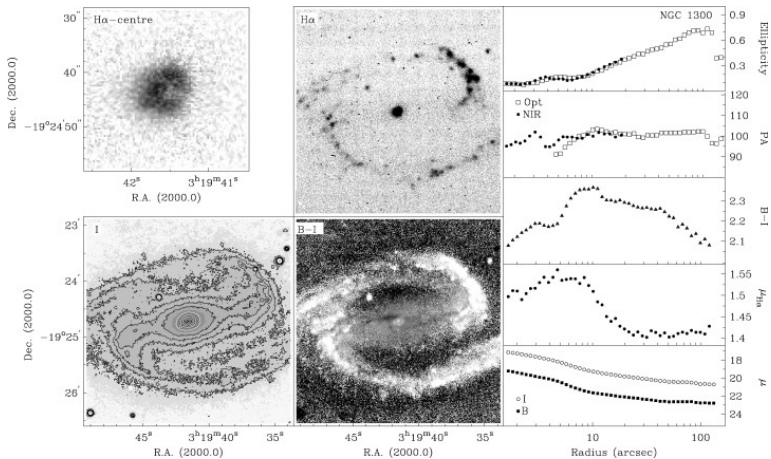


NGC 3982 (SABb)

(Knapen et al., 2002, MNRAS, 337, 808)

# Regiones de formación estelar

Emisión  $H\alpha$



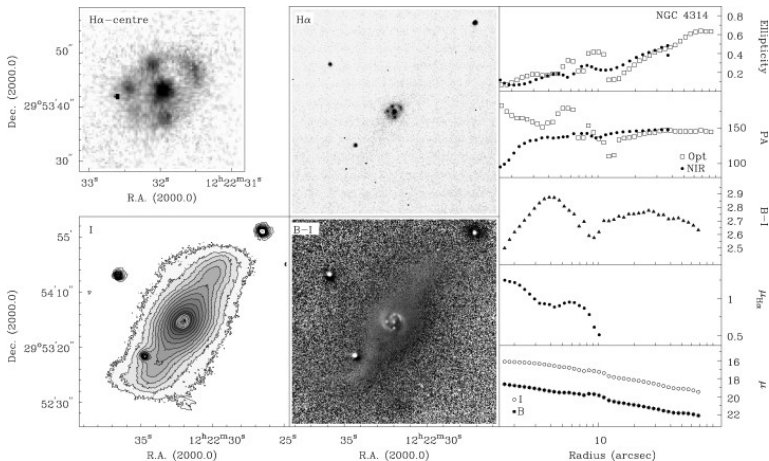
NGC 1300 (SBbc)

(Knapen et al., 2002, MNRAS, 337, 808)



# Regiones de formación estelar

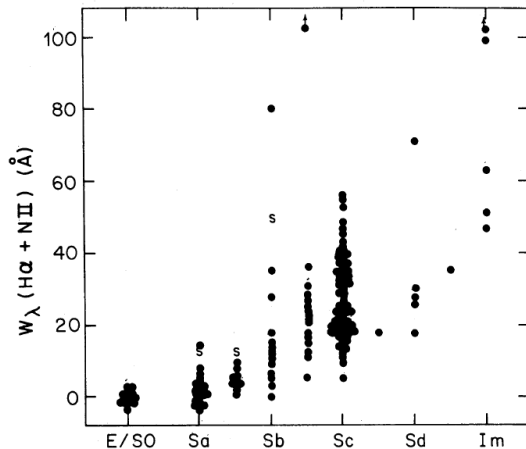
Emisión  $H\alpha$



NGC 4314 (SBa)

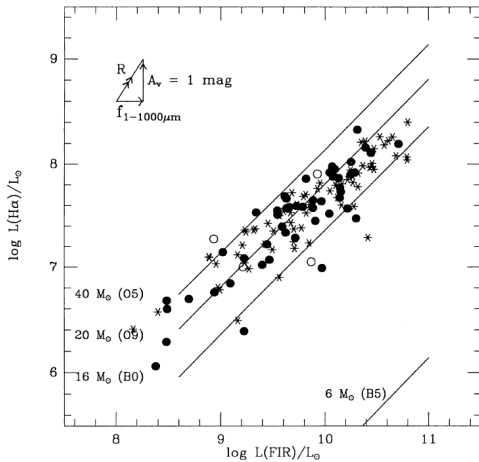
(Knapen et al., 2002, MNRAS, 337, 808)

# Relación $H\alpha$ - tipo de Hubble



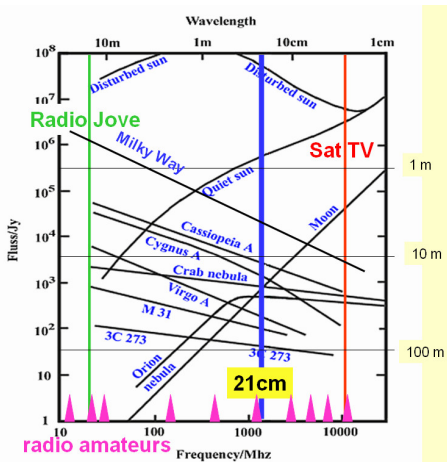
(Kennicutt & Kent 1983, AJ, 88, 1094)

# Relación $H\alpha$ - FIR



(Devereux & Young 1990, ApJ, 350, L25)

# Espectros de fuentes térmicas y no térmicas



Poder resolvente de un telescopio:

$$\theta \simeq \frac{\lambda}{D}$$

$$\begin{aligned}\lambda_{\text{radio}} &\sim 10^{-1} \text{ m} \\ \lambda_{\text{óptico}} &\sim 5 \times 10^{-7} \text{ m}\end{aligned}$$

para  $\lambda = 21 \text{ cm}$ :

| Nombre     | $D$ (m) | $\theta$ (arcmin) |
|------------|---------|-------------------|
| IAR        | 30      | 24                |
| Efflesberg | 100     | 7                 |
| Arecibo    | 300     | 2                 |

Para  $\theta = 1''$  (típico en el óptico)  $\rightarrow D \sim 40 \text{ km}$ .

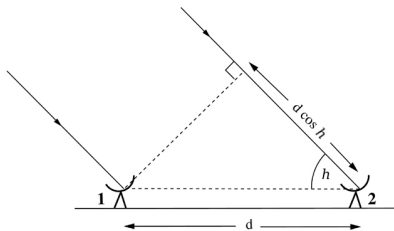


Fig 5.11 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



$$S_1 \propto \cos \frac{2\pi ct}{\lambda} \quad S_2 \propto \cos \left( 2\pi \frac{ct - d \cos(h)}{\lambda} \right).$$

Luego:

$$S_A - S_B \propto \cos \left( \frac{2\pi d \cos(h_A)}{\lambda} \right) - \cos \left( \frac{2\pi d \cos(h_B)}{\lambda} \right)$$

que es máxima cuando:

$$\frac{2\pi d \cos(h_A)}{\lambda} - \frac{2\pi d \cos(h_B)}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta \cos h = (2k + 1) \pi,$$

con  $k$  entero.

$$S_1 \propto \cos \frac{2\pi ct}{\lambda} \quad S_2 \propto \cos \left( 2\pi \frac{ct - d \cos(h)}{\lambda} \right).$$

Luego:

$$S_A - S_B \propto \cos \left( \frac{2\pi d \cos(h_A)}{\lambda} \right) - \cos \left( \frac{2\pi d \cos(h_B)}{\lambda} \right)$$

que es máxima cuando:

$$\frac{2\pi d \cos(h_A)}{\lambda} - \frac{2\pi d \cos(h_B)}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta \cos h = (2k + 1) \pi,$$

con  $k$  entero.



$$S_1 \propto \cos \frac{2\pi ct}{\lambda} \quad S_2 \propto \cos \left( 2\pi \frac{ct - d \cos(h)}{\lambda} \right).$$

Luego:

$$S_A - S_B \propto \cos \left( \frac{2\pi d \cos(h_A)}{\lambda} \right) - \cos \left( \frac{2\pi d \cos(h_B)}{\lambda} \right)$$

que es máxima cuando:

$$\frac{2\pi d \cos(h_A)}{\lambda} - \frac{2\pi d \cos(h_B)}{\lambda} = \frac{2\pi d}{\lambda} \Delta \cos h = (2k + 1) \pi,$$

con  $k$  entero.

La mínima separación que maximiza la señal correlacionada, se da para  $k = 0$ ,  $\rightarrow$  dos fuentes separadas en el cielo por  $\Delta \cos(h) = \lambda/(2d) \rightarrow \sin(h) \Delta h = \lambda/(2d)$ .

De modo que el poder resolvente  $\theta = 2\Delta h$ , nos queda

$$\theta = 2\Delta h = \frac{\lambda}{d \sin(h)}.$$

La mínima separación que maximiza la señal correlacionada, se da para  $k = 0$ ,  $\rightarrow$  dos fuentes separadas en el cielo por  $\Delta \cos(h) = \lambda/(2d) \rightarrow \sin(h) \Delta h = \lambda/(2d)$ .

De modo que el poder resolvente  $\theta = 2\Delta h$ , nos queda

$$\theta = 2\Delta h = \frac{\lambda}{d \sin(h)}.$$

# Hidrógeno neutro

## Distribución espacial

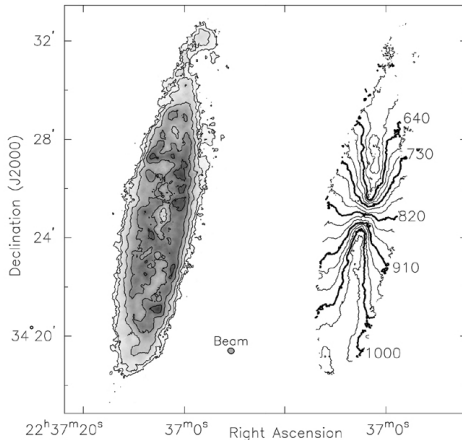


Fig 5.13 (Thorley & Bambic) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

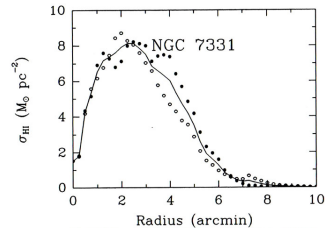


Fig 5.14 (K. Boggan) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

# Hidrógeno neutro

Distribución espacial

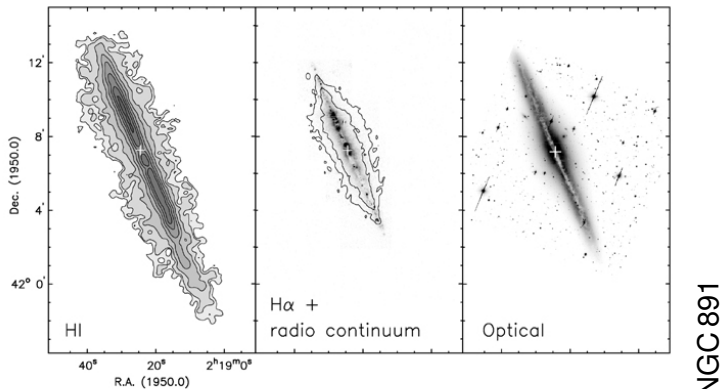


Fig 5.16 (Swaters & Rand) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

# Hidrógeno neutro

Anillos polares

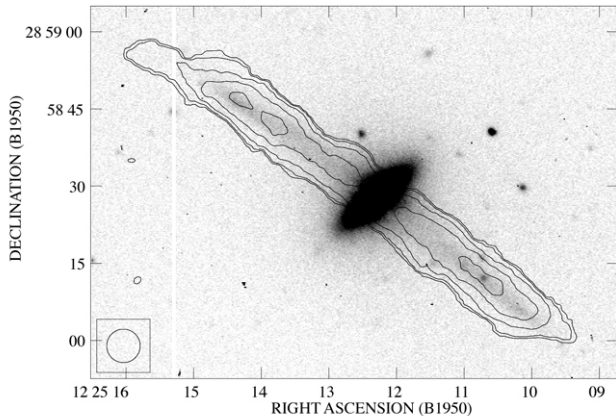


Fig 5.17 (A. Cox) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

## Cap. 4: Galaxias espirales y lenticulares

- 1 Distribución de brillo superficial
- 2 La secuencia de las galaxias de disco
- 3 Distribución de poblaciones estelares
- 4 El gas
- 5 Cinemática - dinámica**
- 6 La estructura espiral
- 7 Barras
- 8 El origen de las S0

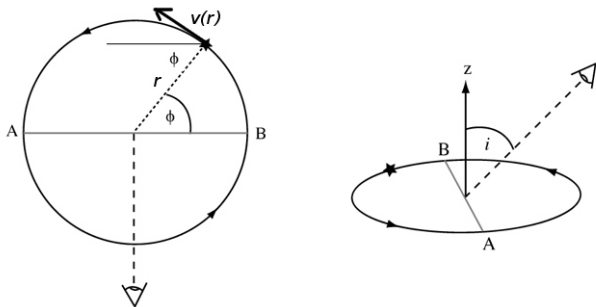


Fig 5.18 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

$$V_r(R, i) = V_{\text{sis}} + V(R) \sin(i) \cos(\psi)$$



# La curva de rotación

Diagrama de araña

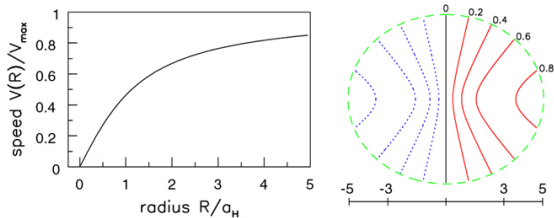


Fig 5.19 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

$$4\pi G \rho_H(r) = \frac{V_H^2}{r^2 + \sigma_H^2}$$

# La curva de rotación

Diagrama de araña

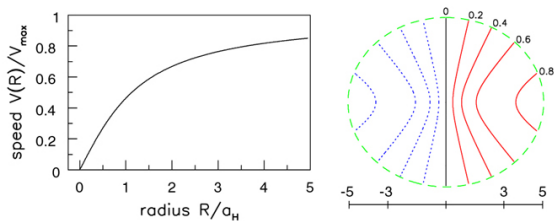
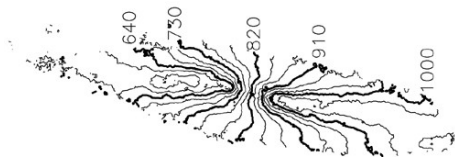


Fig 5.19 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

$$4\pi G \rho_H(r) = \frac{V_H^2}{r^2 + \sigma_H^2}$$



NGC 7331

Diagrama de  
araña

# La curva de rotación

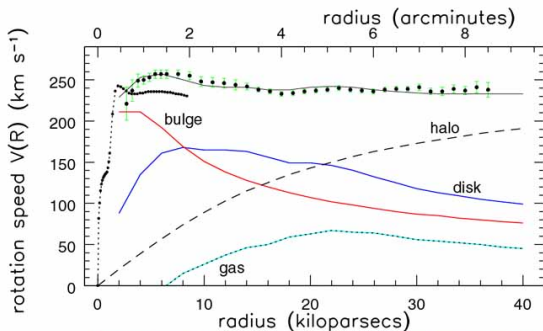


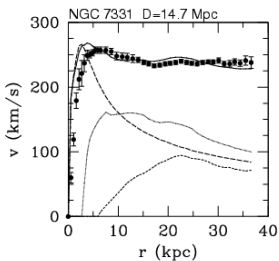
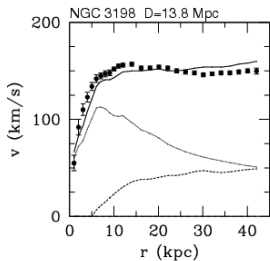
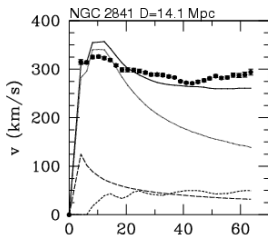
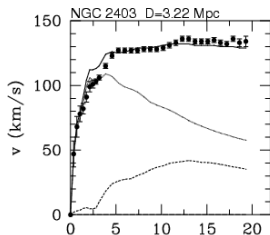
Fig 5.20 (Begeman, Sofue) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

NGC 7331

$$V(R) \approx \text{cte} \Rightarrow \frac{V(R)}{R} \text{ es decreciente}$$

$\Rightarrow$  rotación diferencial

# La curva de rotación



Modified Newton  
Dynamics  
(MOND)

NGC 2403 (Scd),  
NGC 2841 (Sb),  
NGC 3198 (Sc) y  
NGC 7331 (Sb)

(Bottema et al. 2002, A&A  
393, 453)

# La relación Tully-Fisher

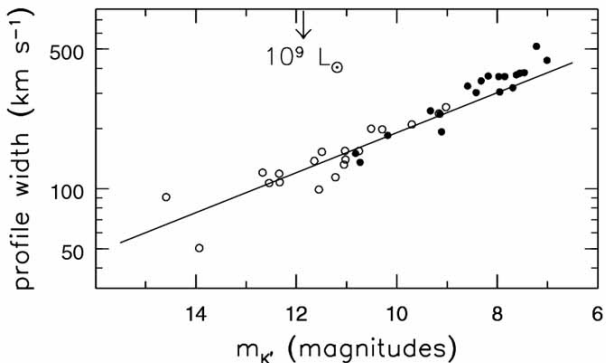


Fig 5.23 (M. Verheijen) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

## Cap. 4: Galaxias espirales y lenticulares

- 1 Distribución de brillo superficial
- 2 La secuencia de las galaxias de disco
- 3 Distribución de poblaciones estelares
- 4 El gas
- 5 Cinemática - dinámica
- 6 La estructura espiral**
- 7 Barras
- 8 El origen de las S0

## Tipos de espirales



NGC 2903 (Sc)

*grand design*

Brazos bien definidos



NGC 7793 (Sbc)

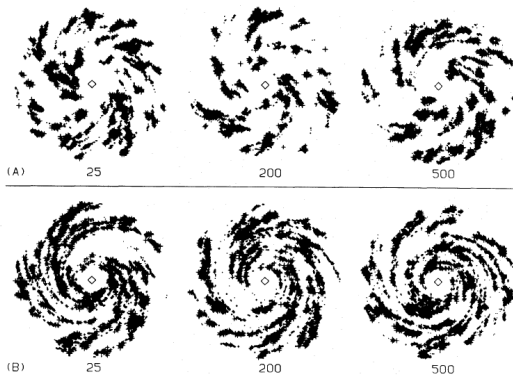
*flocculent*

Varios fragmentos de brazos

# Espirales tipo “grumoso” (*flocculent*)

Formación estelar estocástica autopropagada (SSPSF)

(Gerola & Seiden 1978, ApJ, 223, 129)





# Espirales tipo *grand design*

$$\cos \{m[\phi + f(R, t)]\} = 1$$

$$\frac{1}{\tan i} = \left| R \frac{\partial \phi}{\partial R} \right| = \left| R \frac{\partial f}{\partial R} \right|$$

$i$  (pitch angle)    Sa:  $\langle i \rangle \simeq 5^\circ$      $\rightarrow$     Sc:  $10 < i < 30^\circ$

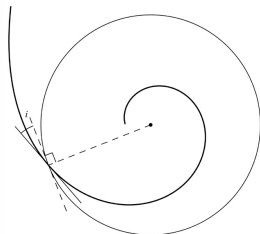
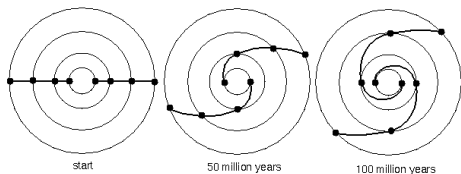


Fig 5.28 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

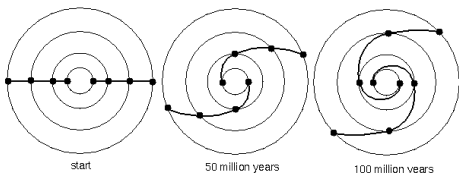
# Espirales tipo “gran diseño” (*grand design*)



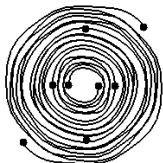
*Differential rotation:* stars near the center take less time to orbit the center than those farther from the center. Differential rotation can create a spiral pattern in the disk in a short time.

(Copyrighted, 1998 – 2006 by Nick Strobel)

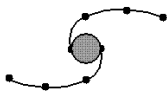
# Espirales tipo “gran diseño” (*grand design*)



*Differential rotation:* stars near the center take less time to orbit the center than those farther from the center. Differential rotation can create a spiral pattern in the disk in a short time.



**Prediction:** 500 million years

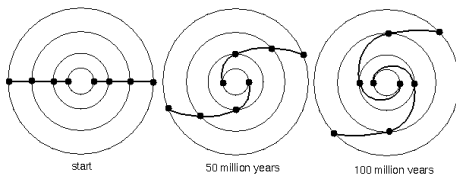


**Observation:** 15,000 million years

The “winding problem”: because of differential rotation, the spiral arms should be so wound up after a short time that the spiral structure has disappeared. Observation contradicts the prediction. What keeps the spiral’s loose?

(Copyrighted, 1998 – 2006 by Nick Strobel)

# Espirales tipo “gran diseño” (*grand design*)



*Differential rotation:* stars near the center take less time to orbit the center than those farther from the center. Differential rotation can create a spiral pattern in the disk in a short time.

- $t=0, \phi = \phi_0 \quad \Omega(R) = v(R)/R$
- Luego de un tiempo  $t: \phi = \phi_0 + \Omega(R)t \rightarrow f(R, t) = -\phi_0 - \Omega(R)t$
- $\Omega(R) > 0 \rightarrow f(R, t)$  es creciente: espiral trailing que se va apretando con el transcurso del tiempo!

# Espiral cinemática

$R_g$ : radio guía.

$\Omega(R_g)$ : velocidad angular del centro guía.

$\phi_g = \Omega(R_g)t$ : acimut del centro guía.

$R = R_g + x = R_g + X \cos(\kappa t + \psi)$ : distancia radial de una estrella.

$X$ : amplitud del movimiento radial de la estrella.

$\kappa$ : frecuencia epicíclica.

$\psi$ : indica la posición inicial.

Si tenemos estrellas con centro guía  $R_g$ , y se cumple que  $\psi = 2\phi_g(0)$  para cada una de ellas  
→ formarán un óvalo con su eje mayor sobre el eje x.

Para un tiempo  $t$  posterior, el centro guía habrá girado y se encontrará en  $\phi_g(t) = \phi_g(0) + \omega(R_g)t$ .

A su vez, para cada estrella:

$$R = R_g + x = X \cos[\kappa t + 2(\phi_g(t) - \Omega(R_g)t)] =$$

$$X \cos[(2\Omega(R_g) - \kappa)t - 2\phi_g(t)]$$

El eje mayor apunta ahora a:

$$\phi = (\Omega(R_g) - \frac{\kappa}{2})t \equiv \Omega_p t$$

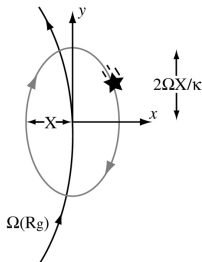


Fig 3.9 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

# Espiral cinemática

$R_g$ : radio guía.

$\Omega(R_g)$ : velocidad angular del centro guía.

$\phi_g = \Omega(R_g)t$ : acimut del centro guía.

$R = R_g + x = R_g + X \cos(\kappa t + \psi)$ : distancia radial de una estrella.

$X$ : amplitud del movimiento radial de la estrella.

$\kappa$ : frecuencia epicíclica.

$\psi$ : indica la posición inicial.

Si tenemos estrellas con centro guía  $R_g$ , y se cumple que  $\psi = 2\phi_g(0)$  para cada una de ellas  
→ formarán un óvalo con su eje mayor sobre el eje x.

Para un tiempo  $t$  posterior, el centro guía habrá girado y se encontrará en  $\phi_g(t) = \phi_g(0) + \omega(R_g)t$ .

A su vez, para cada estrella:

$$R = R_g + x = X \cos[\kappa t + 2(\phi_g(t) - \Omega(R_g)t)] =$$
$$X \cos[(2\Omega(R_g) - \kappa)t - 2\phi_g(t)]$$

El eje mayor apunta ahora a:

$$\phi = (\Omega(R_g) - \frac{\kappa}{2})t \equiv \Omega_p t$$

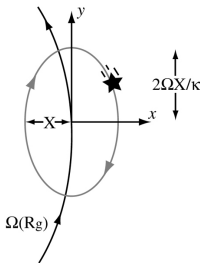


Fig 3.9 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

# Espiral cinemática

$R_g$ : radio guía.

$\Omega(R_g)$ : velocidad angular del centro guía.

$\phi_g = \Omega(R_g)t$ : acimut del centro guía.

$R = R_g + x = R_g + X \cos(\kappa t + \psi)$ : distancia radial de una estrella.

$X$ : amplitud del movimiento radial de la estrella.

$\kappa$ : frecuencia epicíclica.

$\psi$ : indica la posición inicial.

Si tenemos estrellas con centro guía  $R_g$ , y se cumple que  $\psi = 2\phi_g(0)$  para cada una de ellas  
 $\rightarrow$  formarán un óvalo con su eje mayor sobre el eje  $x$ .

Para un tiempo  $t$  posterior, el centro guía habrá girado y se encontrará en  $\phi_g(t) = \phi_g(0) + \omega(R_g)t$ .

A su vez, para cada estrella:

$$R = R_g + x = X \cos[\kappa t + 2(\phi_g(t) - \Omega(R_g)t)] =$$

$$X \cos[(2\Omega(R_g) - \kappa)t - 2\phi_g(t)]$$

El eje mayor apunta ahora a:

$$\phi = (\Omega(R_g) - \frac{\kappa}{2})t \equiv \Omega_p t$$

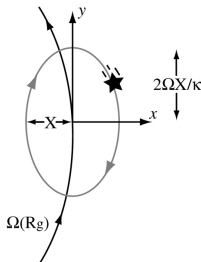


Fig 3.9 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

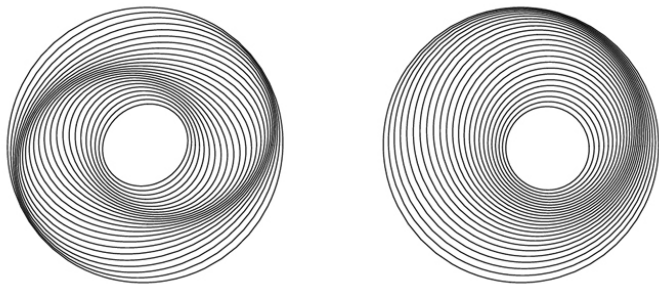


Fig 5.29 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



# Ondas de densidad

Resonancias de Lindblad

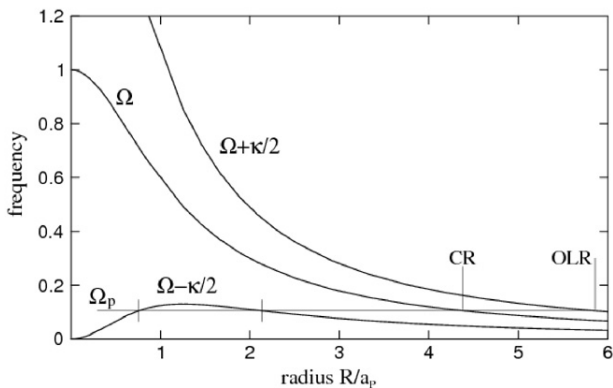
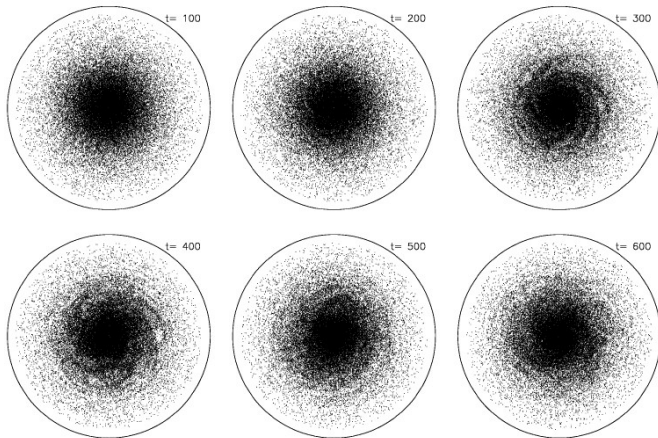


Fig 5.30 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

# La onda espiral



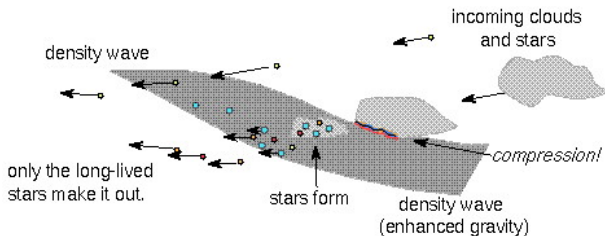
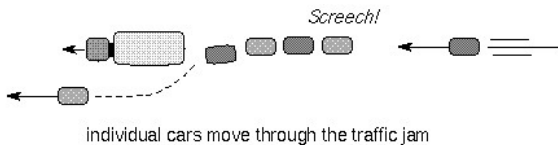
(Sellwood, J. A. 2011, MNRAS, 410, 1637)

¿Qué es lo que mantiene la onda?

- fuerza interna debida a barra en rotación
- galaxia compañera



# Ondas de densidad



# Ondas de densidad

Gas - polvo

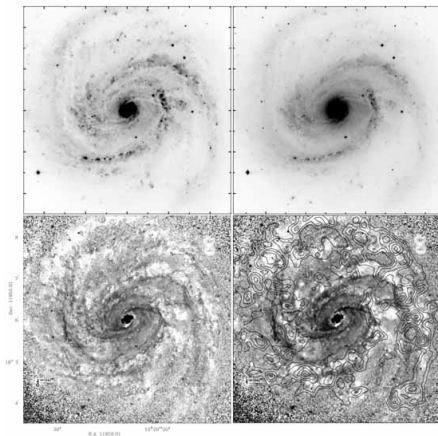


Fig 5.26 (J. Knapen) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

## Cap. 4: Galaxias espirales y lenticulares

- 1 Distribución de brillo superficial
- 2 La secuencia de las galaxias de disco
- 3 Distribución de poblaciones estelares
- 4 El gas
- 5 Cinemática - dinámica
- 6 La estructura espiral
- 7 Barras**
- 8 El origen de las S0



Fig 5.32 (WIYN) 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007

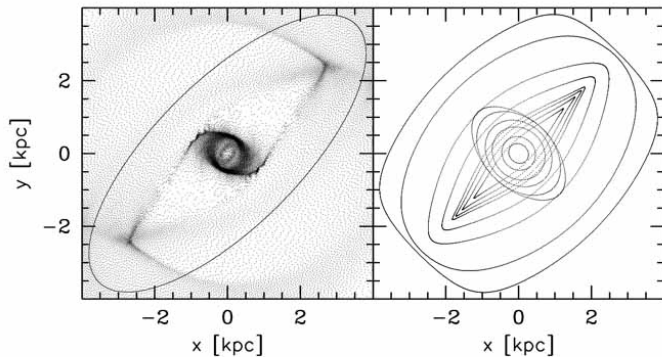


Fig 5.33 'Galaxies in the Universe' Sparke/Gallagher CUP 2007



# Cap. 4: Galaxias espirales y lenticulares

- 1 Distribución de brillo superficial
- 2 La secuencia de las galaxias de disco
- 3 Distribución de poblaciones estelares
- 4 El gas
- 5 Cinemática - dinámica
- 6 La estructura espiral
- 7 Barras
- 8 El origen de las S0**

## Similitudes entres S y S0:

- componentes estructurales: bulbos, pseudo-bulbos, discos, barras, anillos, etc.

## Similitudes entre E y S0:

- poblaciones estelares viejas, sin gas frío ni polvo.
- sin estructura espiral.

## Observaciones:

- en los ambientes de alta densidad, aumenta el número de S0 y disminuye el de S (Dressler et al., 1980).
- la frecuencia de las S disminuye desde  $z = 1$ , mientras que el de las S0 aumenta (Dressler et al., 1997).

## Similitudes entres S y S0:

- componentes estructurales: bulbos, pseudo-bulbos, discos, barras, anillos, etc.

## Similitudes entre E y S0:

- poblaciones estelares viejas, sin gas frío ni polvo.
- sin estructura espiral.

## Observaciones:

- en los ambientes de alta densidad, aumenta el número de S0 y disminuye el de S (Dressler et al., 1980).
- la frecuencia de las S disminuye desde  $z = 1$ , mientras que el de las S0 aumenta (Dressler et al., 1997).

## Similitudes entre S y S0:

- componentes estructurales: bulbos, pseudo-bulbos, discos, barras, anillos, etc.

## Similitudes entre E y S0:

- poblaciones estelares viejas, sin gas frío ni polvo.
- sin estructura espiral.

## Observaciones:

- en los ambientes de alta densidad, aumenta el número de S0 y disminuye el de S (Dressler et al., 1980).
- la frecuencia de las S disminuye desde  $z = 1$ , mientras que el de las S0 aumenta (Dressler et al., 1997).

## Escenarios:

- 1- las galaxias S0 son S que han sido suavemente despojadas de su gas, o bien, han consumido todo el gas frío:
  - Hostigamiento galáctico (*galactic harassment*): efectos de marea
  - Robo del gas por la presión del medio (*ram pressure stripping*): efecto del gas caliente intracúmulo

Problema (Sidney van den Bergh, 2009): existen S0 en el campo, y muchas en grupos poco densos!

## Escenarios:

- 1- las galaxias S0 son S que han sido suavemente despojadas de su gas, o bien, han consumido todo el gas frío:
  - Hostigamiento galáctico (*galactic harassment*): efectos de marea
  - Robo del gas por la presión del medio (*ram pressure stripping*): efecto del gas caliente intracúmulo

Problema (Sidney van den Bergh, 2009): existen S0 en el campo, y muchas en grupos poco densos!

## Escenarios posibles:

- 2- encuentros, fusiones menores ( $<1:7$ ) y acreciones sobre los discos de la S pueden transformarlas en S0 (Bekki et al., 1998; Bournaud et al 2005; Diaz et al. 2018) → esto actúa también en ambientes de baja densidad!
- 3- las galaxias S0 surgen como tales (Sil'chenko 2013; Saha et al., 2018) → puede darse la transformación de S0 a S por acreción de gas fresco!

## Escenarios posibles:

- 2- encuentros, fusiones menores ( $<1:7$ ) y acreciones sobre los discos de la S pueden transformarlas en S0 (Bekki et al., 1998; Bournaud et al 2005; Diaz et al. 2018) → esto actúa también en ambientes de baja densidad!
- 3- las galaxias S0 surgen como tales (Sil'chenko 2013; Saha et al., 2018) → puede darse la transformación de S0 a S por acreción de gas fresco!



## Escenarios posibles:

- 2- encuentros, fusiones menores ( $<1:7$ ) y acreciones sobre los discos de la S pueden transformarlas en S0 (Bekki et al., 1998; Bournaud et al 2005; Diaz et al. 2018) → esto actúa también en ambientes de baja densidad!
- 3- las galaxias S0 surgen como tales (Sil'chenko 2013; Saha et al., 2018) → puede darse la transformación de S0 a S por acreción de gas fresco!

- *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).