

# Sistemas Estelares

curso 2016

## Galaxias

Imágenes y gráficos de apoyo a las clases

Facultad de Ciencias Astronómicas y Geofísicas



Universidad Nacional de La Plata, Argentina



*Profesor: Dr. Sergio A. Cellone*

*Esto no es un apunte de clases*

# Galaxias

- 1 Introducción histórica
  - Primeros tiempos
  - El Gran Debate
- 2 Clasificación morfológica
  - La secuencia de Hubble
  - Masa y poblaciones estelares
- 3 Estructura
  - Forma intrínseca de las galaxias elípticas
  - Efectos de selección
  - Fotometría superficial
  - Ajuste de perfiles

# Galaxias

- 1 **Introducción histórica**
  - Primeros tiempos
  - El Gran Debate
- 2 **Clasificación morfológica**
  - La secuencia de Hubble
  - Masa y poblaciones estelares
- 3 **Estructura**
  - Forma intrínseca de las galaxias elípticas
  - Efectos de selección
  - Fotometría superficial
  - Ajuste de perfiles

Primeros tiempos



## Introducción histórica

Ver: *The historical quest for the nature of spiral nebulae*  
(Ferne, J. D. 1970, PASP, 82, 1189).



### M31

Al-Sufi (Persia, s.X): 1er. registro.

1612: Simón Marius (Mayer) la describe como  
“*vela brillando a través de material translúcido.*”

**1755** - Immanuel Kant:

“Hipótesis nebular” para el origen del Sistema Solar

Las “nebulosas” son “universos islas” semejantes a la VL.

Pierre-Simon Laplace: difunde la hipótesis nebular.

**1761** - John Lambert: VL compuesta por infinidad de estrellas lejanas; puede haber otros sistemas no detectados.



**1784** – William Herschel:

Conteos estelares → VL es disco grueso, diámetro  $\approx 800 d_S = 6.8 \text{ AL}$  (luego 20 AL).

Resuelve en estrellas objetos nebulosos (catálogo Messier).

Concluye que *todas* las nebulosas son estelares.

**Fines s.XVIII: teoría de *universos islas* muy difundida**

**1790** – William Herschel:

Descubre asociación entre nebulosa planetaria  
y su estrella central.



**1820:** Ya no estaba tan seguro ...

*“Más allá de los límites de nuestro sistema,  
todo es oscuridad.”*

**Principios s.XIX: crece la popularidad  
de la hipótesis nebular de Laplace, y  
decae la de los universos islas.**

**1840** – W. Parsons, 3er Conde de Rosse:  
nuevo método para templar espejos →  
telescopio de 1.8m de diámetro  
(*Leviatán de Parsonstown*).

Descubre estructura espiral en M51  
y la resuelve en estrellas.

Se sugiere estructura espiral para la VL.



**Medios s.XIX:**  
la teoría de los  
*universos islas* es  
nuevamente muy  
popular.

Mediados a fines s.XIX:

Mejores observaciones + fotografía: muchas “resoluciones” eran errores.

1830-1847 – John Herschel: coexisten sistemas estelares y verdaderas nebulosidades.

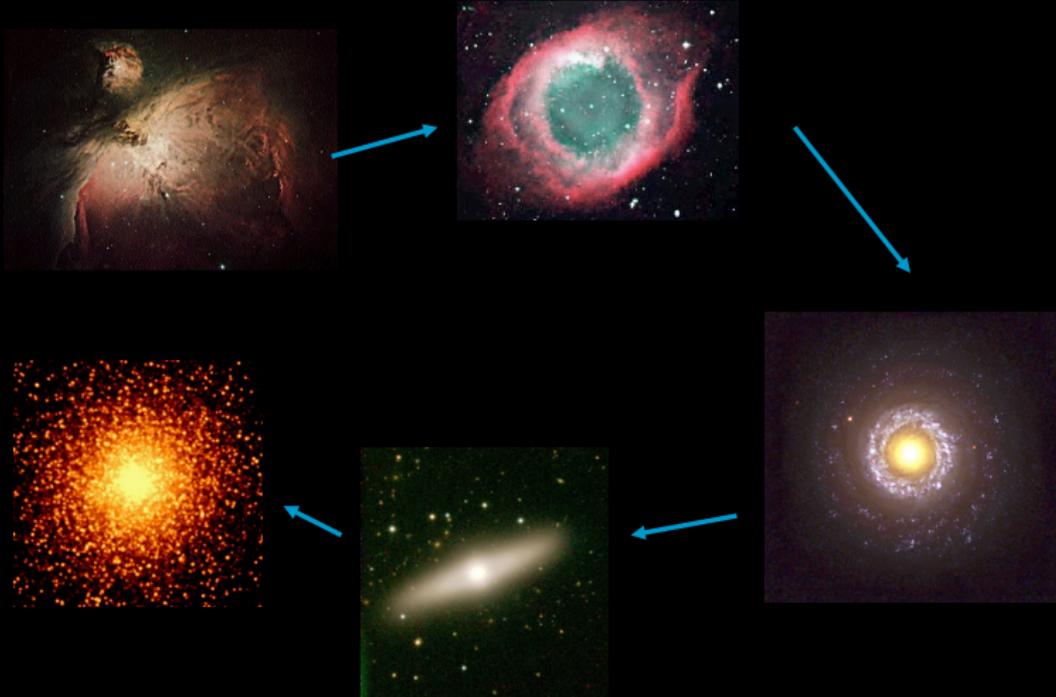
Crece la base de datos.

Espectroscopía: Orión → espectro gaseoso.

**Zona de exclusión:** cercana al plano de la VL, no se observan nebulosas → se concluye que deben estar asociadas.

**Fines s.XIX: la teoría de los *universos islas* está completamente desacreditada.**

**1911** - Se sugiere la siguiente "secuencia evolutiva":



## Principios s.XX:

### Evidencias a favor y en contra de universos islas

- Velocidades radiales → mayoría positivas y grandes.
- Correlación  $v_r$  – magnitud (Wirtz, 1922).
- Conteos de estrellas → diámetro VL  $\approx$  10000 AL.
- Distribución de cúmulos globulares.
- Novas → distancias de hasta 20 millones AL.
- Movimientos propios y rotación de espirales (errores).
- Zona de exclusión.

## Principios s.XX:

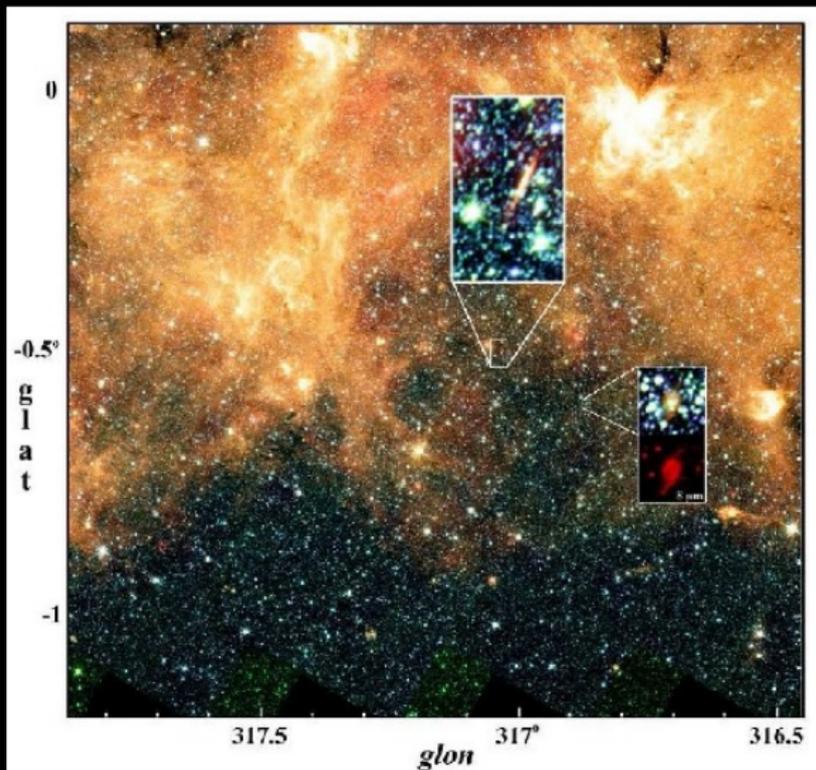
### Evidencias a favor y en contra de universos islas

- Velocidades radiales → mayoría positivas y grandes.
- Correlación  $v_r$  - magnitud (Wirtz, 1922).
- Conteos de estrellas → diámetro VL  $\approx$  10000 AL.
- Distribución de cúmulos globulares.
- Novas → distancias de hasta 20 millones AL.
- Movimientos propios y rotación de espirales (errores).
- Zona de exclusión.

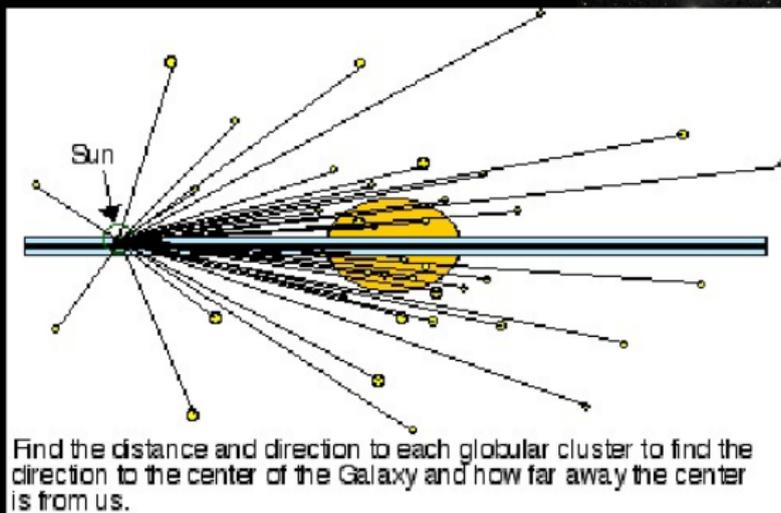
El Gran Debate



## El Gran Debate



## El Gran Debate



## 1920: El "Gran Debate"

### Heber D. Curtis:

- La VL es chica, con el Sol cerca del centro.
- Las espirales son galaxias (universos islas)

### Harlow Shapley:

- La VL es grande, con el Sol lejos del centro.
- Las espirales son chicas y cercanas, no son universos islas.



Harlow Shapley



Heber D. Curtis

The Shapley – Curtis Debate in 1920

The Scale of the Universe

## 1920: El "Gran Debate"

### Heber D. Curtis:

- La VL es chica, con el Sol cerca del centro.
- Las espirales son galaxias (universos islas)

### Harlow Shapley:

- La VL es grande, con el Sol lejos del centro.
- Las espirales son chicas y cercanas, no son universos islas.



Harlow Shapley



Heber D. Curtis

The Shapley – Curtis Debate in 1920

The Scale of the Universe

**1925** – Edwin Hubble descubre estrellas cefeidas en M31 y M33.

Mide sus distancias y queda establecido que ambas son **galaxias** (universos islas).



**Nace la astronomía extragaláctica**

# Galaxias

1

## Introducción histórica

- Primeros tiempos
- El Gran Debate

2

## Clasificación morfológica

- La secuencia de Hubble
- Masa y poblaciones estelares

3

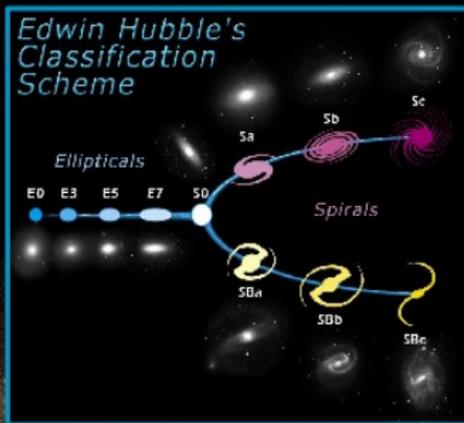
## Estructura

- Forma intrínseca de las galaxias elípticas
- Efectos de selección
- Fotometría superficial
- Ajuste de perfiles

## La secuencia de Hubble

# Clasificación morfológica

**NGC 5044**  
(E0)

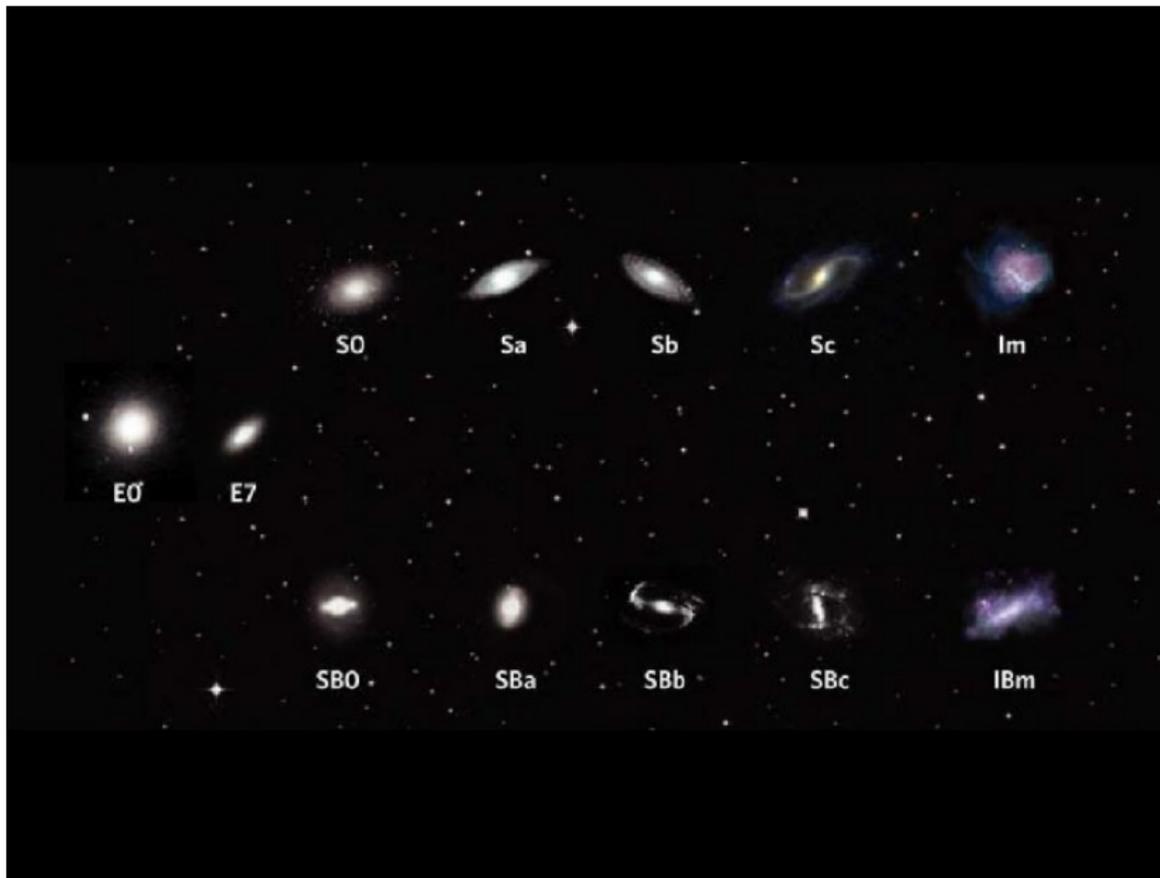


**NGC 5054**  
(Sb)





## La secuencia de Hubble





## Espirales

Componente esferoidal (bulbo) + disco importante

Normales  
(S)



Barradas  
(SB)



## La secuencia de Hubble

**Sa - Sb - Sc - Sd - Sm****M 33**  
(Scd)**M 31**  
(Sb)



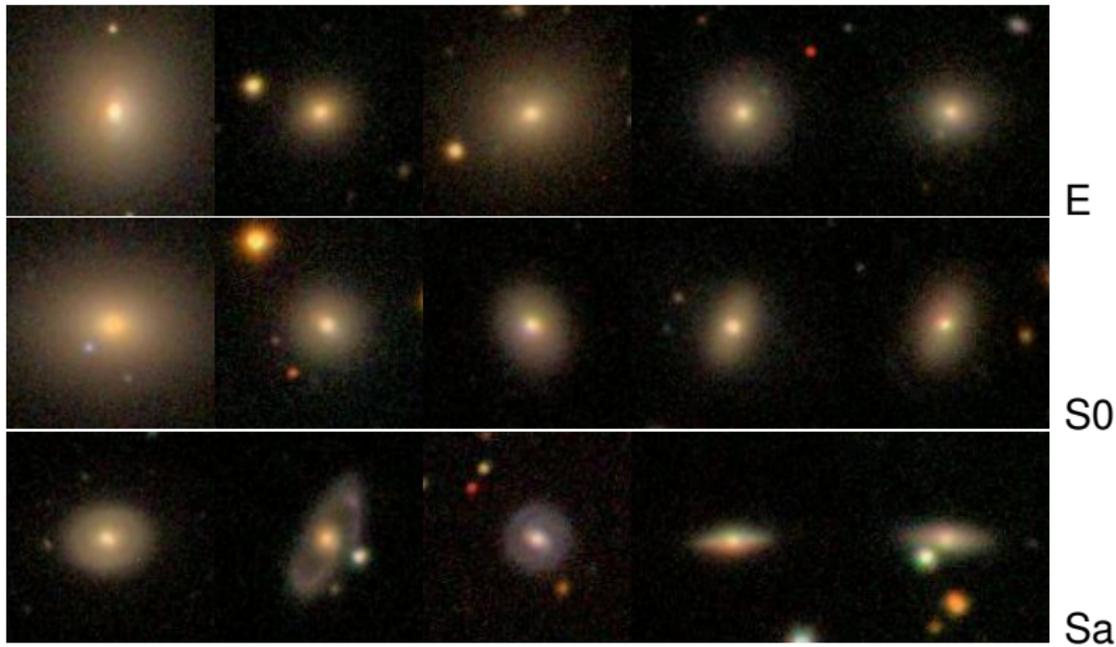
La secuencia de Hubble



La secuencia de Hubble

# Clasificación morfológica

## Sloan Digital Sky Survey (SDSS)



La secuencia de Hubble

# Clasificación morfológica

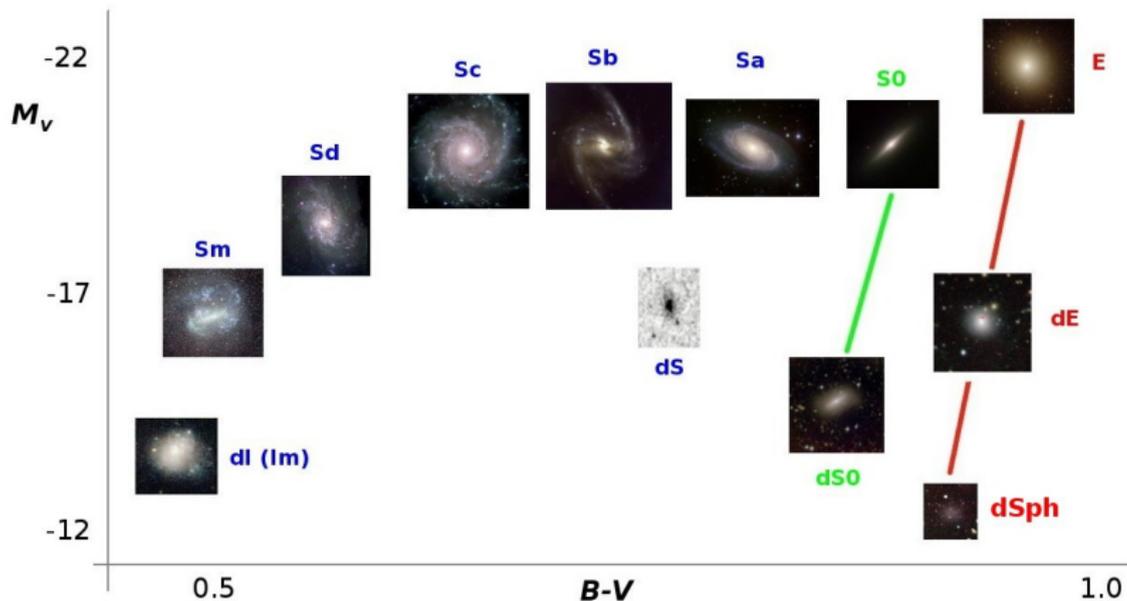
Sloan Digital Sky Survey (SDSS)



# Clasificación numérica

Hubble	E	E-S0	S0	S0/a	Sa	Sb	Sc	Sc-Irr	Irr
de V.	E	S0 <sup>-</sup>	S0 <sup>0</sup>	S0 <sup>+</sup>	Sa	Sb	Scd	Sdm	Im
<i>T</i>	-5	-3	-2	0	1	3	6	8	10

# Luminosidad - color - morfología



# Galaxias

1

## Introducción histórica

- Primeros tiempos
- El Gran Debate

2

## Clasificación morfológica

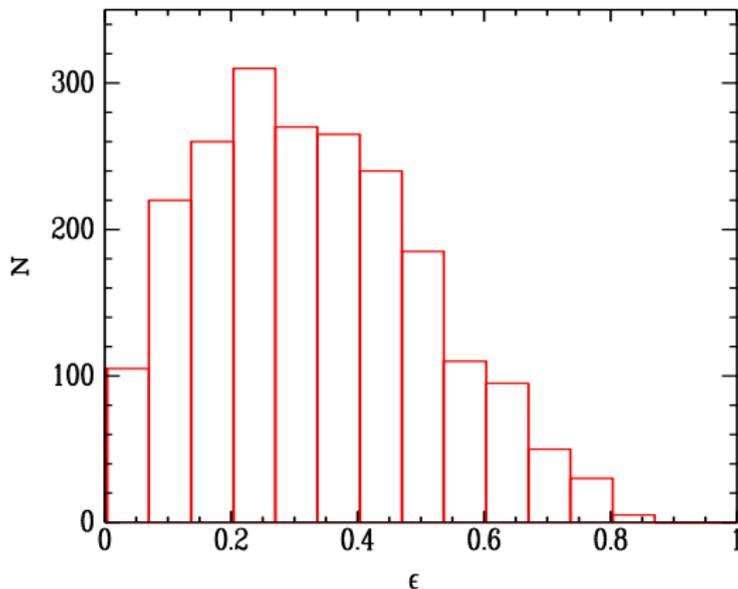
- La secuencia de Hubble
- Masa y poblaciones estelares

3

## Estructura

- Forma intrínseca de las galaxias elípticas
- Efectos de selección
- Fotometría superficial
- Ajuste de perfiles

# Obtención de la distribución intrínseca de elipticidades



Elipticidad  
observada:

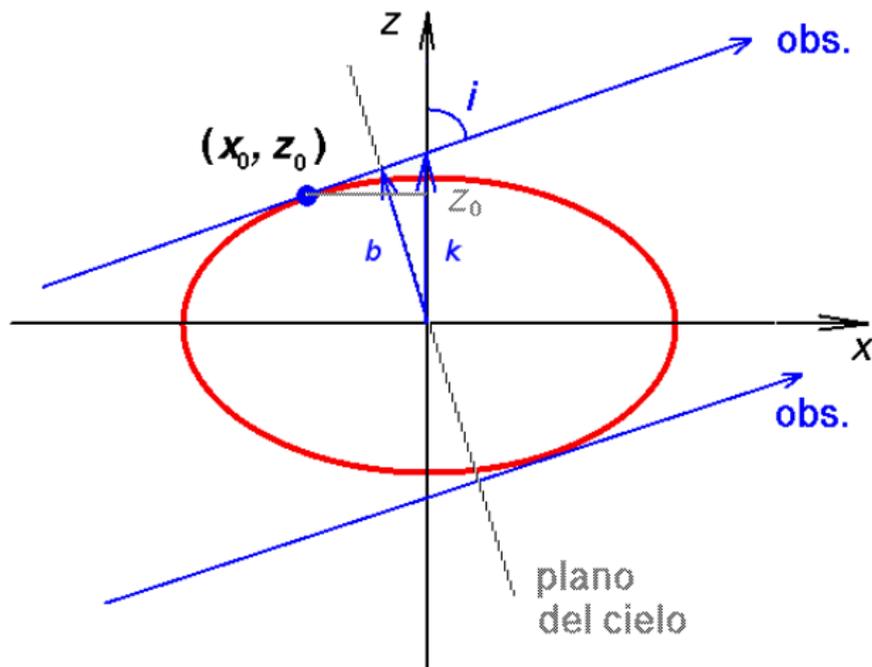
$$\epsilon = 1 - q = 1 - b/a.$$

Histograma de elipticidades de 2135 gxs. E

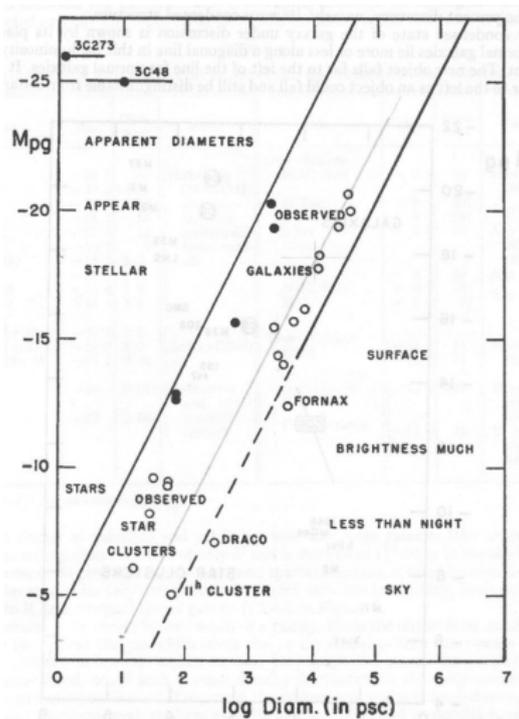
(García Lambas et al., 1992, MNRAS 258, 404).

Forma intrínseca de las galaxias elípticas

# Obtención de la distribución intrínseca de elipticidades

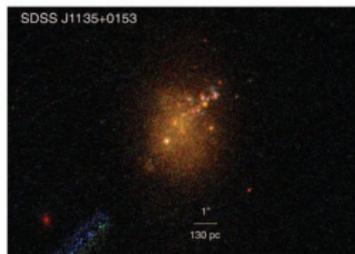
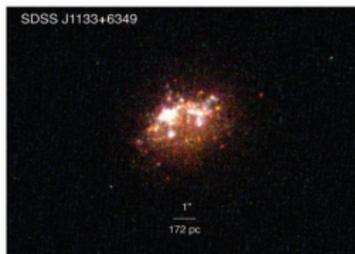
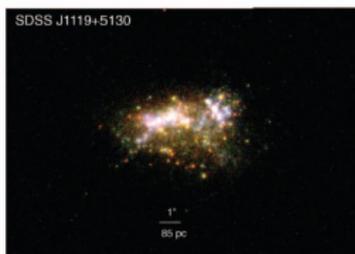


# El diagrama de Arp



(Arp, H. 1965, ApJ, 142, 402)

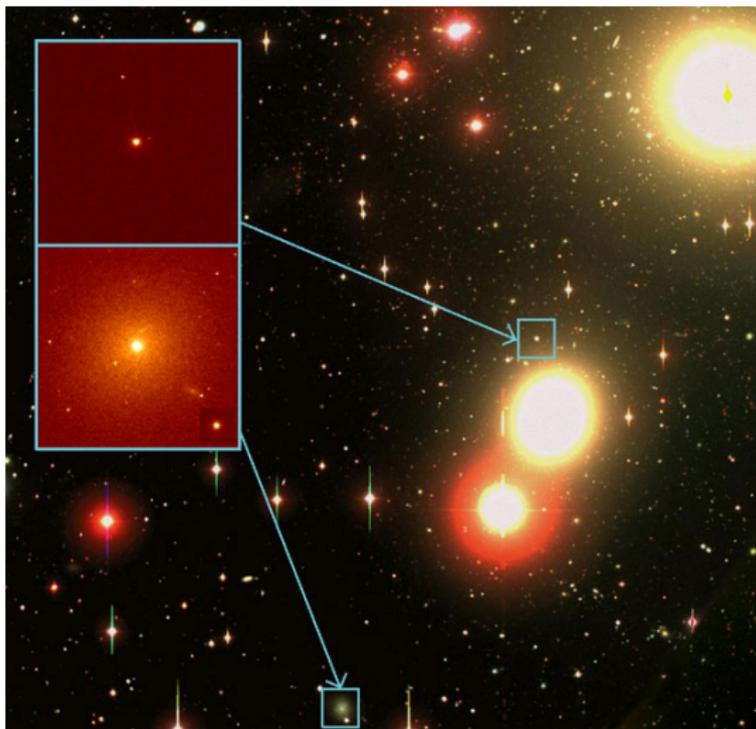
# El diagrama de Arp



ultracompact blue  
dwarf galaxies (UCBD)  
HST,  $U - V$  (narrow) –  
 $I$  imaging

(Corbin et al. 2006, ApJ, 651,  
861)

# El diagrama de Arp



ultra compact dwarf  
(UCD) galaxies

(Drinkwater et al. 2003, Nature,  
423, 519)

# Catálogos de galaxias

**RSA** (*Revised Shapley-Ames Cat. of Bright Galaxies*)

1200 gxs.  $B \lesssim 13$ . (Sandage & Tammann (1981)).

**RC3** (*3<sup>rd</sup> Reference Cat. of Bright Galaxies*) 23 000 gxs.

$B \lesssim 15.5$ . (de Vaucouleurs et al. (1991)).

**APM Bright Galaxies catalogue** 14 700 gxs.  $B < 16.4$  ( $\sim 10\%$  del cielo).

## 2dFGRS (*Two degree Field Galaxy Redshift Survey*)

<http://msowww.anu.edu/2dFGRS>

Última entrega: 30/jun/2003

500  $\square^\circ$  en 3 zonas.

Espectros de 245 591 objetos: 12 311 estrellas +  
125 QSO + 232 155 galaxias

Corr. al rojo confiables para 221 414 gxs.

# Catálogos de galaxias

SDSS (Sloan Digital Sky Survey - <http://www.sdss.org>)

## Fase IV - DR13 (Jun 2015)

- Imágenes:**
- 14 555  $\square^\circ$  ( $\gtrsim \frac{1}{3}$  del cielo)
  - 469 053 874 objetos detectados
    - 260 562 744 estrellas
    - 208 478 448 galaxias
    - 12 682 inciertos
- Espectros:**
- 4 266 444 espectros útiles
    - 2 401 952 galaxias
    - 477 161 QSO
    - 851 968 estrellas
    - 341 140 de cielo
    - 200 490 inciertos

# Catálogos de galaxias

SDSS (Sloan Digital Skuy Survey - <http://www.sdss.org>)

## Fase IV - DR13 (Jun 2015)

- Imágenes:**
- 14 555  $\square^\circ$  ( $\gtrsim \frac{1}{3}$  del cielo)
  - 469 053 874 objetos detectados
    - 260 562 744 estrellas
    - 208 478 448 galaxias
    - 12 682 inciertos
- Espectros:**
- 4 266 444 espectros útiles
    - 2 401 952 galaxias
    - 477 161 QSO
    - 851 968 estrellas
    - 341 140 de cielo
    - 200 490 inciertos

**NED** NASA Extragalactic Database

<http://nedwww.ipac.caltech.edu/>

# Magnitudes y tamaños

Galaxia: objeto tridimensional, que vemos proyectado sobre el plano del cielo (en 2 dimensiones)

¿Dónde está el “borde” de una galaxia?

No es posible medir directamente el brillo total ni el tamaño completo de una galaxia.

Tenemos que definir parámetros que caractericen las luminosidades y tamaños de las galaxias

# Magnitudes y tamaños

Galaxia: objeto tridimensional, que vemos proyectado sobre el plano del cielo (en 2 dimensiones)

¿Dónde está el “borde” de una galaxia?

No es posible medir directamente el brillo total ni el tamaño completo de una galaxia.

Tenemos que definir parámetros que caractericen las luminosidades y tamaños de las galaxias

# Magnitudes y tamaños

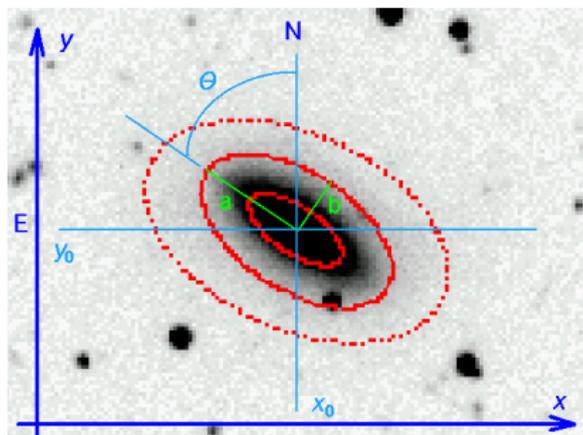
Galaxia: objeto tridimensional, que vemos proyectado sobre el plano del cielo (en 2 dimensiones)

¿Dónde está el “borde” de una galaxia?

No es posible medir directamente el brillo total ni el tamaño completo de una galaxia.

**Tenemos que definir parámetros que caractericen las luminosidades y tamaños de las galaxias**

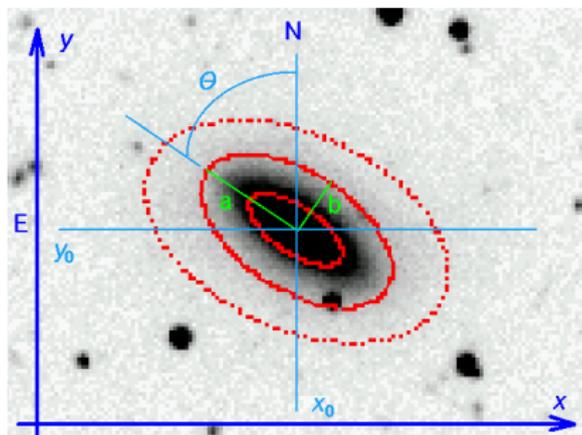
# Ajuste de isofotas elípticas a la imagen de una galaxia



Isofota:

curva que une los puntos de igual brillo  
(generalmente cerrada y aproximadamente elíptica)

# Ajuste de isofotas elípticas a la imagen de una galaxia



Parámetros de la elipse:

$x_0, y_0$ : coordenadas del centro

$a$ : semieje mayor

$b/a$ : achatamiento (razón de semiejes)

$\theta$ : ángulo de posición del eje mayor (del N hacia el E)

# Perfil de brillo superficial

Intensidad:

$$I = \frac{E}{\Delta A \Delta t \Delta \lambda \Delta \Omega} = \frac{F}{\Delta \Omega}$$

Notar que tanto  $F$  como  $\Delta \Omega$  decrecen con  $d^2$

→  $I$  es independiente de  $d$ .

Perfil de brillo superficial:

$I(r)$ : unidades de flujo/arcsec<sup>2</sup>.

# Perfil de brillo superficial

Intensidad:

$$I = \frac{E}{\Delta A \Delta t \Delta \lambda \Delta \Omega} = \frac{F}{\Delta \Omega}$$

Notar que tanto  $F$  como  $\Delta \Omega$  decrecen con  $d^2$

→  $I$  es independiente de  $d$ .

Perfil de brillo superficial:

$I(r)$ : unidades de flujo/arcsec<sup>2</sup>.

# Medidas del flujo luminoso

Brillo superficial:

$$\mu(r) = -2.5 \log(I(r)) + C_i \quad (\text{unidades: mag/arcsec}^2)$$

Flujo integrado:

$$F(r) = \int_0^r \int_0^{2\pi} I(r', \phi) r' dr' d\phi = 2\pi \int_0^r I(r') r' dr'$$

Magnitud integrada:

$$m(r) = -2.5 \log(F(r)) + C_m$$

# Medidas del flujo luminoso

Brillo superficial:

$$\mu(r) = -2.5 \log(I(r)) + C_i \quad (\text{unidades: mag/arcsec}^2)$$

Flujo integrado:

$$F(r) = \int_0^r \int_0^{2\pi} I(r', \phi) r' dr' d\phi = 2\pi \int_0^r I(r') r' dr'$$

Magnitud integrada:

$$m(r) = -2.5 \log(F(r)) + C_m$$

# Medidas del flujo luminoso

Brillo superficial:

$$\mu(r) = -2.5 \log(I(r)) + C_i \quad (\text{unidades: mag/arcsec}^2)$$

Flujo integrado:

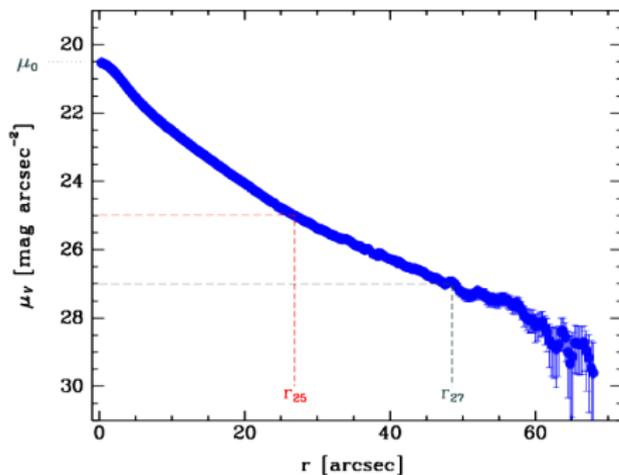
$$F(r) = \int_0^r \int_0^{2\pi} I(r', \phi) r' dr' d\phi = 2\pi \int_0^r I(r') r' dr'$$

Magnitud integrada:

$$m(r) = -2.5 \log(F(r)) + C_m$$

# Parámetros obtenidos del perfil de brillo

Dependen de la banda fotométrica usada

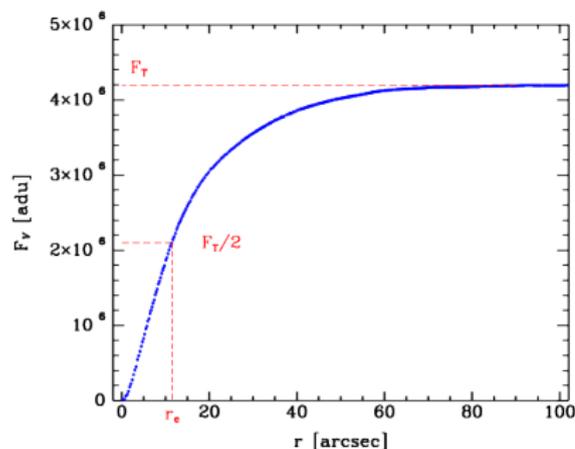


brillo superf. central:  $\mu_0$

radios isofotales:  $r_{25}, r_{27}$

mag. isofotales:  $m_{25}, m_{27}$

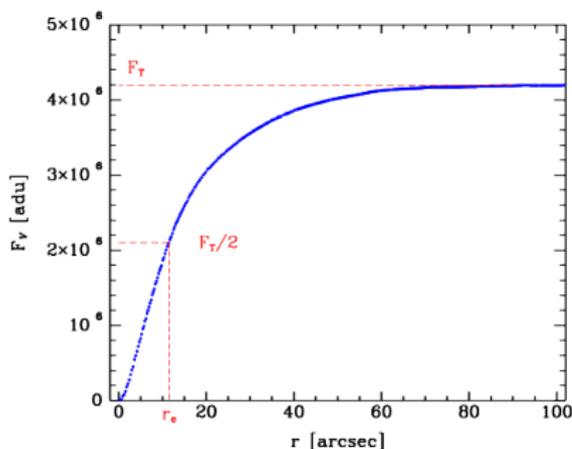
# Parámetros totales y efectivos



mag. total integrada:

$$m_T = -2.5 \log(F_T) + C_m$$

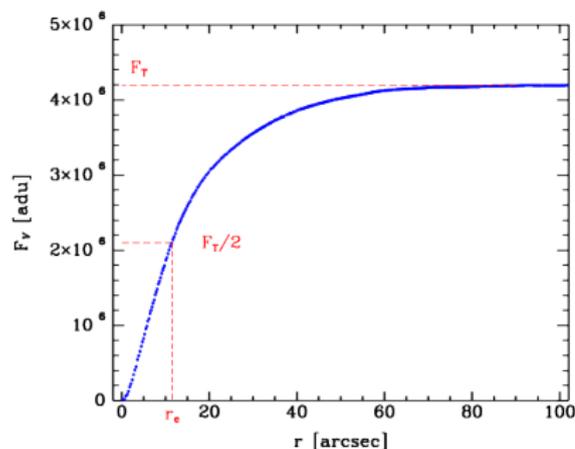
# Parámetros totales y efectivos



radio efectivo:  $r_e$

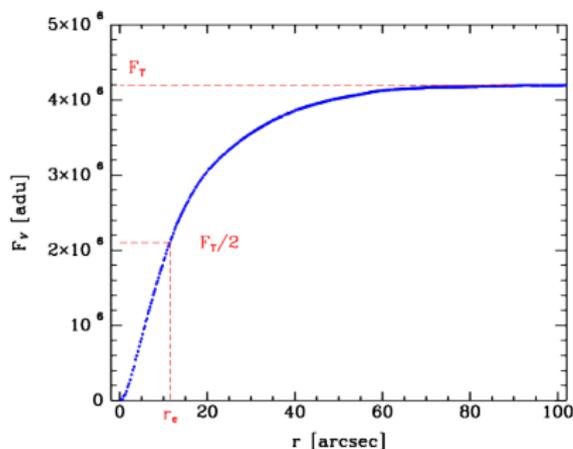
$$\frac{F_T}{2} = 2\pi \int_0^{r_e} I(r') r' dr'$$

# Parámetros totales y efectivos



Brillo superficial efectivo:  $\mu_e = \mu(r_e)$

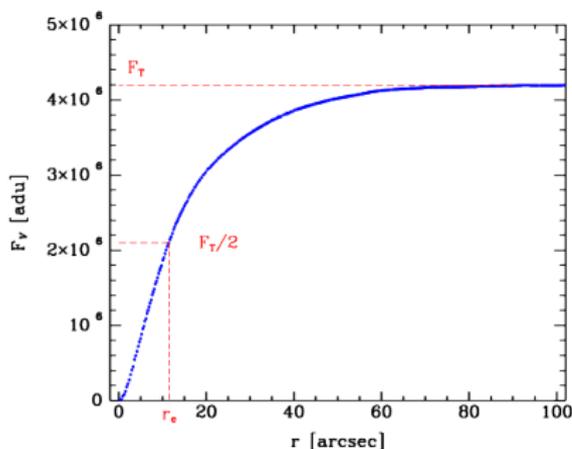
# Parámetros totales y efectivos



Brillo superficial efectivo promedio:

$$\langle \mu_e \rangle = -2.5 \log \left( \frac{F(r_e)}{\pi r_e^2} \right) + C = m_T + 2.0 + 5 \log(r_e)$$

# Parámetros totales y efectivos



Parámetro de concentración: (Trujillo et al. 2001, MNRAS 326, 869)

$$C_{r_e}(\alpha) = \frac{F(\alpha r_e)}{F(r_e)} \quad (\alpha = 0.3 - 0.5)$$

# Medición del brillo del cielo

$$\mu_B \simeq 22.9 \rightarrow 23.3 \text{ mag/arcsec}^2$$

$$\mu_V \simeq 22.0 \rightarrow 22.7 \text{ mag/arcsec}^2$$

$\mu$ (mag/arcsec <sup>2</sup> )	respecto al brillo del cielo
20.0	12 veces
25.0	12 %
27.0	2 %
28.0	0.8 %

# Ley de Hubble modificada

$$l(r) = \frac{l_0}{1 + \left(\frac{r}{r_0}\right)^2}$$

- Ventaja: se puede deproyectar
- Desventajas:
  - 2 parámetros libres ( $l_0$ ,  $r_0$ )  $\Rightarrow$  poco flexible
  - $L \rightarrow \infty$

No se usa actualmente.

# Ley de Sérsic

Propuesta por José Luis Sérsic (1963, BAAA) en la forma:

$$I(r) = I_e e^{-b_n \left[ \left( \frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]}$$

# Ley de Sérsic

Propuesta por José Luis Sérsic (1963, BAAA) en la forma:

$$I(r) = I_e e^{-b_n \left[ \left( \frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]}$$

# Ley de Sérsic

Propuesta por José Luis Sérsic (1963, BAAA) en la forma:

$$I(r) = I_e e^{-b_n \left[ \left( \frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]}$$

Forma alternativa:

$$I(r) = I_0 e^{-\left( \frac{r}{r_0} \right)^{1/n}}$$

# Ley de Sérsic

Propuesta por José Luis Sérsic (1963, BAAA) en la forma:

$$I(r) = I_e e^{-b_n \left[ \left( \frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]}$$

Forma alternativa:

$$I(r) = I_0 e^{-\left( \frac{r}{r_0} \right)^{1/n}}$$

# Ley de Sérsic

Propuesta por José Luis Sérsic (1963, BAAA) en la forma:

$$I(r) = I_e e^{-b_n \left[ \left( \frac{r}{r_e} \right)^{\frac{1}{n}} - 1 \right]}$$

Forma alternativa:

$$I(r) = I_0 e^{-\left( \frac{r}{r_0} \right)^{1/n}}$$

Casos particulares:

$n = 1 \rightarrow$  Ley exponencial

$n = 4 \rightarrow$  Ley de de Vaucouleurs

## Bibliografía del capítulo:

- *Galactic Astronomy*,  
J. Binney & M. Merrifield (Princeton University Press, 1998).
- *Galaxies in the Universe: An Introduction*,  
Linda S. Sparke & John S. Gallagher III (Cambridge University Press, 2nd. Edition, 2000).
- *The historical quest for the nature of the spiral nebulae*.  
Ferne, J. D. 1970, PASP 82, 1189.