

# Astronomía Extragaláctica

## Cap. 6: Galaxias enanas, irregulares, y peculiares

Profesor: Favio R. Faifer y Sergio A. Cellone

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

curso 2024

# Cap. 6: Galaxias enanas, irregulares, y peculiares

- 1 Galaxias enanas
- 2 Enanas elípticas
- 3 Enanas irregulares
- 4 Funciones de luminosidad e historias evolutivas
- 5 Enanas compactas
- 6 Galaxias irregulares
- 7 Galaxias luminosas y ultraluminosas en infrarrojo

# Cap. 6: Galaxias enanas, irregulares, y peculiares

- 1 Galaxias enanas
- 2 Enanas elípticas
- 3 Enanas irregulares
- 4 Funciones de luminosidad e historias evolutivas
- 5 Enanas compactas
- 6 Galaxias irregulares
- 7 Galaxias luminosas y ultraluminosas en infrarrojo

# Galaxias en Andr3meda

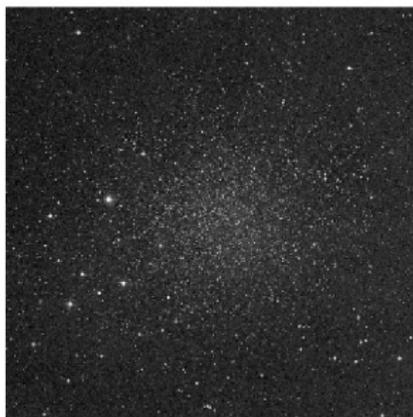
M31, M32, NGC 205



# Comparación GC - dE

Galaxia dSph Sculptor y cúmulo globular M13

The Sculptor Dwarf Galaxy



2 kpc

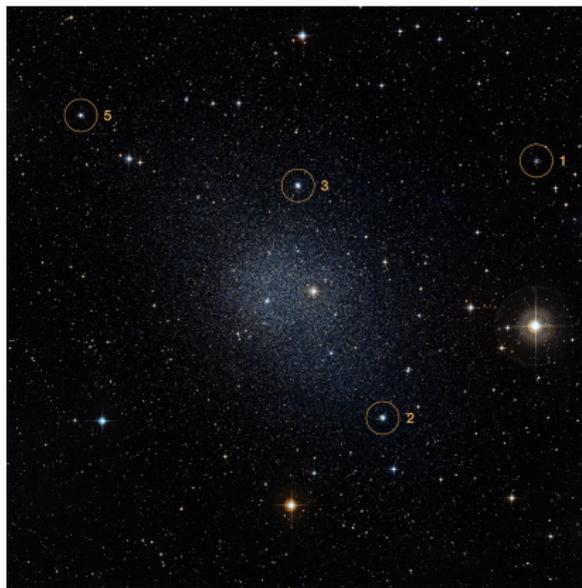
Globular Cluster M13



0.1 kpc

# Comparación GC - dSph

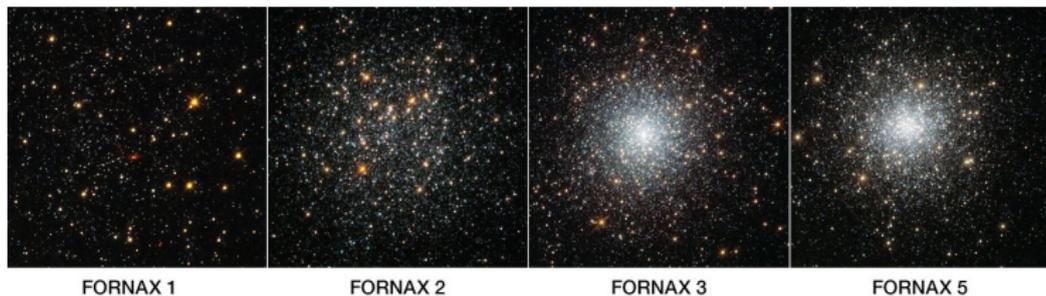
## Galaxia dSph Fornax y sus cúmulos globulares



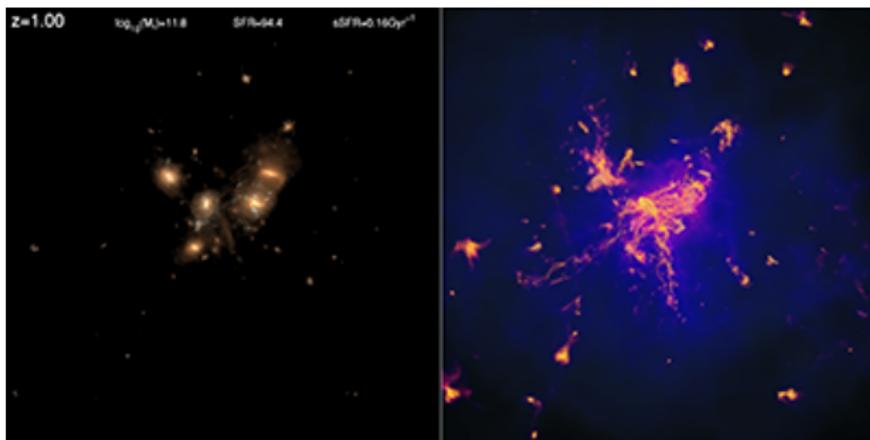
Imágen de la galaxia dSph Fornax (el más brillante de los satélites de la MW, de tipo dSph), donde se señalan sus cinco CGs conocidos. Crédito: NASA, ESA, S. Larsen (Radboud University, the Netherlands).

# Comparación GC - dSph

## Galaxia dSph Fornax y sus cúmulos globulares



Los cinco CGs conocidos en Fornax dSph: la  $L_T$  de Fornax es  $10^{7.2} \mathcal{L}_\odot$ , y sus cúmulos tienen  $\sim 10^5 \mathcal{L}_\odot$  cada uno. Crédito: NASA, ESA, S. Larsen (Radboud University, the Netherlands).



Simulación Illustris (1 Mpc de lado). Izquierda, luz estelar. Derecha, densidad del gas. Se muestra la formación de una galaxia E por sucesivas fusiones.

# Importancia cosmológica

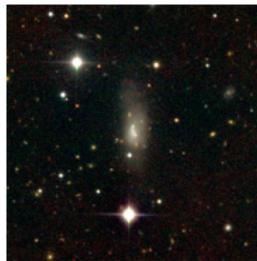
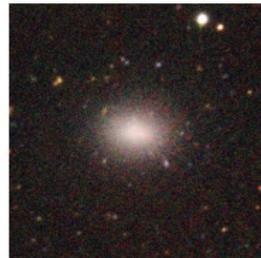
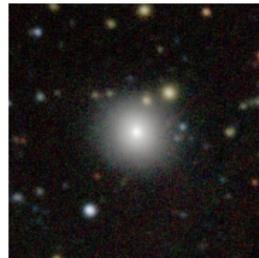


A simulated dark matter “halo” with satellites, possibly similar to the Milky Way. (Credit: Volker Springel, Aquarius Simulation).

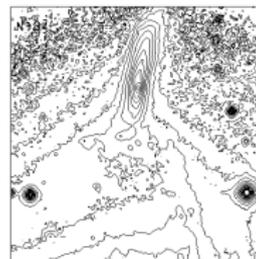
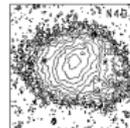
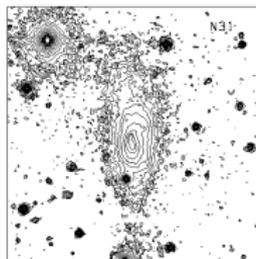
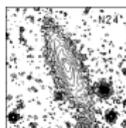
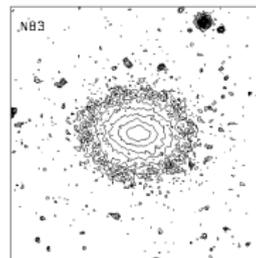
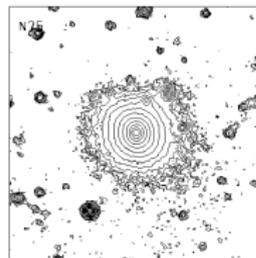
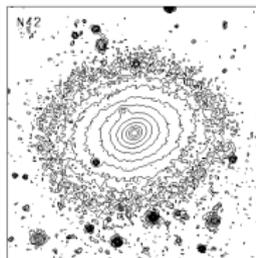
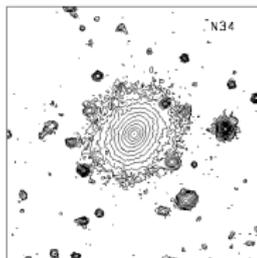
Los modelos  $\Lambda$ CDM predicen un número de enanas órdenes de magnitud mayor que el observado.

# Galaxias enanas:

Galaxias dE y dI



# Galaxias dE y dI



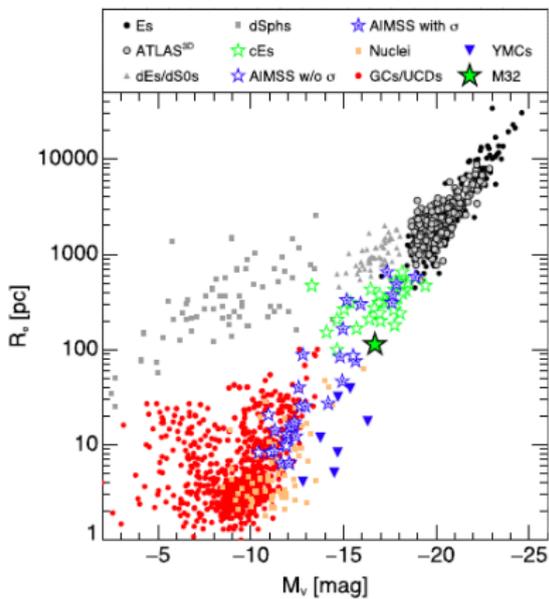
# Cap. 6: Galaxias enanas, irregulares, y peculiares

- 1 Galaxias enanas
- 2 Enanas elípticas**
- 3 Enanas irregulares
- 4 Funciones de luminosidad e historias evolutivas
- 5 Enanas compactas
- 6 Galaxias irregulares
- 7 Galaxias luminosas y ultraluminosas en infrarrojo

Las galaxias enanas elípticas se dividen en dos clases:

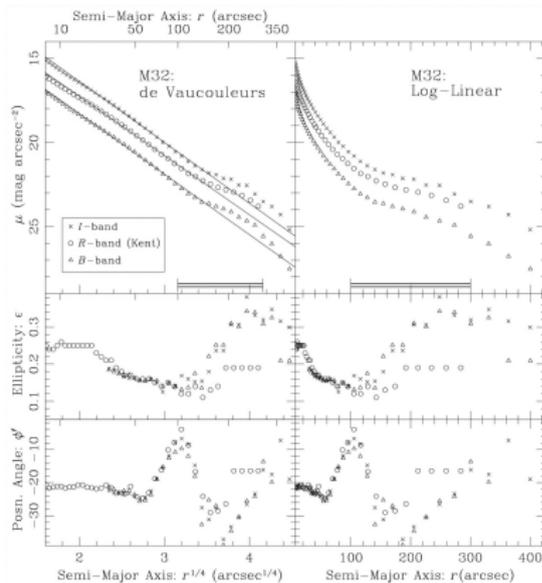
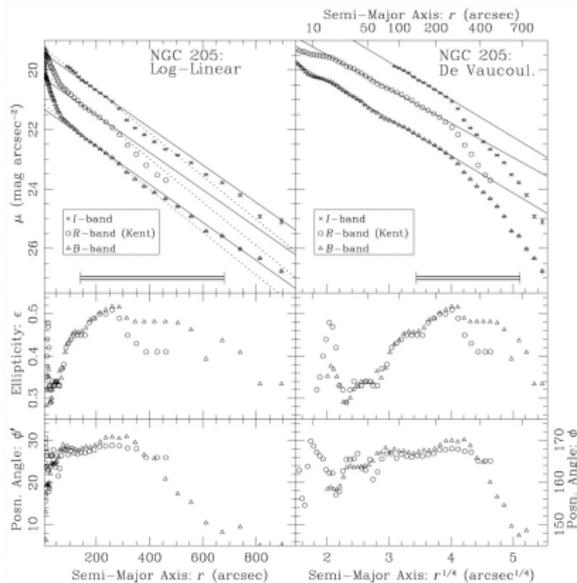
- dE: galaxias elípticas enanas difusas (NGC 205).
- cE: galaxias elípticas enanas compactas (M32).

# Enanas elípticas: dE y cE



Norris et al., 2014

# Enanas elípticas: dE y cE





Ejemplo: NGC 3311 y NGC 3309. Se detectan miles de CGs y una gran cantidad de galaxias enanas de tipo temprano.

Por ser difusas (LSB), las dE en cúmulos cercanos son:

- relativamente fáciles de diferenciar de galaxias de fondo (morfológicamente)
- difíciles de confirmar espectroscópicamente.

Por ser compactas y de alto brillo superficial, las cE en cúmulos cercanos son:

- difíciles de diferenciar de galaxias de fondo (morfológicamente).
- más fáciles de confirmar espectroscópicamente.

# Colapso de una nube de gas

Enfriamiento radiativo

$t_{\text{cool}}$  tiempo de enfriamiento del gas

$t_{\text{dyn}}$  tiempo requerido para el colapso gravitacional del sistema.

$$t_{\text{cool}} < t_{\text{dyn}}$$

$$t_{\text{dyn}} < t_{\text{cool}} < H_0^{-1}$$

$$t_{\text{cool}} > H_0^{-1}$$

- enfriamiento Compton
- radiación de frenado o *bremsstrahlung* (emisión libre-libre),
- y emisión de líneas excitadas colisionalmente, y recombinación.

# Colapso de una nube de gas

Enfriamiento radiativo

$t_{\text{cool}}$  tiempo de enfriamiento del gas

$t_{\text{dyn}}$  tiempo requerido para el colapso gravitacional del sistema.

$$t_{\text{cool}} < t_{\text{dyn}}$$

$$t_{\text{dyn}} < t_{\text{cool}} < H_0^{-1}$$

$$t_{\text{cool}} > H_0^{-1}$$

- enfriamiento Compton
- radiación de frenado o *bremsstrahlung* (emisión libre-libre),
- y emisión de líneas excitadas colisionalmente, y recombinación.

# Colapso de una nube de gas

Enfriamiento radiativo

$t_{\text{cool}}$  tiempo de enfriamiento del gas

$t_{\text{dyn}}$  tiempo requerido para el colapso gravitacional del sistema.

$$t_{\text{cool}} < t_{\text{dyn}}$$

$$t_{\text{dyn}} < t_{\text{cool}} < H_0^{-1}$$

$$t_{\text{cool}} > H_0^{-1}$$

- enfriamiento Compton
- radiación de frenado o *bremsstrahlung* (emisión libre-libre),
- y emisión de líneas excitadas colisionalmente, y recombinación.

# Colapso de una nube de gas

Enfriamiento radiativo

$$t_{\text{dyn}} = \frac{\pi}{2} \left( \frac{2GM}{r^3} \right)^{-\frac{1}{2}} \approx 1.5 \times 10^9 \left( \frac{\mathcal{M}}{10^{12} \mathcal{M}_{\odot}} \right)^{-\frac{1}{2}} \left( \frac{r}{200 \text{ kpc}} \right)^{\frac{3}{2}}. \quad (1)$$

$$t_{\text{cool}} \approx 2.5 \times 10^9 f_m^{-1} \left( \frac{F}{0.1} \right)^{-1} \left( \frac{\mathcal{M}}{10^{12} \mathcal{M}_{\odot}} \right)^{\frac{1}{2}} \left( \frac{r}{200 \text{ kpc}} \right)^{\frac{3}{2}} \text{ años}. \quad (2)$$

$$t_{\text{cool}} < t_{\text{dyn}} \Rightarrow \mathcal{M} < \mathcal{M}_{\text{lim}} \approx 6 \times 10^{11} \mathcal{M}_{\odot} f_m \left( \frac{F}{0.1} \right).$$

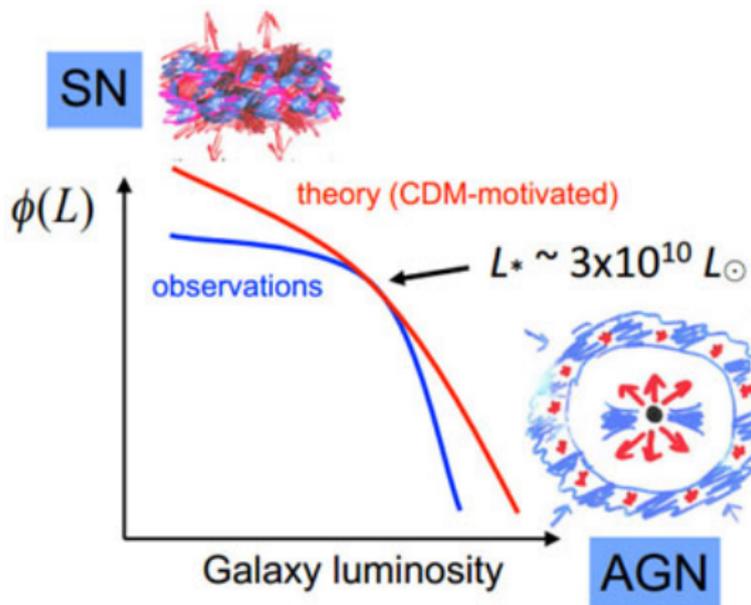
### “Catástrofe de enfriamiento”

El gas se enfría **demasiado rápido** en los halos de baja masa, que se forman primero.

Predice un Universo dominado por enanas de  $10^8 M_{\odot}$ , en contra de lo que se observa.

# Colapso de una nube de gas

Enfriamiento radiativo



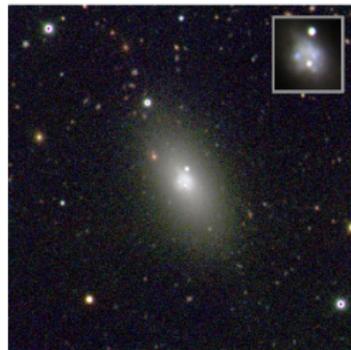
Comparación entre la función de luminosidad esperada (línea roja) y la observada (línea azul) - Silk & Mamon 2012.

# Galaxias dE/dI - centro azul

Phoenix, NGC 205 y FCC 76



NGC 205 ( $M_v = -16.3$ ), dwarf elliptical companion of M31 (NGAO)



# Enana nucleada FCC 314, Cúmulo de Fornax

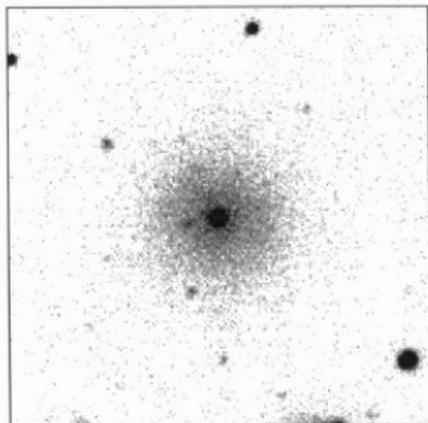
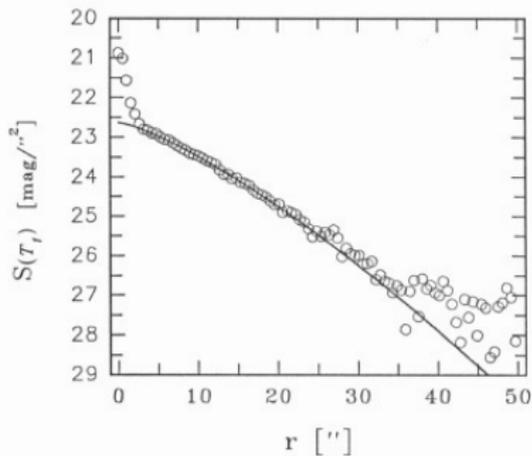
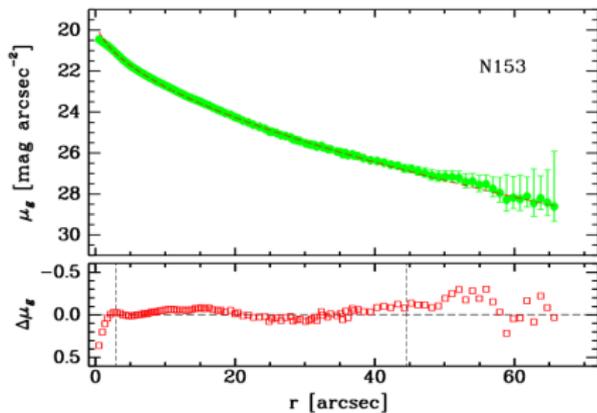


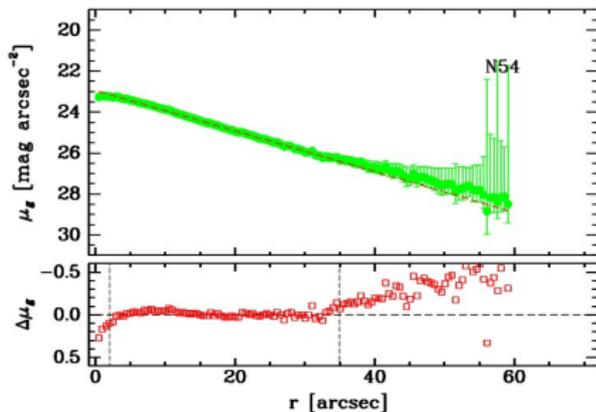
Fig. 1 o: FCC #314



# Enana lenticular (dS0) N153, Grupo de NGC 5044



# Enana dE/dl extendida N54, Grupo de NGC 5044



# Perfiles de brillo superficial

Ley de Sérsic

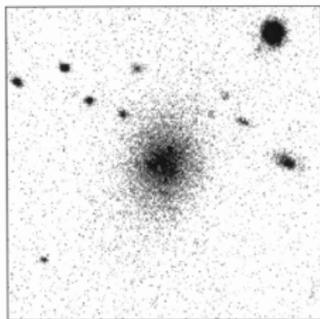
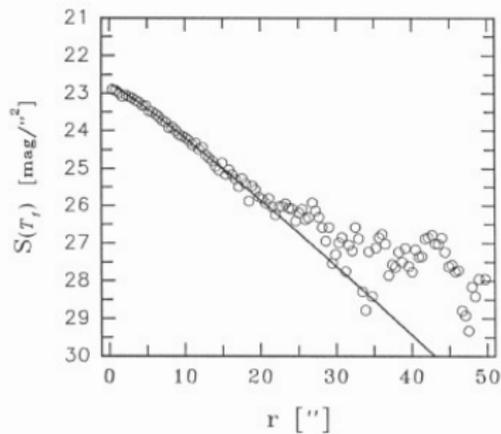


Fig. 1 e: FCC #156



# Perfiles de brillo superficial

Ley de Sérsic

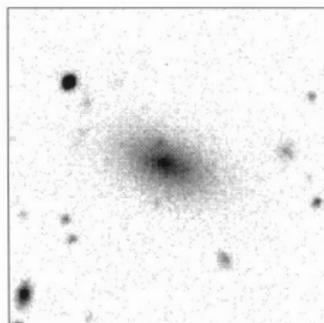
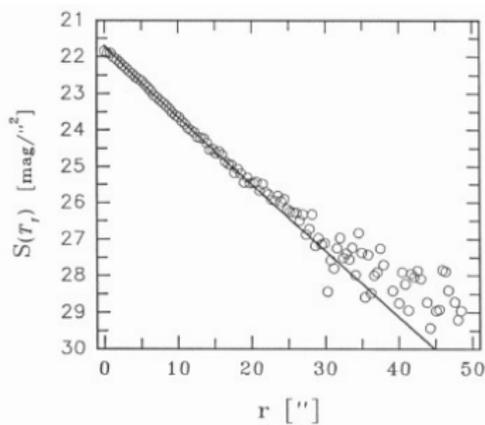


Fig. 1 g: FCC #195



# Perfiles de brillo superficial

Ley de Sérsic

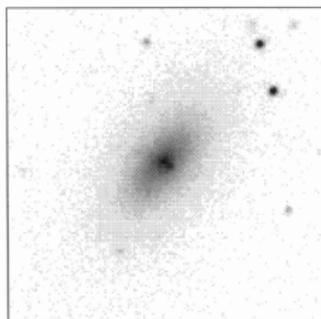
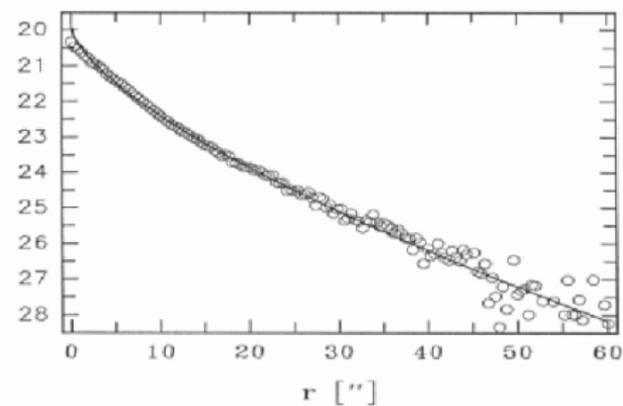
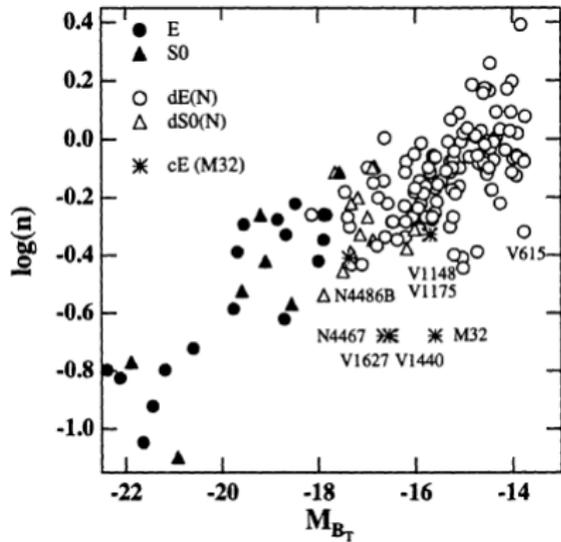
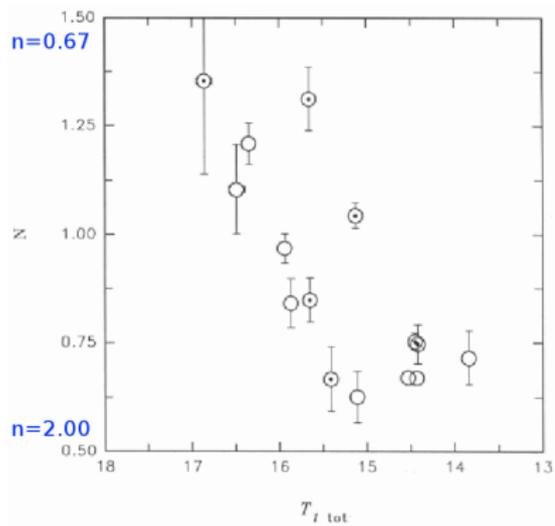


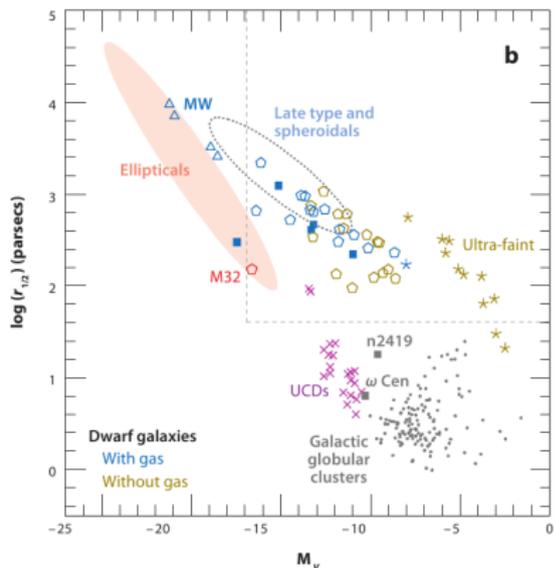
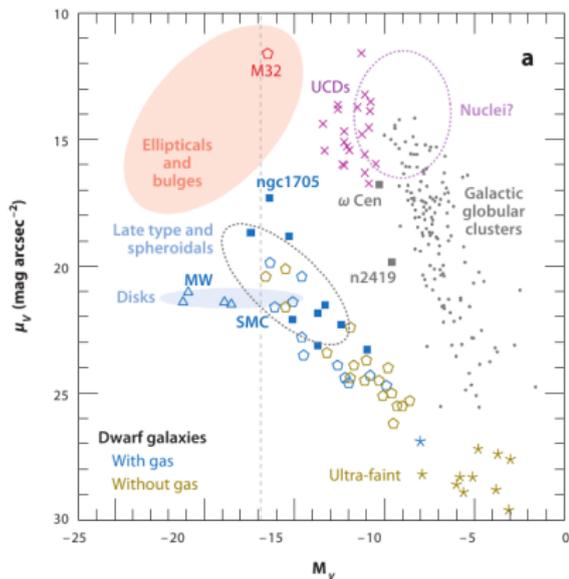
Fig. 11: FCC #203



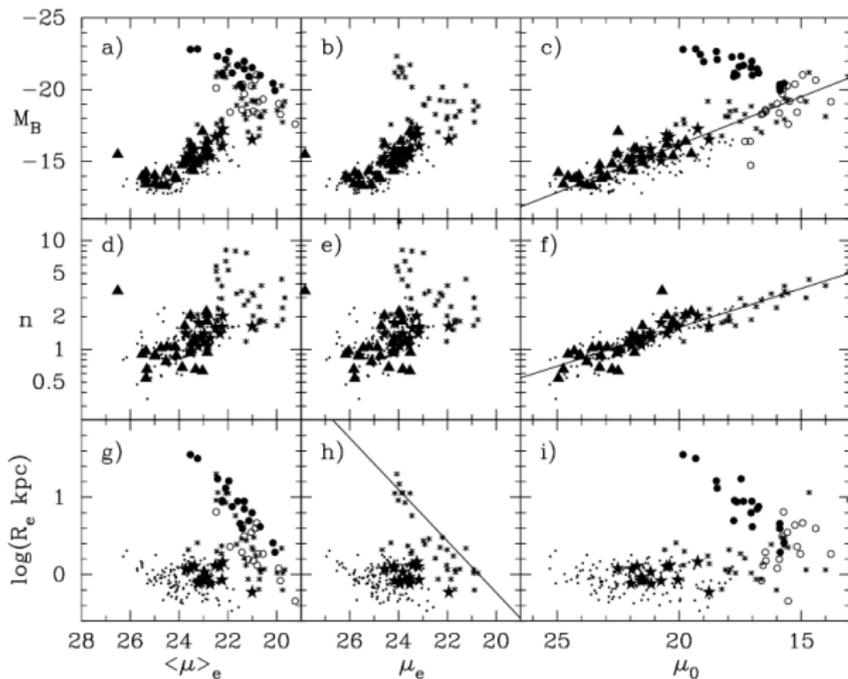
# Relación $\mathcal{L} - n$



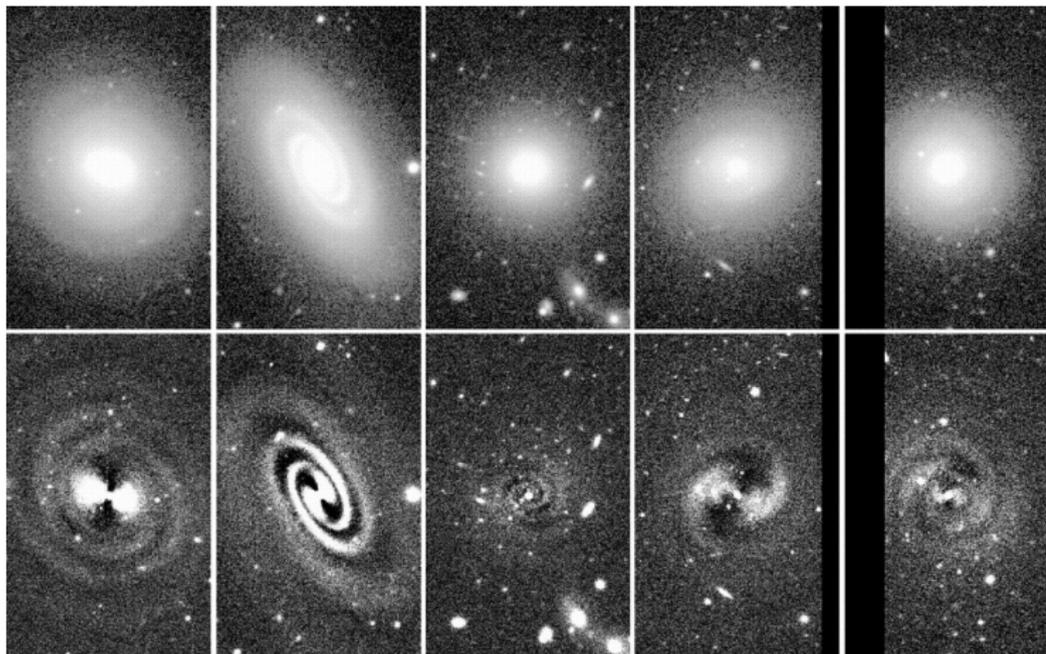
# Relaciones fotométricas



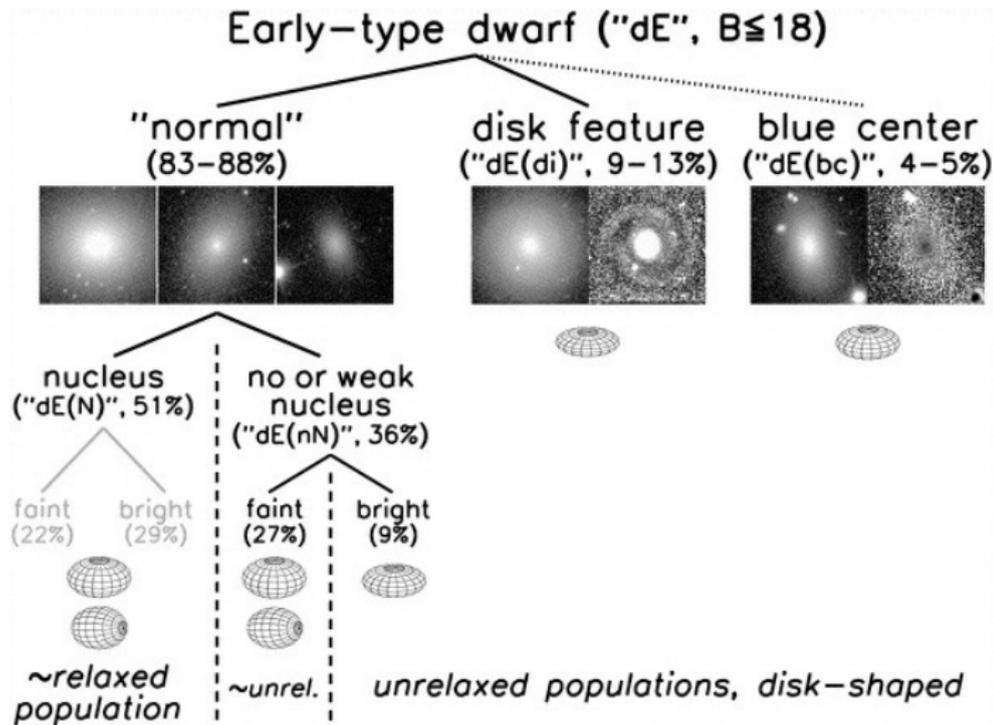
# Relaciones fotométricas

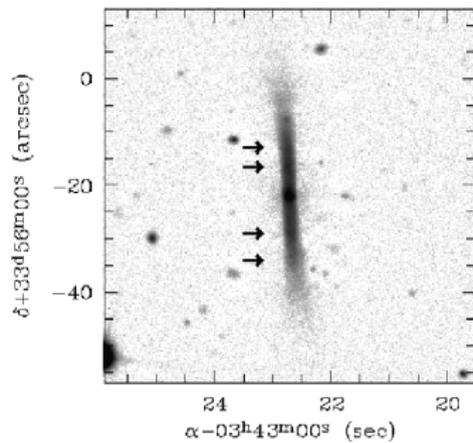
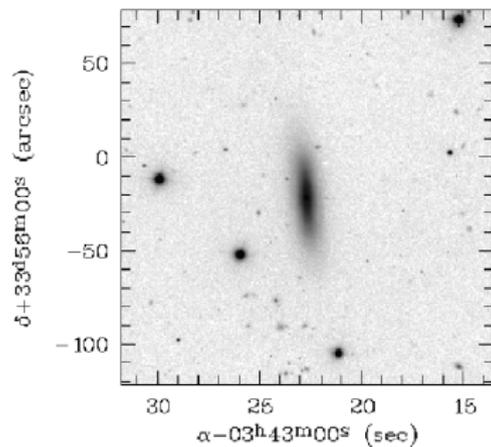


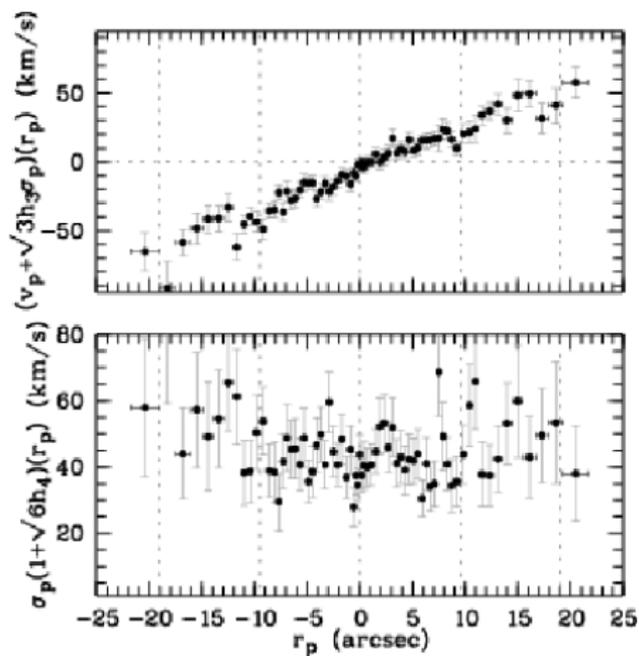
# Estructura subyacente en galaxias dE



# Clasificación de galaxias dE









Fotometría y espectroscopía integradas muestran para las dE (en general):

- Edades intermedias  $\rightarrow$  viejas:  $\sim 5$  Gyr, con bastante dispersión. Las dE,N son varios Gyr + viejas ( $\sim$  GC) que las no-nuc.
- metalicidades subsolares:  $-1 \lesssim [\text{Fe}/\text{H}] \lesssim 0$
- abundancia elementos- $\alpha \sim$  solar.
- Algunas dE tienen gradientes negativos de metalicidad ( $\rightarrow$   $[\text{Fe}/\text{H}]$  decrece con  $r$ ).
- Edad constante o suavemente creciente con  $r$ .

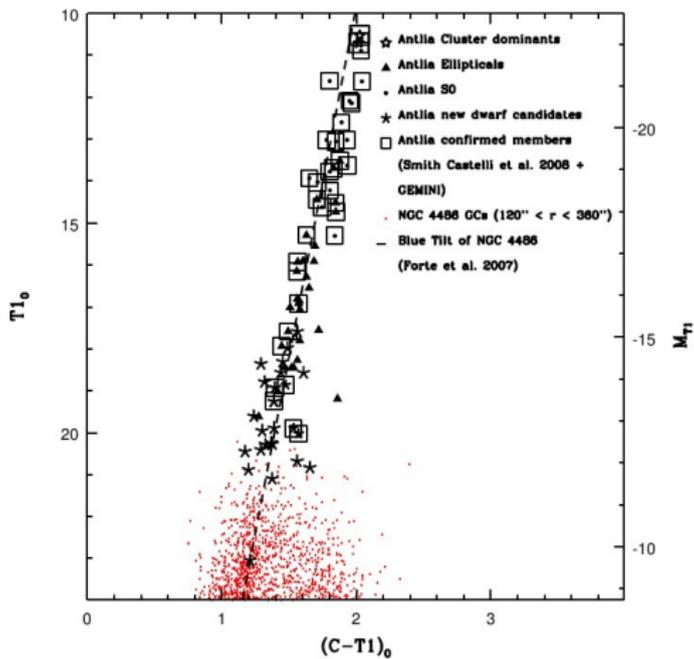
# Colores y poblaciones estelares

Fotometría y espectroscopía integradas muestran para las dE (en general):

- Edades intermedias  $\rightarrow$  viejas:  $\sim 5$  Gyr, con bastante dispersión. Las dE,N son varios Gyr + viejas ( $\sim$  GC) que las no-nuc.
- metalicidades subsolares:  $-1 \lesssim [\text{Fe}/\text{H}] \lesssim 0$
- abundancia elementos- $\alpha \sim$  solar.
  
- Algunas dE tienen gradientes negativos de metalicidad ( $\rightarrow$   $[\text{Fe}/\text{H}]$  decrece con  $r$ ).
- Edad constante o suavemente creciente con  $r$ .

# Relación color-magnitud para galaxias tempranas

Cúmulo de Antlia



# Relación morfología-densidad

*dentro de la clase dE*

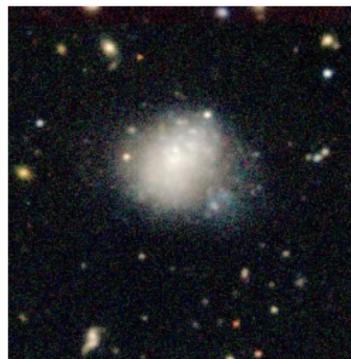
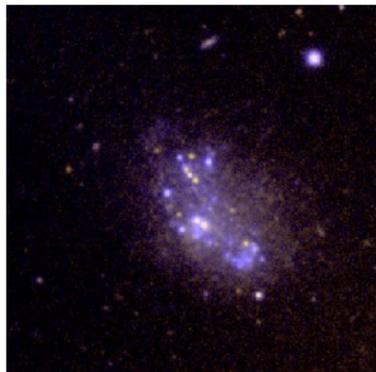
<b>Subtipo dE</b>	<b>Achatamientos</b>	<b>Distribución espacial</b>
dE no nucleadas y dE con centro azul	intermedios	reg. de baja densidad
dE con discos	altos	reg. de densidad intermedia
dE,N (nucleadas)	bajos	reg. de alta densidad

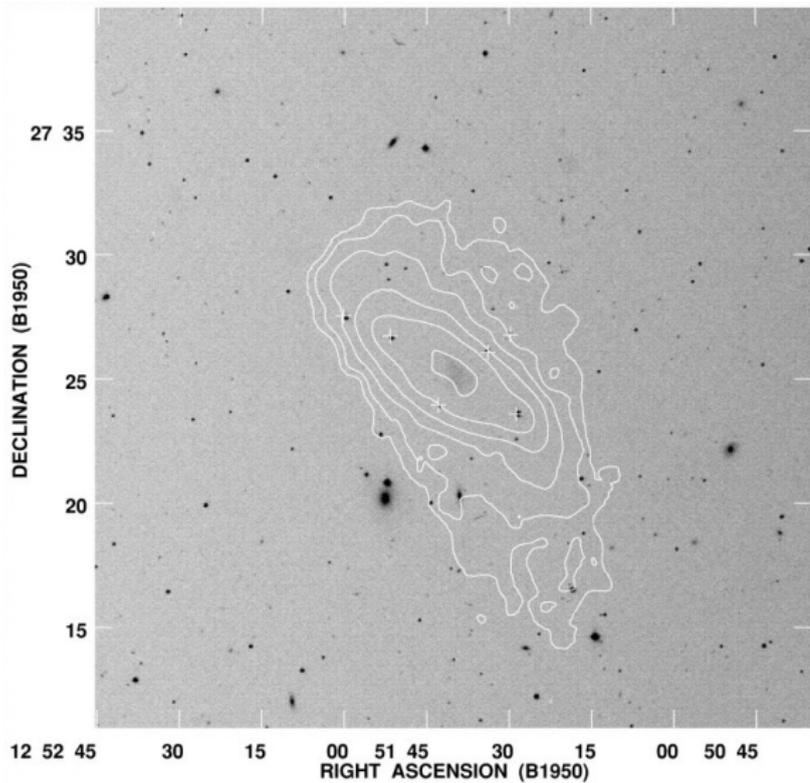
# Cap. 6: Galaxias enanas, irregulares, y peculiares

- 1 Galaxias enanas
- 2 Enanas elípticas
- 3 Enanas irregulares**
- 4 Funciones de luminosidad e historias evolutivas
- 5 Enanas compactas
- 6 Galaxias irregulares
- 7 Galaxias luminosas y ultraluminosas en infrarrojo

# Galaxias enanas irregulares

GR8, SMC (LG), N49 (Grupo NGC 5044)





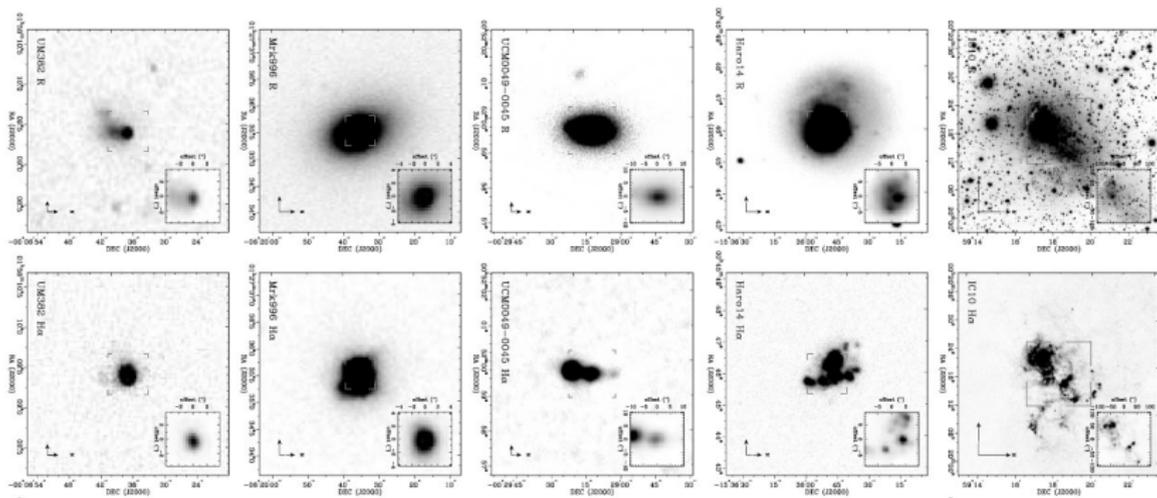
# dl extremas: enanas compactas azules (BCD)

Características:

- Ricas en gas (fracción de HI  $\sim 30\%$ )
- Baja metalicidad:  $\frac{Z_{\odot}}{50} \leq Z \leq \frac{Z_{\odot}}{2}$
- Espectro óptico dominado por emisiones intensas (tipo reg. HII).
- Alta sfr:  $\approx 0.1 - 1 M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$

# dl extremas: enanas compactas azules (BCD)

Imágenes  $R$  (arriba) y  $H\alpha$  (abajo)



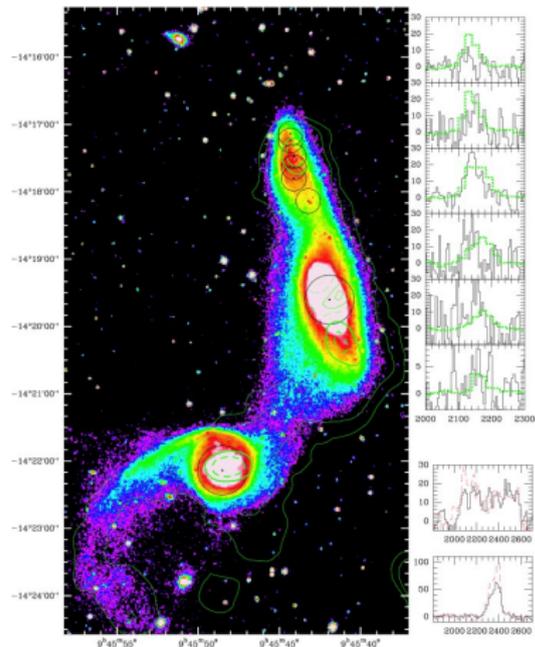
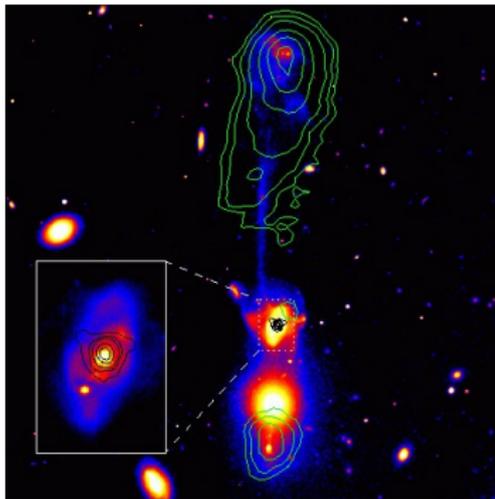
# dl extremas: enanas compactas azules (BCD)

imagen óptica de I Zwicky 18 (HST)

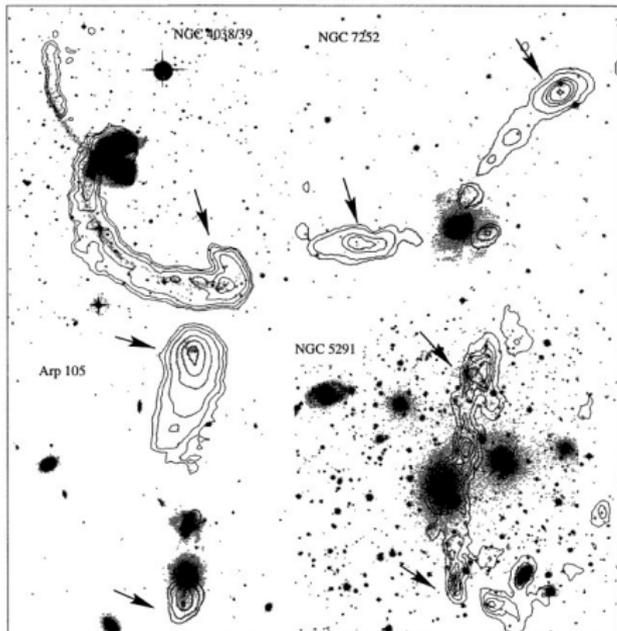


# dl extremas: galaxias enanas tidales (TDG)

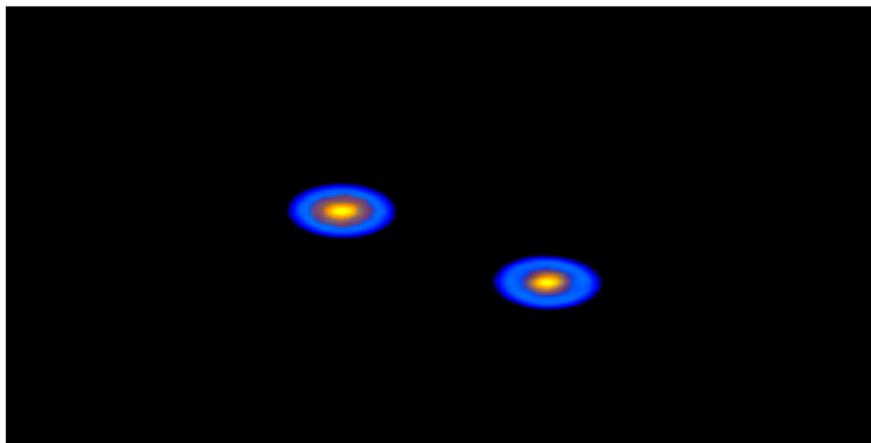
Arp 105 ("la Guitarra") - sistema NGC 2992/93



# dl extremas: galaxias enanas tidales (TDG)

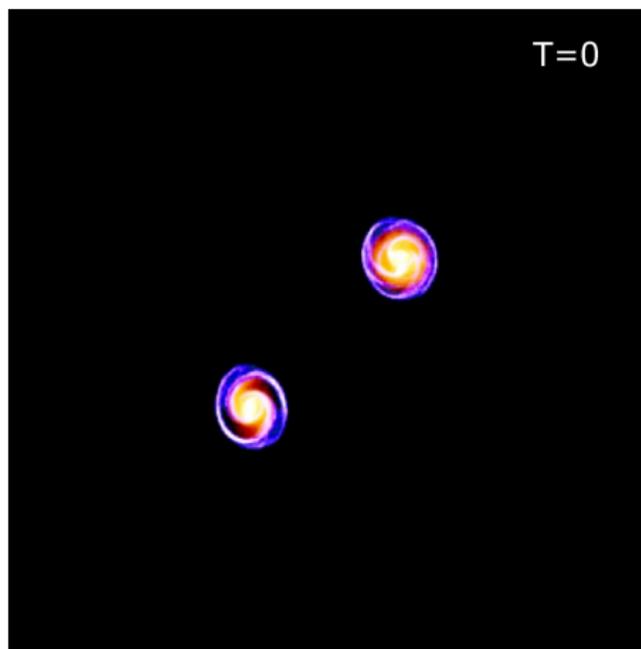


# dl extremas: galaxias enanas tidales (TDG)



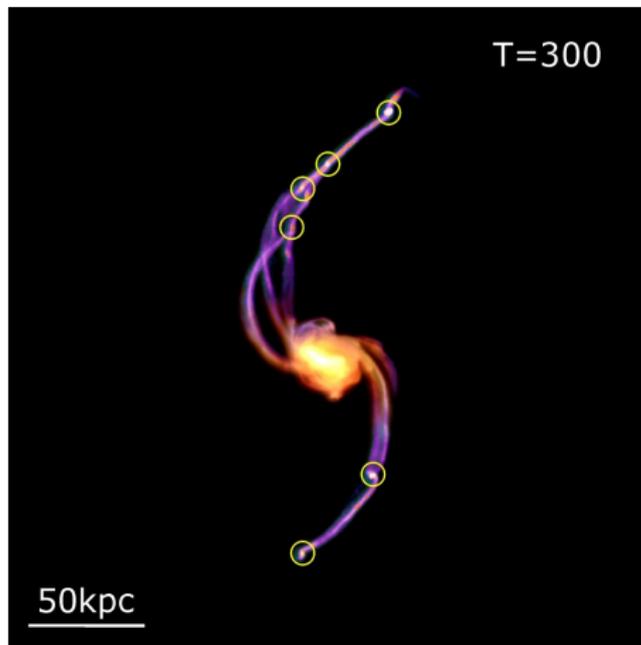
# dl extremas: galaxias enanas tidales (TDG)

Simulaciones



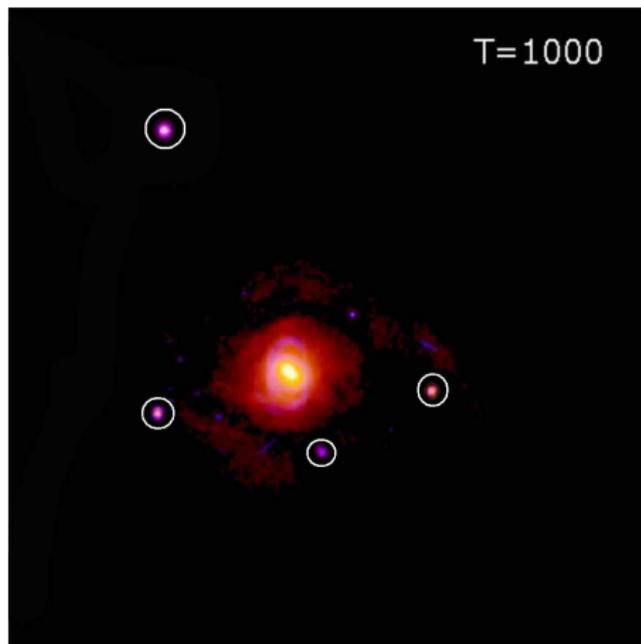
# dl extremas: galaxias enanas tidales (TDG)

Simulaciones



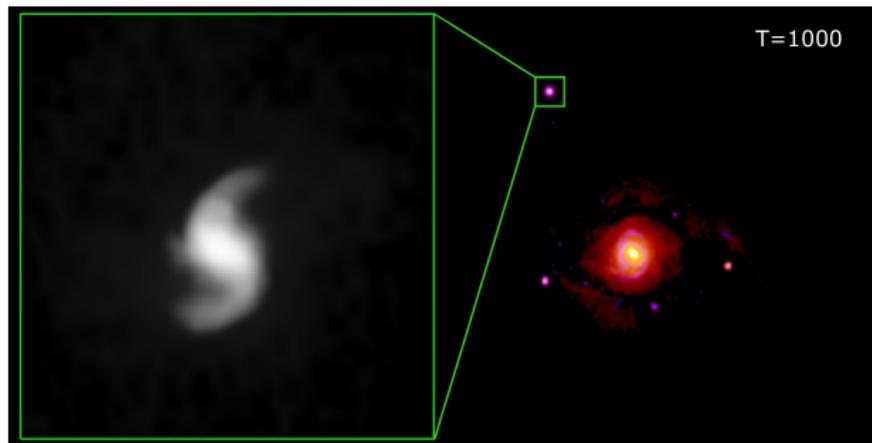
# dl extremas: galaxias enanas tidales (TDG)

Simulaciones



# dl extremas: galaxias enanas tidales (TDG)

Simulaciones



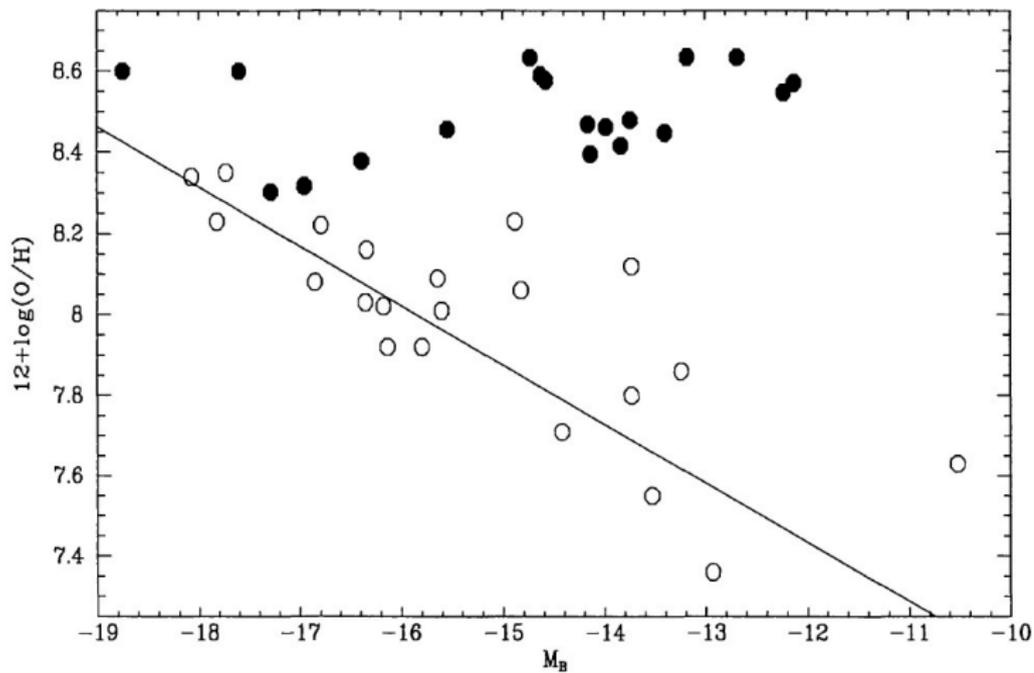
# dl extremas: galaxias enanas tidales (TDG)

Propiedades

		media	mín	máx
$M_B$	mag	-14.8	-12.1	-18.8
$B - V$	mag	0.3	0.0	0.7
sfr	$\log(\mathcal{M}_{\odot}/\text{yr})$	-1.1	-3.6	0.3
$\mathcal{M}_{\text{HI}}$	$10^9 \mathcal{M}_{\odot}$	1.6	0.2	6.0
Abund. O	$12+\log(\text{O}/\text{H})$	8.5	8.3	8.6

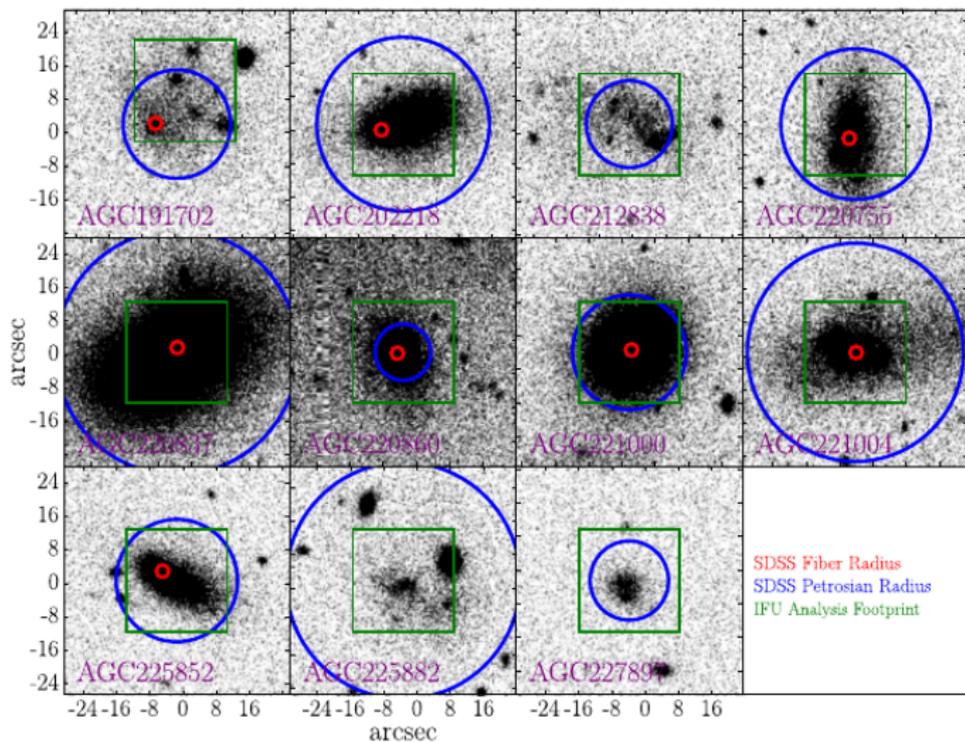
# dl extremas: galaxias enanas tidales (TDG)

Relación metalicidad - magnitud



# Cuestiones observacionales

(Ojo con el SDSS)

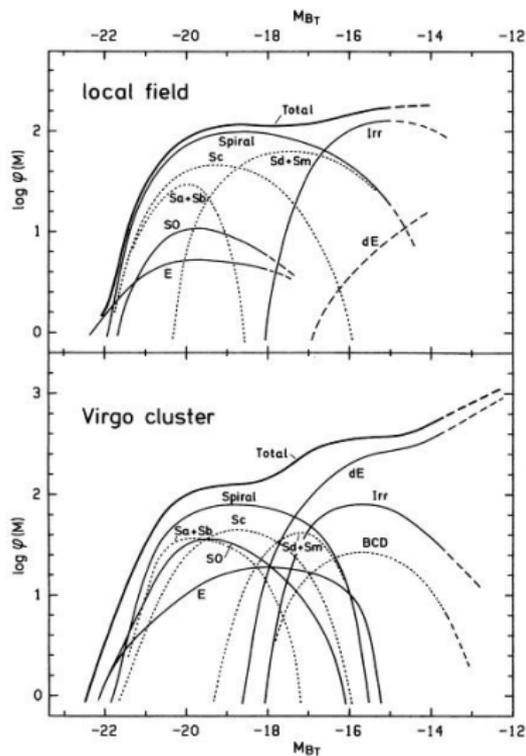


(Jimmy et al. 2015, ApJ, 812, 98)

# Cap. 6: Galaxias enanas, irregulares, y peculiares

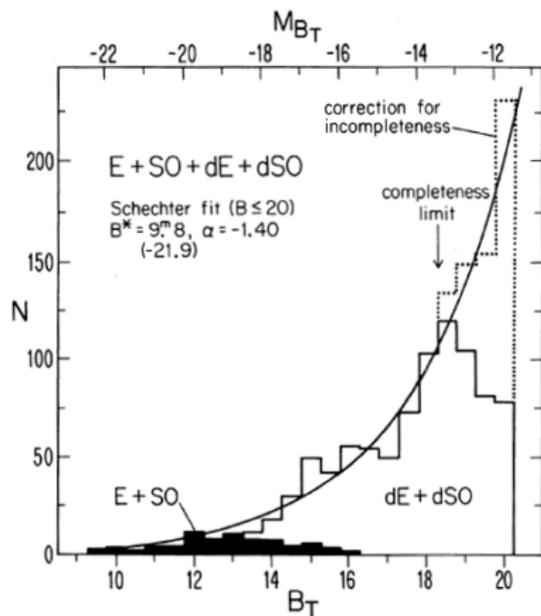
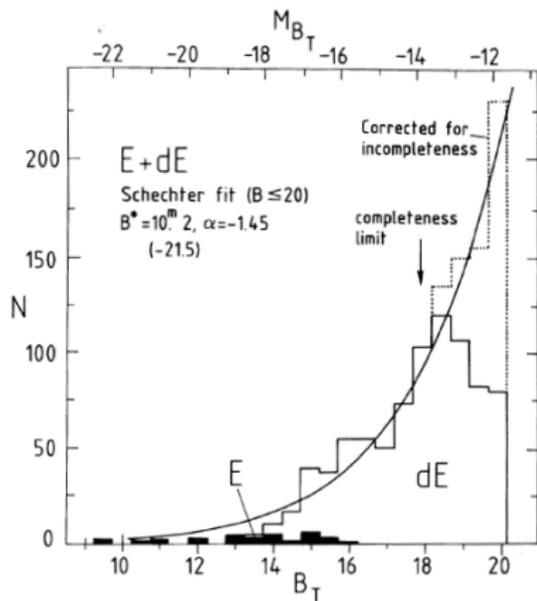
- 1 Galaxias enanas
- 2 Enanas elípticas
- 3 Enanas irregulares
- 4 Funciones de luminosidad e historias evolutivas**
- 5 Enanas compactas
- 6 Galaxias irregulares
- 7 Galaxias luminosas y ultraluminosas en infrarrojo

# Funciones de luminosidad



Galaxias de campo (arriba) y miembros del cúmulo de Virgo (abajo). Se muestran las LFs de los distintos tipos de Hubble. Las líneas a trazos son extrapolaciones. Las LFs de las dE y dI, así como la de la población total son bien descritas por una función de Schechter, mientras que las demás, se describen bien con gaussianas. Además: los cúmulos son el dominio de las E y las enanas! (Binggeli 1987).

# Funciones de luminosidad



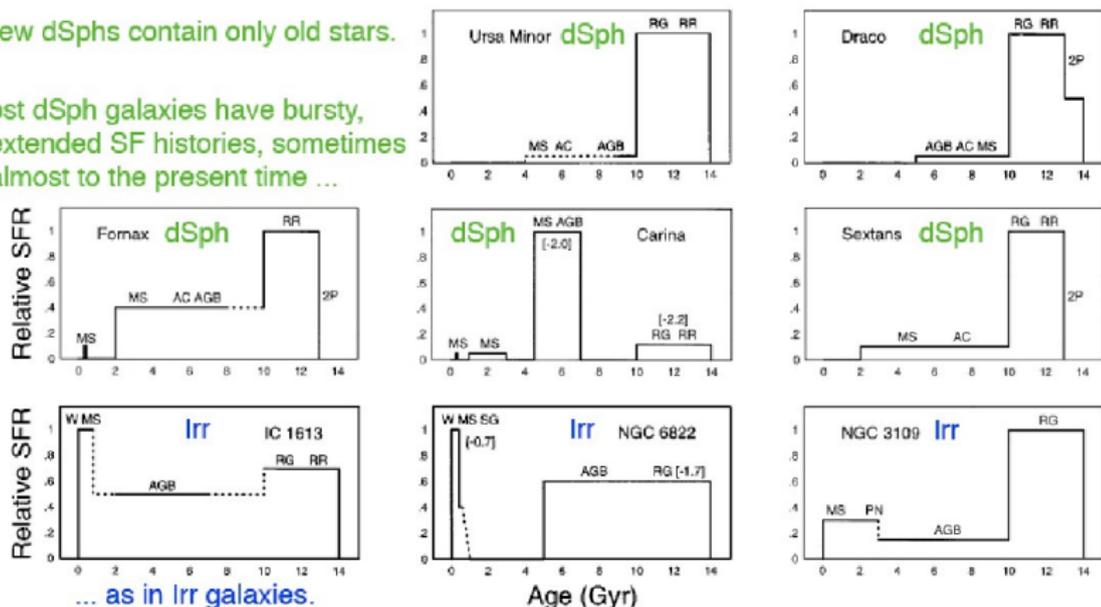
Función de luminosidad de las galaxias del cúmulo de Virgo (Sandage et al, 1985).  
Izquierda: sólo galaxias E y dE. Derecha: galaxias E, S0 y su contraparte enanas.

# Esferoidales e irregulares enanos del Grupo Local

Historias de formación estelar

A few dSphs contain only old stars.

Most dSph galaxies have bursty, extended SF histories, sometimes almost to the present time ...



... as in Irr galaxies.

# Evolución de las dE a partir de otras galaxias

En cúmulos y grupos ricos:

- “Desnudamiento” o *stripping*, o la “inanición” o *starvation* llevarían dl a dE

Problemas:

- No funciona para las de,N
- Las dl tienen en promedio menores metalicidades.
- Al cesar la formación estelar, el brillo superficial de la galaxia disminuiría, hasta quedar por debajo del observado para galaxias dE.

# Evolución de las dE a partir de otras galaxias

Para las dE más luminosas:

- Transformación a partir de espirales tardías (Sc/Sd)

Procesos:

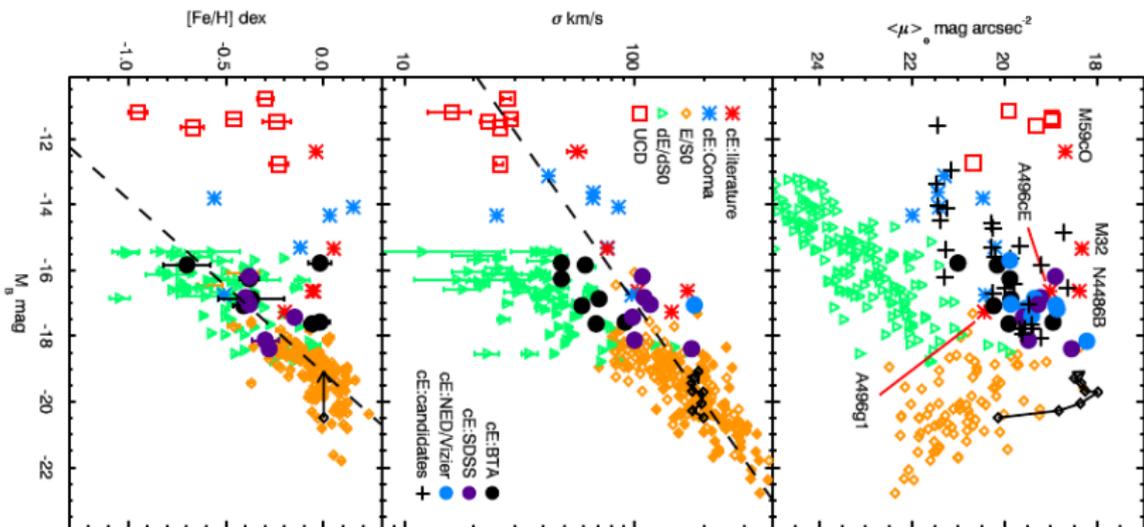
- Engrosamiento del disco por interacciones.
- Pérdida del disco por interacciones → queda el bulge  $\cong$  dE.
- Hostigamiento ("*harassment*") galáctico: sucesivos encuentros rápidos con galaxias masivas transformarían un disco (sin bulge) en una dE.

# Cap. 6: Galaxias enanas, irregulares, y peculiares

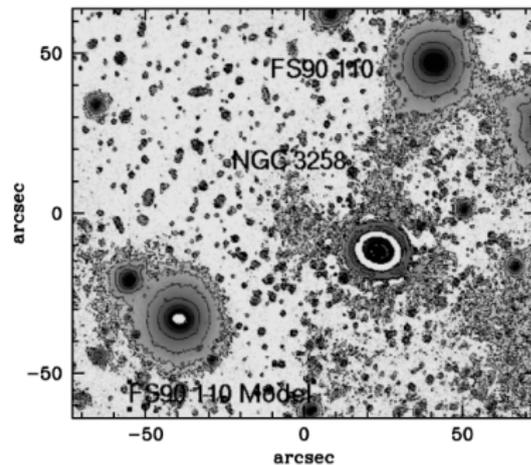
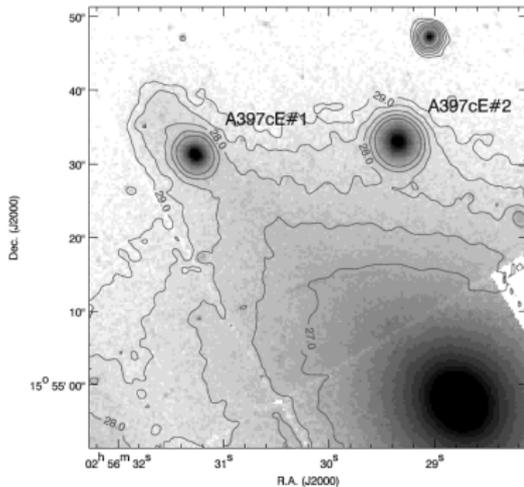
- 1 Galaxias enanas
- 2 Enanas elípticas
- 3 Enanas irregulares
- 4 Funciones de luminosidad e historias evolutivas
- 5 Enanas compactas**
- 6 Galaxias irregulares
- 7 Galaxias luminosas y ultraluminosas en infrarrojo

# Galaxias elípticas compactas (cE) y ultracompactas (UCD)

Relaciones estructurales, cinemática y metalicidad

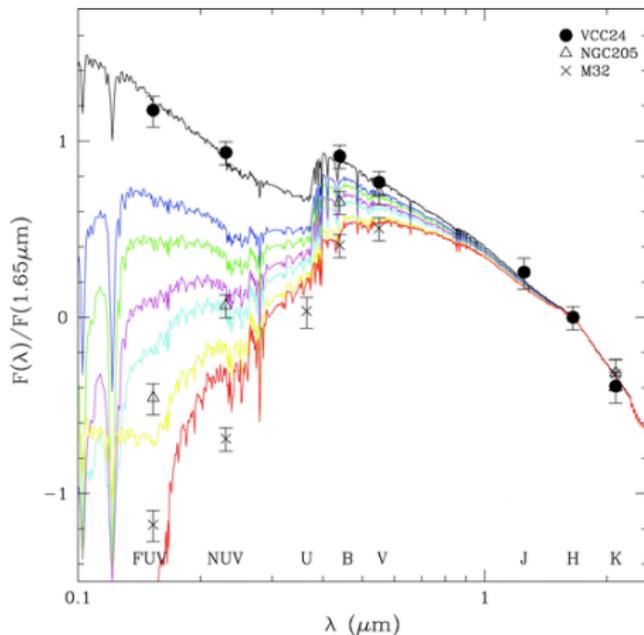


# Galaxias elípticas compactas (cE)

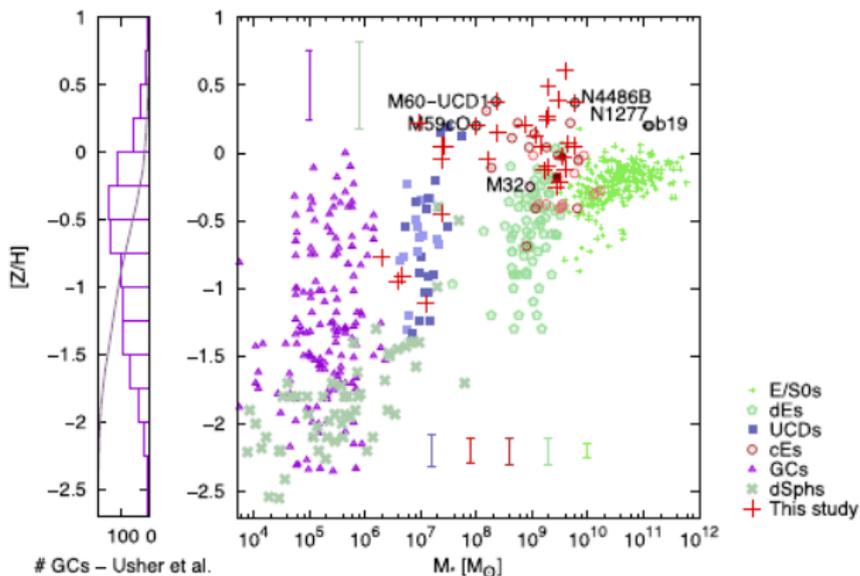


# Distribuciones espectrales de energía

VCC 24 (BCD), NGC 205 (dE), M 32 (cE)



# Galaxias enanas ultracompactas (UCD)



Janz et al. (2016)

# Galaxias enanas ultracompactas (UCD)

Orígenes propuestos

- 1 **evolución de fluctuaciones de densidad primordiales**
- 2 fusiones de GC
- 3 son el extremo de alta  $\mathcal{L}$  de la distribución de GC
- 4 núcleos de dE,N desnudadas en interacciones
- 5 creadas como supercúmulos tidales en fusiones de galaxias de gran masa

# Galaxias enanas ultracompactas (UCD)

Orígenes propuestos

- 1 evolución de fluctuaciones de densidad primordiales
- 2 fusiones de GC
- 3 son el extremo de alta  $\mathcal{L}$  de la distribución de GC
- 4 núcleos de dE,N desnudadas en interacciones
- 5 creadas como supercúmulos tidales en fusiones de galaxias de gran masa

# Galaxias enanas ultracompactas (UCD)

Orígenes propuestos

- 1 evolución de fluctuaciones de densidad primordiales
- 2 fusiones de GC
- 3 son el extremo de alta  $\mathcal{L}$  de la distribución de GC
- 4 núcleos de dE,N desnudadas en interacciones
- 5 creadas como supercúmulos tidales en fusiones de galaxias de gran masa

# Galaxias enanas ultracompactas (UCD)

Orígenes propuestos

- 1 evolución de fluctuaciones de densidad primordiales
- 2 fusiones de GC
- 3 son el extremo de alta  $\mathcal{L}$  de la distribución de GC
- 4 núcleos de dE,N desnudadas en interacciones
- 5 creadas como supercúmulos tidales en fusiones de galaxias de gran masa

# Galaxias enanas ultracompactas (UCD)

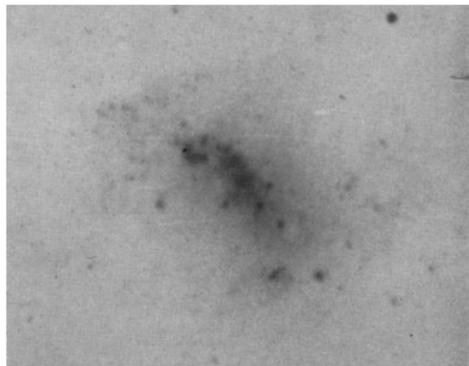
Orígenes propuestos

- 1 evolución de fluctuaciones de densidad primordiales
- 2 fusiones de GC
- 3 son el extremo de alta  $\mathcal{L}$  de la distribución de GC
- 4 núcleos de dE,N desnudadas en interacciones
- 5 creadas como supercúmulos tidales en fusiones de galaxias de gran masa

# Cap. 6: Galaxias enanas, irregulares, y peculiares

- 1 Galaxias enanas
- 2 Enanas elípticas
- 3 Enanas irregulares
- 4 Funciones de luminosidad e historias evolutivas
- 5 Enanas compactas
- 6 Galaxias irregulares**
- 7 Galaxias luminosas y ultraluminosas en infrarrojo

# Galaxias irregulares



NGC 4214

# Galaxias irregulares



NGC 4449



NGC 1427A

Actualmente, la clasificación como galaxia Irr se aplica a objetos que cumplen con:

- 1 sistemas tardíos de baja masa (y baja luminosidad:  $-16 \gtrsim M_B \gtrsim -18$ ),
- 2 cuya rotación no alcanza a generar una estructura espiral (ni siquiera incipiente, como en la LMC).

Su aspecto irregular se debe entonces a una distribución desordenada de las regiones de formación estelar

Actualmente, la clasificación como galaxia Irr se aplica a objetos que cumplen con:

- 1 sistemas tardíos de baja masa (y baja luminosidad:  $-16 \gtrsim M_B \gtrsim -18$ ),
- 2 cuya rotación no alcanza a generar una estructura espiral (ni siquiera incipiente, como en la LMC).

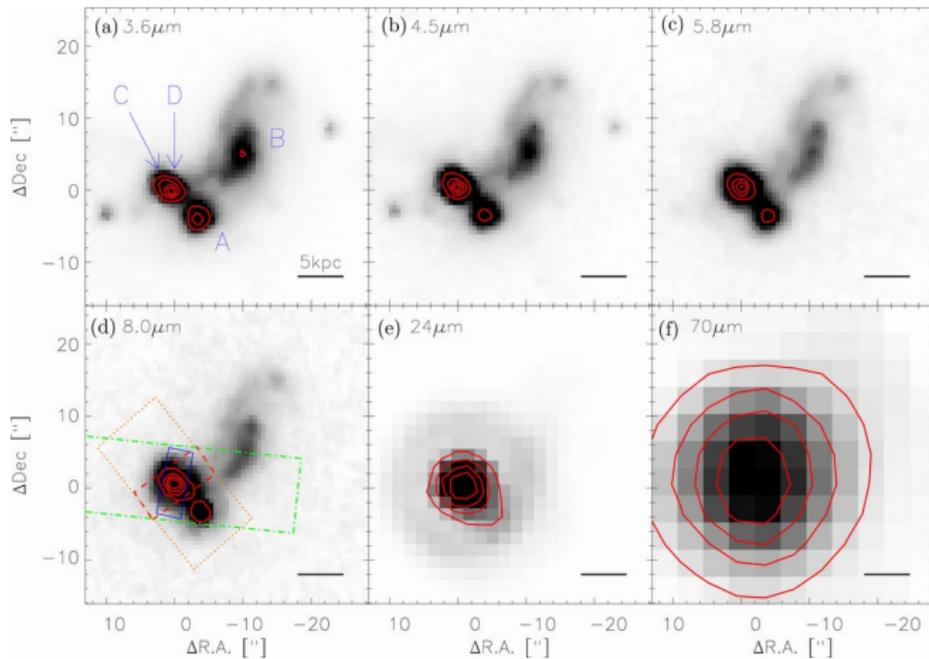
Su aspecto irregular se debe entonces a una distribución desordenada de las regiones de formación estelar

# Cap. 6: Galaxias enanas, irregulares, y peculiares

- 1 Galaxias enanas
- 2 Enanas elípticas
- 3 Enanas irregulares
- 4 Funciones de luminosidad e historias evolutivas
- 5 Enanas compactas
- 6 Galaxias irregulares
- 7 Galaxias luminosas y ultraluminosas en infrarrojo**

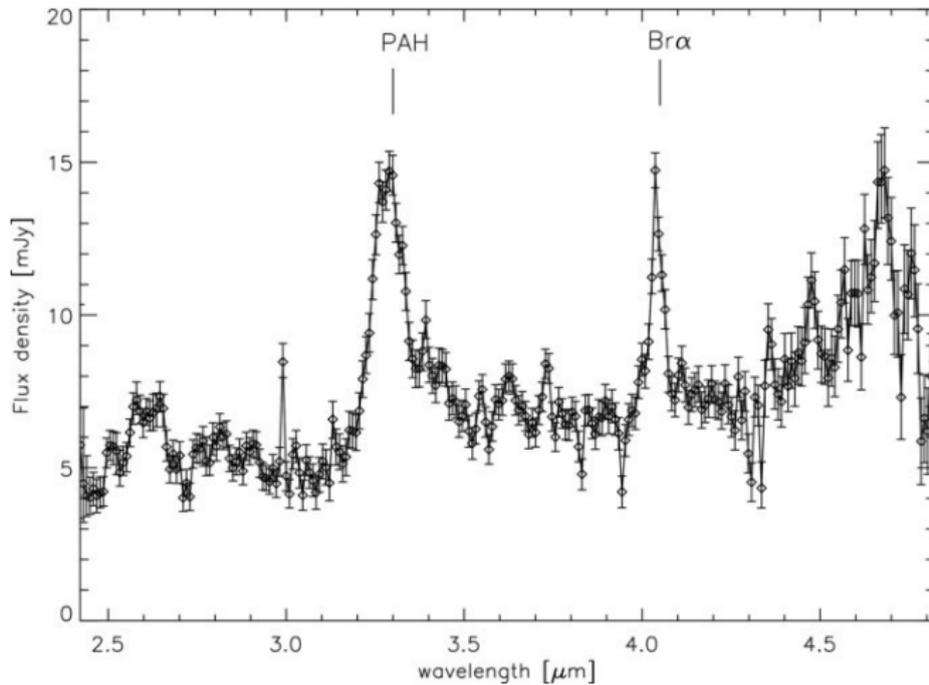
# Galaxias luminosas en infrarrojo (LIRG)

II Zw96



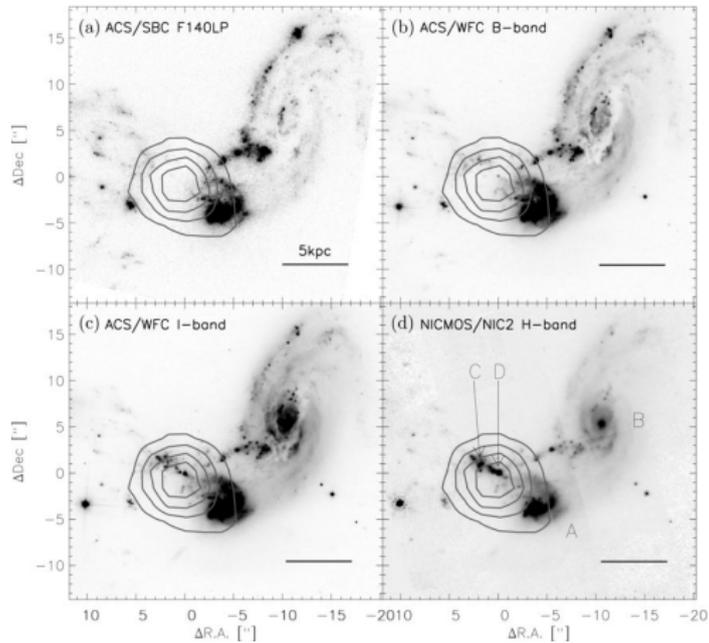
# Galaxias luminosas en infrarrojo (LIRG)

II Zw96



# Galaxias luminosas en infrarrojo (LIRG)

II Zw96



# Galaxias luminosas en infrarrojo (LIRG)

II Zw96

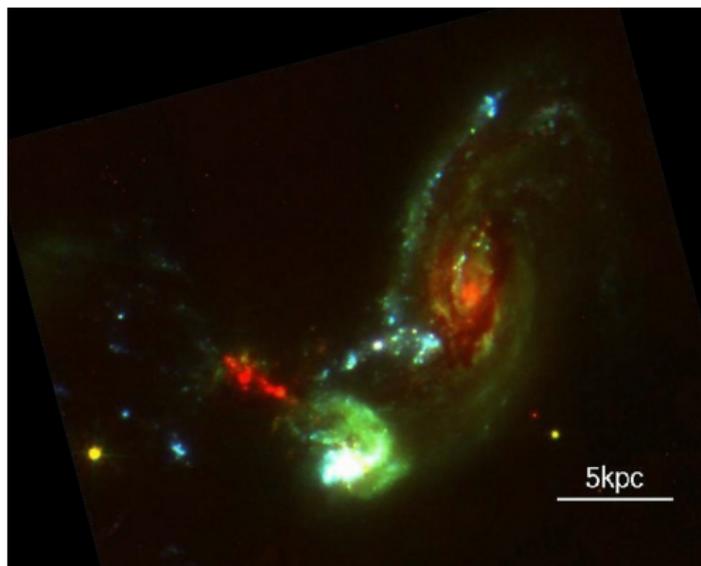
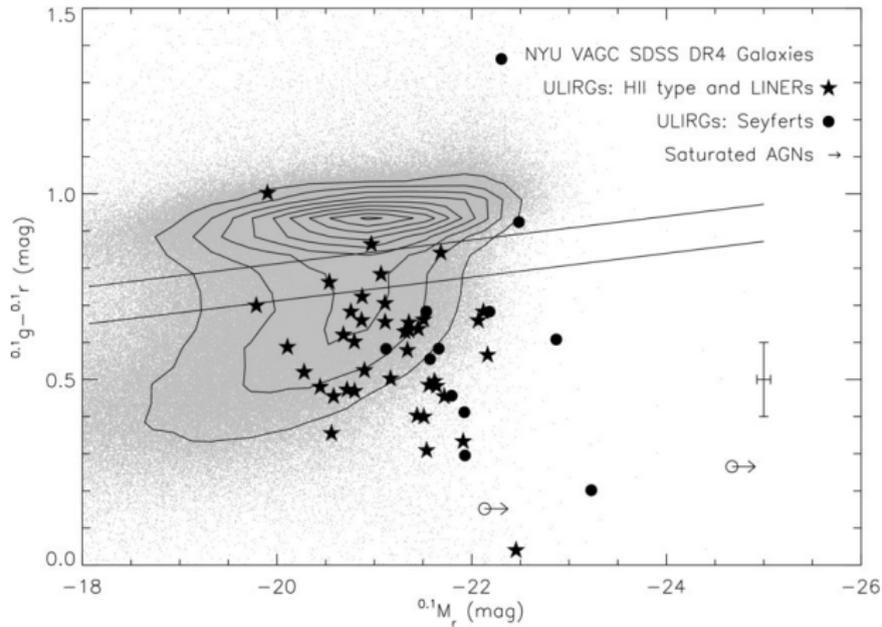


Imagen color falso de II Zw96 con el HST, combinando una banda FUV (azul), banda *B* (verde), y banda *H* (NICMOS, rojo).

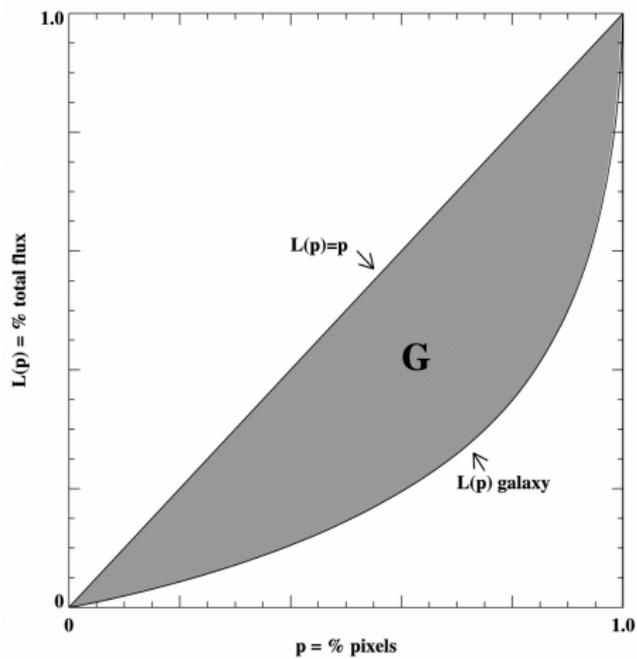
# Galaxias ultraluminosas en infrarrojo (ULIRG)

Comparación con galaxias normales en el SDSS



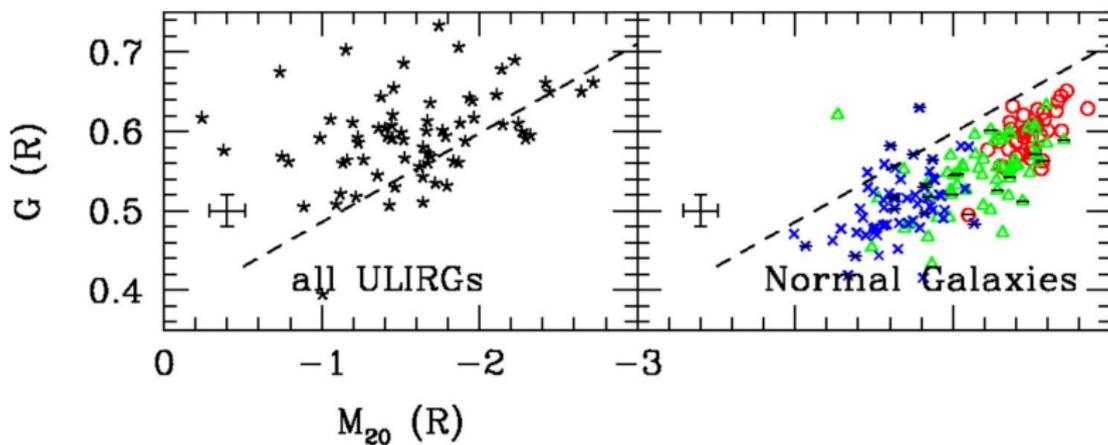
# Morfología cuantitativa

El índice de Gini



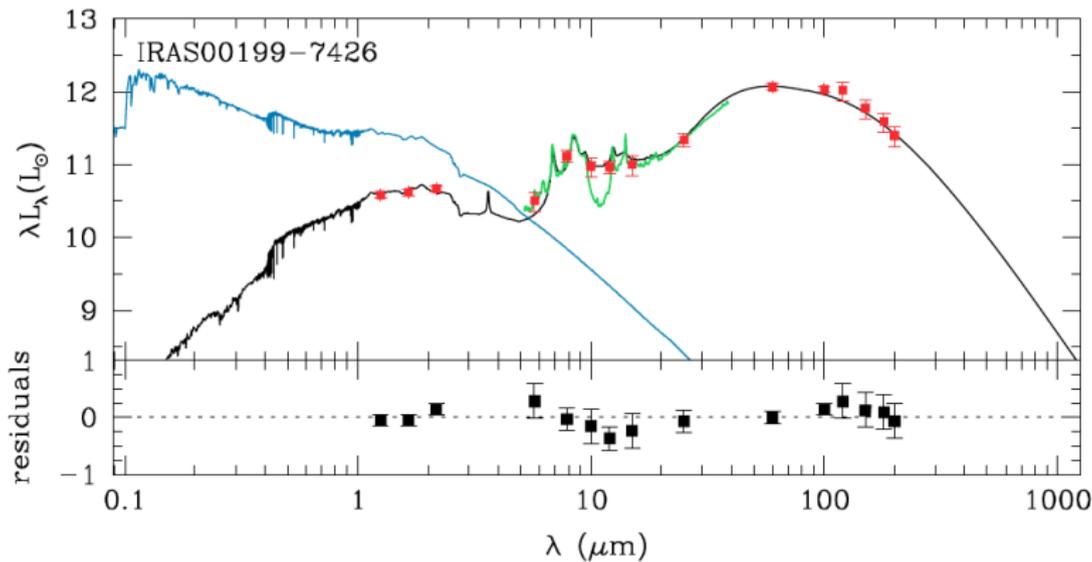
# Morfología cuantitativa

El índice de Gini y el  $M_{20}$



# Galaxias ultraluminosas en infrarrojo (ULIRG)

Distribuciones espectrales de energía



- *Galaxies in the Universe: An Introduction*,  
Linda S. Sparke & John S. Gallagher III (Cambridge  
University Press, 2nd. Edition, 2000).
- *Star-formation histories, abundances, and kinematics of  
dwarf galaxies in the Local Group*,  
Eline Tolstoy, Vanessa Hill, & Monica Tosi (2009, ARA&A,  
47, 371).
- *Galaxy Formation*,  
M. J. Hudson  
(<http://astro.uwaterloo.ca/~mjudson/teaching/phys787/>)
- *Tidal Dwarf Galaxies*,  
P. A. Duc & I. F. Mirabel (1999, en “Galaxy Interactions at  
Low and High Redshift”, IAU Symp. 186, p. 61)