

CTE II

Galaxias

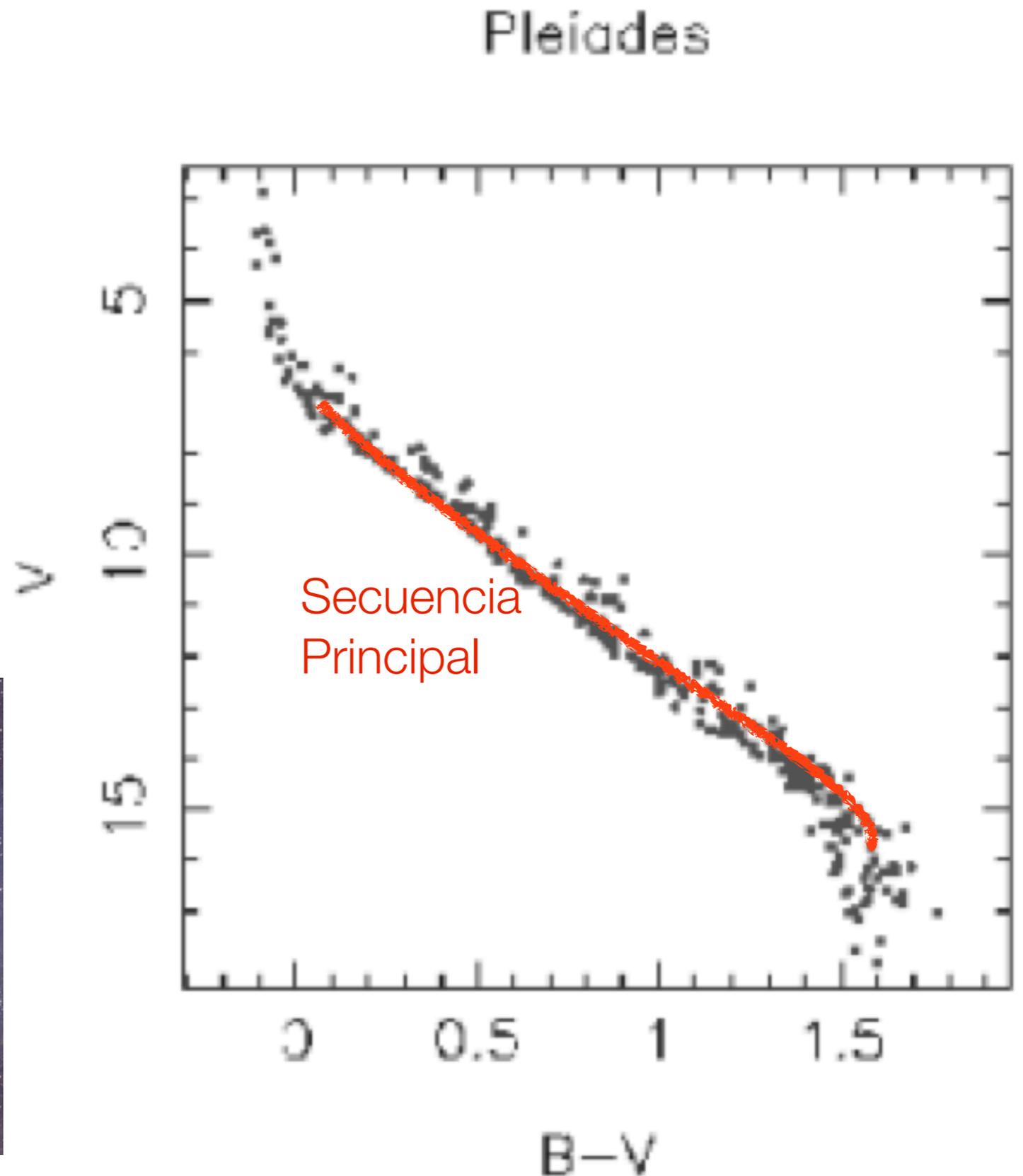
Cecilia Mateu

Instituto de Física, Facultad de Ciencias
Universidad de la República

llegamos hasta aquí

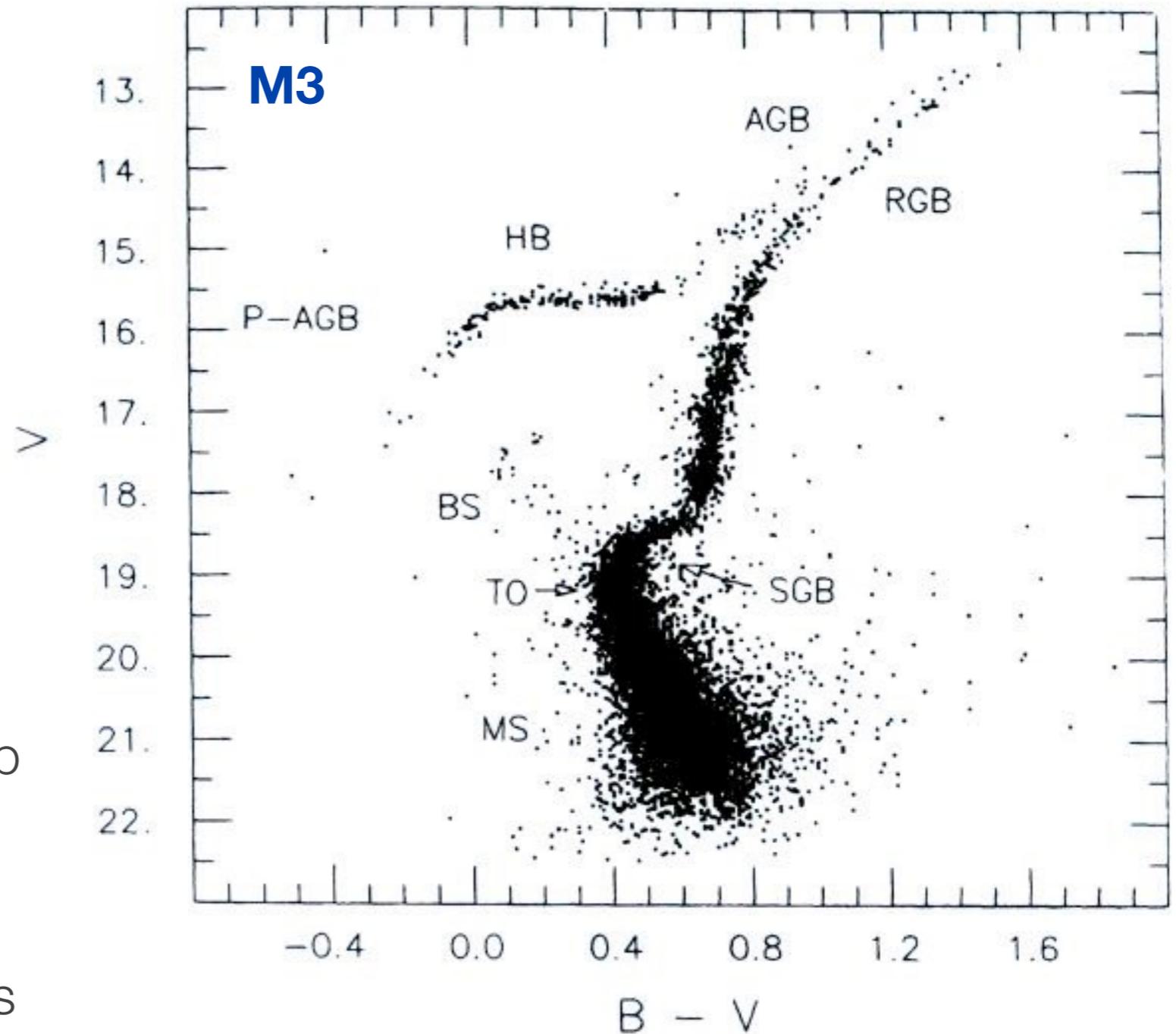
Cúmulos Abiertos : Diagramas Color-Magnitud

- Edad: Mayoritariamente poblaciones estelares jóvenes (desde pocos Maños hasta pocos decenas de Maños)
- Diagrama color-magnitud:
 - Para poblaciones muy jóvenes como éstas, sólo se observa la secuencia principal

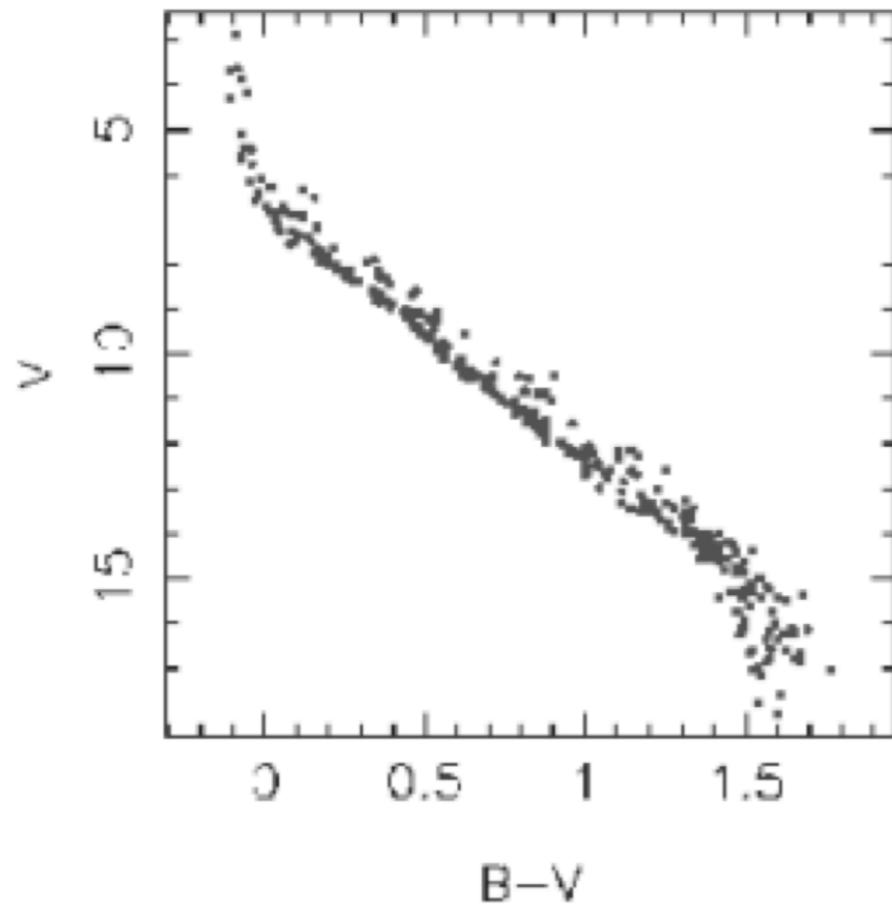


Cúmulos Globulares: Diagramas Color-Magnitud

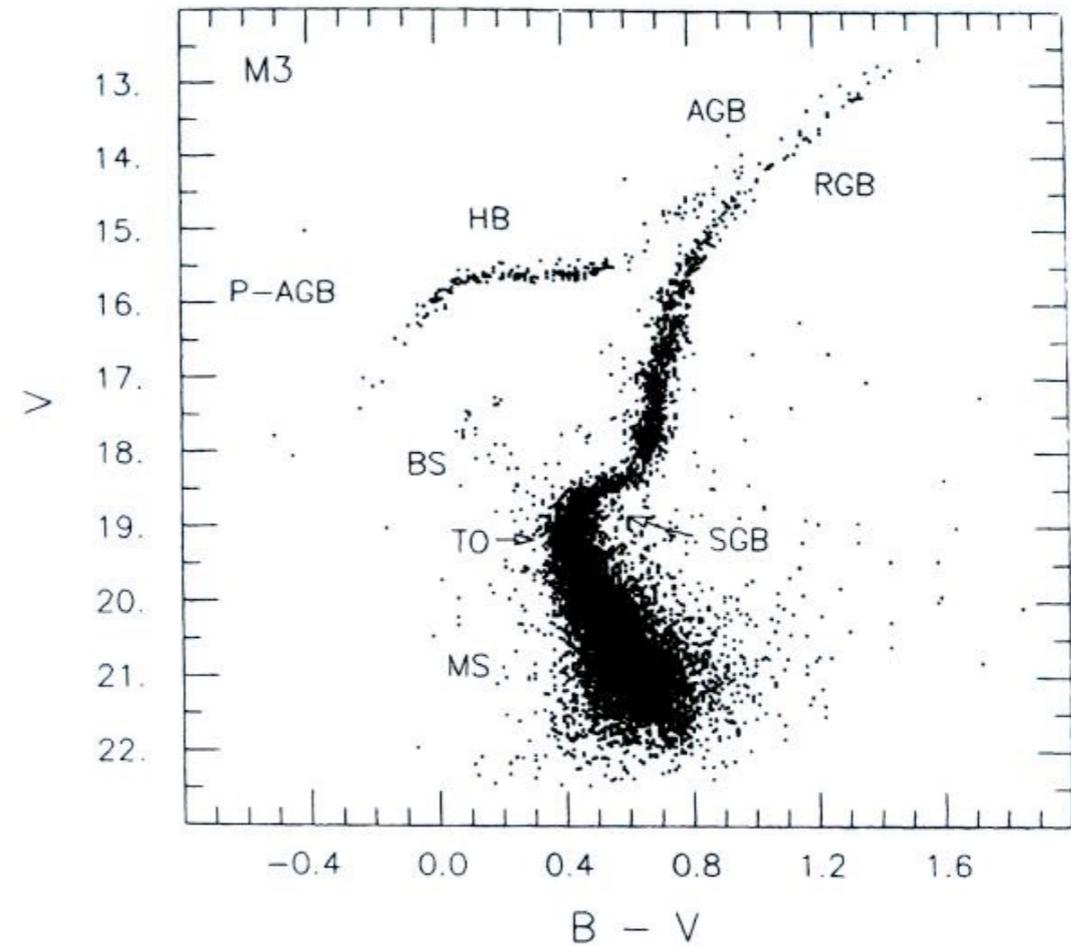
- Edad: Mayoritariamente poblaciones estelares viejas (~7-13 Gaños)
- Diagrama Color-Magnitud:
 - Rama de las Gigantes Rojas
 - Rama de Subgigantes
 - Rama Asintótica de las Gigantes (a veces no)
 - Rama Horizontal o Red Clump (dependiendo de la edad y metalicidad)
 - Secuencia de Enanas Blancas (si las observaciones son suficientemente profundas)



Cúmulos Estelares: Abiertos y Globulares



Cúmulo Abierto



Cúmulo Globular

Cúmulos Abiertos

- Tienen desde decenas hasta pocos miles de estrellas
- Edad: Mayoritariamente poblaciones estelares jóvenes (desde pocos Maños hasta pocos Gaños)
- Abundancias químicas: similares a la del Sol
- En los cúmulos más jóvenes puede haber gas de la nube progenitora
- Están débilmente ligados gravitatoriamente
 - Se dispersan en “poco” tiempo: pocas decenas de Maños



1 Maño = 10^6 años
1 Gaño = 10^9 años

Asociaciones

- Son aglomeraciones con pocas estrellas, del orden de pocas decenas a ~100. Hay dos grandes tipos:
- **Asociaciones OB:** Asociaciones con una fracción importante de estrellas tipo O y/o B. Ejemplos: Orión OB1, Sco-Cen OB (~46pc)
- **Asociaciones T:** Asociaciones con una fracción importante de estrellas T-Tauri (estrellas jóvenes, variables, pre-secuencia principal). Ejemplos: Ori T2, Cygnus T, Tauro-Auriga (~140pc)
- Edades: Jóvenes, edades menores a pocas decenas de Maños
- Puede haber gas remanente de la nube progenitora



Orión OB1

Cúmulos Globulares

- Tienen desde varios miles hasta millones de estrellas
- Muy concentrados, tienen radios desde unos pocos pc hasta ~ 20 pc
- Edad: Mayoritariamente poblaciones estelares viejas ($\sim 7-13$ Gaños)
- Abundancias químicas: más pobres en metales que el Sol
- No hay absolutamente nada de gas
- Están fuertemente ligados gravitatoriamente
- Se dispersan en tiempos muy largos, \gtrsim edad del Universo



NGC 6934

La Vía Láctea

M31

VÍA LÁCTEA

¿cómo pasamos de esto...

Breve cronología: La Vía Láctea como una galaxia

- 1610 Galileo Galilei utiliza el primer telescopio para observar la Vía Láctea: observa que la “nube” visible a simple vista está compuesta de ininidad de estrellas

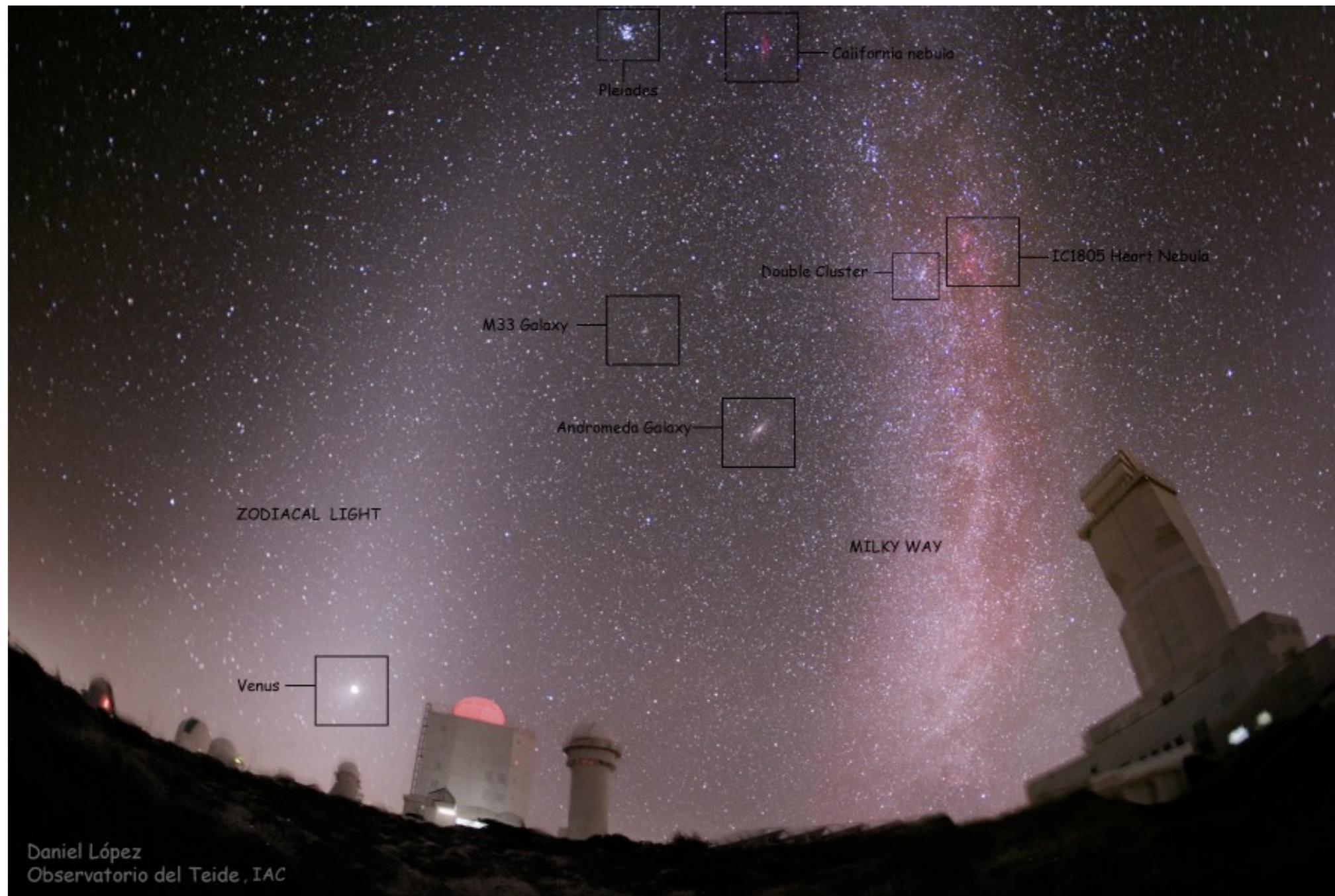


Breve cronología: La Vía Láctea como una galaxia

1755 Immanuel Kant propone que la Vía Láctea es un conglomerado de estrellas distribuidas en forma de disco, estando el Sol ubicado dentro de éste.

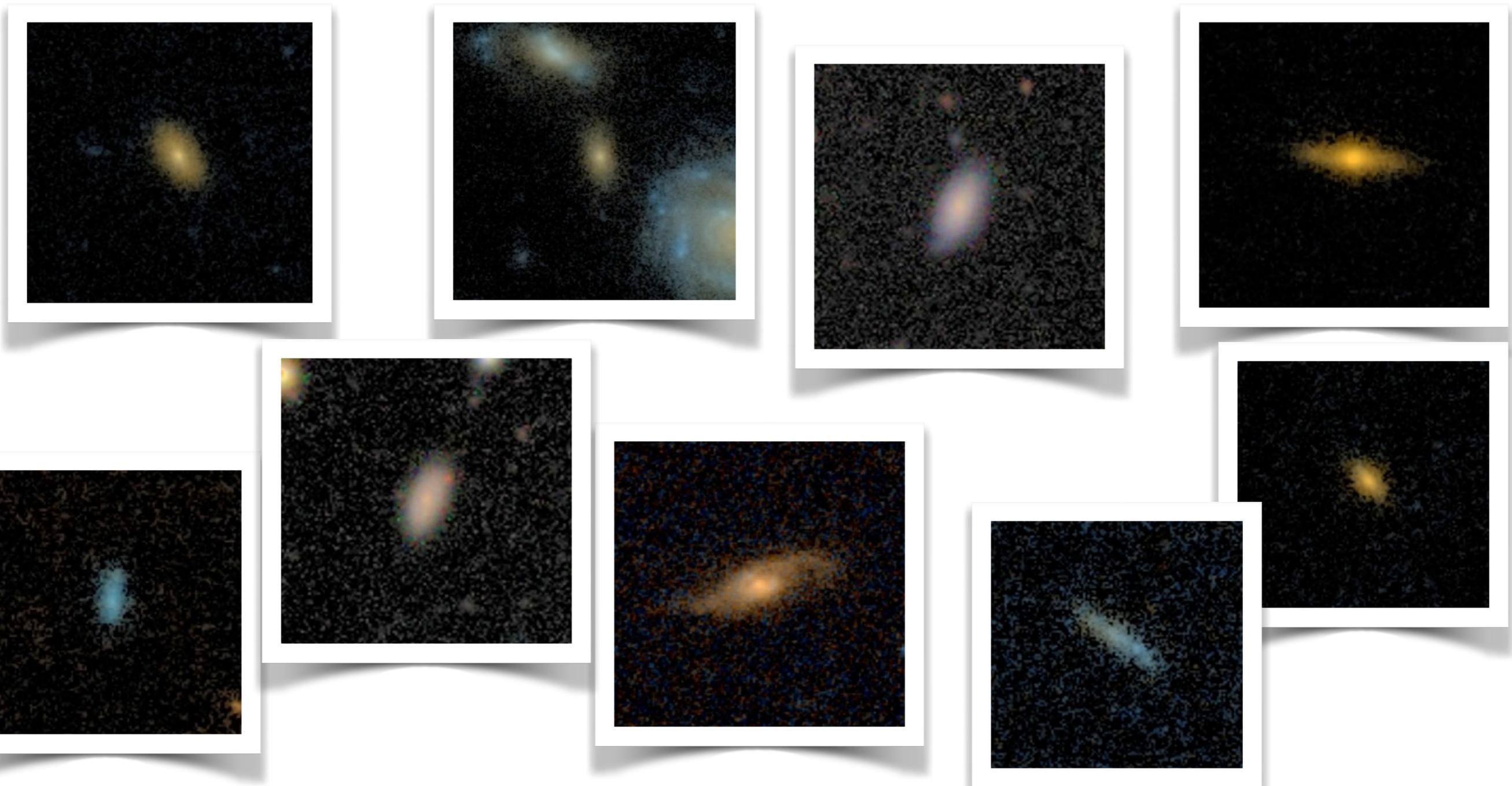


Breve cronología: La Vía Láctea como una galaxia



- Kant propone también que las “nebulosas” observadas son conglomerados de estrellas como la Vía Láctea, ubicados fuera de ésta, a los cuales denomina “*Universos Isla*”

Breve cronología: La Vía Láctea como una galaxia



- Kant propone también que las “nebulosas” observadas son conglomerados de estrellas como la Vía Láctea, ubicados fuera de ésta, a los cuales denomina “*Universos Isla*”

La Vía Láctea: Estructura

Hasta el momento tenemos la siguiente información sobre la Vía Láctea

- Es un sistema compuesto por un gran número de estrellas, lo que hoy en día llamamos una galaxia
- La mayoría de las estrellas está concentrada en un **Disco**
- Hay una zona central o **Bulbo** de gran densidad de estrellas
- El Sol no se encuentra en el centro de la Galaxia
- Los cúmulos globulares se distribuyen en un **Halo** ~esférico dentro del cual el **Disco** está embebido

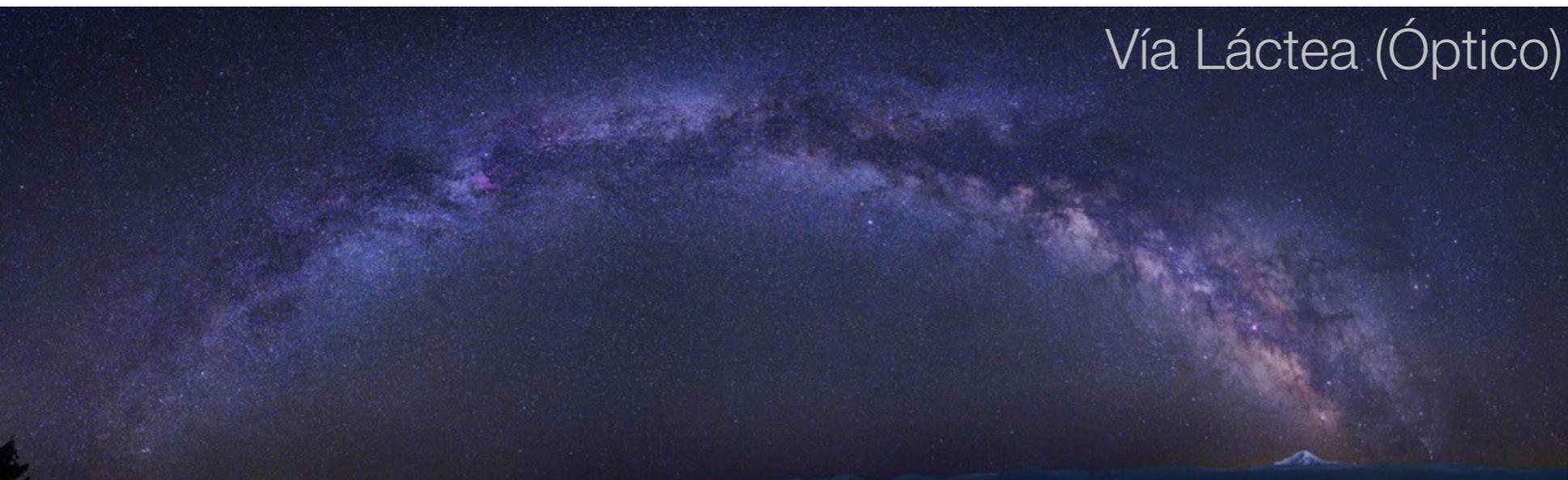
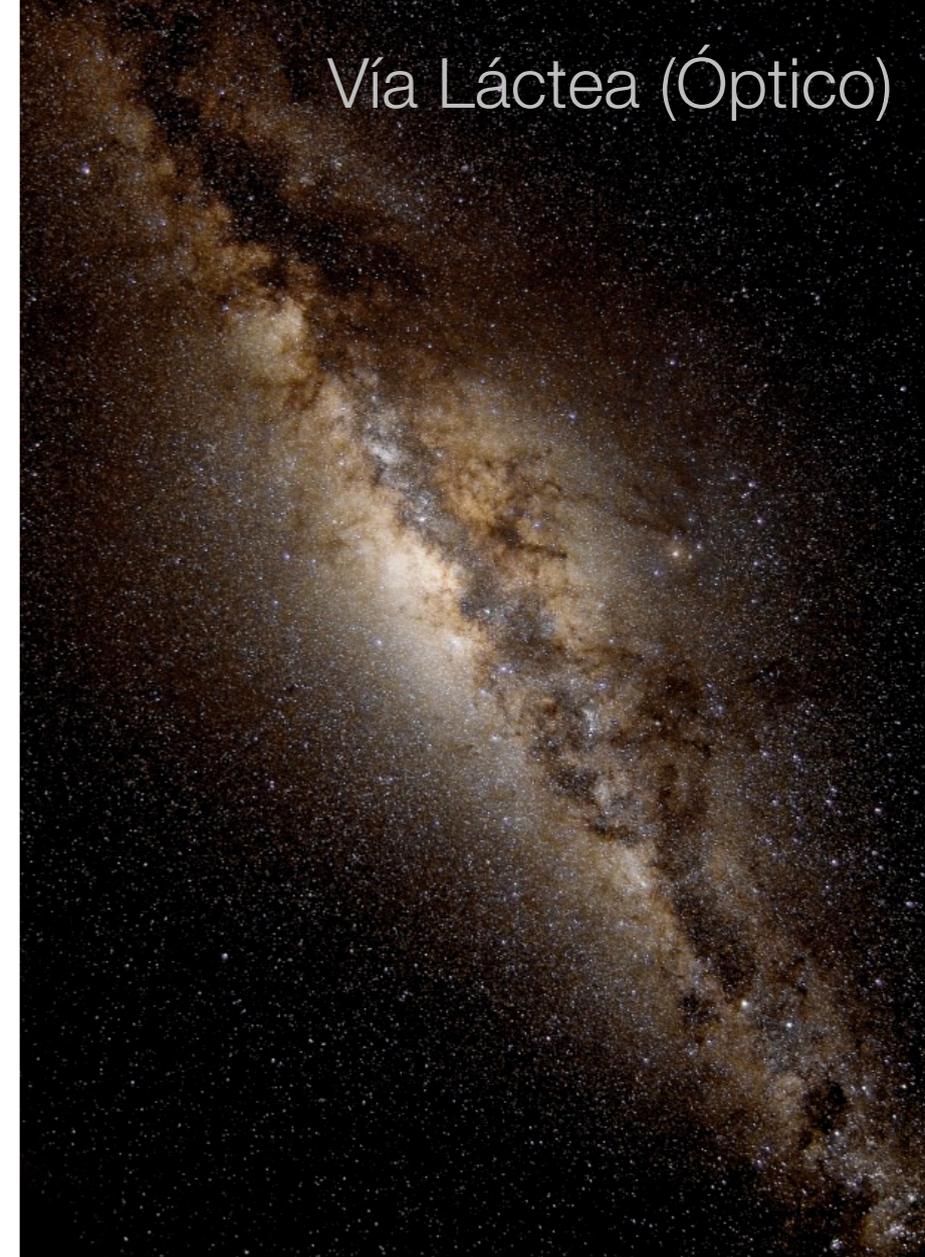
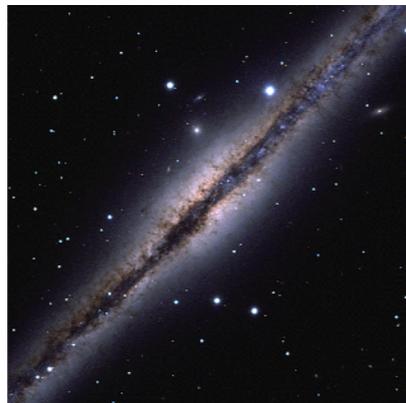


¿A qué se deben estas
las zonas oscuras?

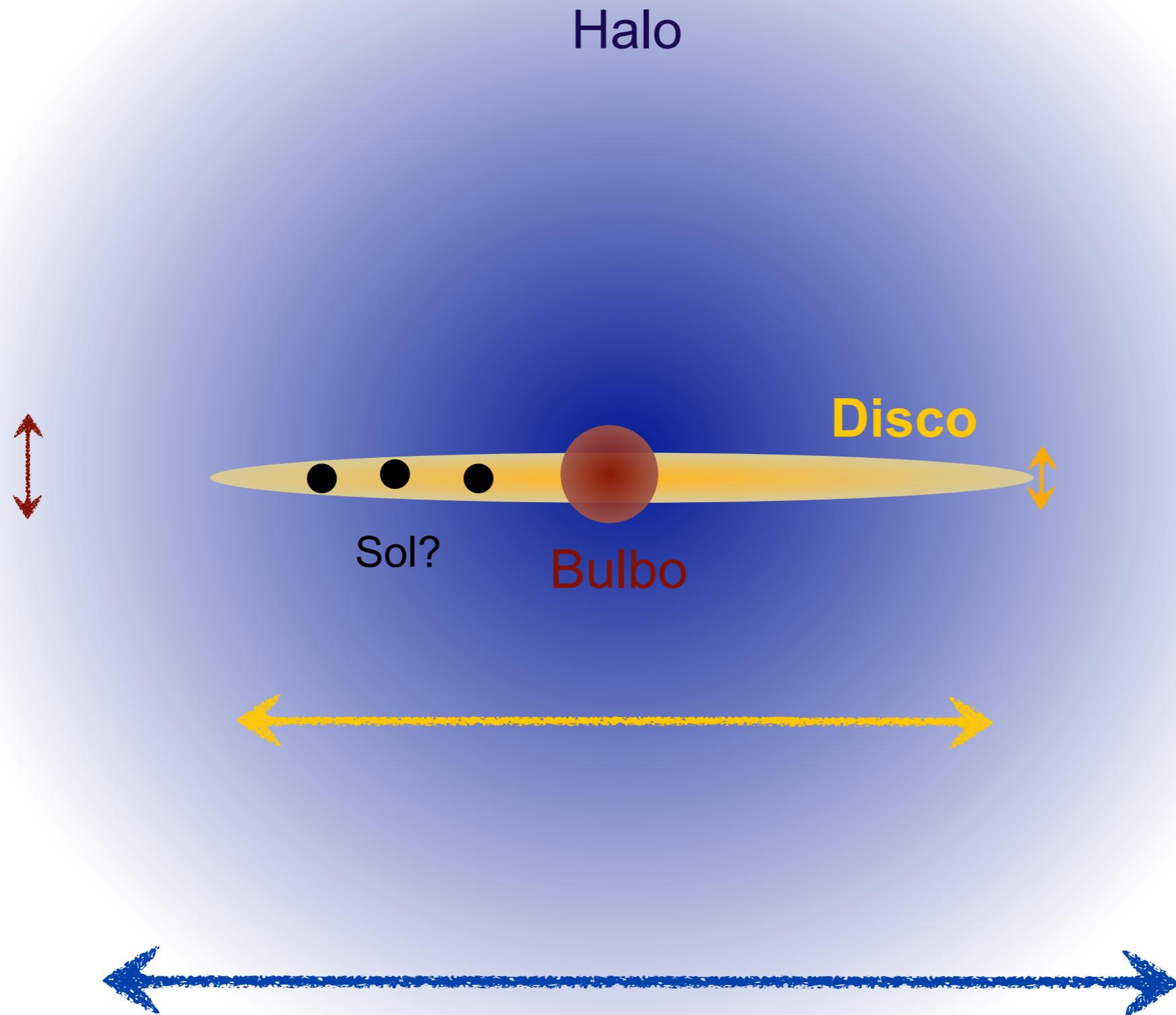
¿Qué más se observa?

La Vía Láctea: El Disco Medio Interestelar

- Curtis propuso que la franja oscura visible en la Vía Láctea es como las franjas observadas en las (galaxias) espirales de canto
- Las zonas oscuras se deben a extinción debida a la presencia de **polvo** en las nubes moleculares presentes en el Disco de la Vía Láctea



Esquema de la Estructura de la Vía Láctea



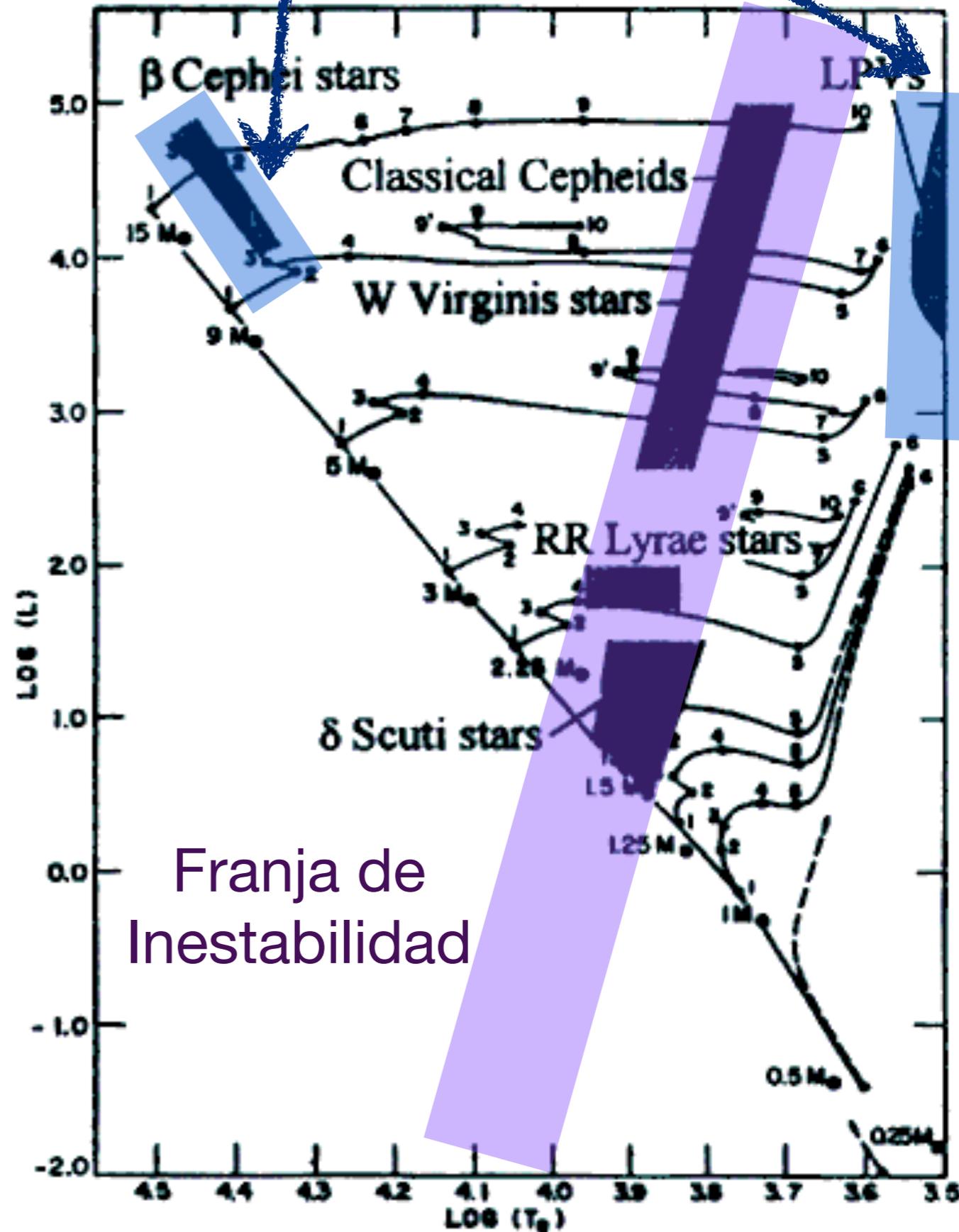
La Vía Láctea: Estructura

- ¿cómo se distribuyen las estrellas en la Vía Láctea? ¿qué extensión tienen las componentes que hemos visto?
- el Sol, ¿qué posición ocupa?
- ¿cómo saber si las nebulosas están dentro o fuera de la Vía Láctea?
- Para poder responder estas preguntas y, en general, hacer estudios de estructura Galáctica es clave poder medir distancias...

Medida de la distancia

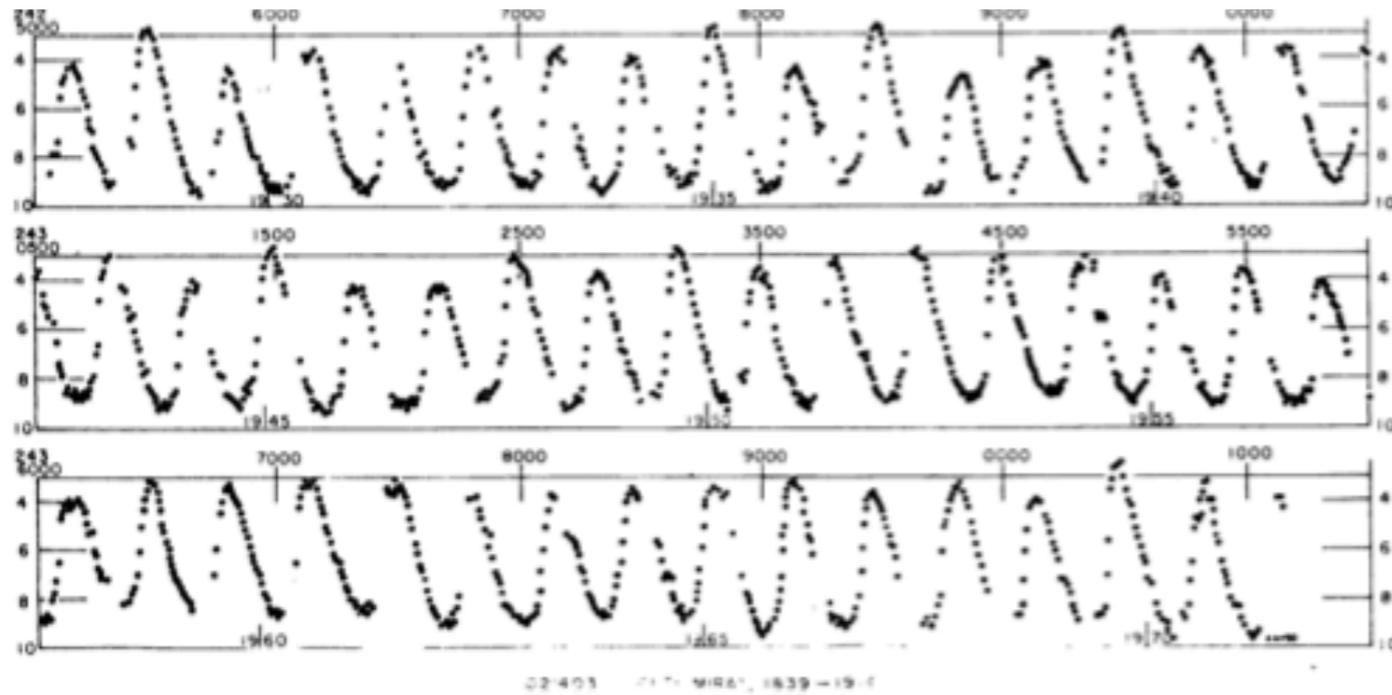
Variables Pulsantes

- Estrellas en la franja de inestabilidad pulsán radialmente
- Dependiendo de la zona del diagrama H-R, la franja de inestabilidad (FI) puede producir estrellas pulsantes de diferente tipo, en poblaciones de edades diferentes:
 - FI + Supergigantes Azules: Cefeidas Clásicas y W Virginis
 - FI + HB: estrellas RR Lyrae
 - FI + MS: estrellas Delta Scuti o SX Phoenicis
 - FI + Secuencia de Enanas Blancas: ZZ Ceti (DAV)

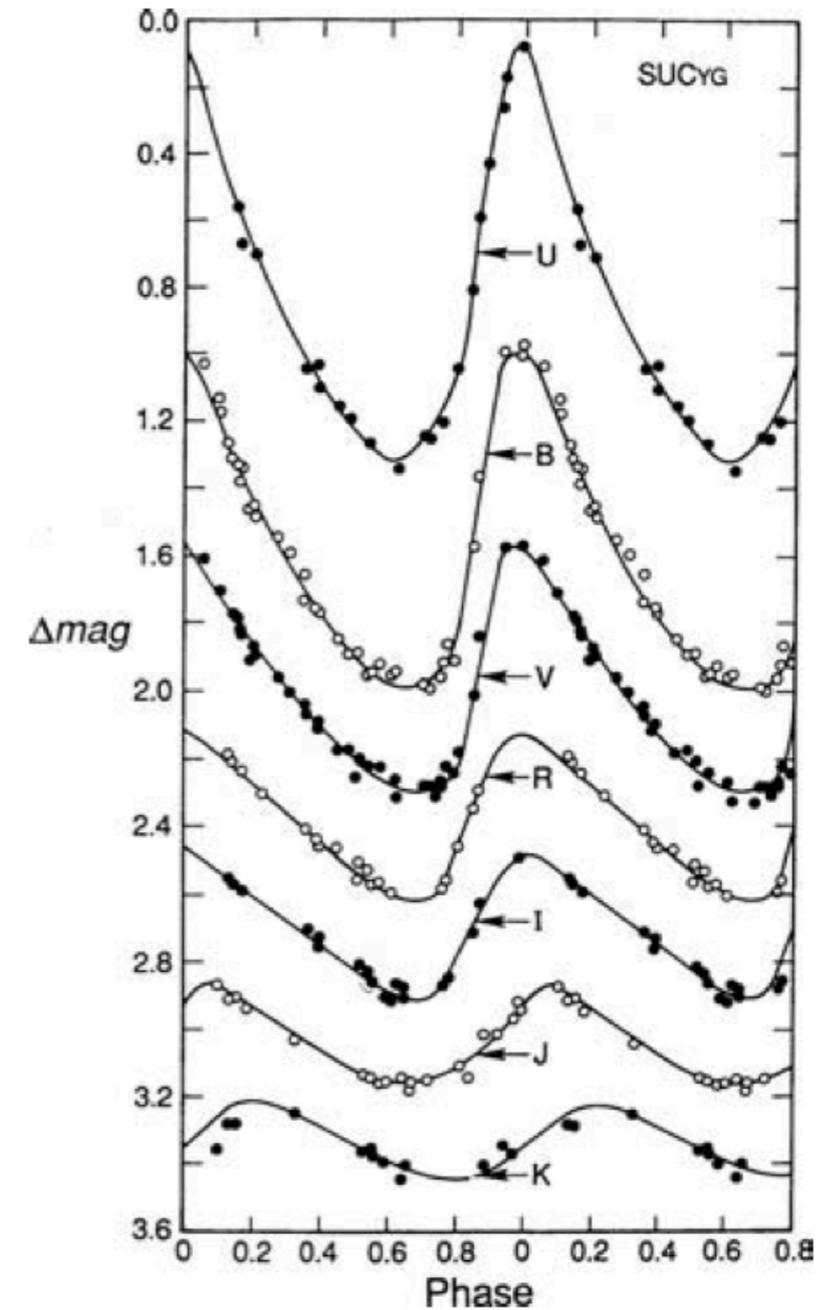


Variables Pulsantes: Curvas de Luz

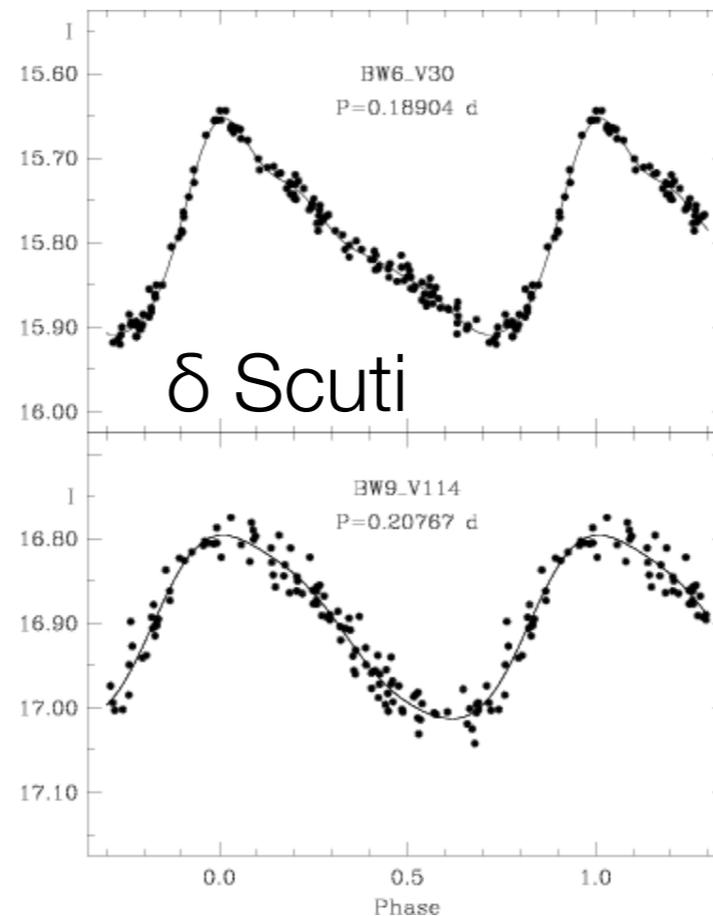
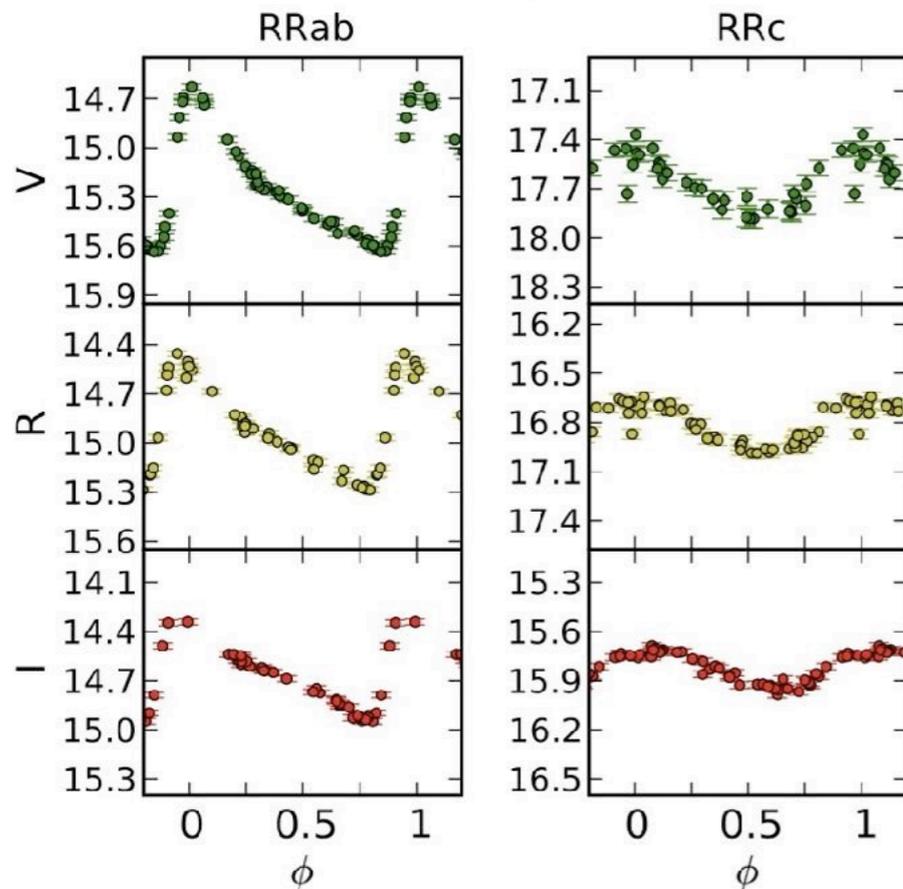
Mira



Cefeidas



RR Lyrae



VARIABLES PULSANTES

- Los diferentes tipos de estrellas variables son trazadores de poblaciones estelares de edades diferentes
- Características observacionales:

Class name	Period	Amplitude (mag)
α Cyg	1-50 d	few 0.1
β Cephei	2-12 h	up to 0.05
Cepheids	2-70 d	0.1-1.5
δ Scuti	30 min - 6 h	up to few 0.1
EC 14026	80 s-8 min	up to 0.03
γ Dor	8 h -3 d	up to few 0.01
GW Vir	5 min-80 min	up to 0.2
PG1716 "Betsy"	30-150 min	up to \sim 0.01
roAp	5-20 min	up to 0.01
RR Lyrae	5 h-1.1 d	0.2-2
RV Tau	30-150 d	1-3
SPB	0.5-5 d	up to 0.03
SR, Mira	50-1000 d	up to 8
V777 Her	2-16 min	up to 0.2
W Vir	1-20 d	0.3-1.2
ZZ Ceti	0.5-25 min	up to 0.2

Cúmulos Globulares: RR Lyrae
Población Joven: Cefeidas

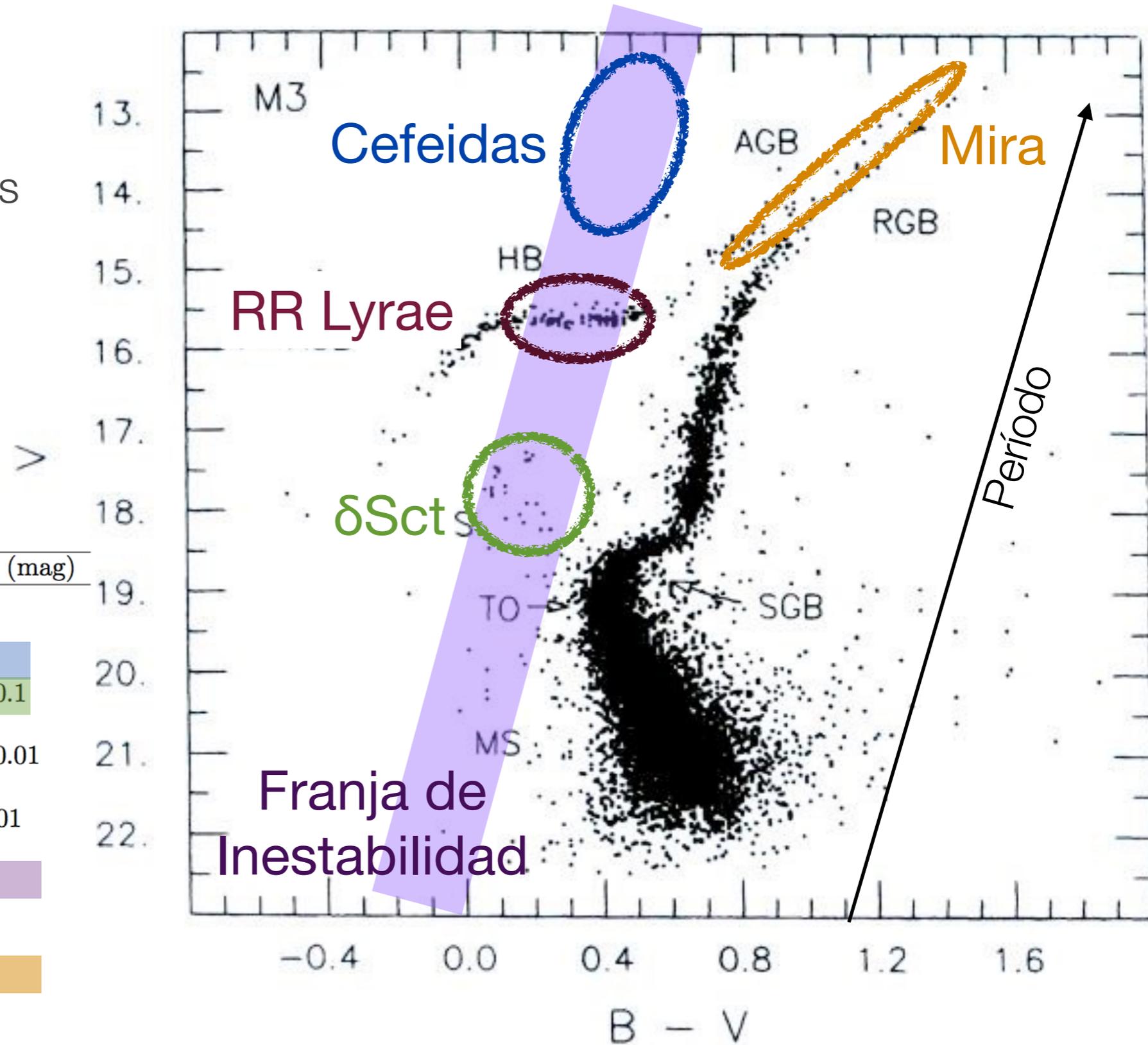


Diagrama Color-Magnitud del Cúmulo globular M3

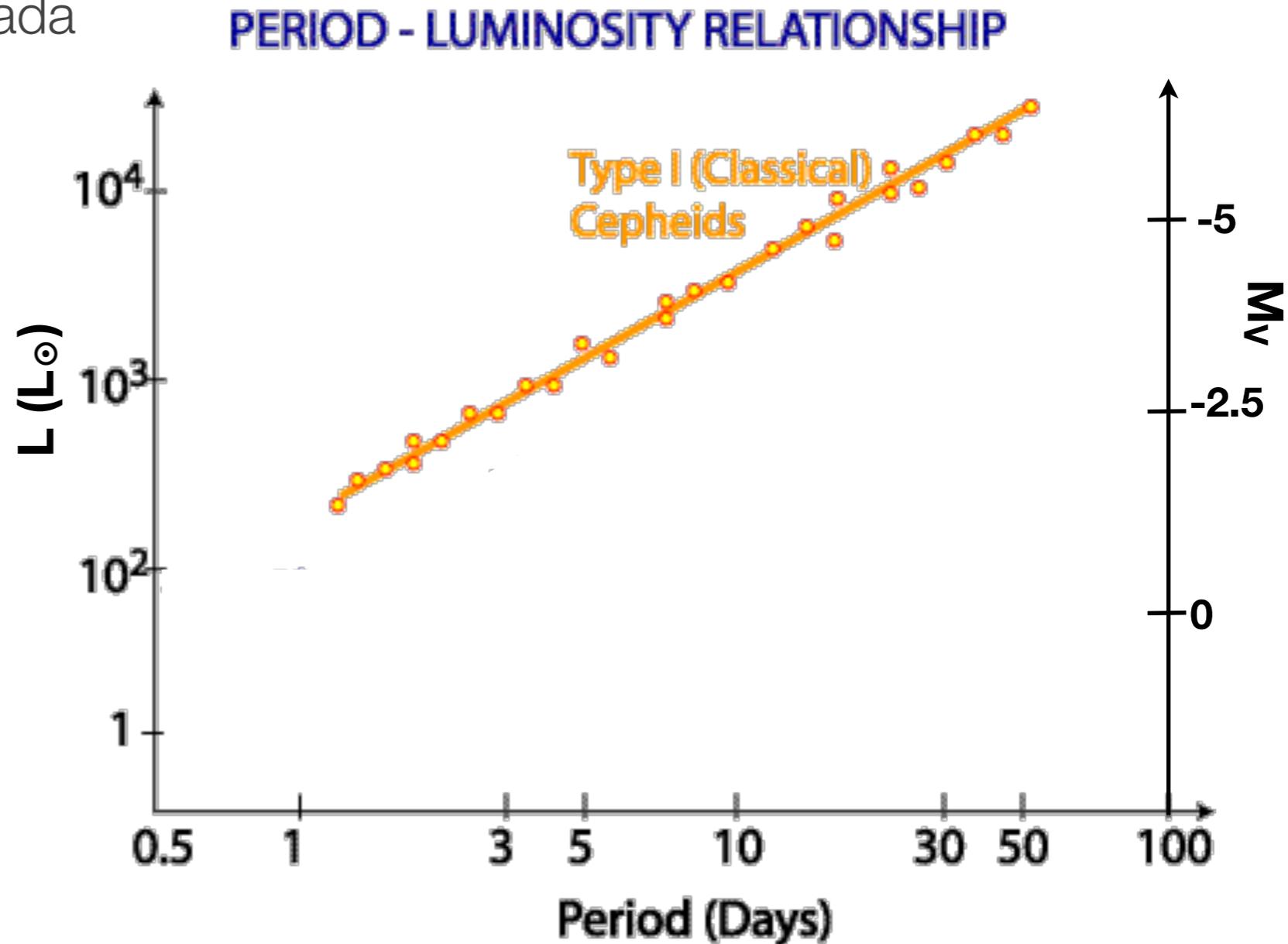
VARIABLES PULSANTES: RELACIÓN PERÍODO-LUMINOSIDAD

- En general, las variables pulsantes siguen una **relación Período-Luminosidad** (diferente para cada tipo de variable)

- La Relación P-L en Cefeidas fue **descubierta por Henrietta Swann-Leavitt (1908)** observando Cefeidas en las Nubes de Magallanes

Dada la magnitud absoluta M , calculada a partir del período y la relación P-L, y magnitud la aparente m (observada), podemos calcular d mediante la Ec. de Pogson:

$$(m-M) = 5 \log(d(\text{pc})) + 5$$



VARIABLES PULSANTES: RELACIÓN PERÍODO-LUMINOSIDAD

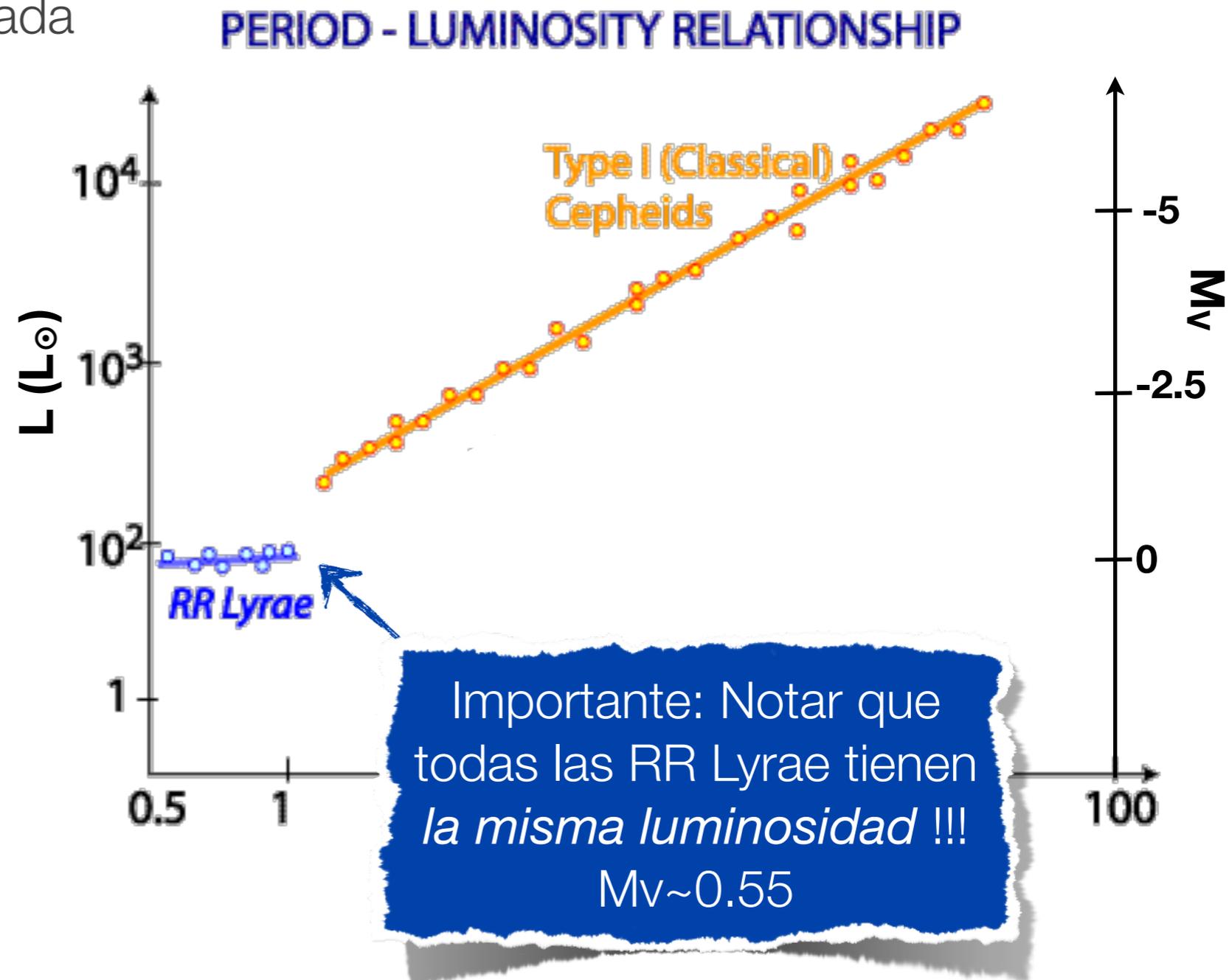
- En general, las variables pulsantes siguen una **relación Período-Luminosidad** (diferente para cada tipo de variable)

- La Relación P-L en Cefeidas fue **descubierta por Henrietta Swann-Leavitt (1908)** observando Cefeidas en las Nubes de Magallanes

Dada la magnitud absoluta M , calculada a partir del período y la relación P-L, y magnitud la aparente m (observada), podemos calcular d mediante la Ec. de Pogson:

$$(m-M) = 5 \log(d(\text{pc})) + 5$$

$$M = a \log P + b$$

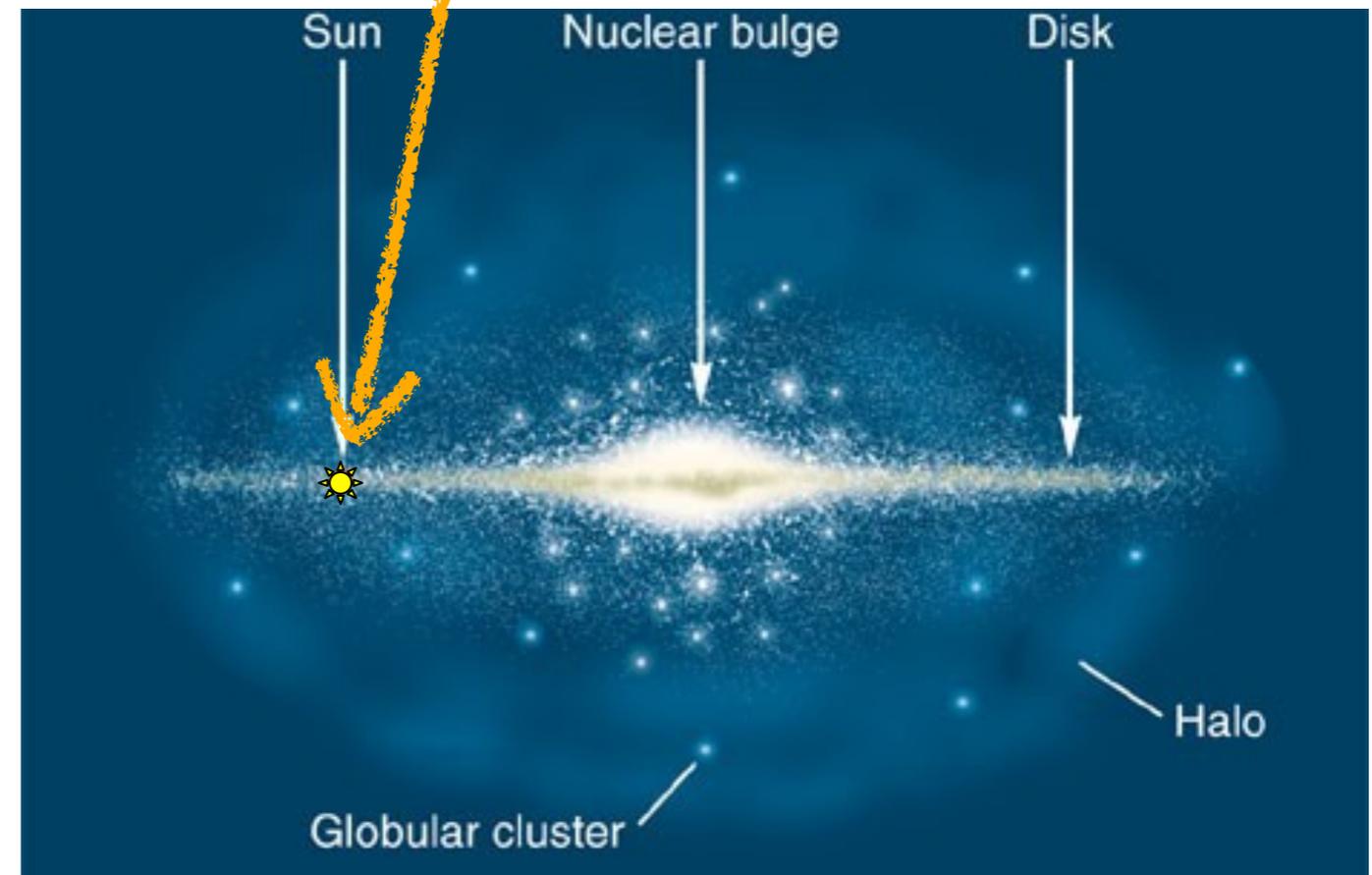
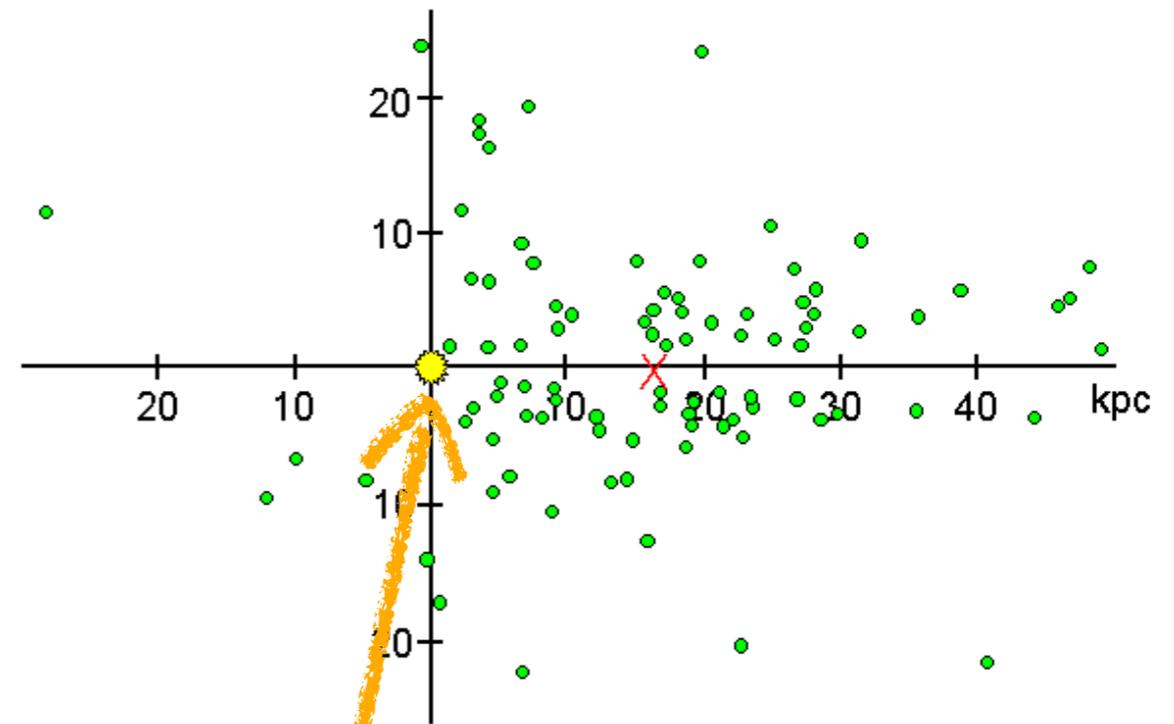


Nota: aunque se llama Período-Luminosidad, la ecuación solemos expresarla en términos de la mag absoluta, porque la relación es logarítmica en L y en P

Breve cronología: La Vía Láctea como una galaxia

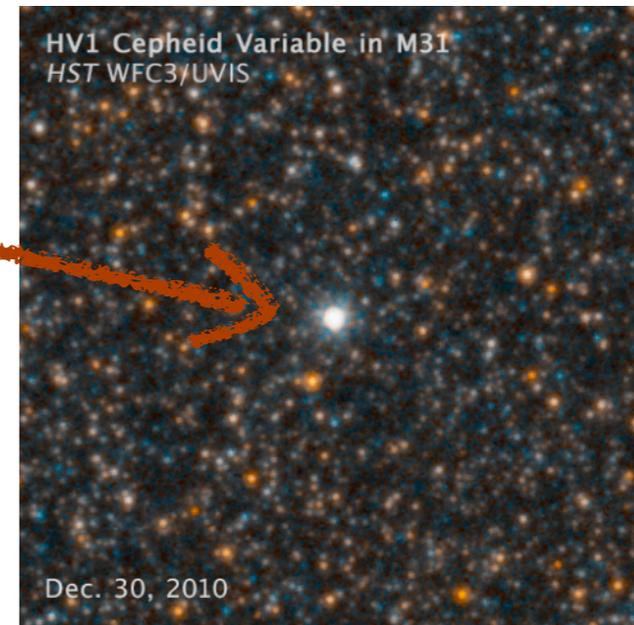
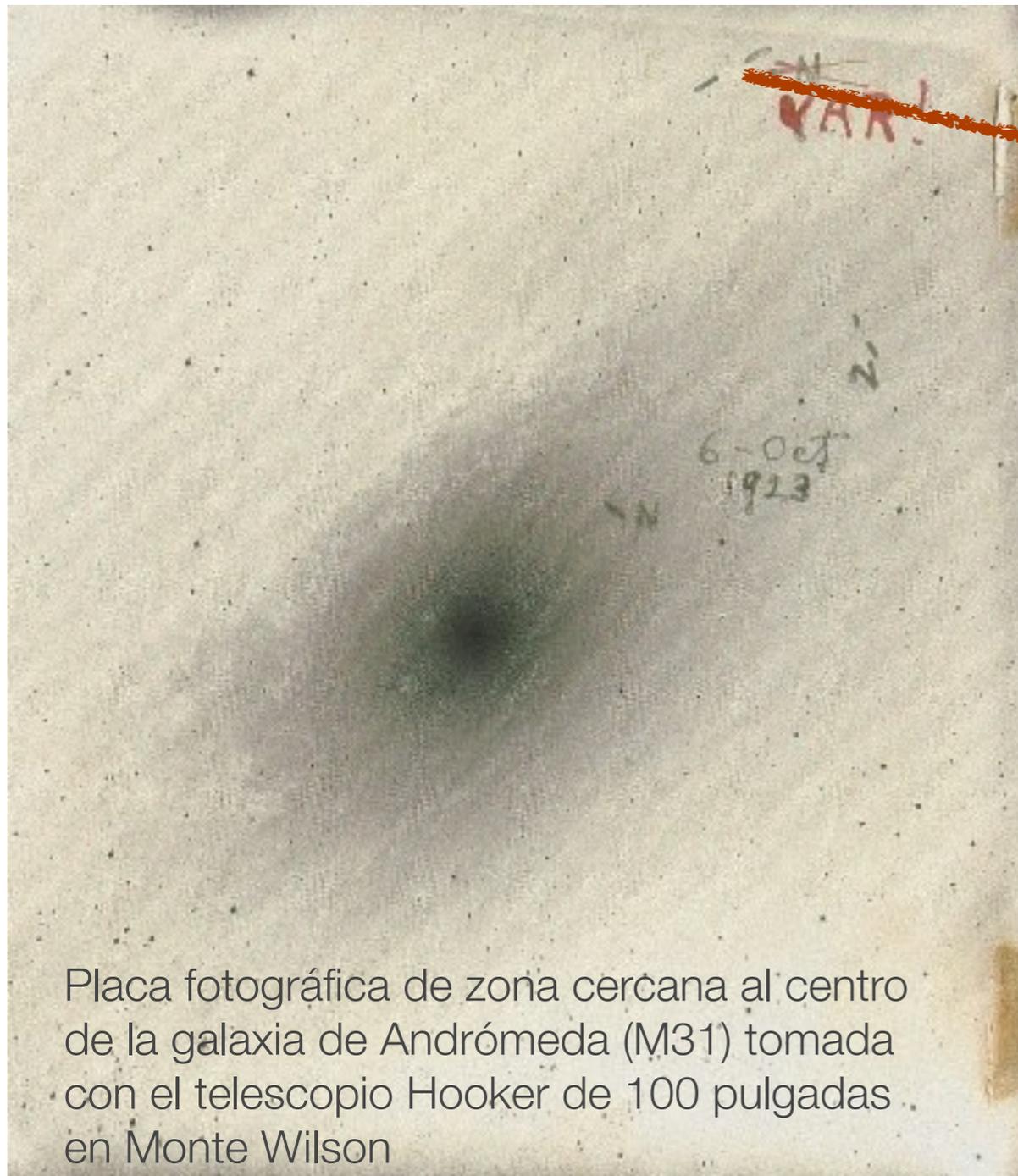
- 1920 Harlow Shapley utiliza mediciones del brillo de estrellas RR Lyrae en cúmulos globulares y estudia su distribución espacial. Encuentra que ésta es esférica y el Sol no está en el centro
- Shapley propone que los cúmulos globulares se distribuyen en un *halo* esférico que rodea el *disco* de la Vía Láctea

Shapley's Globular Cluster Distribution



Breve cronología: La Vía Láctea como una galaxia

- 1924 Edwin Hubble descubre Cefeidas en Andrómeda y determina su distancia, demostrando que es un conglomerado de estrellas **externo** a la Vía Láctea.



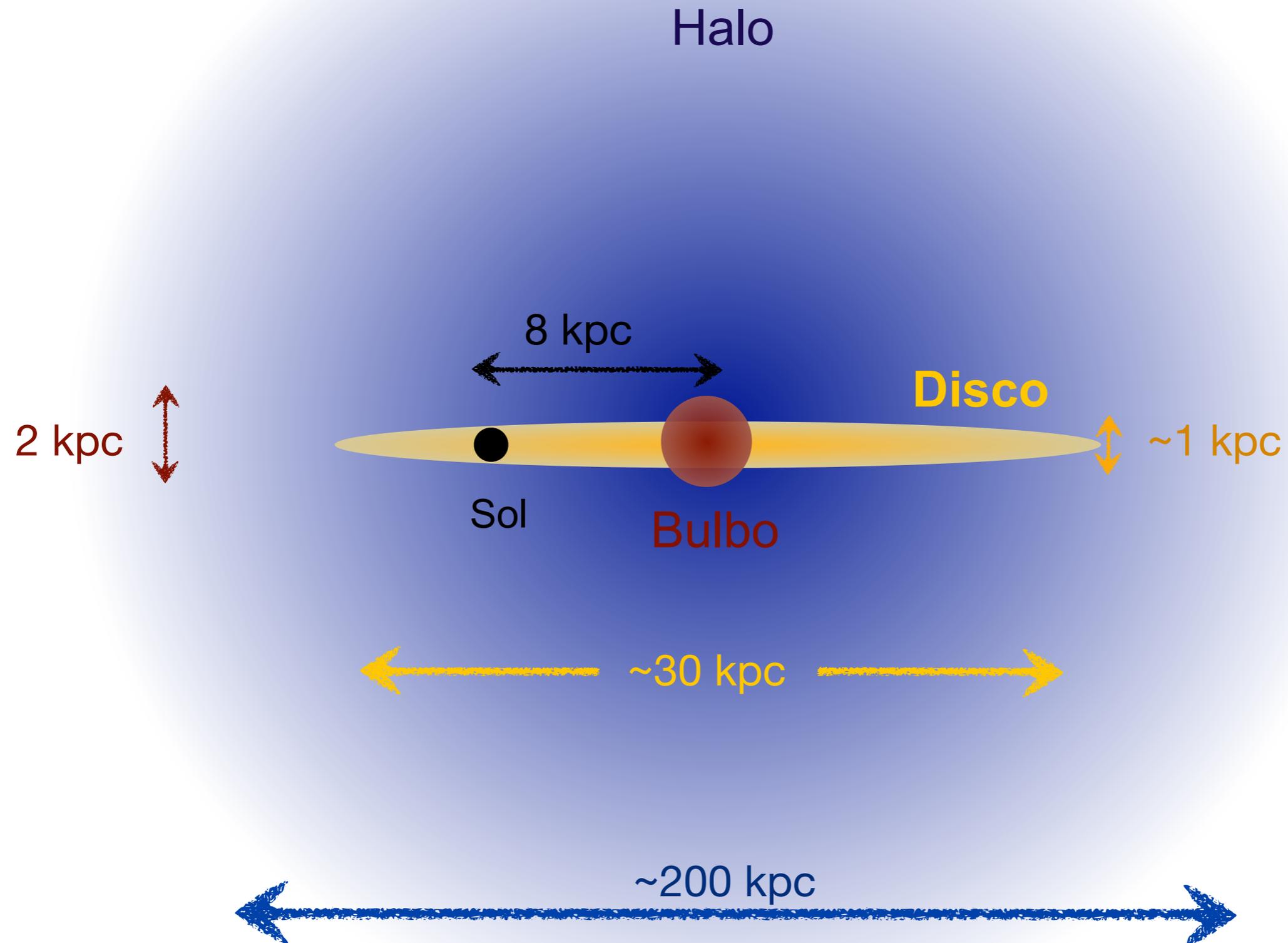
Breve cronología: La Vía Láctea como una galaxia

- 1610 Galileo Galilei utiliza el primer telescopio para observar la Vía Láctea: observa que la “nube” visible a simple vista está compuesta de infinidad de estrellas
- 1755 Immanuel Kant propone que la Vía Láctea es un conglomerado de estrellas distribuidas en forma de disco, estando el Sol ubicado dentro de éste. Propone que “nebulosas” observadas son “Universos Isla”, conglomerados de estrellas como la Vía Láctea, ubicados fuera de ésta
- 1920's Harlow Shapley utiliza mediciones del brillo de estrellas RR Lyrae en cúmulos globulares y estudia su distribución espacial. Encuentra que ésta es esférica y el Sol no está en el centro. Propone que los cúmulos globulares se distribuyen en un *halo* esférico que rodea el *disco* de la Vía Láctea
- 1924 Edwin Hubble descubre Cefeidas en Andrómeda y determina su distancia, demostrando que es un conglomerado de estrellas **externo** a la Vía Láctea.

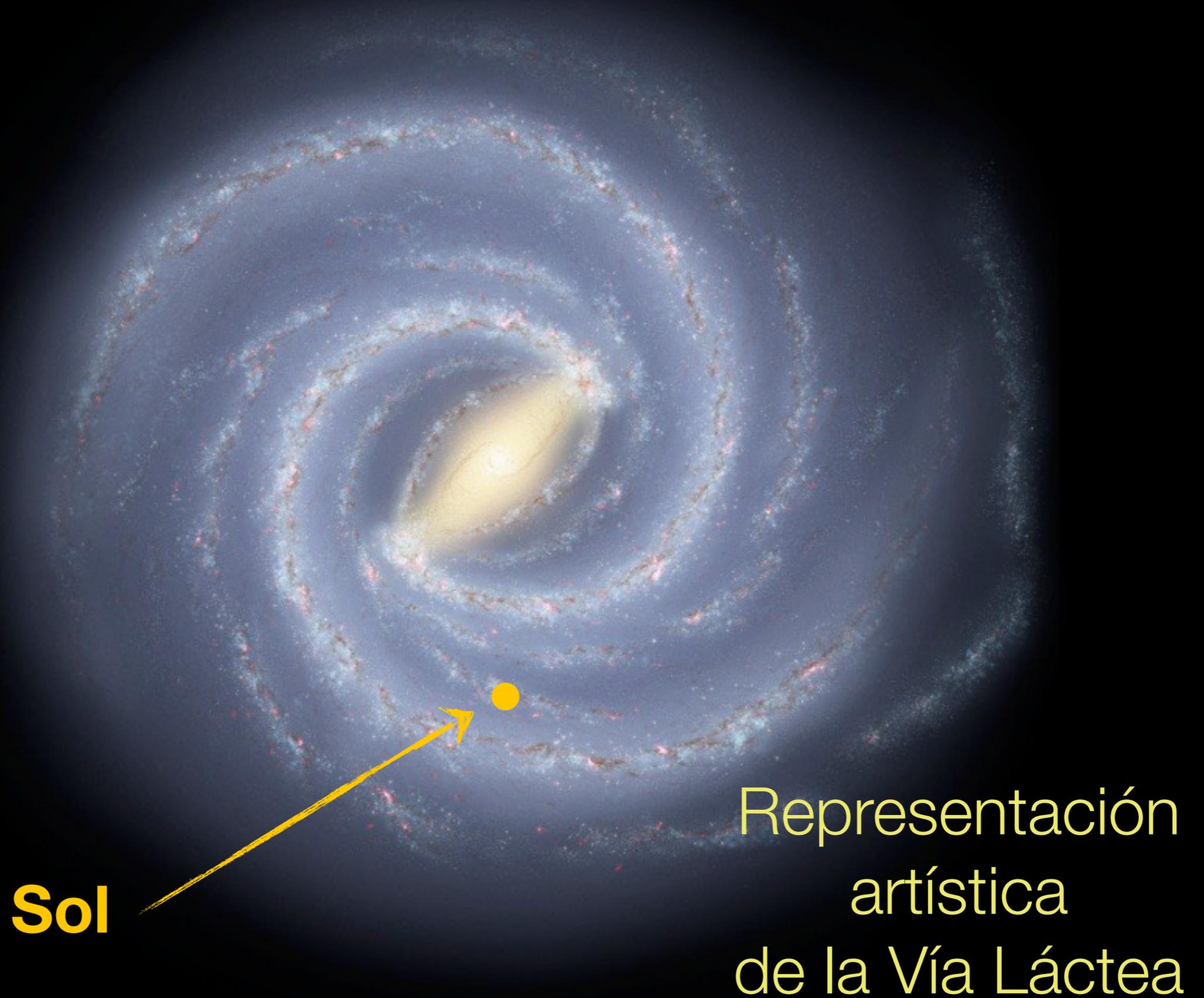
Retomando...

La Vía Láctea como una galaxia

Esquema de la Estructura de la Vía Láctea



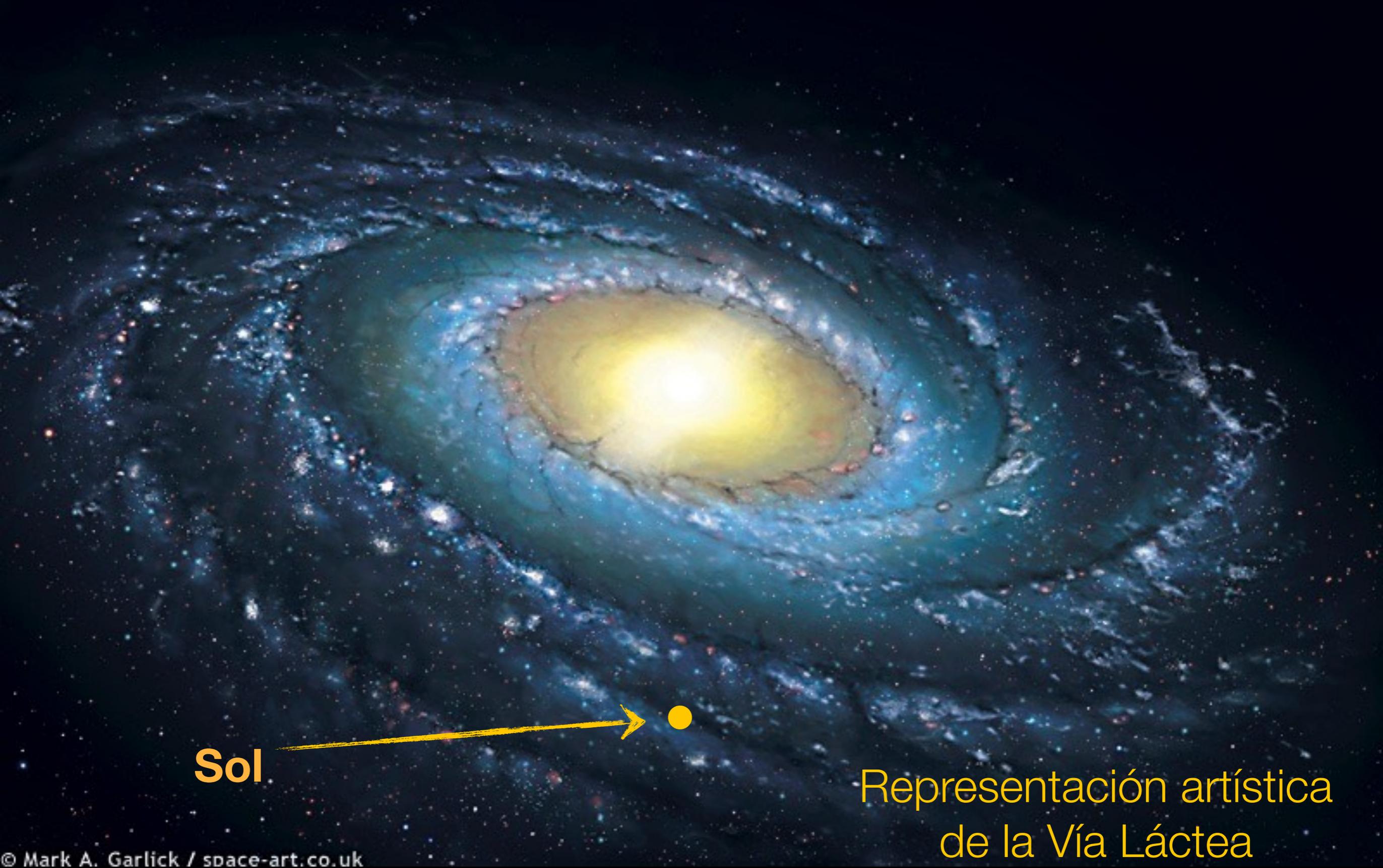
Si pudiéramos salirnos de nuestra
Galaxia, se vería más o menos así...



Sol

Representación
artística
de la Vía Láctea

O así...



Sol

Representación artística
de la Vía Láctea

La Vía Láctea: Poblaciones Estelares

Walter Baade introdujo el concepto de poblaciones estelares I y II estudiando las estrellas dentro y fuera del plano del disco de la Vía Láctea:

- Población I (disco):

Desde joven hasta vieja
y rica en metales (metalicidad ~solar)

- Población II (halo):

vieja y pobre en metales

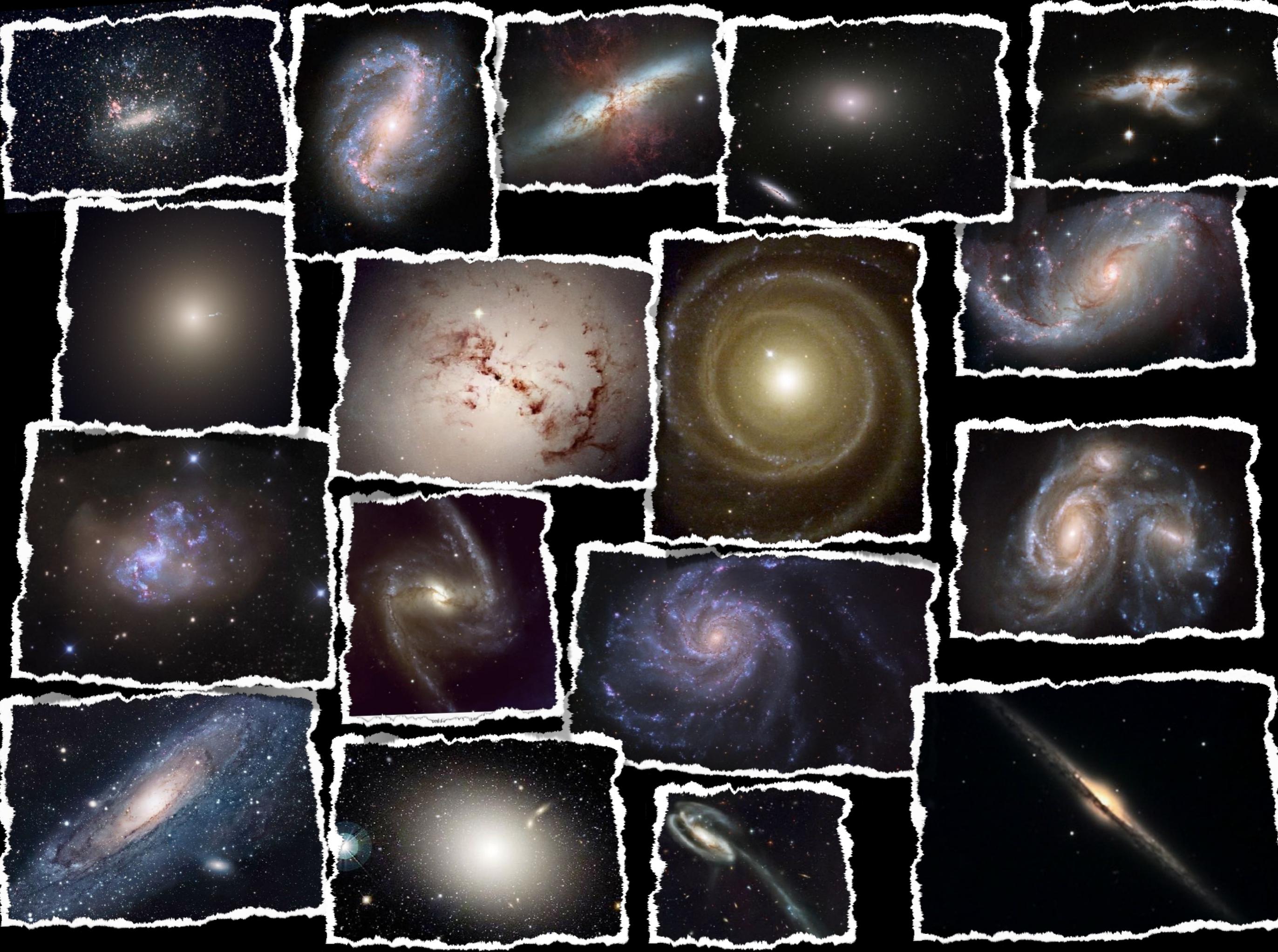
Hoy se conocen con mayor detalle las edades y metalicidades de las diferentes componentes

Utilizaremos las siguientes definiciones para la edad de las poblaciones estelares:

Joven \equiv edad < 1 Ga (1 Ga = 10^9 años), **Intermedia** \equiv ~ 1 -2 Ga - 9 Ga, **Vieja** \equiv ≥ 10 Ga



Galaxias

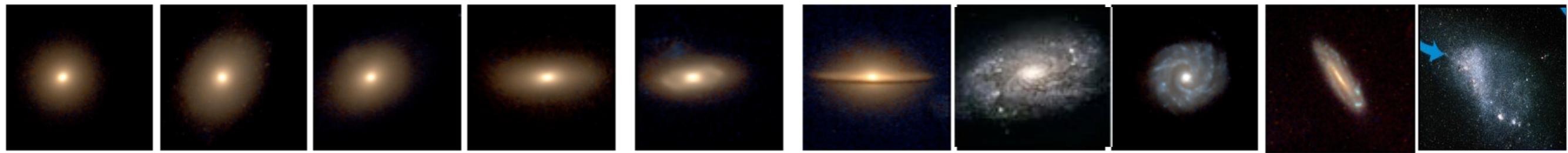


Algunas galaxias observadas por SDSS



CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE HUBBLE:

En 1926 Edwin Hubble propone el primer sistema de clasificación de galaxias, basado en su morfología (**observada en el Visible**)



Elípticas
(E0-E7)

Lenticulares
S0

Espirales
Sa - Sc

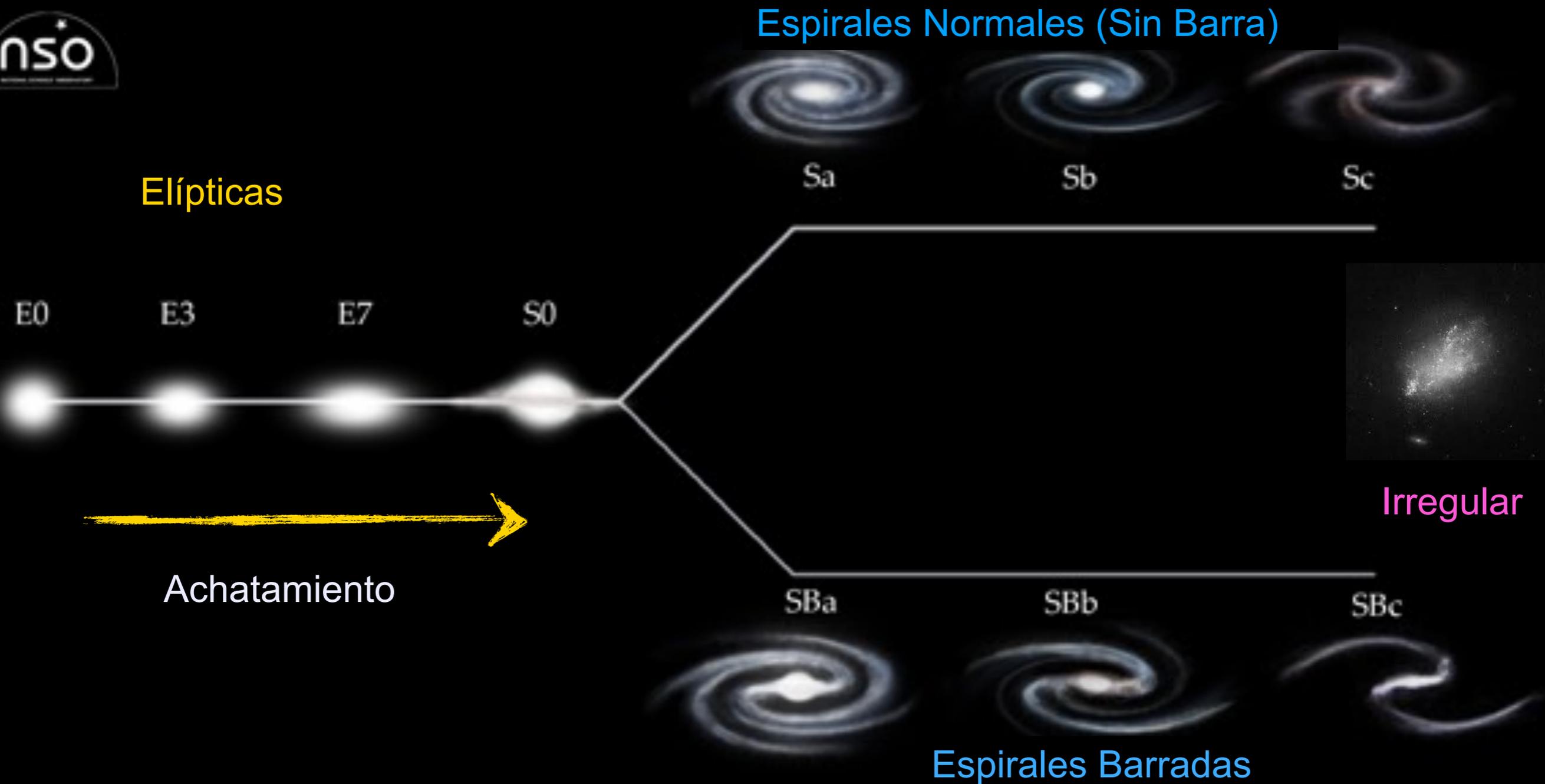
Irregulares

Tipos de Galaxia:

- Elípticas: E0-E7
- Lenticulares S0
- Espirales:
 - Normales: Sa - Sc
 - Barradas: SBa - SBc
- Irregulares: Irr I y II

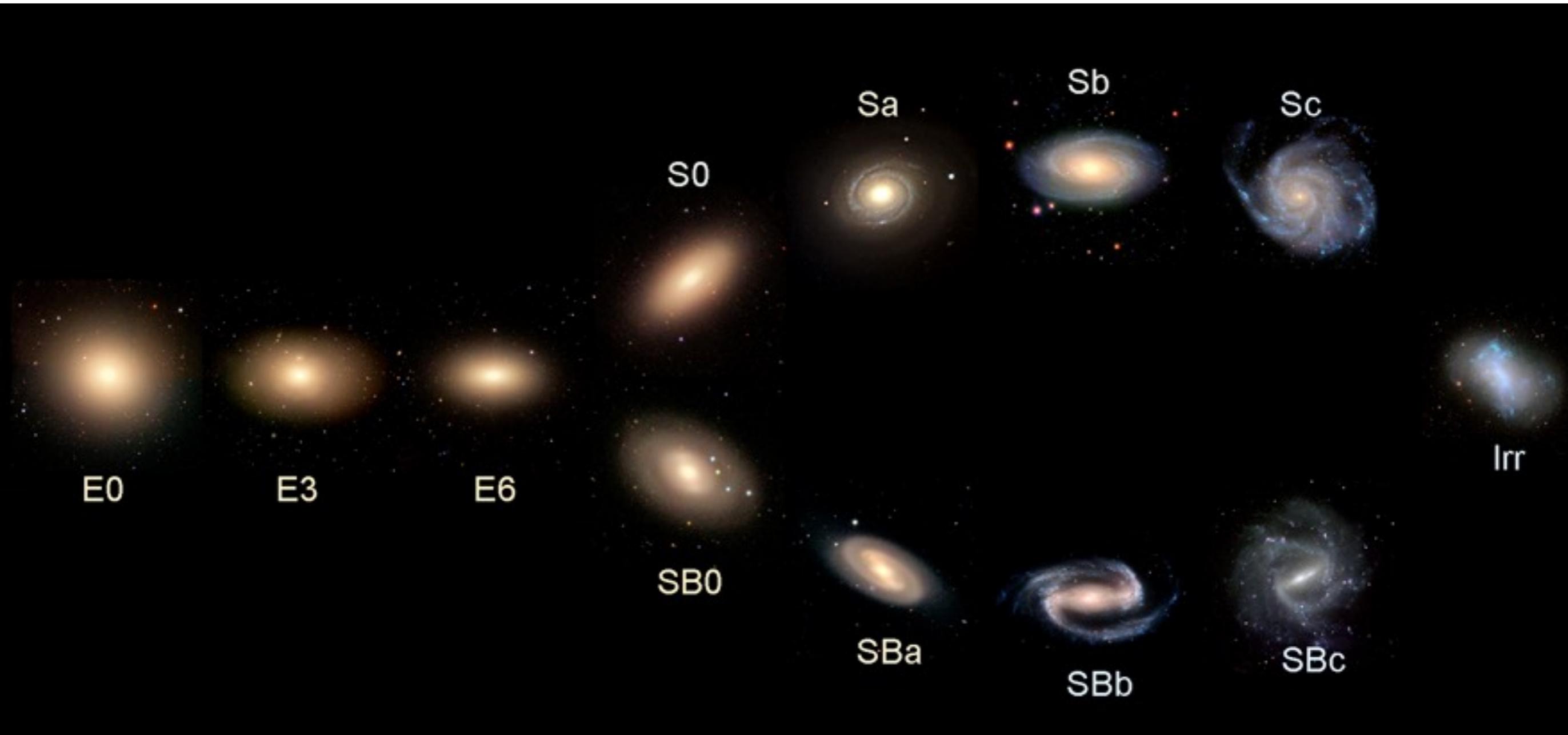
CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE HUBBLE

El diagrama de diapasón separa las galaxias espirales en Normales y Barradas



CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE HUBBLE

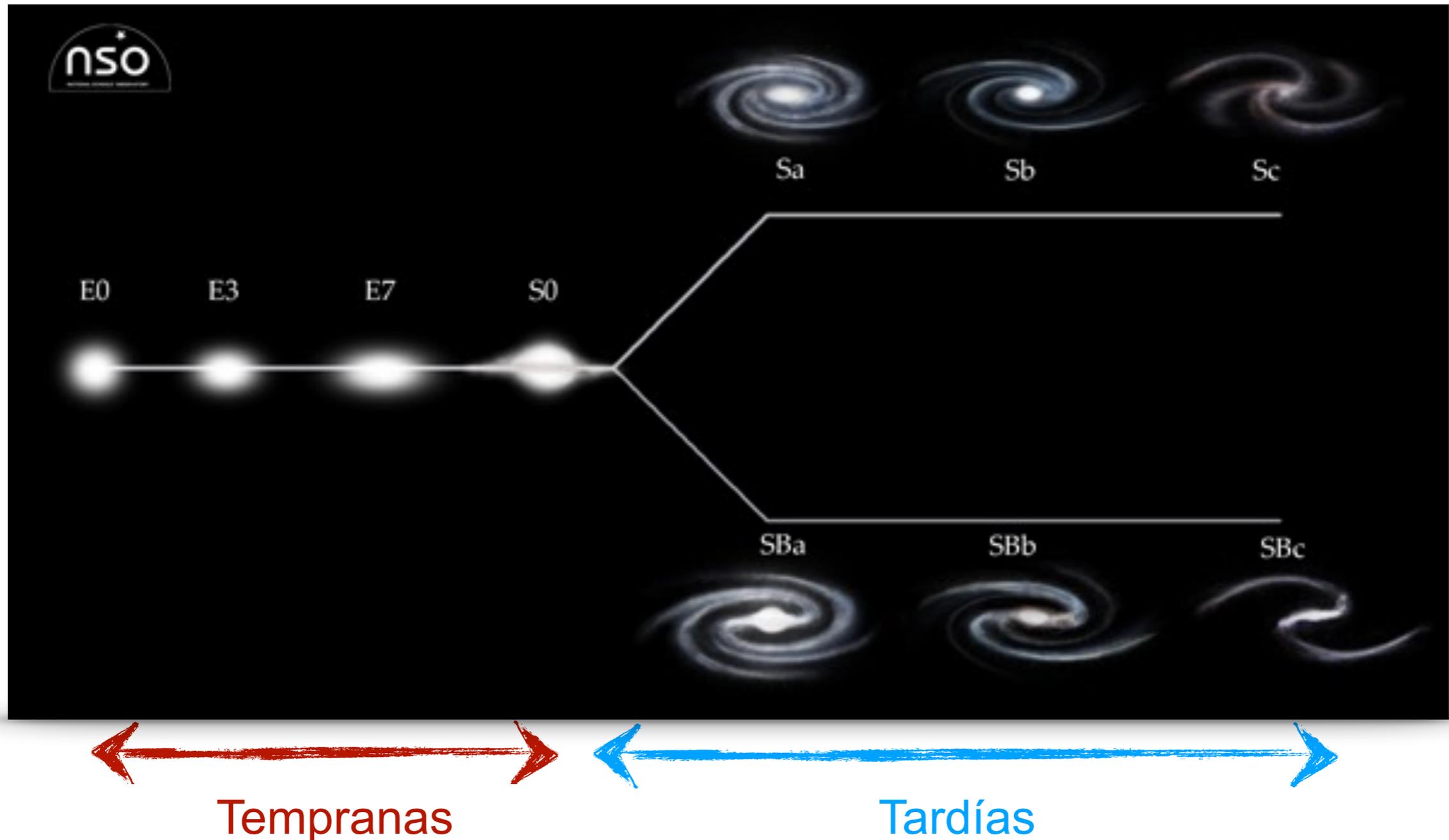
El diagrama de diapasón separa las galaxias espirales en Normales y Barradas



CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE HUBBLE

Se acostumbra llamar galaxias de tipo temprano y tardío a las galaxias elípticas y espirales respectivamente, pues se creía que ésta era una secuencia evolutiva, pero esto NO es así.

La clasificación de Hubble es útil porque varias propiedades de las galaxias correlacionan con el tipo de Hubble



CARACTERÍSTICAS DE LA CLASIFICACIÓN DE HUBBLE



Elípticas

E0 E3 E7 S0



Achatamiento

Espirales Normales (Sin Barra)



Sa

Sb

Sc

Mayor Tamaño del núcleo

Menor pitch-angle=Mayor enrollamiento de los brazos espirales
Menor "grumosidad" (lumpiness) o flokulencia



Irregular

SBa

SBb

SBc

Espirales Barradas



Poblaciones Estelares de Galaxias

TIPOS DE GALAXIAS: CARACTERÍSTICAS Y POBLACIONES

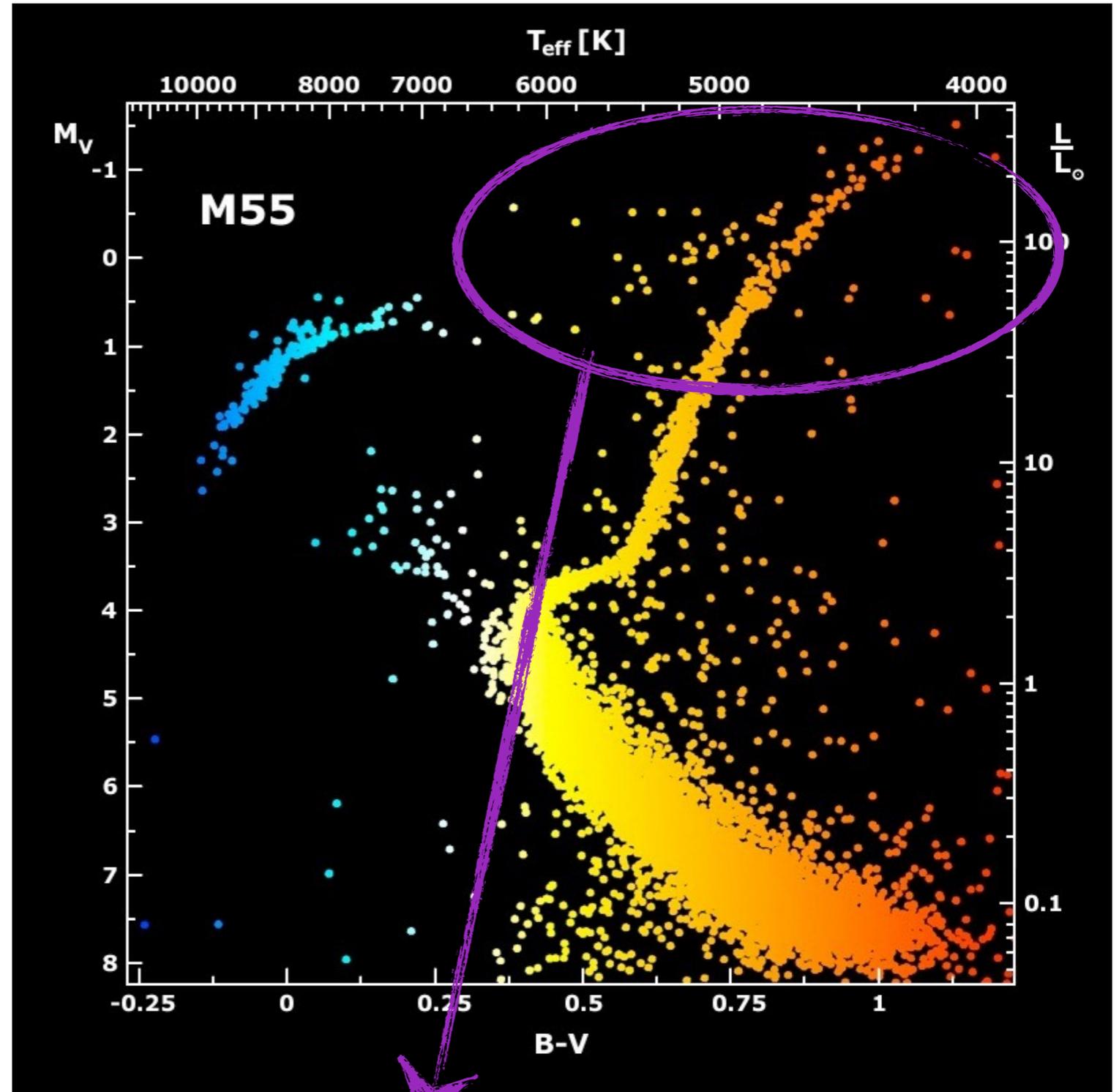
ELÍPTICAS (E0-E7 y S0)

Características Físicas:

- Compuestas por población vieja
- No presentan formación estelar reciente



Color
integrado de la
galaxia es rojo



El color integrado de una población estelar está dominado por el de sus estrellas más brillantes

TIPOS DE GALAXIAS: CARACTERÍSTICAS Y POBLACIONES

ELÍPTICAS (E0-E7 y S0)

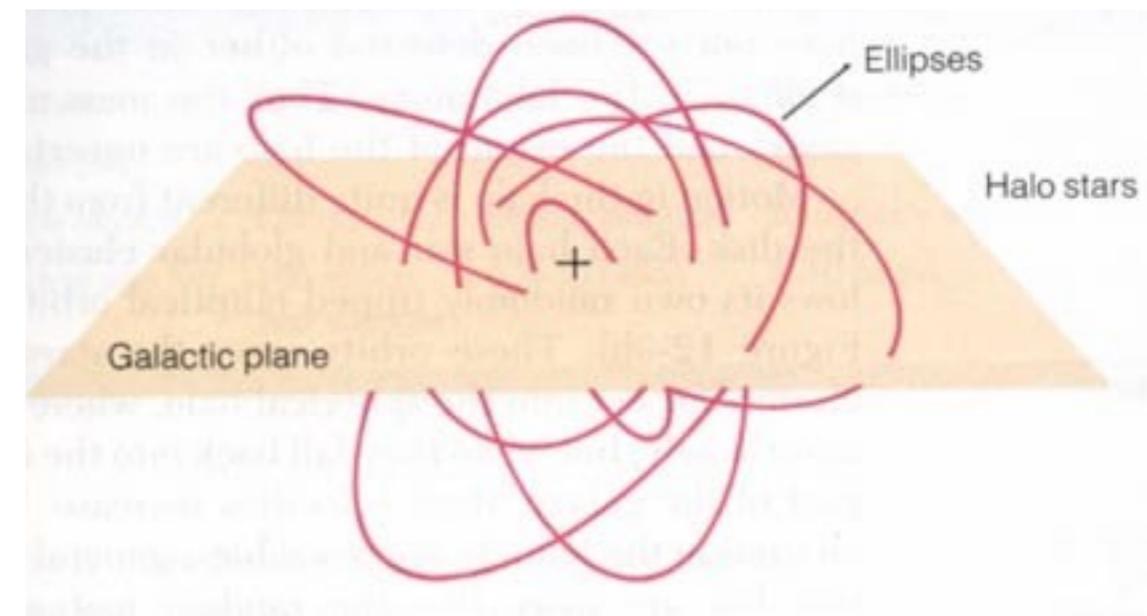
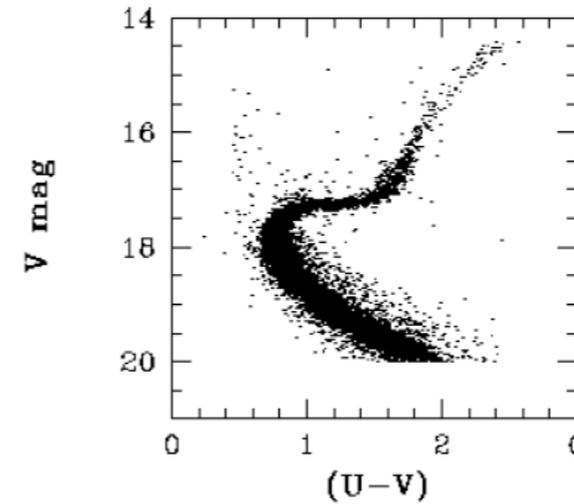
Características Físicas:

- Compuestas por población vieja
- No presentan formación estelar reciente



Color integrado de la galaxia es rojo

- Contienen muy poco o nada de gas y polvo
- Muy masivas: masas hasta $M \sim 10^{13} M_{\odot}$
- Muy luminosas: luminosidades hasta $L \sim 10^{11} L_{\odot}$
- Cinemática desordenada (similar al Halo y Bulbo de la Vía Láctea)
- Se encuentran mayoritariamente en cúmulos de galaxias, i.e. ambientes de alta densidad de galaxias



TIPOS DE GALAXIAS: CARACTERÍSTICAS Y POBLACIONES

ESPIRALES (Sa-c, SBa-c)

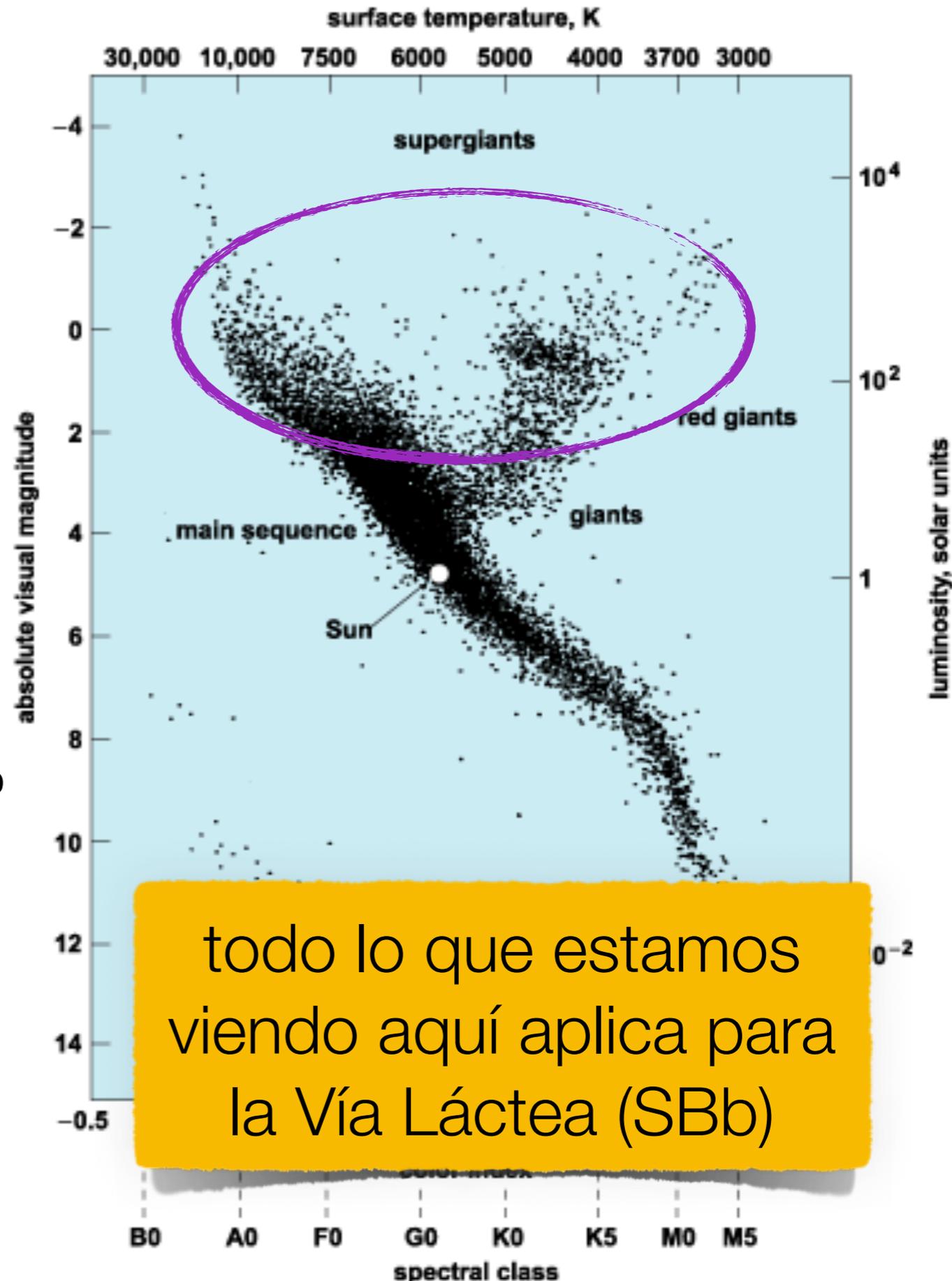
Características Físicas:

- Compuestas por población de todas las edades
- **Sí presentan** formación estelar reciente



Color integrado de la galaxia es más azul

- El gas y polvo están únicamente en el disco (más en la próxima clase)
- La formación estelar ocurre únicamente en el Disco
- La población del Bulbo es más vieja => más roja
- El Disco contiene >90% de las estrellas de una galaxia espiral



TIPOS DE GALAXIAS: CARACTERÍSTICAS Y POBLACIONES

ESPIRALES (Sa-c, SBa-c)

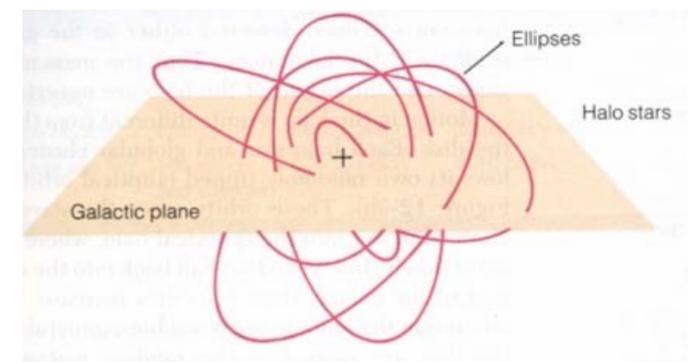
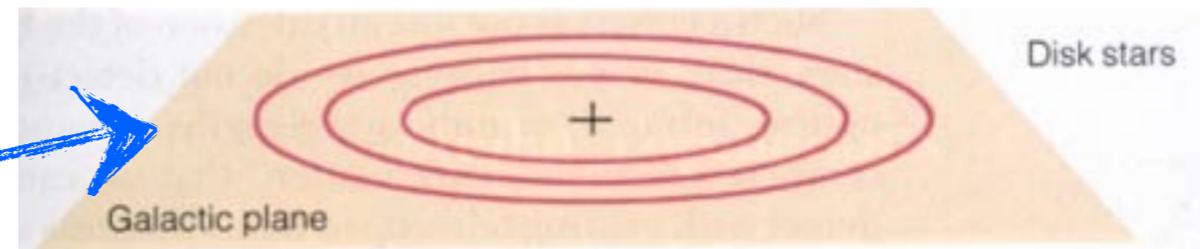
Características Físicas:

- Compuestas por población de todas las edades
- **Sí presentan** formación estelar reciente



Color integrado de la galaxia es más azul

- Nubes de gas y polvo confinadas al disco
- Masas en el rango $M \sim 10^9 - 10^{12} M_{\odot}$
- Luminosidades entre $L \sim 10^8$ a $10^{11} L_{\odot}$
- Órbitas de estrellas del Disco tienen rango pequeño de inclinaciones (rotación ordenada, órbitas ~coplanares)
- Órbitas de estrellas en Bulbos son desordenadas, como en las galaxias elípticas y en el Halo/Bulbo de la V.L.



CLASIF. MORFOLÓGICA DE HUBBLE: IRREGULARES

IRREGULARES

En general no tienen forma bien definida, su apariencia es caótica.

Irr I

- Presentan formación estelar actual
- No muestran franjas de polvo conspicuas



Irr I

Irr II

- No parecen tener formación estelar actual
- Muestran franjas oscuras

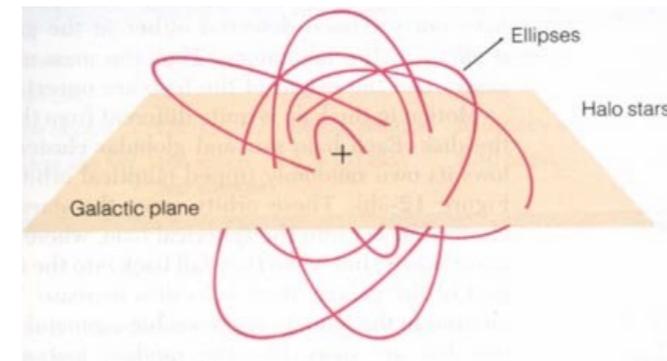


Irr II

TIPOS DE GALAXIAS: CARACTERÍSTICAS Y POBLACIONES

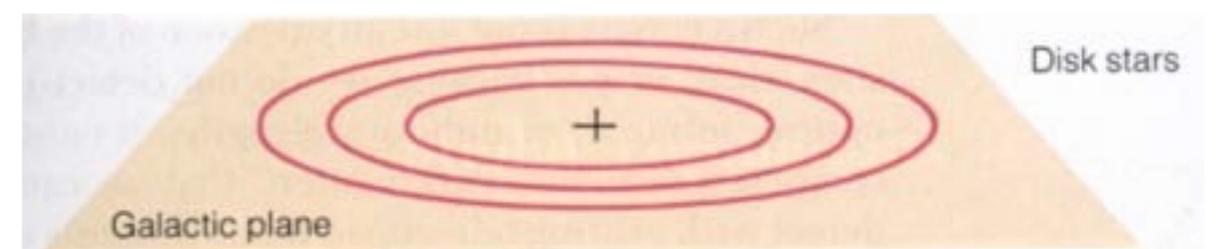
ELÍPTICAS

- Compuestas por población vieja
- No presentan formación estelar reciente
- Contienen muy poco o nada de gas y polvo
- Muy masivas: masas hasta $M \sim 10^{13} M_{\odot}$
- Muy luminosas: Luminosidades hasta $L \sim 10^{11} L_{\odot}$
- Cinemática desordenada (similar al Halo y Bulbo de la V.L.)
- Mayoritariamente en cúmulos de galaxias



ESPIRALES

- Compuestas por población de todas las edades
- **Sí presentan** formación estelar reciente
- Nubes de gas y polvo confinadas al disco
- Masas en el rango $M \sim 10^9 - 10^{12} M_{\odot}$
- Luminosidades entre $L \sim 10^8$ a $10^{11} L_{\odot}$
- Órbitas de estrellas del disco tienen rango pequeño de inclinaciones (rotación ordenada)
- Mayoritariamente en el campo



Distribución de Masa y Luz en Galaxias

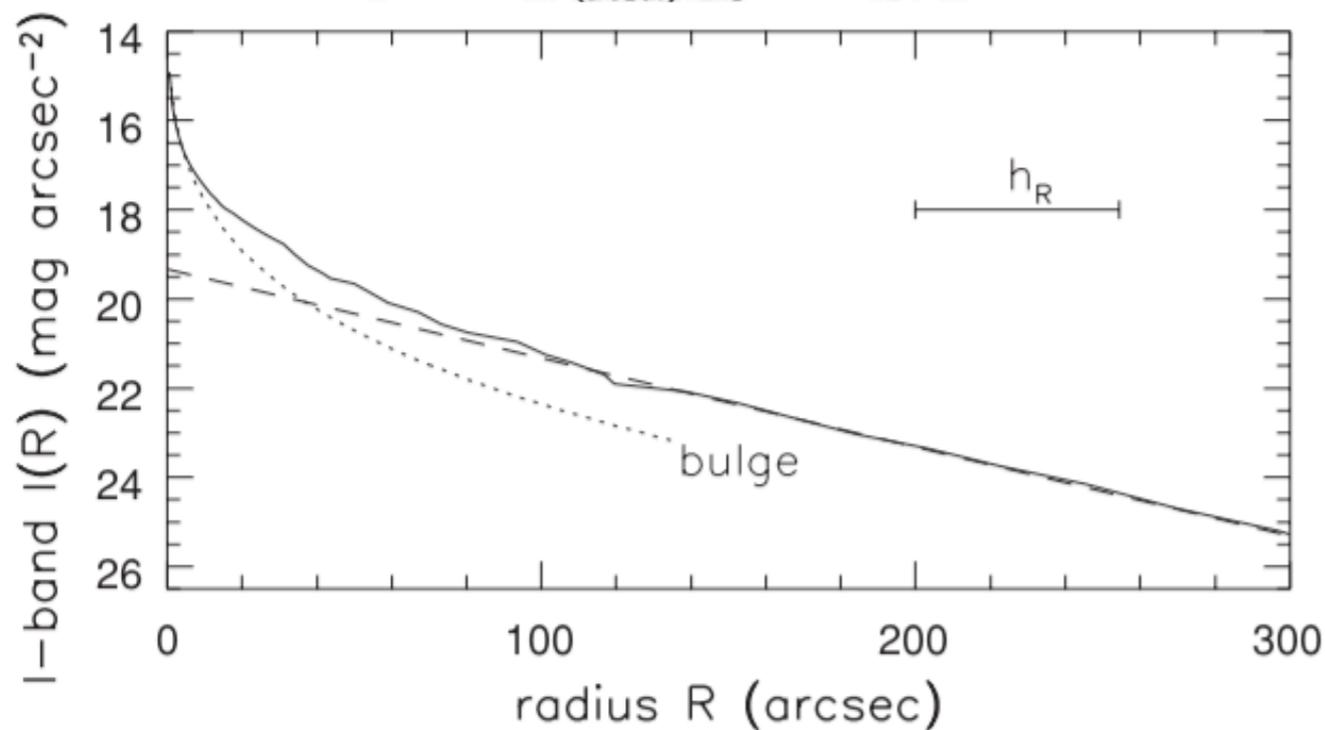
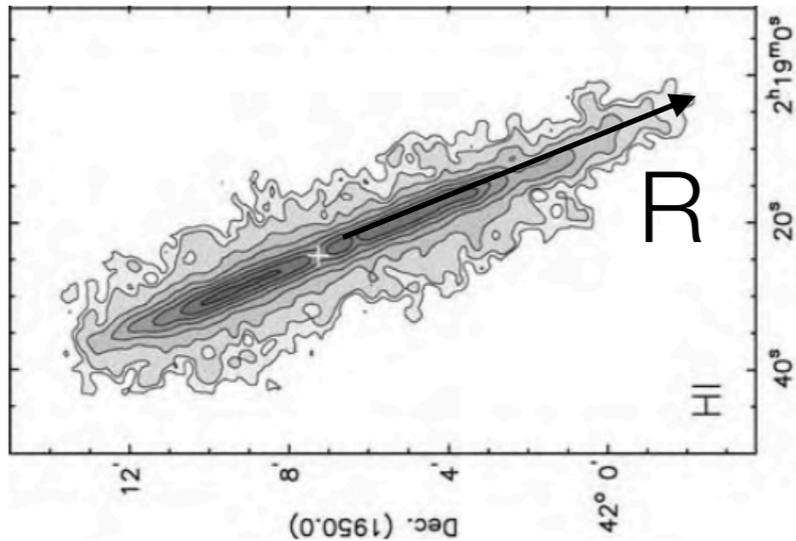
¿Cómo se distribuye la luz?: Perfiles de brillo

Perfiles de Brillo

- El perfil de brillo describe cómo cambia el brillo como función de la distancia al centro

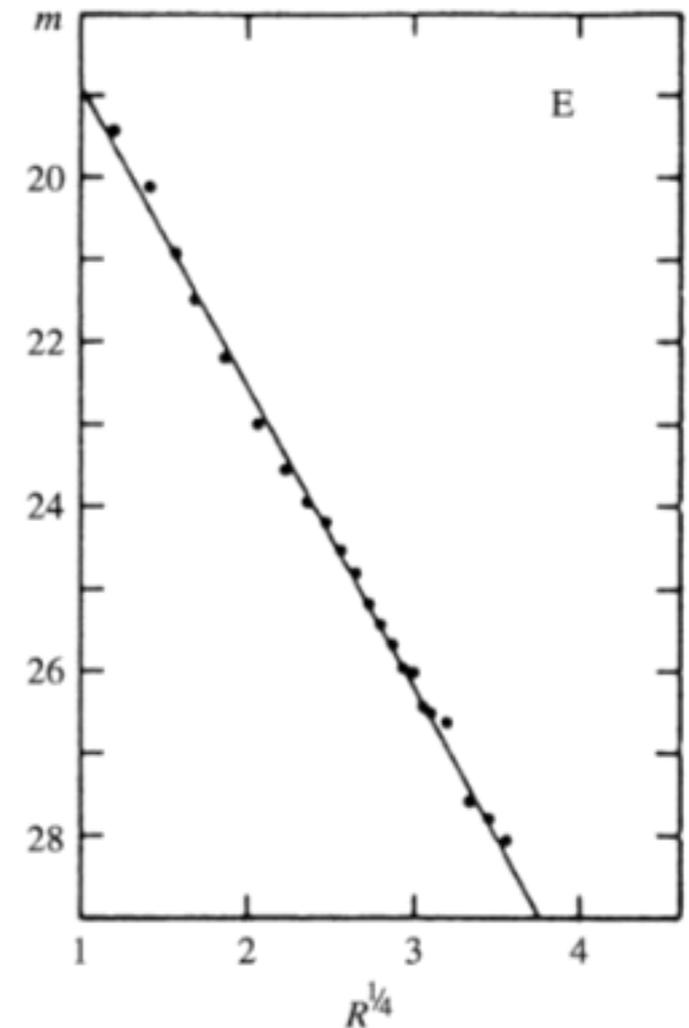
Disco

$$I(R) = I_0 e^{-\frac{R}{h}}$$



Elíptica

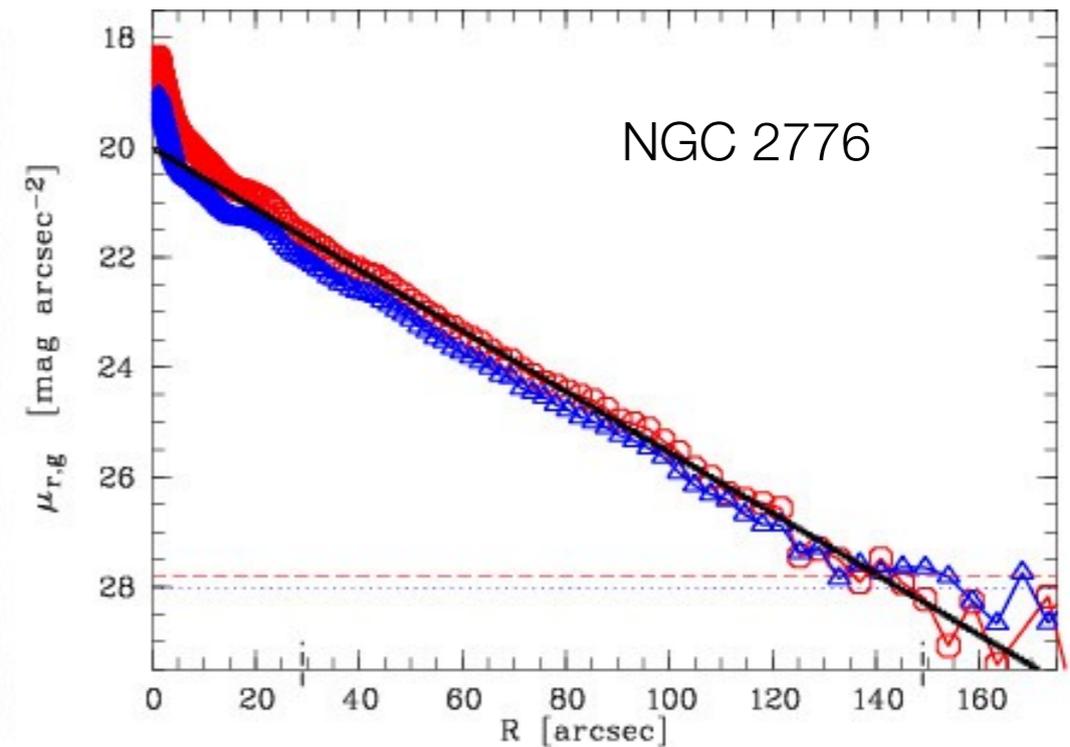
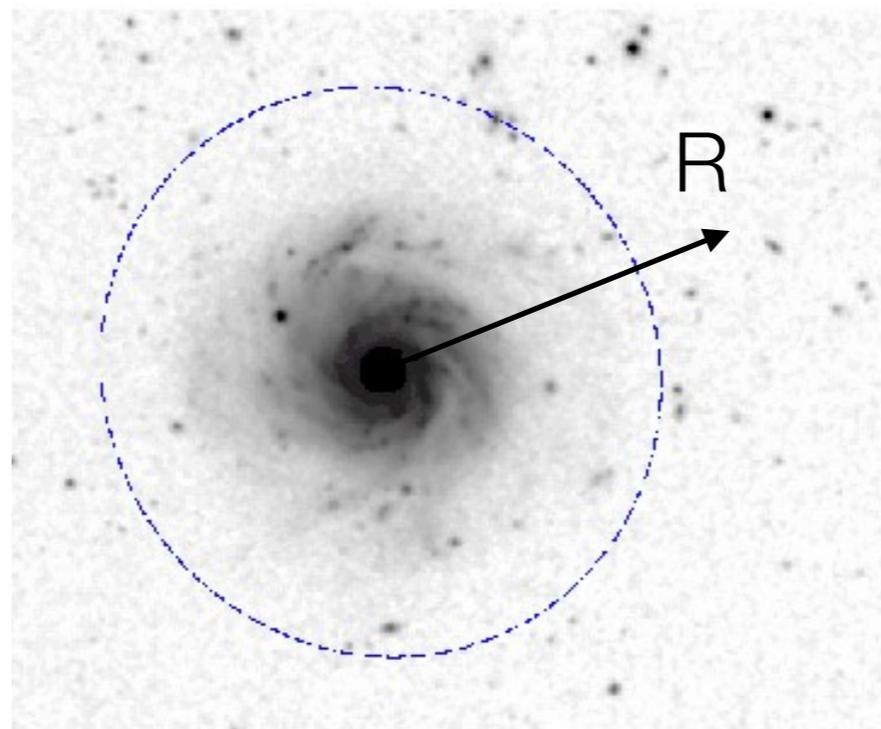
$$I(R) = I_e e^{\{-b_n[(R/R_e)^{1/n} - 1]\}}$$



Perfiles de Brillo

- Dada una serie de medidas del brillo como función de R se pueden determinar la escala radial h y el brillo central I_0 . Integrando el perfil de densidad, obtenemos la **luminosidad total** (Práctico 3)

Disco $I(R) = I_0 e^{-\frac{R}{h}}$



- Como el brillo cae exponencialmente, a partir de cierto radio (varias veces el valor de h) habremos encerrado casi el 100% de la luminosidad (y, por lo tanto, de la masa luminosa, i.e. la masa responsable por el brillo)

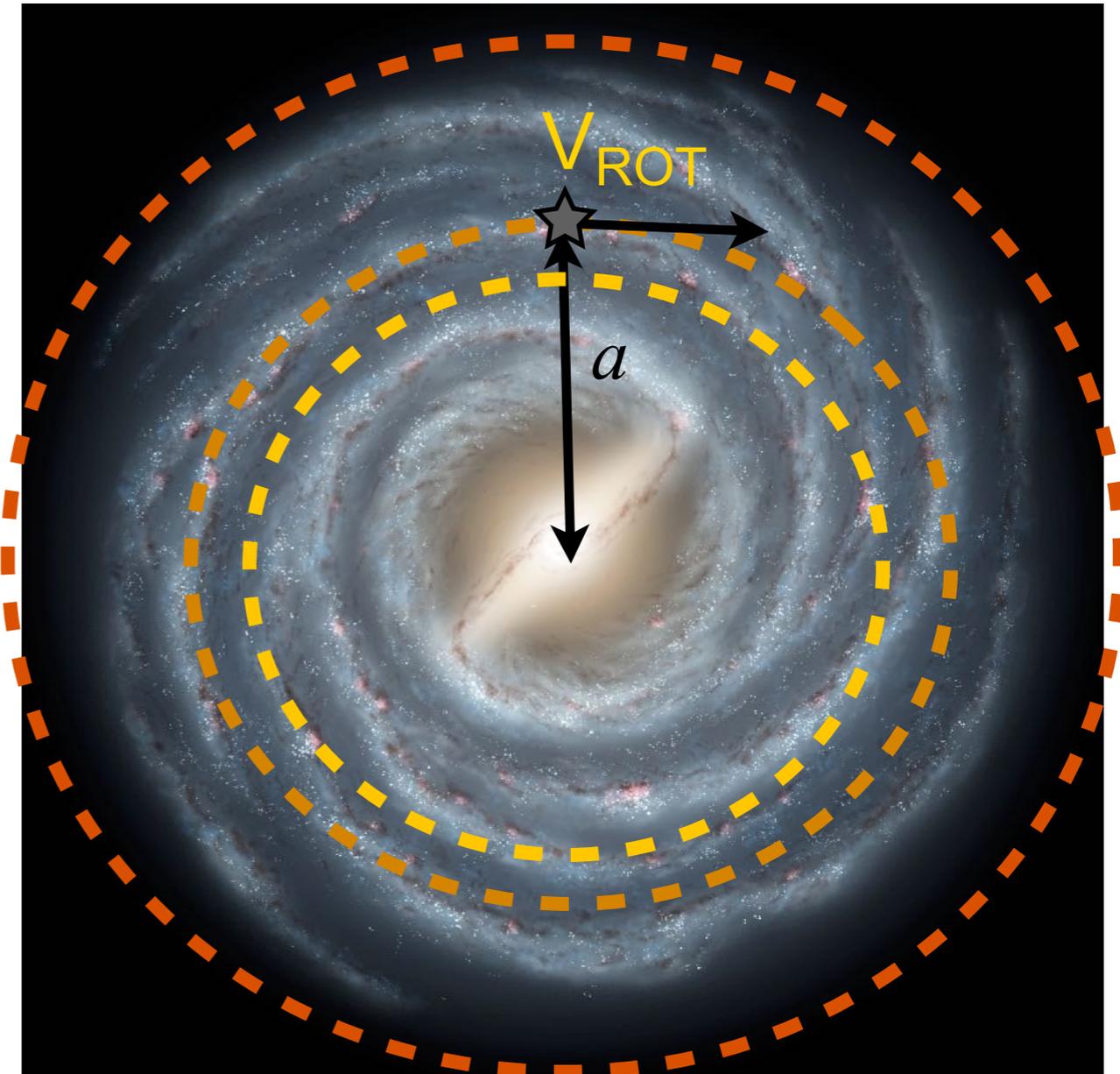
¿Cómo se "distribuye" la cinemática en la galaxia?
Galaxias Espirales: Curvas de Rotación

La Vía Láctea: Cinemática

Una forma de calcular la masa de la galaxia como función del radio

Sabiendo esto y la 3ª Ley de Kepler, tenemos que para estrellas cada vez más alejadas del centro de la Galaxia, la masa encerrada debería ir aumentando hasta llegar al borde de la galaxia, **a partir de ahí**, si el radio a aumenta pero M_{enc} es constante, P debería aumentar monótonamente y por lo tanto, **$V_{rot} \sim 2\pi a/P$ la velocidad de rotación debería disminuir monótonamente**

¡Pero esto NO es lo que se observa!



Curvas de rotación

- Una forma de calcular la masa de la galaxia como función del radio es estudiando cómo se mueven las estrellas a radios diferentes
- Si escribimos la 2da Ley de Newton ($F=ma$) a una partícula en una órbita circular de radio R alrededor del centro de la galaxia, tenemos:

$$\frac{mM_{encerrada}G}{R^2} = -m\frac{V^2}{R}$$

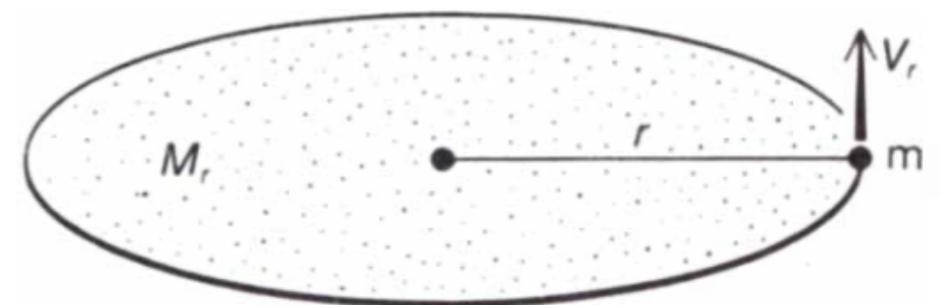
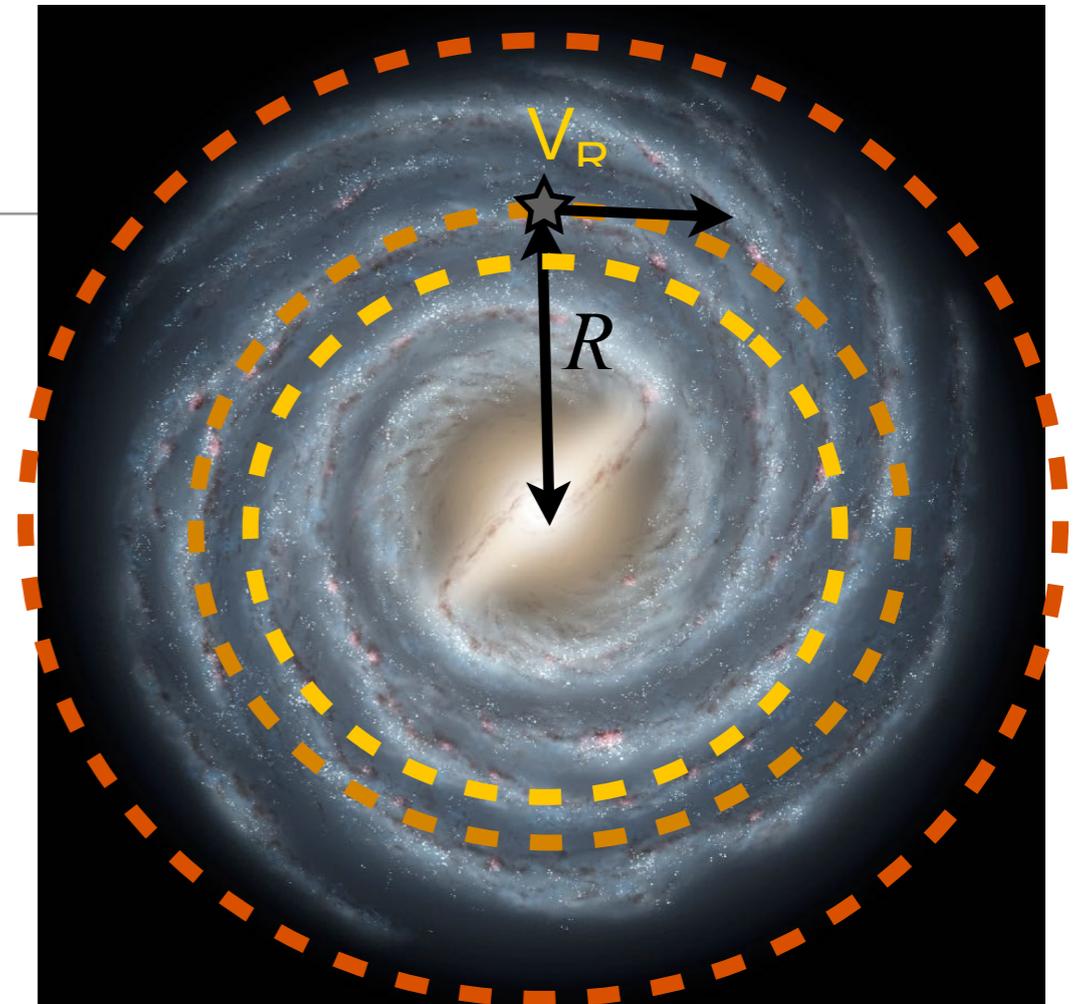
fuerza gravitatoria

(Ley de Gravitación Universal)

ac. centrípeta

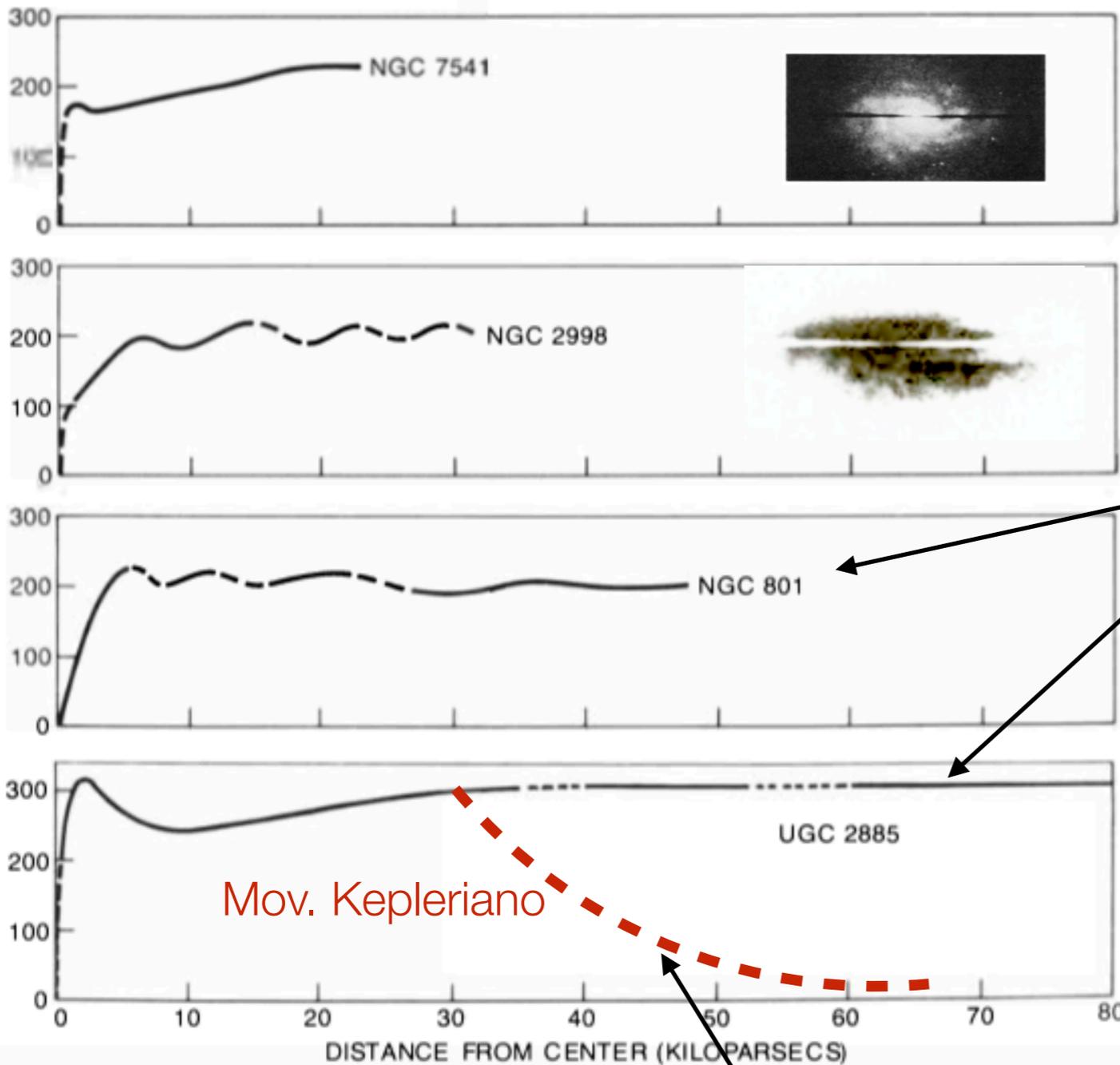
$$V = \sqrt{\frac{GM(< R)}{R}}$$

curva de rotación $V(R)$



Curvas de rotación en galaxias externas

Lo que se observa:



Vera Rubin (1983, SciAm)

caída Kepleriana no se observa

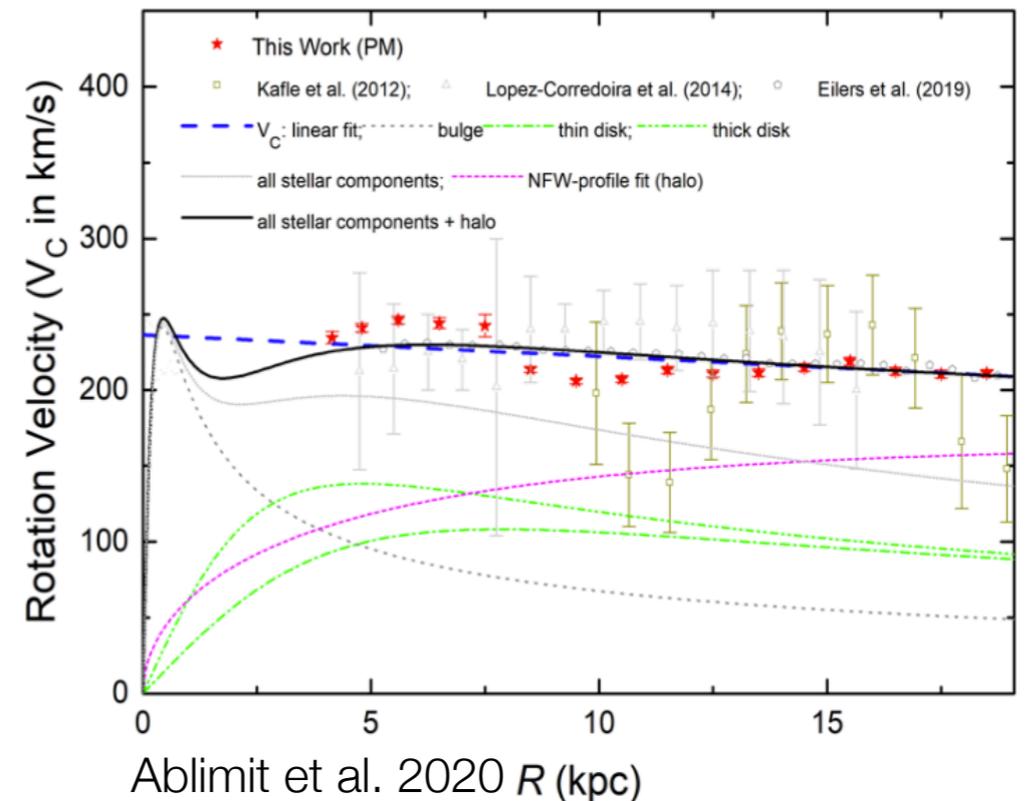
A pa
ence
mate
debe

esto fue descubierto por Vera Rubin (R)

Pero al medir las curvas de rotación en galaxias... esto **NO se observa!**

las curvas de rotación son planas hasta donde se pueden medir

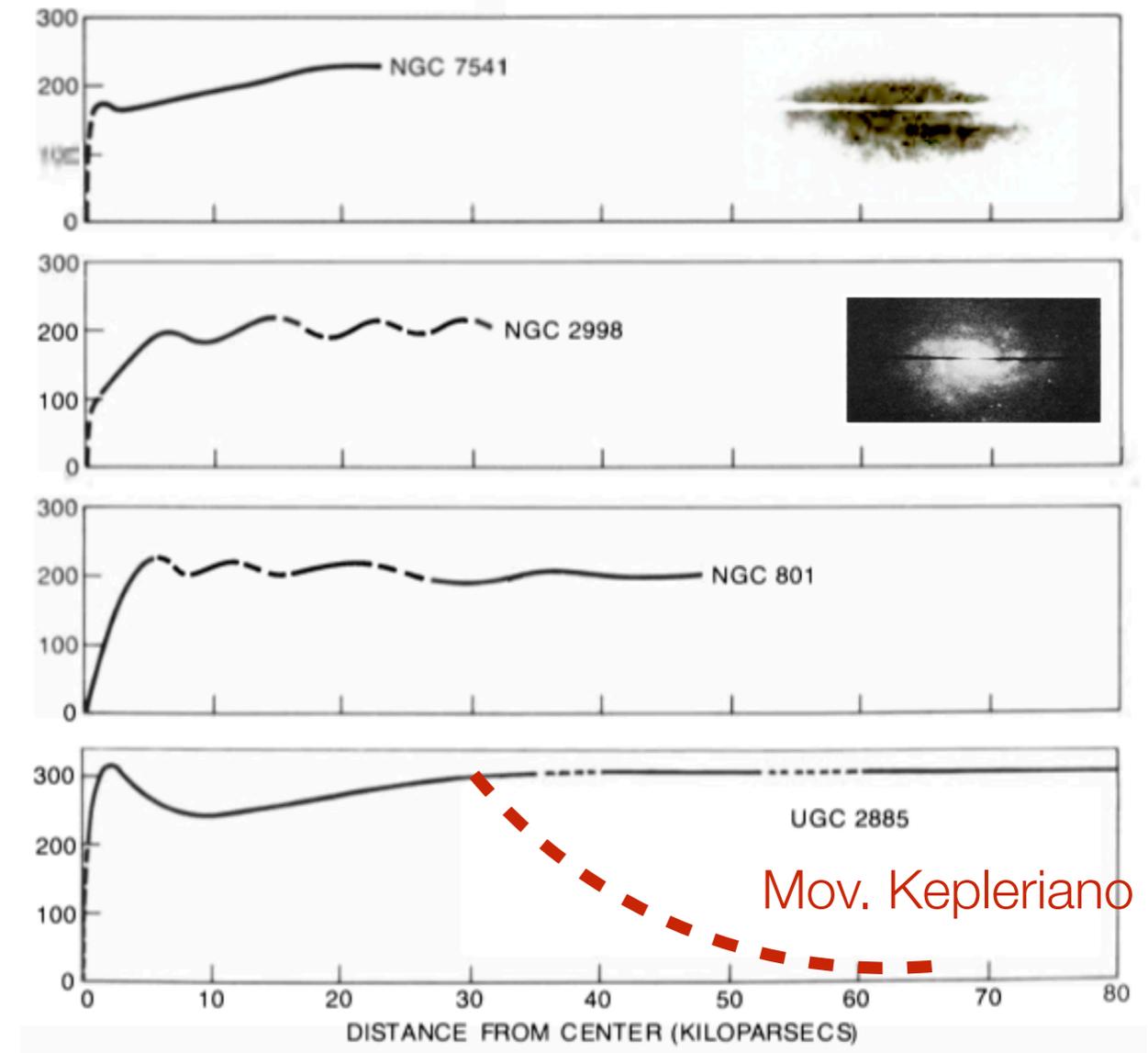
Curva de Rotación de la Vía Láctea



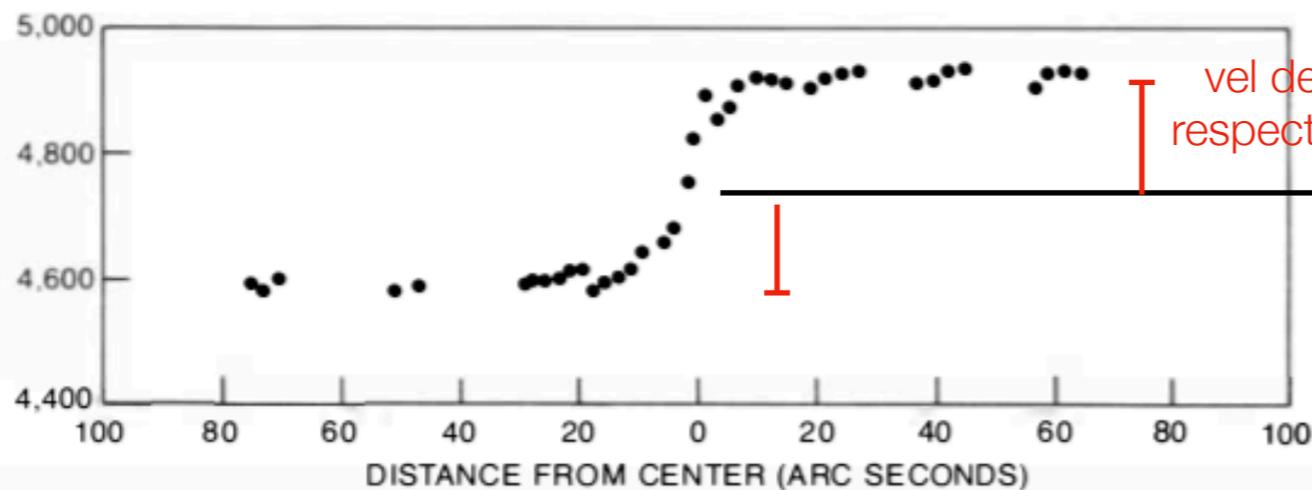
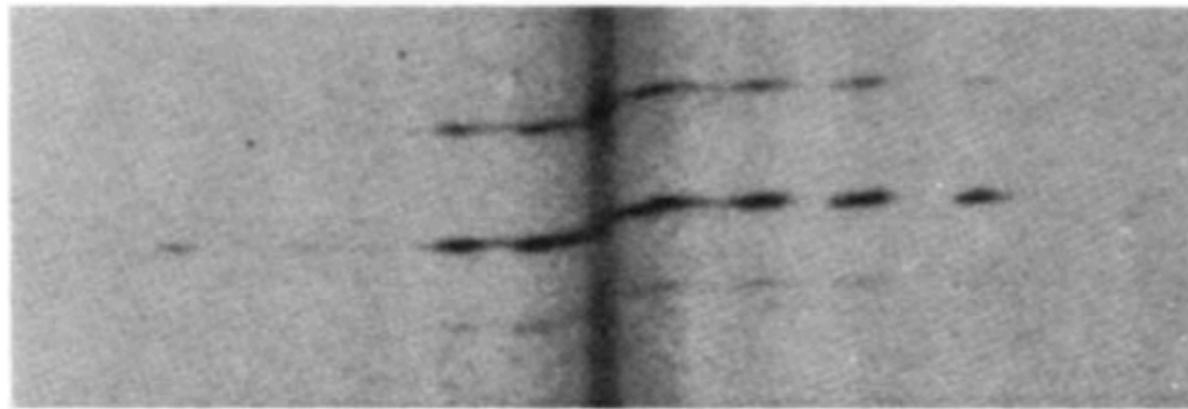
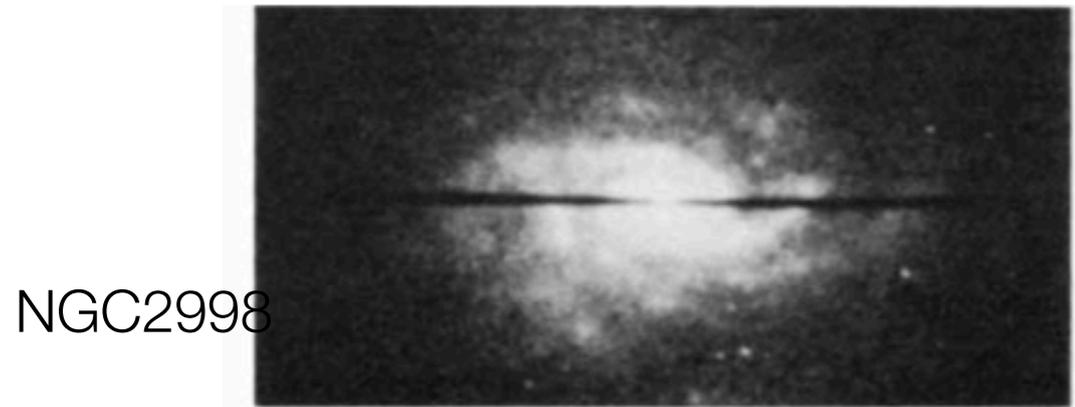
Ablimit et al. 2020 R (kpc)

Medición de las curvas de rotación de galaxias

- A radios grandes ($>3-4$ veces la escala radial), como el perfil de brillo es exponencial, la mayor parte del brillo ya está encerrado
- Por lo tanto, a esas distancias ya se encierra la amplia mayoría de la materia luminosa ($>99\%$)
- Sin embargo, las curvas de rotación se mantienen planas hasta donde se pueden medir
- **Ésta fue la primera evidencia de la existencia de lo que hoy conocemos como materia oscura**

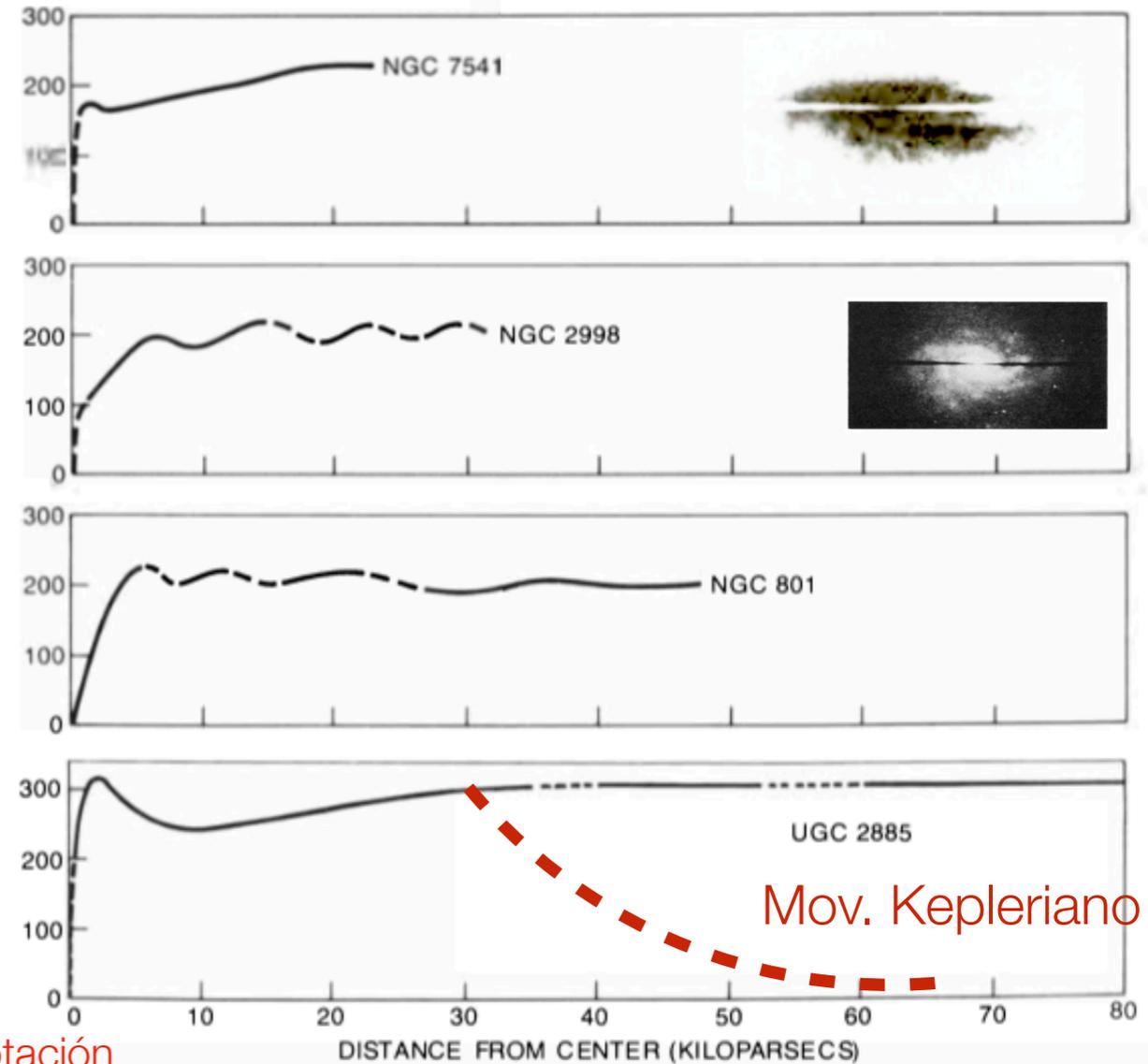


Medición de las curvas de rotación de galaxias



vel de rotación
respecto al centro

→ velocidad sistémica
(=vel del centro de masa)



Bibliografía

- Kartunnen Caps. 17.4 y 18 (hasta 18.4)
- Kutner Caps. 16 y 17
- Ojo: en ambos libros hay mucho más de lo que veremos en este curso. (No se preocupen, lo veremos en Astro Galáctica y Extragaláctica, más adelante...)