

CTE II

Galaxias y Medio interestelar. La Vía Láctea como una galaxia

Cecilia Mateu

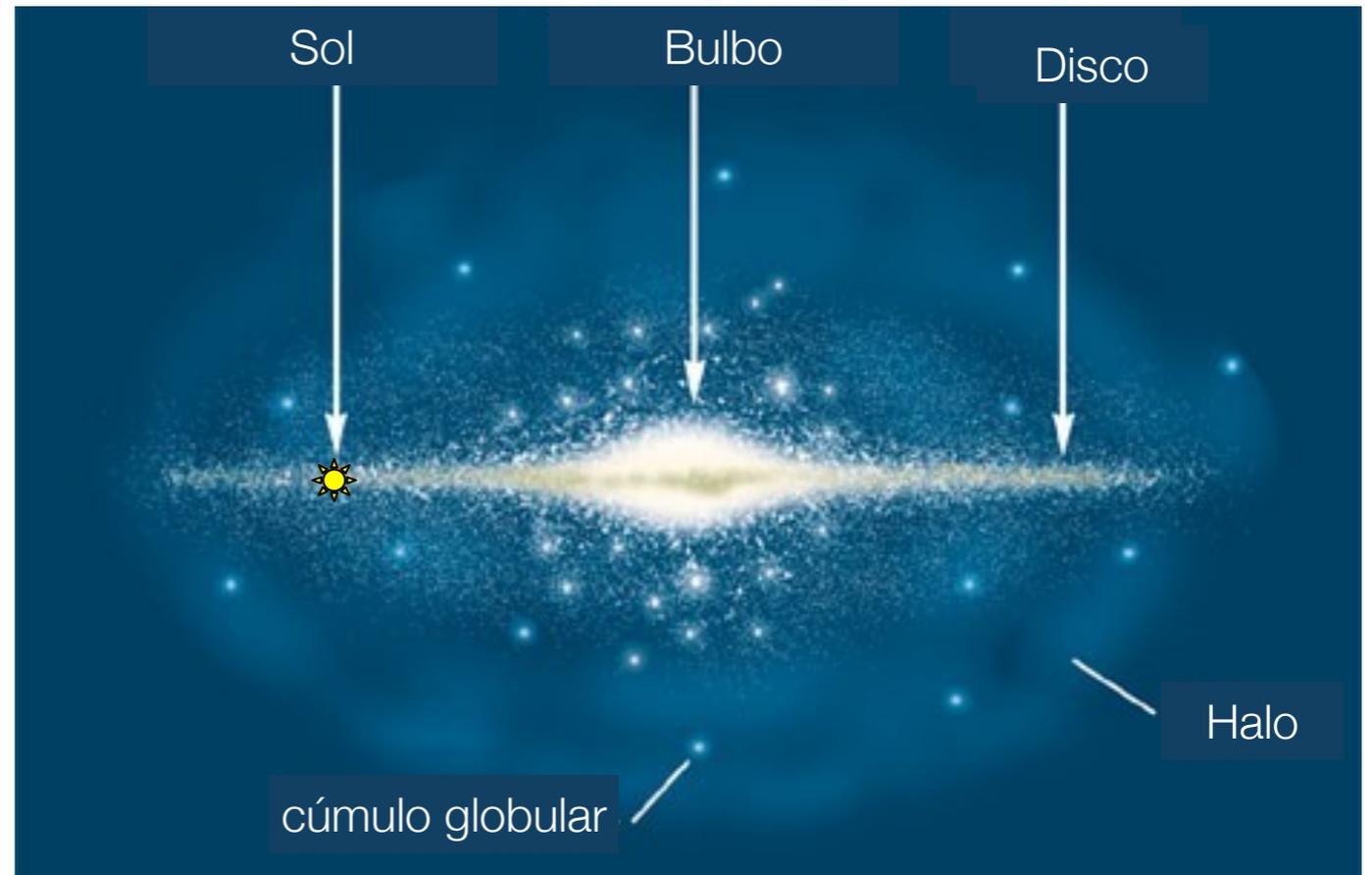
Instituto de Física, Facultad de Ciencias
Universidad de la República

Fecha del Parcial

- 1er Parcial:
 - **Martes 18/octubre** en el salón del teórico: **8 a 10:30, salón 210 - NOTAR QUE EMPEZAREMOS A LAS 8:00am, así tienen 30min extra.**
 - Recuperaremos la clase perdida después del parcial, en otro horario (a confirmar - probablemente Jueves 20 16:30-18:30)

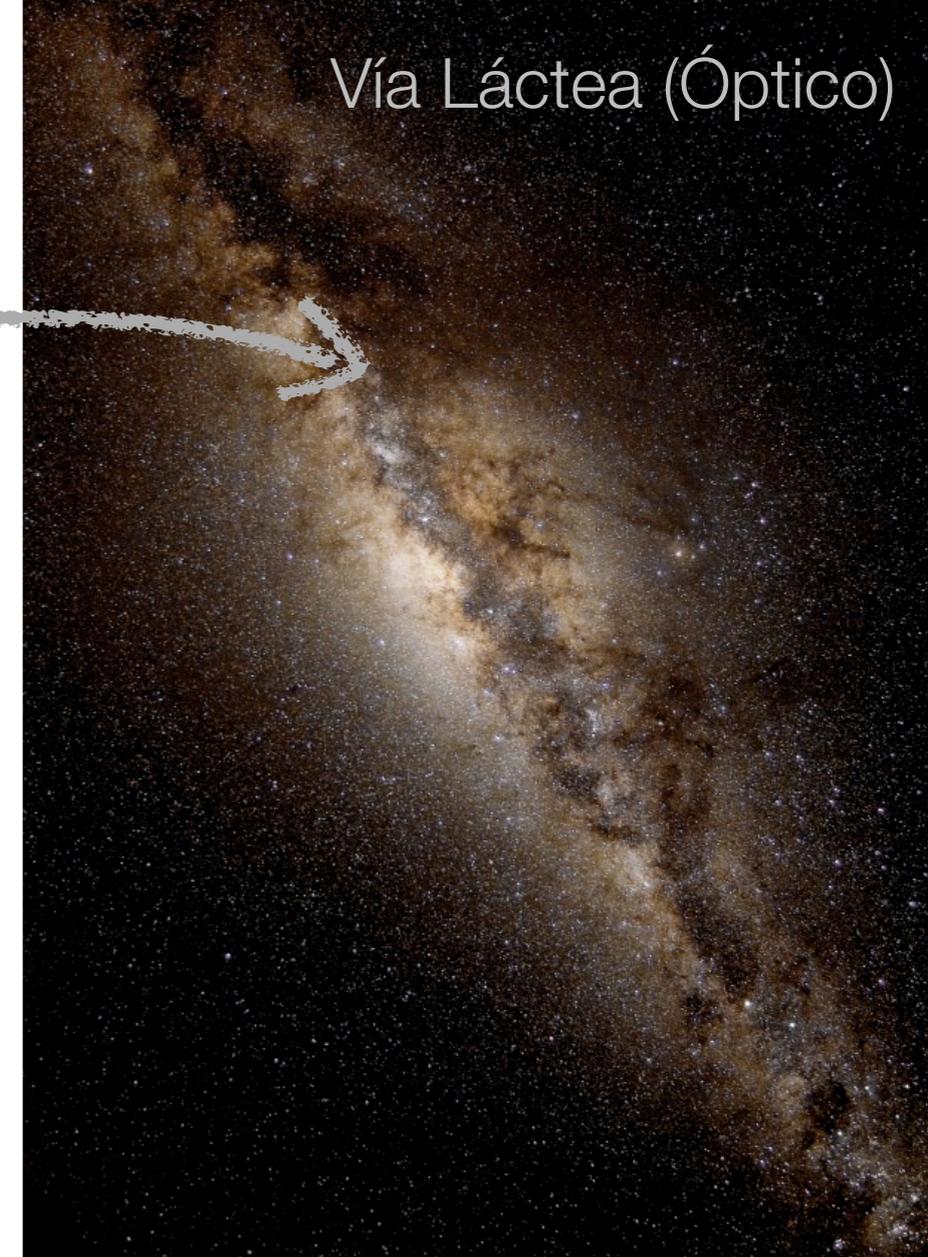
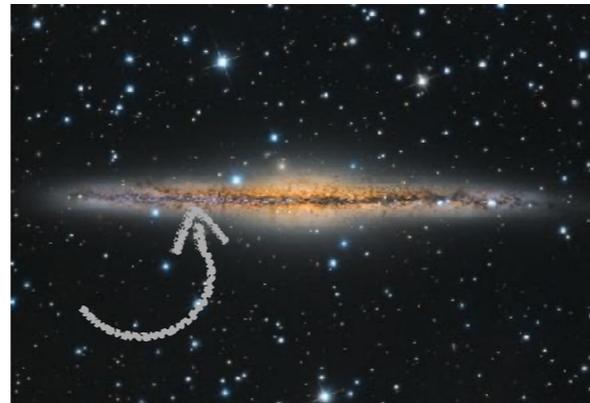
La Vía Láctea

- Habíamos visto:
 - La Vía Láctea es una galaxia espiral
 - La mayoría (>99%) de sus estrellas conforman un Disco, que tiene una parte central llamada Bulbo
 - El Disco y Bulbo están rodeados por un Halo esférico, donde se encuentran los cúmulos globulares
 - El sol está en el disco, a una distancia de 8.5kpc del centro (a mitad de camino entre el centro y el borde aprox.)



La Vía Láctea: 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



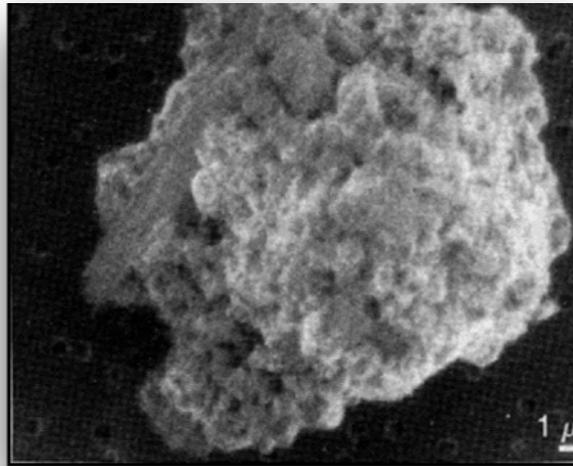
- Veamos a qué se refiere...



Medio Interestelar

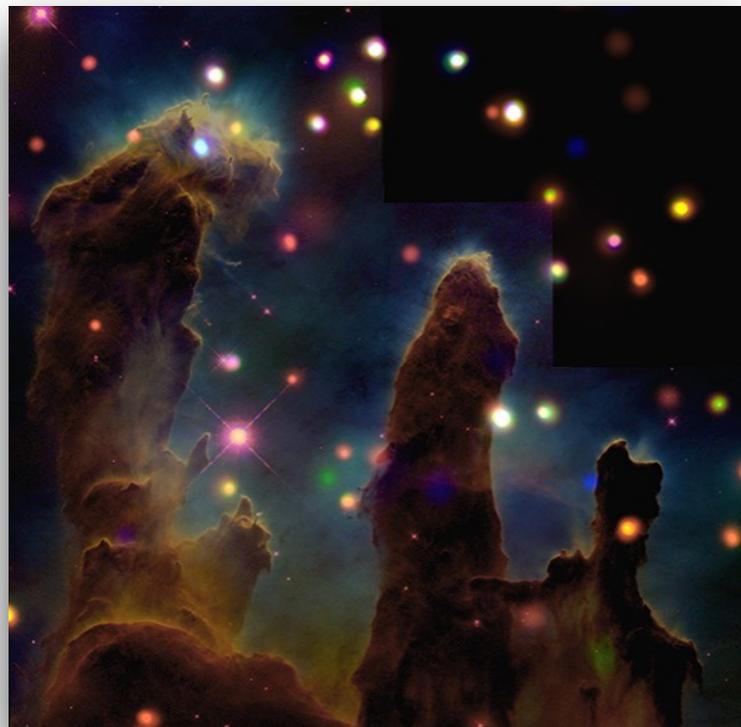
La Vía Láctea: Medio Interestelar

El medio interestelar se compone de gas y polvo:



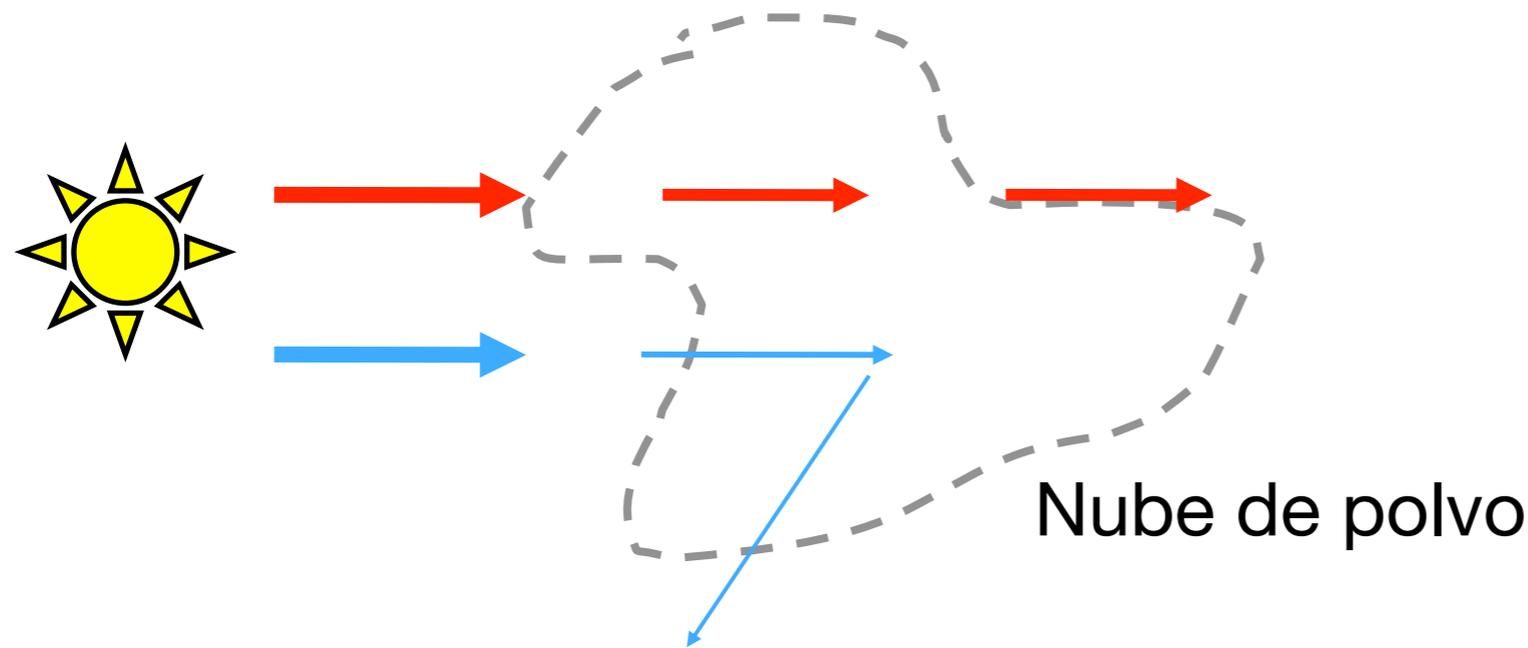
Partícula de polvo

- Gas en diferentes estados físicos: Fases del Medio Interestelar
- Polvo: Agregados de silicatos SiO y SiO_2 con hielo- H_2O hielo (“hielo sucio”) + grafitos y PAHs=Hidrocarburos policíclicos aromáticos (ej. fullereno C_{60})
- El gas y polvo coexisten entre sí (su presencia está correlacionada, donde hay polvo hay gas) y con las estrellas en cada galaxia



Nebulosa del Águila (HST)

La Vía Láctea: Medio Interestelar



Dos efectos del polvo sobre la luz incidente en una nube:

Absorción:

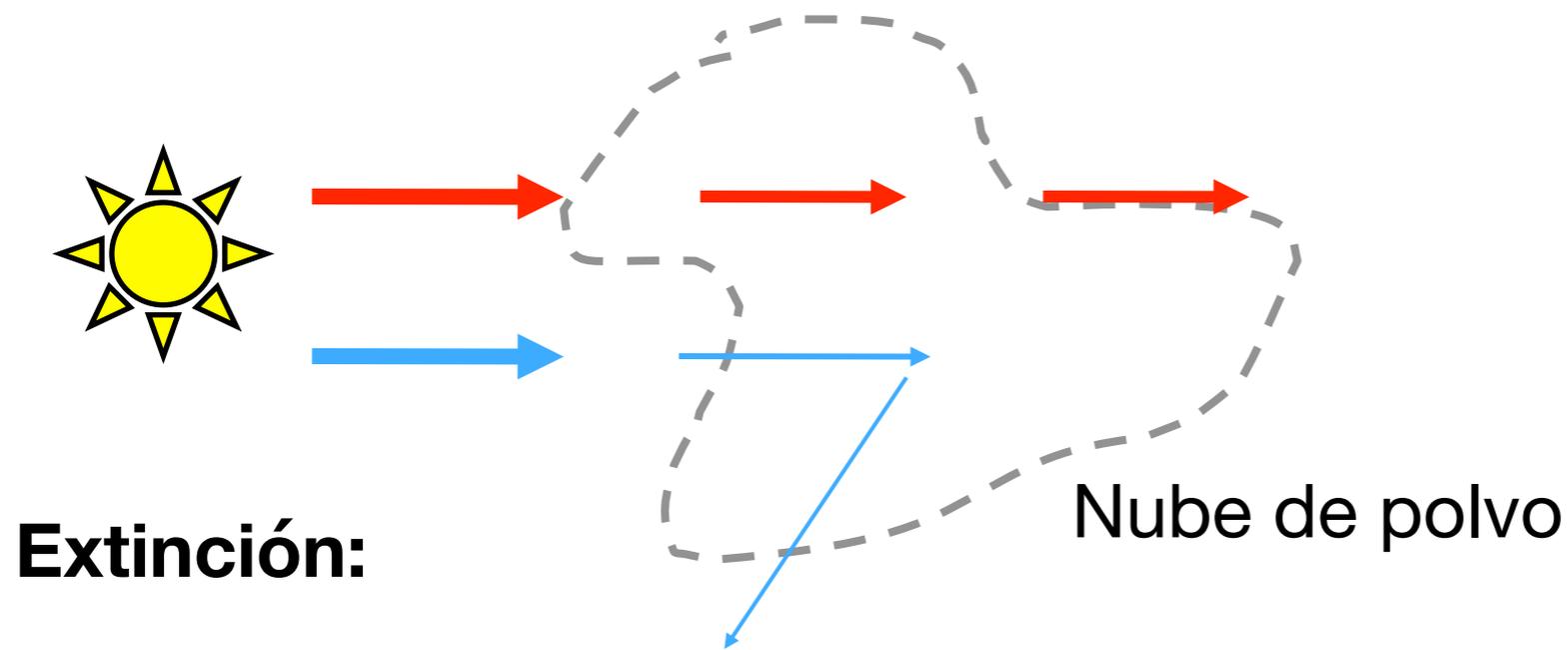
Disminución de la intensidad de la luz que atraviesa la nube

Dispersión (scattering) :

Al atravesar la nube, la luz saliente tiene una dirección diferente a la incidente => la intensidad de la luz saliente en una cierta dirección es menor que la inicial. El polvo dispersa más la luz de onda corta (azul).

La Vía Láctea: Medio Interestelar

El polvo es el causante de la extinción y enrojecimiento de la luz proveniente de las estrellas



Extinción:

Efecto combinado de la absorción y dispersión de la luz. A una longitud de onda dada, la intensidad saliente es menor por la combinación de ambos efectos

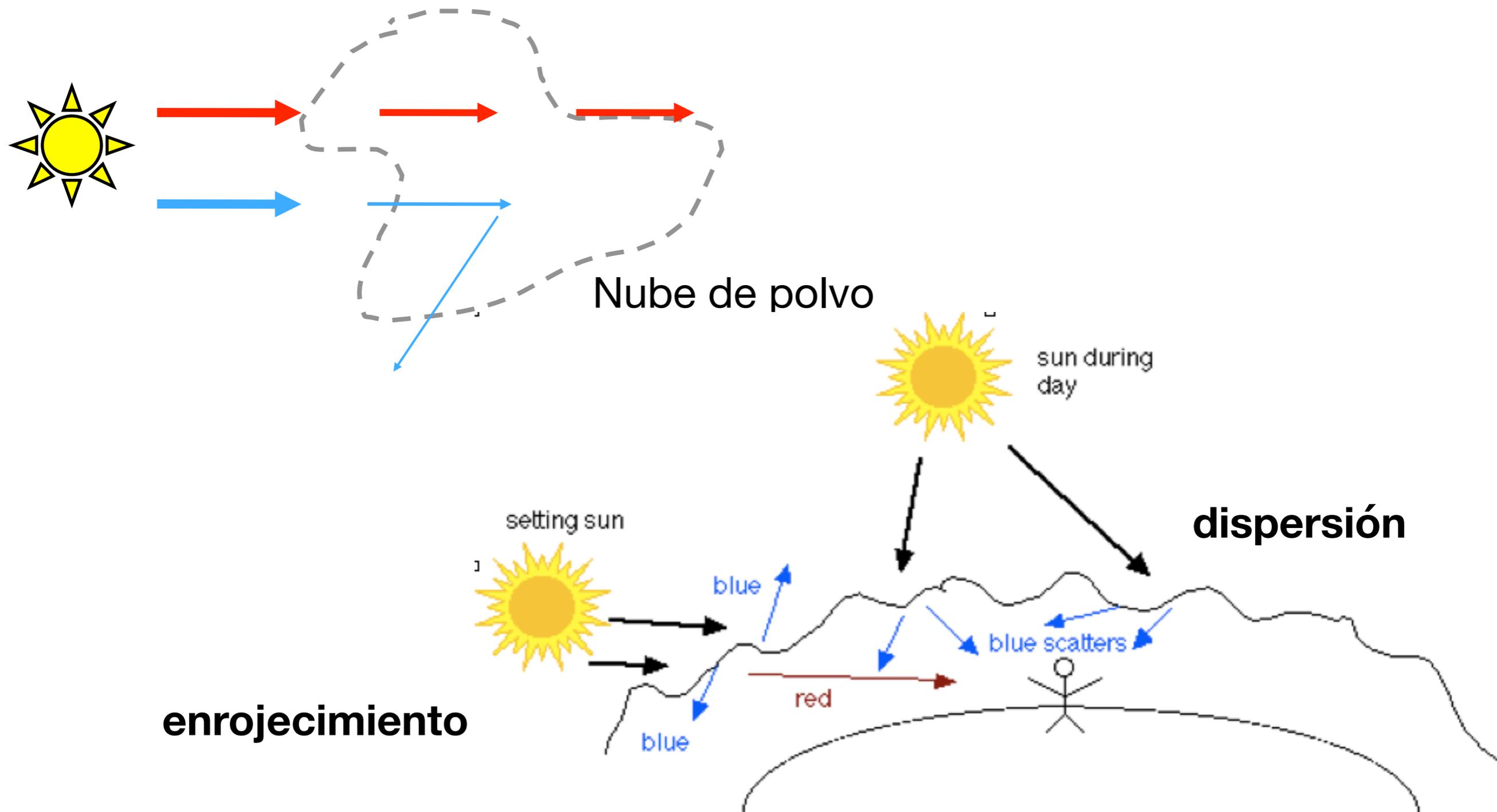
Enrojecimiento:

El polvo *absorbe y dispersa* más la luz azul, haciendo que las estrellas parezcan más rojas



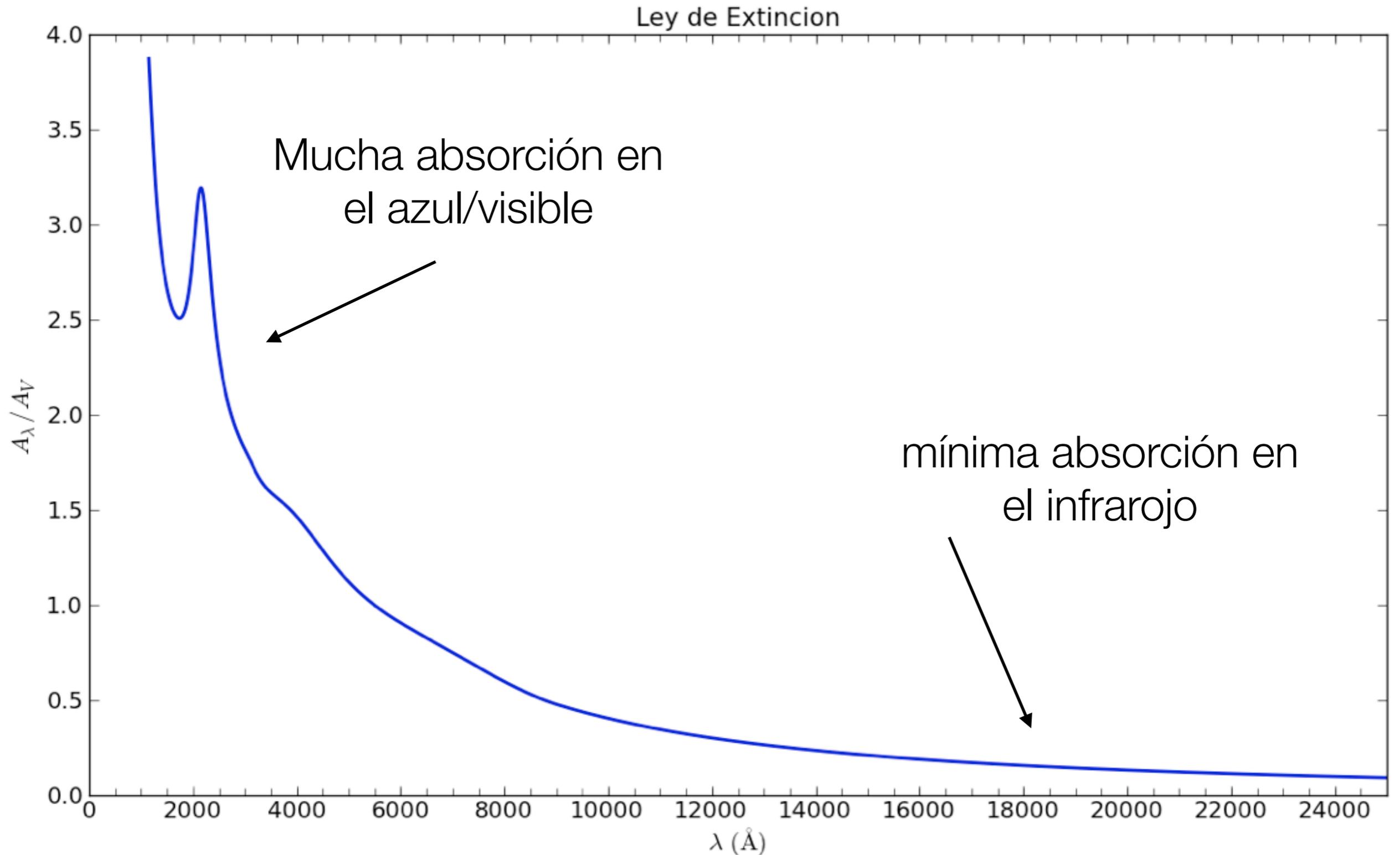
La Vía Láctea: Medio Interestelar

El polvo es el causante de la extinción y enrojecimiento de la luz proveniente de las estrellas



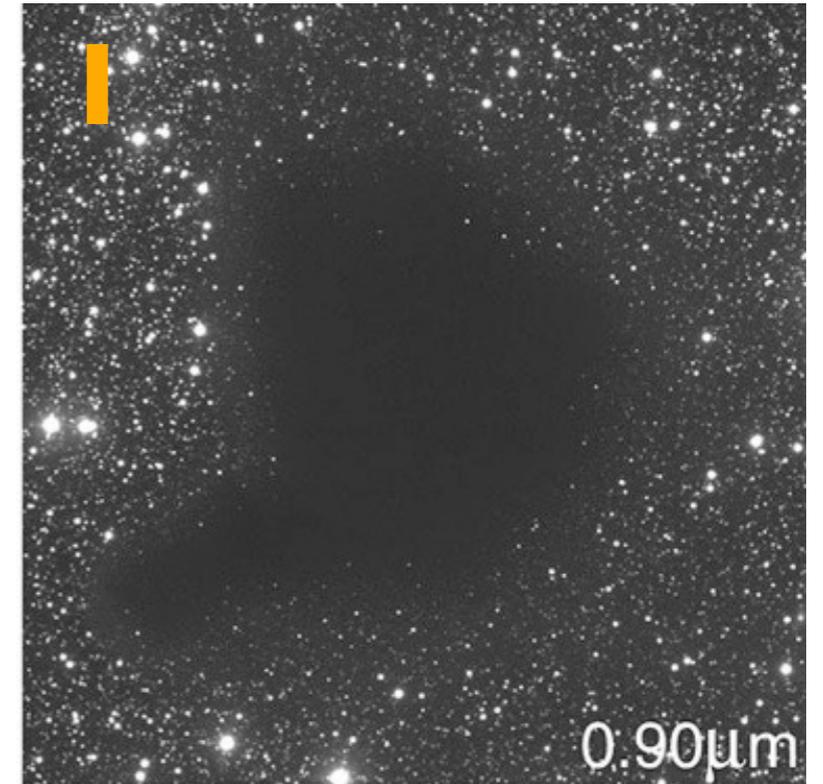
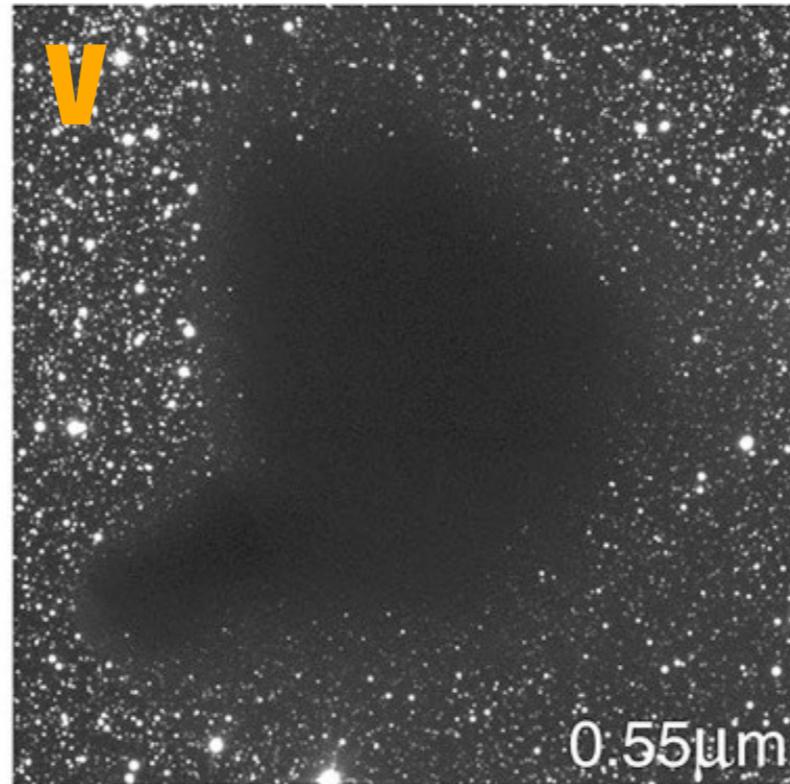
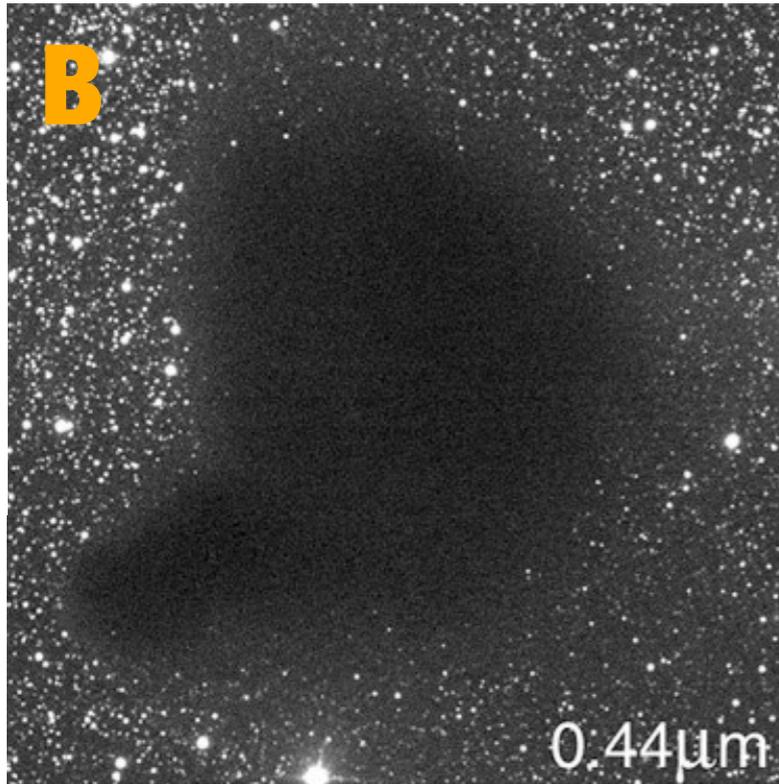
La Vía Láctea: Medio Interestelar

Ley de extinción: muestra cuánta luz es absorbida en función de λ

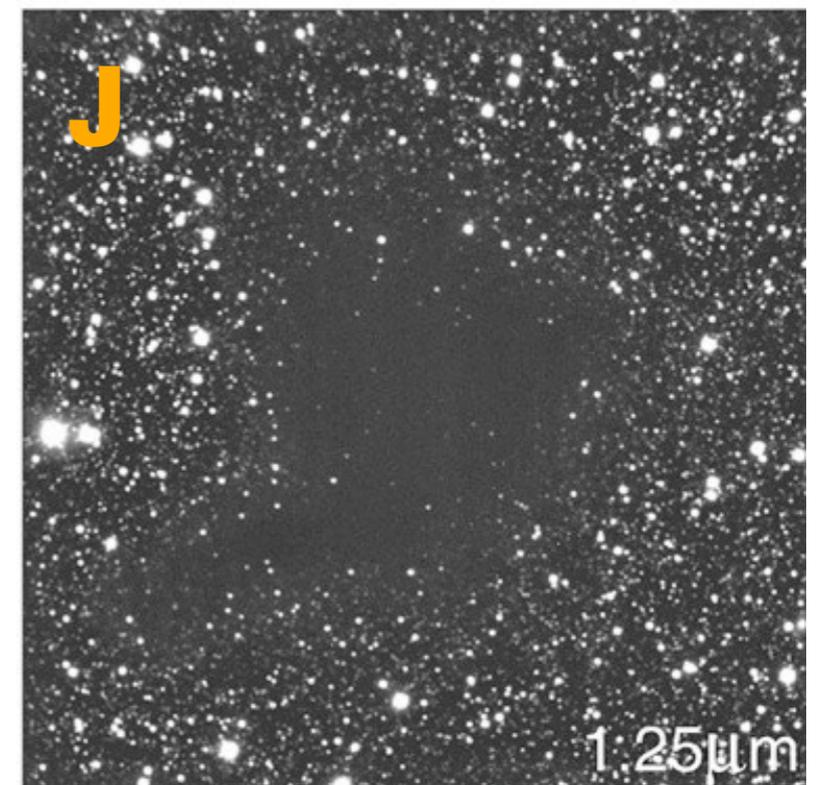
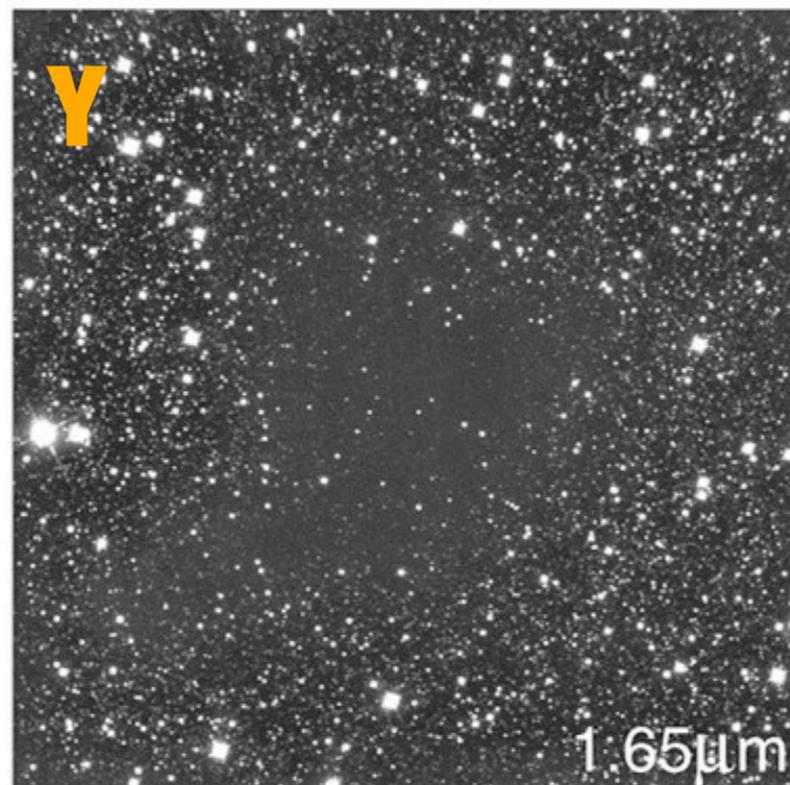
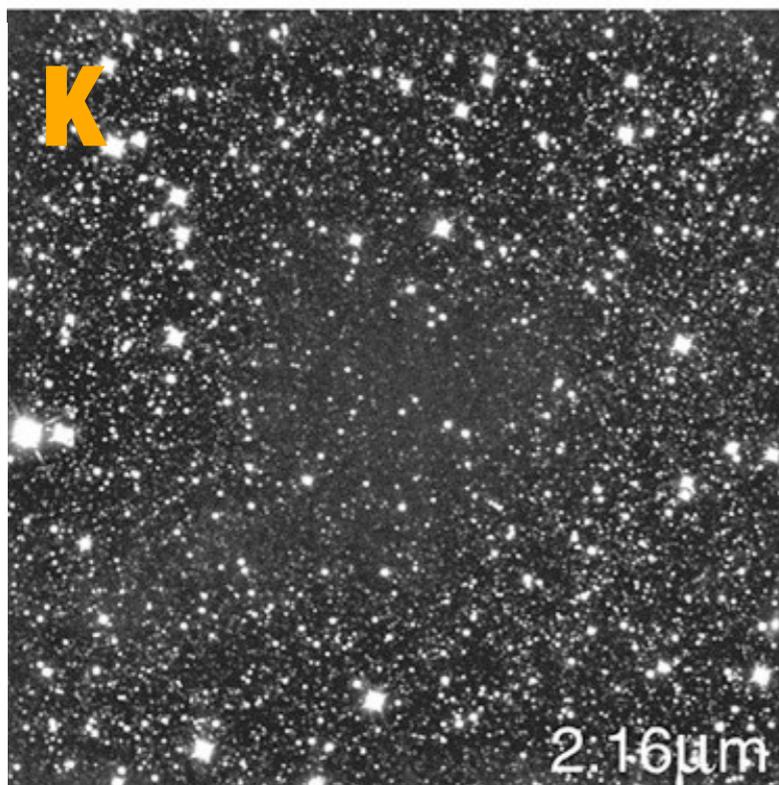


Observaciones Multi-Banda: Infrarojo Cercano

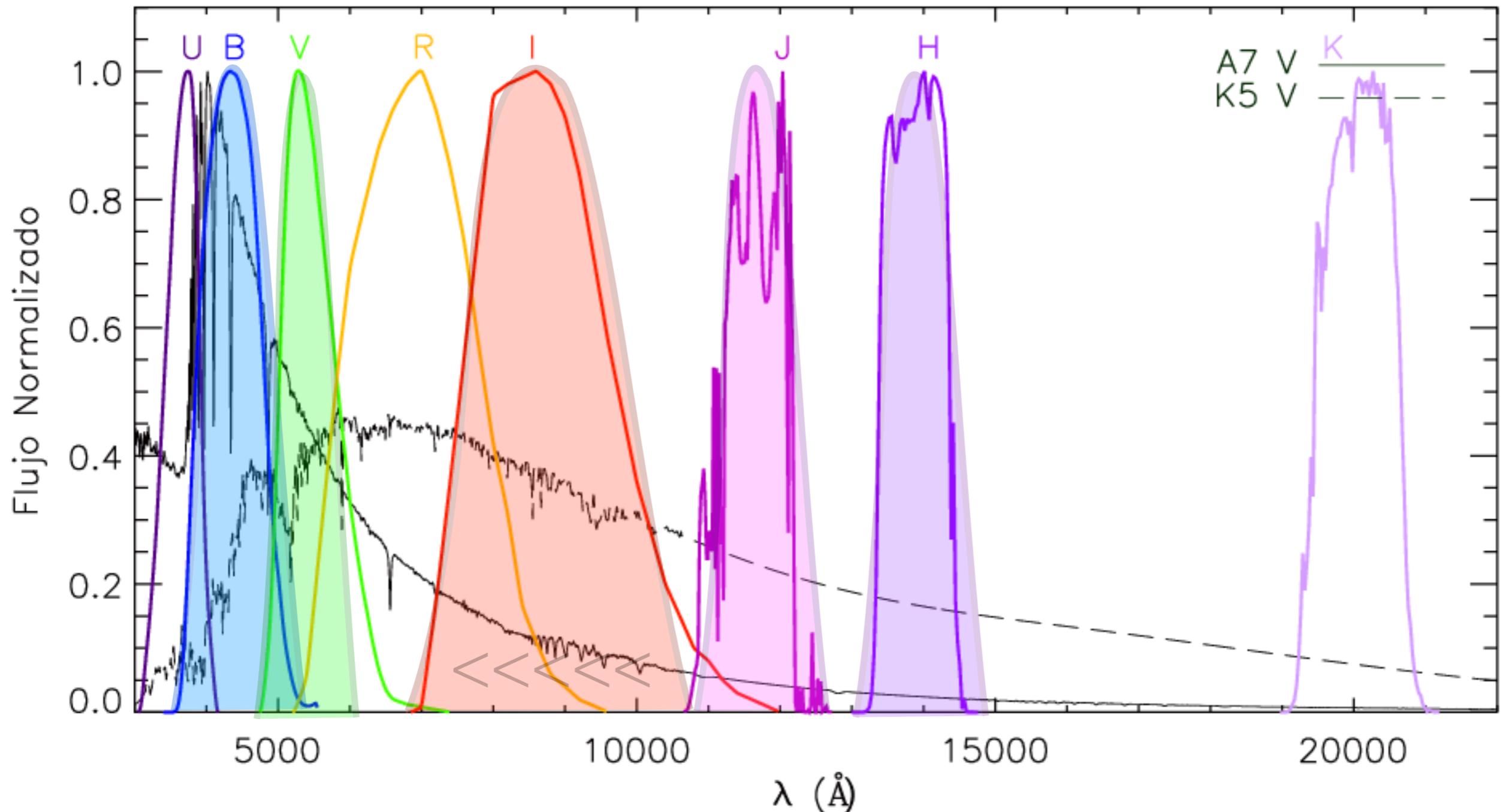
Óptico



Infrarojo Cercano

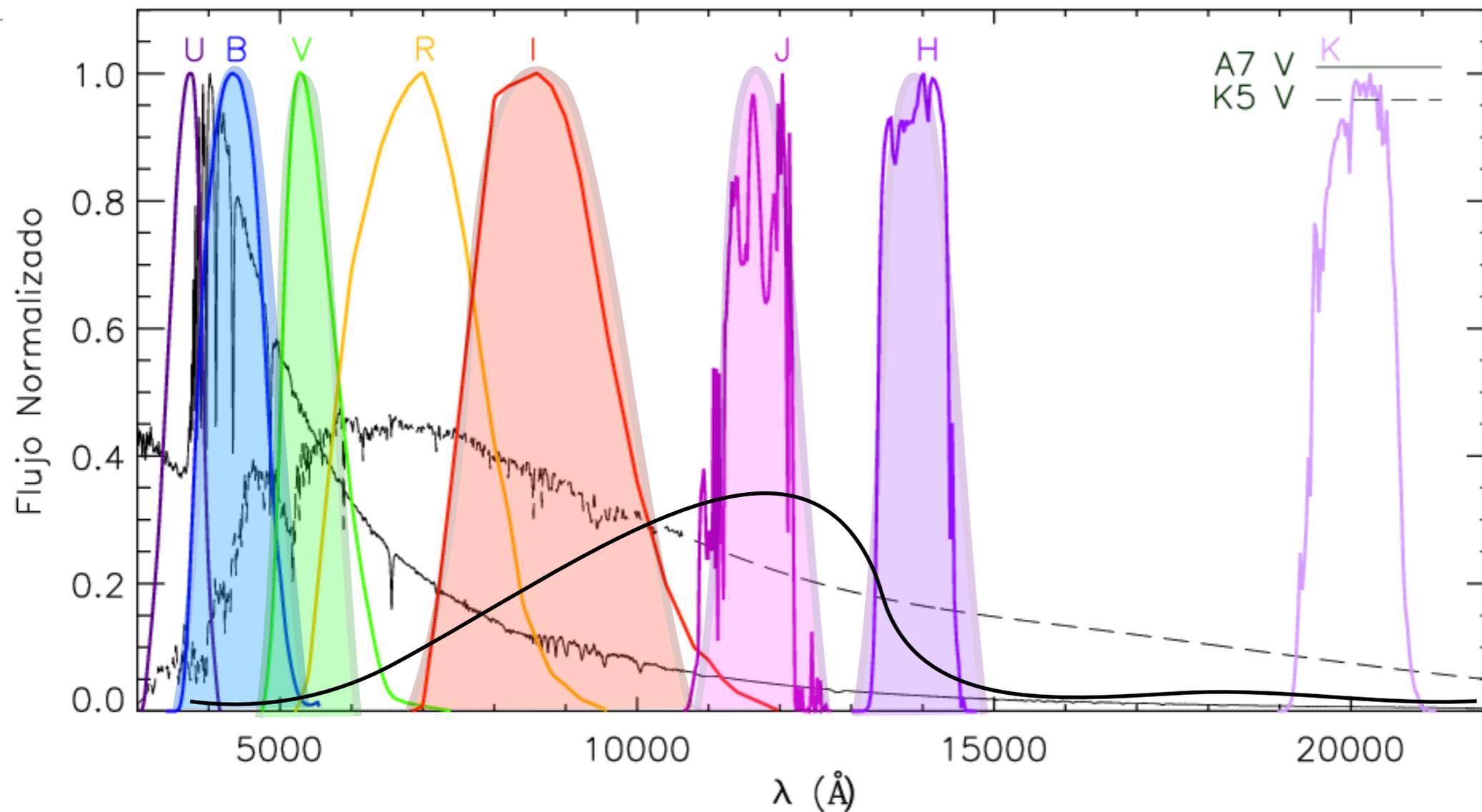


Observaciones Multi-banda: ¿Qué vemos?

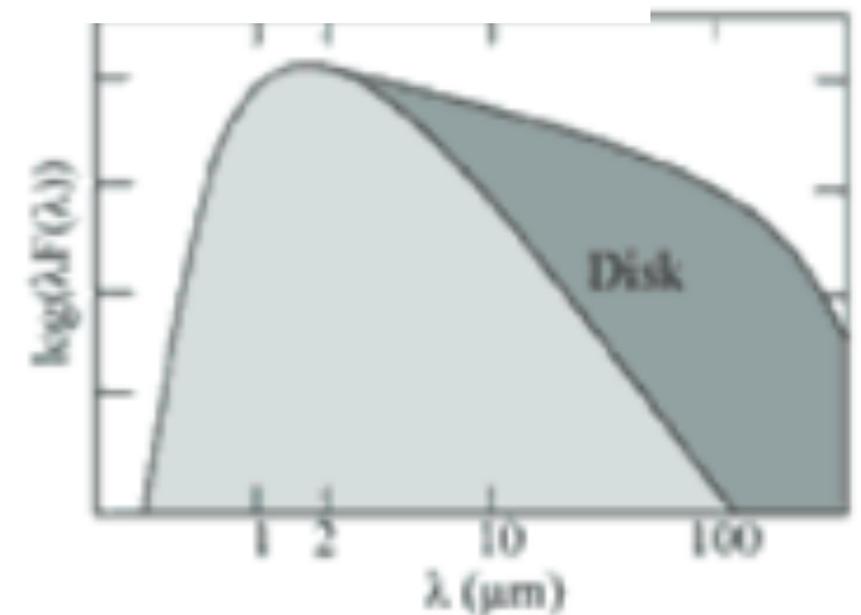


- En el óptico ($\sim 4000\text{\AA} - 1\text{mm}$, bandas UBVRI) se observa primordialmente la emisión de estrellas más tempranas que tipo espectral M
- En el cercano infrarrojo (1 mm-25mm, bandas JHK) se observa la emisión de estrellas frías tipo K, M o más tardías

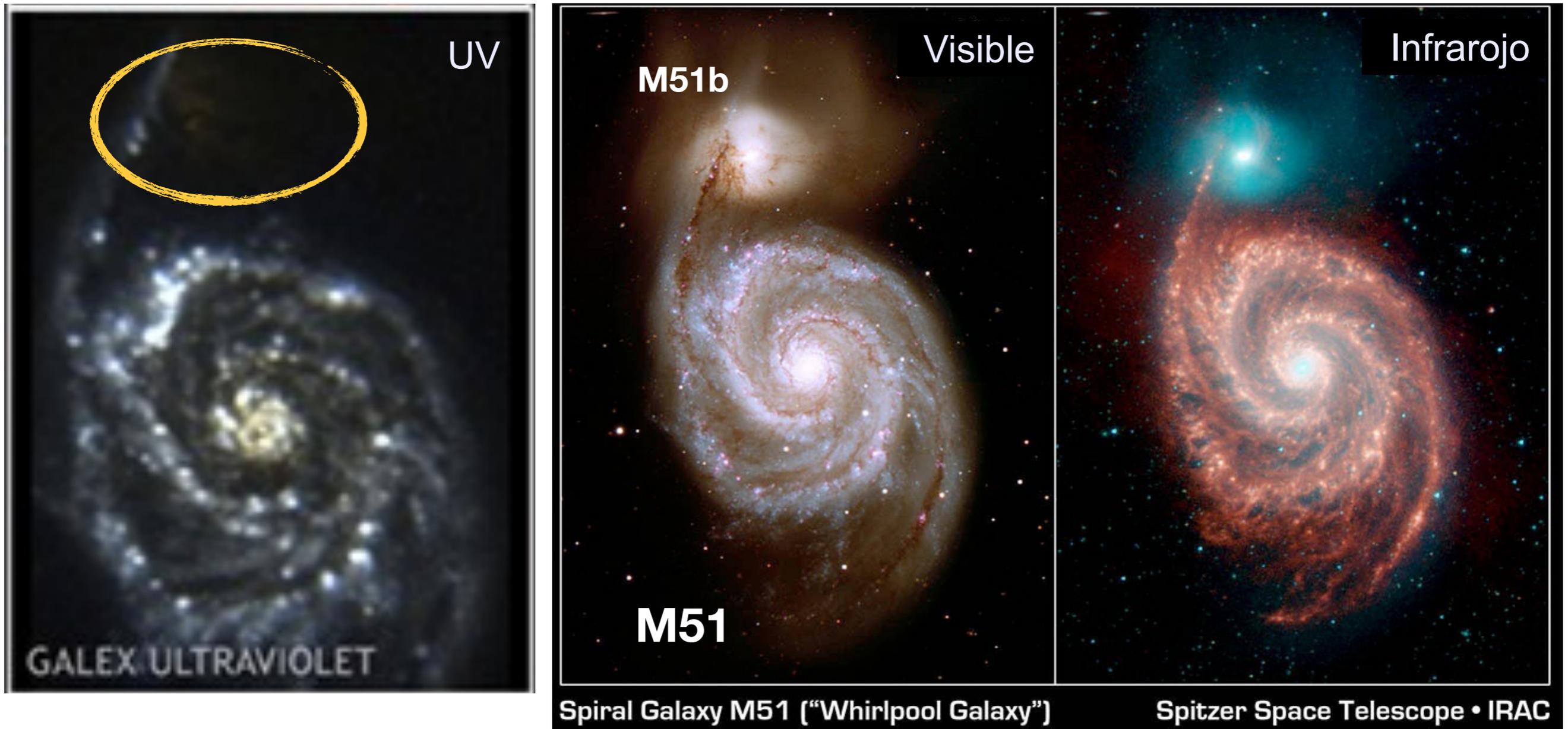
Observaciones Multi-banda: ¿Qué vemos?



- En el lejano infrarrojo ($>25\mu\text{m}$) se observa la emisión del polvo, que reemite la radiación absorbida
- Recordar lo que habíamos visto en el espectro de las protoestrellas



M51 - Whirlpool Galaxy



3.6 microns (azul), 4.5 microns (cyan) = Infrarojo Medio => población estelar

5.8 microns (naranja) and 8.0 microns (rojo) = Infrarojo Lejano => emisión del polvo

¿Qué significa que la galaxia pequeña no se observe en el UV? => no hay formación estelar
=> no hay estrellas jóvenes y masivas

Notar el polvo en los brazos espirales y ausente en la galaxia elíptica M51b

¿cómo afecta la extinción a las magnitudes?

Extinción y Enrojecimiento

- La **extinción** A_X (en el filtro X) se define como diferencia entre la magnitud aparente (observada) m_X de una estrella y la magnitud m_{X_0} que tendría en ausencia de polvo (o magnitud intrínseca)

$$A_X \equiv m_X - m_{X_0}$$

- El **exceso de color $E(X-Y)$** se define como la diferencia entre el color intrínseco $(X-Y)_0$ y el color observado $(X-Y)$

$$E(X - Y) \equiv (X - Y) - (X - Y)_0$$

- ¿Cómo se expresa el exceso de color $E(X-Y)$ en términos de A_X y A_Y ?

$$E(X - Y) = (X - X_0) - (Y - Y_0) = A_X - A_Y$$

- El cociente $R_V = A_V / E(B - V)$ está dado por la ley de extinción, que depende del tipo de polvo que causa la extinción. En la Galaxia típicamente $R_V = 3.1$. R_V se llama *cociente de absorción total-a-selectiva*

Fases del Medio Interestelar

Tipos de Nebulosas: Clasificación Observacional

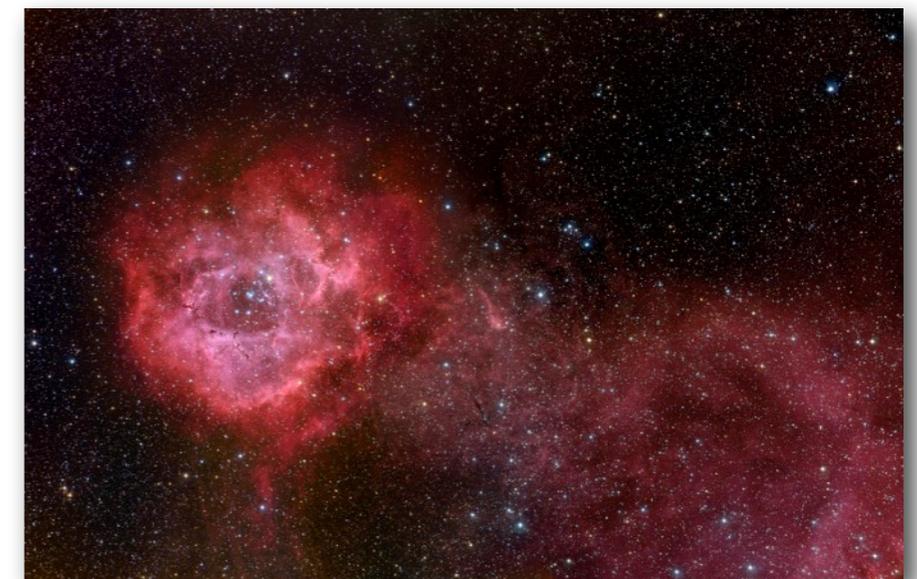
Nebulosas de Reflexión:

Reflejan luz de estrellas cercanas o embebidas en la nebulosa. Parecen azuladas pues la luz azul es la que más se dispersa



Nebulosas de Absorción u Oscuras:

El polvo bloquea la luz de las estrellas del fondo por absorción

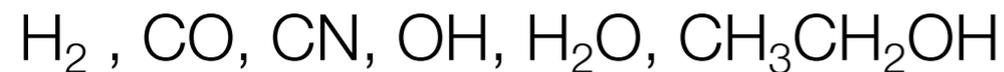


Nebulosas de Emisión: Principalmente constituidas de gas ionizado. Presentan líneas de emisión, mayoritariamente de H

La Vía Láctea: Medio Interestelar

El polvo y el gas *coexisten* en las nubes o nebulosas. Dependiendo de las condiciones **físicas** del gas, podemos clasificar las nubes de la siguiente manera:

- **Nubes moleculares:** El gas está compuesto por **moléculas**, típicamente



se detectan mediante líneas de emisión vibro-rotacionales del CO en 2.6mm, ya que la molécula de H₂ que es la más abundante emite en el UV lejano

- **Nubes de HI:**

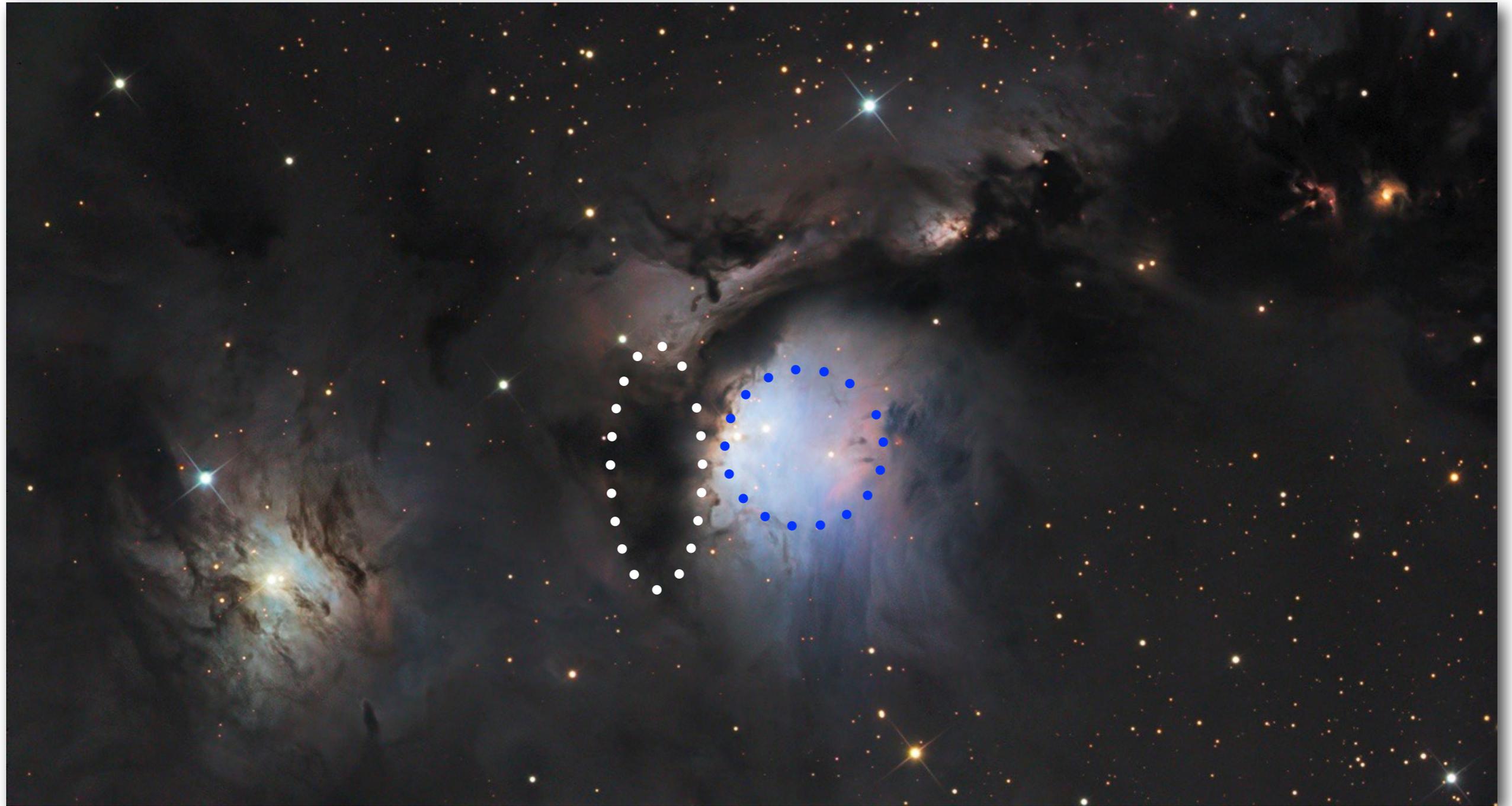
El gas es mayormente Hidrógeno **neutro**. Estas nubes se detectan mediante la emisión en la línea de 21cm del H.

- **Regiones HII:**

El gas es mayormente hidrógeno **ionizado** (HII o H⁺), debido a la cercanía de estrellas jóvenes de alta masa (tipos O y B). Se detectan mediante la **emisión** de las líneas de la serie de Balmer del H.

La Vía Láctea: Fases del Medio Interestelar

Importante: Las diferentes fases del Medio Interestelar *coexisten*



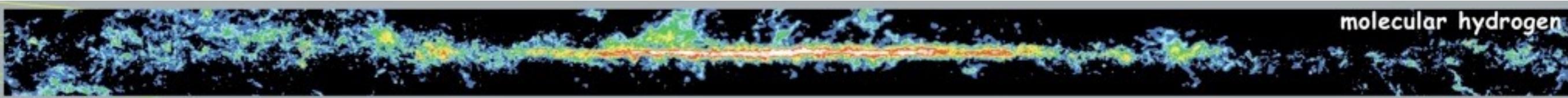
La Vía Láctea: Medio Interestelar

¿Cómo se distribuyen las nubes de polvo y gas en el Disco de la Vía Láctea?

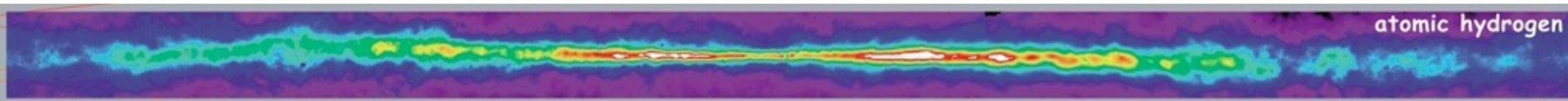
La Vía Láctea: Óptico (Estrellas)



La Vía Láctea: Líneas de 2.6mm CO (**Hidrógeno Molecular**)



La Vía Láctea: Línea de 21cm de H (**Hidrógeno Neutro**)



- Se observa que las nubes de polvo y gas están confinadas **exclusivamente** al Plano de la Galaxia
- El Medio Interestelar (nubes de HI, HII, moleculares y polvo) constituye ~10% de la masa total de la Galaxia ($\sim 10^{11} M_{\odot}$)

La Vía Láctea: Fases del Medio Interestelar

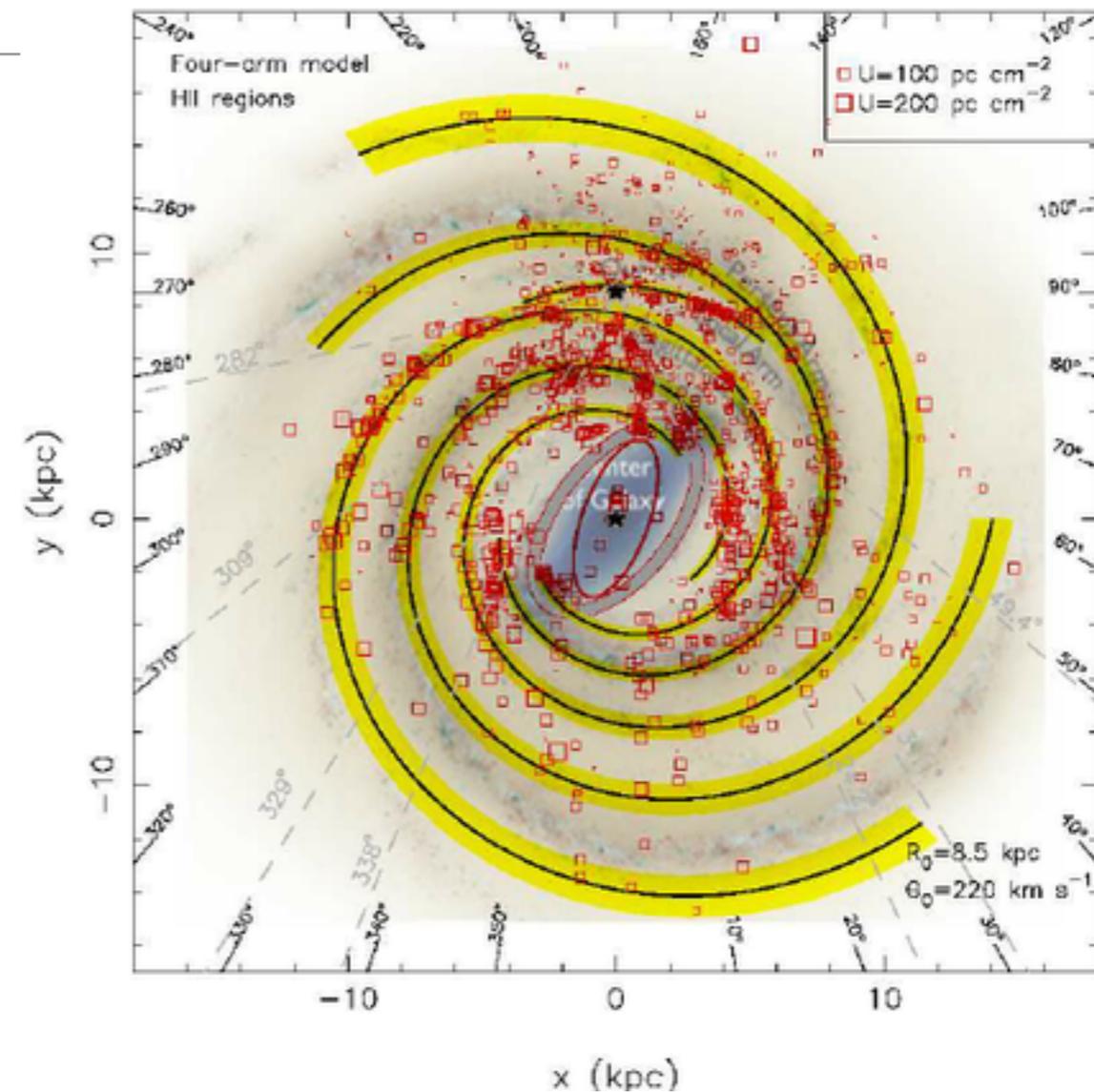
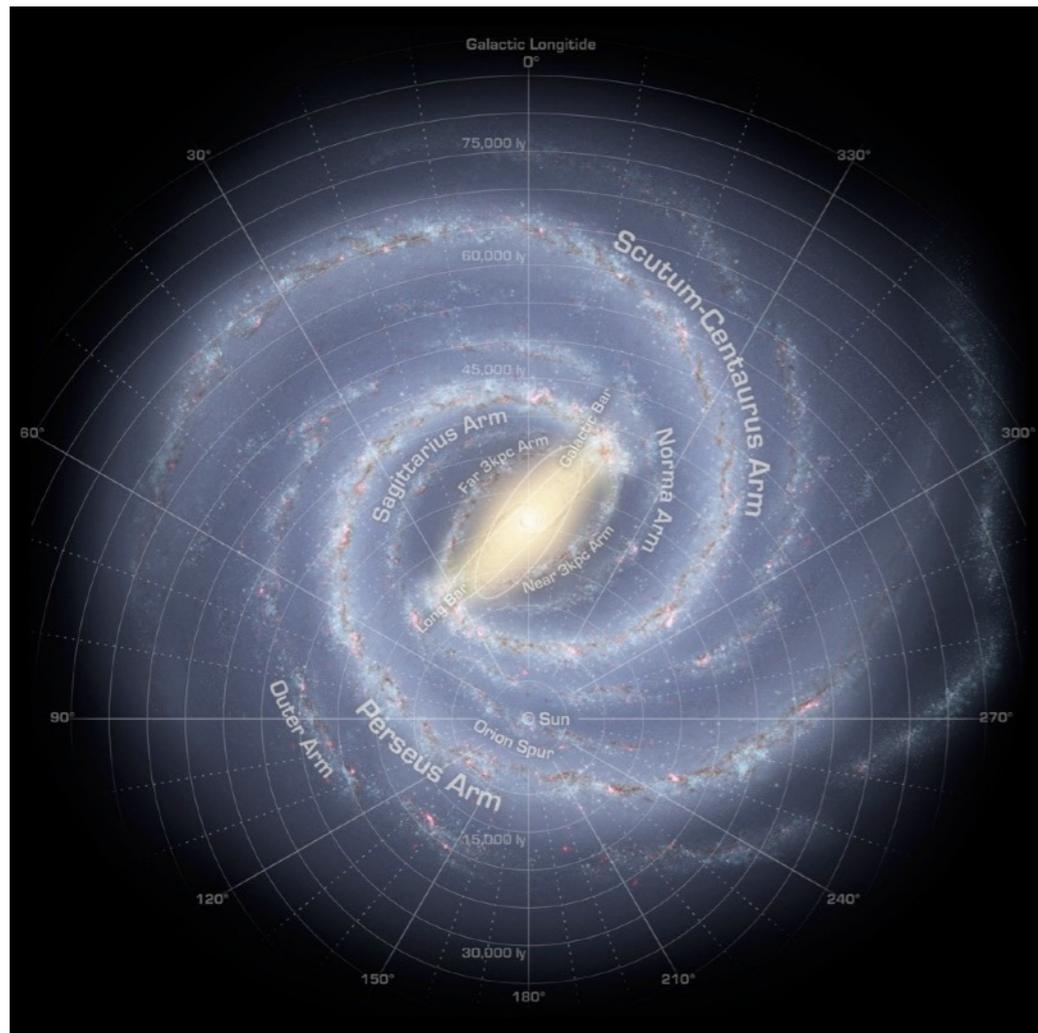
Componente	Densidad átomos/cm ³	Temp K	λ Detección
Regiones HII	~0.1	$\geq 10^4$	Regiones de Formación Estelar en el P.G.
Nubes de HI	~1-10	~100-10 ³	P.G.
Nubes moleculares	~10 ² - 10 ³	~20-50	P.G. brazos espirales
Polvo	~10 ⁵	<100	Sigue al gas molecular

P.G. = Plano Galáctico

Densidad del aire: ~**3x10¹⁹** partículas/cm³

La Vía Láctea: El Disco - Población Estelar

- Las observaciones de nubes moleculares en 21 cm y otros trazadores muestran la existencia de brazos espirales

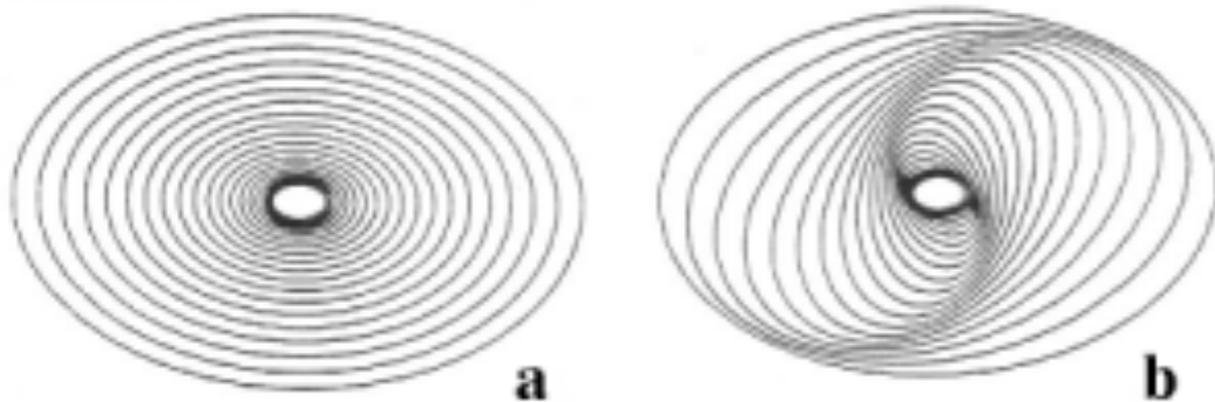


- Brazos espirales: nubes de polvo, de Hidrógeno molecular y regiones HII
- En los brazos espirales se encuentran las regiones de formación estelar y cúmulos abiertos

La Vía Láctea: Brazos Espirales

Lo que ocurre es que **los Brazos Espirales son en realidad, ondas de densidad:**

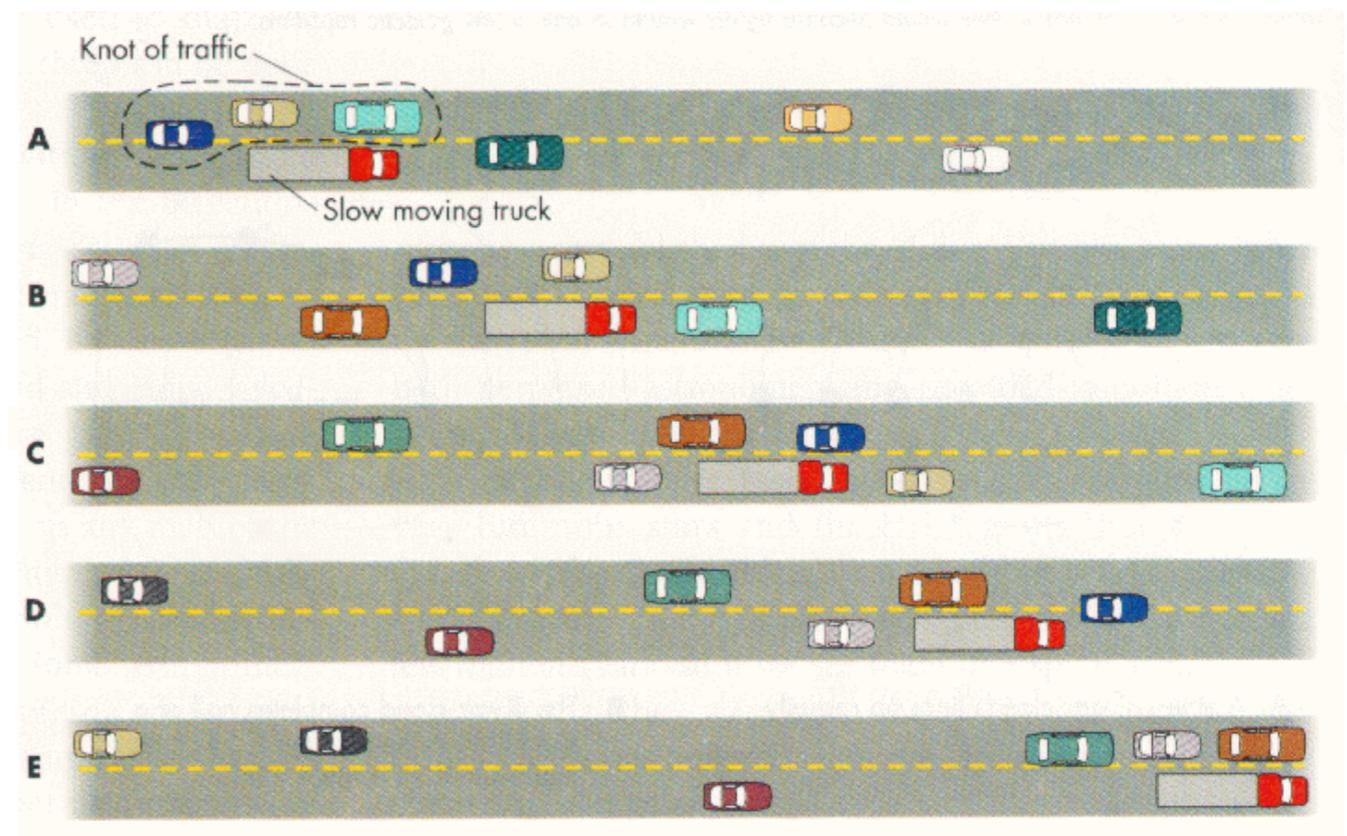
Las zonas brillantes de los brazos son zonas de mayor densidad, en ellas las estrellas se mueven ligeramente más lento que afuera, acumulándose momentáneamente. Esto es consecuencia (en parte) de que las órbitas no son perfectamente circulares



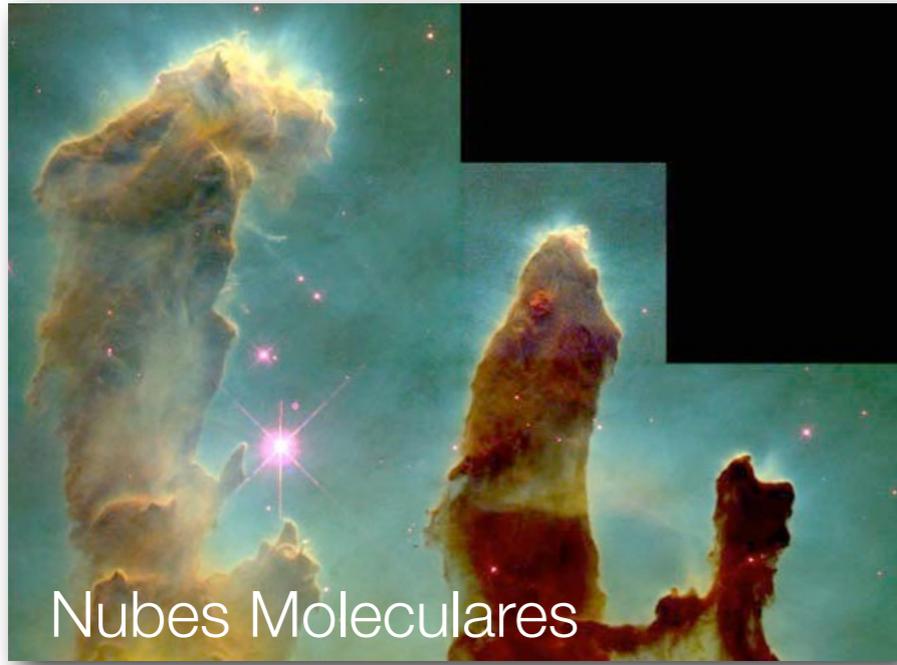
por esto es en los brazos espirales donde se encuentran las nubes moleculares más densas y donde ocurre la formación estelar

Density Wave

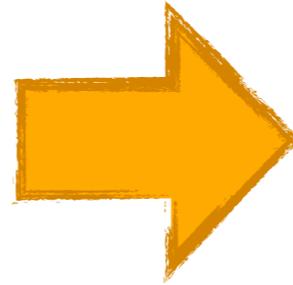
A slow moving truck causes a knot of traffic that moves along the highway at the speed of the truck. Individual cars approach the traffic knot, slow down as they move carefully through the knot, and then resume speed as they leave the knot. As a result, the traffic knot consists of different cars at different times.



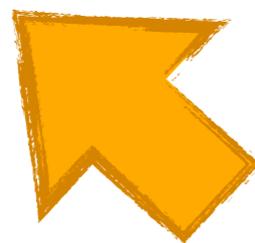
1- Las estrellas se forman en las Nubes Moleculares a partir del colapso gravitatorio de núcleos densos



2- Las estrellas O y B recién formadas ionizan el Medio -> formación de regiones HII (nebulosas de emisión y Reflexión)



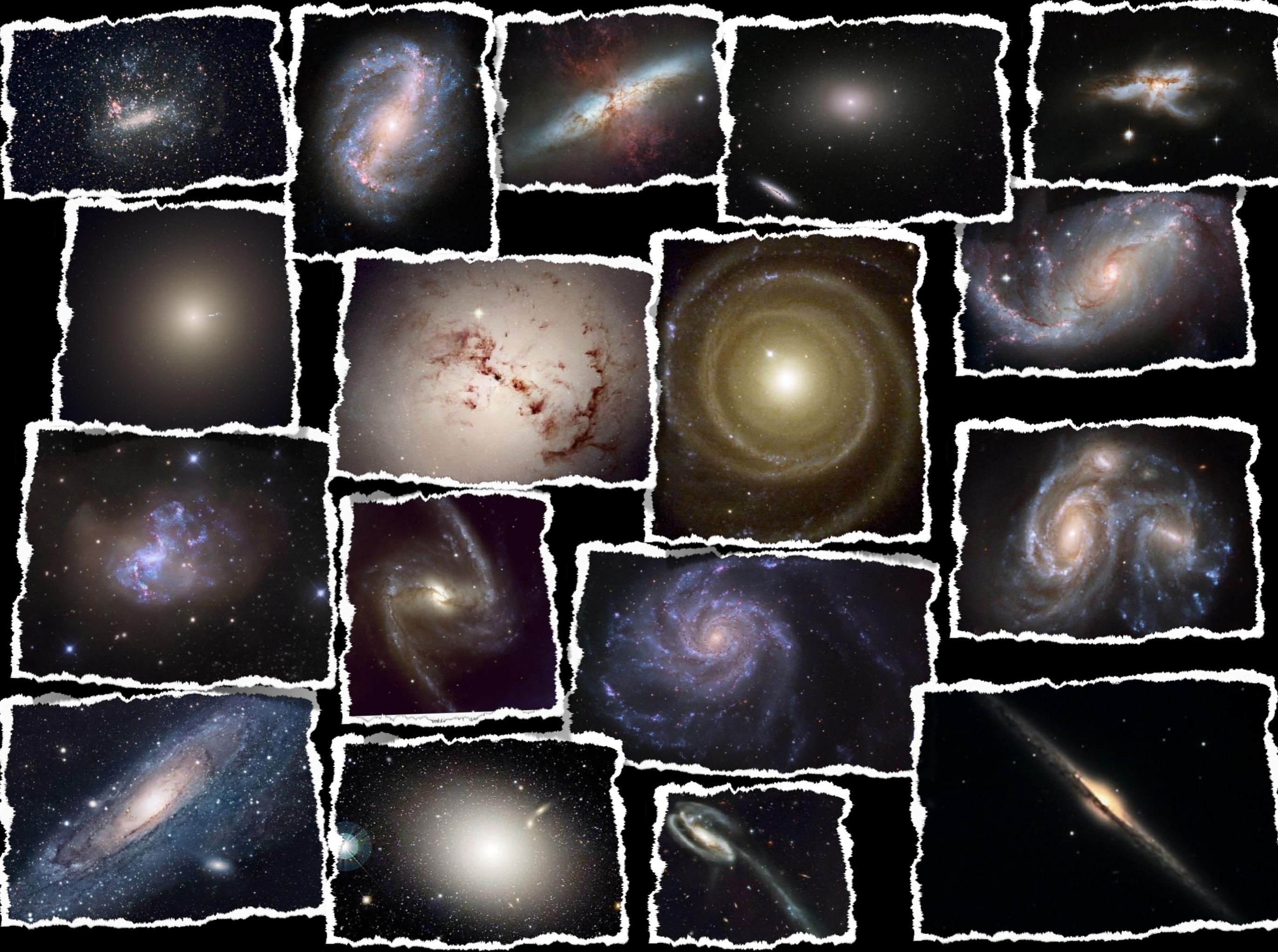
4- El gas se enfría y colapsa, formando nuevas Nubes Moleculares. Nuevas estrellas se forman a partir del gas enriquecido químicamente



3- Los vientos estelares y explosiones de supernova dispersan el medio interestelar circundante y lo enriquecen químicamente con elementos pesados generados en el interior estelar



Galaxias



reordenando un poco según la forma,
se ve que hay sólo unas pocas clases...



CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE HUBBLE

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

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



Elípticas

Espirales Normales (Sin Barra)

E0

E3

E7

S0

Sa

Sb

Sc



Irregular

SBa

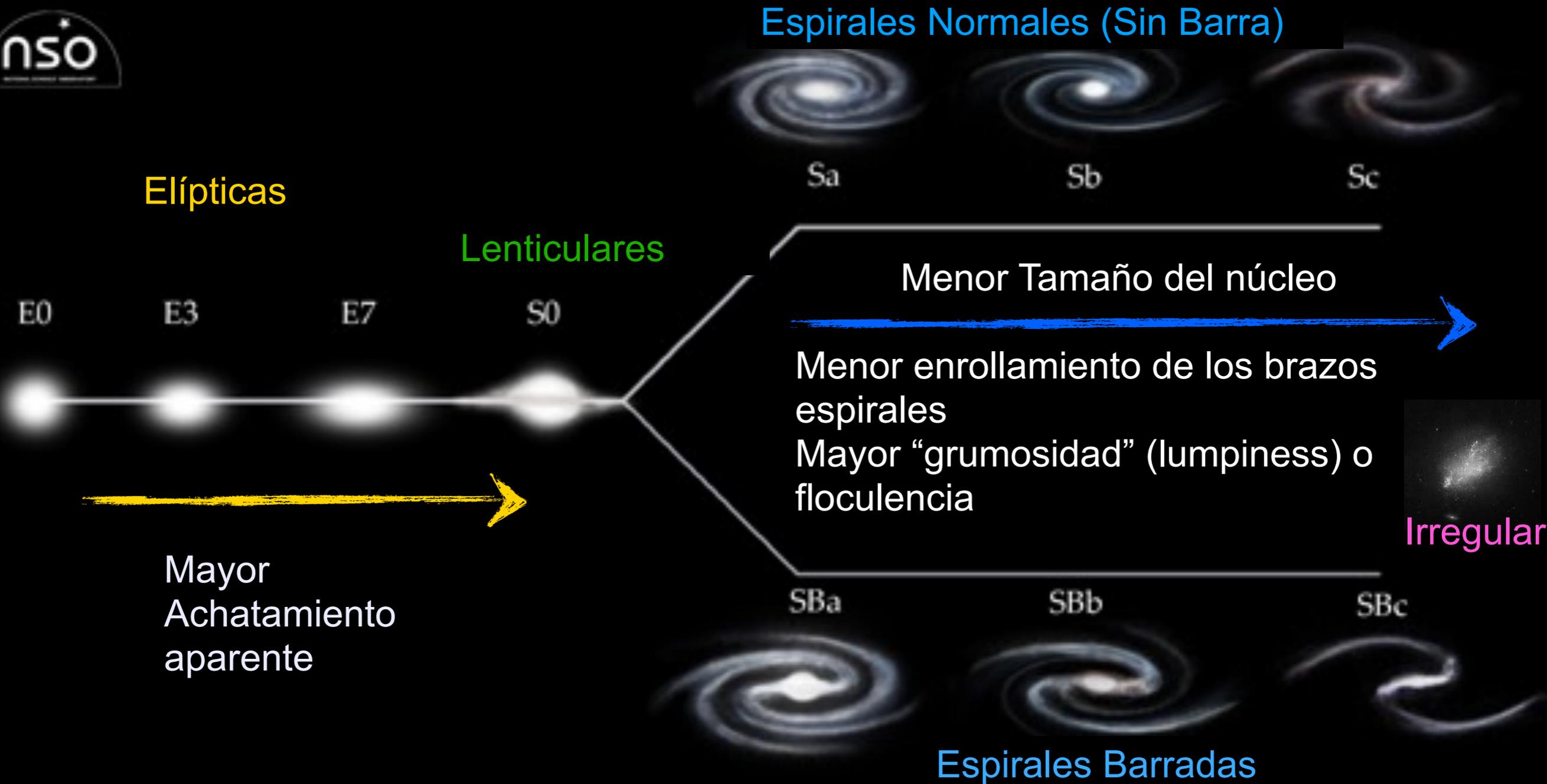
SBb

SBc

Espirales Barradas

CRITERIOS PARA LA CLASIFICACIÓN DE HUBBLE

¿cómo se ordenan las galaxias en el diapasón?

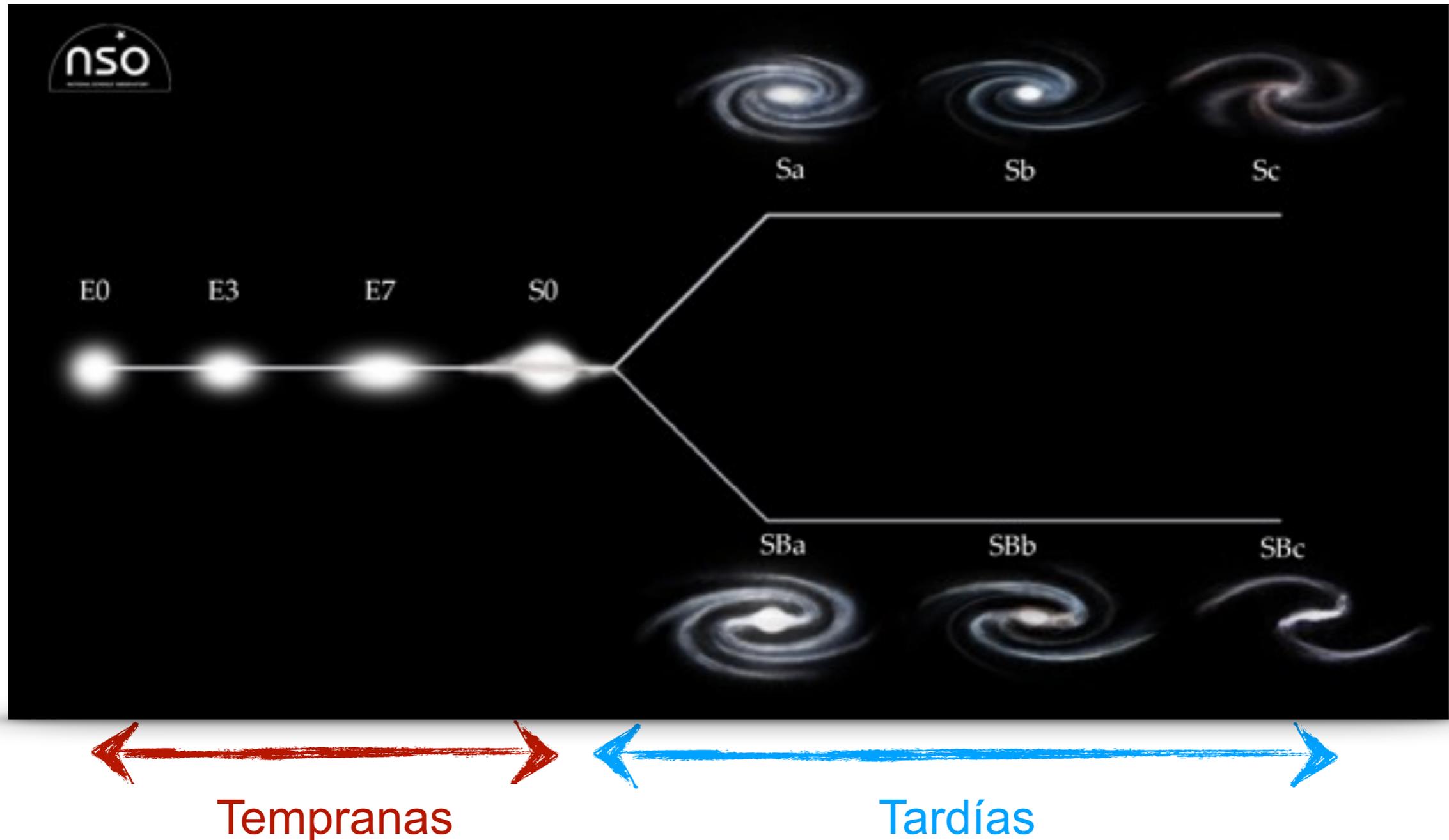


Nota: una E0 podría ser una E7 vista a lo largo del eje mayor

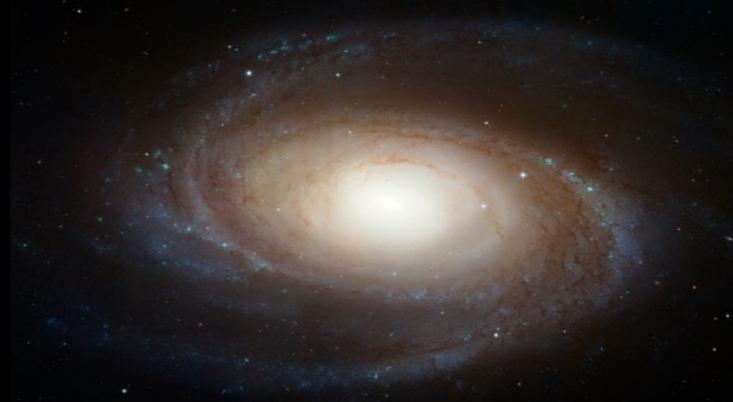
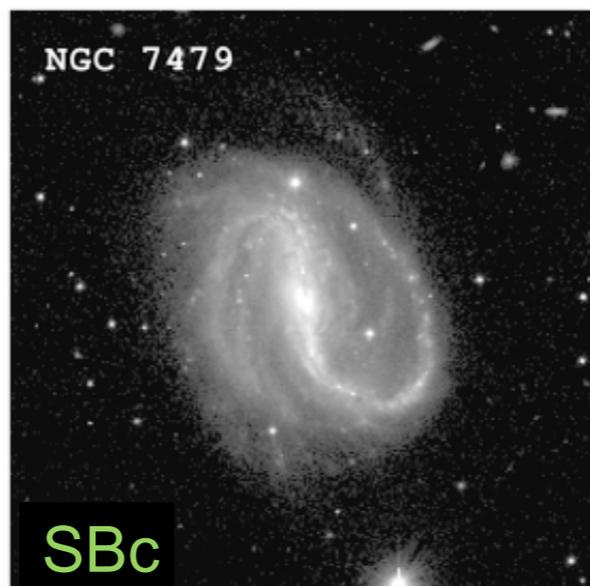
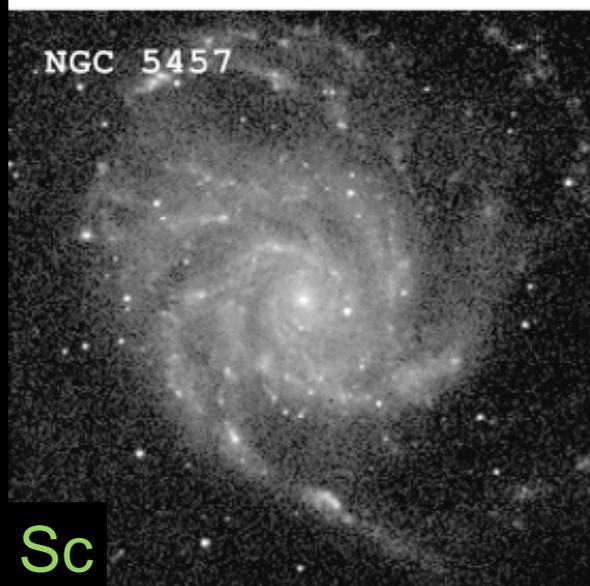
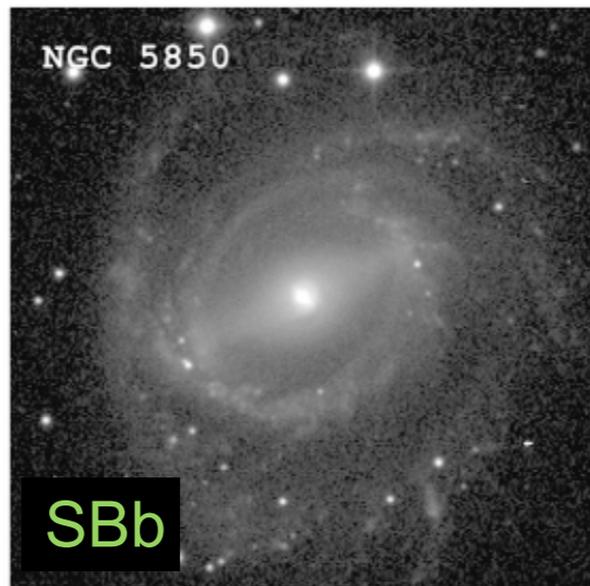
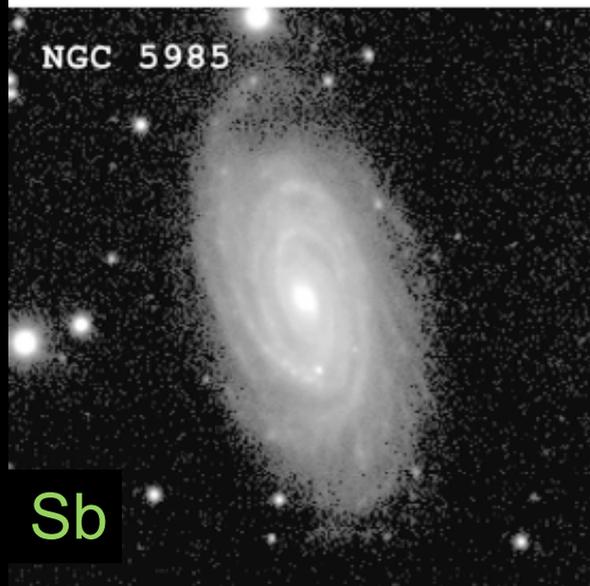
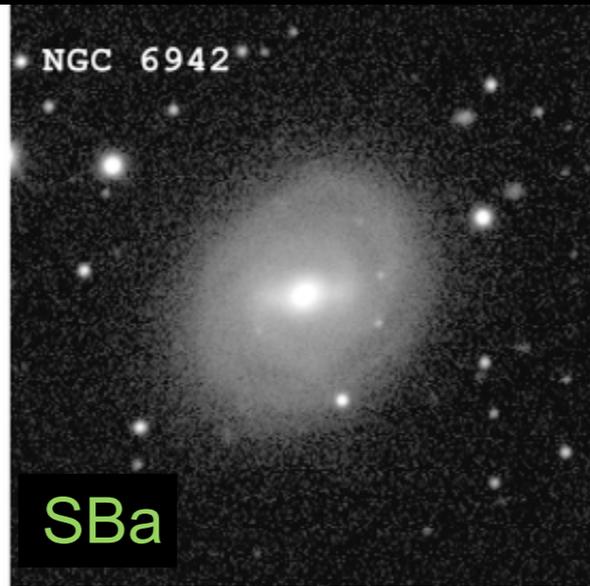
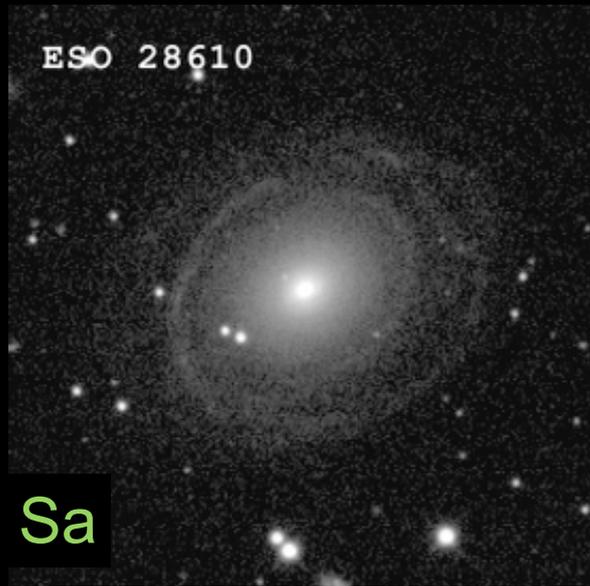
CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE HUBBLE

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.**

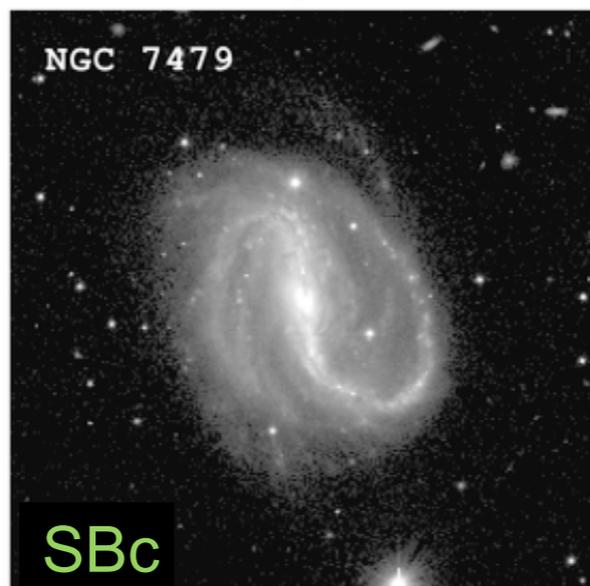
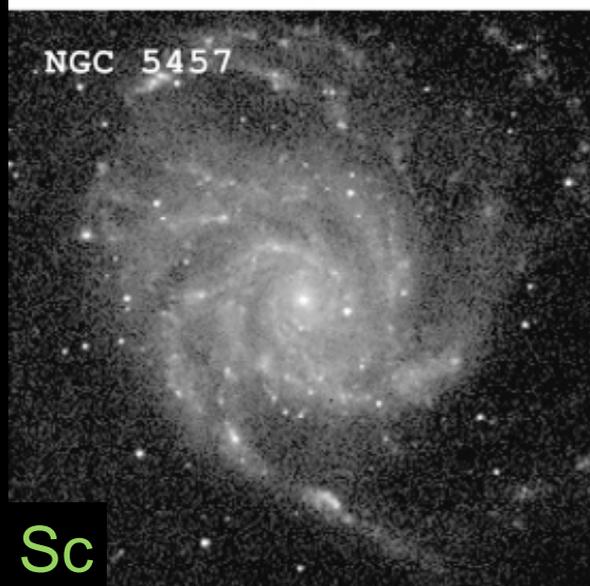
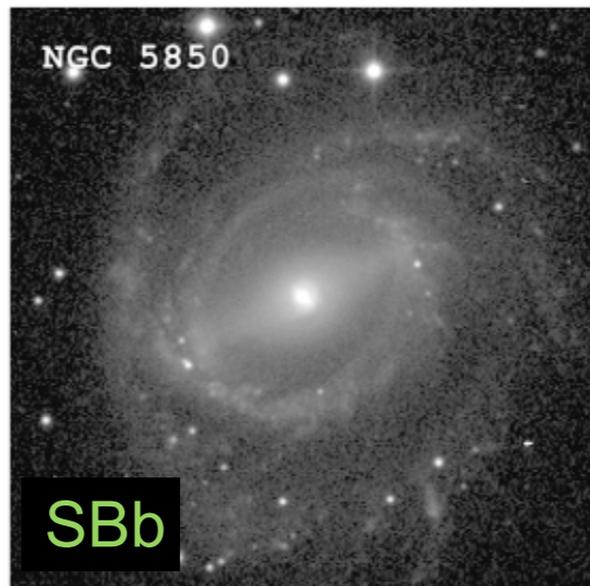
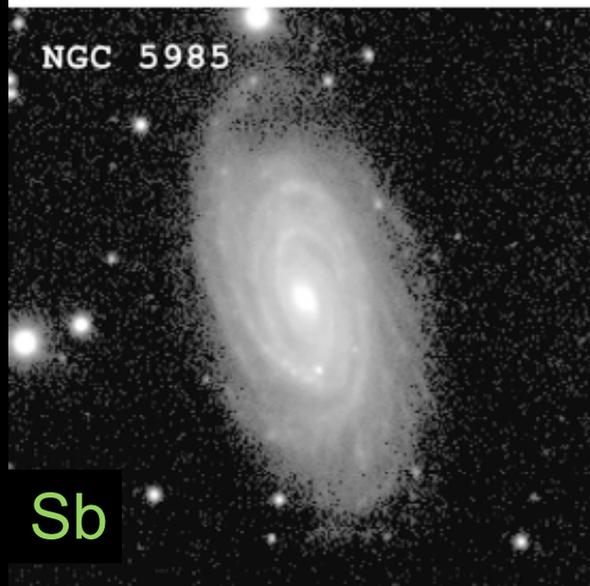
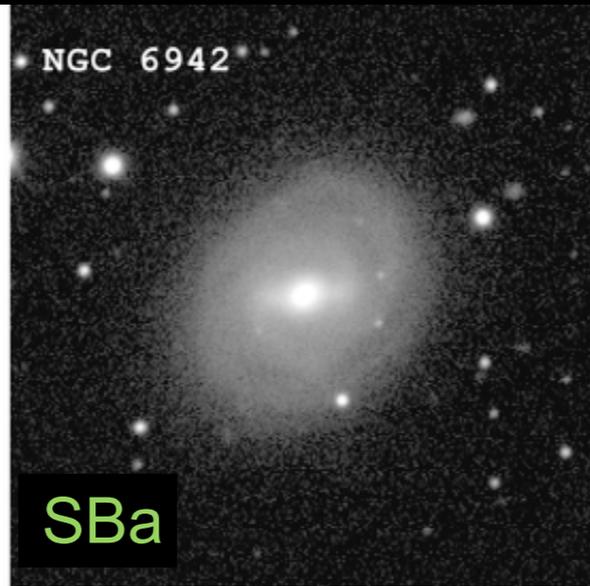
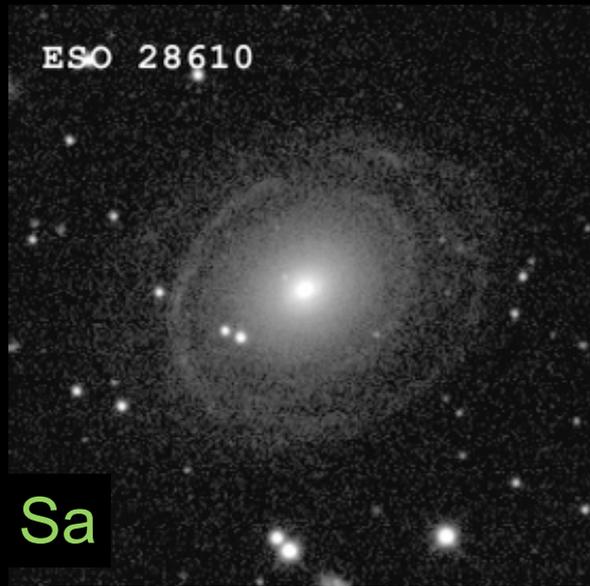
La clasificación de Hubble es útil porque varias propiedades de las galaxias correlacionan con el tipo de Hubble



CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE HUBBLE: ESPIRALES



CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE HUBBLE: ESPIRALES



como práctica, indicar el tipo de Hubble... (queda de "tarea")



Poblaciones Estelares de Galaxias

TIPOS DE GALAXIAS: CARACTERÍSTICAS Y POBLACIONES

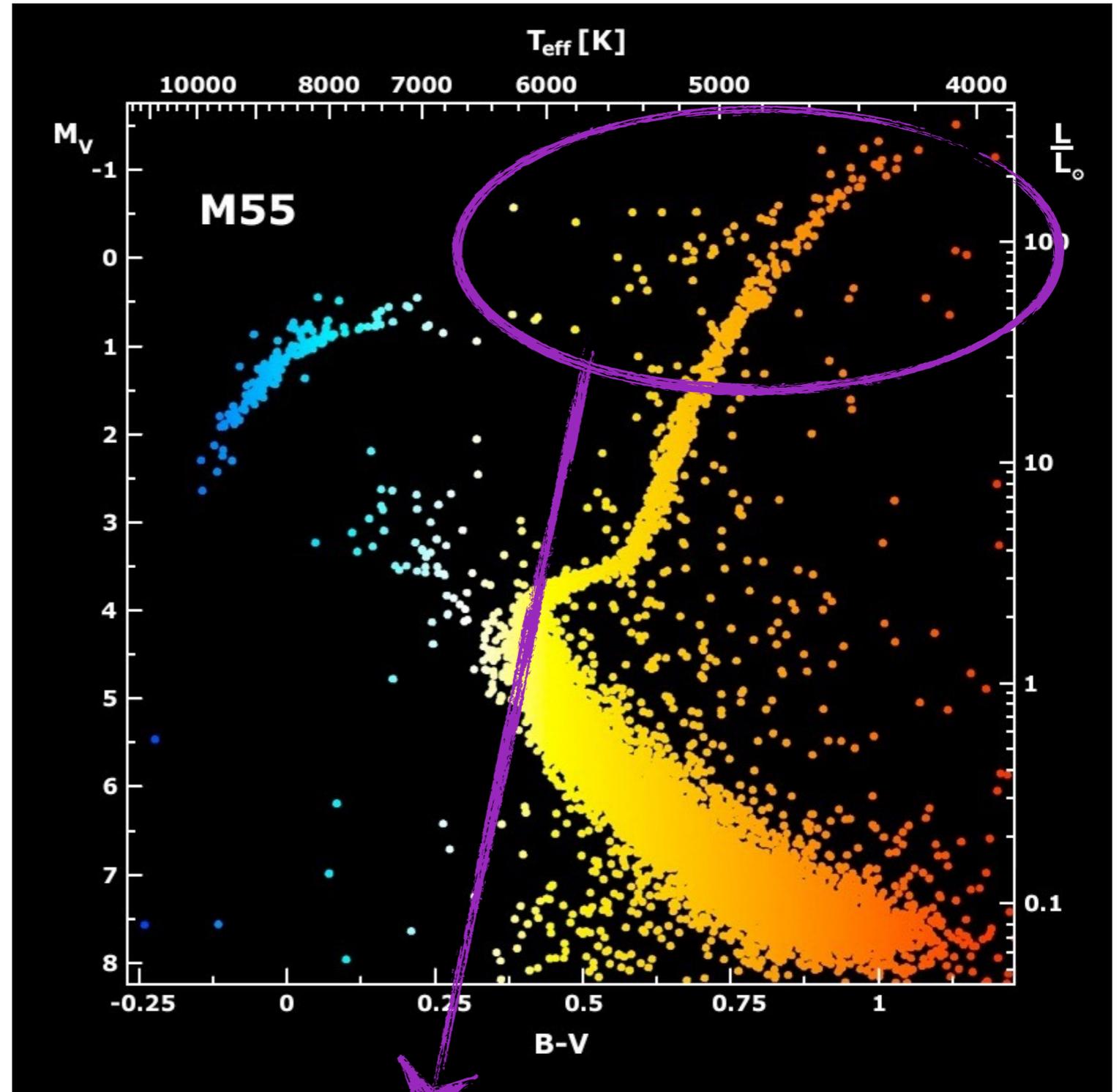
ELÍPTICAS (E0-E7 y S0)

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

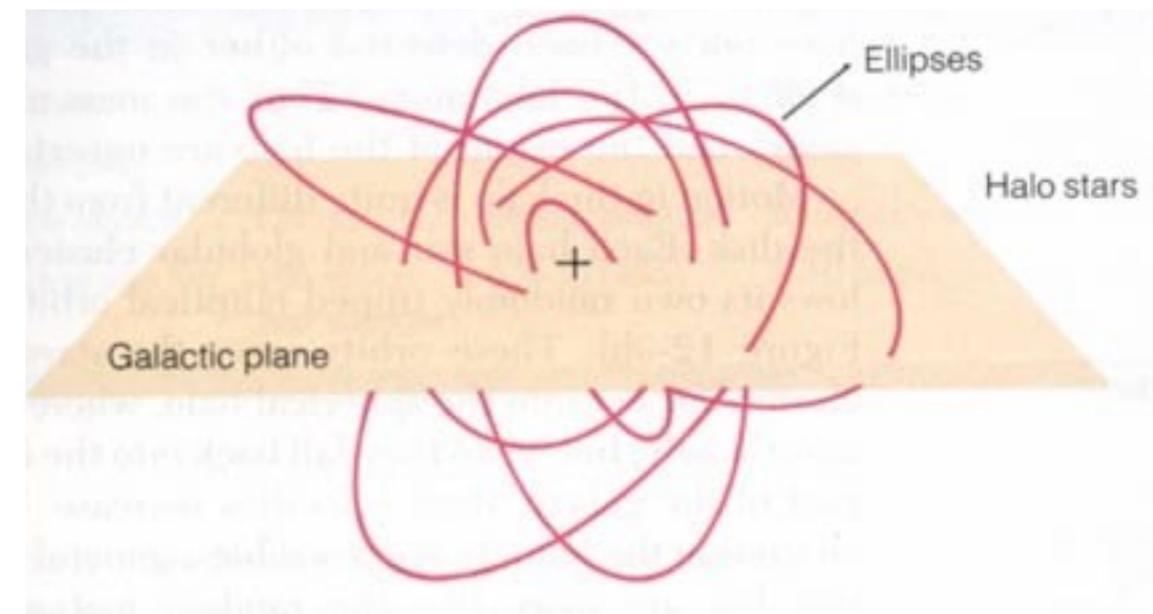
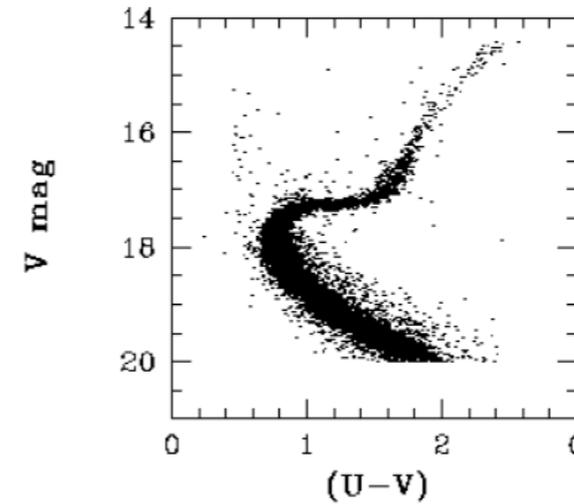


Color integrado de la galaxia es rojo

- 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

- 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)

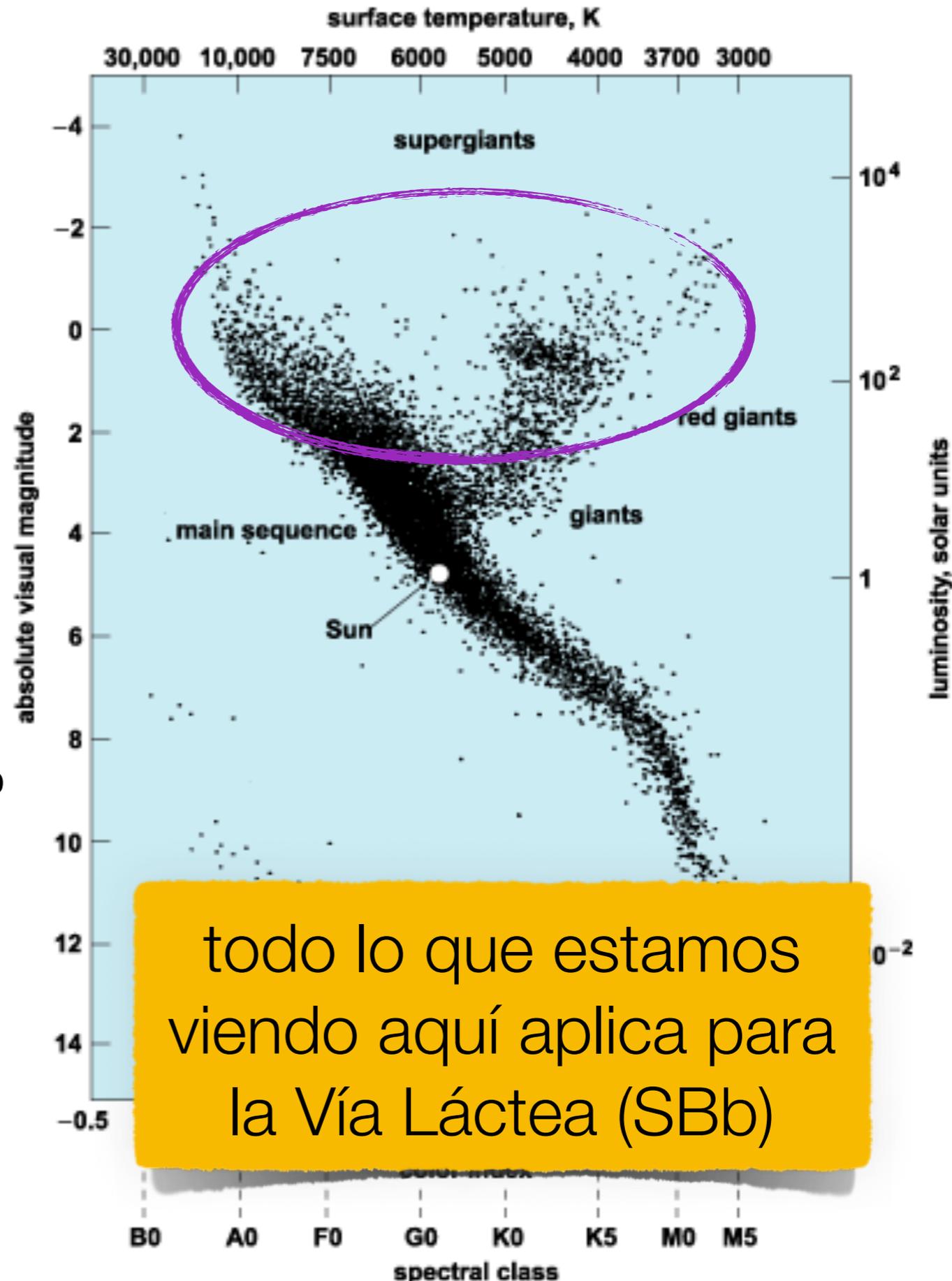
Características Físicas:

- 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



el disco es azul porque
tiene estrellas jóvenes

el bulbo es amarillo porque solo tiene estrellas viejas,
no hay formación estelar



regiones HII (formación
estelar) -> nebulosas de
emisión (rosa = línea
 $H\alpha = 6563\text{\AA}$ del
Hidrógeno)

franjas de polvo

La luz azul proviene de las
estrellas más jóvenes

La luz amarilla/rojiza proviene de las
estrellas más viejas (gigantes)

TIPOS DE GALAXIAS: CARACTERÍSTICAS Y POBLACIONES

ESPIRALES (Sa-c, SBa-c)

Características Físicas:

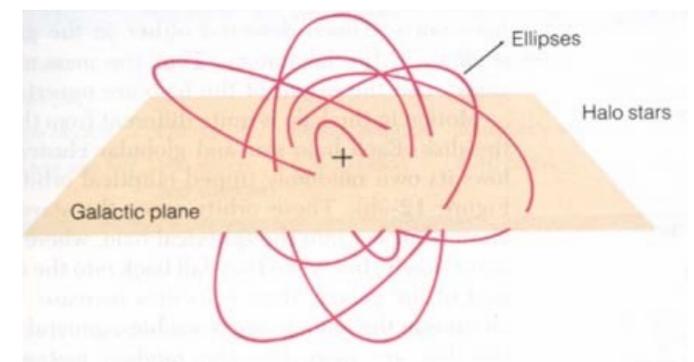
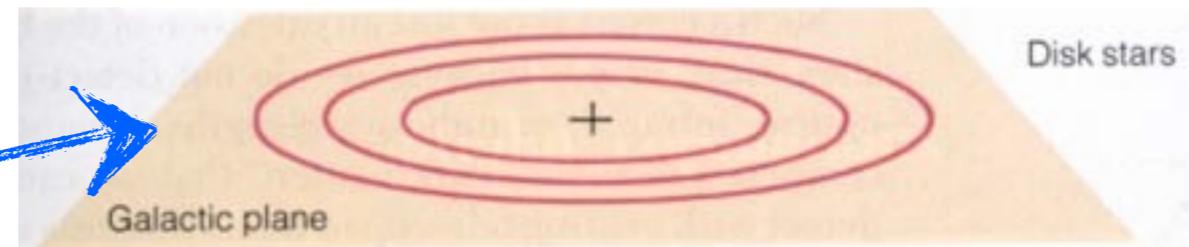
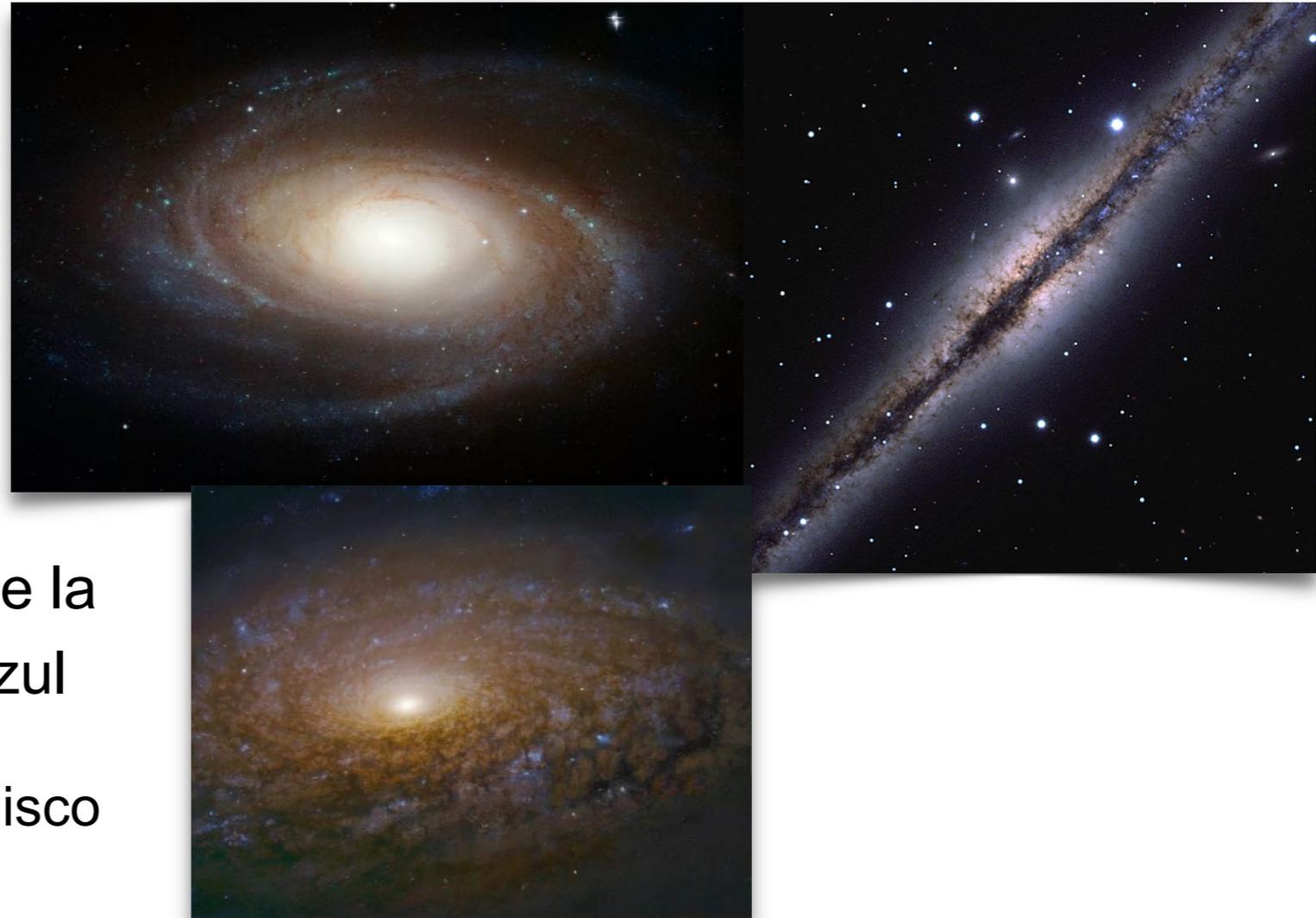
- Compuestas por población de todas las edades
- **Sí presentan** formación estelar reciente



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

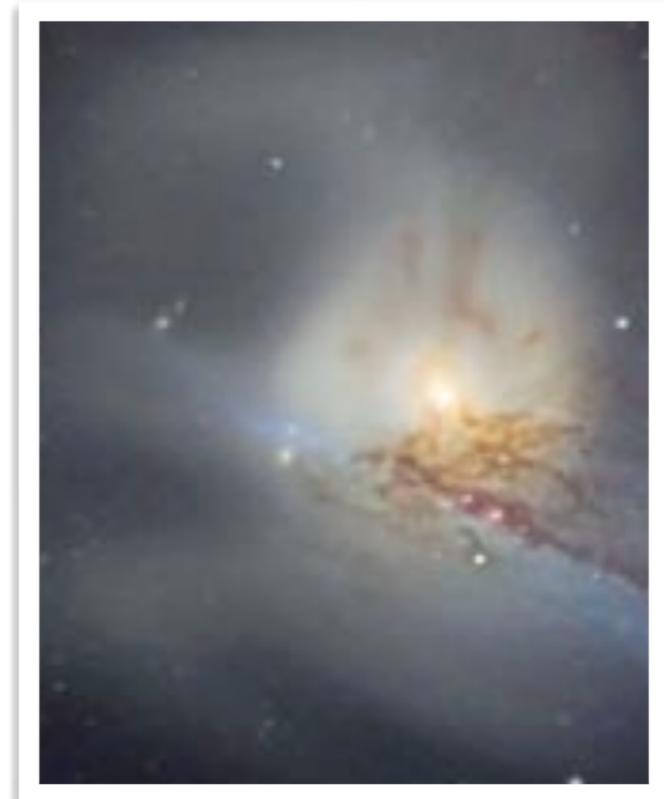
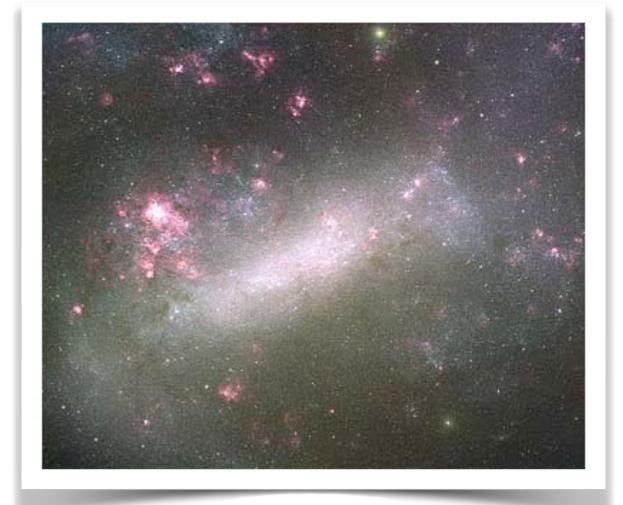
En general no tienen forma bien definida, su apariencia es caótica.

Irr I y II

- Presentan formación estelar actual o reciente
- Algunas muestran franjas de polvo
conspícuas



Irr I



Irr II

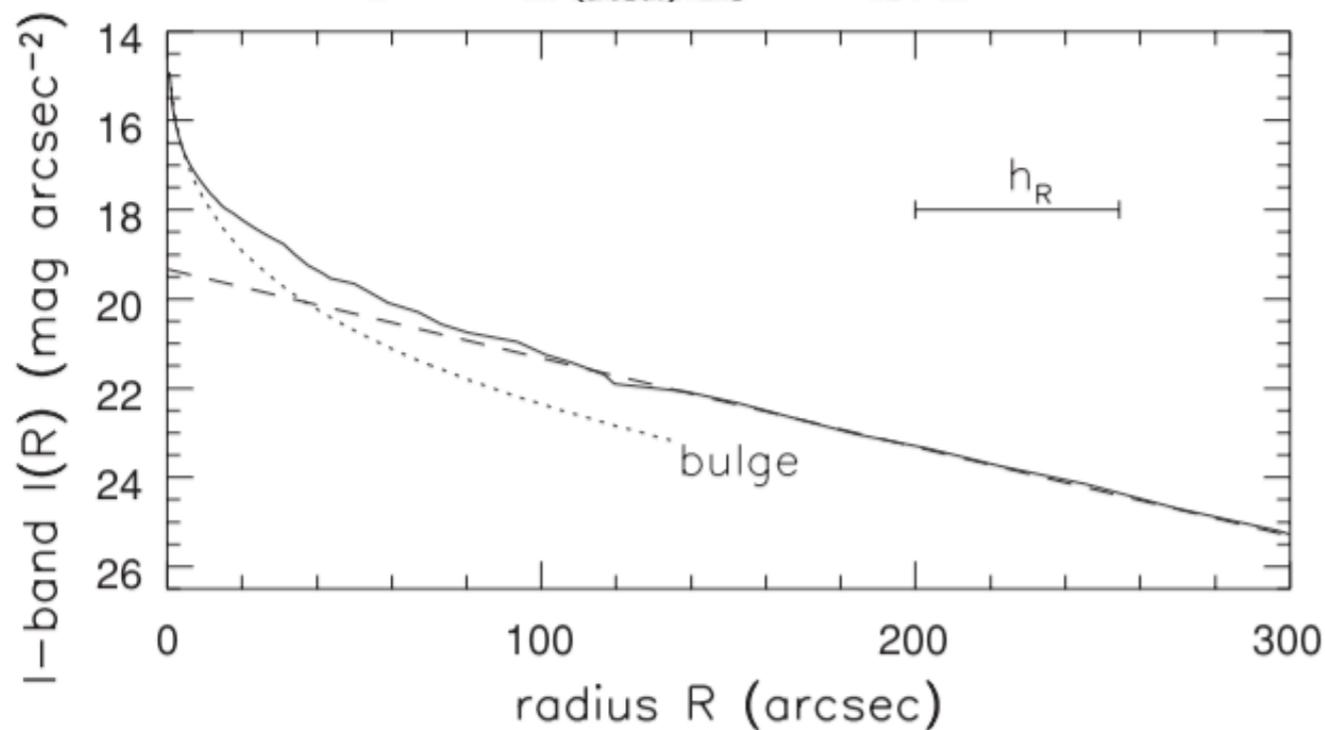
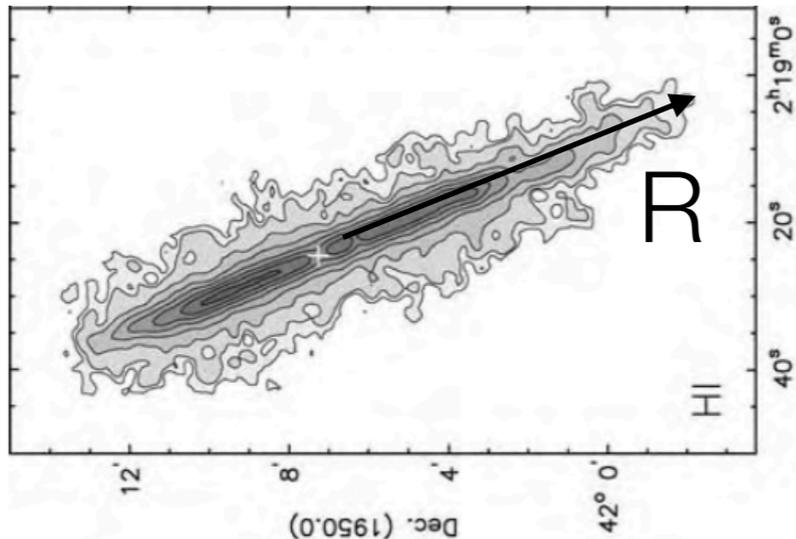
Distribución de Masa y Luz en Galaxias

¿Cómo se distribuye la luz?: Perfiles de brillo

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

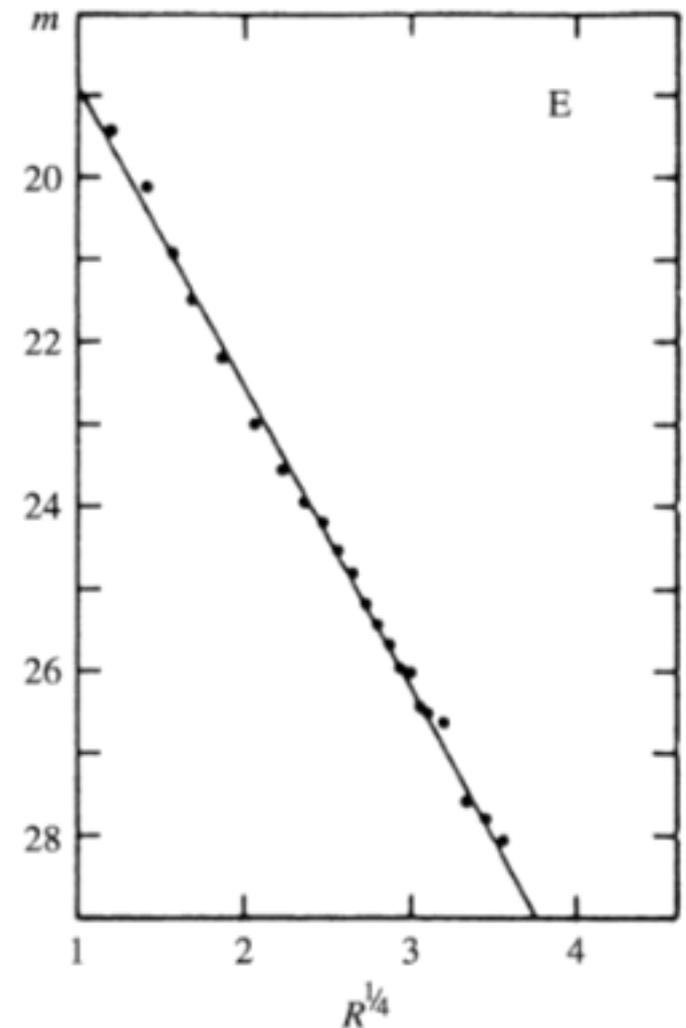
Disco

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



Elíptica

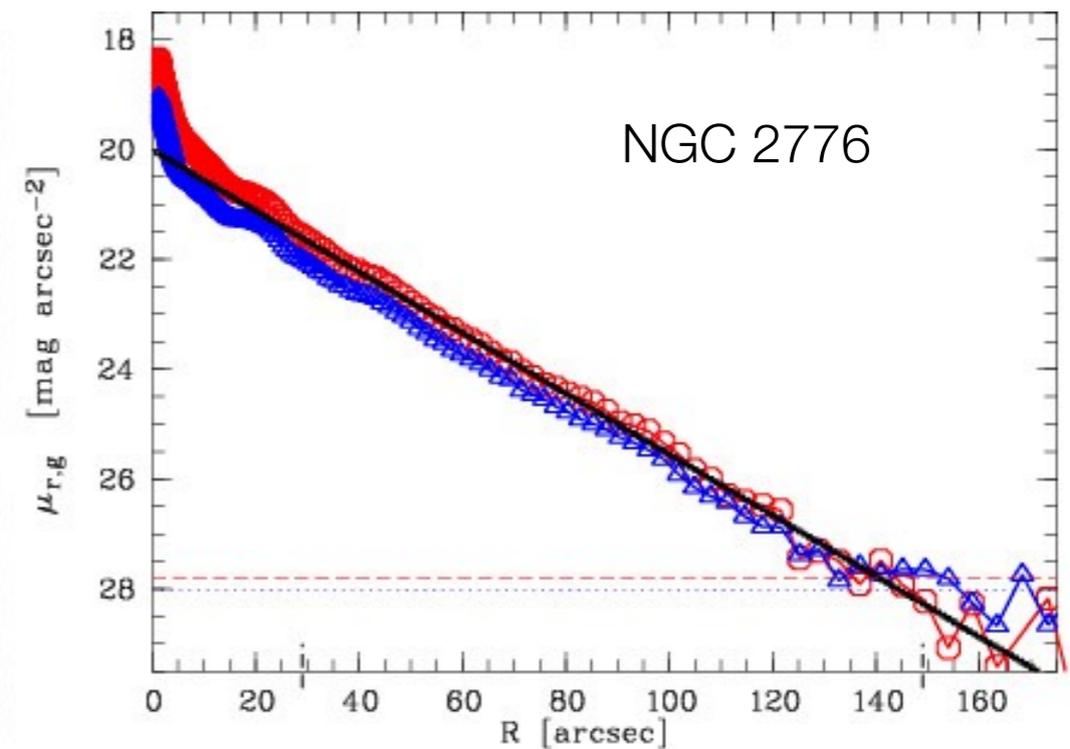
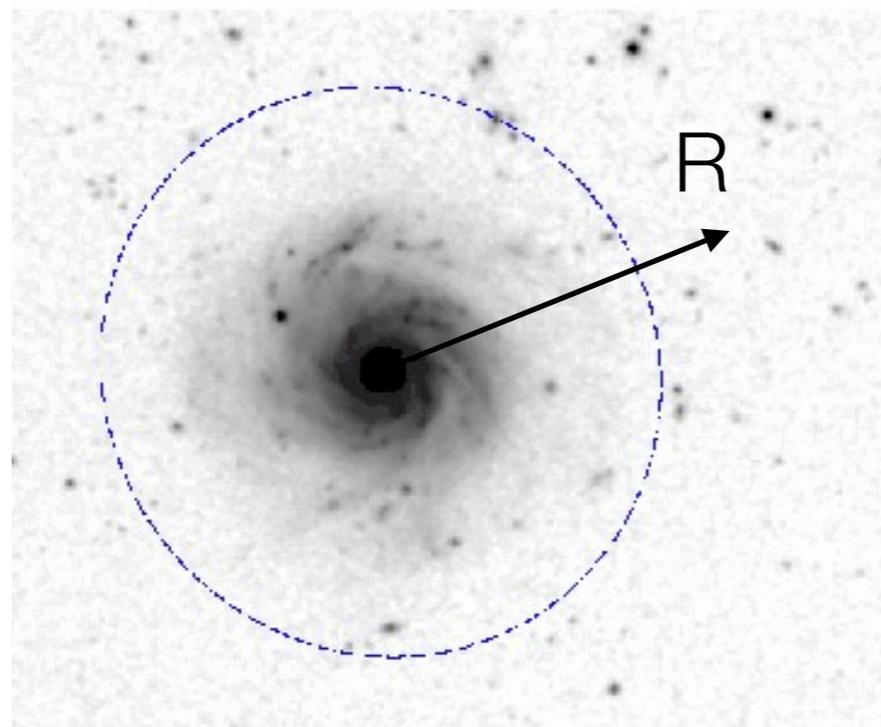
$$I(R) = I_e e^{\{-b_n[(R/R_e)^{1/n} - 1]\}}$$



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 5)

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

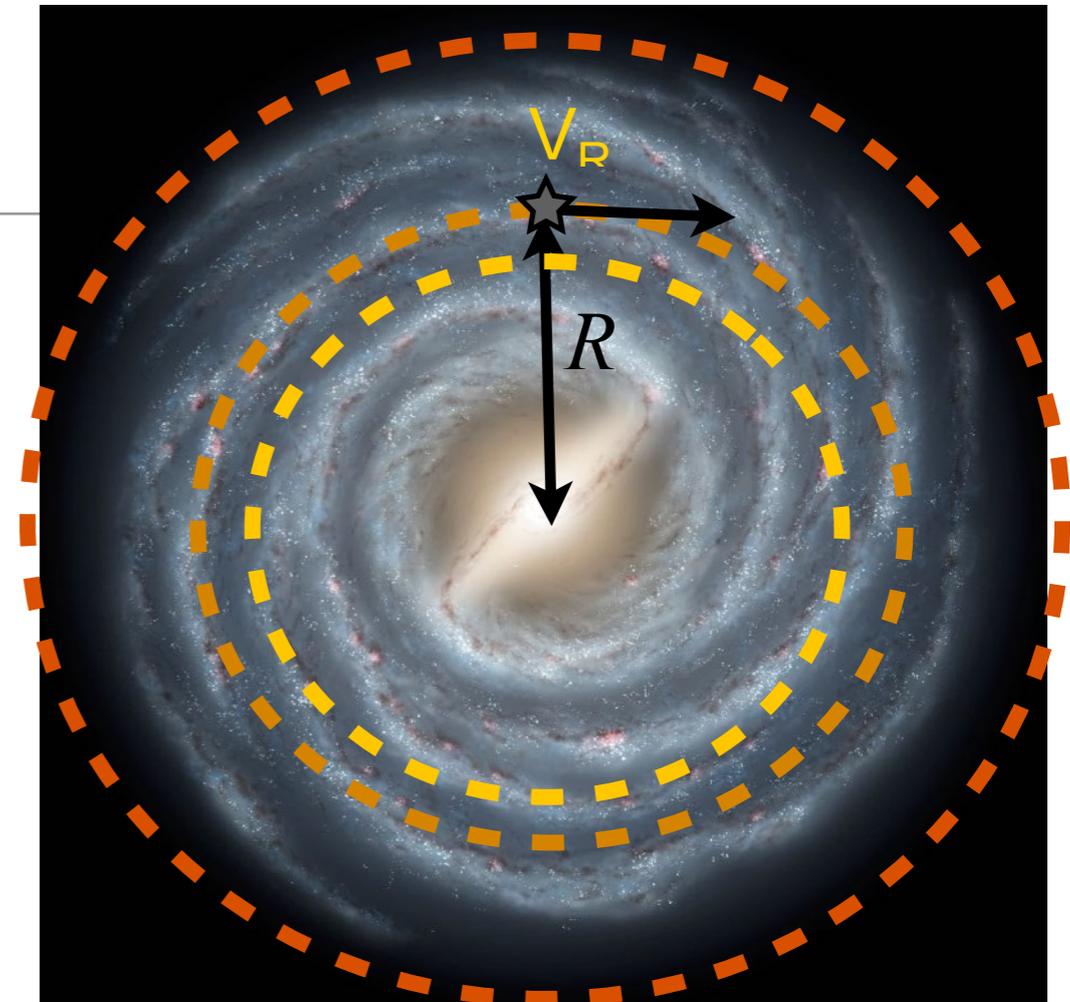


- Como el brillo cae exponencialmente, a partir de cierto radio (varias veces el valor de h) habremos encerrado casi el 100% de la luminosidad (y, por lo tanto, de la masa luminosa, i.e. la masa responsable por el brillo)

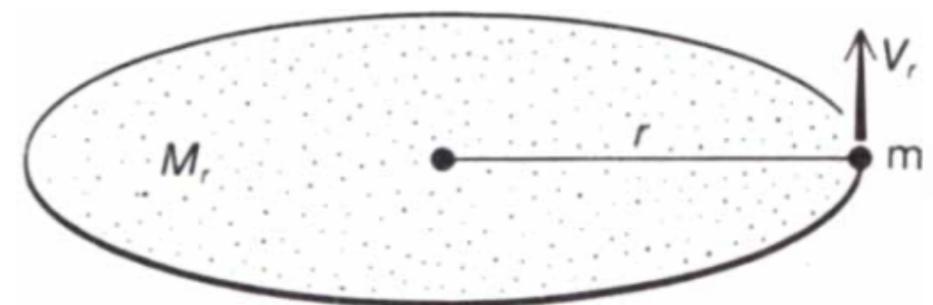
¿Cómo es la cinemática en diferentes partes de la galaxia? Galaxias Espirales: Curvas de Rotación

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

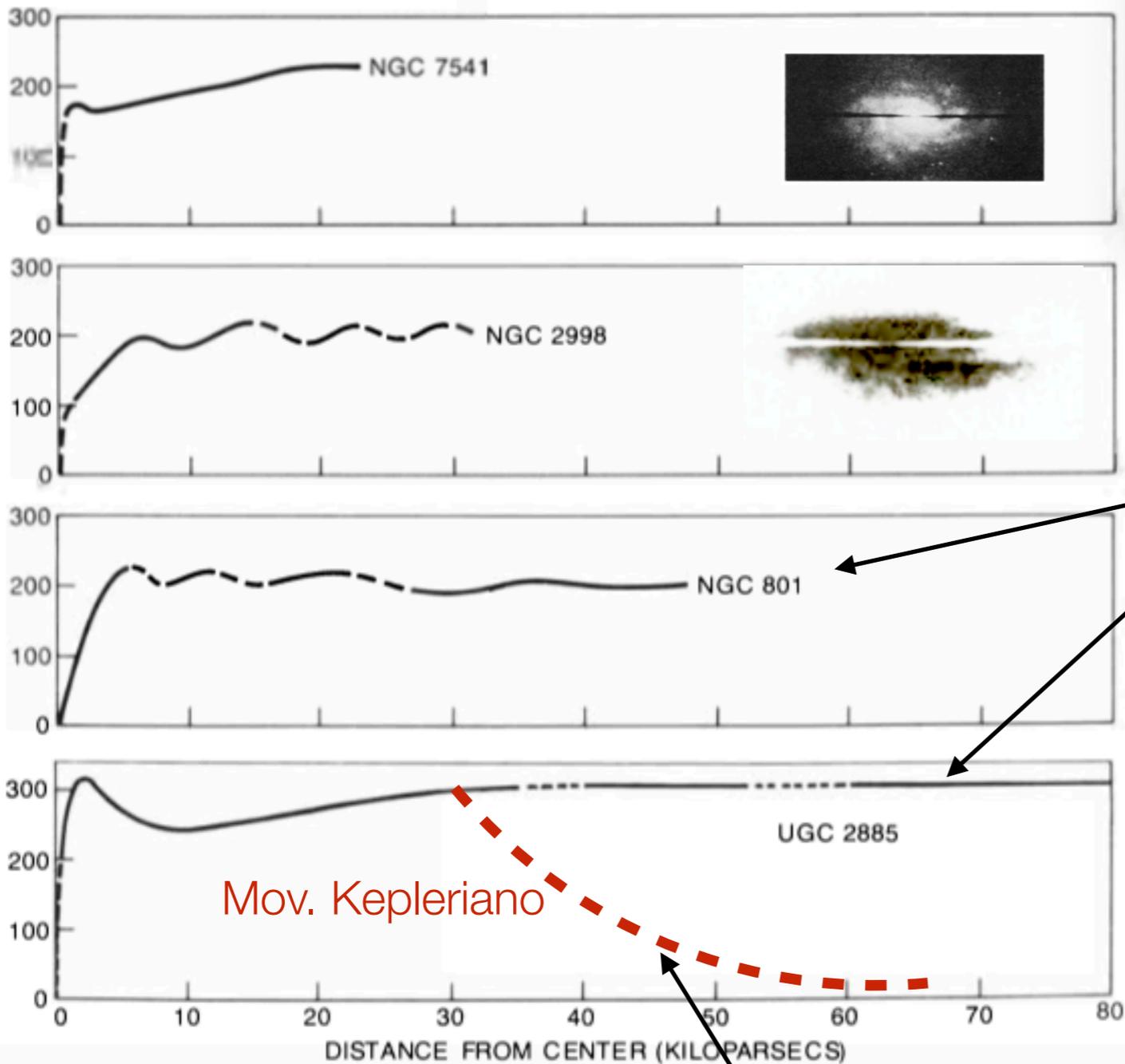
curva de rotación $V(R)$

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

a partir del radio tal que ya se encerró toda la masa, la velocidad debería disminuir con R

Curvas de rotación en galaxias externas

Lo que se observa:

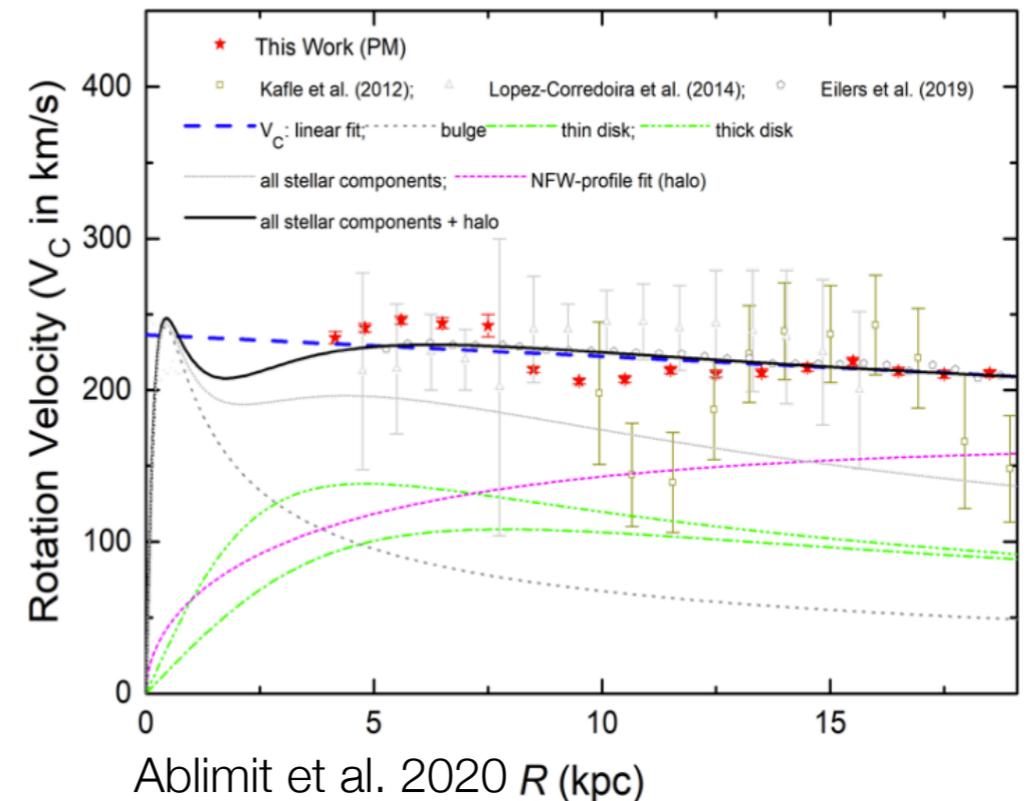


A partir del radio en cual ya está... la...
 esto fue descubierto por Vera Rubin (1982) la...
 relación $V(R)$

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

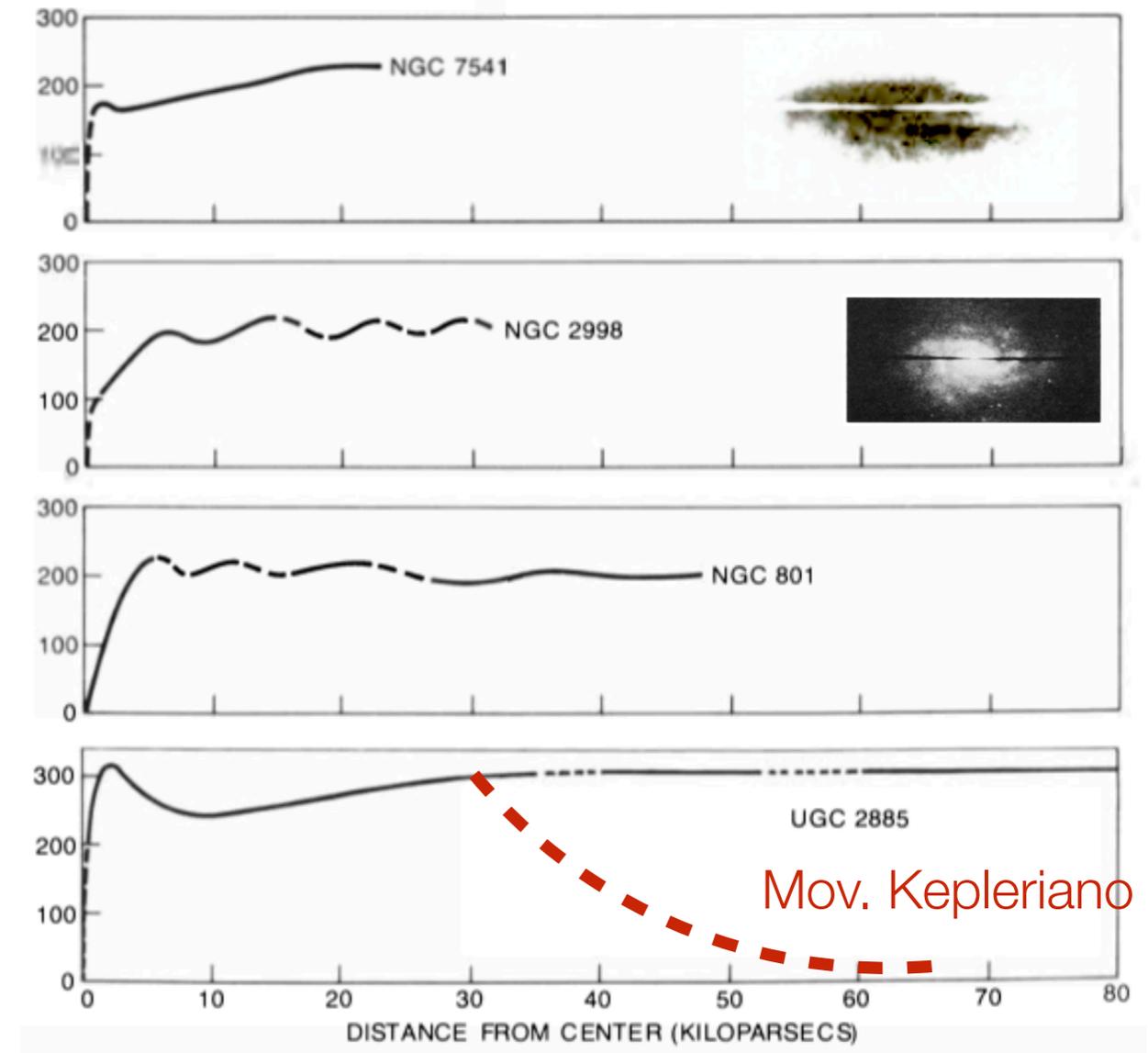


caída Kepleriana no se observa

Vera Rubin (1983, SciAm)

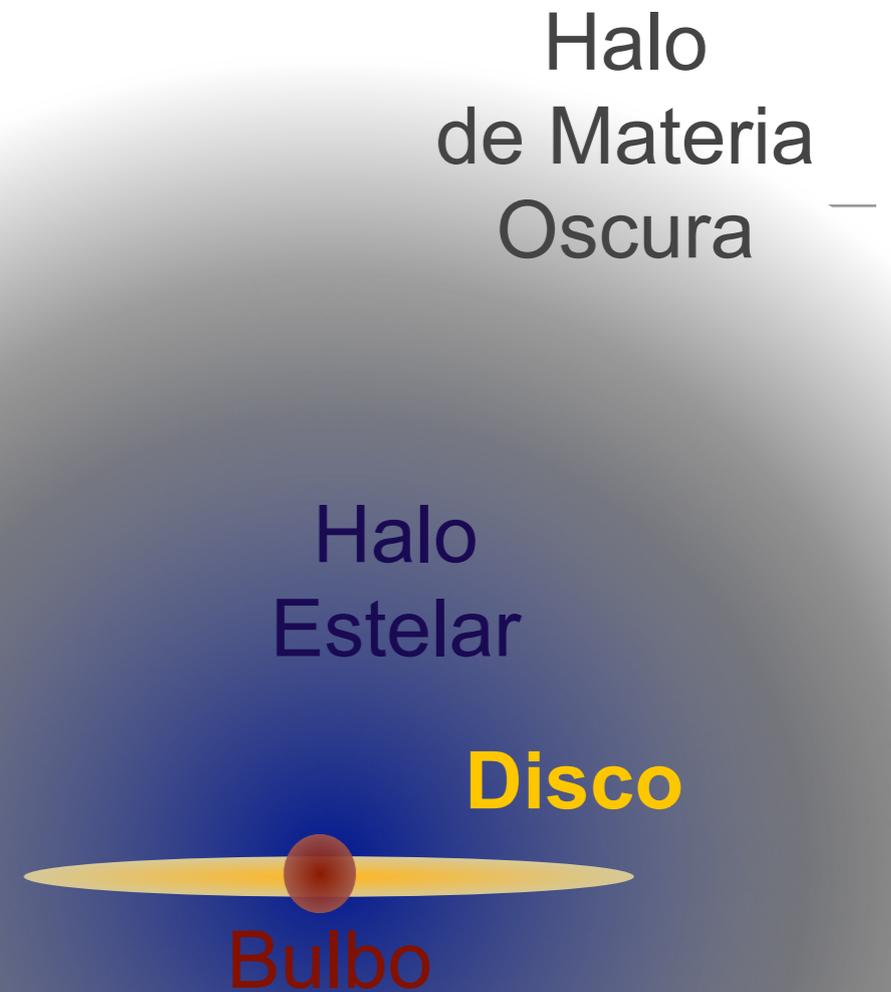
Medición de las curvas de rotación de galaxias

- 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**



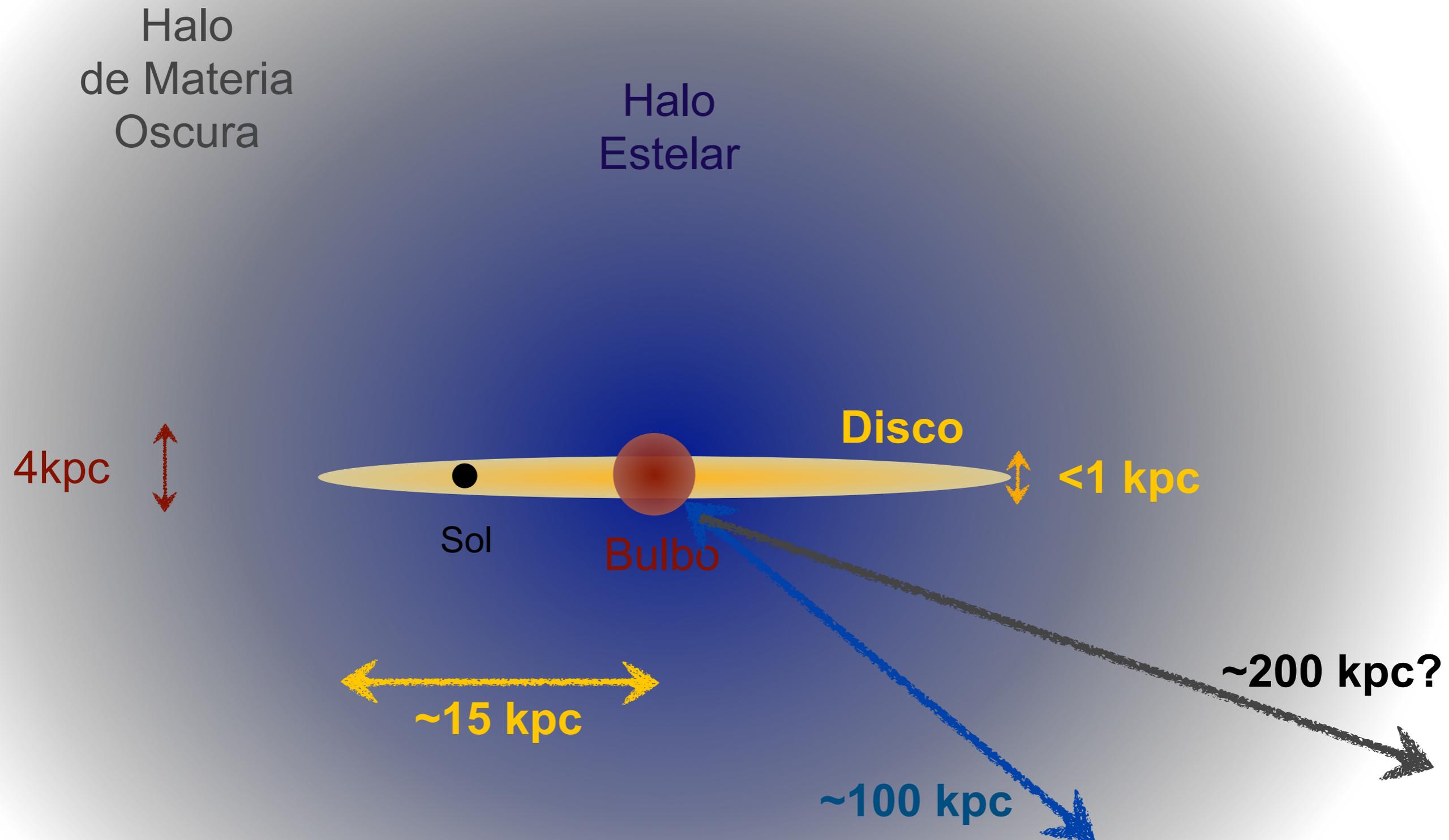
La Vía Láctea: Componentes

- **Disco:** Población desde joven, recién formada, hasta vieja, rica en metales [metalicidad ~solar] (Población I). Gas y polvo. Brazos espirales
- **Halo Estelar:** Población vieja y pobre en metales [metalicidad sub-solar] (Población II)
- **Bulbo:** Población vieja y rica en metales [metalicidad solar a super-solar]. Hay gas y polvo, pero confinado al plano del disco (no se considera que pertenece al Bulbo)
- **Halo de Materia Oscura:** engloba a todas las componentes y contiene la mayor parte de la masa



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

Esquema de la Estructura de la Vía Láctea



solución...

Sc

Sa

S0

SBb

Irr

Sc

Sa

S0

E0

