

CTE II - Galaxias II:

Medio interestelar. Galaxias en el Universo Local

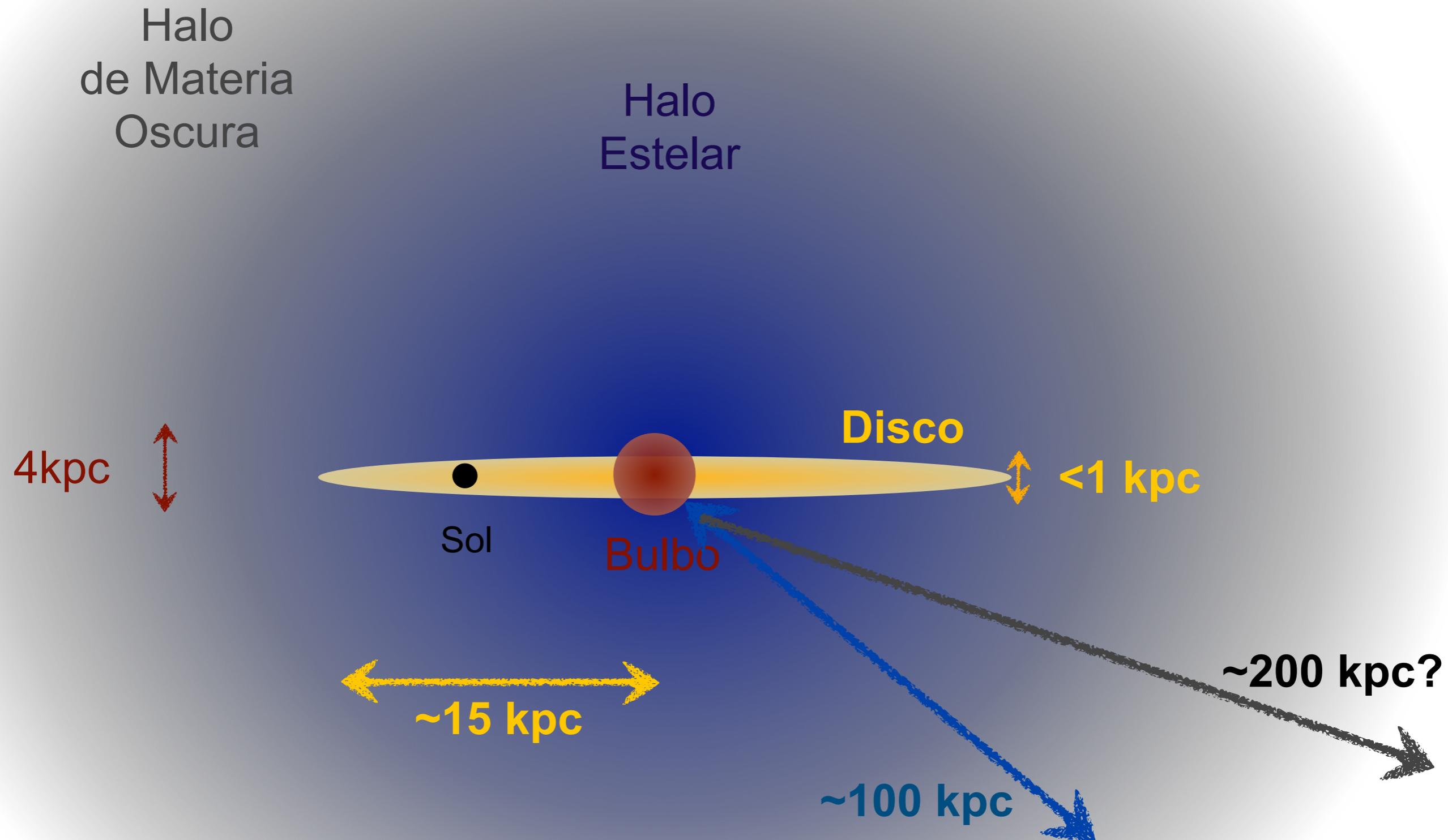
La Escala de Distancias

Cecilia Mateu

Instituto de Física, Facultad de Ciencias
Universidad de la República

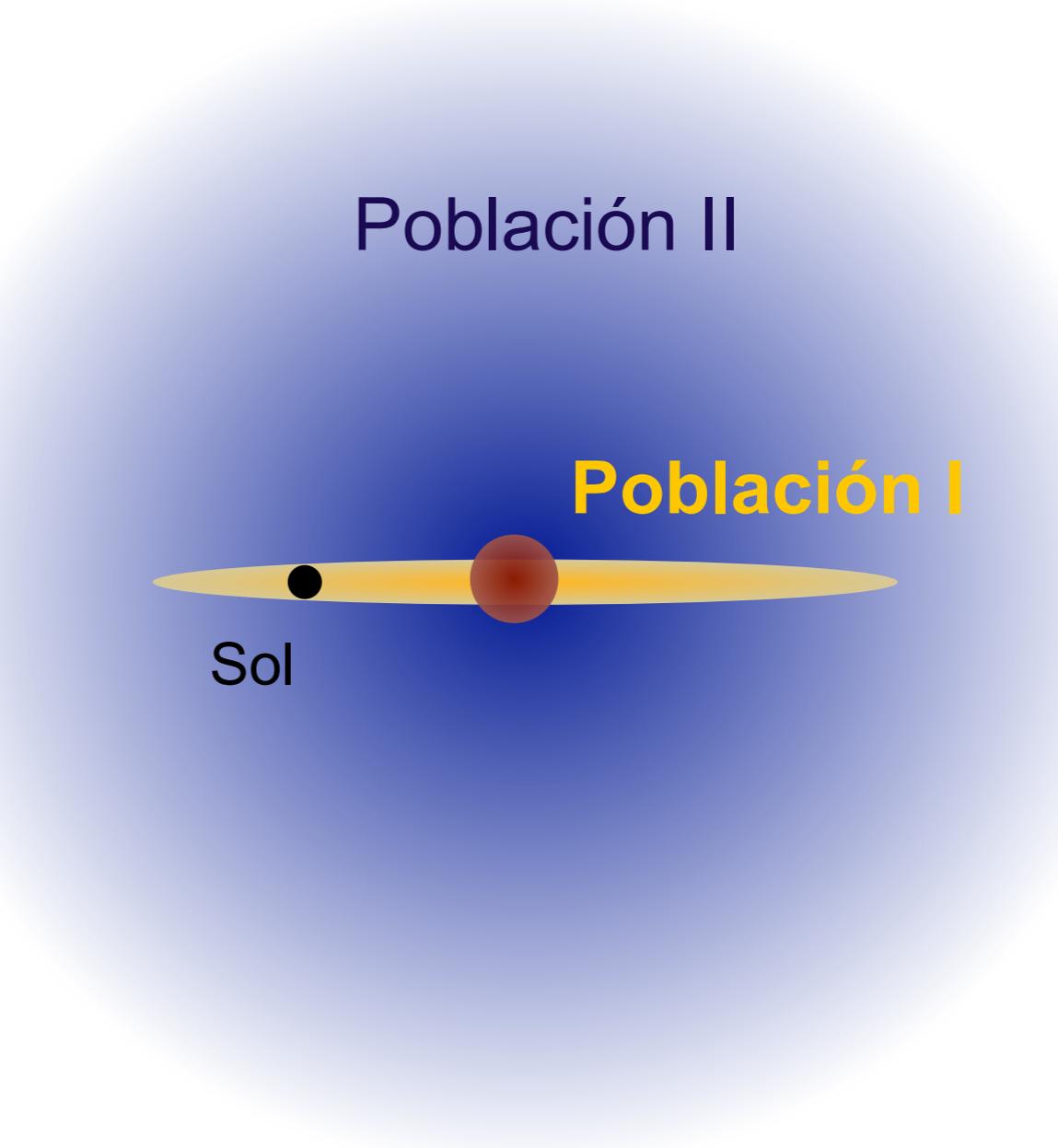
continuación de galaxias...

Esquema de la Estructura de la Vía Láctea



La Vía Láctea: Componentes

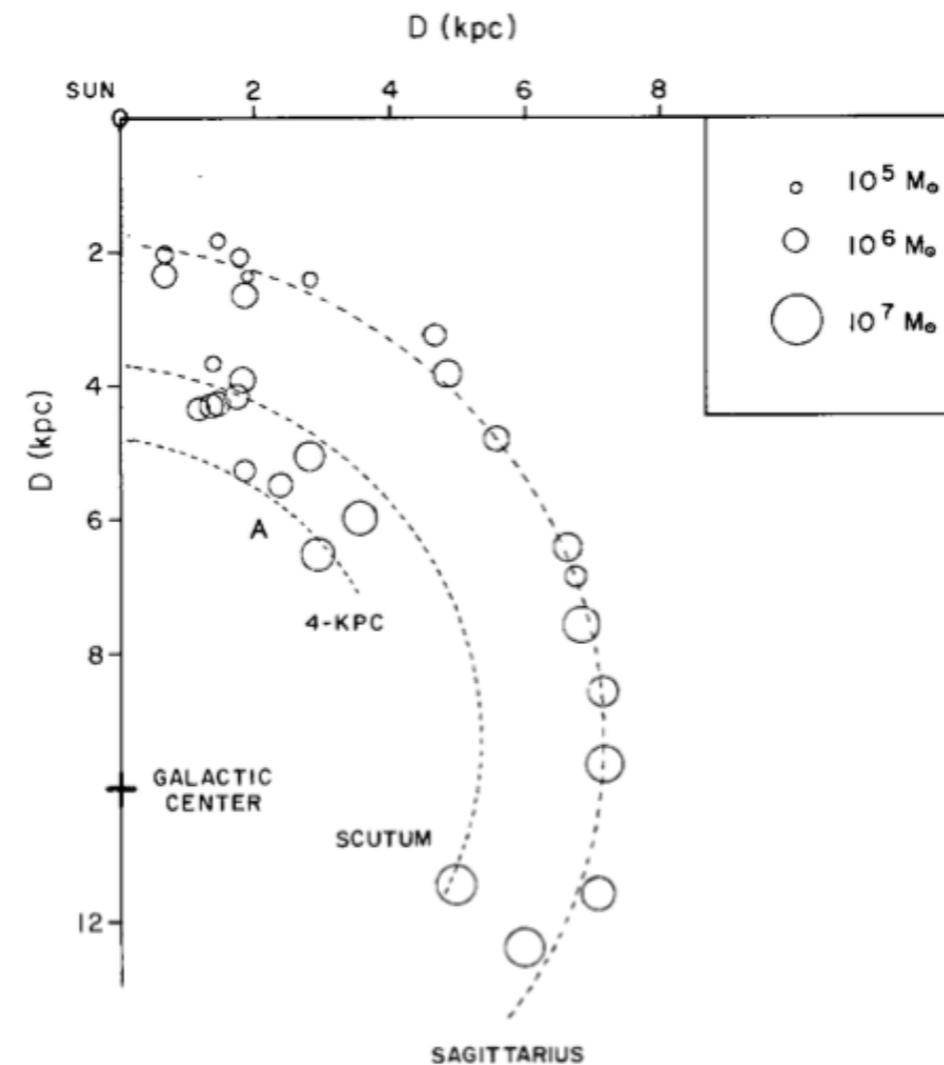
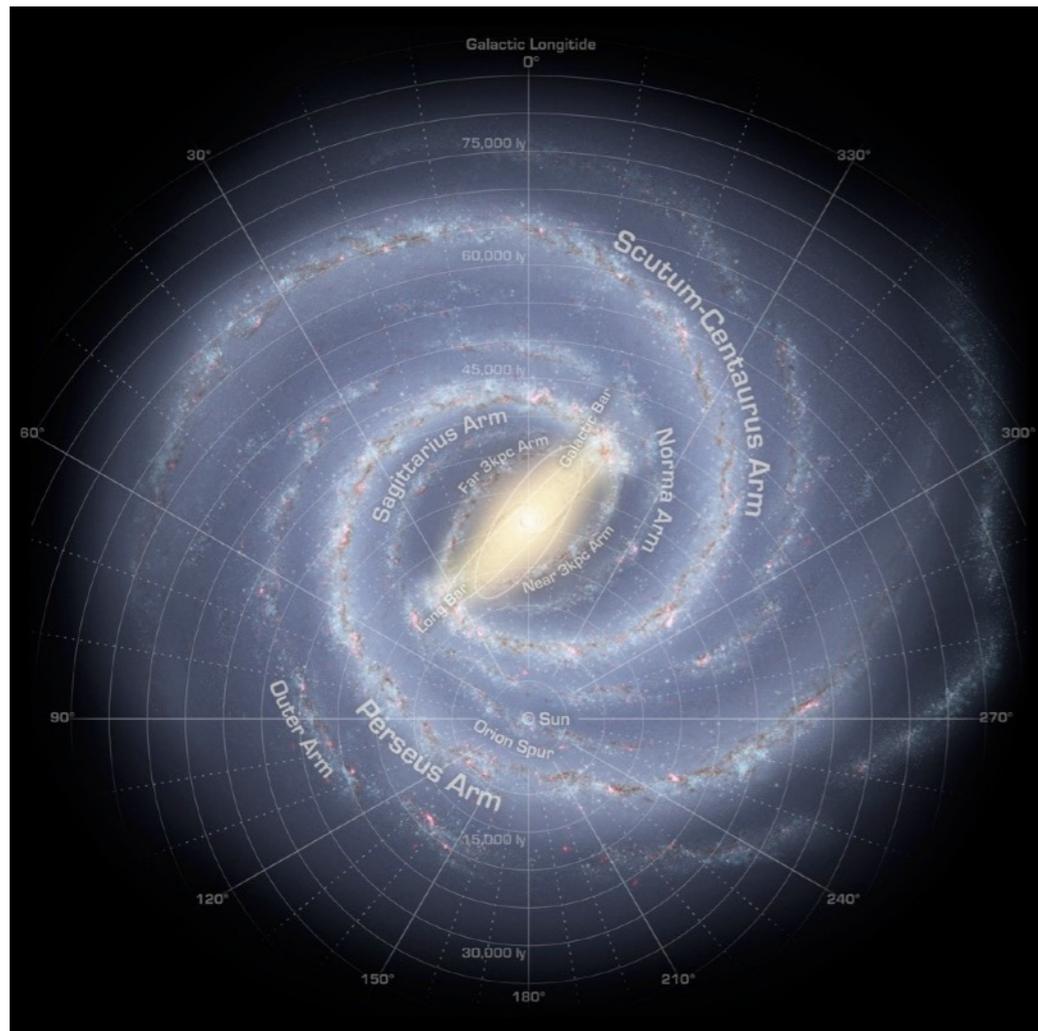
- **Disco:** Población desde joven, recién formada, hasta vieja, rica en metales [metalicidad ~solar] (Población I). Gas y polvo. Brazos espirales
- **Halo Estelar:** Población vieja y pobre en metales [metalicidad sub-solar] (Población II)
- **Bulbo:** Población vieja y rica en metales [metalicidad 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



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

La Vía Láctea: El Disco - Población Estelar

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

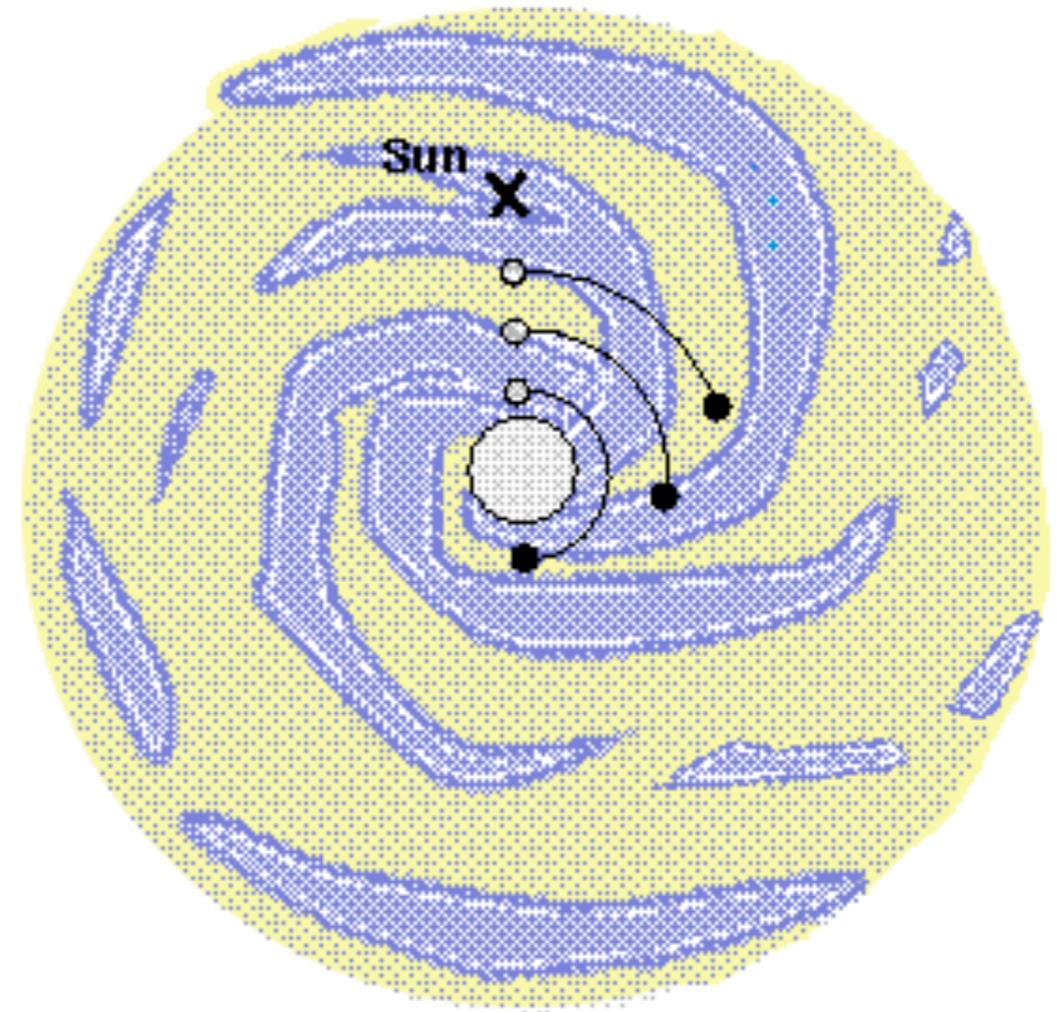


- Brazos espirales: nubes de polvo, de Hidrógeno molecular y regiones HII
- En los brazos espirales se encuentran las regiones de formación estelar y cúmulos abiertos

La Vía Láctea: Rotación Diferencial

Las estrellas en el Disco Galáctico tienen períodos orbitales que crecen conforme crece el radio galactocéntrico R

Por lo tanto el Disco Galáctico NO rota como un cuerpo rígido, sino que muestra lo que se conoce como **Rotación Diferencial**



Differential rotation: greater angular speeds closer to the galactic center.

La Vía Láctea: Brazos Espirales

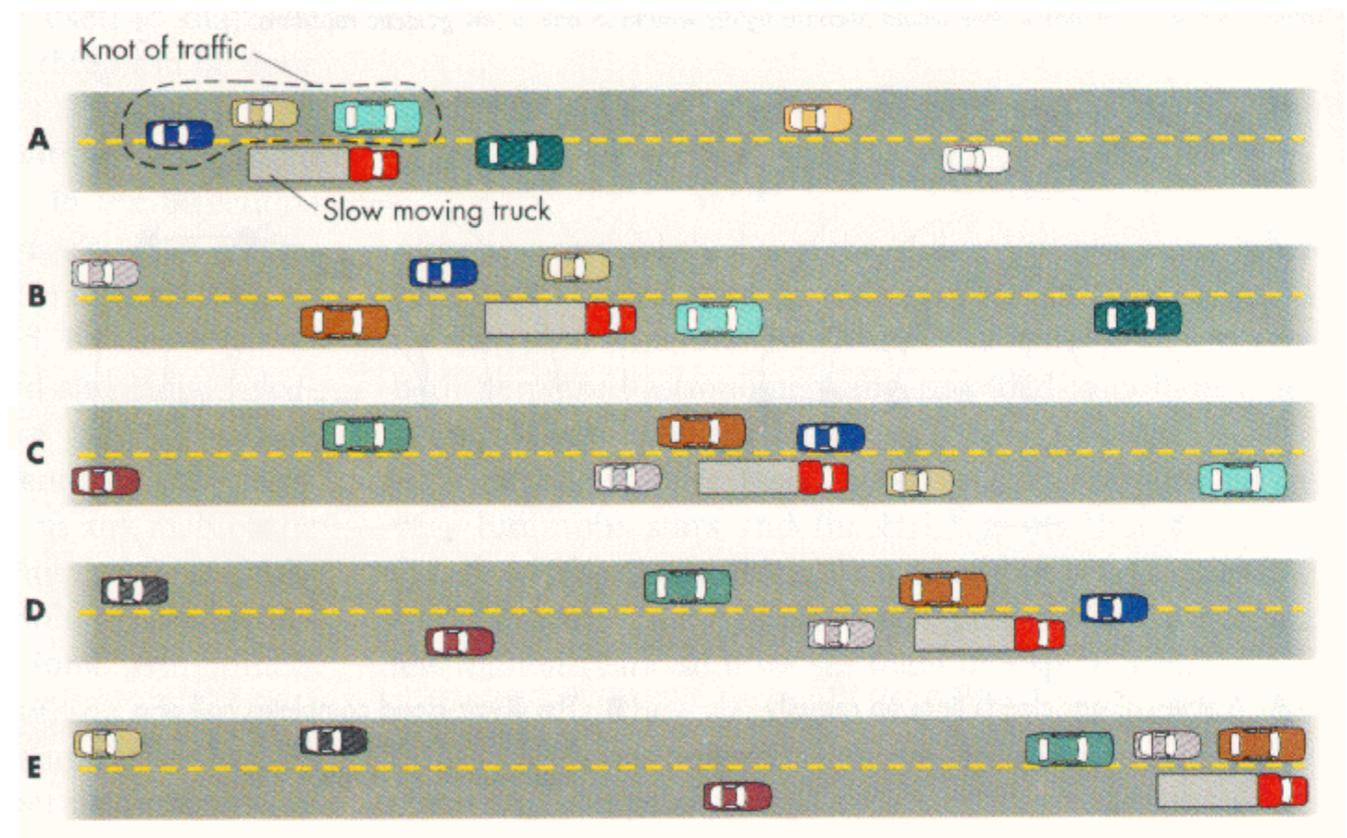
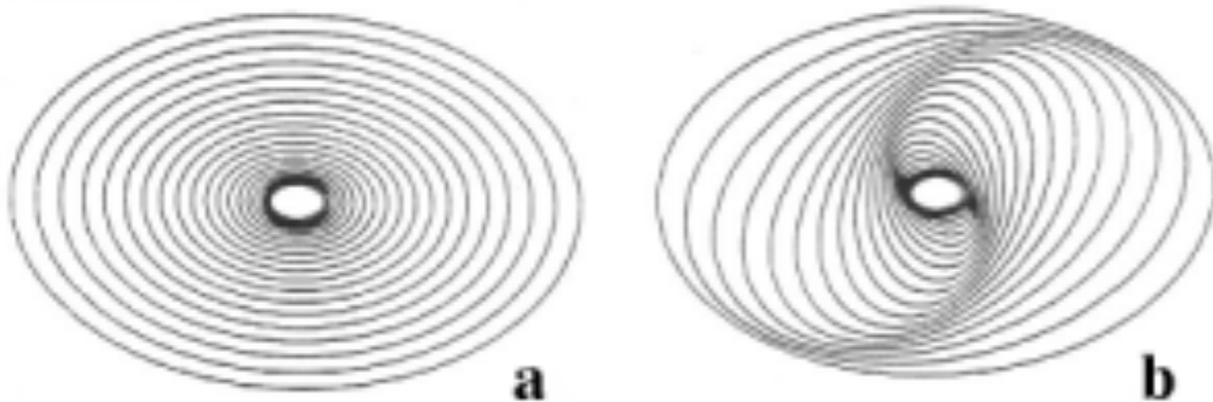
Lo que ocurre es que los Brazos Espirales son en realidad, ondas de densidad:

Las zonas brillantes de los brazos son zonas de mayor densidad, en ellas las estrellas se mueven ligeramente más lento que afuera, como 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

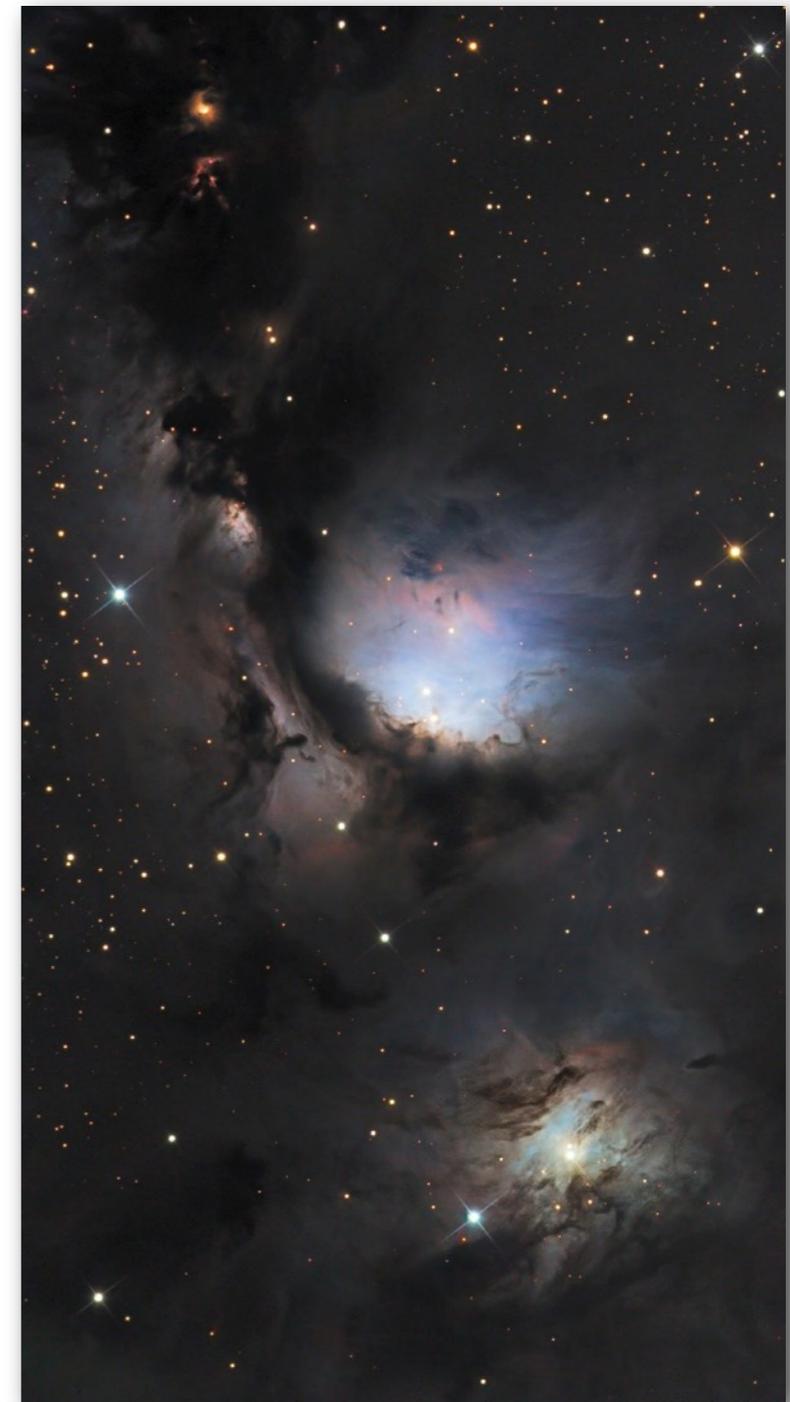
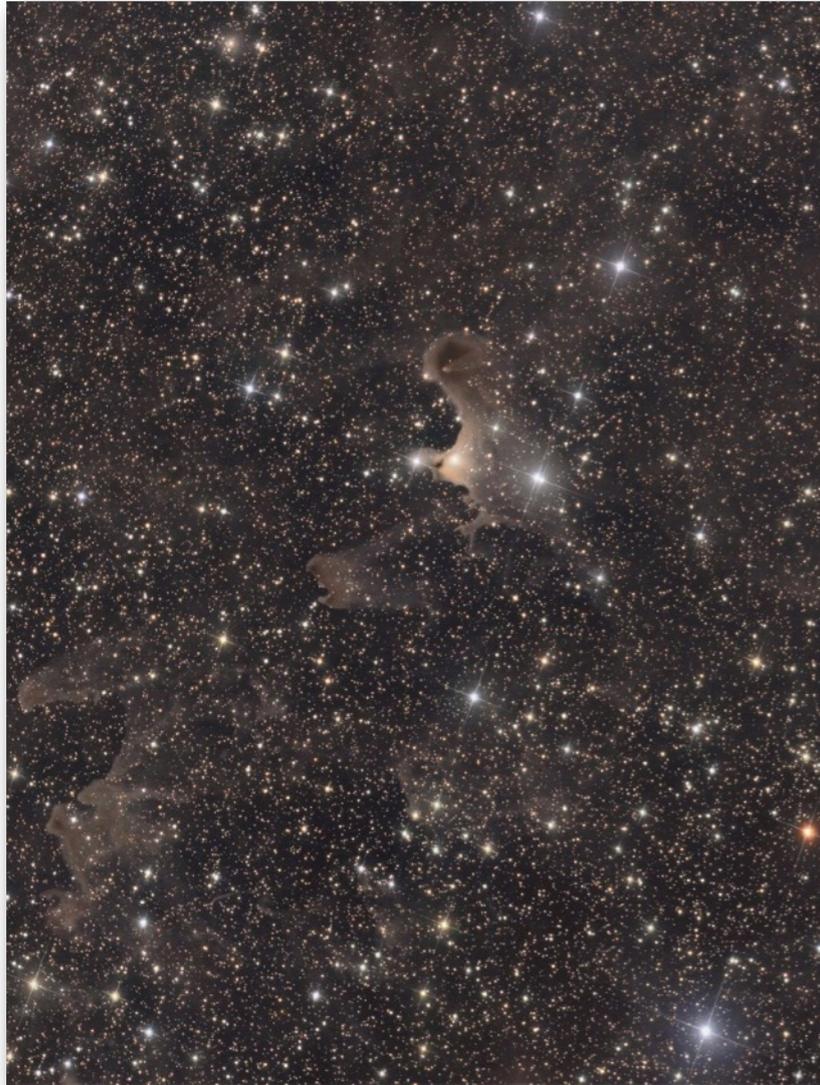
A slow moving truck causes a knot of traffic that moves along the highway at the speed of the truck. Individual cars approach the traffic knot, slow down as they move carefully through the knot, and then resume speed as they leave the knot. As a result, the traffic knot consists of different cars at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





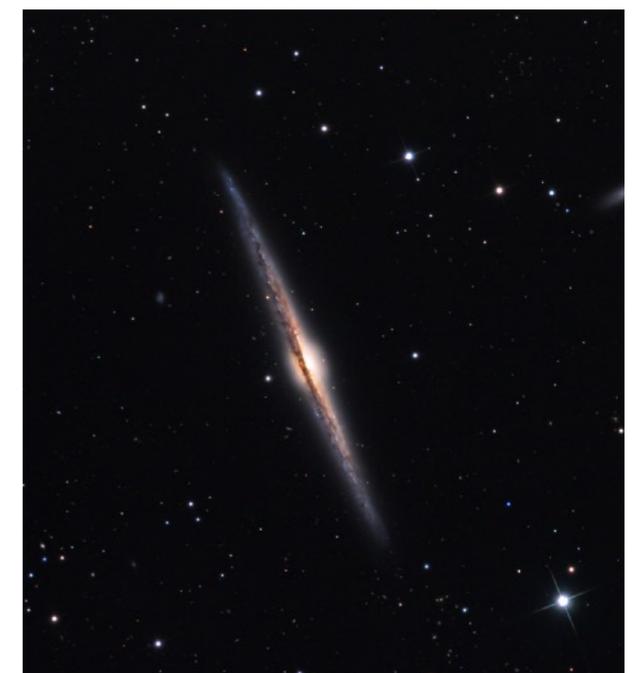
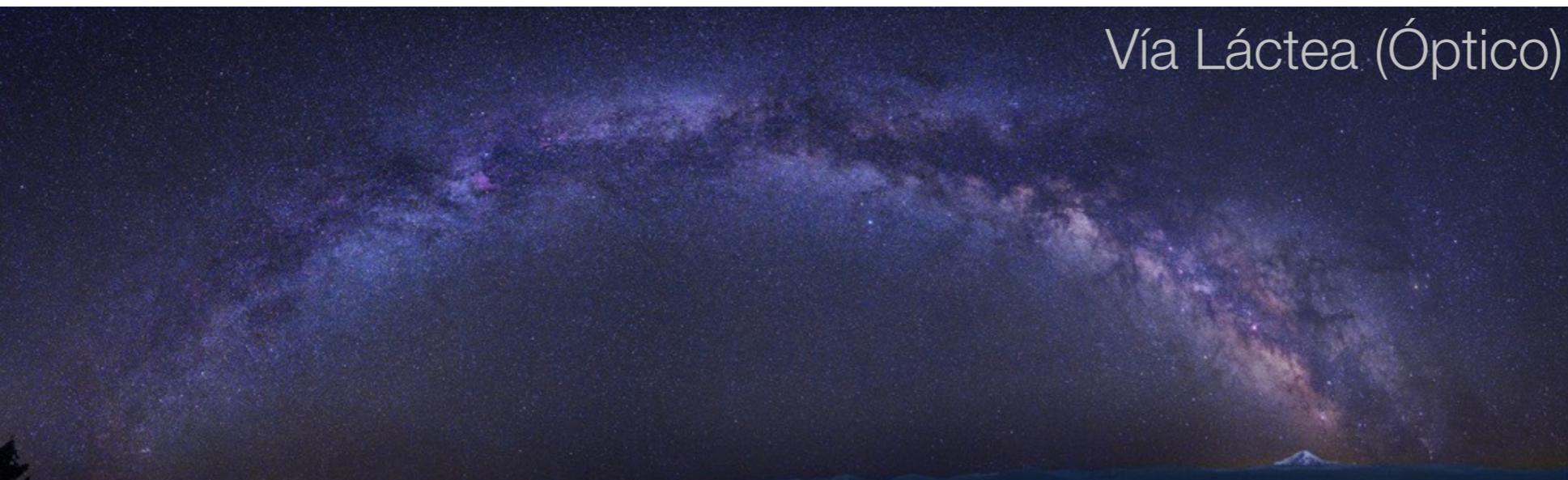
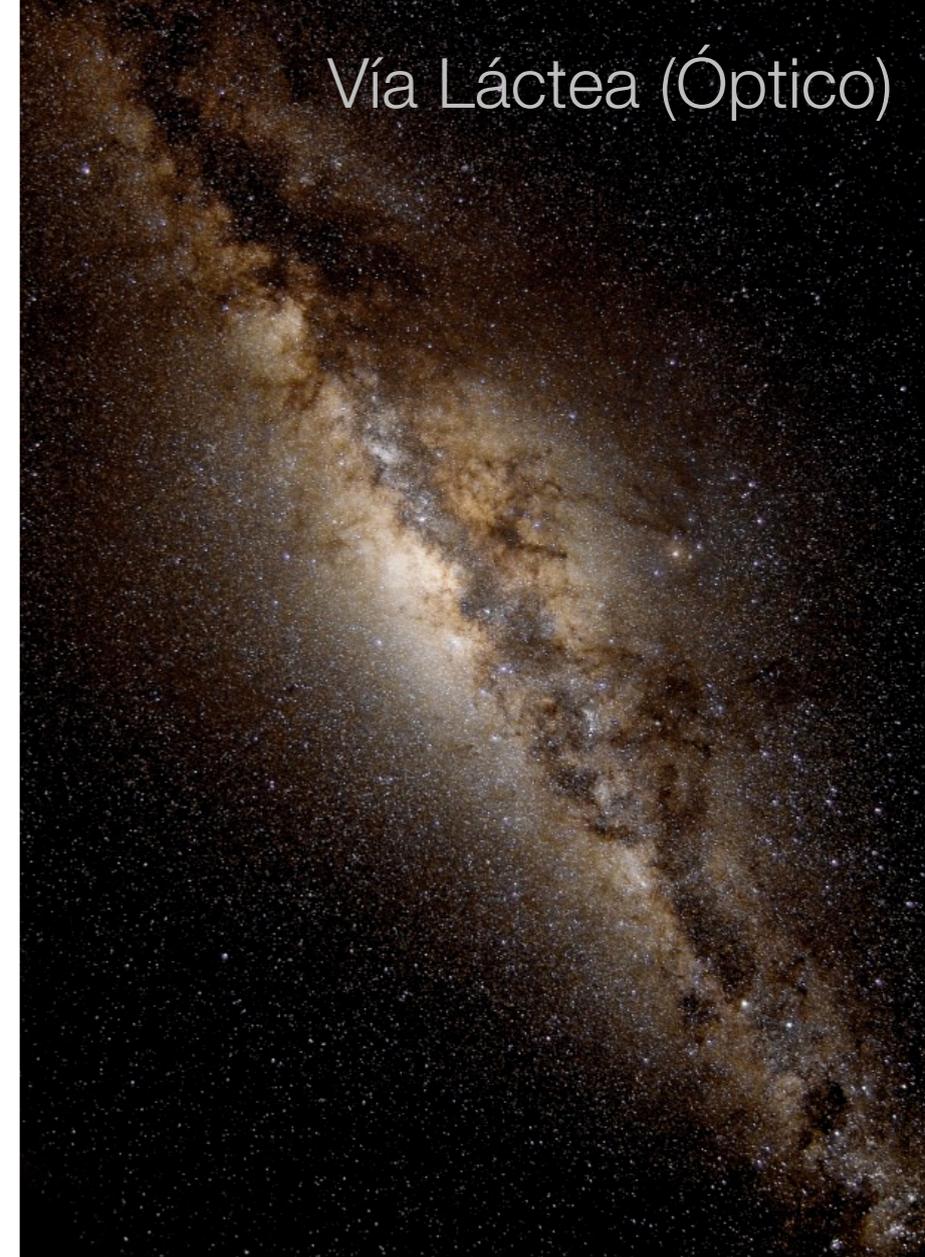
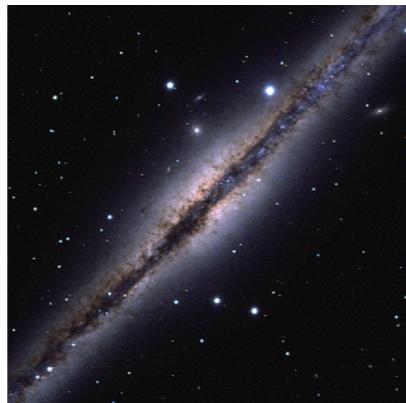
Medio Interestelar

Medio Interestelar



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



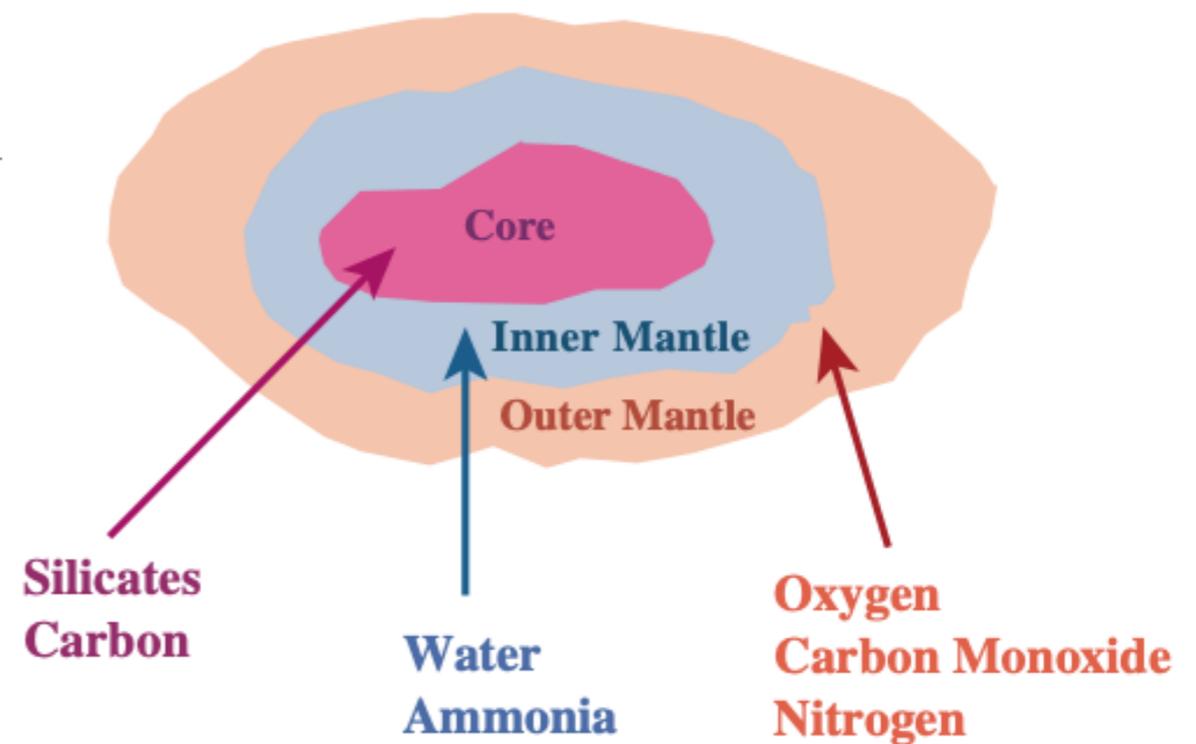
¿Qué es el Medio Interestelar?

- Gas en diferentes estados físicos: Fases del Medio Interestelar
- Polvo
 - El gas y polvo coexisten entre sí (su presencia está correlacionada) y con las estrellas en cada galaxia
- Rayos Cósmicos

Polvo

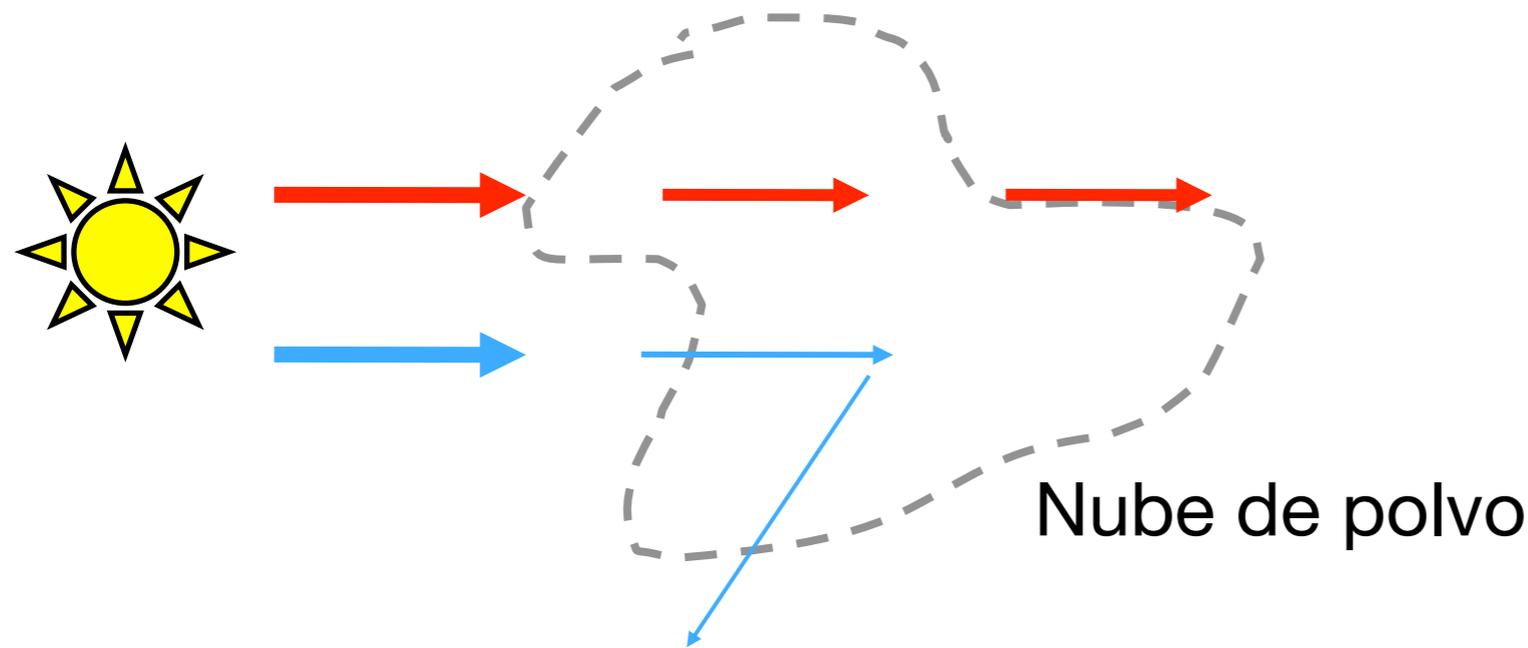
Polvo Interestelar

- Agregados de silicatos SiO y SiO₂ y H₂O hielo (se le dice coloquialmente “hielo sucio”) + grafitos y PAHs=Hidrocarburos policíclicos aromáticos (ej. fulereno C₆₀)
- Cubiertos de mantos de agua y amoníaco y O, N y CO
- Tamaño típico de los granos es de ~0.5nm a 500nm
- Polarización \Leftrightarrow granos elongados



- Para longitudes de onda λ comparables con el tamaño de los granos (UV-óptico) los efectos de dispersión se vuelven importantes produciendo extinción y enrojecimiento
- Para λ más grandes (de IR en adelante) estos efectos se vuelven despreciables, la luz no “ve” el polvo

La Vía Láctea: Medio Interestelar



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

Absorción:

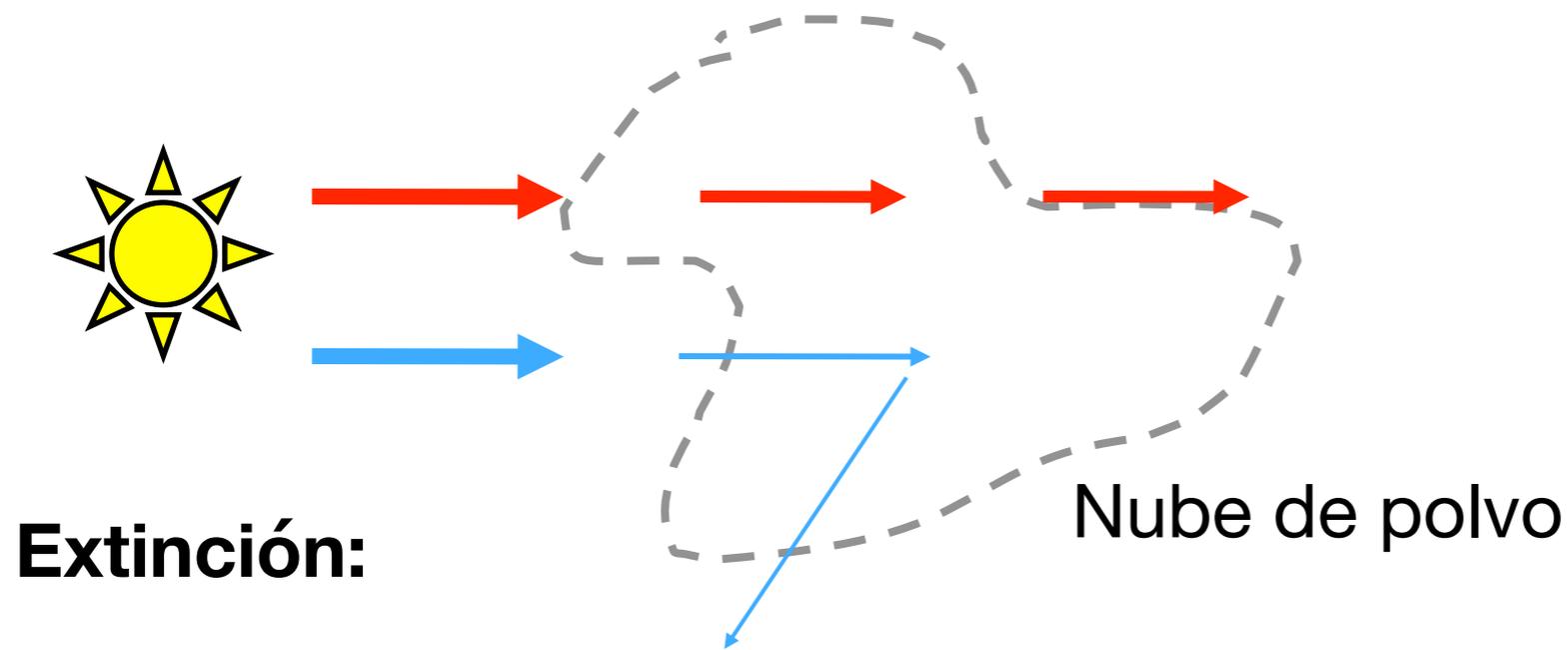
Disminución de la intensidad de la luz que atraviesa la nube

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

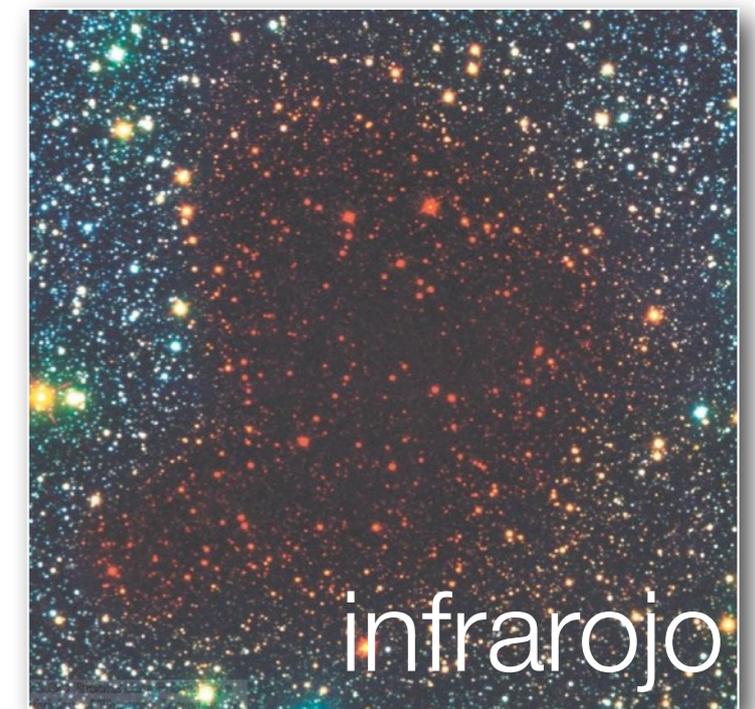


Extinción:

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

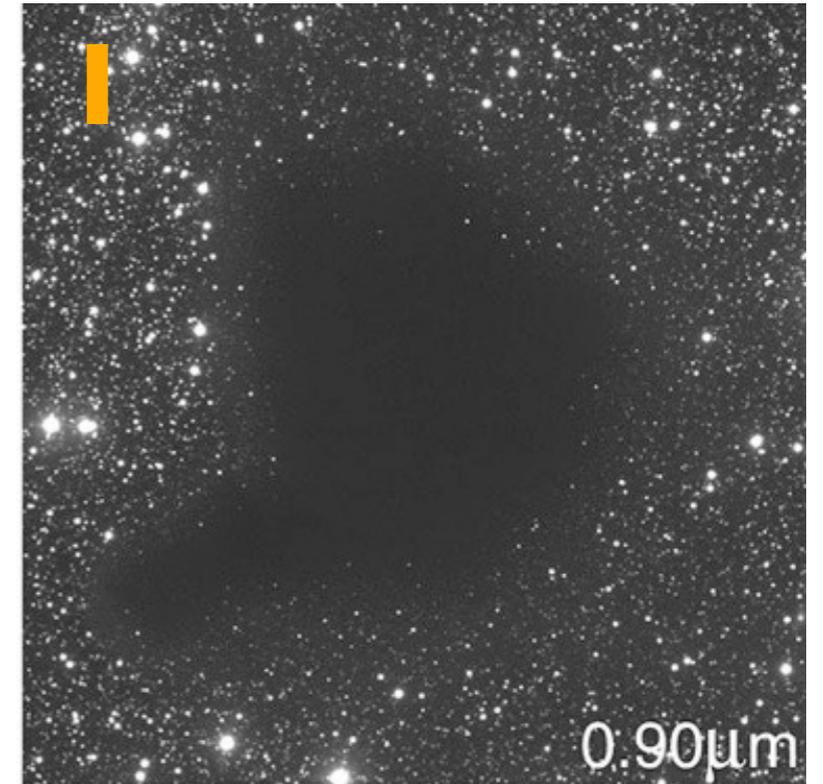
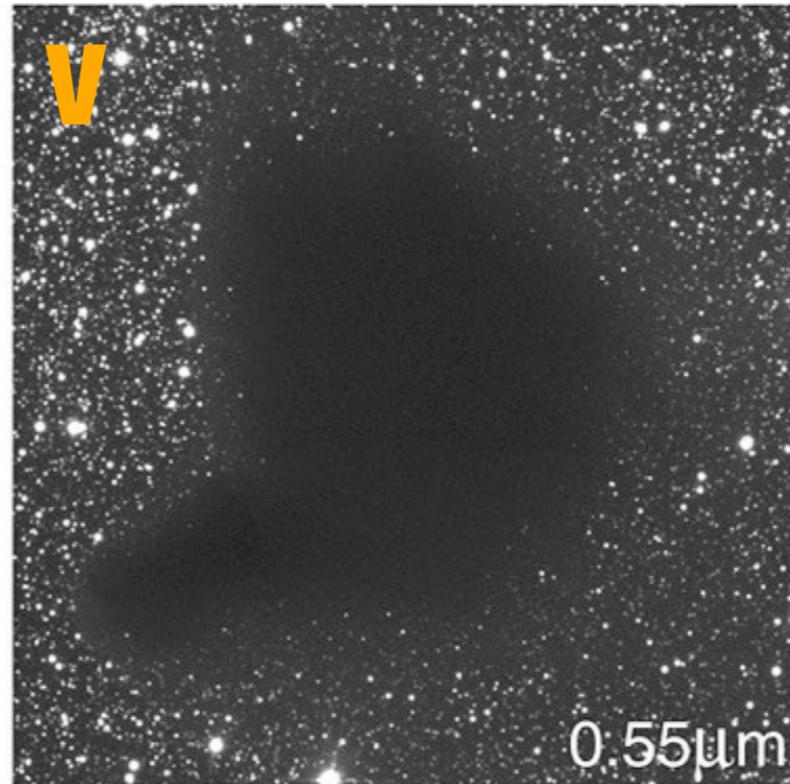
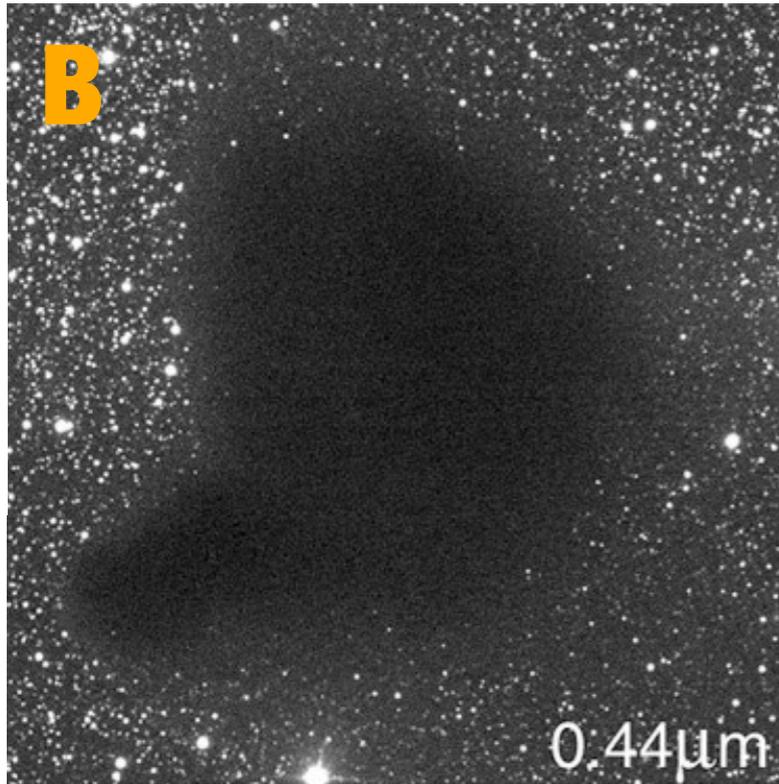
Enrojecimiento:

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

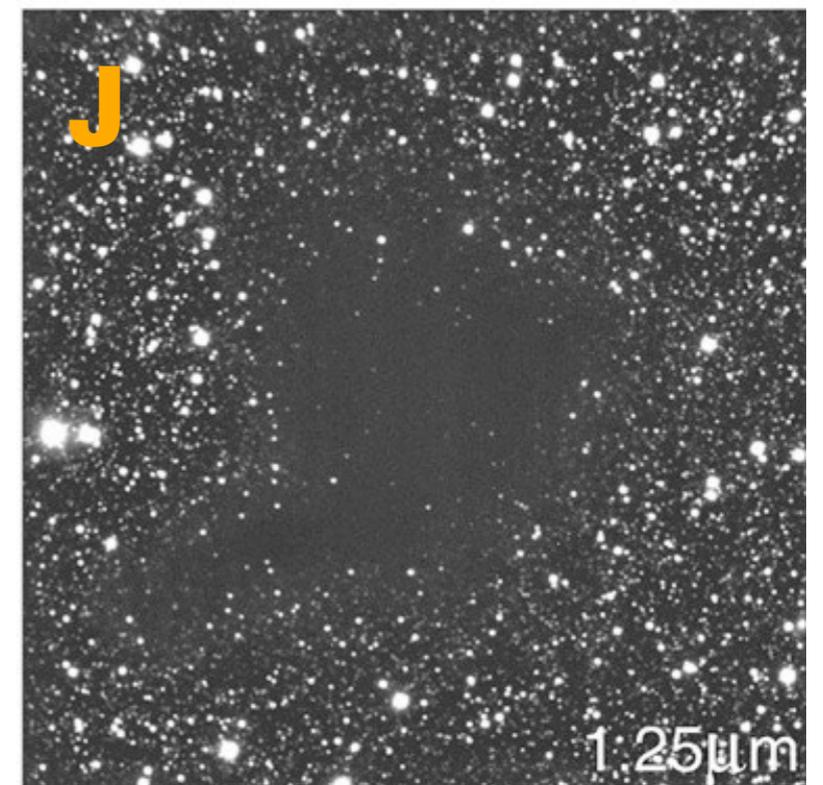
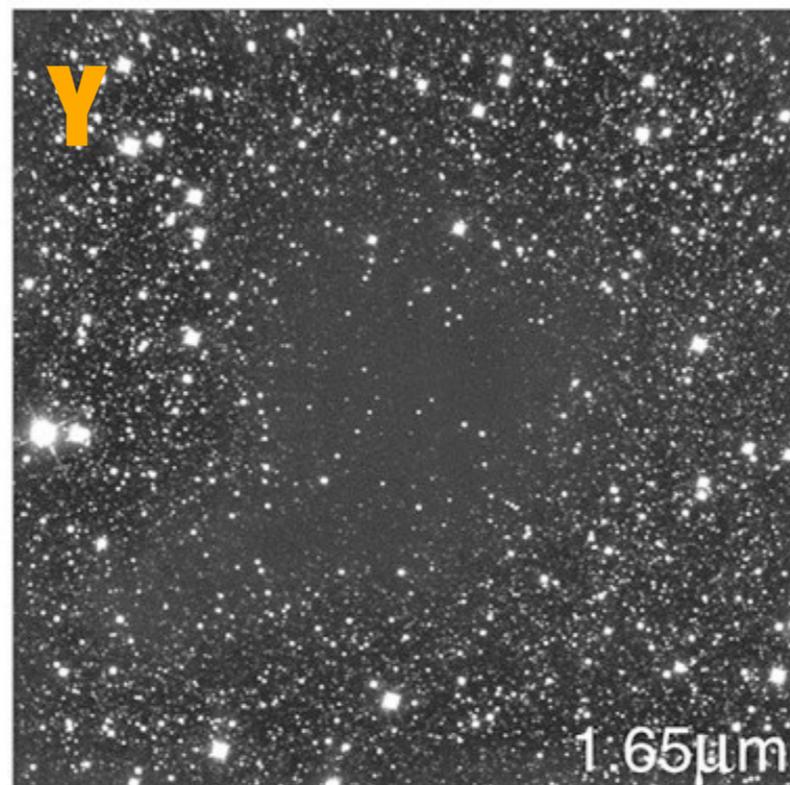
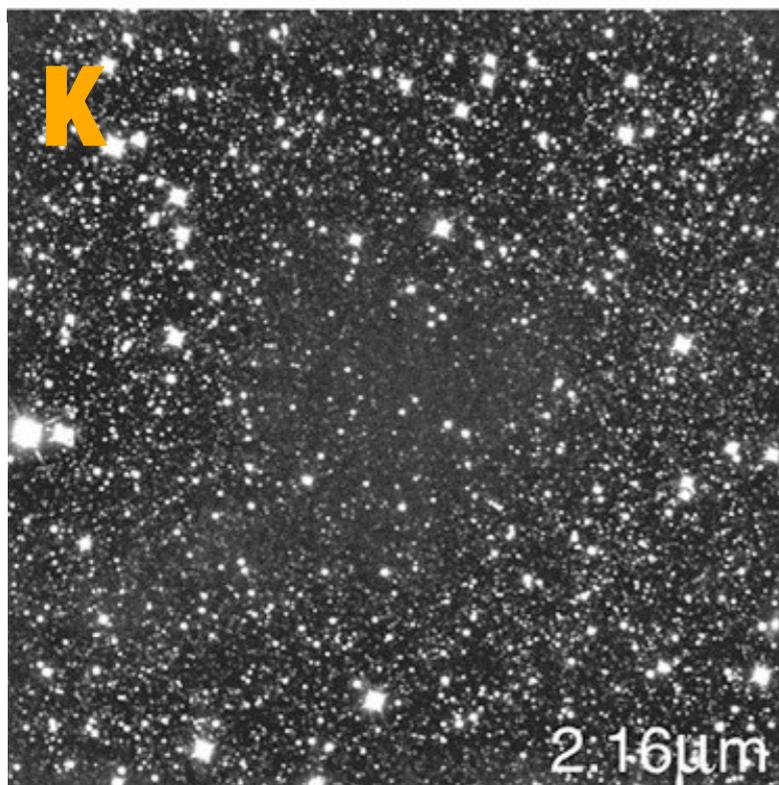


Observaciones Multi-Banda: Infrarojo Cercano

Óptico



Infrarojo Cercano



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 $(X-Y)$

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

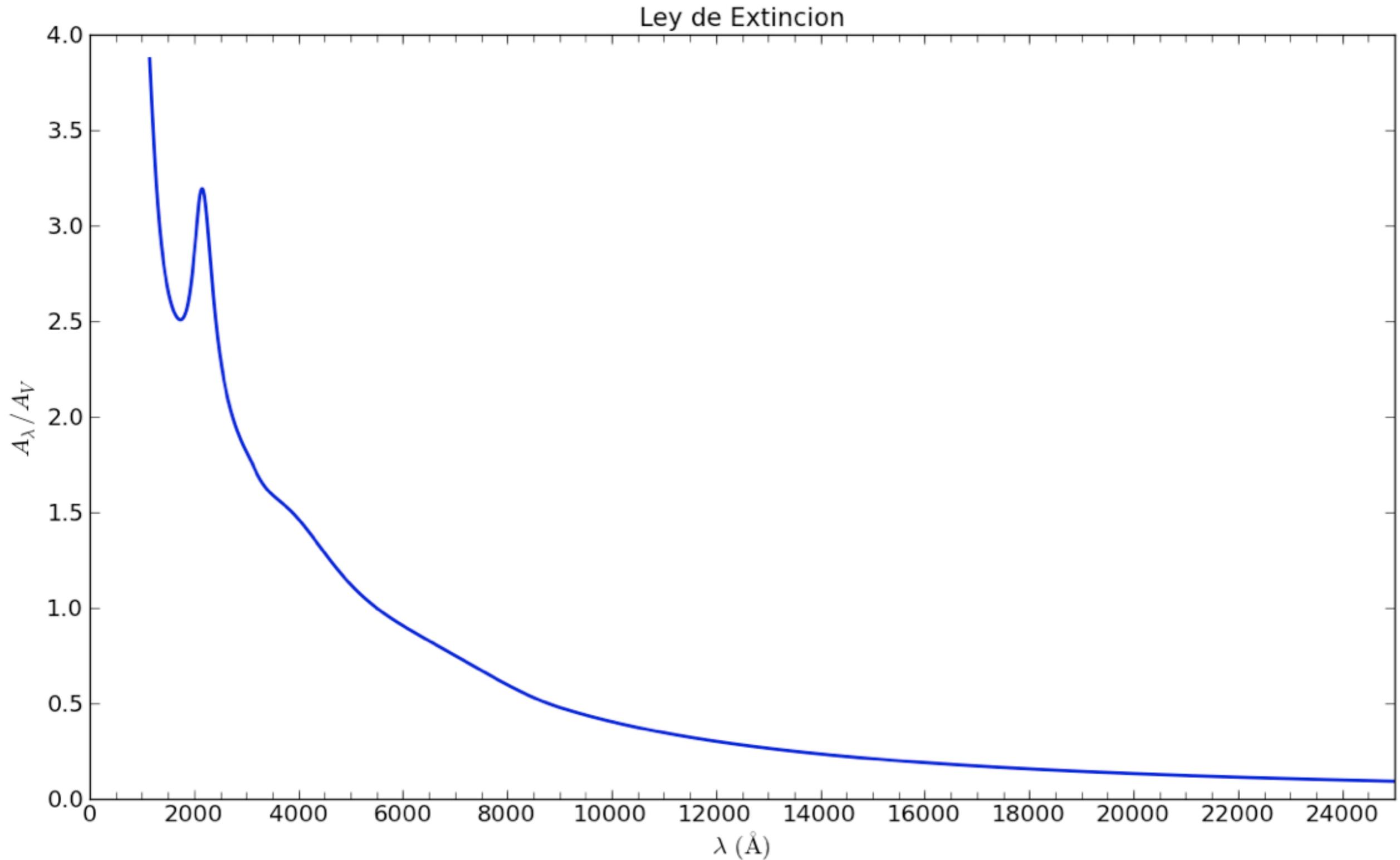
- ¿Cómo se expresa el exceso de color $E(X-Y)$ en términos de A_X y A_Y ?

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

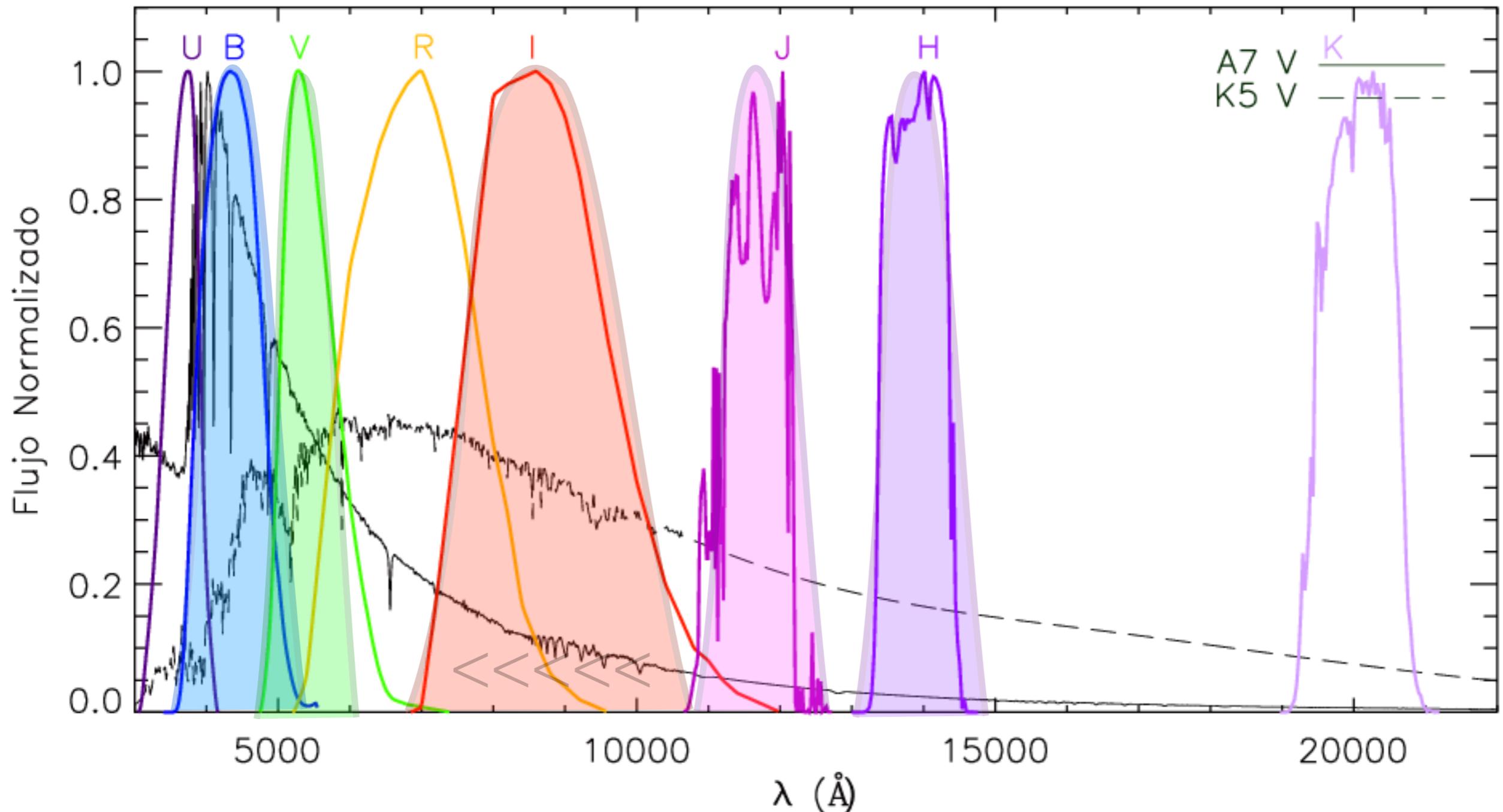
- El cociente $R_V = A_V/E(B - V)$ está dado por la ley de extinción, que depende del tipo de polvo que causa la extinción. En la Galaxia típicamente $R_V = 3.1$. R_V se llama *cociente de absorción total-a-selectiva*

La Vía Láctea: Medio Interestelar

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

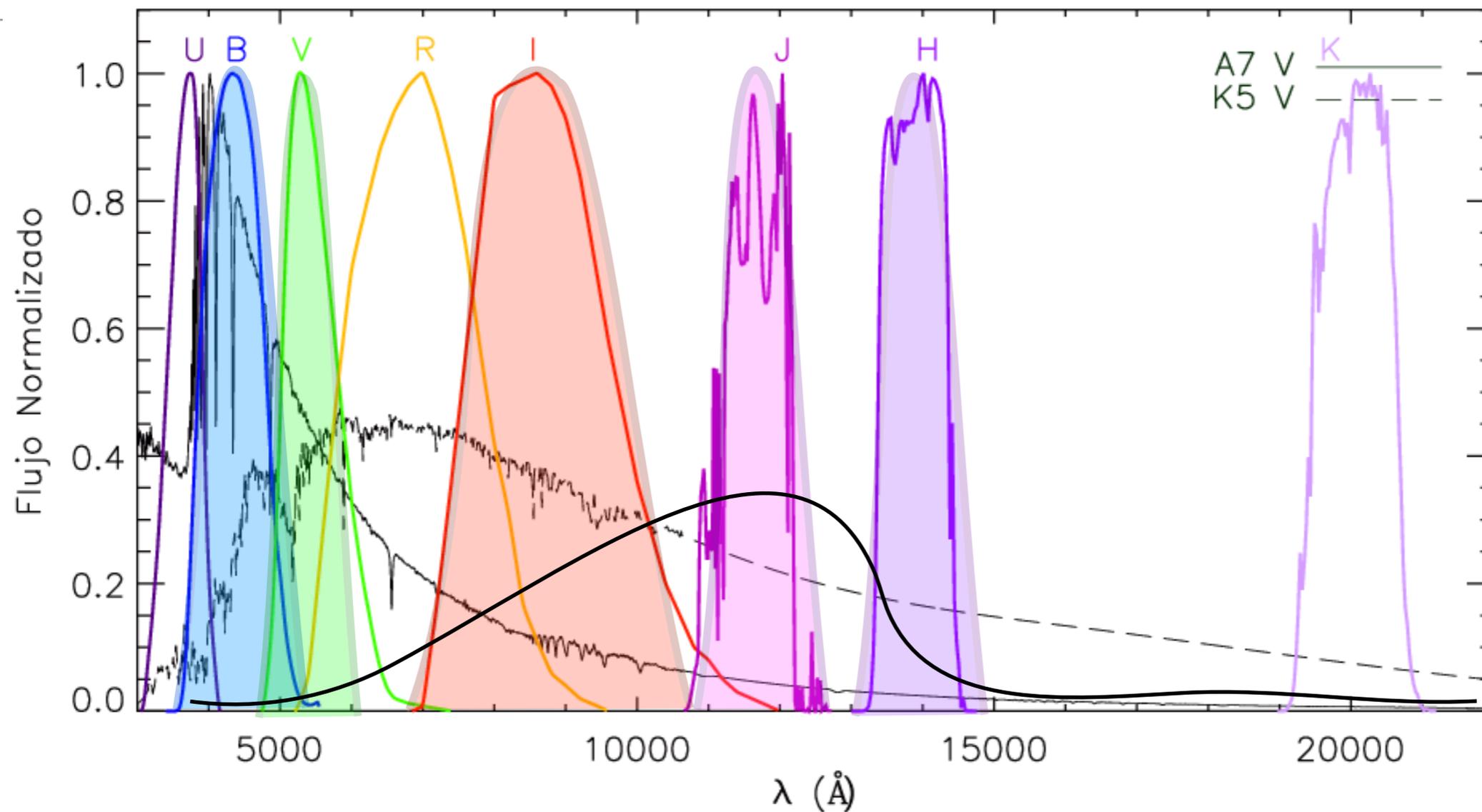


Observaciones Multi-banda: ¿Qué vemos?

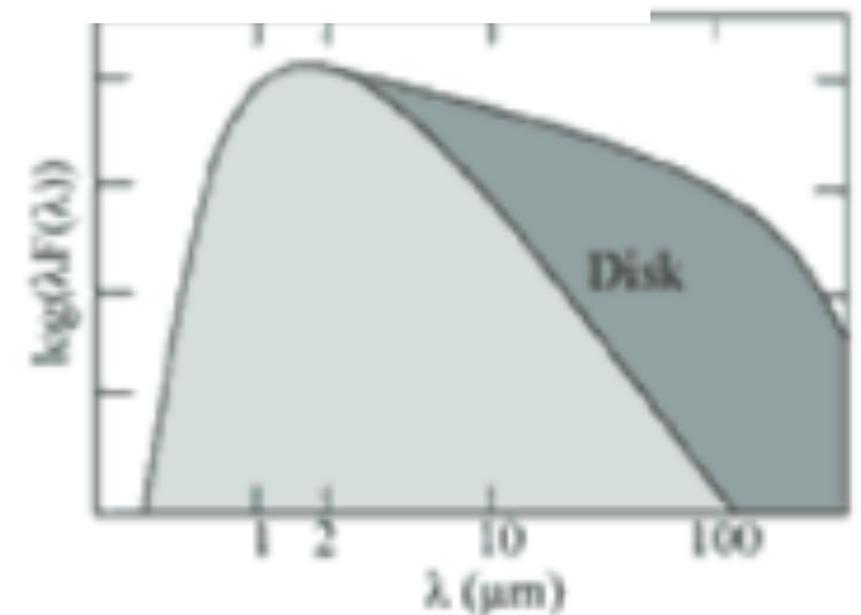


- En el cercano infrarrojo (1 mm-25mm, bandas JHK) se observa la emisión de estrellas frías tipo K,M o más tardías
- En el óptico (~4000Å - 1mm, bandas UBVRI) se observa primordialmente la emisión de estrellas más tempranas que tipo espectral M

Observaciones Multi-banda: ¿Qué vemos?



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

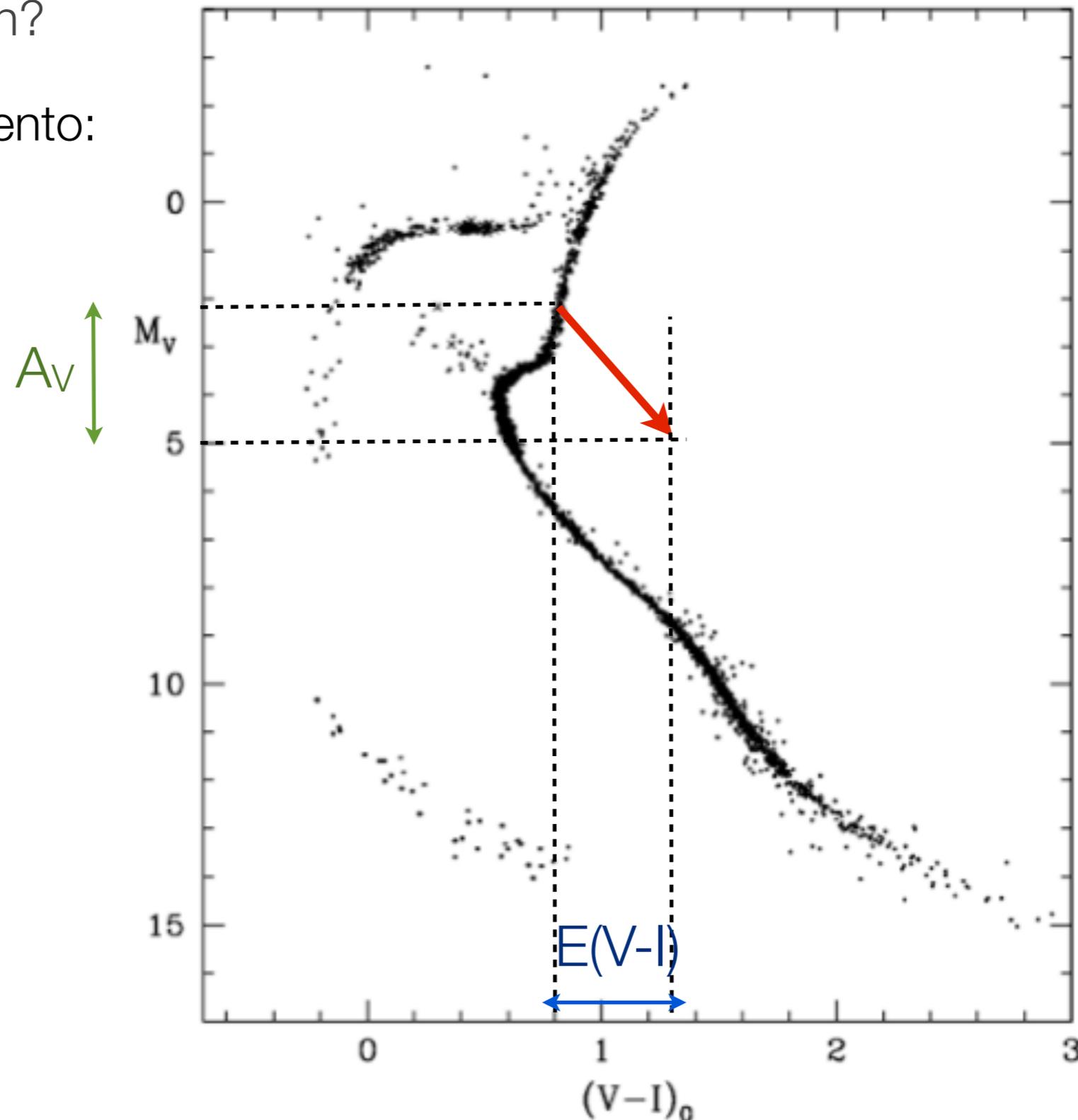


Extinción y Enrojecimiento

- ¿Cómo se ve afectada la posición de una estrella en el diagrama color-magnitud debido a la extinción?

Vector de Enrojecimiento:
 $(A_x, E(X-Y))$

- Cada estrella se corre en el diagrama, según lo indica su vector de enrojecimiento

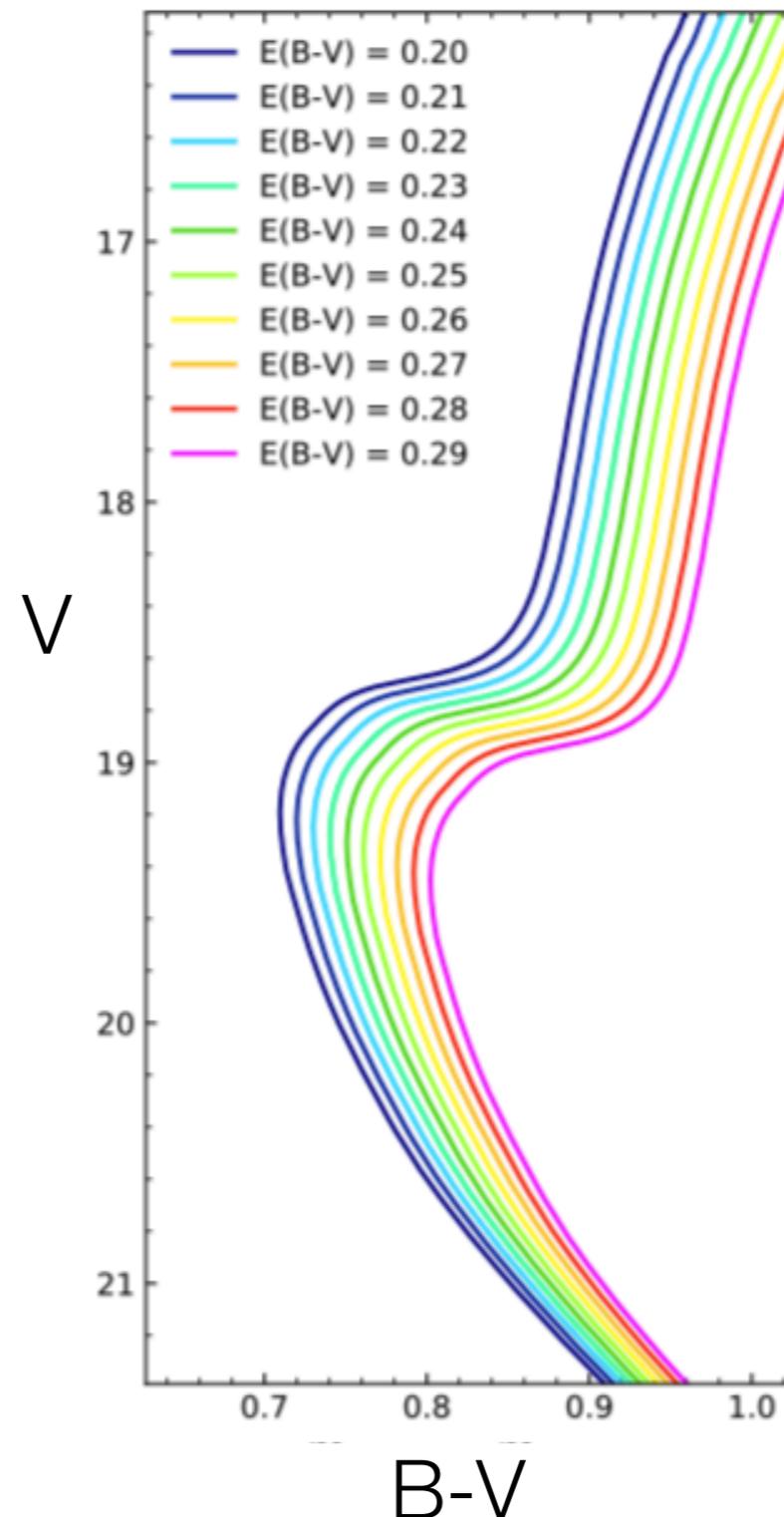


Extinción y Enrojecimiento

- ¿Cómo se ve afectada la posición de una estrella en el diagrama color-magnitud debido a la extinción?

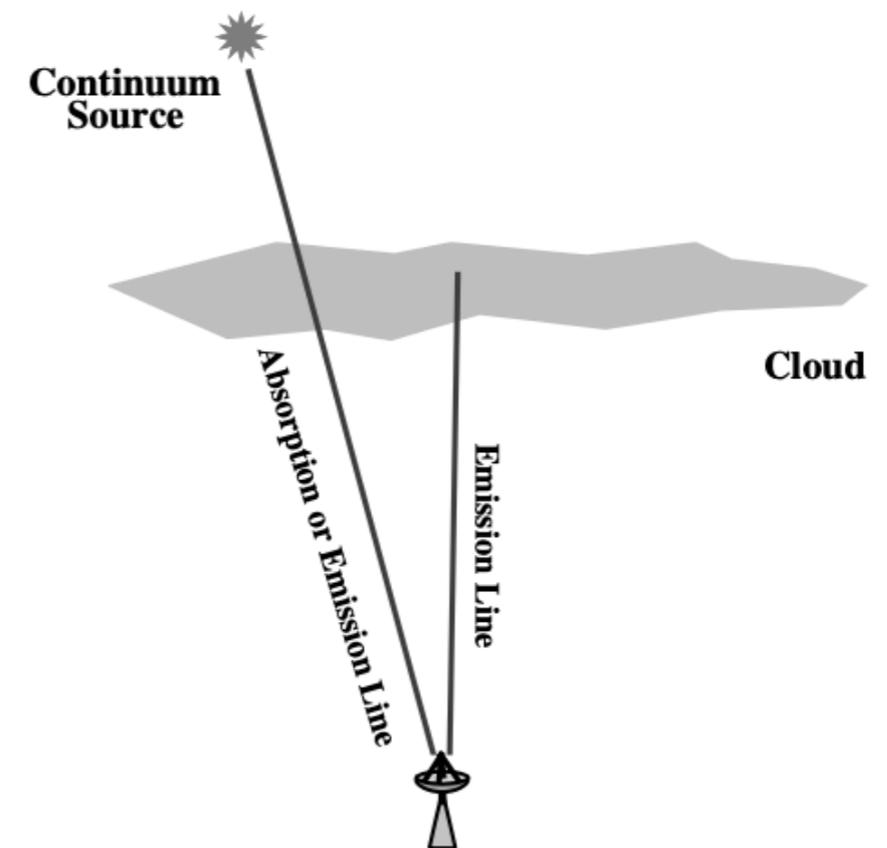
Vector de Enrojecimiento:
(A_x , $E(X-Y)$)

- Cada estrella se corre en el diagrama, según lo indica su vector de enrojecimiento
- Si toda la población está sometida al mismo enrojecimiento, todo el diagrama se corre hacia la derecha en un factor dado por el exceso de color correspondiente $E(B-V)$ y hacia abajo en uno dado por la extinción A_V

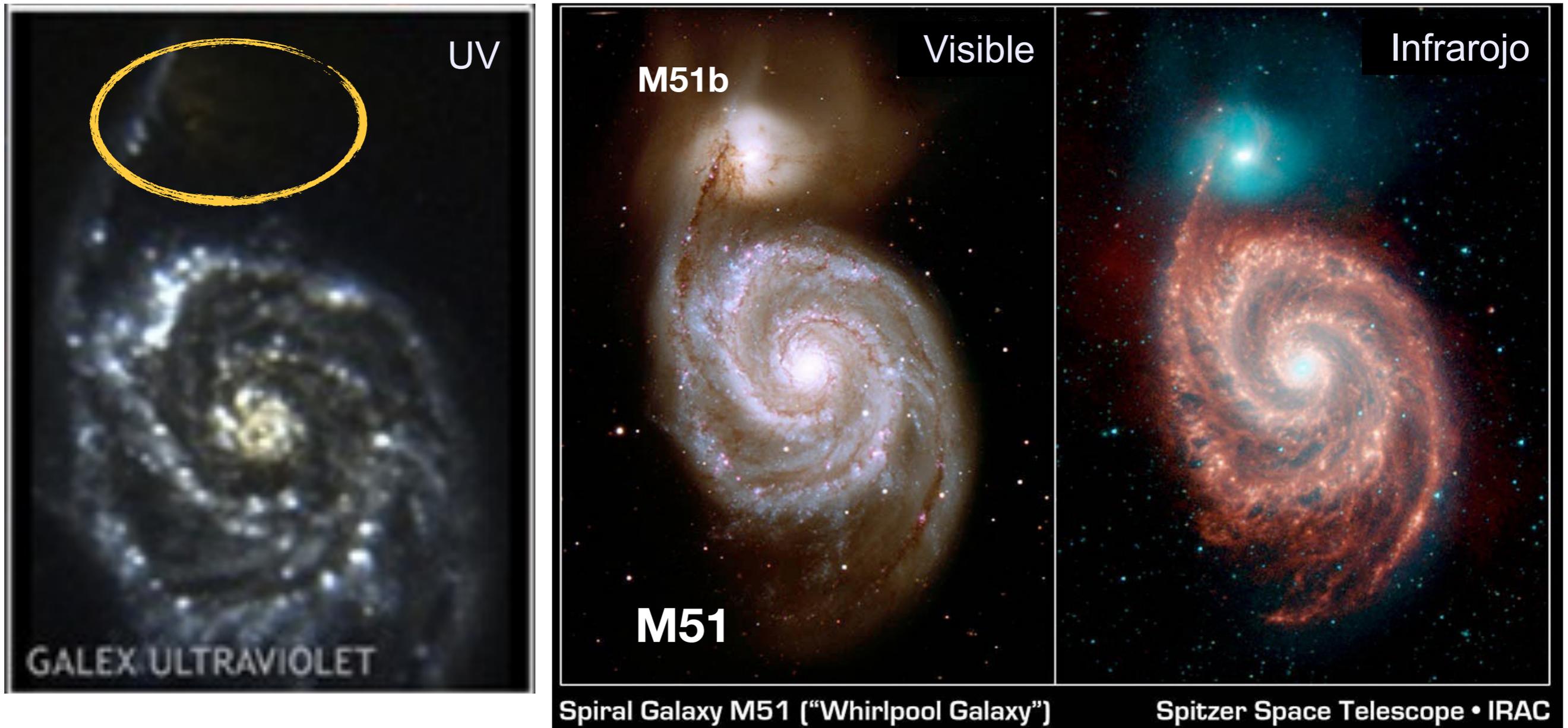


Efectos observables del Medio Interestelar

- Extinción
- Enrojecimiento
- Polarización
- Emisión térmica del polvo: el polvo re-radia la energía que absorbe a longitudes de onda largas, en el infra-rojo lejano ($\sim 10 \mu m$)
- Líneas de absorción moleculares y del gas
- Líneas de emisión - gas caliente



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

Fases del Medio Interestelar

Tipos de Nebulosas: Clasificación Observacional

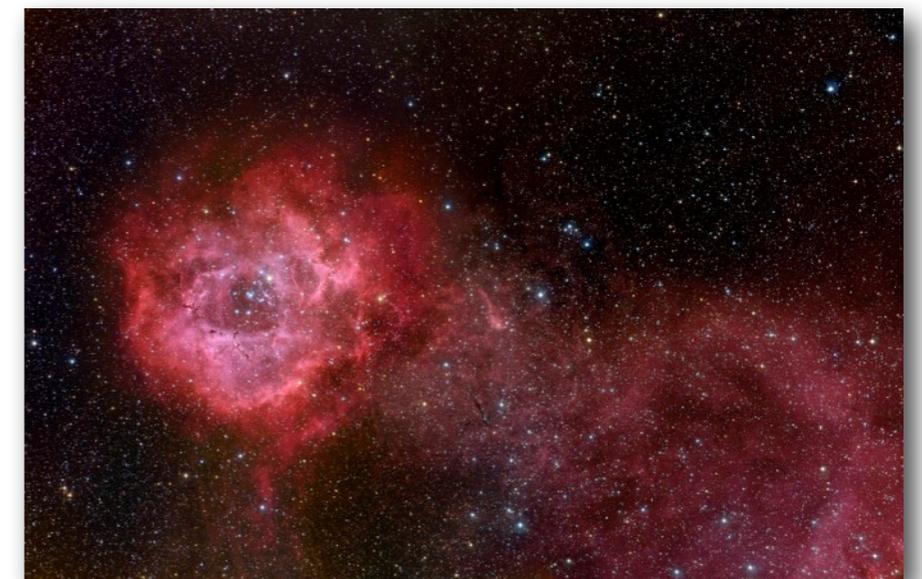
Nebulosas de Reflexión:

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

Fases del Medio Interestelar

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

- **Regiones HII**
- **Gas Coronal**

- **Nubes de HI**

- **Nubes moleculares**

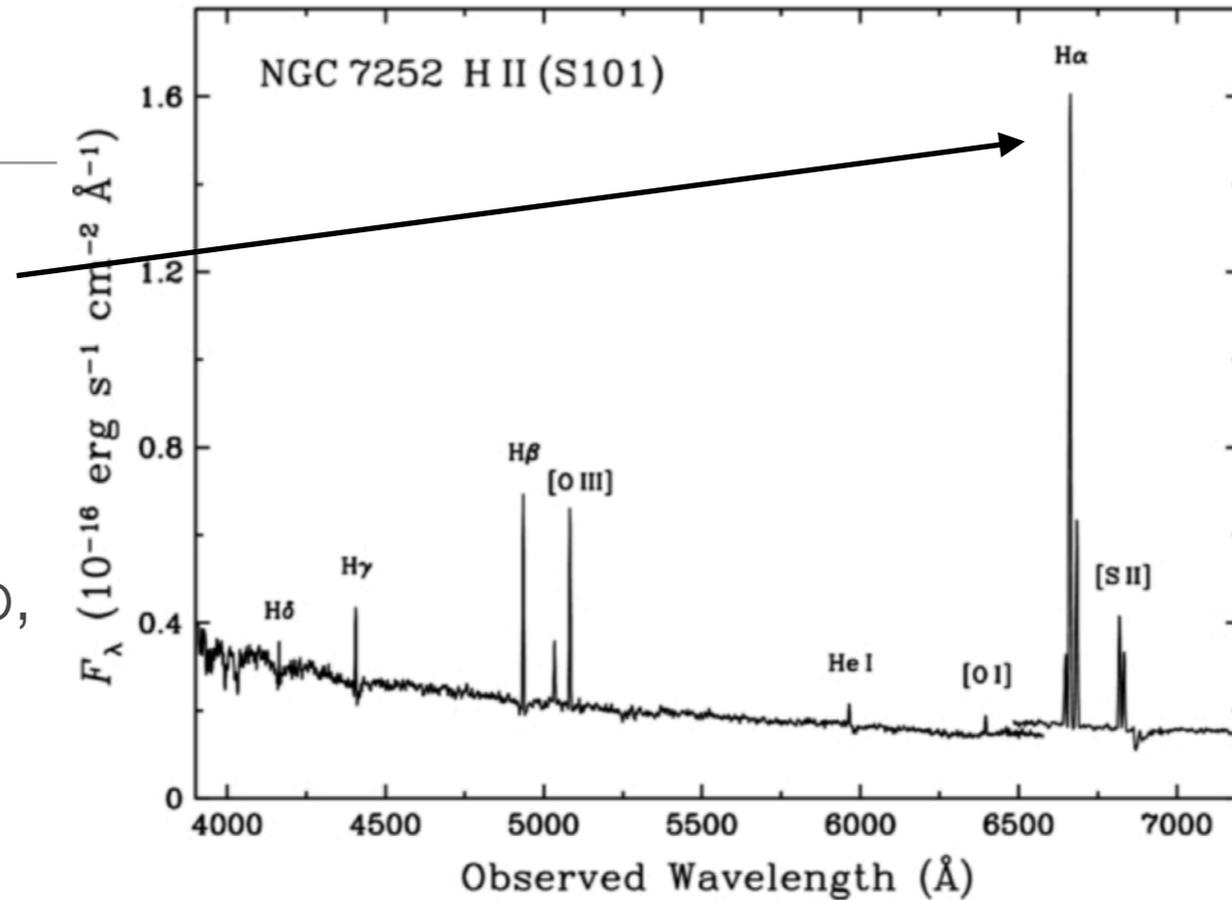
La Vía Láctea: Fases del Medio Interestelar

Algunas características físicas de las fases del medio interestelar

Componente	Densidad átomos/cm ³	Temp K
Gas Coronal (HII)	0.001	$\geq 10^6$
Regiones HII (H ⁺)	~0.1	$\geq 10^4$
Nubes de HI	~1-10	~100-10 ³
Nubes moleculares	~10 ² - 10 ³	~20-50
Polvo	~10 ⁵	<100

Regiones HII

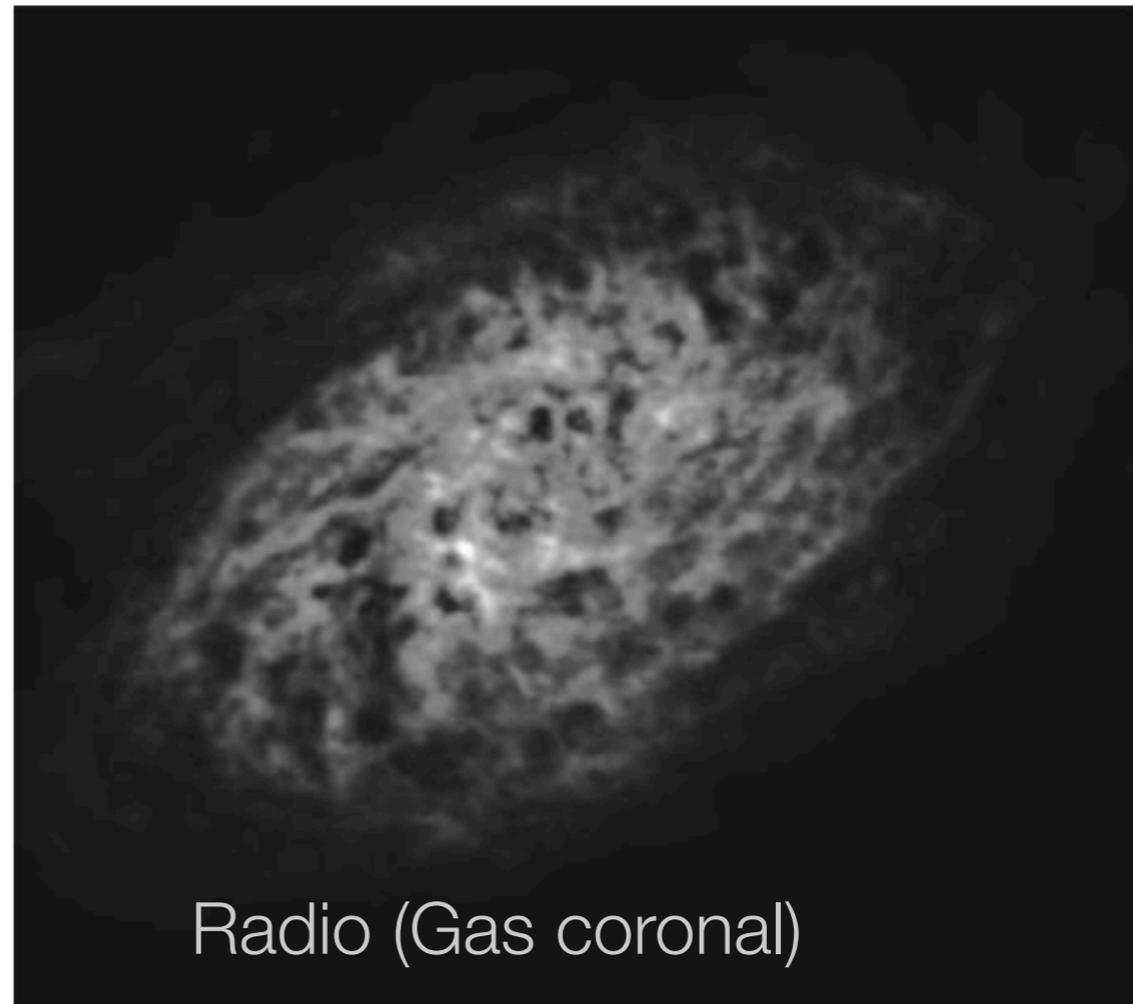
- H mayormente ionizado
- Fuertes líneas de emisión de Hidrógeno, en especial $H\alpha$
- Asociadas a la presencia de estrellas jóvenes de alta masa y, por tanto calientes, que ionizan el medio
- Asociadas a formación estelar, muestran regiones de formación estelar en galaxias externas



Gas Coronal

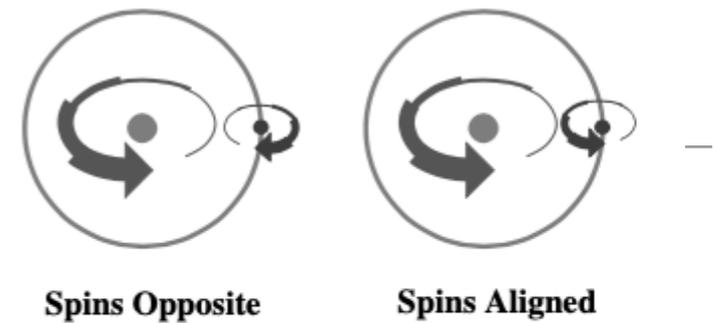
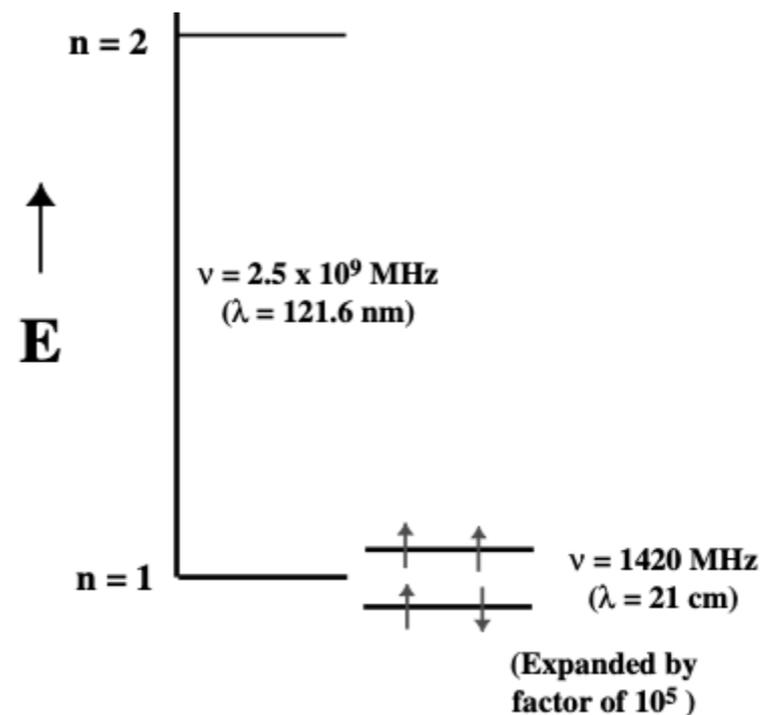
- H totalmente ionizado (difícil detección a través de líneas colisionales: ej. O IV, CIV, NV)
- Componente difusa de gas muy caliente (10^6 K) producido en explosiones de supernova, rodea todo el disco galáctico extendiéndose varios kpc
- En el gas coronal se ven agujeros producidos por explosiones de supernova y vientos estelares

Las dos imágenes de la galaxia NGC 2403 están en la misma escala

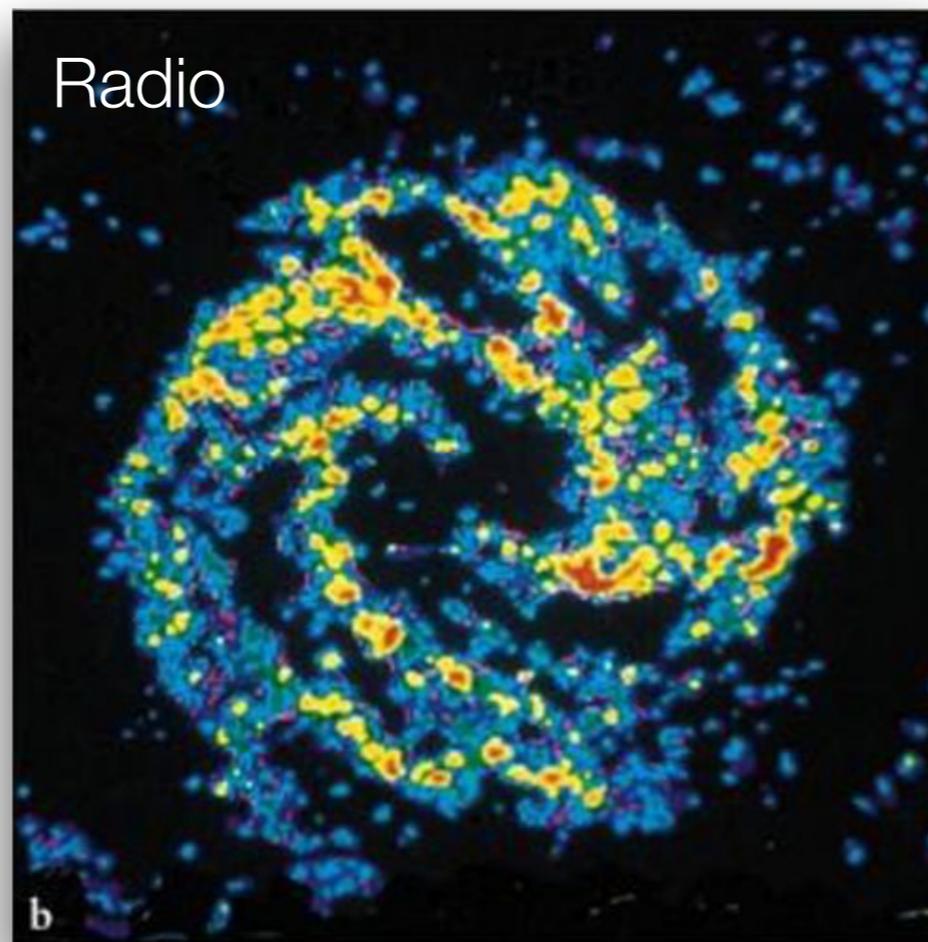


Regiones HI

- H mayormente neutro
- Se detectan principalmente mediante la línea de 21cm del H (radio)
 - transición hiperfina del átomo de H

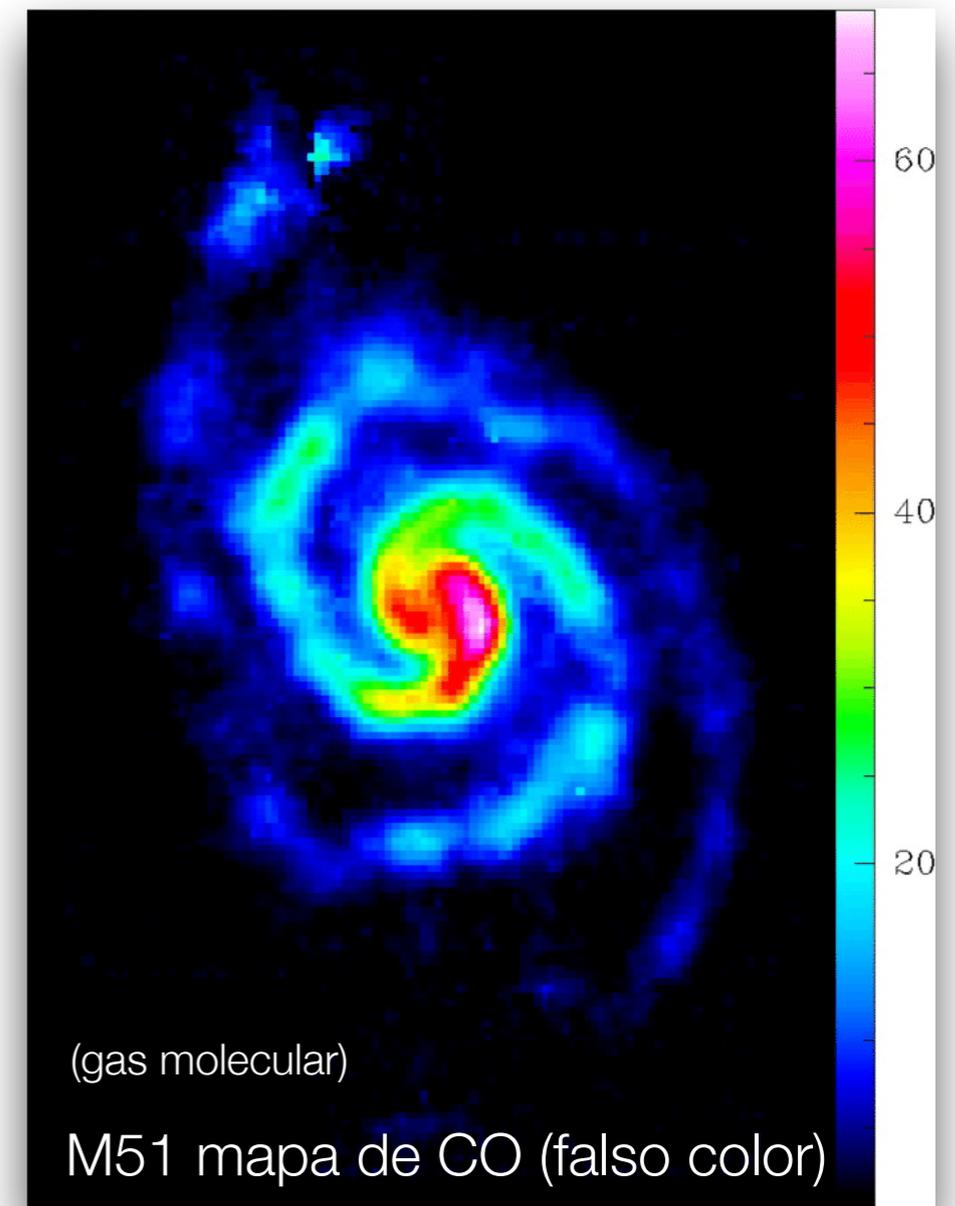
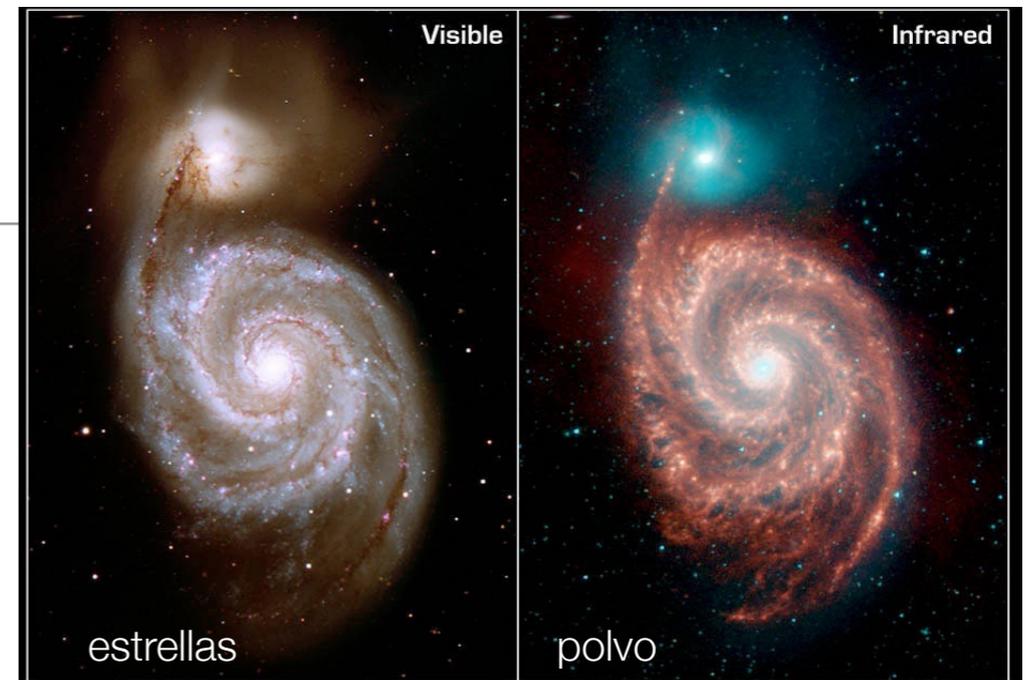


- La línea de 21cm es una línea “prohibida”, es excitada por transiciones
- A las densidades típicas del Medio Interestelar, es poco probable comparada con las líneas como las de Balmer, pero hay tanto H que igual es fácil de detectar



Nubes Moleculares

- Zonas de T suficientemente baja y densidad alta para que se formen moléculas
- La molécula más abundante es H_2 , pero es muy difícil de detectar porque sus transiciones ocurren en el UV
- Otras moléculas: CO, CN, OH, H_2O , CH_3CH_2OH
- Generalmente se usa CO como trazador de las nubes moleculares (transición de 2.6mm -> microondas)
- En las nubes moleculares también encontramos mayor densidad de **polvo**
- *CO y polvo siguen los brazos espirales, el HI tiene una distribución más homogénea, permea la galaxia*



La Vía Láctea: Fases del Medio Interestelar

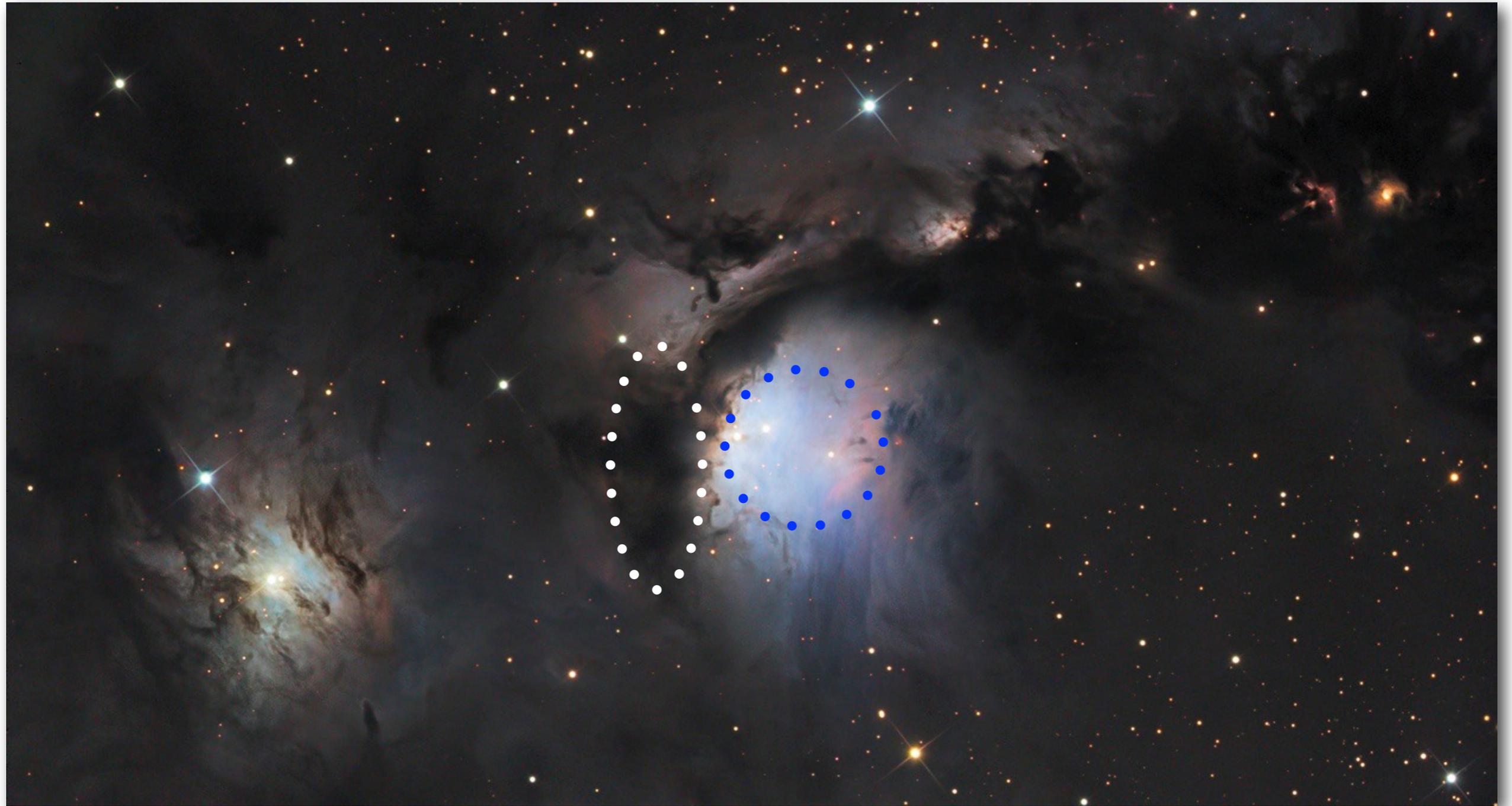
Algunas características físicas de las fases del medio interestelar

Componente	Densidad átomos/cm ³	Temp K	Masa %	λ Detección
Gas Coronal (HII)	0.001	$\geq 10^6$	~50%	Rayos X
Regiones HII (H ⁺)	~0.1	$\geq 10^4$	~35%	H α (6563 Å)
Nubes de HI	~1-10	~100-10 ³	~13%	H en 21 cm
Nubes moleculares	~10 ² - 10 ³	~20-50	<1%	CO (2.6 mm)
Polvo	~10 ⁵	<100	<1%	Infrarojo lejano (15 μ m-1mm)

Nota: Aquí con % de Masa nos referimos a qué porcentaje de todo el Medio Interestelar de la Vía Láctea se encuentra en cada una de las diferentes fases

La Vía Láctea: Fases del Medio Interestelar

Importante: Las diferentes fases del Medio Interestelar *coexisten*



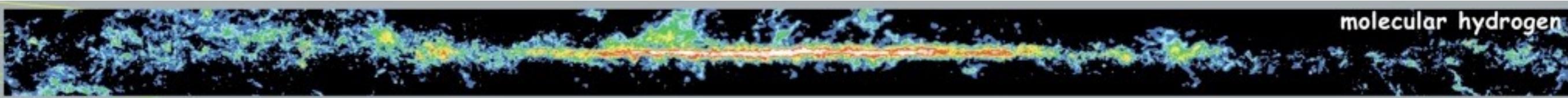
La Vía Láctea: Medio Interestelar

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

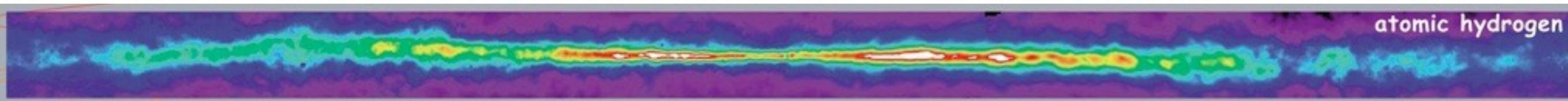
La Vía Láctea: Óptico (Estrellas)



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 ($\sim 10^{11} M_{\odot}$)

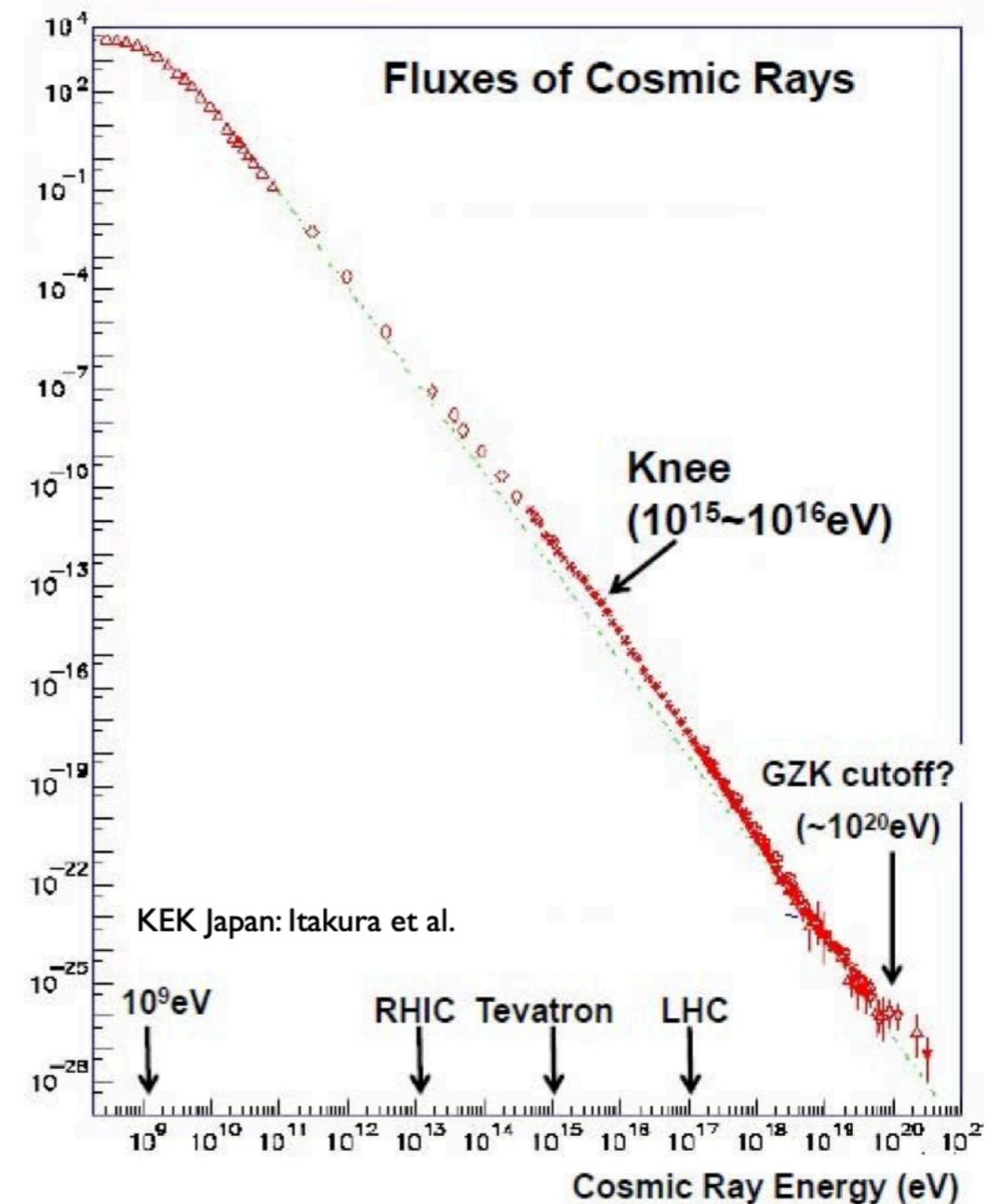
La Vía Láctea: Fases del Medio Interestelar

Componente	Densidad átomos/cm ³	Temp K	Masa %	λ Detección
Gas Coronal (HII)	0.001	$\geq 10^6$	~50%	difuso, engloba el disco
Regiones HII (H ⁺)	~0.1	$\geq 10^4$	~35%	Regiones de Formación Estelar en el P.G.
Nubes de HI	~1-10	~100-10 ³	~13%	P.G.
Nubes moleculares	~10 ² - 10 ³	~20-50	<1%	P.G. brazos espirales
Polvo	~10 ⁵	<100	<1%	Sigue al gas molecular

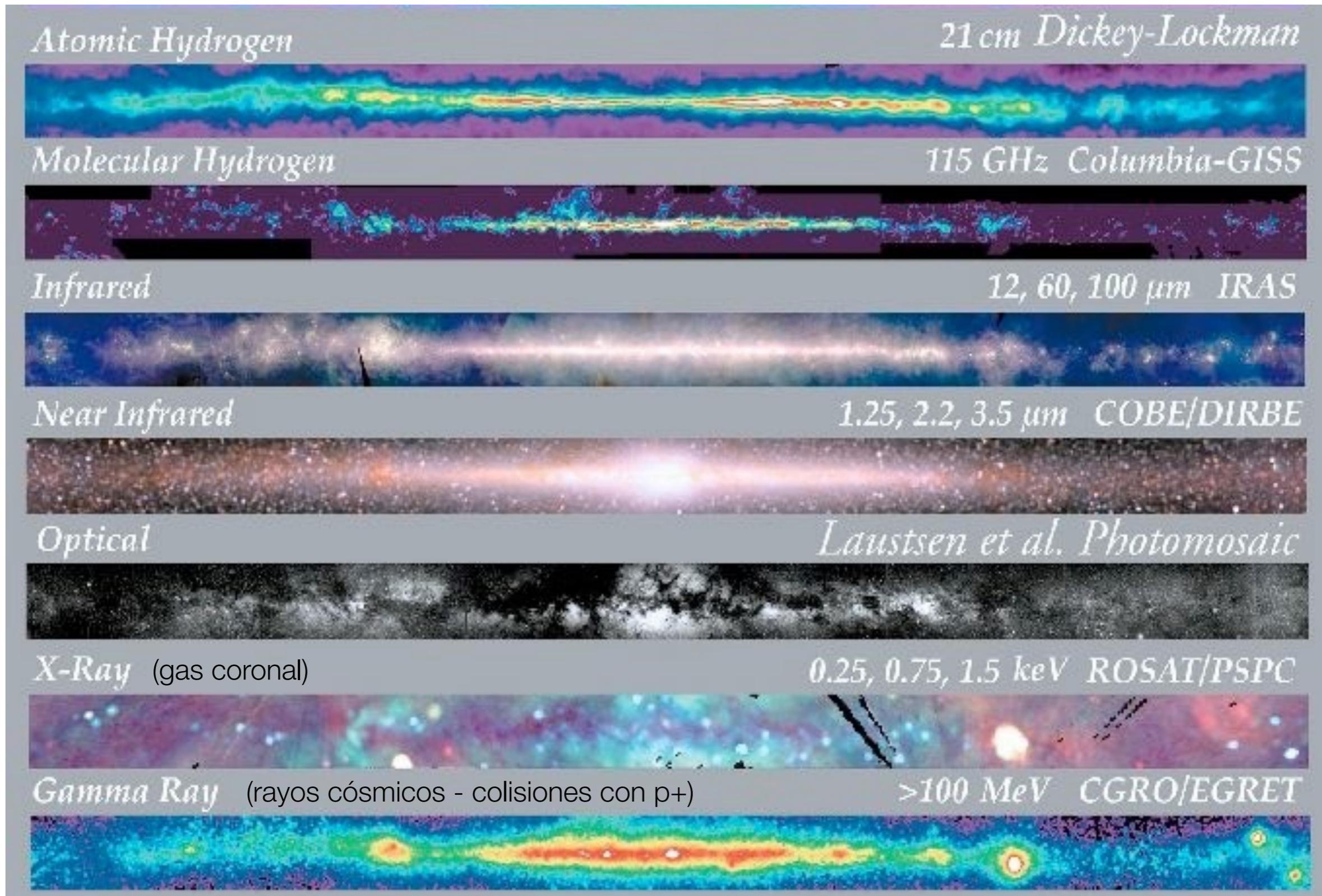
P.G. = Plano Galáctico

Rayos C3smicos

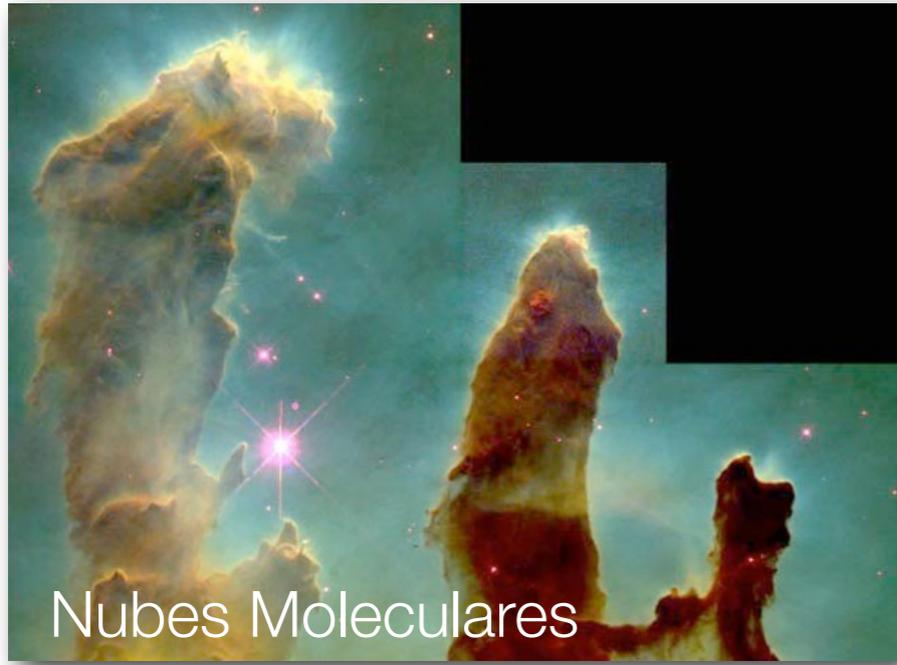
- protones y n3ucleos at3omicos movi3ndose a altas energ3as
 - >90% protones (n3ucleo de H)
 - 9% N3ucleos de He y 1% n3ucleos m3as pesados
- Seg3n la energ3a, son producidos en diferentes escenarios:
 - En erupciones (flares) solares (menor energ3a)
 - Ondas de choque en supernovas (mayor energ3a), vecindad de pulsars (aceleraci3n por campo magn3tico)



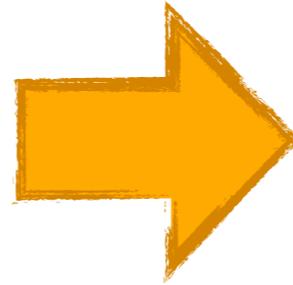
La Vía Láctea: Medio Interestelar



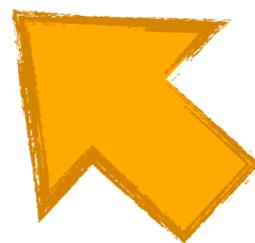
1- Las estrellas se forman en las Nubes Moleculares a partir del colapso gravitatorio de núcleos densos



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

