

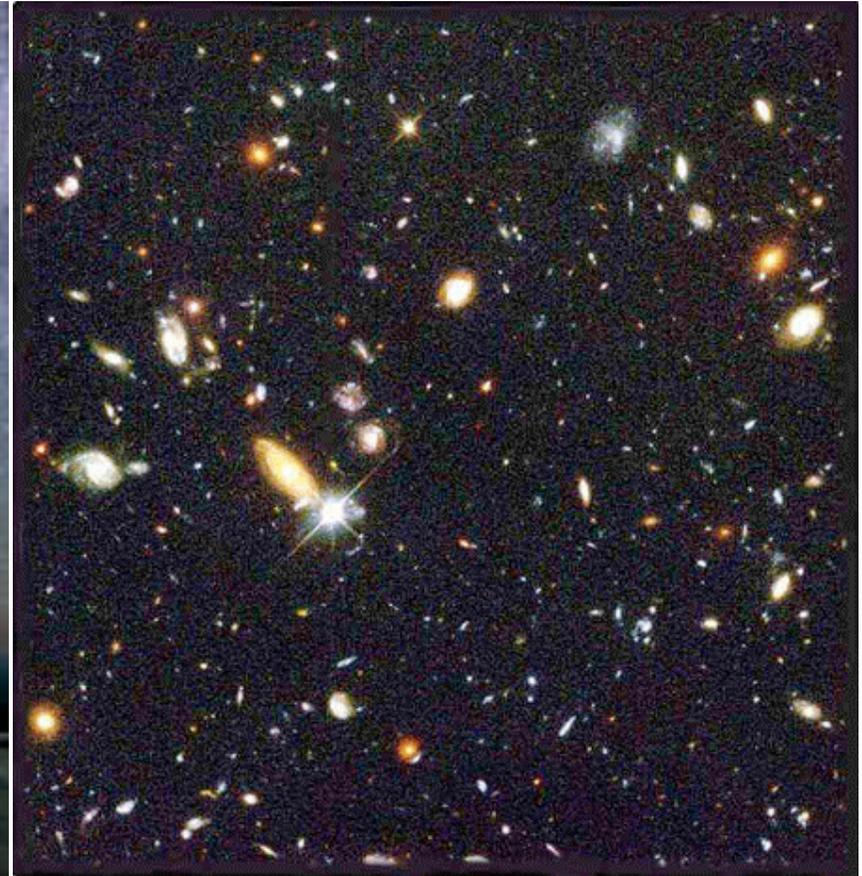
Las herramientas de los astrofísicos

La astrofísica es una ciencia pero (casi) no se pueden hacer experimentos. Se obtiene información a través:

- Observar la luz (más general: radiación electromagnética) proveniente de los astros.
- Exploración directa: analizar meteoritos, rocas de la Luna, mandar sondas a cometas, planetas de nuestro sistema solar
- Detectar partículas elementales de alta energía: neutrinos, rayos cósmicos
- Buscar ondas gravitacionales
- Hacer experimentos en laboratorio para averiguar la estructura del polvo interestelar, líneas de emisión



Vista al cielo a simple vista



“Hubble Deep Field” - zona observada por el satélite Hubble durante 3 semanas

- Como podemos explicar y interpretar lo que vemos?
- Están los objetos cerca o lejos?
- Que objetos son? Que es su fuente de luminosidad?

El tiempo astronómico

Edad del universo:	13.000 millones de años
Vida del sol:	9.000 millones de años
Edad del sol:	5.000 millones de años
Vida de una estrella masiva:	1 millón de años
Edad de la tierra:	5.000 millones de años
Aparición de los mamíferos:	hace 200 millones de años
Extinción de los dinosaurios:	hace 65 millones de años
Historia humana:	unos 6.000 años
Vida humana:	(menos de) 100 años

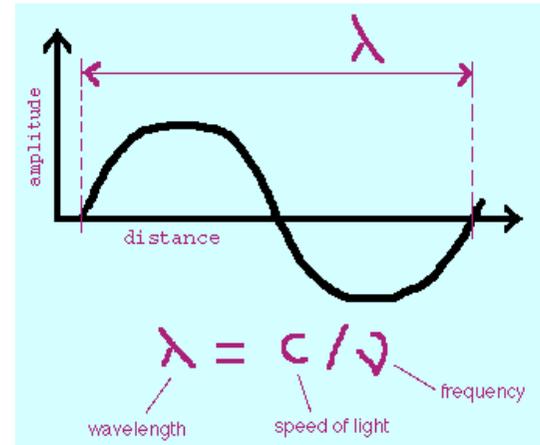
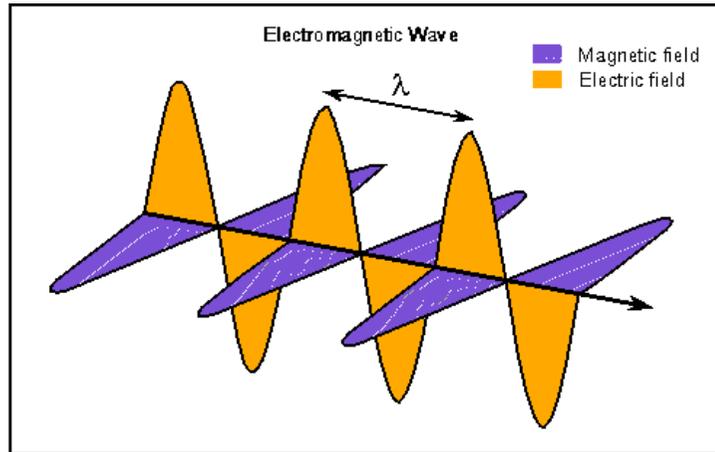
→ ! No vemos cambios en el cielo !

Índice

- La luz a diferentes longitudes de onda: que información nos da y como la podemos medir
- Emisión continuo y emisión espectral
- Efecto Doppler
- Como medir distancias
- Escalas del universo

La "doble naturaleza" de la luz

1) La luz es **radiación electromagnética**. Tiene propiedades de **onda** que es caracterizada por su frecuencia (o longitud de onda)



Velocidad de la luz
en el vacío:
 $c \approx 300\,000 \text{ km/s}$

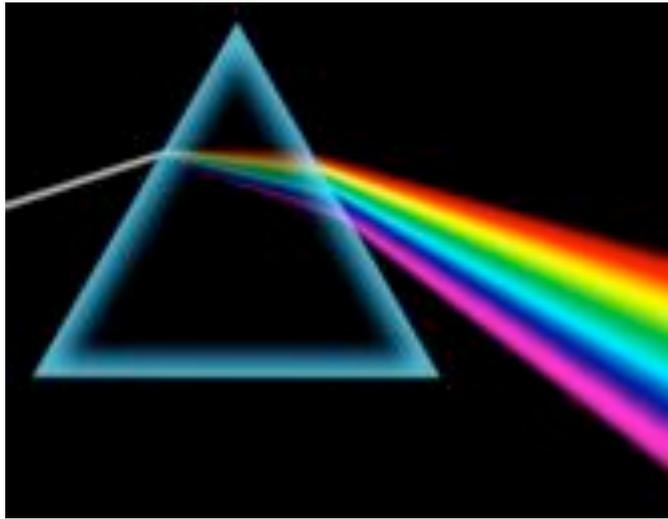
2) La luz también tiene propiedades de partículas. Las partículas de la luz son **fotones**. Su energía, **E**, se relaciona con la frecuencia, **ν** , como:

$$E = h \nu = h c / \lambda$$

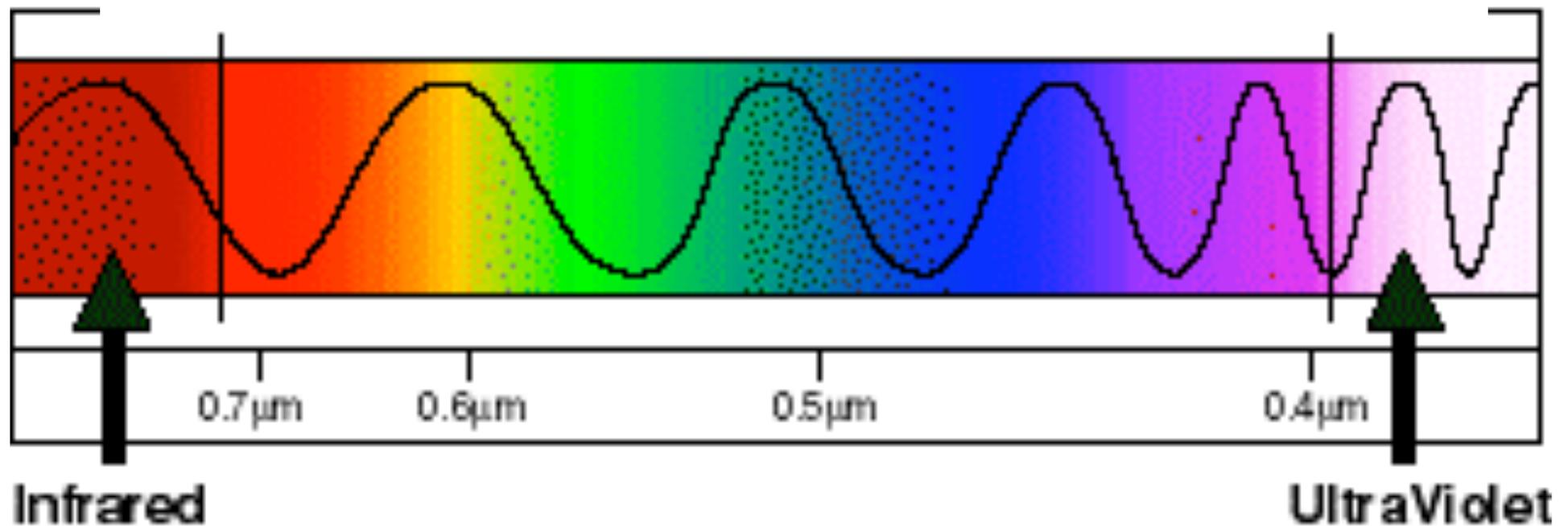
(donde h es la constante de Planck)

- Longitud de onda larga (frecuencia baja) → baja energía
- Longitud de onda corta (frecuencia alta) → alta energía

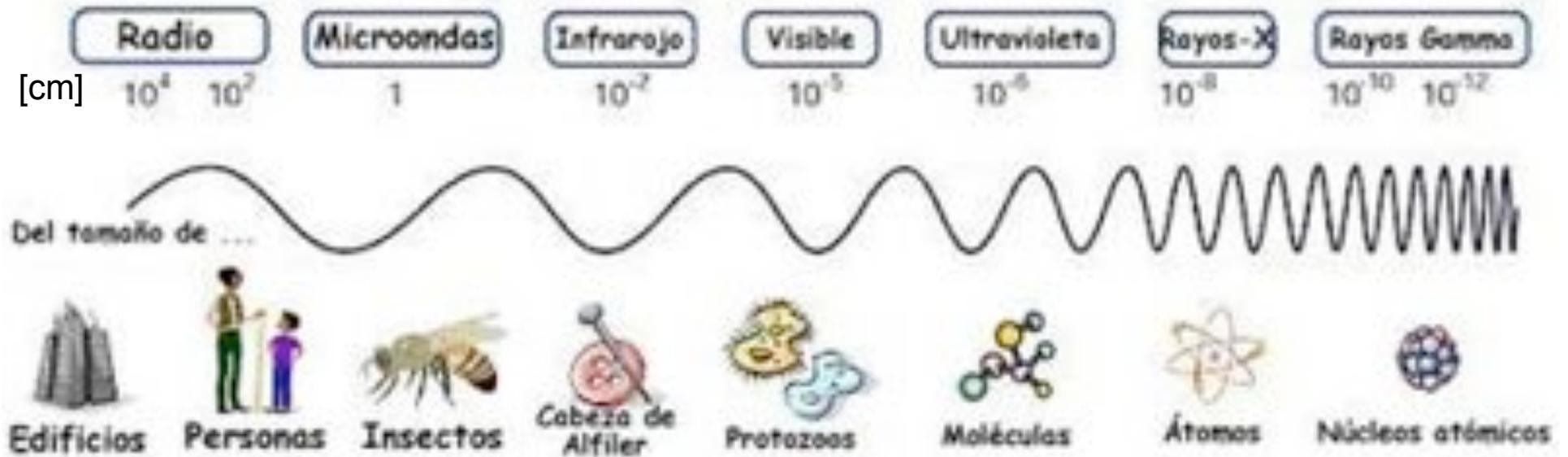
La mecánica cuántica explica estos dos aspectos de la naturaleza en una teoría.



Espectro electromagnético visible

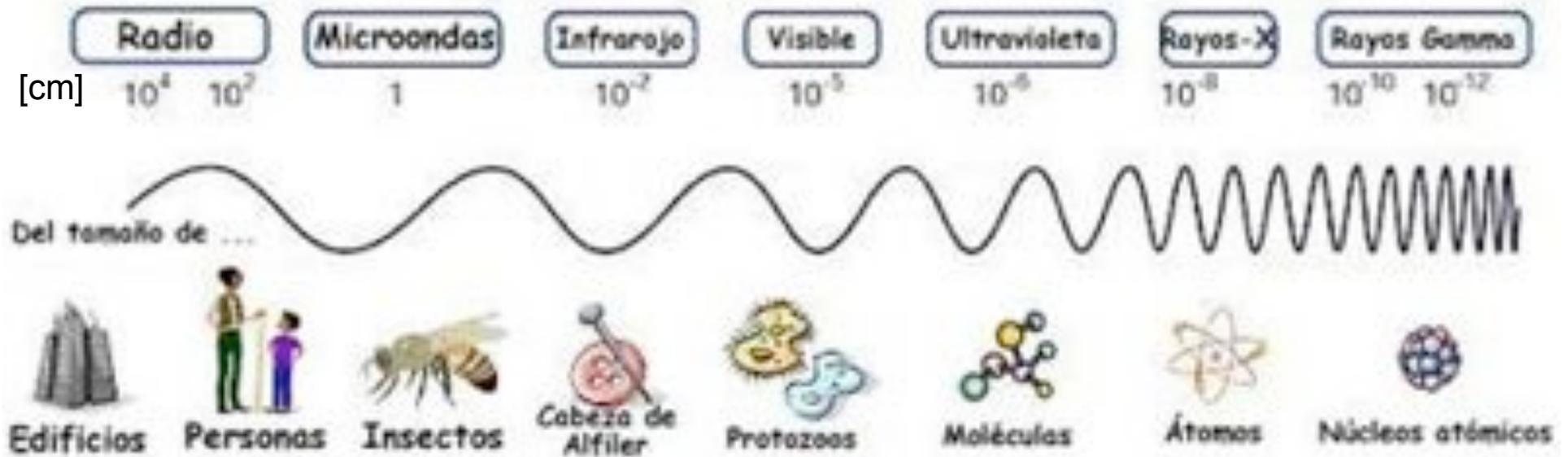


Espectro electromagnético entero



¿Qué se puede observar en cada longitud de onda?

Espectro electromagnético entero



Gas y partículas frías

Hidrógeno atómico Polvo interestelar

Moléculas

Estrellas
Gas caliente

Gas muy caliente

Procesos relativistas:

- estrellas de neutrones
- agujeros negros

.....

Observamos la Vía Láctea

En el óptico vemos estrellas, zonas oscurecidas por el polvo interestelar y gas ionizado.



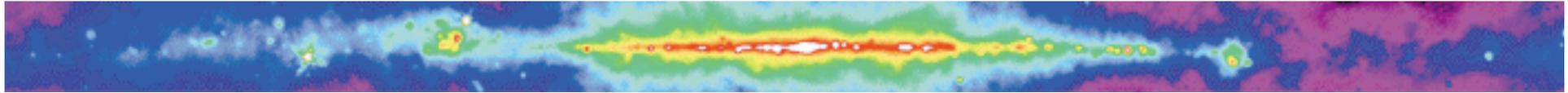
Visto desde la hemisferia norte



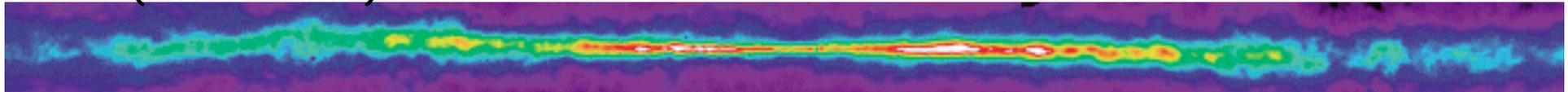
...y de la hemiferia sur

La Vía Láctea en.....

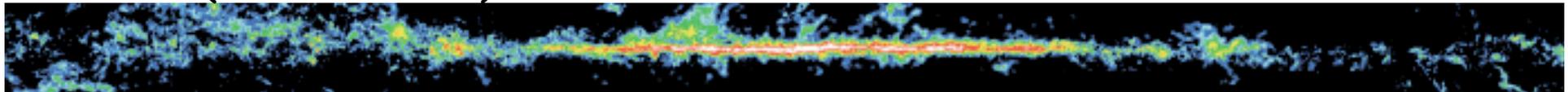
Radio



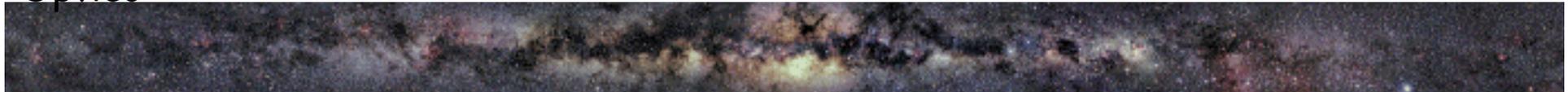
Radio (Gas atómico)



Radio mm (Gas molecular)



Óptico



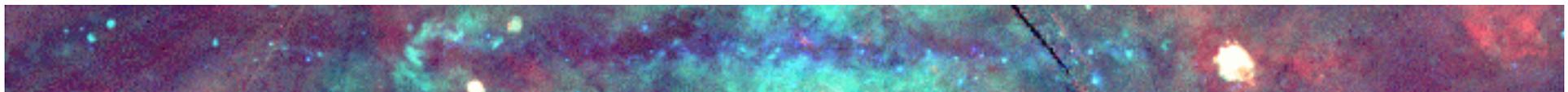
Infrarrojo cercano



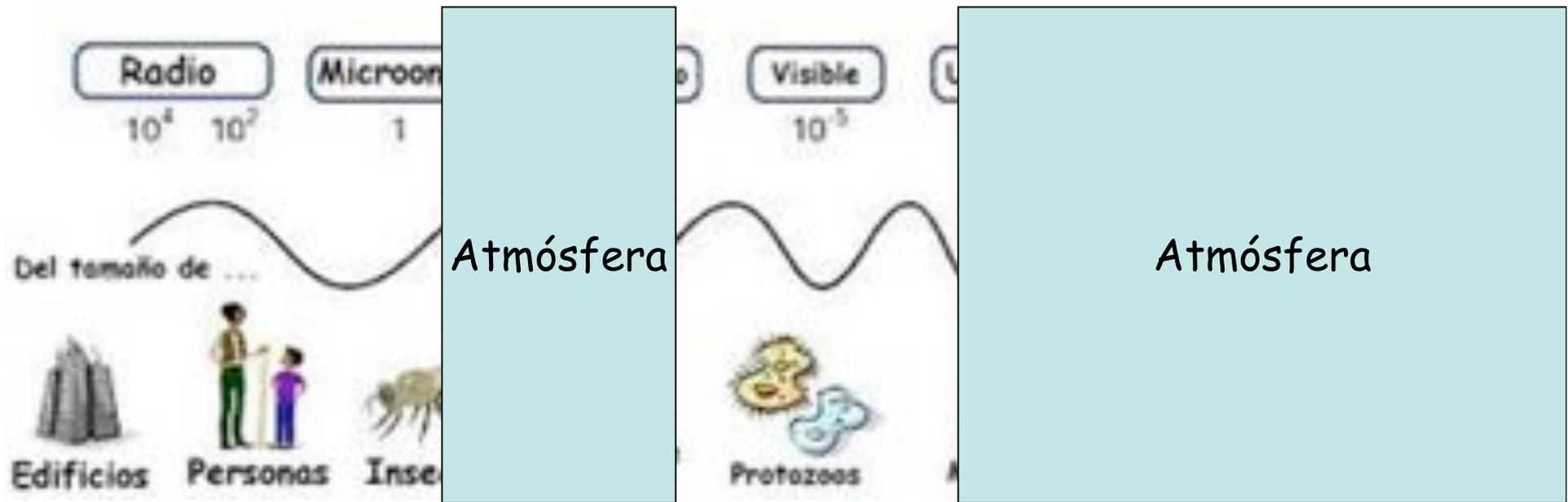
Infrarrojo lejano



Rayos X



Espectro electromagnético entero



Gas y partículas frías

Hidrógeno
atómico

Polvo interestelar

Moléculas

Estrellas

Gas caliente

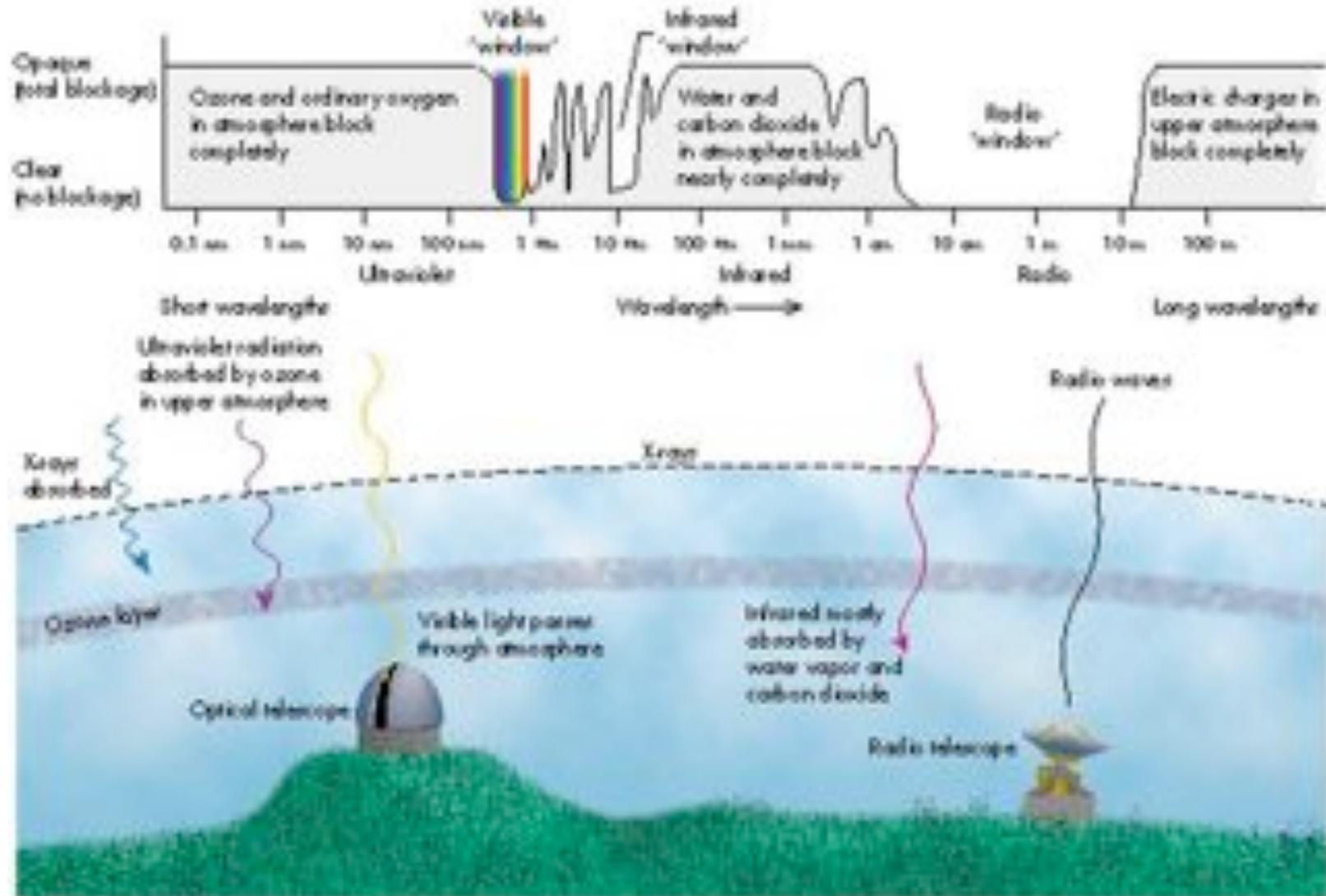
Gas muy caliente

Procesos relativistas:

-estrellas de neutrones

-agujeros negros

Absorción atmosférica



Consecuencias para telescopios

Visible:
Telescopios pueden estar en la superficie de la Tierra

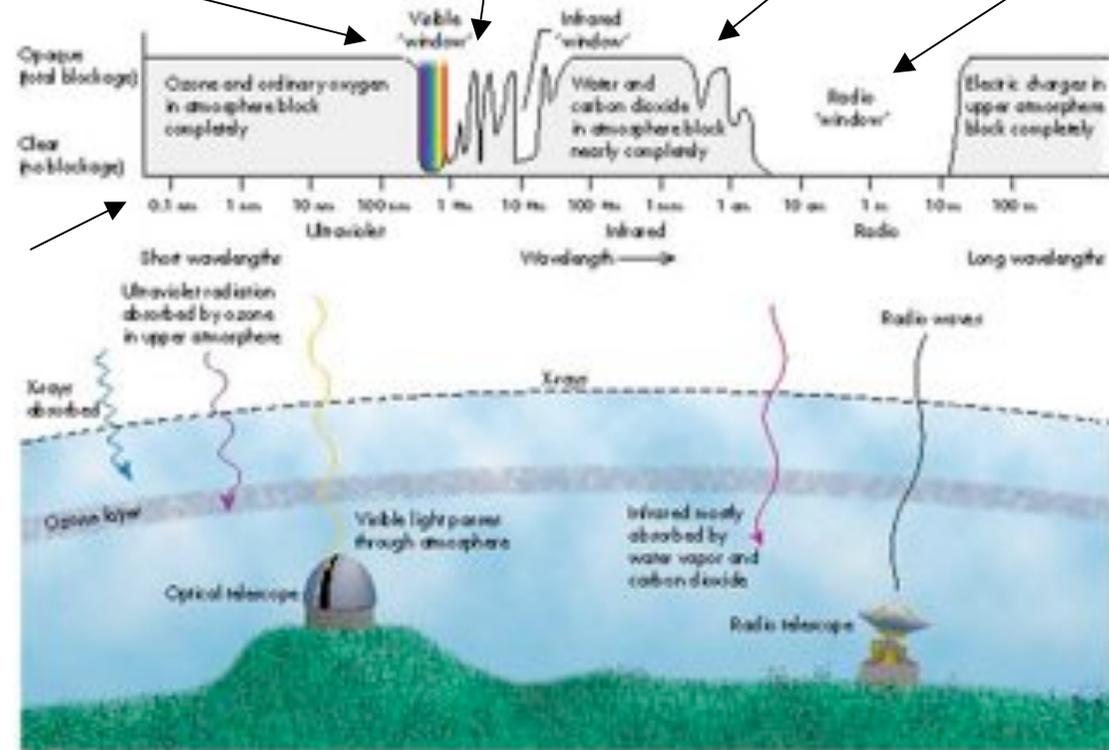
Infrarojo:
Cercano: Se puede observar desde la superficie de la Tierra
Lejana: Se necesitan satélites

Radio mm:
Telescopios a gran altura, en lugares secos .
Satélites ayudan

UV: Satélites, cohetes, globos

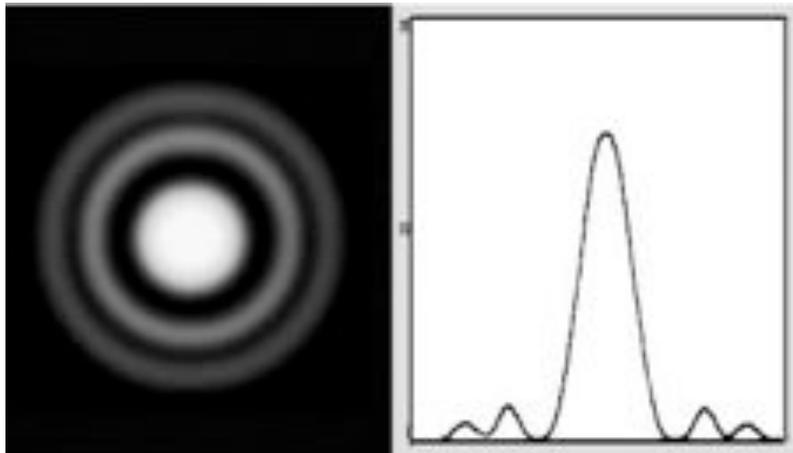
Radio cm: Telescopios pueden estar a la altura del mar

Rayos x y gamma:
Satélites, cohetes



¿Qué tiene que conseguir un telescopio?

1. Hacer **la imagen más brillante**, captar muchos fotones.
 - El número de fotones captados es proporcional a la superficie del telescopio. Un telescopio con 8m de diametro capta 16 veces más fotones que uno de 2m de diametro (es 16 veces más sensible)
→ Lo mejor es hacer el telescopio lo más grande posible
2. **Aumentar la imagen**
3. Hacer la **imagen lo más nítido posible**: tener la mejor posible “resolución angular”
 - En telescopios ópticos: nítidez de la imagen está dado por la estabilidad de la atmosfera, “**seeing**”. Valores típicos: 1 segundos de arco (1/60 veces el diametro de la luna)
 - En telescopios radio: la **resolución angular es un problema** debido al “limite de difracción”

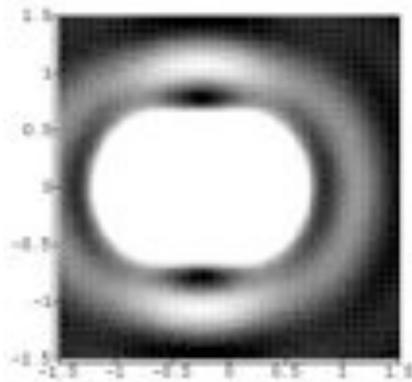


Debido a la difracción una estrella no se ve como un punto sino como un disco rodeado por anillos

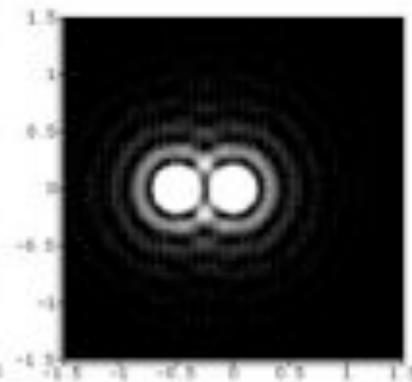
Resolución angular

Resolución angular (distancia en la que dos puntos se pueden ver como separados):

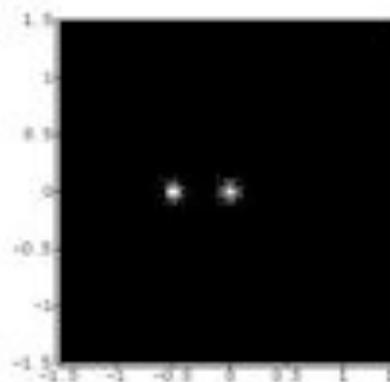
$$\Theta = 1.22 \lambda / D$$



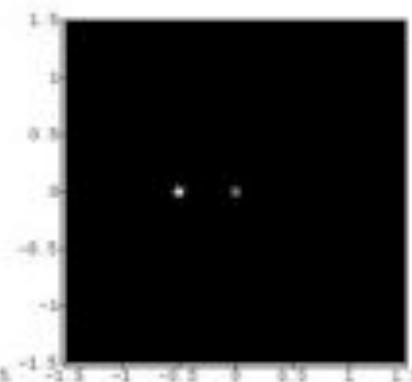
A. Objeto size = 21524 μ (34 μ)
 $\theta_p = 0.000$ arc sec at $\lambda=600$ nm
 integration time = 30 seconds



B. Objeto size = 0.500 μ (20 μ)
 $\theta_p = 0.248$ arc sec at $\lambda=600$ nm
 integration time = 2.7 seconds



C. Objeto size = 2.000 μ (84 μ)
 $\theta_p = 0.0527$ arc sec at $\lambda=600$ nm
 integration time = 7.7 seconds



D. Objeto size = 5.00 μ (200 μ)
 $\theta_p = 0.0208$ arc sec at $\lambda=600$ nm
 integration time = 1.5 seconds

Resolución de un telescopio

$$\text{Limite de resolución} = 1.22 \lambda / D$$

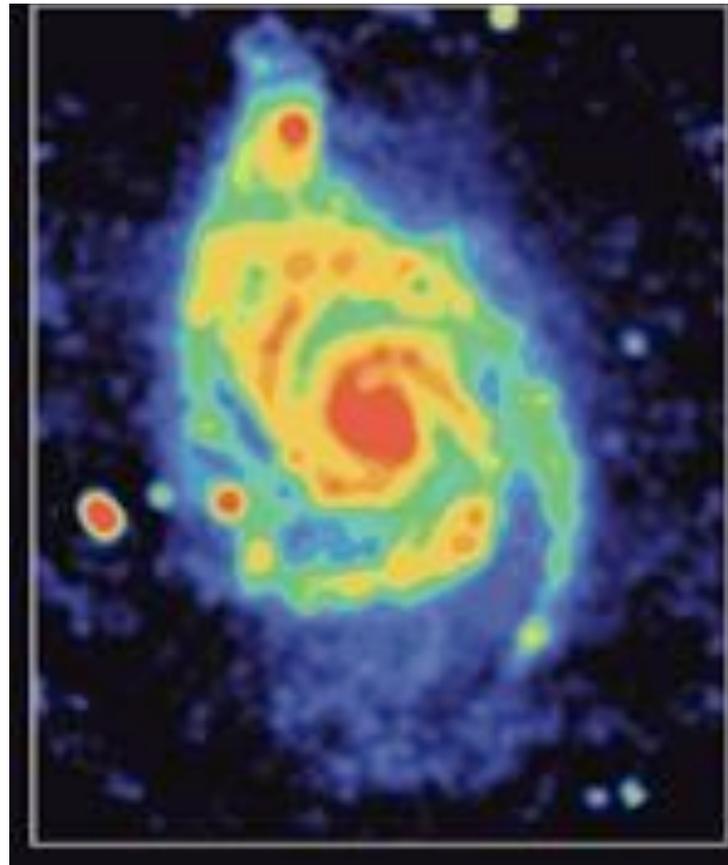
Longitud de onda

Diámetro telescopio

- Visual, p.e. verde: $\lambda = 0.5 \mu\text{m}$, $D=1\text{m} \rightarrow 0.13 \text{ arcsec}$
- "Seeing" de la atmósfera: $\sim 1 \text{ arcsec}$
- \rightarrow Resolución de telescopios ópticos está siempre limitado por seeing

- Radio, p.e.: $\lambda = 21\text{cm}$ (HI), $D=100\text{m} \rightarrow 530 \text{ arcsec}$
- \rightarrow Resolución en radio es mucho peor
- \rightarrow Interesa hacerlos lo más grande posible

Imagen visible y en radio de M51



Radioastronomía



Algunos radiotelescopios

Effelsberg, $D = 100\text{m}$
(cerca de Bonn, Alemania)

Gran tamaño puede ser un problema....

Telescopio de Greenbank de 100m colapsó en 1988 después de estar en uso durante más de 20 años.



Radiotelescopios

Arecibo, $D = 305\text{m}$
(Puerto Rico),

Solo puede observar
rango restringido en
el cielo.



Radio interferómetros

Very Large Array (VLA) (New Mexico, EEUU):

- Funcionando desde 1981
- 27 antenas con 25m diámetro cada uno
- Máxima distancia: 36km



Telescopios milimétricos



- IRAM (Instituto de Radioastronomía milimétrica)
- Organismo Alemán-francés-español fundado en 1979
- Dos instrumentos:
 - Antena de 30m en Sierra Nevada:
 - Interferómetro Plateau de Bure en los Alpes Franceses
 - Observan entre 1 y 3mm

Futúro: Atacama Large Millimeter Array (ALMA) en el desierto de Atacama en Chile (a 5000m de altura)



- Proyecto conjunto entre EEUU, ESO, Japón
- Consistirá de 64 antenas de 12m de diametro





SOFIA - Stratospheric Observatory for Infrared Astronomy

- Proyecto de NASA y DLR (Alemania)
- Telescopio de 2.5m en Boing
- Instalación de telescopio en marcha. Terminación previsto en 2011
- Rango de observación: $0.3\mu\text{m}$ - 1.6mm
- Exactitud de puntería: 1 seg. de arco





Satélites en Infrarrojo

Satélite Spitzer:

- Observaciones entre 3 y $160\mu\text{m}$

Lanzados en Mayo 2009 dos satélites europeos:

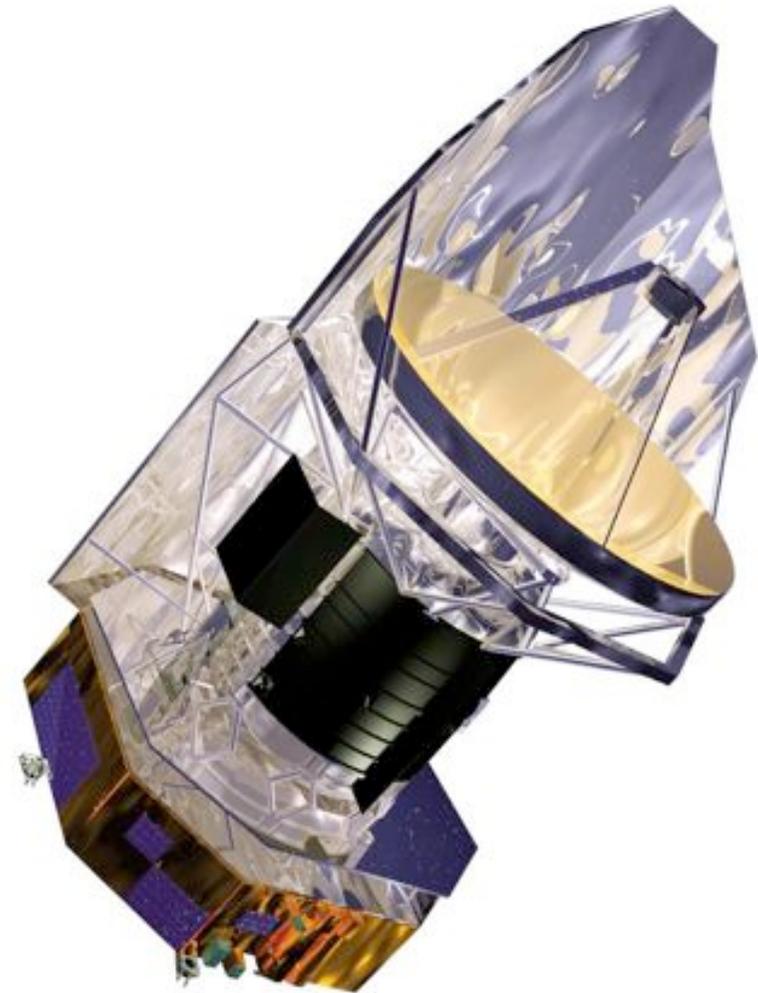
Satélite Herschel:

Observaciones en submilimétrica ($60\text{-}600\mu\text{m}$)

Satélite Planck:

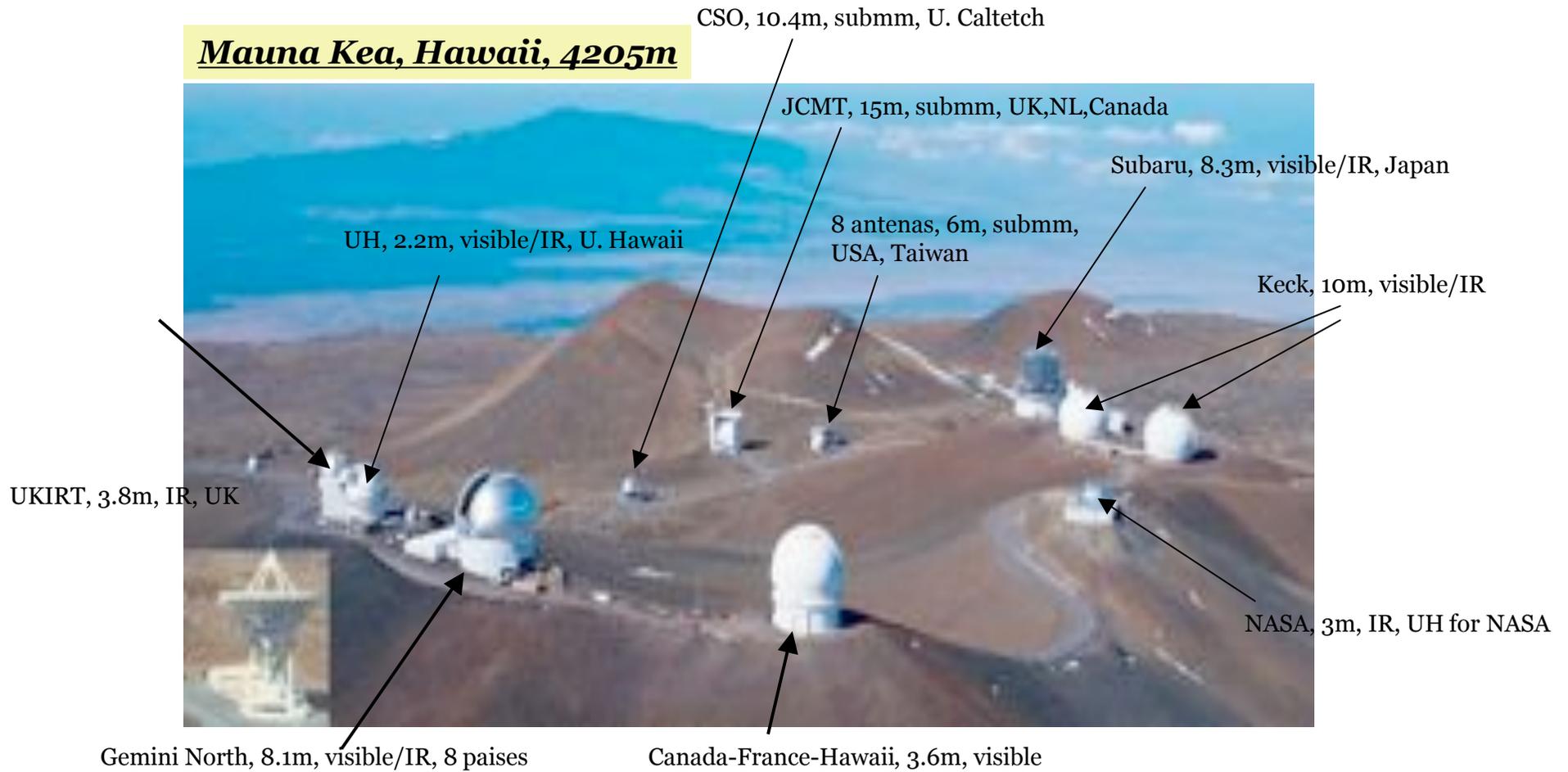
Barrido en todo el cielo

Participación de la Universidad Granada



Los sitios más importantes con telescopios

Mauna Kea, Hawaii, 4205m



Roque de los Muchachos, La Palma, 2400m

UK,NL,España



TNG, 3,9m, visible/IR
Italia

GTC, 10m, visible/IR

NOT, 2.5 m, visible/IR,
Nórdico

INT, 2.5 m, visible/IR,
UK,NL,España

Además:

- MAGIC, 2 x 17m Cherenkov telescope
- Torre solar sueca + Torre Holandesa
- experimento SUPERWASP
- Mercator telescope, 1.2m,Bélgica
- Liverpool robotic telescope, 2m
- The Carlsberg Meridian Telescope

España

Calar Alto, Almería, 2170m

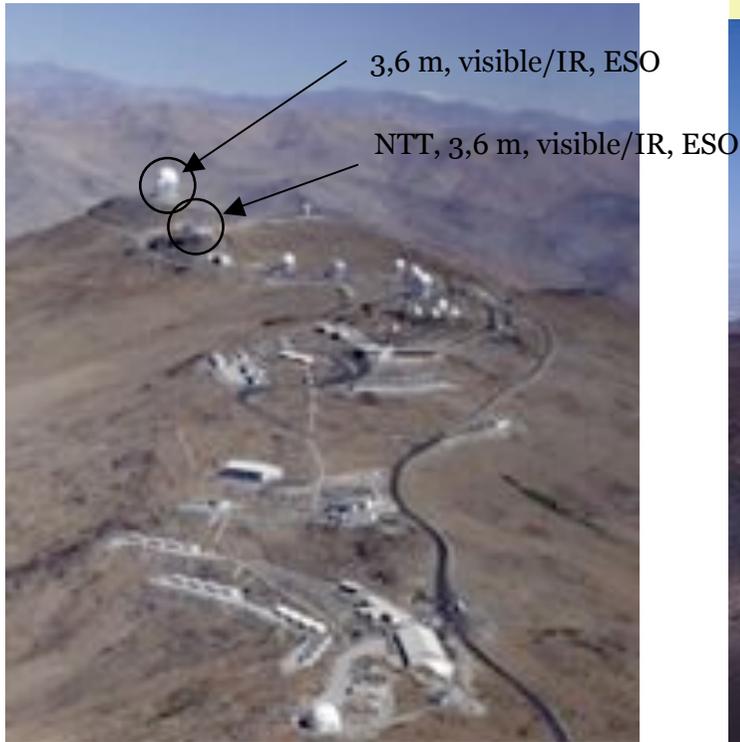
2.2 m, visible/IR,
Alemania+España

3.5 m, visible/IR, Alemania+España



1.23 m, visible/IR, Alemania+España

La Silla, Chile, 2400m

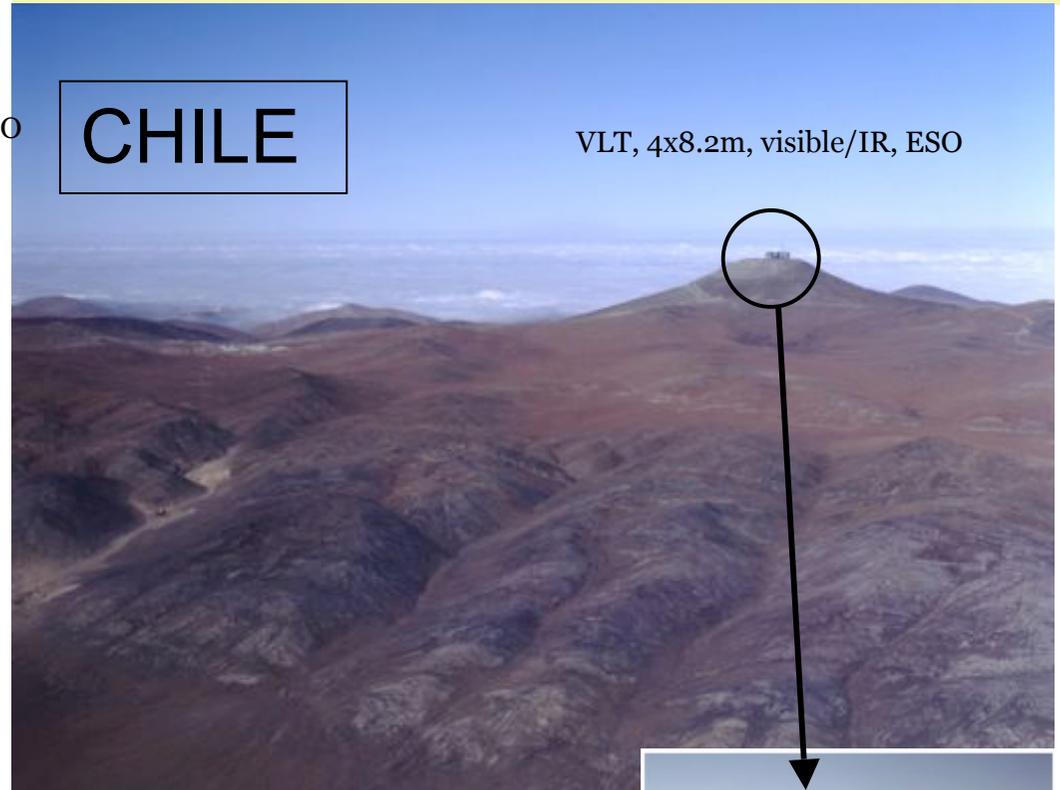


3,6 m, visible/IR, ESO
NTT, 3,6 m, visible/IR, ESO

Latitude 29° 15' south & Longitude 70° 44' west

© ESO Education & Public Relations Department

Cerro Paranal, Desierto de Atacama, Chile, 2600m



CHILE

VLT, 4x8.2m, visible/IR, ESO

Array de antenas 12 m, submm, ESO

© ESO Education & Public Relations Department



The VLT Array on the Paranal Mountain

ESO PR Photo 14a/01 (24 May 2000) © European Southern Observatory

Cerro Pachón, Chile, 2740m



SOAR 4.1 m, visible/IR, Barzil, USA
Gemini South, 8.1m, visible/IR

Latitude 30° 14' 16.8" S & Longitude 70° 44' 01.4" W

Además,

- Las Campanas (Magellan, 2 x 6m, USA)
- Cerro Tololo (CTIO)

Telescopio óptico en el espacio: Hubble Space Telescope

- Es el único satélite en el rango visible
- Funciona desde 1990, y bien desde 1993
- Observa UV → IR
- Diámetro del espejo: 2.4m
- Resolución angular: $\approx 0.1''$

Sucesor: **James Webb Space Telescope**

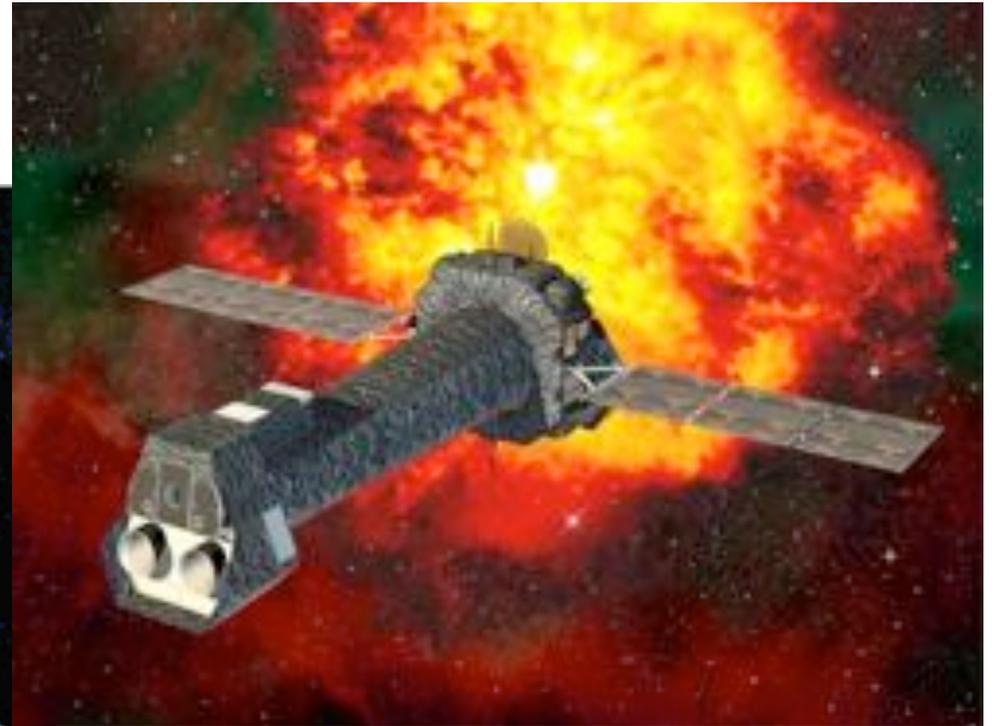
- Telescopio con espejo de 6.5m
- Observa solamente en IR para ser sensible para objetos lejanos
- Lanzamiento previsto en 2013



Telescopios de rayos x y gamma



Compton Gamma Ray Observatory (CGRO)



Satélite XMM (rayos x)

Aplicaciones

- ¿Que veríamos si nuestros ojos estuvieran sensibles a rayos X
 - desde la superficie de la tierra?
 - desde la luna?
- Y si nuestros ojos estuvieran sensibles a ondas radio?
- Tienes 100 millones de Euros (es decir: mucho, pero limitado) para construir un telescopio óptico. ¿Qué criterios sigues para construirlo? Considera:
 - ¿Ponerlo en la superficie de la tierra o en el espacio? ¿Cómo escogerías el sitio?
 - ¿Que tamaño tendría el espejo?
 - ¿Que harías si tuvieras dinero ilimitado?

Mecanismos de radiación

- Emisión continua
 - Emisión térmica (o emisión de un "cuerpo negro")
 - Otros:
 - Radiación sincrotrón
 - Emisión radio térmica
- Líneas espectrales de átomos y moléculas

Emisión de cuerpo negro

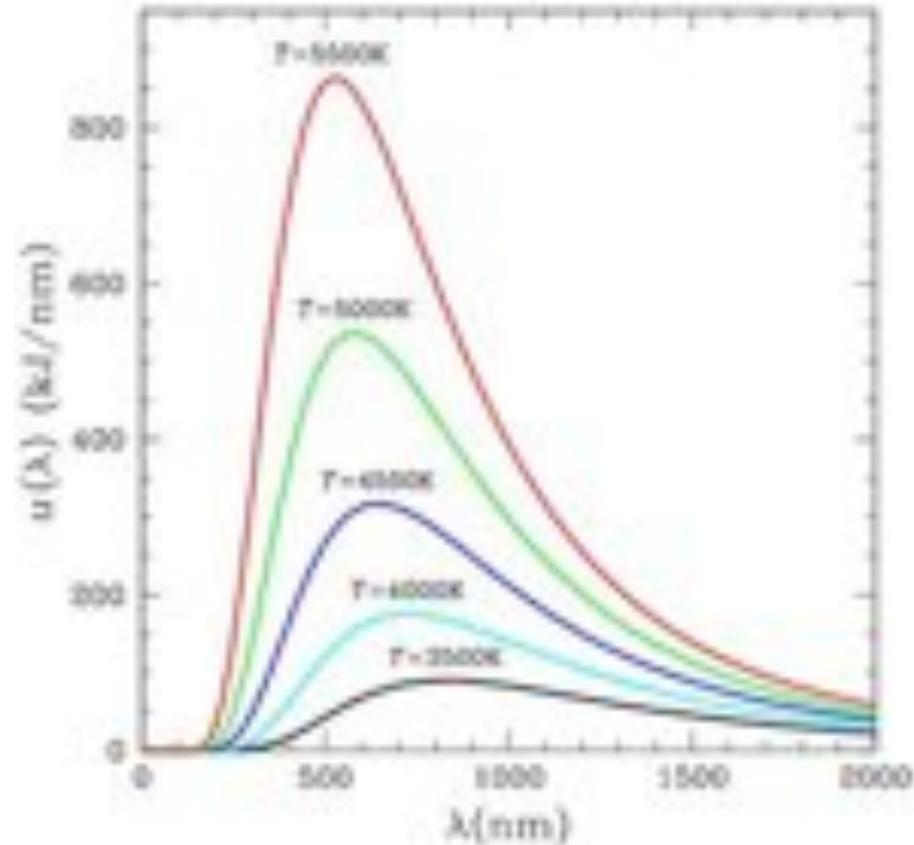
Cuerpo negro ideal: Cuerpo que absorbe toda la radiación que entra. Es un **absorbente y emisor perfecto**.

Los fotones que emite están en equilibrio termodinámico (la emisión se llama también "emisión térmica")

El cuerpo negro tiene una **temperatura determinada** espectro depende solamente de la temperatura.

Ejemplos:

- Buen cuerpo negro: gráfita
- Mal cuerpo negro: espejo

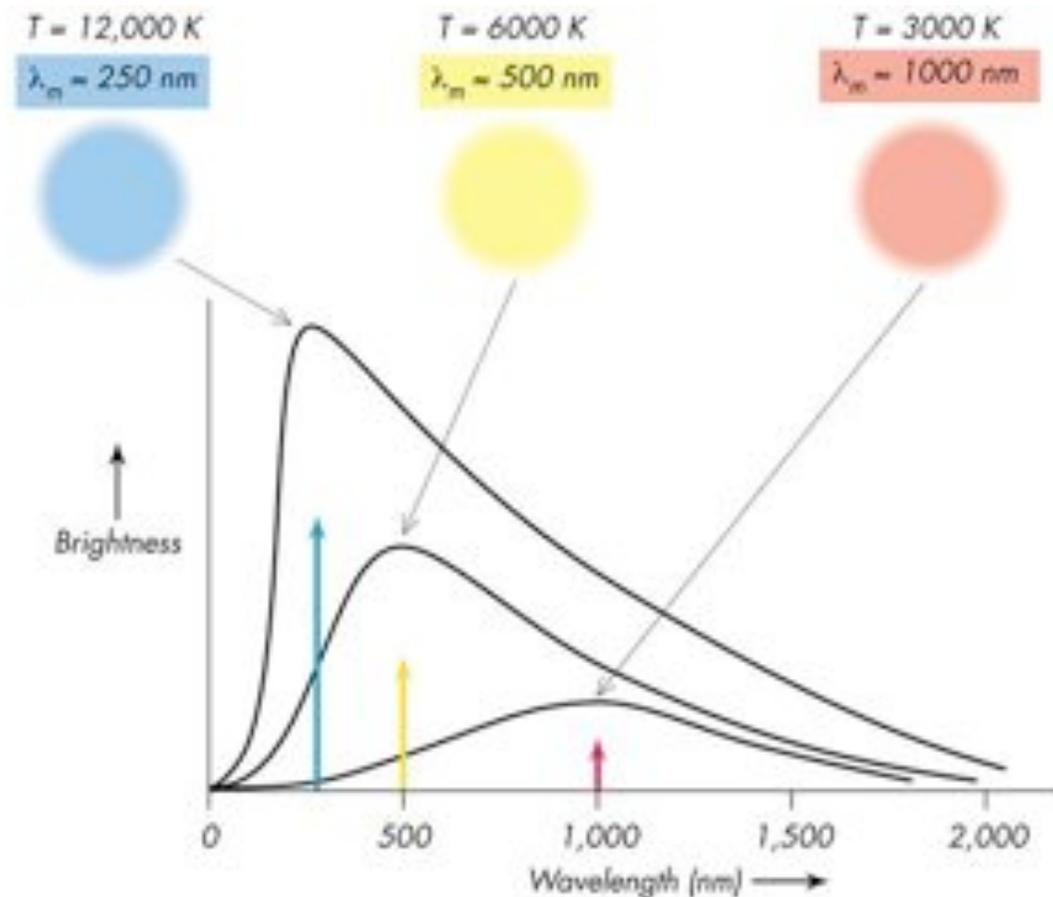


El espectro que emite depende solamente de la temperatura.

Emisión continua de un "cuerpo negro"

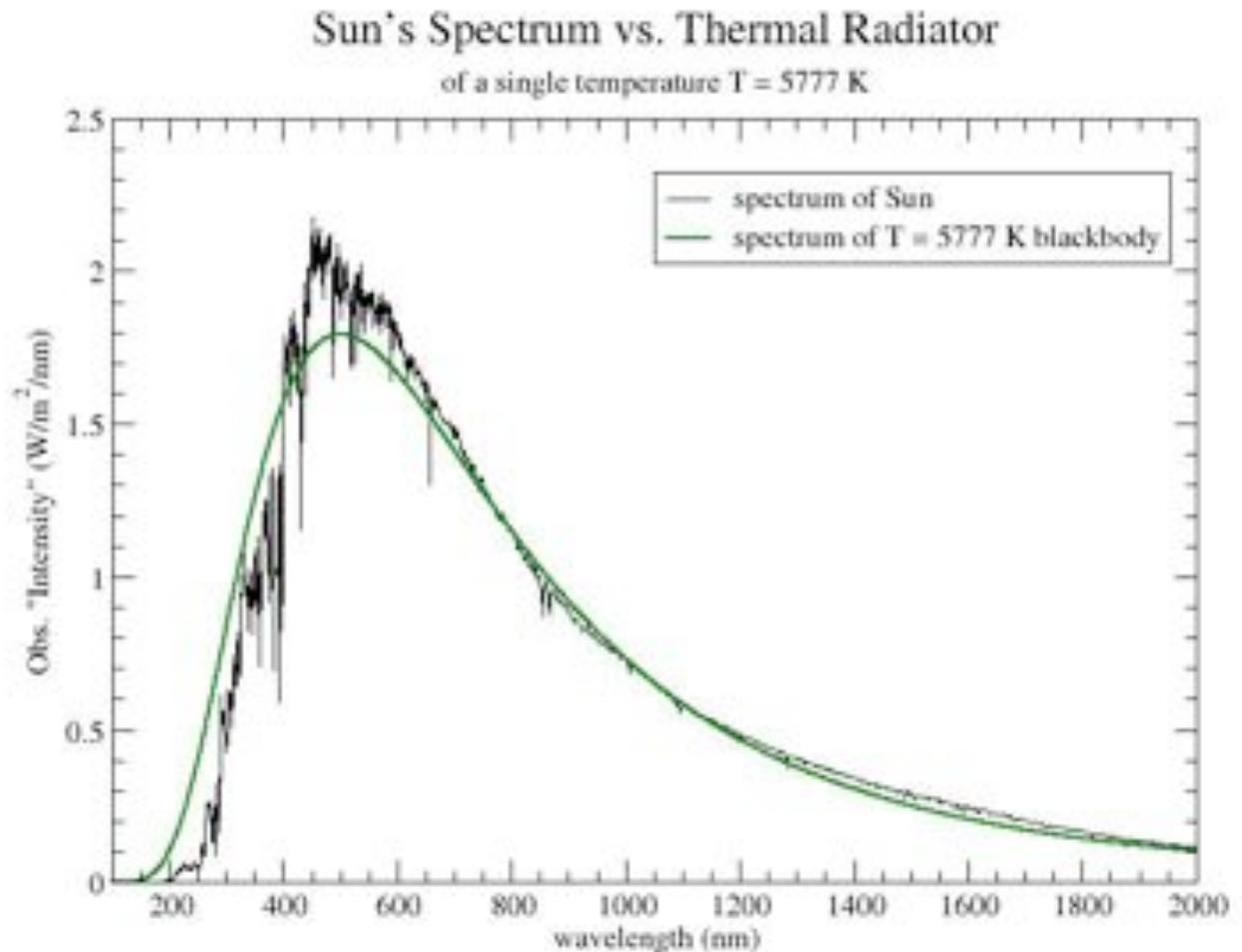
Propiedades de la emisión:

- T más alta:
 - Emite más energía por superficie (proporcional a T^4)
 - Maximo de la emisión se mueve hace longitudes de ondas cortas
- La emisión no depende del material, sino solamente de la temperatura



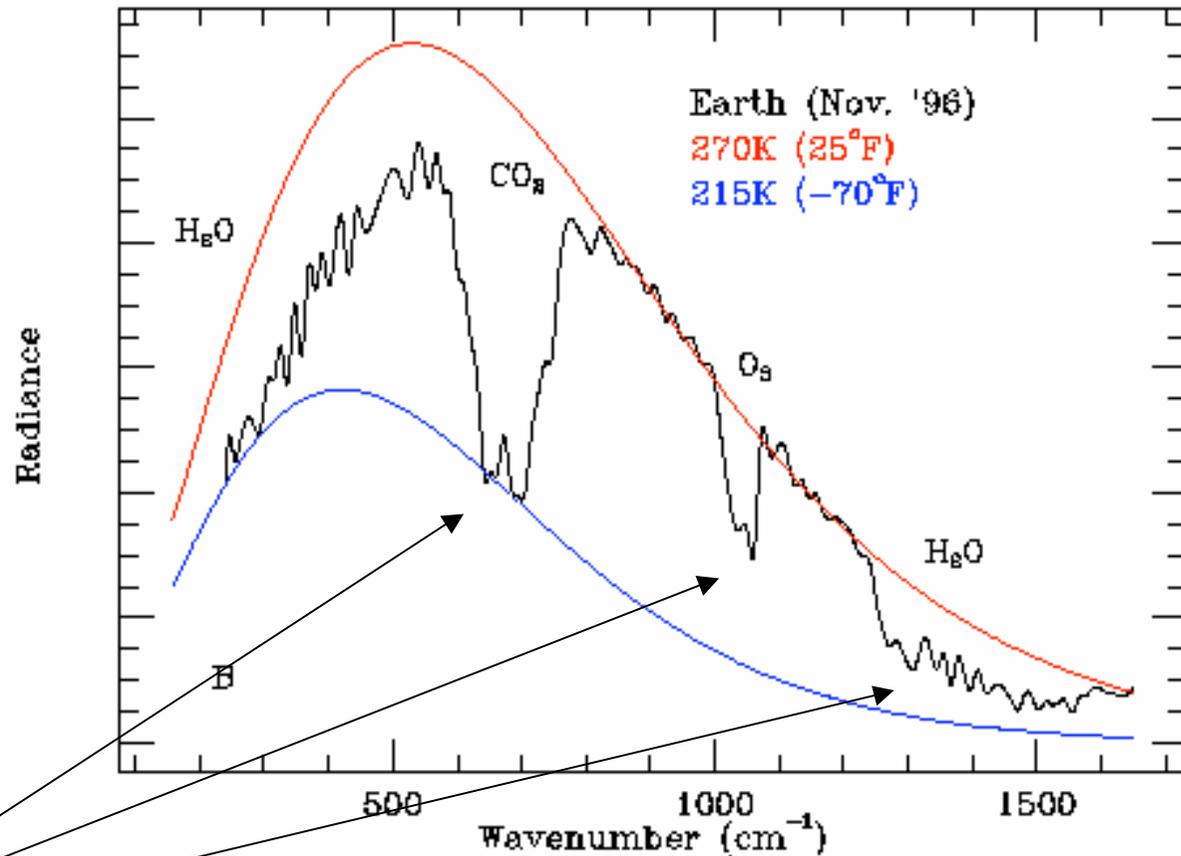
El sol como cuerpo negro

El sol está en una buena (aunque no perfecta) aproximación un cuerpo negro. La radiación que entraría en la superficie, la absorbería.



La tierra como un cuerpo negro

No se un cuerpo negro perfecto, pero se puede aproximar relativamente bien



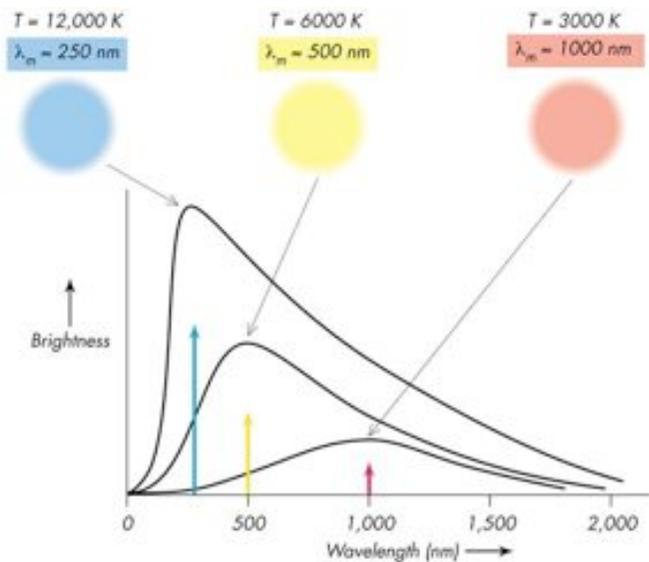
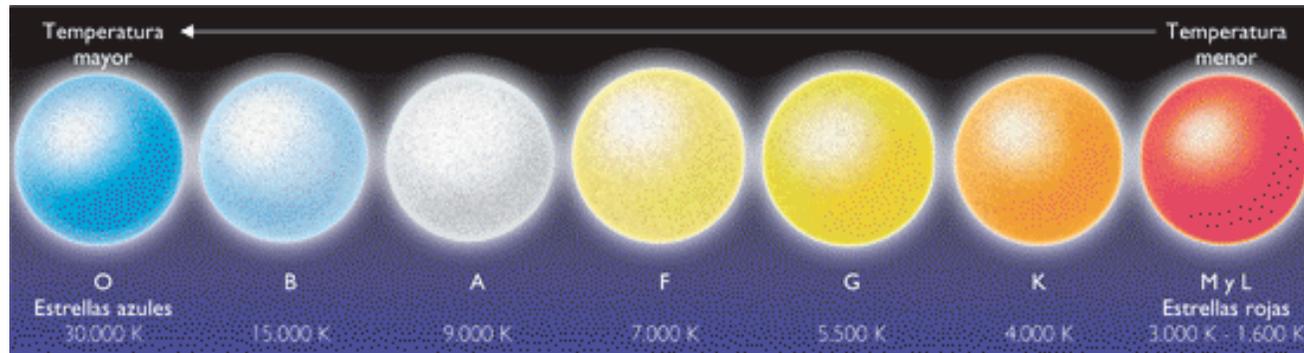
Bandas de absorción

Otros cuerpos como cuerpos negro

- Cualquier cuerpo que es suficientemente opaco (absorbente) es en "buena" aproximacion de un cuerpo negro.



Aplicación: Clasificación de estrellas



Las estrellas tienen diferentes colores (ejemplo Beteigeuze y Rigel en la constelación Orion).

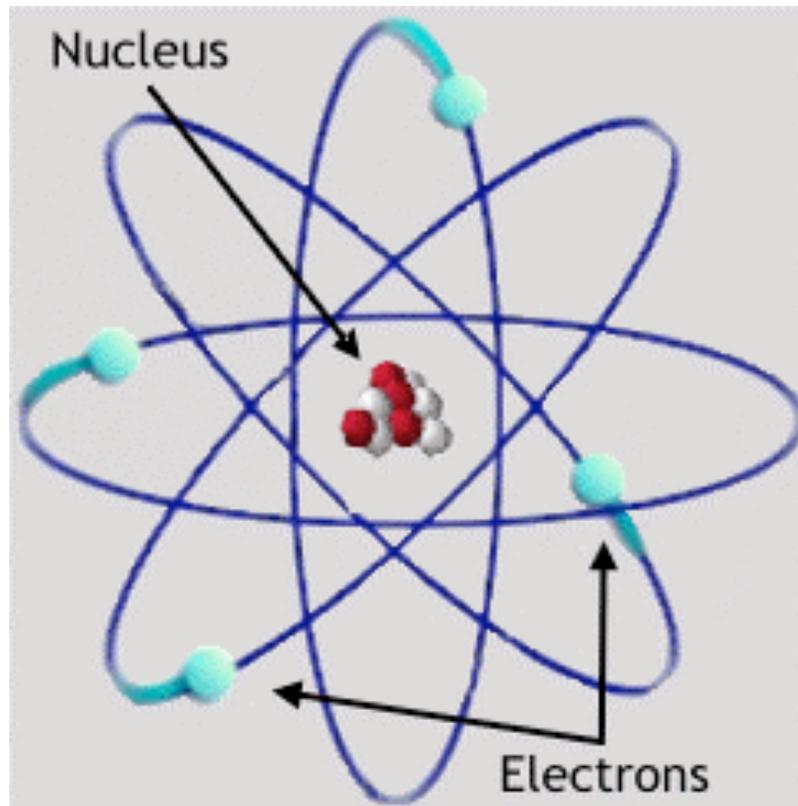
¿Que hay que medir para determinar la temperatura de una estrella? ¿Es suficiente medir una longitud de onda?

Emisión de líneas

Modelo de un átomo.

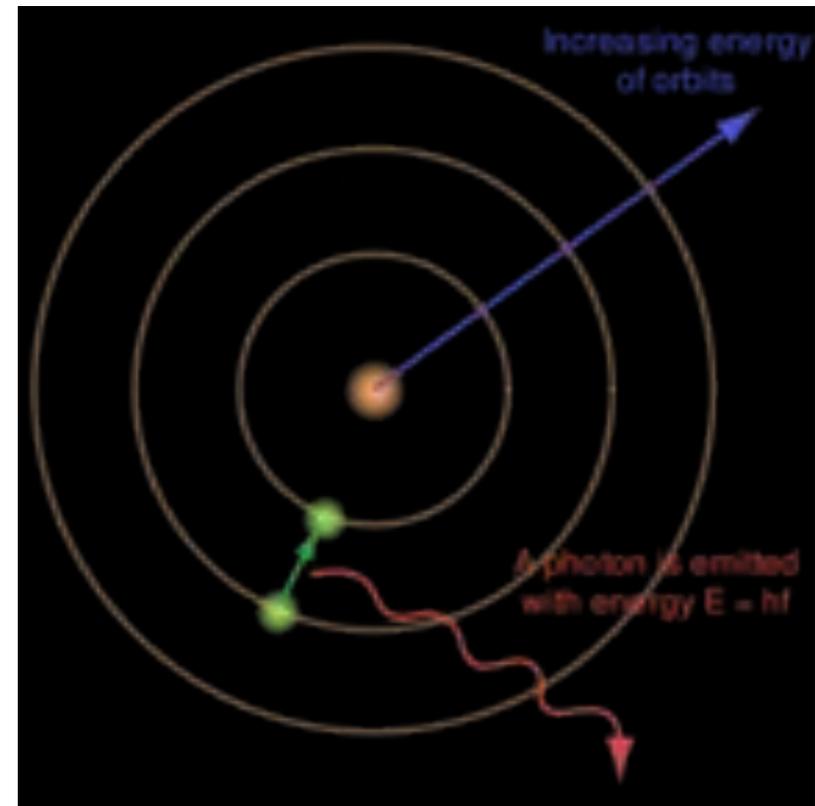
El átomo consiste de:

- Núcleo (protones y neutrones)
- Envoltura de electrones

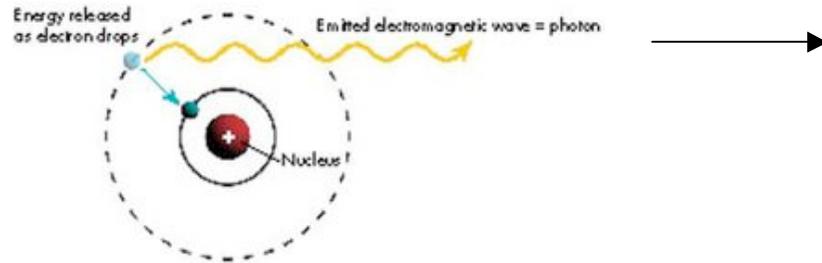


Emisión de líneas:

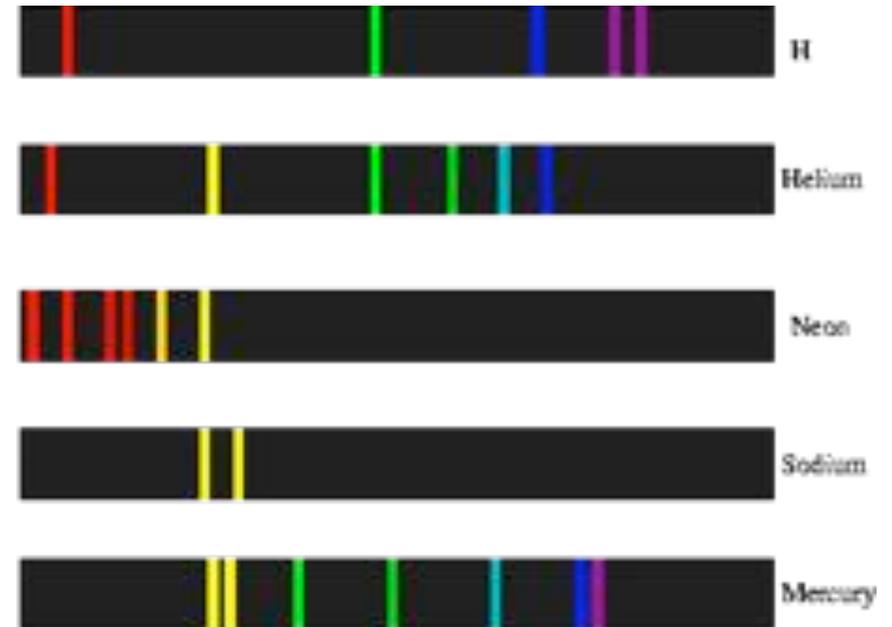
El electrón pasa de un nivel superior a un nivel inferior



Emisión de una línea espectral

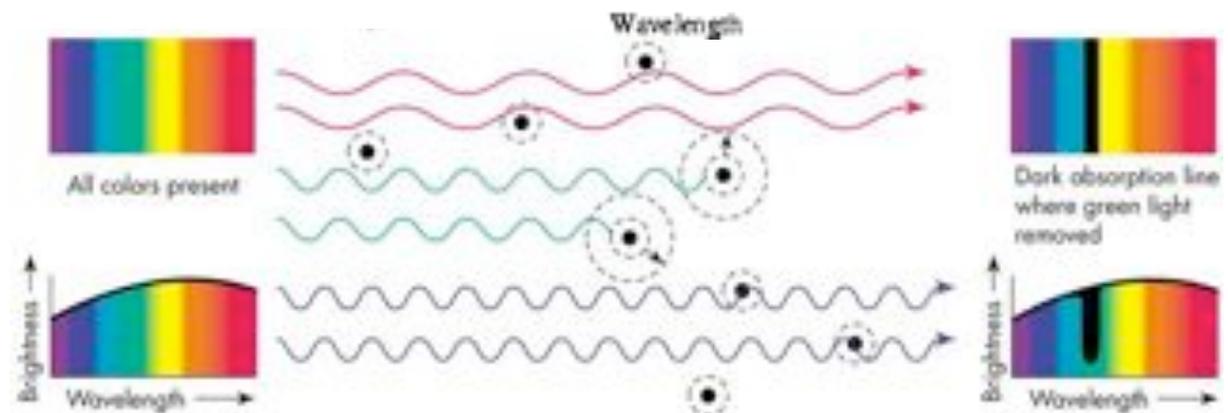


El patrón de las líneas nos dice que elemento lo ha emitido.
(¿Porqué no es suficiente medir la frecuencia de una línea?)

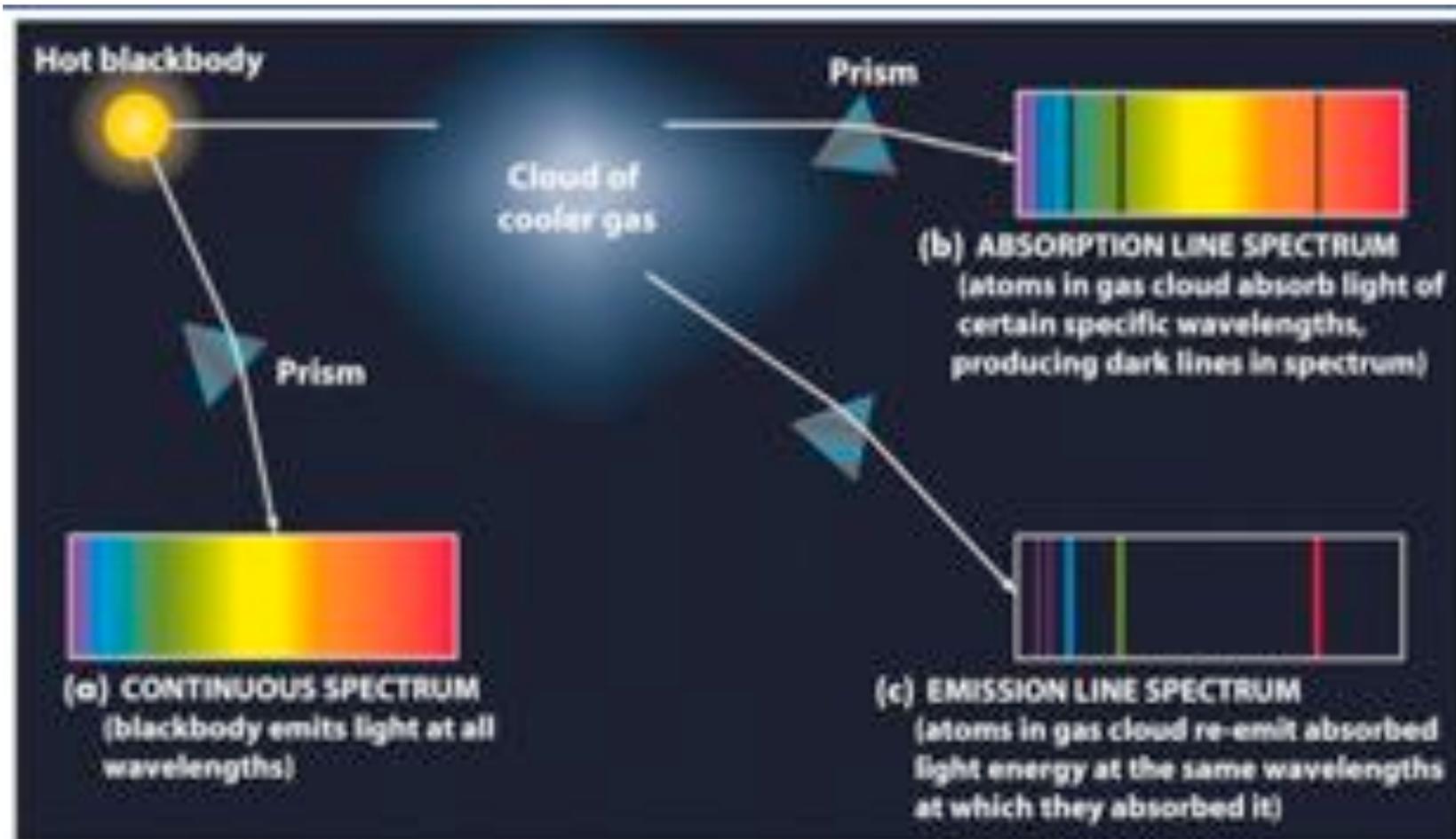


Absorción de una línea:

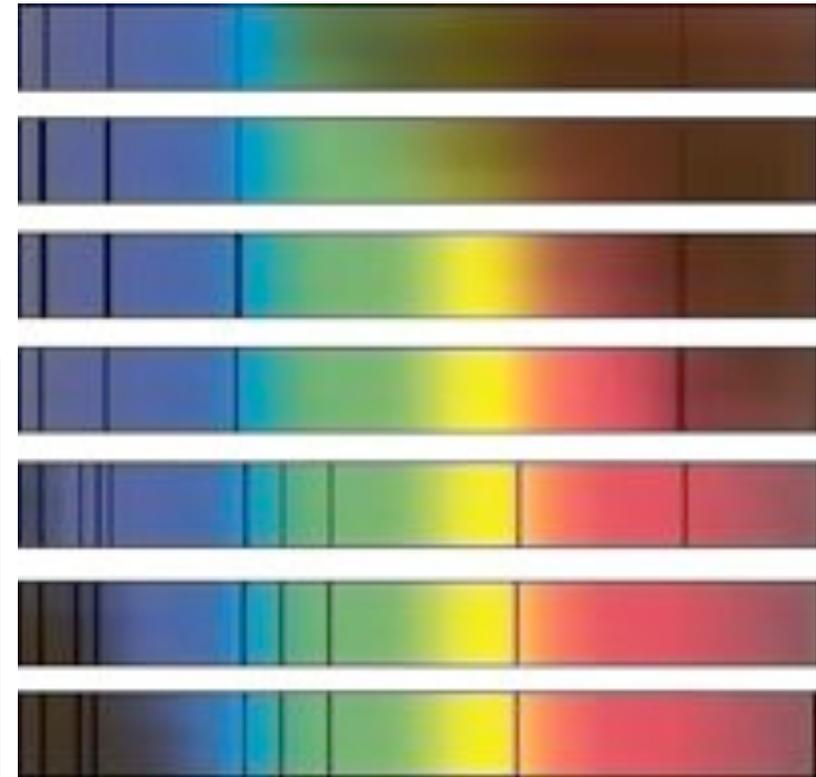
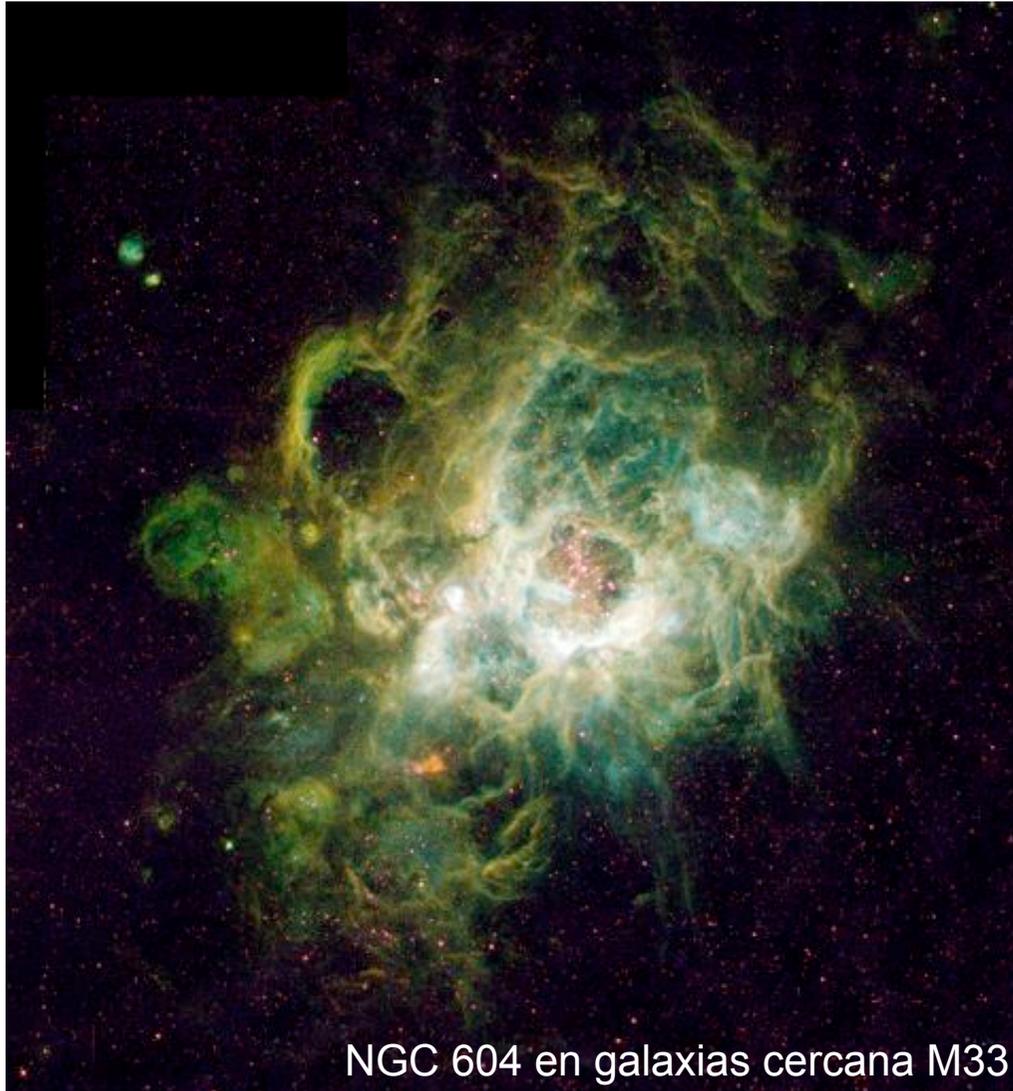
La luz verde tiene justo la longitud de onda para elevar un electrón del nivel 0 al nivel 1 → se absorbe.



Líneas de emisión, de absorción y emisión continua



Ejemplos

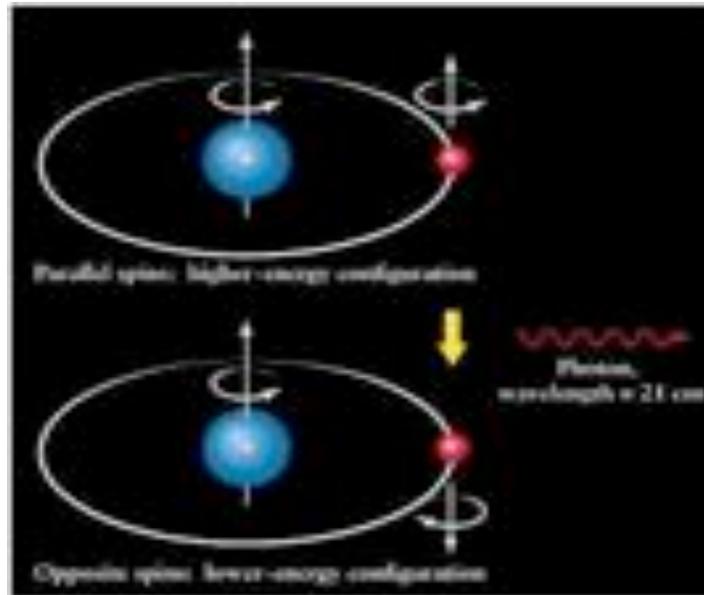


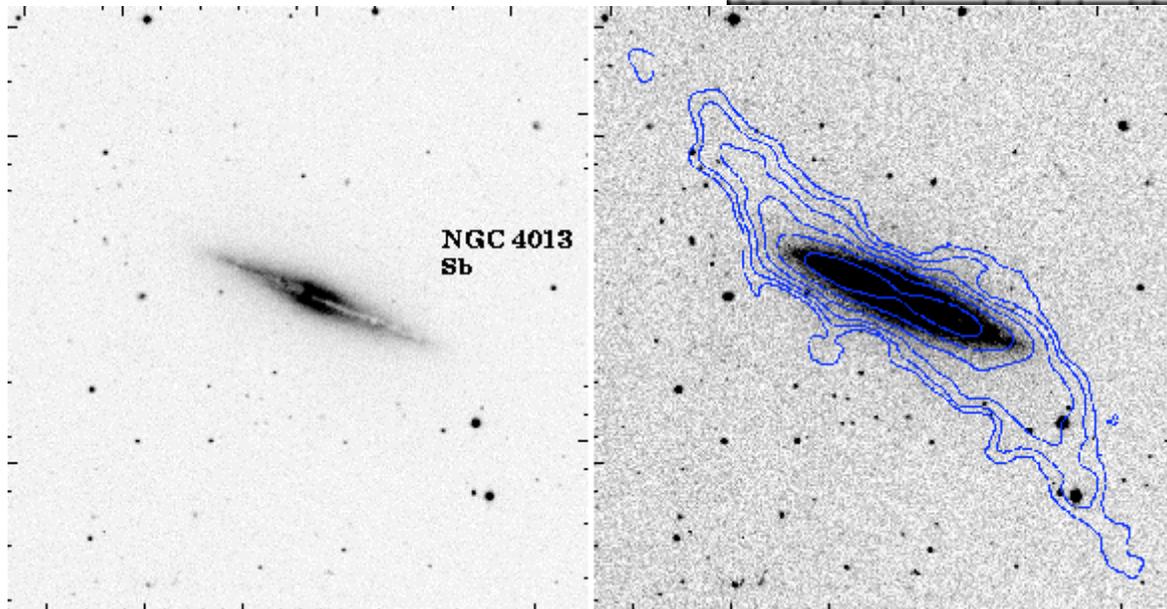
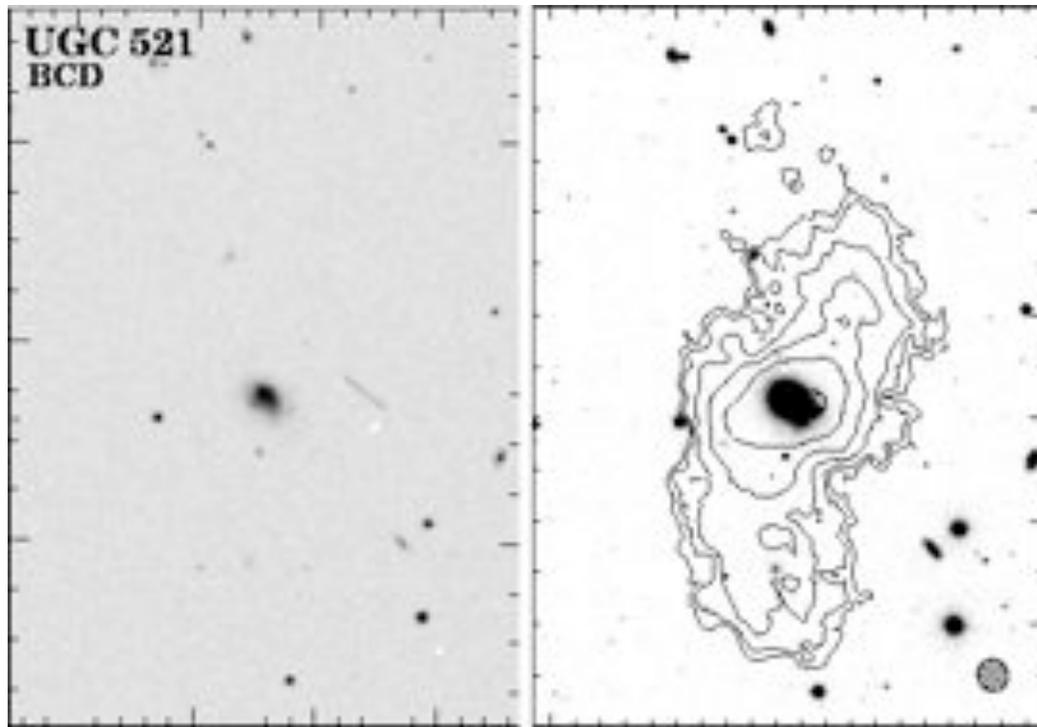
Clasificación de estrellas

Estudio de region de gas ionizado
alrededor de estrella masivas (regiones
HII

Emisión de hidrógeno atómico frío

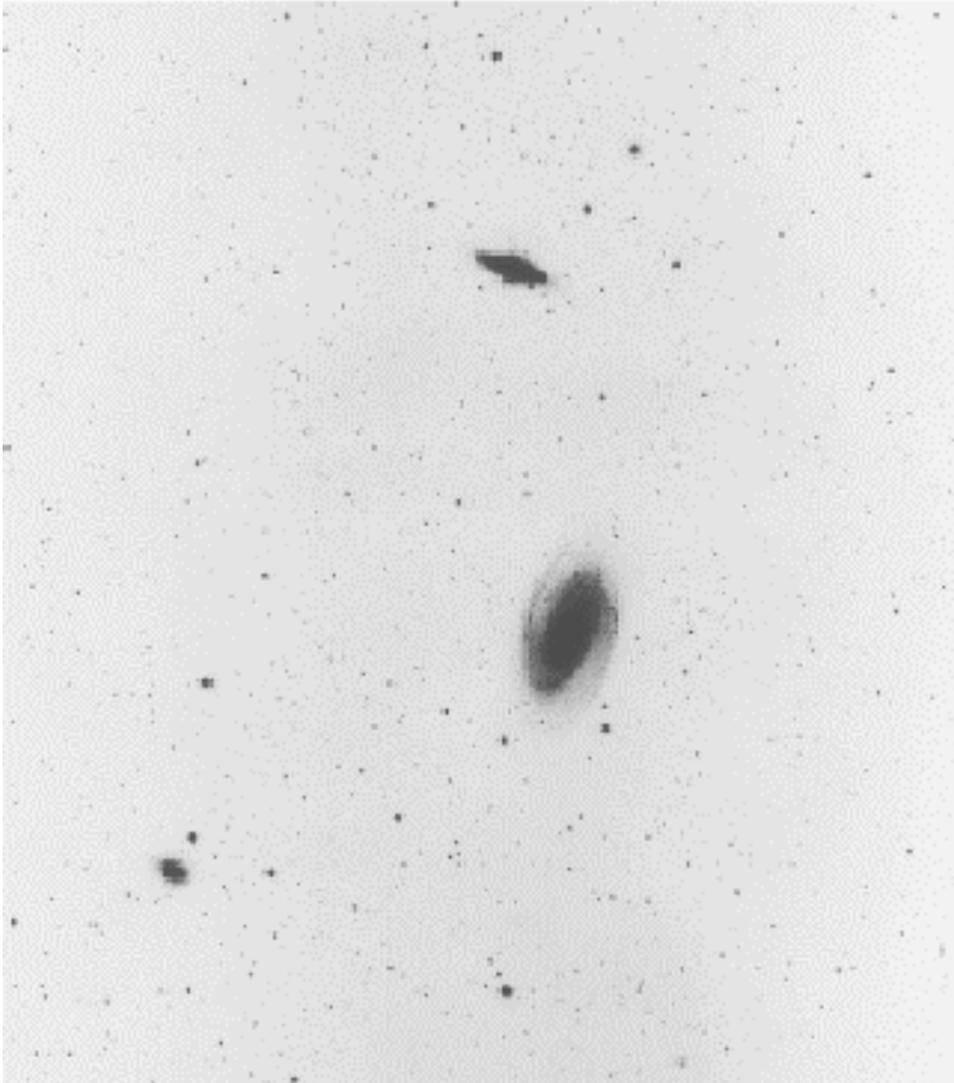
- Cuando es frío, no hay fotones que pueden subir un electron de su envoltura a un nivel superior.
- Existe una transición que necesita muy poca energía, entre los estados de diferentes spin.
- Es también emisión de línea, a 21 cm (en radio)





Imágenes en hidrógeno atómico
pueden ser muy diferentes
de imágenes en el visible

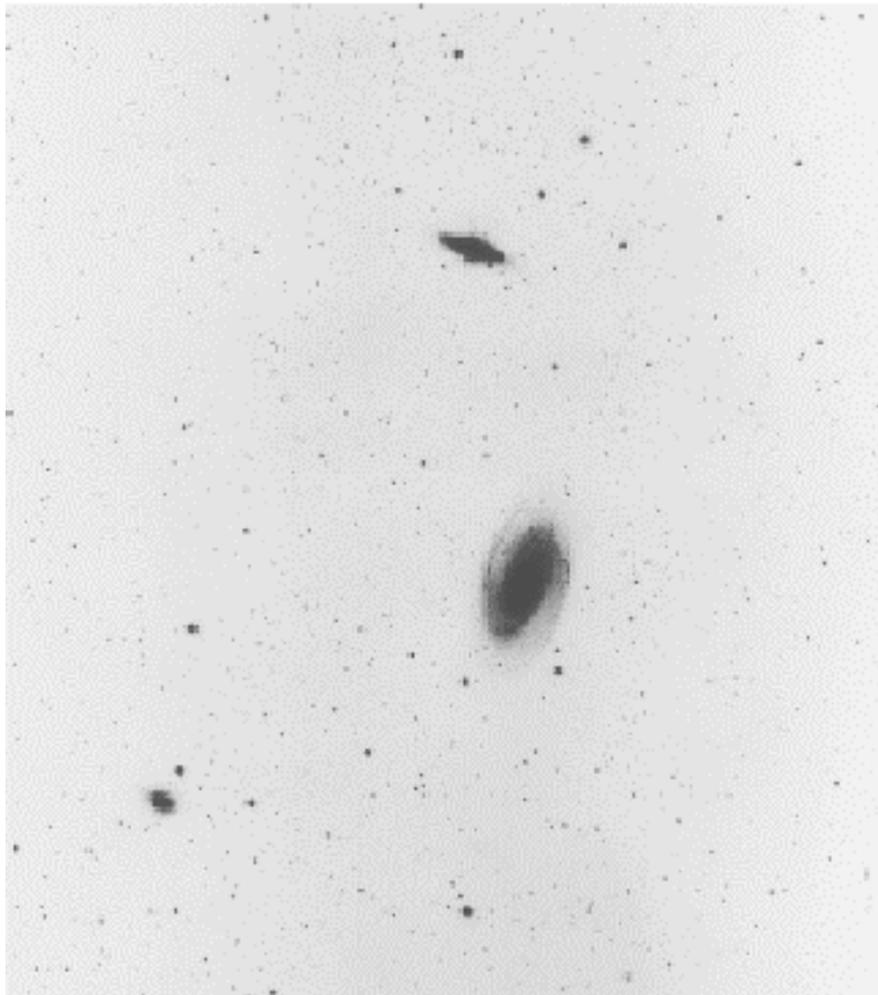
Grupo M81: La observación del gas atómico puede cambiar la imagen



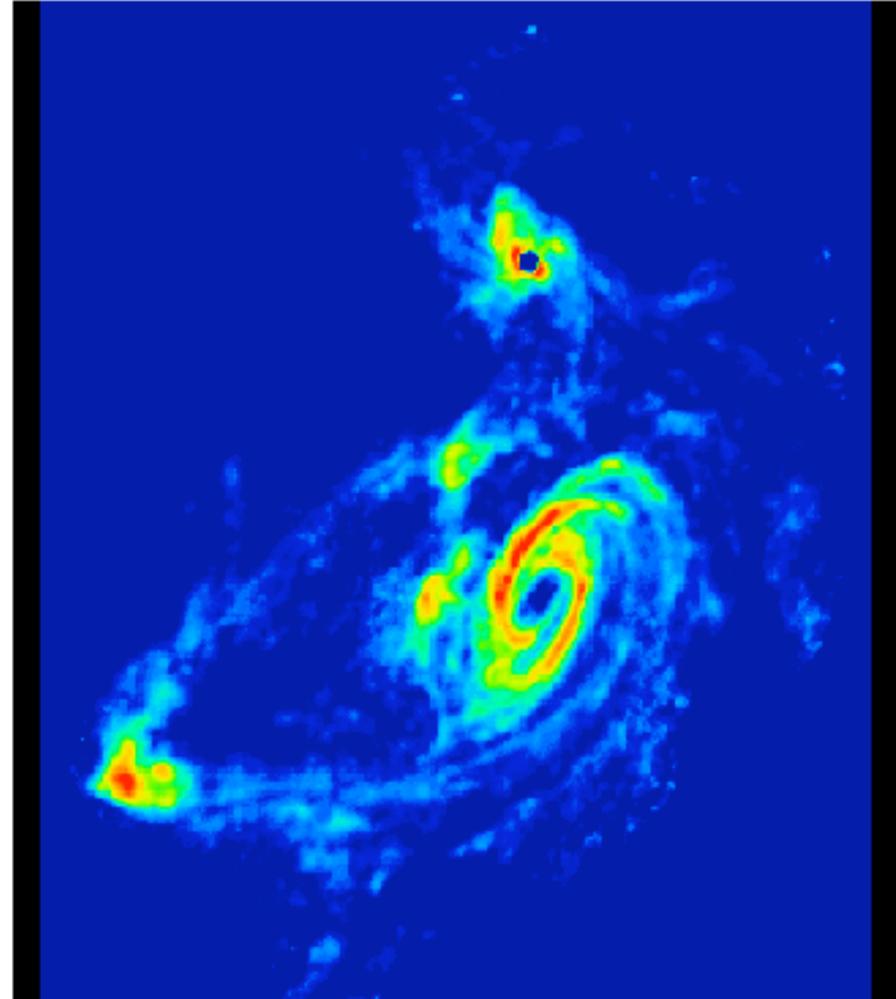
Galaxias en interacción gravitatoria

TIDAL INTERACTIONS IN M81 GROUP

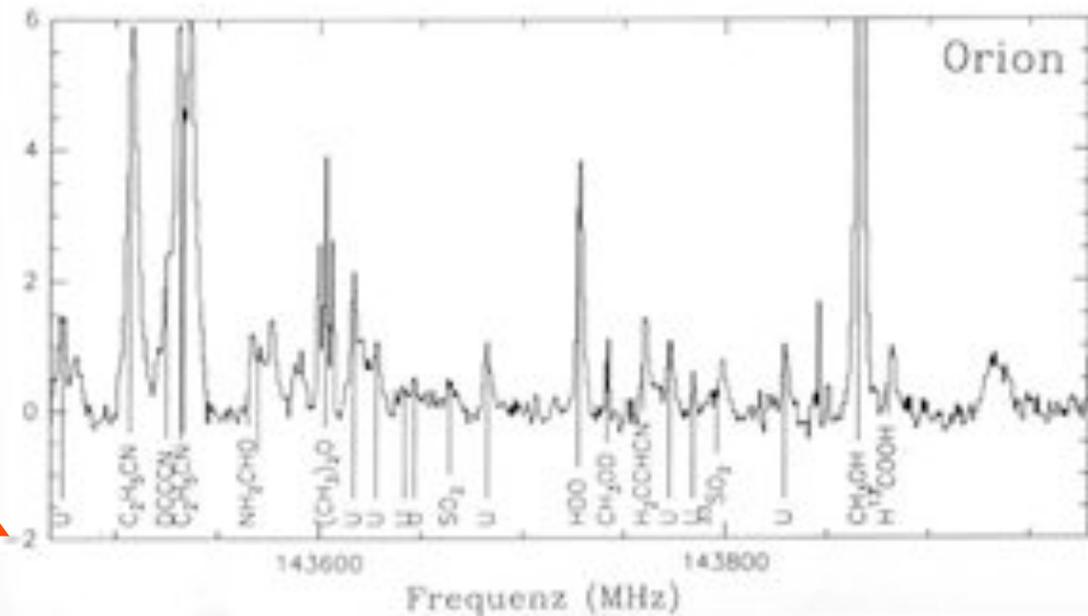
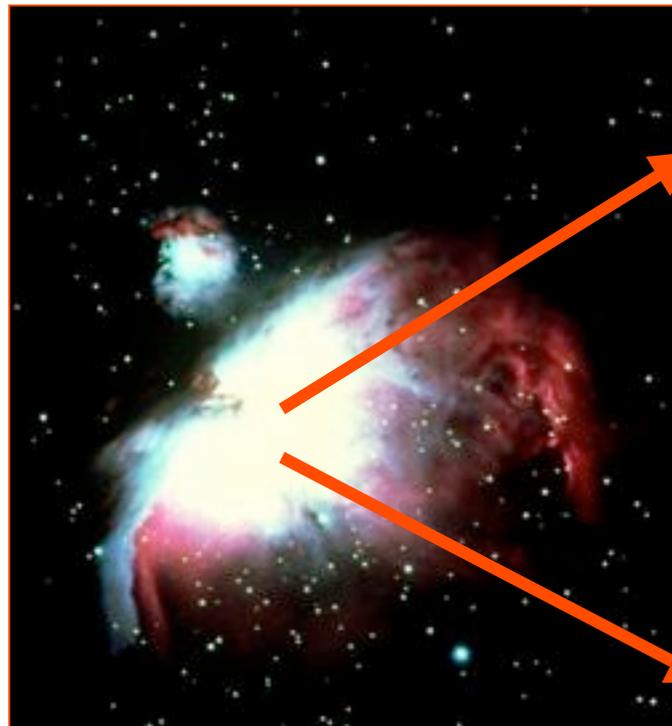
Stellar Light Distribution



21cm HI Distribution



Ejemplo de líneas "rotacionales": Moléculas en en la nube de formación estelar de Orion



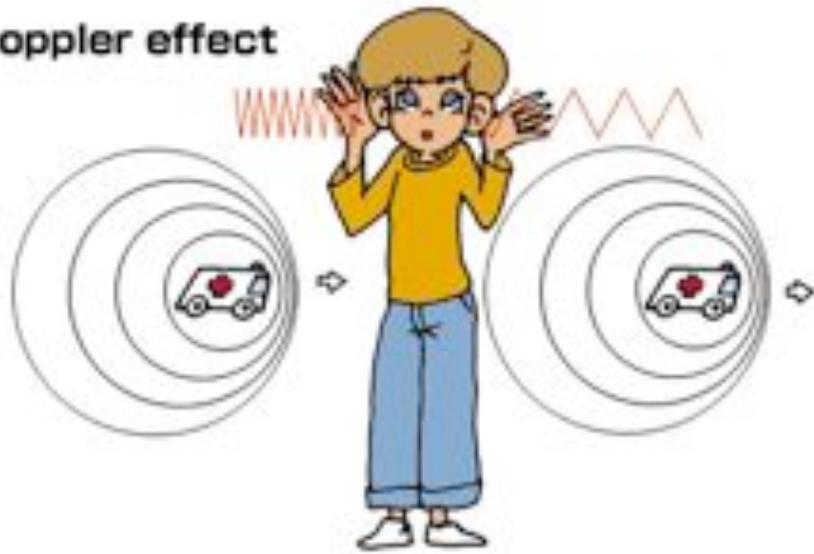
Muchas líneas, permite hacer "astroquímica"

También hay líneas no identificadas

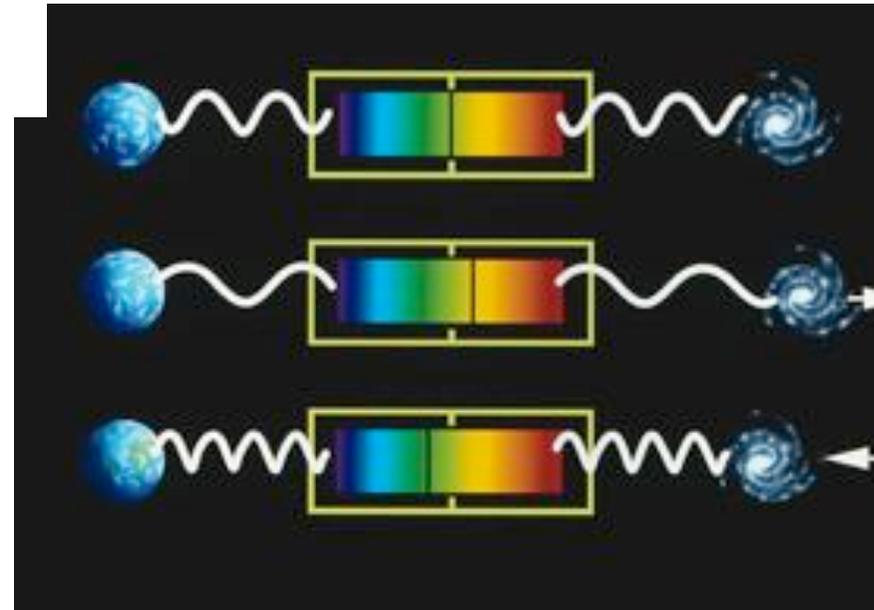
(Mauersberger et al. (Pico Veleta))

Efecto Doppler

Doppler effect



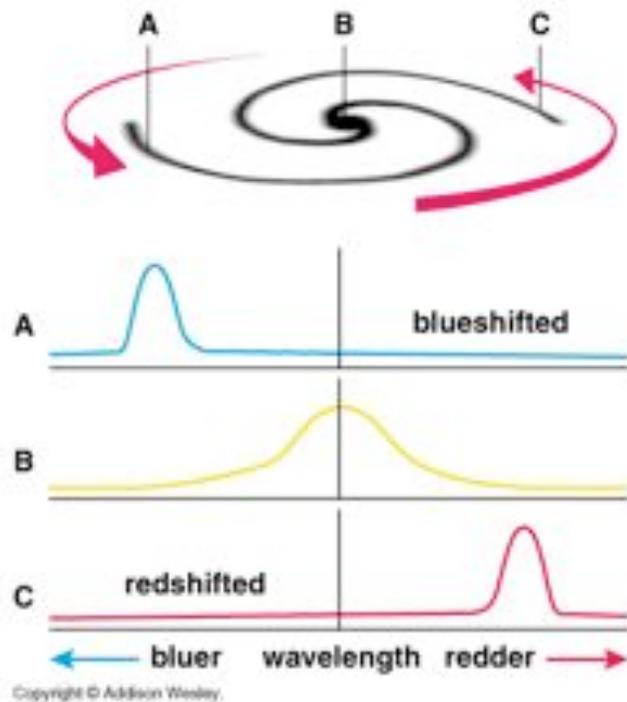
- La observación de una Líneas permite determinar la velocidad del objeto!!



Información que nos dan las líneas

- Frecuencia/patrón de líneas: Qué átomos/moléculas hay
- Frecuencia observada de una línea conocida: con el efecto Doppler nos da información sobre la velocidad de la fuente. Eso nos da, por ejemplo, información sobre:
 - Expansión del universo, distancia de galaxias
 - Rotación de una galaxia, "masa dinámica"
 - Movimiento de objetos dentro de las galaxias
 - Temperatura del gas → movimiento del gas aleatorio → desanchamiento de la línea
 -

Curva de rotación y materia oscura

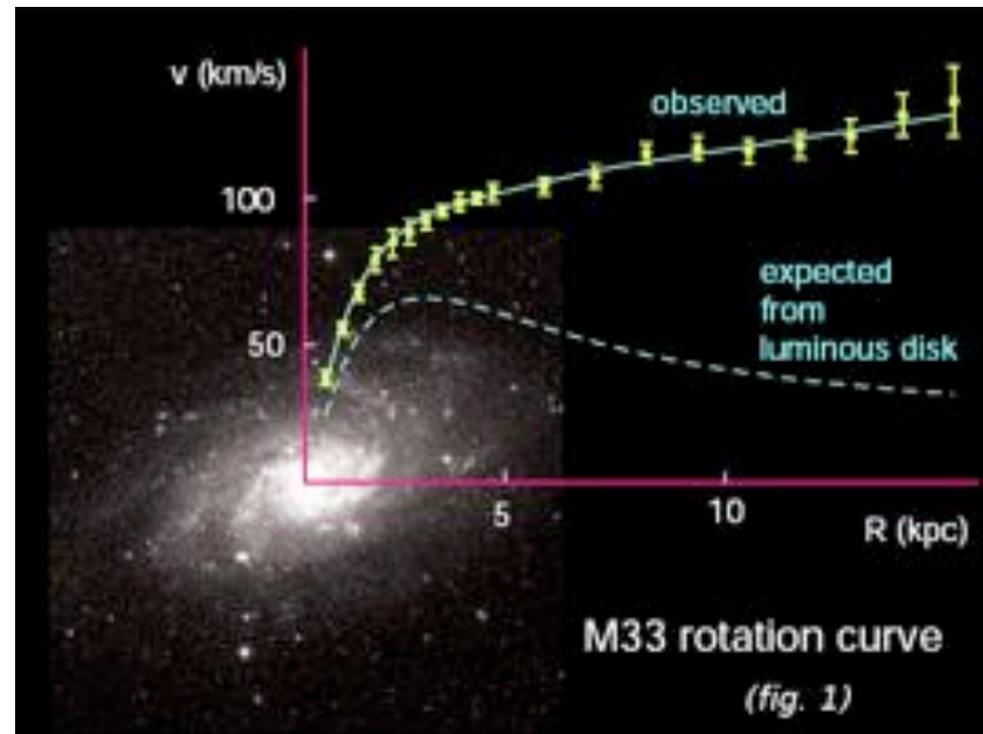


En cada sitio un objeto siente

- La fuerza de gravitación (que depende de la masa interior) tirando para dentro.
- La fuerza centrífuga (que depende de la velocidad de rotación) que parece expulsarlo para fuera.

Las fuerzas tienen que ser iguales en una situación estable.

De la velocidad de rotación se puede calcular la masa interior.



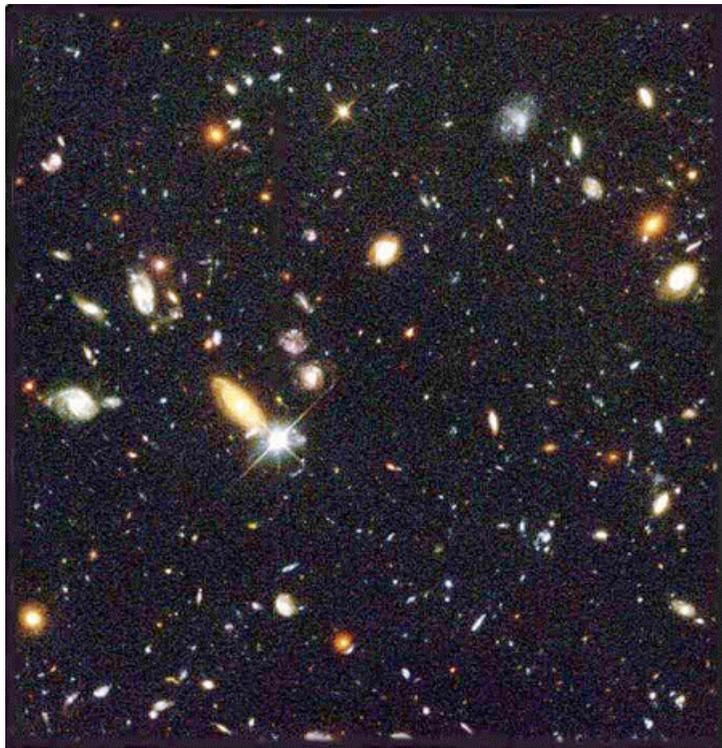
La masa deducida de la rotación es superior a la masa inferido de la materia que vemos → tiene que haber MASA OSCURA

Aplicaciones

- Un meteorito se acerca a la tierra y tu eres el jefe de equipo rescate.
 - ¿Que observaciones propones?
 - ¿Qué parámetros hay que medir y cómo se pueden medir?

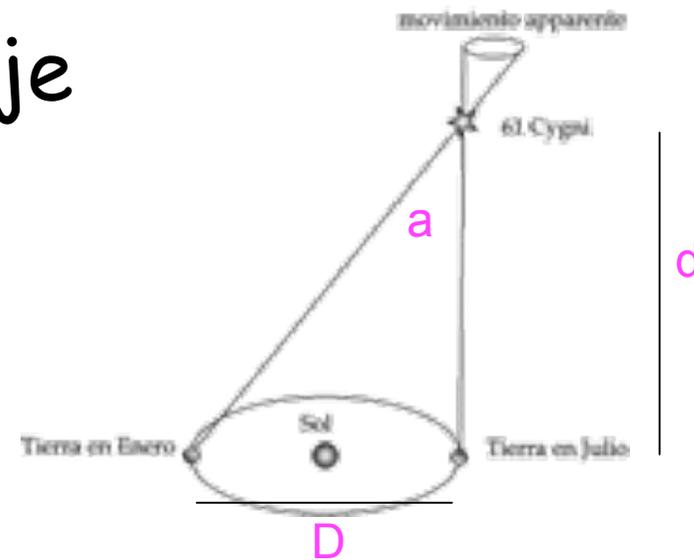
¿Cual es la distancia a un objeto?

- Difícil a determinar porque vemos solamente la proyección de los objetos a la esfera celeste
- Importante!! Sin la distancia no sabemos si un objeto es luminoso y distante o poco luminoso y cercano.



Como se pueden averiguar las distancias de los objetos del Hubble Deep Field?

Primer metodo: Paralaje



- Se conoce la distancia, D , entre la posición de la Tierra en Julio y en Enero
- Se mide el ángulo, a (diferencia de posición), del objeto con respecto al fondo de las estrellas lejanas
- Se puede averiguar la distancia, d , del objeto

-Aplicable en la vecindad del sol ($\sim 1\%$ del diámetro de la Vía Láctea)
-Alrededor de 1900 se llevaron a cabo grandes muestreo para medir el paralaje de muchos (varios 10 000) estrellas. Eso fue importante para su clasificación y entender su funcionamiento

Como se pueden medir distancias en otras galaxias?

- 1) Se intenta encontrar "candelas estándar" = objetos de las que conocemos la luminosidad.
 - **Cepheides:** En 1912 Henrietta Leavitt encontró una relación entre el periodo de variación en la luminosidad de un tipo de estrellas (Cepheides) y su luminosidad absoluta.
 - Posibilita determinar las distancias a galaxias cercanas
 - Ha sido la base para el trabajo de Hubble para calibrar su ley de Hubble
 - **Supernovas tipo I**
 - Relación entre máxima luminosidad y tiempo característico de desvanecimiento
- 2) Relación de **Tully-Fisher**
Correlación empírica entre anchura de la línea de HI y la luminosidad
- 3) **Ley de Hubble:** relación lineal entre la velocidad de recesión y la distancia
 - La relación mas usada
 - A pequeña escala: Hay que corregir por el movimiento propio
 - A gran escala: la constante de Hubble ha variado con el tiempo?

Las distancias astronómicas

Si podríamos viajar tan rápido como luz (300 000 km/s) llegaríamos.....

- ... a la **luna** en 1.3 segundos
- ... al **sol** en 8 minutos
- ... a la **próxima estrella** en 2 años
- ... al **centro de la Vía Láctea** en 26.000 años
- ... a las **Nubes de Magallanes** en 200.000 años
- ...a la **galaxia vecina de Andrómeda** en 3 millones de años
- ...a la **galaxia más lejana** que vemos en el cielo en 100.000 millones de años

¿Dónde nos encontramos?



La tierra - un planeta

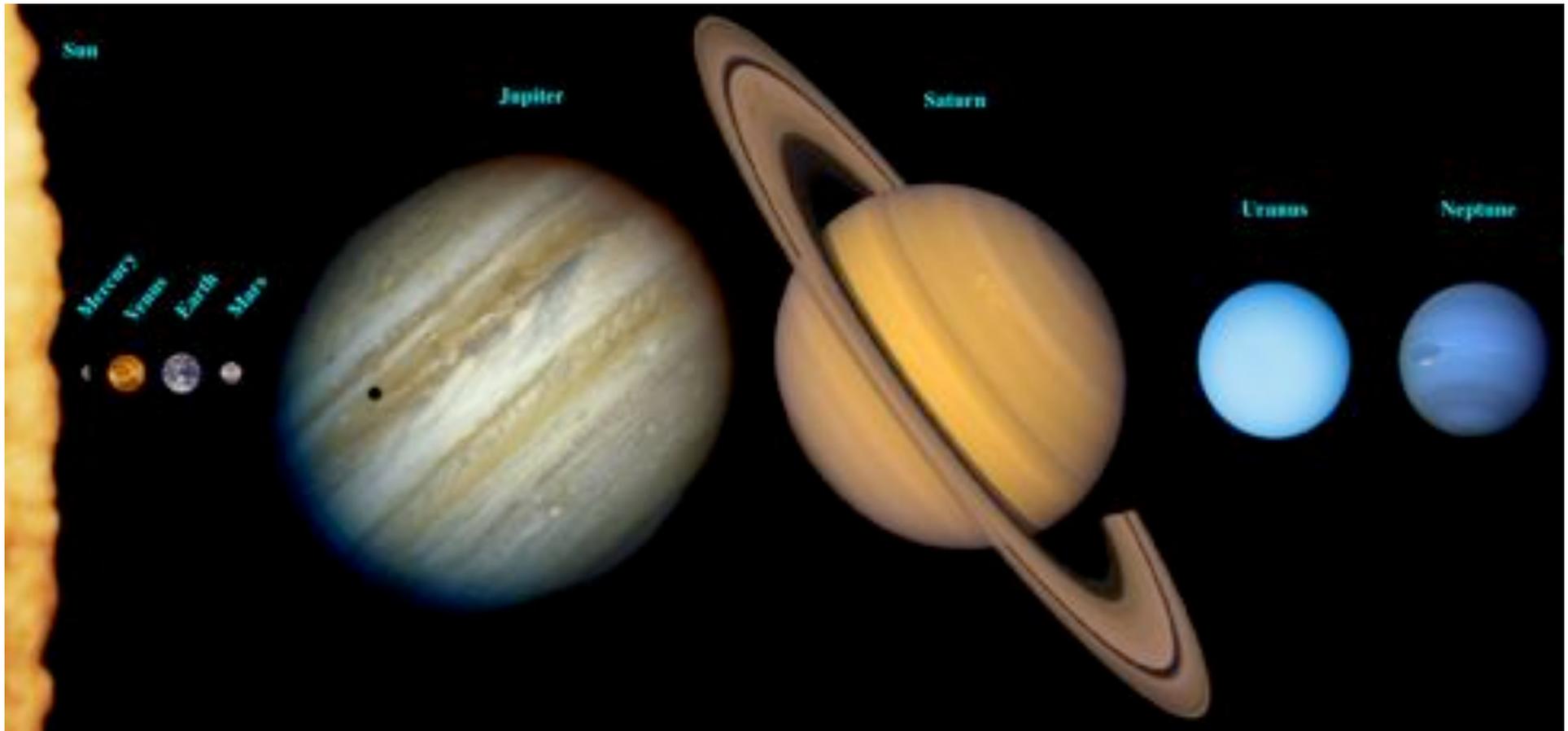
Sistema solar

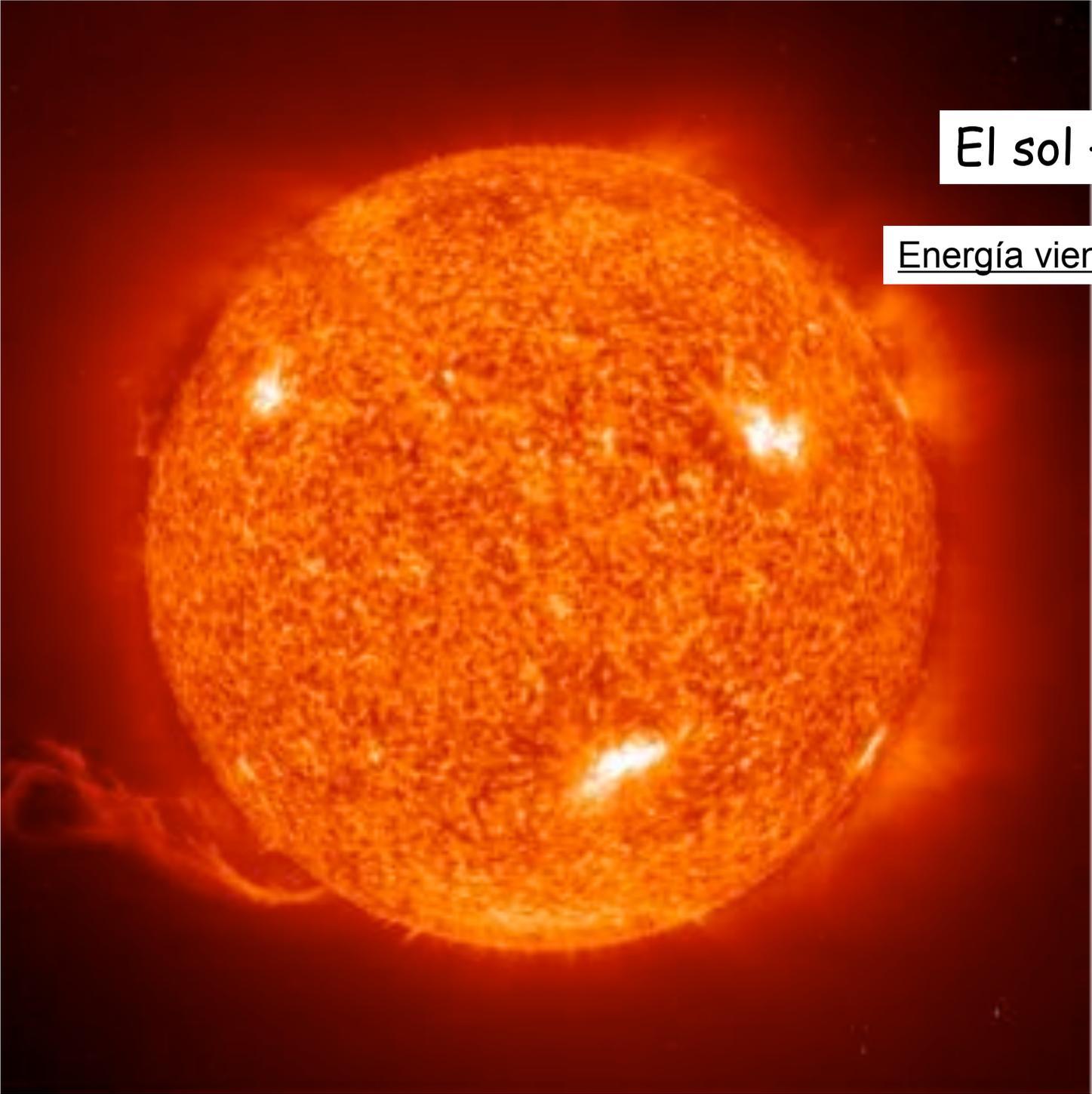


Consiste de:

- Sol
- 8 planetas (Pluto ya no) y sus satélites
- Asteroides
- Cometas

Los planetas





El sol - una estrella

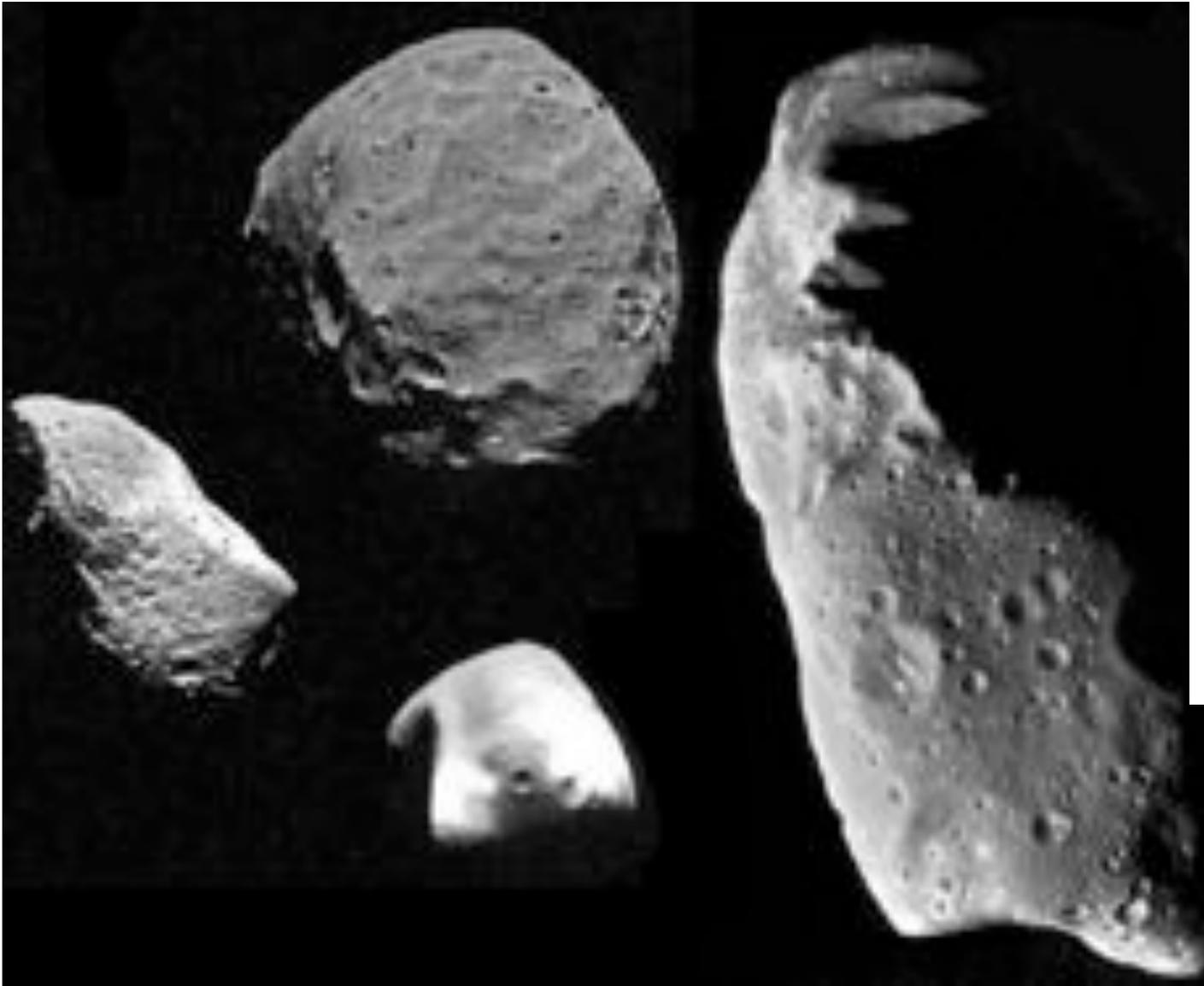
Energía viene de fusión nuclear

Cometas

Cometa: objetos con órbita excéntrica, provenientes de las zonas más exteriores del sistema solar



Asteroides - pequeños planetas



Asteroides = Cuerpos densos y pequeños

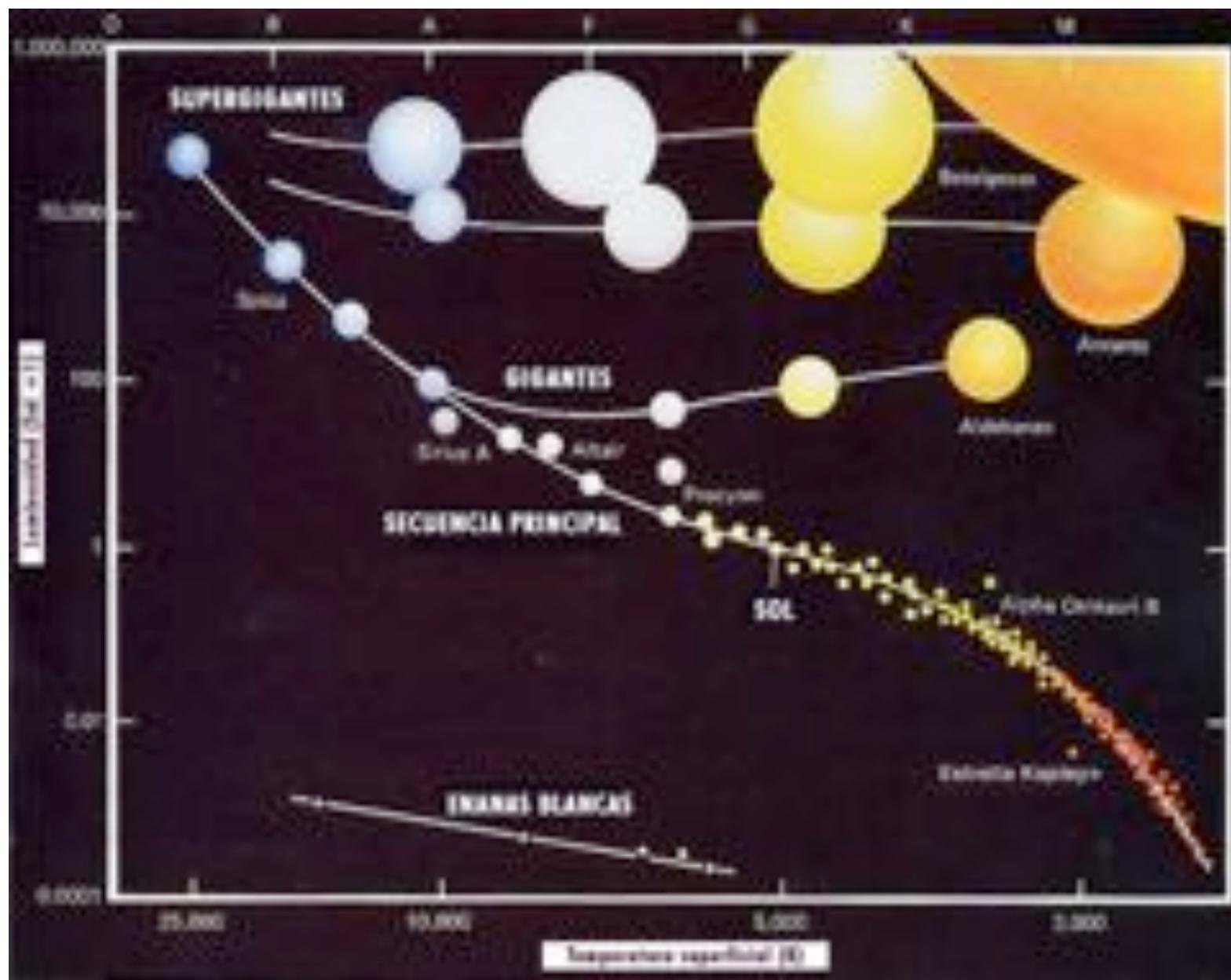
Cinturón de asteroides entre Marte y Jupiter

Cinturón de Kuiper: Región con muchos asteroides con órbitas \approx fuera de Pluto

Fuera de nuestro sistema solar: estrellas



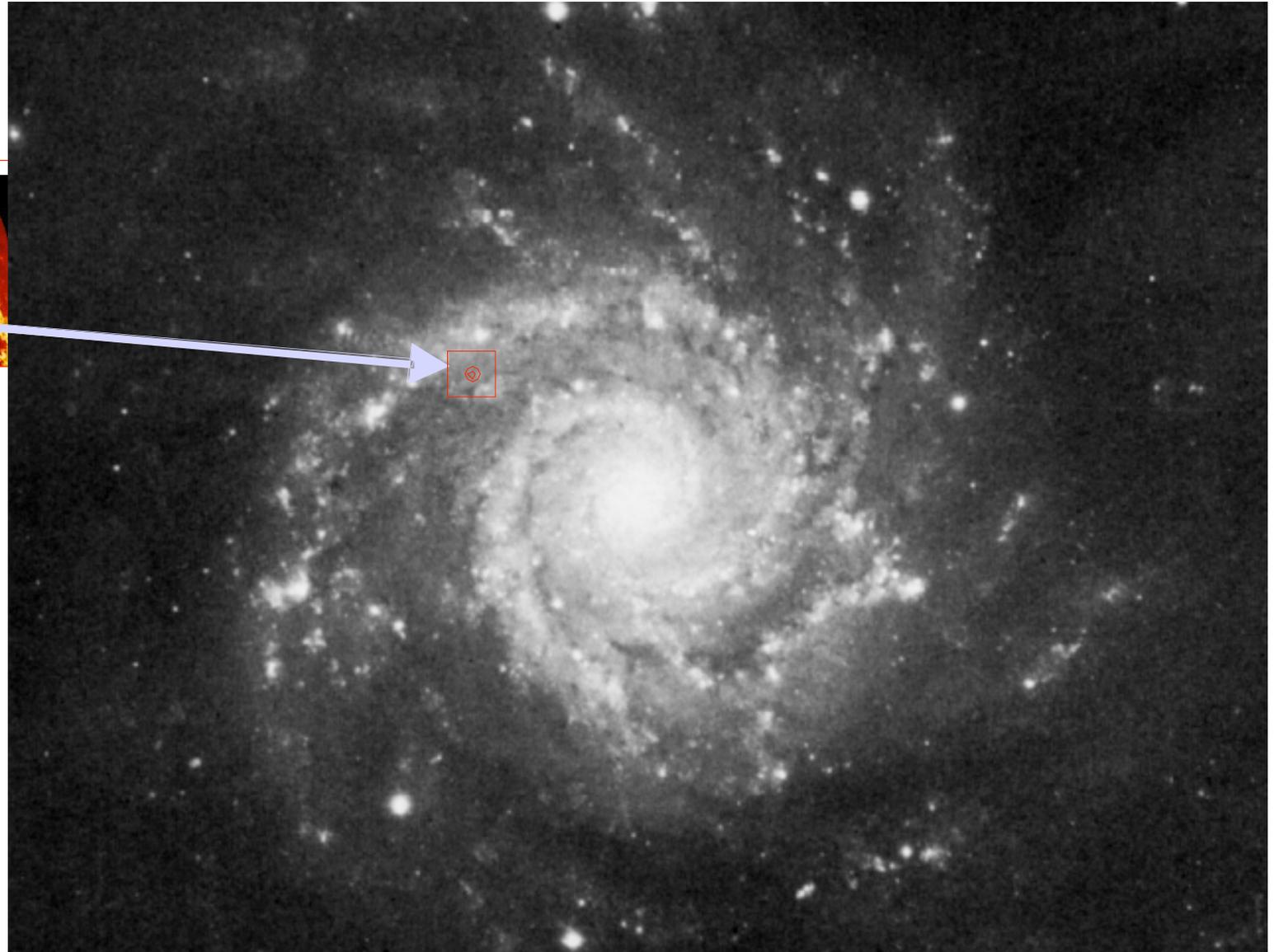
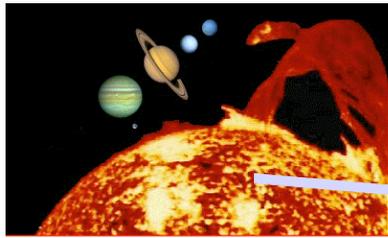
Constelaciones de Leo y Cisne



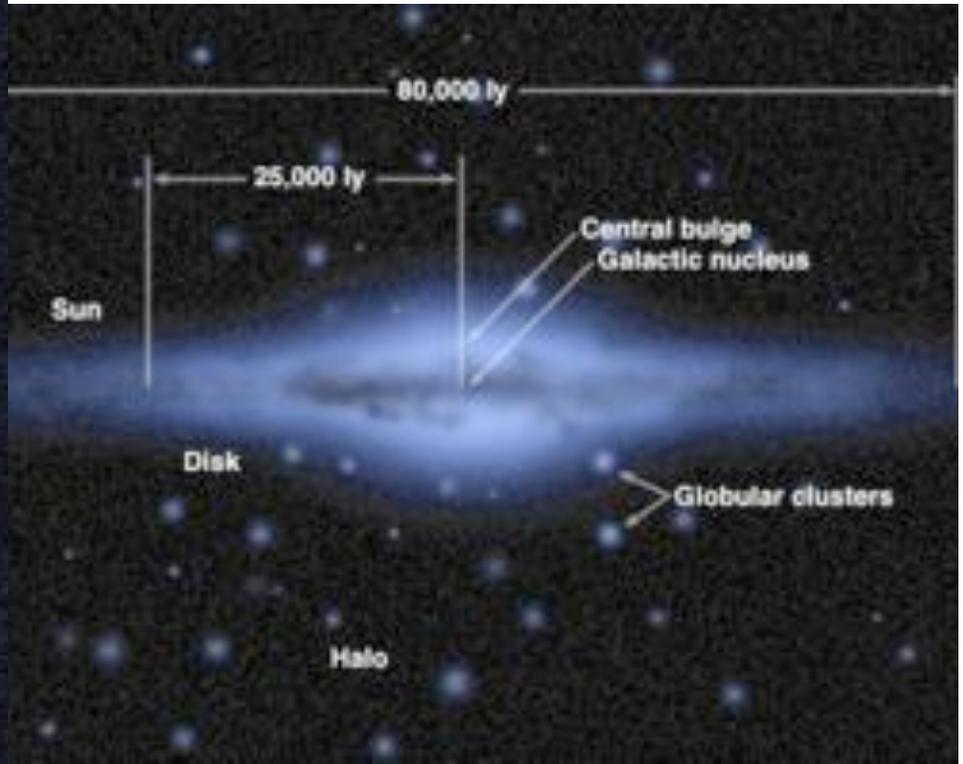
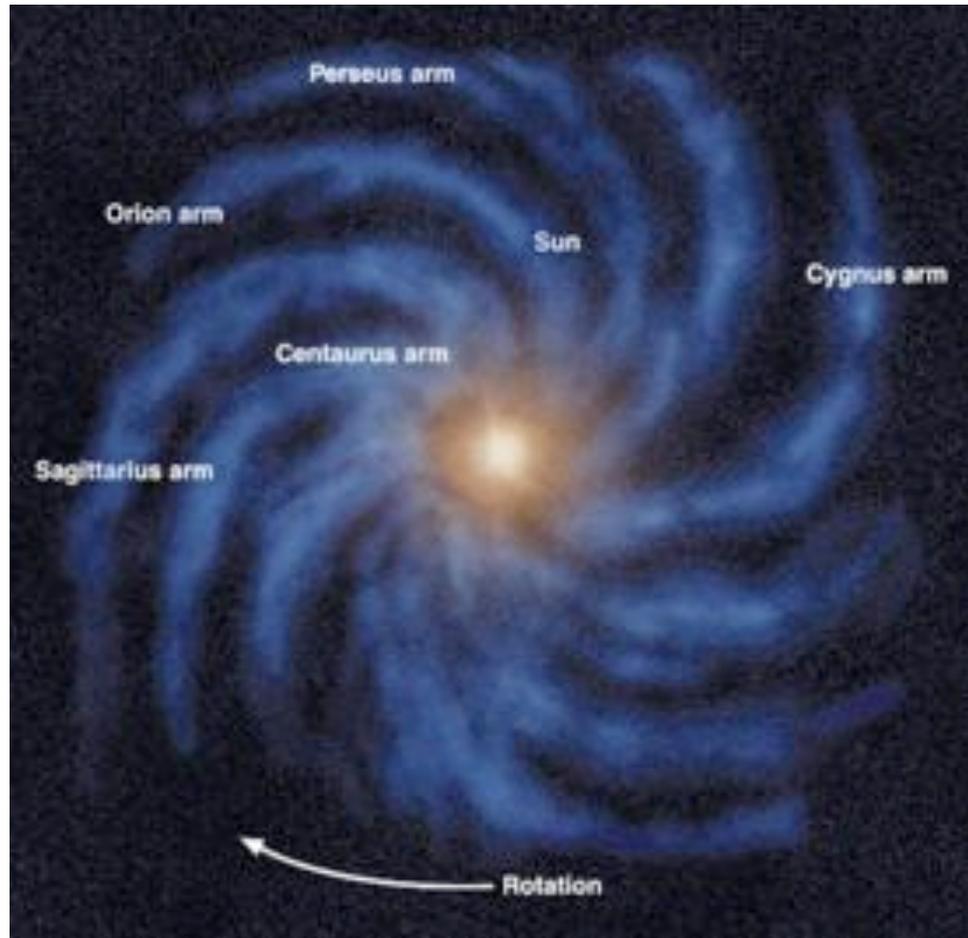
La Vía Láctea



La Vía Láctea - una galaxia



Nuestra galaxia: La Vía Lactea



Whirlpool Galaxy • M51



Una galaxia espiral contiene:

- Estrellas (que se forman del gas)
- Gas
- Polvo interestelar
- Campo magnético
- Rayos cósmicos
- Materia oscura

G A L A X I E S



NGC 253



M51



NGC 5128



NGC 891



M83



M87



M31



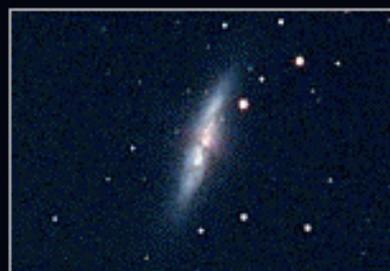
Markarian's Chain



M86 and M84



M33



M82



NGC 6946



M81



M66, M65 and NGC 3628

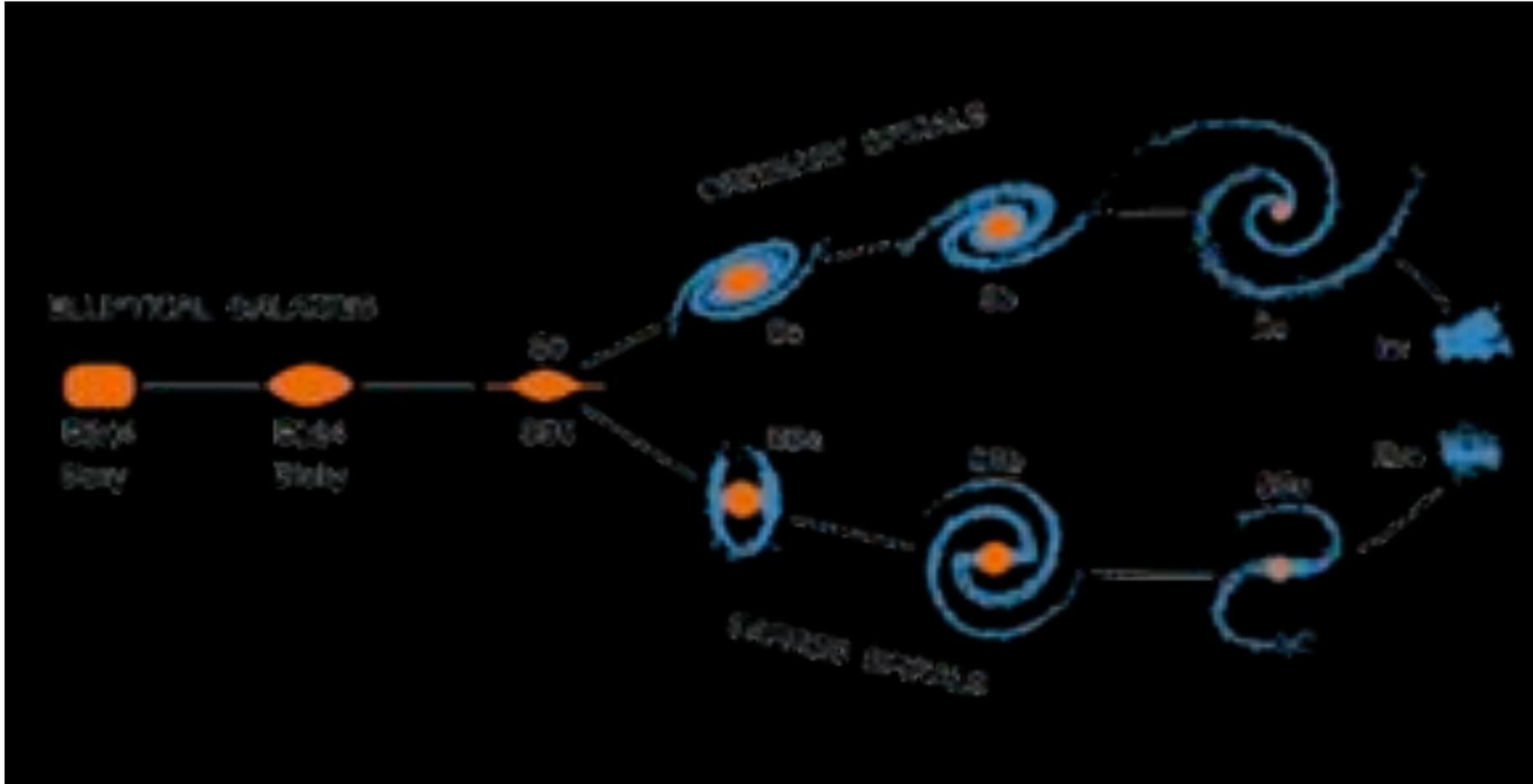


M101



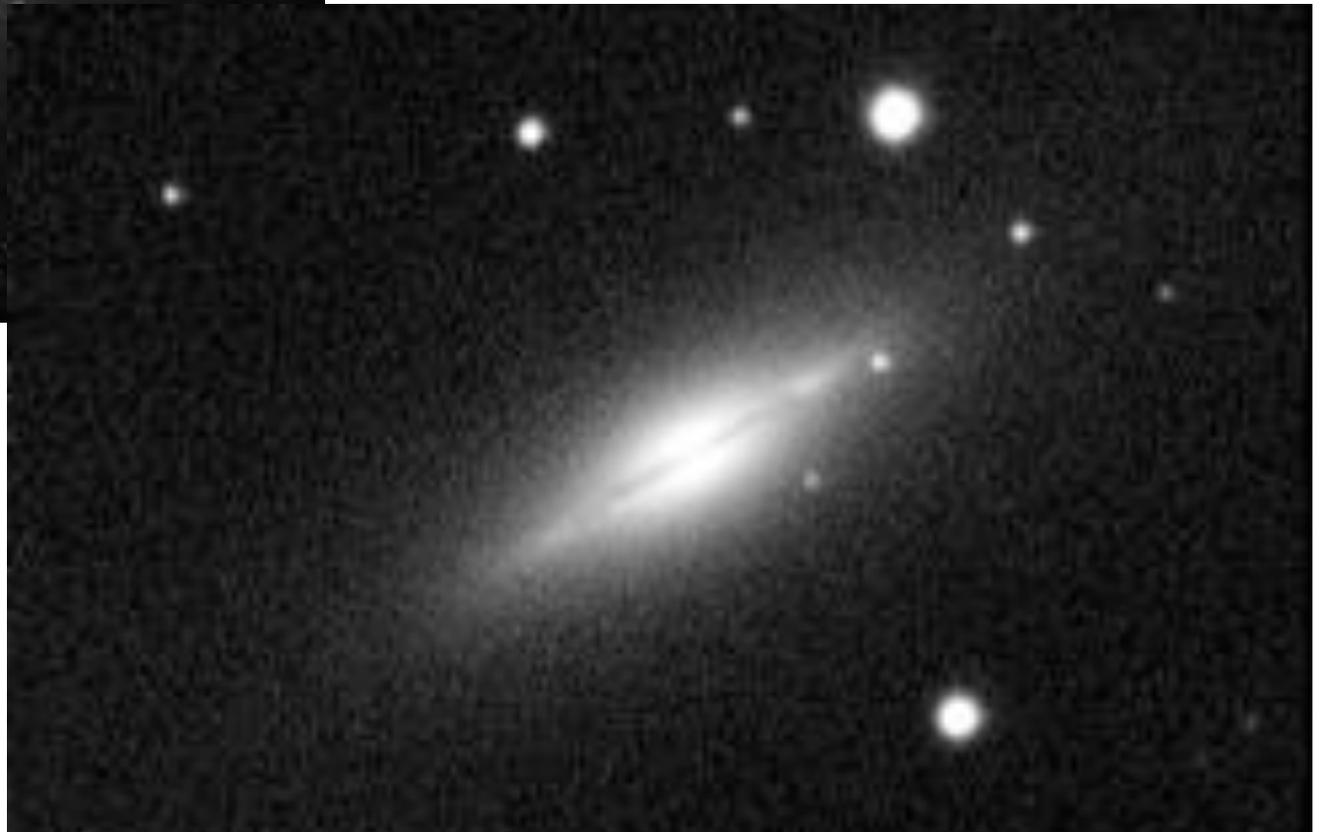
M106

Formación y evolución de galaxias



La clasificación de galaxias de Edwin Hubble (1926)

Galaxias elípticas y esferoidales



Galaxias espirales



Espirales barradas

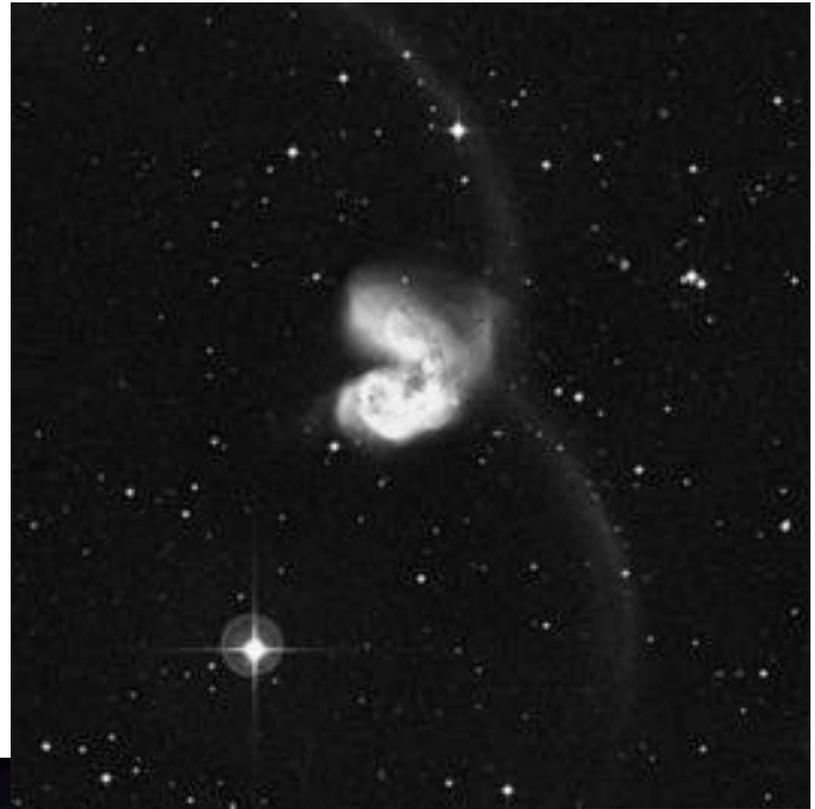


Galaxias irregulares



Nuestros vecinos:
Las Nubes de Magallanes

Galaxias peculiares



Galaxies NGC 2207 and IC 2163



Hubble
Heritage

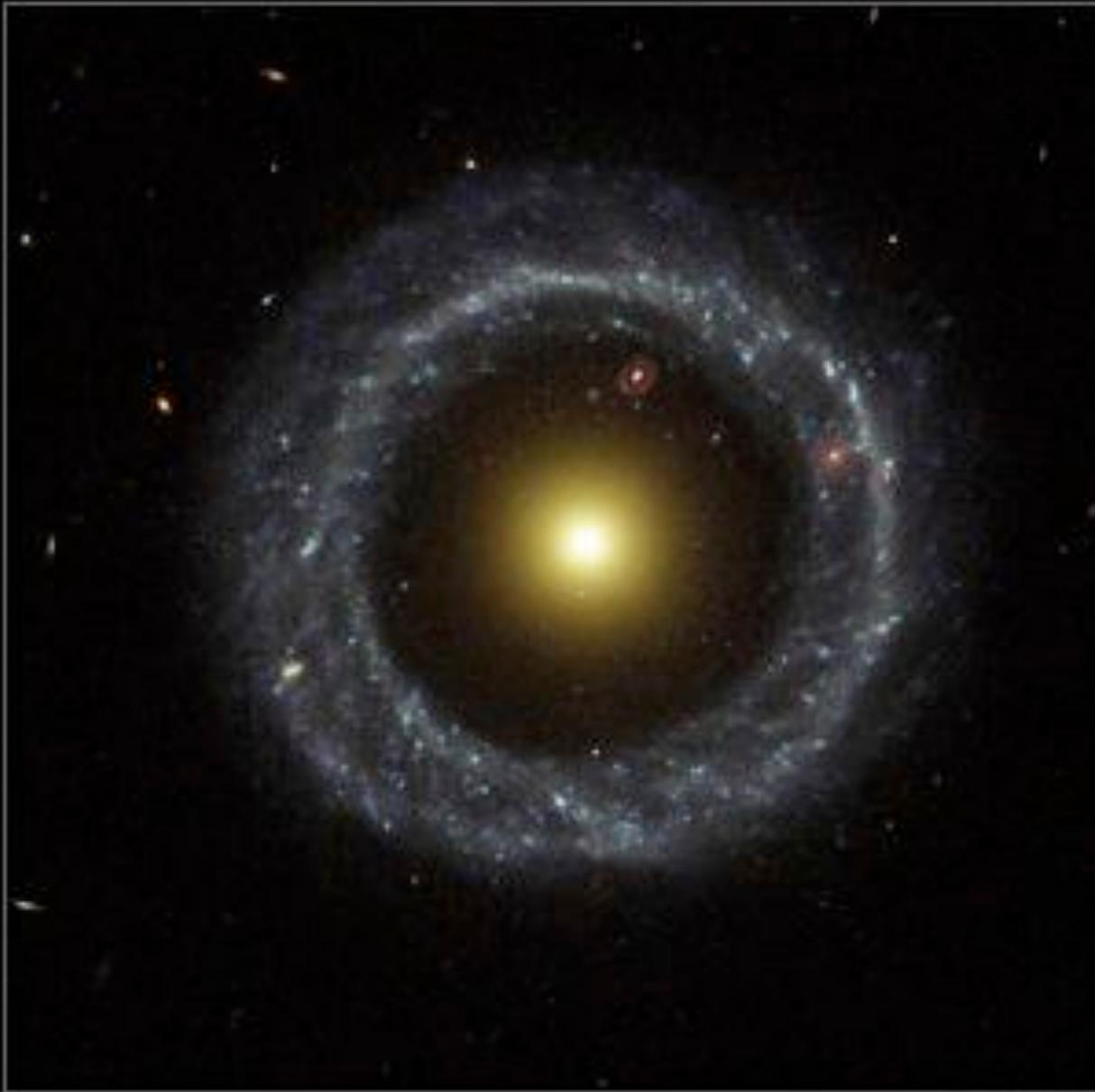


M51: Galaxia Whirlpool



NGC 4676 - Los ratones

Hoag's Object



Hubble
Heritage

Galaxias
peculiares:

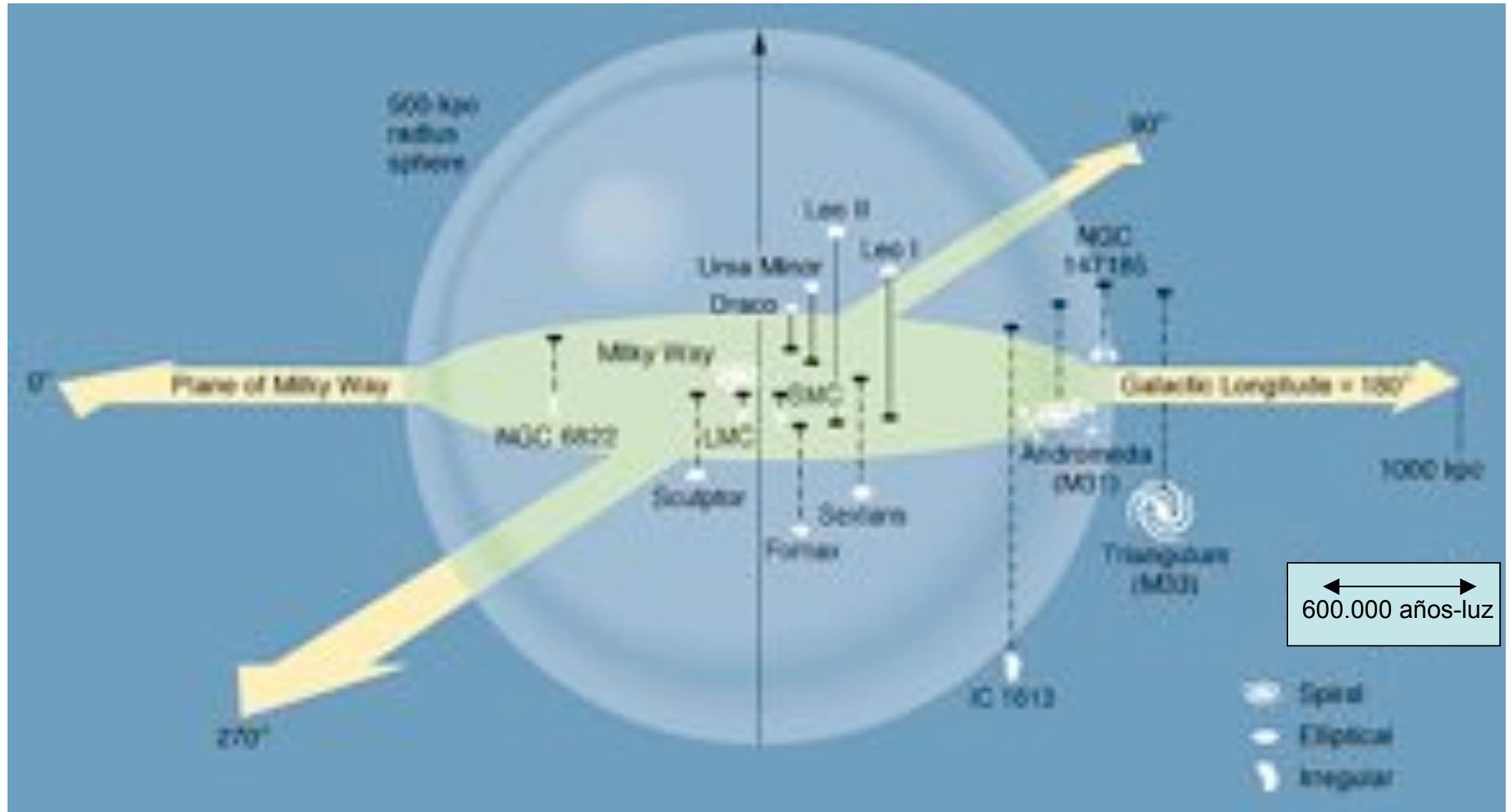
Galaxia-Anillo
→ Resultado
de una
colisión

Galaxias peculiares: Galaxias ultraluminosas en infrarrojo



Remanentes de
colisiones

Entorno de la Via Lactea: Grupo Local



Hickson Compact Group 87



Hubble
Heritage

Grupos de galaxias

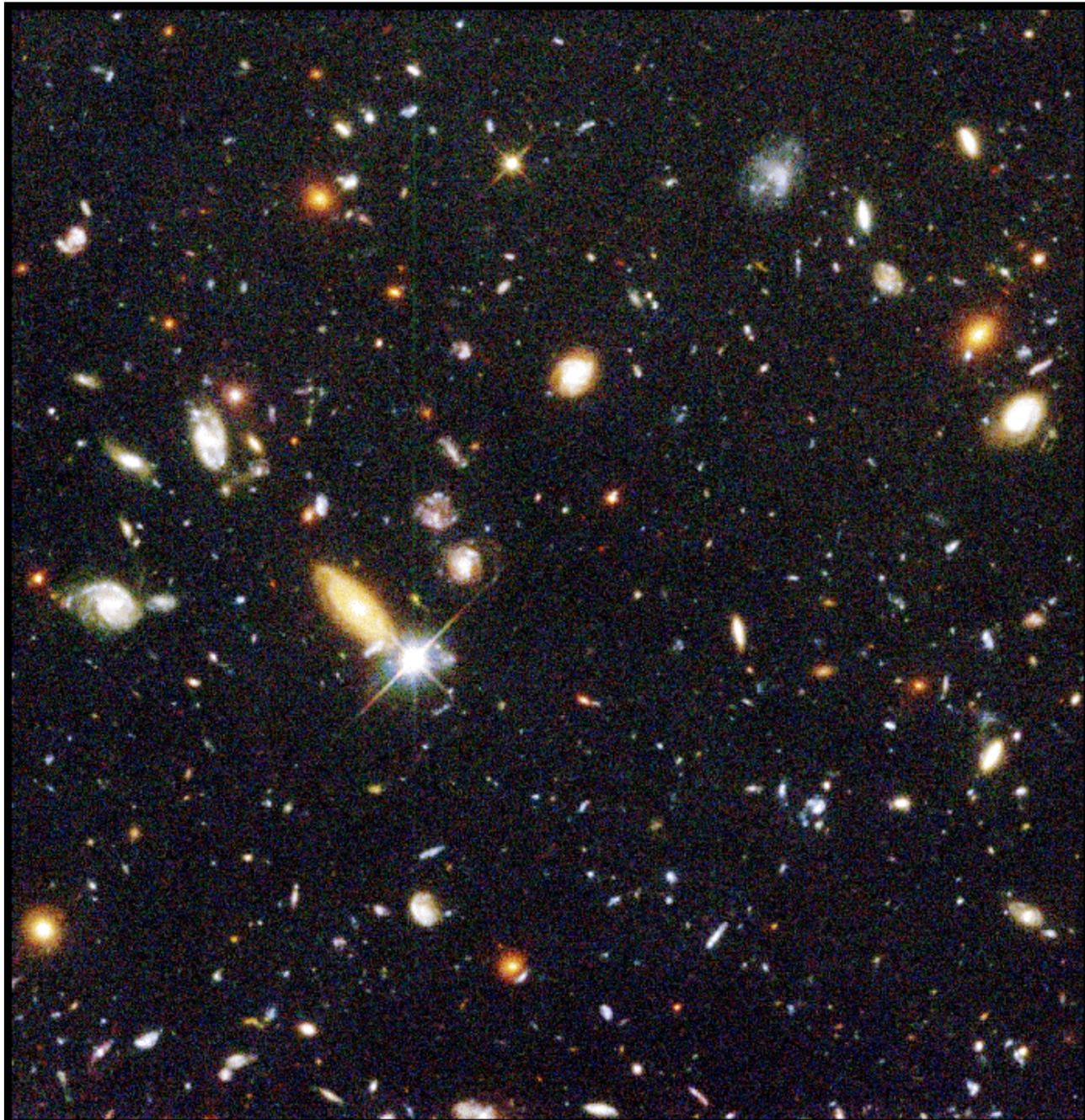
Hasta una decena de miembros

Cúmulos de galaxias



Unos cientos a
miles de
miembros

Cúmulo de Coma



Hubble Deep Field

HST · WFPC2

PRC96-01a · ST ScI OPO · January 15, 1996 · R. Williams (ST ScI), NASA

Age of the Universe

Today: 14 Billion Years

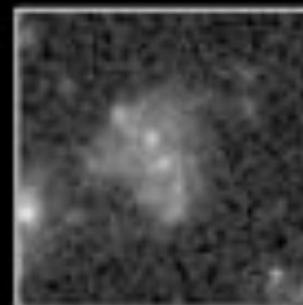
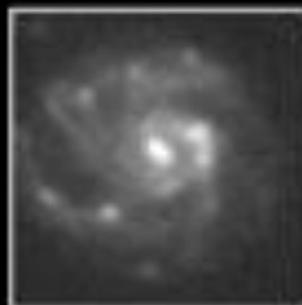
9 Billion Years

5 Billion Years

2 Billion Years



Elliptical



Spiral

Galaxies: Snapshots in Time

HST · WFPC2



