



# La radiación electromagnética en su pasaje por la atmósfera



**La radiación electromagnética es la principal (y casi única) fuente de información que disponemos de los objetos de estudio en la Astronomía.**

## **OBJETIVO**

Analizar los fenómenos y procesos que afectan el pasaje de la radiación electromagnética a través de la atmósfera.



# EL ESPECTRO ELECTROMAGNÉTICO

Longitud de onda  
(en metros)



Más larga

Más corta

Comparación  
de las  
Longitudes  
de Onda



Campo de Fútbol



Pelota de tenis



Punto ortográfico



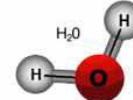
Célula



Bacteria



ADN



Molécula de agua

Radiación No Ionizante

Radiación Ionizante

Nombre  
común de  
las ondas

RADIOFRECUENCIAS

INFRARROJOS

ULTRAVIOLETAS

RAYOS GAMMA

VISIBLE

MICROONDAS

Longitud de  
Onda

RAYOS-X SUAVES

RAYOS-X FUERTES

Fuentes



Líneas  
Eléctricas



Torres de  
Radio AM



Torres de  
Radio FM/TV



Teléfonos  
móviles y  
antenas



Hornos  
Microondas



Radiadores



El Sol



Arco de soldadura



Equipos de  
Rayos X



Fuentes  
Radiactivas

Frecuencia  
(ciclos por segundo)



Menor

Energía de un  
fotón  
(electrón voltios)



# RESUMEN HISTÓRICO

1859 Kirchhoff: radiación de cuerpo en equilibrio térmico

1860 Kirchhoff y Bunsen: leyes de radiación

1879 Stefan: obtención empírica del flujo total

1893 Wien: ley de desplazamiento

1896 Zeeman: efecto y aplicación al estudio de manchas solares

1900 Planck: deducción teórica de la radiación de cuerpo negro

1906 Schwarzschild: teoría de campos de radiación estacionarios

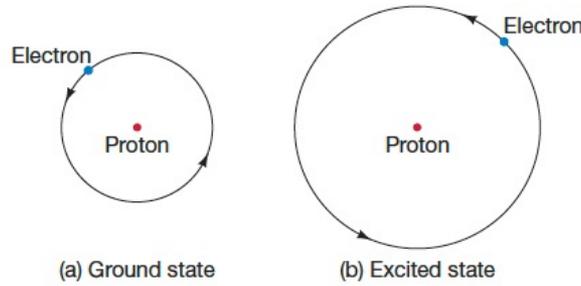
1911 Rutherford: modelo de átomo con núcleo y nube de electrones

1913 Bohr: modelo del átomo de Hidrógeno

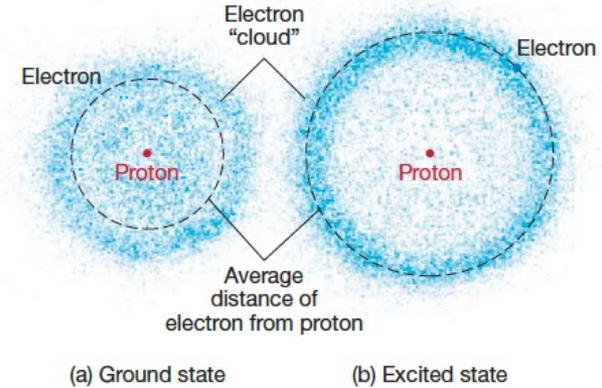
1916 Eddington: teoría de la constitución interna de las estrellas

# Modelo atómico

Niveles atómicos  
cuantizados:  
Corresponden a valores  
fijos de energía



▲ **FIGURE 4.8 Classical Atom** An early-20th-century conception of the hydrogen atom—the Bohr model—pictured its electron orbiting the central proton in a well-defined orbit, much like a planet orbiting the Sun. Two electron orbitals of different energies are shown: (a) the ground state and (b) an excited state.



▲ **FIGURE 4.9 Modern Atom** The modern interpretation of the hydrogen atom visualizes the electron as a “cloud” surrounding the nucleus. The same two energy states are shown as in Figure 4.8.

(a) Parts of an atom

Two electrons occupy all space outside the nucleus.

Neutron in nucleus      Proton in nucleus

(b) Bohr model

Electrons do not move in orbits like planets...

(c) Quantum mechanical model

Electron cloud  
Nucleus

...but rather are waves “smeared out” in a cloud of probability held in place by the electric attraction of the nucleus.

**Figure 5.8** (a) An atom (in this case helium) is made up of a nucleus consisting of positively charged protons and electrically neutral neutrons and surrounded by less massive negatively charged electrons. (b) Atoms are often drawn as miniature “solar systems,” but this model is incorrect. (c) Electrons are actually smeared out around the nucleus in quantum mechanical clouds of probability.

Atom in  $E_4$  energy state

Atom in  $E_2$  energy state

We use **energy level diagrams** to represent the allowed states of an atom.

Analogously, atoms exist in one allowed energy state or another, but never in between.

# El espectro del Sol

El continuo:  
Ley de Planck

$dE$  - Energía que cruza la superficie por unidad de tiempo ( $dt$ ), por unidad de area ( $dA$ ), por unidad de frecuencia ( $d\nu$ ), por unidad de ángulo sólido ( $d\omega$ ) en dirección que forma ángulo  $\theta$  con la normal

$$dE = I_\nu (dA \cos \theta) d\nu d\omega dt$$

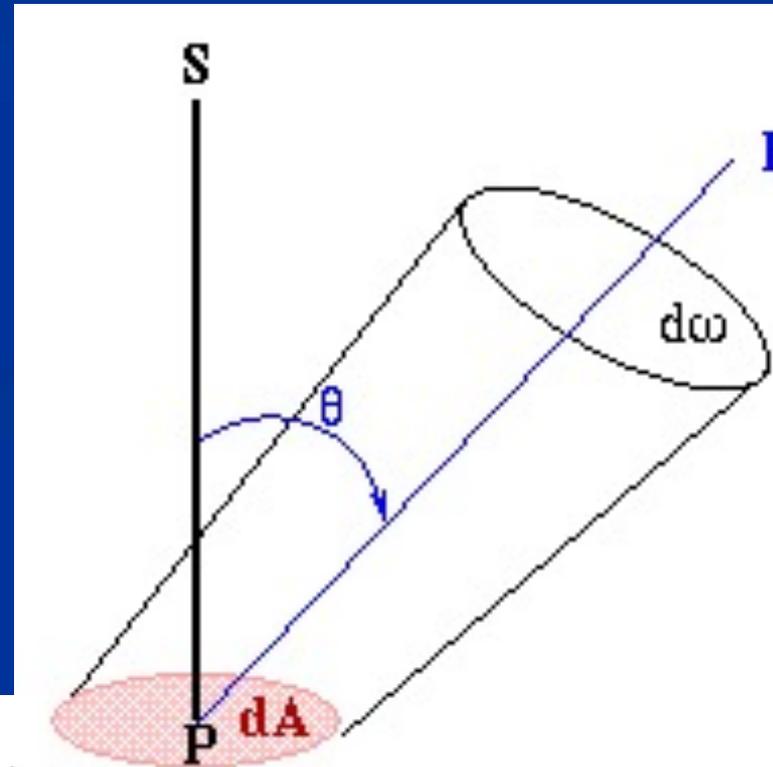
donde  $I_\nu$  es la Intensidad específica

[W m<sup>-2</sup> Hz<sup>-1</sup> sterad<sup>-1</sup>]

Flujo (Densidad de Flujo):

Integral de  $I$  en todas direcciones

$$F = \int_{\Omega} I \cos \theta d\omega$$



# Ley de Planck

Se definen para un **cuerpo negro**: es una idealización, es un objeto que absorbe toda la radiación que incide sobre él. Para estar en equilibrio termodinámico, debe irradiar energía a la misma tasa que absorbe. Es un absorbente y emisor perfecto.

La energía radiante emitida por un cuerpo negro a una temperatura de equilibrio (superficial) T se distribuye en frecuencias (o en longitudes de onda), según la función de Planck:

$$I_{\nu} = B_{\nu}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2 (e^{h\nu/kT} - 1)}$$

$$I_{\lambda} = B_{\lambda}(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/k\lambda T} - 1)}$$

$\nu$  - frecuencia [Hz = 1/s]

$\lambda$ - longitud de onda [m]

T – Temperatura [K]

h – Constante de Planck

$h = 6.63 \times 10^{-34}$  Js

k – Cte. de Boltzmann

$k = 1.38 \times 10^{-23}$  JK<sup>-1</sup>

Ley de Planck: medio (o cuerpo) en equilibrio térmico emitirá con:

$$I_{\nu}(\nu) = B_{\nu}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{h\nu/kT} - 1)}$$

$I_{\nu}$  Intensidad específica [ $\text{W m}^{-2} \text{Hz}^{-1} \text{sterad}^{-1}$ ]

$\nu$ - frecuencia [ $\text{Hz} = 1/\text{s}$ ]

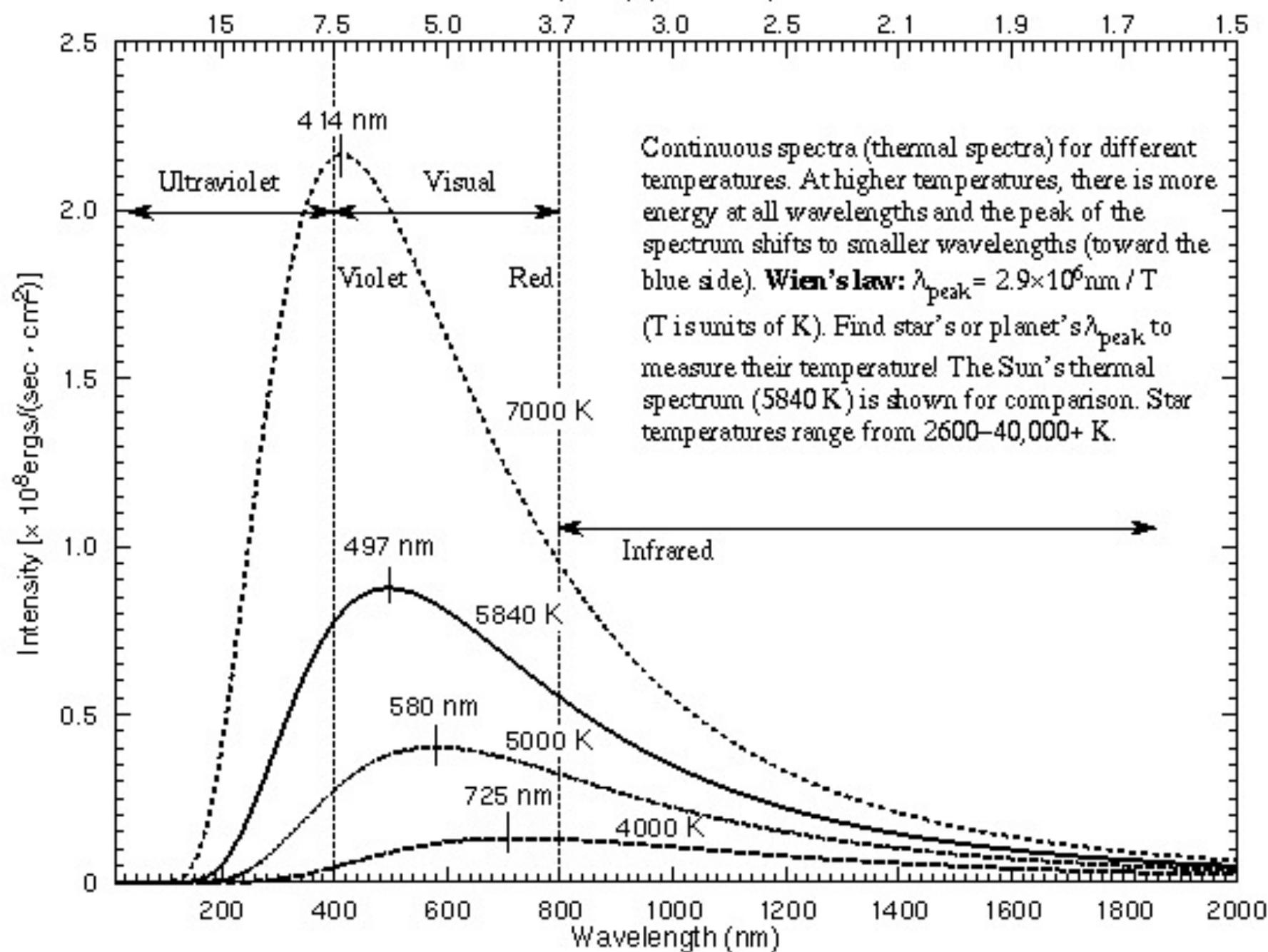
$T$  – Temperatura [ $^{\circ}\text{K}$ ]

$h$  – Constante de Planck ( $6.63 \times 10^{-34} \text{ Js}$ )

$k$  – Constante de Boltzmann ( $1.38 \times 10^{-23} \text{ JK}^{-1}$ )

La observación y la teoría concuerdan en que las estrellas a grosso modo están formadas por capas gaseosas concéntricas en equilibrio térmico. La intensidad de la emisión resultante de un medio como éste es la función de Planck la cual es independiente de las propiedades del medio, solo depende de su temperatura (aunque  $T$  dependerá de las propiedades del medio).

Frequency ( $\times 10^{14}$  Hz)



$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

$\lambda$  - longitud de onda [m]  
c - velocidad de luz ( $3 \times 10^8$  m/s)

$$d\nu = -\frac{c}{\lambda^2} d\lambda$$

$$I_\nu d\nu = -I_\lambda d\lambda$$

$$I_\lambda(\lambda) = B_\lambda(\lambda, T) = \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{29 \times 10^6 (\text{Angstroms } K)}{T}$$

Ley de Wien

Si integramos la intensidad en todas las direcciones y en todas las frecuencias obtenemos el Flujo de energía o energía emitida por unidad de área y de tiempo en la superficie del cuerpo emisor:

$$F = \int_0^{\infty} \frac{2hc^2}{\lambda^5 (e^{hc/\lambda kT} - 1)} d\lambda$$



$$F = \sigma T^4$$

Ley de Stefan

$\sigma$  - constante de Stefan (=  $5.67 \times 10^{-8} \text{ Wm}^{-2}\text{K}^{-4}$ )

La Ley de Wien y la Ley de Stefan se deducen de la Ley de Planck

La observación y la teoría concuerdan en que las estrellas a grosso modo están formadas por capas gaseosas concéntricas en equilibrio térmico. La intensidad de la emisión resultante de un medio como éste es la función de Planck la cual es independiente de las propiedades del medio, solo depende de su temperatura (aunque T dependerá de las propiedades del medio).

$$I_{\nu}(\nu) = B_{\nu}(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2(e^{h\nu/kT} - 1)}$$

**Luminosidad**: energía total emitida por unidad de tiempo.

Para el caso de una ESTRELLA ESFERICA:

$$L = S F = 4\pi R^2 \sigma T^4$$

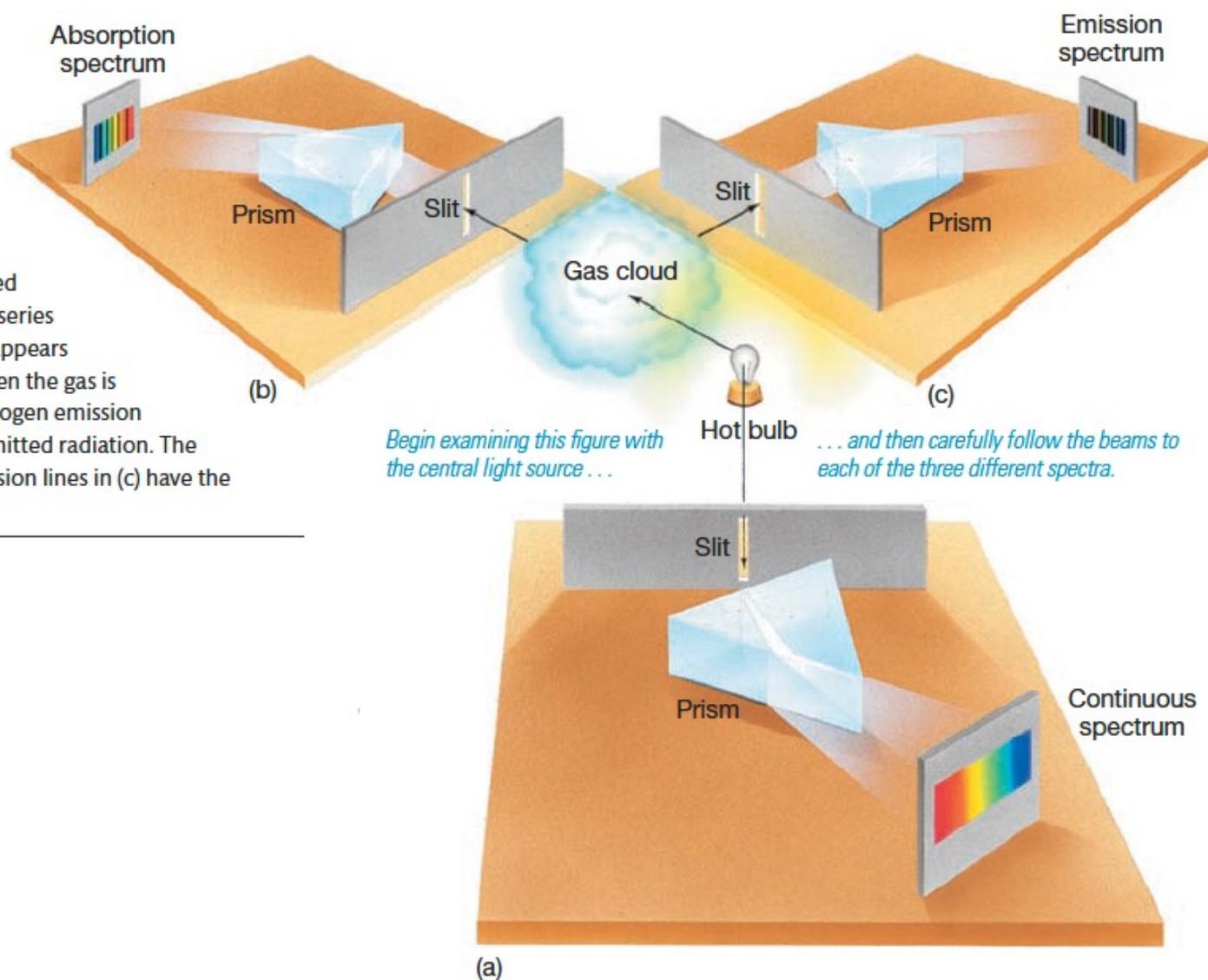
Condición: emisión planckiana (equilibrio térmico)

La temperatura deducida a través de esta expresión se conoce como **Temperatura Efectiva** de la estrella y se requiere conocer el radio y la luminosidad de la estrella. La radiación que recibimos es la suma de emisiones de diferentes capas superficiales a diferentes temperaturas, pero el efecto total es equivalente al de una capa de temperatura  $T_{\text{ef}}$ .

# Generación de líneas: Leyes de Kirchhoff

► **FIGURE 4.7 Kirchhoff's**

**Laws** A source of continuous radiation, here represented by a lightbulb, illustrates Kirchhoff's laws of spectroscopy. (a) The unimpeded beam shows the familiar continuous spectrum of colors. (b) When the source is viewed through a cloud of hydrogen gas, a series of dark hydrogen absorption lines appears in the continuous spectrum. (c) When the gas is viewed from the side, a fainter hydrogen emission spectrum is seen, consisting of reemitted radiation. The absorption lines in (b) and the emission lines in (c) have the same wavelengths.



$$E_2 - E_1 = \Delta E = h\nu = h \frac{c}{\lambda}$$

$E_1, E_2$  – Estados energéticos

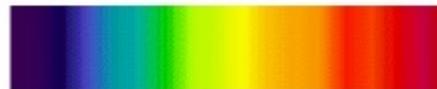
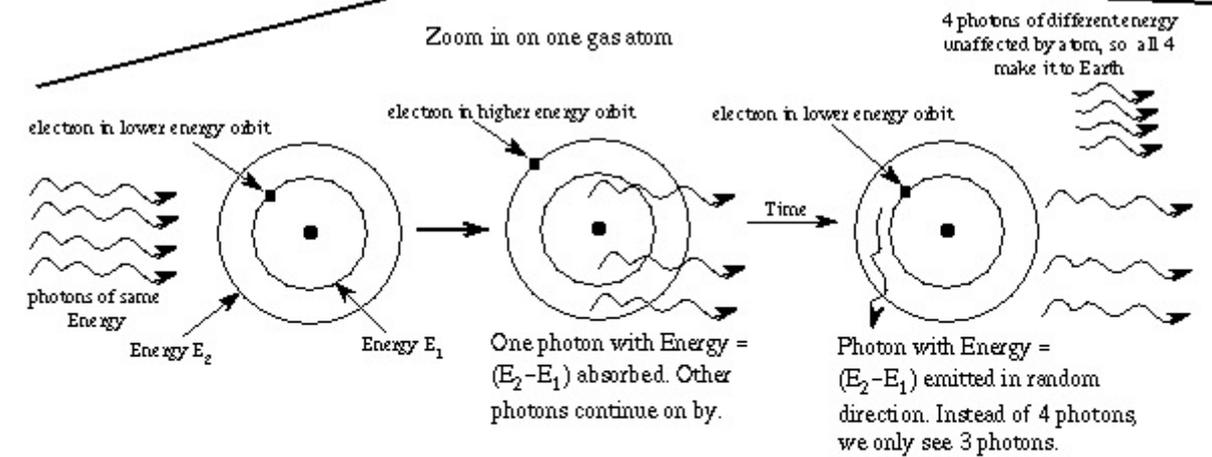
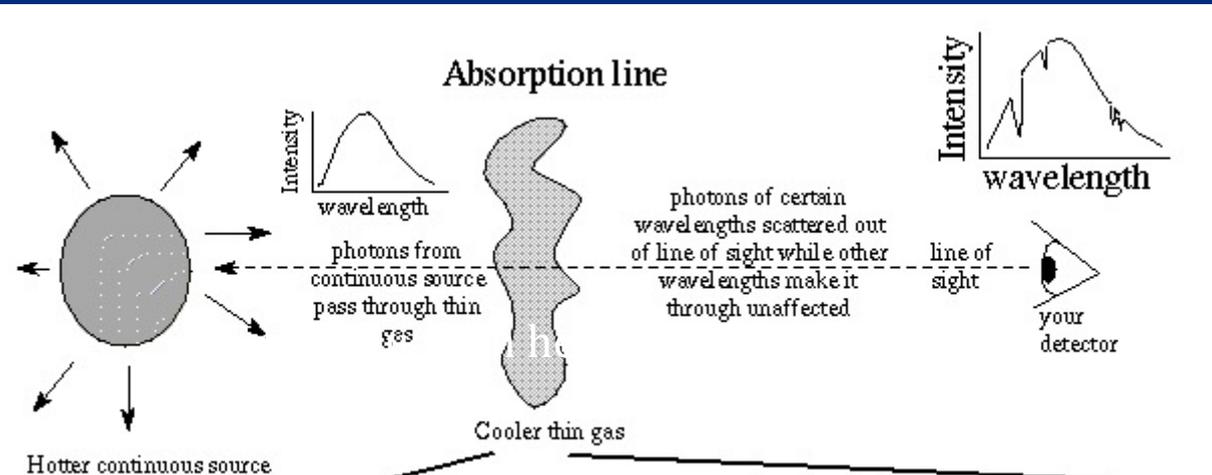
$\Delta E$  – Diferencia de energía

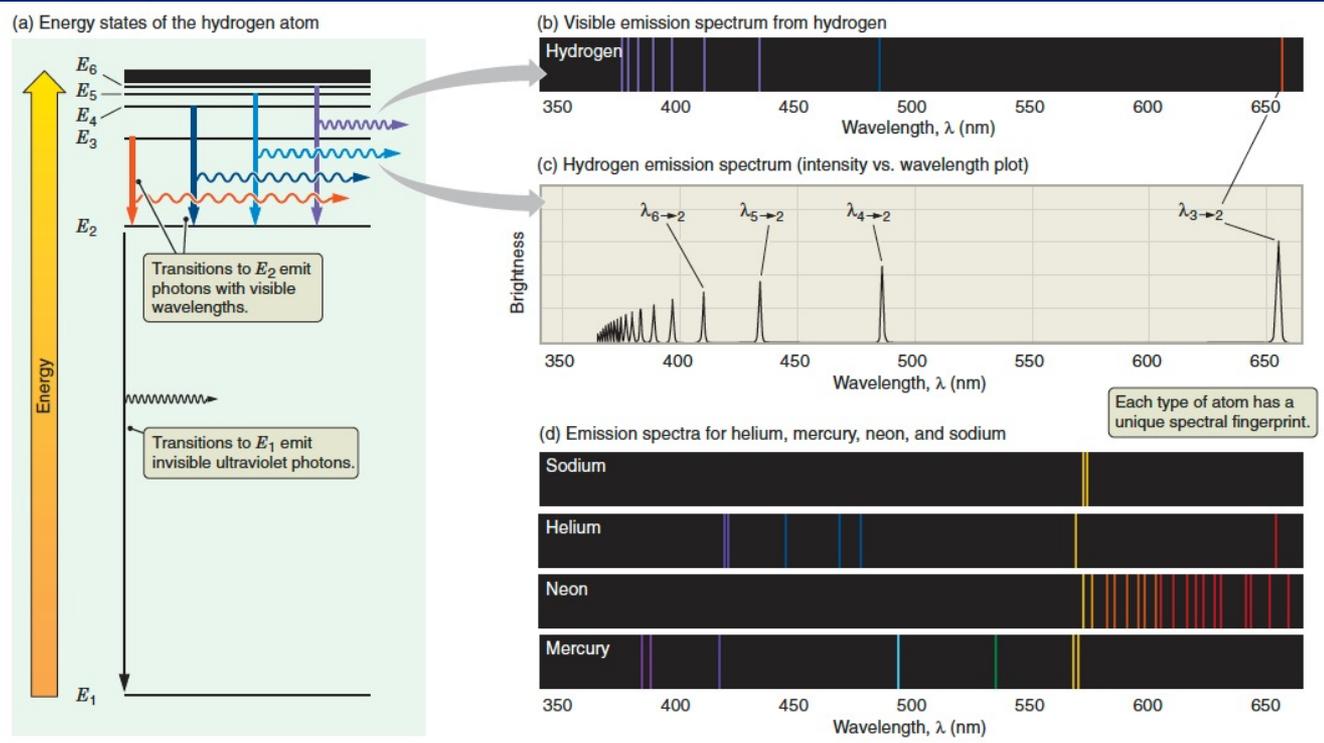
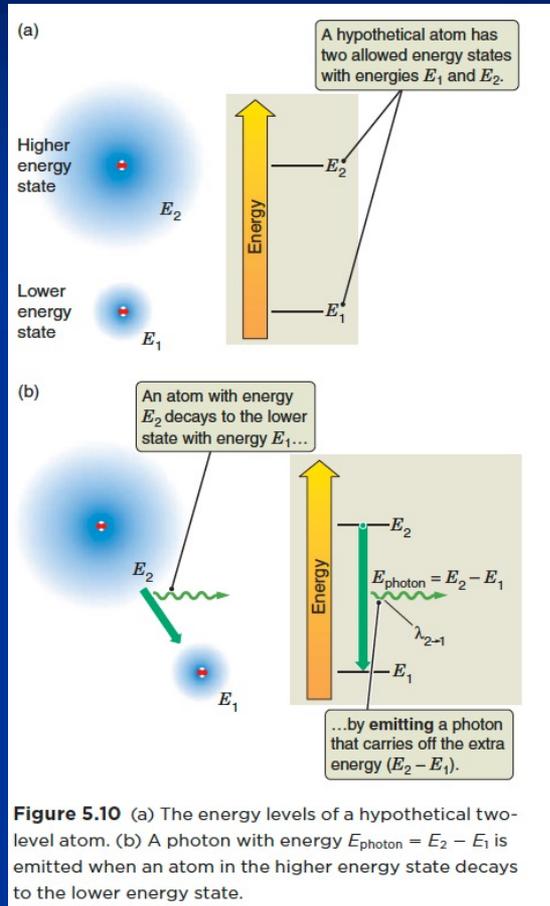
$h$  – Constante de Planck

$\nu$  – frecuencia

$\lambda$  – longitud de onda

$c$  – velocidad de la luz

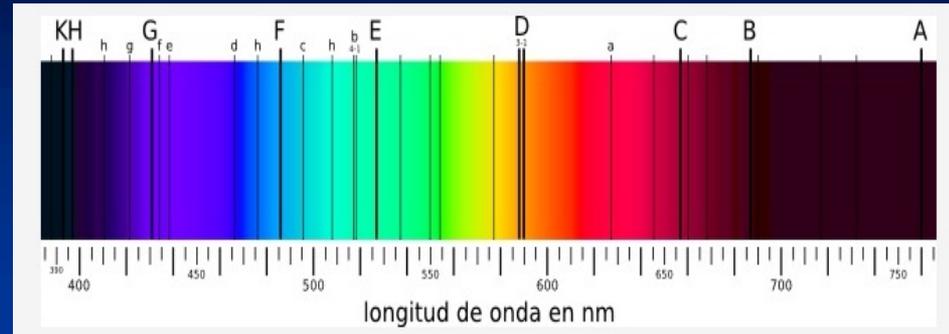




**Figure 5.15** (a) The energy states of the hydrogen atom. Decays to level  $E_2$  emit photons in the visible part of the spectrum. (b) This spectrum is what you might see if you looked at the light from a hydrogen lamp projected through a prism onto a screen. (c) This graph of the brightness (intensity) of spectral lines versus their wavelength illustrates how spectra are traditionally plotted. (d) Emission spectra from several other gases: helium, mercury, neon, and sodium.

# Leyes de Kirchhoff

## JOSEPH VON FRAUNHOFER (1814) LINEAS ESPECTRALES DEL SOL

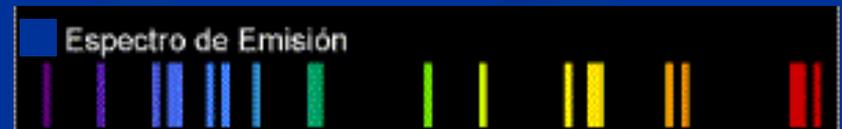


## GUSTAV ROBERT KIRCHHOFF (1859)

**Primera ley:** Un sólido, un líquido o gas, denso y opaco, incandescente, emiten un espectro continuo.



**Segunda ley:** Un gas enrarecido al ser excitado por calor o una corriente eléctrica emite un espectro discreto de líneas características de cada sustancia química.



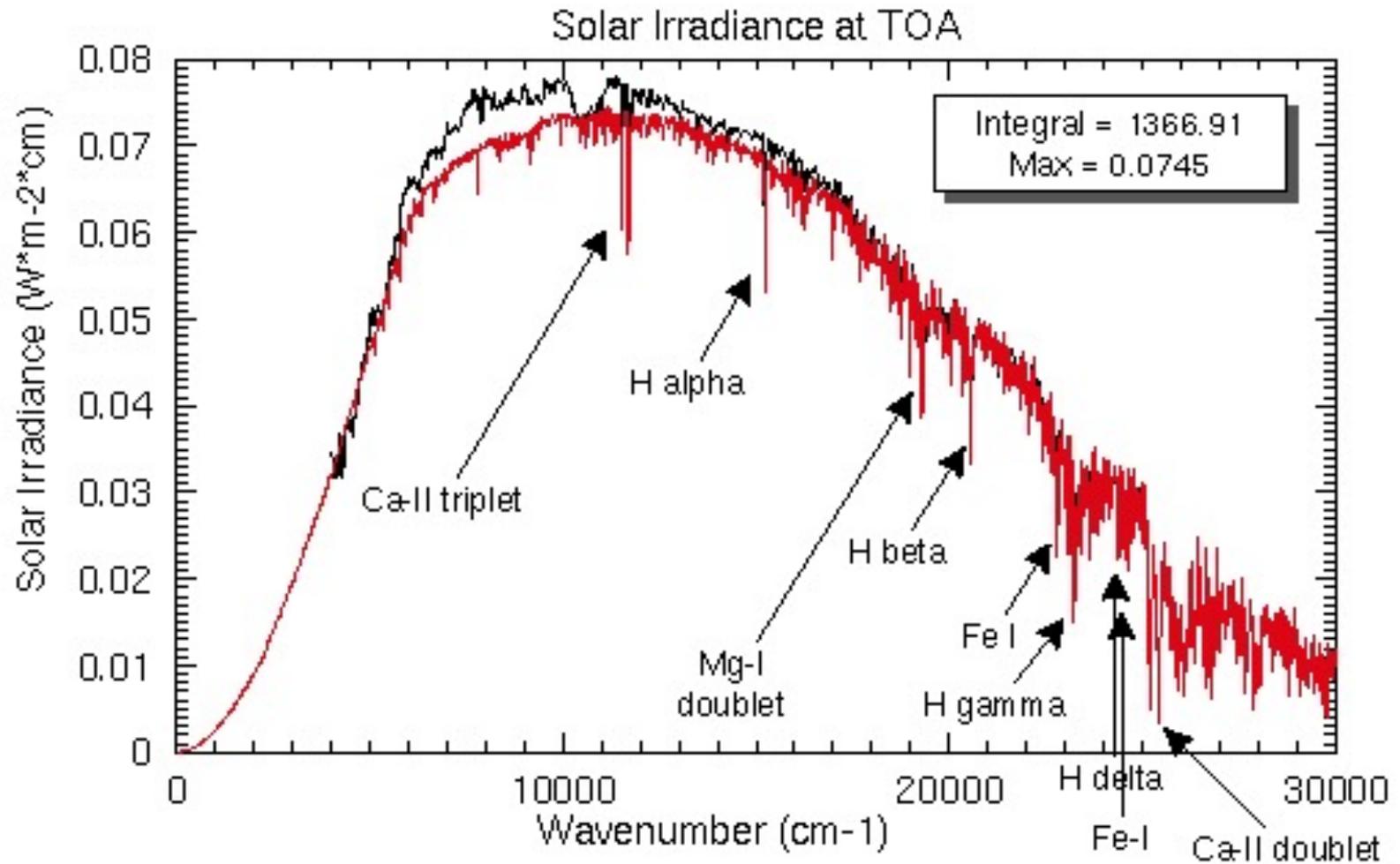
**Tercera ley:** Un gas a menor T interpuesto entre una fuente continua y un observador absorberá del espectro continuo radiación de la longitud de onda que emite al ser excitado.

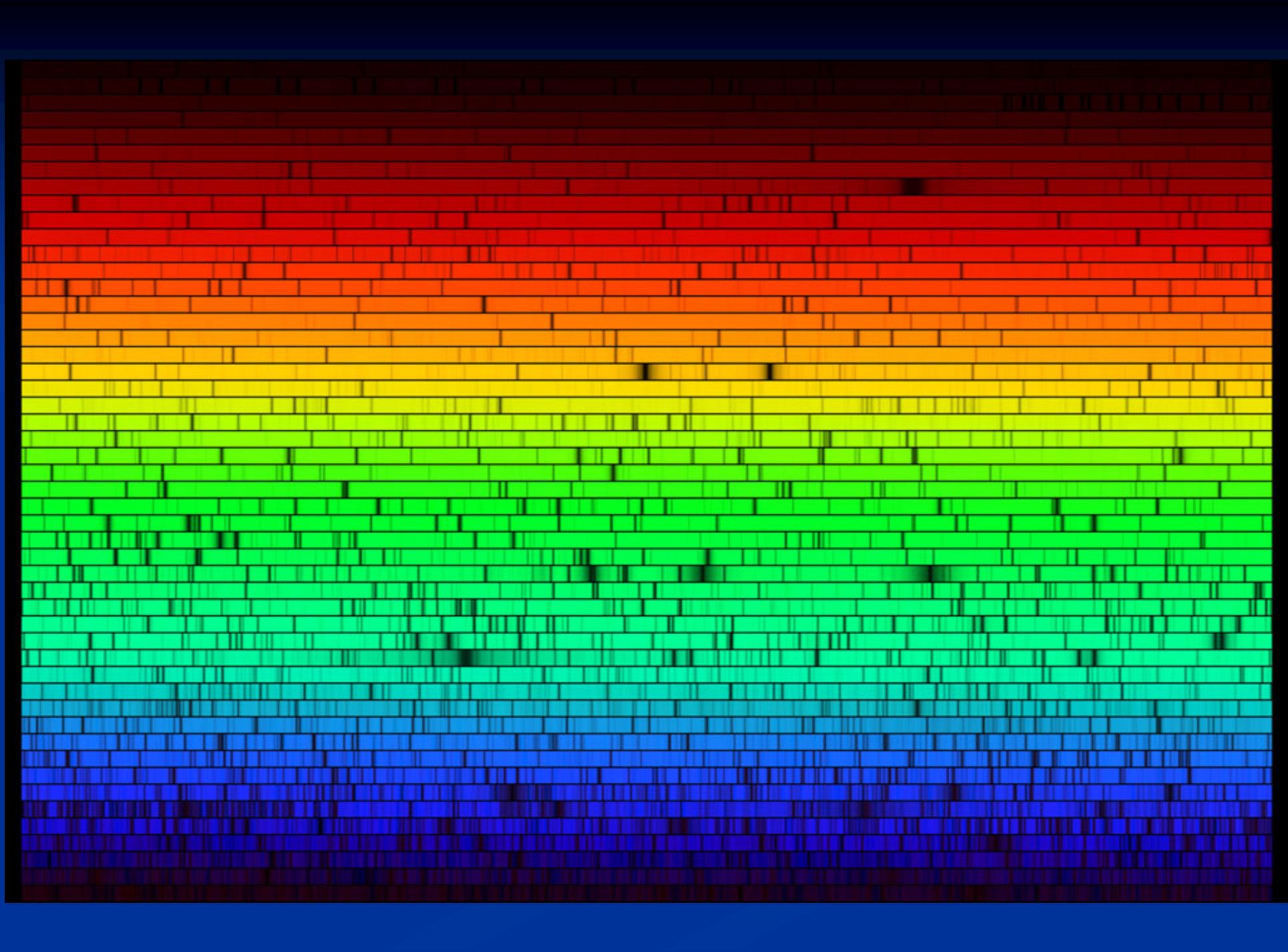


# Transiciones atómicas y moleculares

Transición	Energía (eV)	Región espectral	Ejemplo
Estructura hiperfina	$10^{-5}$	Radio	21 cm H
Acoplamiento spin-órbita	$10^{-5}$	Radio	18cm OH
Rotación molecular	$10^{-2} - 10^{-4}$	Milimétrica - IR	2.6mm J1-0 CO
Rotación-vibración molecular	$1 - 10^{-1}$	IR	$2\mu\text{m}$ H <sub>2</sub>
Estructura atómica fina	$1 - 10^{-3}$	IR	$12.8\mu\text{m}$ NeII
Transiciones electrónicas de átomos y moléculas	$10^{-2} - 10$	UV, visible, IR	Series H
Transiciones nucleares	$> 10^4$	Gamma	15MeV de <sup>12</sup> C
Aniquilaciones	$> 10^4$	Gamma	511keV de positronium

# ESPECTRO SOLAR RECIBIDA EN EL TOPE DE LA ATMOSFERA





# El pasaje de la radiación desde el techo de la atmósfera hasta nuestro ojo

Suma de efectos:

1

Absorción, Emisión y  
Dispersión en la atmósfera

+

3

Refracción en la atmósfera  
turbulenta

+

2

Pasaje por el sistema óptico  
(reflexión y/o refracción, difracción)

1

# Pasaje de la radiación a través de un medio denso

Atmósfera como capas plano-paralelas no turbulentas

- Absorción
  - Emisión
  - Dispersión (Scattering)
- } Transferencia Radiativa

# Transferencia Radiativa

Propagación de la radiación en un medio



Energía puede:

- Adicionarse – Emisión
- Substraerse – Absorción

$$dE = dE_{abs} + dE_{emi}$$

$$dE = dI_{\nu} dA d\nu d\omega dt$$

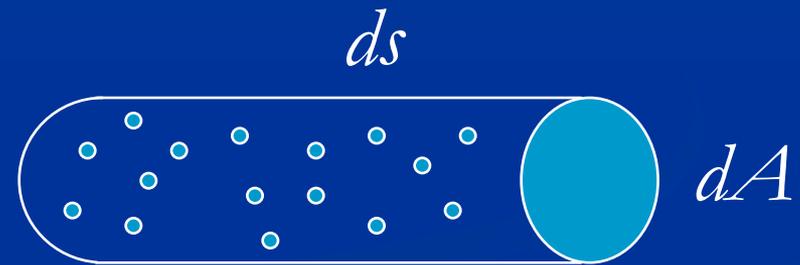
# Emisión

Coeficiente de emisión espontánea  $j_\nu$  - energía emitida por unidad de tiempo, de ángulo sólido y de volumen ( $ds dA$ )

$$dE_{emi} = j_\nu ds dA d\nu d\omega dt$$

# Absorción

Considero partículas de densidad numérica  $n$  con un área efectiva de absorción (sección de corte)  $\sigma$ .



El área total de absorbentes es  $n\sigma ds dA$

La Energía absorbida será

$$dE_{abs} = -n \sigma_\nu I_\nu ds dA d\nu d\omega dt$$

Definimos

$\alpha$  - coeficiente de absorción [ $m^{-1}$ ]

$$\alpha_\nu = n\sigma_\nu$$

$$\alpha_\nu = \rho\kappa_\nu$$

$\kappa$  - coeficiente de absorción masivo u opacidad [ $m^2kg^{-1}$ ]

donde  $\rho$  - densidad

# Ecuación de Transferencia Radiativa

Sustituyendo las expresiones de la absorción y emisión en la ecuación de balance y reduciendo, queda

$$dI_\nu = -\alpha_\nu I_\nu ds + j_\nu ds$$

$$\frac{dI_\nu}{ds} = -\alpha_\nu I_\nu + j_\nu$$

Introduciendo la profundidad óptica  $\tau$

$$d\tau_\nu = \alpha_\nu ds$$

queda

$$\frac{dI_\nu}{d\tau_\nu} = -I_\nu + S_\nu$$

$$S_\nu \equiv \frac{j_\nu}{\alpha_\nu}$$

donde  $S_\nu$  es denominada  
Función Fuente

# Soluciones particulares a la ecuación de transferencia radiativa

- Medio que solo emite ( $\alpha_v = 0$ )

$$\frac{dI_v}{ds} = j_v$$

$$I_v = I_v(s_0) + \int_{s_0}^s j_v ds'$$

El brillo incrementa con el coef. de emisión integrado a lo largo de la visual.

- Medio que solo absorbe ( $j_v = 0$ )

$$\frac{dI_v}{ds} = -\alpha_v I_v$$

$$I_v = I_v(s_0) \exp\left[-\int_{s_0}^s \alpha_v ds'\right]$$

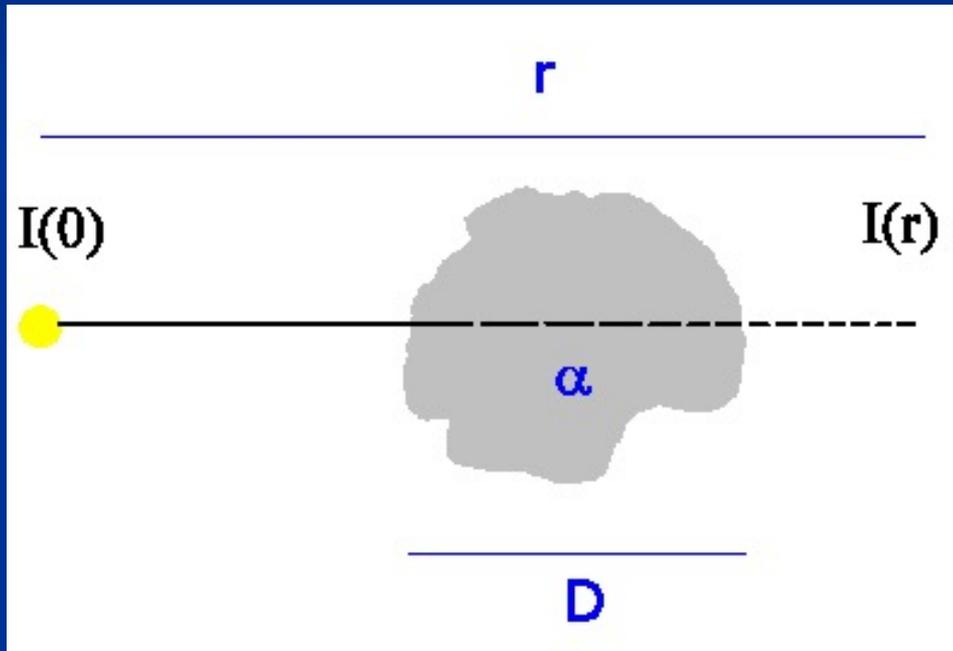
Si  $\alpha_v = \text{cte}$  y la nube tiene un tamaño  $D$ :

$$I_v = I_v(s_0) \exp[-\alpha_v D]$$

# Absorción en una nube

$L$  = Camino Libre Medio de los fotones

$$L = \frac{1}{\alpha}$$



$$I(r) = \frac{I(0)}{e^{D\alpha}} = \frac{I(0)}{e^{D/L}}$$

- Si  $D \gg L$  ( $\alpha \gg 1$ ), gran absorción – medio opaco
- Si  $D \ll L$  ( $\alpha \ll 1$ ), absorción despreciable – medio transparente

# Absorción en la atmósfera

- Suponemos una atmósfera compuesta por constituyentes ( $i$ ) que en función de la altura ( $z$ ) tienen una abundancia fraccional  $r_i(z)$  y el aire una densidad  $\rho(z)$ .
- Los constituyentes tiene un coeficiente de absorción masivo  $\kappa_i$ .
- A una altura  $z_0$  la profundidad óptica  $\tau$  en la vertical debido al constituyente  $i$  es

$$\tau_i(\lambda, z_0) = \int_{z_0}^{\infty} r_i(z) \rho(z) \kappa_i(\lambda) dz$$

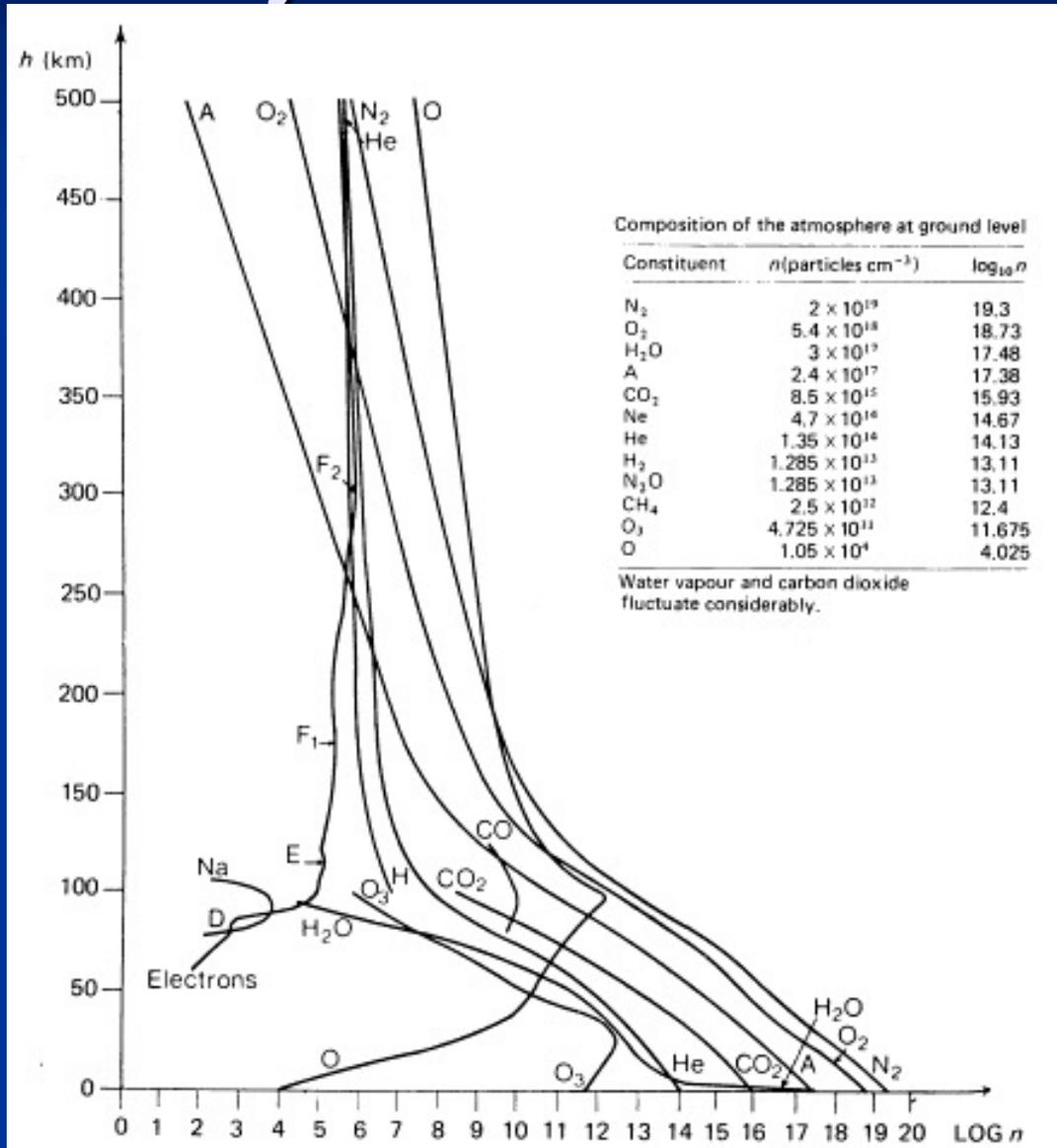
- La atenuación de la intensidad a la altura  $z_0$  para un objeto en una dirección con una distancia cenital  $\theta$ , es dada por

$$\frac{I_\lambda(z_0)}{I_\lambda(\infty)} = \exp\left[-\frac{1}{\cos \theta} \sum_i \tau_i(\lambda, z_0)\right]$$

# Transiciones atómicas y moleculares relevantes en la atmósfera

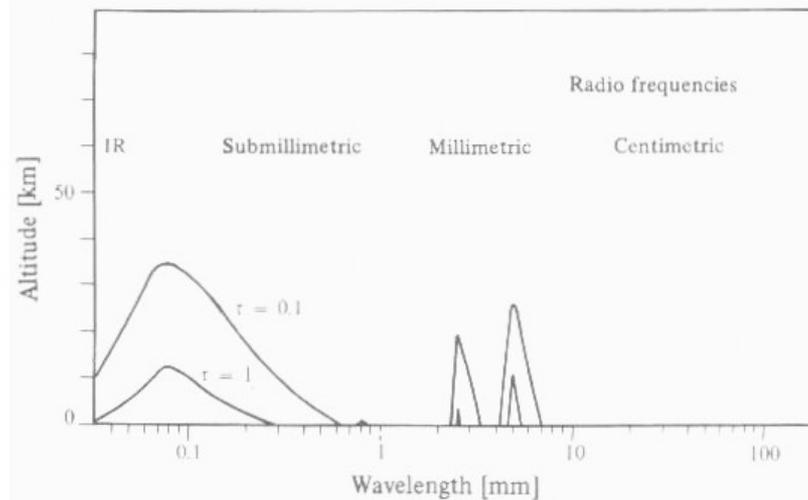
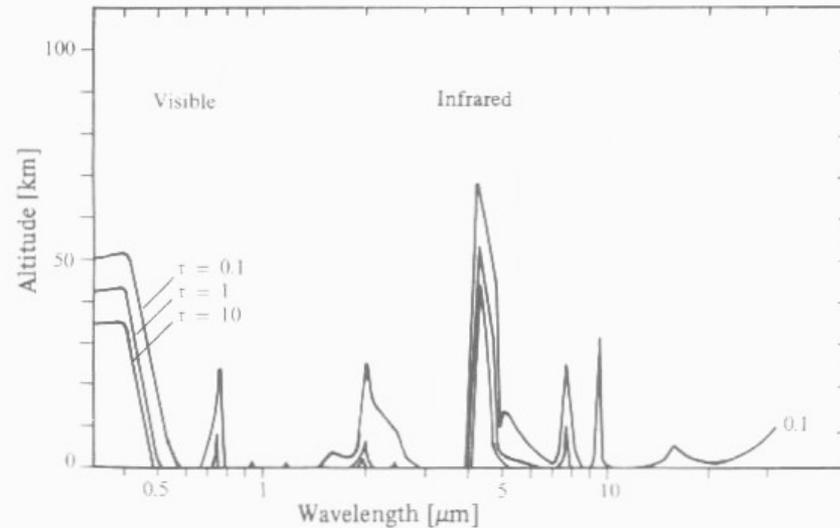
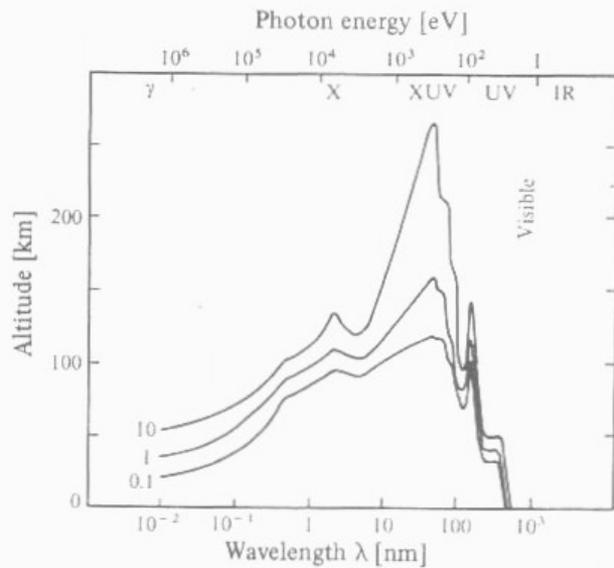
- Transiciones moleculares rotacionales puras ( $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ , ...) – mm e IR
- Transiciones moleculares rotacionales-vibracionales ( $\text{CO}_2$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{CO}$ , ...) – IR
- Transiciones moleculares electrónicas ( $\text{CH}_4$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{O}_3$ , ...) – Visible y UV
- Transiciones electrónicas de átomos e iones ( $\text{O}$ ,  $\text{N}$ , ...) – Visible y UV

# Variación con altura de los constituyentes atmosféricos

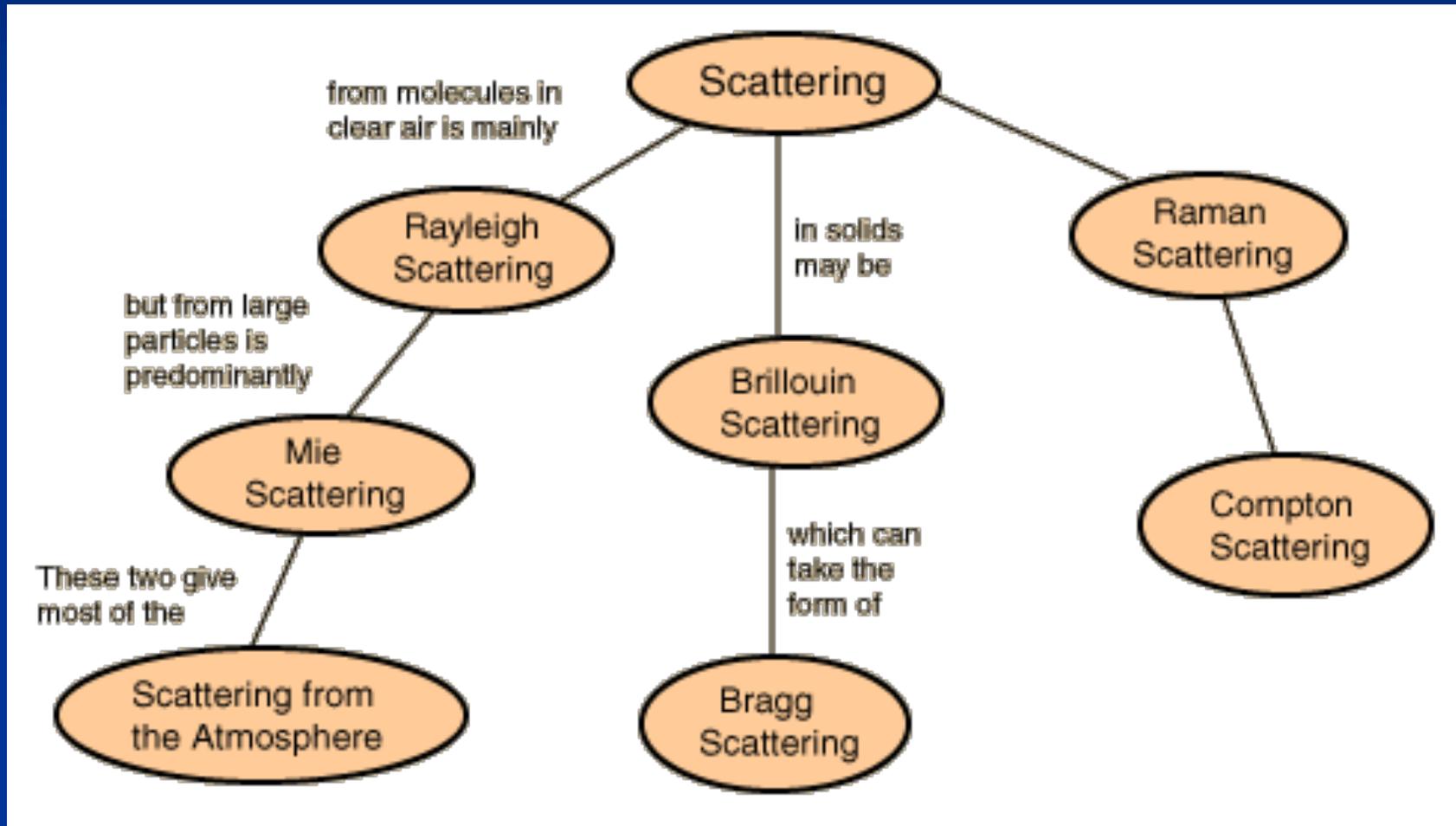




# Curvas de iso- $\tau$ en función de la altura $z$

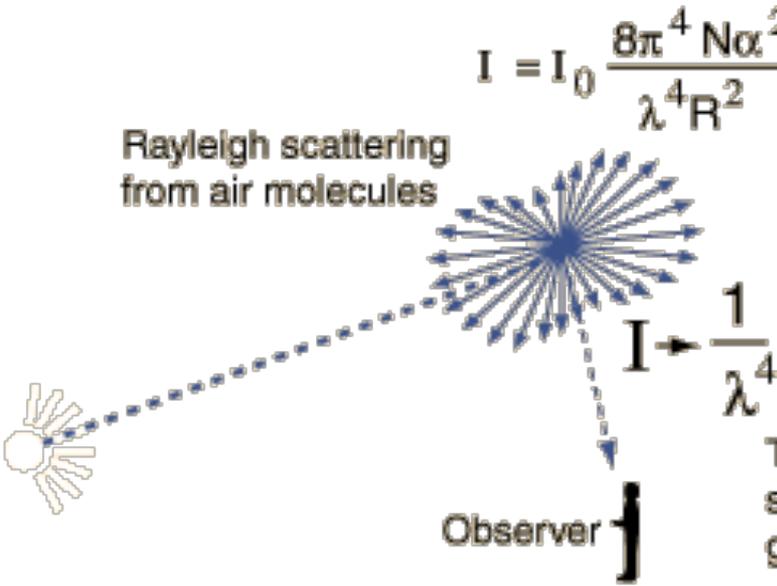


# Dispersión (Scattering)



# Dispersión Rayleigh por moléculas

Para partículas de tamaño  $< 0.1\lambda$ , la intensidad dispersada por dispersores dipolares es:



Rayleigh scattering from air molecules

$$I = I_0 \frac{8\pi^4 N\alpha^2}{\lambda^4 R^2} (1 + \cos^2\theta)$$

Scattering at right angles is half the forward intensity for Rayleigh scattering

$N$  = # of scatterers  
 $\alpha$  = polarizability  
 $R$  = distance from scatterer

$I \propto \frac{1}{\lambda^4}$

Observer

The strong wavelength dependence of Rayleigh scattering enhances the short wavelengths, giving us the blue sky.

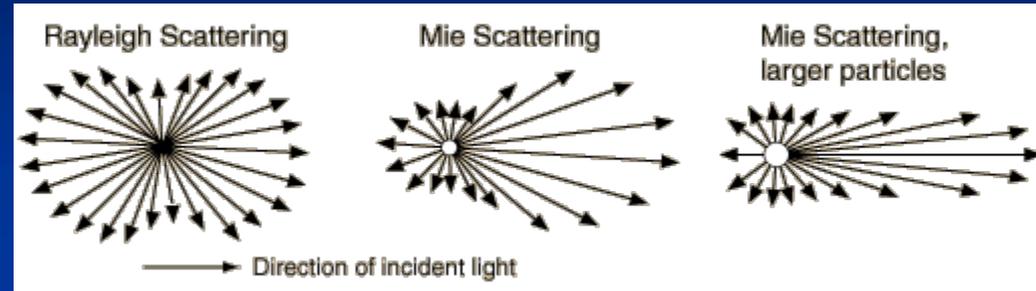
Dispersión casi-uniforme y fuertemente dependiente de  $\lambda$

# Dispersión Mie por gotas de agua y aerosoles

## ■ Dispersión Mie

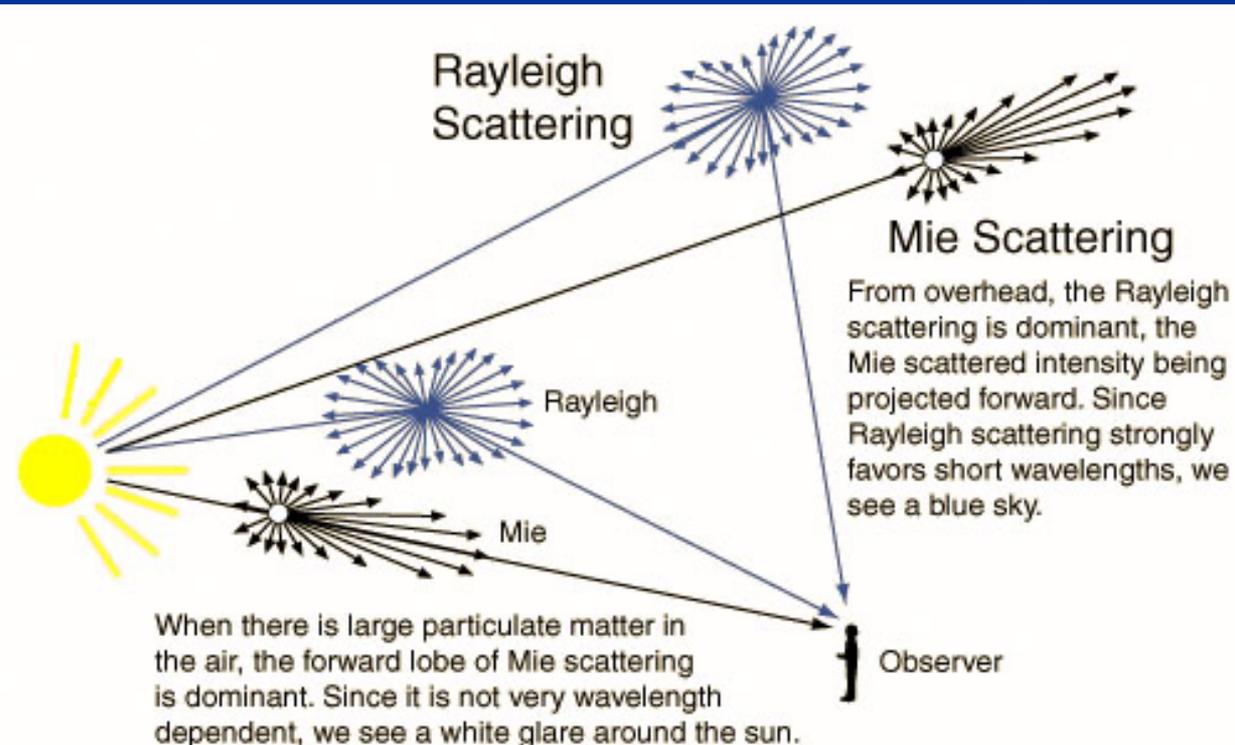
$$a \gg \lambda \quad \sigma \approx 2 \pi a^2$$

$$a > \lambda \quad \sigma \propto 1 / \lambda$$

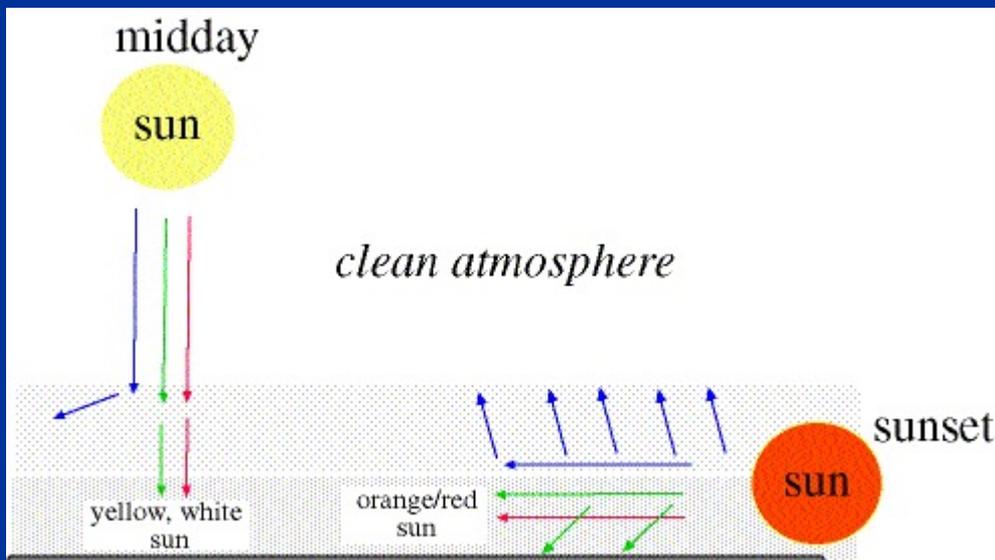
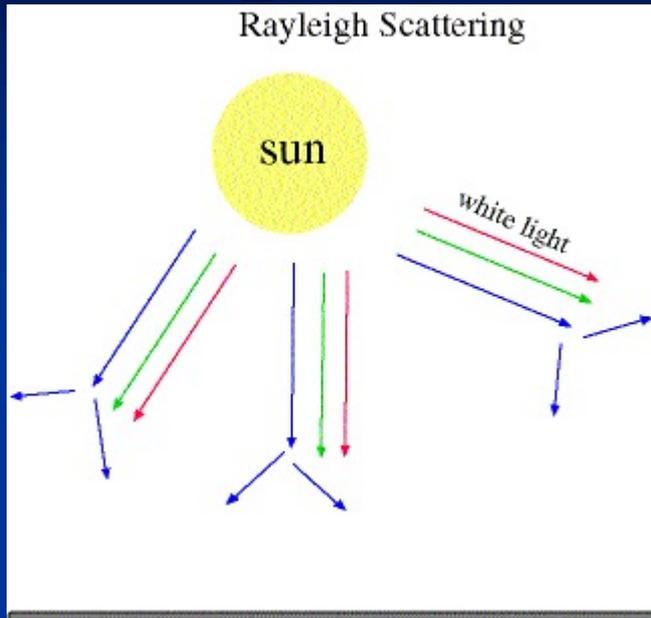


Fuerte dispersión hacia adelante

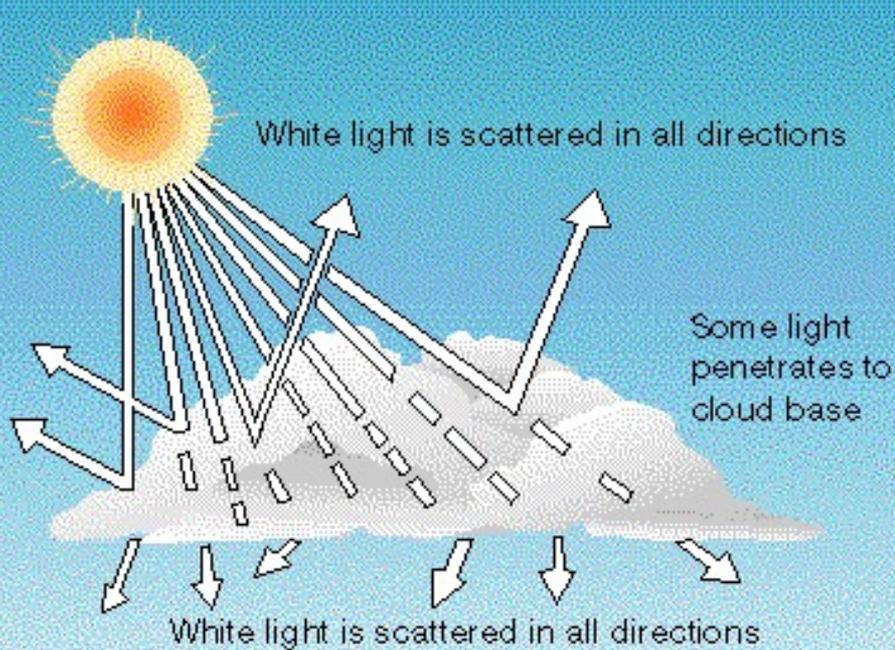
Dispersión  
Rayleigh y Mie  
combinadas



# Dispersión Rayleigh por moléculas



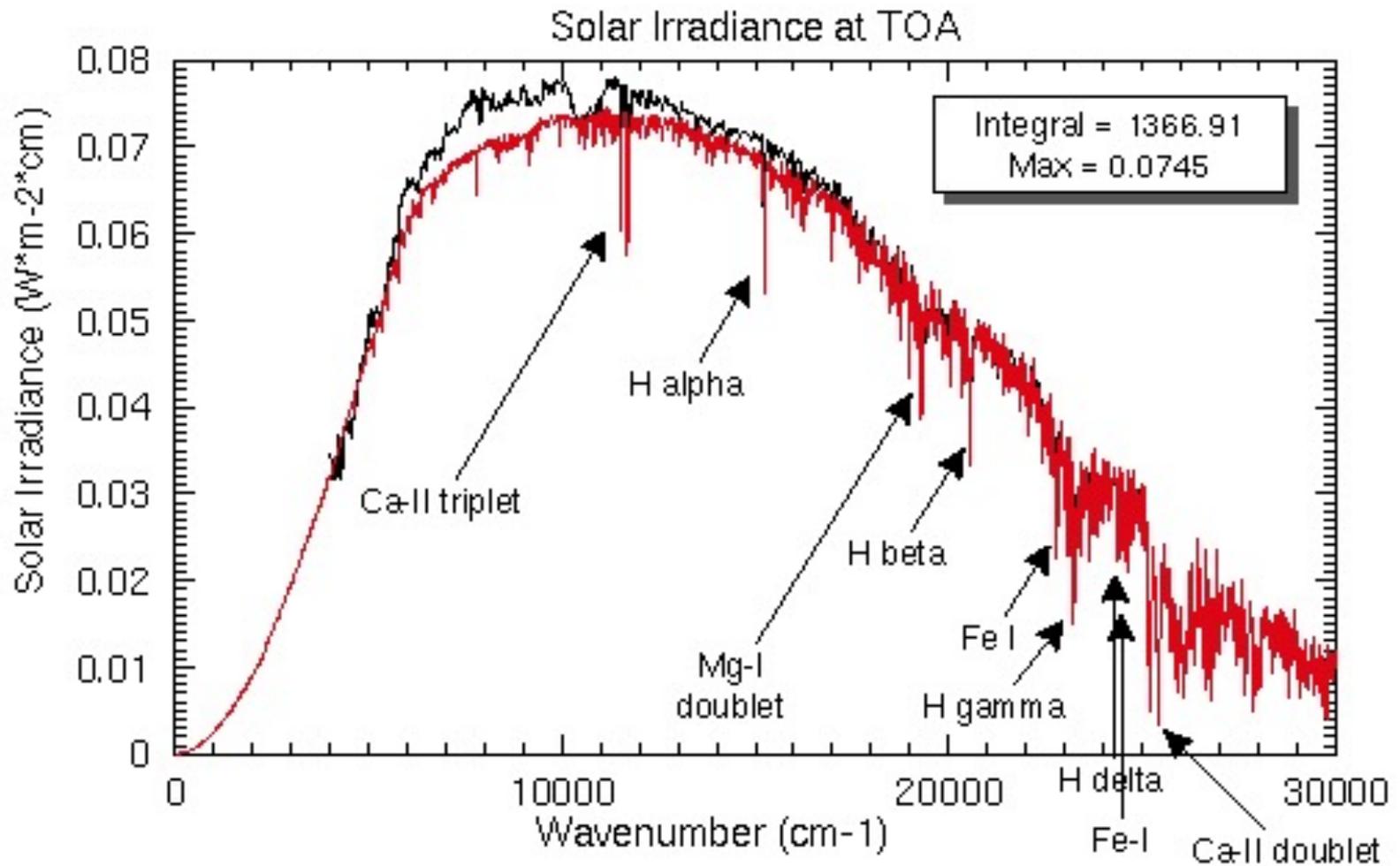
# Dispersión Mie por gotas de agua y aerosoles



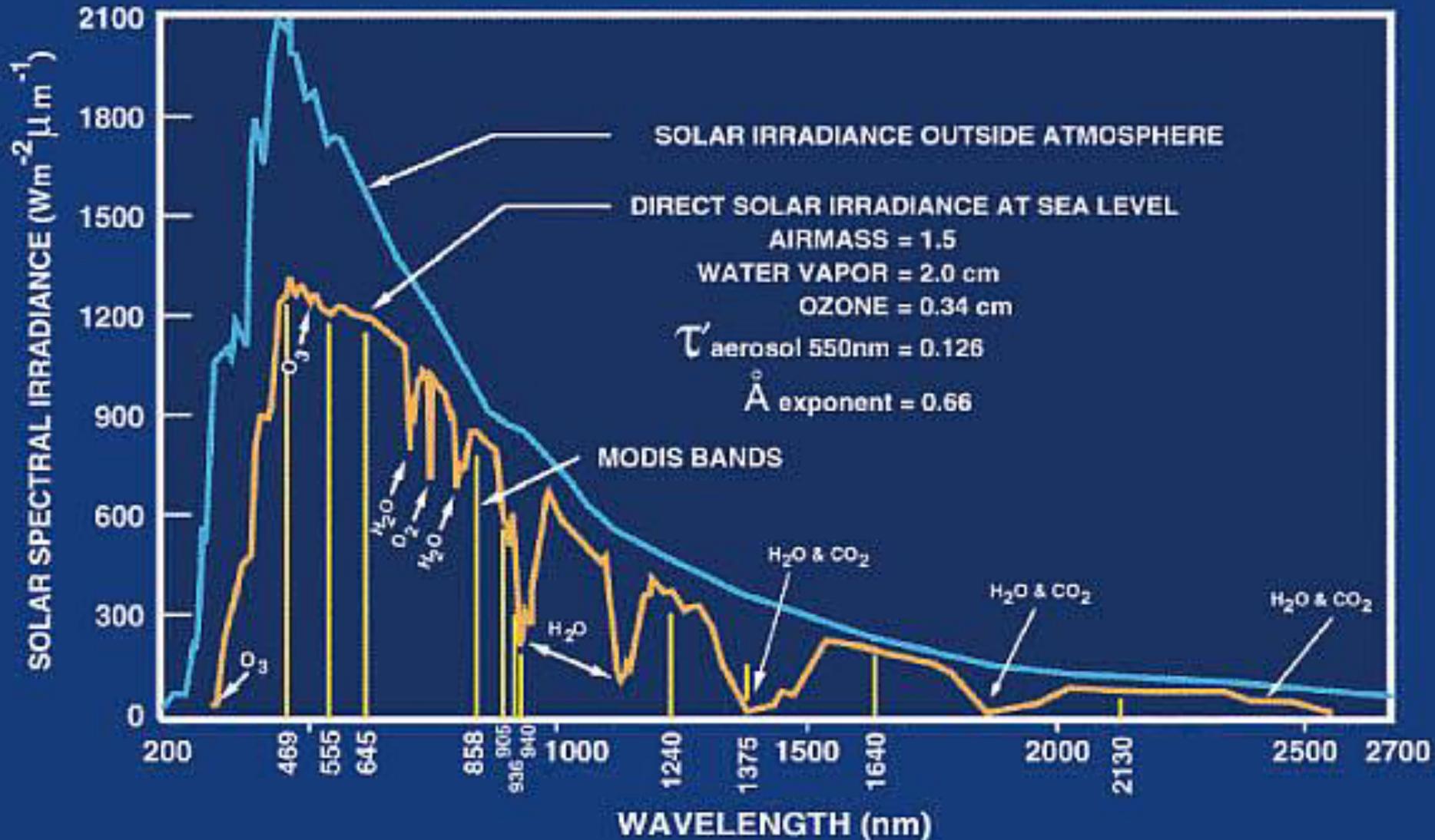
Absorción  
+  
Emisión  
+  
Dispersión

en el Espectro del Sol

# ESPECTRO SOLAR OBSERVADOR EN EL TOPE DE LA ATMOSFERA

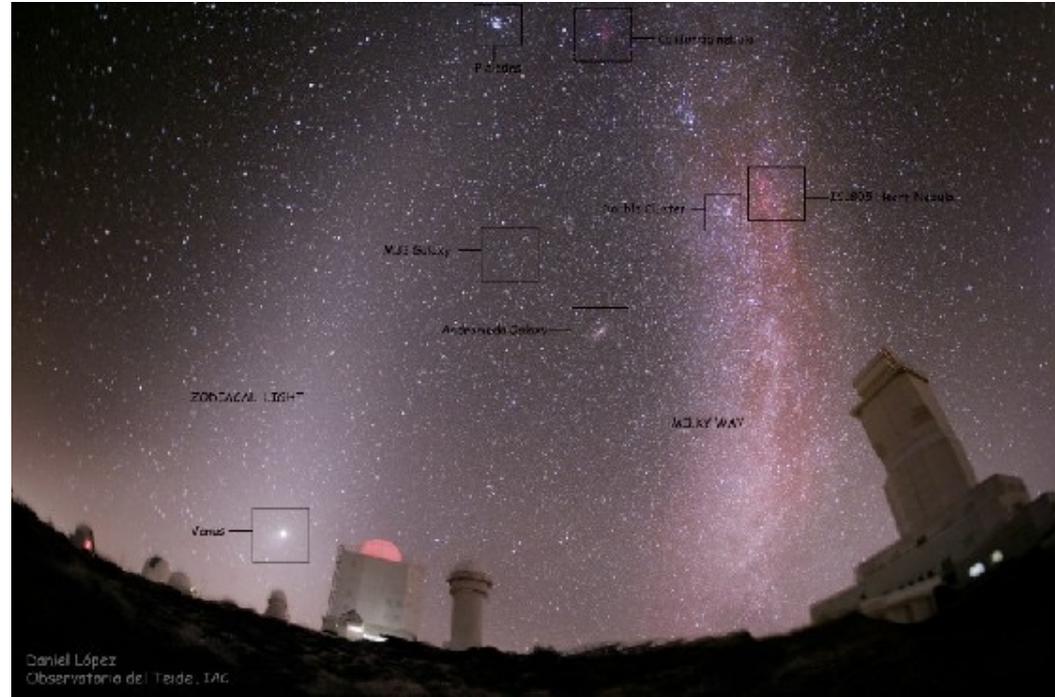


# RADIACION SOLAR RECIBIDA EN EL TOPE DE LA ATMOSFERA Y EN LA SUPERFICIE TERRESTRE

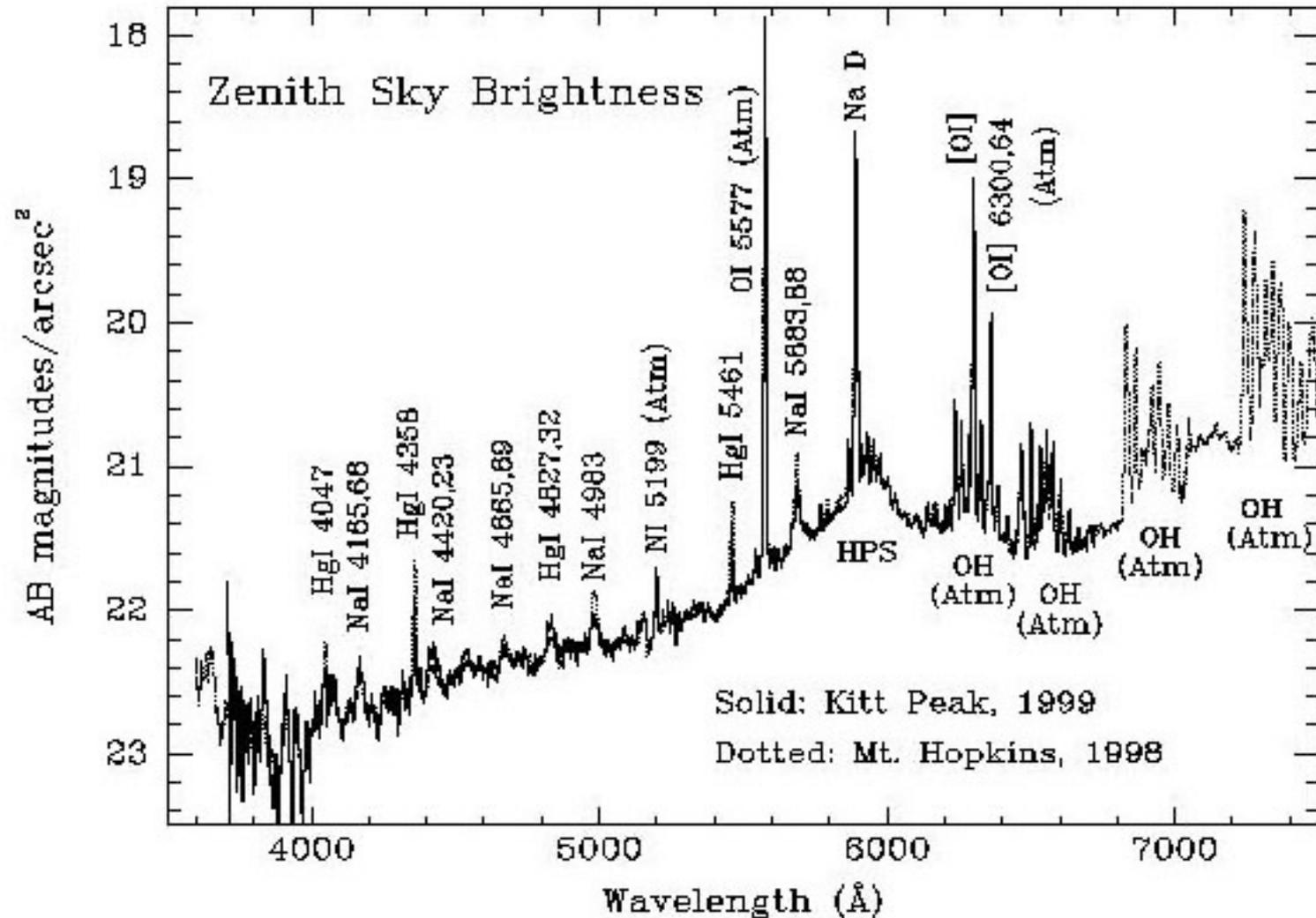


# Emisión Atmosférica

- Fuentes Naturales:
  - Luminiscencia por recombinación de átomos ionizados por la radiación UV en la alta atmósfera
  - Luna
  - Luz Zodiacal: luz dispersada por polvo en el plano de la eclíptica
  - Auroras (cerca de los polos terrestres)
- Fuentes Artificiales:
  - Contaminación lumínica

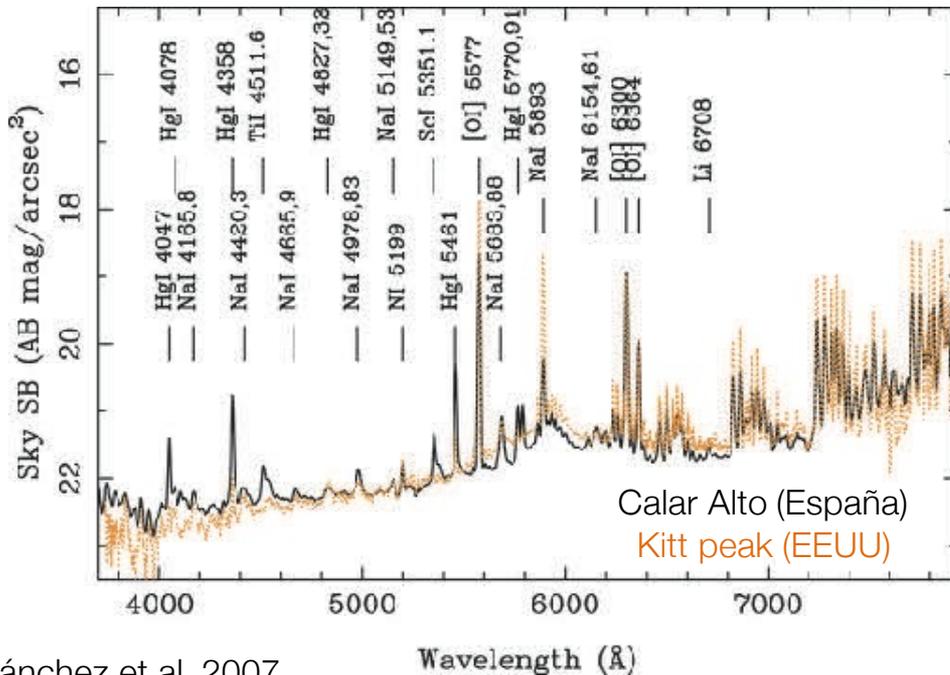
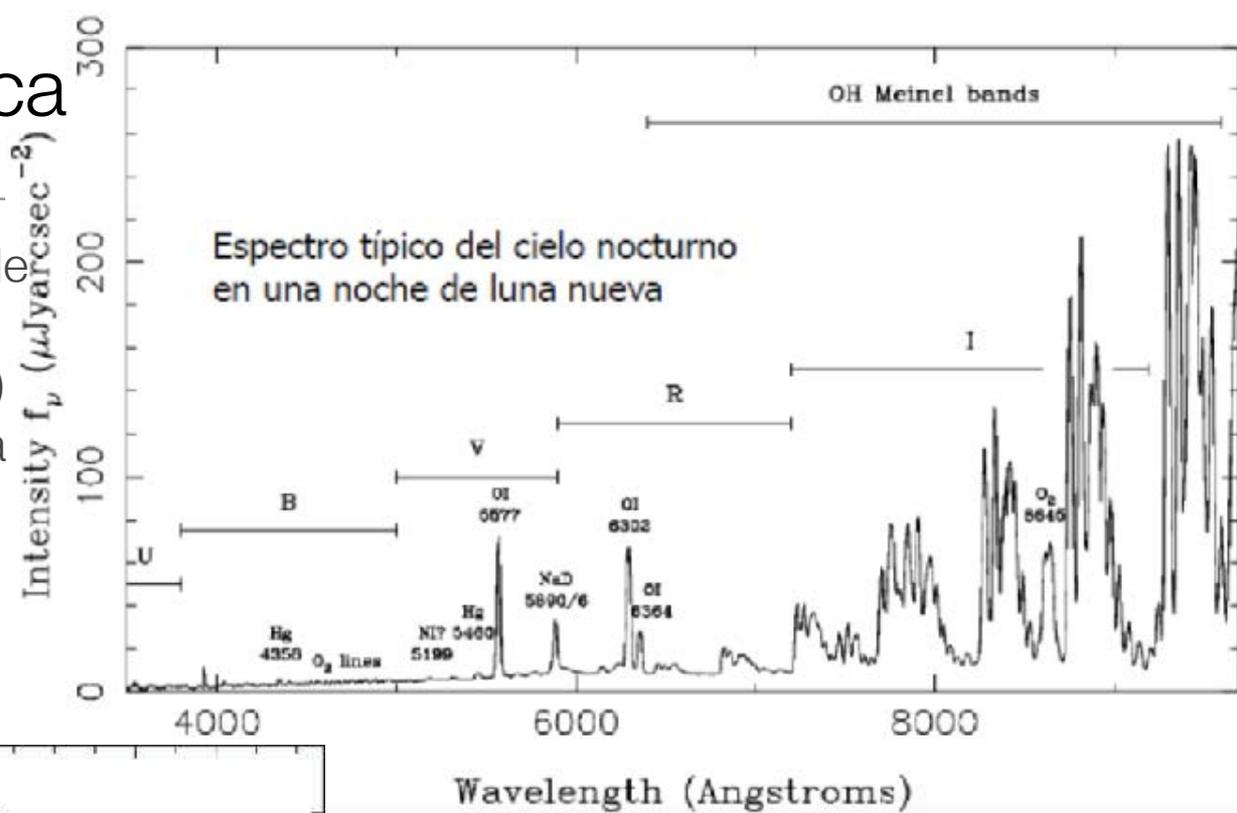


# Espectro del cielo nocturno



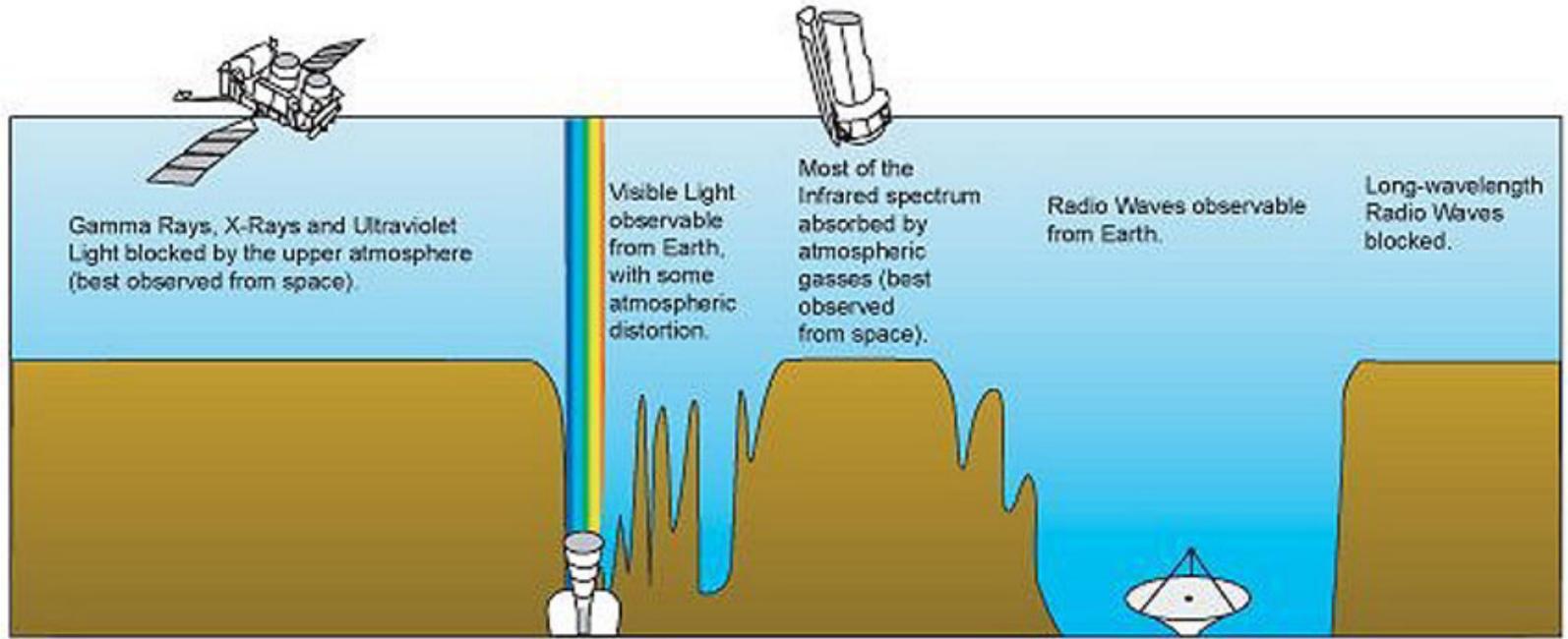
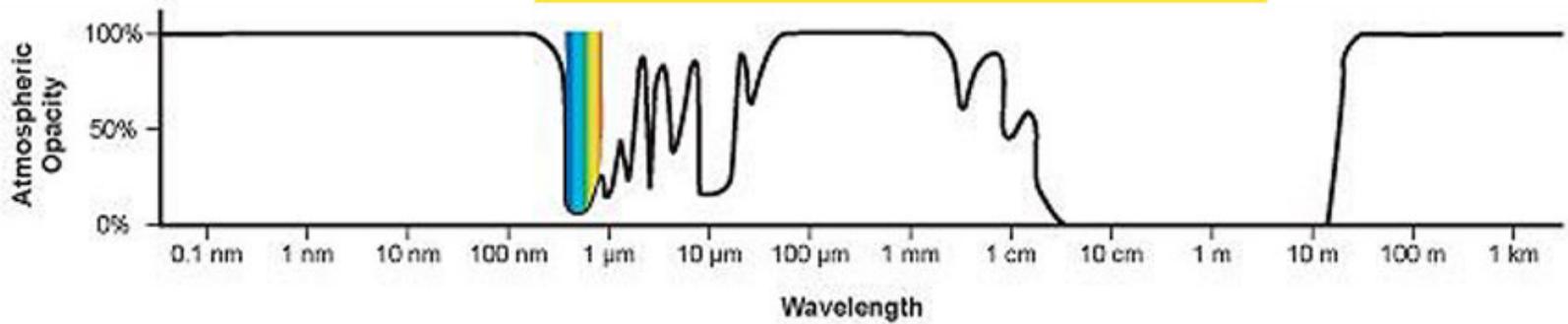
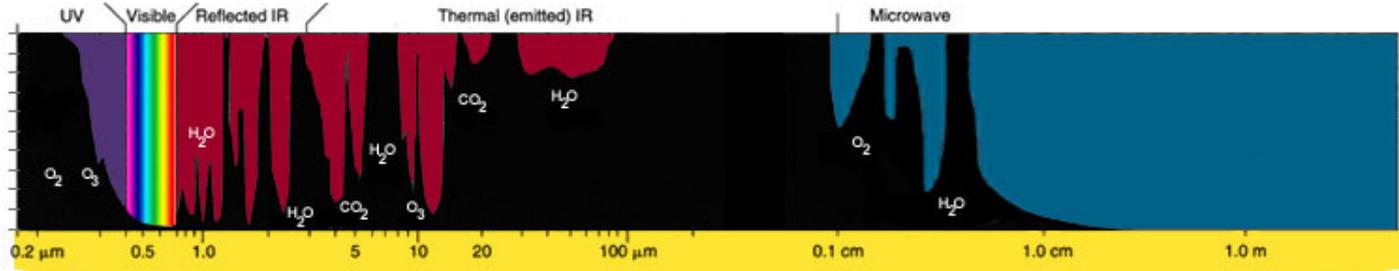
# Emisión Atmosférica

- Luminiscencia por emisión de luz de átomos excitados (o recombinación de ionizados) por la radiación UV en la alta atmósfera
- e.g. OH, O<sub>2</sub>, OI...

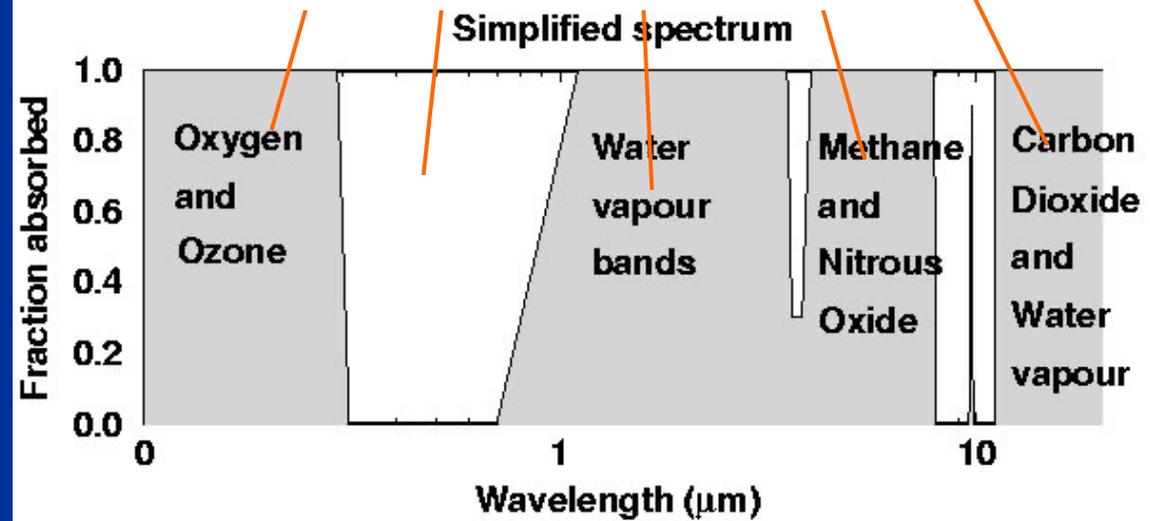
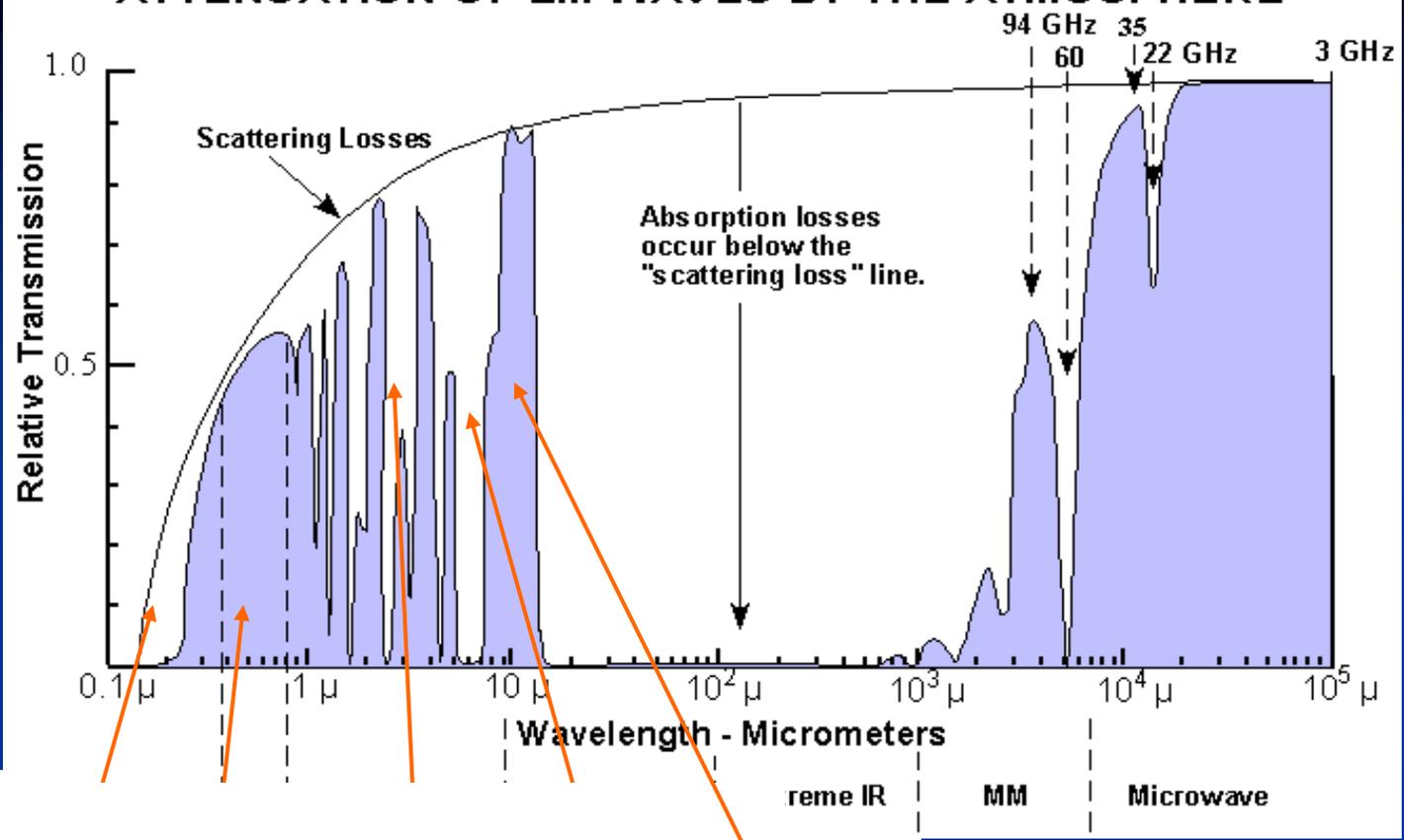


- Contaminación lumínica: luz emitida hacia el cielo y dispersada en la atmósfera y/o reflejada por nubes

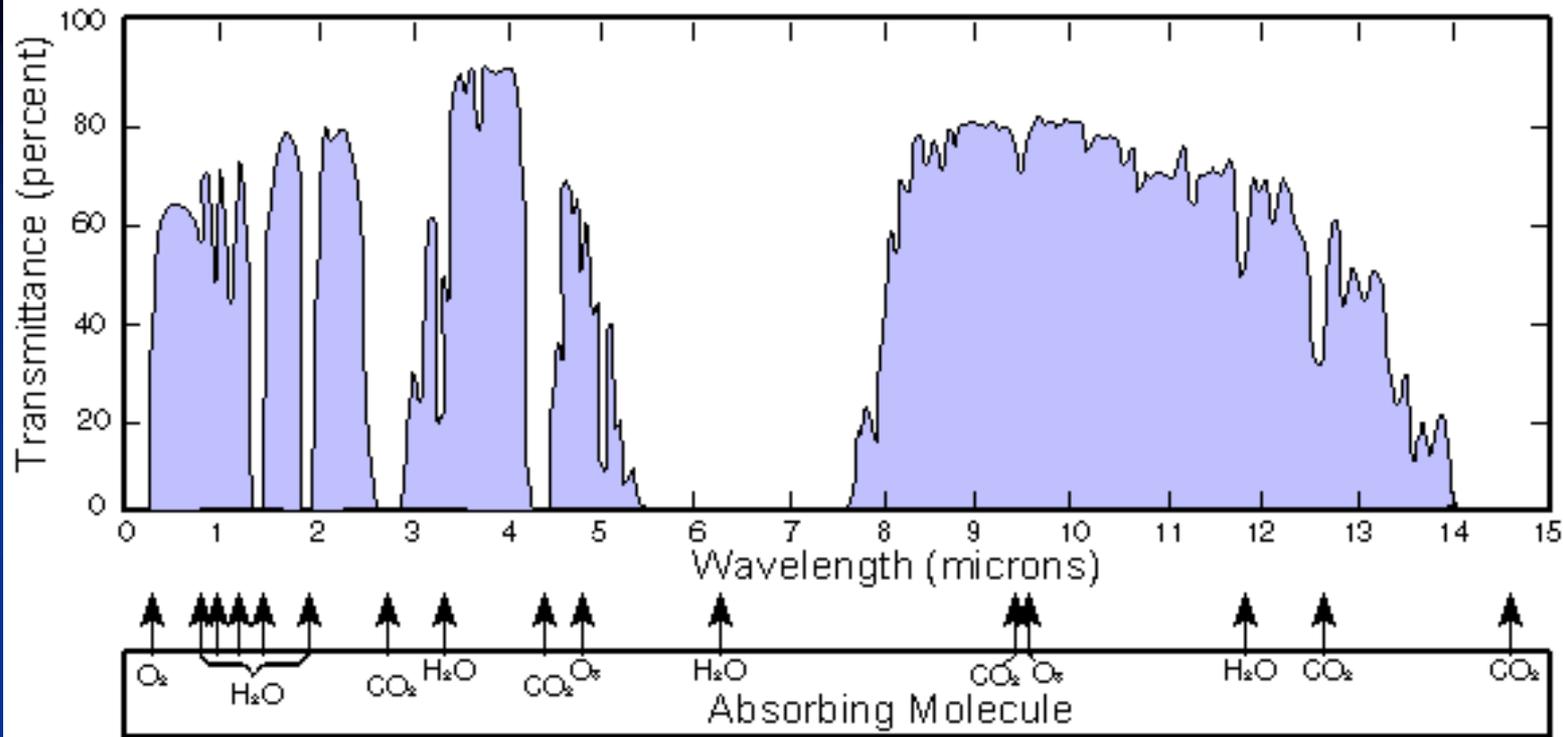
# Las ventanas atmosféricas



# ATTENUATION OF EM WAVES BY THE ATMOSPHERE

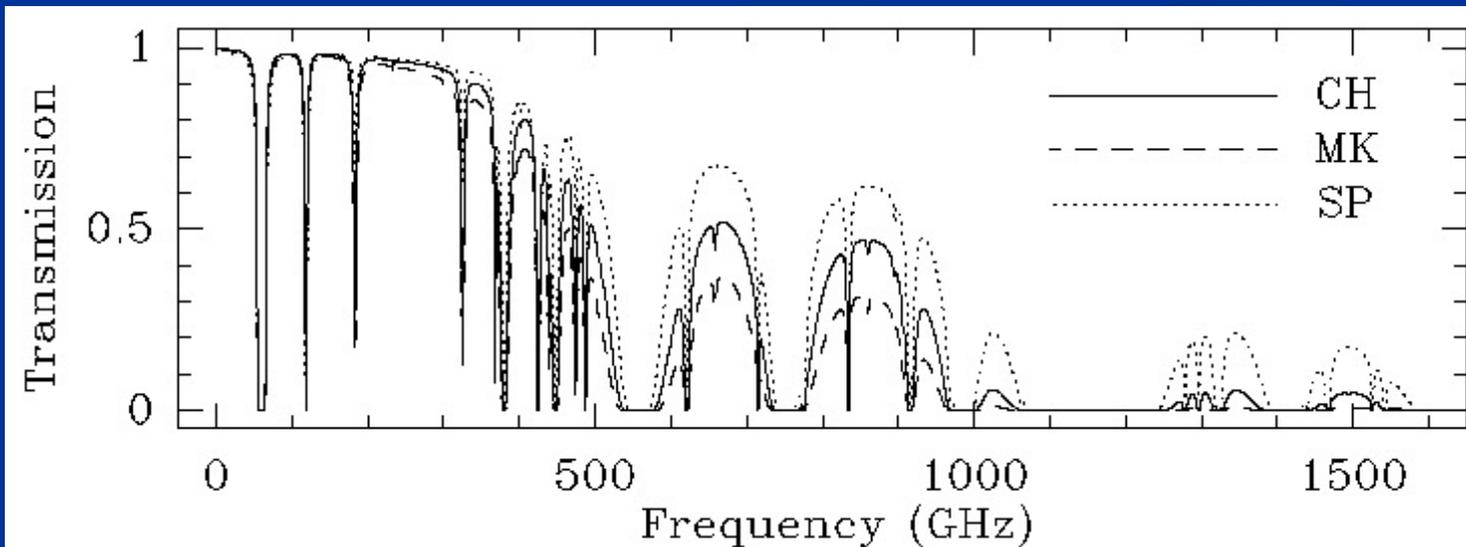


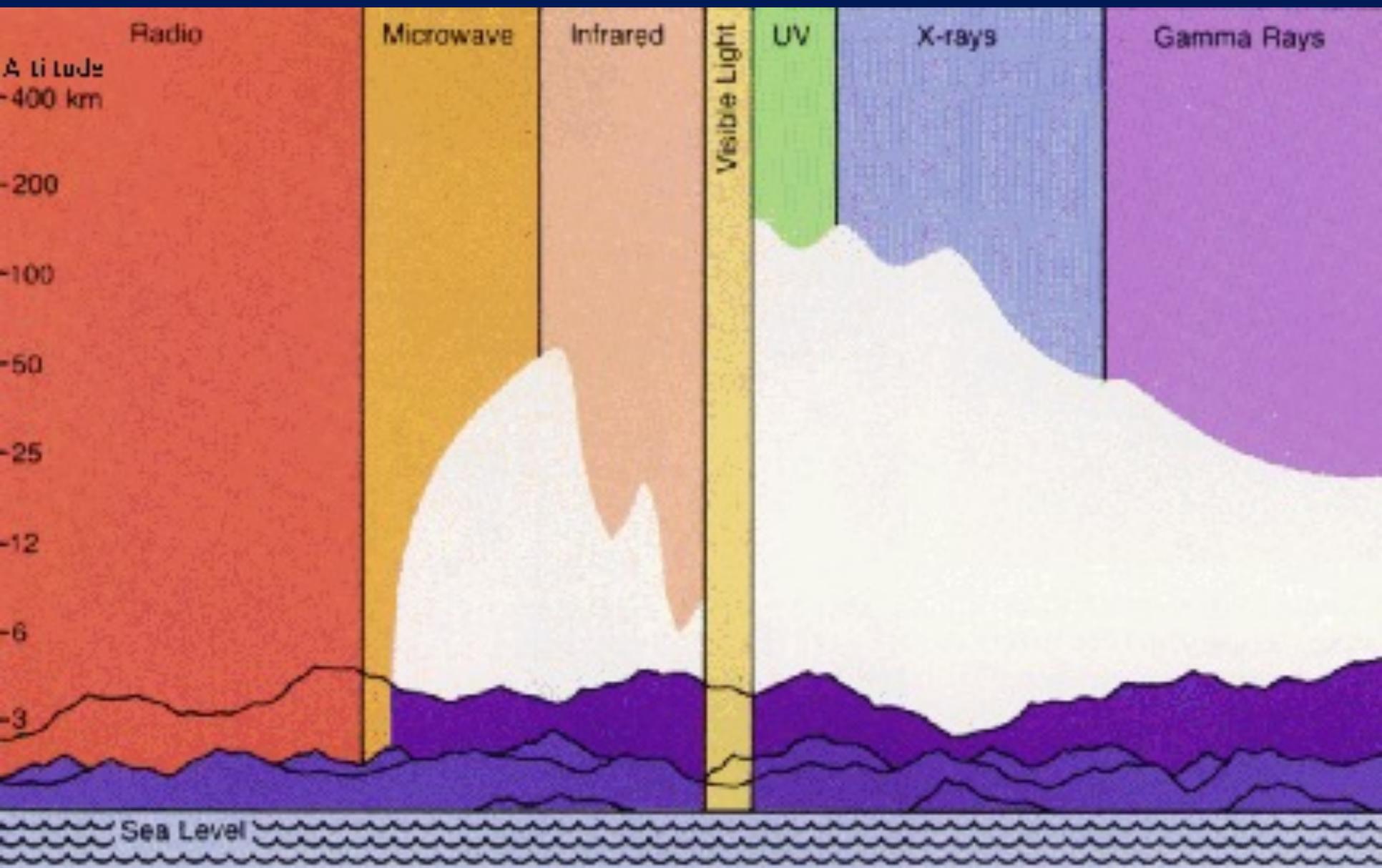
# Región IR



# Región mm

para  
Chajnantor (Chile),  
Mauna Kea (Hawaii)  
y South Pole



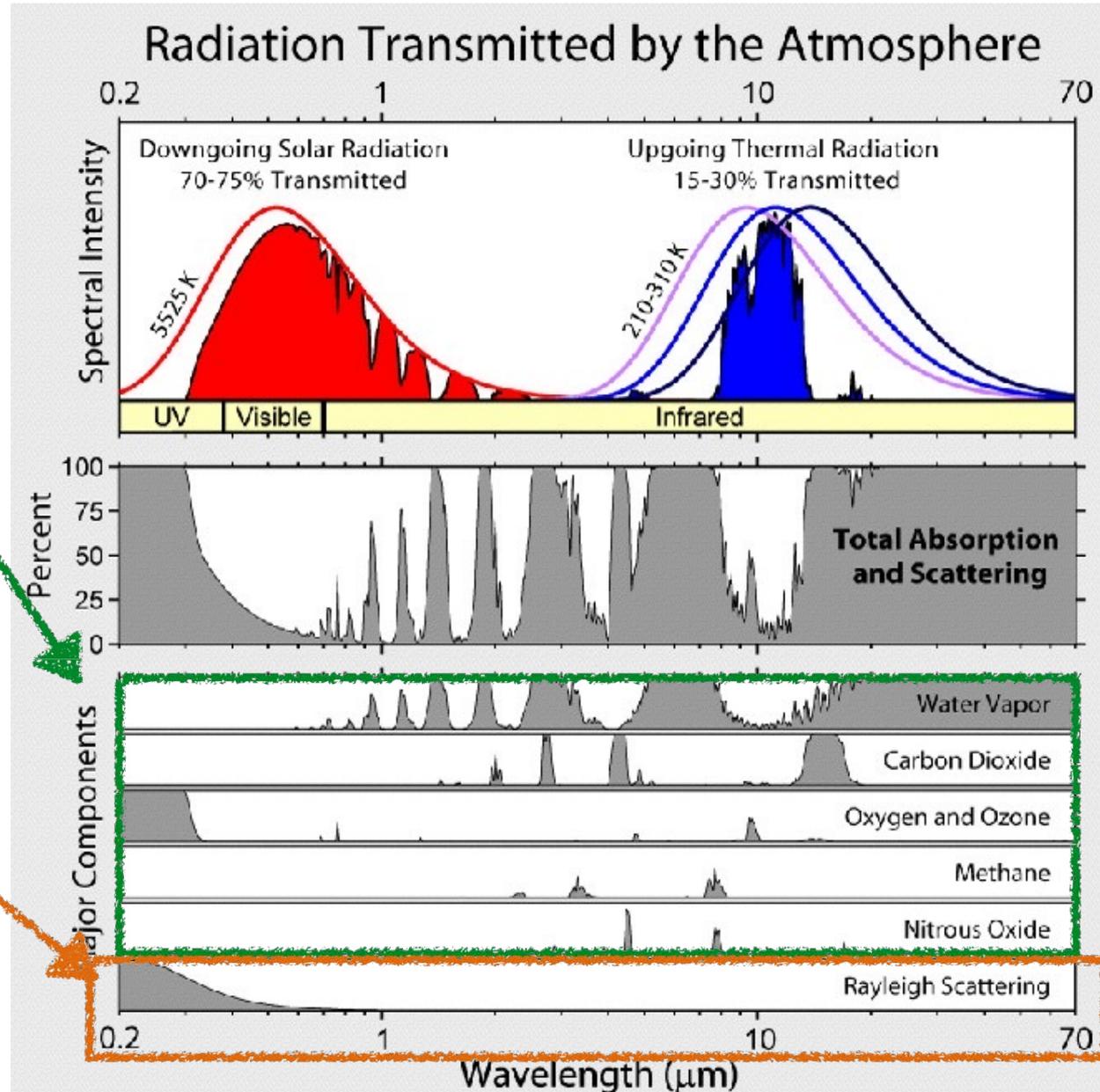


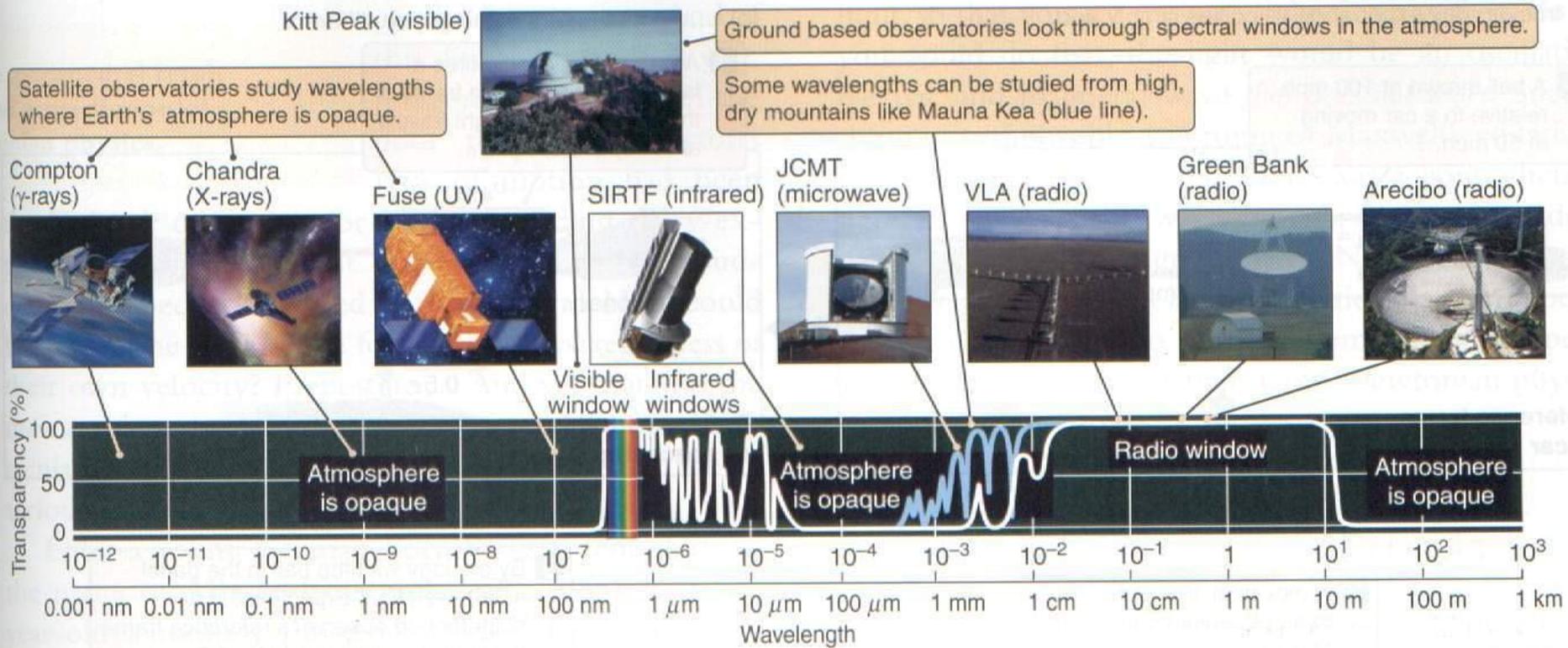
# Efectos de la atmósfera: Absorción

- Absorción:

- cuantizada: por líneas espectrales y bandas moleculares de absorción de elementos en la atmósfera

- continua: por dispersión de moléculas y aerosoles





**Figure 4.12** Earth's atmosphere blocks most electromagnetic radiation. Earth-bound telescopes observe the sky through transparent "windows" in the atmosphere. To observe wavelengths outside of these windows requires sending telescopes into space.

# Extinción Atmosférica

- El efecto total de la dispersión de Rayleigh causa lo que llamamos **extinción**
- La **extinción**  $A$  (en un filtro dado) se define como diferencia entre la magnitud observada  $m$  de una estrella y la magnitud  $m_o$  que tendría en ausencia de la atmósfera

$$A = m - m_o$$

- La extinción depende de la **masa de aire**  $X$ :

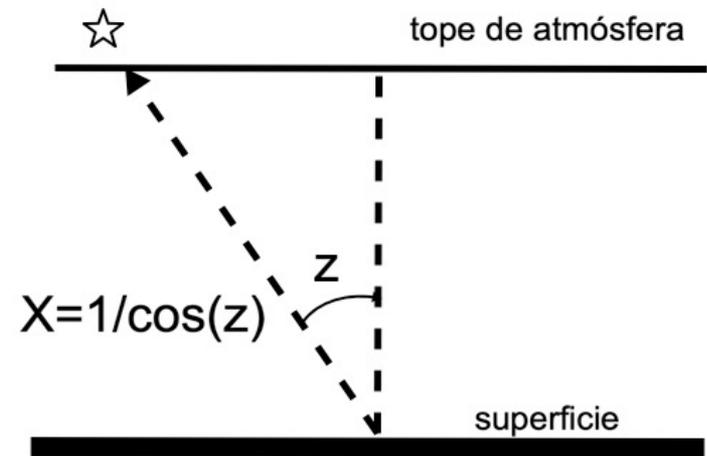
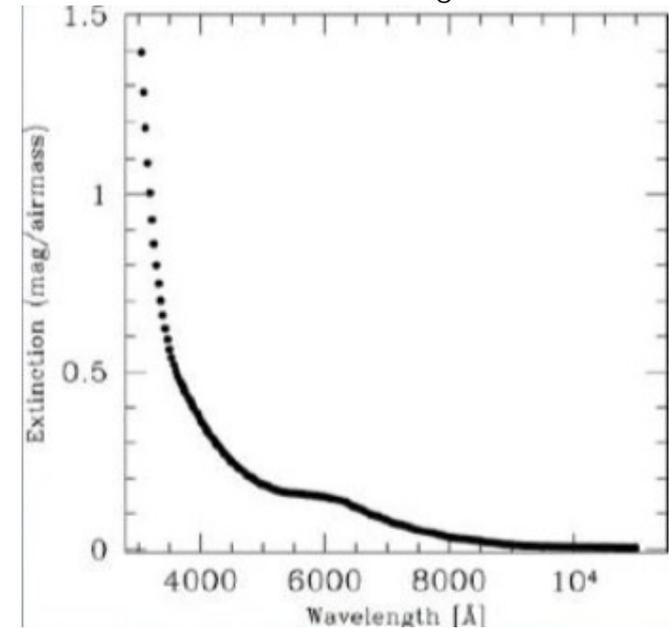
$$m(X) = m_o + k \cdot X$$

**coeficiente de extinción**

- En la aproximación de una atmósfera (localmente) plano paralela, tenemos:

$$X \approx \frac{1}{\cos z} = \sec z$$

**ángulo zenital**



Aproximación válida para  $z < 60^\circ$

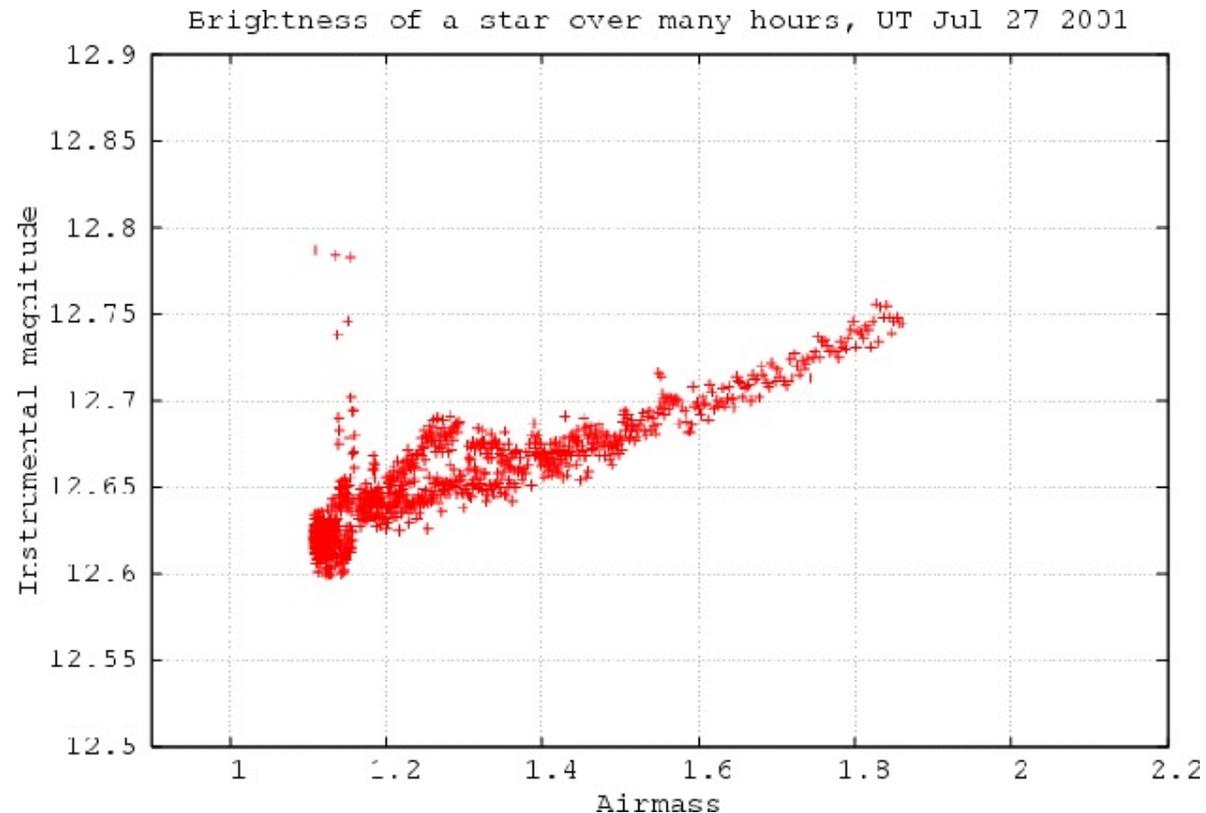
# Extinción Atmosférica

---

- El coeficiente de extinción  $k$  depende de la longitud de onda / filtro, del lugar, de las condiciones climáticas de la noche de observación...

$$m(X) = m_o + k \cdot X$$

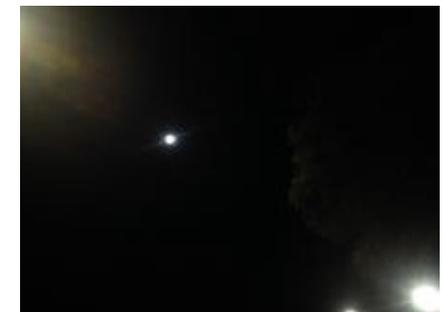
- El efecto se puede corregir observando un conjunto de estrellas, en la misma noche, para varias masas de aire
- El punto de corte de la recta  $m(X)$  es la magnitud que se observaría sin efecto de la extinción atmosférica



# Extinción Atmosférica

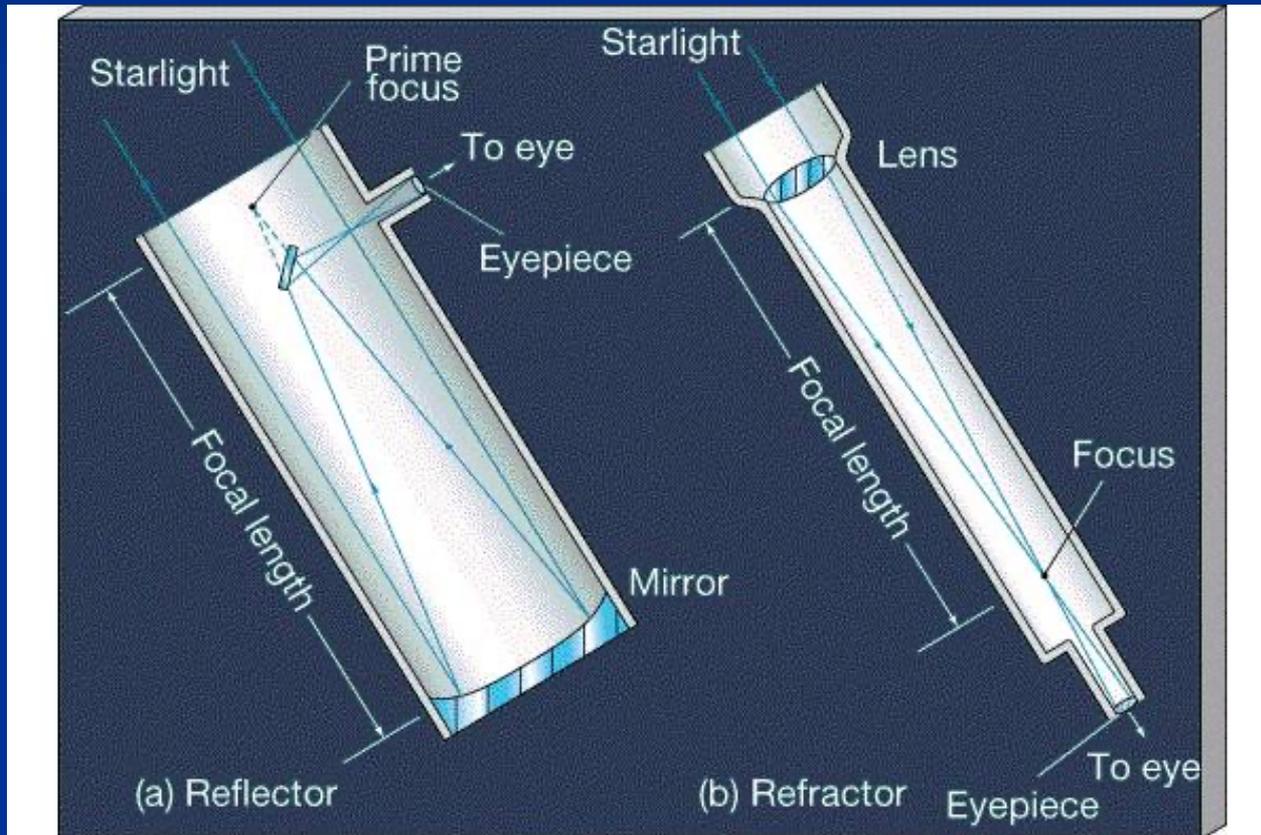
---

- La extinción:
  - disminuye la intensidad de la radiación
  - la enrojece, como consecuencia de su dependencia con la longitud de onda (mayor dispersión de longitudes de onda cortas comparadas con las largas)



# 2

## Pasaje por el sistema óptico

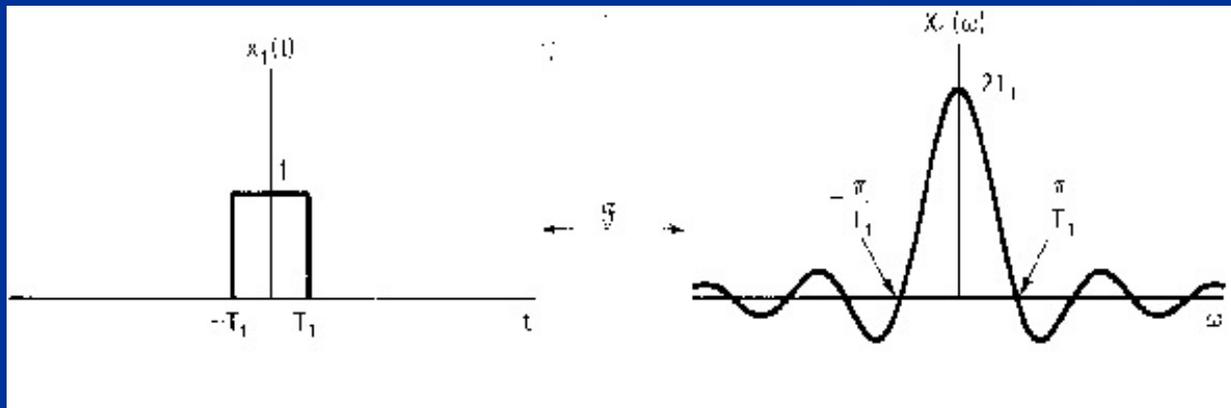


# Teorema fundamental de la óptica de Fourier

La distribución de amplitud en el plano focal de un sistema óptico ( $a(p, q)$ ) es la Transformada de Fourier de la distribución de amplitud en el plano de la pupila del sistema ( $A(x, y)$ ).

$$a(p, q) = TF[A(x, y)]$$

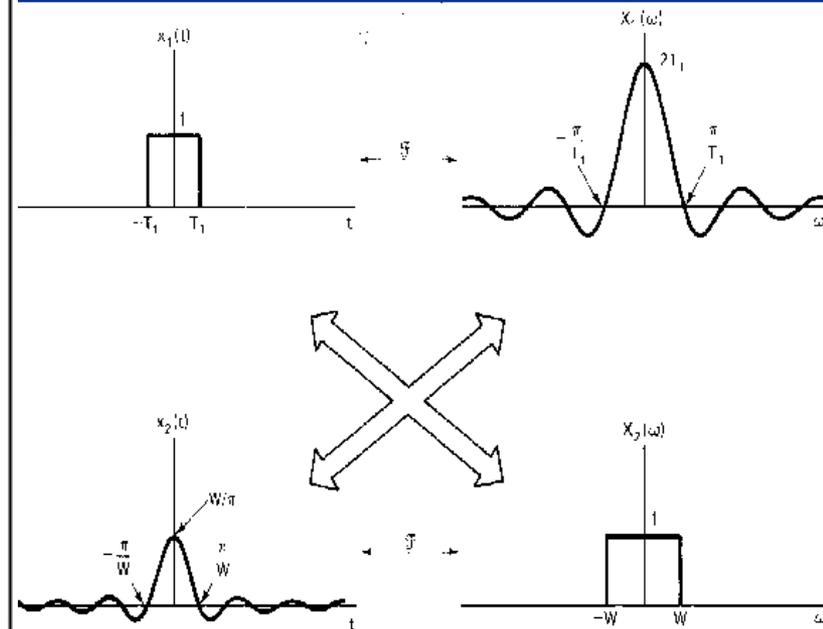
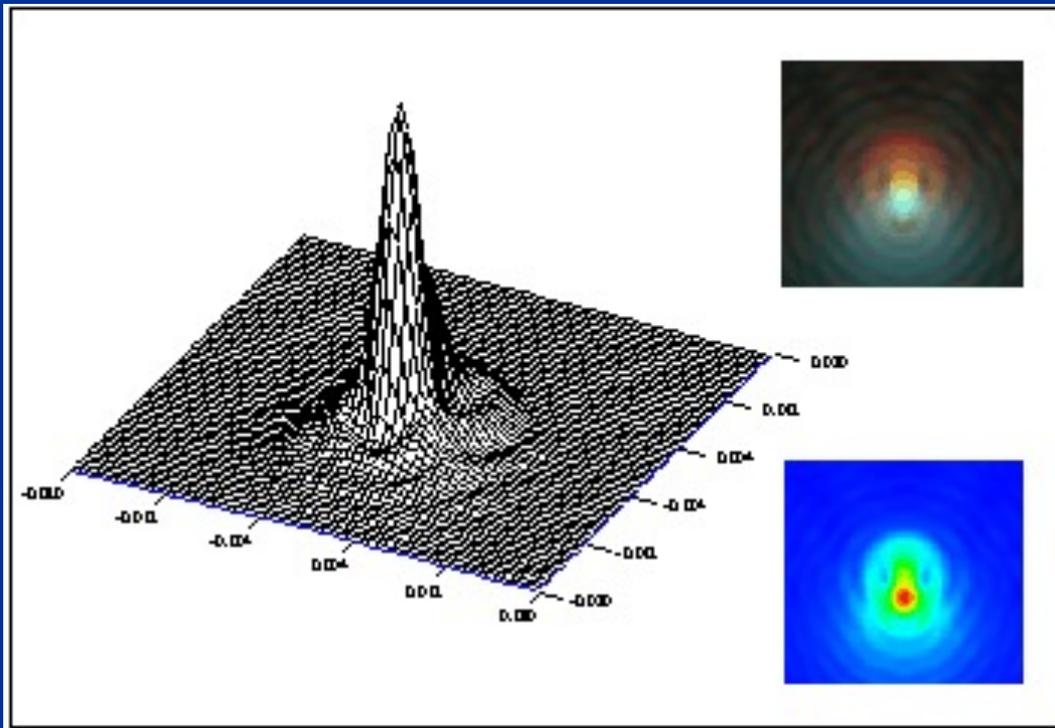
La distribución de amplitud en el plano pupilar es el producto de un frente plano por la “obstrucción” del sistema (función caja).



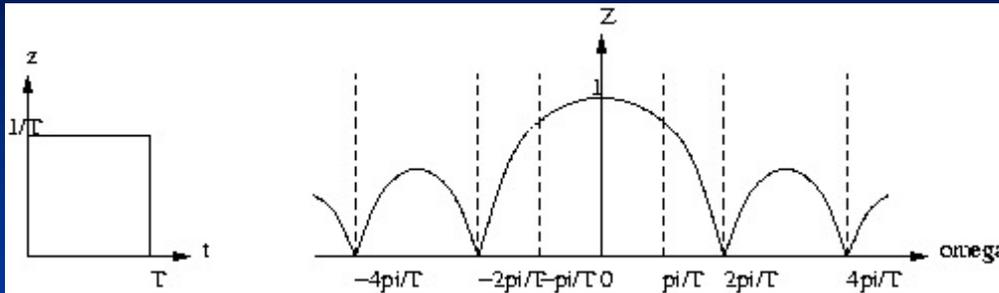
# Point Spread Function (PSF)

Def.: Es la respuesta de un sistema a una fuente puntual.

Es la imagen formada en el plano focal del instrumento por una fuente puntual en el infinito.



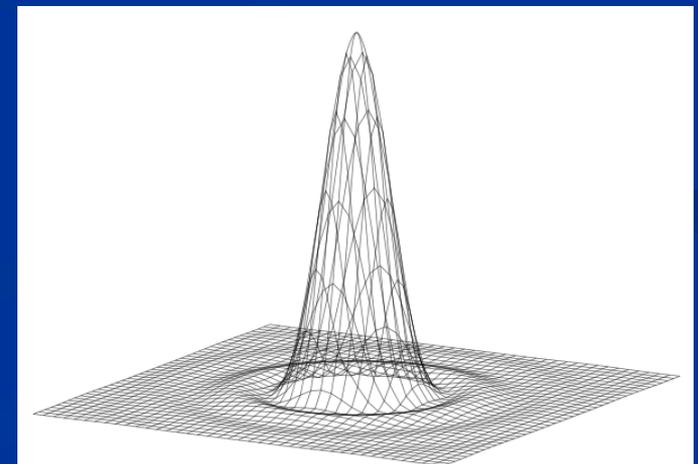
# Imagen de un sistema óptico



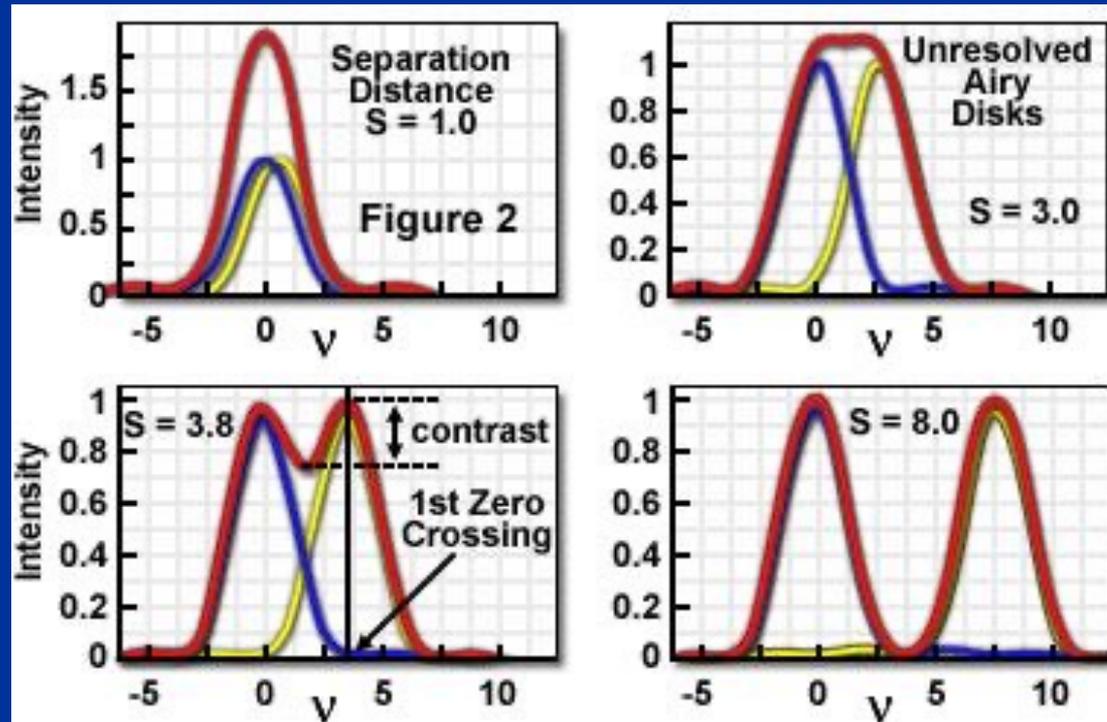
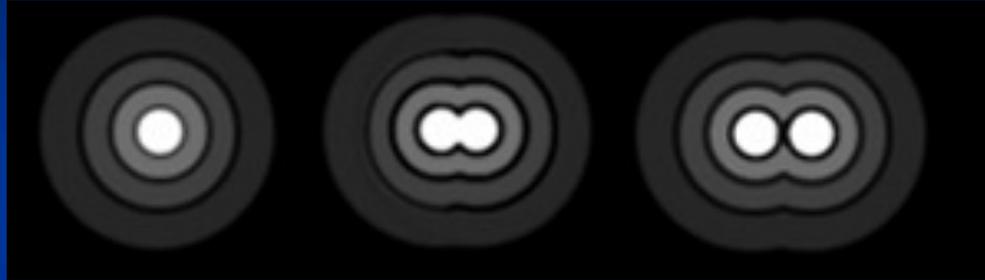
Separación angular del primer cero (en radianes):

$$\theta = 1.22 \lambda / D$$

$\lambda$  - longitud de onda  
 $D$  - Diámetro de la lente o espejo



# Separación angular



# Ejemplos

Observando en una  $\lambda=550$  nm (visible)

Para un telescopio de

$D=14$ cm

$$\theta = 4.8e-6 \text{ rad} = 1''$$

$D=8$ m

$$\theta = 0.017''$$

Observando en una  $\lambda=21$ cm (radio)

$D=305$ m

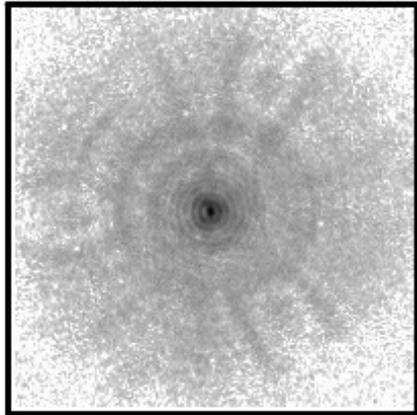
$$\theta = 180''$$

$D=12000$ km

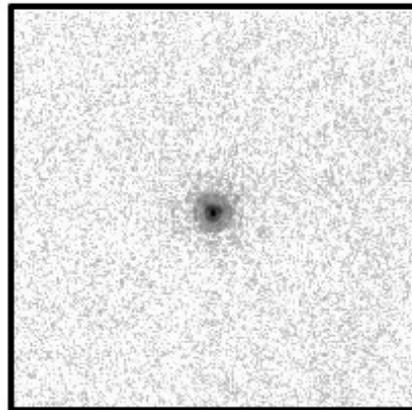
$$\theta = 0.004'' \quad !!!$$



# PSF of HST's WFPC camera before corrections



BEFORE COSTAR



AFTER COSTAR



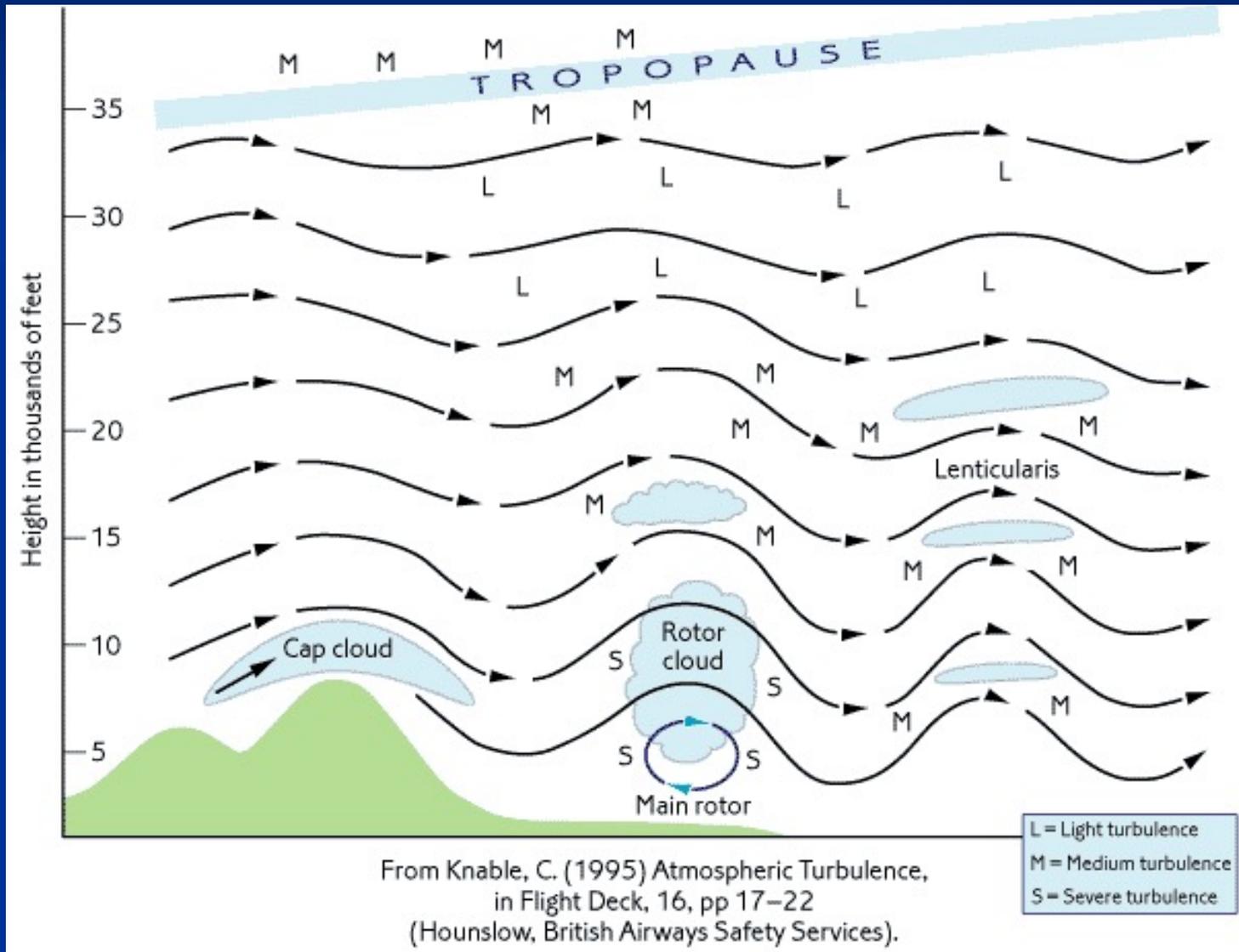
Wide Field Planetary Camera 1



Wide Field Planetary Camera 2

## 3

# Turbulencia atmosférica



# Degradación de la imagen por la turbulencia atmosférica

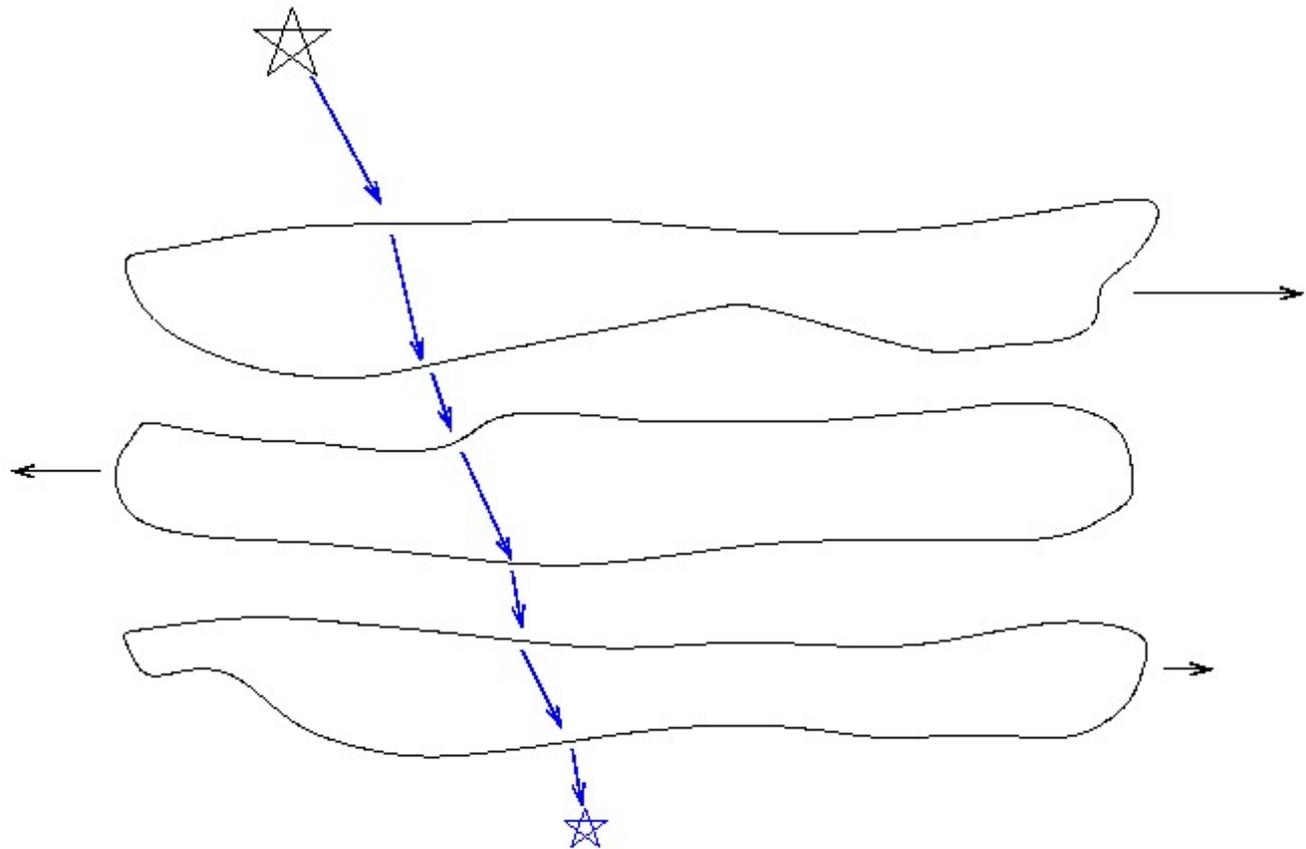
- Titilar (scintillation) – variación del brillo visto por el ojo, se corresponde con el enfocamiento o desenfocamiento de la energía en el frente de onda.
- Agitación de la imagen en el plano focal del instrumento como resultado de las variaciones locales del ángulo que forma el plano tangente del frente de onda con la visual.
- Esparcido (smearing) de la imagen lo que agranda el tamaño de las imágenes y es causado por la pérdida de coherencia espacial en la pupila.

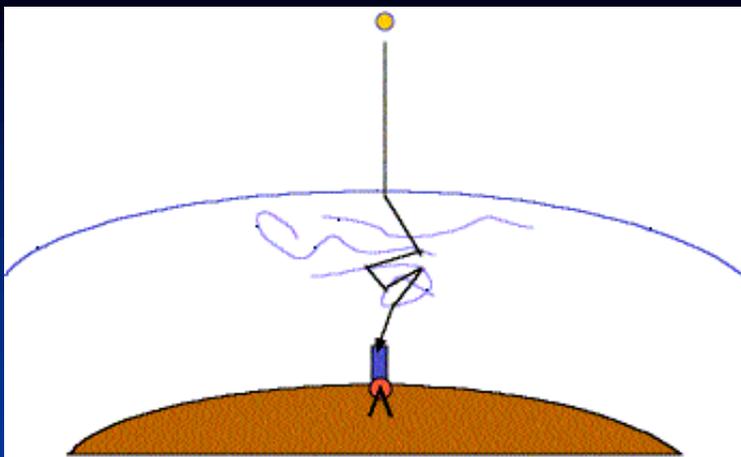
Seeing



# Seeing

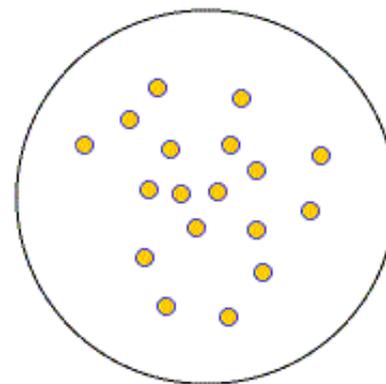
- Es una consecuencia de la turbulencia atmosférica.
- Esta causado por las fluctuaciones de temperatura de gran frecuencia ( $\sim 1$  seg) y la mezcla de parcelas de aire de diferente temperatura y densidad. Este comportamiento de la atmósfera se aprecia en el ocular del telescopio como imágenes borronadas, en movimiento o con rápidas variaciones de brillo.
- Hay principalmente 3 áreas donde ocurre la turbulencia atmosférica:
  - Dentro de la cúpula y el telescopio
  - Cerca de la superficie (0 – 100 metros)
  - Tropósfera central (100m – 2km)
  - Alta tropósfera (6-12km.)



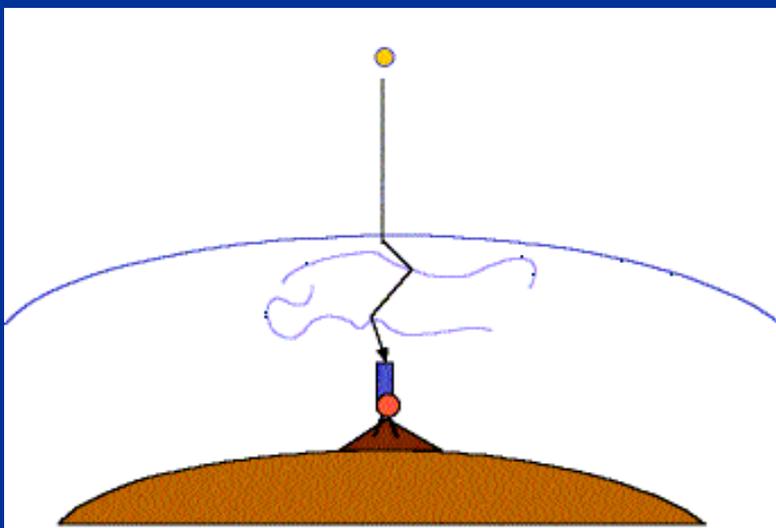


atmosphere refracts starlight  
in random directions very  
quickly—stars “twinkle”.

telescope view  
(high magnification)

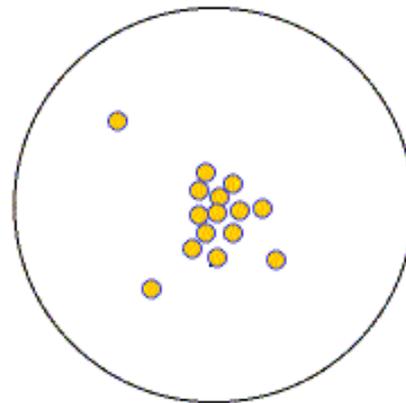


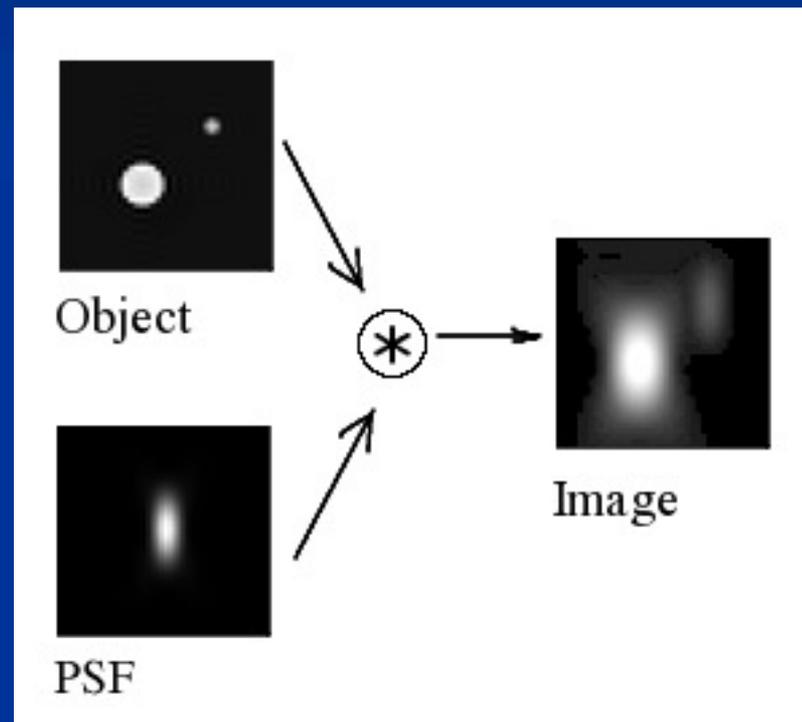
multiple images  
created

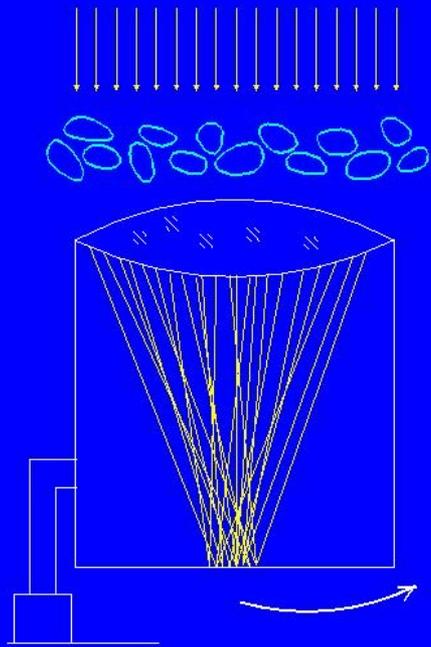


on mountain tops there is  
less atmosphere to look  
through—less distortion.

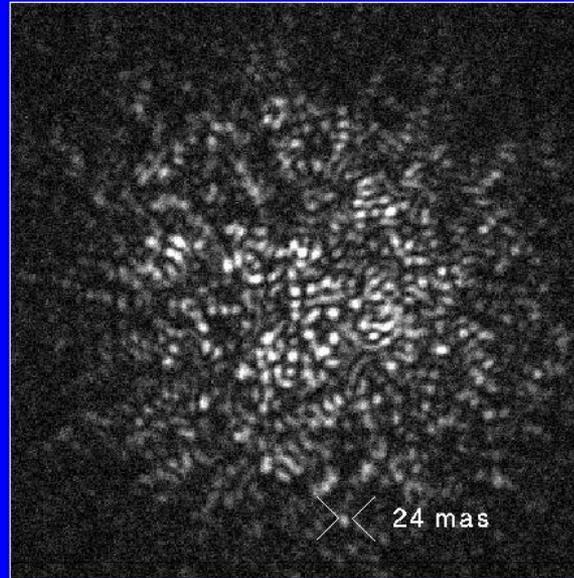
telescope view  
(high magnification)







atmosphere  
telescope  
speckle interferogram

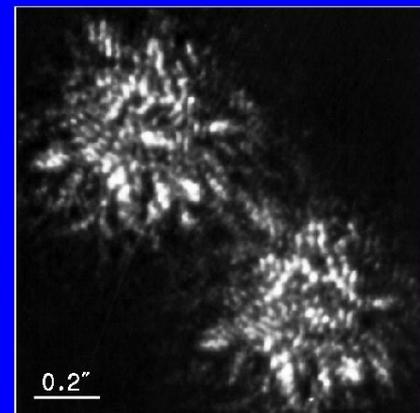


speckle interferogram  
6 m telescope,  $\gamma$  Ori,  $\lambda = 500$  nm  
field of view 1.84 arcsec

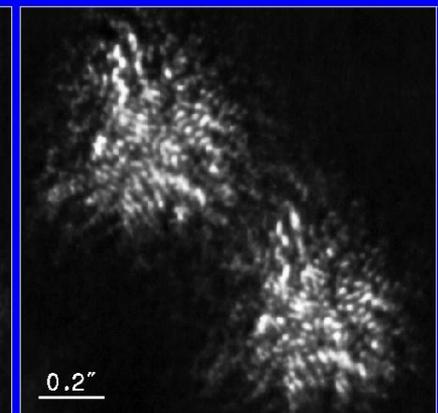
# Speckles ("motas")

variance and life time of atmospheric psfs

Zeta Aquarii. 3.6 m ESO telescope,  $\lambda = 656$  nm, exposure time = 30 msec

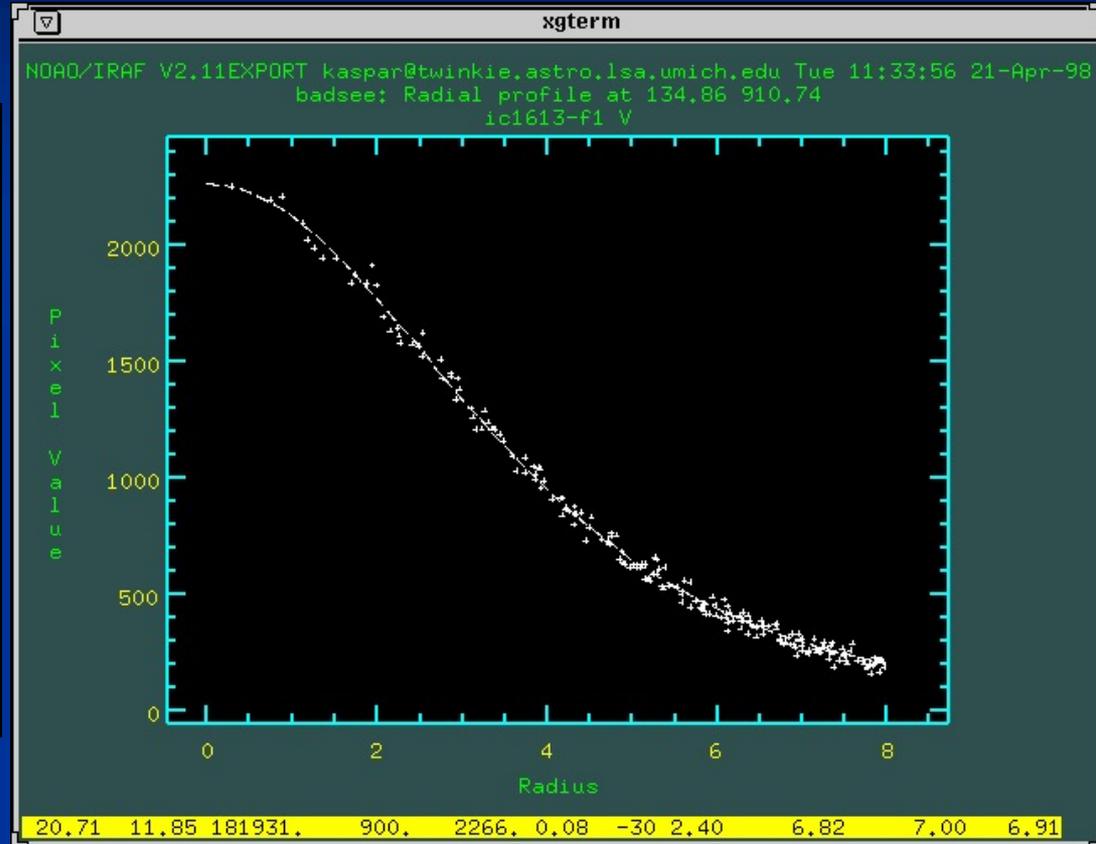
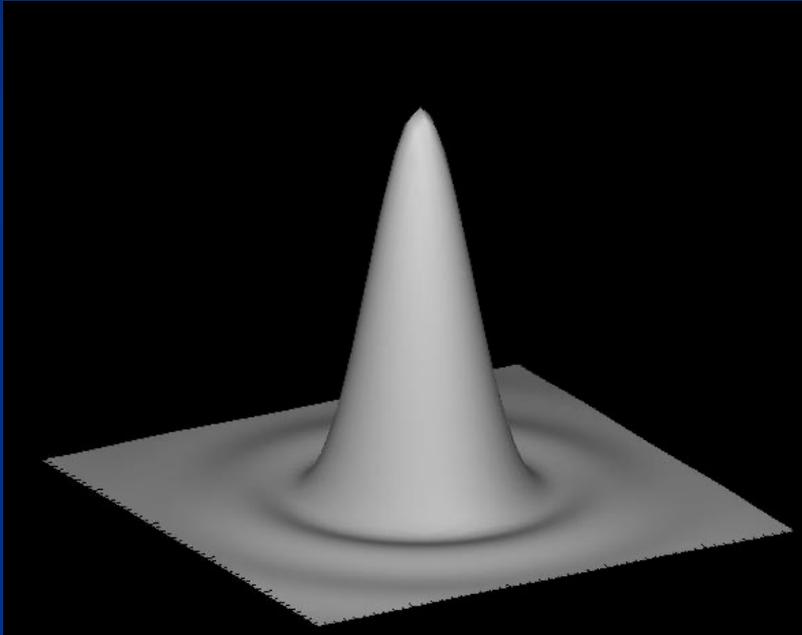


time  $t_0$



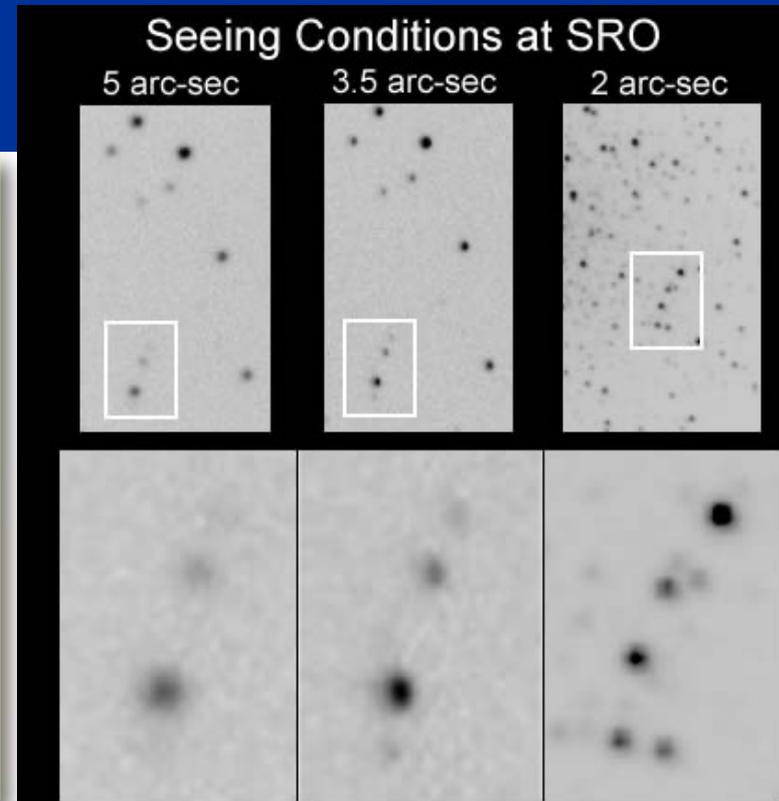
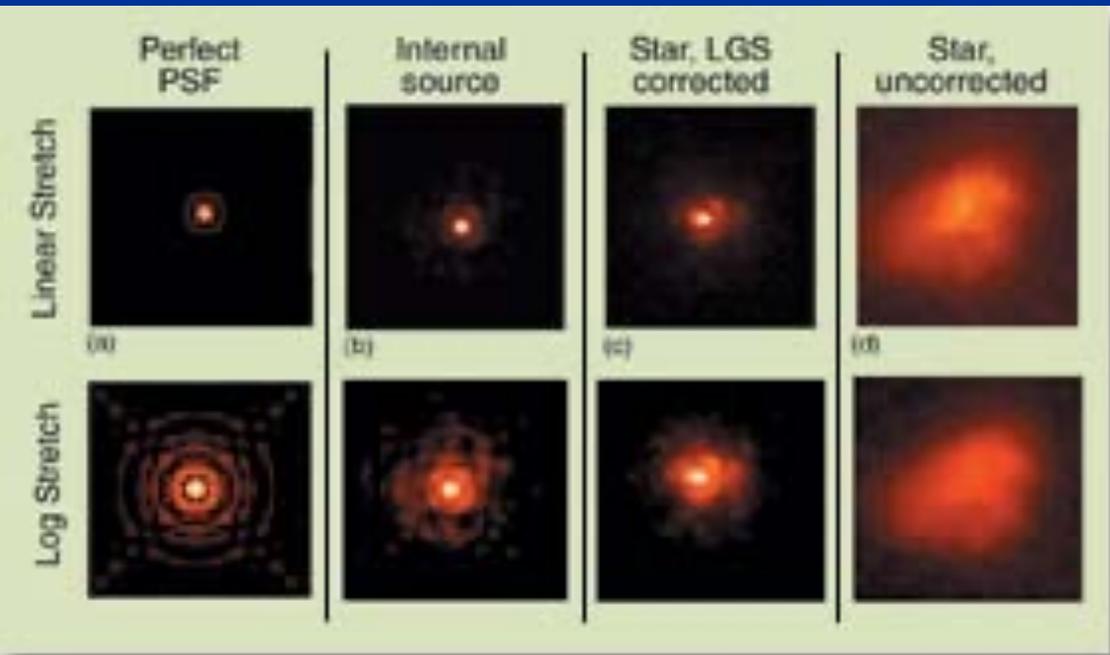
time  $t_0 + 0.5$  s

# Perfiles estelares con y sin seeing



# De lo mejor a lo peor

## Categorías de seeing



# Las condiciones cambiantes

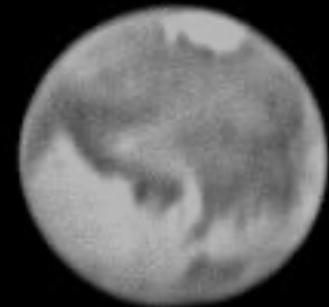


Júpiter

Marte  
observado en  
condiciones de  
mal seeing



Los dibujos  
de P. Lowell  
de los canales  
marcianos.



Rotating Jupiter

LX 200R Ritchey-Chrétien 8 inches  
EQ6 Pro + QHY-5  
Registax + IP + ImageMagick  
48 x 700/2000 frames

Zerjillo and A. Román  
September 5, 2010, 01:40  
Olvera, Cádiz, Spain

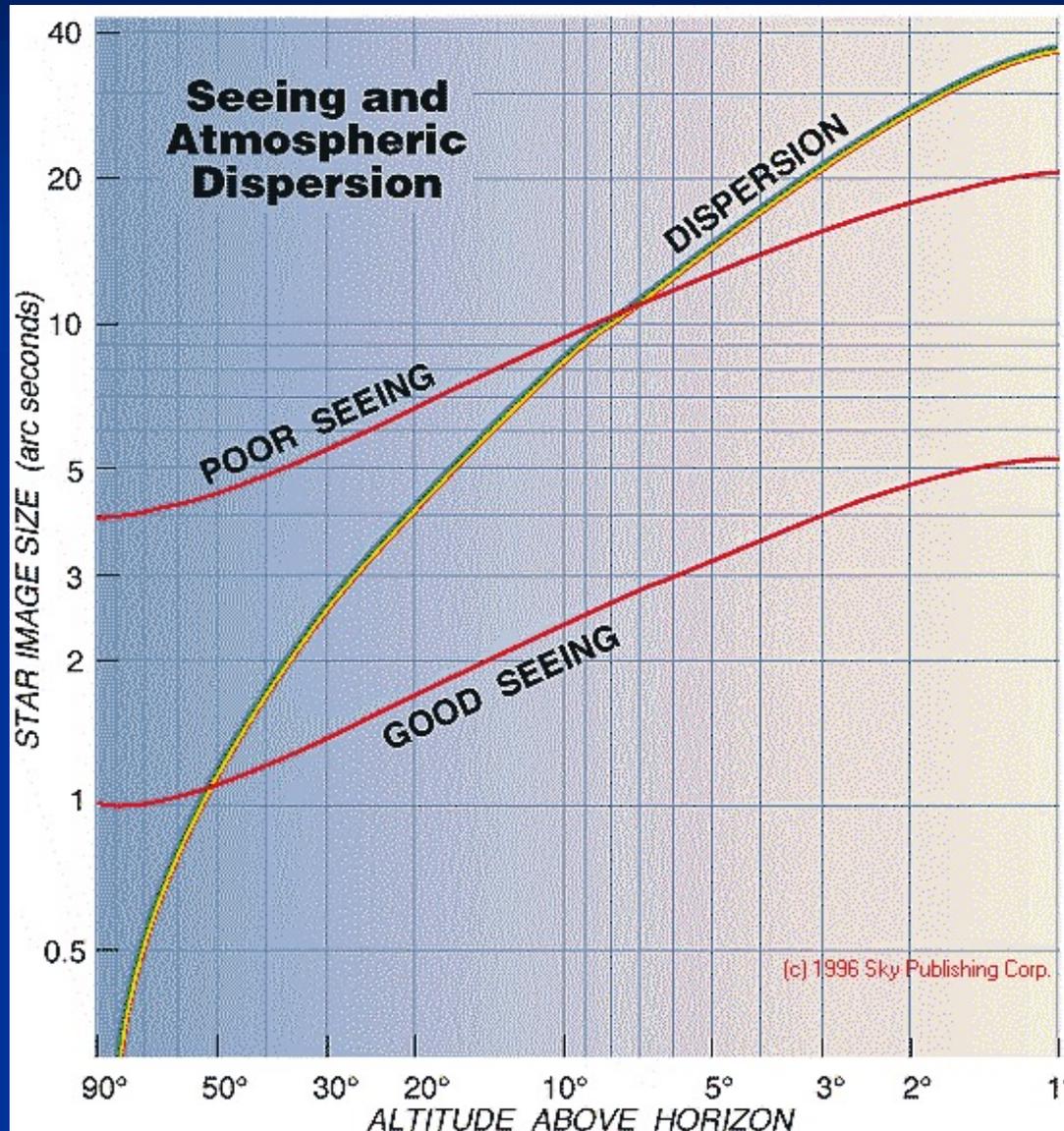
# Todos los efectos atmósfericos

La dispersión, distorsión, absorción, enrojecimiento y refracción atmosférica vista en una sola imagen.

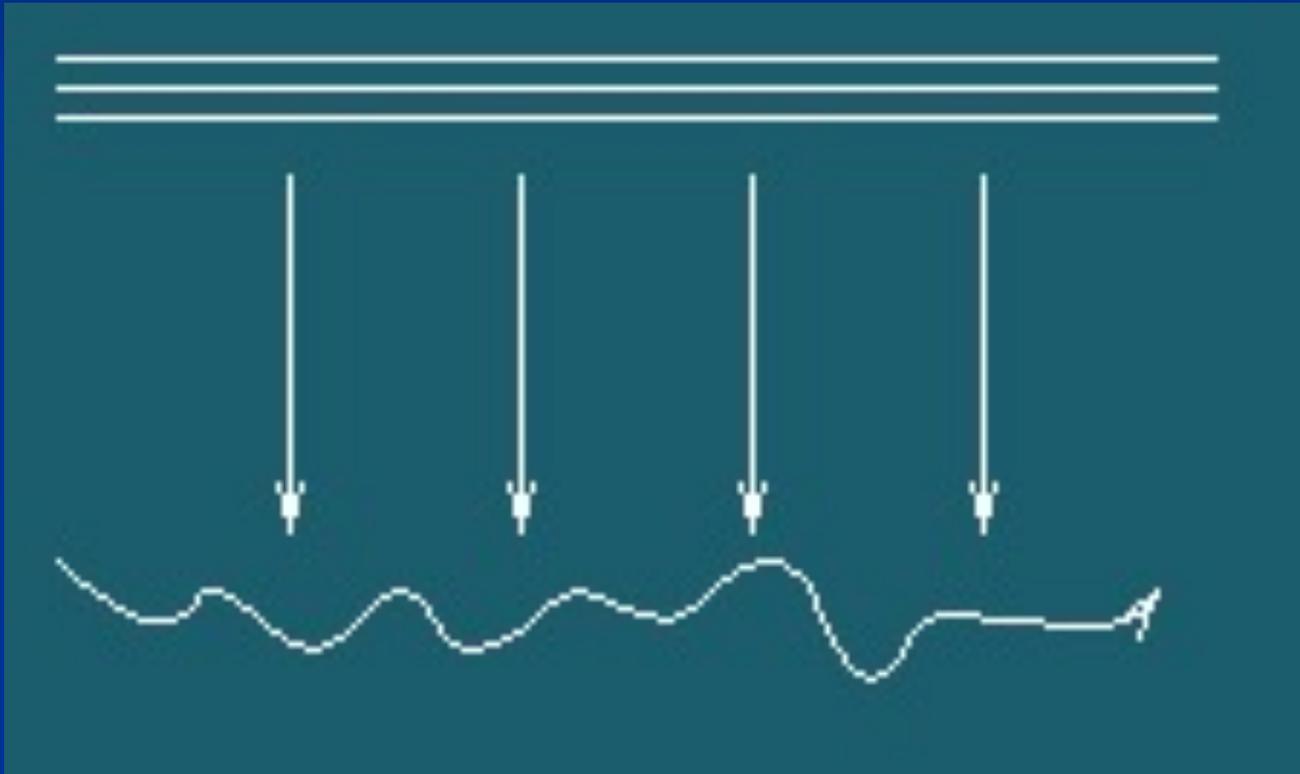
El limbo del Sol poniente esta distorsionado en franjas horizontales debido a capas de aire a diferente temperatura. Un “fleco” verde flota sobre la parte superior como resultado de la dispersión que ubica las imágenes azul y verde un poco mas alto que las amarilla y roja. El Sol es achatado con una forma oval debido a la mayor refracción cercana al horizonte, donde el aire mas denso absorbe y enrojece mas la luz.



# Seeing vs dispersión

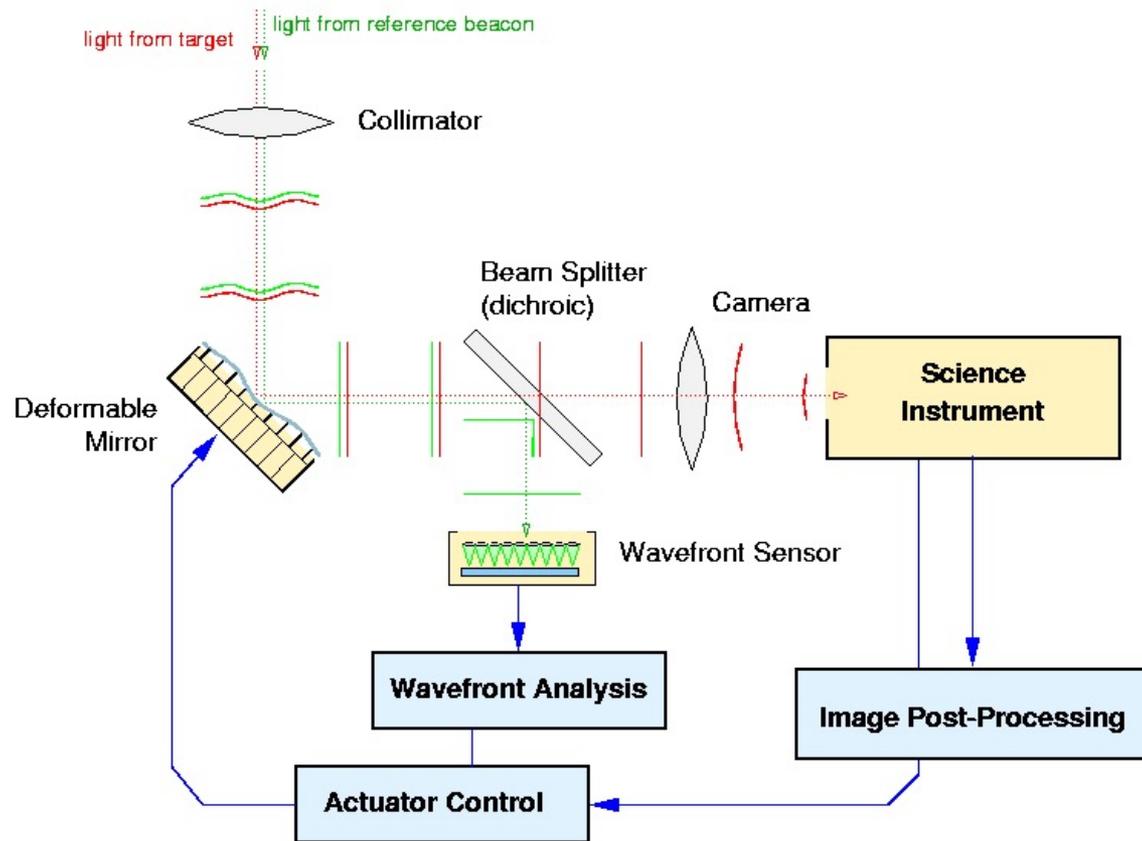


# La degradación del frente de onda



¿Es posible volver atrás?

# Optica adaptativa



# Optica adaptativa con laser beam

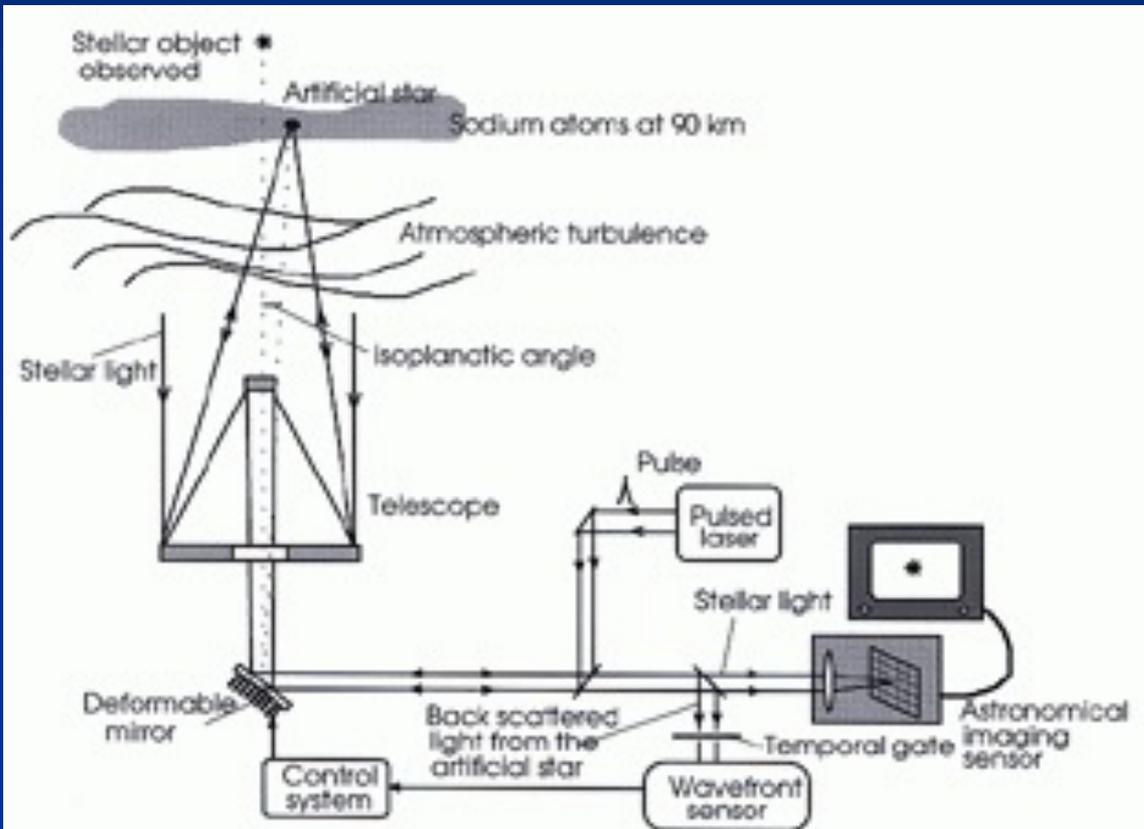


Figure 4: Adaptive Optics with laser guide star



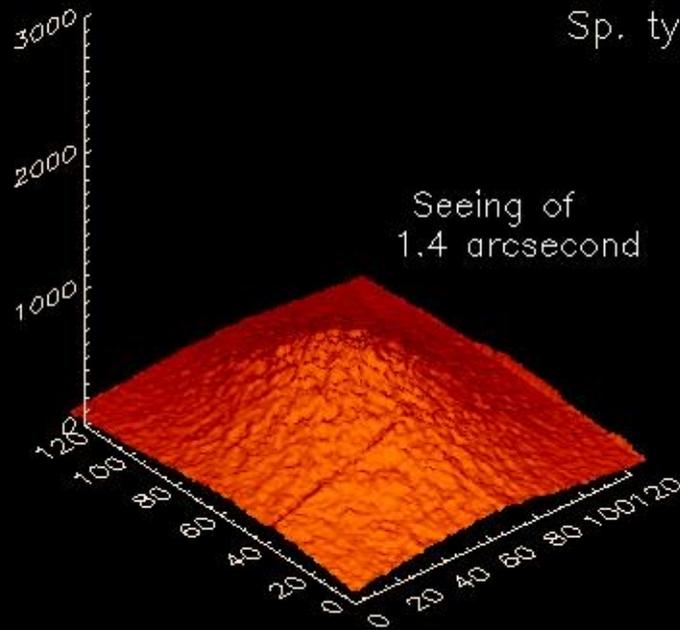
# La mejora de la PSF

SAO 74164

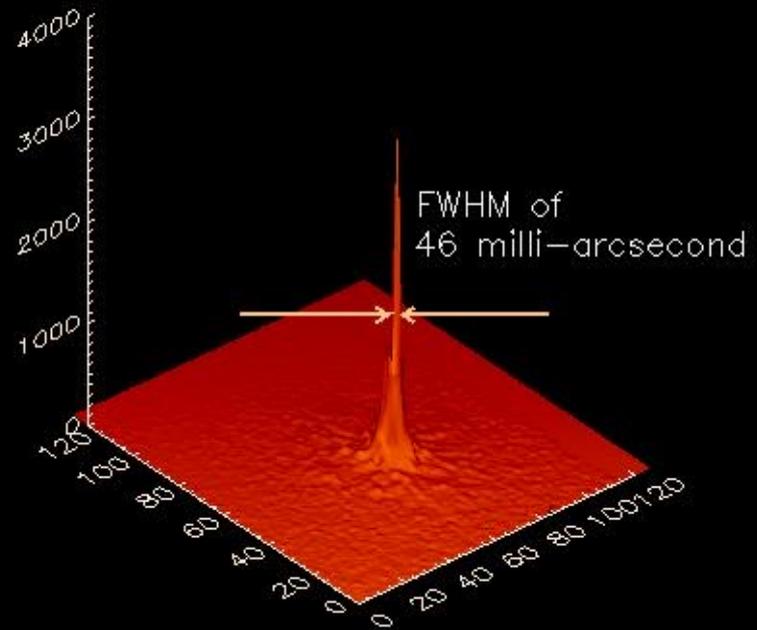
open loop

V mag. = 4.4

Sp. type: G8III



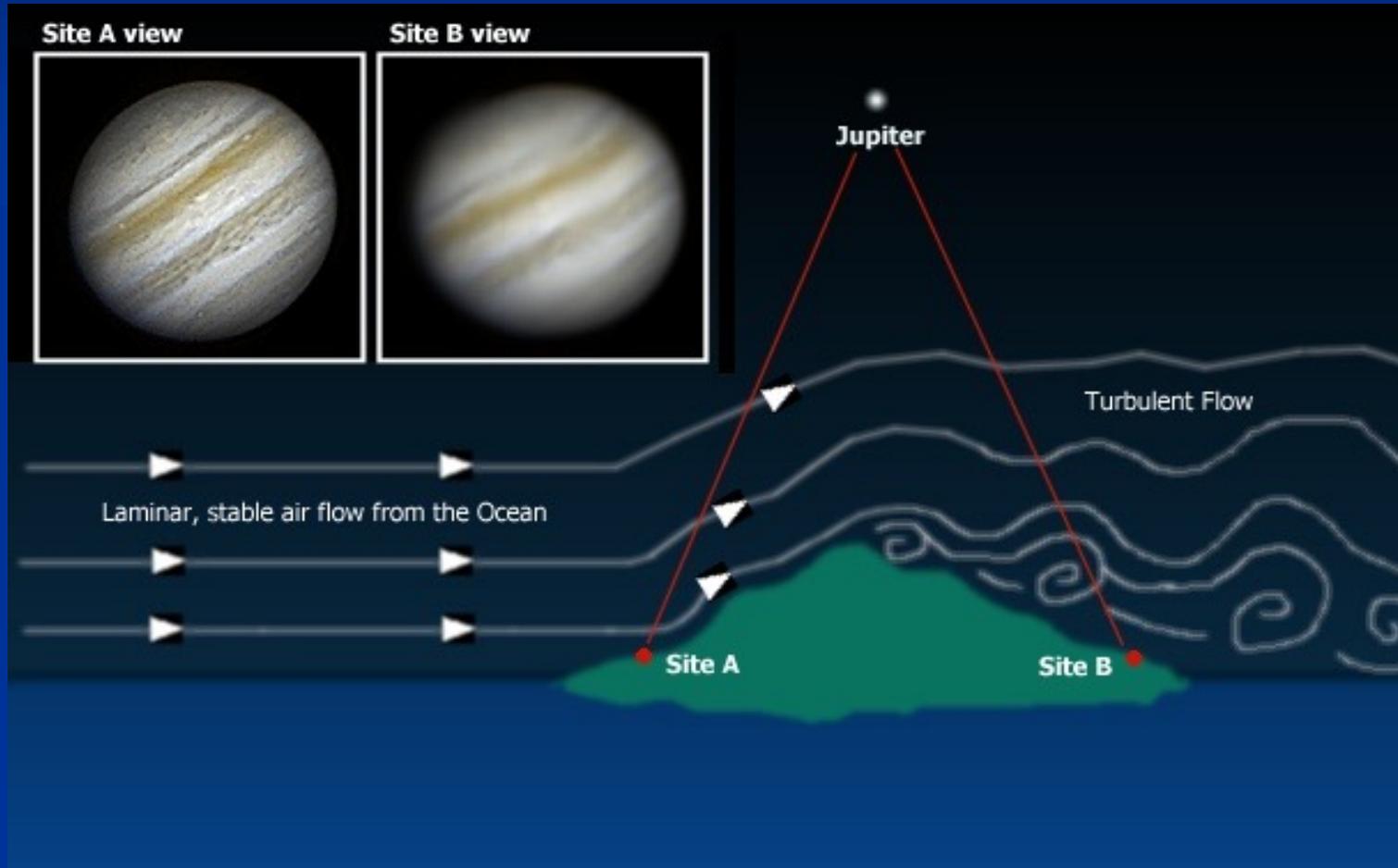
Keck I AO loop closed



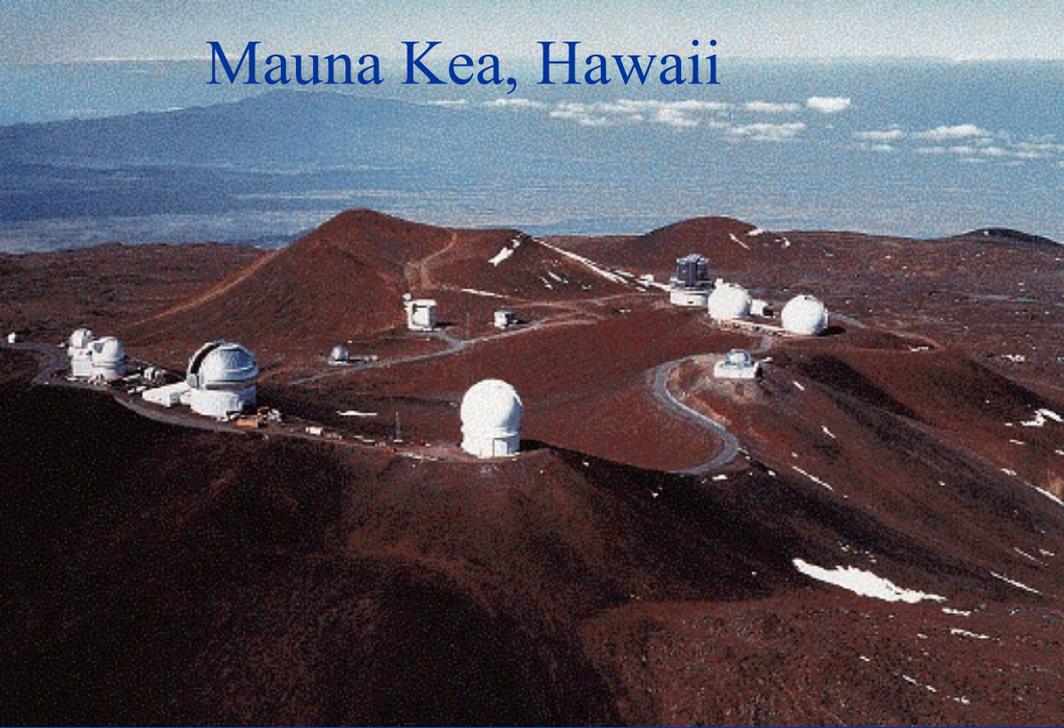
H band images –  $1.6\mu\text{m}$   
14 Dec 2000 – 07:45 UTC

Strehl ratio: 0.23

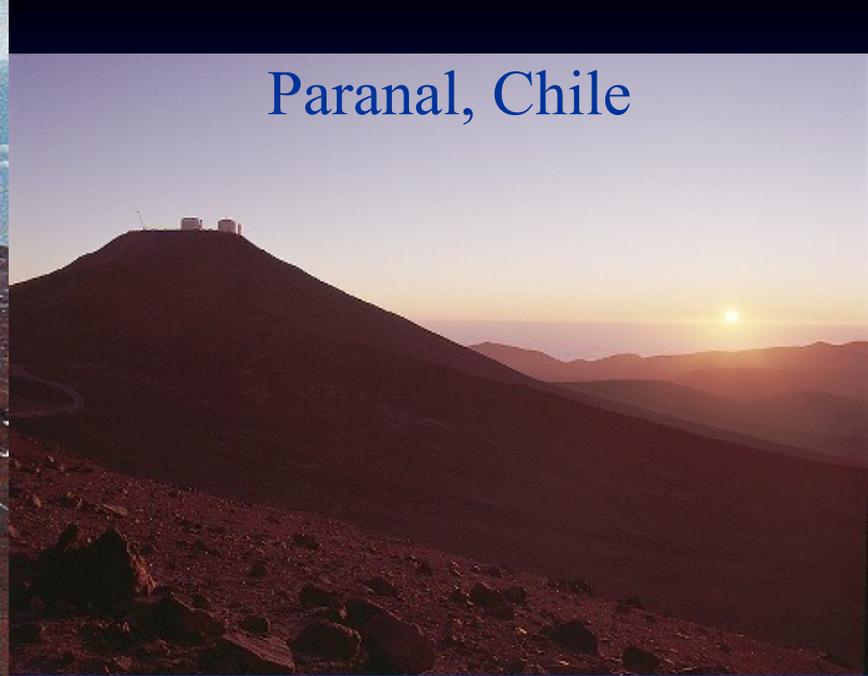
# Donde colocar un observatorio



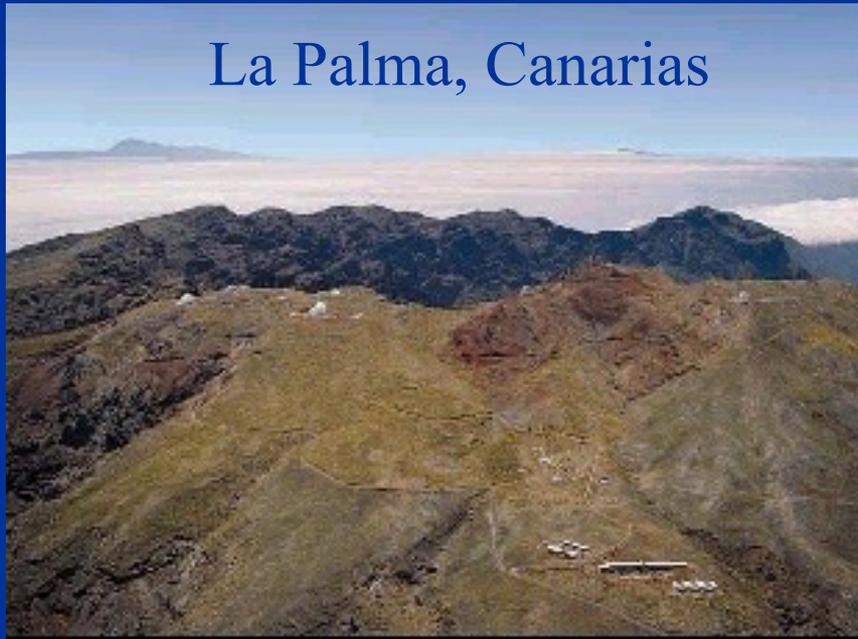
Mauna Kea, Hawaii



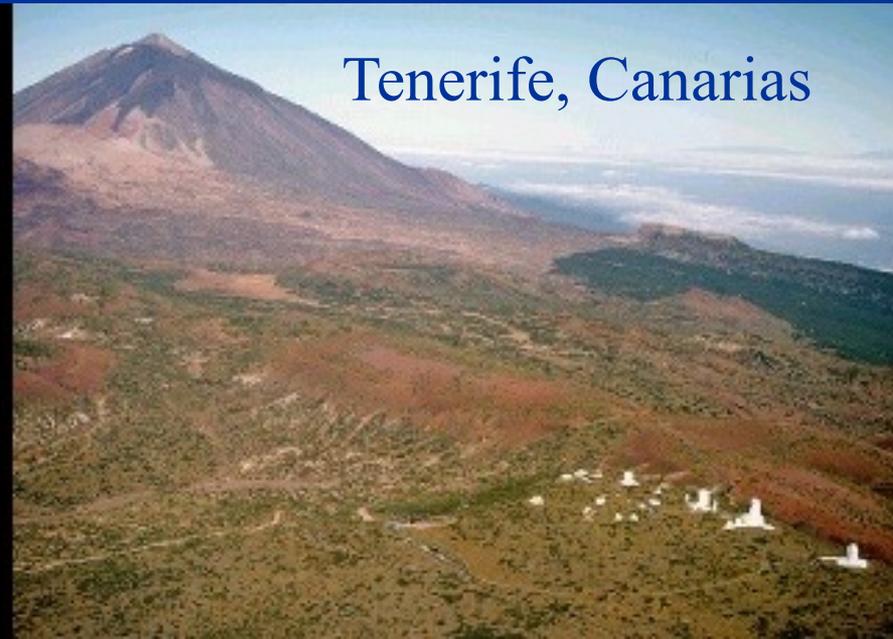
Paranal, Chile



La Palma, Canarias



Tenerife, Canarias



# Conceptos a recordar

- Transferencia Radiativa
- Ventanas atmosféricas
- Disco de difracción o de Airy y resolución angular
- Point Spread Function (PSF)
- Seeing