



Tema 0: Introducción a la asignatura



Instrumentación astronómica

Código Asignatura:	600615 (Máster en Astrofísica)
Créditos:	6 ECTS= 30 h teoría + 15 h prácticas + 105 h trabajo personal.
Horario y aulas:	lunes 09:30-11:30 Aula 8B lunes 15:30-16:30 Aula 8B
Exámenes:	? de Febrero ??:??, ?? de Septiembre ??:??
Profesores:	Pablo G. Pérez González (Teoría) África Castillo Morales (Prácticas)

**Despacho 10 en Dpto. de Astrofísica y CC. De la Atmósfera,
1ª planta módulo W.**

Tutorías:	lunes, martes, miércoles de 15:30-17:30 (mejor avisar antes: pgperez@fis.ucm.es), otros días y horarios posibles previo aviso.
------------------	---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------



Página web de la asignatura

http://guaix.fis.ucm.es/~pgperez/Teaching/instrumentacion_astronomica.html



Personal Webpage of Pablo G. Pérez-González



Home

Teaching

Research

Publications

Multimedia

Links

Restricted

Bibliografía

Temario

Prácticas

Instrumentación Astronómica curso 2011/2012

Las clases teóricas de esta asignatura empezarán el lunes 3 de Octubre de 2011 a las 09:30, y las clases prácticas el 10 de Octubre a las 15:30.

En el curso 2011/2012 la asignatura será impartida por la Profesora África Castillo (prácticas, lunes de 15:30 a 16:30 en el aula 8B) y el Profesor Pablo G. Pérez González (teoría, lunes de 9:30 a 11:30 en el aula 8B)

A continuación se detalla la bibliografía recomendada para la asignatura y la agenda de las clases. Gran parte del temario y el material docente está extraído de la [página del Profesor Jaime Zamorano](#).

Bibliografía

- 1.-Astrophysical Techniques, C.R. Kitchin, CRC Press 5ª edición 2008.
- 2.-Observational Astronomy, D. Scott Birney, G. González, D. Oesper, Cambridge UP 2ª edición 2006.
- 3.-Detection of light: from the ultraviolet to the submillimeter, G.H. Rieke, Cambridge UP 2ª edición 2006.
- 4.-Astronomical Optics, D. Schoeder, Academic Press 2ª edición 1999.
- 5.-Astronomical observations, G. Walker, Cambridge UP 1987.
- 6.-Electronic and computer-aided astronomy, I.S. McLean, publicado por Ellis Horwood Ltd 1989.
- 7.-Astronomical Instrumentation, G.H. Rieke, 2012, no publicado todavía.

Temario

1. La observación astronómica desde tierra y desde el espacio (3 de Octubre de

Clases y Evaluación

• Habrá clases magistrales de Instrumentación Astronómica (~28-30 horas) y clases de prácticas (~15 horas).

- ◆ Clases a través de presentaciones Powerpoint (bajar de web).
- ◆ **iii**No intentéis leer todo!!! Texto sirve de guía para apuntes.
- ◆ Fijaos mejor en figuras mientras las explico.
- ◆ Paradme si voy rápido.
- ◆ Preguntad si no explico bien una figura. Yo sé lo que significa y puedo saltarme información importante que considero obvia (pero no lo es!!).
- ◆ La asignatura es en gran parte cualitativa.
- ◆ Leer temas antes de clase es MUY MUY recomendable.



Clases y Evaluación

Evaluación:

- ◆ Examen teórico
(evaluado sobre 7 puntos -40% mínimo-).
- ◆ Trabajo de prácticas
(evaluado sobre 3 puntos).



Bibliografía

Libros recomendados:

- 1) *Astrophysical Techniques*, C.R. Kitchin, CRC Press 5ª edición 2008, \$50 en amazon.com, £33 en amazon.co.uk. **K08.**
- 2) *Observational Astronomy*, D. Scott Birney, G. González, D. Oesper, Cambridge UP 2ª edición 2006, \$50 en amazon.com, £35 en amazon.co.uk. **BG006.**
- 3) *Detection of light: from the ultraviolet to the submillimeter*, G.H. Rieke, Cambridge UP 2ª edición 2006, \$75 en amazon.com, £45 en amazon.co.uk. **R06.**
- 4) *Astronomical Optics*, D. Schoeder, Academic Press 2ª edición 1999, \$135 en amazon.com, £80 en amazon.co.uk. **S99.**
- 5) *Astronomical observations*, G. Walker, Cambridge UP 1987, \$75 en amazon.com, £40 en amazon.co.uk. **W87.**
- 6) *Electronic and computer-aided astronomy*, I.S. McLean, publicado por Ellis Horwood Ltd 1989, \$130 en amazon.com, £70 en amazon.co.uk. **M89.**
- 7) *Measuring the Universe: a multiwavelength perspective*, G.H. Rieke, 2012, no publicado todavía. **R12.**



Temario

- 1.La observación astronómica desde tierra y el espacio.**
- 2.Telescopios: generalidades. Telescopios ópticos. Grandes telescopios.**
- 3.Telescopios espaciales.**
- 4.Radiotelescopios.**
- 5.Telescopios de altas energías.**
- 6.Detectores.**
- 7.Detectores fotoeléctricos.**
- 8.CCDs.**
- 9.Astronomía infrarroja.**
- 10.Imagen CCD.**
- 11.Espectrómetros.**
- 12.Espectrógrafos de redes. Espectroscopía multi-objeto y de campo integral.**



Expectativas generales

El curso pretende ver cómo nuestra visión del Universo ha cambiado dramáticamente en los últimos años debido, en parte, al desarrollo de los telescopios e instrumentación astronómica capaces de observar no sólo desde tierra sino también desde el espacio.

Esta asignatura se dedica a la física de las observaciones astronómicas, estudiando en detalle los telescopios e instrumentos que se emplean en la observación desde los tradicionales empleados en el óptico y radio a los más modernos de altas energías.

Se pondrá especial atención en estudiar las ventajas de observar desde el espacio y la complejidad añadida de esta técnica.

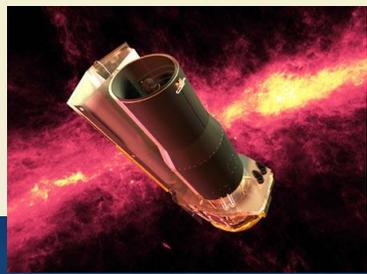




Tema 1: La observación astronómica desde tierra y el espacio.

Consultar: "*Observational astronomy*", BGO06.

"Measuring the Universe: a multi-wavelength perspective", R12.



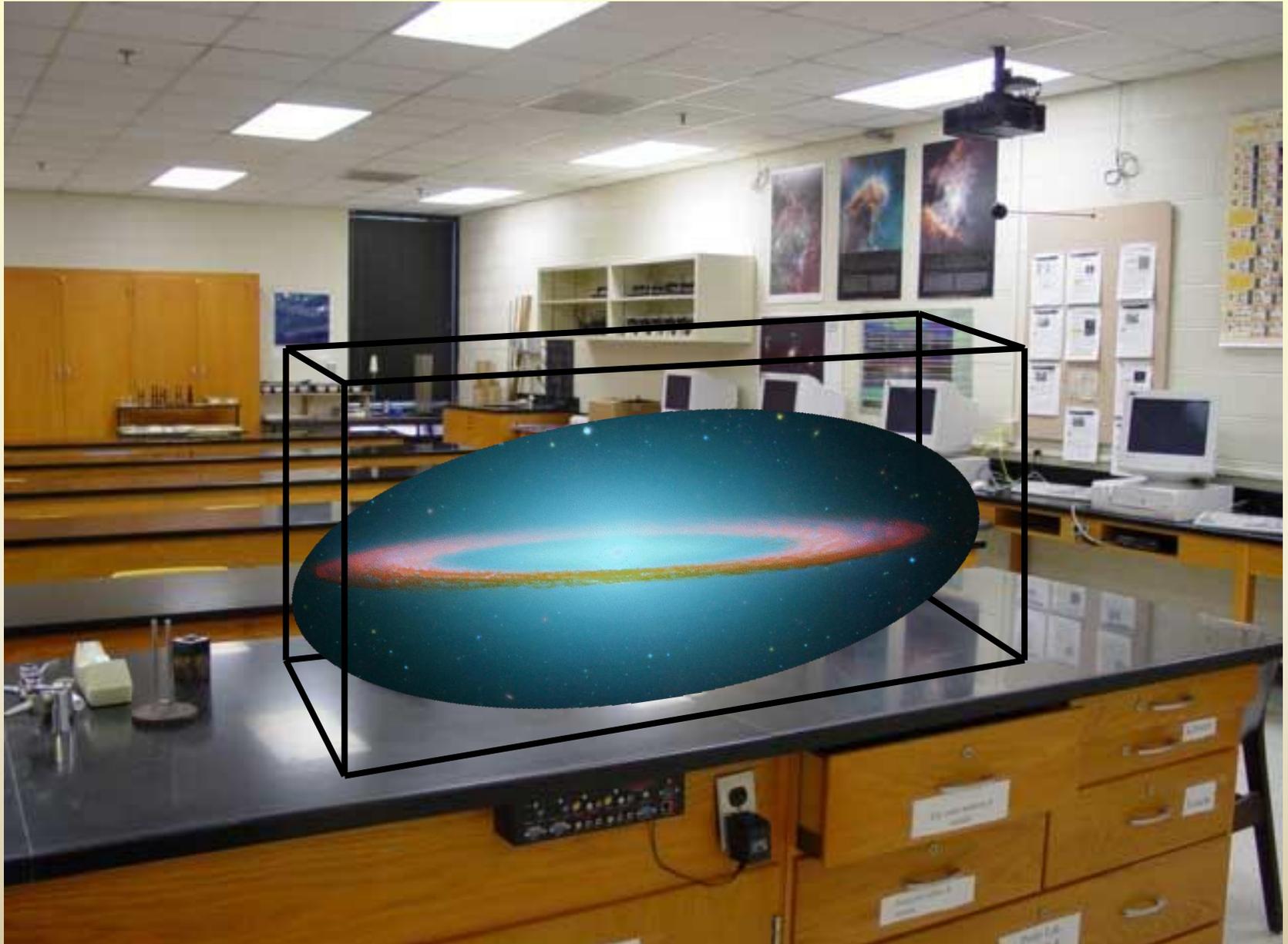
OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA

- La astronomía es una ciencia observacional:
 - Nuestro laboratorio es el cosmos.
 - No podemos interaccionar con los fenómenos que observamos.
 - Parámetros físicos que no son reproducibles en los laboratorios terrestres.

- La información que recibimos no es sólo EM:
 - Ondas gravitacionales, rayos cósmicos, neutrinos, sondas espaciales ...



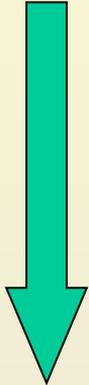
La importancia de la observación astronómica.



OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA

- Proceso de medida en astronomía:

- Colección: Interesa recoger la mayor cantidad de fotones. Objetos celestes luminosos, pero lejanos → poco flujo en tierra.
- Selección: De los fotones recogidos se seleccionan algunos por su frecuencia de acuerdo a los objetivos científicos del proyecto (Fotometría, espectroscopía).
- Detección: La interacción con ciertos materiales produce señales que son medibles.



OBSERVACIÓN ASTRONÓMICA

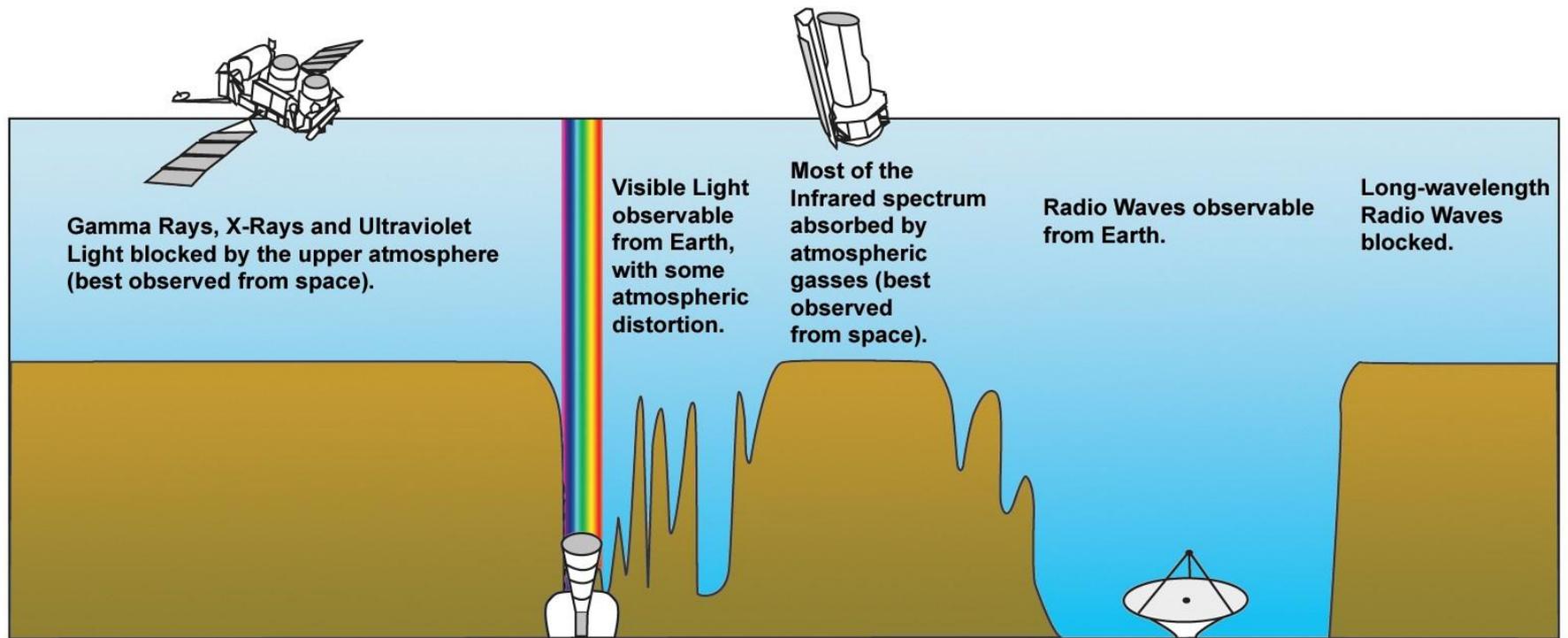
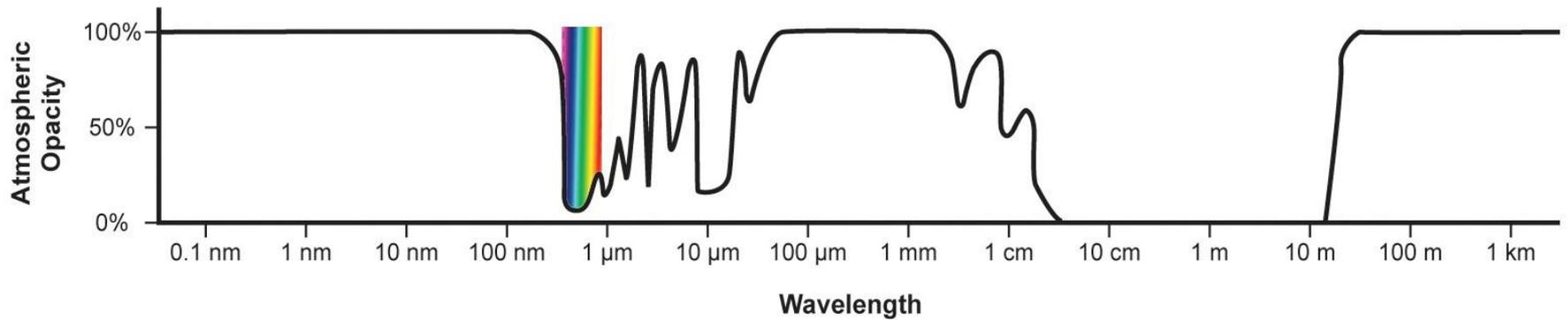
- Pretendemos la mayor resolución posible:
 - Resolución espectral.
 - Resolución espacial.
 - Resolución temporal.

El aumento de resolución implica una disminución del flujo sobre el detector.

Necesitamos telescopios grandes y detectores muy sensibles para estudiar objetos de los que, aunque son muy luminosos, nos llega un flujo muy débil por estar tan alejados del observador.



VENTANAS DE LA ATMÓSFERA



Espectro electromagnético

Rayos Gamma	<0.1 nm	Satélites
Rayos-X	0.001 nm – 10 nm	Satélites
Ultravioleta	10 nm – 300 nm	telescopios ópticos en globos o satélites
Óptico Visible	300 nm – 700 nm	telescopios ópticos en tierra, CCDs
Infrarrojo óptico	700 nm – 1 μ m	telescopios ópticos en tierra, CCDs
Infrarrojo cercano (NIR)	1 μ m – 5 μ m	telescopios ópticos
Infrarrojo medio	5 μ m – 25 μ m	telescopios ópticos – avión o satélite
Infrarrojo lejano (FIR)	25 μ m – 350 μ m	Satélites
Submilimétricas	350 μ m – 1 mm	Radiotelescopios a gran altura
Microondas	1 mm – 3 cm	Radiotelescopios
Radio	1 mm – 30 m	Radiotelescopios



Ventana Radio

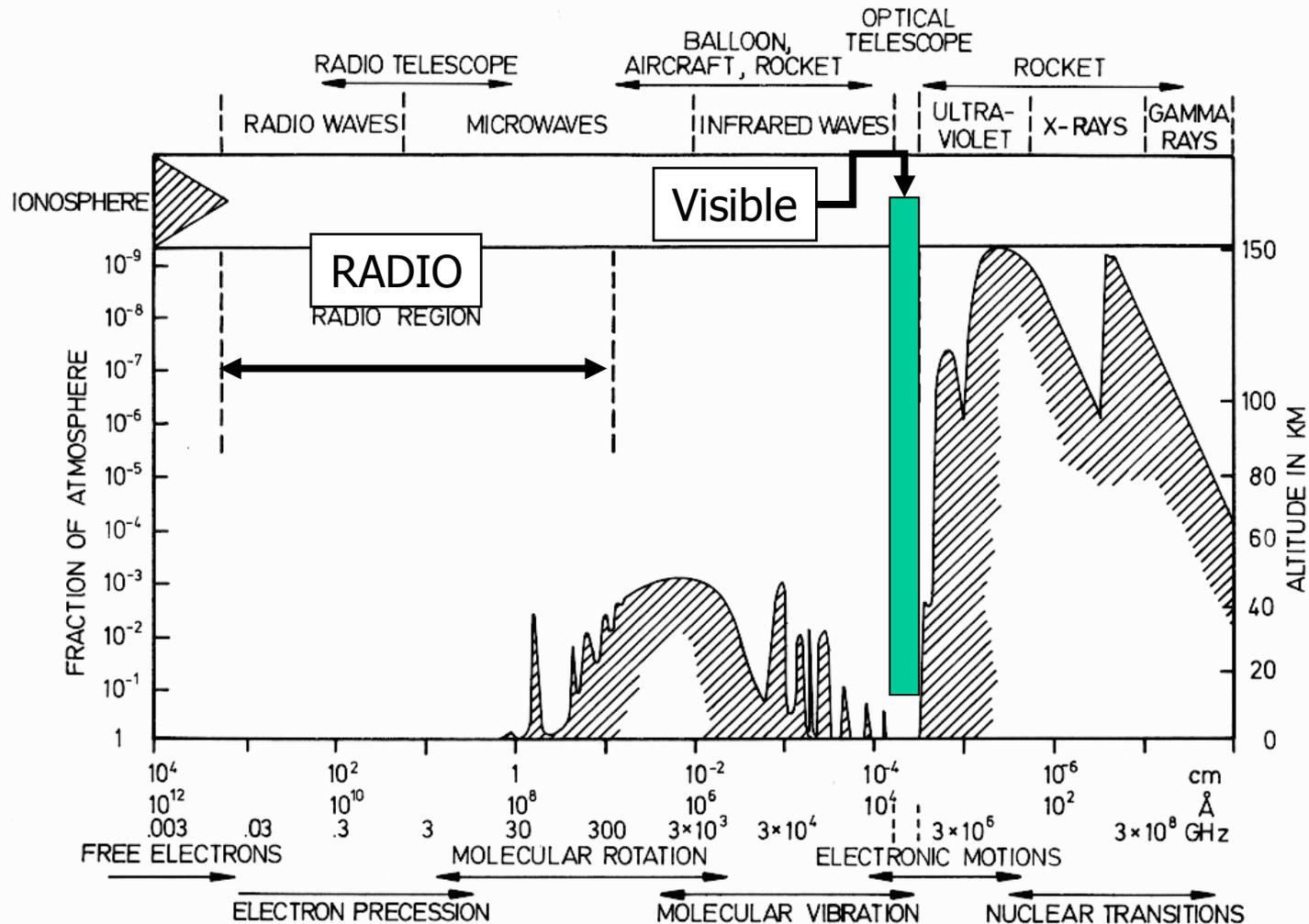


Fig. 1.1. The transmission of the earth atmosphere for electromagnetic radiation. The diagram gives the height in the atmosphere at which the radiation is attenuated by a factor 1/2

Desde 15 MHz (20m) hasta 200 GHz (1mm): 10 octavas.
Límites dependen de la posición geográfica y del tiempo.



Ventana Radio

Desde 15MHz (20m) hasta 200GHz (1mm): 10 octavas.
Límites dependen de la posición geográfica y del tiempo.

Límite alta frecuencia:

- Debida a la absorción resonante de las moléculas que se encuentran en la troposfera →
- Otras moléculas como N_2 y CO_2 tienen las bandas a frecuencias más altas donde la atmósfera ya no es transparente.

200GHz (1mm) ondas milimétricas

H_2O	22.2 GHz	13.5 mm
	184 GHz	1.63 mm
O_2	60 GHz	5 mm
	119 GHz	2.52 mm

- Las moléculas del ISM emiten y absorben en milimétricas.
- Radio Telescopios en zonas altas y secas.

Visita: <http://www.alma.info/>

THE ATACAMA LARGE MILLIMETER ARRAY



Ventana Radio

Límite baja frecuencia:

15 MHz (20m) ondas métricas

Debida a los electrones libres de la atmósfera (ionosfera).

El plasma impide el paso de radiación con frecuencia menor que la frecuencia del plasma

$$\nu < \nu_p$$

no se transmite

frecuencia del plasma

$$\nu_p (Hz) = 9 \times N_e^{1/2} (m^{-3})$$

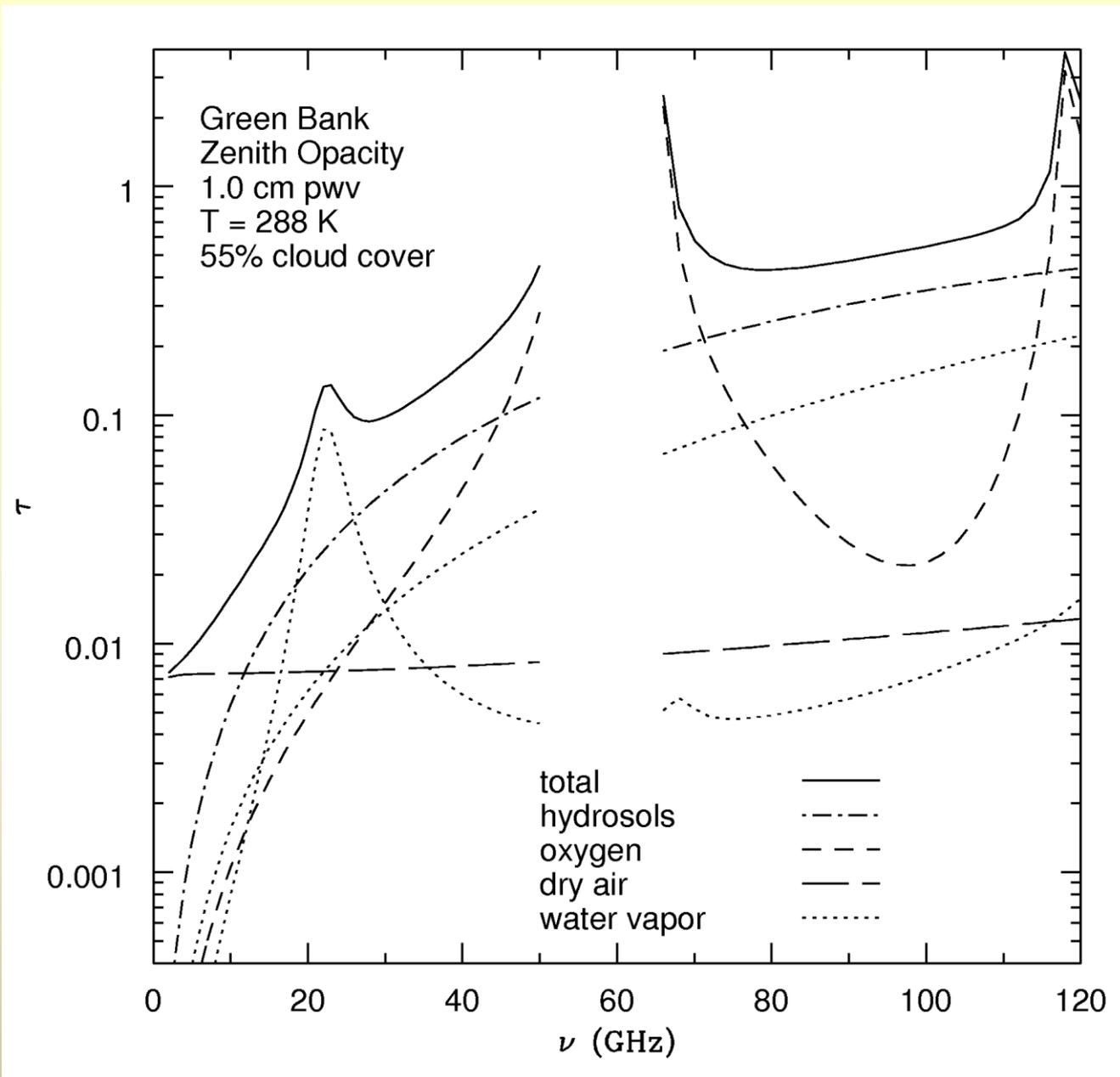
$$\text{(noche)} \quad \nu_p \simeq 4.5 MHz \quad N_e \simeq 2.5 \times 10^{11} m^{-3}$$

$$\text{(de día)} \quad \nu_p \simeq 11 MHz \quad N_e \simeq 1.5 \times 10^{12} m^{-3}$$

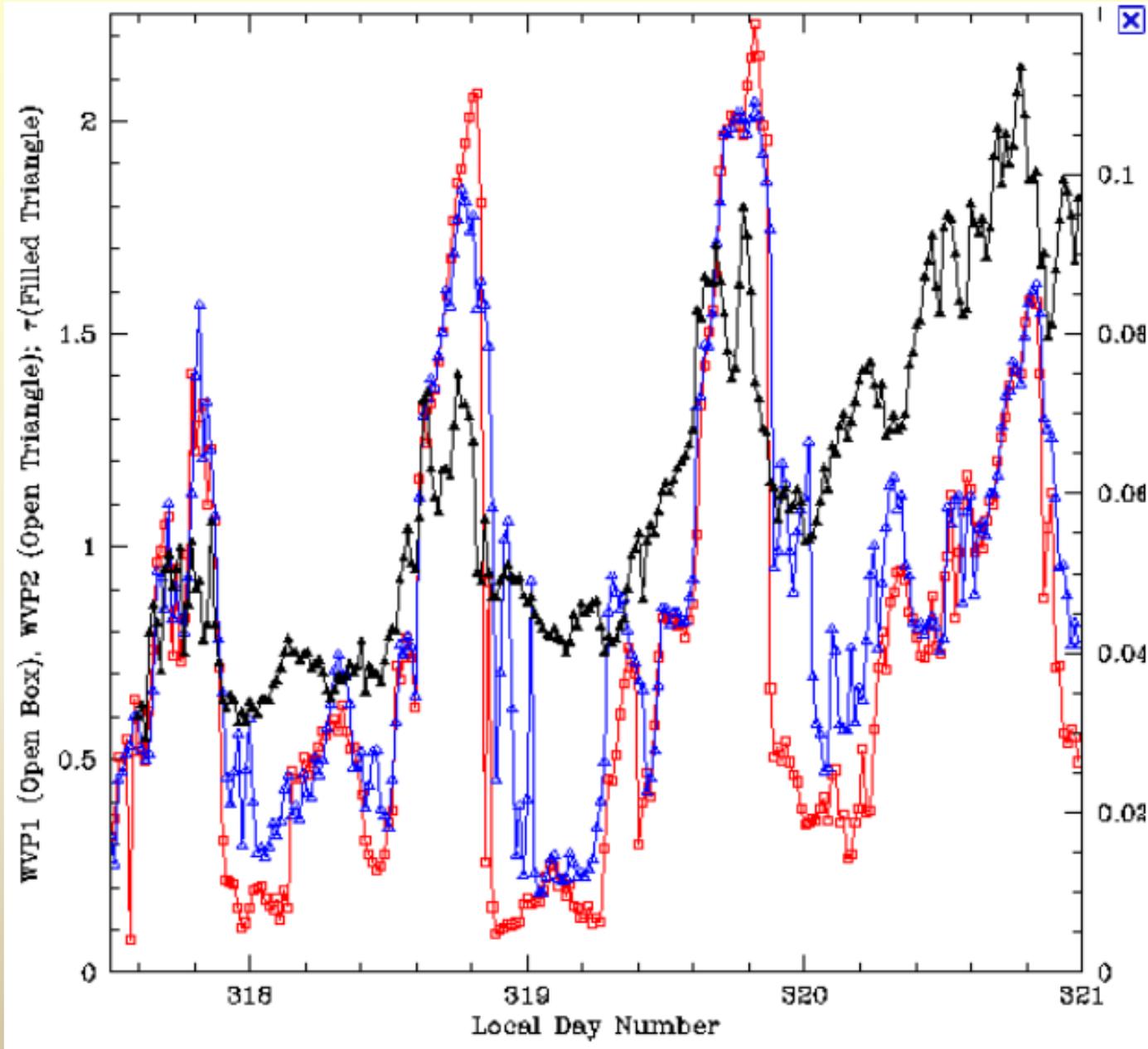
Límite depende de la densidad electrónica (N_e) y por lo tanto varía entre día y noche y con la actividad solar.



Ventana Radio

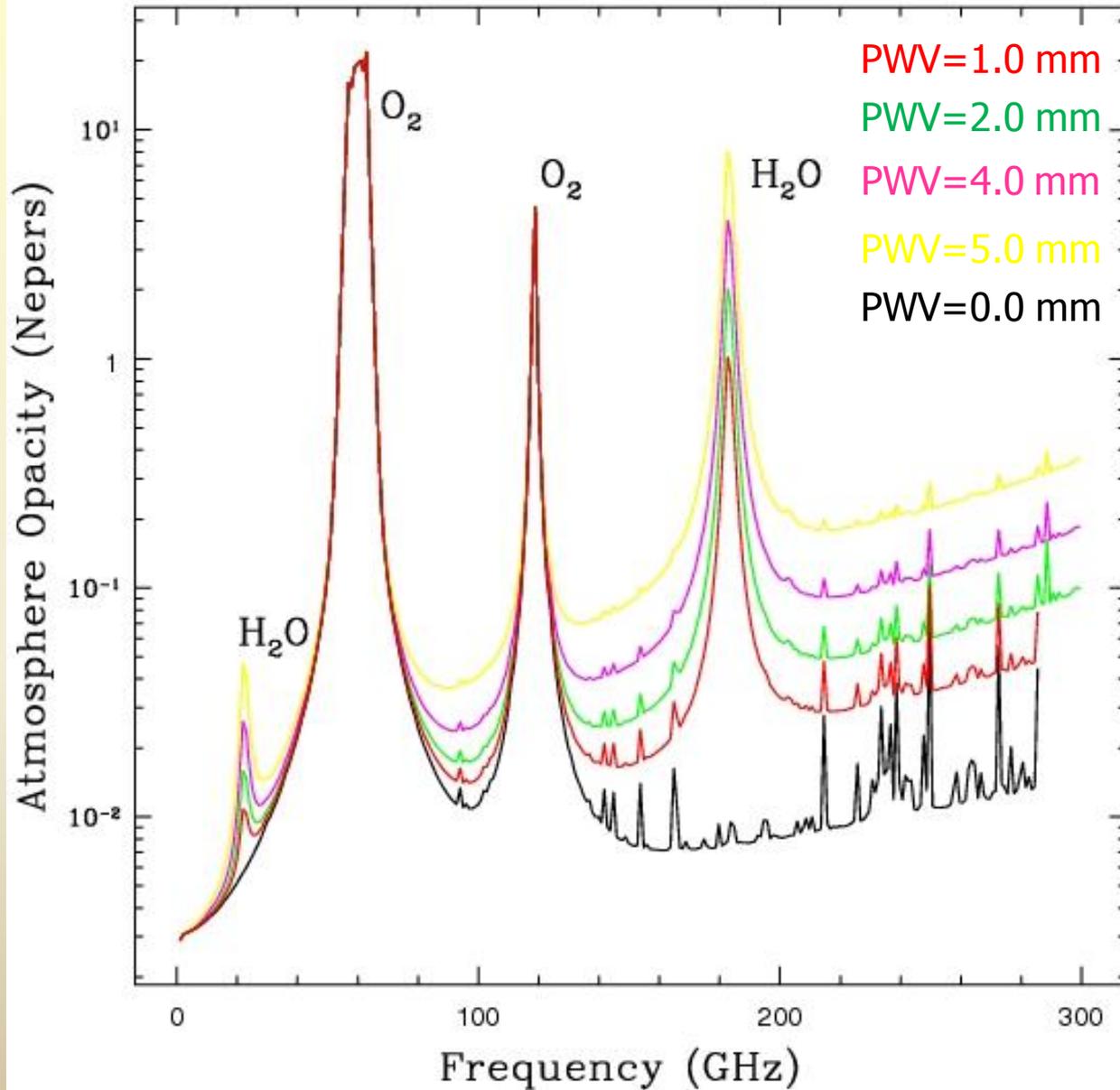


Ventana Radio



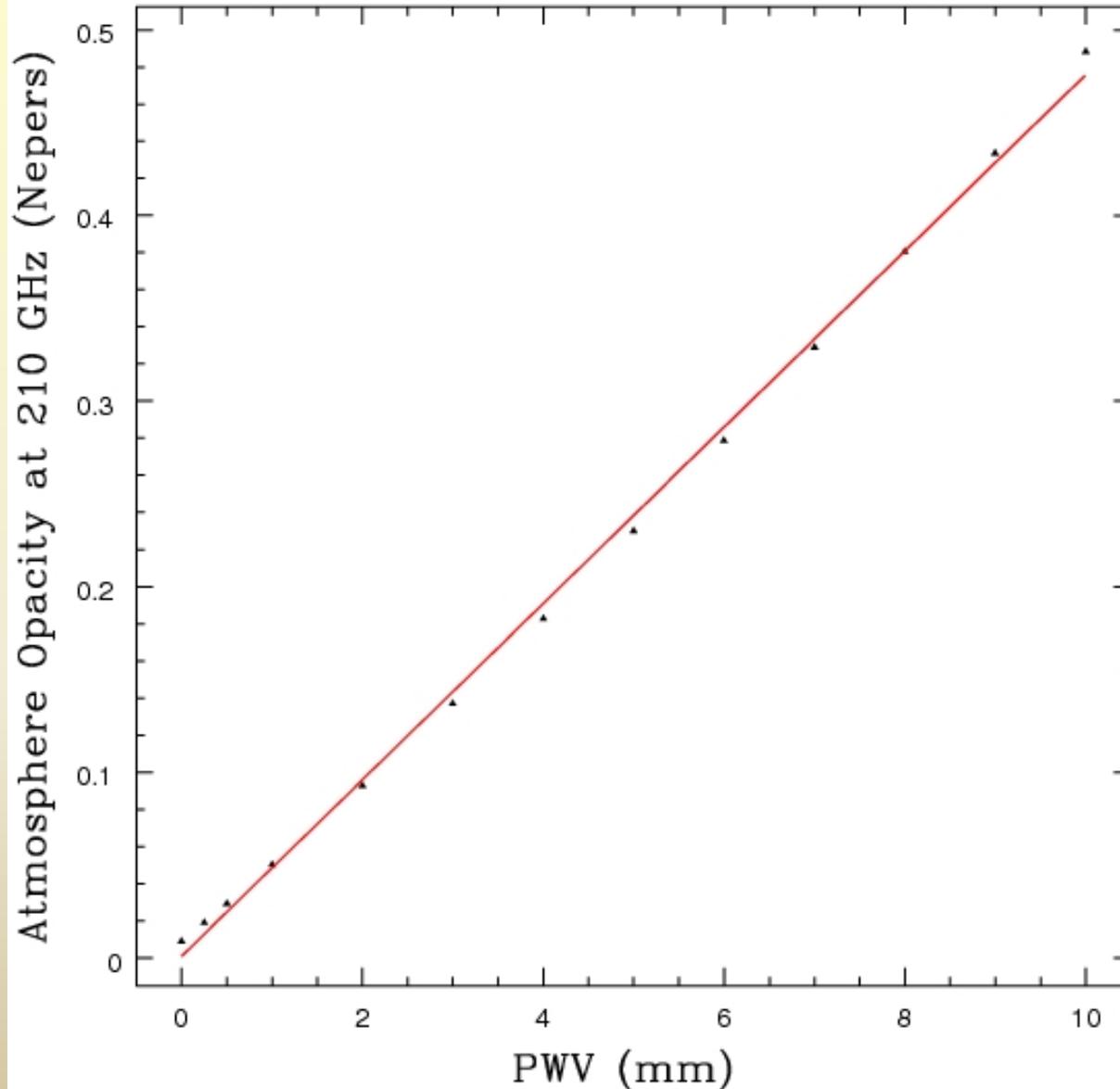
Ventana Radio

<http://haro.astrossp.unam.mx/~hiriart/radiometro/html-files/method.html>



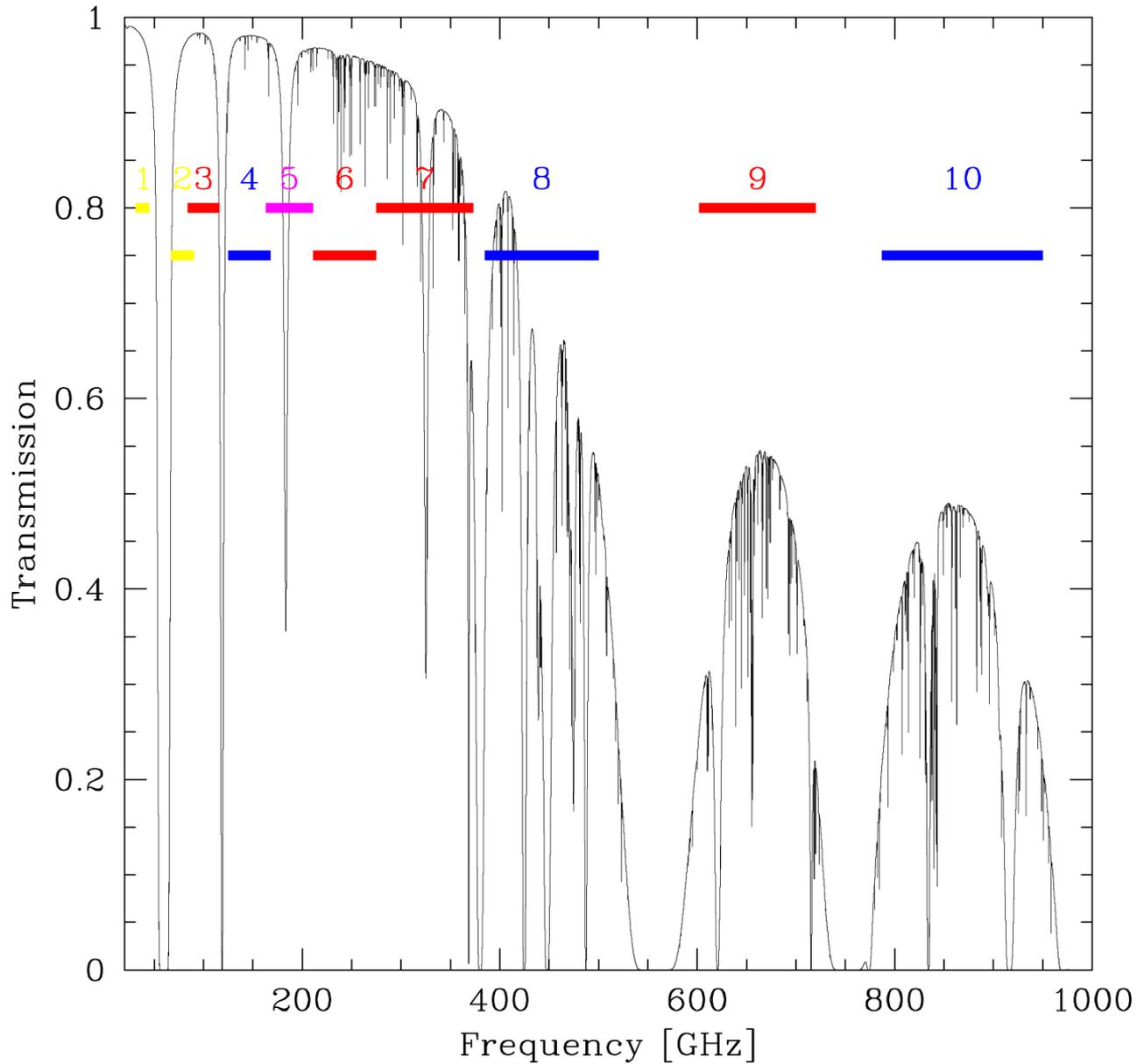
Ventana Radio

<http://haro.astrossp.unam.mx/~hiriart/radiometro/html-files/method.html>



Ventana Radio

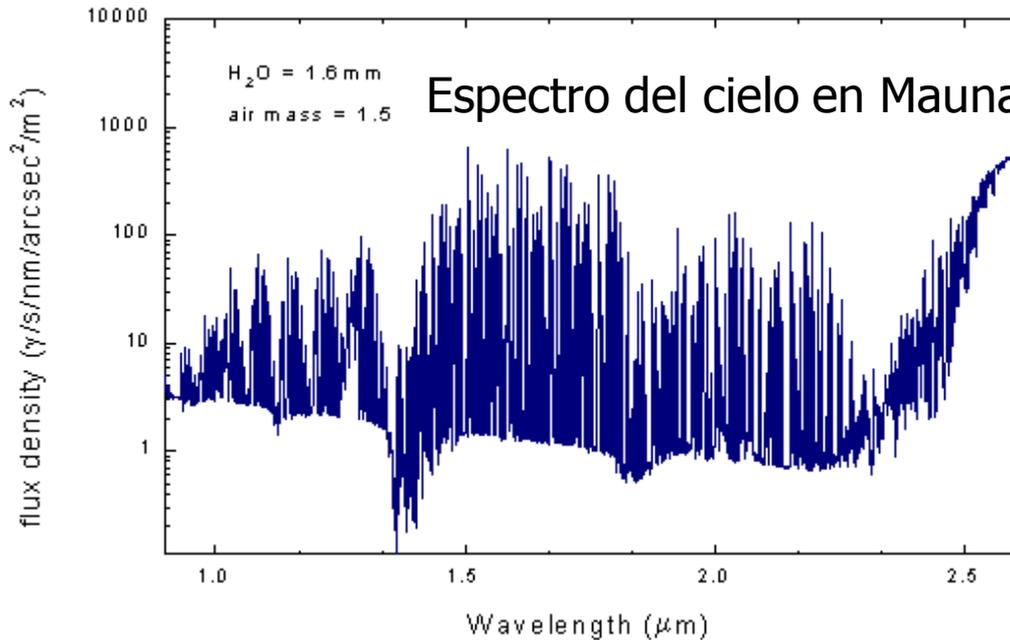
Atmospheric transmission at Chajnantor, pwv = 0.5 mm



<http://www.eso.org/sci/facilities/alma/observing/specifications/FreqBands.jpg>



Infrarrojo cercano

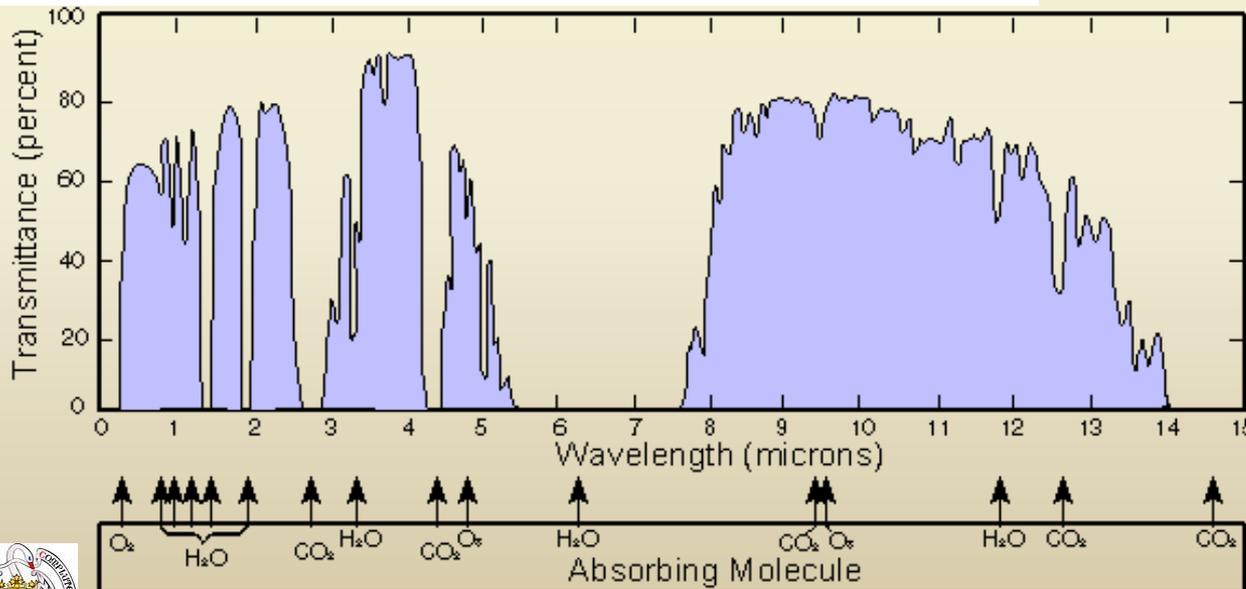


Emisión en nIR:

moléculas de la atmósfera,
principalmente líneas de OH.

Visita:

Mauna Kea OH Line Emission Spectrum



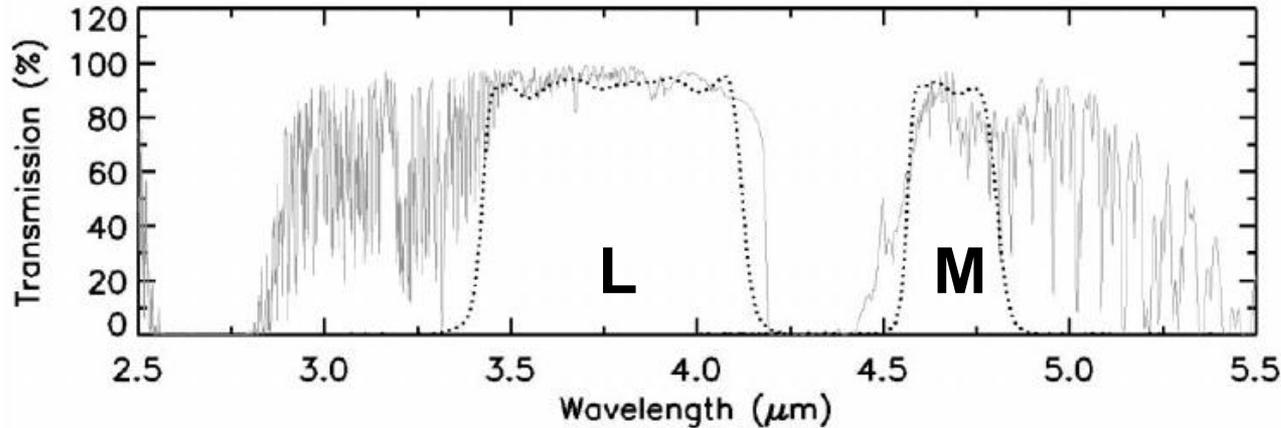
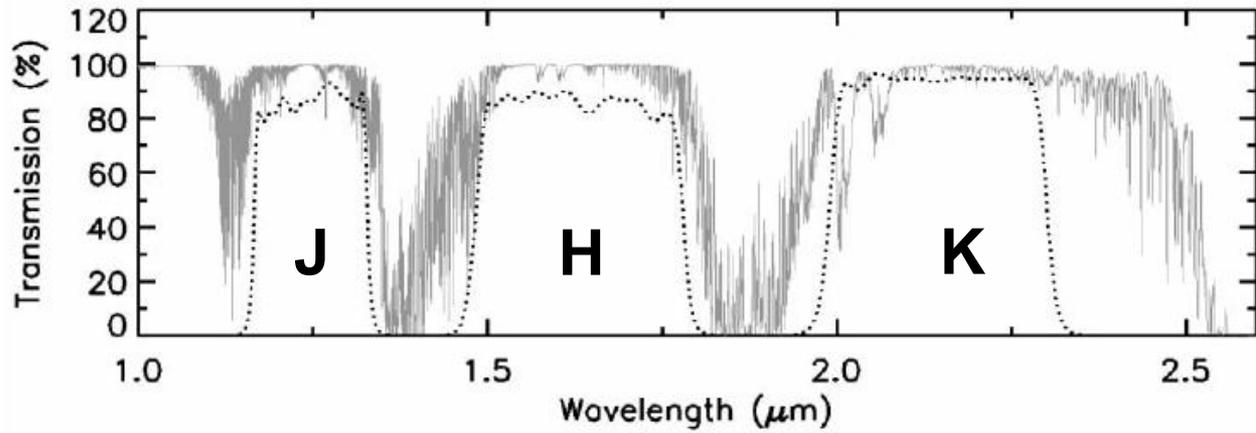
Absorción en nIR:

moléculas de la atmósfera,
principalmente bandas
de vapor de agua.



Ventanas en el infrarrojo cercano (nIR)

Mauna Kea Observatories Near-Infrared Filter Set.



Name	Center
<i>J</i>	1.250
<i>H</i>	1.635
<i>K'</i>	2.120
<i>K_s</i>	2.150
<i>K</i>	2.200
<i>L'</i>	3.770
<i>M'</i>	4.680

Tokunaga, Simons & Vacca
(2002) PASP 114,180

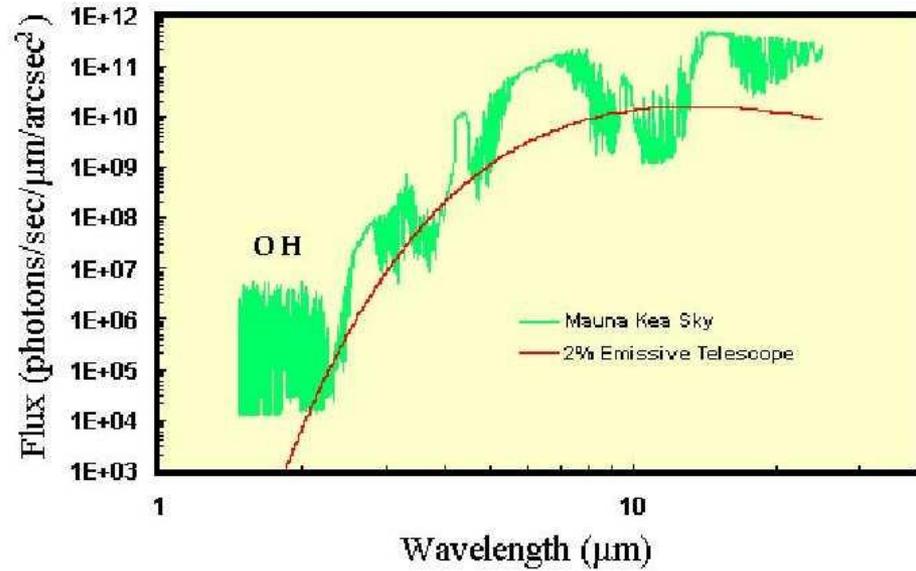
http://www.ifa.hawaii.edu/~tokunaga/MKO-NIR_filter_set.html

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



Infrarrojo medio

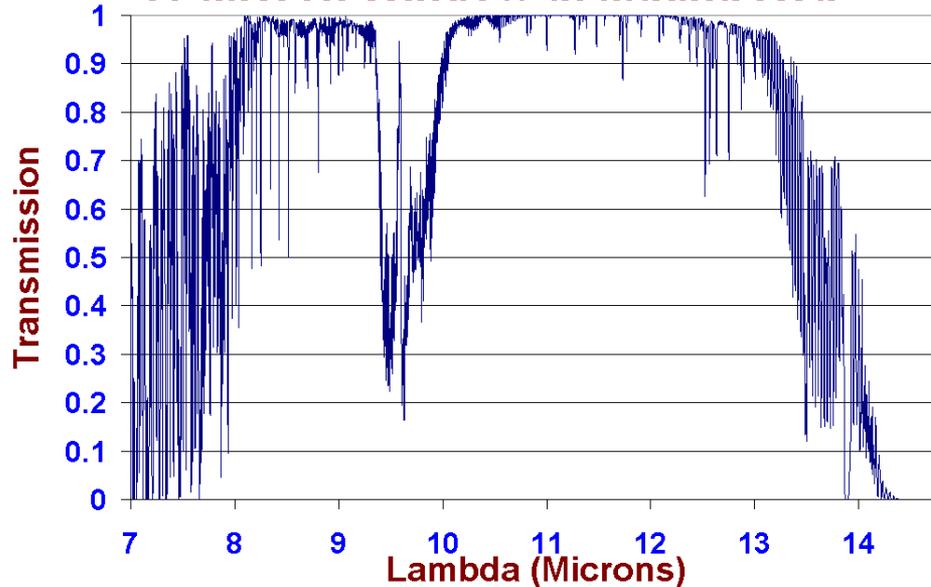


Emisión en mid IR en Mauna Kea

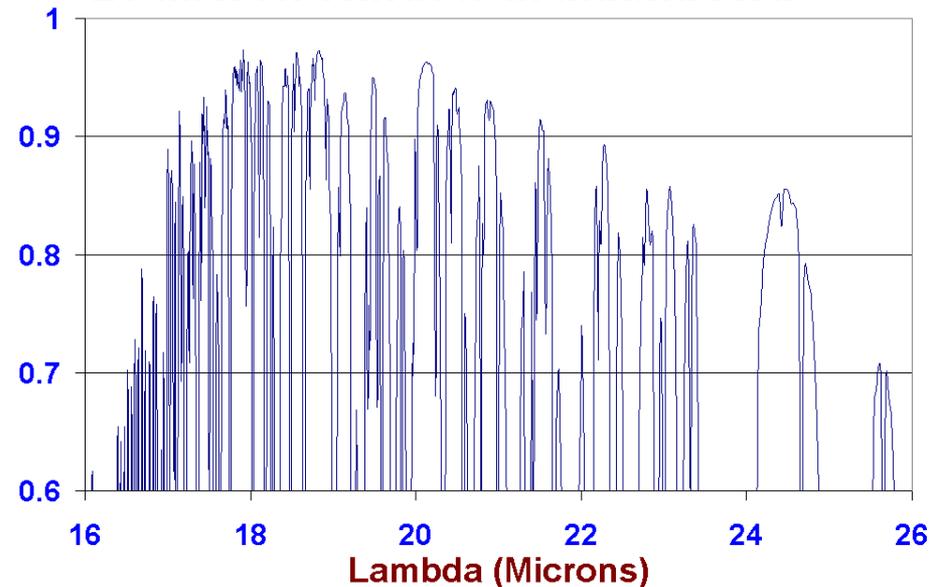
Visita: Página de CanariCam para GTC
<http://www.iac.es/project/CCam/Atmosphere.htm>

Transmisión en mid IR en Mauna Kea

10 Micron Window at Mauna Kea

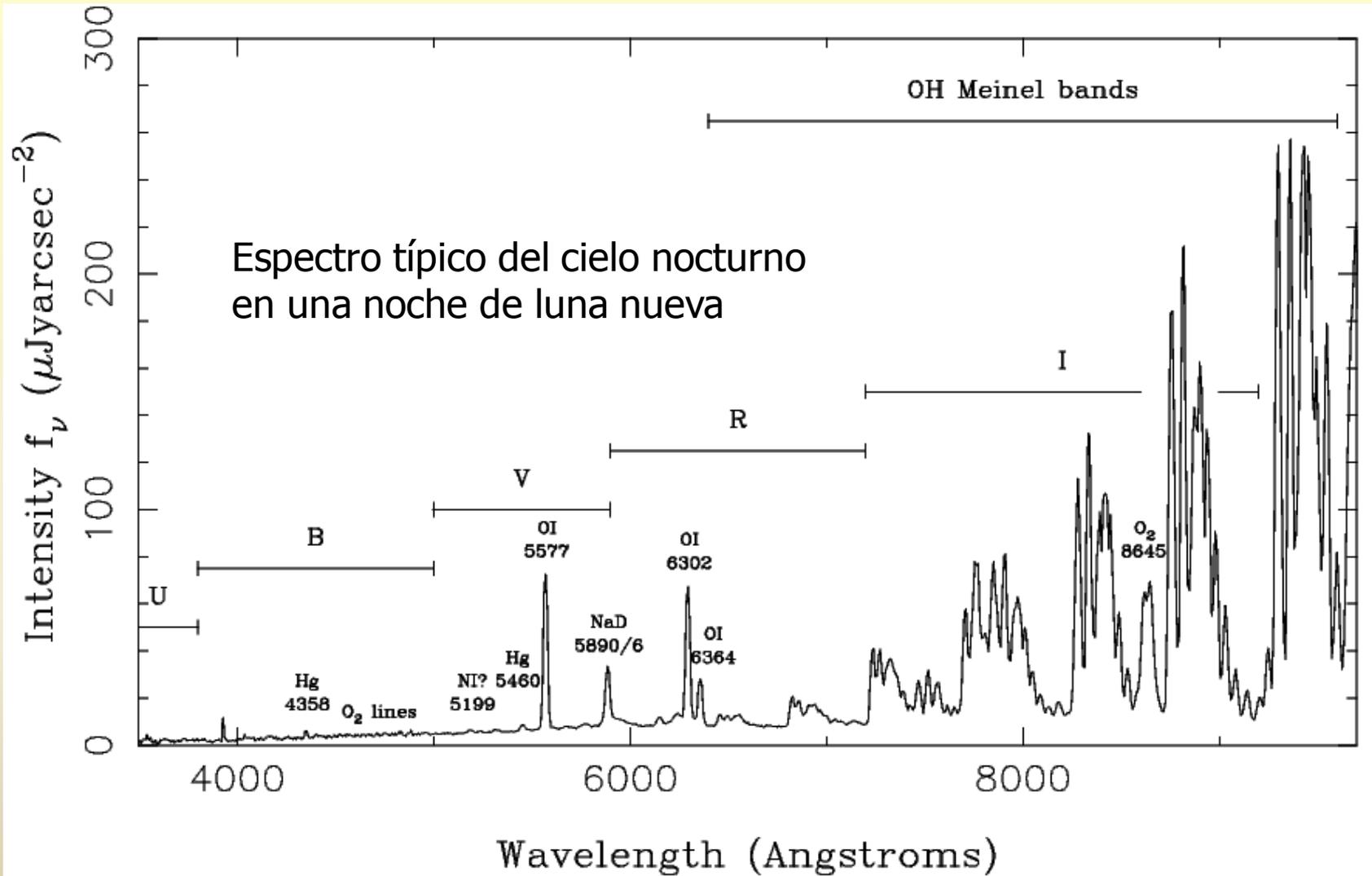


20 Micron Window at Mauna Kea



Espectro del cielo nocturno

<http://www.ing.iac.es/Astronomy/observing/conditions/skybr/skybr.html>



La Palma night-sky brightness, Benn & Ellison 1998, ING Technical Note 115

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

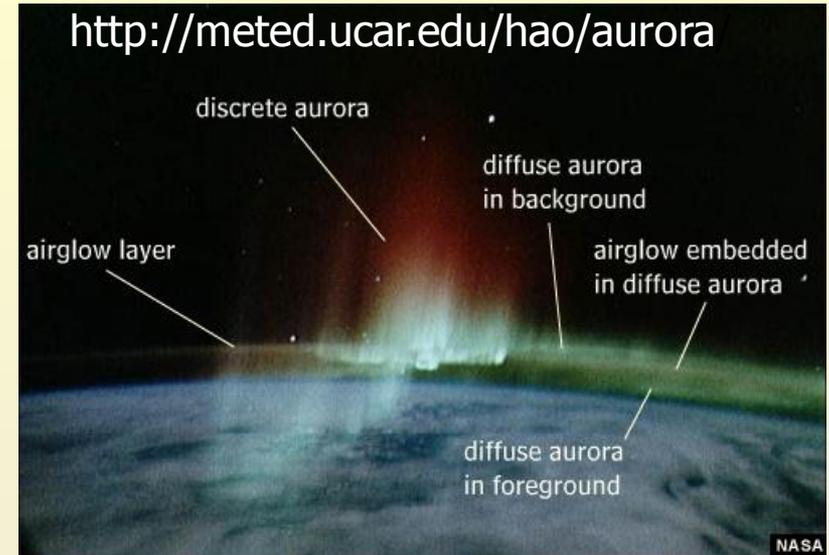
(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



Contribuyentes al espectro del cielo nocturno

- **Airglow:** Es la luminiscencia nocturna del cielo emitida por átomos y moléculas de la alta atmósfera que son excitados por la radiación solar UV durante el día.

- OI 5577/6300/6363Å (como en las auroras)
- NaD 5890/6 Å
- OH Bandas vibro-rotacionales de Meinel (en el rojo e infrarrojo)
- O₂ 8645Å O₂ bandas de Herzberg



- El airglow depende de la actividad solar y es 1000x más brillante de día.
- Su intensidad varía de forma errática en escalas de tiempo de minutos y en un factor 2 durante la noche (en especial las bandas de OH).
- La emisión no depende de la latitud terrestre (salvo zonas de auroras) y tiene su máximo en distancias cenitales $z \approx 80^\circ$.
- Se origina en una capa fina a $h=100-300$ km

interactive auroral
spectra viewer

http://meted.ucar.edu/hao/aurora/a_spectra.htm

- **Luminiscencia de la alta atmósfera:**

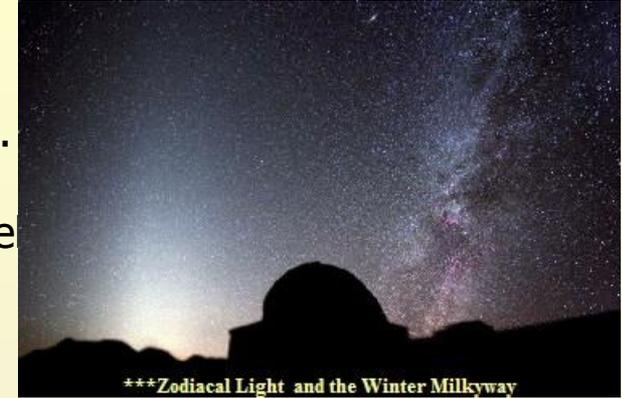
Las observaciones desde satélites en órbitas cercanas se ven afectadas por:

- Ly α geocoronal (difusión resonante múltiple de la luz solar en la geocorona).
- Luminiscencia producida por el propio satélite que en su movimiento excita átomos y moléculas (en especial O₂).



Contribuyentes al espectro del cielo nocturno

- **La Luna**: Espectro solar reflejado por la Luna.
- **Luz zodiacal**: luz solar difundida por polvo interplanetario.
- **Radiación estelar** difundida por granos de polvo interestelar.
- **Auroras**.
- **Contaminación lumínica**.



Contribution	Surface brightness V (S_{10} units)	Typical V_{zenith} (sunspot minimum)
Airglow	$\approx 145 + 130(S_{\odot} - 0.8)/1.2$	145
Aurora	negligible at $ \text{latitude} < 40^{\circ}$	0
Zodiacal light	$\approx 140 - 90\sin(\beta)$ ($ \beta < 60^{\circ}$)	60

$(S_{10} = 27.78 \text{ mag arcsec}^{-2} \quad 220 S_{10} = 21.9 \text{ mag arcsec}^{-2})$

S_{10} , a unit of measurement of surface brightness used in astronomy and defined as the surface brightness of a star whose visual magnitude is 10 and whose light is smeared over one square degree.

Extragalactic light		~ 1
Light pollution	< 20 at a 'dark' site (Smith 1979)	
Total		220



Contaminación lumínica

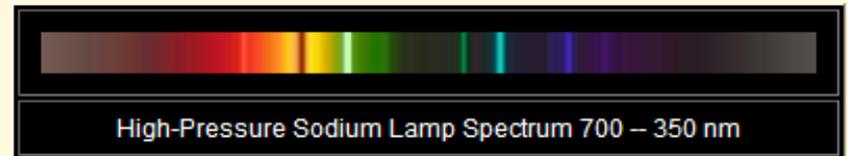
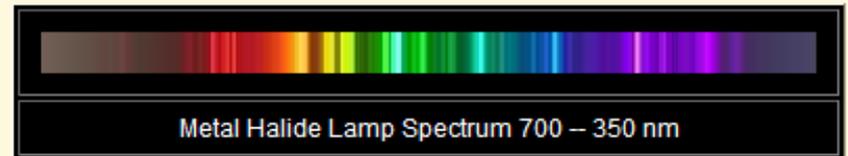
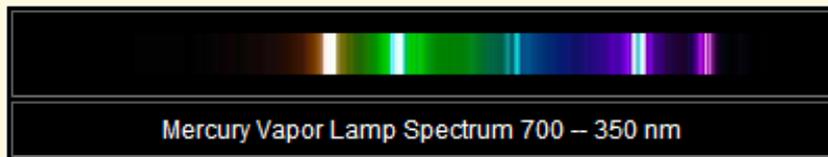
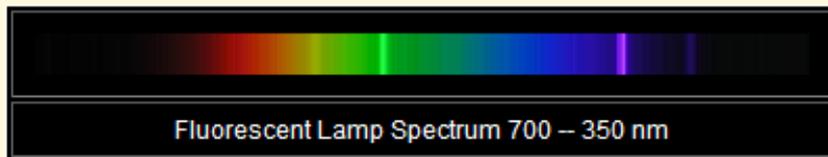
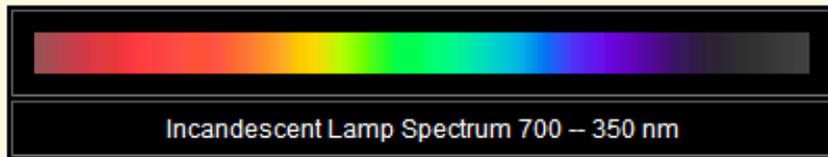
Tipos de lámparas

Lámparas incandescentes.

Lámparas de mercurio HgI 4358Å HgI 5460Å

Lámparas de sodio:

- Baja presión NaD 5890/6Å 5683/8 6154/61 débiles sin continuo
- Alta presión NaD 5890/6Å 4665/9 4979/83 5149/53 5683/8 6154/61 continuo apreciable entre 5500Å y el infrarrojo.



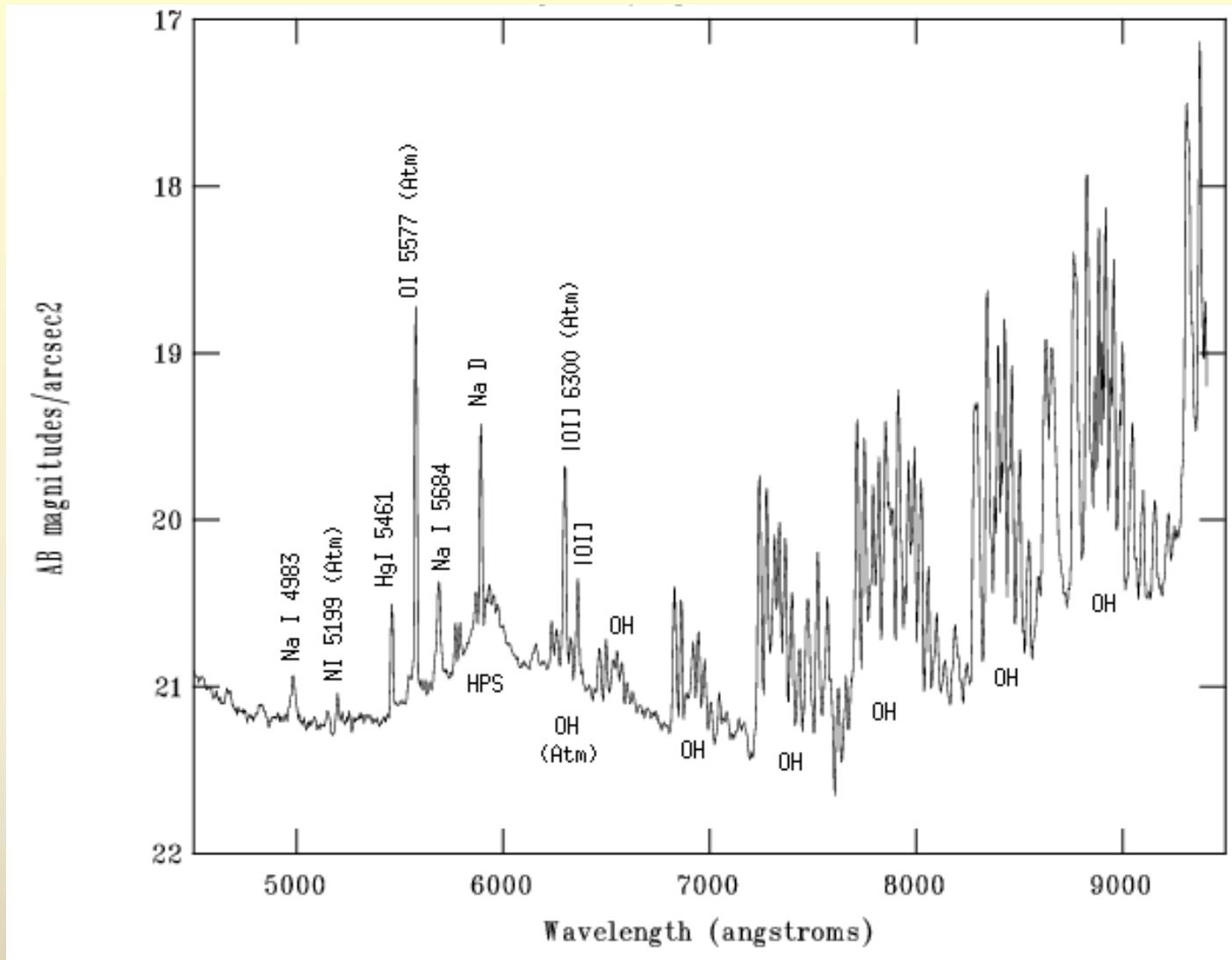
http://www.darksky.org/images/light_spec.html

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



Espectro del cielo con contaminación lumínica



Se observan líneas de emisión de lámparas de alumbrado

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

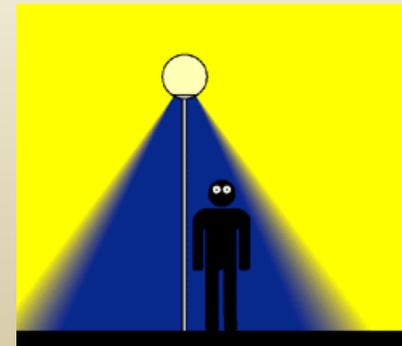
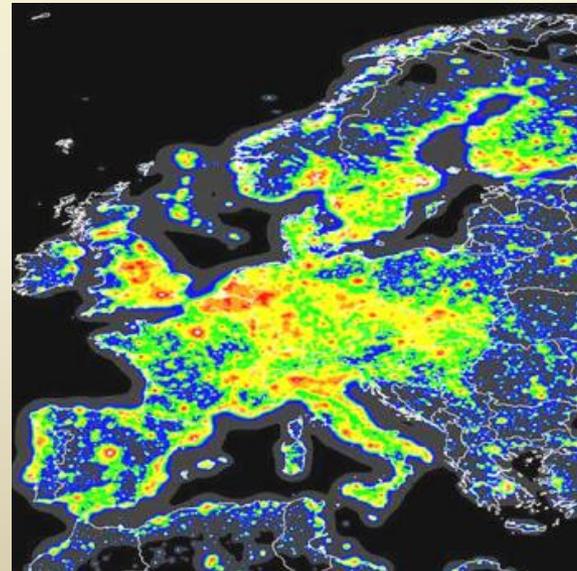
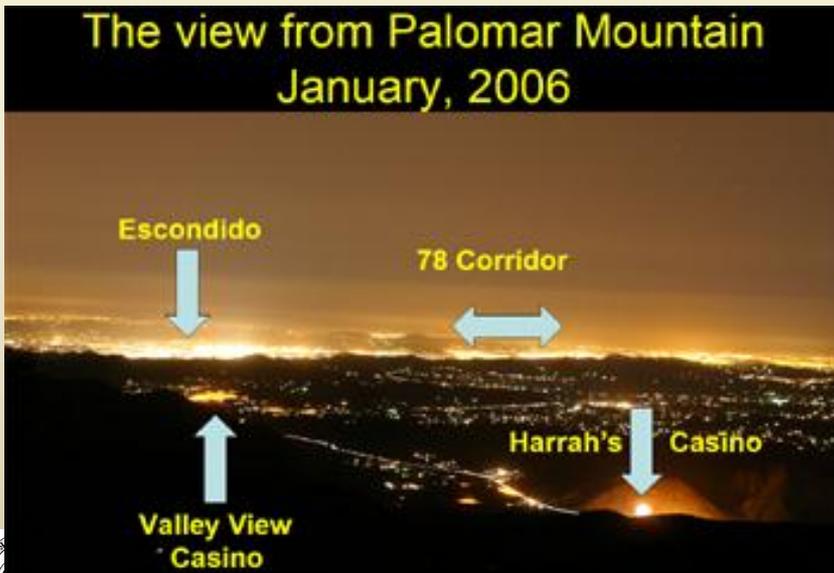
(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



Contaminación Lumínica



Visita: International Dark-Sky Association



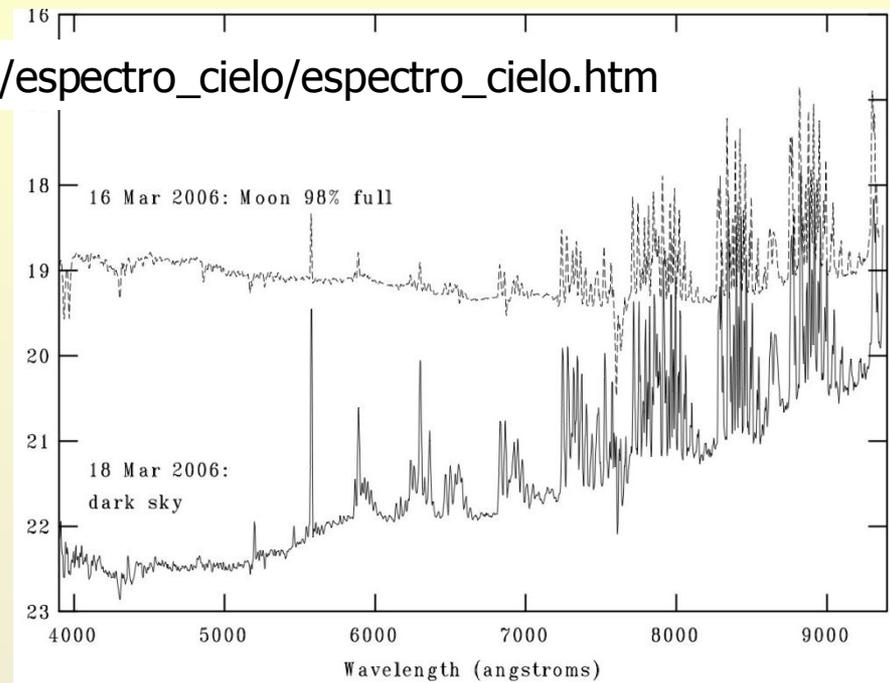
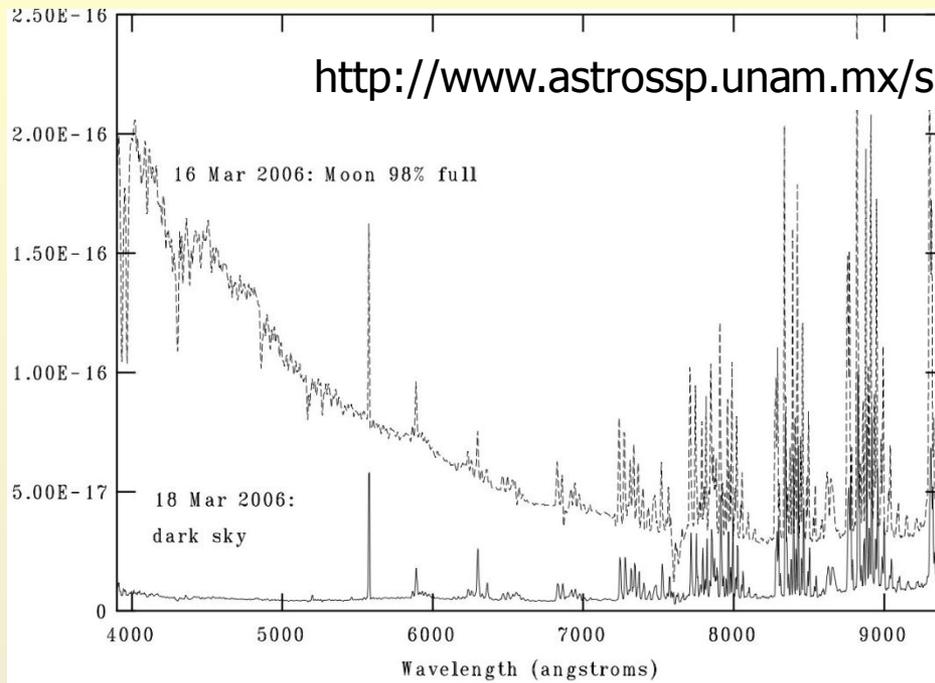
The night sky in the World

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



Espectro del cielo (contribución de la Luna)



Espectro del cielo en el observatorio de San Pedro Mártir en una noche oscura y otra con luna casi llena. (izda) en unidades de flujo y (dcha) en mag/arcsec²

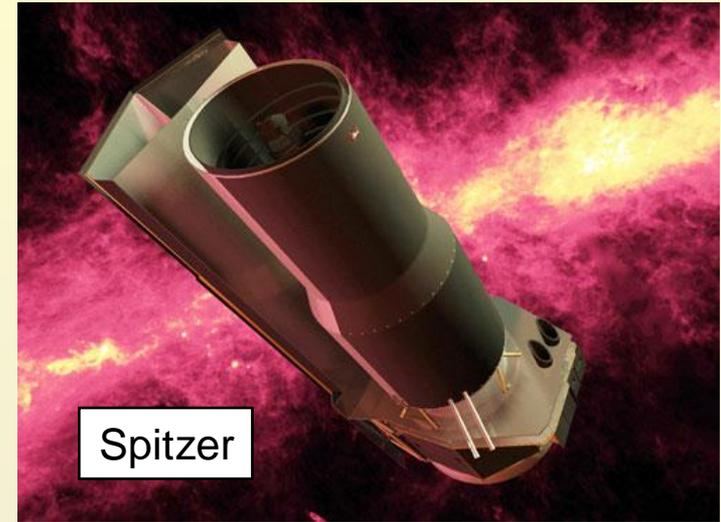
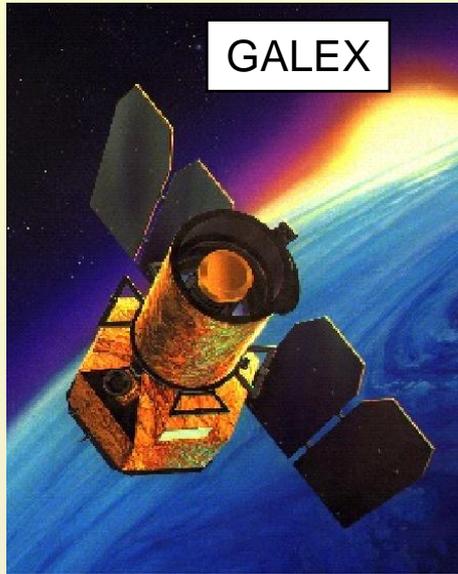
Brillo medio del cielo en La Palma (rms 0.1)
 B = 22.7 V = 21.9 R = 21.0 mag/arcsec²

Incremento con la luna

	Creciente	Cuarto	Llena
Fase (grados)	135	90	0
Edad de la luna	4	8	15
Frac. iluminada %	25	50	100
ΔM (U, B, V)	0.5	2.0	4.3
ΔM (R)	0.3	1.3	3.5
ΔM (I)	0.2	1.1	3.3



Los observatorios (en Tierra y Espacio)



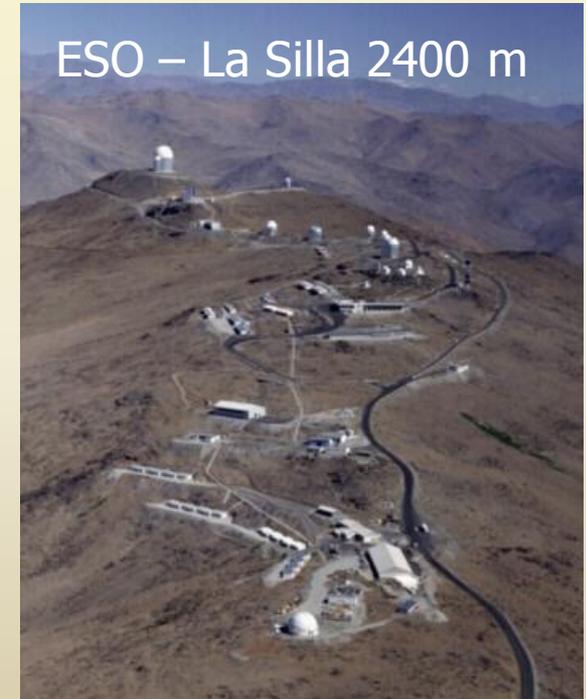
Elección de la localización de los observatorios

Los observatorios se construyen en lugares seleccionados ('site testing') porque reúnen condiciones de observación favorables:

- **Noches (días) despejados.** Observatorio por encima de la capa de inversión atmosférica.
- **Turbulencia atmosférica mínima.** Es importante el relieve y las condiciones geográficas para que existan flujos laminares sobre el observatorio.

Uno de los parámetros que se miden en el 'site testing' es el seeing.

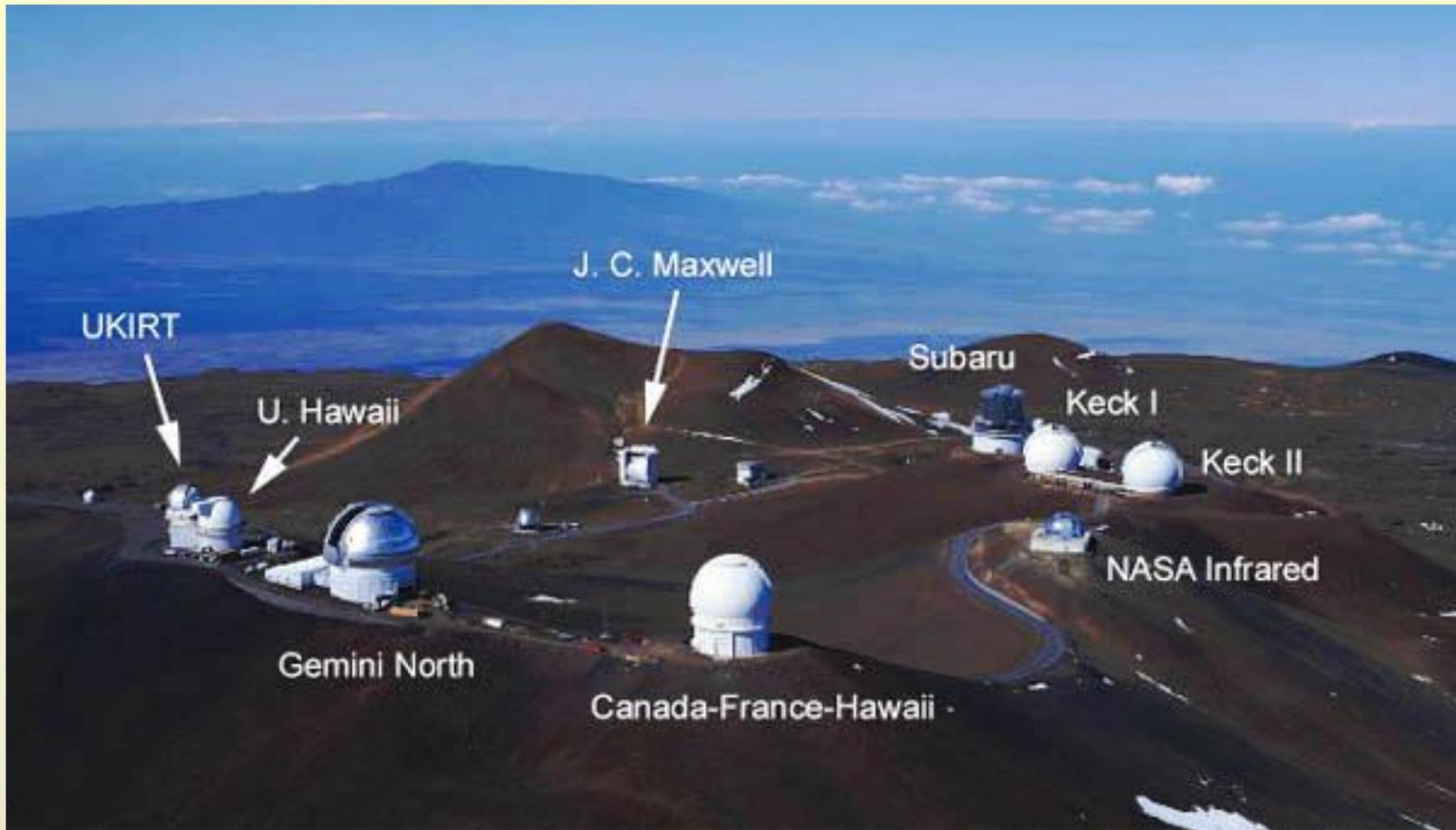
- **Oscuridad del cielo.** Debe encontrarse alejado de contaminación luminosa.
- **Bajo contenido de vapor de agua precipitable.** Muy importante en IR y milimétricas.



Construir y mantener un observatorio es costoso. Deben albergar además de telescopios los servicios generales (residencia, cocina, laboratorios, talleres, etc.)



Observatorios astronómicos



Observatorios astronómicos



Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)

EFECTOS DE LA ATMÓSFERA

- La atmósfera terrestre produce cambios en la radiación que la atraviesa en:
 - Dirección: refracción y seeing.
 - Intensidad: extinción (absorción) y centelleo.



EXTINCIÓN ATMOSFÉRICA (I)

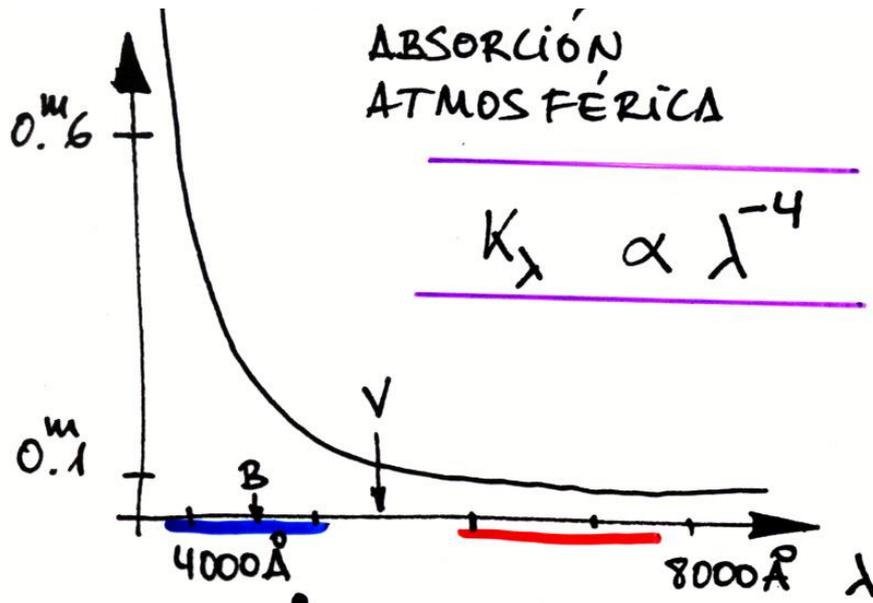
- La absorción no selectiva afecta a todas las longitudes de onda y se debe principalmente a la **difusión de Rayleigh** (moléculas del aire).

Modelo de Hayes & Latham

ApJ 197, 593 (1975)

$$A_{\text{Ray}}(\lambda, h) = 9.4977 \times 10^{-3} \left(\frac{1}{\lambda}\right)^4 \left[\frac{(n-1)_{\lambda}}{(n-1)_{\lambda=1}} \right]^2 \times \exp\left(\frac{-h}{7.996}\right)$$

$$\frac{(n-1)_{\lambda}}{(n-1)_{\lambda=1}} = 0.23465 + \frac{1.076 \times 10^2}{146 - (1/\lambda)^2} + \frac{0.93161}{41 - (1/\lambda)^2}$$



Altura del observatorio	h (km)
Longitud de onda	λ (μm)
Índice de refracción del aire	n
Extinción $A(\lambda, h)$	(mag/masa de aire)

nómica

Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)

EXTINCIÓN ATMOSFÉRICA (II)

Otros contribuyentes:

Ozono: Se encuentra a una altura entre 10 y 35 km
Su contribución no depende de la altura del observatorio.
Se puede evitar con globos estratosféricos.
La atmósfera es opaca a $\lambda < 320$ nm debido al ozono.

$$A_{oz}(\lambda) = 1.11 T_{oz} k_{oz}(\lambda)$$

K_{λ} coeficiente de absorción (cm^{-1})
T cantidad total de ozono (atm cm)
T ≈ 0.2 en el ecuador
T ≈ 0.3 a latitud 60°
T tiene variaciones estacionales y
además varía a lo largo de la noche

Aerosoles: Partículas de polvo fino, gotas de agua y contaminación atmosférica.
Más bajas que las moléculas que causan la difusión Rayleigh.
La extinción depende poco de λ : es más gris.

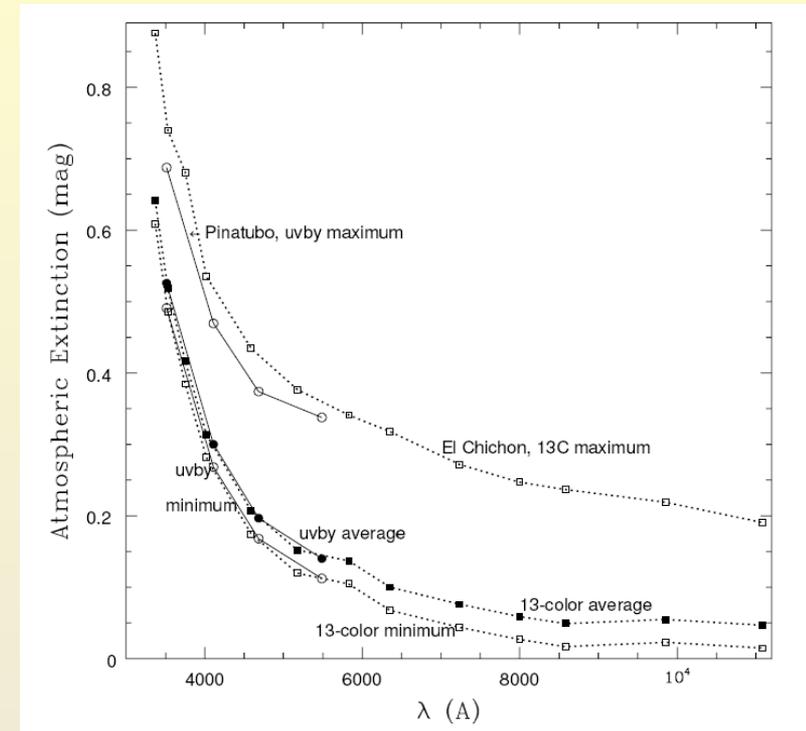
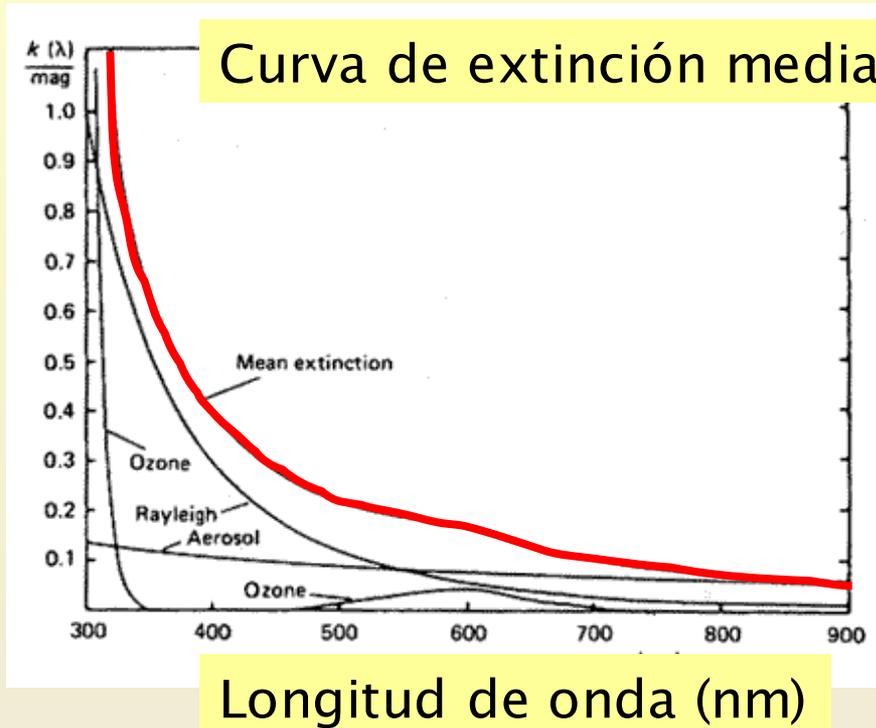
$$A_{aer}(\lambda, h) = A_0 \lambda^{-\alpha} \exp(-h/H)$$

A_0 y α dependen del lugar geográfico ($\alpha \approx 0.8$)
h altura (km)
H escala de alturas $H \approx 1.5$ km



EXTINCIÓN ATMOSFÉRICA (III)

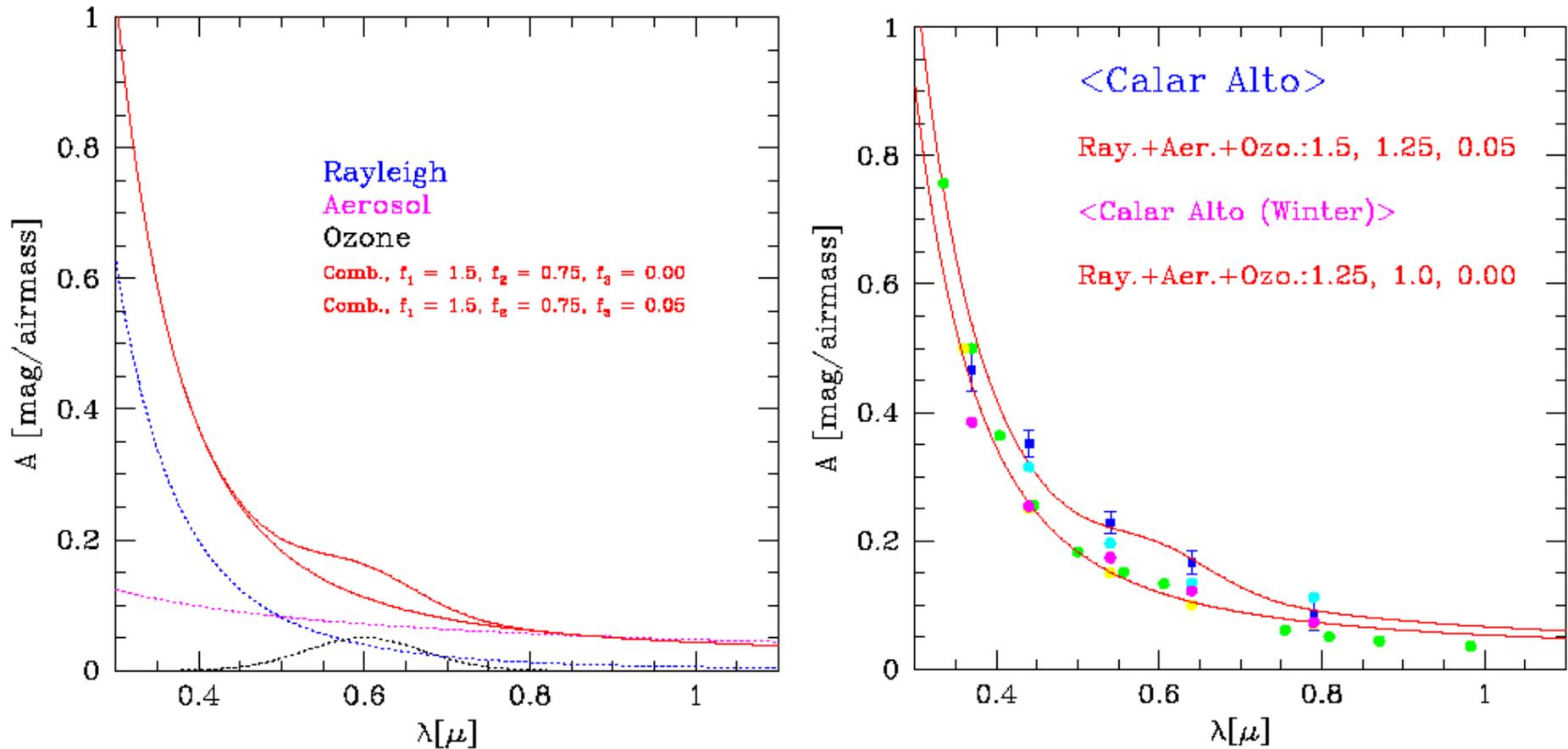
K_λ



- La cantidad y variación de la extinción con la longitud de onda dependen del lugar de observación y de las condiciones atmosféricas.
- Los observatorios suelen determinar una curva de extinción media.
- Como varía estacionalmente y a lo largo de la noche, es arriesgado utilizar una curva de extinción media para corregir de la absorción atmosférica.



EXTINCIÓN ATMOSFÉRICA (IV)

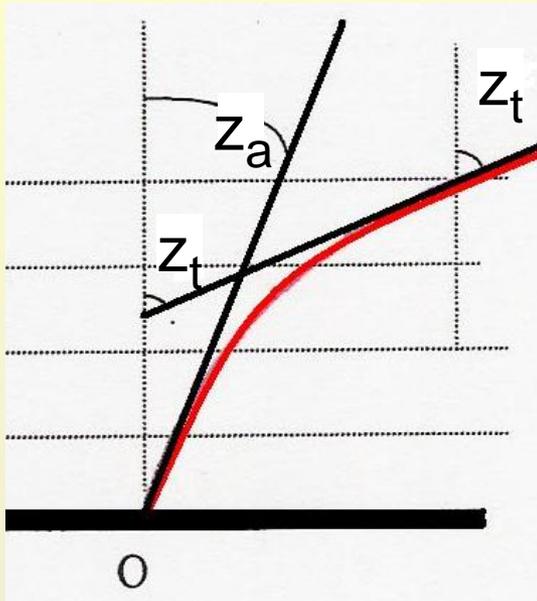


Curva de extinción media y sus diferentes contribuyentes (izda) y coeficientes de extinción en Calar Alto y ajuste de los contribuyentes.

Hopp & M. Fernández en Calar Alto Newsletter nov. 2002



REFRACCIÓN ATMOSFÉRICA (I)

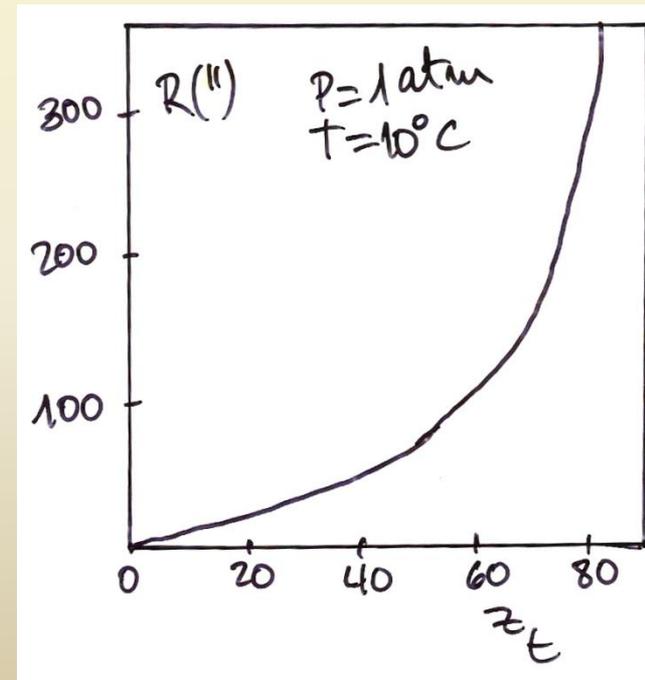


La refracción es la diferencia entre la distancia cenital real z_t y la aparente z_a .

La radiación que atraviesa la atmósfera se desvía y los objetos celestes se desplazan aparentemente hacia arriba.

Este efecto aumenta con la distancia cenital.

La refracción afecta al apuntado y seguimiento de los telescopios.

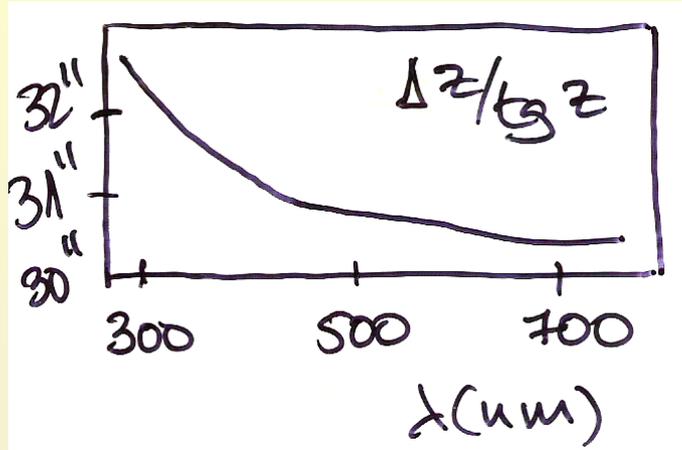


© Zoltan Neda & Sandor Volkan

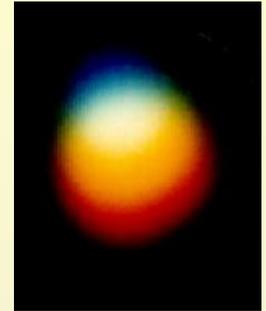
Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)

REFRACCIÓN ATMOSFÉRICA: Dispersión

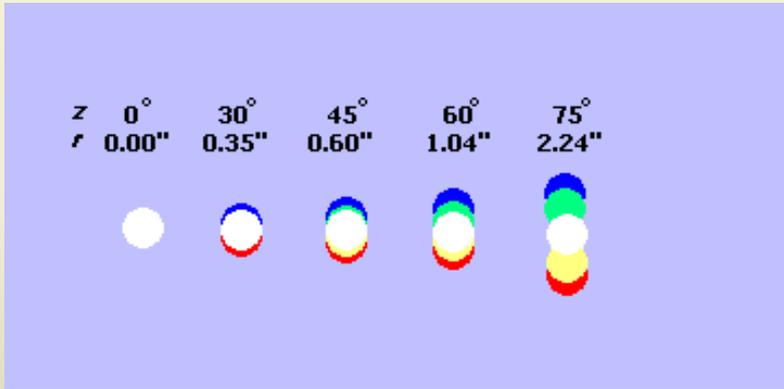


El índice de refracción del aire depende de la longitud de onda (dispersión).



© Dan Bruton

<http://www.astro.ufl.edu/~oliver/ast3722/ast3722.htm>



Este efecto debe ser tenido en cuenta en observaciones espectroscópicas.



Andrew T. Young (2000) *JOSA A*, **17**, 2129

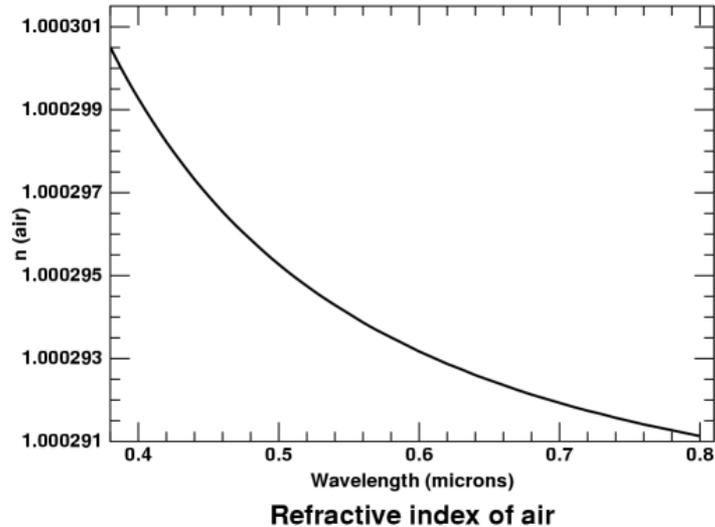
<http://mintaka.sdsu.edu/GF/papers/JOSA/GF-vis.html>

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



TURBULENCIA



Refracción del aire a condiciones estándar de presión y temperatura
E. R. Peck and K. Reeder en 'Dispersion of air' JOSA 62, 958-962 (1972)

Orígenes de la turbulencia:

- Convección.
- Corriente en chorro.
- Deformaciones orográficas.
- Cúpulas.

El valor del índice de refracción del aire n es muy próximo a la unidad.

Las variaciones de contenido en vapor de agua no tienen un efecto significativo pero sí los cambios locales de presión P (Pa) y temperatura T (K).

$$N = (n - 1) \cdot 10^6$$

$$N = 0.779 \times P/T$$

$$\Delta N = 2 \Delta T \frac{P}{T^2}$$



EFECTOS DE LA TURBULENCIA (I)

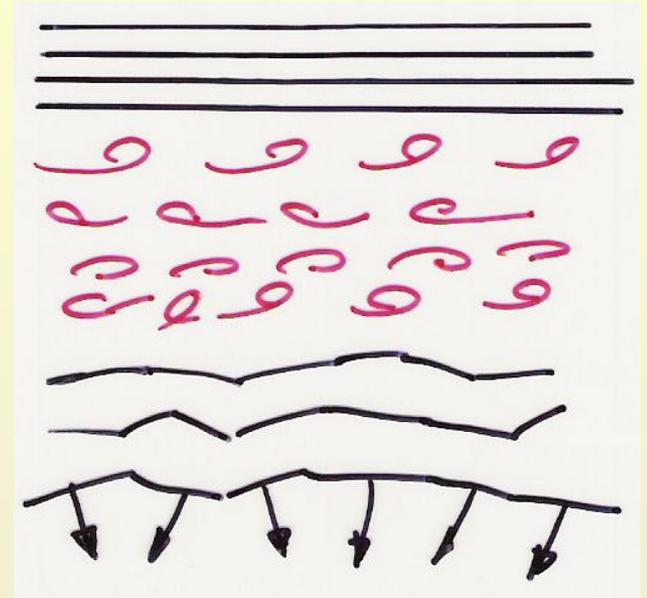
El frente de ondas (plano a la entrada de la atmósfera) se quiebra por efecto de la turbulencia.

La longitud de coherencia r_0 es el parámetro que refleja el estado turbulento de la atmósfera.

$$r_0(\lambda) = r_0(\lambda_0) \left(\frac{\lambda}{\lambda_0} \right)^{1.2} (\cos z)^{0.6}$$

$$\begin{array}{cc} r_0 \uparrow & \lambda \uparrow \\ r_0 \uparrow & z \downarrow \end{array}$$

Mejora hacia el IR y empeora hacia el horizonte



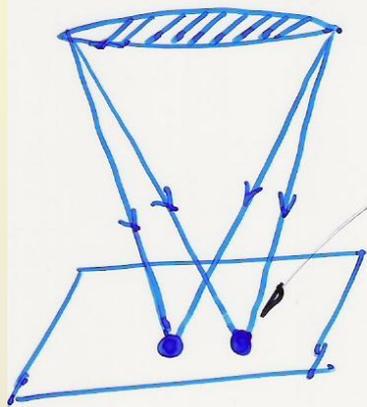
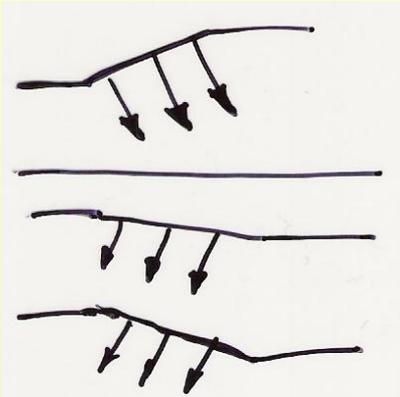
El frente de ondas llega al telescopio quebrado en trozos de tamaño $\sim r_0$
(r_0 parámetro de Fried).

Cuanto mayor es r_0 mejores condiciones de observación se tienen.



EFFECTOS DE LA TURBULENCIA (II)

- A) Telescopio de abertura pequeña ($D \sim r_0$).
Se forman imágenes individuales o 'speckles' que son discos de Airy que se mueven en el plano focal.

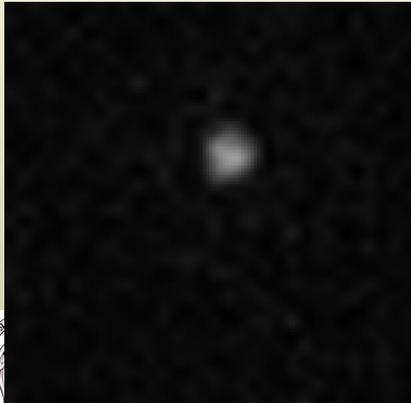
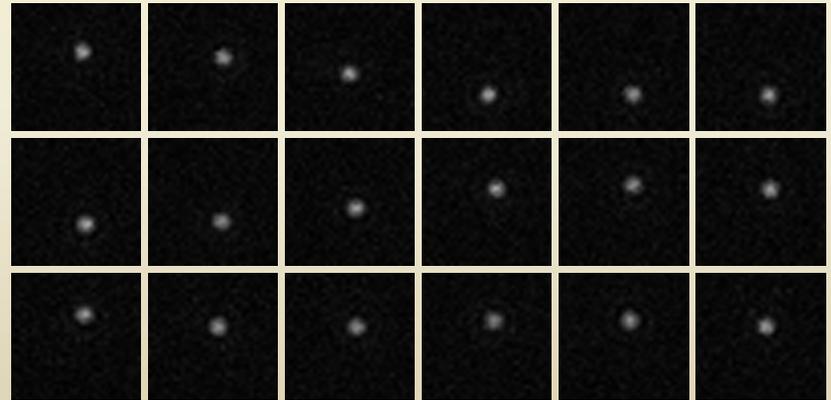


OBJETIVO
(diámetro D)

IMAGEN
MOVIÉNDOSE

PLANO FOCAL

$$\theta = 1.2 \cdot 206265 \frac{\lambda}{D} (")$$



<http://btc.montana.edu/ceres/html/MtnQuest/seeing.htm>

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)

EFECTOS DE LA TURBULENCIA (III)

B) Telescopio de abertura grande ($D > r_0$).
Se forman muchos 'speckles' a la vez,
cada uno corresponde a una parte del
frente de ondas quebrado.

$$\alpha = 1.2 \cdot 206265 \frac{\lambda}{r_0} (")$$

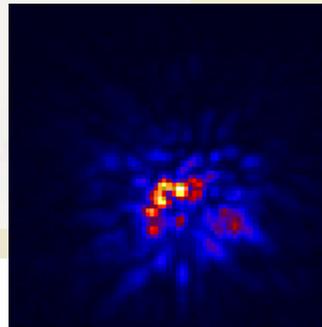
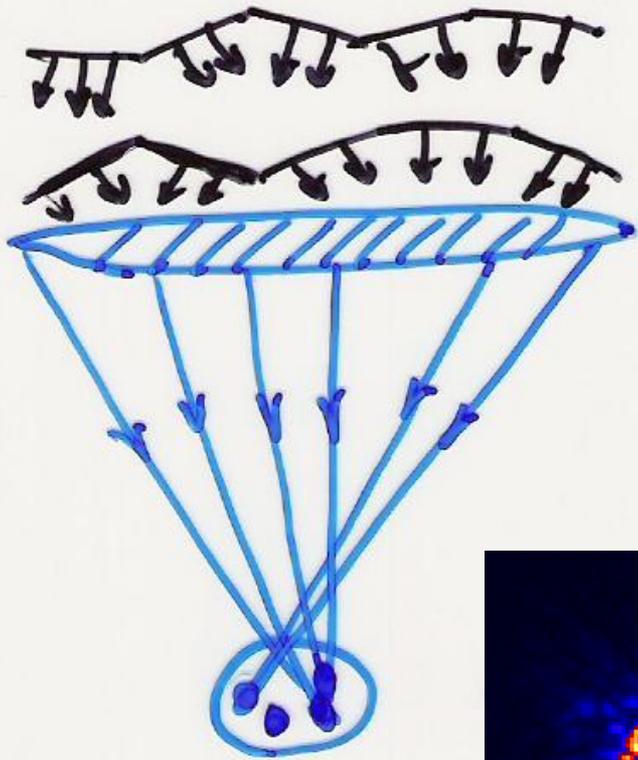
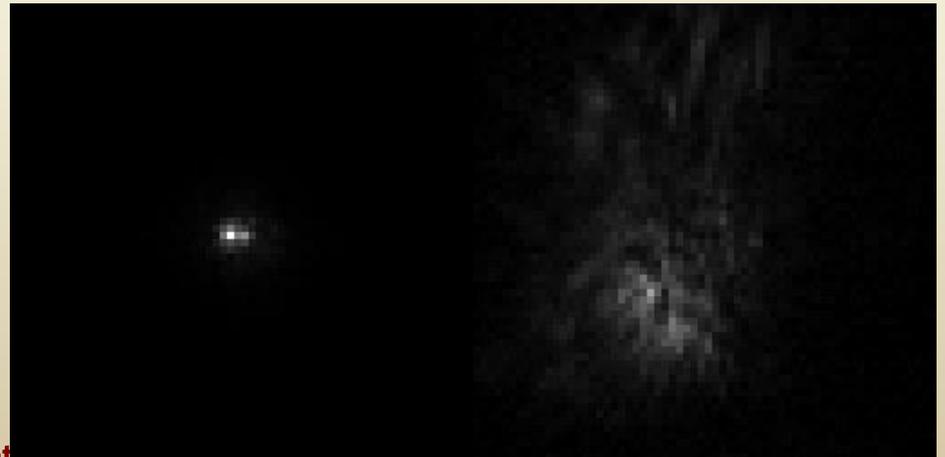
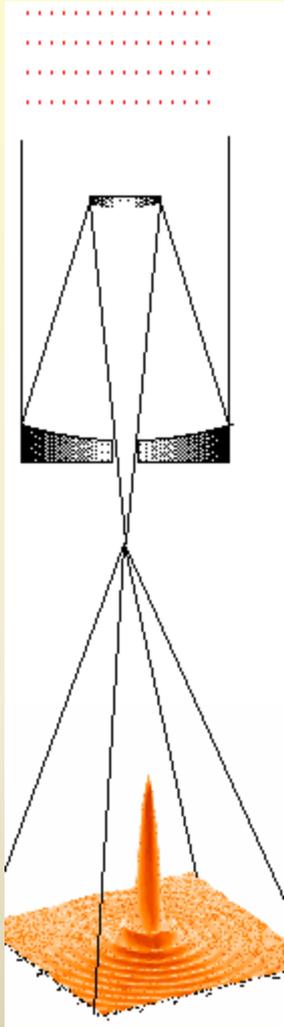


imagen instantánea de una estrella

Se llama
disco de 'seeing'
a la envolvente
de los 'speckles'.

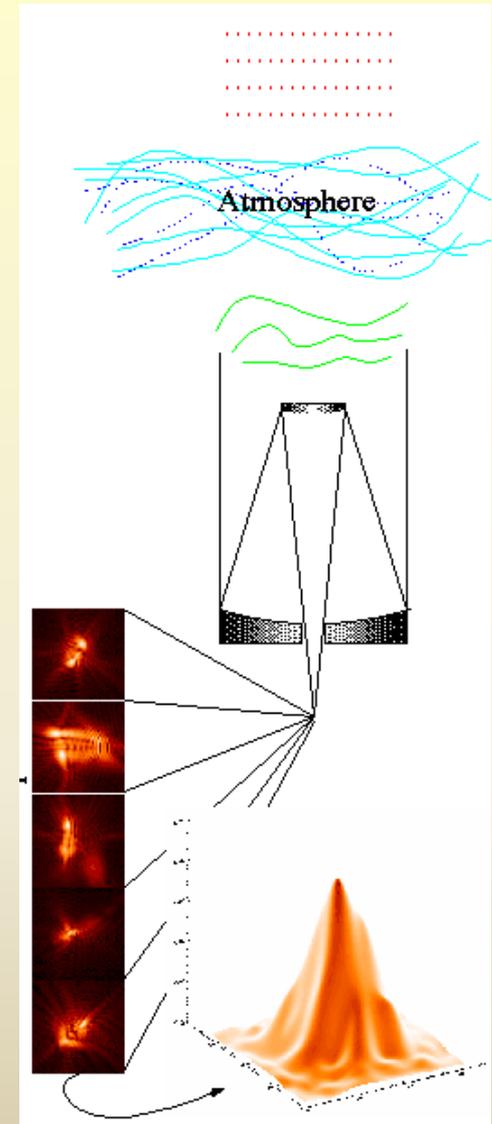


EFECTOS DE LA TURBULENCIA (IV)



Esquema de la imagen de una estrella a través de una atmósfera ideal no turbulenta y de una atmósfera real.

Imágenes sucesivas tomadas a gran velocidad y resultado de una exposición que las englobe.



http://www.cfht.hawaii.edu/Instruments/Imaging/AOB/local_tutorial.html

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



EFECTOS DE LA TURBULENCIA (V)

Seeing limited Resolution = $1.22 \lambda/r_0$

$r_0 \propto \lambda^{6/5}$ e.g. $r_0 = 0,2 \text{ m}$ @ $0,5 \mu\text{m}$
0,5'' @ $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$
0,38'' @ $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$

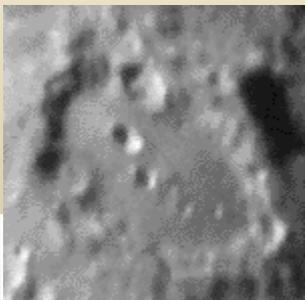
Diffraction Limited Resolution = $1.22 \lambda/D$

e.g. $D = 10 \text{ m}$
0,01'' @ $\lambda = 0,5 \mu\text{m}$
0,045'' @ $\lambda = 2,2 \mu\text{m}$



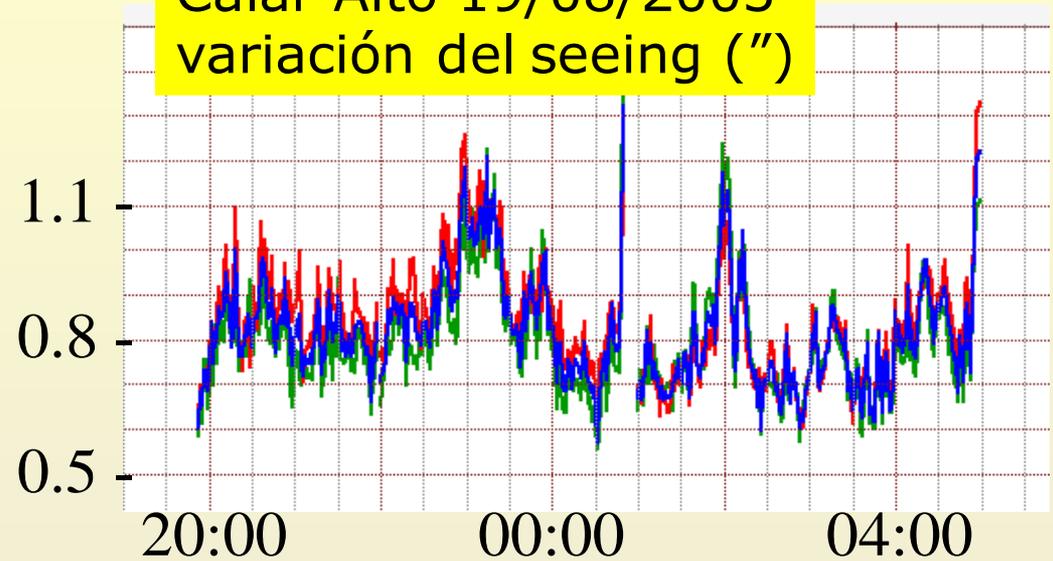
EFECTOS DE LA TURBULENCIA (VI)

El seeing limita la resolución de los telescopios terrestres si ($D > r_0$)



Cráter Clavius observado con buen y mal 'seeing'
<http://www.salzgeber.at/astro/moon/seeing.html>

Calar Alto 19/08/2003
variación del seeing (")



El 'seeing' es muy variable.

The Tombaugh-Smith Seeing Scale



0.79" 1.3" 2.0" 3.2" 5.0"

Resumen de contenidos

- **Ventanas de observación astronómica desde tierra.**
- **Efectos de la atmósfera en las observaciones astronómicas.**
- **Contaminación lumínica.**
- **Necesidad de telescopios espaciales.**
- **Criterios principales de los site-testing de los observatorios.**
- **Extinción atmosférica y seeing.**

