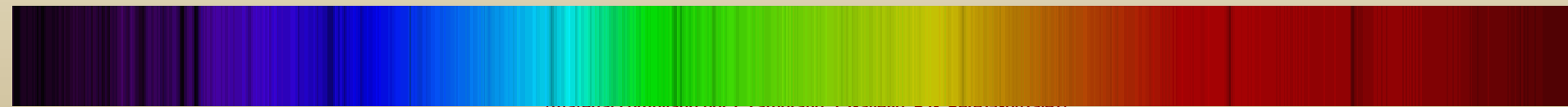
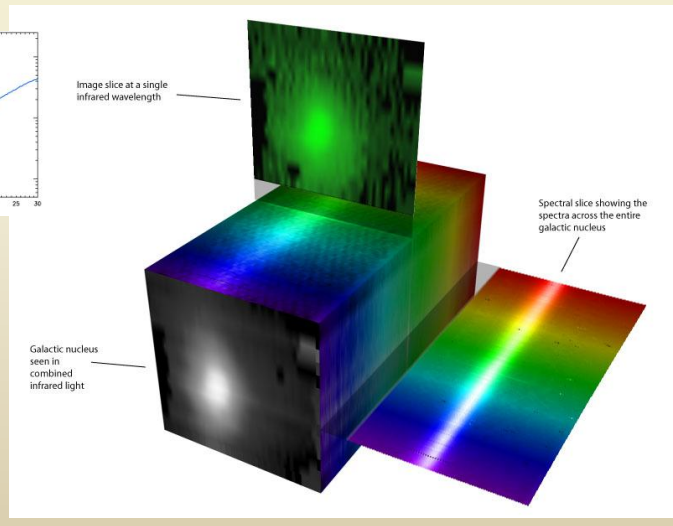
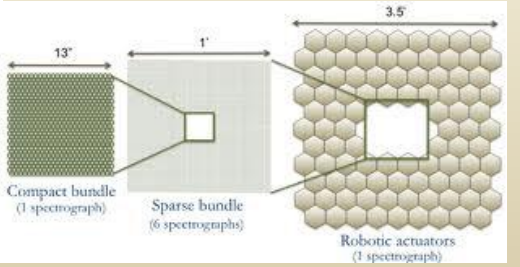
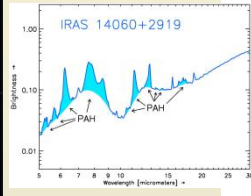
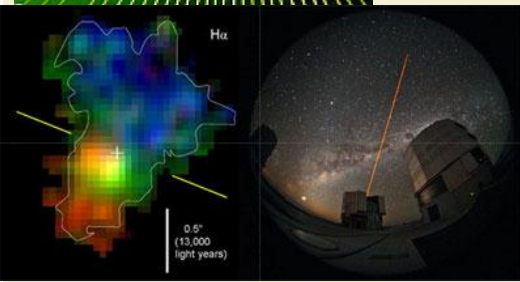
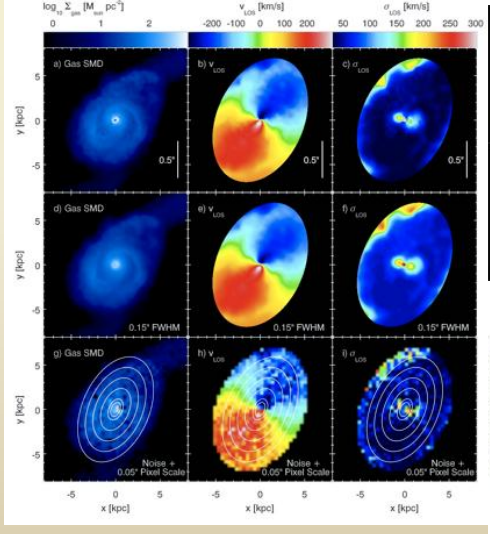
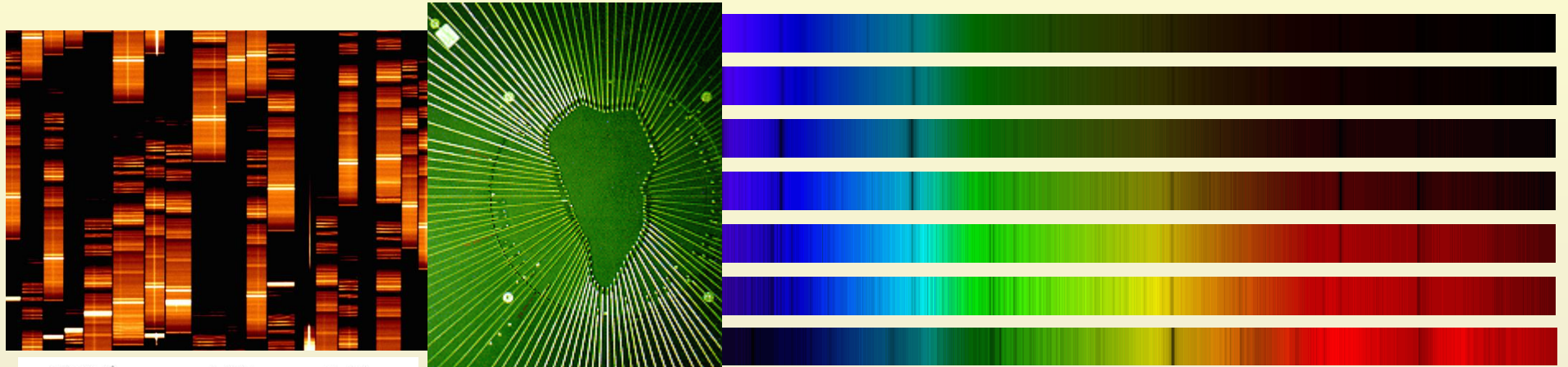




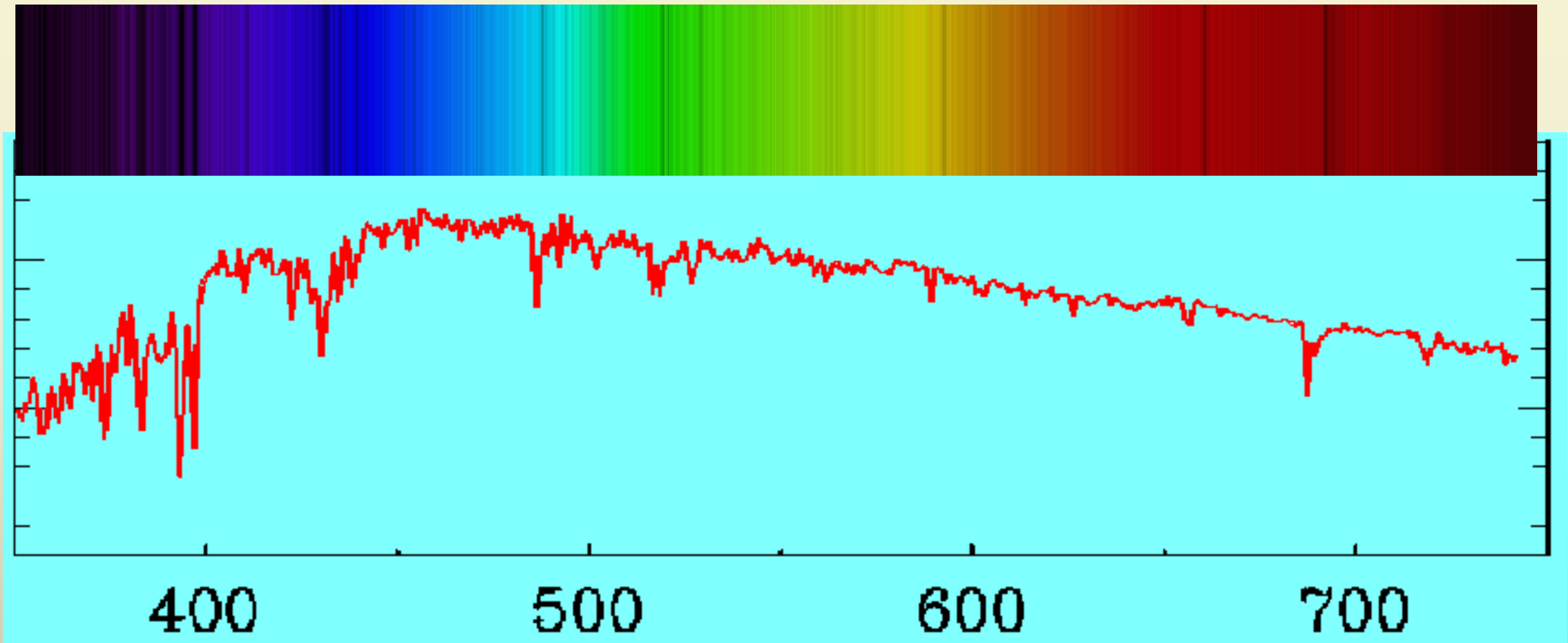
Tema 10: espectroscopía





Introducción

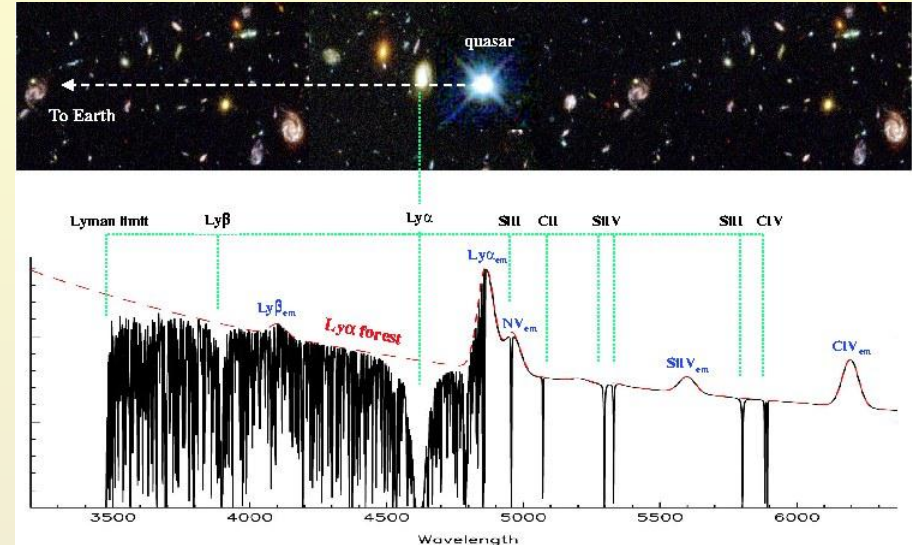
- El objetivo de la espectroscopía es obtener las distribuciones espectrales de energía (SEDs): flujo de energía recibido de los objetos celestes respecto a la longitud de onda.
- Mucho más exigente en tiempo de observación que la fotometría ya que es equivalente a una fotometría en banda estrecha en múltiples canales.



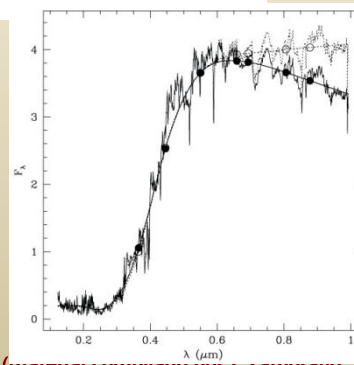
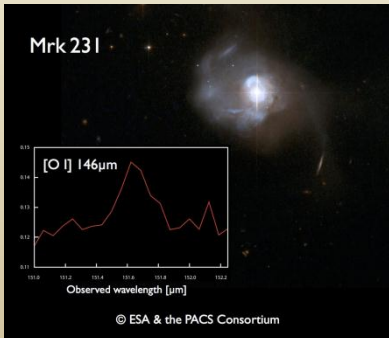
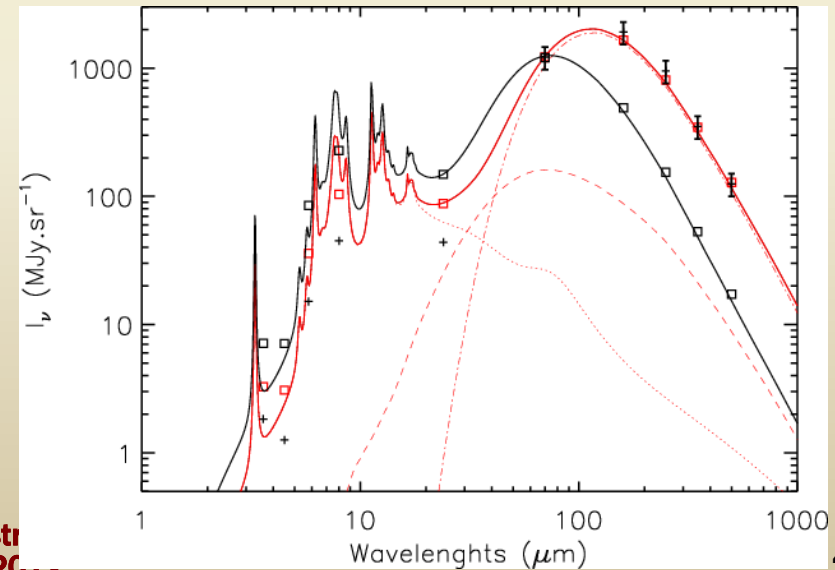
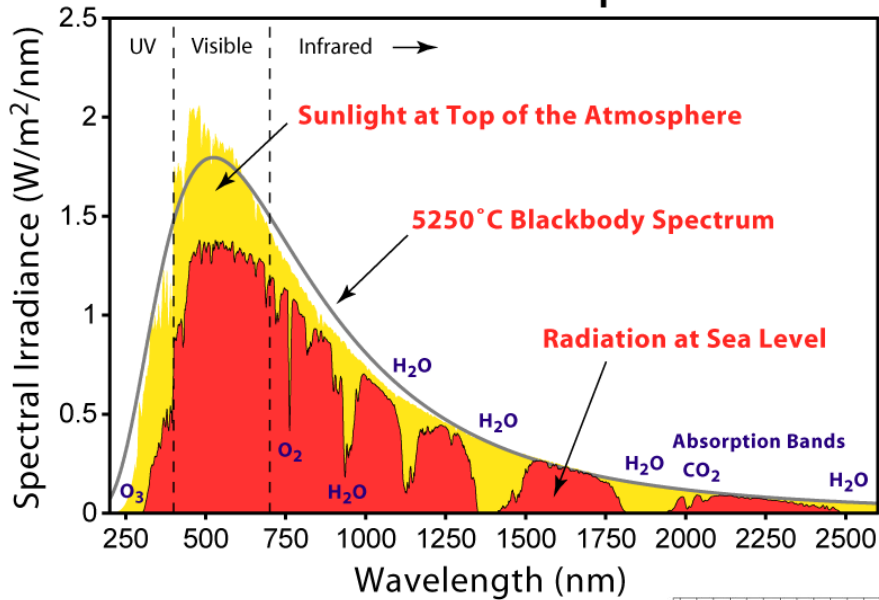


Introducción

- La espectroscopía permite distinguir componentes de las galaxias (p.e., estrellas, gas caliente, polvo, etc...), que emiten de distinta forma:
 - continuo.
 - líneas de emisión.
 - líneas de absorción.



Solar Radiation Spectrum



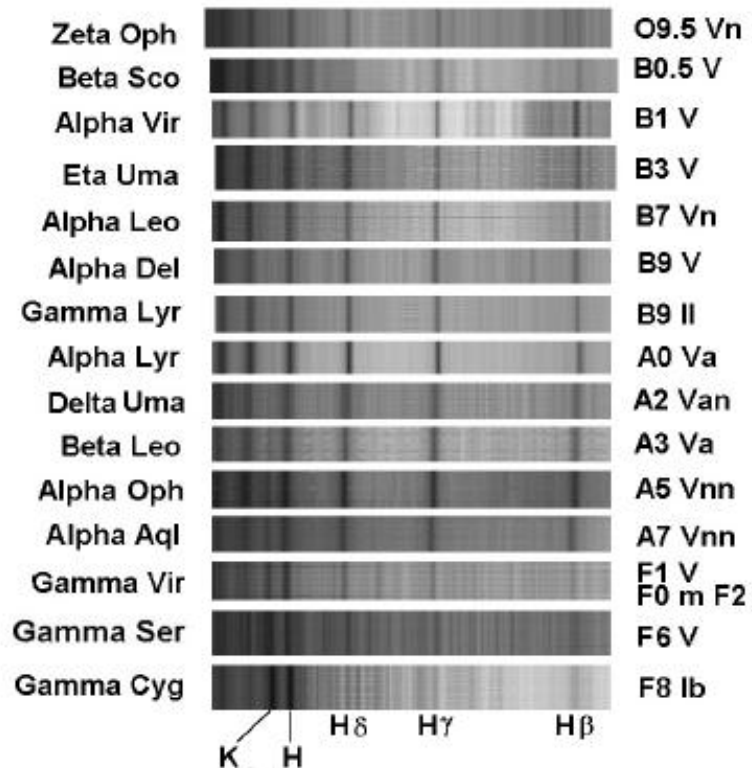
str
20
(material preparado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



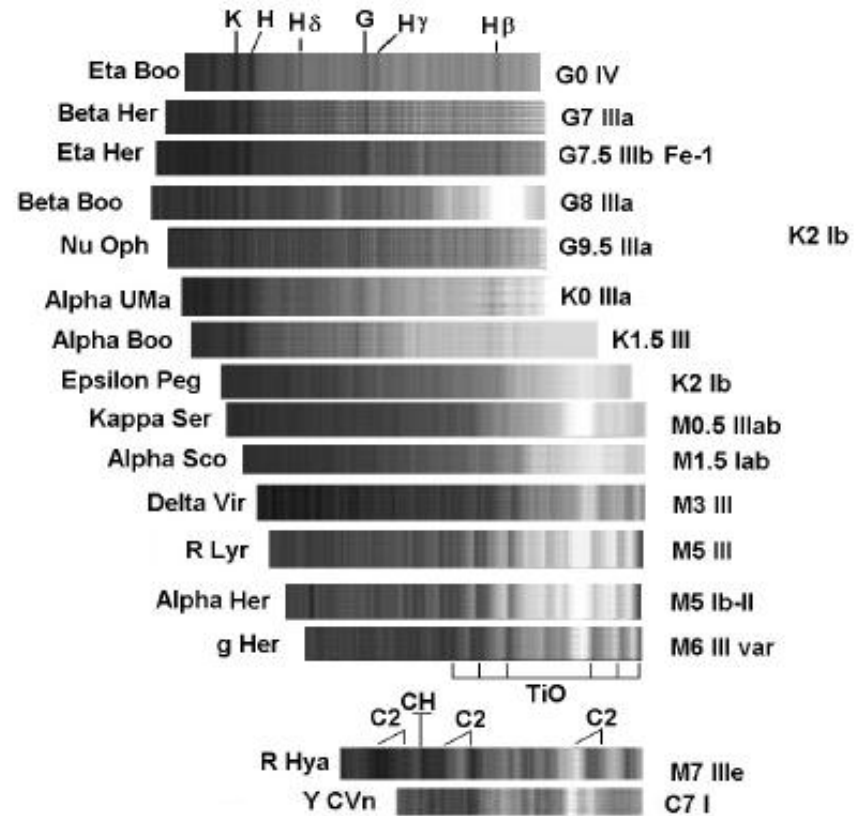
Introducción

- La información que se obtiene con la espectroscopía es mucho mayor que con la fotometría. Por ejemplo:
 - Permite clasificar directamente las estrellas.
 - La medida de sus líneas informa temperaturas y abundancias de elementos en la atmósfera, rotación, velocidad de desplazamiento respecto al observador etc.

Stars with spectral types earlier than the Sun

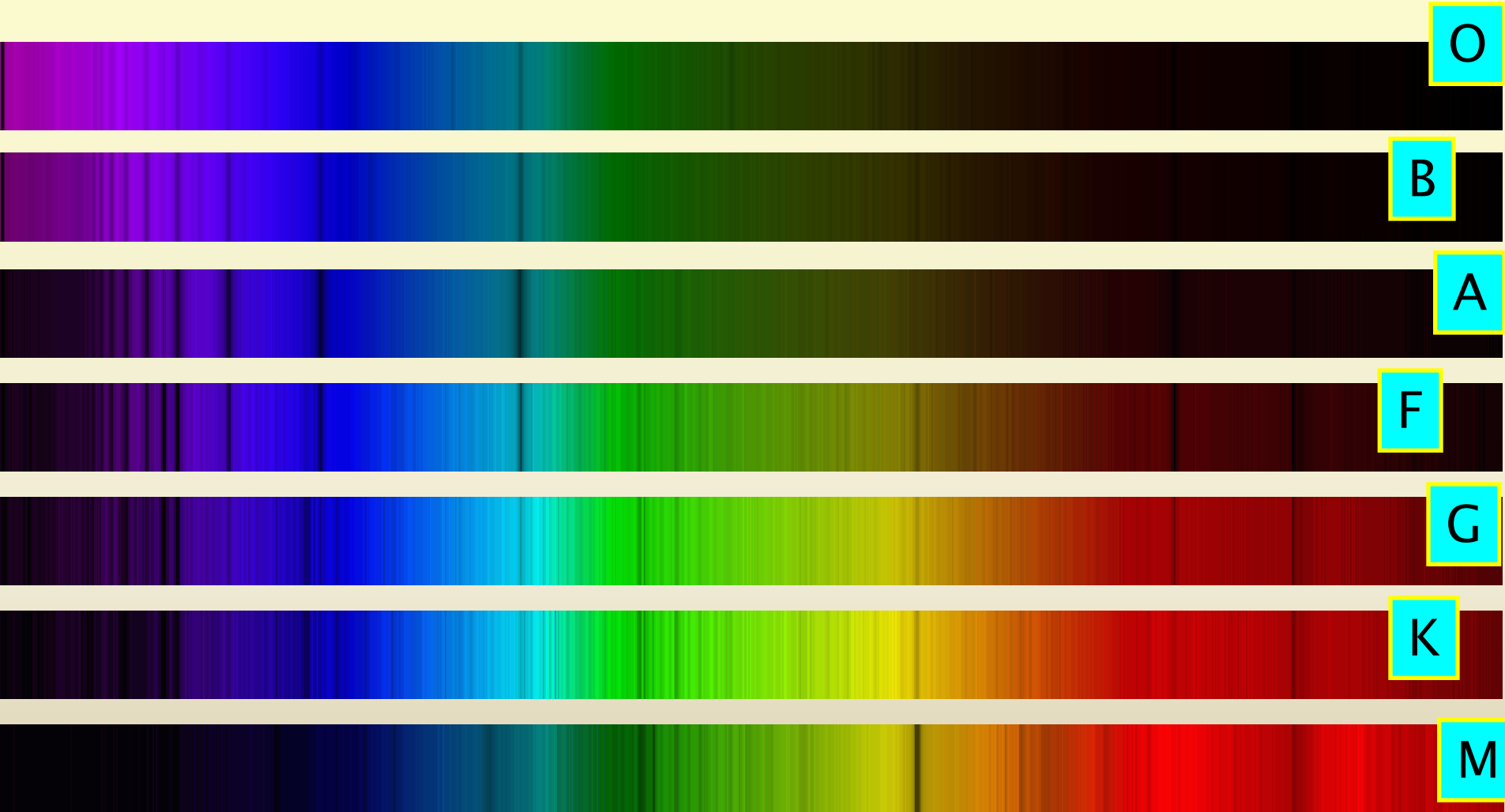


Stars with spectral type like the Sun and later.





Tipos espectrales



<http://www.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/TRABAJOS/COLOR/colorspectra.html>

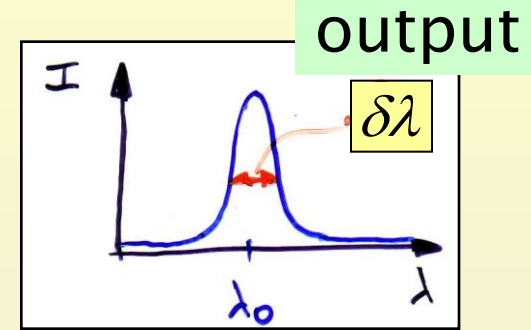
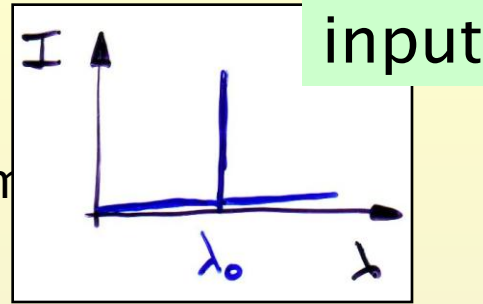


Resolución espectral

La **pureza espectral** o **perfil**

instrumental $\delta\lambda$ es una medida de la anchura (FWHM) de las líneas m producida por el instrumento.

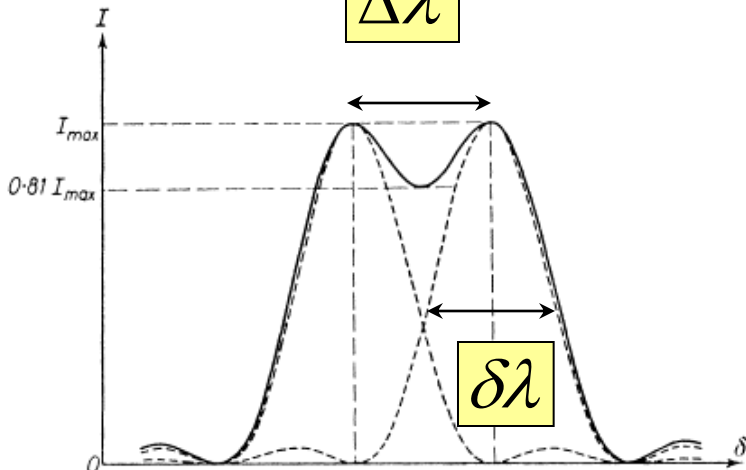
No confundir con la dispersión!!



Criterio de Rayleigh:

el espectrógrafo separa dos líneas cuando la diferencia de longitud de onda de los máximos sea mayor o igual a la pureza espectral.

$\Delta\lambda$



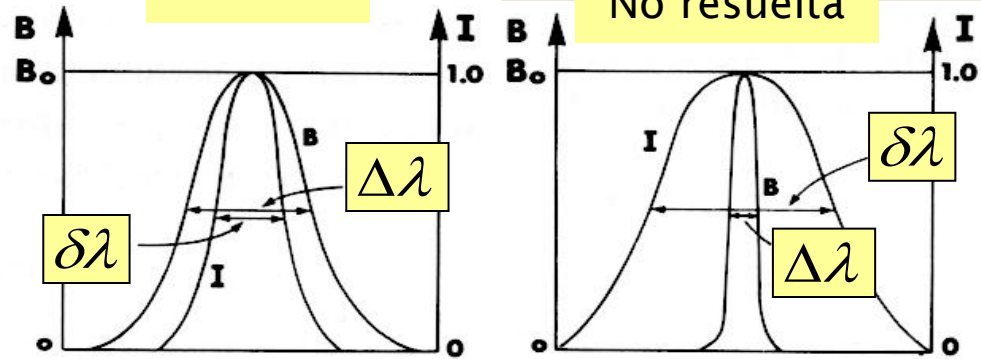
$\delta\lambda$ da idea de la capacidad para resolver líneas de longitud de onda cercana y de observar detalles en las líneas.

Línea resuelta si

$$\delta\lambda < \Delta\lambda$$

resuelta

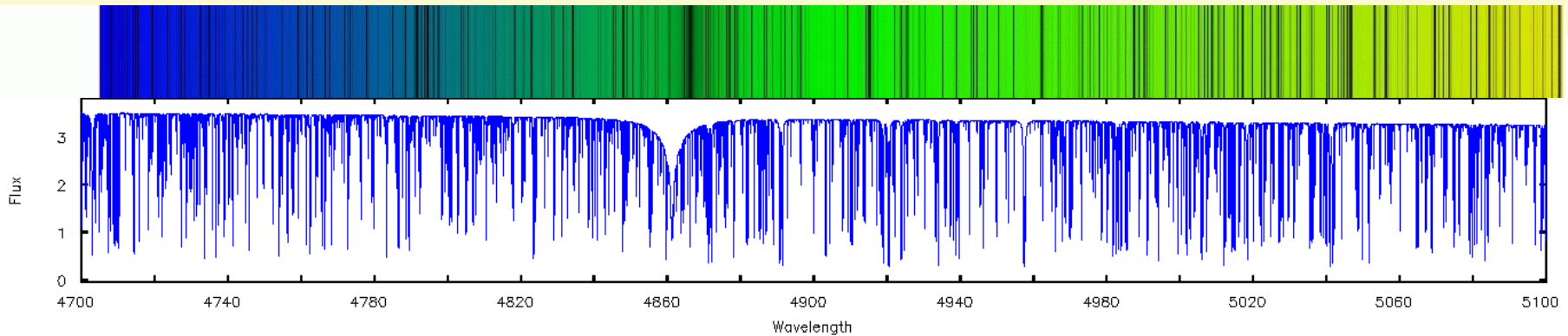
No resuelta





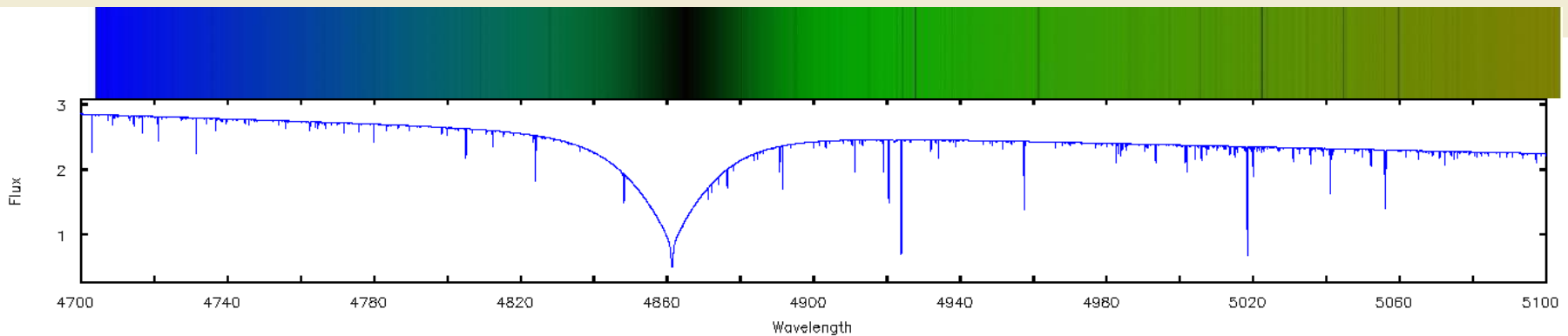
Tipos espectrales

Sol 5500K



http://star.arm.ac.uk/~csj/pus/spectra/tot_1.html

Vega 10000K



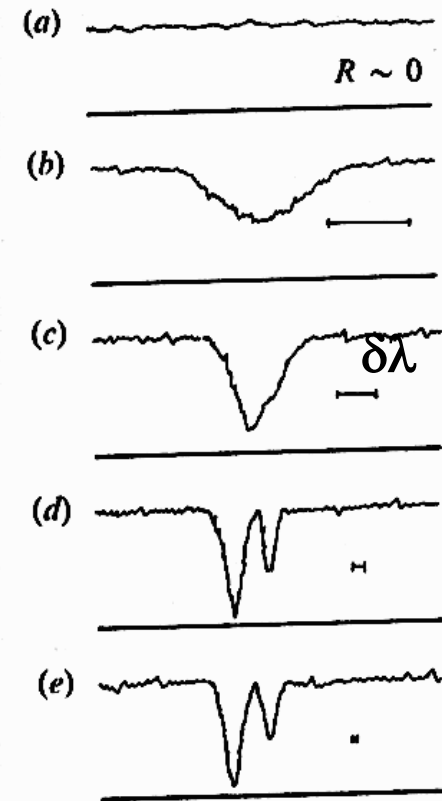


Resolución espectral

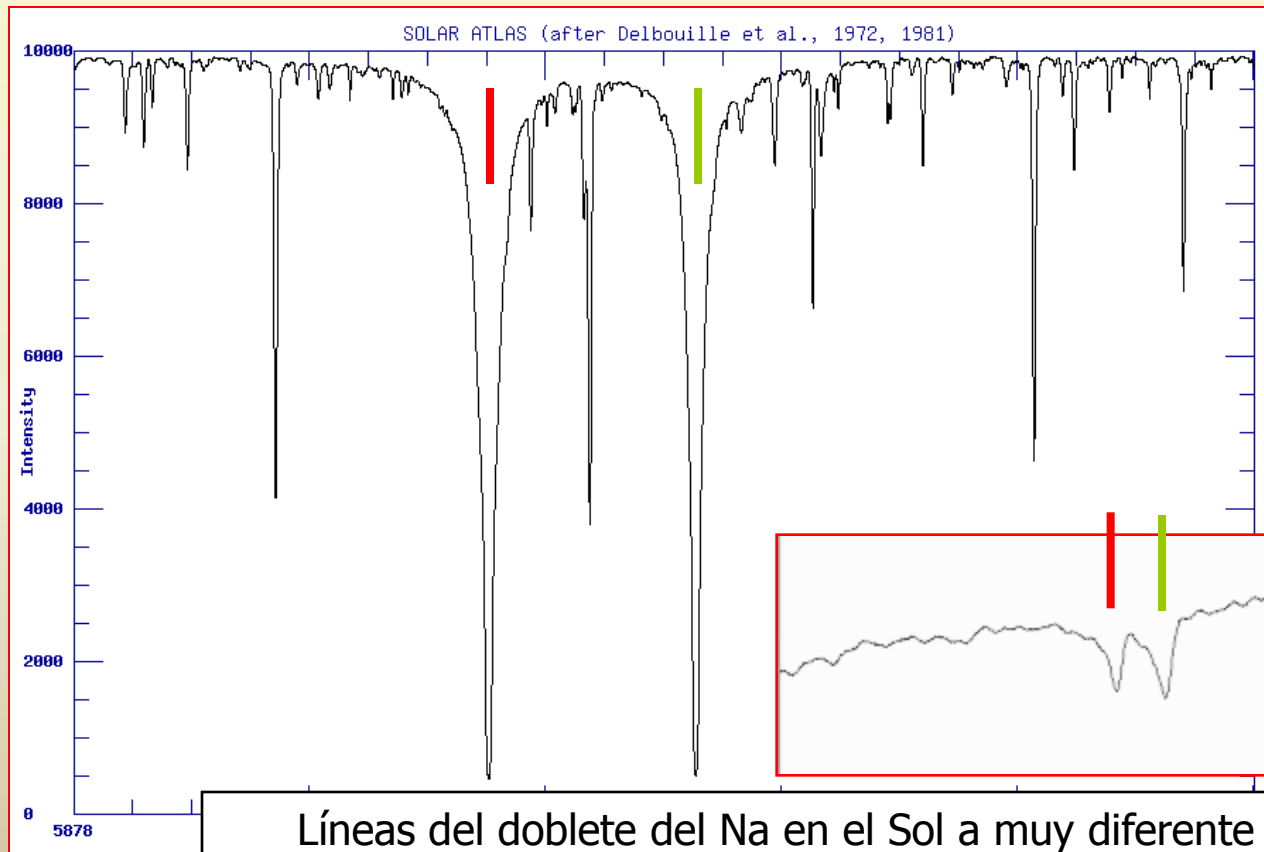
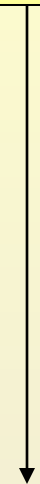
- La resolución R es el cociente entre la longitud de onda y la pureza espectral.

$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda}$$

R	Resolución
$\sim 10^3$	Baja
$\sim 10^4$	Intermedia
$> 2 \times 10^4$	Alta



R



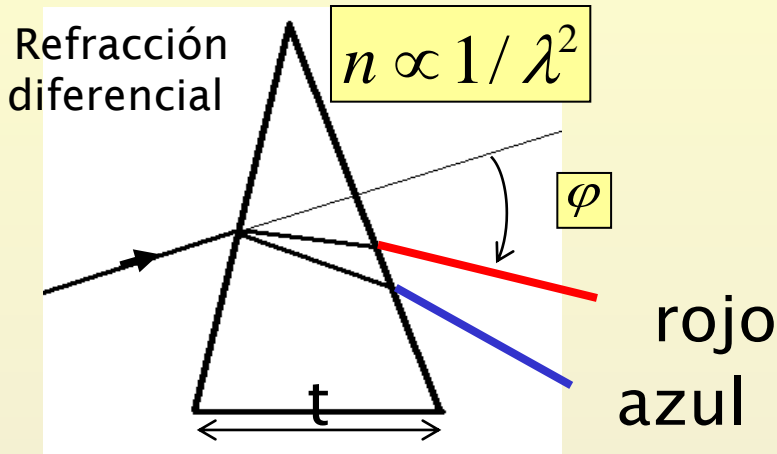
Longitud de onda λ

Líneas del doblete del Na en el Sol a muy diferente resolución



Espectrógrafos de prismas

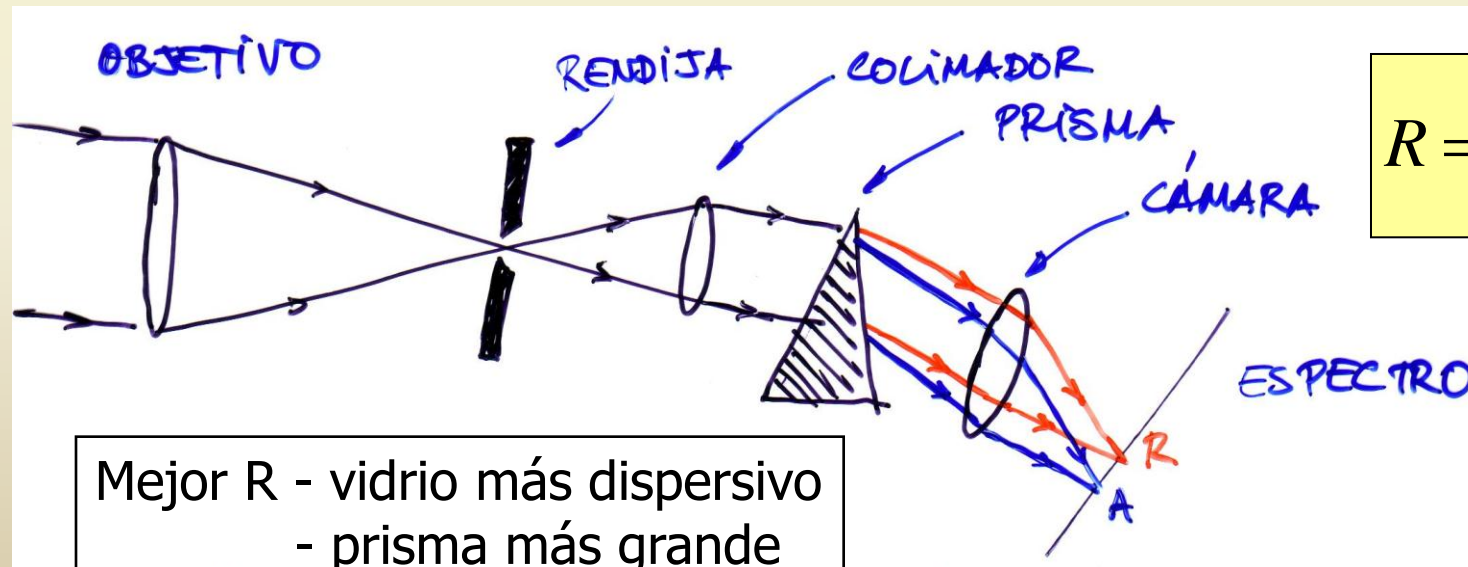
Se emplea un prisma como elemento dispersor. *Usado en el nIR.*



espesor del prisma

$$\frac{d\varphi}{d\lambda} = \frac{t}{a} \frac{dn}{d\lambda} \propto 1/\lambda^3$$

anchura del haz colimado



$$R = \frac{\lambda}{\delta\lambda} = t \frac{dn}{d\lambda}$$

- Mejor R - vidrio más dispersivo
- prisma más grande
- varios prismas

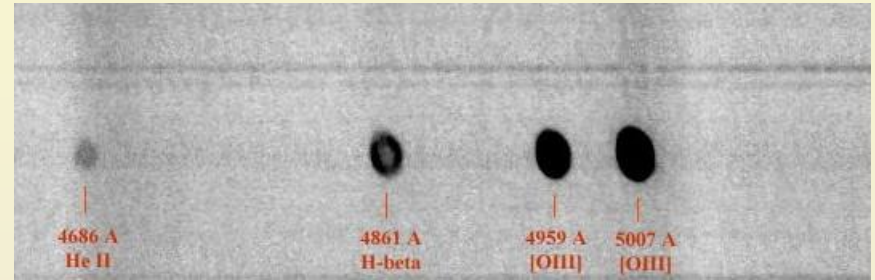


Espectroscopía sin rendija

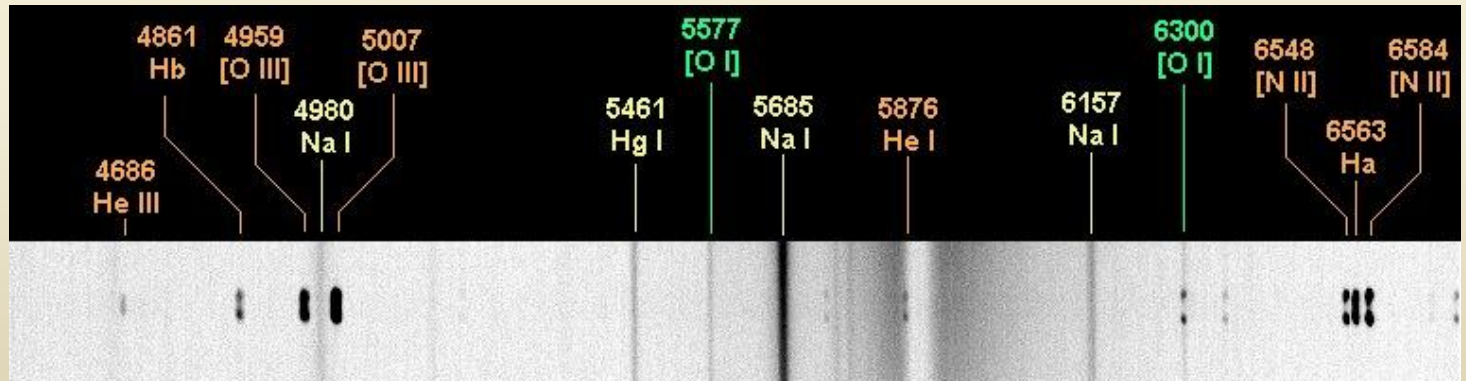
- Los espectrógrafos sin rendija están pensados para obtener simultáneamente los espectros de todos los objetos de un campo.
- La resolución espectral no es muy buena porque viene determinada por el tamaño de los objetos.

Espectro de M57 (nebulosa de la Lyra)
Obtenido sin y con rendija

Sin rendija



Con rendija



<http://www.astrosurf.com/buil/us/spe6/planet.htm>

© Christian Buil

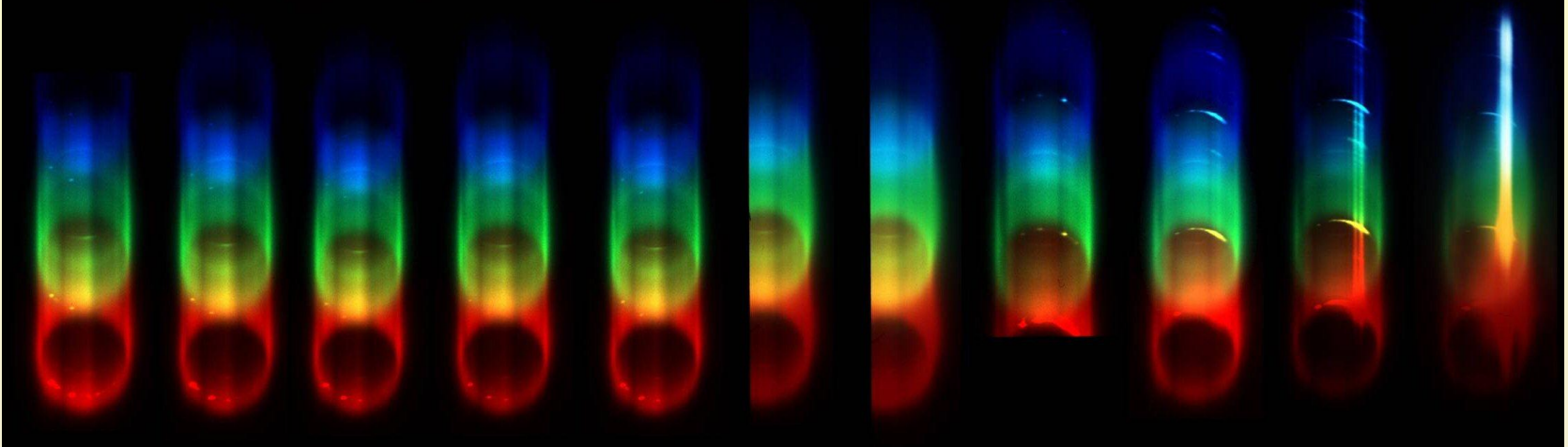
Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

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

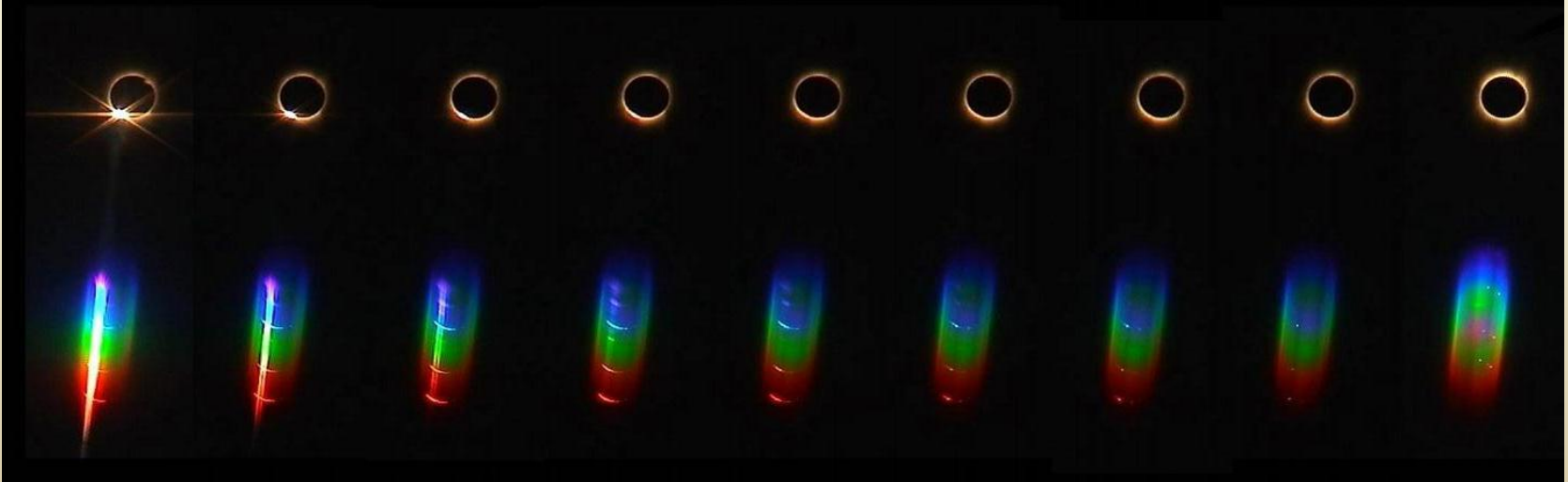


Espectroscopía sin rendija

© Jaime Zamorano – Universidad Complutense de Madrid – Expedición UCM Libia – Eclipse total de Sol del 29 marzo 2006



© Jaime Zamorano – Universidad Complutense de Madrid – Expedición UCM Libia – Eclipse total de Sol del 29 marzo 2006



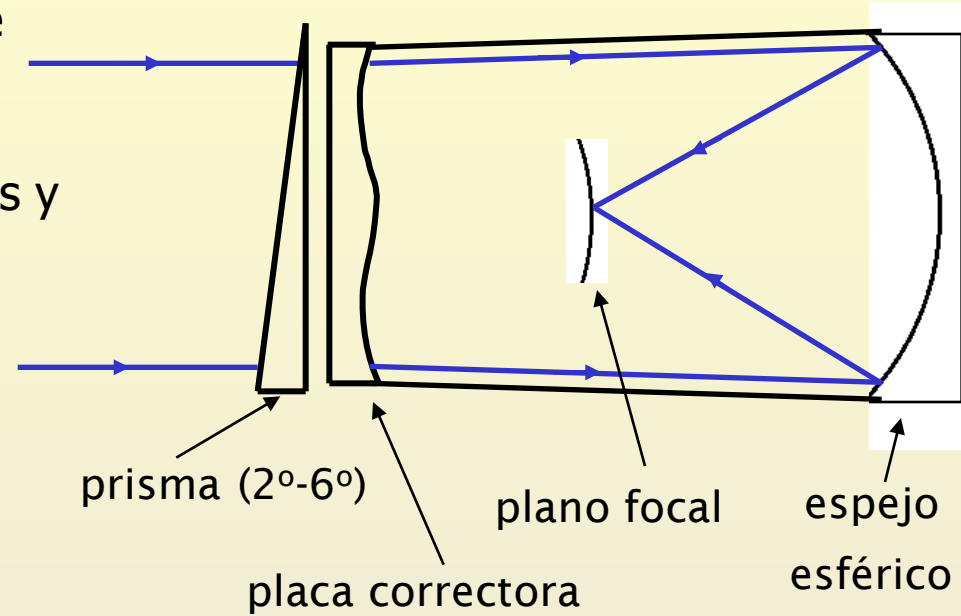
Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

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

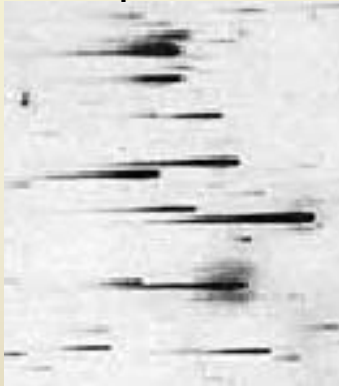


Prisma objetivo

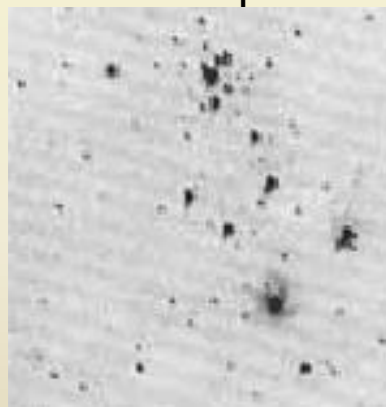
- Es un espectrógrafo de prisma sin rendija.
- Se suelen utilizar para exploraciones de gran campo buscando objetos con características espectrales especiales.
- Los telescopios Schmidt (muy luminosos y con un campo más amplio) son los aconsejados.



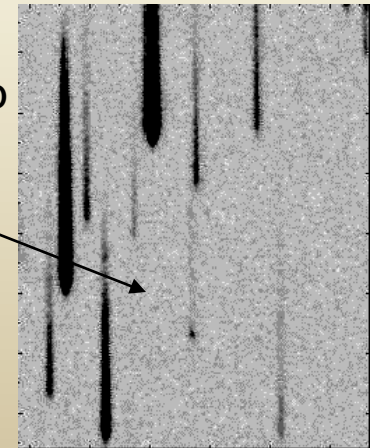
Con prisma



Sin prisma



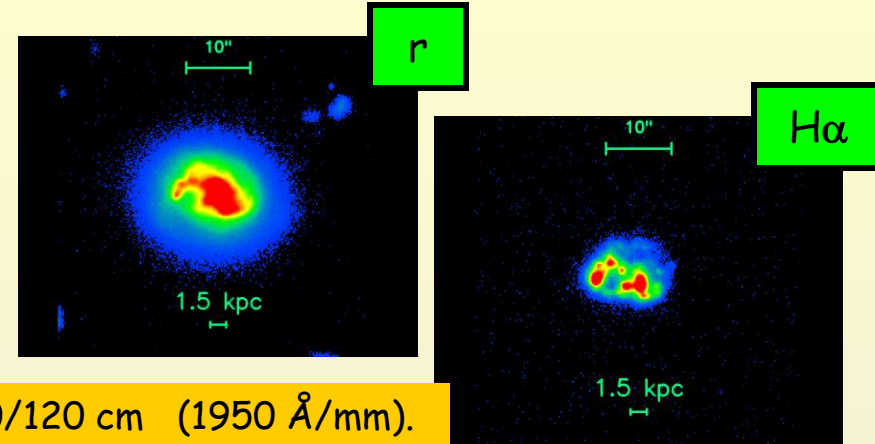
Espectro prisma-objetivo de un cuasar





Ejemplo prisma objetivo: Exploración UCM

Muestra completa de galaxias con formación estelar en el Universo Local seleccionadas por su emisión $H\alpha$

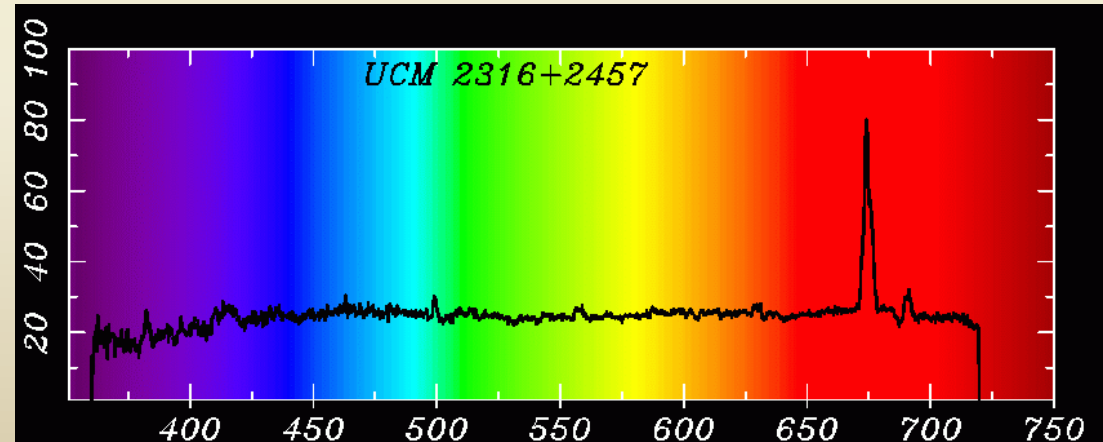
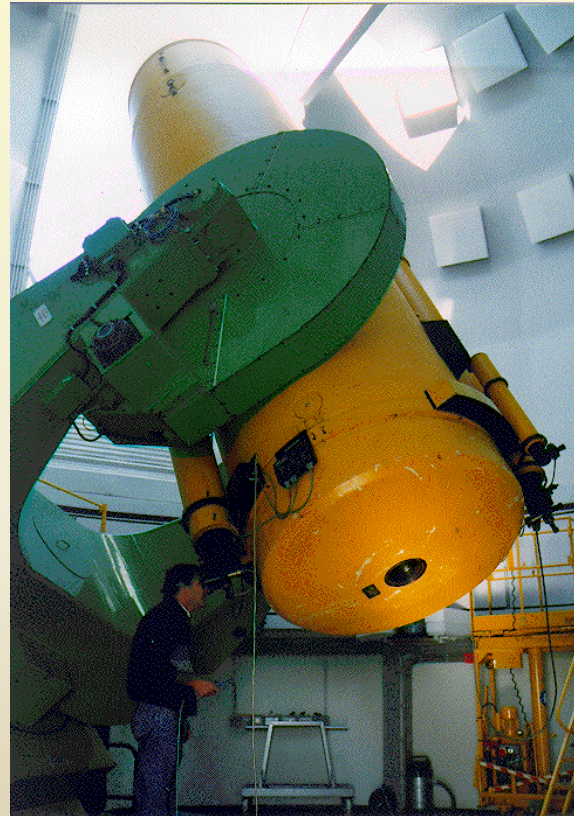


Calar Alto, Schmidt 80/120 cm ($1950 \text{ \AA}/\text{mm}$).

IIIa-F + Filtro RG630 ($6400\text{-}6850 \text{ \AA}$).

$471.4 \square$ ($0.4 \text{ galaxias}/\square$) 191 galaxias

$z < 0.045$ $\text{EW} (H\alpha + [\text{NII}]) > 20 \text{ \AA}$.



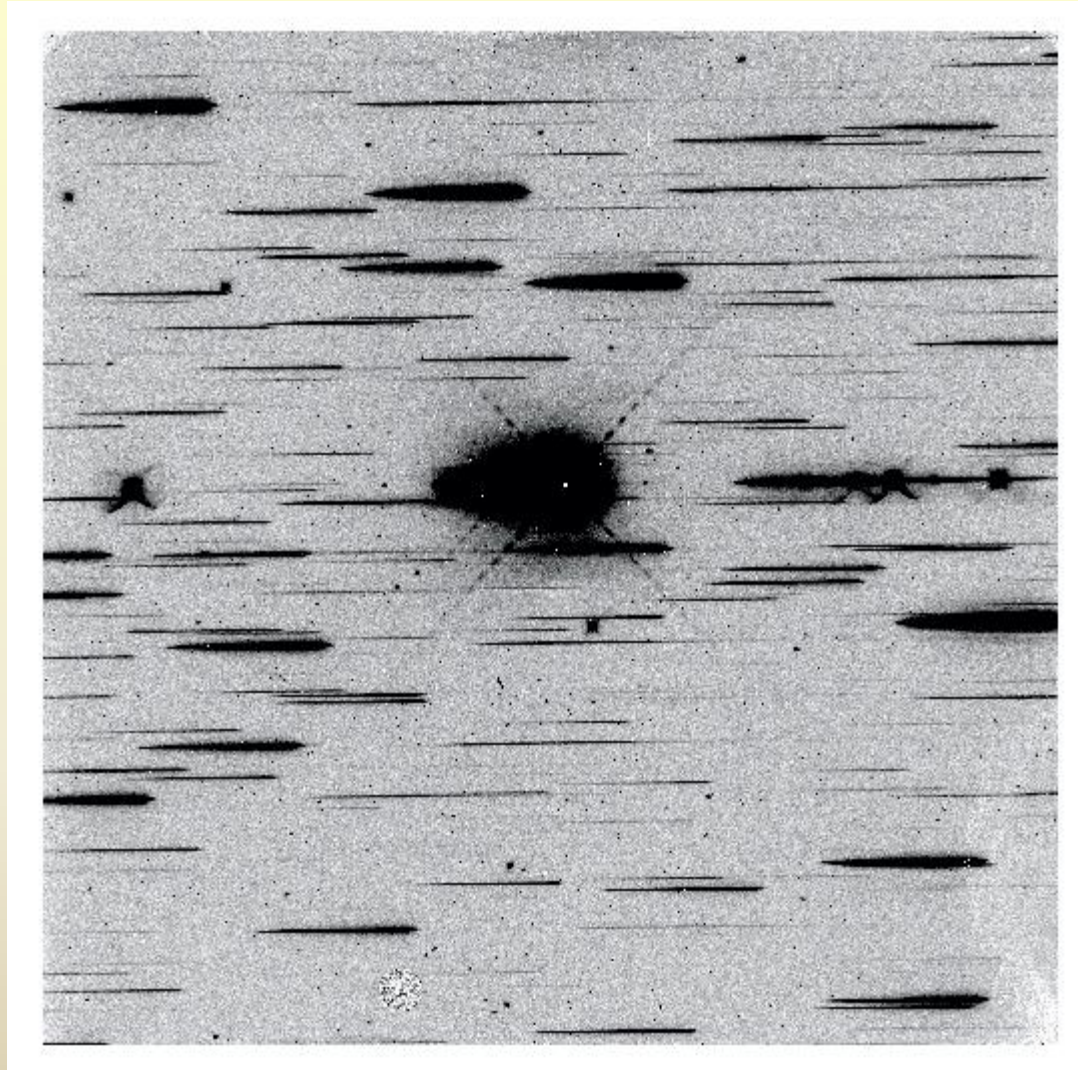
http://guaix.fis.ucm.es/ucm_survey/

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

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



Ejemplo espectroscopía sin rendija: HST



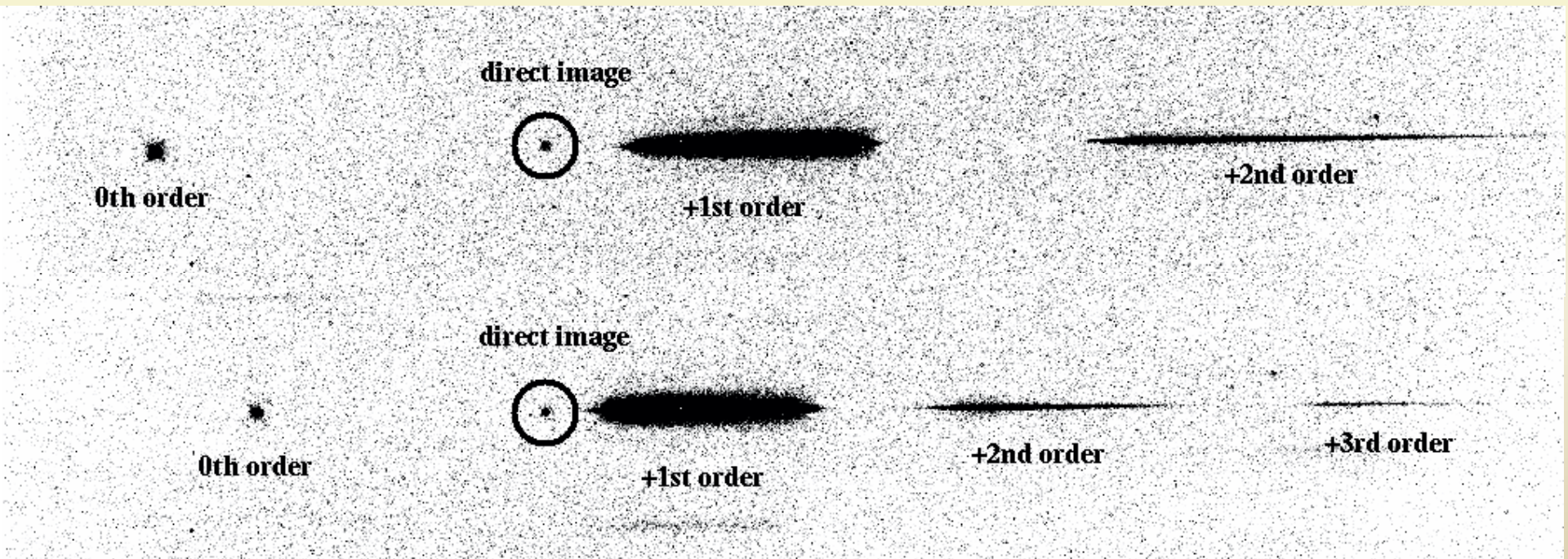
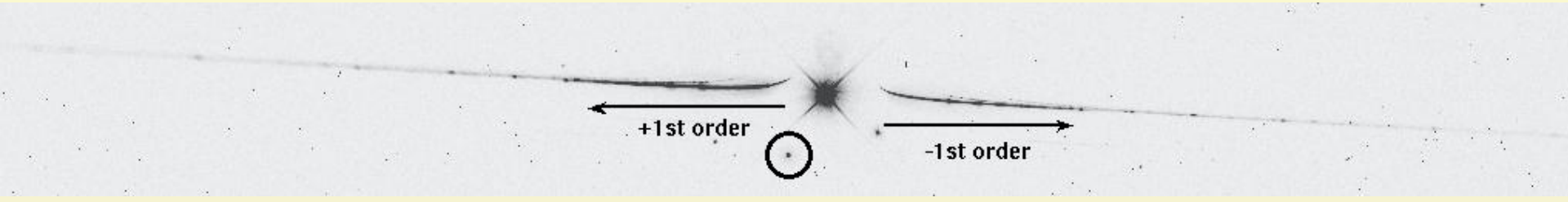
Kuntschner et al. (2010)

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

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



Ejemplo espectroscopía sin rendija: HST



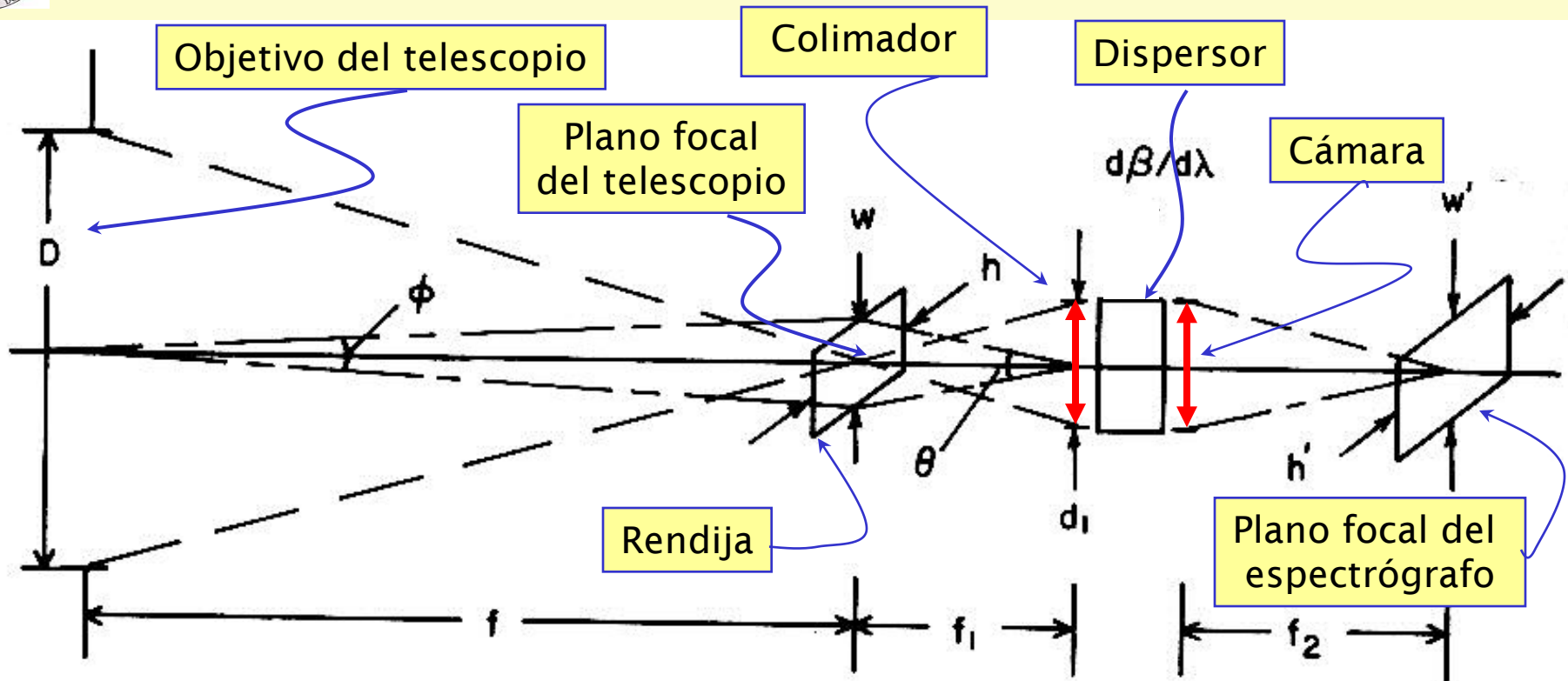
Kuntschner et al. (2010)

Instrumentación Astronómica
Curso 2011/2012

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



Espectrómetros



Esquema general de un espectrómetro adaptado a un telescopio

Rendija proyectada en el cielo

$$\phi = w/f$$

$$\phi' = h/f$$

Rendija proyectada en el colimador

$$\theta = w/f_1$$

$$\theta' = h/f_1$$

Imagen monocromática de la rendija

$$w' = w f_2/f_1$$

$$h' = h f_2/f_1$$

Factor de amplificación

$$f_2/f_1$$



Espectrómetros

La anchura de la imagen monocromática de la rendija depende del factor de ampliación (cociente entre focales de la cámara y el colimador)

$$w' = w f_2 / f_1$$

Esta anchura en unidades de longitud de onda es la pureza espectral o perfil instrumental.

$$\delta\lambda = w' \frac{d\lambda}{dx} = \frac{w'}{f_2} \frac{d\lambda}{d\beta}$$

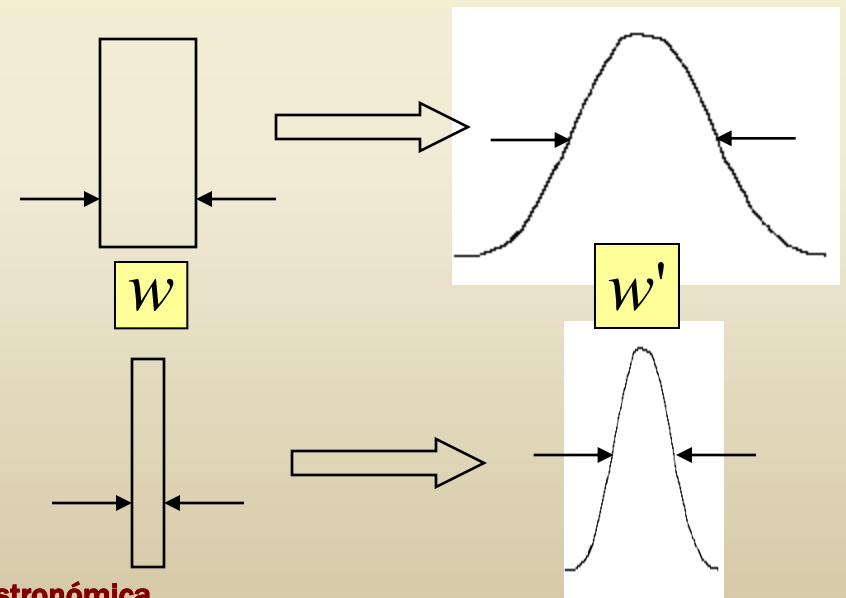
$$\delta\lambda = \frac{w}{f_1} \frac{d\lambda}{d\beta} = \frac{f \phi}{f_1} \frac{d\lambda}{d\beta} = \frac{D \phi}{d_1} \frac{d\lambda}{d\beta}$$

Número F de primario y colimador deben ser parecidos!!

$$\delta\lambda = \frac{D \phi}{d_1} \frac{1}{d\beta/d\lambda}$$

La pureza espectral $\delta\lambda$ o perfil instrumental mejora si:

- Disminuye la anchura de la rendija.
- El haz colimado es mayor (una red más grande).
- La dispersión angular es mayor.

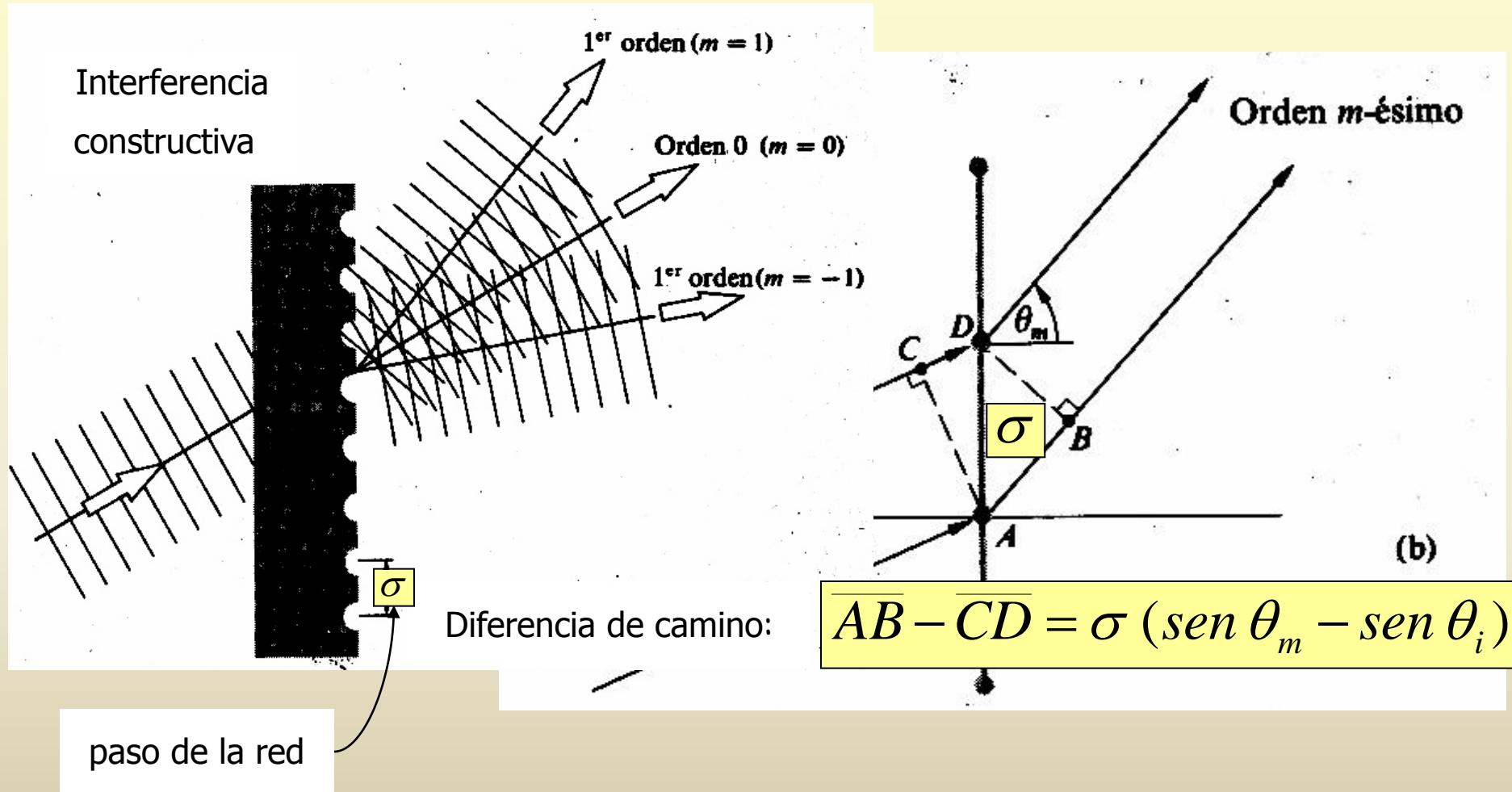




Redes de difracción

Los elementos dispersores de los espectrógrafos suelen ser redes de difracción.

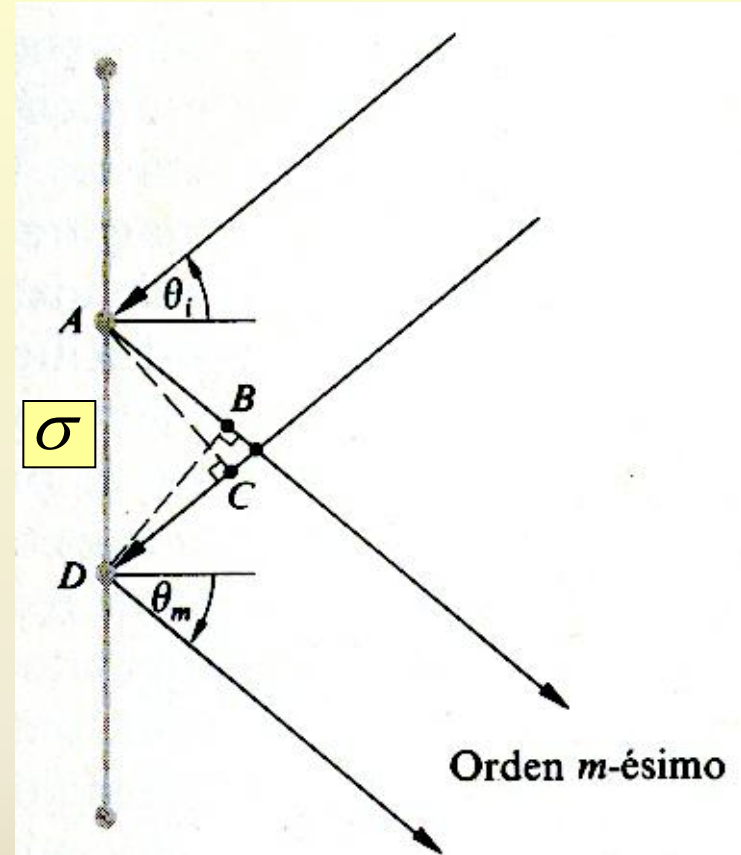
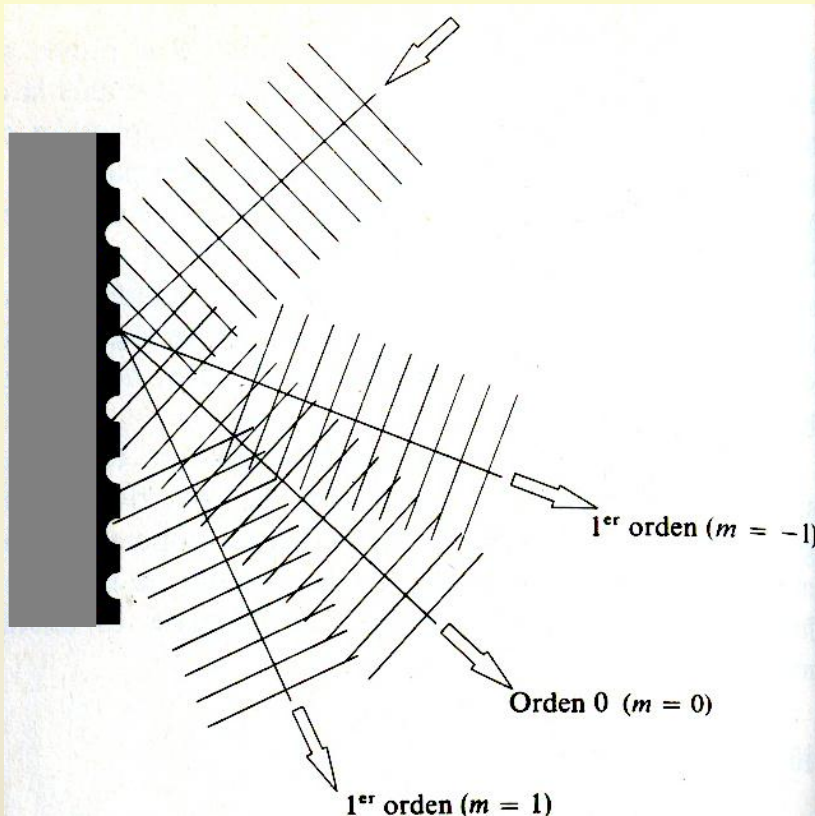
Redes de transmisión





Redes de difracción

Redes de reflexión



Diferencia de camino:

$$AB - CD = \sigma (\sin \theta_m - \sin \theta_i)$$



Redes de difracción

Ecuación de la red

$$m \lambda = \sigma (\text{sen } \alpha + \text{sen } \beta)$$

Las redes se tallan de forma especial para que el máximo de luz no esté en el orden cero.

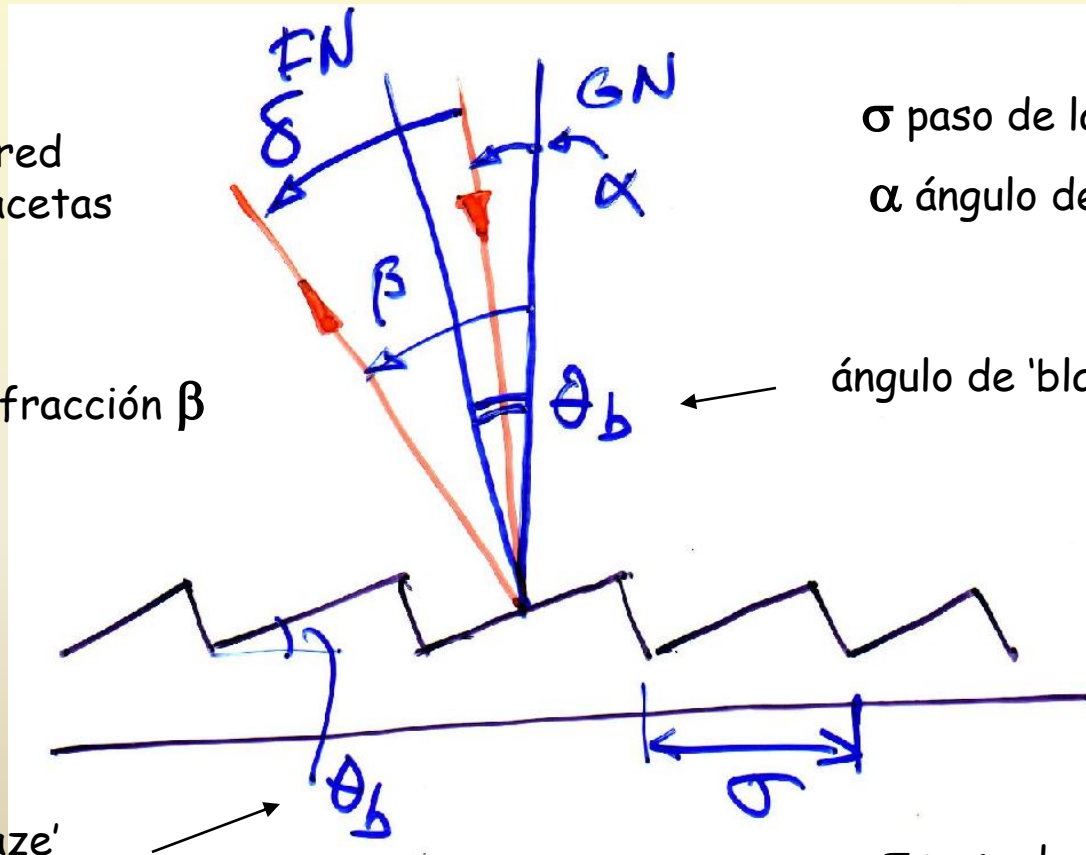
δ desviación

GN: normal a la red
FN: normal a las facetas

σ paso de la red
 α ángulo de incidencia

ángulo de difracción β

ángulo de 'blaze'



ángulo de 'blaze'

σ paso de la red



Eficiencia de las redes (1)

En el orden cero la dispersión es nula.

Interesa que la luz vaya en preferencia a otros órdenes.

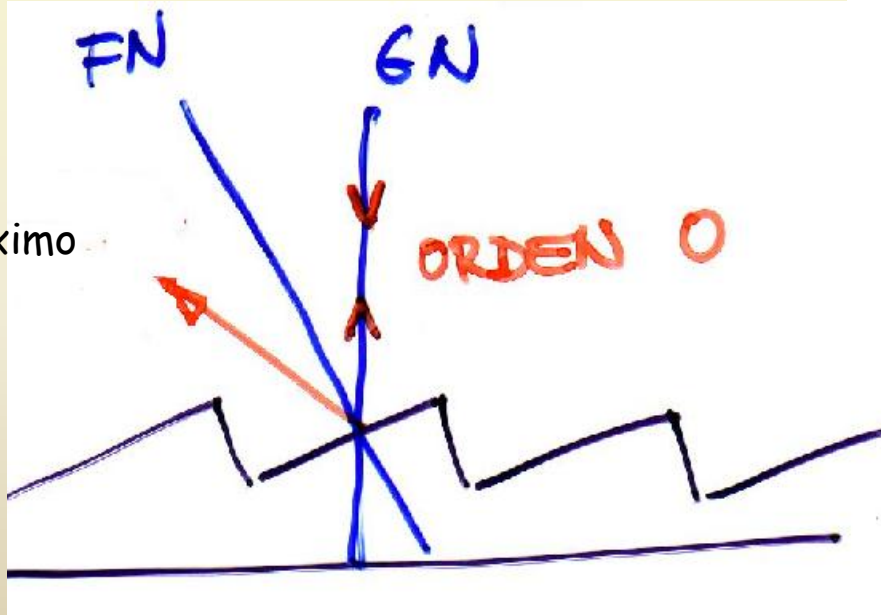
La dirección en la que se difracta el máximo de radiación corresponde a la reflexión especular en las facetas.

$$m \lambda = \sigma \operatorname{sen} 2\theta_b$$

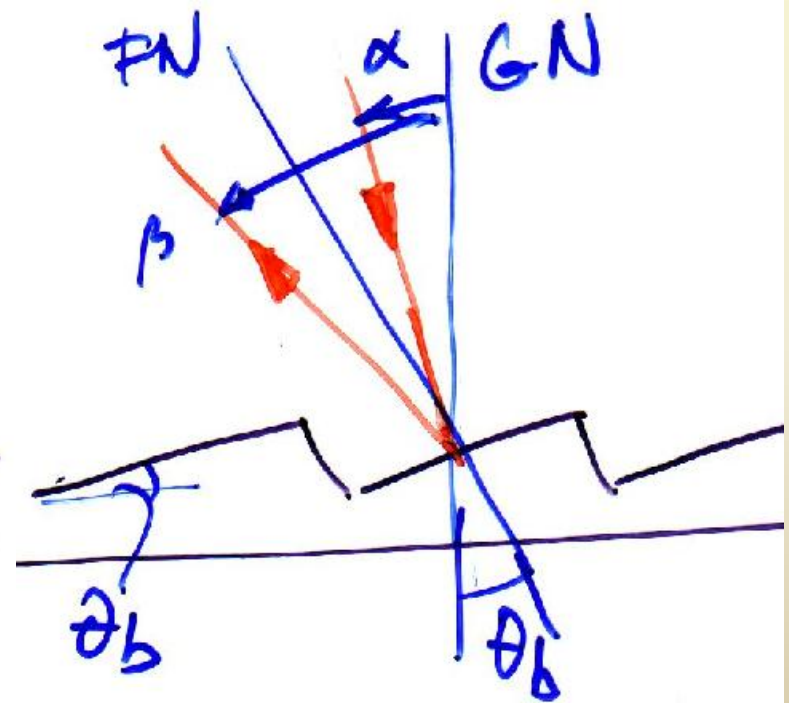


m máxima luz

Máximo



incidencia normal $\alpha=0$



incidencia $\alpha \neq 0$



Eficiencia de las redes (2)

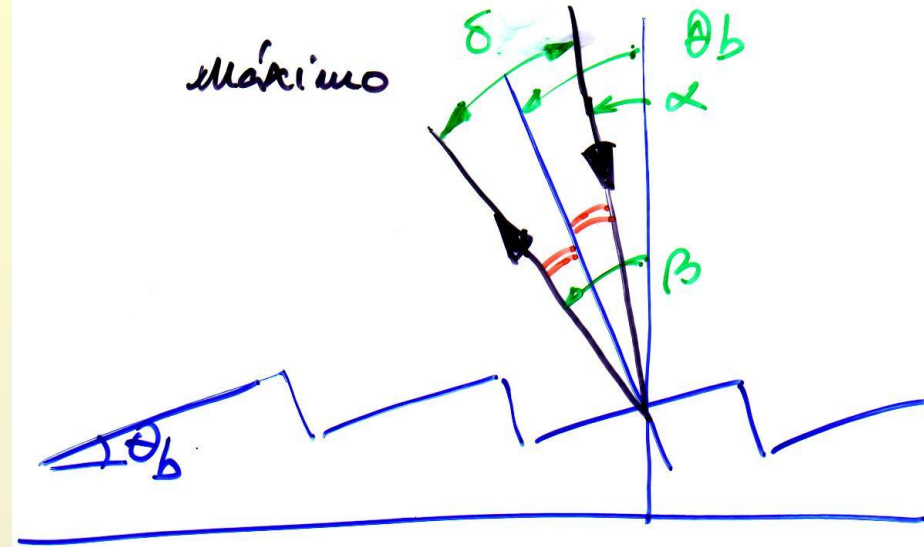
El máximo de eficiencia ocurre justo a la reflexión especular en las facetas.

$$\beta - \theta_b = \theta_b - \alpha \iff \beta + \alpha = 2\theta_b$$

$$\left. \begin{aligned} \beta &= \theta_b + \delta/2 \\ \alpha &= \theta_b - \delta/2 \end{aligned} \right\} \implies \beta - \alpha = \delta$$

Longitud de onda de blaze
(Ido del máximo para $m=1$):

$$\lambda_b = 2\sigma \operatorname{sen} \theta_b \cos(\delta/2)$$



máximo en otros órdenes

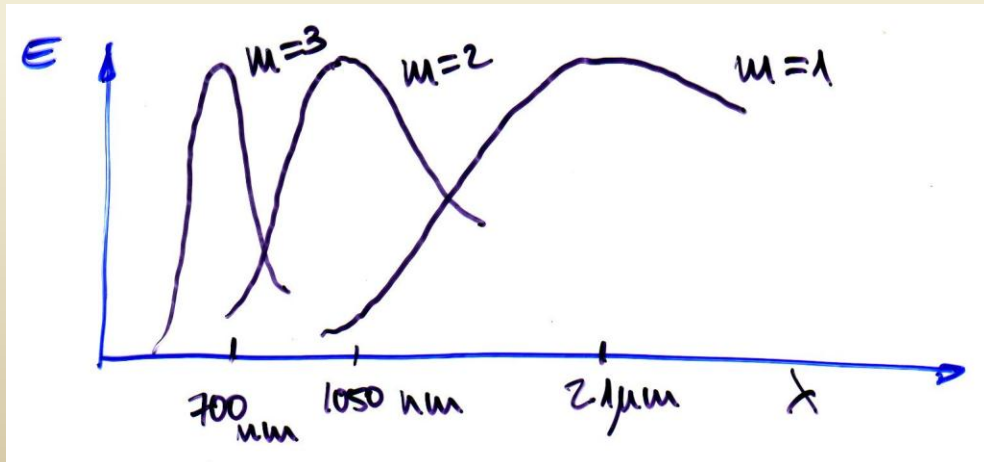
$$\lambda_m = \lambda_b / m$$

En incidencia normal

$$\alpha = 0 \quad \beta = 2\theta_b$$

$$\lambda_b = 2\sigma \operatorname{sen} \theta_b \cos \theta_b$$

$$\lambda_b = \sigma \operatorname{sen} 2\theta_b$$





Dispersión

dispersión angular

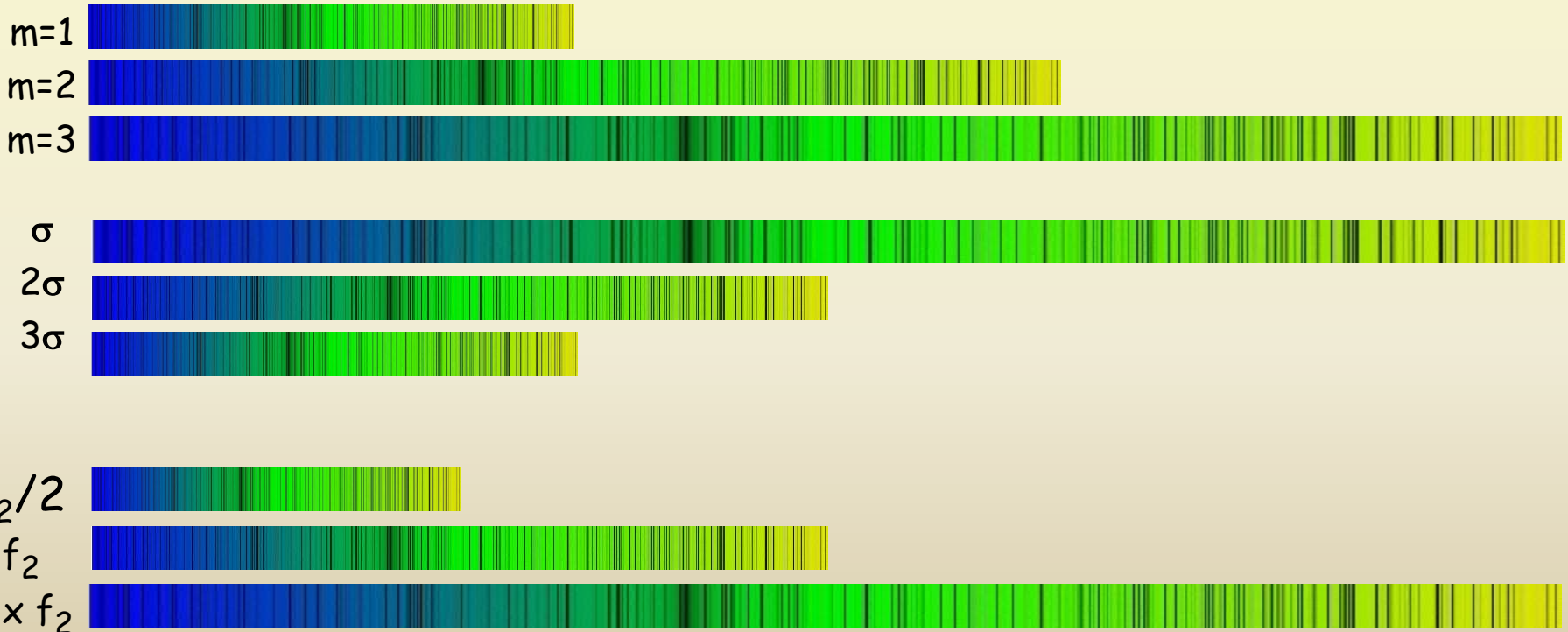
dispersión lineal

Dispersión lineal recíproca [$\text{\AA}/\text{mm}$]

$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{\sigma \cos \beta}$$

$$\frac{dx}{d\lambda} = f_2 \frac{d\beta}{d\lambda}$$

$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{\sigma \cos \beta}{m f_2}$$



Recordatorio:

σ paso de la red; m orden; f_2 distancia focal de la cámara



Dispersión (ejemplos)

En un espectrógrafo una red de 600 trazos/mm produce una dispersión de 48 Å/mm en el segundo orden. Determinéase la dispersión en el primer y tercer órdenes para esa red y otras de 300 y 1200 tr/mm. Idem si se cambia a una cámara del doble de distancia focal.

f_2	300 tr/mm	600 tr/mm	1200 tr/mm
m=1	192 Å/mm	96 Å/mm	48 Å/mm
m=2	96 Å/mm	48 Å/mm	24 Å/mm
m=3	64 Å/mm	32 Å/mm	16 Å/mm

$2 \times f_2$	300 tr/mm	600 tr/mm	1200 tr/mm
m=1	96 Å/mm	48 Å/mm	24 Å/mm
m=2	48 Å/mm	24 Å/mm	12 Å/mm
m=3	32 Å/mm	16 Å/mm	8 Å/mm

La dispersión es directamente proporcional al orden:
Dispersión lineal recíproca en m=2 es de 48 Å/mm → 96 Å/mm en m=1

La dispersión es inversamente proporcional al paso de la red:

$$\sigma_2 = 1/600 = 1.65 \mu m$$

$$\sigma_1 = 2 \sigma_2$$

$$\sigma_3 = \sigma_2 / 2$$

La dispersión es directamente proporcional a la focal de la cámara:
Dispersión lineal recíproca se hace la mitad al doblar f_2



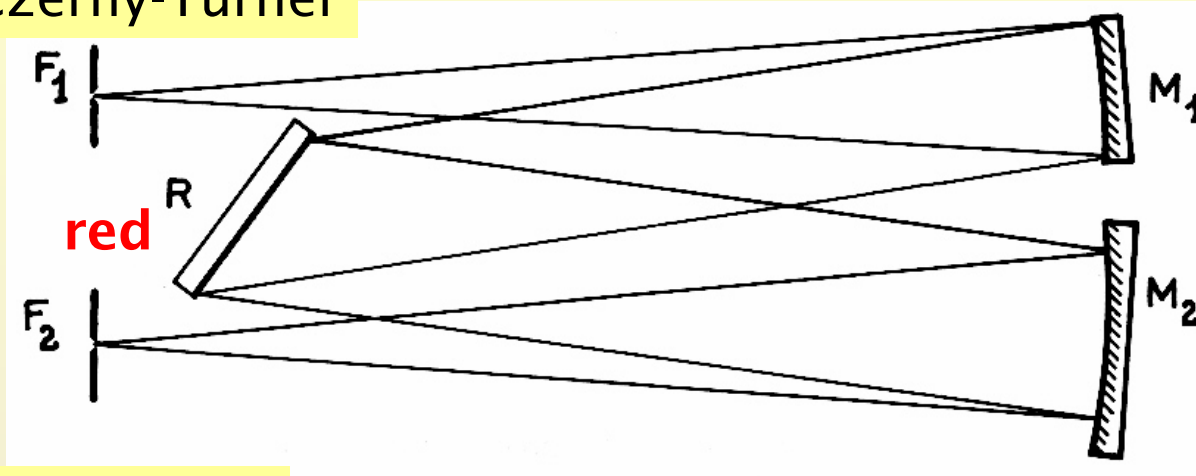
Espectrógrafos de red

Usualmente las redes de difracción por reflexión son planas.

Czerny-Turner

rendija

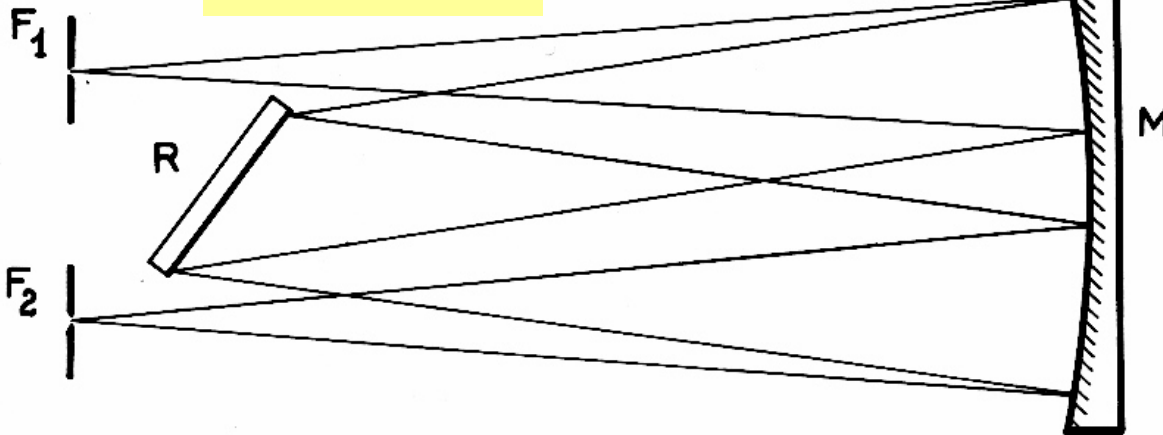
plano focal
cámara



colimador

cámara

Ebert-Fastie



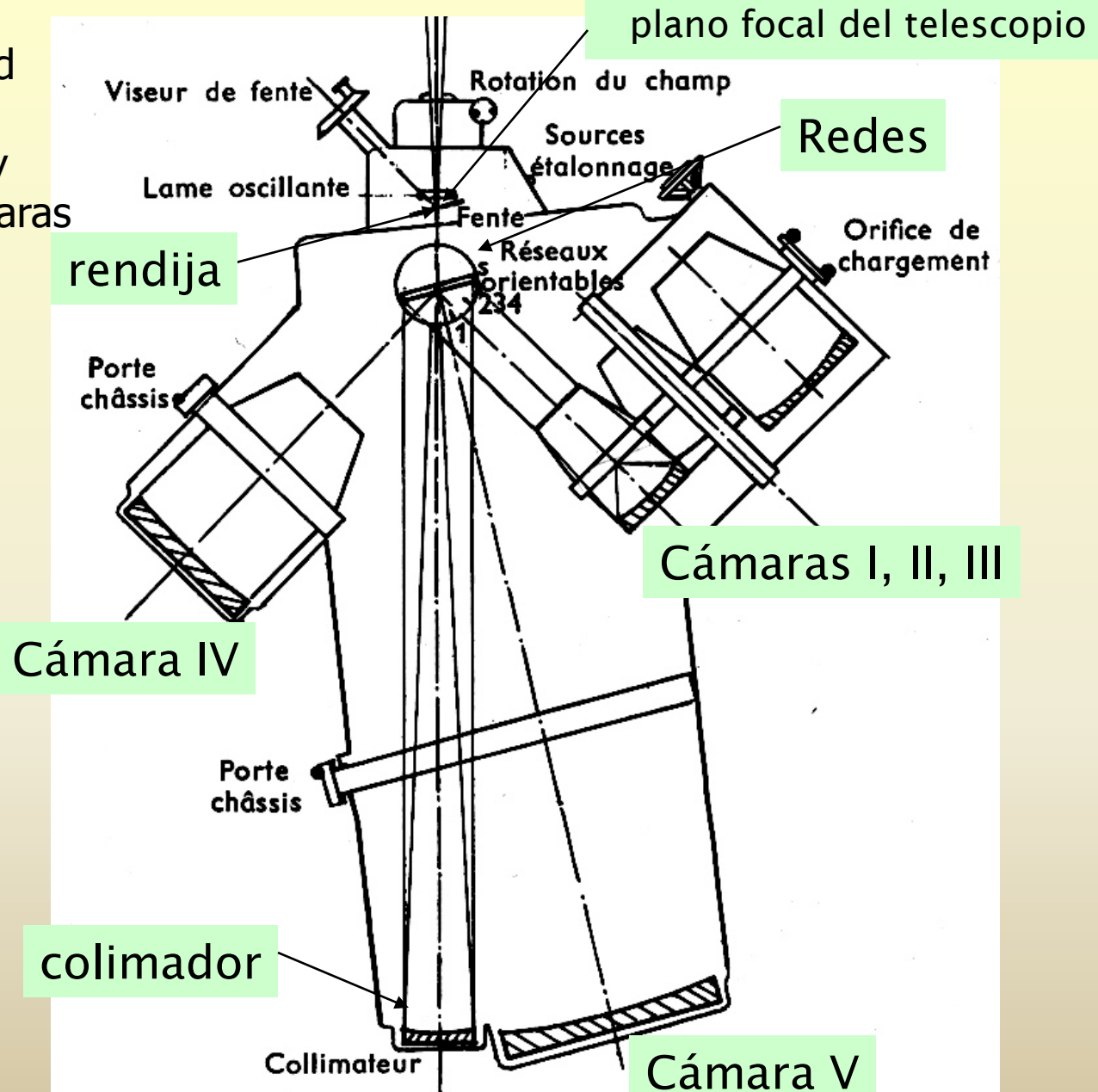
Colimador y cámara
son el mismo espejo

Las redes están montadas sobre un mecanismo de giro para seleccionar la longitud de onda central



Espectrógrafos de red

Los espectrógrafos de red plana suelen tener varias redes de diferente paso y pueden tener varias cámaras para lograr diferentes dispersiones.



Distancias focales de las cámaras.

I	16,5 cm
II } III }	34 cm
IV	67 cm
V	200 cm

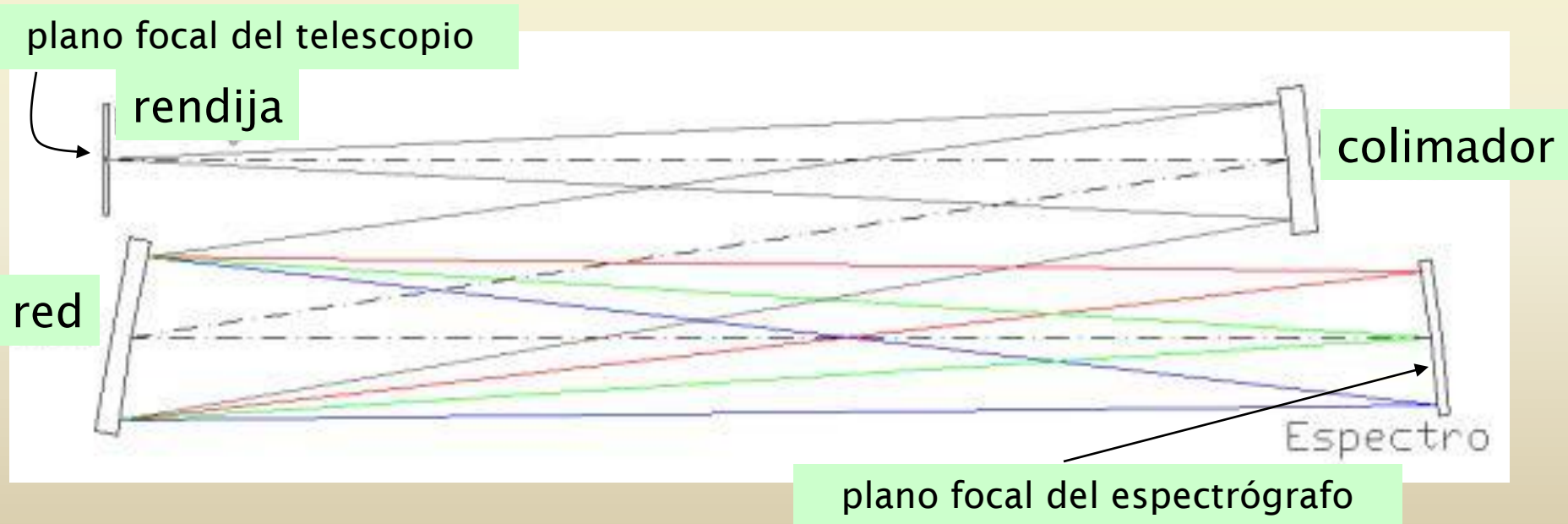


Espectrógrafos de red

Usualmente las redes de difracción por reflexión son planas. Con redes cóncavas se evita el sistema óptico de cámara ya que la red enfoca el espectro.

Montaje de Wadsworth, que corresponde al espectrógrafo solar FOCUSS empleado en las prácticas de obtención del espectro del Sol.

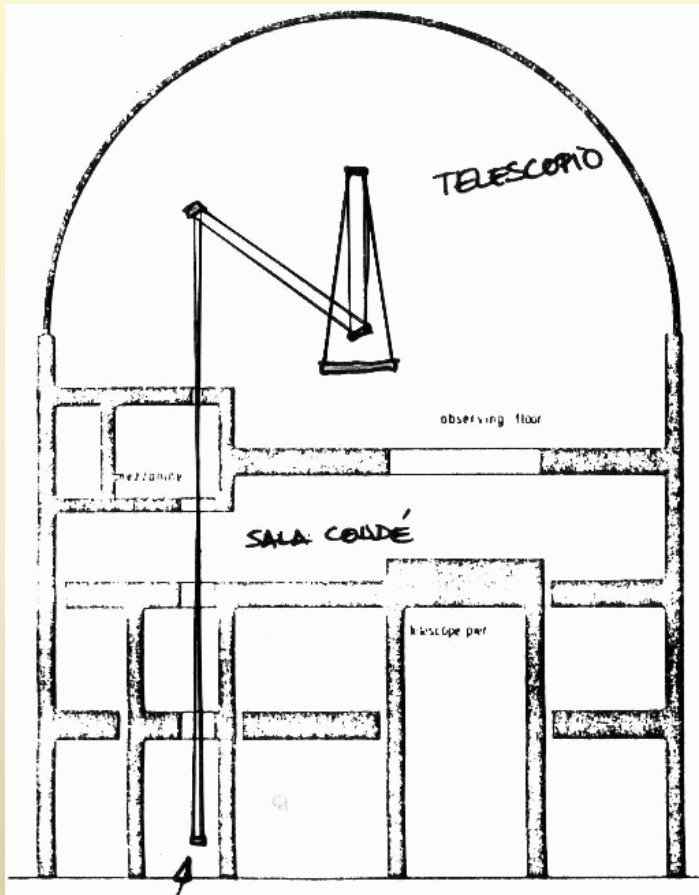
<http://www.ucm.es/info/Astrof/users/jaz/FOCUSS/focuss.html>





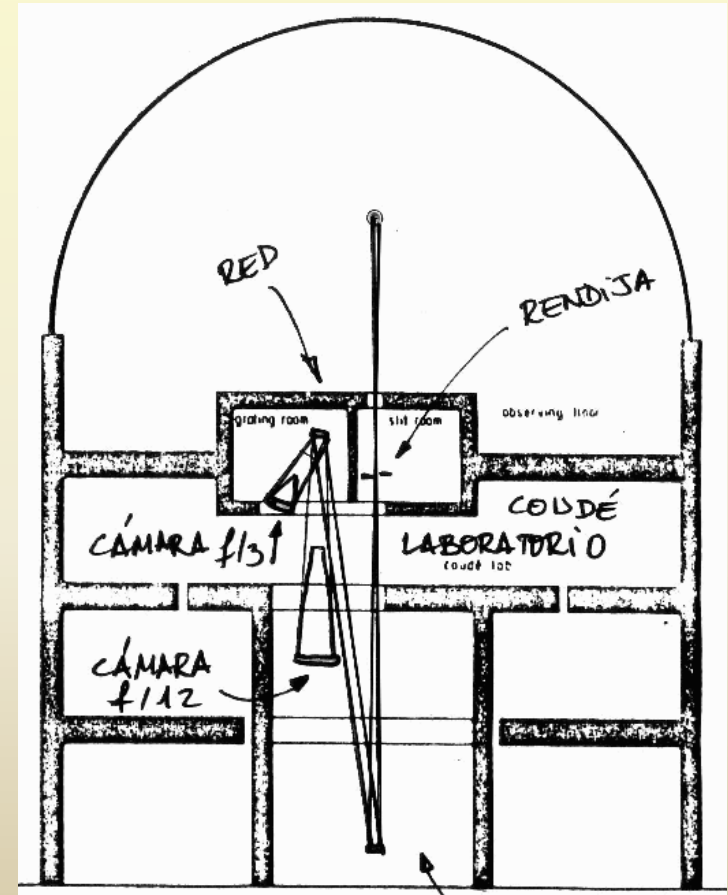
Espectrógrafo coudé

Son espectrógrafos de alta dispersión situados en el foco coudé de los telescopios. Los espectrógrafos pueden ser muy grandes ya que este foco es fijo para cualquier posición a la que apunte el telescopio y éste no tiene que cargar con el espectrógrafo.



colimador

Espectrógrafo coudé del 2.2m de Calar Alto.

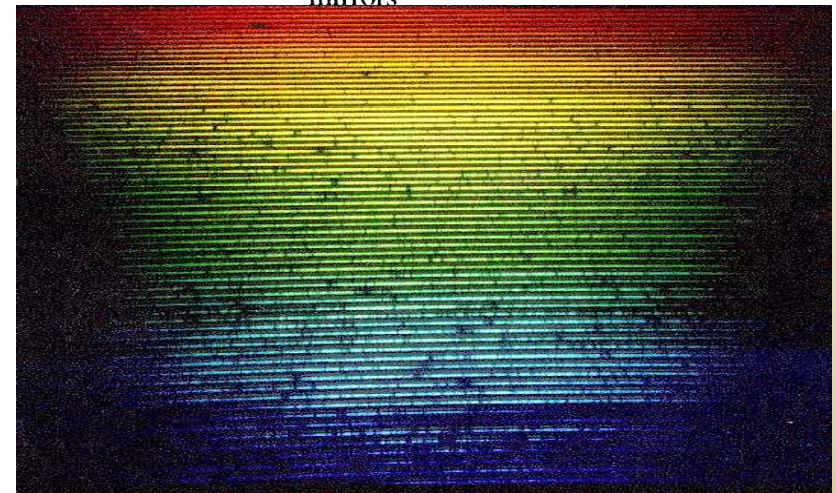
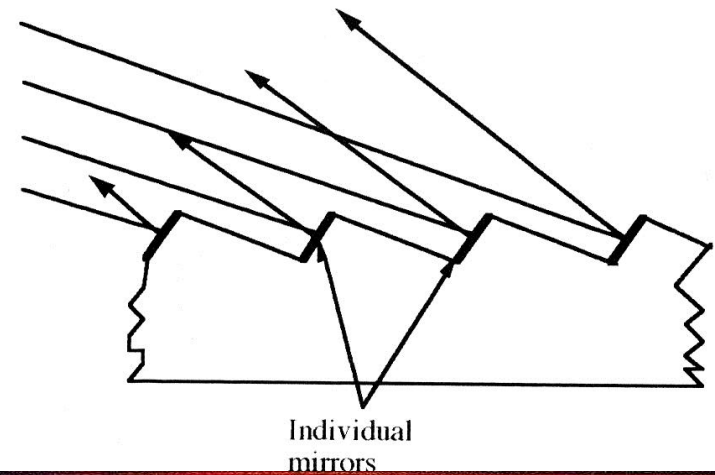
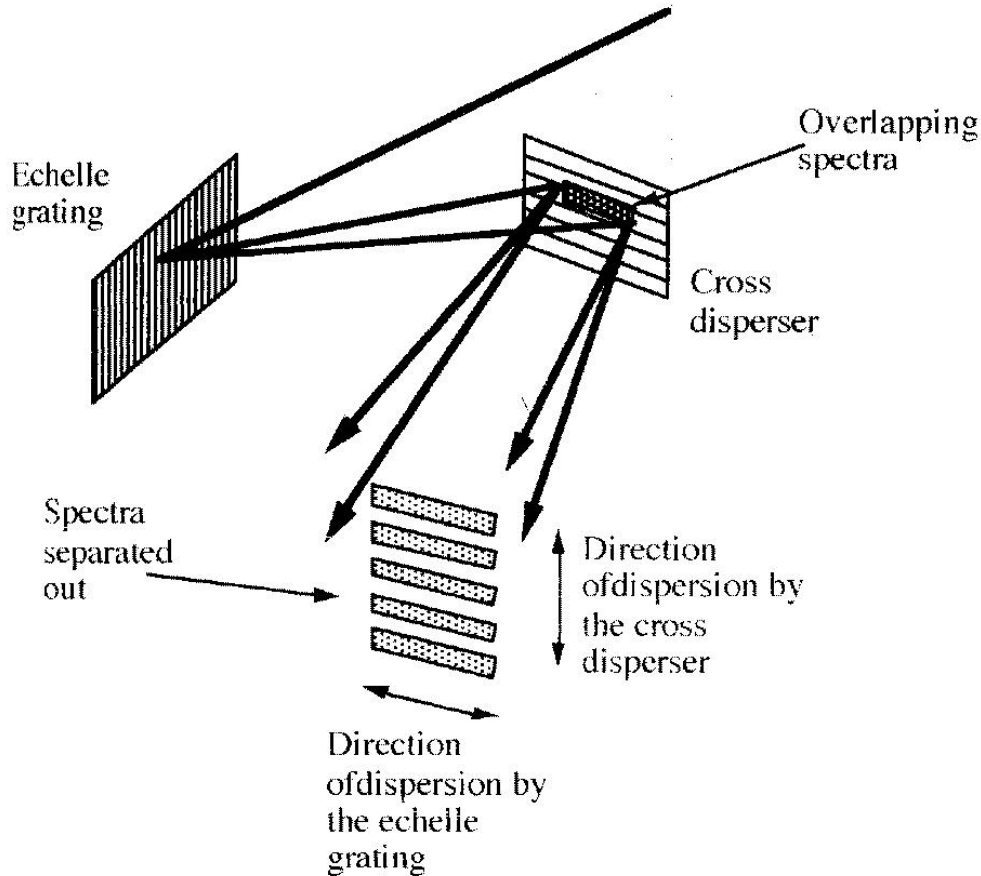


colimador



Espectrógrafos 'echelle'

Son espectrógrafos de alta dispersión que trabajan en órdenes altos. Al existir un gran solapamiento de órdenes hay que instalar un dispersor cruzado para separarlos en el plano focal del espectrógrafo.



Vista esquemática de un espectrógrafo 'echelle' e imagen de los órdenes en el plano focal (dcha)

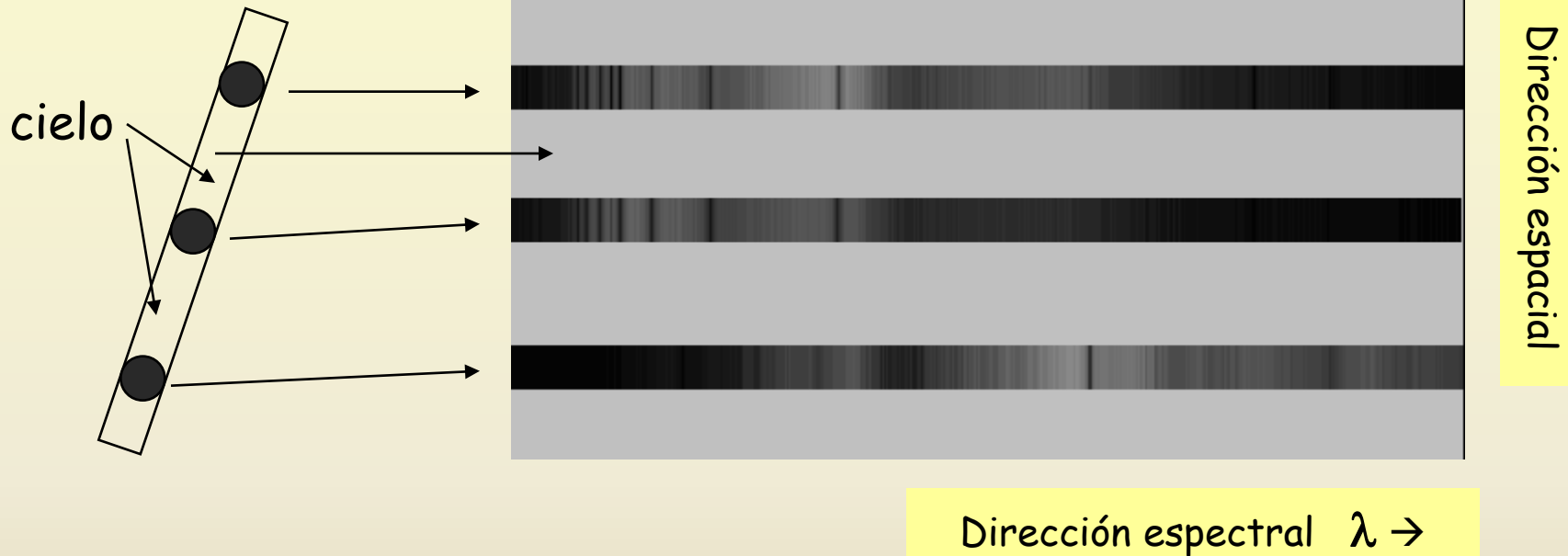


Espectrógrafos de rendija larga

Los espectrógrafos con rendija larga permiten obtener a la vez espectros de todos los objetos situados en la rendija (además del espectro del cielo).

rendija

Vista de los espectros en el plano focal del espectrógrafo



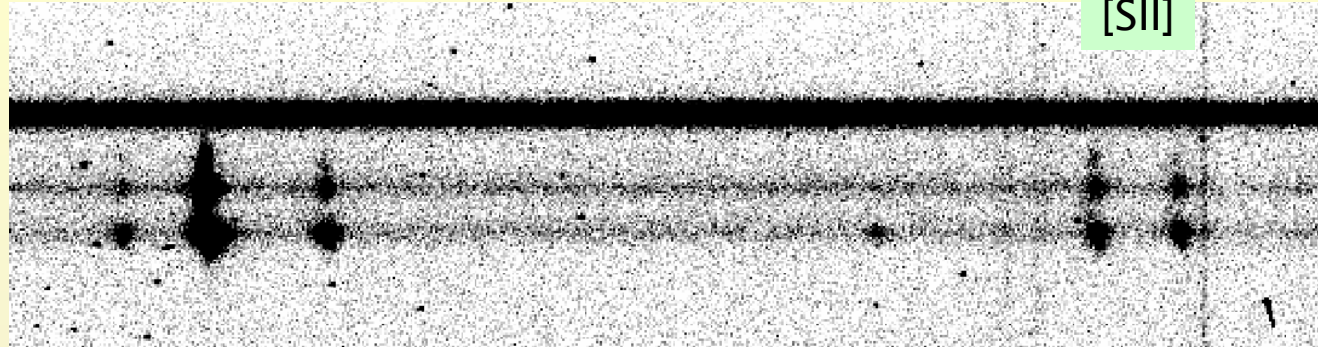
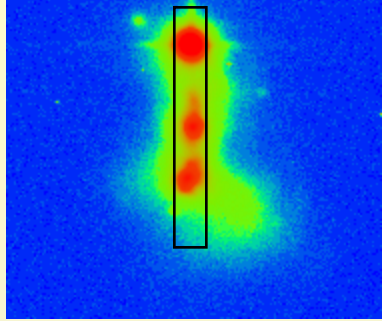
Ventajas:

- 1) Ahorro de tiempo de observación (varios objetos + cielo)
- 2) Fácil determinación de variaciones espaciales.
- 3) Espectros comparables ya que la observación es simultánea.

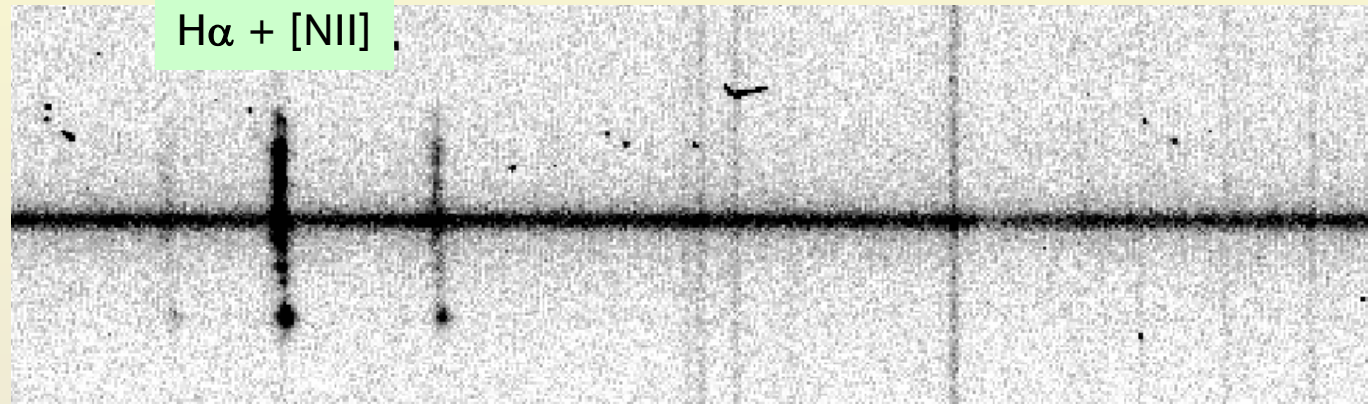
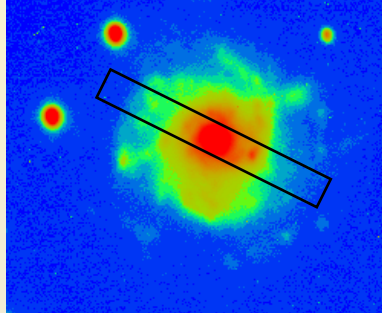


Ejemplos de espectros con rendija larga

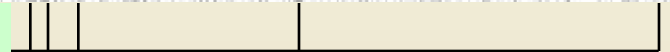
UCM2327+2515



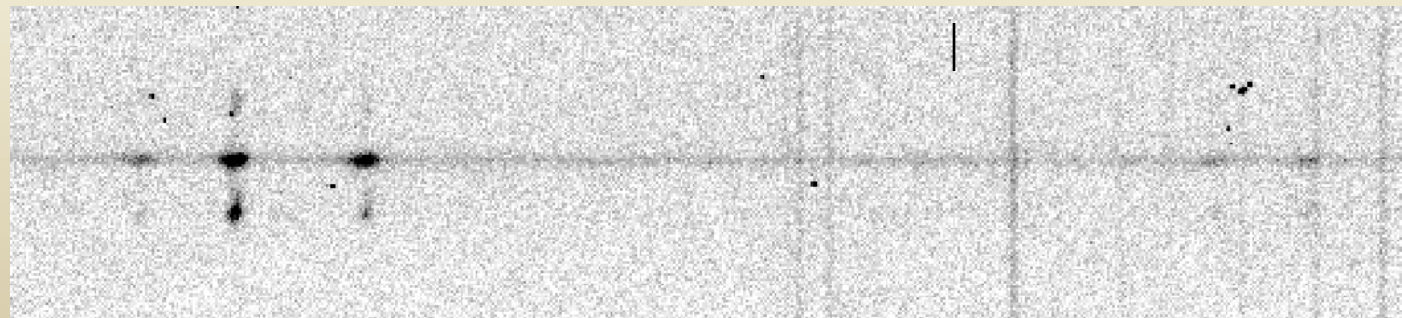
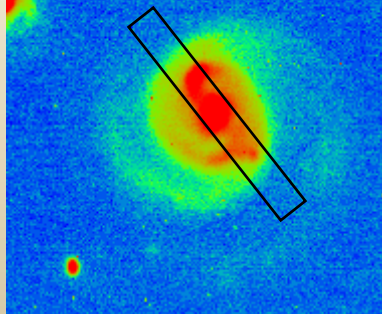
UCM2317+2356



Líneas del espectro del cielo



UCM2316+2459

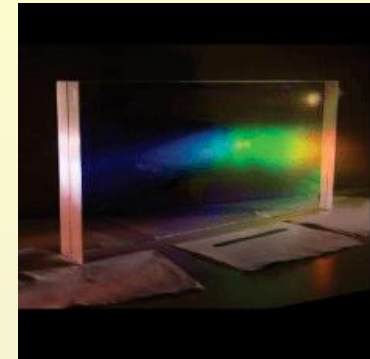




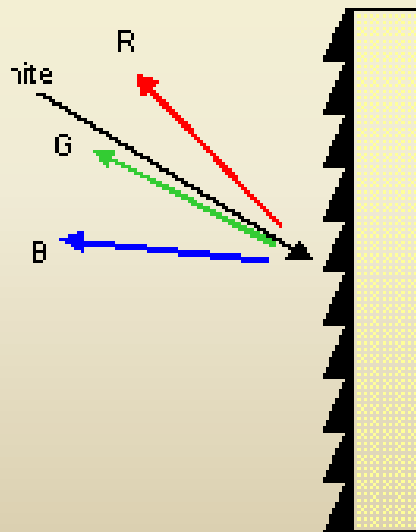
Espectrógrafos con VPHs

Red VPH (Volume Phase Holographic) funciona como una red de transmisión.

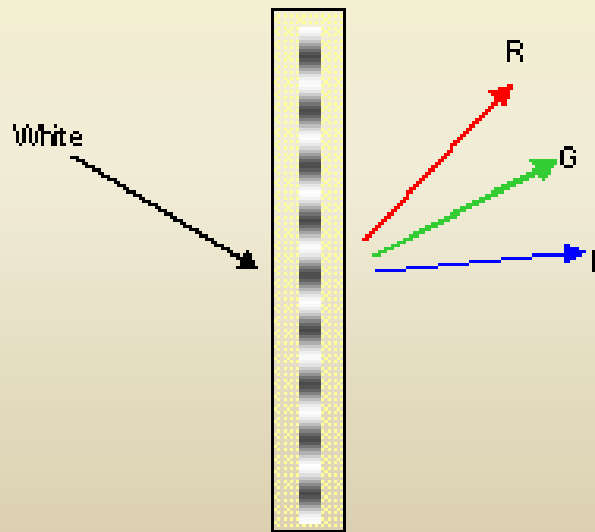
Dos capas transparentes contienen una capa de material transmisor con índice de refracción que varía con una periodicidad. La fase de la luz incidente se modula según pasa por las diferentes zonas del material.



Conventional Surface Relief Reflection Grating



Volume Phase Holographic (VPH) Transmission Grating



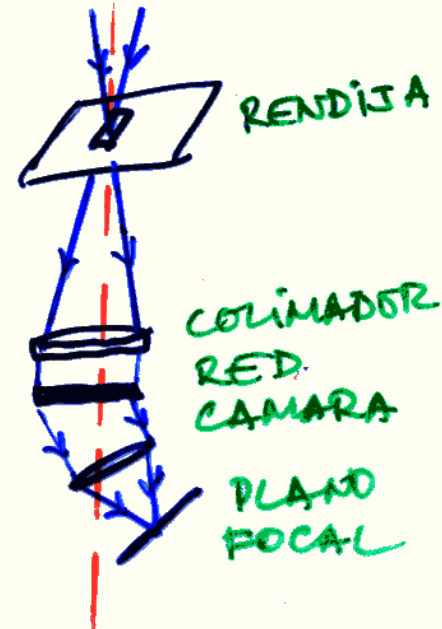
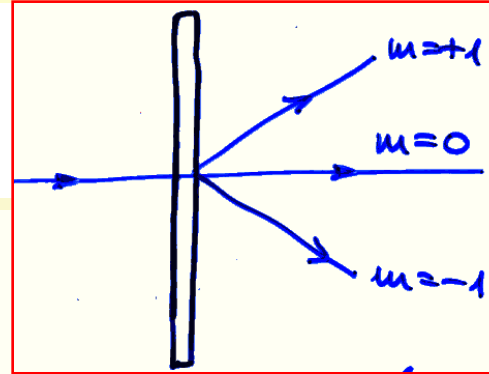
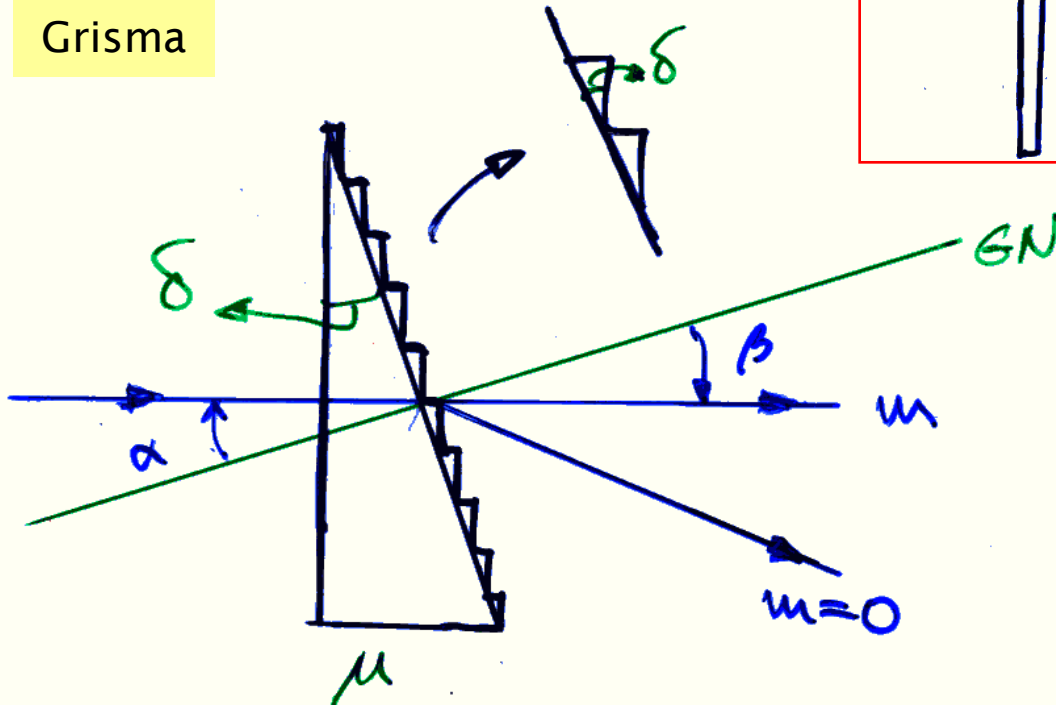
- Transmitancias altas
- Resoluciones altas
- Rangos espectrales limitados



Espectrógrafos de grismas (1)

Si se usa una red de transmisión en un espectrógrafo, el orden $m=0$ es el que sale en la dirección del eje óptico.

Grisma



Espectrógrafo con red de transmisión

$$m\lambda = \sigma(\mu \text{ sen}\alpha - \text{sen}\beta)$$

$$m\lambda = \sigma(\mu - 1) \text{ sen}\delta$$

Los grismas (*grism*: *grating + prism*) son redes de transmisión grabadas sobre un prisma que desvía la luz para que un orden diferente del $m=0$ ($m=1$ generalmente) salga en la dirección del eje óptico.

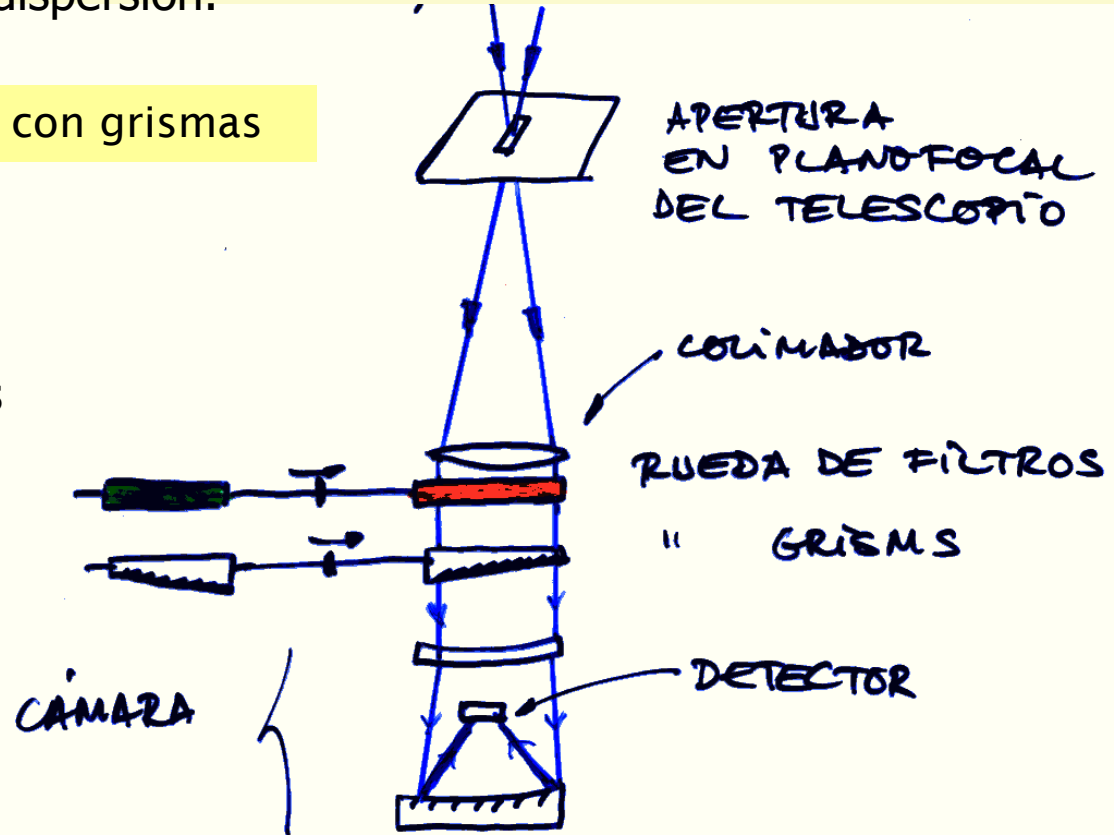


Espectrógrafos de grismas (2)

Con los grismas podemos construir espectrógrafos que puedan seleccionar grismas de diferente dispersión.

Espectrógrafo con grismas

Como todos los grismas envían en el eje óptico la luz del orden decidido en su diseño, puede emplearse una rueda de grismas de diferente dispersión que sea seleccionable.

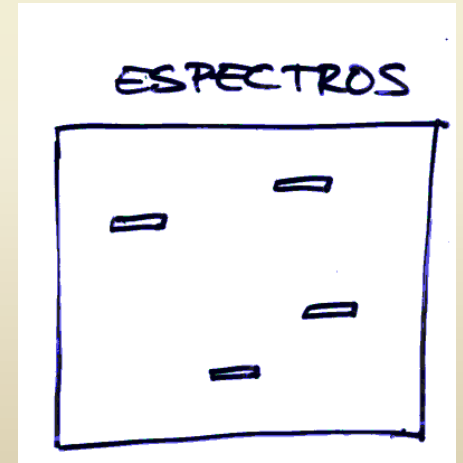
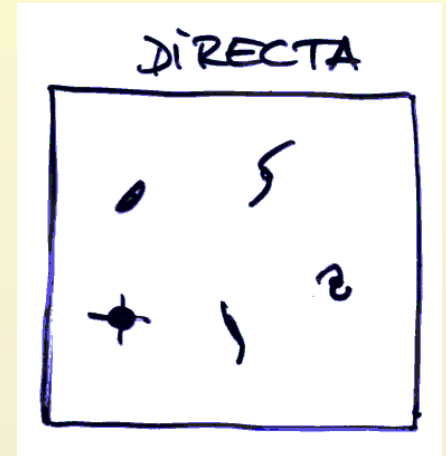
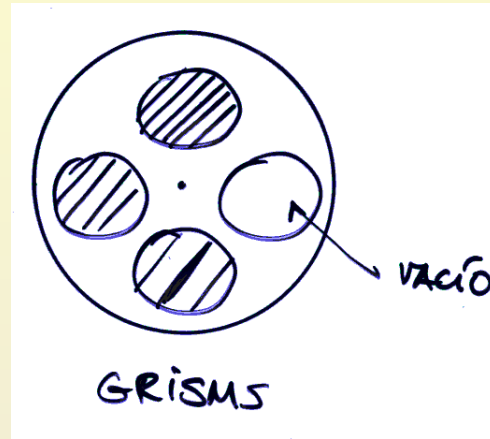
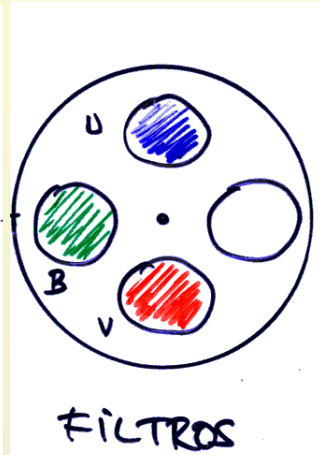
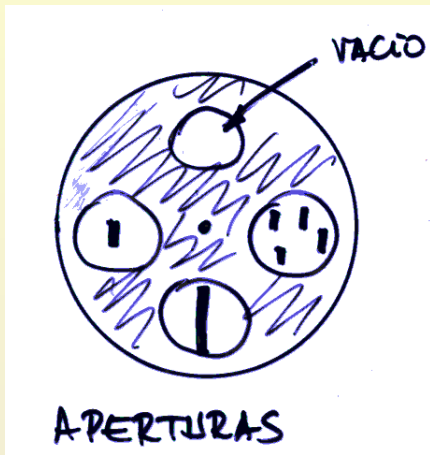


Suelen tener paso de red grande, por lo que en estas redes las aberraciones de coma ($\propto 1/\sigma$) y astigmatismo ($\propto 1/\sigma^2$) son reducidas y permiten campo amplio de visión.



Espectrógrafos de grismas (3)

Se emplean como cámaras directas para obtener imágenes del campo al que apunta el telescopio o como espectrógrafos de resolución baja.



Se pueden usar como espectrógrafo simple o **multiobjeto** usando una placa con múltiples rendijas.

- Las placas de rendijas (o aperturas) se construyen a medida de cada observación con anterioridad y son intercambiables.
- Son espectrógrafos pensados para objetos débiles (cúmulos de galaxias, por ejemplo) ya que son sistemas muy luminosos.



Ejemplos de espectrógrafos

<http://www.gtc.iac.es/en/pages/instrumentation/osiris.php>

OSIRIS@GTC

ID	Resolution	Spectral Range (Å)	Maximum Efficiency	Disperser
R.300B	325	3500-7000	70 %	Grism
R.300R	327	5000-10000	70 %	Grism
R.500B	501	3500-7000	68 %	Grism
R.500R	582	5000-10000	67 %	Grism
R.1000B	989	3700-7000	65 %	Grism
R.1000R	1118	5230-10000	65 %	Grism
R.2000B	2101	4000-5580	87 %	Grism
R.2500U	2503	3480-4550	70 %	VPH
R.2500V	2505	4470-5950	80 %	VPH
R.2500R	2503	5630-7540	80 %	VPH
R.2500I	2506	7410-9970	80 %	VPH



Ejemplos de espectrógrafos

<http://www.gtc.iac.es/en/pages/instrumentation/osiris.php>

OSIRIS@GTC

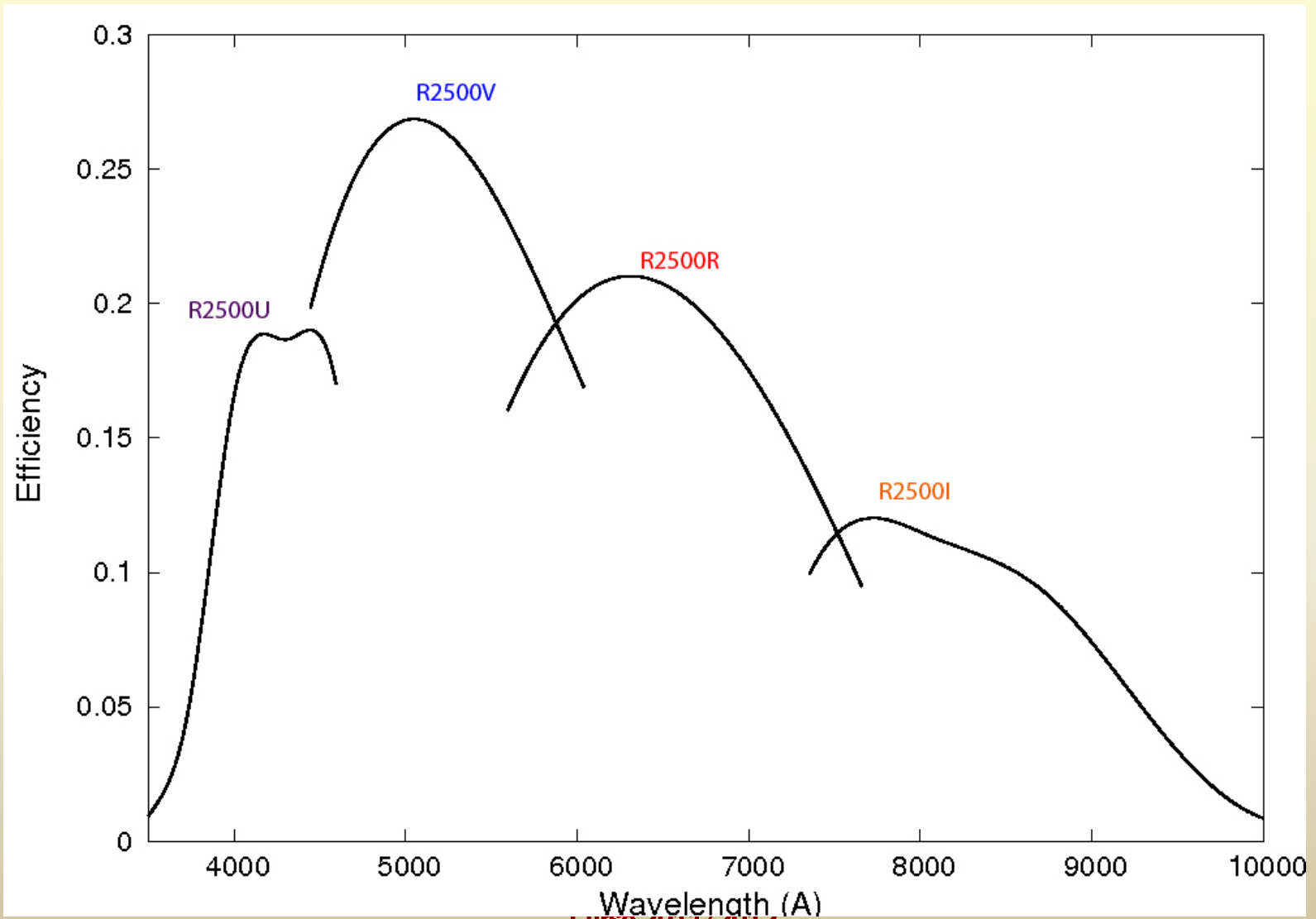
ID	Name	λ_c (Å)	λ range (Å)	D (Å/pix)	R	Efficiency
R300B	MBR_G1	4560	3600 - 10000	2.48 (at 4560Å)	360 (at 4560Å)	Image
R300R	MBR_G2	6865	4800 - 10000	3.87 (at 6865Å)	348 (at 6865Å)	Image
R500B	BR_G1	4830	3440 - 7600	1.77 (at 4830Å)	537 (at 4830Å)	Image
R500R	BR_G2	7310	4800 - 10000	2.44 (at 7319Å)	587 (at 7319Å)	Image
R1000B	IR_G2.1	5510	3630 - 7500	1.06 (at 5510Å)	1018 (at 5510Å)	Image
R1000R	IR_G3.2	7510	5100 - 10000	1.31 (at 7510Å)	1122 (at 7510Å)	Image
R2000B	---	4780	3950 - 5700	0.43 (at 4780Å)	2165 (at 4780Å)	Image
R2500U	---	4025	3440 - 4610	0.31 (at 4025Å)	2555 (at 4025Å)	Image
R2500V	---	5210	4500 - 6000	0.40 (at 5210Å)	2515 (at 5210Å)	Image
R2500R	---	6590	5575 - 7685	0.52 (at 6590Å)	2475 (at 6590Å)	Image
R2500I	---	8740	7330 - 10000	0.68 (at 8740Å)	2503 (at 8740Å)	Image



Ejemplos de espectrógrafos

<http://www.gtc.iac.es/en/pages/instrumentation/osiris.php>

OSIRIS@GTC



Curso 2011/2012

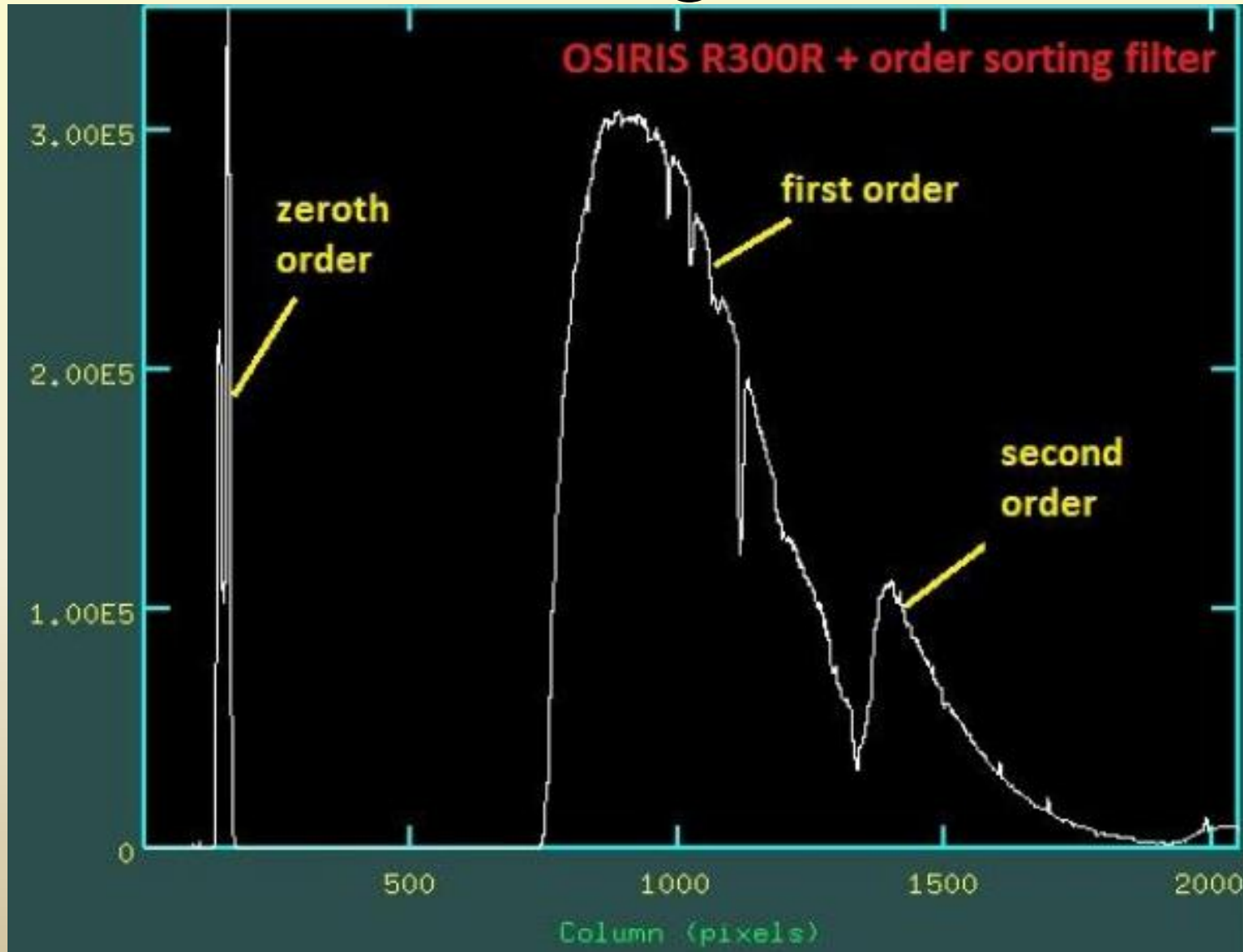
(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, P.G. Pérez-González)



Ejemplos de espectrógrafos

<http://www.gtc.iac.es/en/pages/instrumentation/osiris.php>

OSIRIS@GTC



(material compilado por J. Zamorano, J. Gallego, F.O. Pérez-González)



Ejemplos de espectrógrafos

http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/isis/isis_blue.html

ISIS@WHT

ISIS wavelength coverage and resolution with EEV12

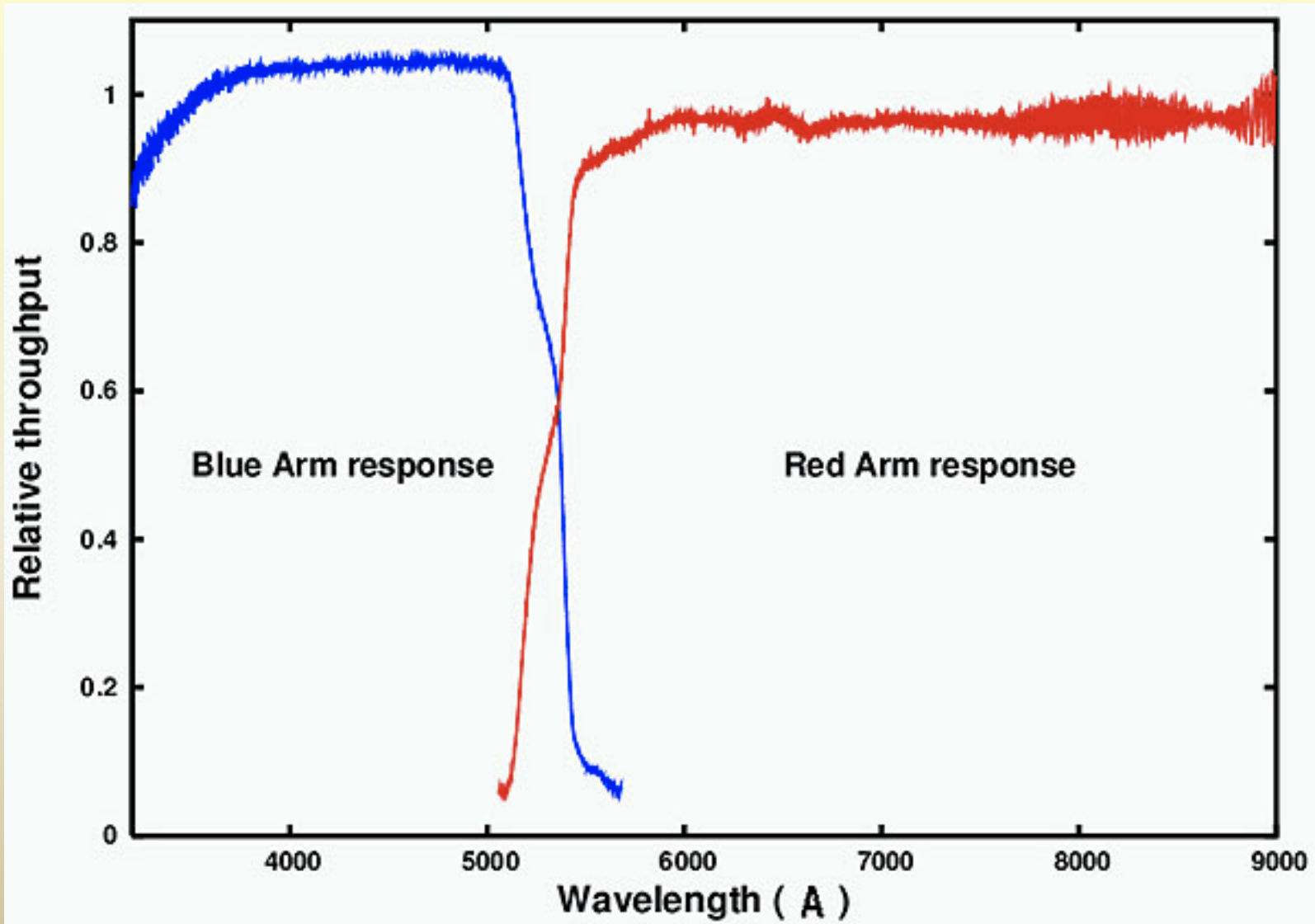
Grating	Blaze	Dispersion (Å/mm)	Dispersion (Å/pix)	Total Spectral range (Å)	Unvignetted range 2820 pixels (Å)	50% unvignetted range 3670 pixels (Å)	Slit-width for 54 μ at detector (in arcsecs)
R158B	3600	120	1.62	6635	4568	5944	0.83
R300B	4000	64	0.86	3539	2436	3170	0.84
R600B	3900	33	0.45	1825	1256	1636	0.89
R1200B	4000	17	0.23	940	646	842	1.08
H2400B	Holo	8	0.11	442	304	396	1.24



Ejemplos de espectrógrafos

http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/isis/isis_blue.html

ISIS@WHT (with dichroic)

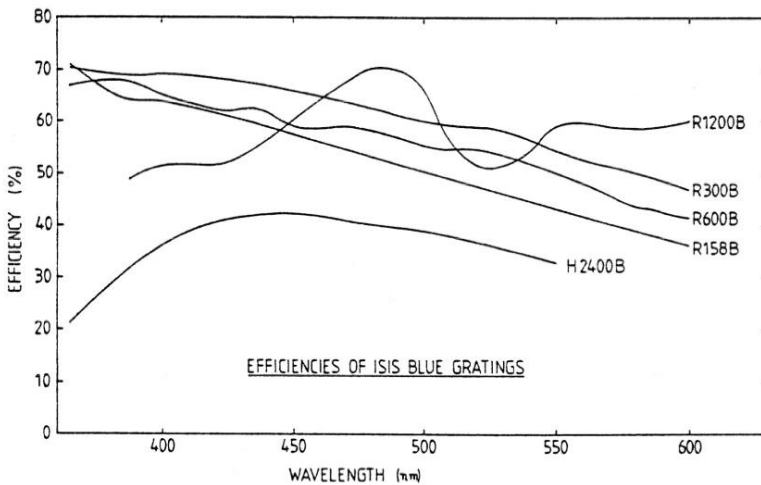
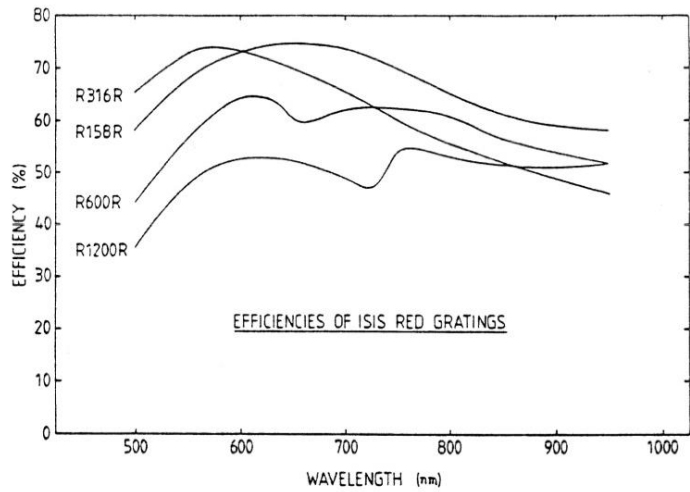




Ejemplos de espectrógrafos

http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/isis/isis_blue.html

ISIS@WHT



throughput

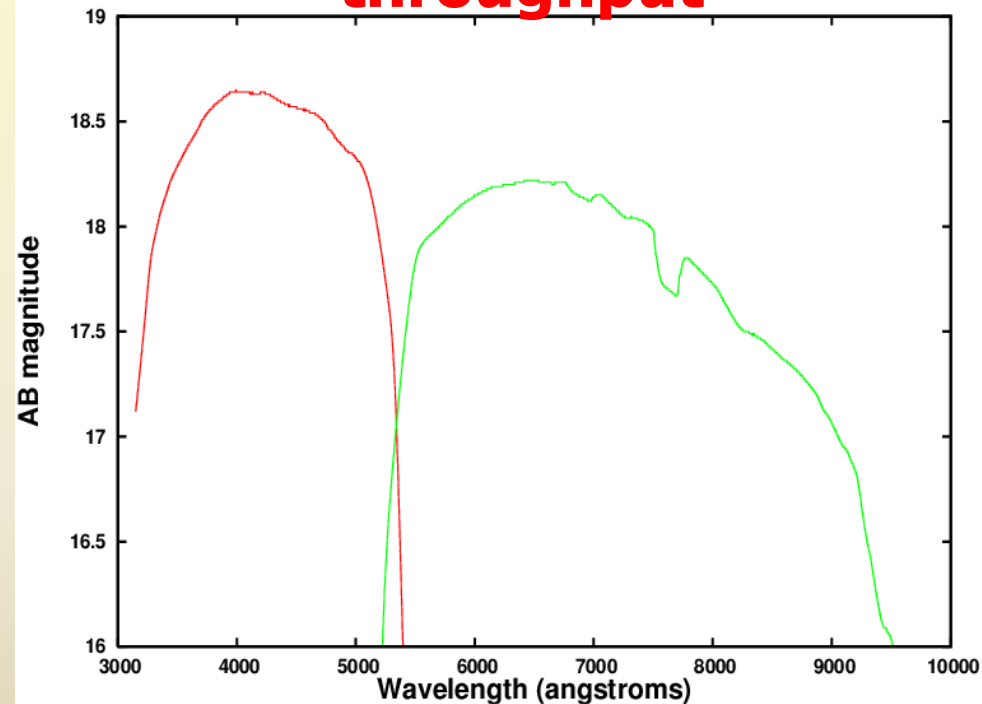


Figure 15: The upper panel shows the efficiencies of the ISIS red gratings, and the lower panel those of the blue gratings, as measure in the laboratory.

ntación Astronómica
so 2011/2012

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



Ejemplos de espectrógrafos

<http://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/irs/irsinstrumenthandbook/4/>

IRS@Spitzer

Table 2.1: IRS module characteristics.

Module	Channel	Detector	Delivered Wavelength Range* (micron)	Resolving Power**	Plate Scale (arcsec/pix)	Slit width*** (arcsec)	Slit length (arcsec)
SL2 SL3 SL1	0	Si:As	5.13-7.60 7.33-8.66 7.46-14.29	60-127 61-120	1.8	3.6 3.7	57
PU-blue	0	Si:As	13.3-18.7	~3	1.8	80 [^]	56 [^]
PU-red	0	Si:As	18.5-26.0	~3	1.8	82 [^]	54 [^]
LL2 LL3 LL1	2	Si:Sb	13.90-21.27 19.23-21.61 19.91-39.90	57-126 58-112	5.1	10.5 10.7	168
SH	1	Si:As	9.89-19.51	600	2.3	4.7	11.3
LH	3	Si:Sb	18.83-37.14	600	4.5	11.1	22.3

*SL1 spectra may exhibit the "14 micron teardrop", which affects wavelengths beyond approximately 13.2 microns (see Chapter 7). LL1 spectra become very noisy beyond 38 microns.

**The resolving power is approximately constant as a function of wavelength within each low-resolution spectroscopic order.

***The width of each slit is constant to 1% over its length.

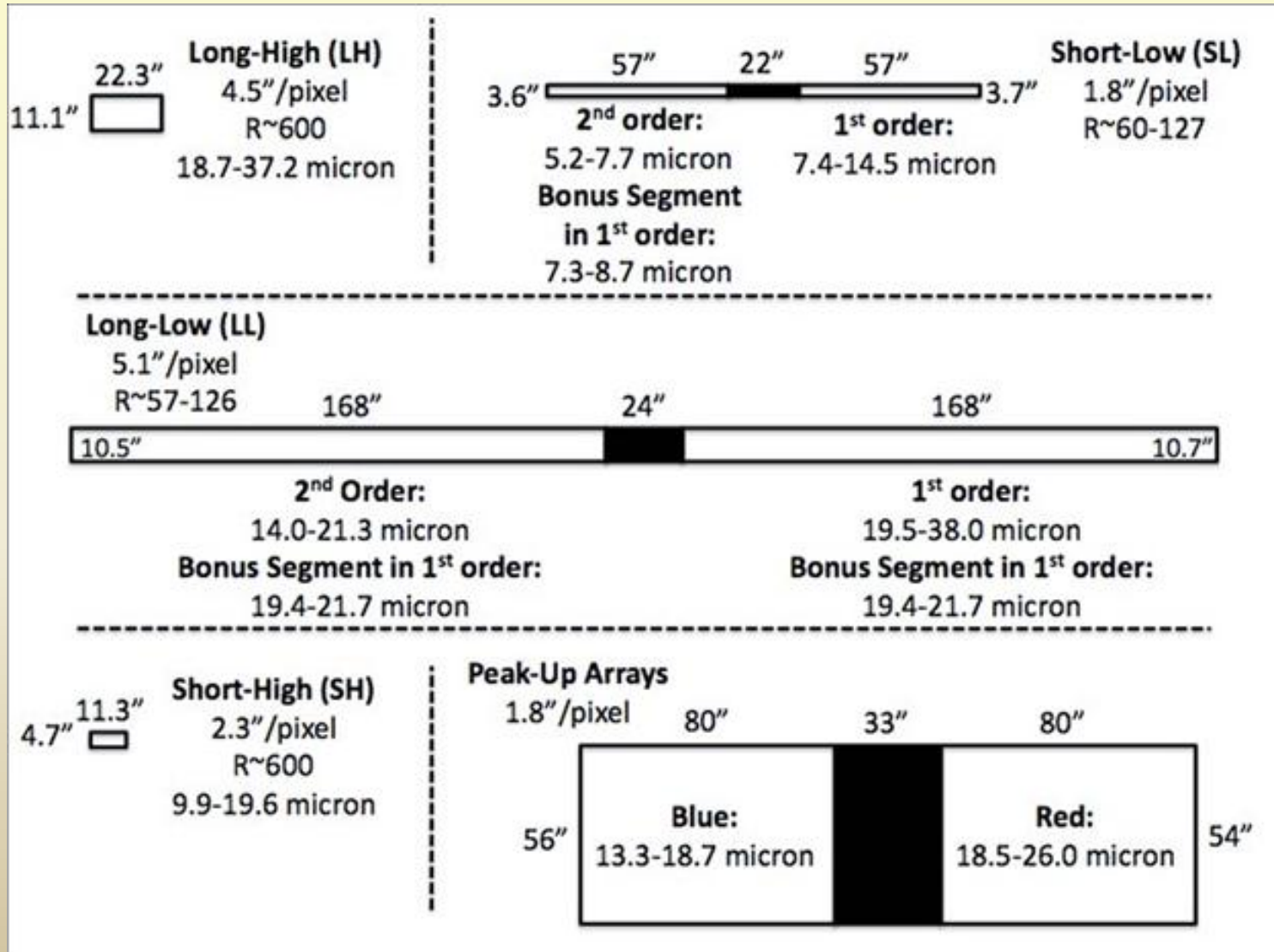
[^] This represents the field of view for the peak-up arrays.



Ejemplos de espectrógrafos

<http://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/irs/irsinstrumenthandbook/4/>

IRS@Spitzer

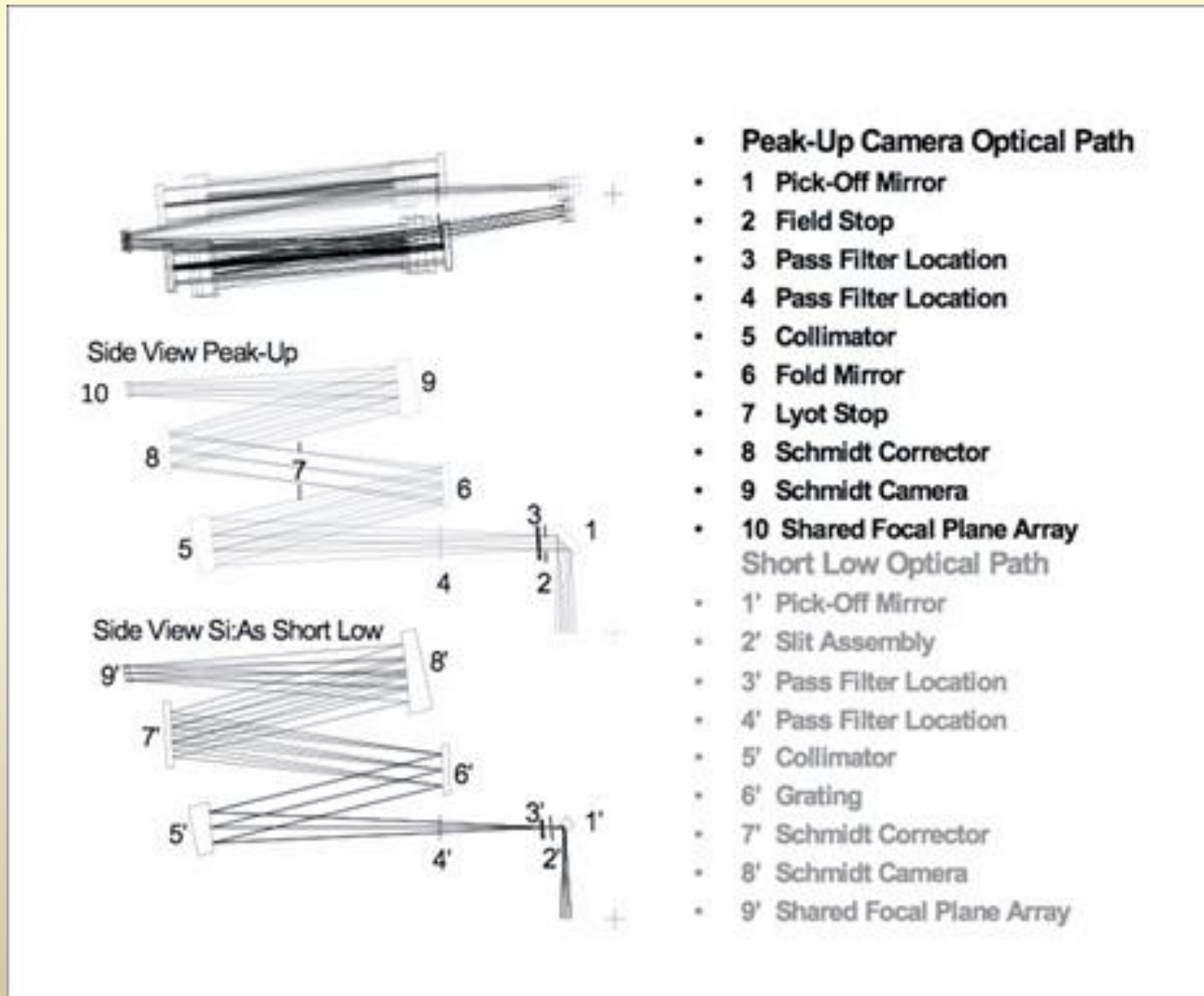




Ejemplos de espectrógrafos

<http://irsa.ipac.caltech.edu/data/SPITZER/docs/irs/irsinstrumenthandbook/4/>

IRS@Spitzer





Resumen de contenidos

- **Parámetros relevantes en espectroscopía: pureza espectral, resolución, dispersión lineal (y recíproca), etc....**
- **Tipos de espectrómetros según elemento dispersor.**
- **Parámetros de los espectrógrafos/dispersores y efecto en los datos espectroscópicos.**