

ESPECTROSCOPIA

1

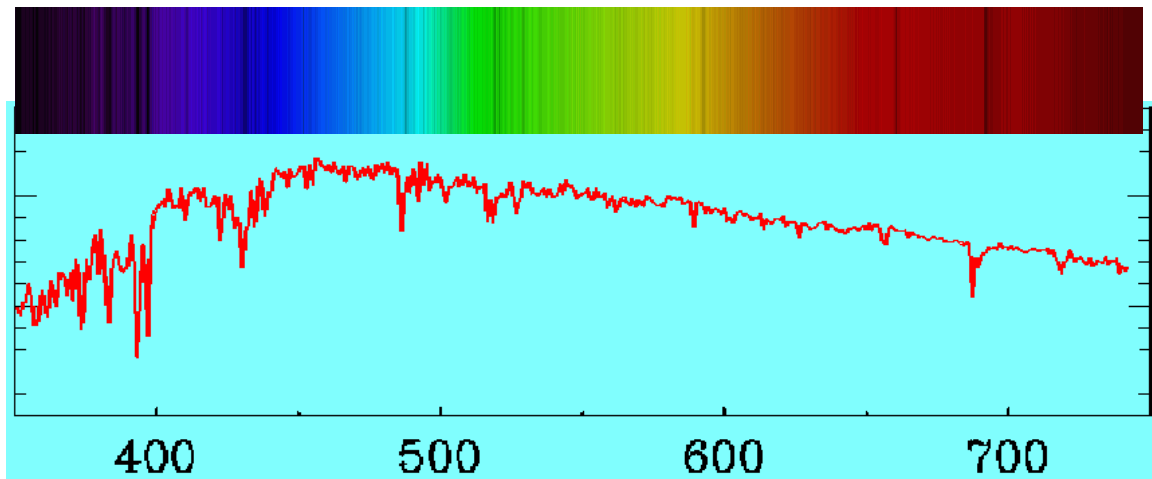
ESPECTROSCOPIA: Índice de contenido

1. Introducción.
 - Utilidad de la espectroscopía. Resolución espectral.
2. Espectrógrafos de prismas. Prisma objetivo.
3. Espectrómetros.
 - Componentes. Pureza espectral.
 - Redes de difracción. Dispersión angular. Dispersión lineal.
 - Rango espectral libre. Eficiencias de las redes.
4. Espectrógrafos de redes.
 - Ejemplos de espectrógrafos de redes.
 - Espectrógrafos echelle. Espectrógrafos coudé.
5. Espectrógrafos con resolución espacial.
 - Rendija larga.
 - Espectrógrafos con grismas.
 - Espectrógrafos de fibras.
6. Preparación de observaciones espectroscópicas.

2

ESPECTROSCOPÍA: Introducción

- El objetivo de la espectroscopía es obtener las distribuciones espectrales de energía: el 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.

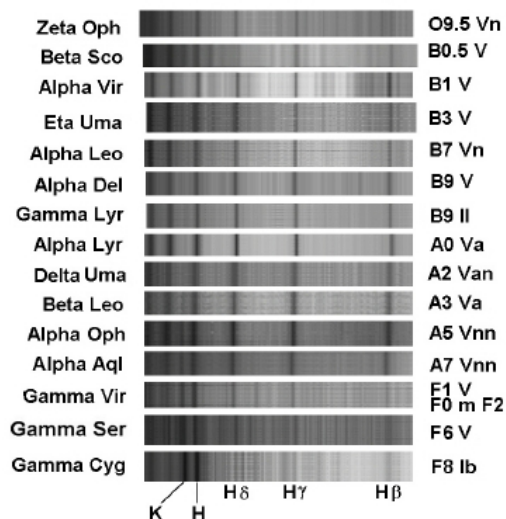


3

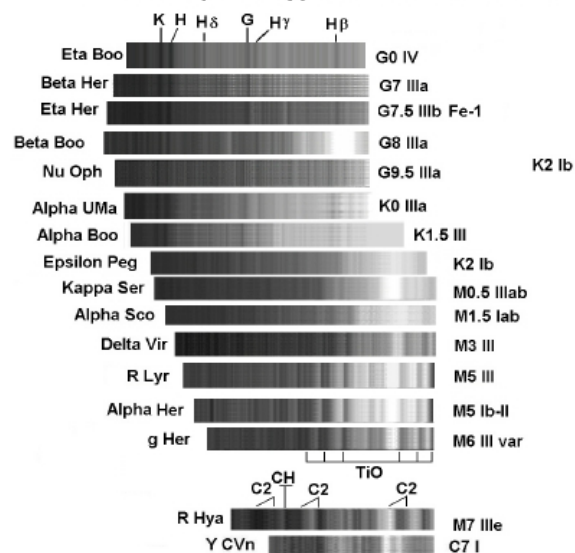
ESPECTROSCOPÍA: Introducción

- 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



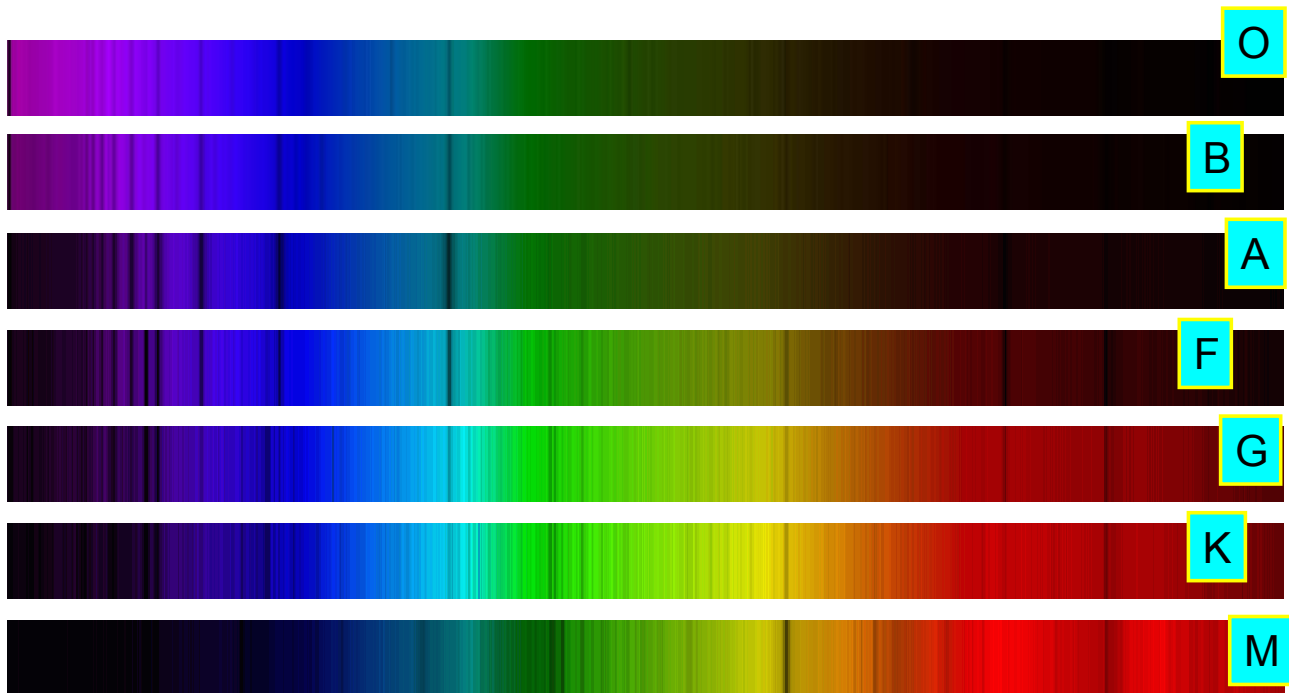
Stars with spectral type like the Sun and later.



4

ESPECTROSCOPIA:

Tipos espectrales

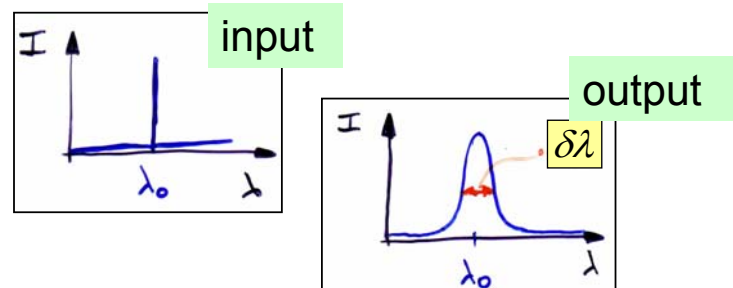


<http://www.ucm.es/info/Astrof/JAZ/TRABAJOS/COLOR/colorspectra.htm>

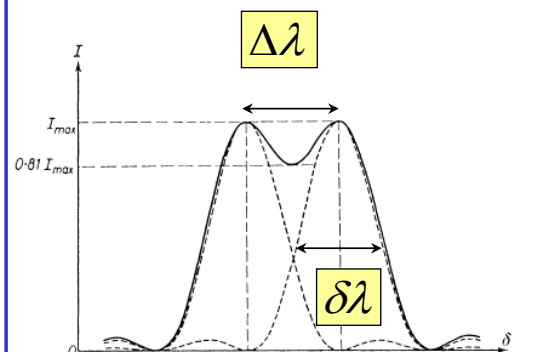
ESPECTROSCOPIA:

Resolución espectral

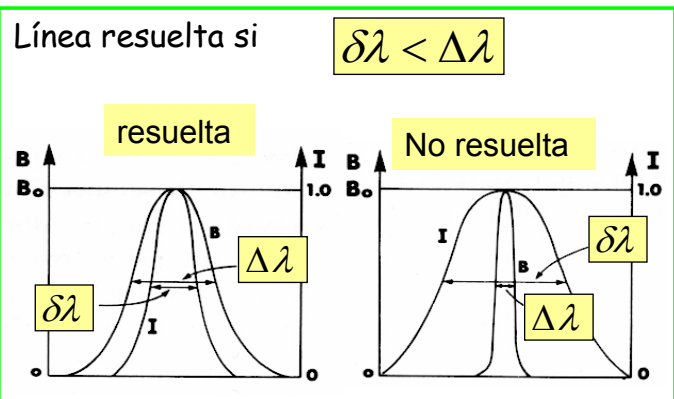
La pureza espectral o perfil instrumental $\delta\lambda$ es una medida de la anchura (FWHM) de las líneas monocromáticas registradas por espectrógrafo.



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.



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



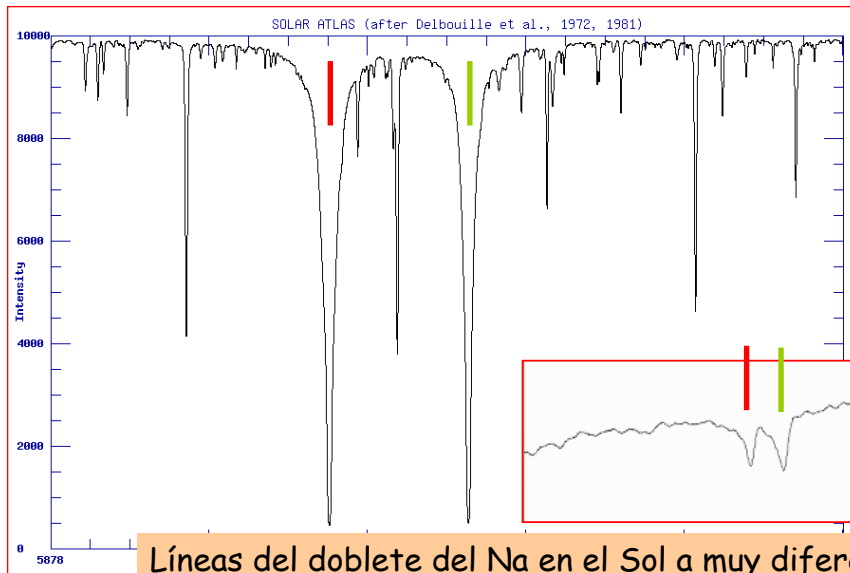
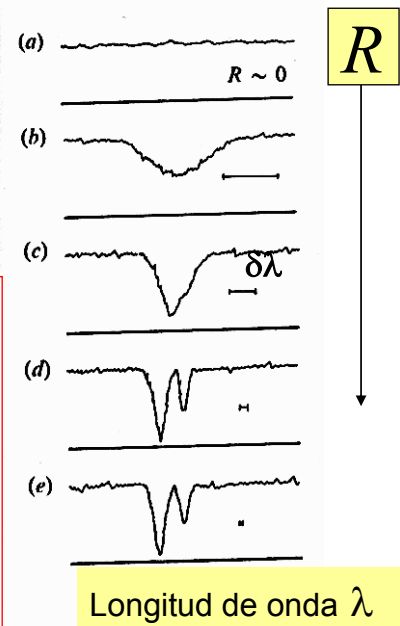
ESPECTROSCOPIA:

Resolución espectral

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

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

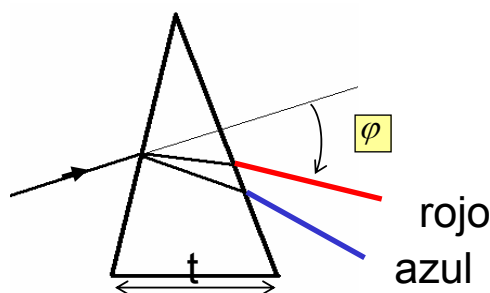
R	Resolución
$\sim 10^3$	Baja
$\sim 10^4$	Intermedia
$> 5 \times 10^4$	Alta



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

ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos de prismas

Se emplea un prisma como elemento dispersor.

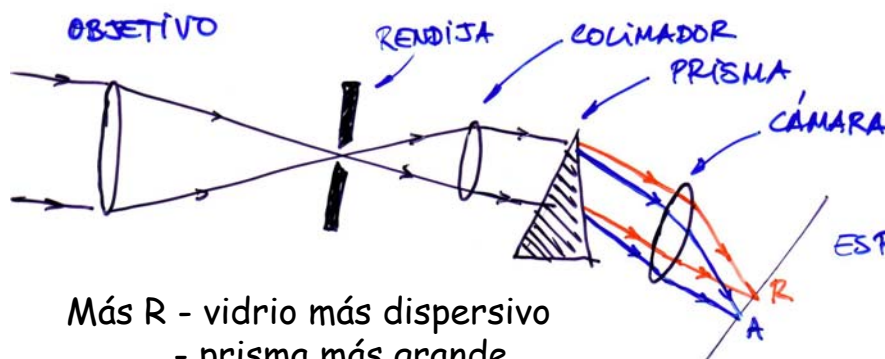


$$n \propto 1/\lambda^2$$

espesor del prisma

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

anchura del haz colimado



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

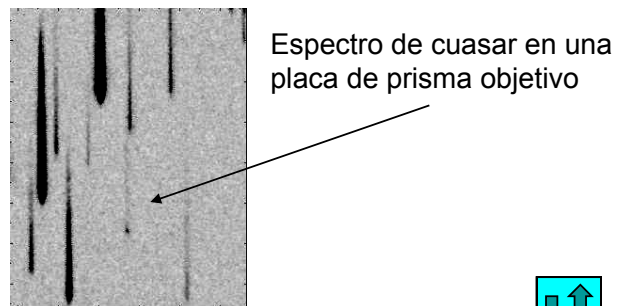
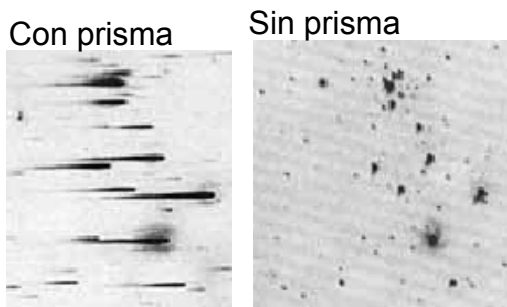
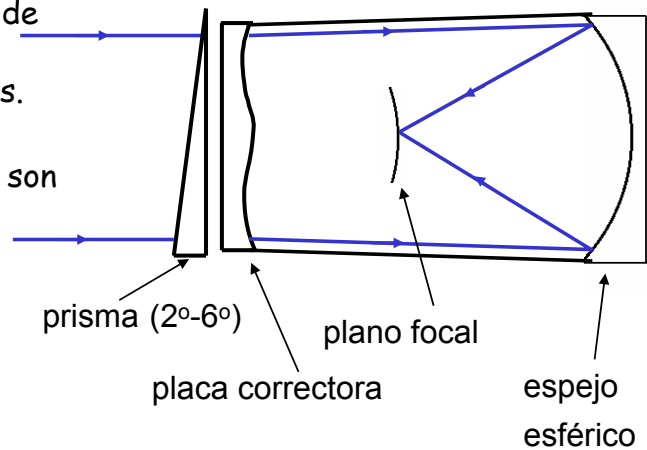
- Más R - vidrio más dispersivo
- prisma más grande
- varios prismas



ESPECTROSCOPIA:

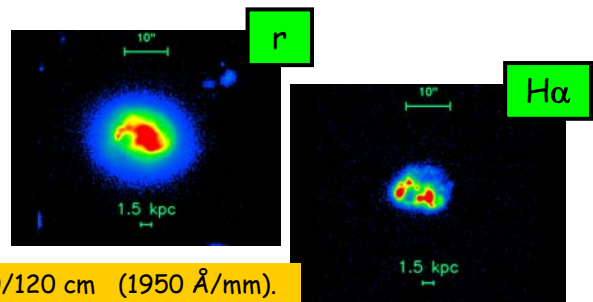
Prisma objetivo

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

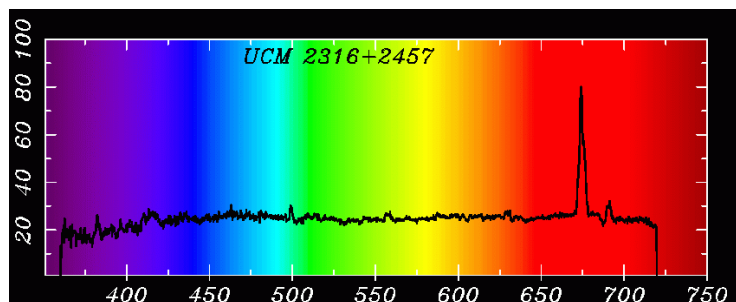


Ejemplo de prisma objetivo: La exploración UCM

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

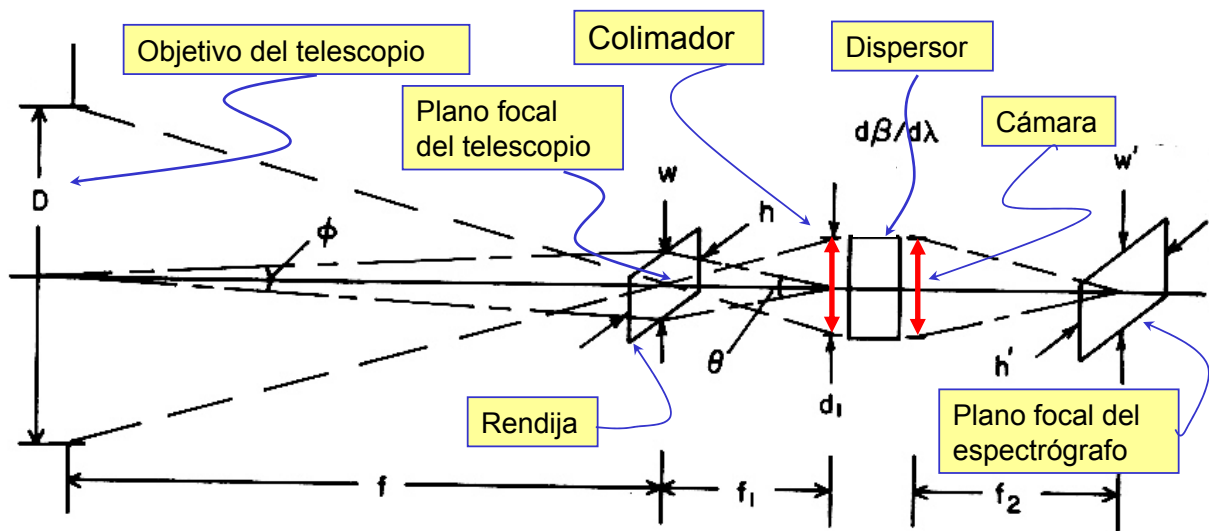


Calar Alto, Schmidt 80/120 cm (1950 Å/mm).
 IIIa-F + Filtro RG630 (6400-6850 Å).
 471.4 □ (0.4 galaxias/□) 191 galaxias
 $z < 0.045$ EW (H α + [NII]) > 20 Å.



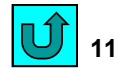
ESPECTROSCOPIA:

Espectrómetros



Esquema general de un espectrómetro adaptado a un telescopio

Rendija proyectada en el cielo	Rendija proyectada en el colimador	Imagen monocromática de la rendija	Factor de ampliación
$\phi = w/f$	$\theta = w/f_1$	$w' = w f_2/f_1$	f_2/f_1
$\phi' = h/f$	$\theta' = h/f_1$	$h' = h f_2/f_1$	



ESPECTROSCOPIA:

Espectrómetros

$$w' = w f_2 / f_1$$

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

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

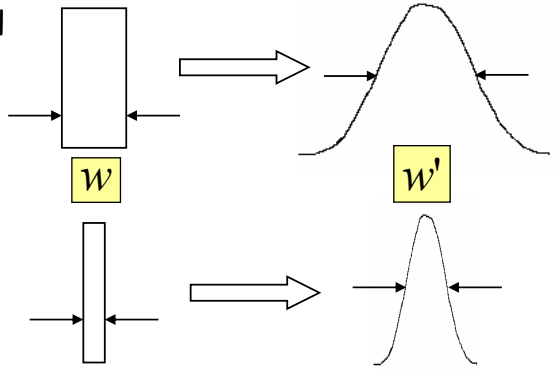
$$\delta\lambda = w' \frac{d\lambda}{dx} = \frac{w'}{f_2} \frac{d\lambda}{d\beta}$$

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

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

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.

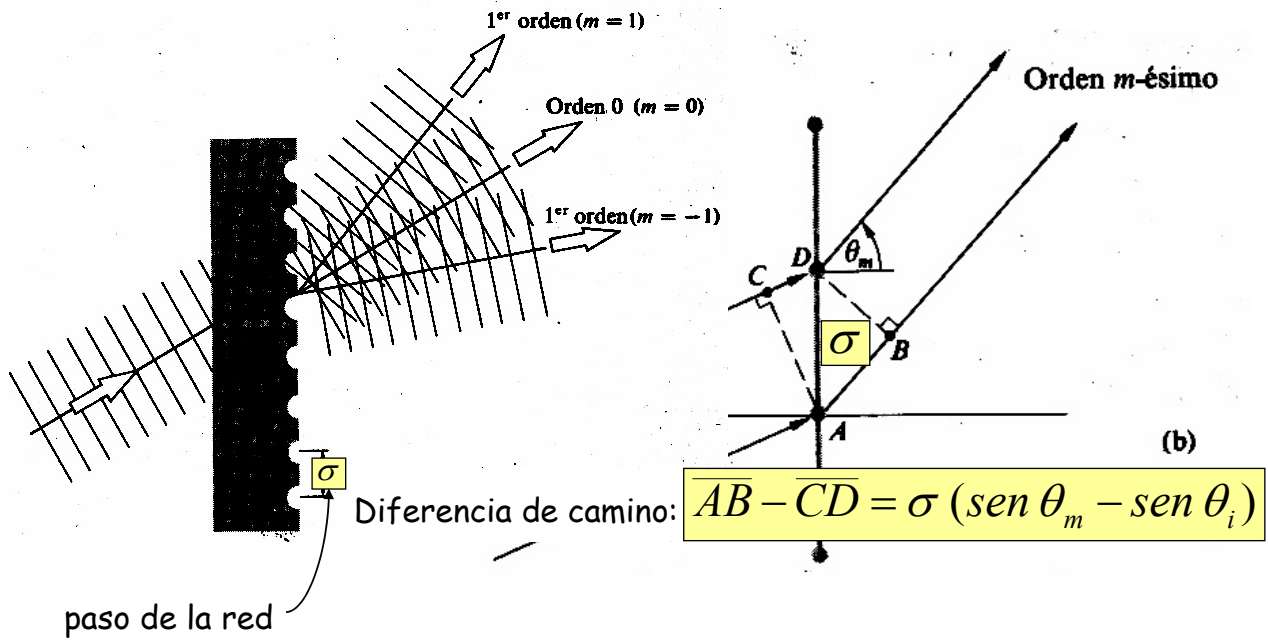


ESPECTROSCOPIA:

Redes de difracción

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

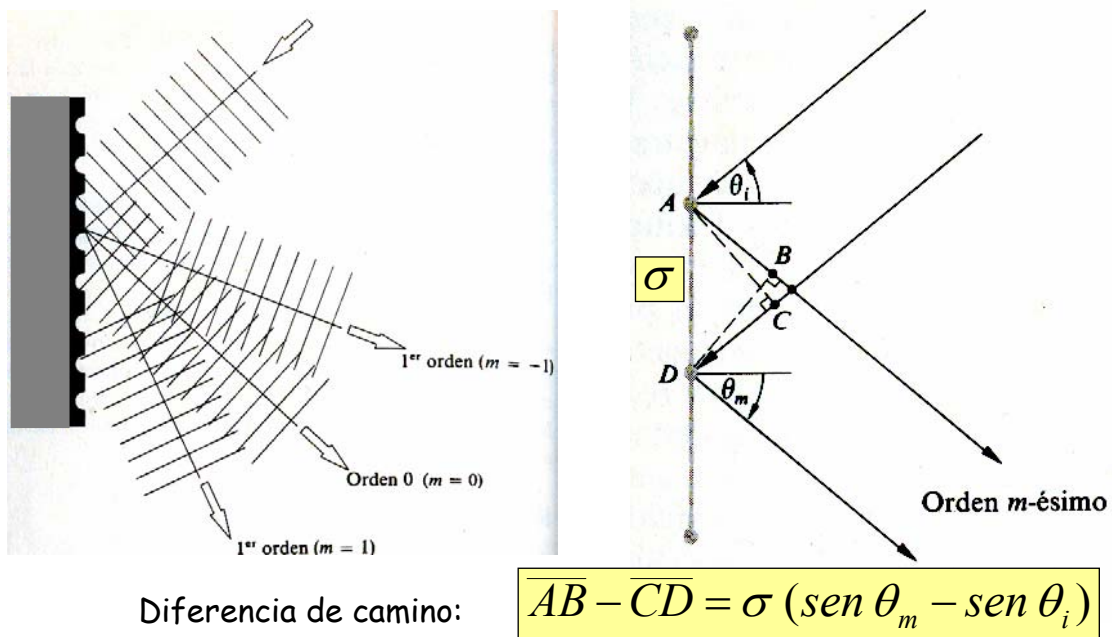
Redes de transmisión



ESPECTROSCOPIA:

Redes de difracción

Redes de reflexión

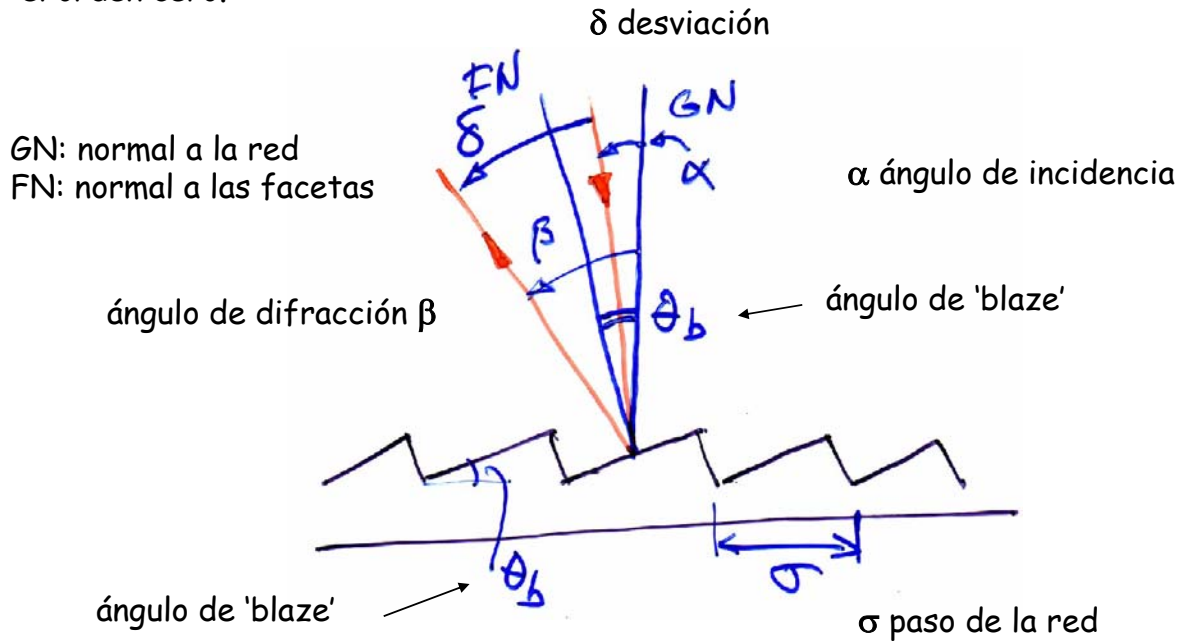


ESPECTROSCOPIA:

Redes de difracción

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

$$m \lambda = \sigma (\sin \alpha + \sin \beta)$$

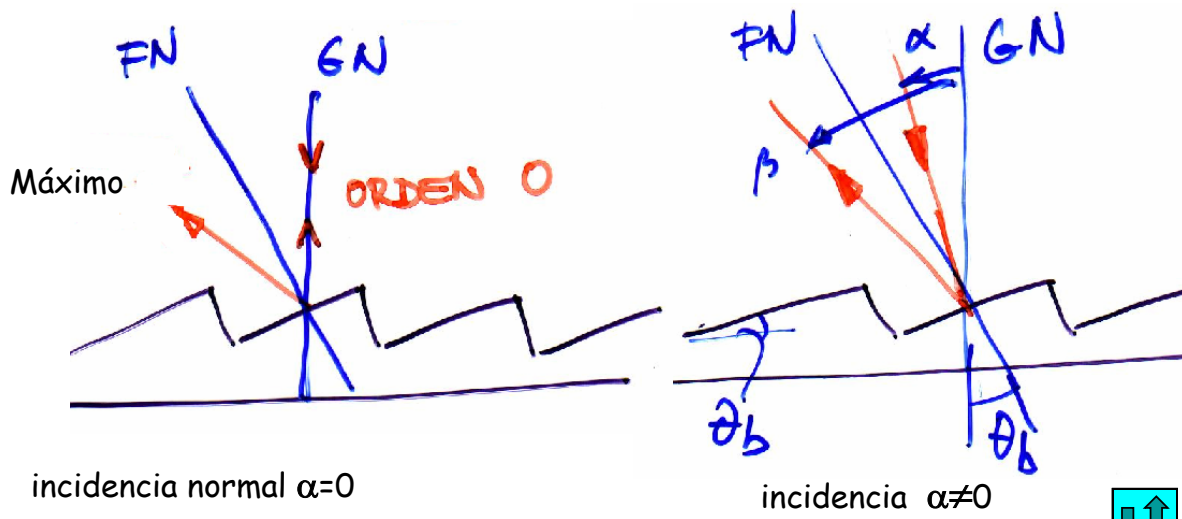


ESPECTROSCOPIA: Eficiencia de las redes (1)

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.

$$m \lambda = \sigma \sin 2\theta_b \longrightarrow m \text{ máxima luz}$$



ESPECTROSCOPIA: Eficiencia de las redes (2)

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

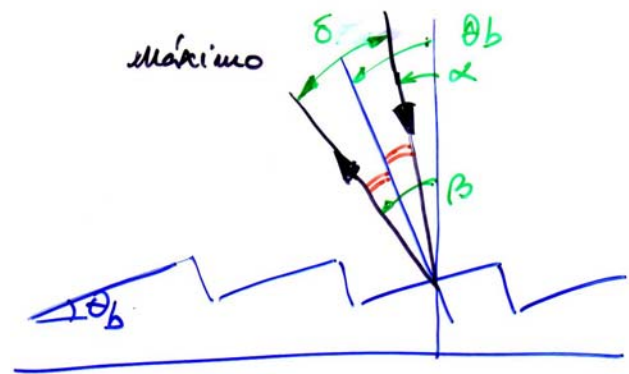
$$\beta - \theta_b = \theta_b - \alpha \iff \beta + \alpha = 2\theta_b$$

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

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

$$\lambda_b = 2\sigma \sin \theta_b \cos(\delta/2)$$

máximo en otros órdenes $\lambda_m = \lambda_b / m$

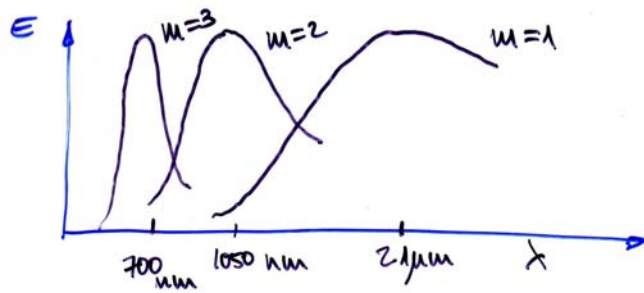


En incidencia normal

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

$$\lambda_b = 2\sigma \sin \theta_b \cos \theta_b$$

$$\lambda_b = \sigma \sin 2\theta_b$$



ESPECTROSCOPIA:

Dispersión



dispersión angular

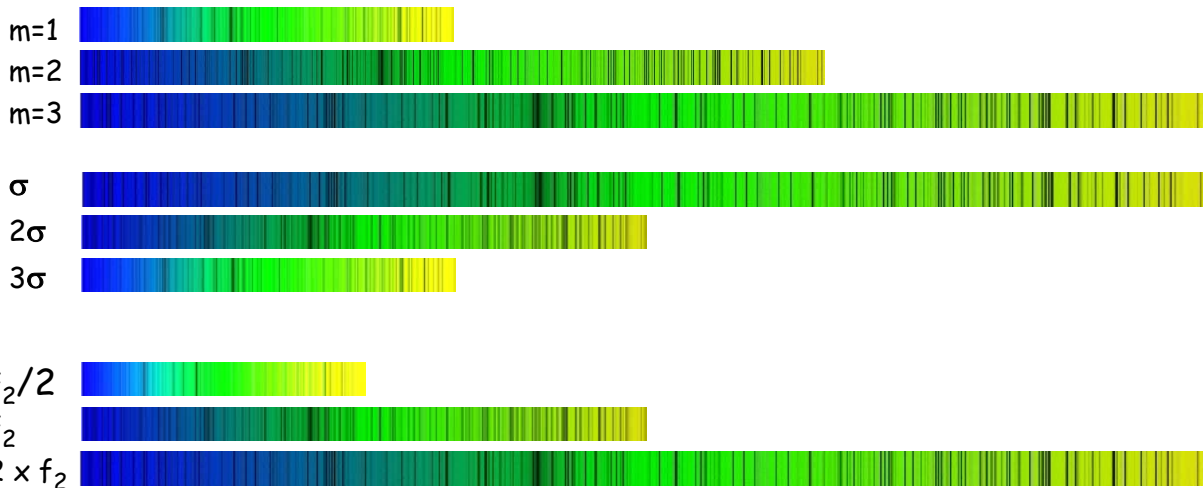
$$\frac{d\beta}{d\lambda} = \frac{m}{\sigma \cos \beta}$$

dispersión lineal

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

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

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



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

ESPECTROSCOPIA:

Dispersión (ejemplos)

En un espectrógrafo una red de 600 trazos/mm produce una dispersión de 48 Å/mm en el segundo orden. Determinése 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:

$$\sigma_2 = 1/600 = 1.65 \mu\text{m}$$

$$\sigma_1 = 2 \sigma_2$$

$$\sigma_3 = \sigma_2/2$$

La dispersión es directamente proporcional a la focal de la cámara:

Dispersión lineal recíproca se hace la mitad al doblar f_2



19

ESPECTROSCOPIA: Solapamiento de órdenes

Para un cierto ángulo de incidencia α , en la dirección β se difractan fotones de longitud de onda diferente según el orden.

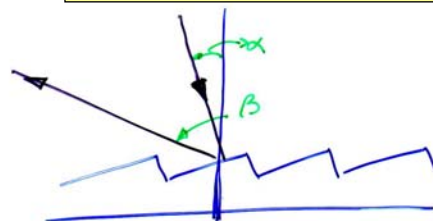
α y β fijos

λ y λ' en órdenes sucesivos

$$m \lambda = cte$$

$$m \lambda' = (m + 1) \lambda$$

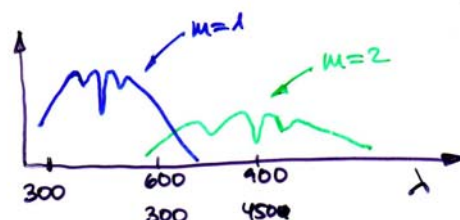
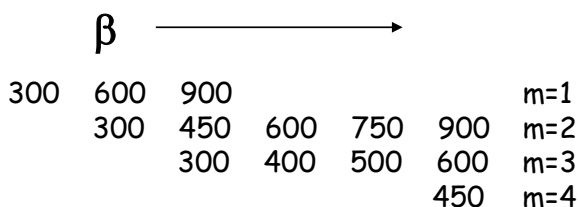
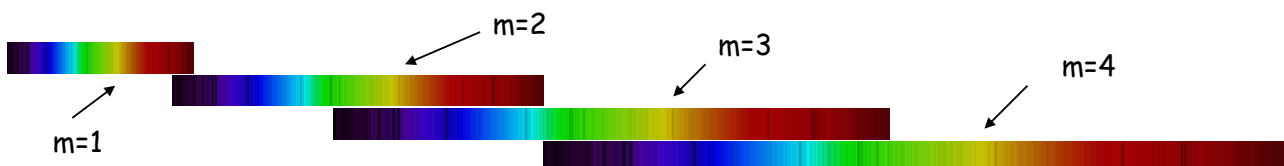
$$m \lambda = \sigma (\sin \alpha + \sin \beta)$$



Rango espectral libre:

diferencia entre longitudes de onda que aparecen en la misma posición en órdenes sucesivos

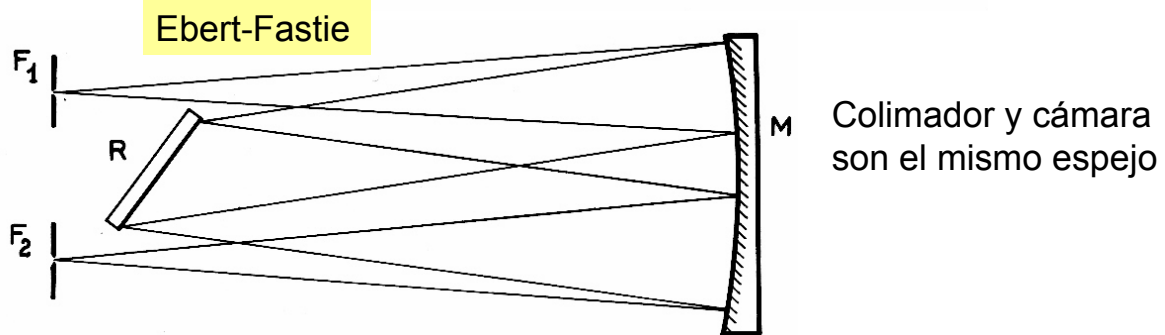
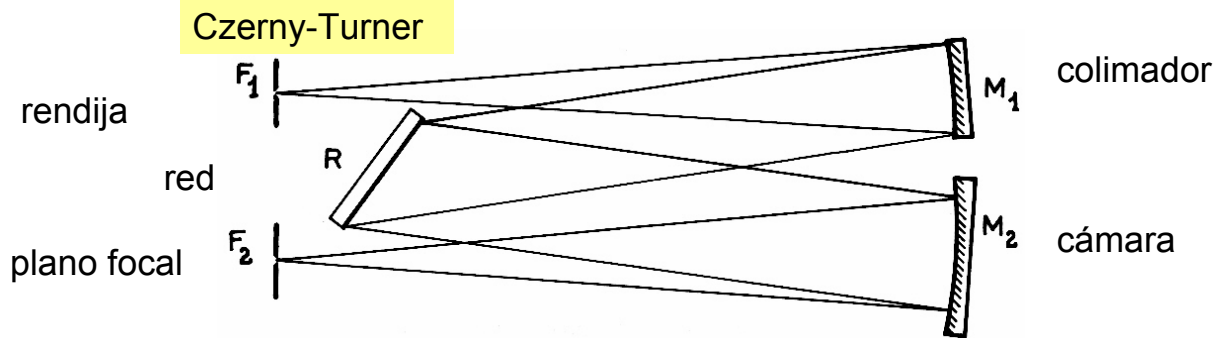
$$\lambda' - \lambda = \lambda / m$$



20

ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos de red

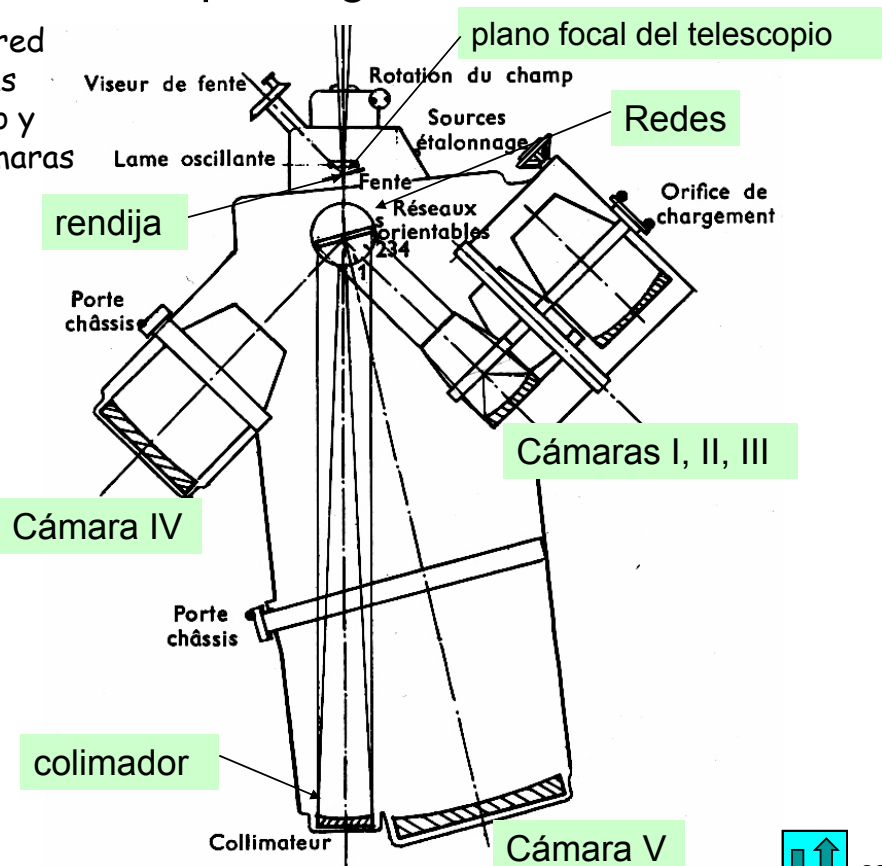
Usualmente las redes de difracción por reflexión son planas.



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

ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos de red

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



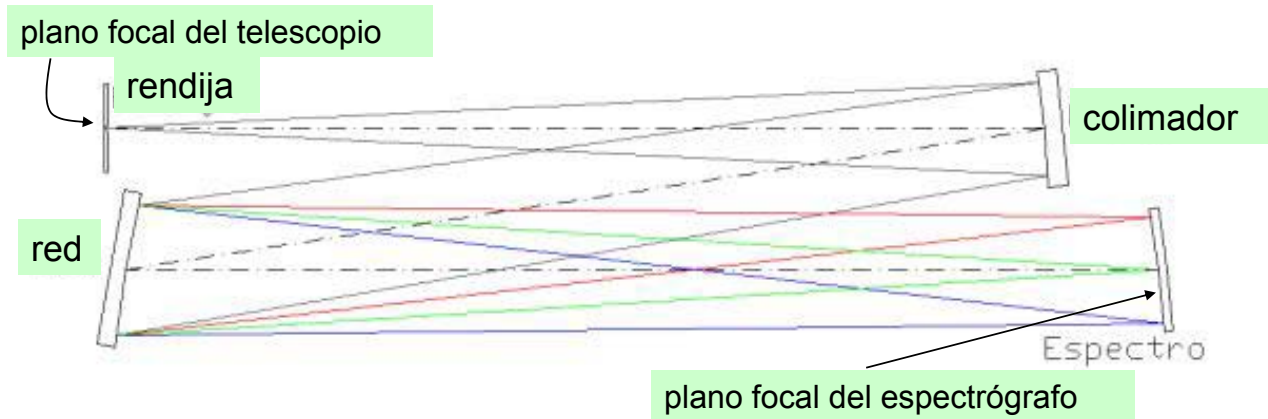
Distancias focales de las cámaras.

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

ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos de red

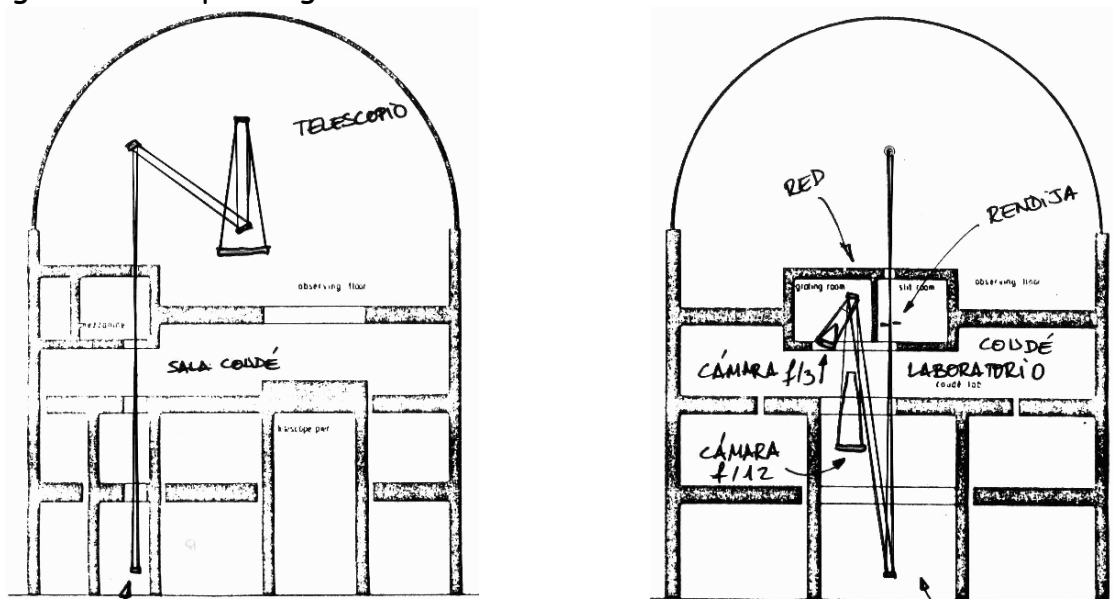
Usualmente las redes de difracción por reflexión son planas. Con redes cóncavas se evita el sistema óptico de cámara ya que la red enfoca el espectro.

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



ESPECTROSCOPIA: 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.



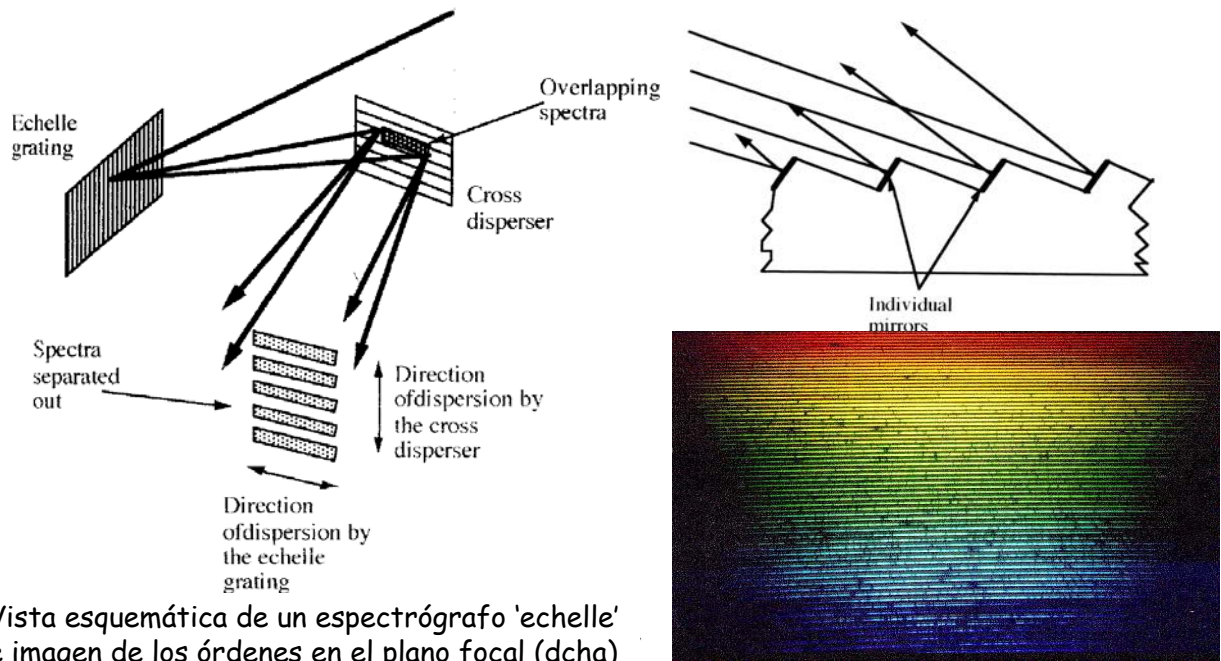
Espectrógrafo coudé del 2.2m de Calar Alto.



ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos 'echelle'



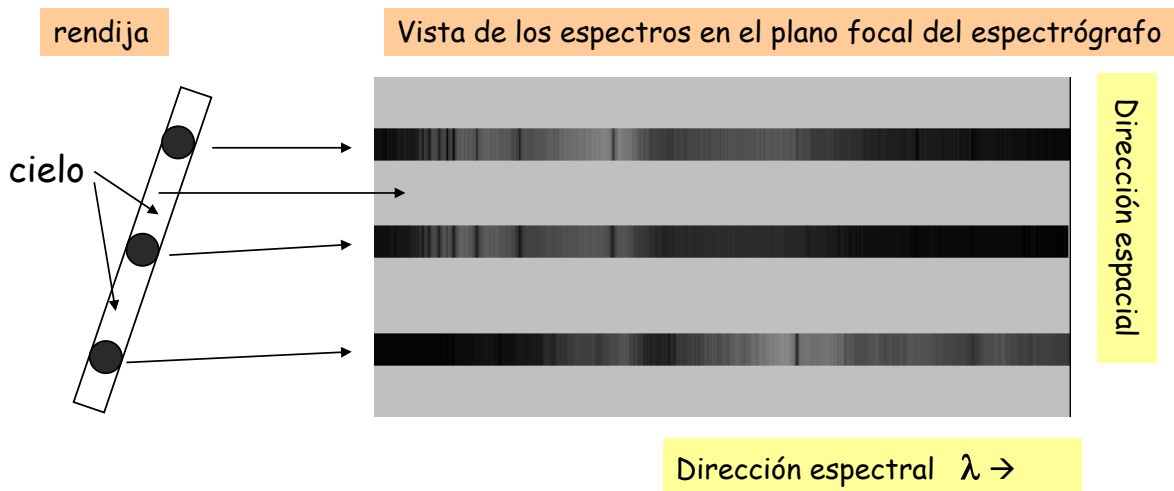
Son espectrógrafos de alta dispersión que trabajan en órdenes altos. Al existir un gran solapamiento de órdenes hay que instalar un dispersor cruzado para separarlos en el plano focal del espectrógrafo.



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

ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos con rendija larga

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

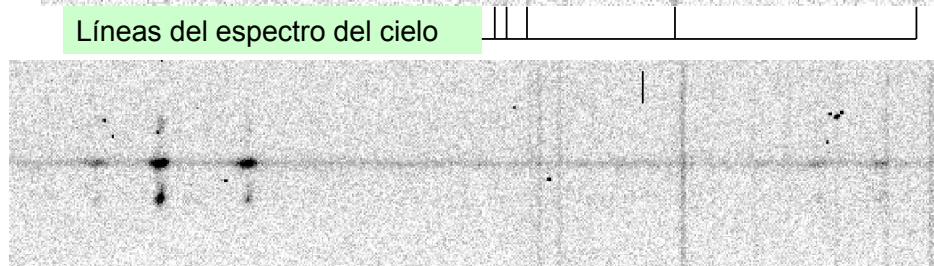
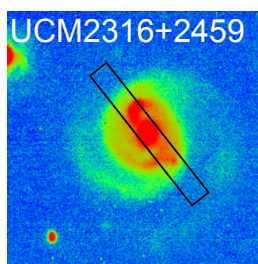
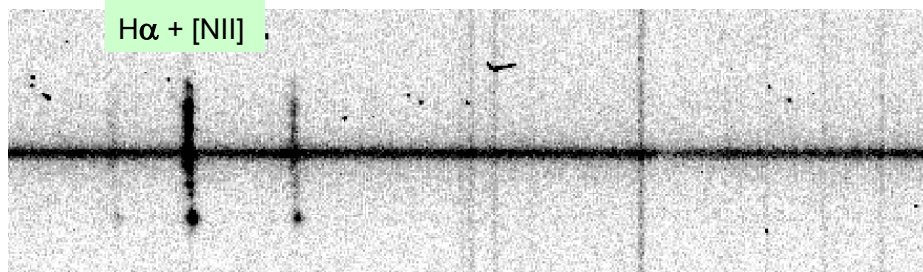
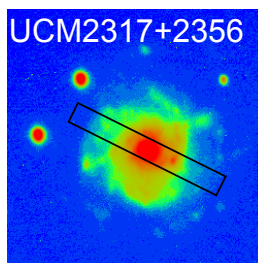
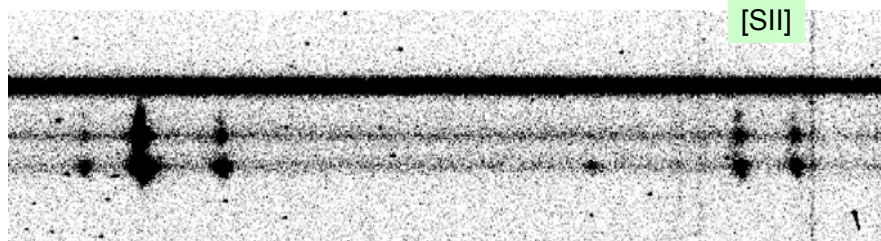
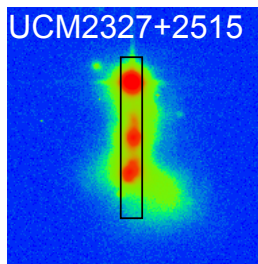


Ventajas:

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



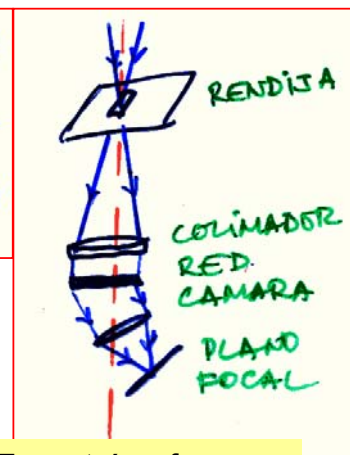
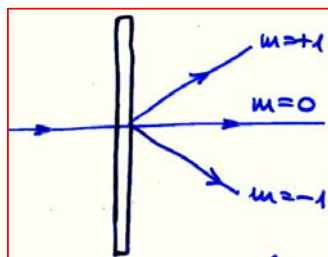
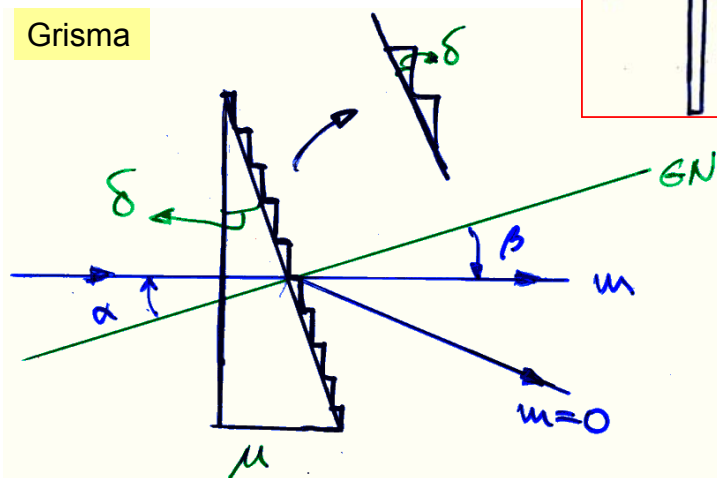
Ejemplos de espectros con rendija larga



ESPECTROSCOPIA: 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

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

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

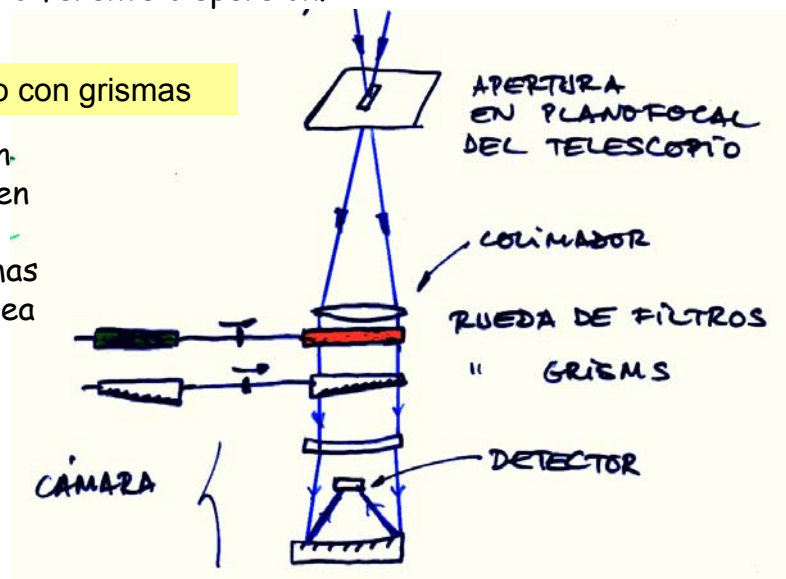
Los grismas (*grism*: *grating* + *prism*) son redes de transmisión grabadas sobre un prisma que desvía la luz para que un orden diferente del $m=0$ (el primer orden generalmente) salga en la dirección del eje óptico.

ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos de grismas(1)

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

Espectrógrafo con grismas

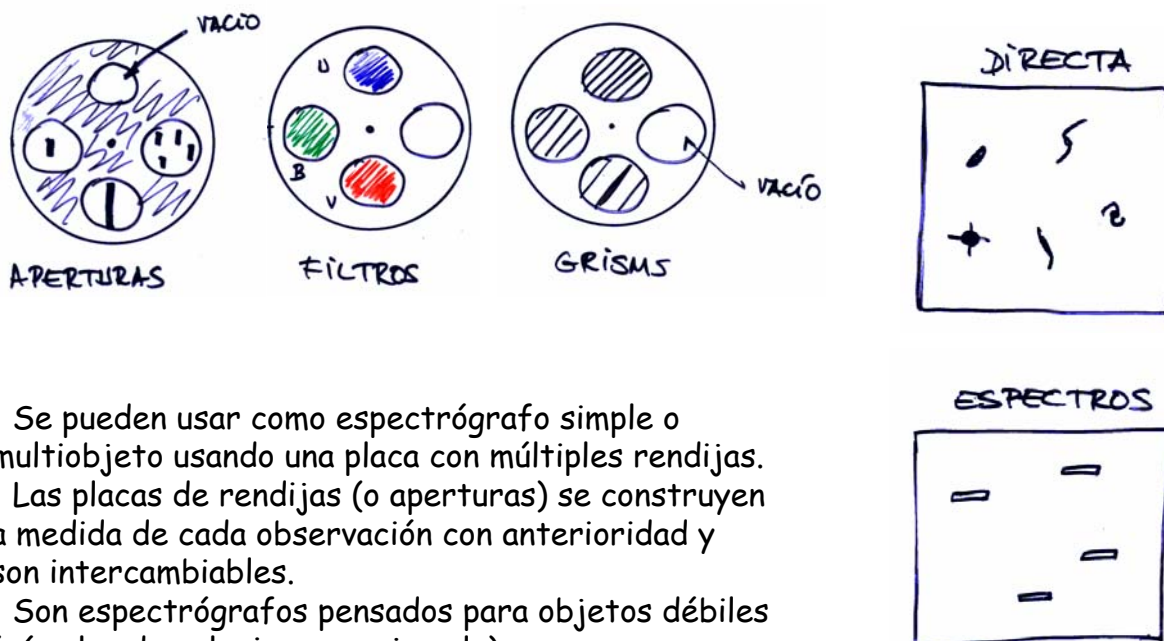
Como todos los grismas envían en el eje óptico la luz del orden decidido en su diseño, puede emplearse una rueda de grismas de diferente dispersión que sea seleccionable.



Como el paso de red es grande en estas redes se reducen las aberraciones de coma ($\propto 1/\sigma$) y astigmatismo ($\propto 1/\sigma^2$), permitiendo campo amplio de visión.

ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos de grismas(3)

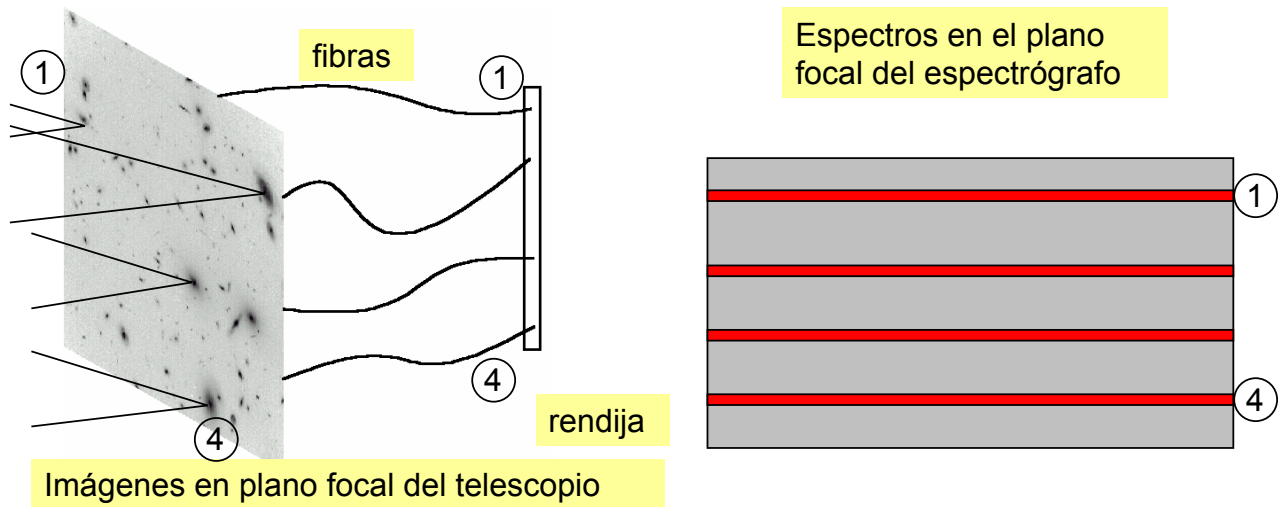
Se emplean como cámaras directas para obtener imágenes del campo al que apunta el telescopio o como espectrógrafos de resolución baja.



- 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.

ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos de fibras(1)

Es otro tipo de espectroscopía multiobjeto. La idea es trasladar mediante fibras la luz de objetos a la rendija de un espectrógrafo.



Las fibras están colocadas justo en la posición del plano focal correspondiente a la imagen de cada galaxia; por eso se necesita realizar astrometría de precisión con anterioridad. El número de fibras es mucho mayor que el mostrado en este esquema sencillo.



32

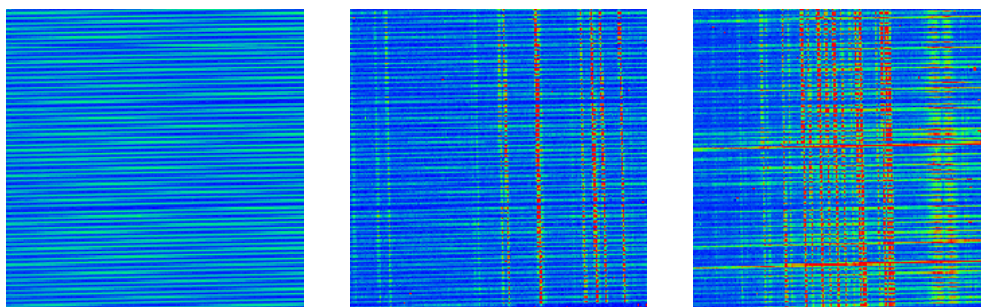
ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos de fibras(2)

Espectrógrafos de Máscara de aperturas:
Placas a medida para cada campo con perforaciones donde se acoplan las fibras.

Ejemplo:
Espectrógrafos de SDSS: 640 perforaciones en un disco de aluminio. La luz se envía a dos espectrógrafos dobles (dos canales)



Colocando las fibras



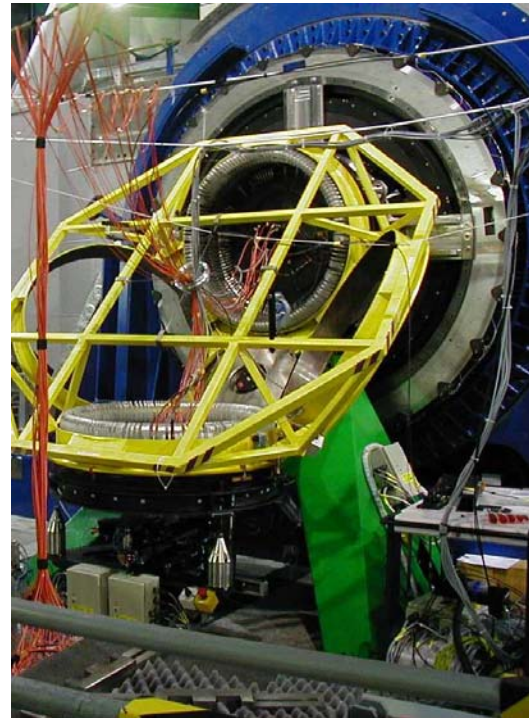
Flat field, arco de comparación e imagen científica con múltiples espectros.
<http://skyserver.sdss.org/en/sdss/instruments/instruments.asp>



33

ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos de fibras(3)

Espectrógrafos de fibras móviles.
Las fibras se colocan a voluntad mediante sistemas robóticos.

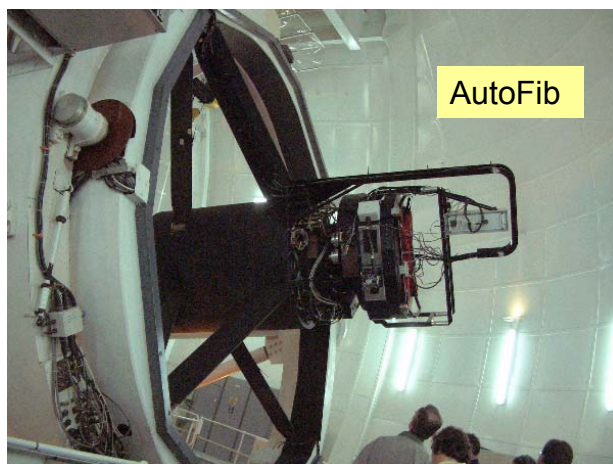


MEDUSA (ESO VLT, 132 fibras de 1".2)
<http://www.eso.org/instruments/flames/Giraffe.html>

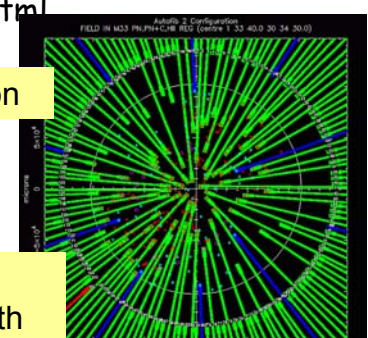


ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos de fibras(4)

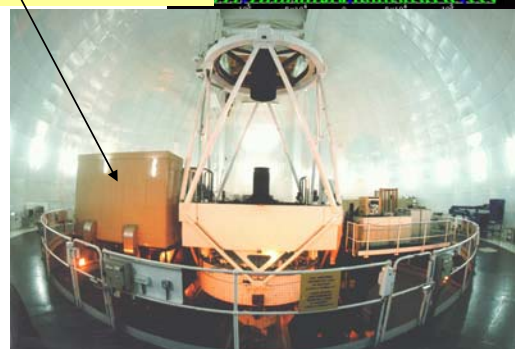
Otro ejemplo de espectrógrafo de fibras móviles: AF2/WYFFOS (WHT 4.2m; ING, La Palma) (módulo de 150 fibras de 1".6 o 90 micras)
<http://www.ing.iac.es/Astronomy/instruments/af2/index.html>



Configuración



WYFFOS en una plataforma Nasmyth



Las fibras son colocadas por un robot (AutoFib) en las posiciones previamente seleccionadas (configuración, práctica 7) en el foco primario del WHT 4.2m. Tienen 26m y conducen la luz hasta WYFFOS (Field Fibre Optical Spectrograph) en la plataforma Nasmyth.



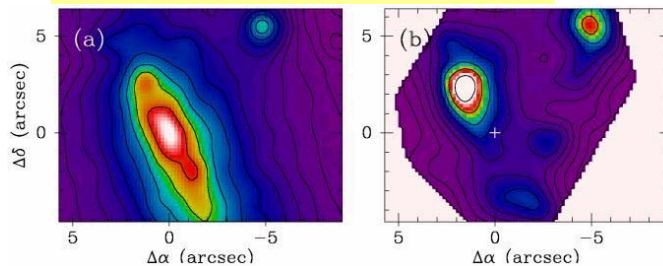
ESPECTROSCOPIA: Espectrógrafos de fibras(5)

Espectrógrafos de haces de fibras.
 Las fibras forman un paquete que permite obtener el espectro de cada zona de un objeto extenso.
 Con ellos se pueden hacer mapas de intensidad, de velocidad, de índices espectrales ...

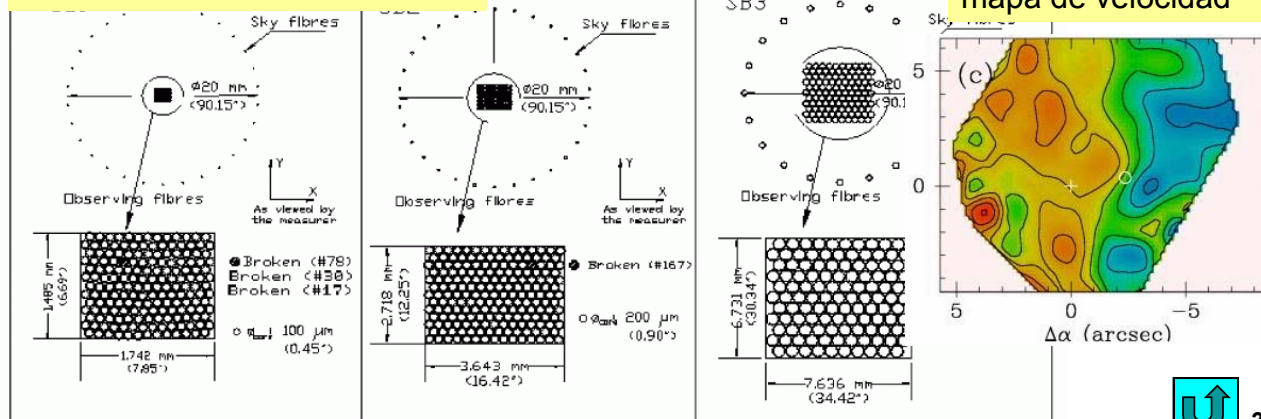
INTEGRAL (WHT 4.2m)

<http://www.ing.iac.es/PR/newsletter/news3/integral.html>

Mrk370 en filtro V y [OIII]5007



Haces de fibras de INTEGRAL



36

ESPECTROSCOPIA: Preparación de observaciones

Ejemplo

Supongamos que se quieren obtener (nuestro proyecto científico así lo requiere) espectros de galaxias de $m_r \sim 15$ en el intervalo 6000-7500 Å nm y que se dispone del espectrógrafo IDS del INT 2.5m de La Palma.

DATOS

TELESCOPIO INT 2.5m $f/15 \rightarrow f=38.130$ m
 Escala de placa $P=206265/38130 = 5.41$ arcsec/mm
 ESPECTRÓGRAFO IDS

cámaras: $f_2^a = 235$ mm $f_2^b = 500$ mm
 colimador: $f_1 = 1275$ mm

CCDs TEK#5 y EEV4280 (véase info 2)

1024 píxeles x 24 micras = 24.6 mm

2048 píxeles x 13 micras = 26.6 mm



37

ESPECTROSCOPIA: Preparación de observaciones

Ejemplo (cont)

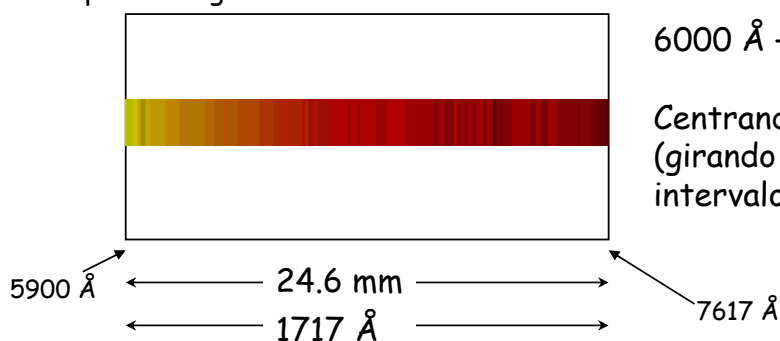
SELECCIÓN

- 1) RED R600R (véase info 1)
600 trazos/mm y optimizada para R: $\lambda_b = 6700 \text{ \AA}$
- 2) CÁMARA 235 mm

Dispersión
69.8 $\text{\AA}/\text{mm}$

TEK#5 24.6 mm x 69.8 $\text{\AA}/\text{mm} \rightarrow 1717 \text{ \AA}$
 EEV4280 26.6 mm x 69.8 $\text{\AA}/\text{mm} \rightarrow 1857 \text{ \AA}$
 (cualquiera valdría, elijo de momento TEK#5)

Espectro registrado en el CCD



ESPECTROSCOPIA: Preparación de observaciones

SELECCIÓN

Ejemplo (cont)

- 3) RENDIJA $w' \sim 3$ píxeles para muestrear adecuadamente
 $w' = 3 \text{ píxeles} \times 24 \text{ } \mu\text{m}/\text{píxel} = 72 \text{ } \mu\text{m}$
 $w = 72 \text{ } \mu\text{m} \times 1275 \text{ mm} / 235 \text{ mm} = 391 \text{ } \mu\text{m}$

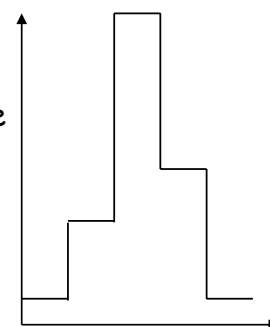
$$w' = w f_2 / f_1$$

Rendiya proyectada en el cielo

$$\phi = w / f$$

$$w = 391 \text{ } \mu\text{m} \rightarrow$$

$$\rightarrow \phi = 391 \text{ } \mu\text{m} \times 5.41 \text{ arcsec}/\text{mm} = 2.1 \text{ arcsec}$$



PUREZA ESPECTRAL $\delta\lambda = 72 \text{ } \mu\text{m} \times 69.8 \text{ } \text{\AA}/\text{mm} = 5 \text{ } \text{\AA}$

ESCALA ESPACIAL

24 μm (1 píxel) en plano focal del espectrógrafo (CCD)

$$h'_i = 24 \text{ } \mu\text{m} \rightarrow h_i = 24 \text{ } \mu\text{m} \times 1275 / 235 = 130 \text{ } \mu\text{m}$$

130 μm en plano focal del telescopio

$$\rightarrow 130 \text{ } \mu\text{m} \times 5.41 \text{ arcsec}/\text{mm} = 0.7 \text{ arcsec en el CCD}$$

Escala 0.7 arcsec/mm

Tablas (no completas) de las redes disponibles en el IDS del INT

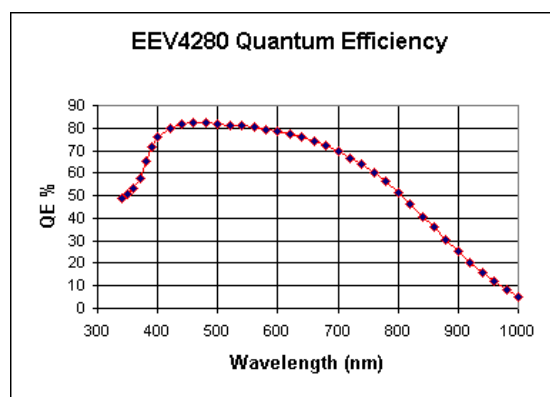
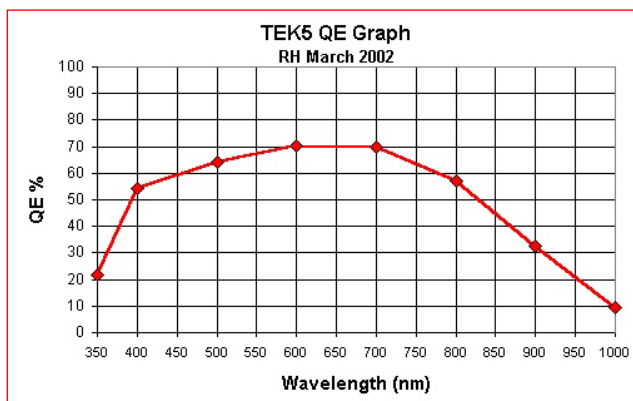
Table 5: Characteristics of the IDS gratings with the 500 mm camera

Name ¹	Origin ²	Ruling (lines mm ⁻¹)	Blaze (Å)	Efficiency ³ (%)	Central wavelength (Å)	Dispersion ⁴ (Å mm ⁻¹)	Entrance slit for 30 μm at detector (arcsec)
R150V	B+L	150	5250	66	5500	132.2	0.51
R300V	NPL	300	5460	72	5500	66.1	0.52
R400B	B+L	400	3900	50	4000	49.6	0.52
R400V	B+L	400	5100	72	5500	49.7	0.52
R400R	B+L	400	7250	59	8000	49.9	0.54
R600R	B+L	600	6700	65	7000	33.3	0.56
R600IR	B+L	600	10000	70	8500	33.4	0.58
R632V	NPL	632	5460	72	5000	31.6	0.54

Table 4: Characteristics of the IDS gratings with the 235 mm camera

R150V	B+L	150	5250	66	5500	271.3	1.03
R300V	NPL	300	5460	72	5500	138.5	1.05
R400B	B+L	400	3900	50	4000	104.5	1.06
R400V	B+L	400	5100	72	5500	104.5	1.08
R400R	B+L	400	7250	59	8000	104.4	1.11
R600R	B+L	600	6700	65	7000	69.8	1.16
R600IR	B+L	600	10000	70	8500	70.2	1.19

Algunos parámetros de los CCDs usados con el IDS



TEK#5
 Tamaño chip 1024x1024 píxeles
 Tamaño píxel 24x24 micras

EEV4280
 2048x4100 píxeles
 13.5x13.5 micras