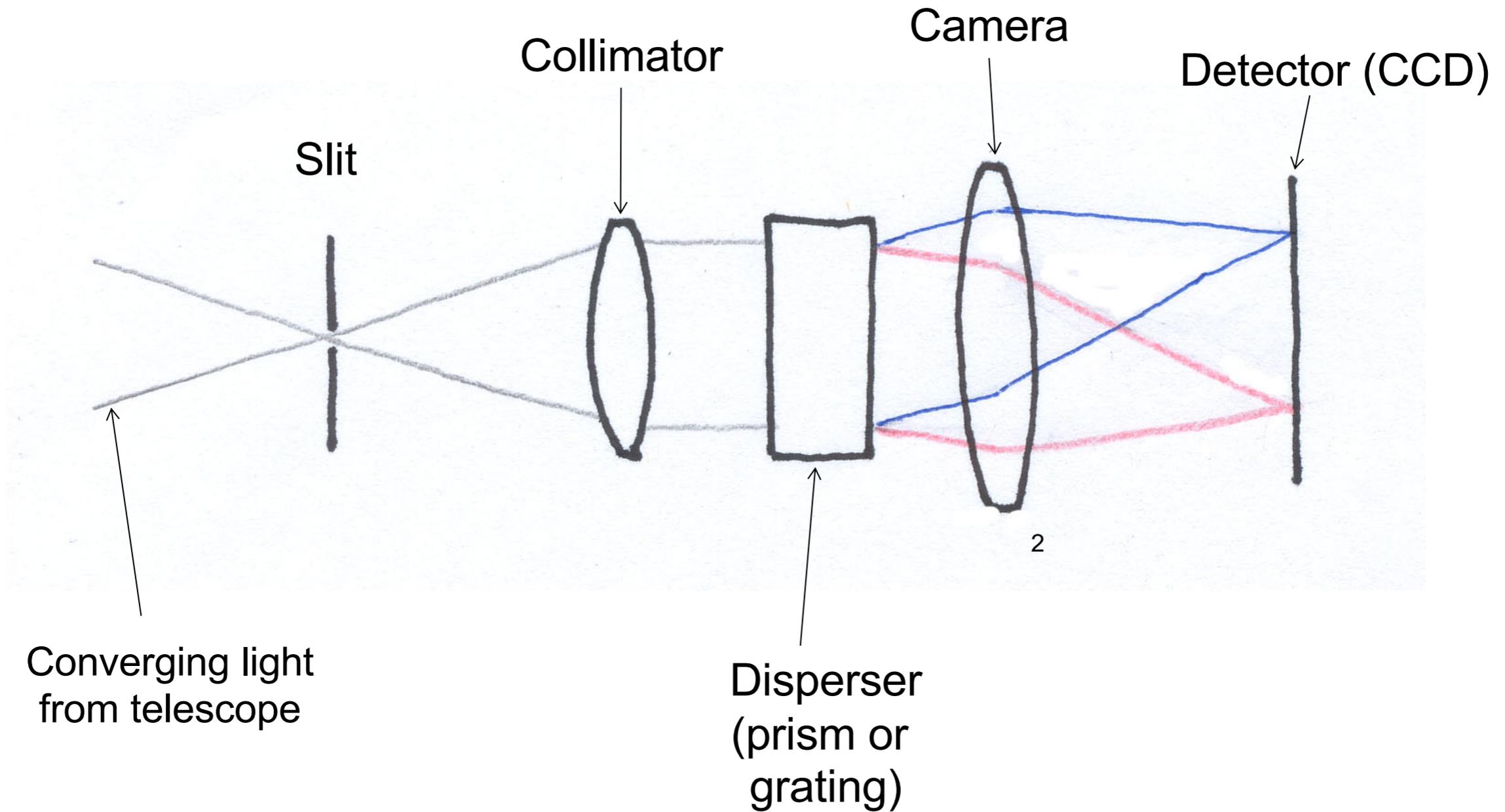


Técnicas Astronómicas

Clase 9: Espectroscopía

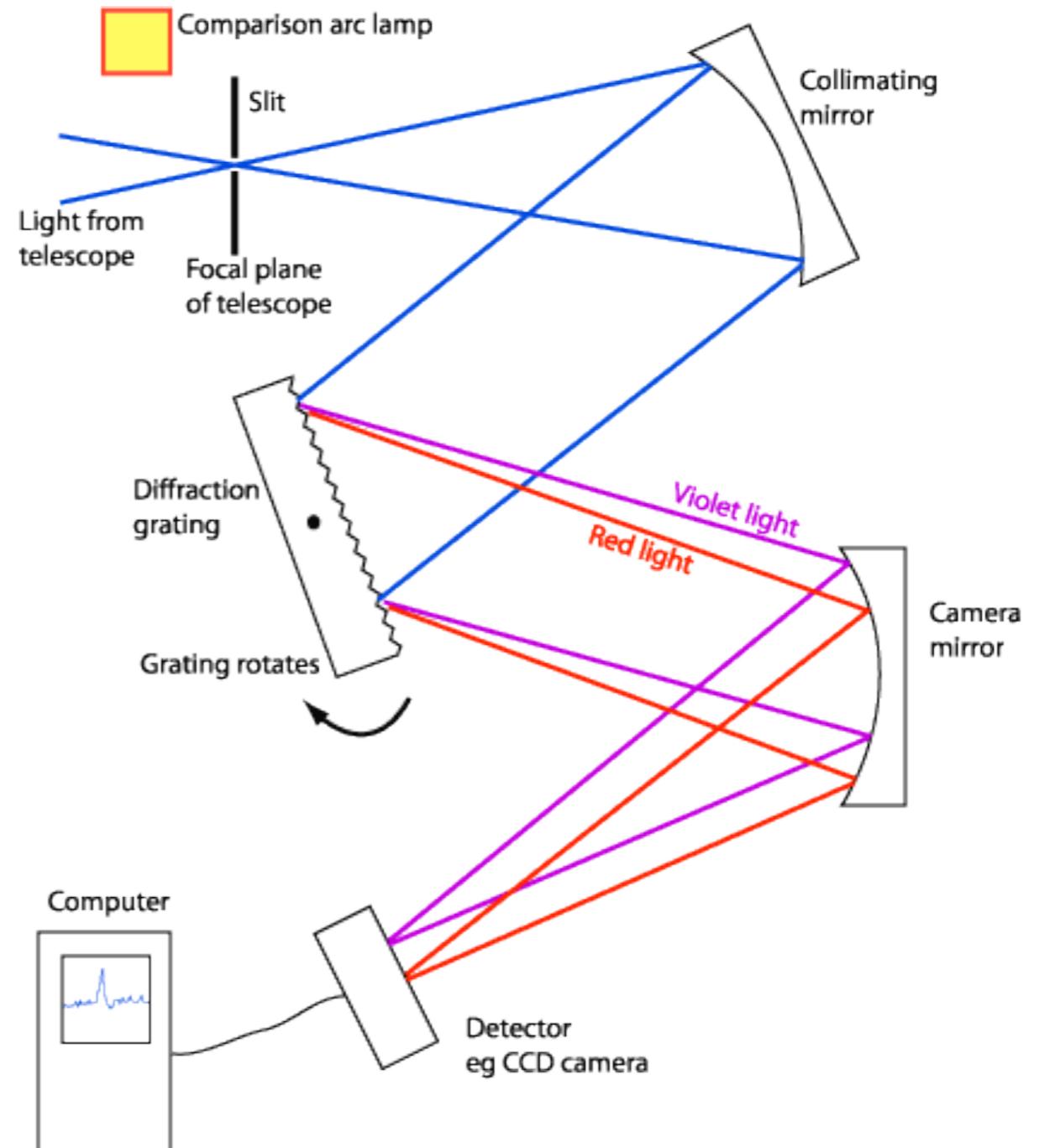
Teórico: Cecilia Mateu (con algún agregado de G. Tancredi)

Schematic Spectrograph



Slit Spectrographs

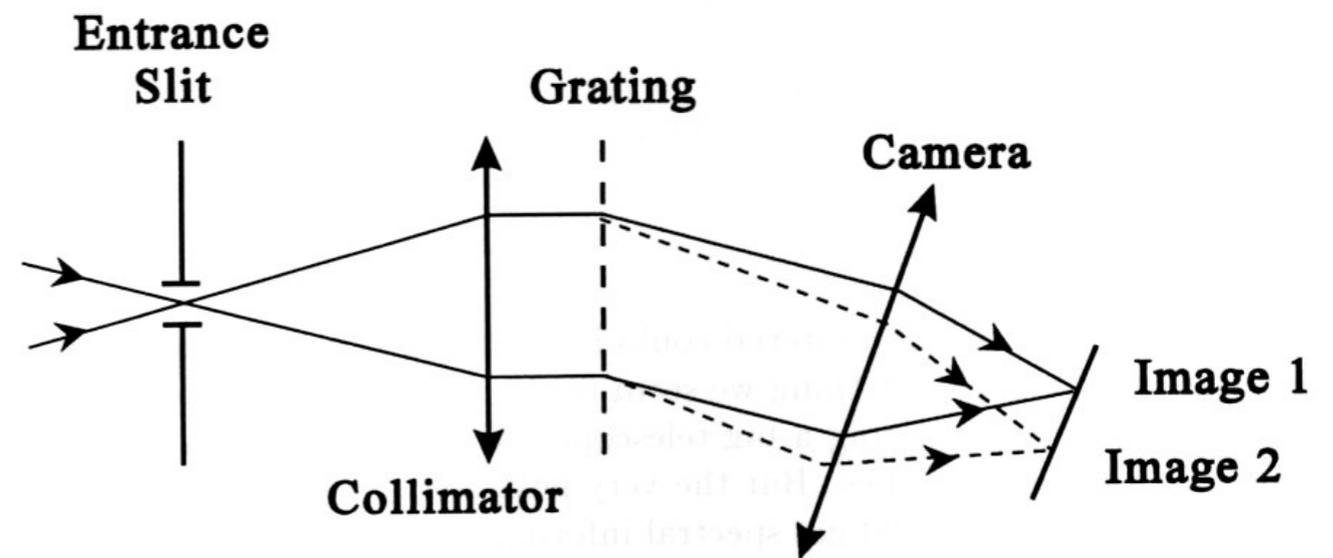
- **Entrance Aperture:** A slit, usually smaller than that of the seeing disk
- **Collimator:** converts a diverging beam to a parallel beam
- **Dispersing Element:** sends light of different colors into different directions
- **Camera:** converts a parallel beam into a converging beam
- **Detector:** CCD, IR array, photographic plate, etc.



A Schematic Diagram of a Slit Spectrograph

Types of Spectrographs

- By type of dispersing element:
 - Grating (transmission or reflection)
 - Prism (rare, except as a cross-dispersor)
 - Grism = grating on a prism
 - Narrow-band imaging
 - Interferometry



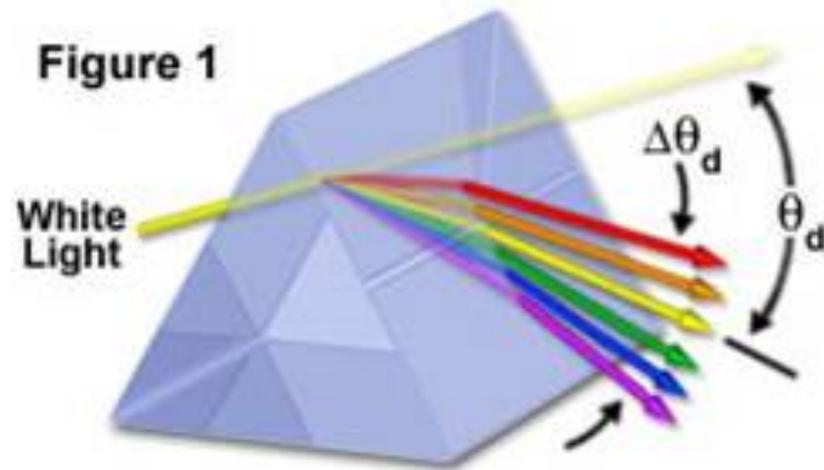
- By geometry:
 - Long-slit or multislit
 - Aperture of multi-fiber
 - Integral field units (IFU): lenslets or fiber bundles
 - Tunable imagers (e.g., Fabry-Perot)

Espectroscopía

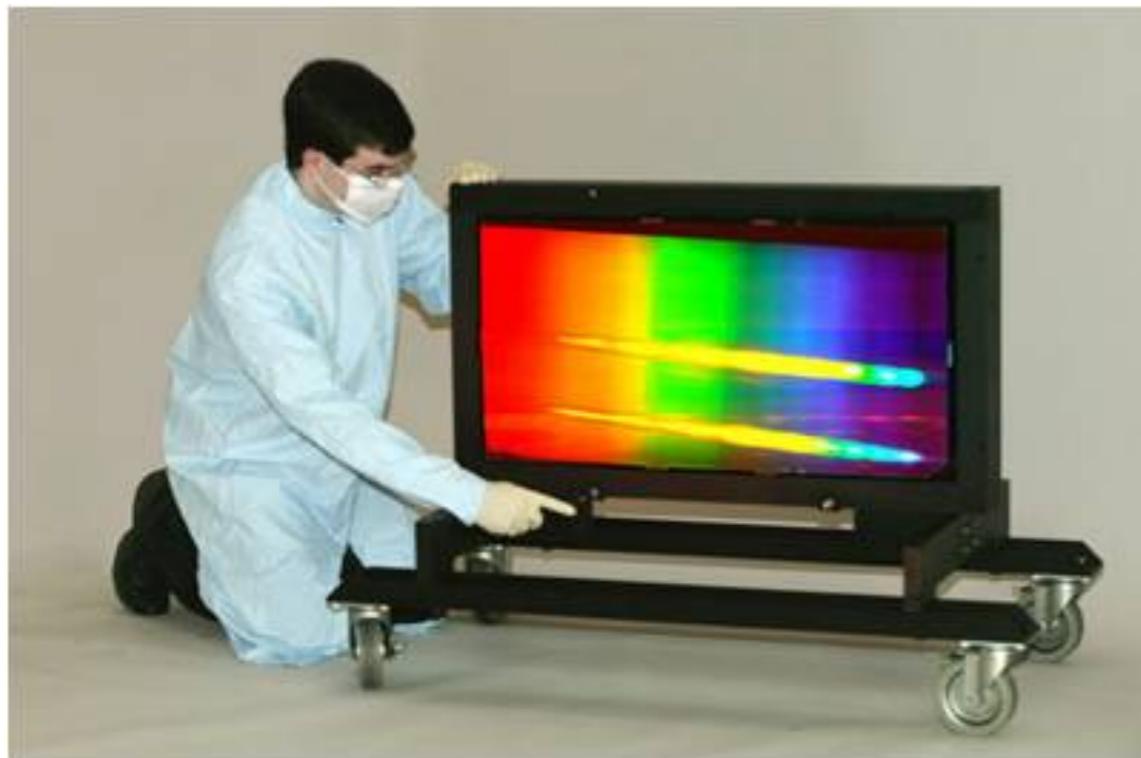
- Distintos Elementos Dispersores
 - Prisma Objetivo
 - Rendija-larga (Long-slit)
 - Grisma (Grating+Prism)
 - Espectrógrafos Echelle
 - Espectrógrafos Multi-Objeto (MOS=Multi-Object Spectrographs)
 - IFUs: Integral Field Unit Spectrographs

Dispersers

Equilateral Dispersing Prism



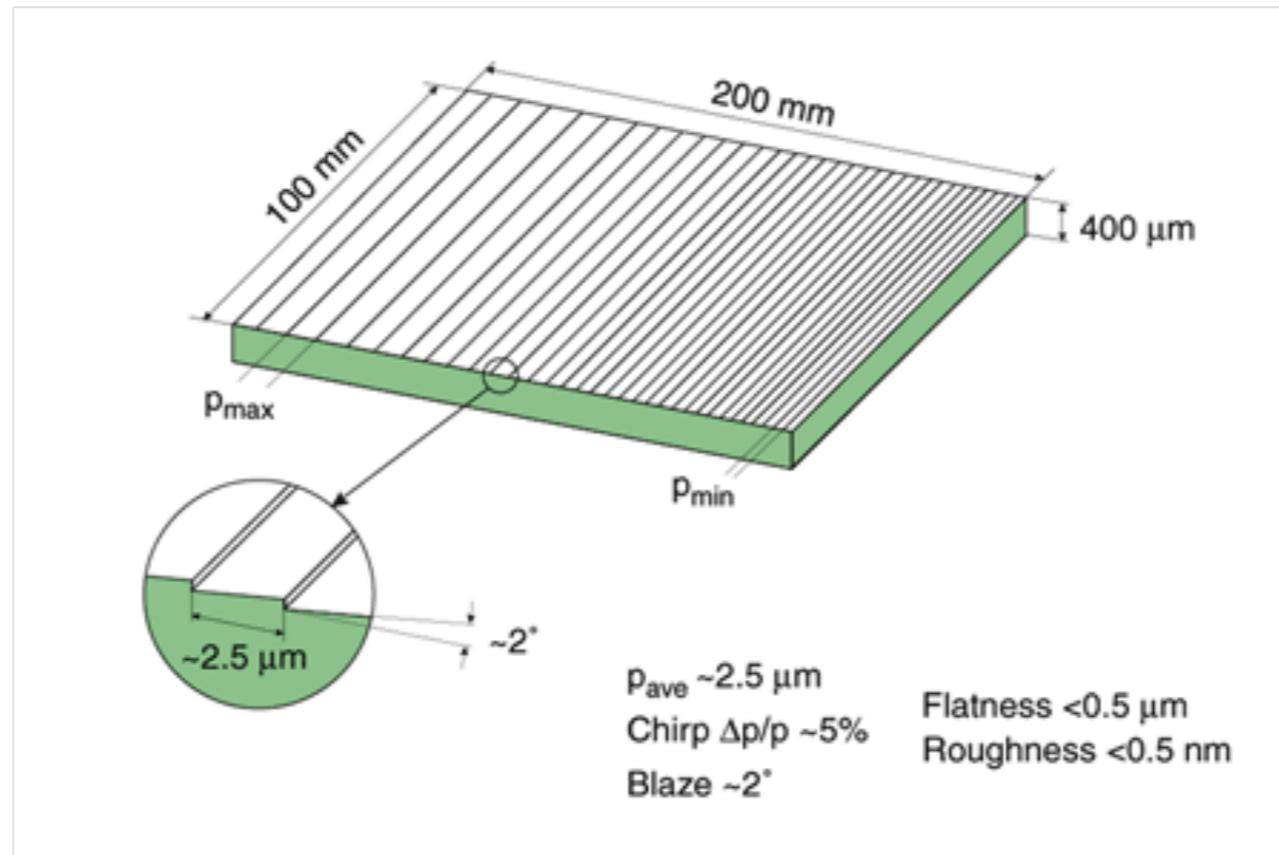
Prisms: disperse light into a spectrum because the index of refraction is a function of the wavelength. Usually: $n(\text{blue}) > n(\text{red})$.



Diffraction gratings: work through the interference of light. Most modern spectrographs use diffraction gratings. Most astronomical spectrographs use *reflection* gratings⁶ instead of *transmission* gratings.

A combination of the two is called a *Grism*.

Diffraction Gratings



7

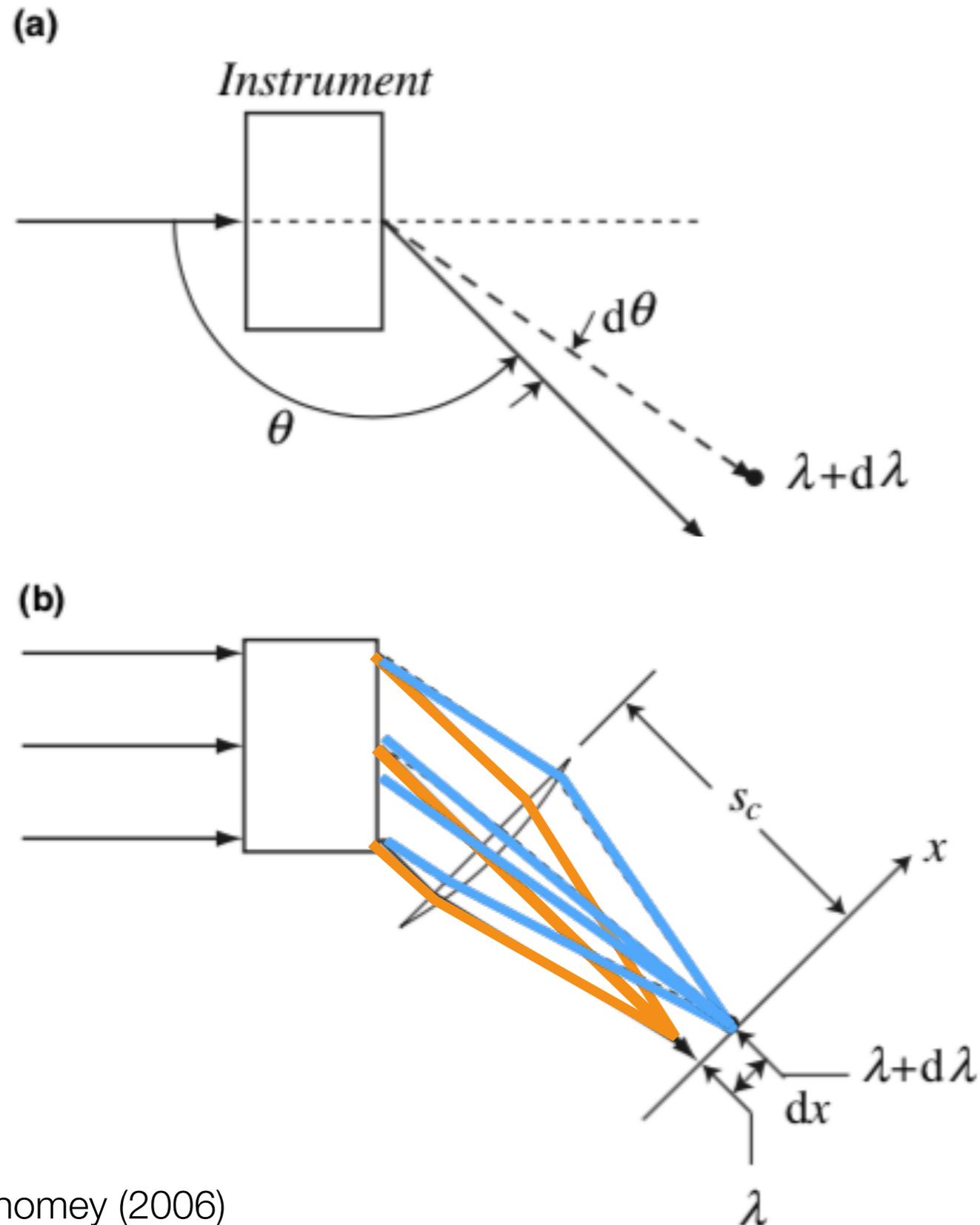
Diffraction gratings are made up of very narrow grooves which have widths comparable to a wavelength of light.

For instance, a 1200g/mm grating has a groove width of about 833nm. The wavelength of red light is about 650nm.

Light reflecting off these grooves will interfere.

This leads to dispersion.

Espectroscopía



Elemento Dispersor: separa el haz incidente de manera que cada haz monocromático λ tiene un ángulo de salida θ diferente

La **dispersión angular** es :

$\frac{d\theta}{d\lambda}$ indica la separación angular resultante por intervalo de λ

El espectrógrafo además debe enfocar diferentes haces incidentes de la misma λ en el mismo punto

$\frac{d\lambda}{dx}$ es la **dispersión lineal**, i.e. en el plano del detector (plano focal)

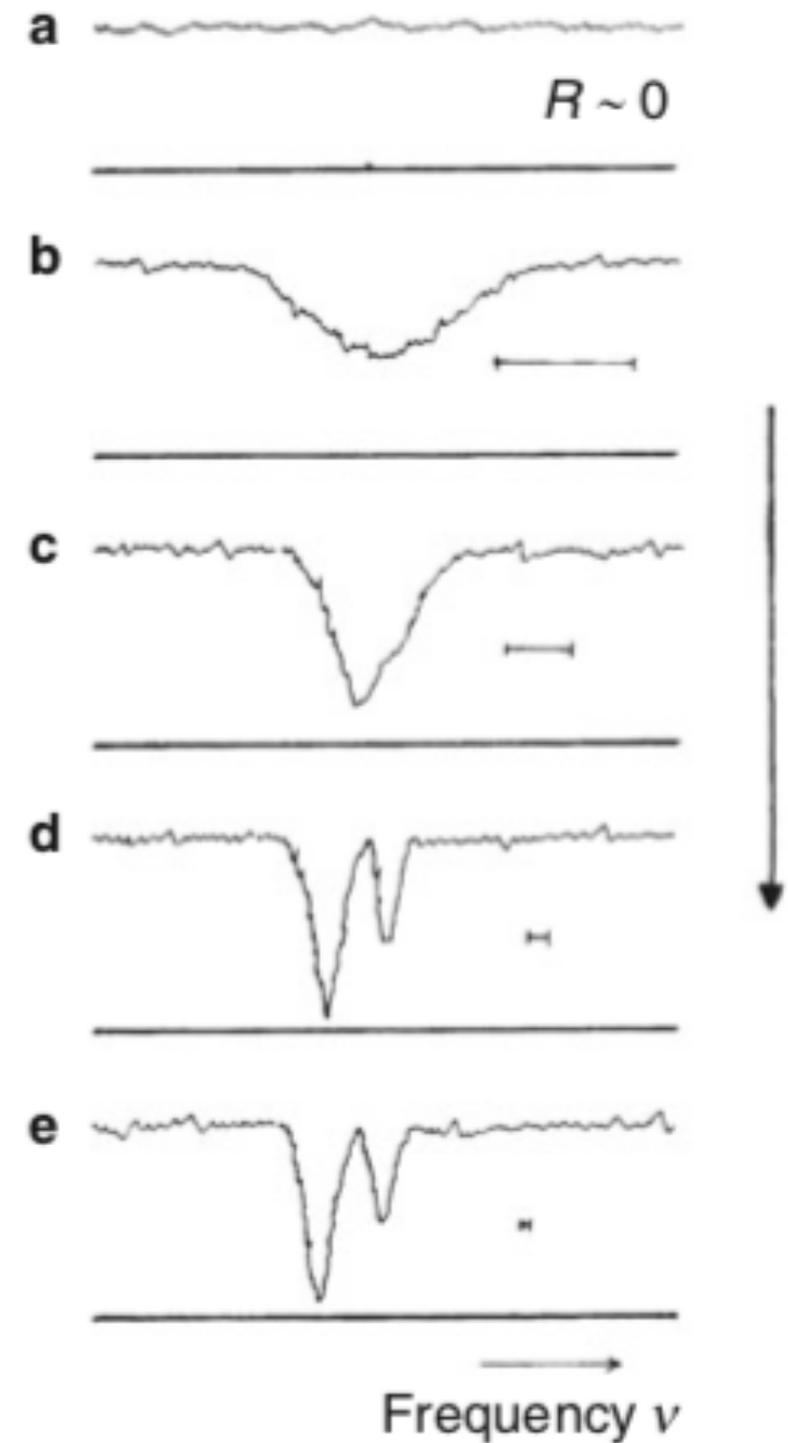
Resolución espectral

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

- R = Poder de resolución (resolving power)

- baja R ~ 1000 - pocos miles
- media R ~ 10.000 -
- alta R >50.000 - 100.000

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



Lena, Lebrun & Mignard,
Observational Astrophysics

Espectroscopía Sin Rendija (Slitless Spectroscopy)

Prisma Objetivo

- Se pone un prisma antes del objetivo del telescopio
- Se produce un espectro para cada objeto en el campo del telescopio



Imagen Directa

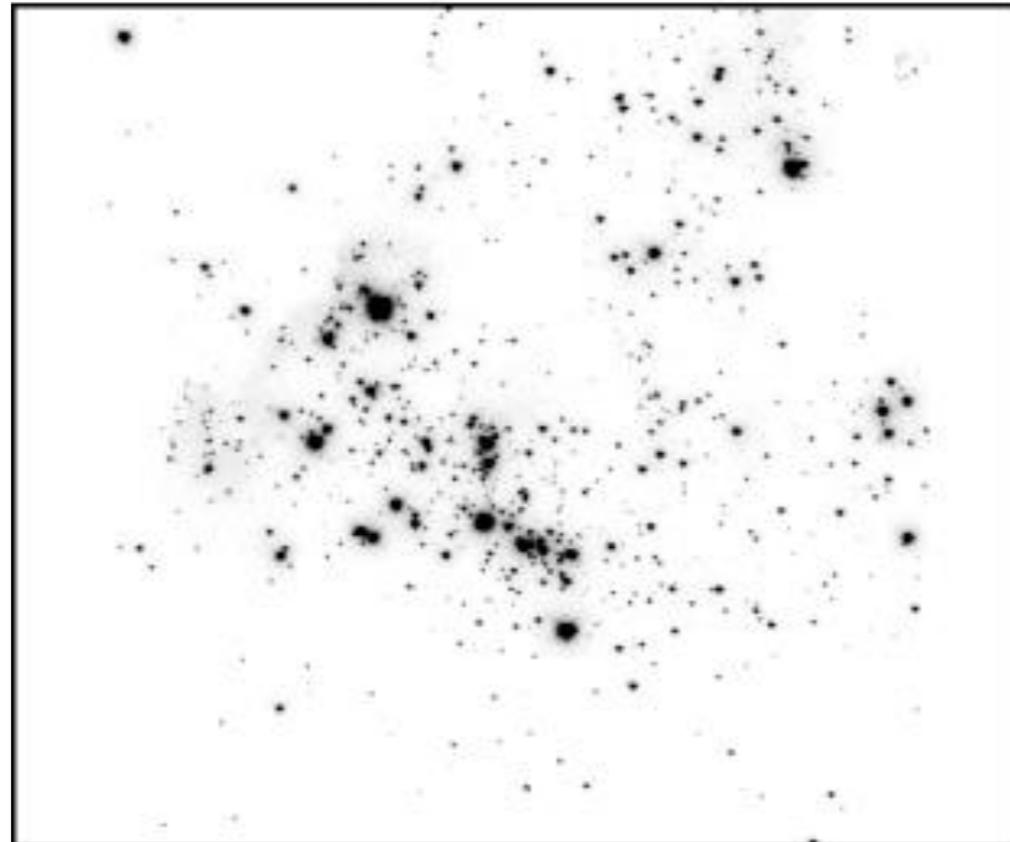
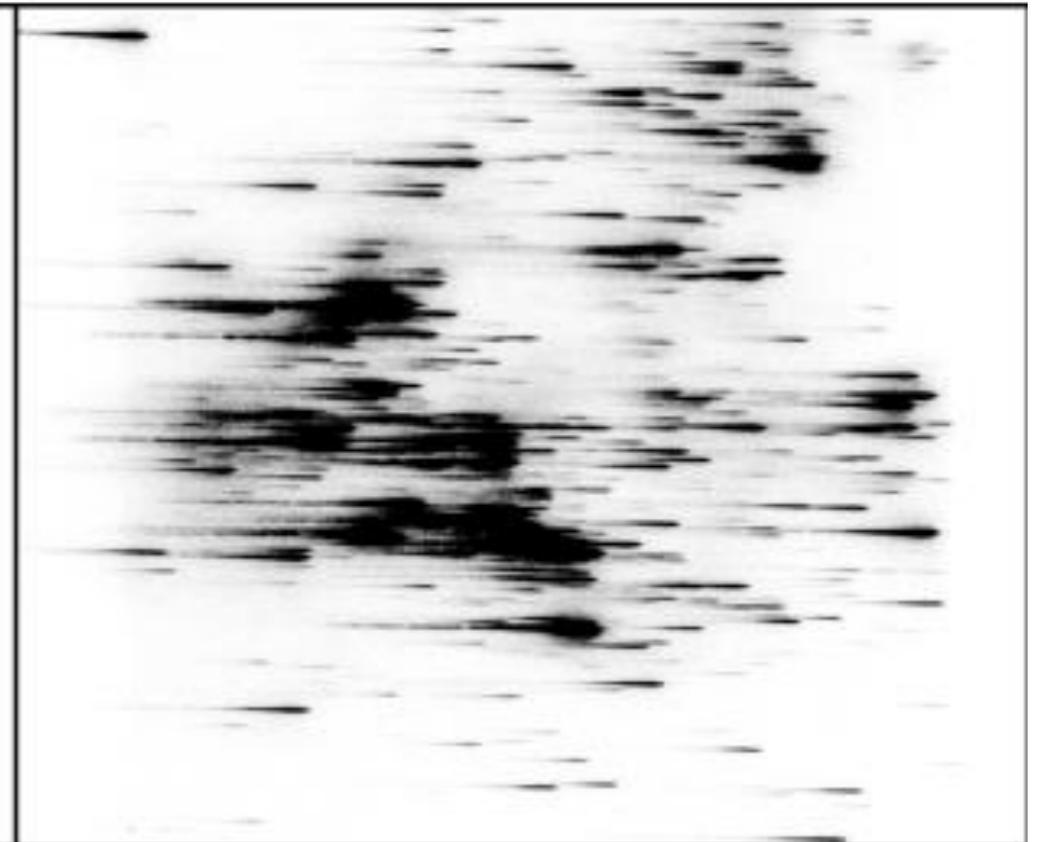


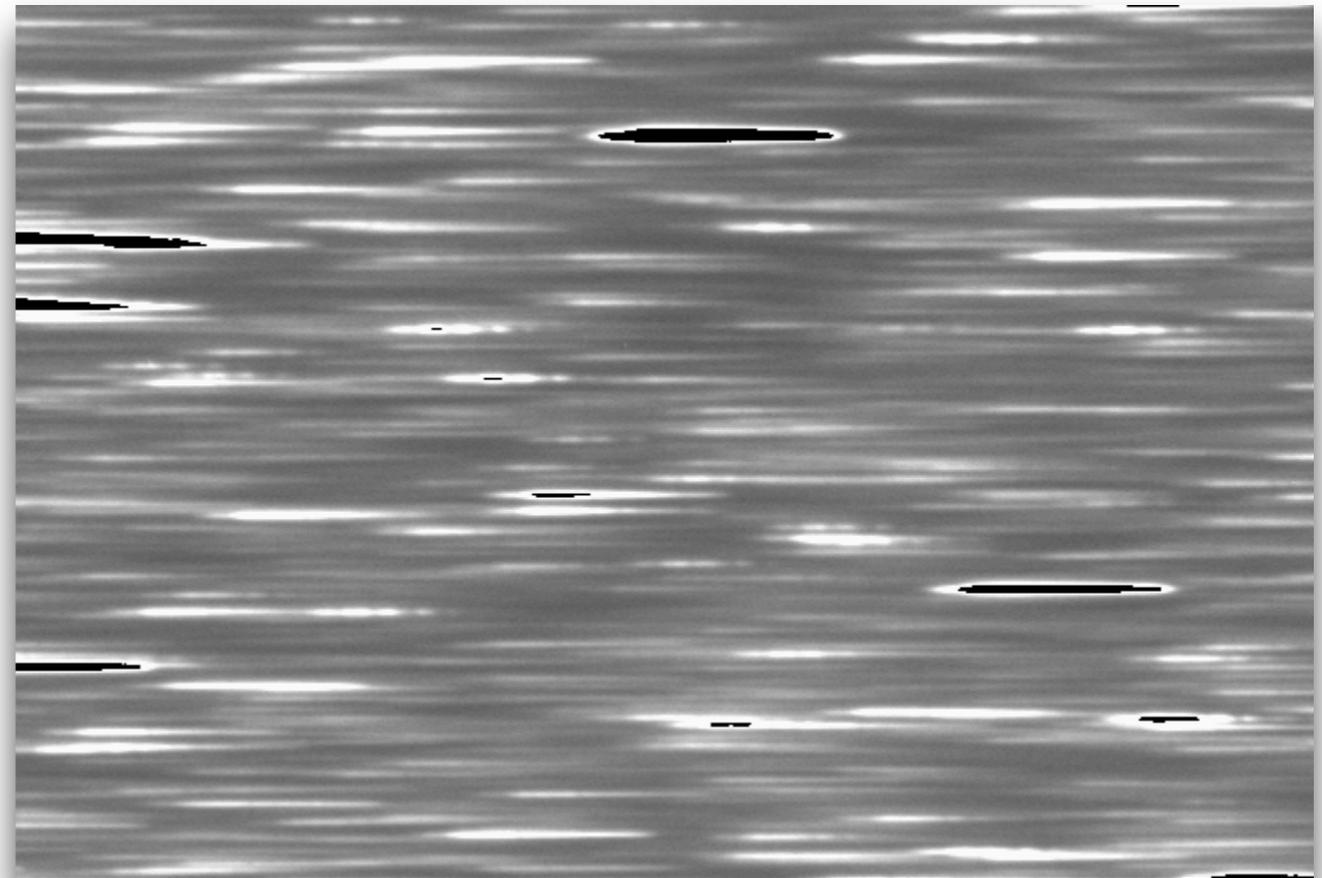
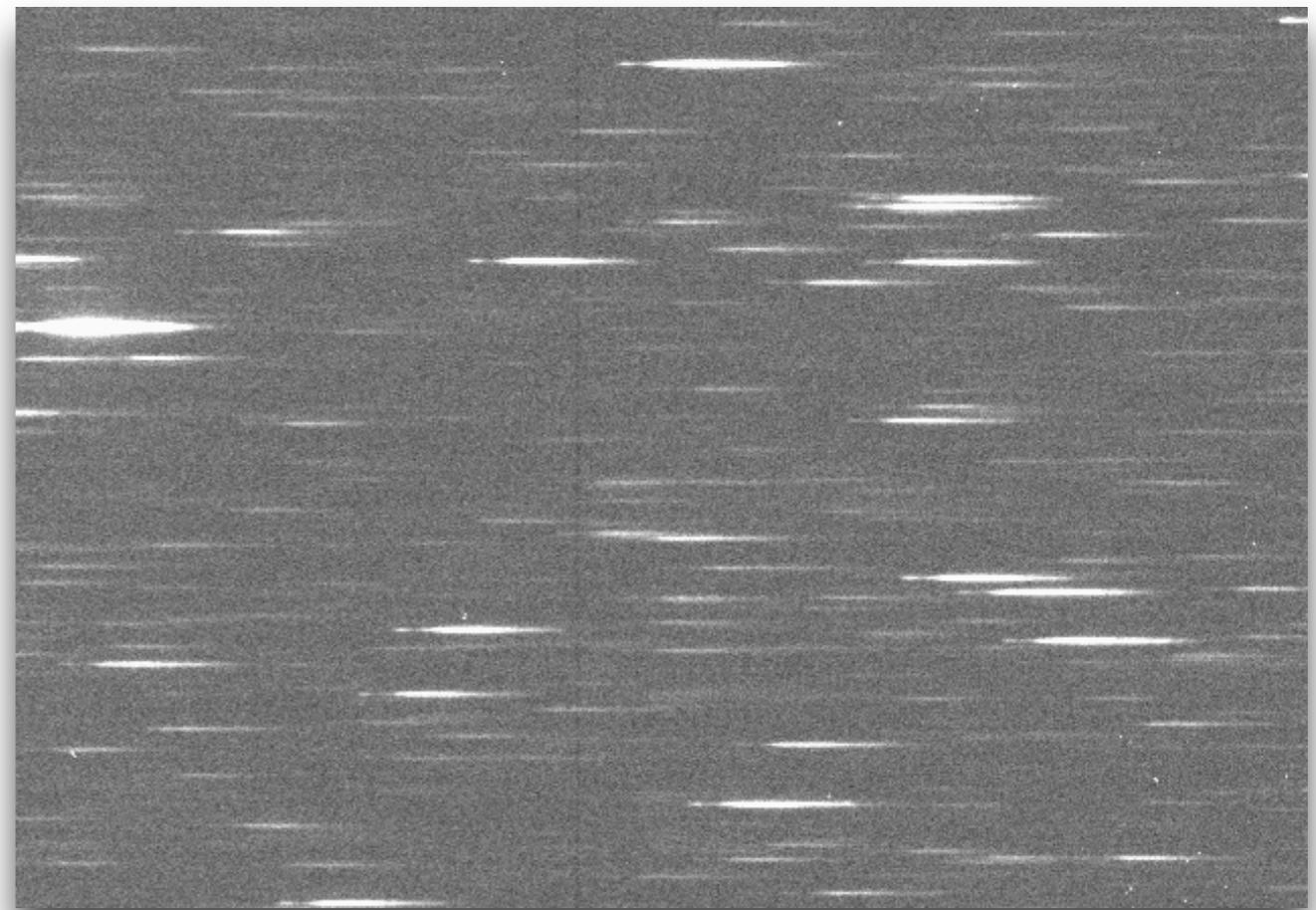
Imagen con prisma objetivo



Prisma Objetivo

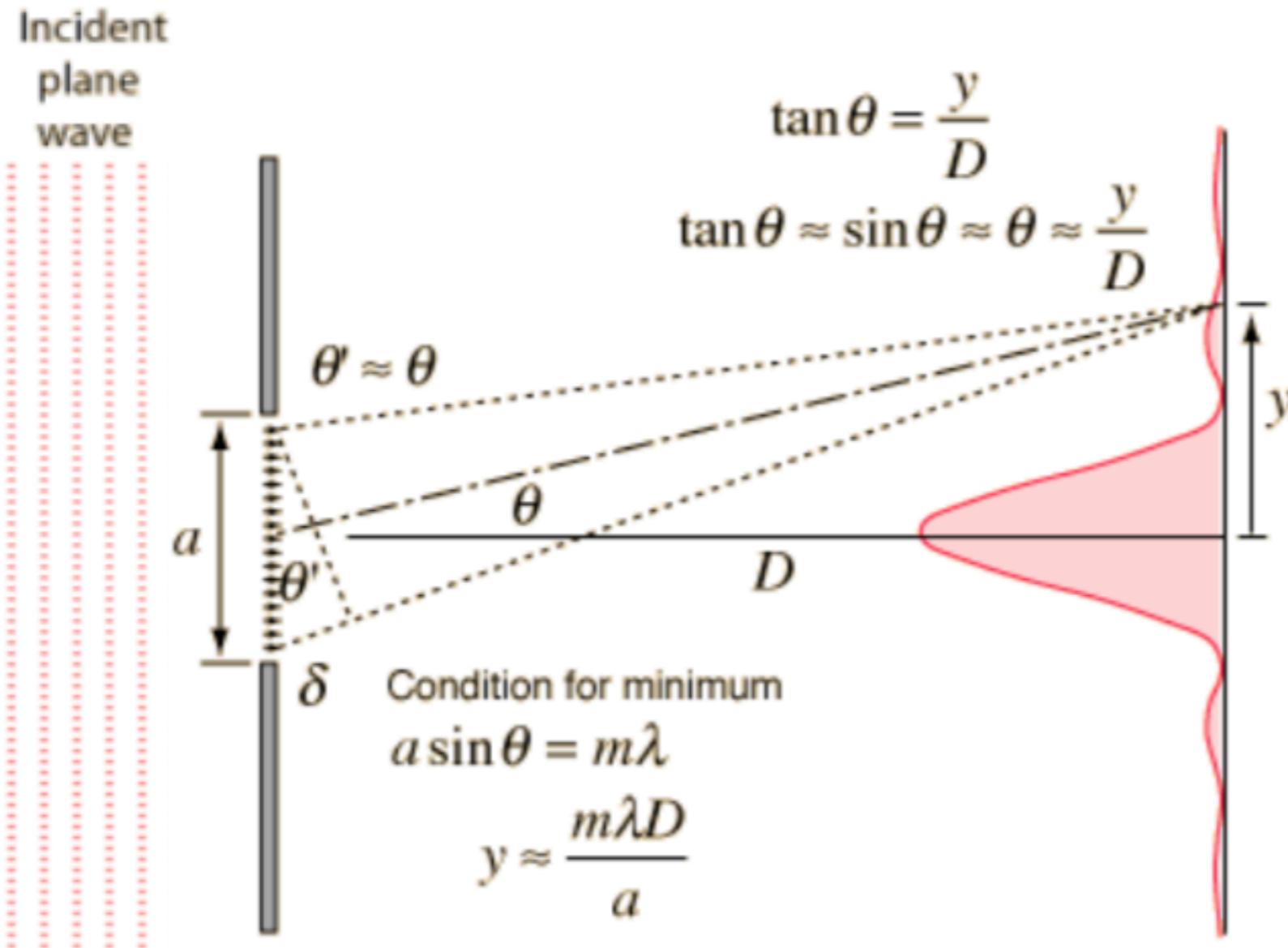
- Pros:
 - Se produce un espectro para cada objeto en el campo, a la vez
 - Útil para sondeos de campo amplio
- Contras:
 - Solapamiento de espectros en campos densos
 - poca dispersión/baja resolución
 - poca transmisión en UV (vidrio)
- Dispersión angular:

$$\frac{d\theta}{d\lambda} \propto \lambda^{-3}$$



Espectroscopía con Rendija (Slit Spectroscopy)

Difracción



Condition for nulls (zero intensity):

$\alpha = \text{integer } (m, \text{ "order" })$
 or
 $\sin(\theta) = m\lambda/a$

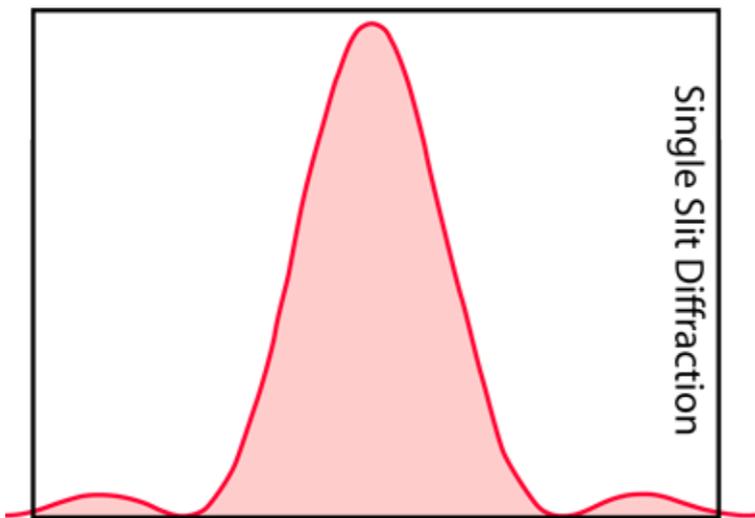
$$I(\theta) = \frac{\sin^2(\pi\alpha)}{(\pi\alpha)^2}$$

máximos de interferencia

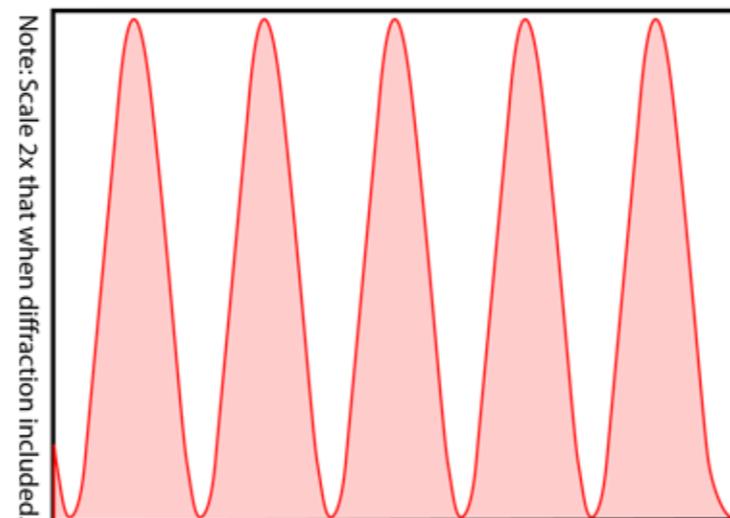
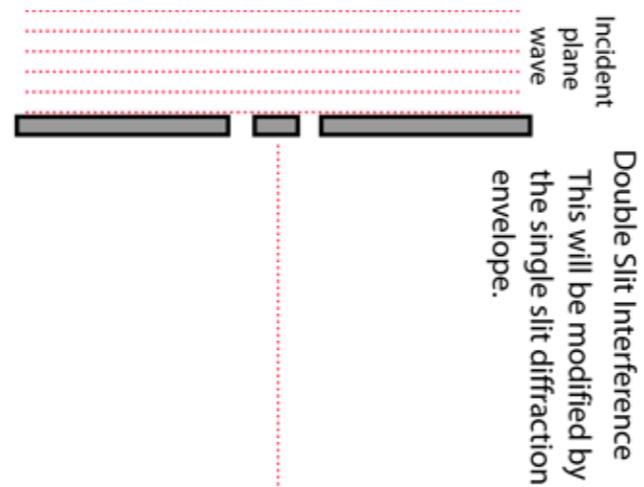
$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{a}$$

Difracción e interferencia

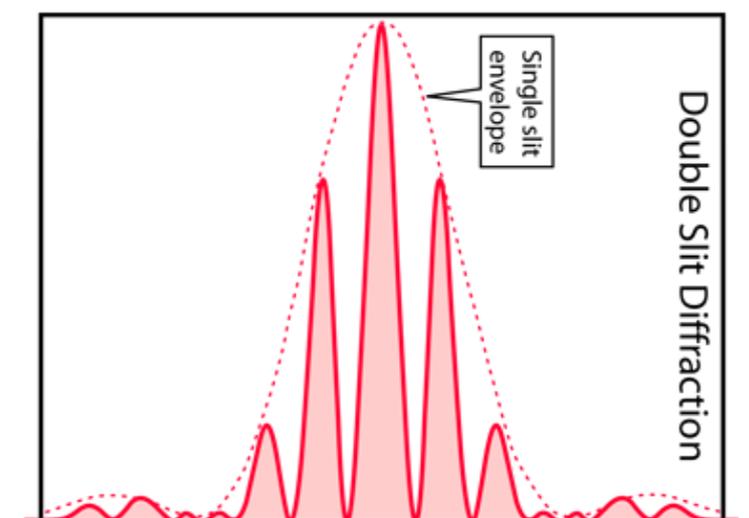
Single Slit Diffraction



Double Slit Interference



Double Slit Diffraction

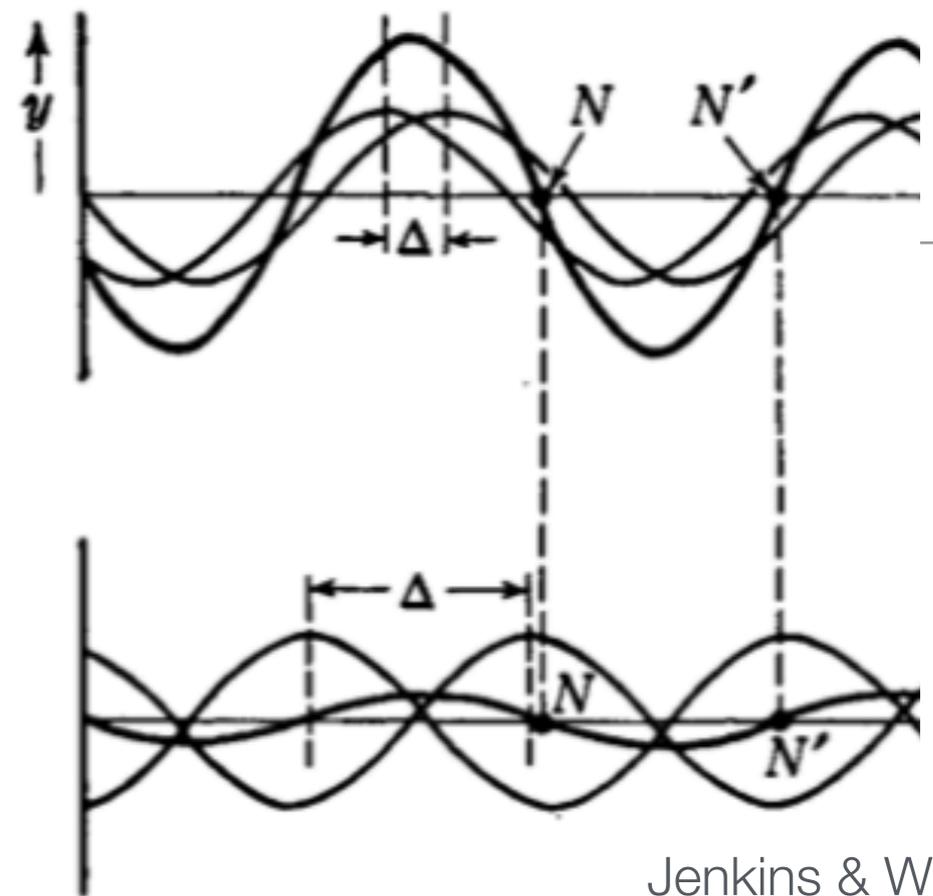


Interferencia: doble rendija

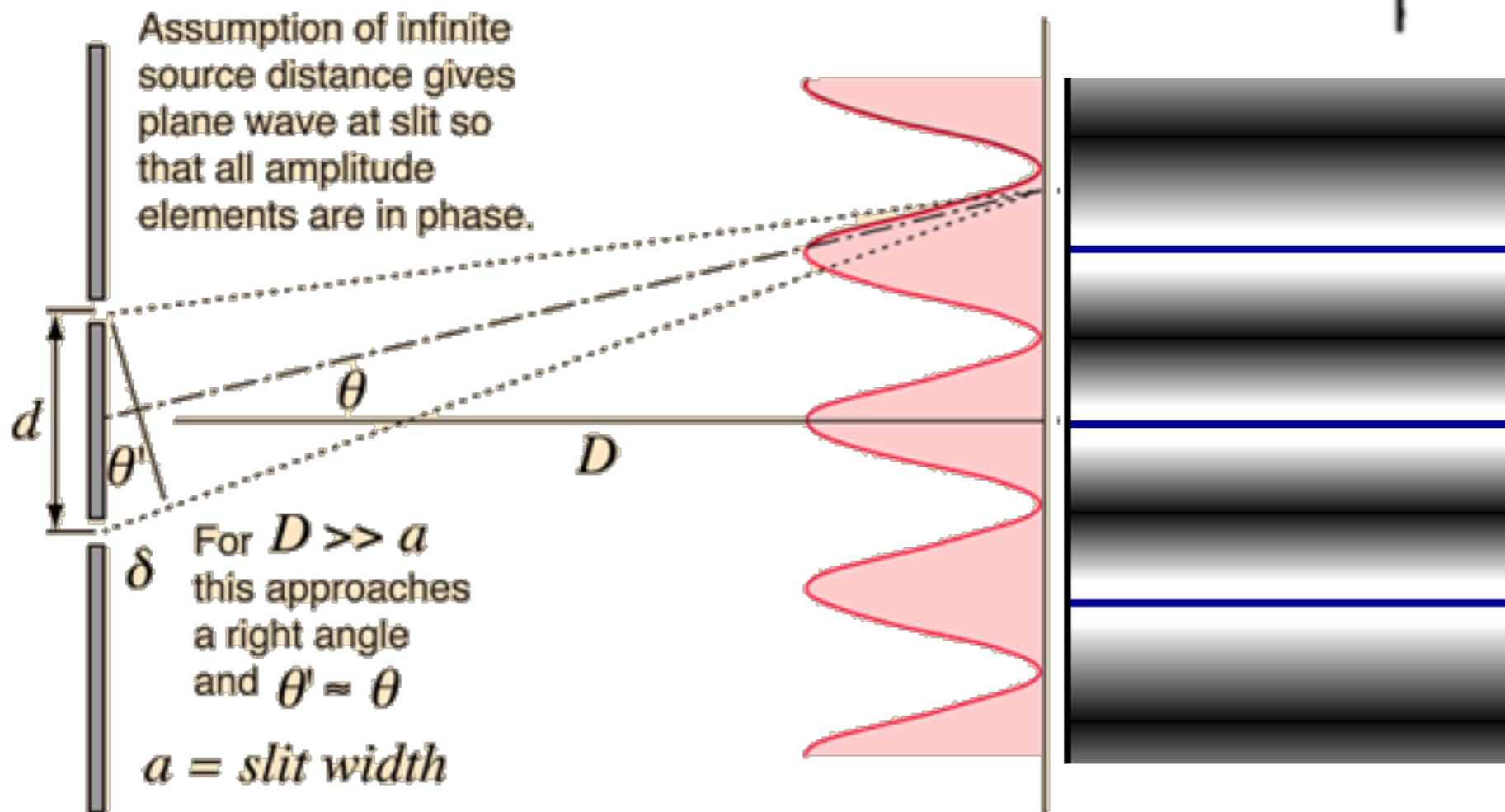
- interferencia constructiva cuando la diferencia de fase $r_2 - r_1 = d \sin \theta$ es igual a $m\lambda$:

$$\sin \theta = \frac{m\lambda}{d}$$

máximos de interferencia



Jenkins & White,
Fundamentals of Optics



Multirendija

$$I(\theta) = \frac{\sin^2(\pi\alpha)}{(\pi\alpha)^2} \frac{\sin^2(N\pi\delta)}{(\pi\delta)^2}$$

$$\alpha = \frac{a \sin \theta}{\lambda}$$

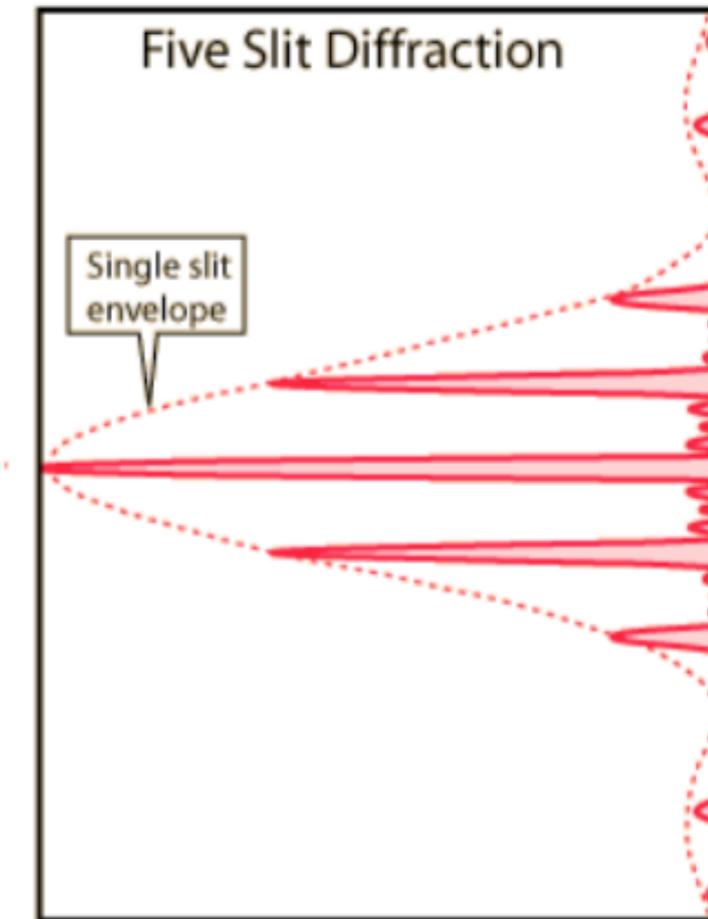
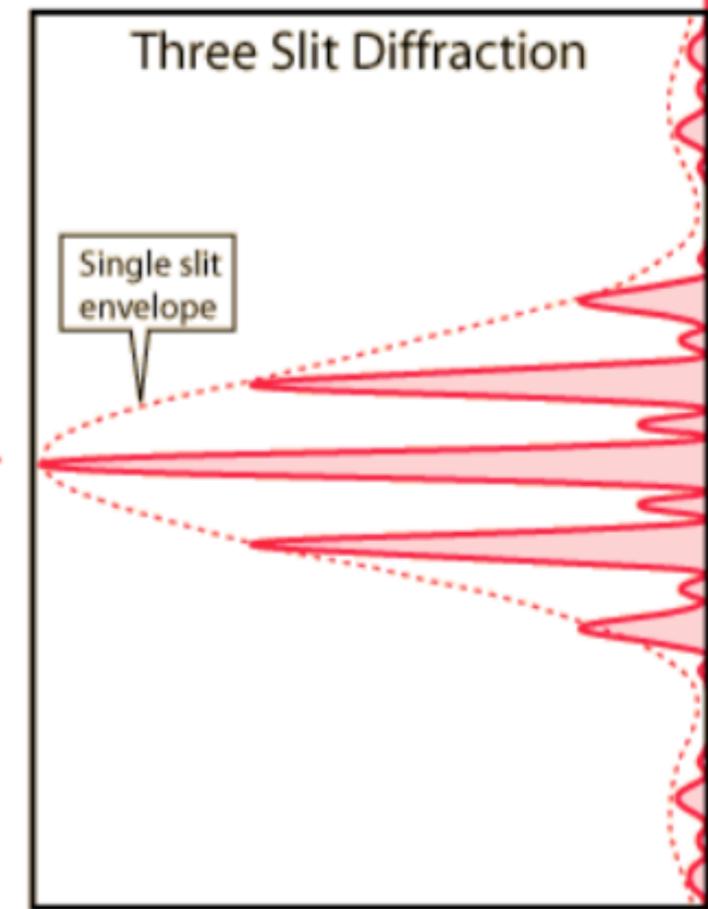
θ = projected angle from center of peak
 a = slit width

d = distance between slits

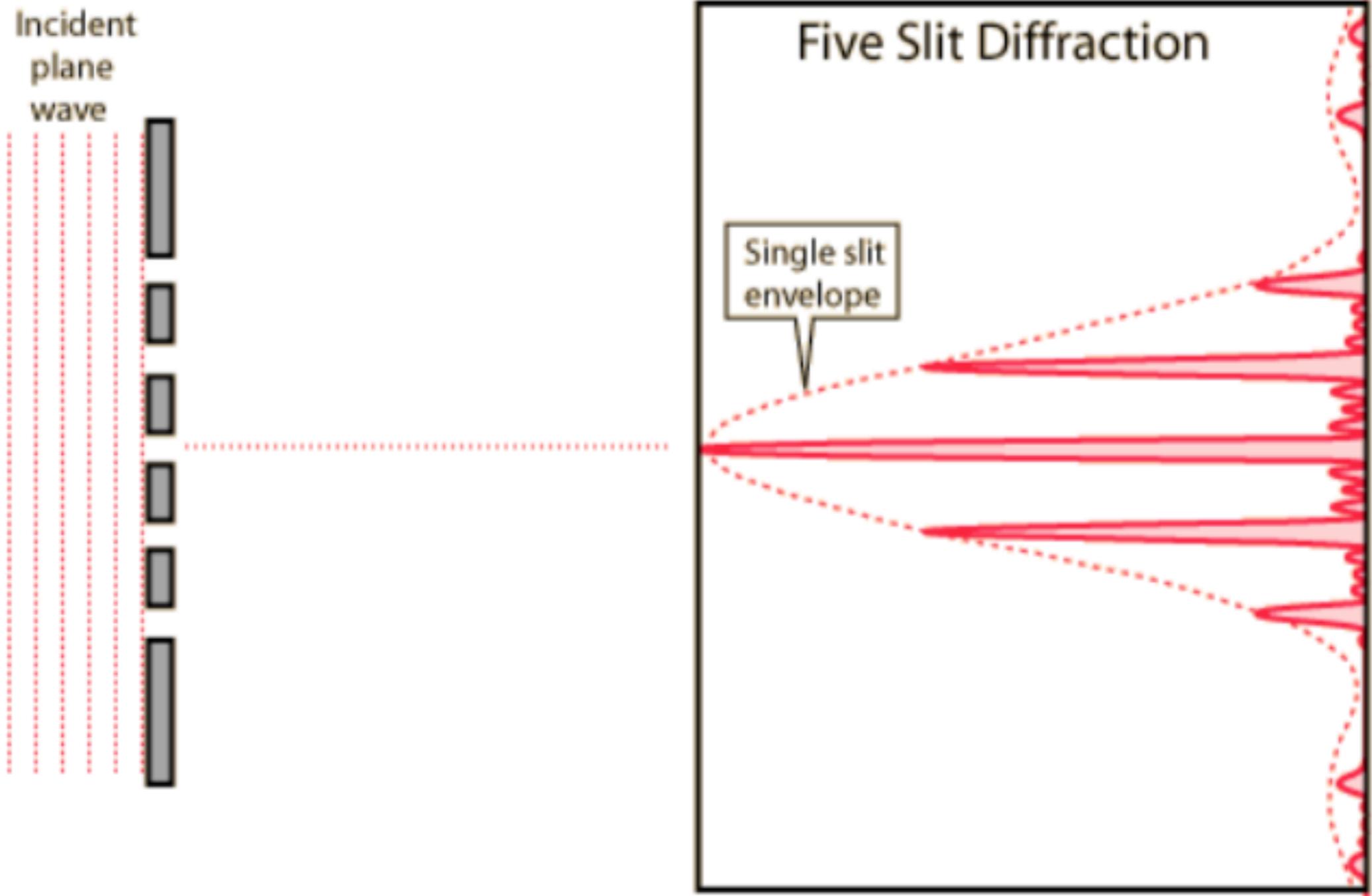
λ = wavelength

N = number of slits

$$\delta = \frac{d \sin \theta}{\lambda}$$



La rejilla de difracción



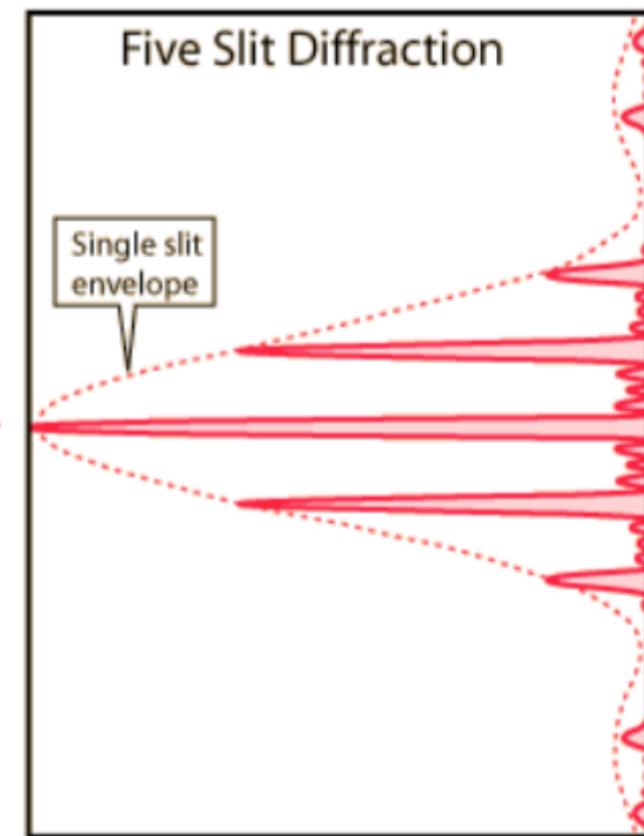
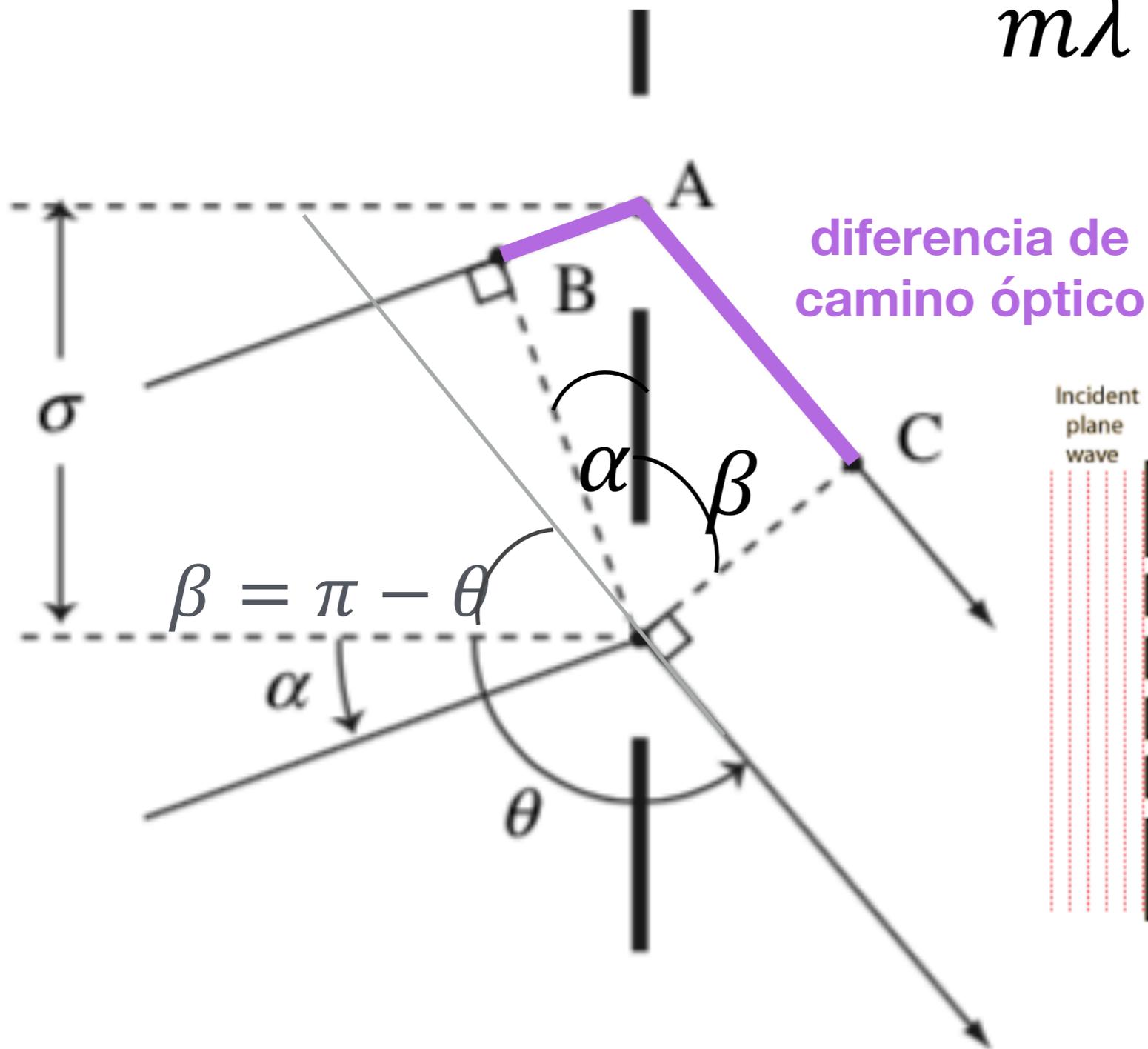
La rejilla de difracción

- La ecuación de la rejilla (válida para transmisión y reflexión):

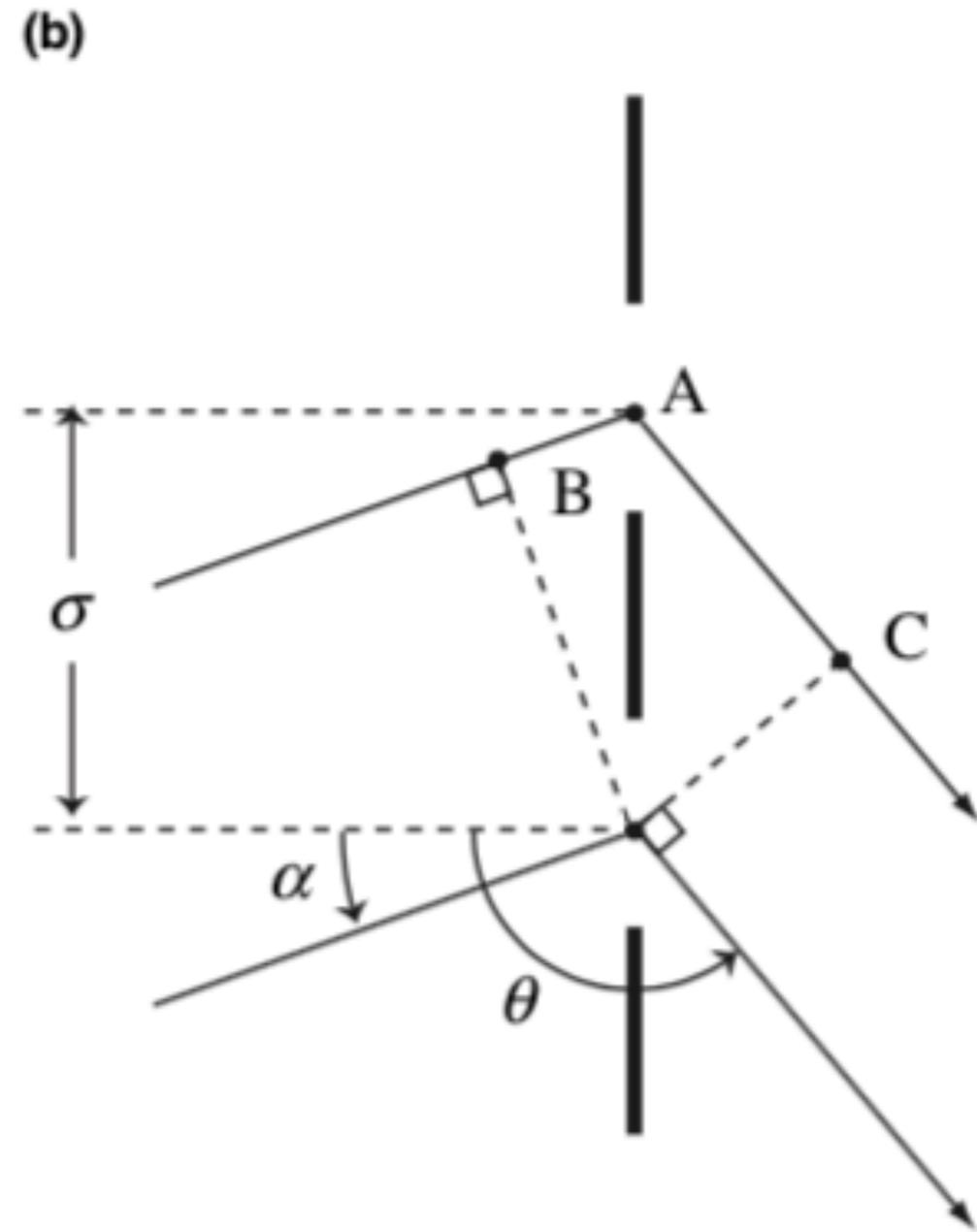
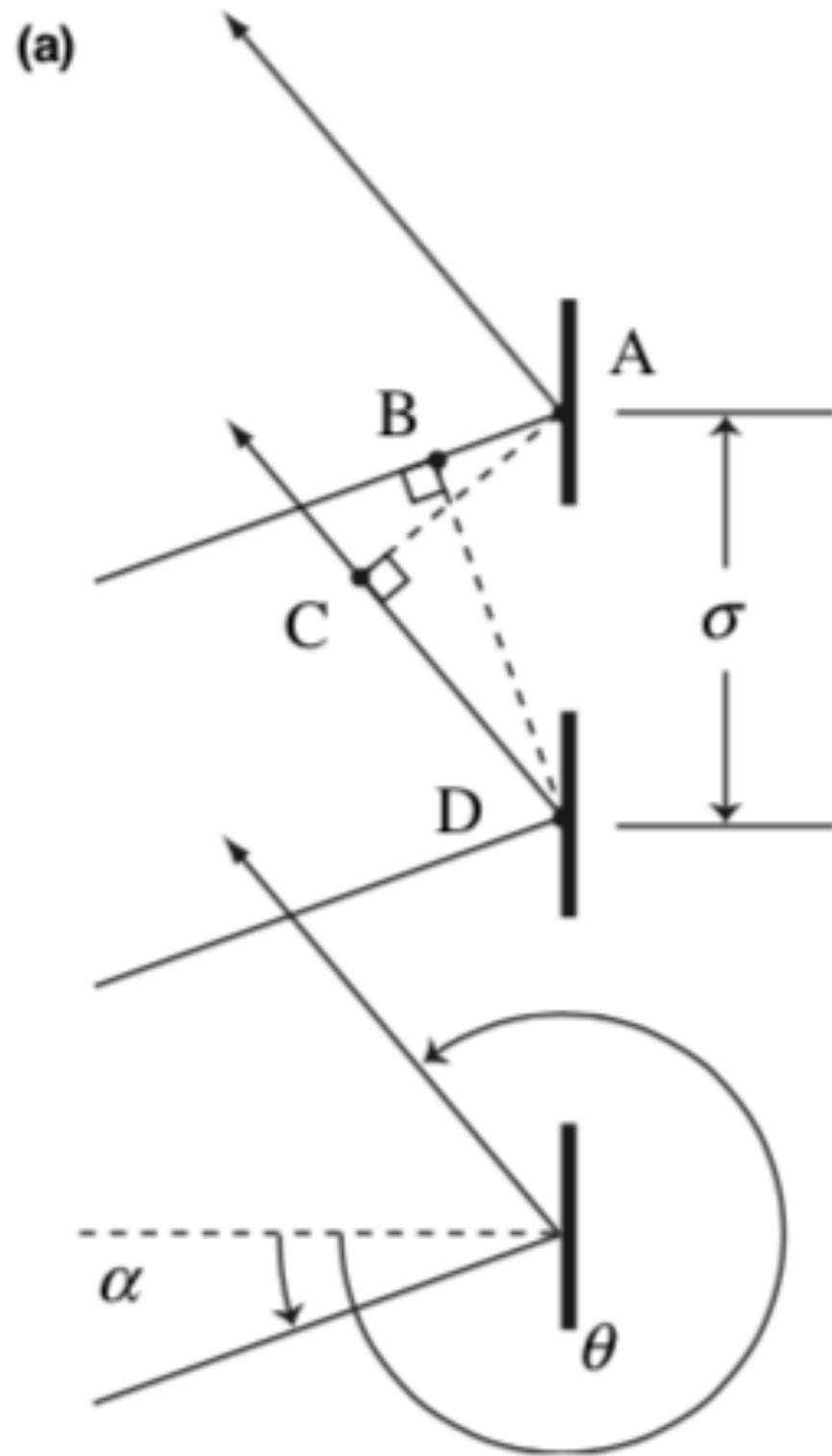
(Grating Equation)

$$m\lambda = d\sin\alpha + d\sin\beta$$

posición de los máximos

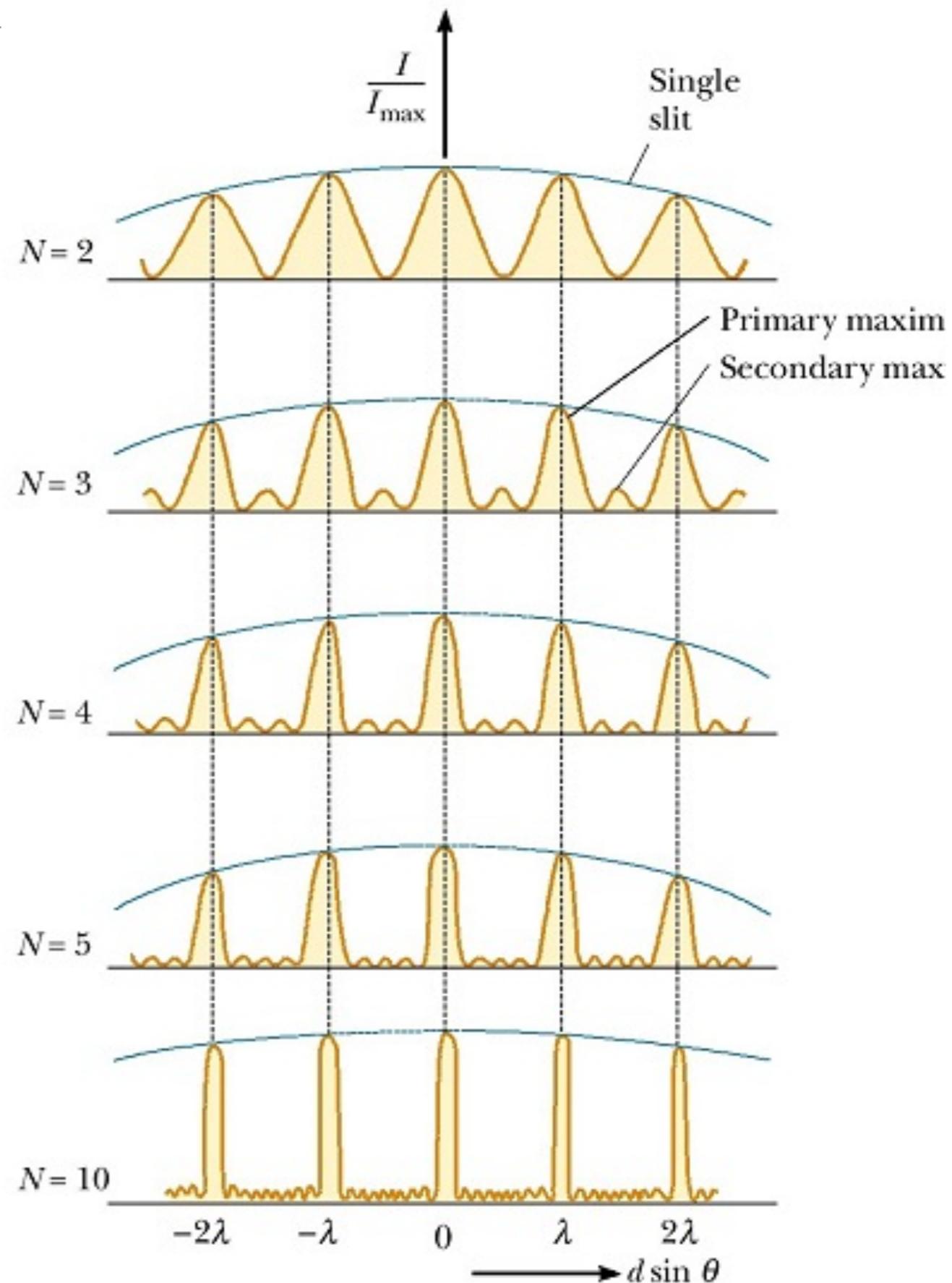


Rejillas de Transmisión y de Reflexión

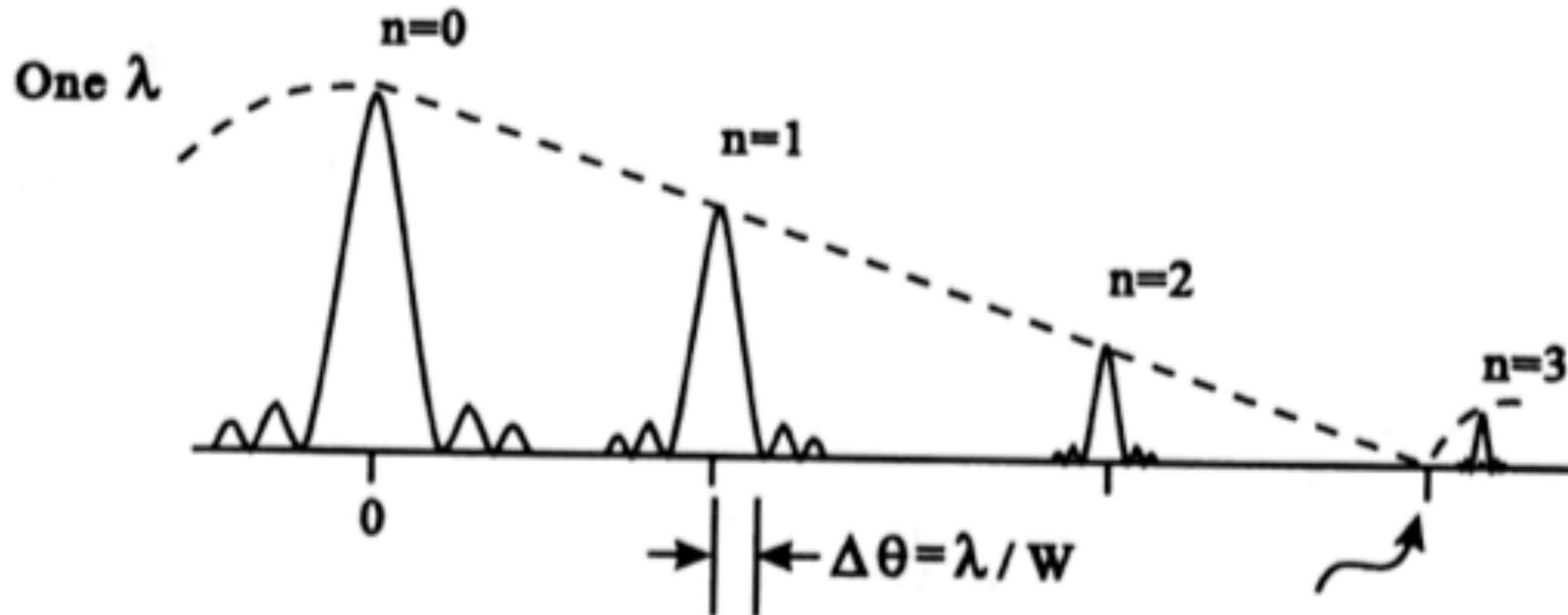


Múltiples rendijas - Rejilla de Difracción

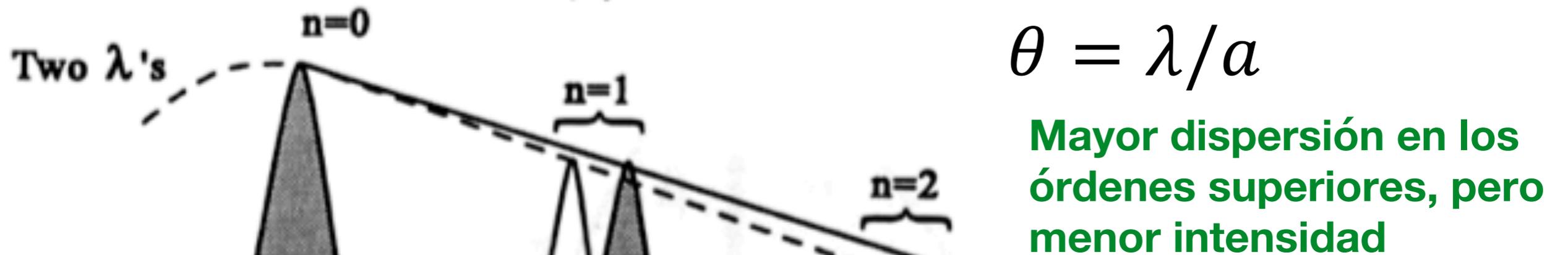
- **El número N** de surcos de la rejilla controla el **ancho** de los picos
- **El espaciamiento d** controla la **separación** de los picos
- El grosor de los surcos, a , afecta la amplitud de los picos (controla el ancho de envoltorio de difracción)



Fuente bi-cromática



$$\theta = \lambda/a$$

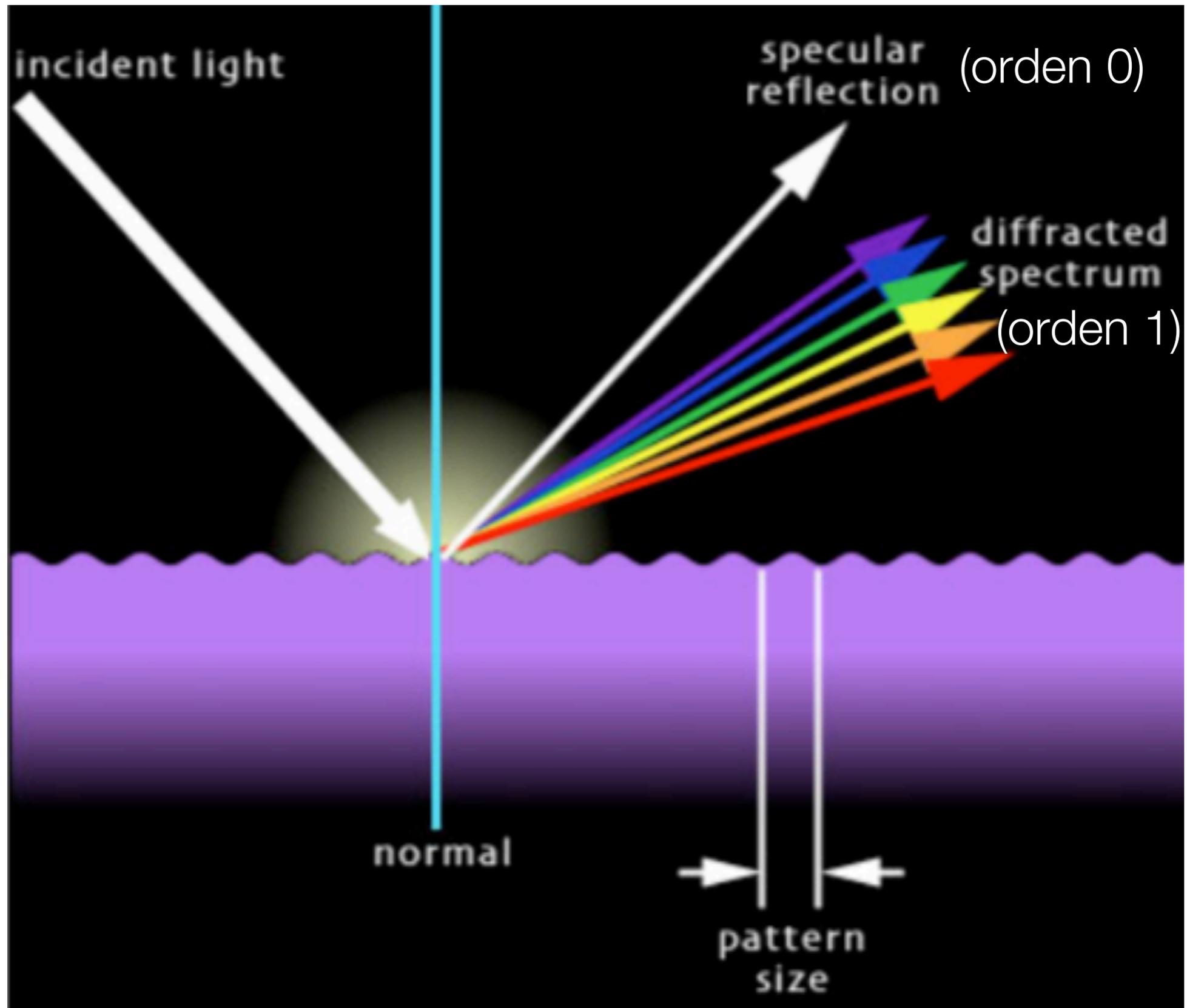


en el orden cero no hay dispersión en λ

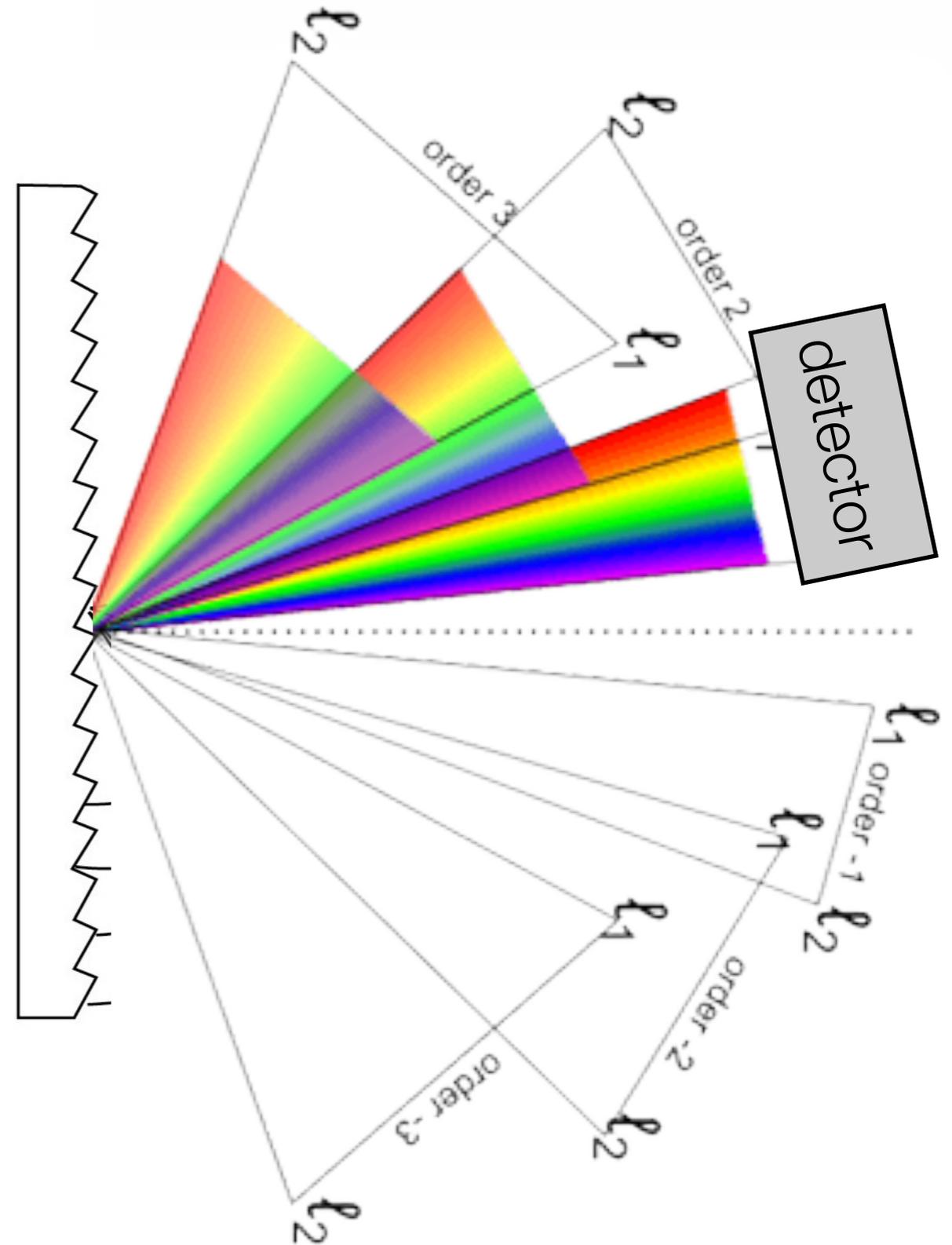
$$\theta_1 = \frac{\lambda_1}{a}$$

$$\theta_2 = \frac{\lambda_2}{a}$$

Fuente de luz blanca

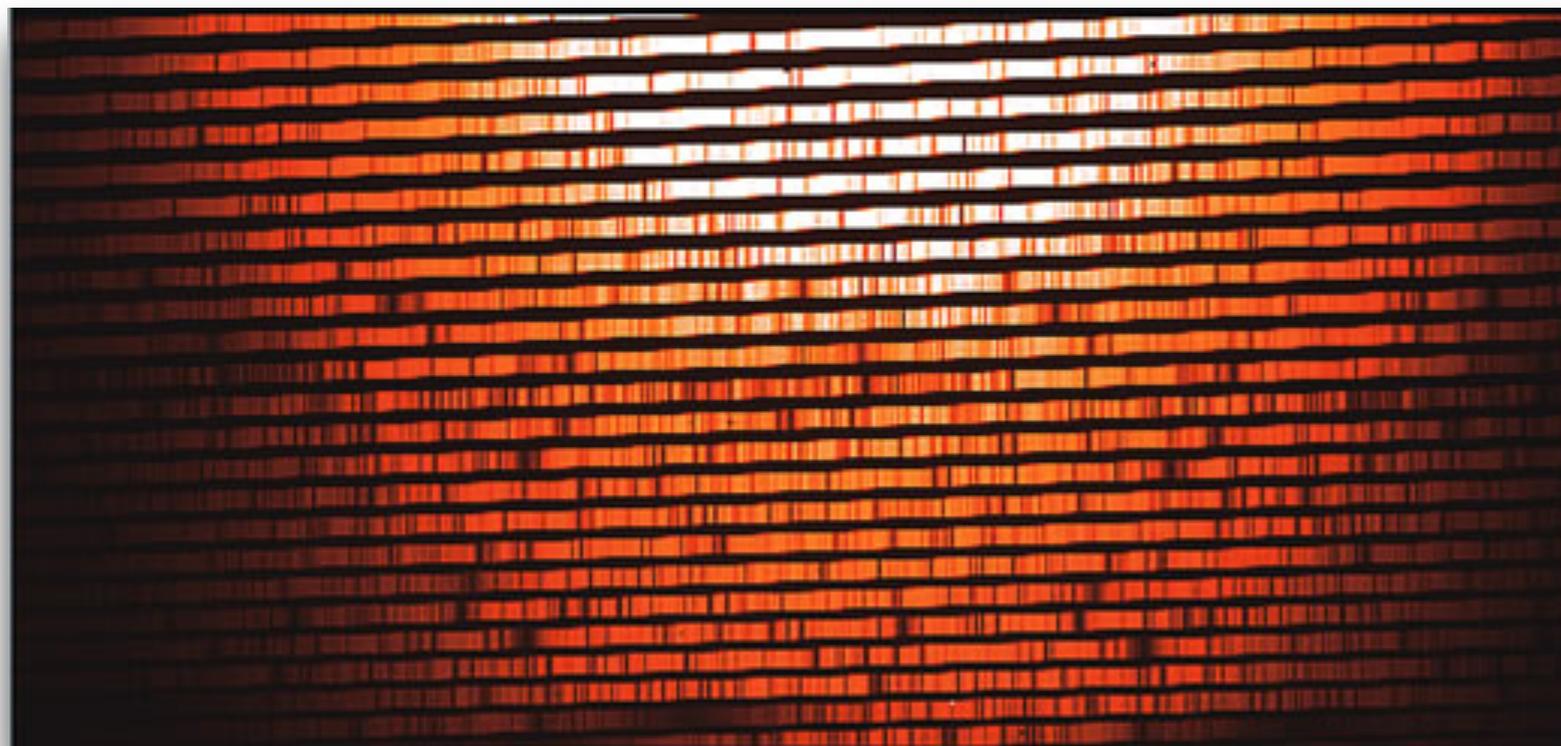
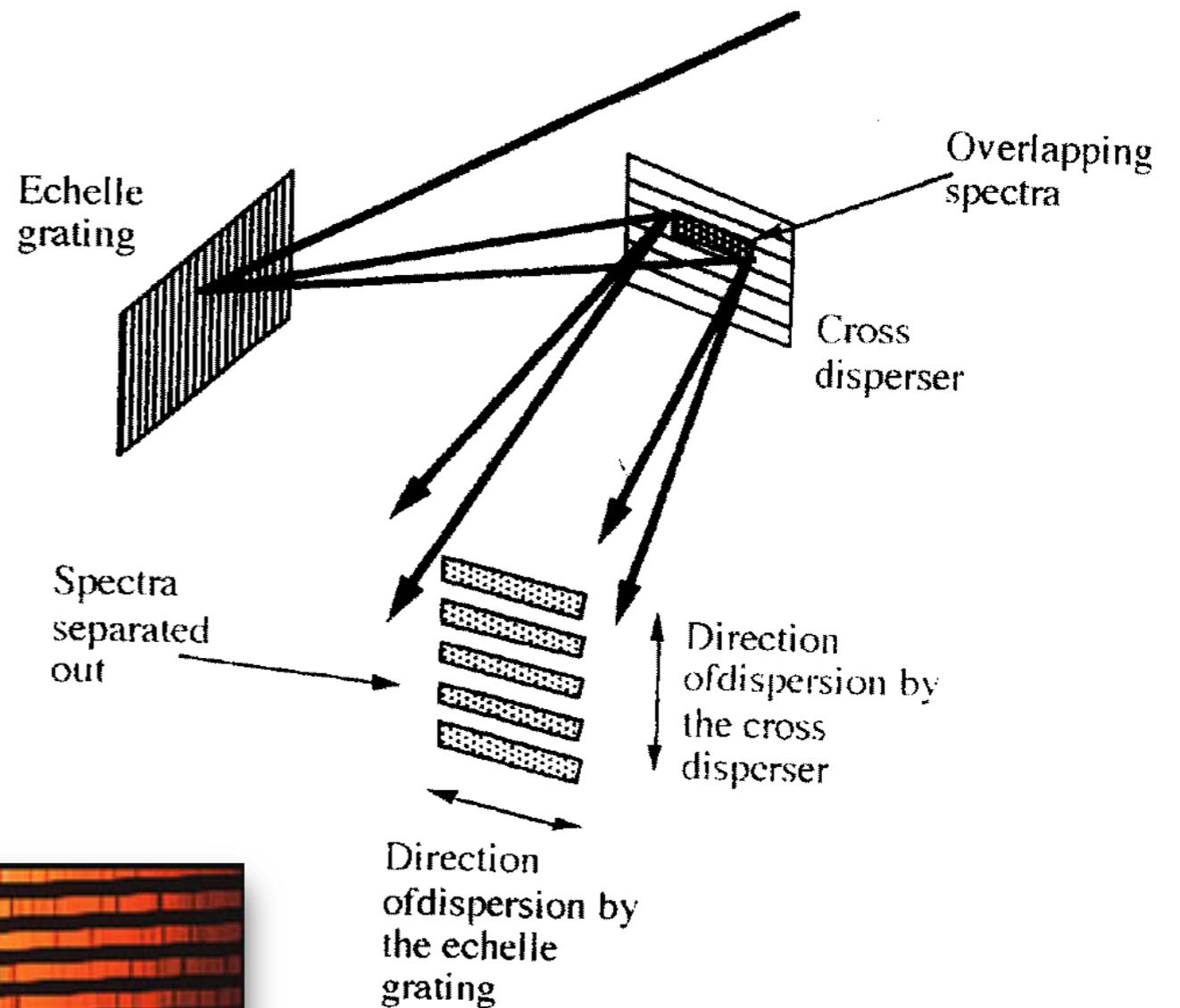


- Cuidado: para diferentes órdenes m , distintas λ se pueden solapar
- Rango espectral libre: para un orden dado, el rango de longitud de onda para el que no hay solapamiento con órdenes contiguos
- Se puede utilizar filtros de bloqueo para evitar el solapamiento en un orden dado
- En este tipo de espectrógrafo generalmente el sistema óptico es tal que se detecta el espectro en un sólo orden (... pero, ver espectroscopía Echelle)
- Blazing -> inclinación para concentrar más luz en un orden (a una cierta λ)



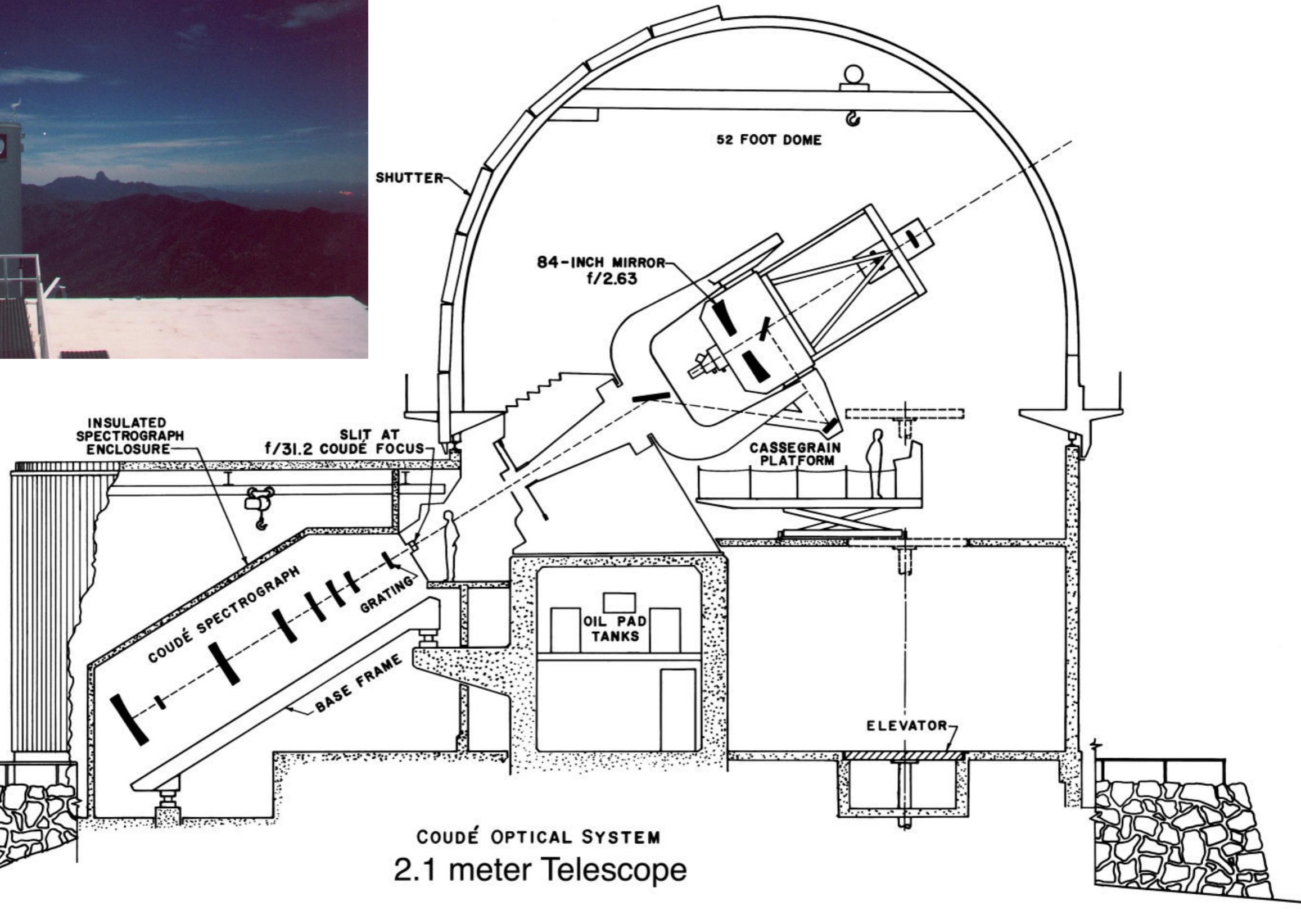
Espectroscopía Echelle

- En un espectrógrafo Echelle (escalera) se introduce un elemento dispersor adicional para separar los diferentes órdenes (que no haya solapamiento en λ)

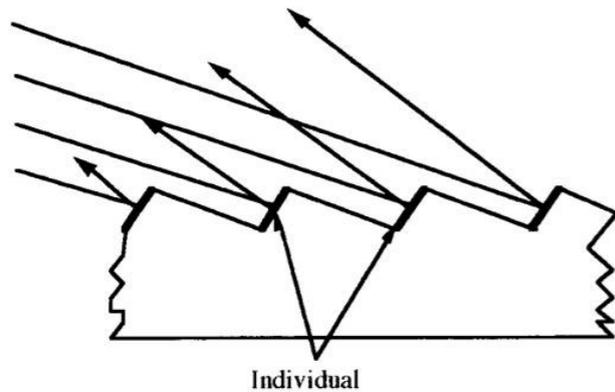


← ← ← distintos órdenes

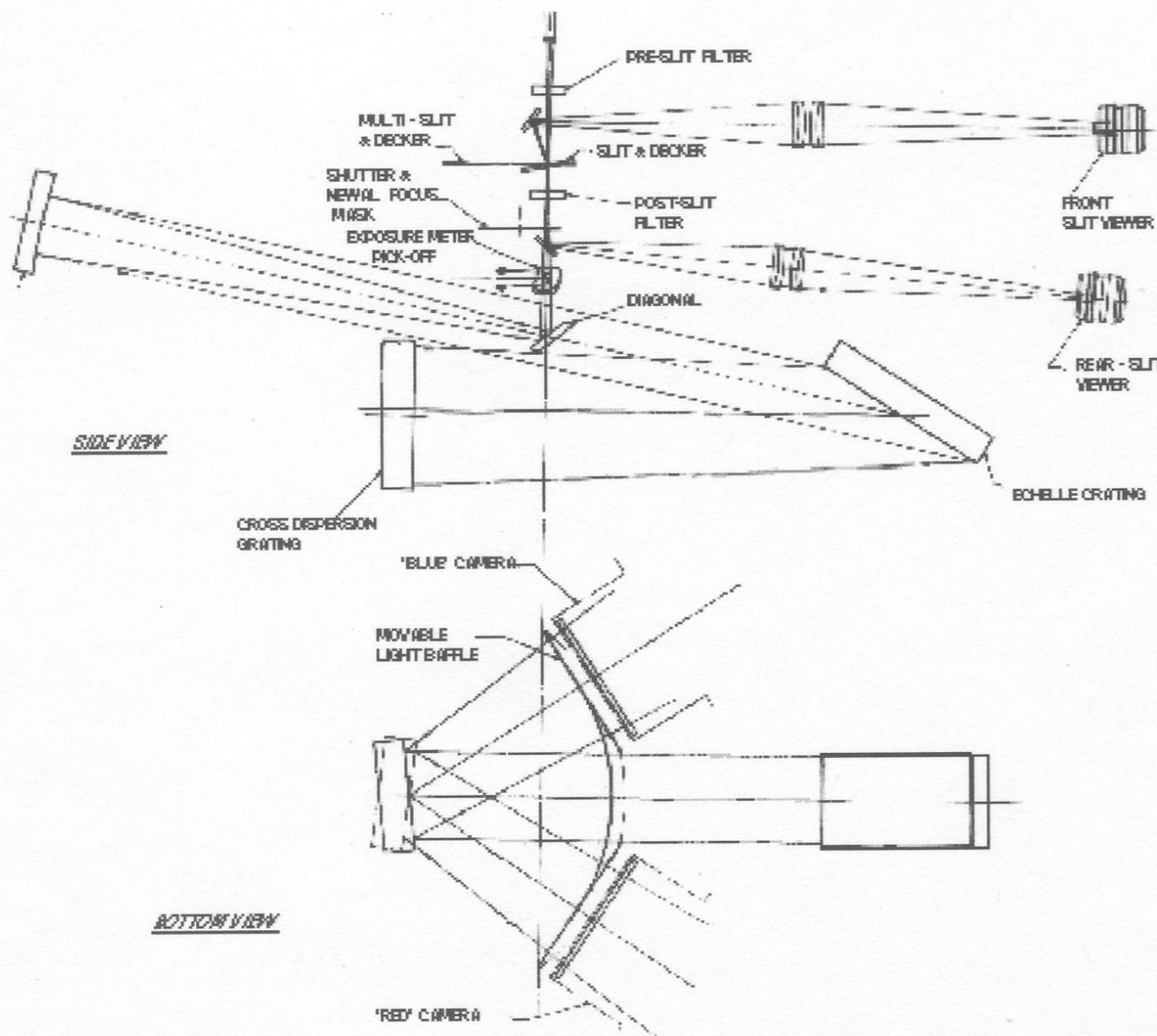
High-resolution spectrographs: KPNO Coude Feed



High-resolution spectrographs: Echelle



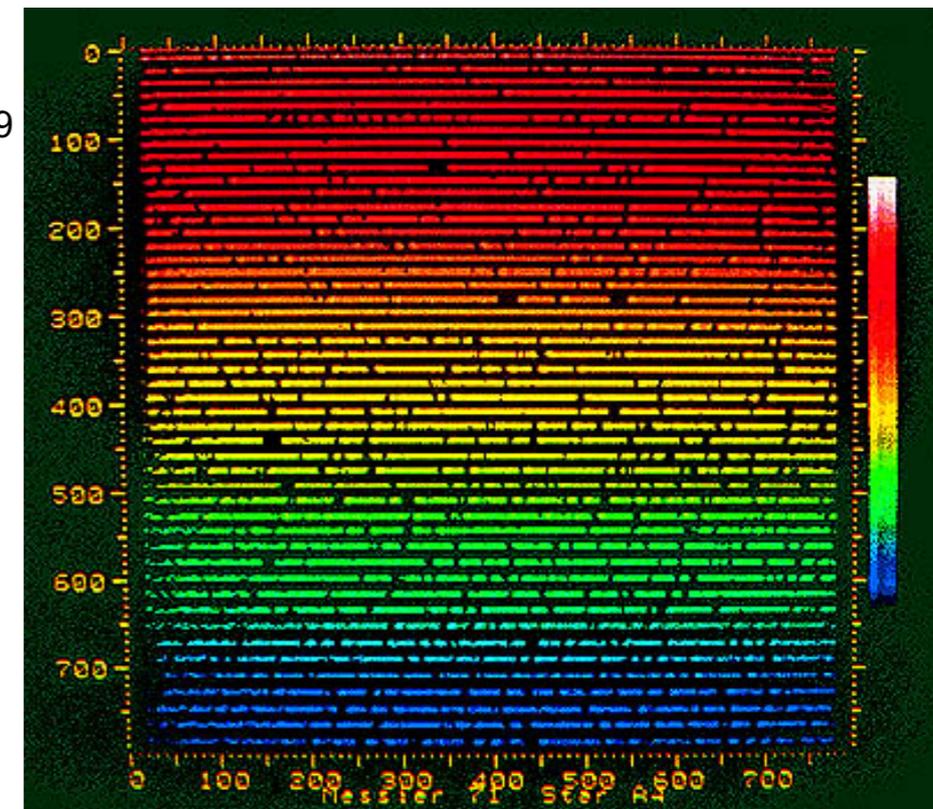
Echelle grating: coarse grating (big d) used at high orders ($m \sim 100$; $\tan \theta_B = 2$).



Side and bottom views of 4m echelle spectrograph

Kitt Peak 4-m Echelle
Orders are separated by *cross dispersion*: using a second disperser to disperse λ in a direction perpendicular to the echelle dispersion.

29



Resolución

- Teníamos la Ecuación de la Rejilla (Grating Equation)

$$m\lambda = d\sin\alpha + d\sin\beta$$

- La relación de **dispersión angular** se obtiene diferenciando la Ec. de la Rejilla con respecto a λ

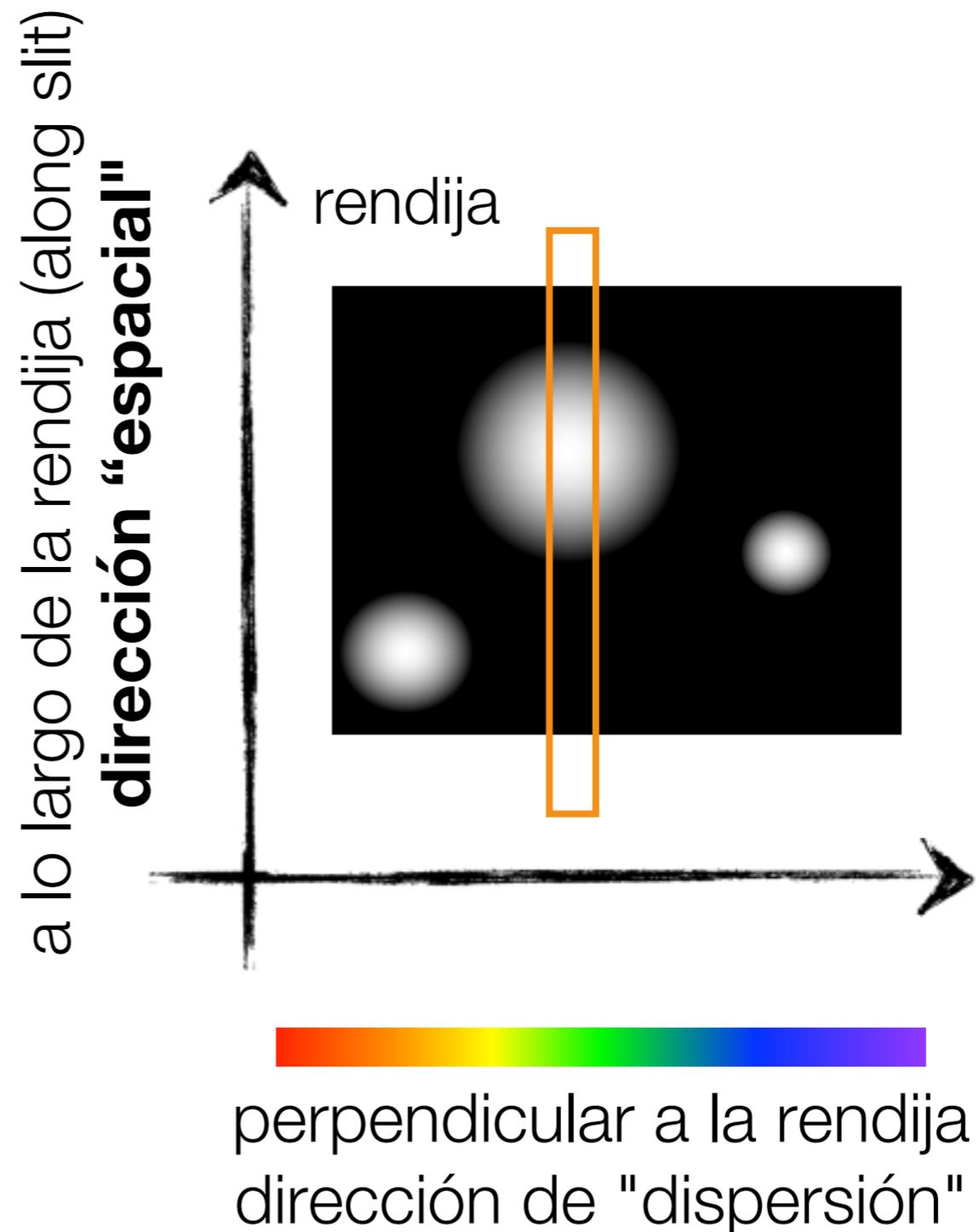
$$\frac{\partial\beta}{\partial\lambda} = \frac{m}{d\cos\beta} \quad [\text{radianes}/\text{\AA}]$$

- dado un espaciamiento d de la rejilla, para un orden dado la dispersión es constante (no depende de λ)
- La **dispersión lineal** (en el plano del detector) se calcula dividiendo la escala de placa entre la ec. anterior:

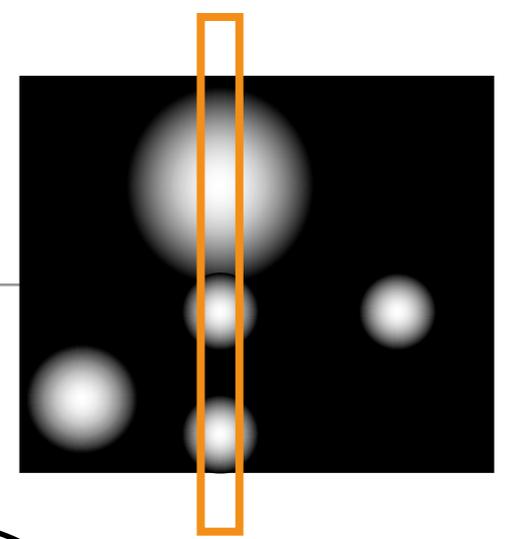
$$\frac{\partial\lambda}{\partial l} = s\left(\frac{\partial\beta}{\partial\lambda}\right)^{-1} \quad [\text{\AA}/\text{mm}]$$

¿Cómo se ve esto en la práctica?

- La configuración **rendija (larga o no) + rejilla** de difracción es una de las más comunes en los espectrógrafos profesionales
- Se suele llamar espectroscopía de rendija (slit spectroscopy)
- Recordar que el espectro se produce en la dirección perpendicular a la rendija - > dirección de "dispersión"

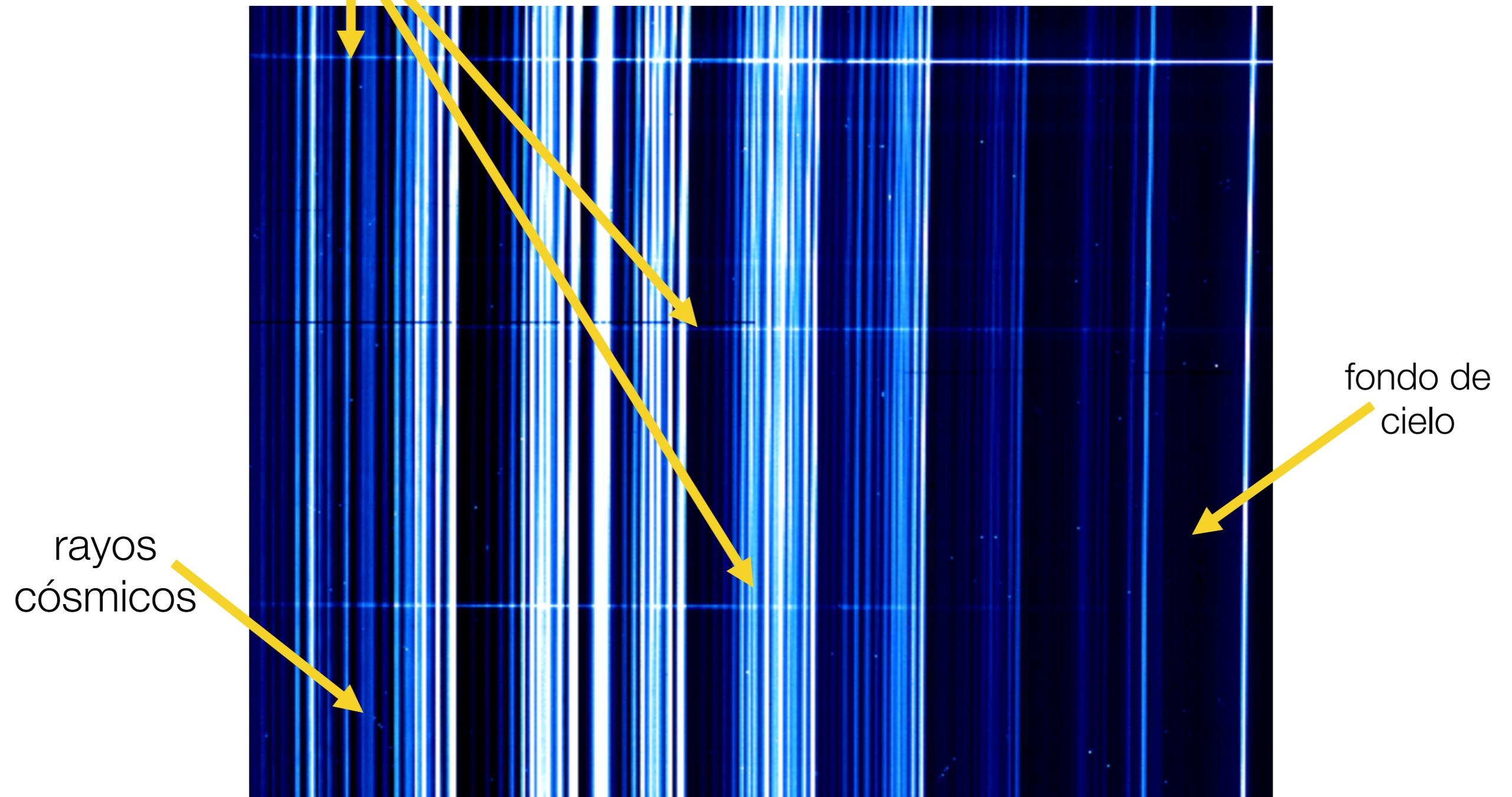


¿Cómo se ve esto en la práctica?



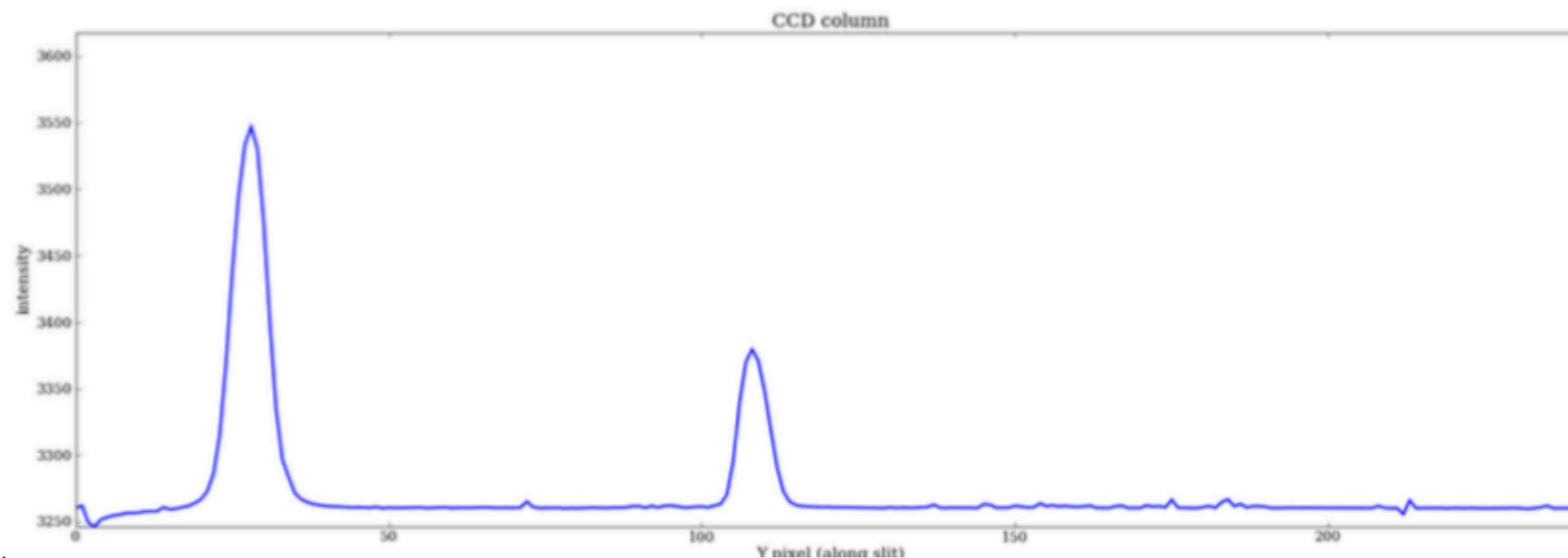
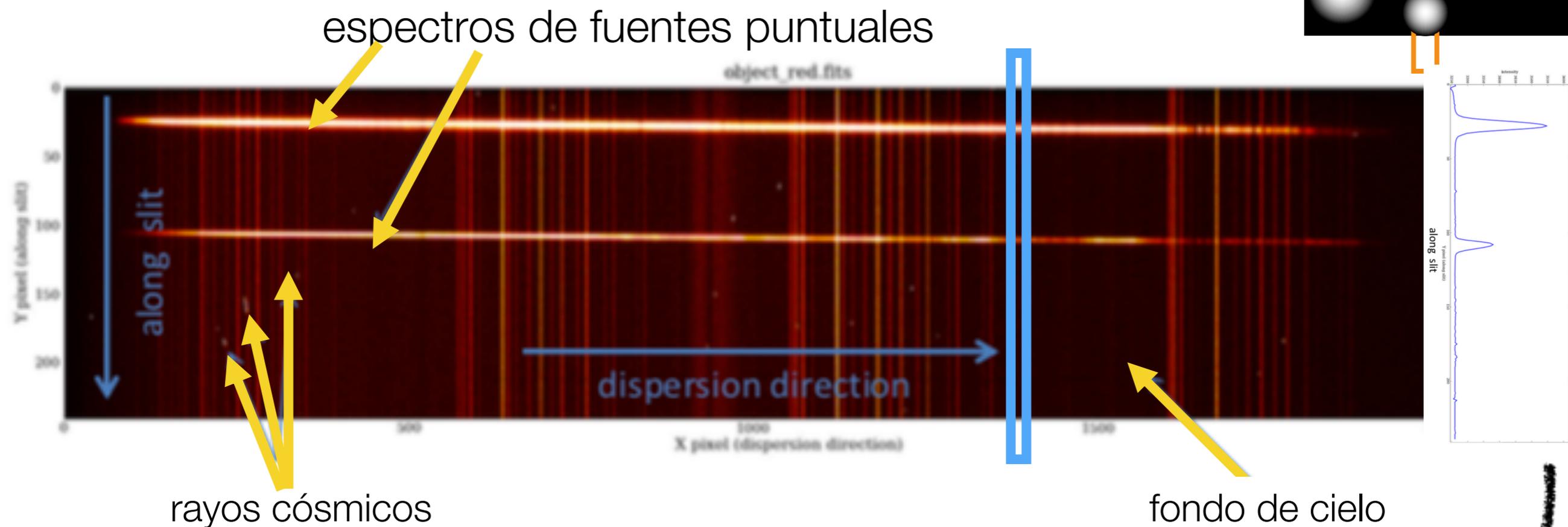
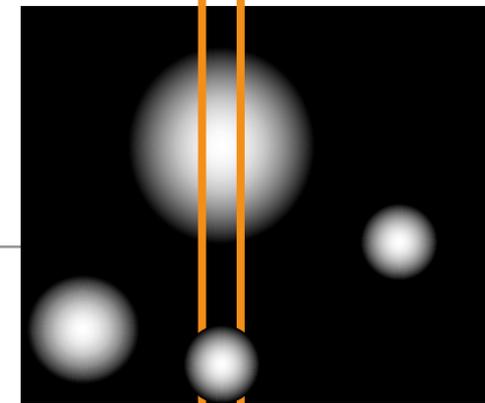
espectros de fuentes puntuales

líneas de emisión del cielo



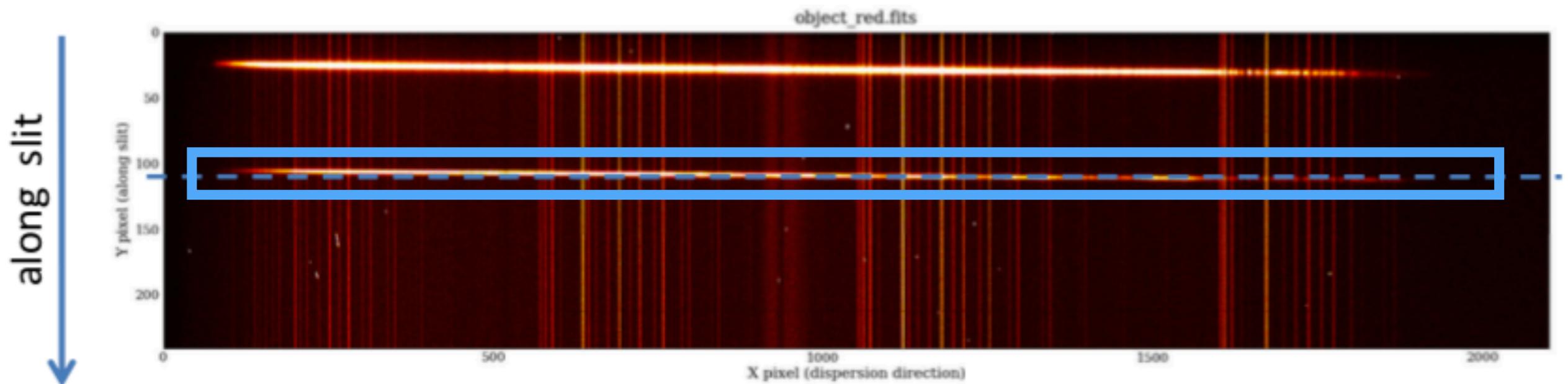
Espectro tomado con OSIRIS GranTeCan (Downes et al. 2015)

Corte en la dirección Espacial (along slit)



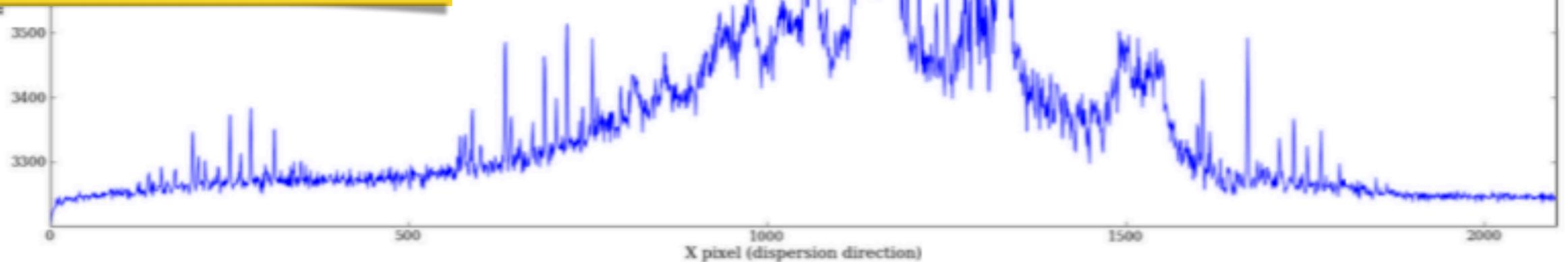
dirección espacial (along slit)

Corte en la dirección de dispersión



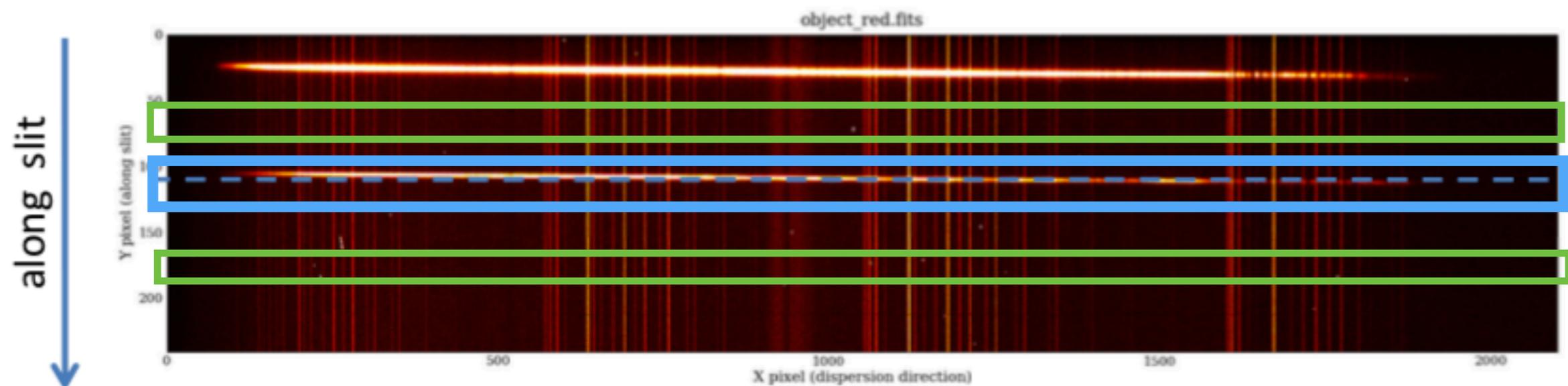
dirección de dispersión

La información en longitud de onda va en la dirección de dispersión (X)



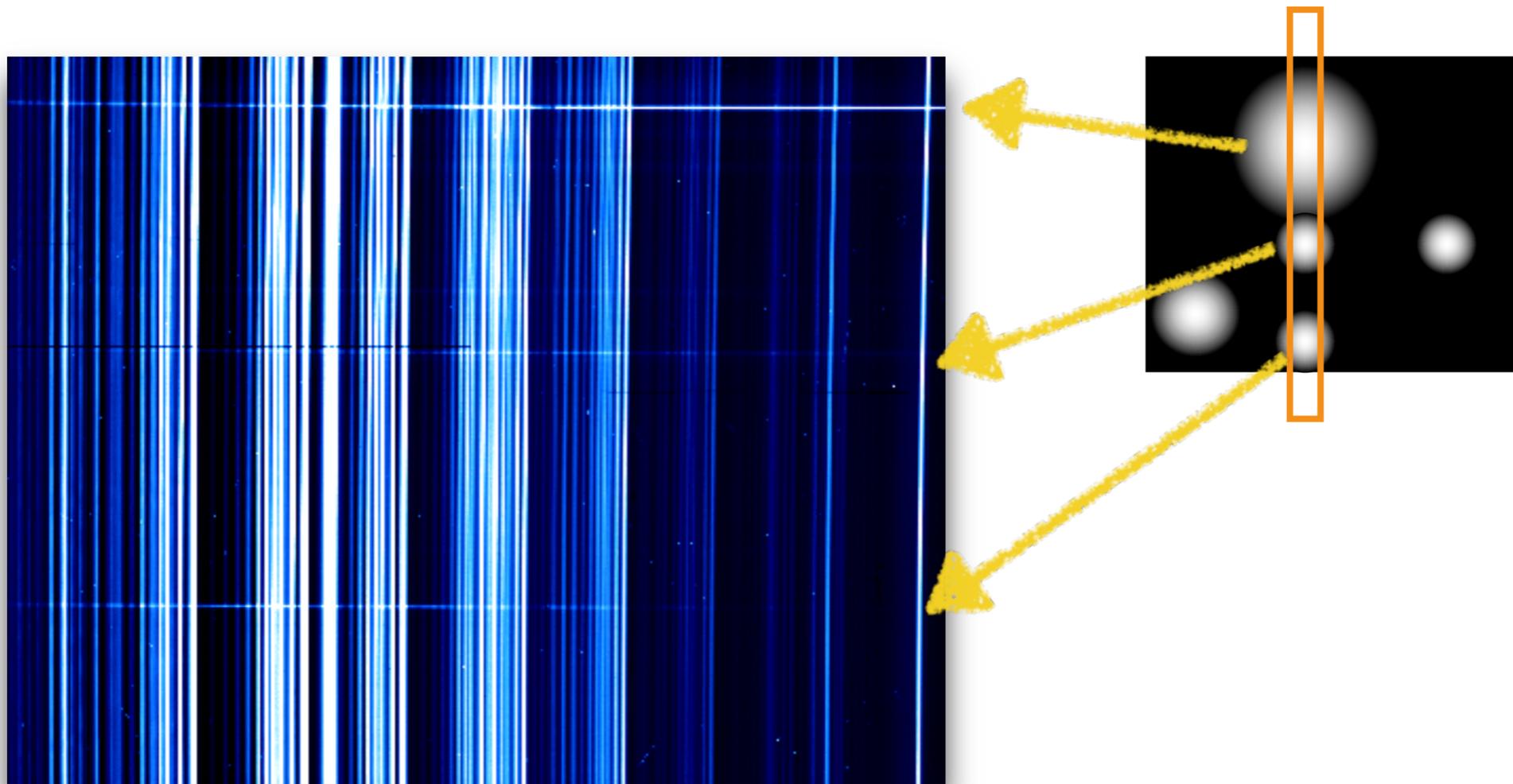
Procesamiento

- **Se extrae (i.e. se corta) el espectro del objeto en la imagen**
- Reducción usual por bias y dark,
- Corrección por curva de respuesta del detector: el flat debe tomar en cuenta la diferencia de respuesta del detector como función de λ ->
- Se extraen espectros en **ventanas** arriba y abajo del espectro del objeto para sustraer la **contribución del fondo de cielo al espectro**
- Se deben obtener espectros de una lámpara de comparación (e.g. HeArNe) para hacer la calibración el longitud de onda ($X \rightarrow \lambda$)



Objetos extendidos

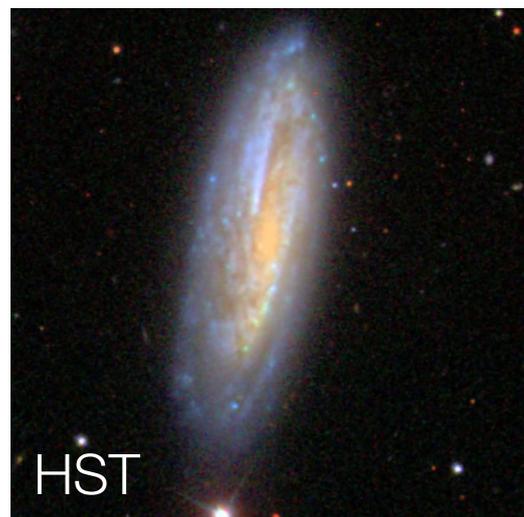
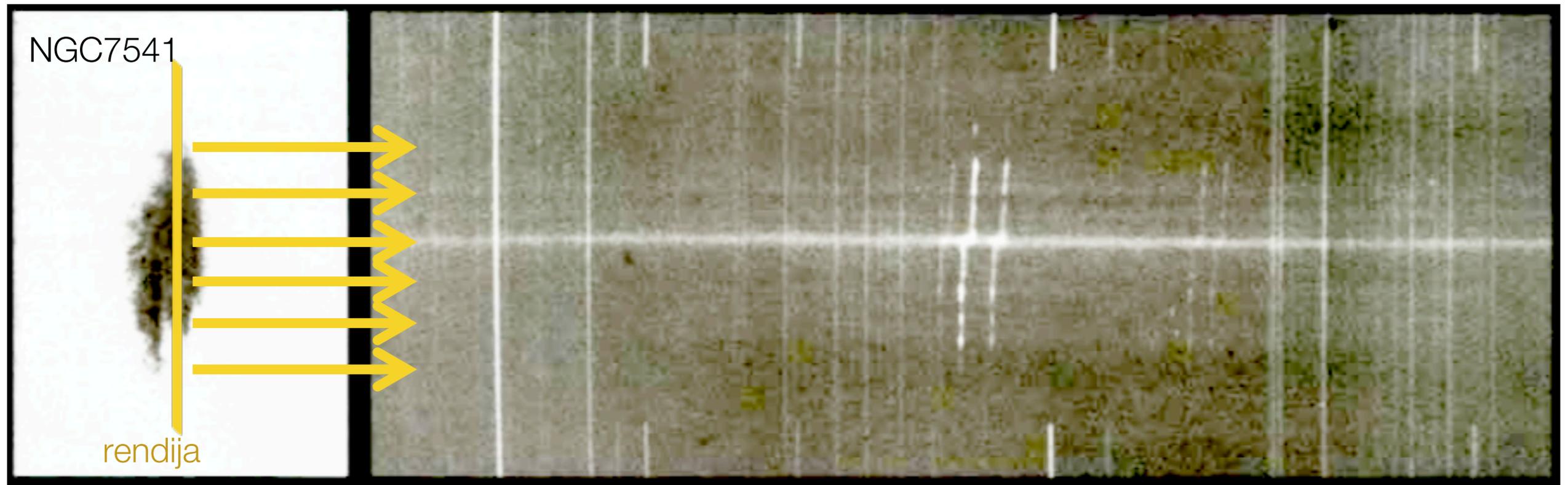
- La espectroscopía de rendija larga da información espacial en la dirección a lo largo de la rendija:
 - se obtiene un espectro de cada objeto que caiga en la rendija, a un Y diferente en la dirección espacial en el CCD

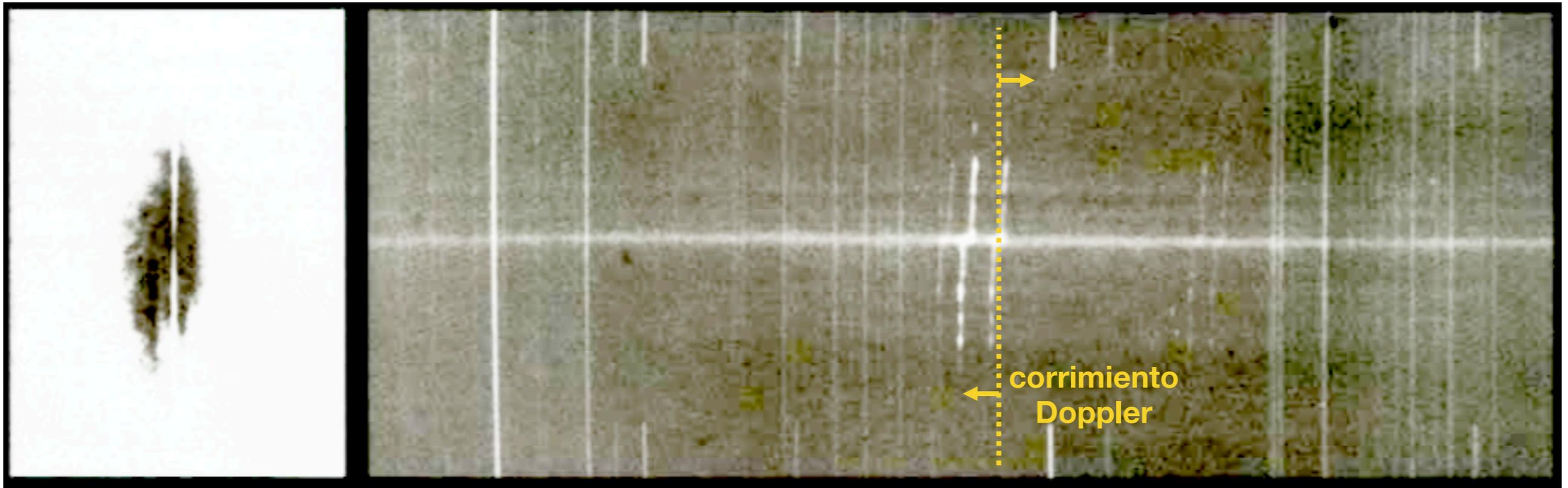


Objetos extendidos

- La utilidad de la información espacial es más evidente para objetos extendidos: se obtiene espectroscopía de 1D del objeto (e.g. galaxia) a lo largo de la rendija

Vera Rubin (1983, SciAm)

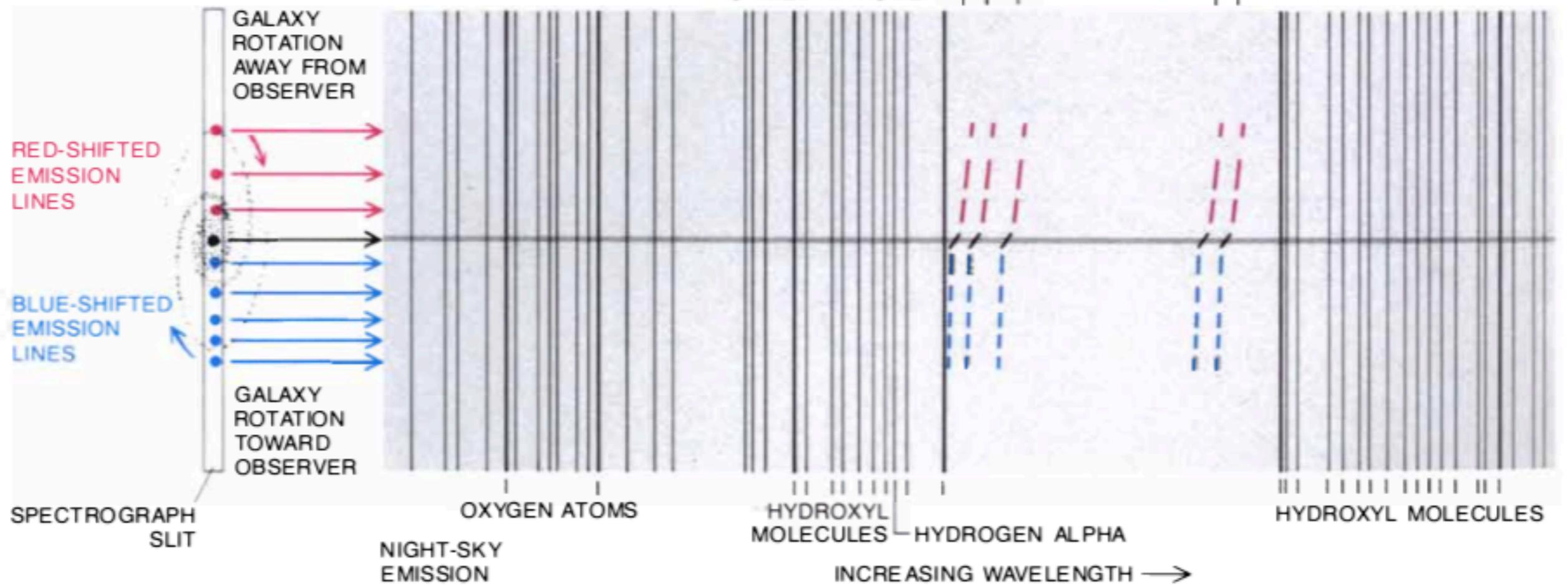




GALAXY
EMISSION

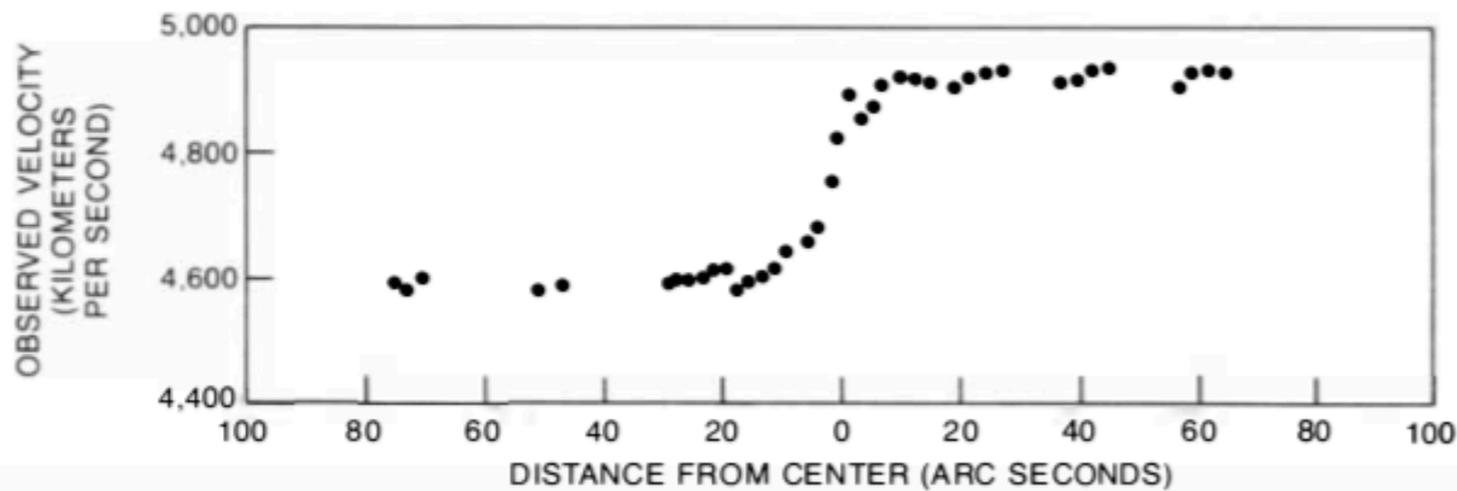
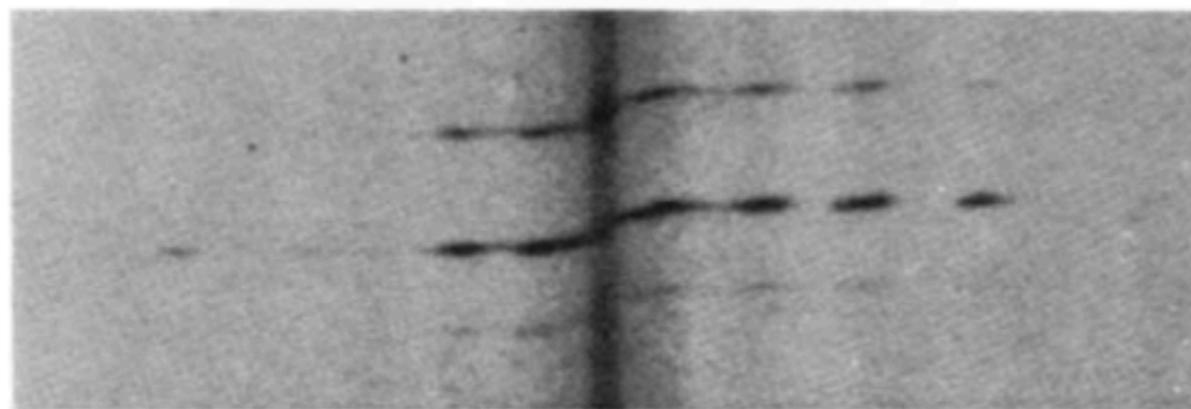
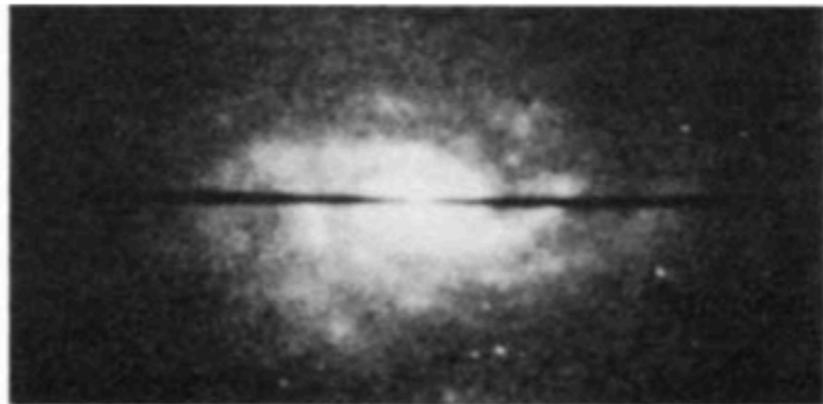
IONIZED NITROGEN
HYDROGEN ALPHA
IONIZED NITROGEN

IONIZED
SULFUR

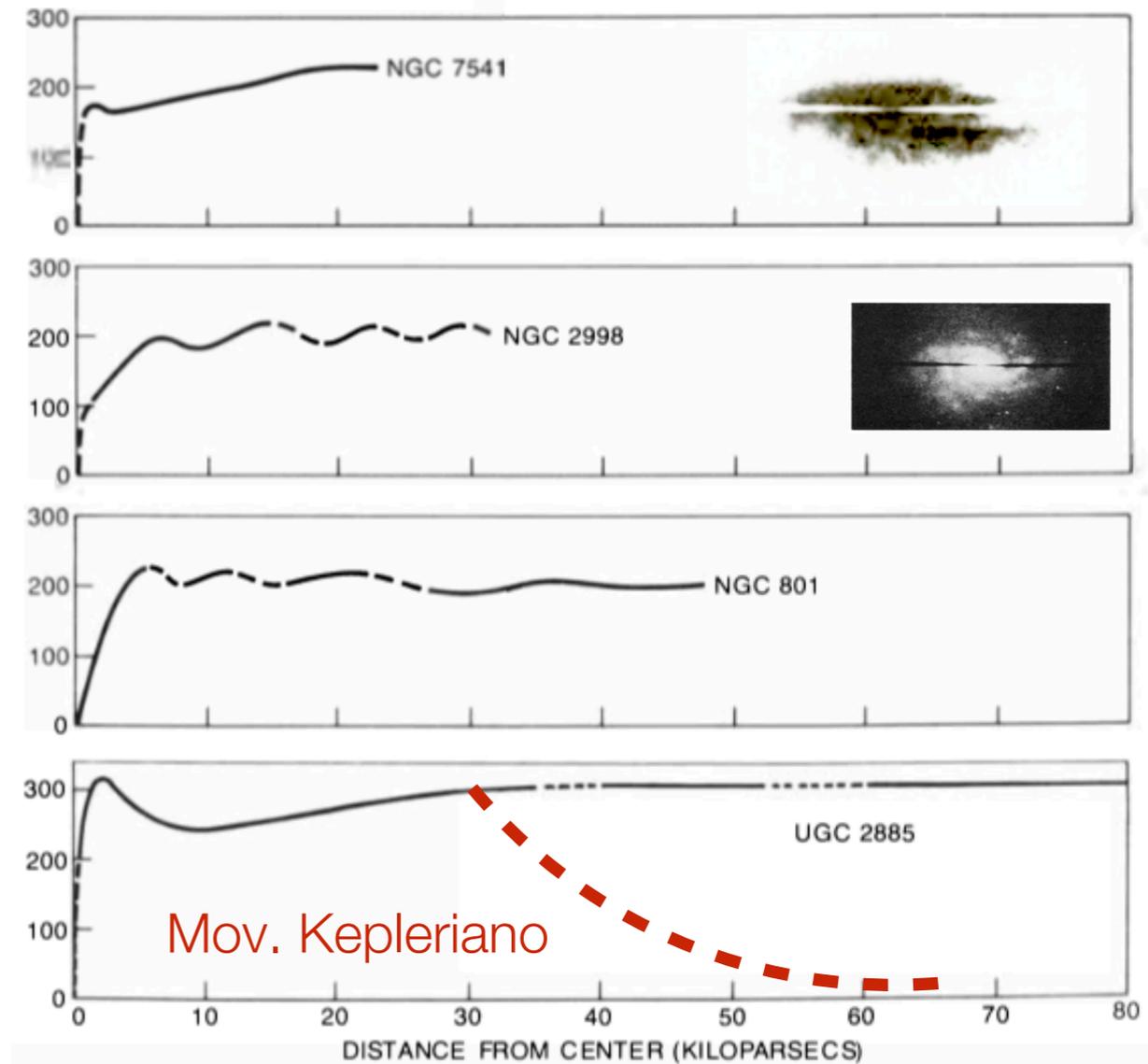


Breve desvío: curva de rotación de galaxias

NGC2998



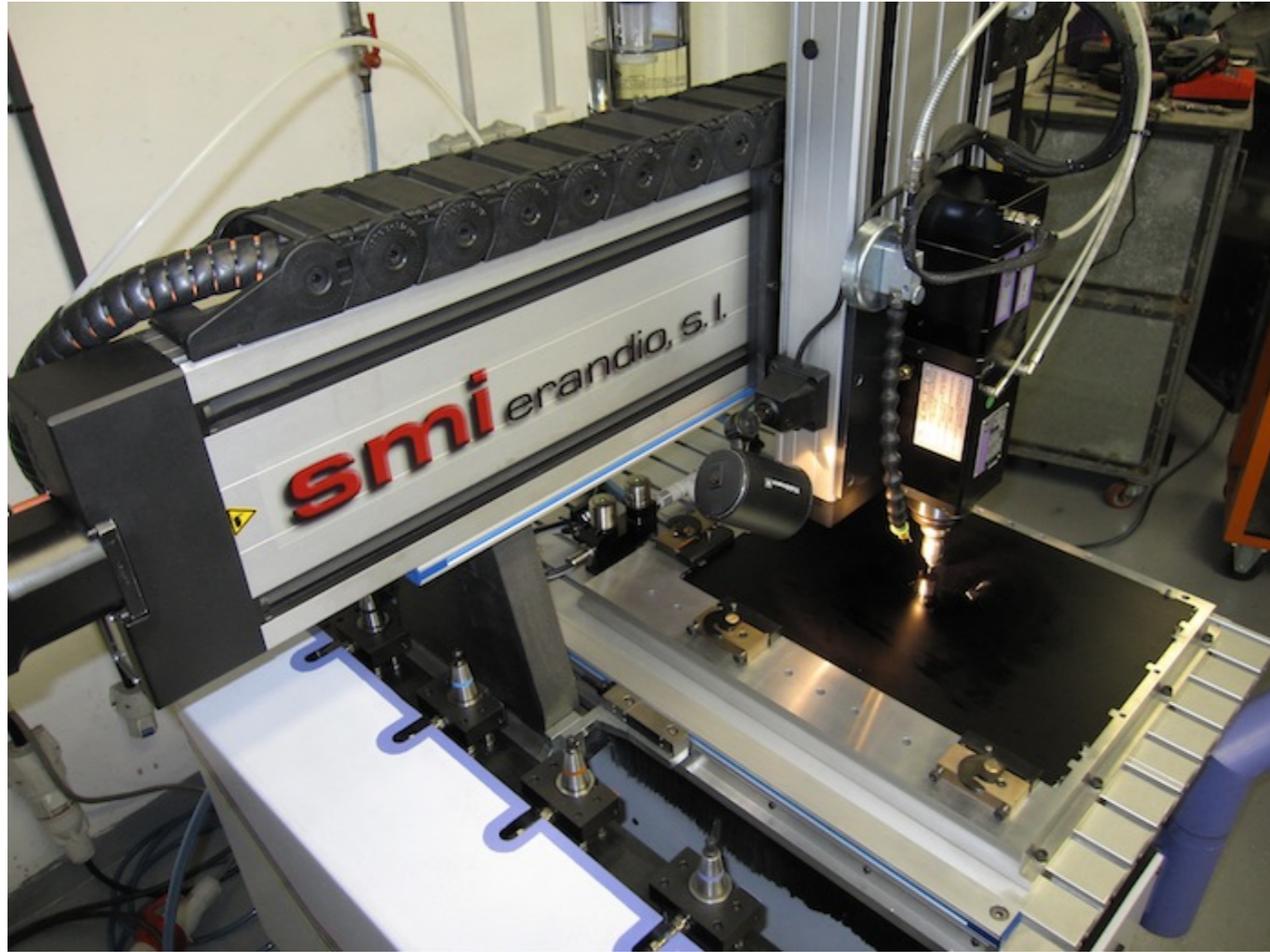
Vera Rubin (1983, SciAm)



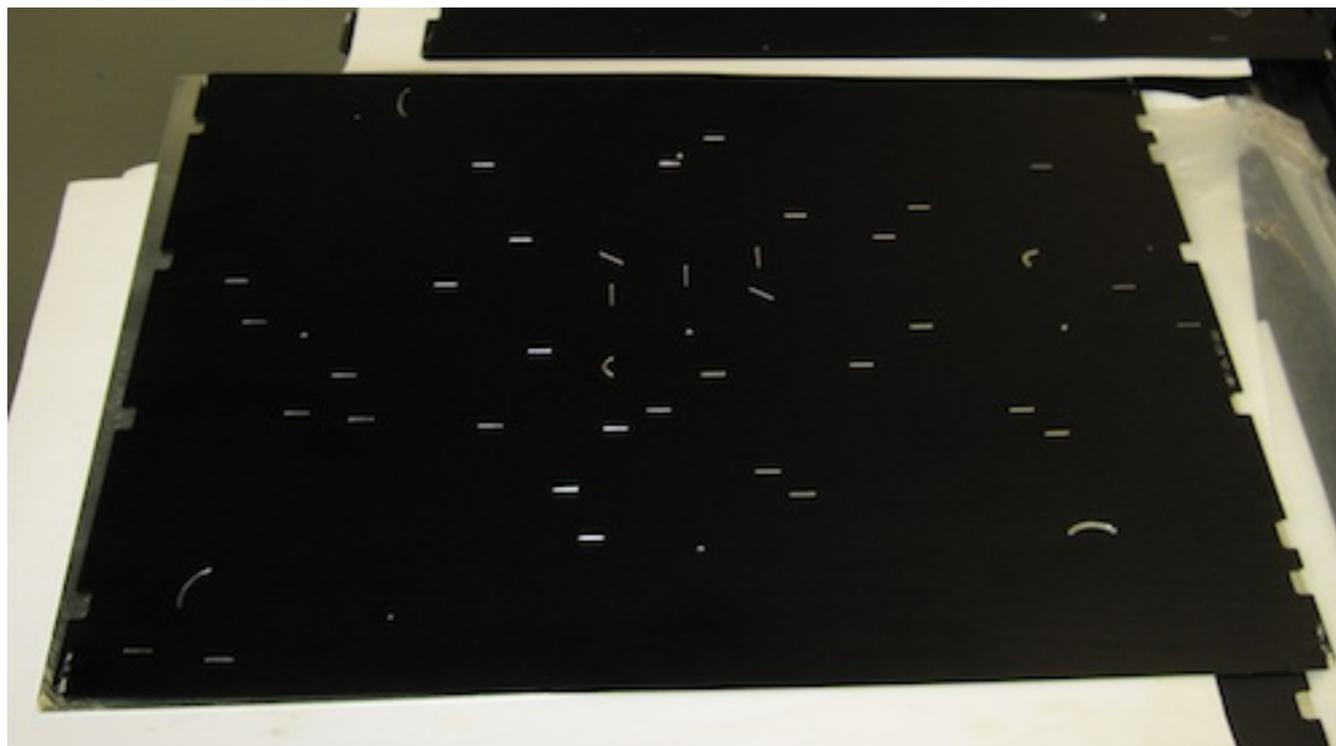
Las curvas de rotación planas fueron la primera evidencia que llevó a la postulación de la existencia de la materia oscura

Espectroscopía MultiObjeto (MOS)

Espectroscopía MultiObjeto (MOS) - Multirendija



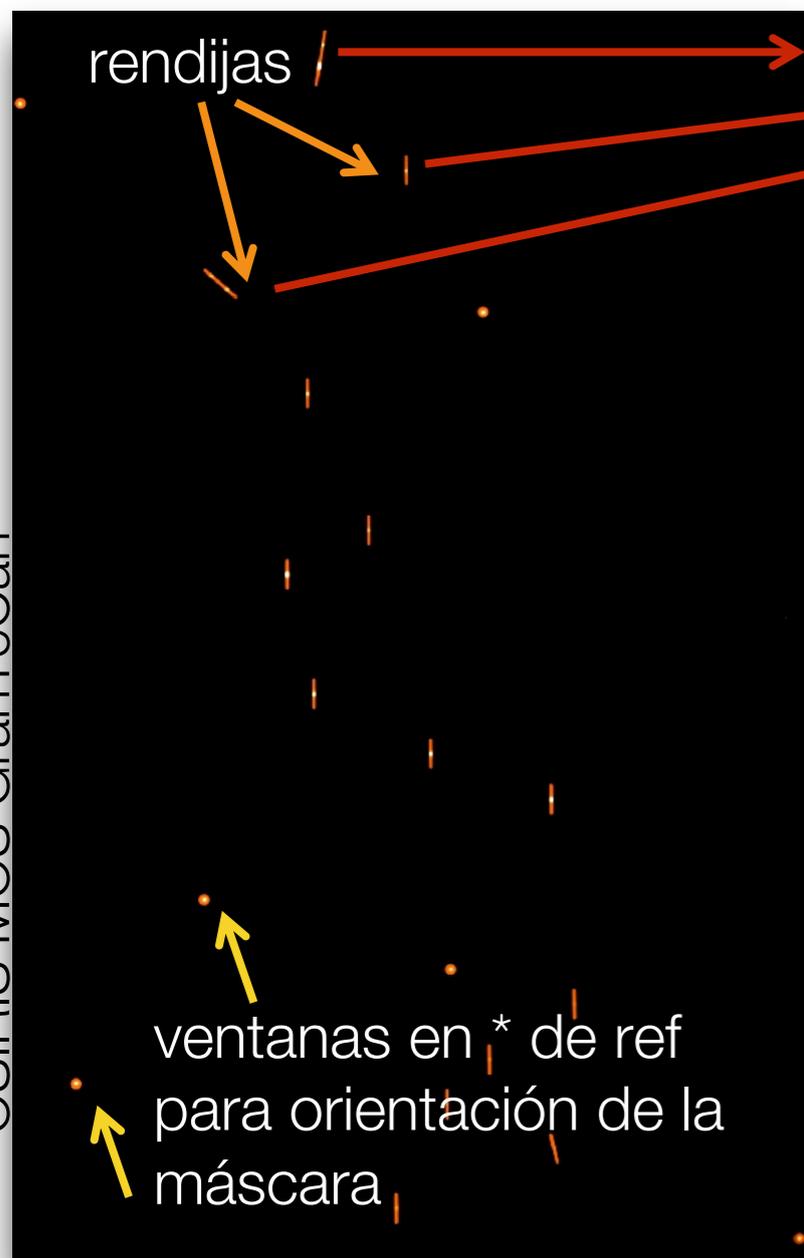
cortado de máscaras para OSIRIS GranTeCan



GranTeCan 10m, Roque de Los Muchachos, La Palma

Espectroscopía MultiObjeto (MOS) - Multirendija

- Se cortan rendijas pequeñas (narrow slit) sobre la posición de cada objeto en el plano focal
- Los espectros se producen en diferentes Y según la ubicación de cada rendija



Slit mask (máscara de rendijas)

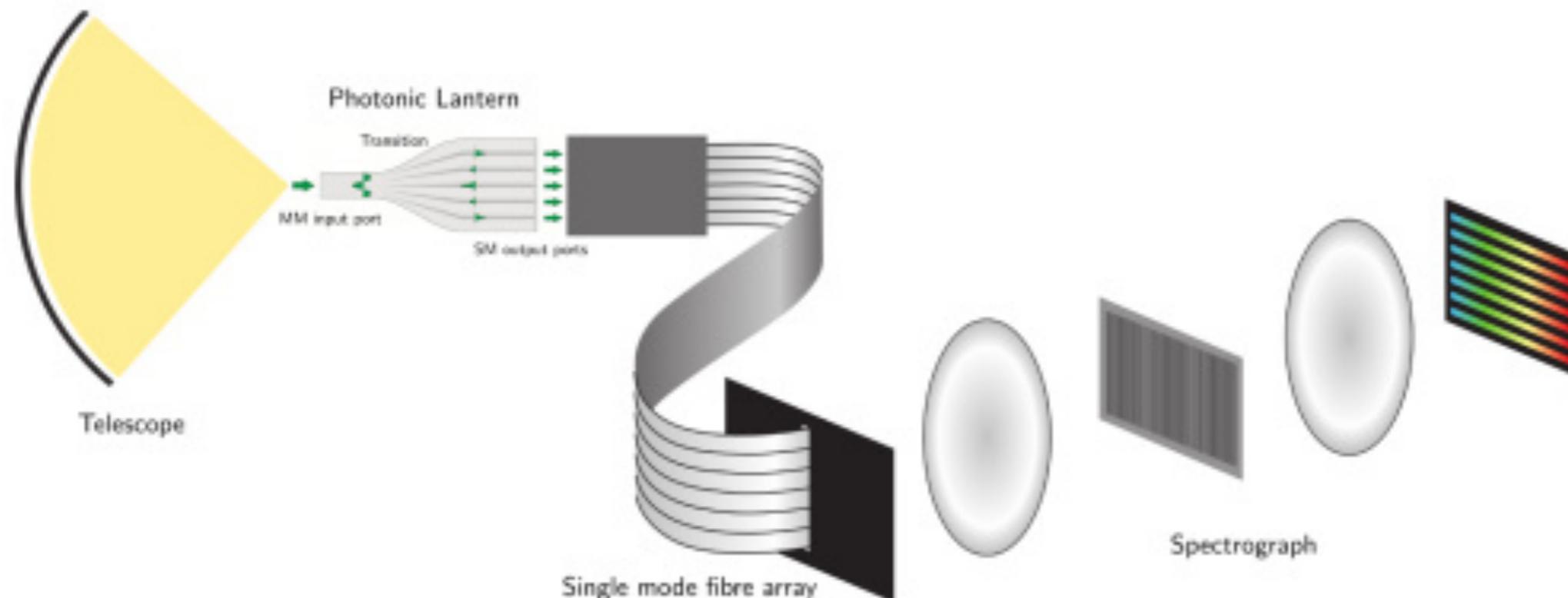


Imagen

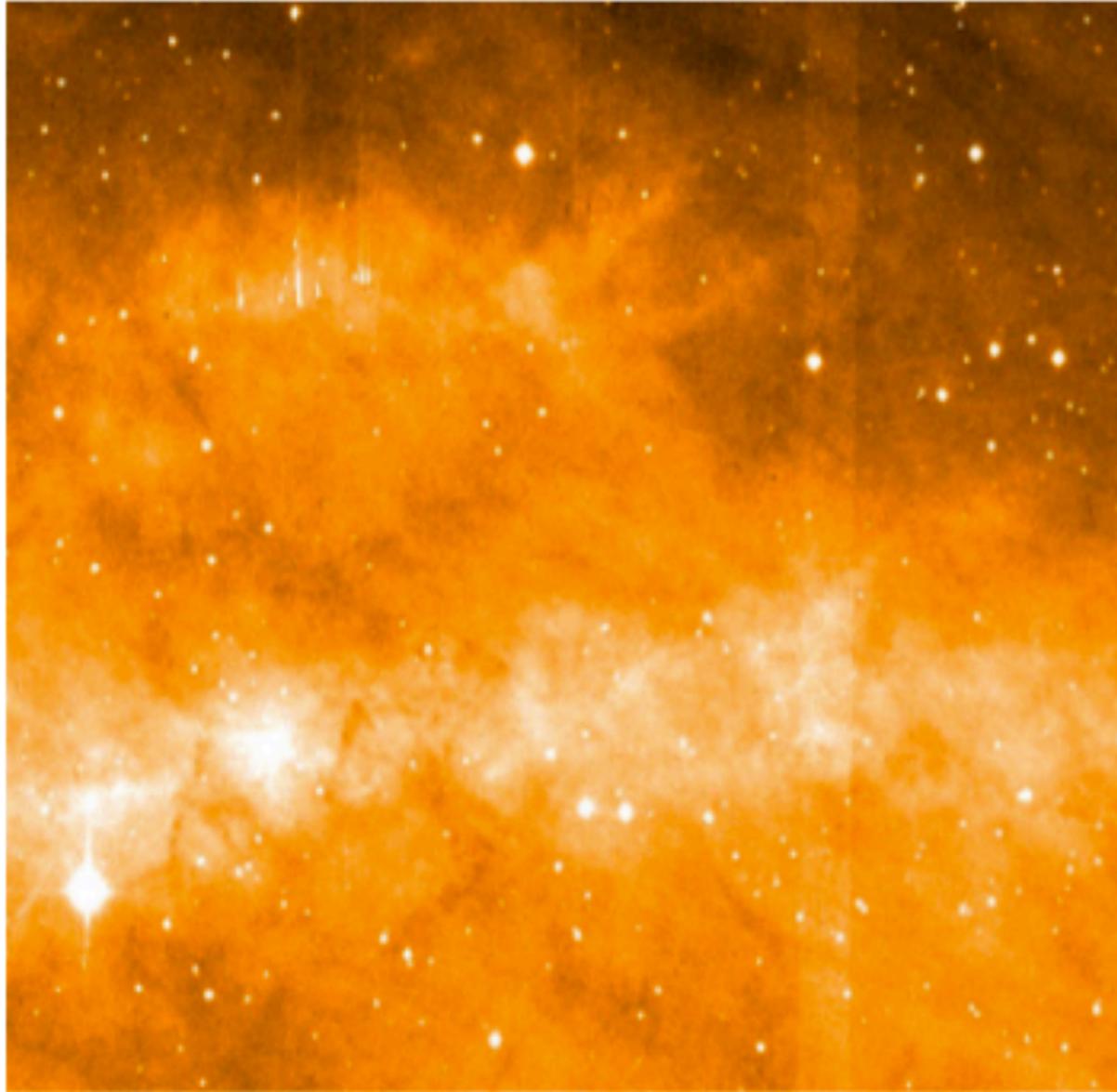
- Los espectros tienen offsets (corrimientos) diferentes en la dirección de dispersión según la posición X de cada rendija
- No pueden coincidir dos rendijas en el mismo Y —
-> si no los espectros quedarían solapados

Espectrógrafos Multi-fibra (Fiber fed Spectrograph)

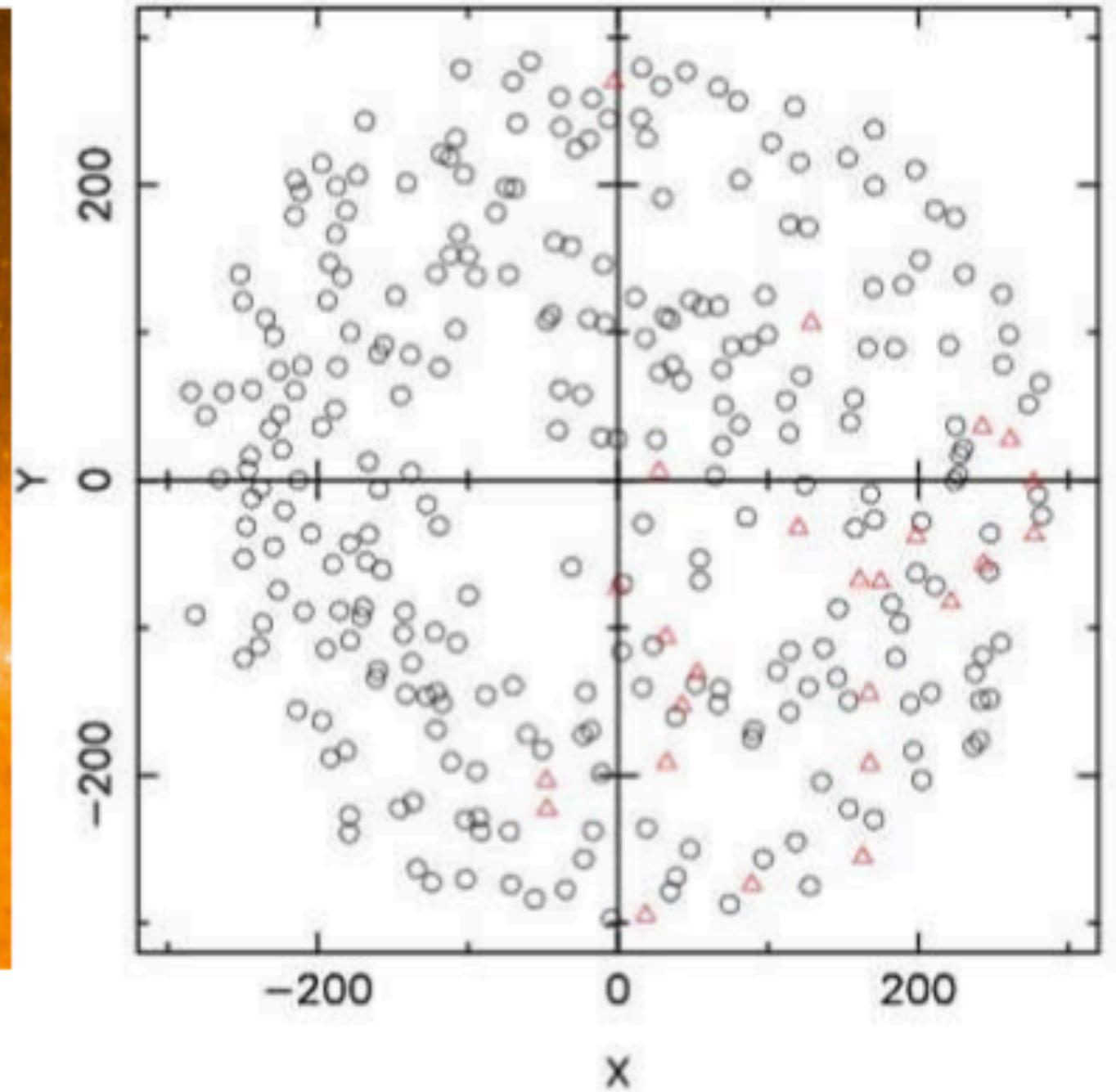
- Se posiciona una fibra óptica en cada objeto (cientos a pocos miles de fibras)
- Las fibras llevan la luz de cada objeto al espectrógrafo : se.g. (simplificación) se alinean sobre una rendija + rejilla ->>> los espectros salen alineados
- Sólo hay restricción en la distancia mínima a la que pueden estar dos fibras



Espectrógrafos Multi-fibra (Fiber fed Spectrograph)

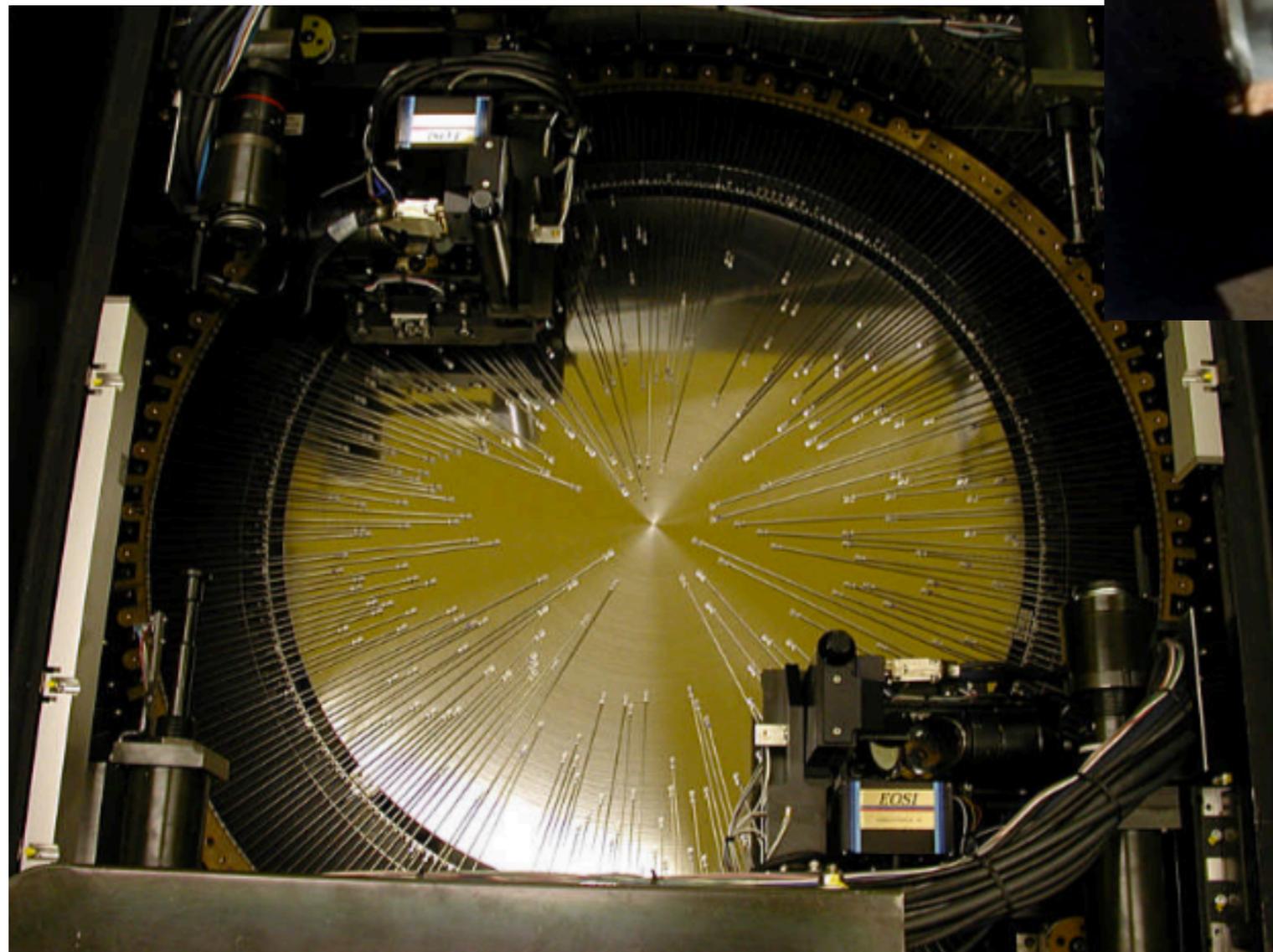
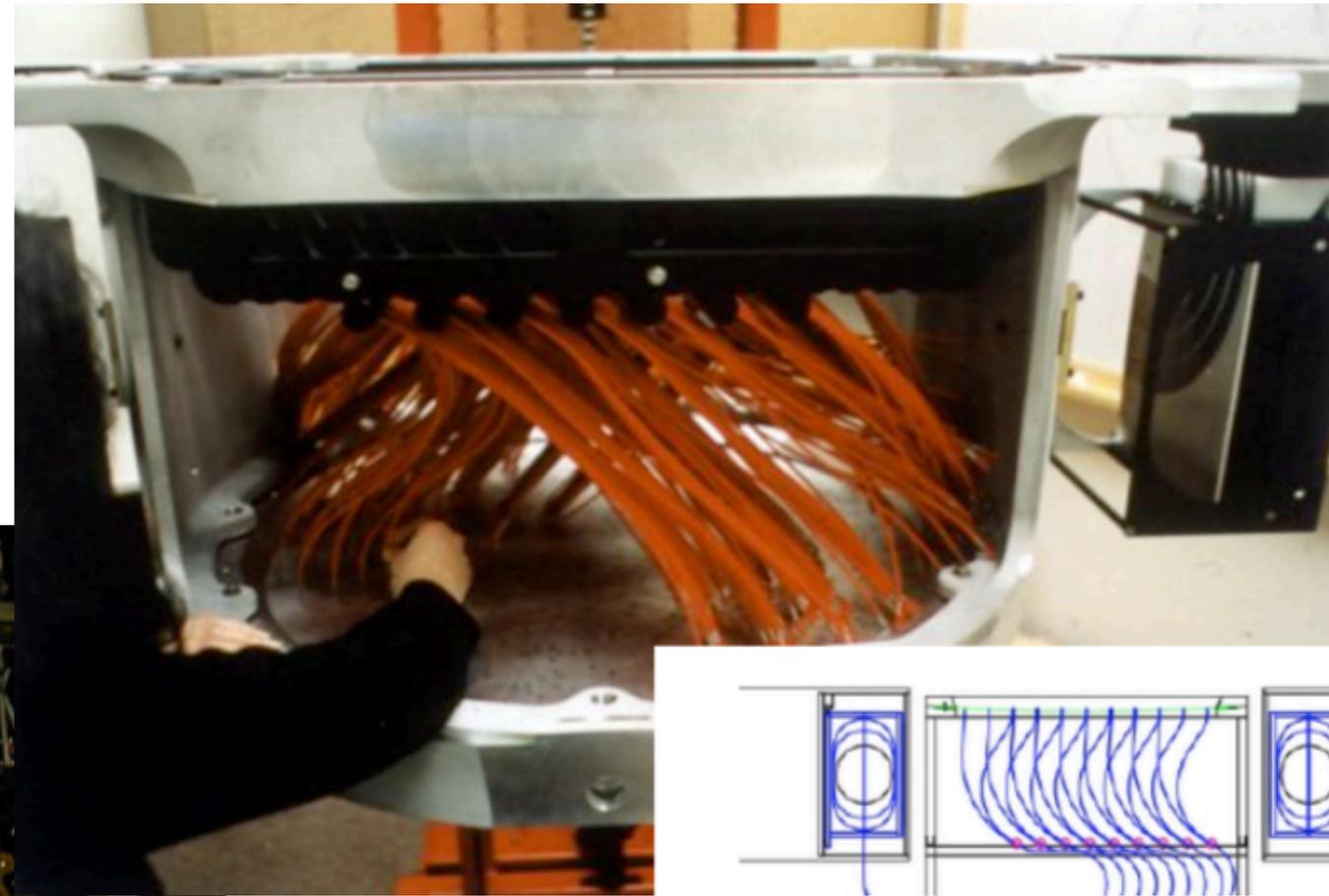


IPHAS star forming region



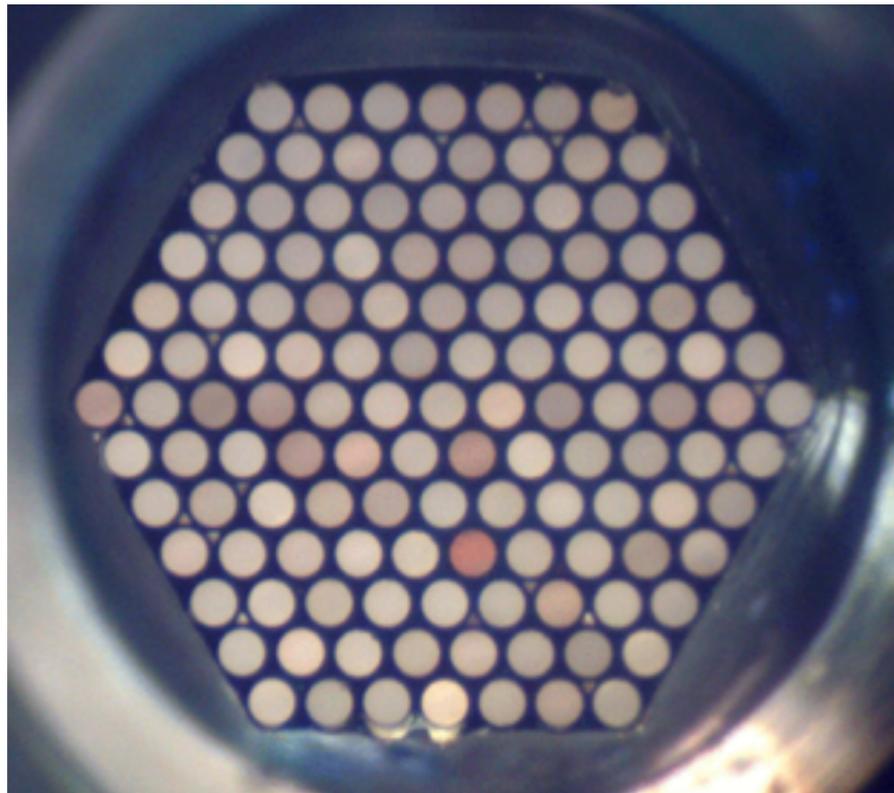
Espectrógrafos Multi-fibra (Fiber fed Spectrograph)

- En APOGEE - SDSS 2.5m Apache point, las fibras se posicionan manualmente

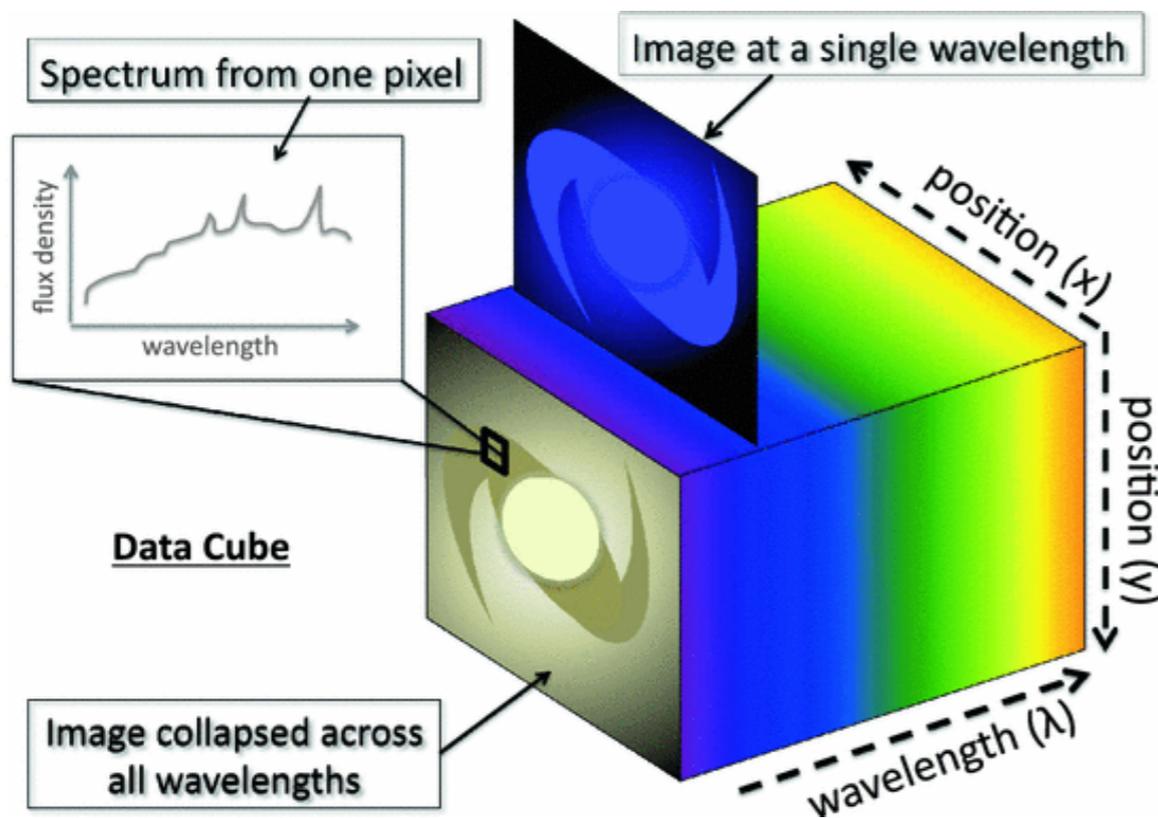
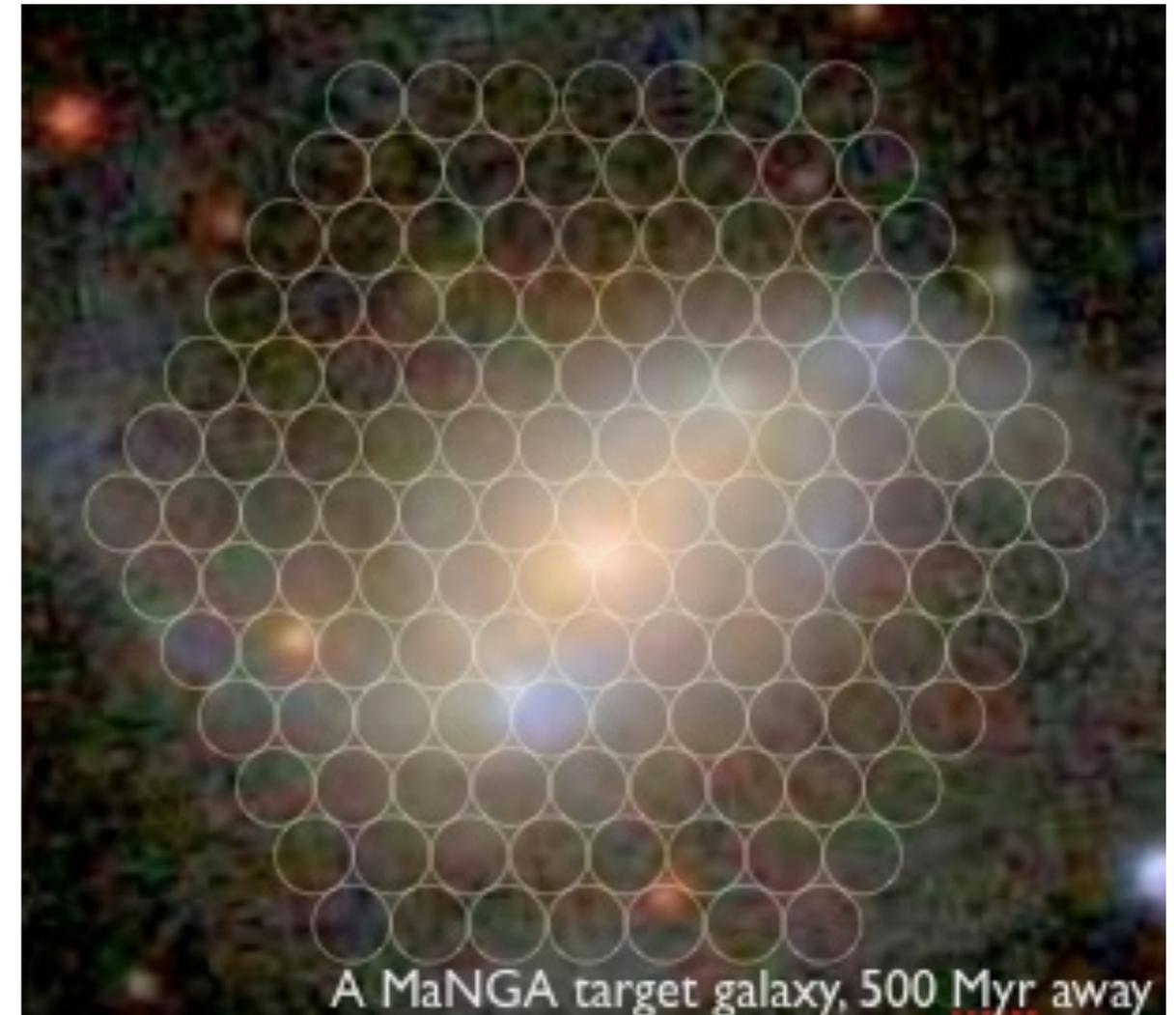


- En otros, e.g. HectoSpec en MMT unas varillas llevan las fibras y se posicionan robóticamente

IFUs: Integral Field Units



MaNGA - SDSS



MaNGA Technical Details

- ☆ Dark-time observations
- ☆ Fall 2014 – Spring 2020
- ☆ 17 IFUs per 7 deg² plate
- ☆ Wavelength: 360-1000 nm, resolution $R \sim 2000$
- ☆ 10,000 galaxies across ~ 2700 deg², redshift $z \sim 0.03$
- ☆ roughly 3-hour dithered exposures
- ☆ Spatial sampling of 1-2 kpc
- ☆ Per-fiber $S/N = 4-8$ (per angstrom) at 1.5 Re

Bibliografía

- Massey & Hanson (2013) Astronomical Spectroscopy. In: Oswalt T.D., Bond H.E. (eds) Planets, Stars and Stellar Systems. Springer, Dordrecht, pp 35-98
- Frei & Gunn, 1994, AJ, 108, 476
- Bessel, 2005, Annual Reviews in Astronomy & Astrophysics, 43, 293
- Chomey, To Measure the Sky: An Introduction to Observational Astronomy
- Lena, Mignard & Lebrun, Observational Astrophysics