

# Astrofísica Observacional (FIS-639)

Mestrado e Doutorado em Física e Astronomia



---

## – Aula 7 – Espectroscopia

---

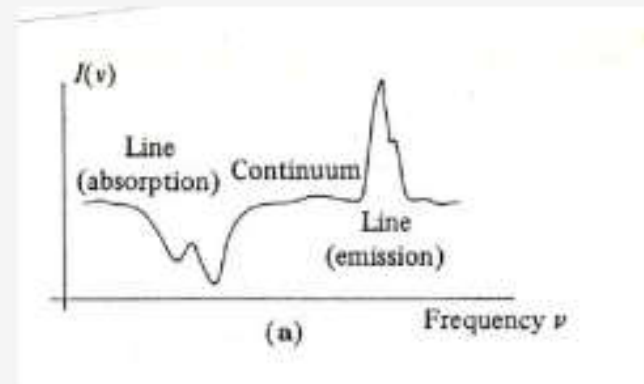
Prof. Dr. Sergio Pilling  
[sergiopilling@yahoo.com.br](mailto:sergiopilling@yahoo.com.br)  
<http://www1.univap.br/spilling>

# Espectros astrofísicos

- De modo geral, a emissão eletromagnética de um objeto astrofísico depende da frequência (comprimento de onda), direção e tempo
- A dependência com a frequência é chamada de espectro

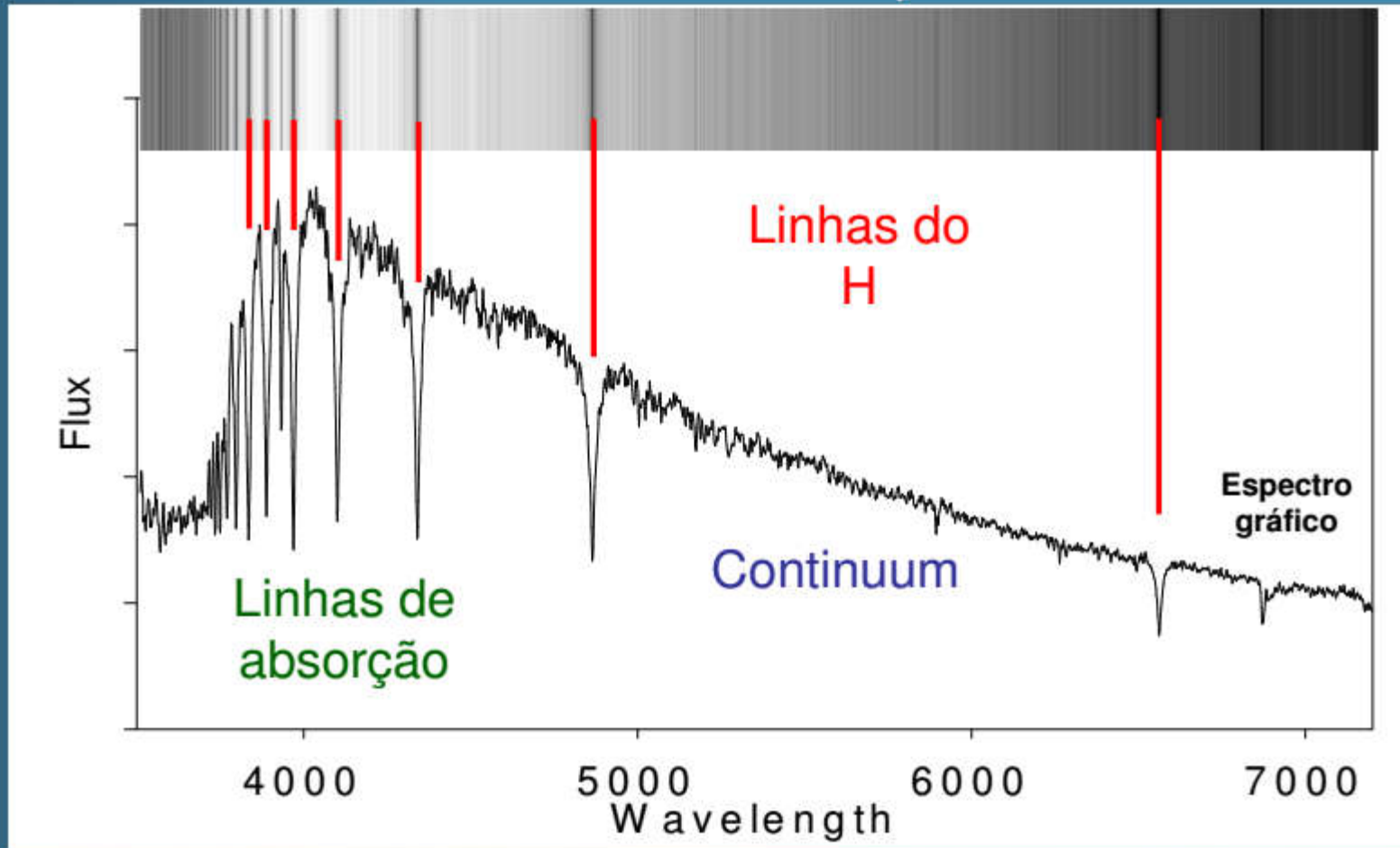
◇ contínuo

◇ linhas

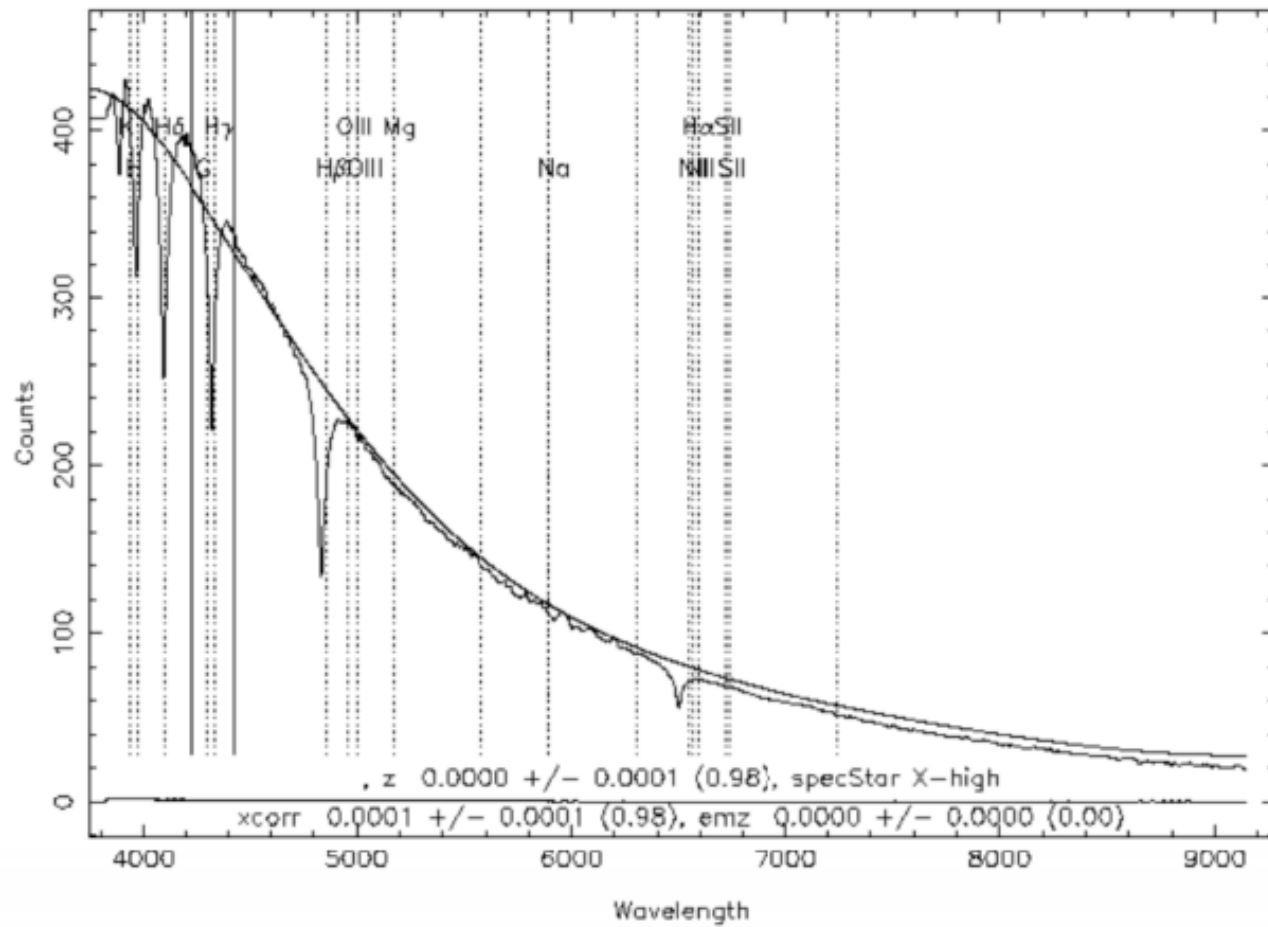


- A espectroscopia é a técnica que se traduz no maior número de vínculos às propriedades físicas dos objetos astrofísicos. Porém é mais custosa, em termos de tempo de integração, que a fotometria

# Espectro estelar



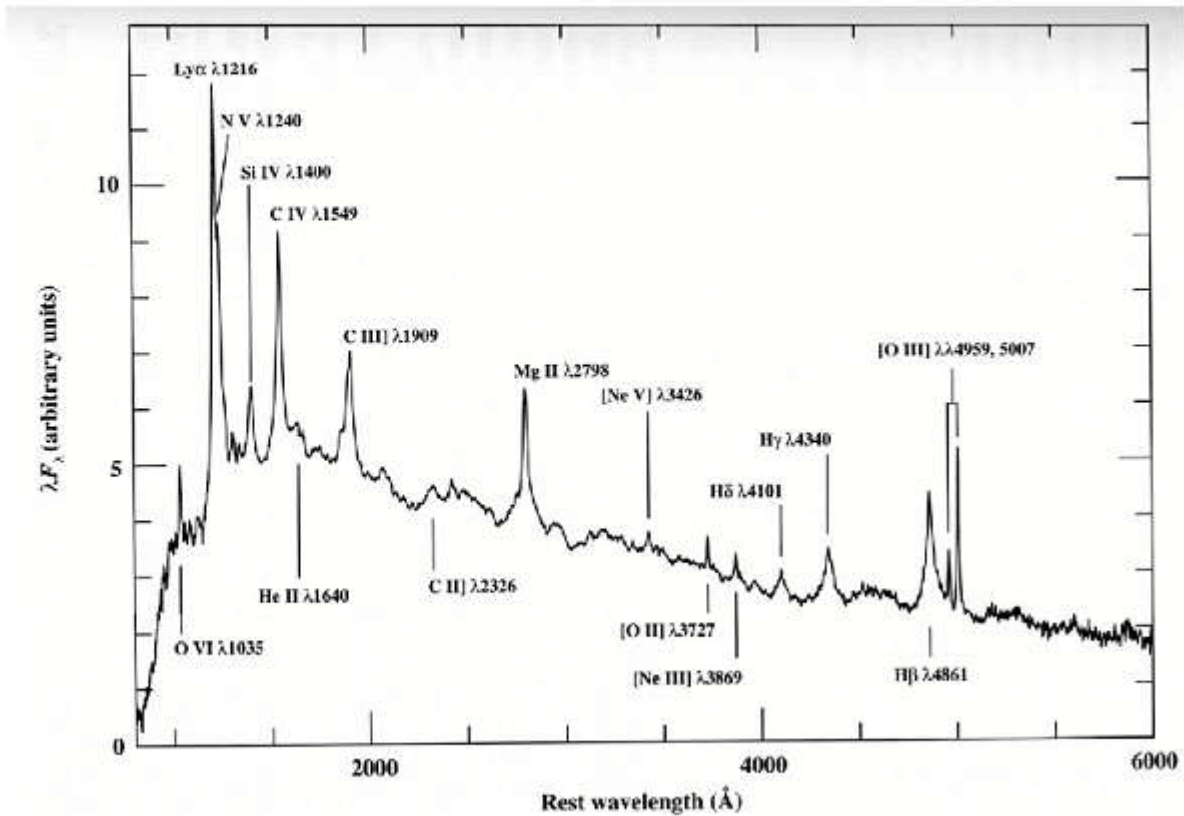
## Espectro de anã branca - SDSS



[http://www.sdss.org/gallery/gal\\_spectra.html](http://www.sdss.org/gallery/gal_spectra.html)

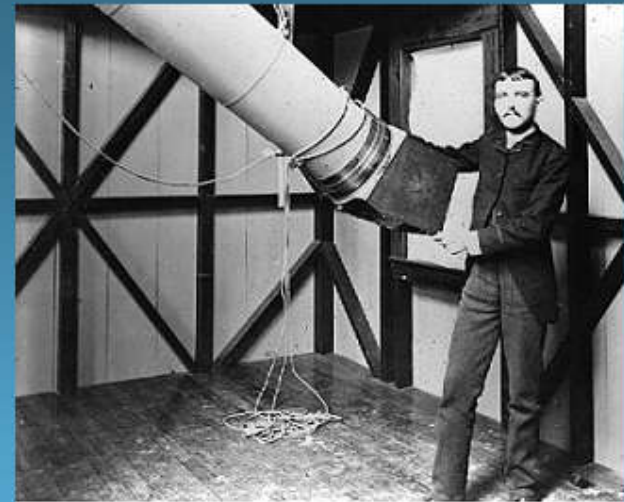
# Espectros de núcleos ativos

Linhas de emissão intensas e largas: gás quente e com alta velocidade interna.



- **Classificação Espectral**

Novo esquema: desenvolvido no Observatório de Harvard no início do Séc. XX.



Henry Draper (1837-1882) SI neg. 48,235



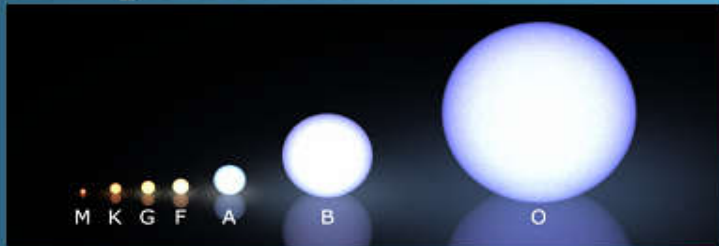
O trabalho começou por Henry Draper que fotografou o primeiro espectro de Vega em 1872.

**Annie J. Cannon estudou o espectro de mais de 400,000 estrelas e percebeu uma correlação entre o tipo espectral (A, B, C, etc.) e a cor da estrela (ou seja, sua temperatura).**

**Ela propôs uma nova classificação, que ficou conhecida como classificação de Harvard.**

A nova a classificação, feita nos anos 1920, foi feita em termos da **temperatura superficial da estrela.**

A ordem passa a ser:



**O B A F G K M**

←→  
estrelas quentes  
tipos recentes  
(early types)

←→  
estrelas frias  
tipos tardios  
(late types)

Cada classe é subdividida em **10 sub-classes de 0 até 9**

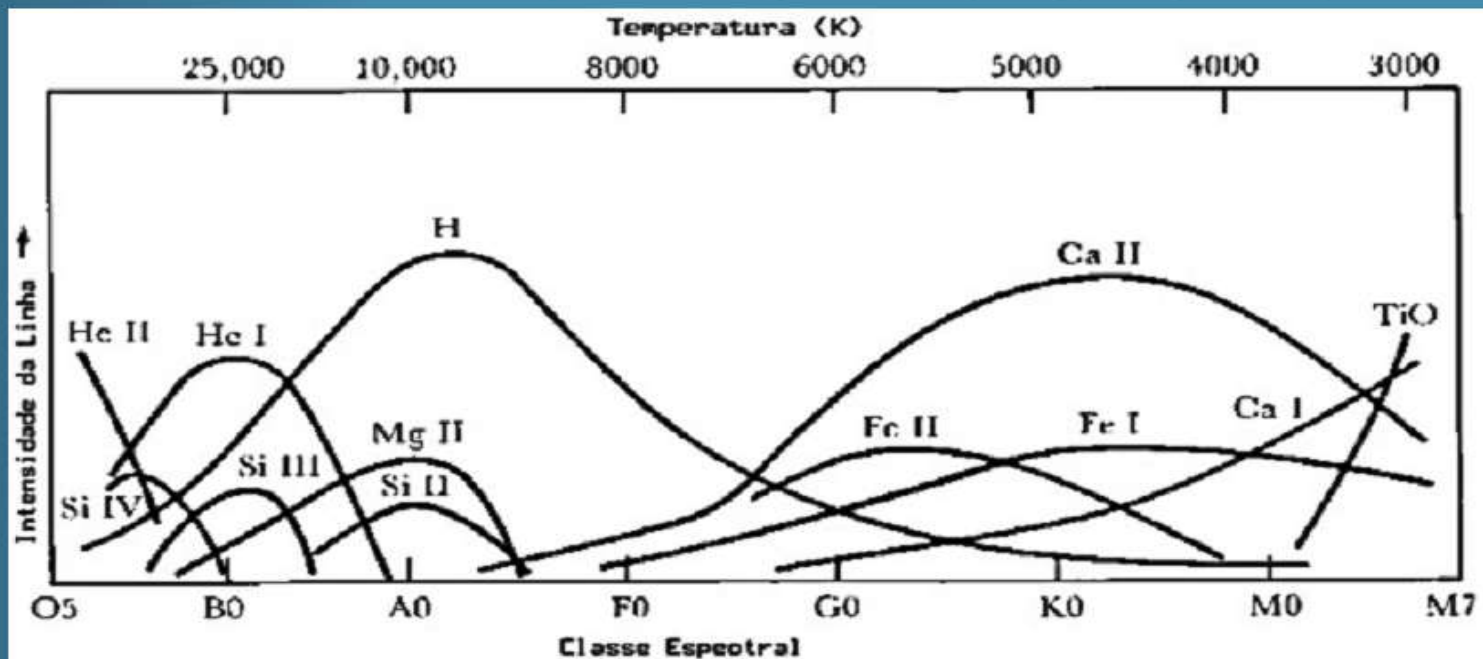
Intensidade das linhas em função da temperatura (ou tipo espectral)

Nomenclatura:

H I, He I, Ca I, etc.  
→ átomo com todos os elétrons.

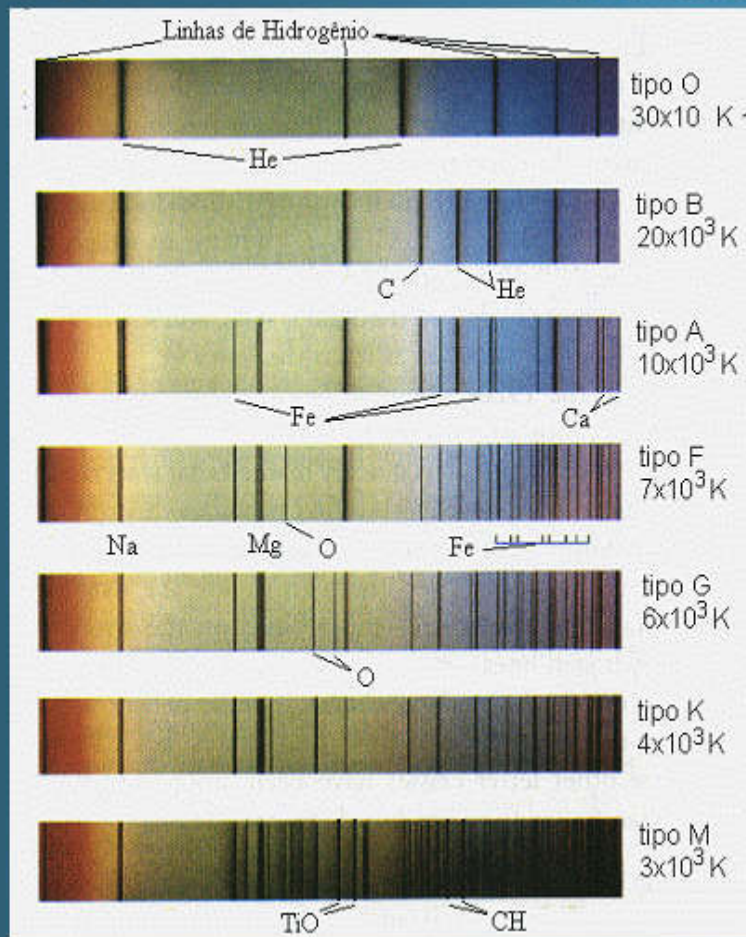
H II, He II, O II, Ca II, etc.  
→ átomo que perdeu 1 elétron.

He III, O III, Ca III, etc.  
→ átomo que perdeu 2 elétrons.



700

400 nm



**Estrelas com  $T > 25.000$  K:** forte linha de absorção do He II (hélio uma vez ionizado) e de elementos mais pesados, com múltiplas ionizações (O, N e Si)

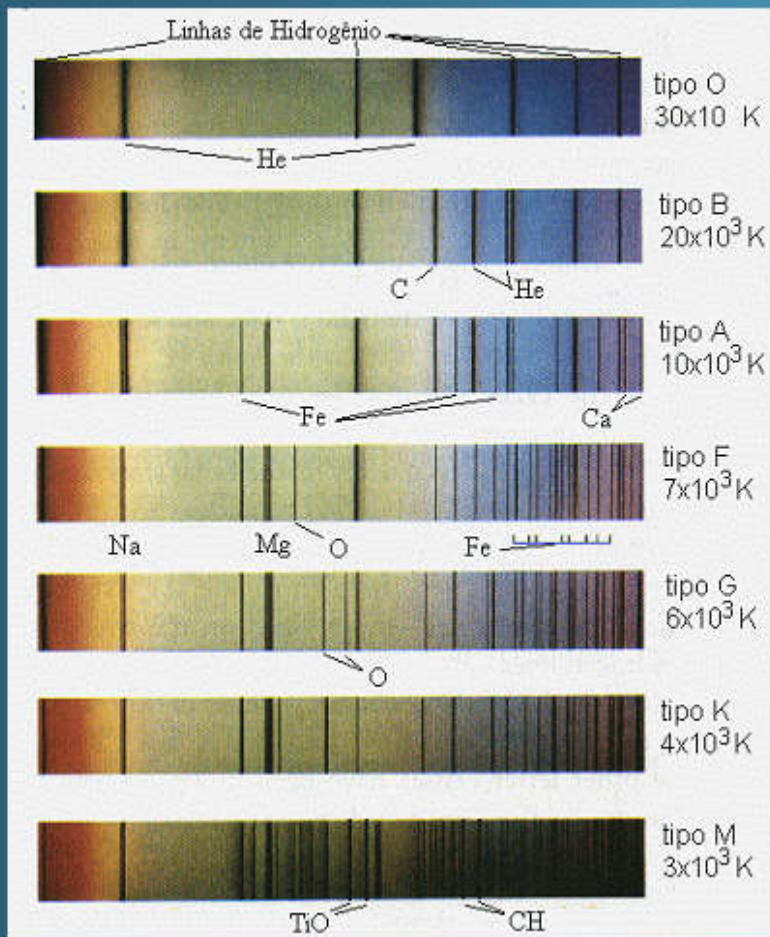
Essas fortes linhas não aparecem no espectro das **estrelas mais frias**: não atingem as temperaturas necessárias para excitar e ionizar esses elementos.

**As linhas de H I** são mais fracas nas estrelas + quentes, pois a altas temperaturas, o hidrogênio encontra-se ionizado, restando poucos átomos intactos para produzirem essas linhas.



700

400 nm

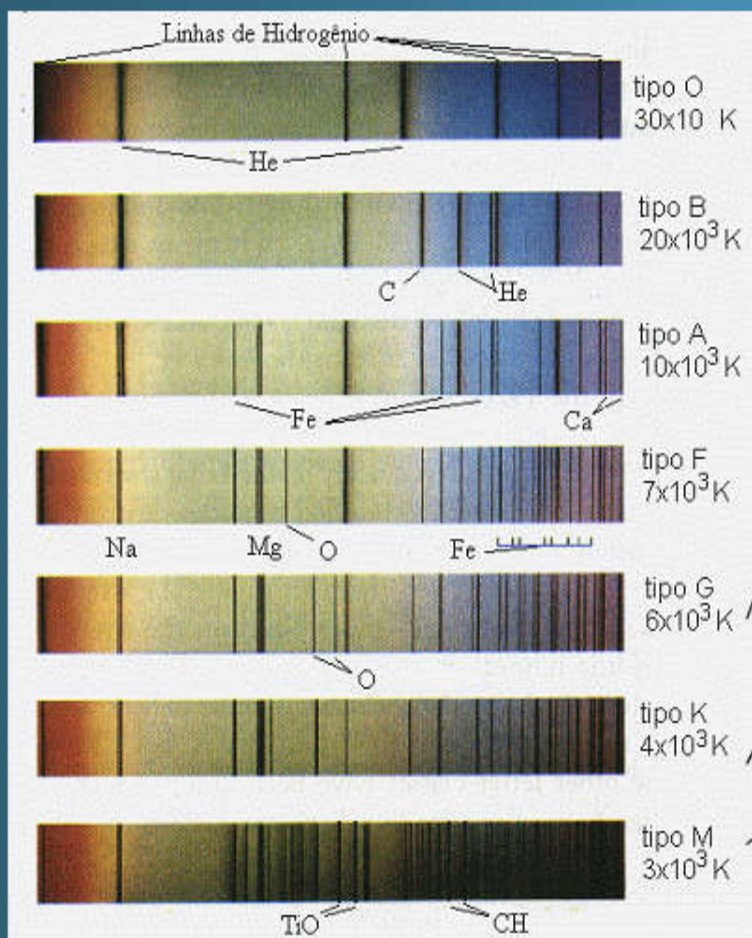


**Estrelas com  $T \sim 10.000\text{K}$ :** as mais fortes linhas de absorção são do H excitado, onde os elétrons facilmente se movem entre o segundo e terceiro níveis orbitais (ex., linha vermelha em  $656,3\text{ nm} - \text{H}\alpha$ ).

Linhas de Ca e Ti, que têm elétrons menos ligados, são mais comuns nessas estrelas do que as linhas de He, O e N, em que os elétrons são fortemente ligados.

700

400 nm



**Nas estrelas + frias:** novamente não encontramos as linhas do H excitado, porque os elétrons ficam preferencialmente no estado fundamental.

Verificam-se linhas de elementos mais pesados fracamente excitados.

Não se encontram linhas de elementos ionizados.

Como a energia dos fótons saindo das estrelas frias não é suficiente para destruir moléculas, ocorrem muitas linhas moleculares de absorção (ex. TiO).

## Sistema MK de classificação espectral

Proposto por William W. Morgan e Phillip C. Keenan em 1943.

Neste sistema, uma *classe de luminosidade*, designada por um algarismo romano anexado ao tipo espectral de Harvard.

Também conhecido como *sistema de Yerkes*.

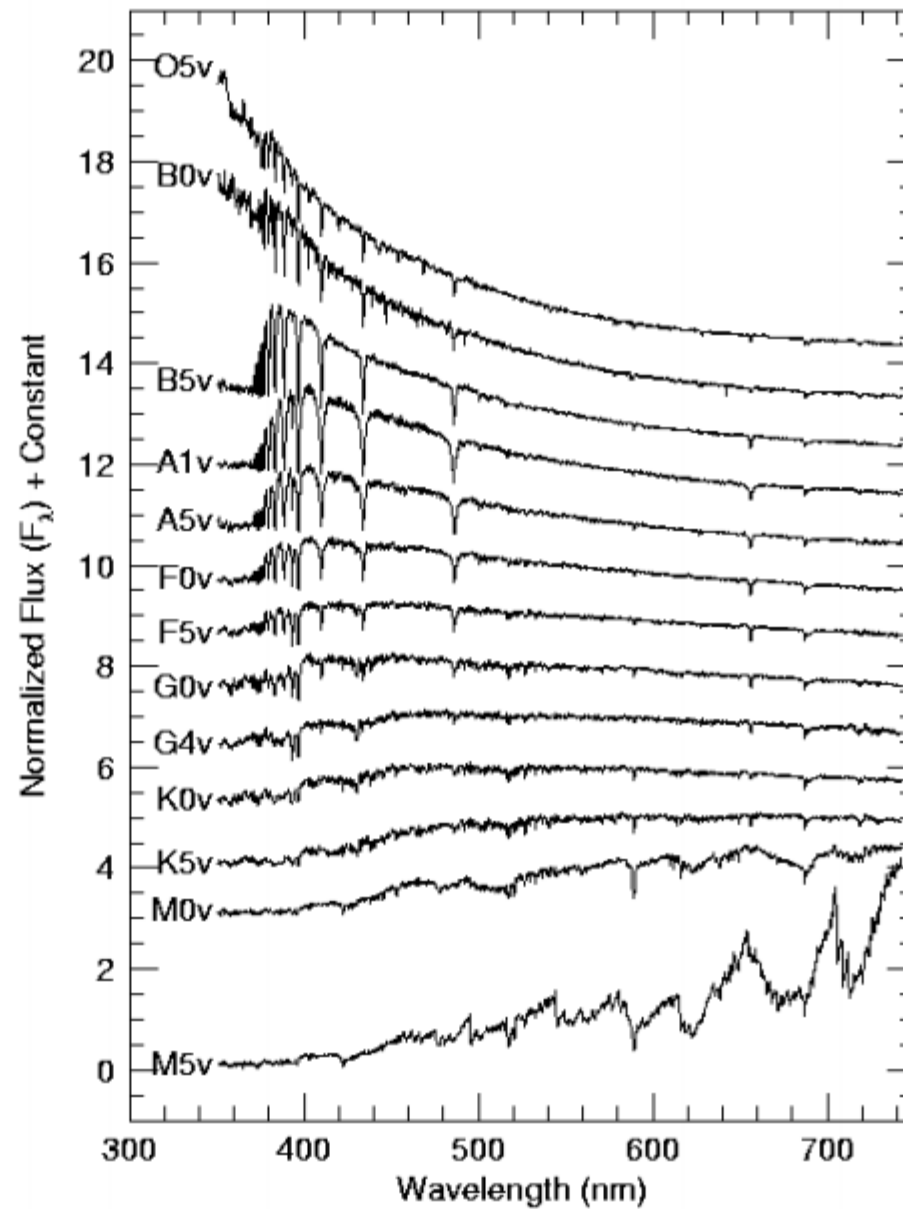
### Exemplo

**Altair: A7V**

**Canopus: F0Ib**

Classe	Tipo de Estrela
Ia-0	Supergigantes extremamente luminosas (hipergigantes)
Ia	Sugergigantes luminosas
Ib	Supergigantes menos luminosas
II	Gigantes brilhantes
III	Gigantes normais
IV	Subgigantes
V	Estrelas da Sequência Principal (estrelas anãs)
VI	Sub-anãs
VII	Anãs brancas

### Dwarf Stars (Luminosity Class V)



- Diagrama HR

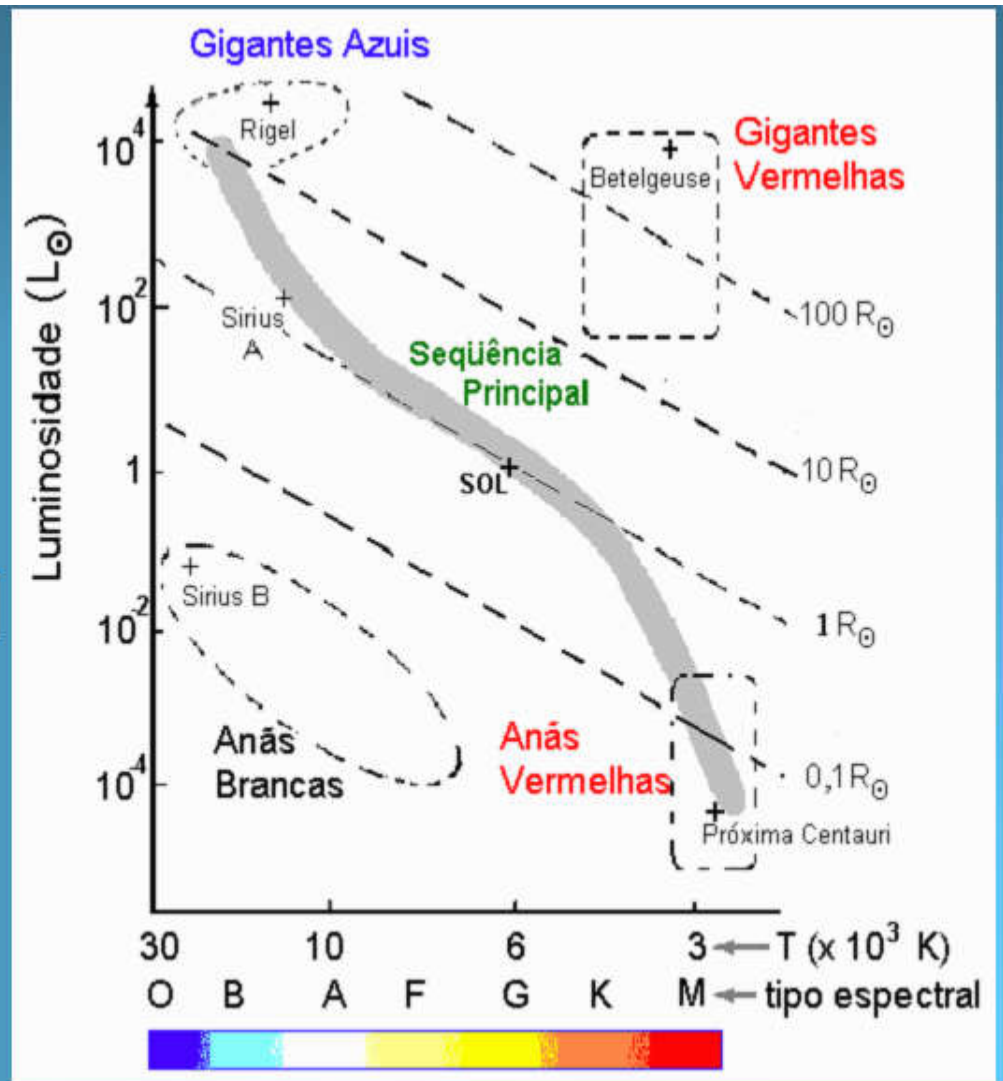
Vamos considerar novamente a lei de Stefan-Boltzman

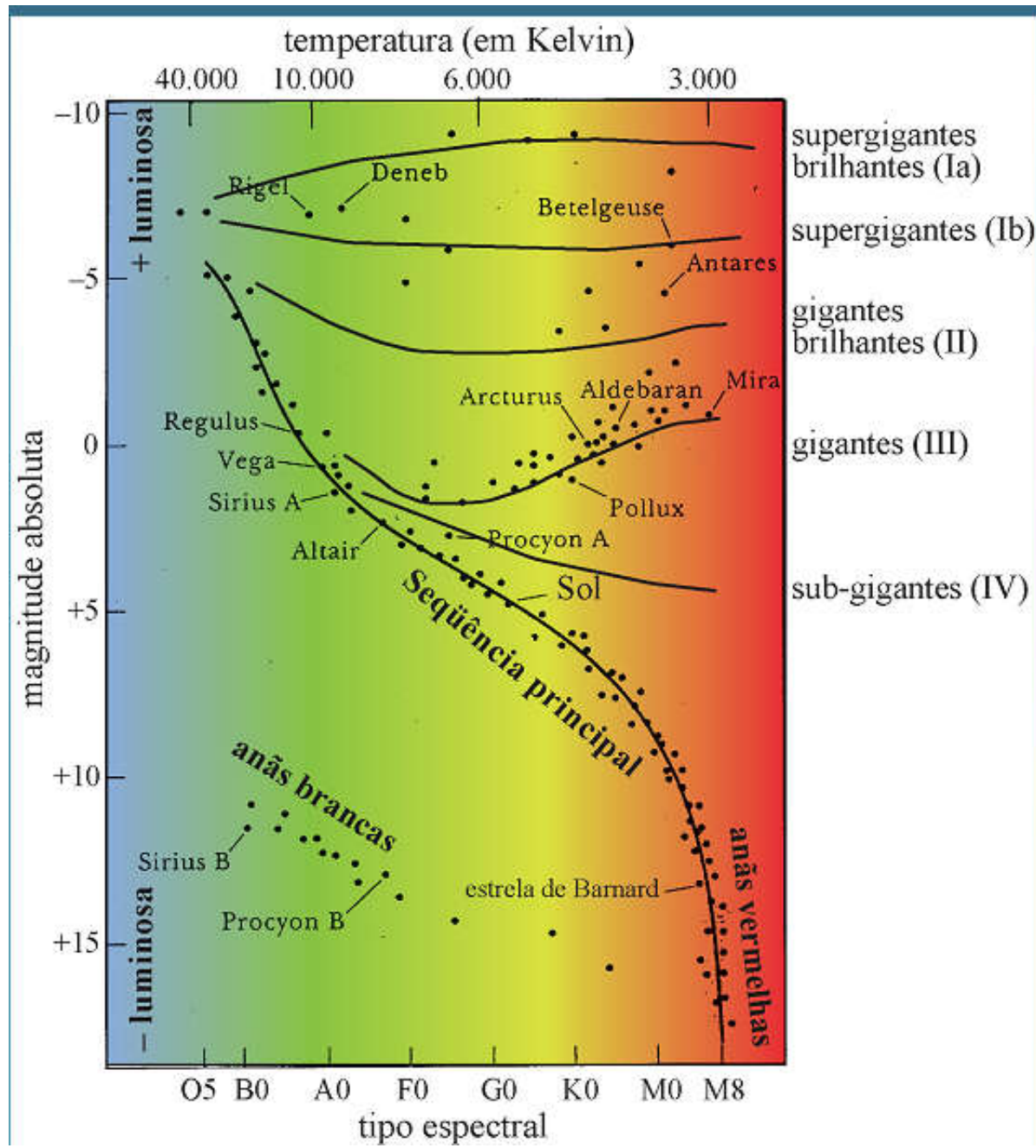
$$L = 4\pi\sigma R^2 T_{ef}^4$$

Tirando-se o logaritmo:

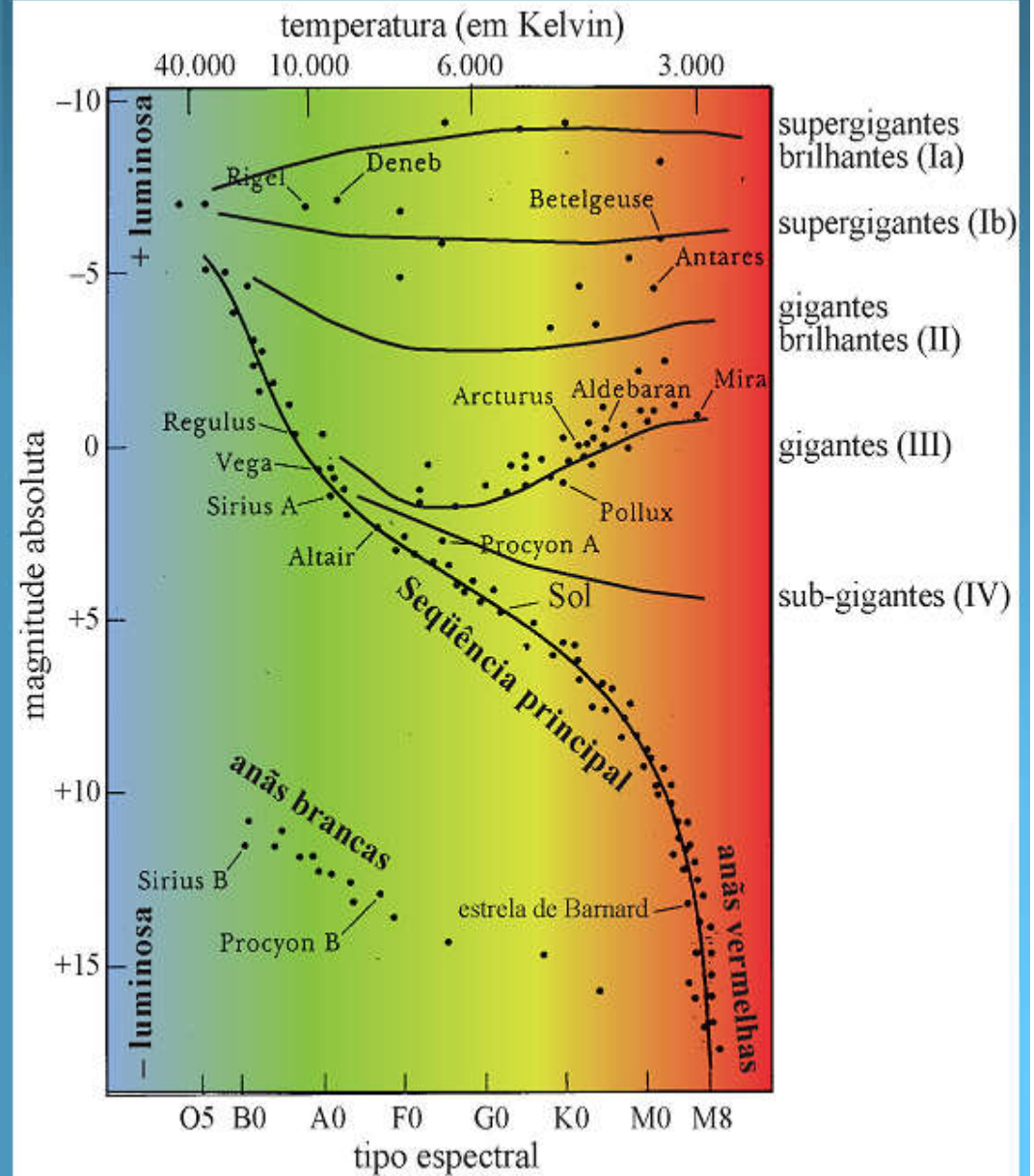
$$\log(L) = 4 \log(T_{ef}) + 2 \log(R) + C$$

ou seja, *linhas de mesmo raio são retas no diagrama HR*

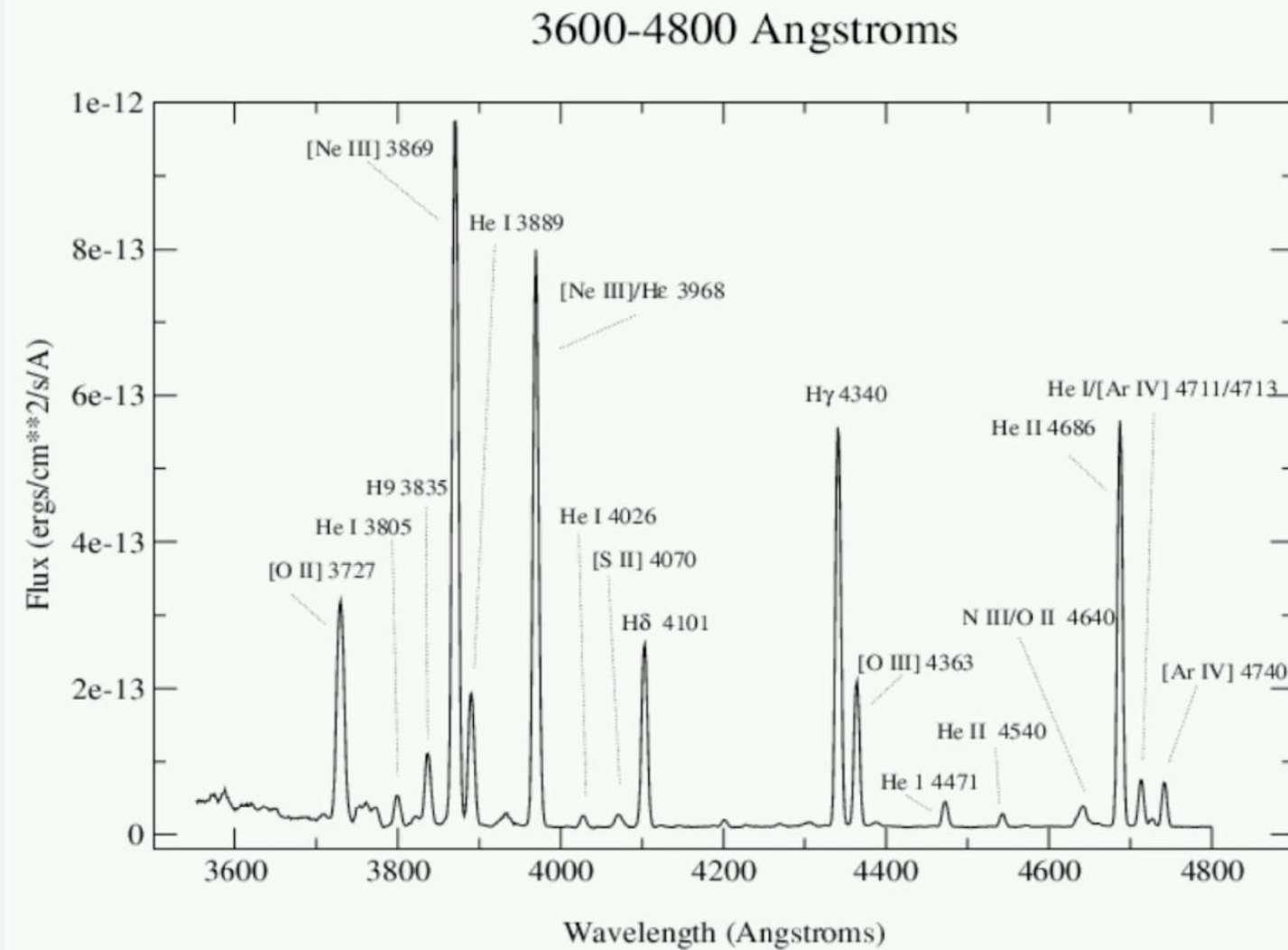




O Sol é uma estrela G2V, ou seja, considerada como uma estrela anã.



# Espectro de nebulosa planetária

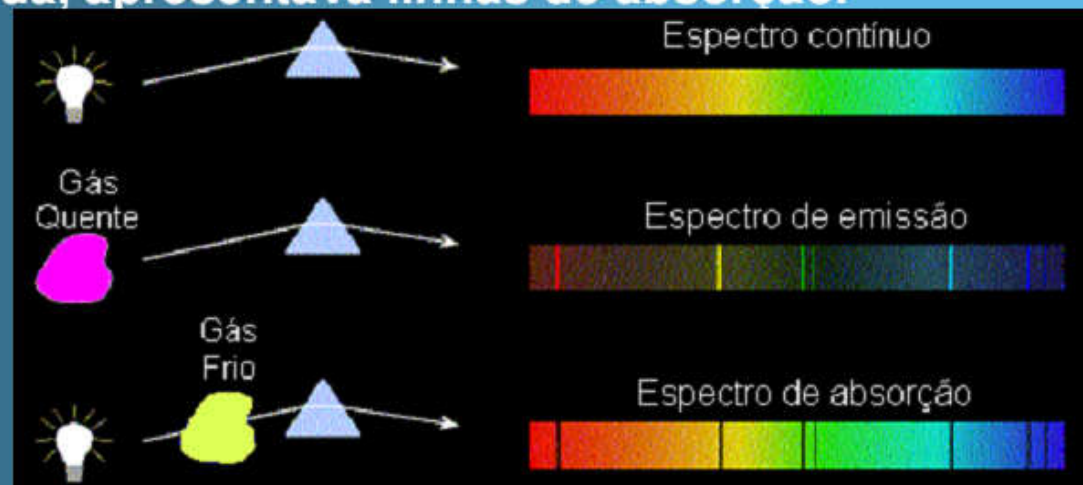




# História

- Fraunhofer (1814)
  - ↳ identificou > 500 bandas escuras – linhas de Fraunhofer - no espectro solar usando um espectrógrafo (sua invenção)
    - em 1802, Wollaston já as tinha notado...
- Kirchhoff & Bunsen (1859)
  - ↳ origem das linhas de absorção do espectro solar: transições eletrônicas
- Novo elemento identificado no espectro solar, Hélio
  - ↳ 1868 – Janssen & Lockyer
- Catálogo Henry Draper (HD) – 1918 e 1924
  - ↳ catálogo espectroscópico de 225.000 objetos
    - Harvard College Observatory: supervisão de Pickering, compilação de Cannon

Em 1856, Gustav Kirchhoff utilizou o bico de Bunsen (seu orientador) para estudar espectroscopicamente a chama das substâncias. Ele passou a verificar que os elementos e substâncias químicas apresentavam um espectro com linhas de emissão. Notou também que uma mesma substância gasosa colocada a frente de uma emissão contínua, apresentava linhas de absorção.



**As três leis de Kirchhoff para espectros:**

- 1) Um corpo opaco e quente emite um espectro contínuo;
- 2) Um gás quente e transparente emite linhas de emissão;
- 3) Um gás frio e transparente provoca absorção em uma emissão contínua de fundo.

# Linha espectral

- Uma linha ou banda em um espectro astrofísico pode ser descrita por:
  - ◊ sua posição;
  - ◊ sua intensidade;
  - ◊ forma;
  - ◊ polarização.

# Parametrização das linhas espectrais

- O perfil da linha é comumente parametrizado de maneira simplificada pelos seguintes parâmetros:

- ↳ largura total a meia-altura
- ↳ largura equivalente
- ↳ intensidade

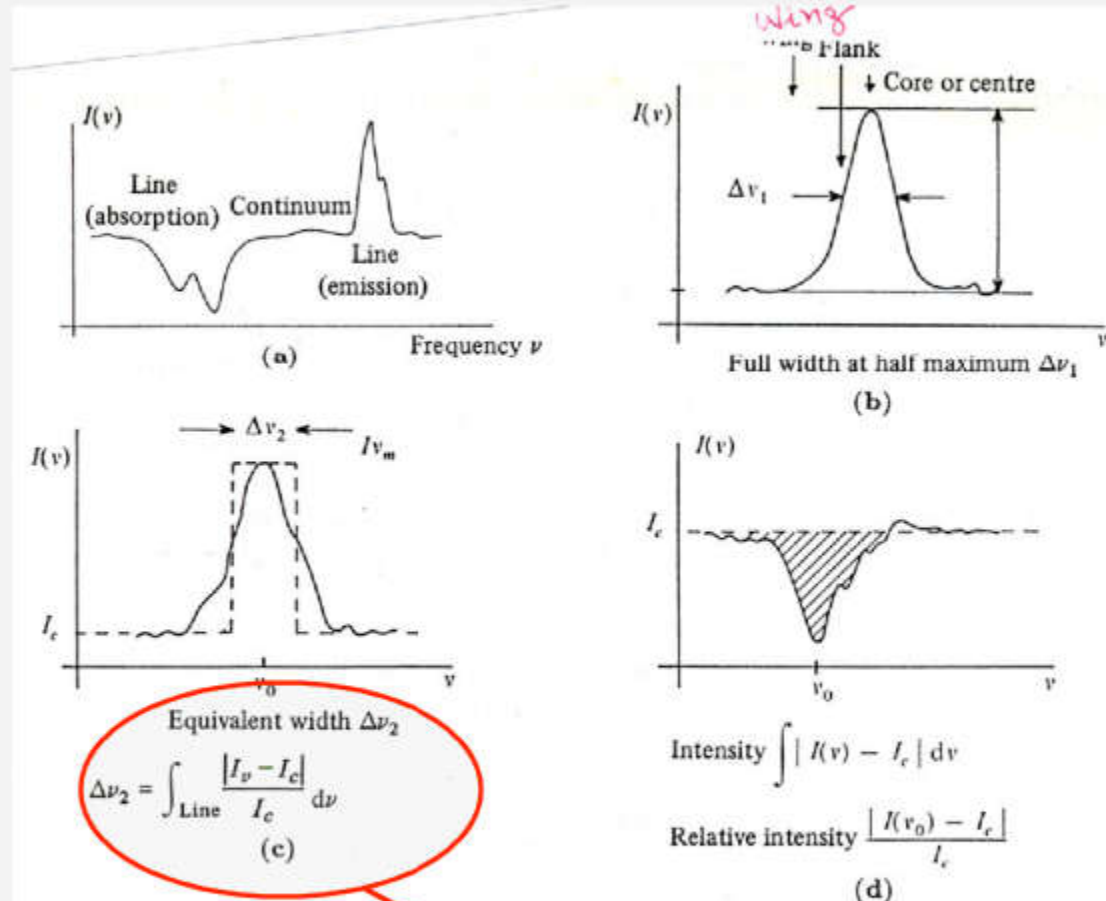


Fig. 7.1a-d. Terminology for spectral lines. (a) Arbitrary spectrum. (b) Full width at half-maximum of an emission line. (c) Equivalent width of a line. Definition applies for absorption or emission lines. (d) Relative intensity of an absorption line

Léna

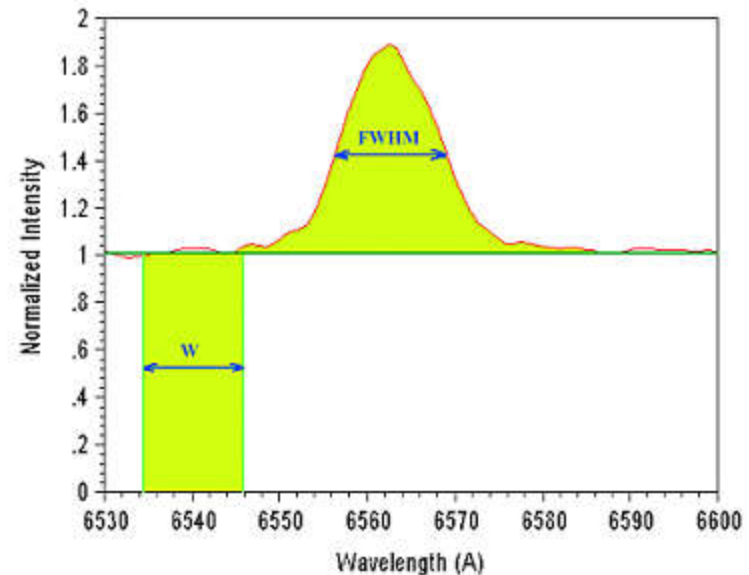
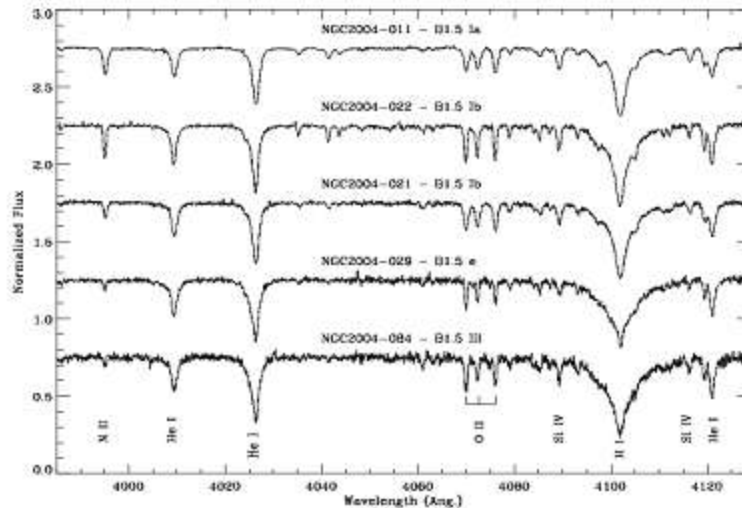
Medida de intensidade!

# Fluxo de linha e Largura equivalente

Largura equivalente,  $W$  ou EW:

$$W = \sum \frac{F_c - F_\lambda}{F_c} d\lambda$$

C. Trundle *et al.*: VLT-Flames survey:  $T_{\text{eff}}$  scales & N abundances of B-type stars.



Fluxo de linha:  
 $F = \int (F_\lambda - F_c) d\lambda$

- As **linhas espectrais** carregam muitas informações dos processos e das condições físicas existentes na fonte (Processos Radiativos II). Alguns exemplos:

Característica da linha	Informação
Posição	Elemento, transição
Intensidade ou largura equivalente	Abundância
	Temperatura, pressão, gravidade
Posição e perfil	Campo de velocidade macroscópico
Perfil	Campo de velocidade microscópico
Polarização	Campo magnético

## Figura do espectro eletromagnético com exemplos

**Table 7.1.** Bound-bound transitions

Transitions	Energy [eV]	Spectral region	Example
Hyperfine structure	$10^{-5}$	Radiofrequencies	21 cm hydrogen line
Spin-orbit coupling	"	"	1666 MHz transitions of OH molecule
Molecular rotation	$10^{-2}$ – $10^{-4}$	Millimetric, infrared	1-0 transition of CO molecule at 2.6 mm
Molecular rotation-vibration	$1$ – $10^{-1}$	Infrared	H <sub>2</sub> lines near 2 $\mu$ m
Atomic fine structure	$1$ – $10^{-3}$	Infrared	Ne II line at 12.8 $\mu$ m
Electronic transitions of atoms, molecules and ions	$10^{-2}$ – $10$ $10$ – $10^4$	Ultraviolet, visible, infrared Ultraviolet, X-ray	Lyman, Balmer, etc. series of H, resonance lines of C I, He I K, L shell electron lines
Nuclear transitions	$> 10^4$	Gamma rays	<sup>12</sup> C line at 15.11 MeV
Annihilations	$\gtrsim 10^4$		positronium line at 511 keV

...mar

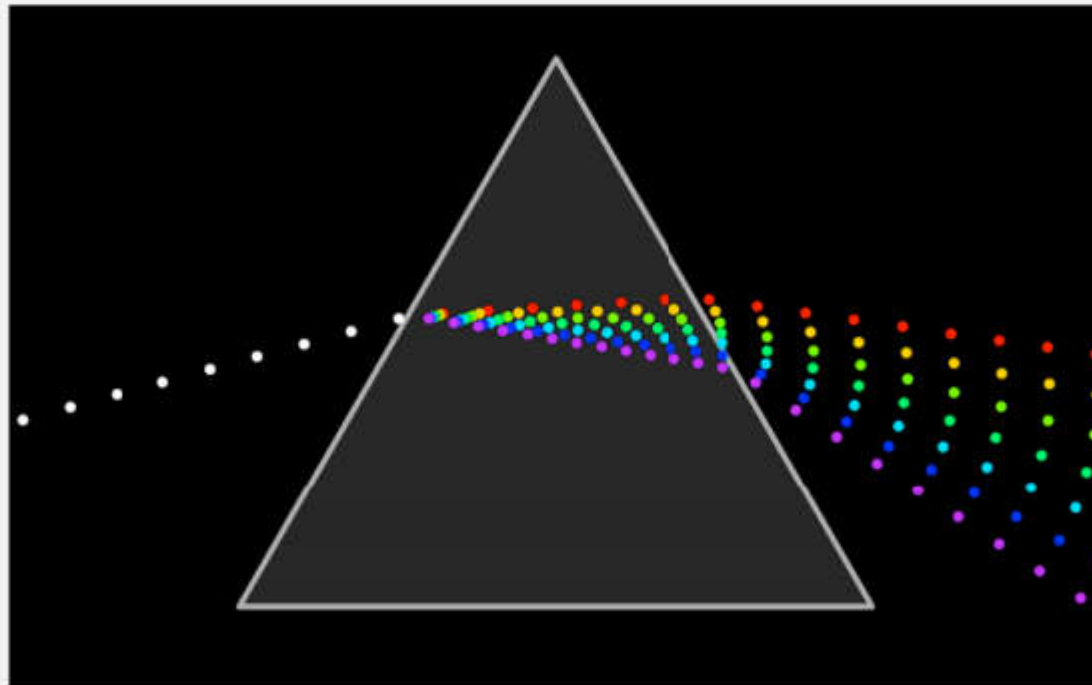
# Espectroscopia

- No intervalo óptico, o método mais comum para a obtenção de um espectro baseia-se na utilização de um elemento dispersor, isto é, um elemento que separa um feixe policromático em suas diferentes componentes de frequência
- Vamos a seguir discutir dois elementos dispersores:
  - ↳ prismas
  - ↳ redes de difração ou reflexão
    - são os elementos dispersores mais comuns nas implementações atuais de espectrógrafos



# Elementos dispersores - Prisma

- Princípio físico:
  - ↳ refração da luz ao atravessar a interface entre dois meios opticamente distintos, i.e., com diferentes índices de refração



Wikipedia - Spectroscopy

# Prisma

- Se os dois meios forem transparentes (sem absorção), isotrópicos e isotérmicos aplica-se a Lei de Snell

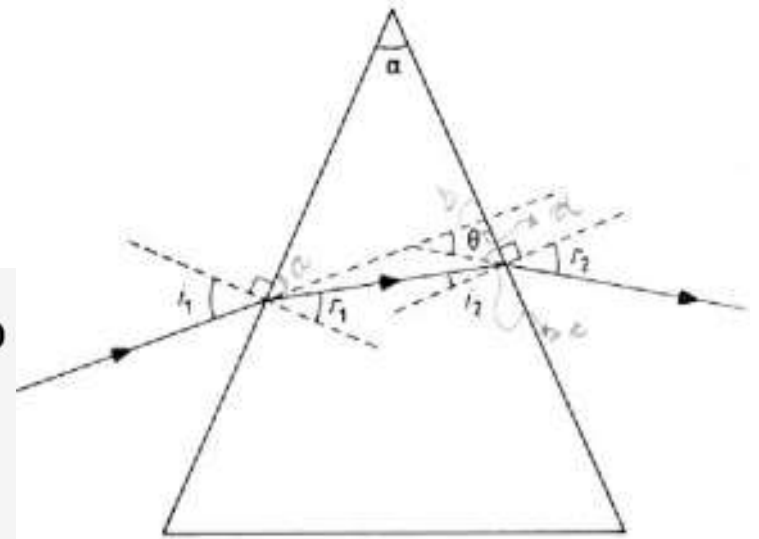
$$\mu_1 \text{ sen } i = \mu_2 \text{ sen } r$$

- ◇ onde  $\mu_i$  é o índice de refração (real) do meio  $i$ ;
  - ◇  $i=1$  representa o meio onde se encontra o feixe incidente
  - ◇ Os gases em geral, e o ar em particular, possuem índice de refração unitário
- Assim, a propagação da luz por um prisma pode ser descrita como:

$$\mu_\lambda = \frac{\text{sen } i_1}{\text{sen } r_1} = \frac{\text{sen } r_2}{\text{sen } i_2}$$

- $\alpha$  é o ângulo do prisma e pode ser escrito

$$\alpha = r_1 + i_2$$



- $\theta$  é o desvio total do raio e pode ser escrito como:

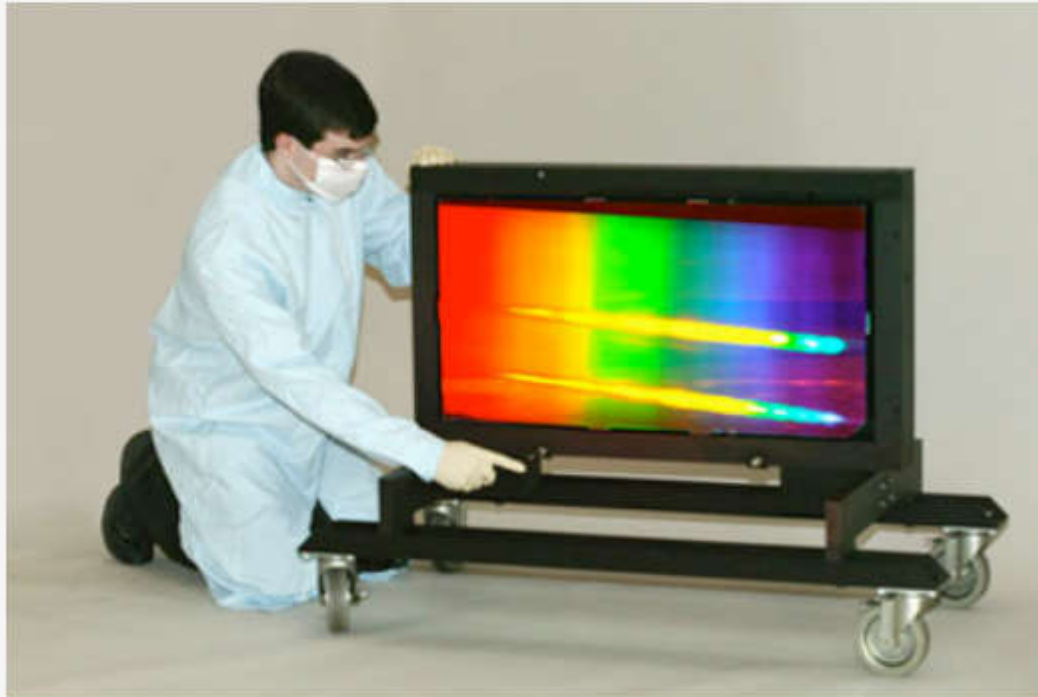
$$\theta = r_2 + i_1 - \alpha$$

- ◇  $i_1$  e  $\alpha$  são constantes para um feixe de entrada, mas...
- ◇  $r_2$  depende do índice de refração do prisma que depende do comprimento de onda, portanto:

**o desvio é diferente para cada comprimento de onda**

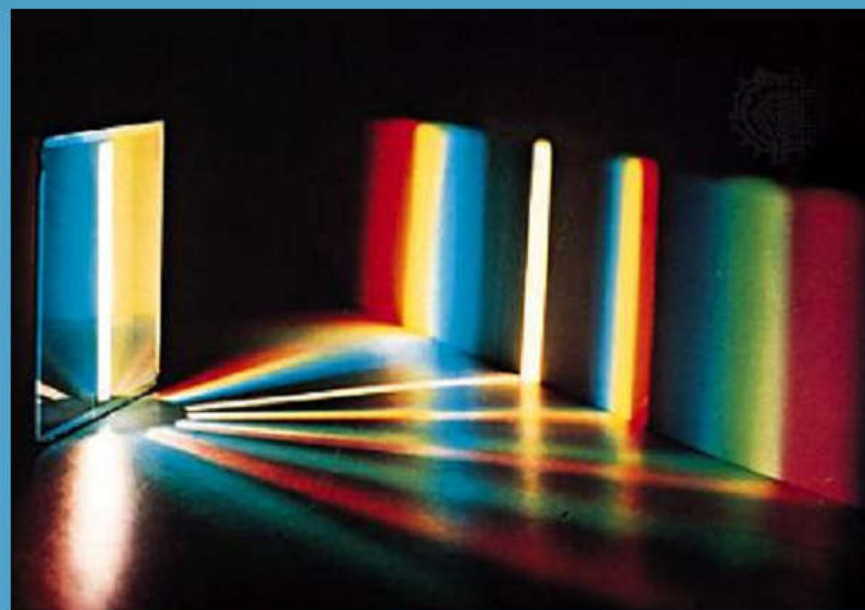
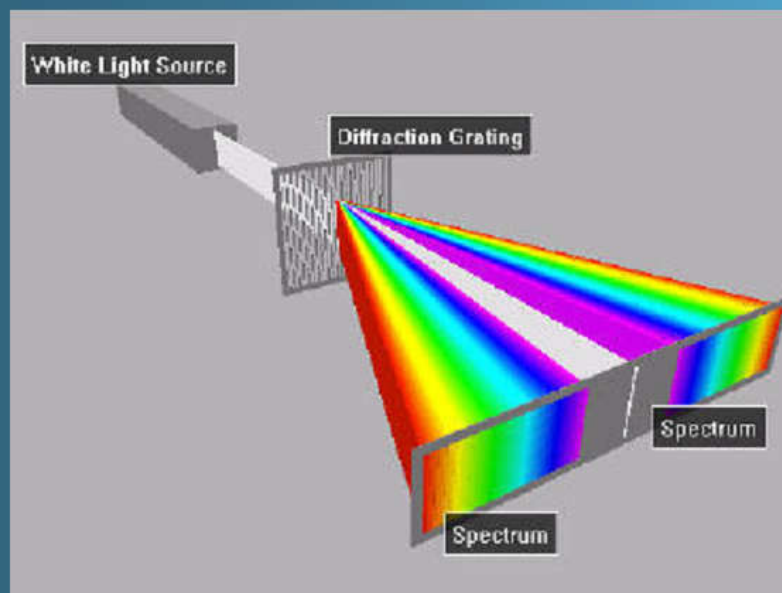
# Redes de difração

- ⇨ Uma rede de difração é um anteparo composto por  $N$  aberturas de mesma largura  $D$  separadas entre si pela distância  $d$



Wikipedia - Diffraction grating

O uso de redes de difração é comum, equivalendo entre 100 a 1000 aberturas por mm, com resoluções entre 1.000 e 100.000.



## Redes – como funcionam?

- ⇨ uma onda de luz plano-paralela de incidência normal ao atravessar uma rede de difração sofre interferência de modo que a distribuição angular é:

$$I(\theta) = I(0) \frac{\text{sen}^2\left(\frac{\pi D \text{sen} \theta}{\lambda}\right)}{\left(\frac{\pi D \text{sen} \theta}{\lambda}\right)^2} \frac{\text{sen}^2\left(\frac{N \pi d \text{sen} \theta}{\lambda}\right)}{\text{sen}^2\left(\frac{\pi d \text{sen} \theta}{\lambda}\right)^2}$$

- D: largura de uma abertura
- N: número de aberturas
- d: separação das aberturas

Inventada  
por  
Fraunhofer

*circular*  
Abertura circular

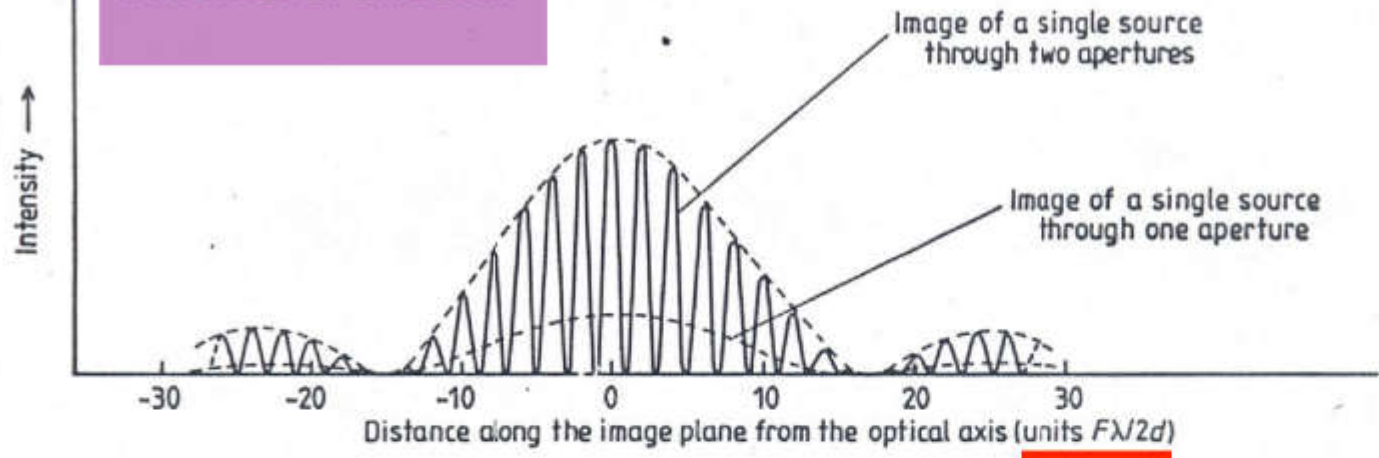


Figure 2.5.6 Image structure for one point source viewed through two apertures.

Abertura = fenda

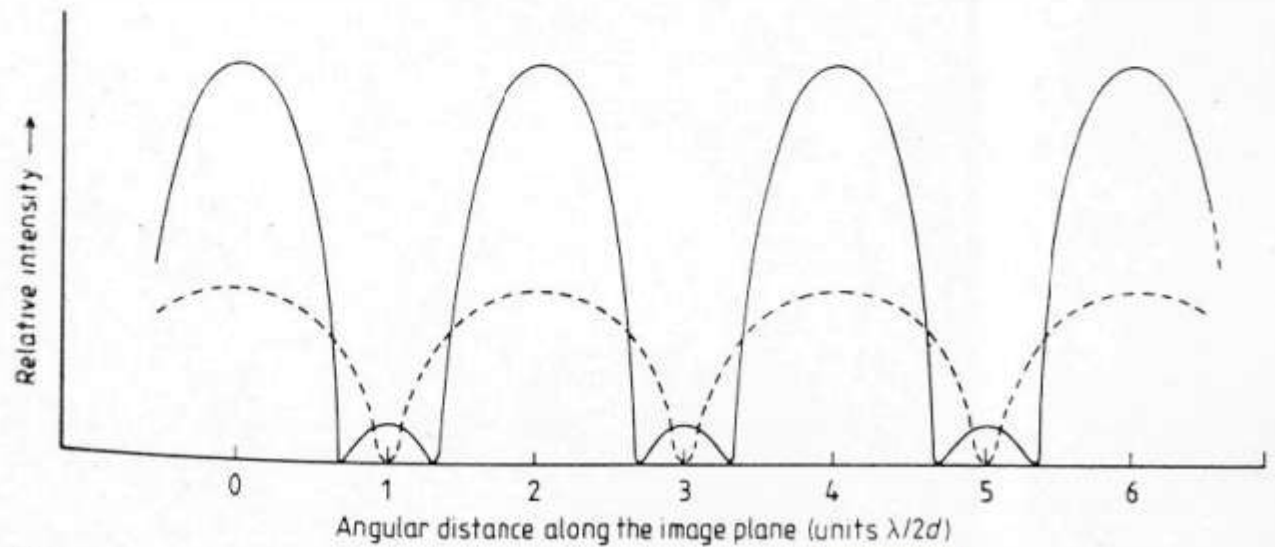
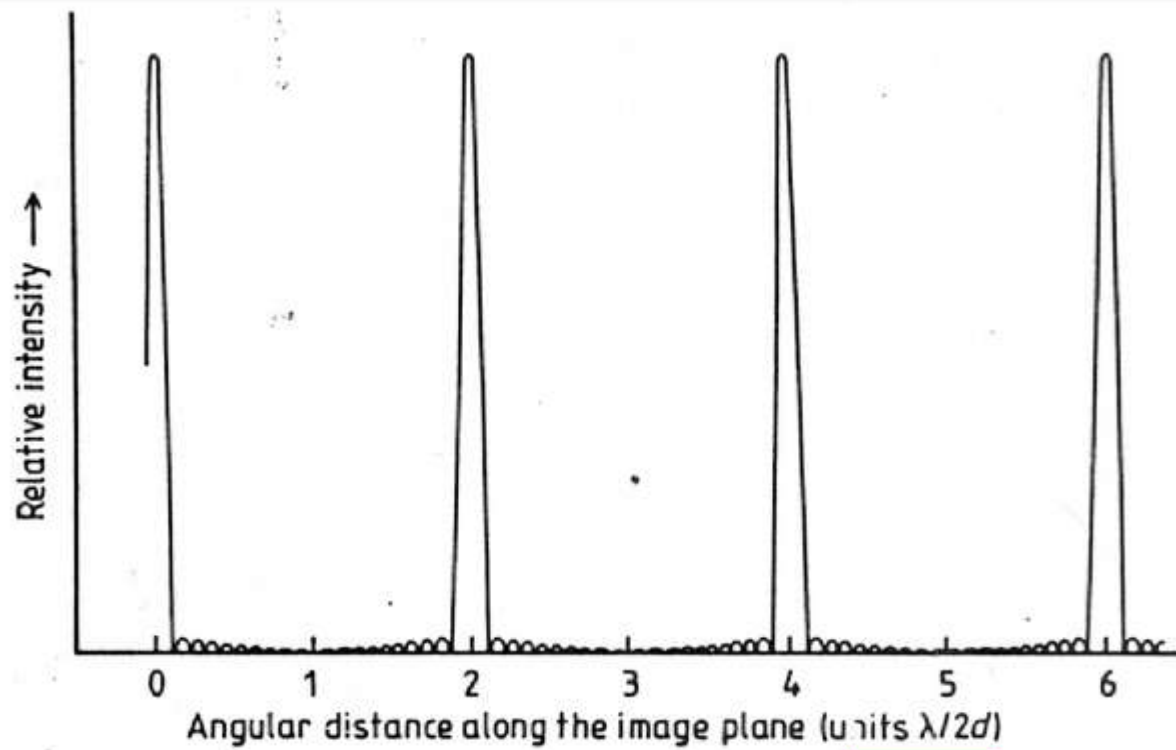


Figure 4.1.8 Small portion of the image structure for a single point source viewed through two apertures (broken curve) and three apertures (full curve).

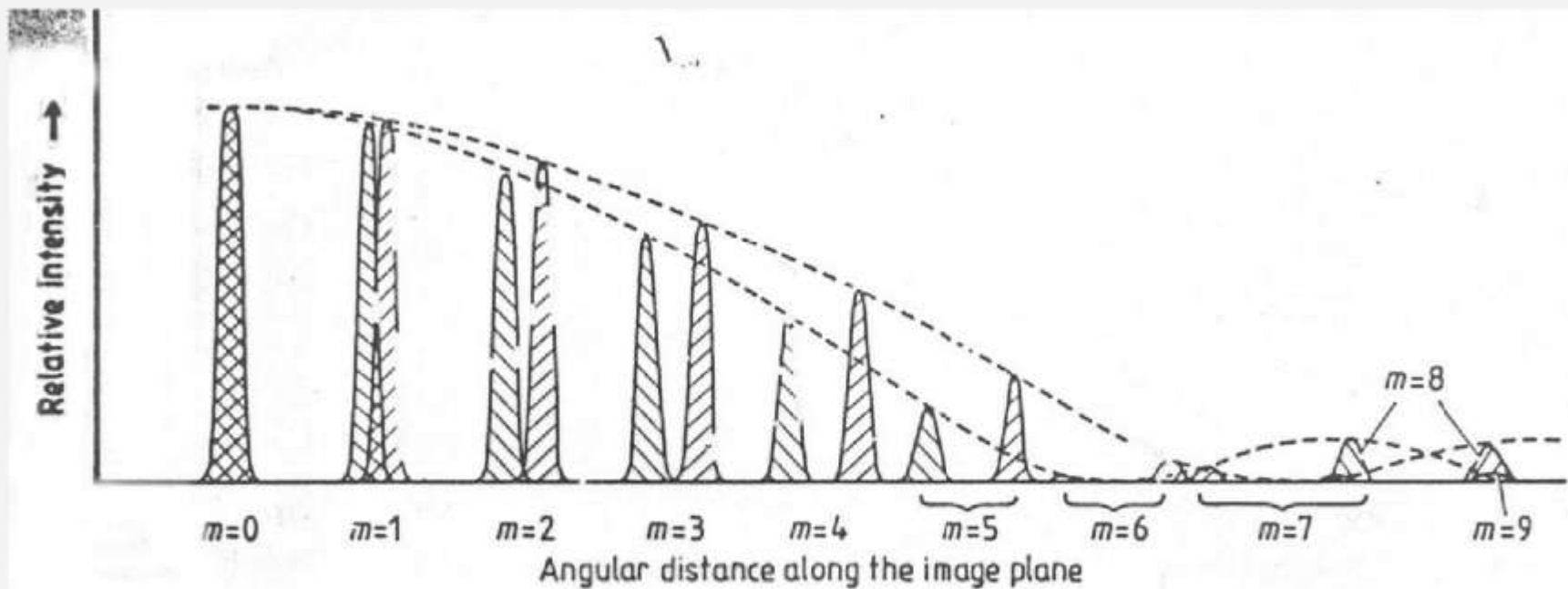
Kitchin



**Figure 4.1.9** Small portion of the image structure for a single point source viewed through twenty apertures.

Kitchin





**Figure 4.1.10** A portion of the image structure for a single **bichromatic** point source viewed through several apertures.

Kitchin

Luz de um bulbo observada através de uma rede de difração de transmissão



Wikipedia - diffraction grating

- Para um dado comprimento de onda, as posições dos máximos são:

$$\text{sen } \theta = \frac{m\lambda}{d} \Rightarrow \theta = \arcsen \left[ \frac{m\lambda}{d} \right]$$

↷ onde  $m$  assume valores inteiros

$m$  é a ordem da franja

- Portanto cada ordem corresponde a um espectro do feixe incidente na rede
  - ↷ não há dispersão para  $m = 0$

- Largura da franja

↳ distância angular entre mínimos adjacentes ao pico

$$W = \frac{2\lambda}{Nd \cos \theta}$$

independe de m

- Resolução espacial (Rayleigh)

$$W_{\text{esp}} = \frac{\lambda}{Nd \cos \theta}$$

$\Delta\theta$  – largura da franja

- Resolução espectral

Separação das franjas de dois  $\lambda$  com critério de resolução de Rayleigh

$$W_{\lambda} = W_{\text{esp}} \frac{d\lambda}{d\theta}$$

$$W_{\lambda} = \frac{\lambda}{Nm}$$

$\Delta\lambda$

- Costuma-se usar a seguinte definição para a resolução espectral de um espectrógrafo

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

que para redes assume o valor

$$R = N m$$

A resolução,  $R$ , de um espectrógrafo de rede depende apenas da ordem utilizada e do número de aberturas da rede

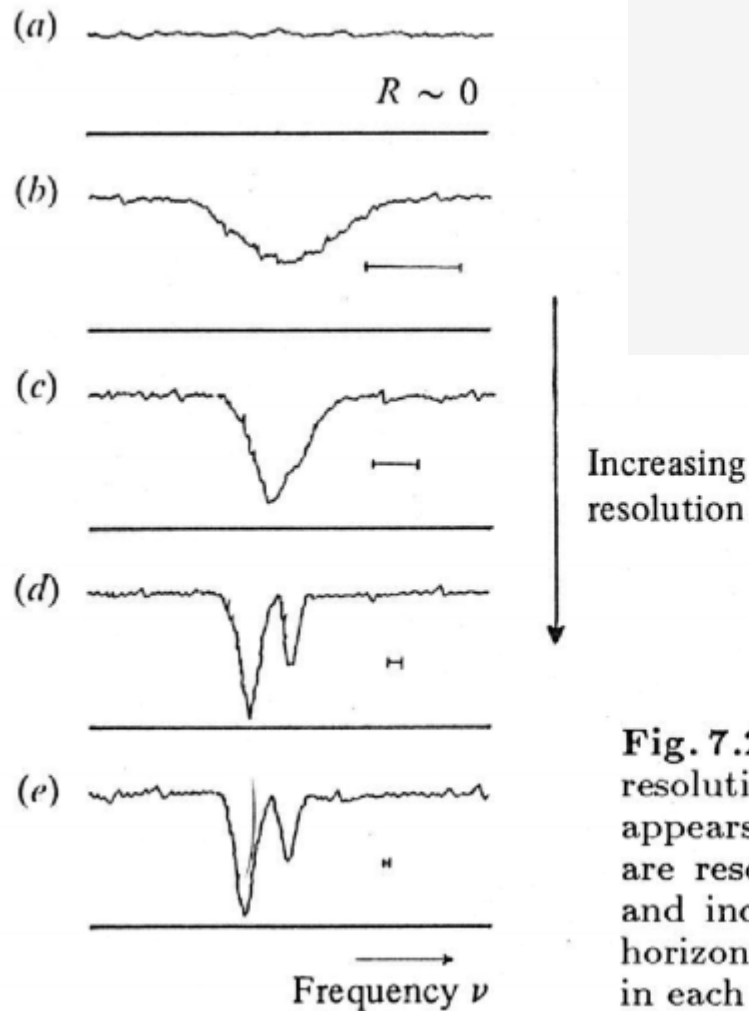
- Intervalo espectral livre,  $\Sigma$

↳ diferença entre dois comprimentos de onda superpostos de ordens espectrais adjacentes

$$\Sigma = \lambda_1 - \lambda_2 = \frac{\lambda_2}{m}$$

→ se  $m$  é pequeno,  $\Sigma$  é grande, e valores indesejados de  $\lambda$  podem ser retirados com um filtro

→ se  $m$  é grande, é necessário usar um elemento dispersor cruzado



**Fig. 7.2.** Observation of a spectral line at increasing resolution. (a)  $R \sim 0$ ; (b) the line appears, (c) the line appears *double*, but not resolved (*blend*); (d) the two lines are resolved; (e) the true width of the lines is reached and increasing  $R$  will not improve the line purity. The horizontal line shows the instrumental spectral width  $\Delta\nu$  in each observation

## Equação de rede

- Se feixe não incide normalmente na rede, a imagem angular (= espectro) desloca-se de acordo com o ângulo  $i$  entre a incidência e a normal à rede
- Desse modo, os máximos do padrão de difração são dados pela **equação de rede**

$$\theta = \text{arcsec} \left[ \left( \frac{m\lambda}{d} \right) - \text{sen } i \right]$$

- No caso geral,

$$\text{sen } i \pm \text{sen } \theta = \frac{m\lambda}{d}$$

Comprimento de onda central muda com a rotação da rede em torno do eixo

# Características de rede

- As redes podem ser de:
  - ↳ transmissão (aberturas)
  - ↳ reflexão (aberturas substituídas por espelhos)
  - ↳ por índice de refração (*redes de fase*)
- Redes típicas
  - ↳ 100 – 1000 aberturas/mm
  - ↳ 1000 – 50.000 aberturas no total

- Problemas das redes

- ↳ superposição de ordens

- correção com filtros

- ↳ máximos secundários

- ↳ erros na construção da rede

- erro mais comum: variação periódica no espaço das ranhuras

- \* fantasmas de Rowland

- variação com único período

- linhas espúrias próximas a linhas fortes

- \* fantasmas de Lyman

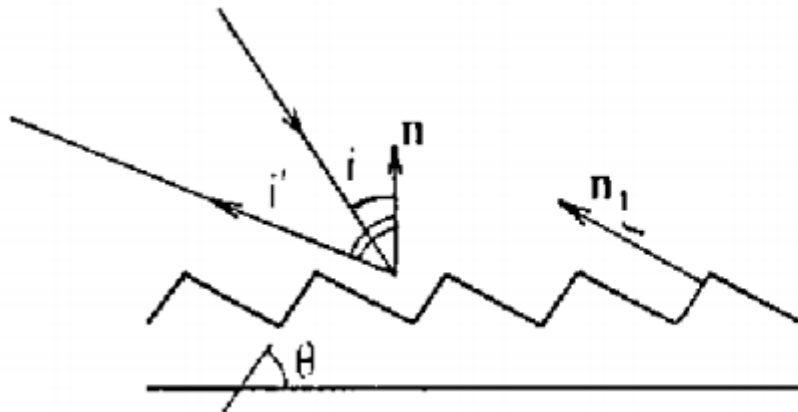
- variação de períodos múltiplos

- linhas espúrias associadas a linhas fortes, mas longe delas



# Blazing

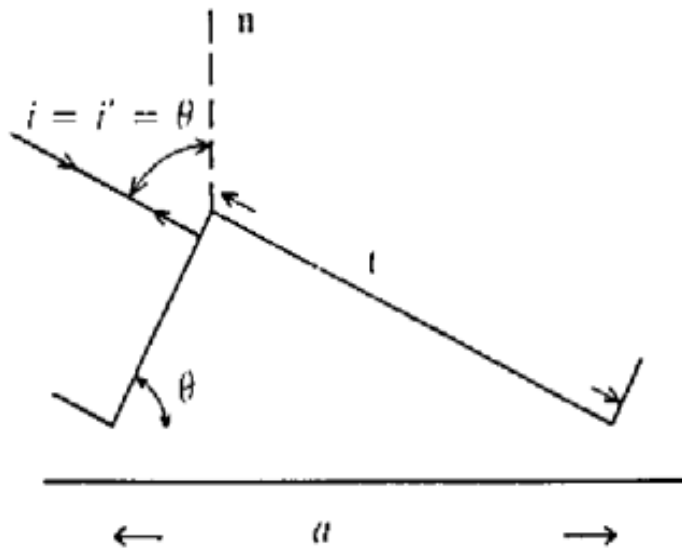
- Desvantagem da rede de difração
  - ◇ luz da fonte é dividida nas várias ordens. Assim, perde-se luz
- Solução: Blazing
  - ◇ técnica que concentra maior parte da luz em uma dada ordem
  - ◇ técnica usada em redes de reflexão
  - ◇ cada espelho é inclinado com relação ao eixo da rede
  - ◇ ordens baixas: até 90% de eficiência
- Sombreamento
  - ◇ se a luz é refletida ou incide a grandes ângulos, a própria rede pode interceptar parte do feixe e causar perda de luz
  - ◇ não existe solução para esse problema
    - o que pode ser feito é evitar incidência a ângulos altos



**Fig. 5.7.** Blazed grating.  $n$  is normal to the grating,  $n_1$  is normal to the blazed faces, and  $\theta$  is the blaze angle

- Rede echelle

- ◊ blazing com ângulos altos
- ◊ concentra a luz em altas ordens (10-100)
- ◊ alta dispersão
- ◊ dispersor cruzado
- ◊ montagem compacta – em comparação com um espectrógrafo com câmara com distância focal longa que é outra opção para aumentar resolução



*Echelle Grating.* The principle here consists in using a very high order of interference  $m$ , with a large period  $a$  ( $\gg \lambda$ ), and a high angle of incidence, such that  $i = i' = \theta$  *Littrow condition*. At the blaze wavelength, the grating relation is (Fig. 5.8)

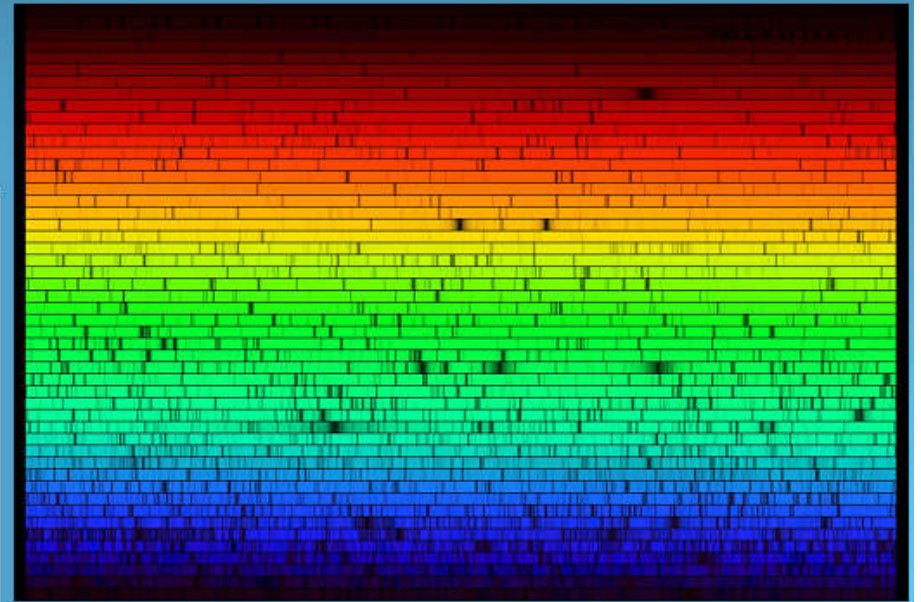
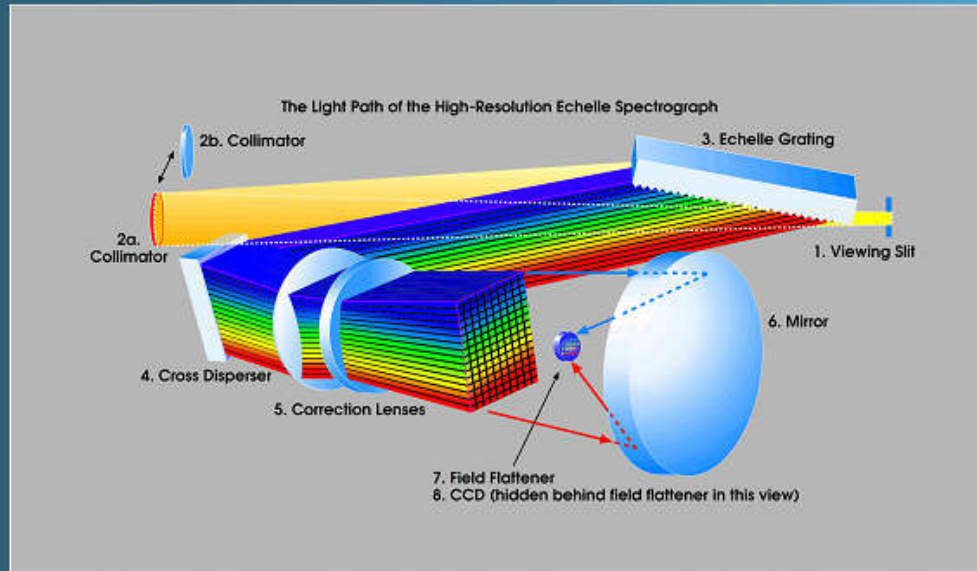
$$m\lambda_b = 2a \sin i = 2t,$$

and the resolution  $R$  is, for a slit of width  $L$  and a collimator of focal length  $f_{\text{coll}}$ ,

$$R = 2 \tan \theta \frac{f_{\text{coll}}}{L}.$$

As  $a$  is relatively large, the periodicity can be accurately maintained over a large number of grooves, which leads to high resolution ( $R = mN$ ) and high dispersion ( $\propto m/a$ ).

# -Espectrógrafos Echelle



- Grismas

- ◇ rede de transmissão na hipotenusa de um prisma
- ◇ espectro de ordem 1 paralelo ao eixo do feixe incidente
- ◇ pode ser montado como um filtro em uma câmera direta permitindo espectroscopia de baixa dispersão

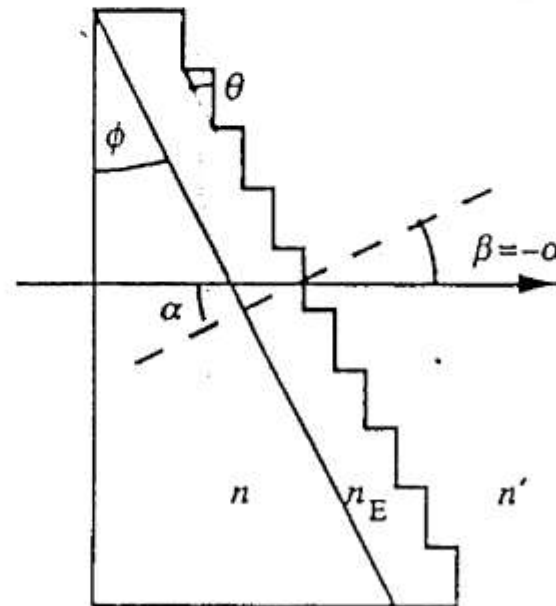


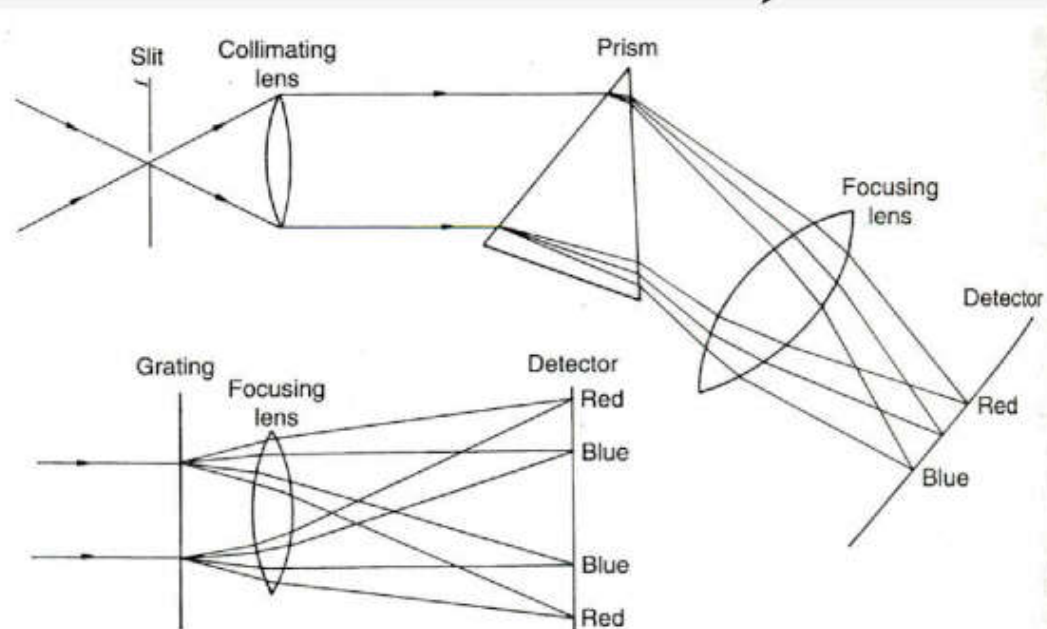
Fig. 4.4. A simplified schematic giving the basic geometry of a grism—a transmission diffraction grating deposited on the hypotenuse face of a right-angled prism.

# Espectrógrafos

- Configuração básica de um espectrógrafo de fenda
  - ↳ fenda
  - ↳ colimador
  - ↳ elemento dispersor (prisma ou rede)
    - sempre no feixe colimado
  - ↳ câmera
  - ↳ detector

Rede

Prisma



Smith

Fig. 3.10. The essential optical components of an astronomical slit spectrometer

- Configuração básica de um espectrógrafo sem fenda
  - ⇒ esta configuração é normamente utilizada para levantamentos e objetos extensos
  - ⇒ elemento dispersor
  - ⇒ câmera
  - ⇒ detector

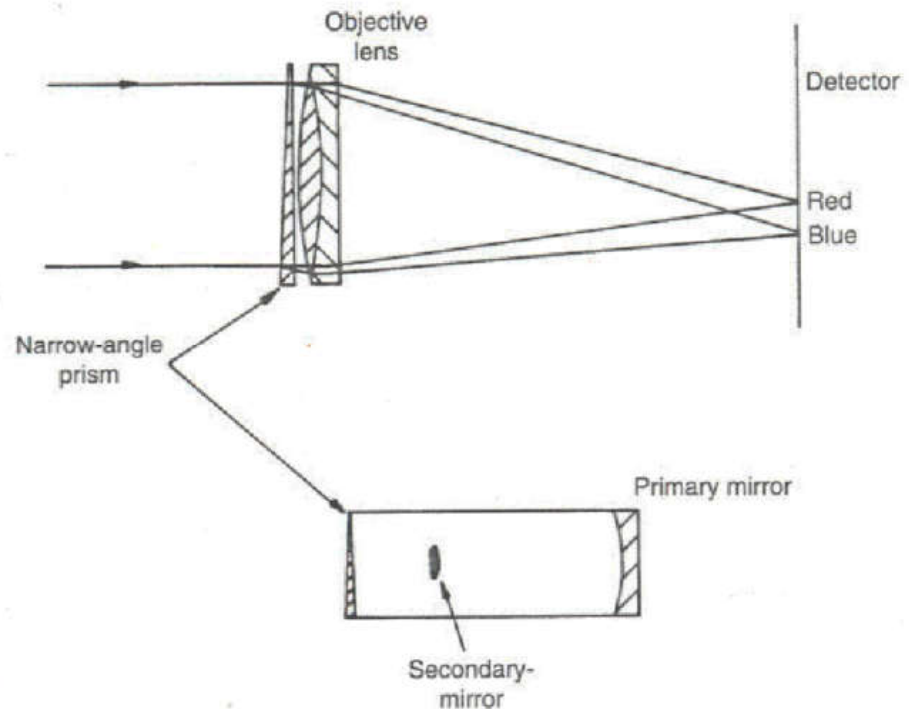


Fig. 3.14. An objective prism spectrometer: a narrow-angle prism is placed in the parallel beam in front of the objective and produces a spectrum directly in the focal plane of the telescope. Because there is no slit, a spectrum is formed of every object in the field of view of the telescope. A low-dispersion transmission grating can also be used. In a reflecting telescope, the dispersing element is placed outside the secondary mirror, as in the lower diagram. The angle of the prism is exaggerated in the drawing; an actual objective prism cannot easily be distinguished by the eye from a circular sheet of plane glass.

Smith

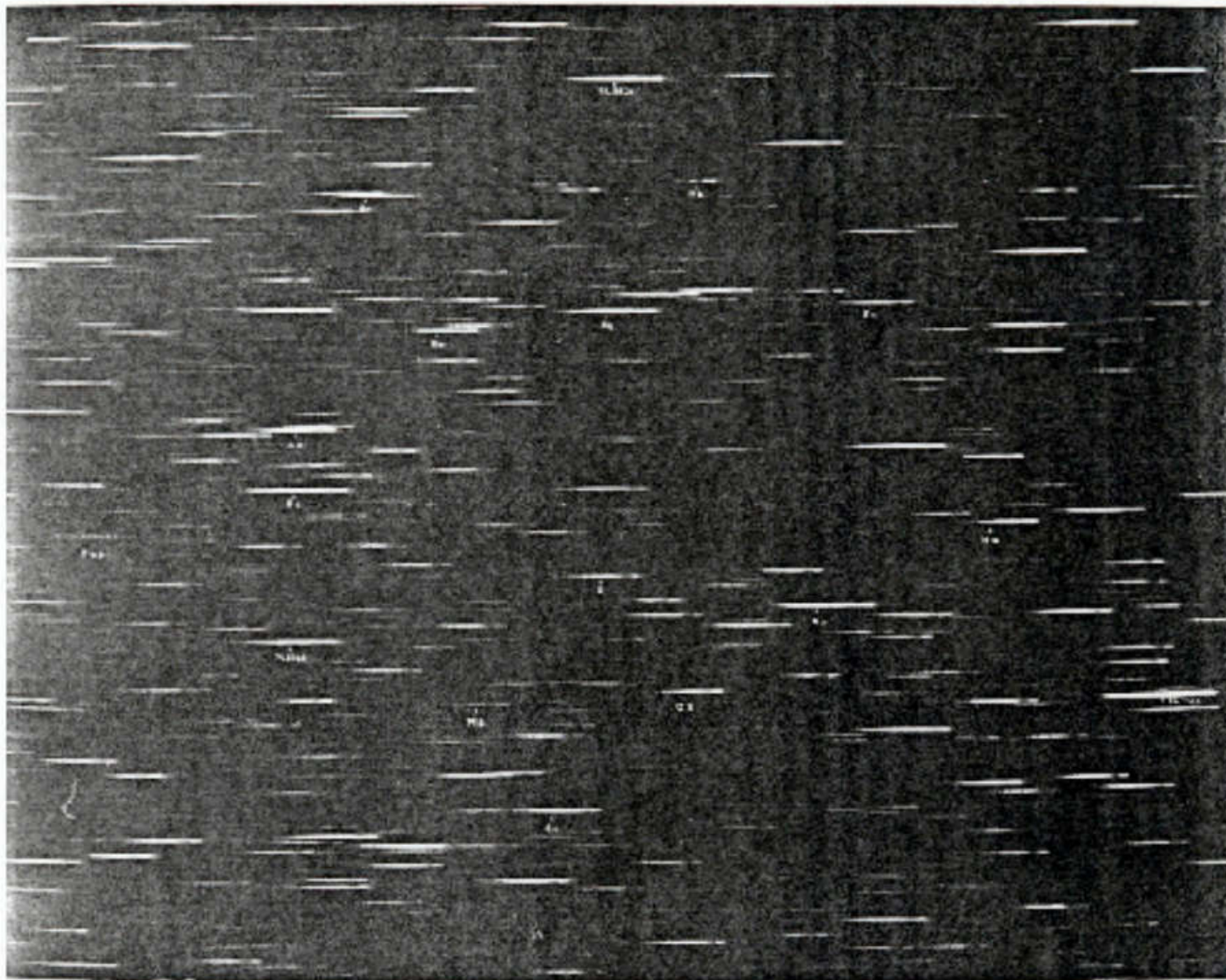


Fig. 3.15. This Hamburg Observatory photograph of stars in the constellation of Cygnus was taken through an  $8^\circ$  objective prism, which has turned every stellar image into a tiny, low-dispersion spectrum. (Royal Astronomical Society.)

Smith

- Espectrógrafo de fibras ópticas

- ↳ fibras ópticas no plano focal do telescópio

- ↳ duas soluções

- fibras cobrindo uma região do céu (*integral field unit*)

- 1 fibra para cada objeto

- \* máscara ou

- \* pinças

- ↳ fibras levam a luz para um espectrógrafo que pode ser fixo

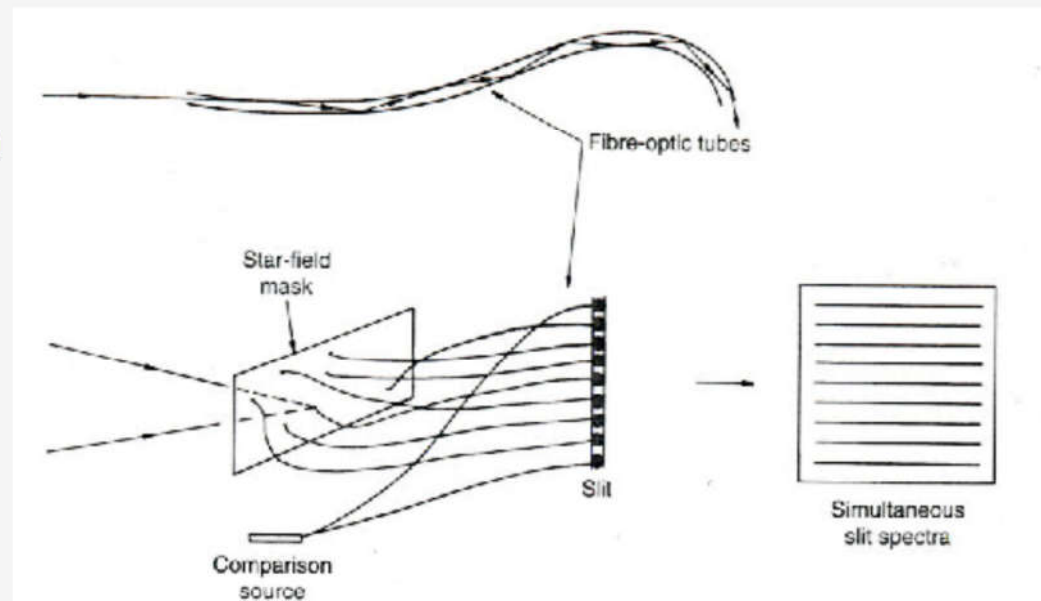


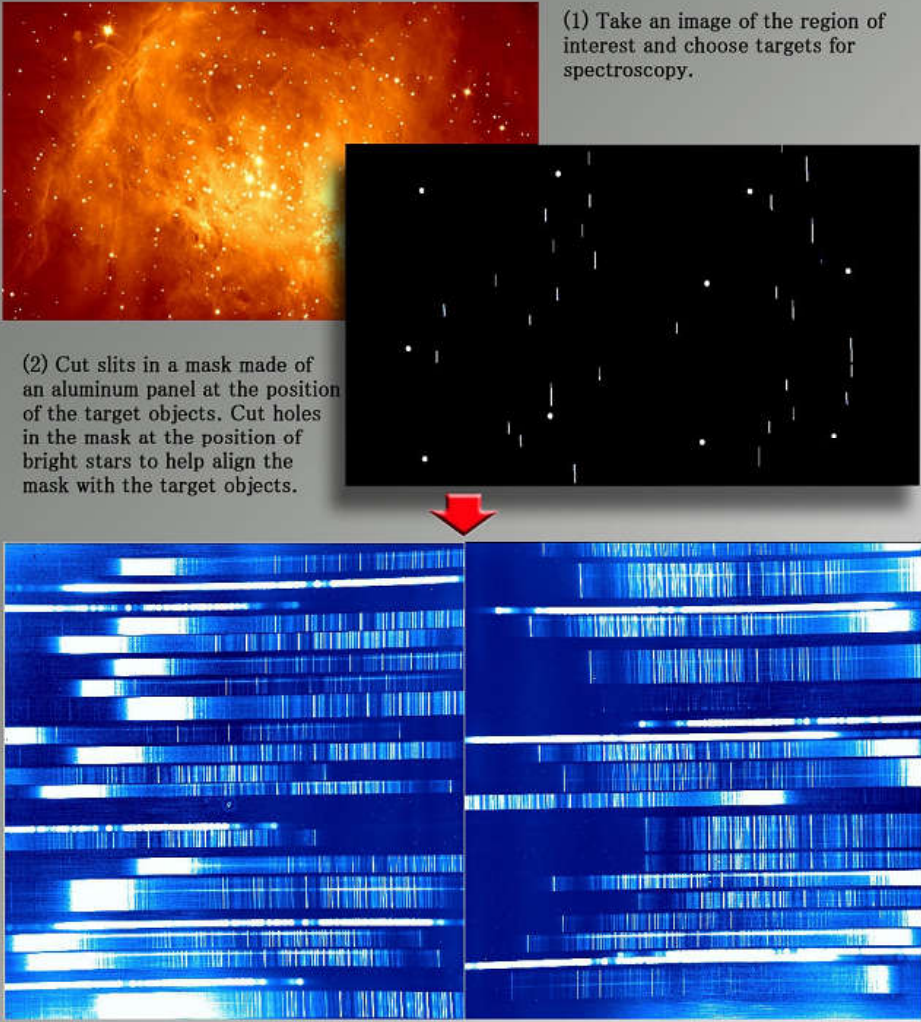
Fig. 3.17. Fibre-optic spectroscopy. The upper diagram shows the light-path through a typical fibre-optic tube, which is some  $50\ \mu\text{m}$  in diameter. A mask is placed in the focal plane of the telescope, with holes at the positions of the stars of interest. The light from these stars is led along fibre-optic tubes to a conventional slit, so that the detector at the end of the spectrograph records simultaneously slit spectra of all the stars in the star field mask. The spectrum of a comparison arc can easily be added



# Espectroscopia de multi-fenda

Um exemplo é o MOIRCS, do telescópio japonês Subaru

Spectral Observations of Multiple Objects Using MOIRCS



(1) Take an image of the region of interest and choose targets for spectroscopy.

(2) Cut slits in a mask made of an aluminum panel at the position of the target objects. Cut holes in the mask at the position of bright stars to help align the mask with the target objects.

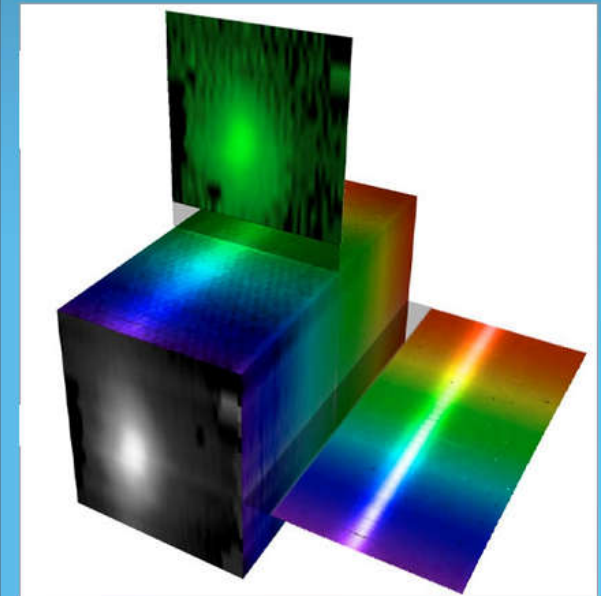
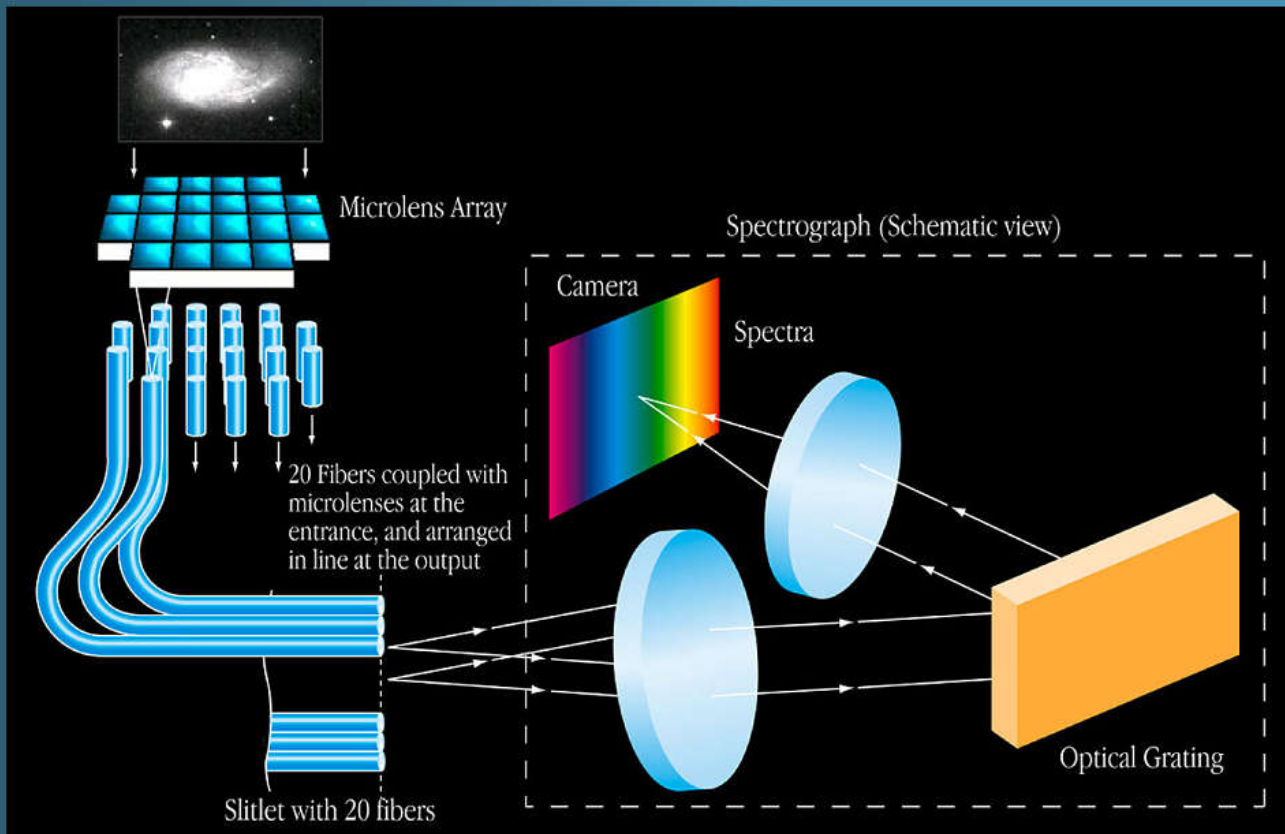
(3) Raw spectroscopic data from MOIRCS. Two infrared detectors record spectra from the left and right side of the mask.

## **Unidade de campo integral**

### **Integral field unit (IFU)**

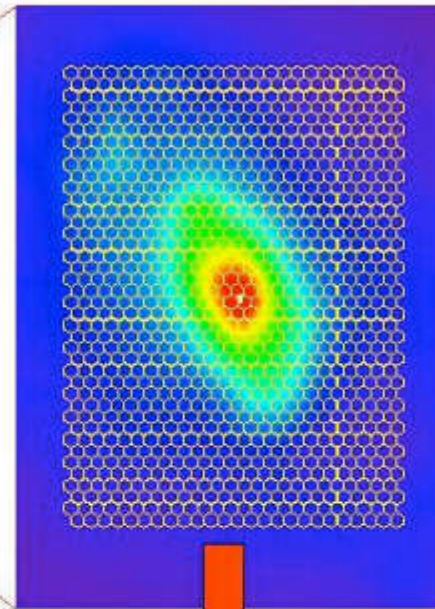
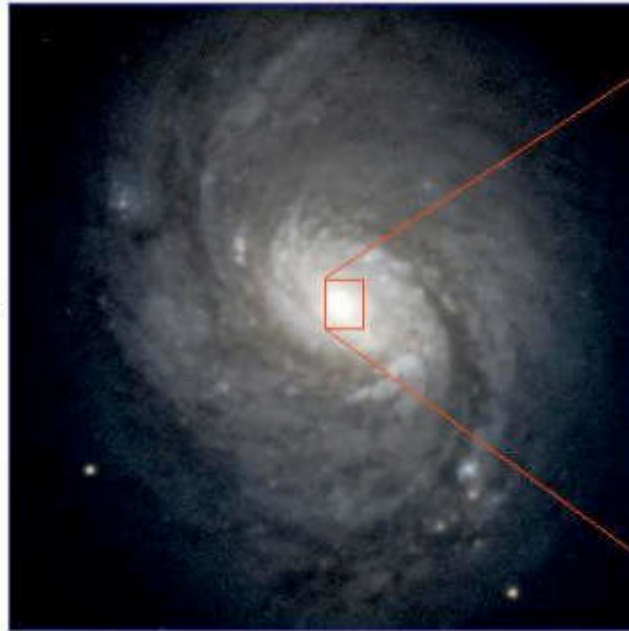
- Um conjunto de fibras ópticas é colocado no plano focal
- Cada fibra leve o sinal para um espectrógrafo de fenda
- Temos, portanto, um “cubo” de dados onde os eixos são posição (=fibra), comprimento de onda e contagem
- Esses dados podem ser reconstruídos em imagens ou espectros (um não exclui o outro)

# -Espectrógrafos IFUs



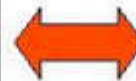
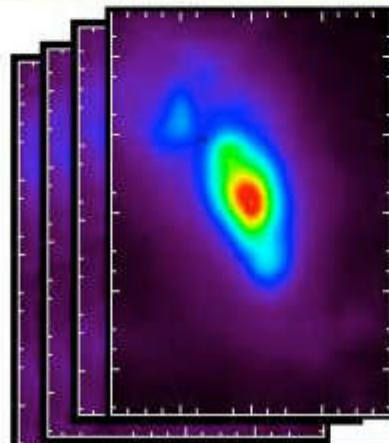
# GMOS (Gemini multi-object spectrograph)- IFU

Image taken by GMOS without using the IFU



The GMOS IFU records a spectrum for each pixel

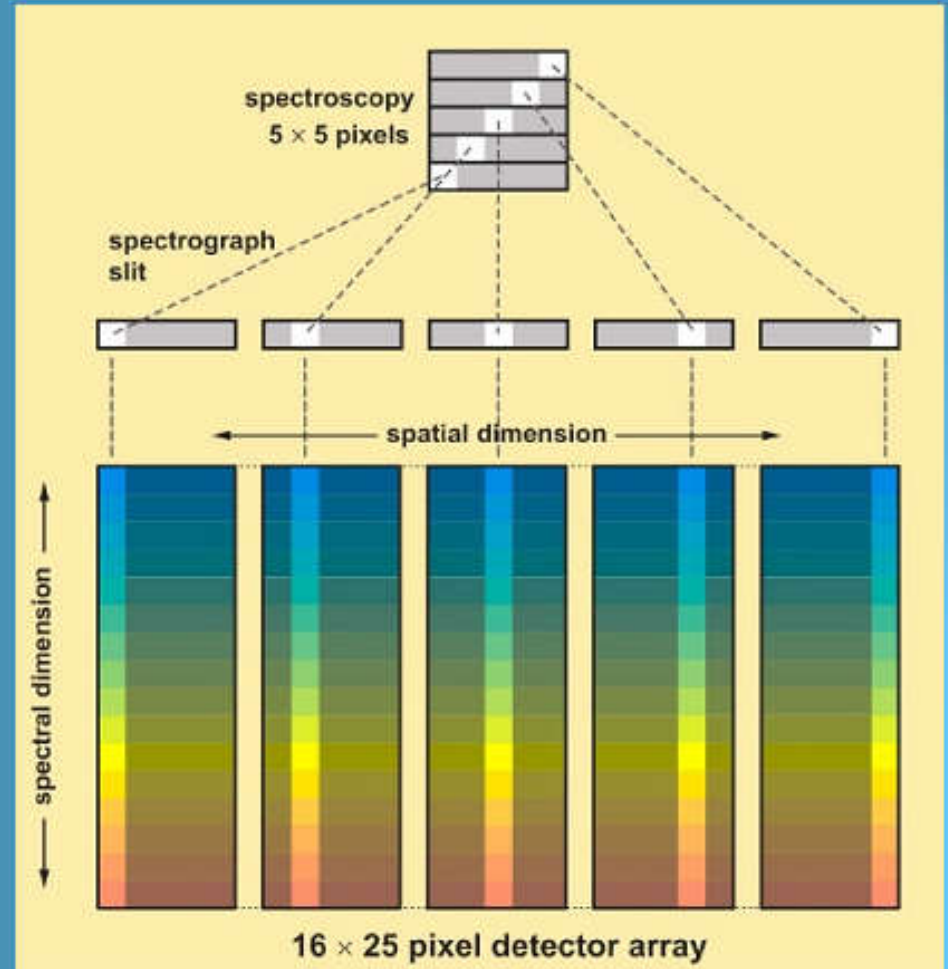
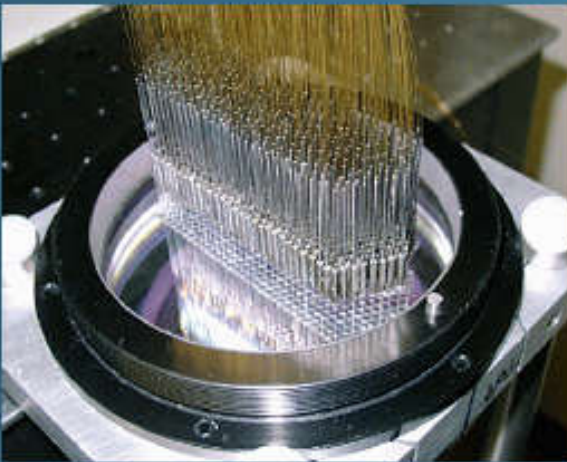
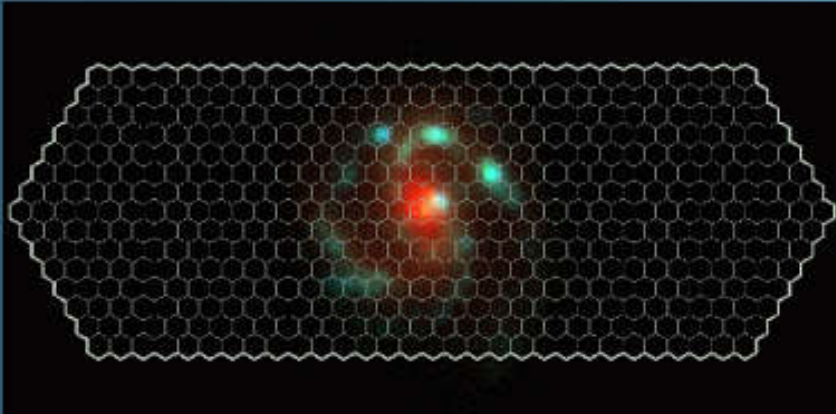
One image at each wavelength



One spectrum for each pixel in the image

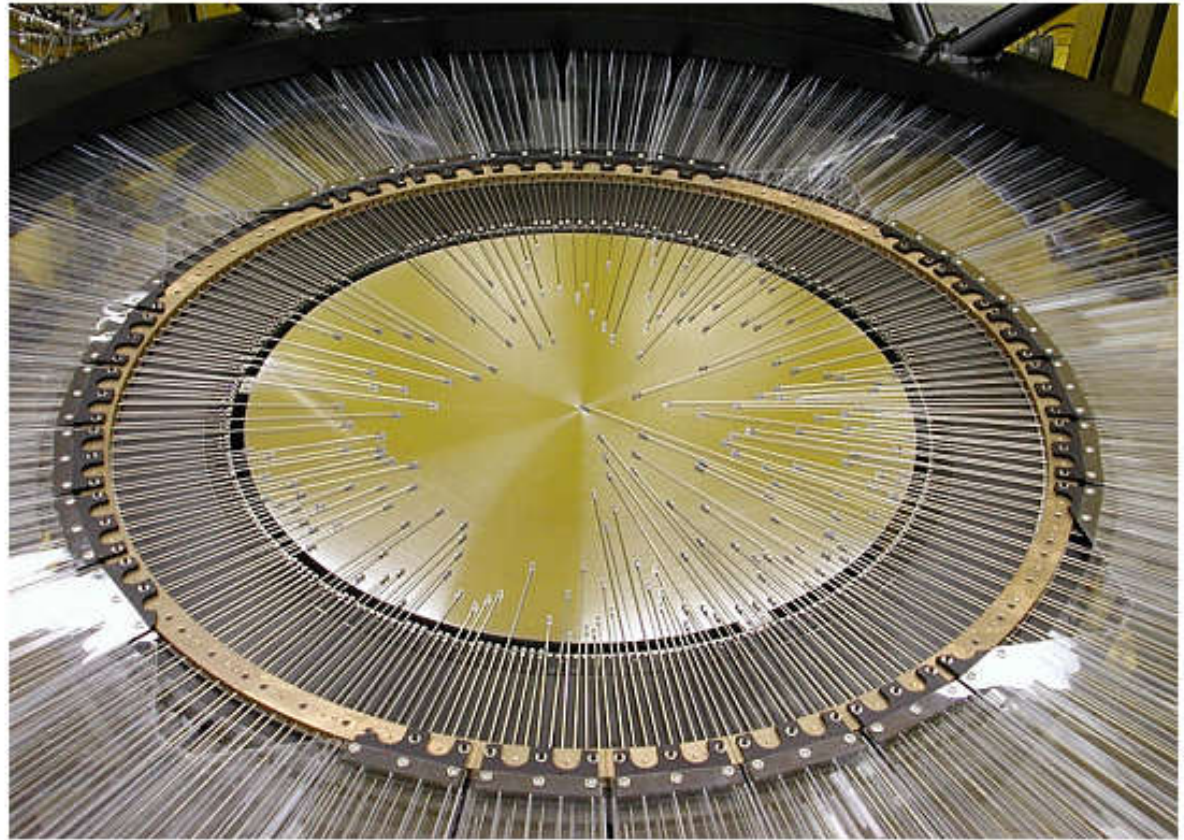
[http://star-www.dur.ac.uk/~jra/gmos\\_ifu.html](http://star-www.dur.ac.uk/~jra/gmos_ifu.html)

# -Espectrógrafos IFUs



# Espectrógrafo de fibras ópticas

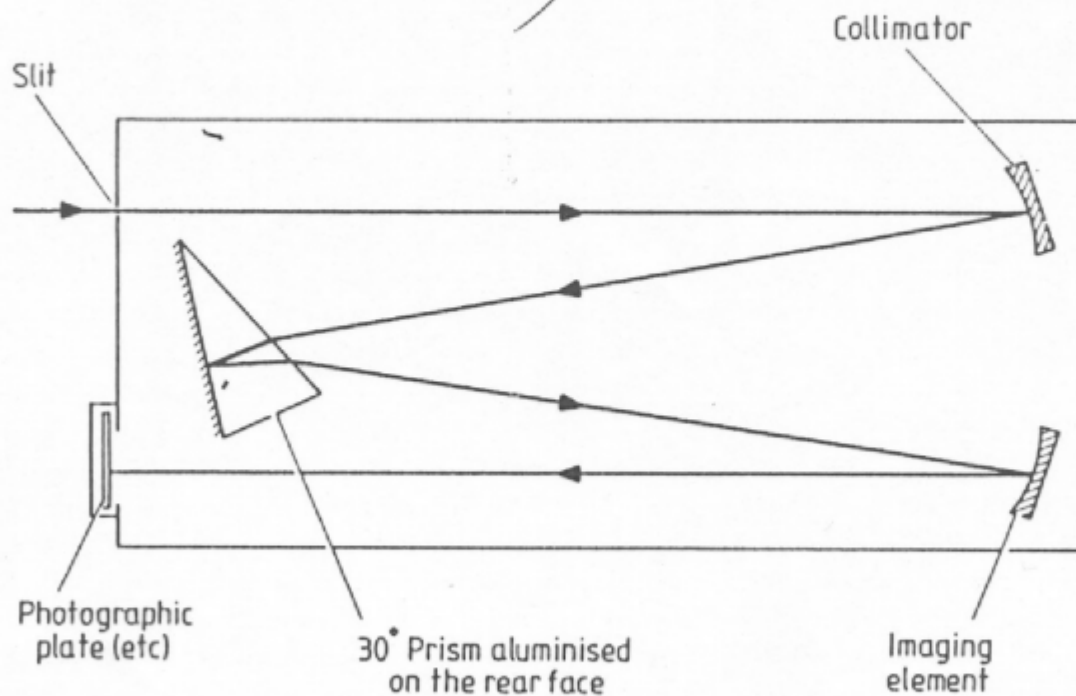
Espectrógrafo  
Hectospec,  
CfA, Harvard



## SIFS (SOAR)

- 1300 fibras (23 x 50)
- 2 escalas de placa
  - ◊ 3.9 x 7.5"
  - ◊ 7.8 x 15"
- angular resolution (about 0.15 arcsec, with tip-tilt correction)
- medium resolution spectroscopy ( $R = 1000 - 30000$ )
- <http://www.lna.br/~sifs/index.html>

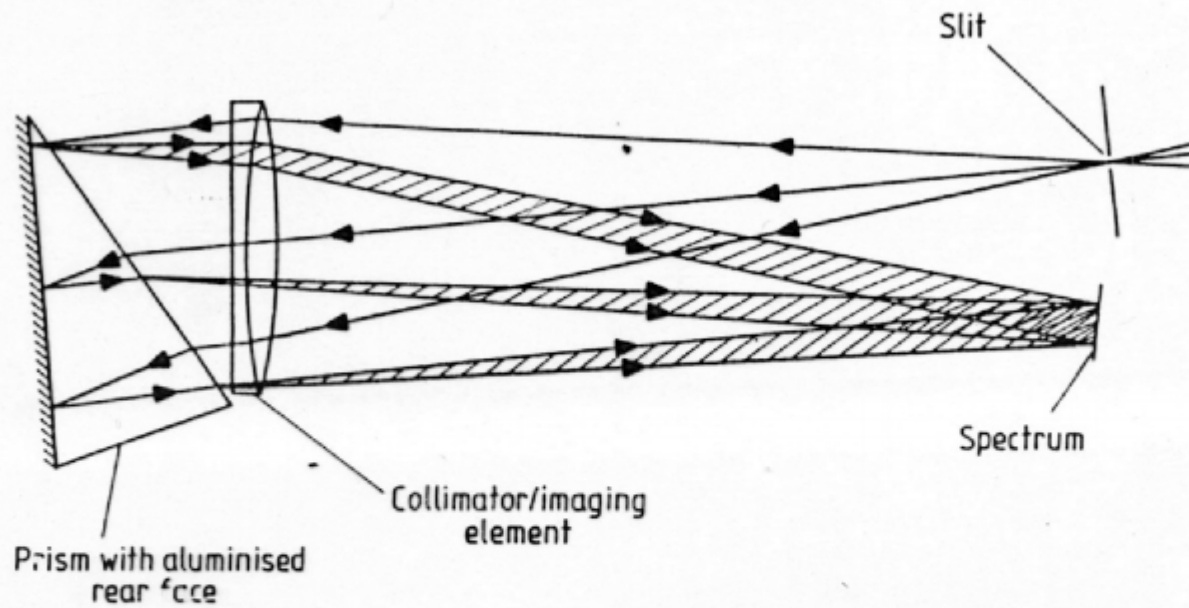
# Montagens de espectrógrafos



= Czerny-Turner  
se é  
rede de  
difrac

Figure 4.2.1 Compact design for the basic prism spectroscope.





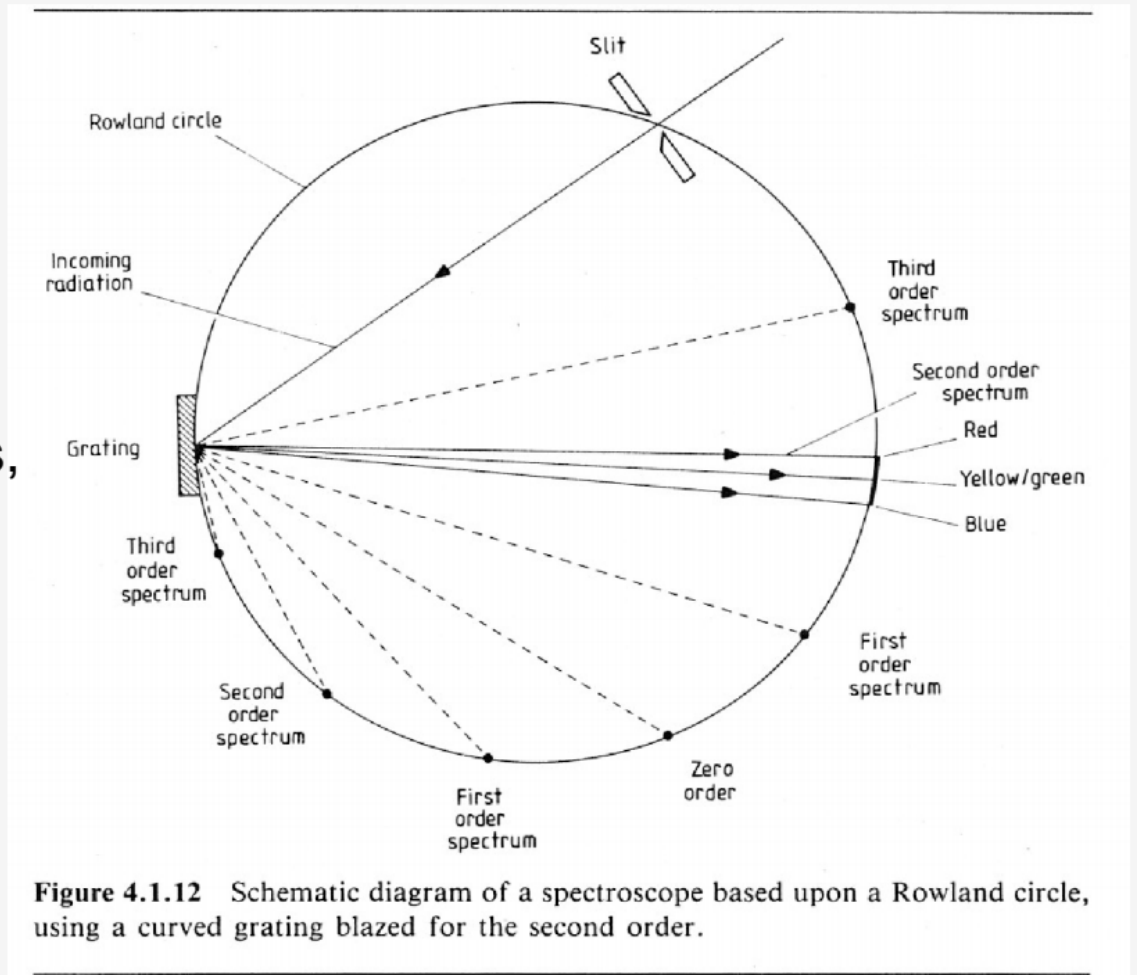
**Figure 4.2.2** Light paths in a Littrow spectroscope.

Kitchin

= Ebert se of rede  
de difrac

## Círculo de Rowland

- utiliza rede curva
- rede pode fazer a função do colimador ou imageador
- um elemento óptico a menos, assim a perda é menor



## Eagle

montagem com rede curva, porém mais compacta que círculo de Rowland

- astigmatismo

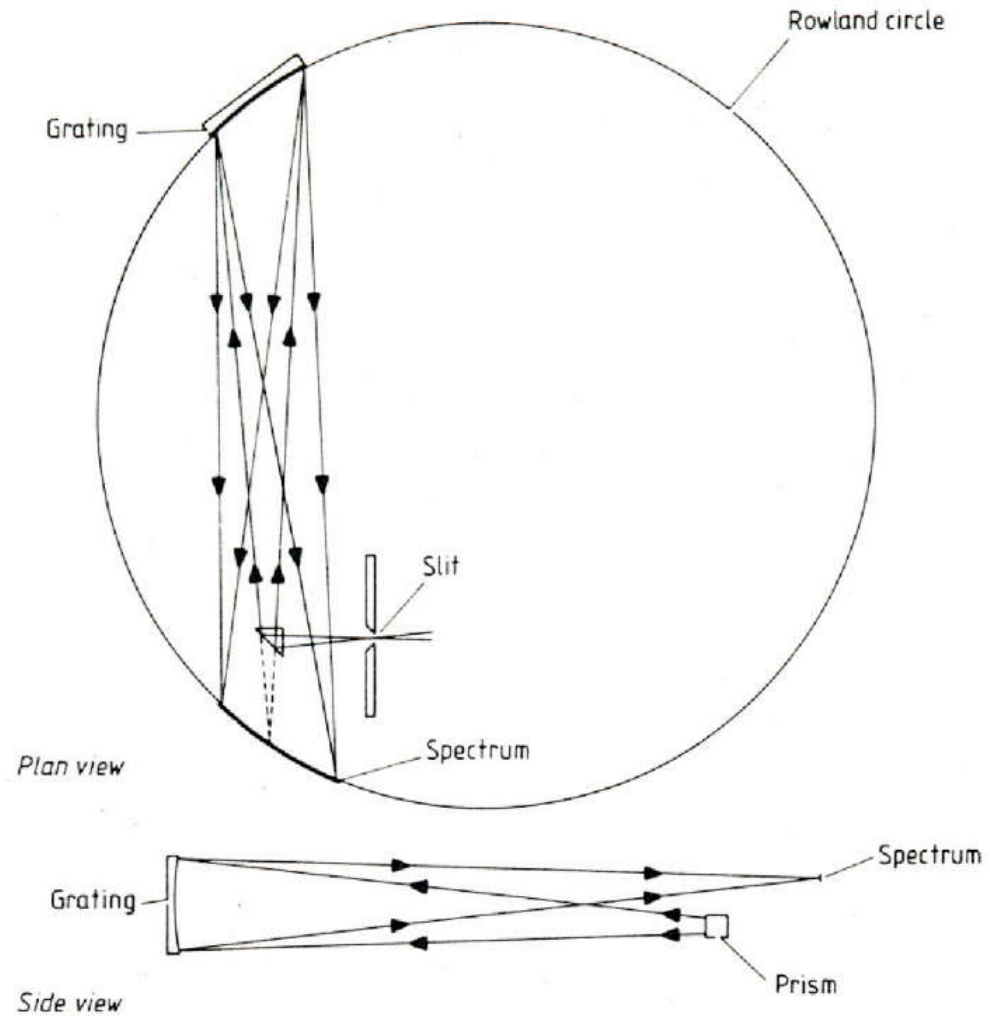


Figure 4.2.5 Optical arrangement of an Eagle spectroscope.

Kitchin

# Wadsworth

- possui aberrações importantes

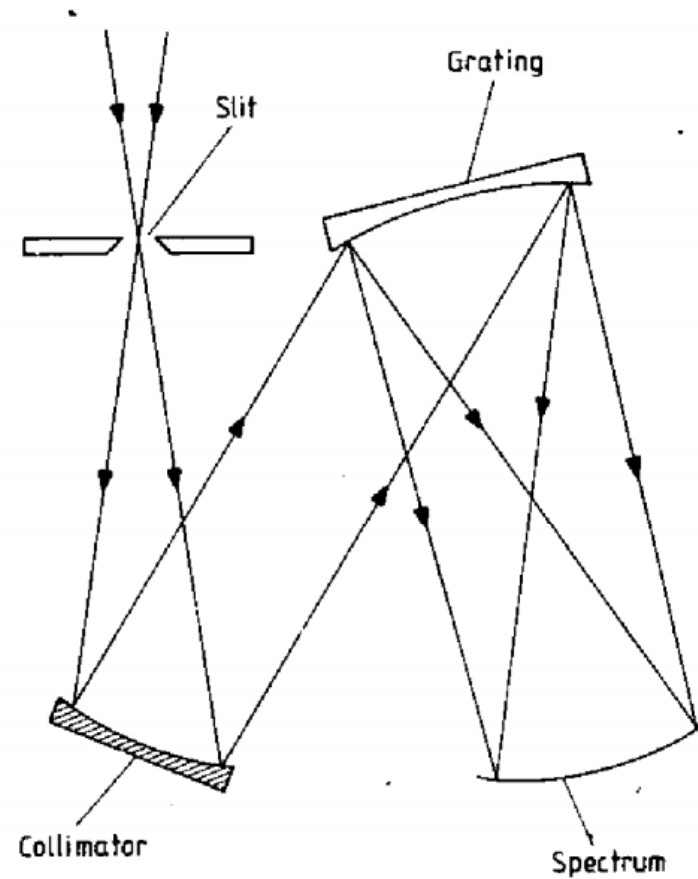


Figure 4.2.6 The Wadsworth spectroscope mounting.

Kitchin

# Dispersão linear

- Dispersão linear (mm/Å)

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

antes vimos  
a dispersão angular

↷  $f_2$ : distância focal do elemento que forma a imagem final

↷ Para uma rede

$$\frac{dx}{d\lambda} = \pm \frac{m f_2}{d \cos\theta}$$

→ a dispersão linear de uma rede é praticamente constante ao longo do espectro (o que não é verdade para um prisma)

## Obtendo um espectro

- O espectro obtido com instrumento não corresponde perfeitamente ao real. Um dos motivos é que o espectrógrafo não possui uma resolução infinita em frequência. Podemos representar essa transformação como:

$$\diamond I(\nu) = P(\nu) * I_o(\nu)$$

→  $I_o(\nu)$ : espectro real

→  $I(\nu)$ : espectro observado

→  $P(\nu)$ : perfil instrumental

- Se  $P(\nu) = \delta(\nu - \nu_o) \Rightarrow I(\nu) = I_o(\nu)$
- Se perfil instrumental é conhecido e razão sinal-ruído é alta (> 100 – 1000), o espectro real pode ser obtido pela deconvolução do espectro medido

## Procedimentos observacionais

- flats – com luz passando por todo o espectrógrafo
  - ↳ pois sensibilidade depende do comprimento de onda
- imagens da lâmpadas com emissão de elementos específicos
  - ↳ para calibração em comprimento de onda
- subtração do fundo de céu
  - ↳ para fontes puntiformes, o céu sempre atravessa a fenda e seu espectro é também medido, podendo ser subtraído do espectro da fonte

## Exemplo de observação Goodman - SOAR

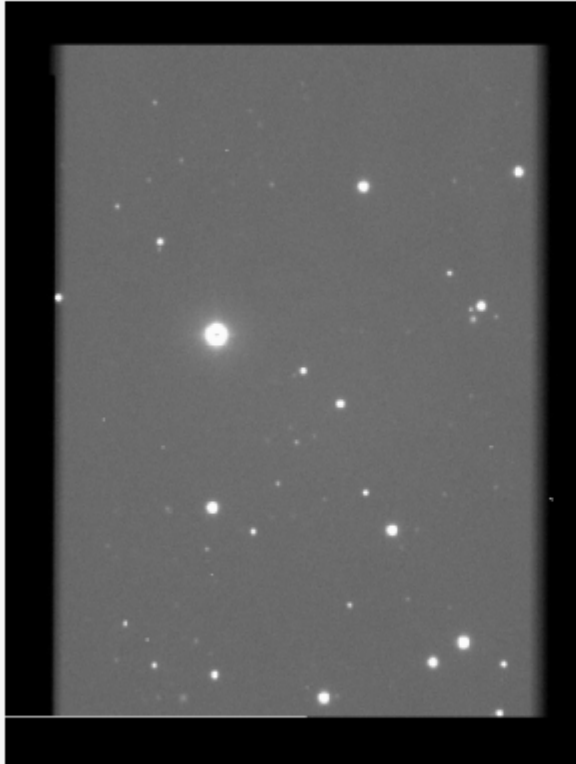


Imagem de campo  
sem fenda  
sem elemento dispersor



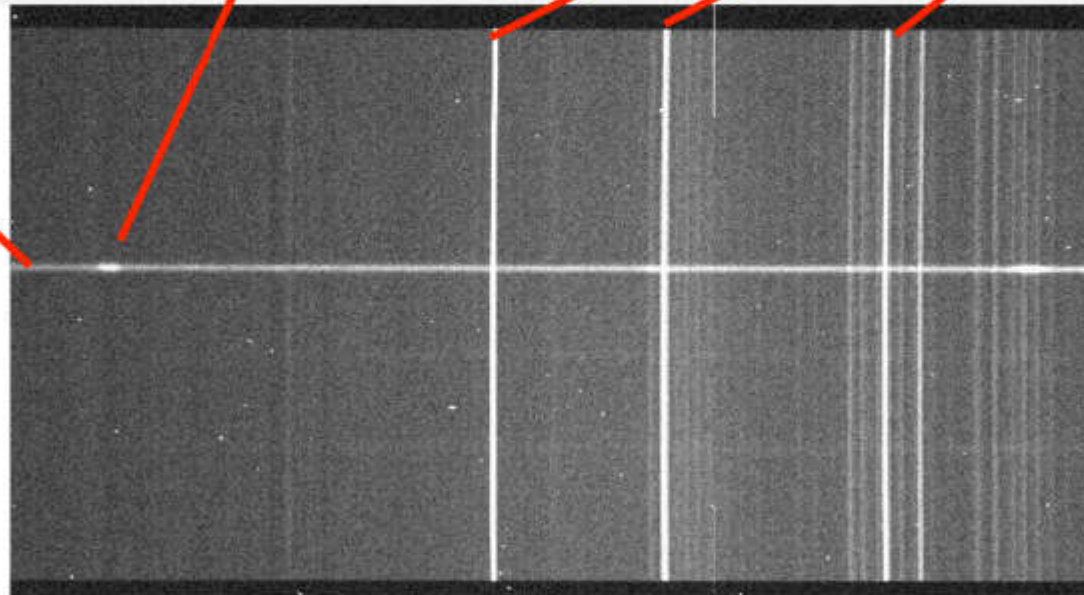
Imagem do objeto na fenda  
sem elemento dispersor



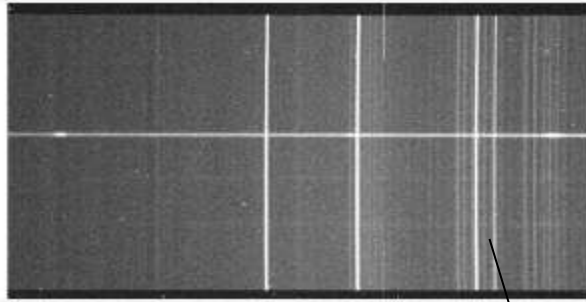
espectro  
do objeto

linha de  
emissão

linhas  
do céu

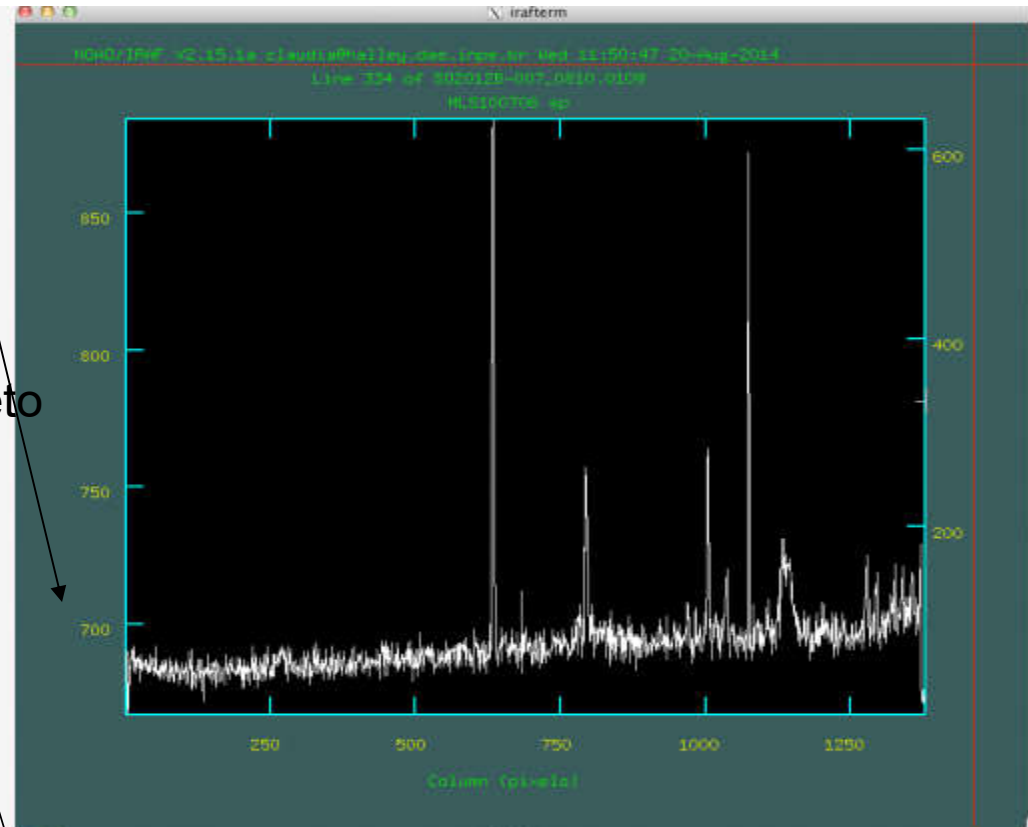


Objeto na fenda  
com elemento dispersor

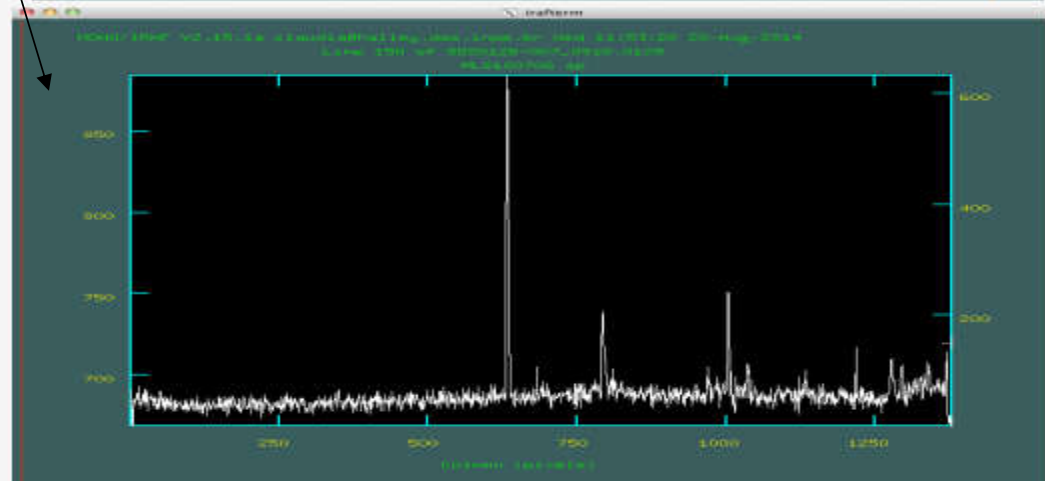
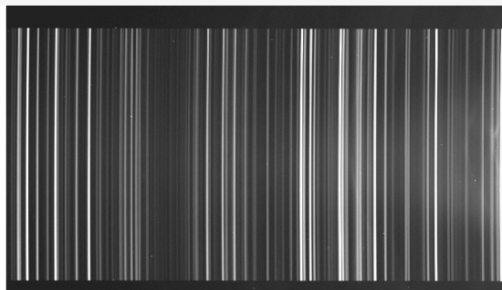


objeto

céu

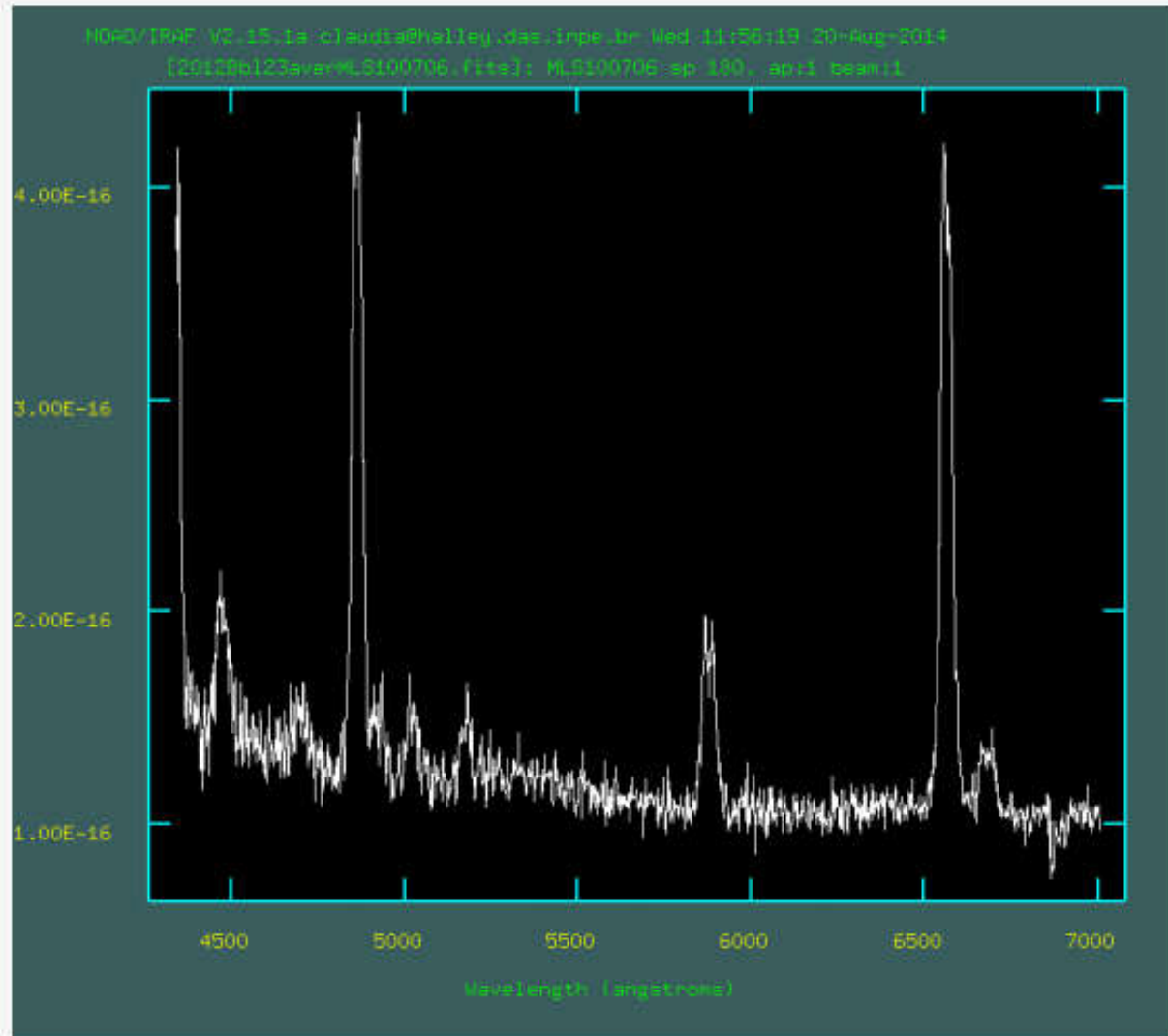


**Espectro de lâmpada**  
**Calibração em comprimento de onda**



# Espectro final

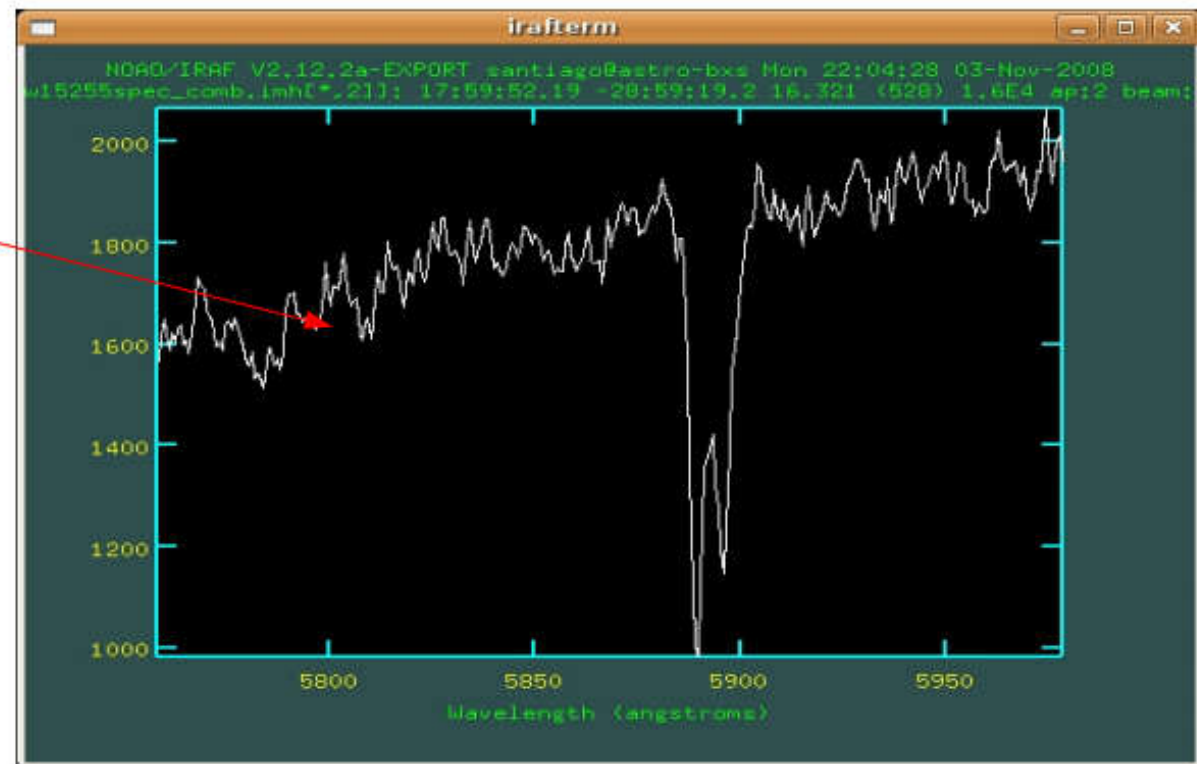
- unidimensional
- subtraído céu
- calibrado em comprimento de onda



# Resolução espectral e poder resolutor

Resolução:

$$\Delta\lambda \approx 3\text{\AA}$$



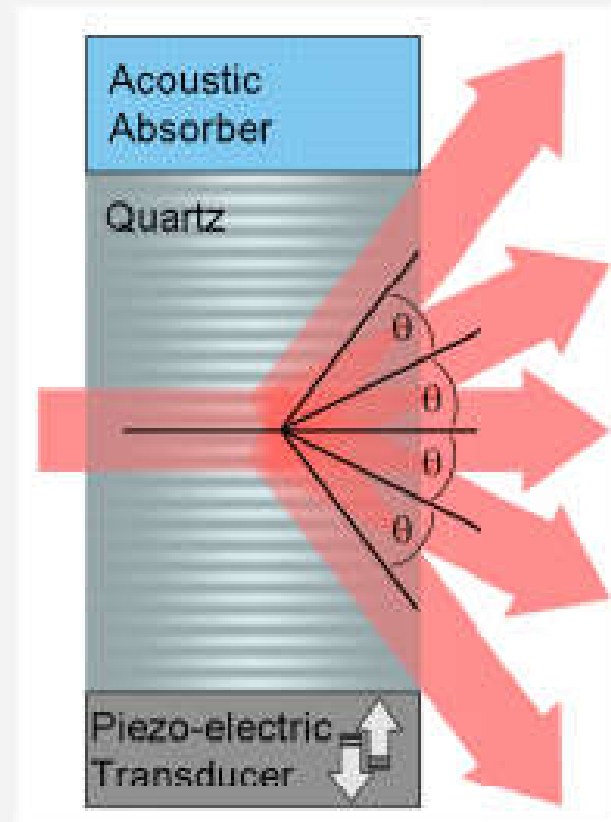
Poder resolutor:  $R = \lambda / \Delta\lambda = 3000$

## Bônus: Espectrômetro do ROI

### Modulador acústico-óptico

Um tipo de “filtro ajustável” é baseado na difração de Bragg (espalhamento em cristais)

“An acousto-optic modulator (AOM) consists of a piezoelectric transducer which creates sound waves in a material like glass or quartz. A light beam is diffracted into several orders. By vibrating the material with a pure sinusoid and tilting the AOM so the light is reflected from the flat sound waves into the first diffraction order, up to 90% deflection efficiency can be achieved.”



Wikipedia

- **Bibliografia e literatura recomendada**

- **Notas de aula da prof. Claudia Rodrigues (INPE)**

<http://www.das.inpe.br/~claudia.rodrigues/ast203/>

- **Notas de aula do Prof. Gabriel Hickel (UNIVEI)**

<https://sites.google.com/site/profgabrielhickel/home/tecobsast>

- **Notas de aula do Prof. Basilio Santiago (UFRGS)**

<http://www.if.ufrgs.br/oei/santiago/fis02014/>

- **Notas de aula do Prof. Jorge Menezes (USP)**

<http://www.astro.iag.usp.br/~jorge/aga5802/>

- Kitchin, C.R., Astrophysical Techniques, 4a. edição, Editora IOP, 2003.
- Lená, P., Lebrun, F., Minard, F., Observational Astrophysics, 2a. Edição, Editora Springer, 1998.
- Birney - Observational Astronomy (2nd Ed, 2008), Cap.5 e 10
- Howell Handbook of CCD Astronomy (2nd Ed, 2006) Cap. 5
- Sterken & Manfrod - Astronomical Photometry (1992)
- Smith
- Walker