

5 – MEDIDORES DE ESPECTRO

Neste capítulo falaremos, principalmente, de espectroscopia óptica, pois é aquela onde as técnicas são mais variadas e mais antigas. Aliás, “antigo e funcional” são termos que ligam bem no caso de espectrógrafos pois são da pouca instrumentação em Astronomia que dura tanto tempo (décadas) mantendo-se “state-of-the-art”. Muitas “peças de Museu” ainda se utilizam em telescópios de topo mundial. [A espectroscopia começou em 1860]

Faremos uma breve menção à espectroscopia noutros complementos de onda na última Secção.

5.1 Noções Gerais

5.1.1 Resolução espectral

Define-se **resolução espectral** (adimensional) por: $R = \lambda / \Delta\lambda$

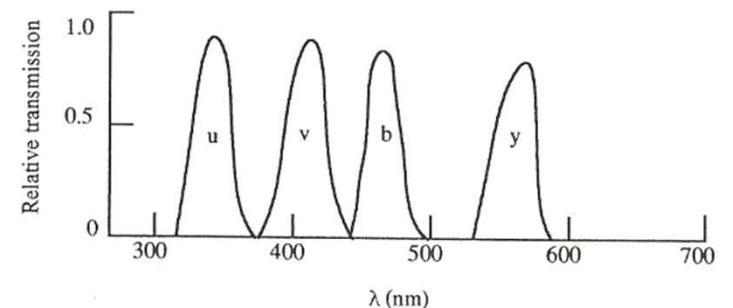
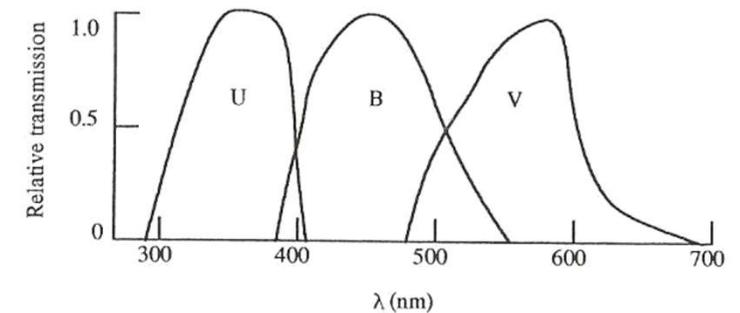
Operacionalmente: $R < 100$ (fotometria)

$R > 100$ (espectroscopia)

Assim, conforme a resolução com que se estuda o espectro, as técnicas têm nomes diferentes:

$R \approx 1-10$ (fotometria de banda larga – broadband) [e.g. Johnson]

$R \approx 10-100$ (fotometria de banda intermédia) [e.g. Stromgren]



$R \approx 100-300$ (fotometria de banda estreita) [e.g. H_α H_β OIII]

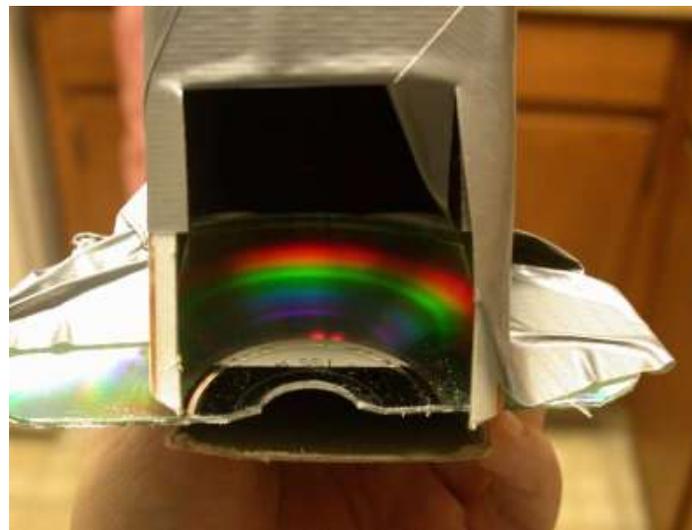
$R > 300$ (espectroscopia de interferência)

5.1.2 Redes de difracção

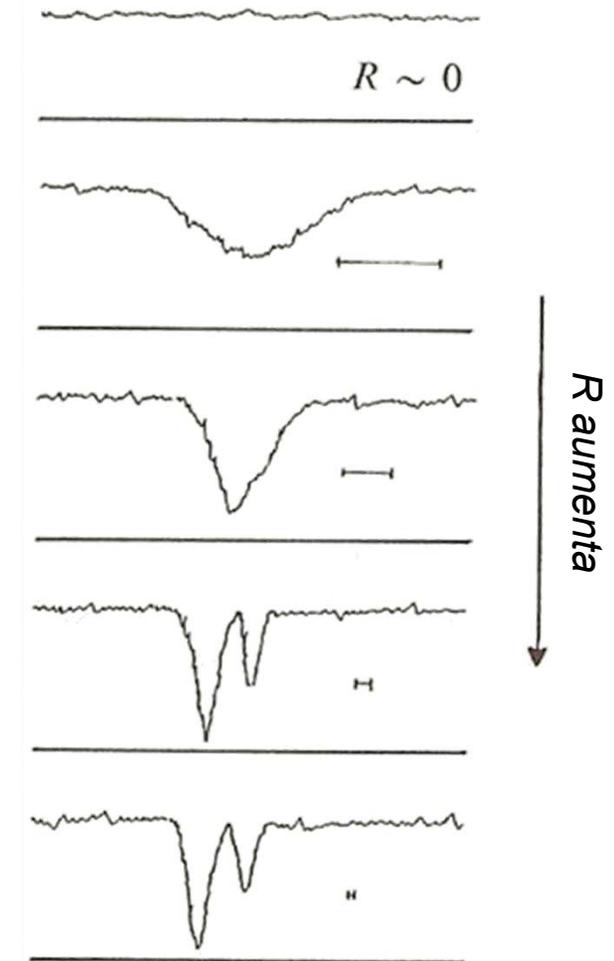
As redes de difracção são um caso particular da **Espectrometria de Interferência** onde se provoca a interferência das ondas incidentes de forma à mesma ser construtiva na gama de interesse e destrutiva no resto do espectro.



Exemplo de uma rede de difracção de *transmissão*.



Um CD ou DVD é um exemplo de uma excelente rede de difracção de *reflexão*.



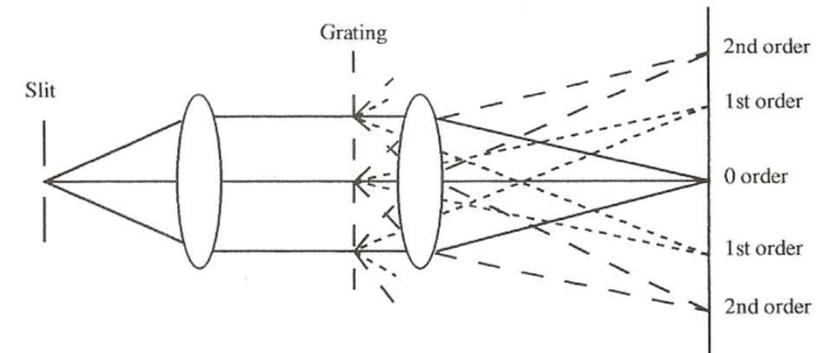
A espectroscopia óptica recorre frequentemente a redes de difracção constituídas por **sulcos** com um espaçamento dado em linhas/mm. É **ortogonalmente** a estes sulcos que a radiação é dispersa. As redes de difracção existem em dois tipos:

- i) **Redes de transmissão**: consistem em sulcos muito próximos com dezenas de μm de profundidade sobre um dado substrato (vidro ou sílica, em geral; para redes com pequena cobertura usa-se quartzo para comprimentos de onda curtos e fluorite para os longos). Infelizmente têm perdas de radiação da ordem dos 50% (devido às “barreiras” à luz).
 - a) **Redes de amplitude**: os sulcos funcionam como “centros de dispersão” da luz incidente: o vermelho é mais desviado que o azul.
 - b) **Redes de fase**: a variação da espessura óptica do substrato causa alterações de fase na radiação (dispersão).
- ii) **Redes de reflexão**: são o tipo mais comum, por serem mais baratas e terem menos perdas. Os sulcos são rasgados com diamante num substrato **reflexivo** (alumínio ou magnésio). Assim faz-se um **molde**, do qual se tiram as cópias (redes de reflexão adquiridas no mercado).

O tratamento matemático das duas situações (transmissão e reflexão) é semelhante e afim a fenómenos de interferência. Para um raio de luz de comprimento de onda λ , incidente com ângulo i em relação à normal à rede temos:

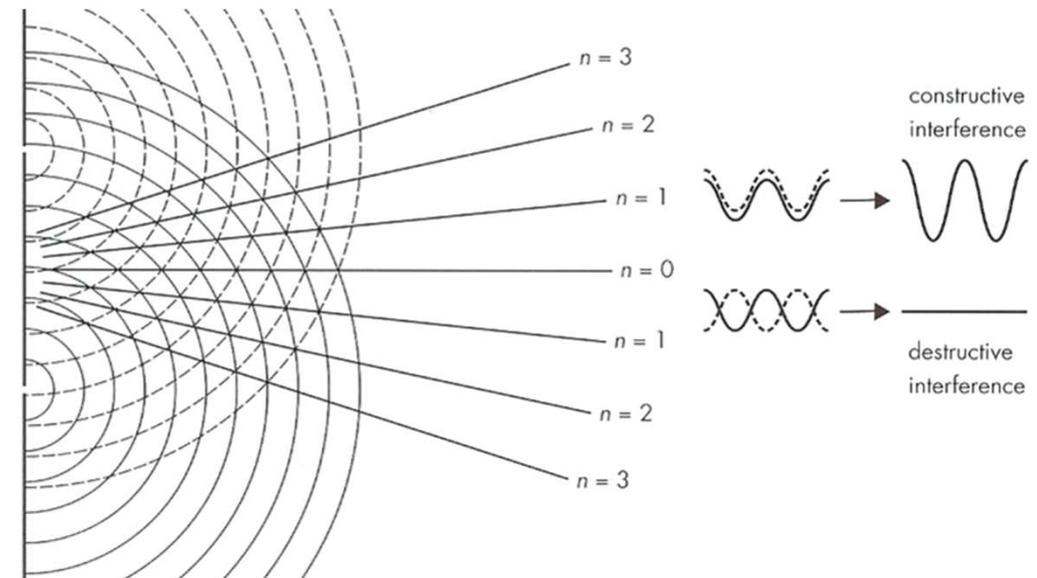
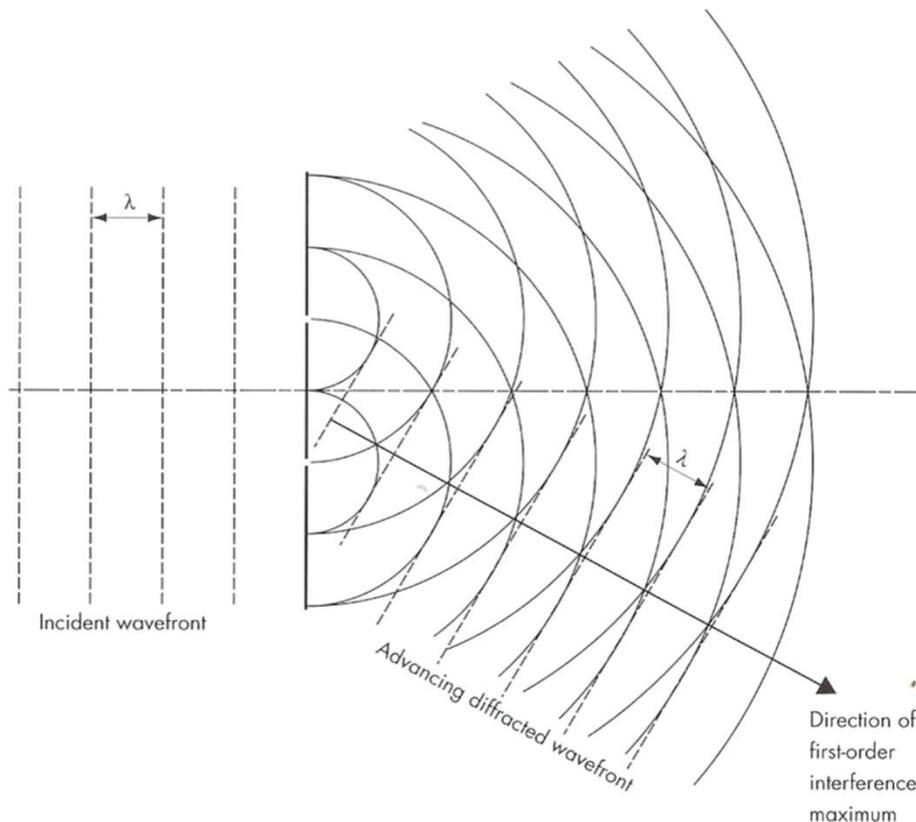
$$n\lambda = a (\sin i \pm \sin \theta_n)$$

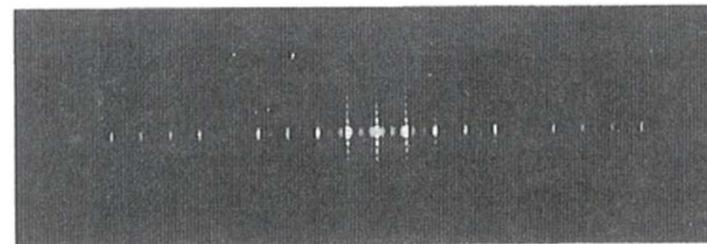
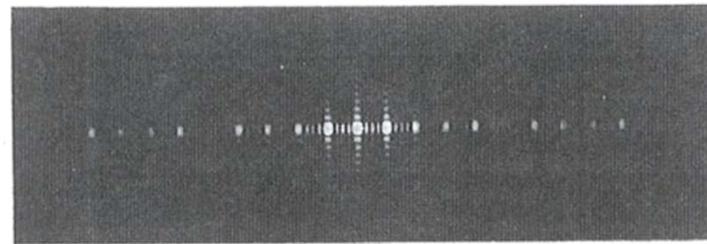
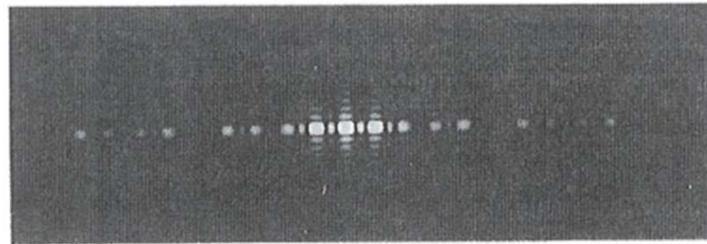
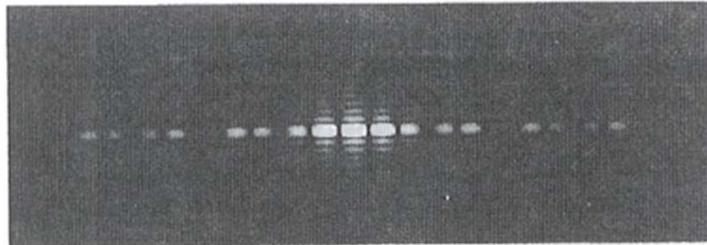
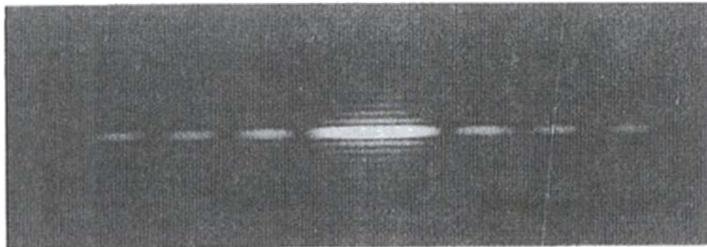
onde θ_n é o ângulo de saída/reflexão da interferência construtiva (dispersão) de ordem n e a a distância entre sulcos (um valor **constante** no caso de redes de difracção). Finalmente, o sinal “ \pm ” reflecte a existência de **ordens** (1, 2, 3, ...) quer para um lado quer para o outro da central ordem zero.



Acima: um espectrómetro básico com a fenda de entrada, um colimador, a rede de dispersão e a objectiva. Notem-se as várias ordens de dispersão.

Abaixo: As ordens reflectem **máximos** de interferência (construtiva). Neste caso apenas duas fontes são difractadas.





A cada ordem de dispersão corresponde uma “fringe” de interferência. A ordem central (zero) é sempre a mais intensa. Com o aumento do número total de linhas (N) aumenta a intensidade relativa das “fringes” de valor n mais baixo, sendo as mesmas também cada vez mais estreitas (largura de $\sim \lambda$ para $N \sim 1000$).

Com origem na relação da página anterior tiramos duas importantes propriedades para uma rede de difracção:

$$\text{Dispersão Angular} \equiv A = d\theta_n / d\lambda = n / (a \cos \theta_n)$$

[$i(\lambda)=\text{const.}$; usam-se módulos]

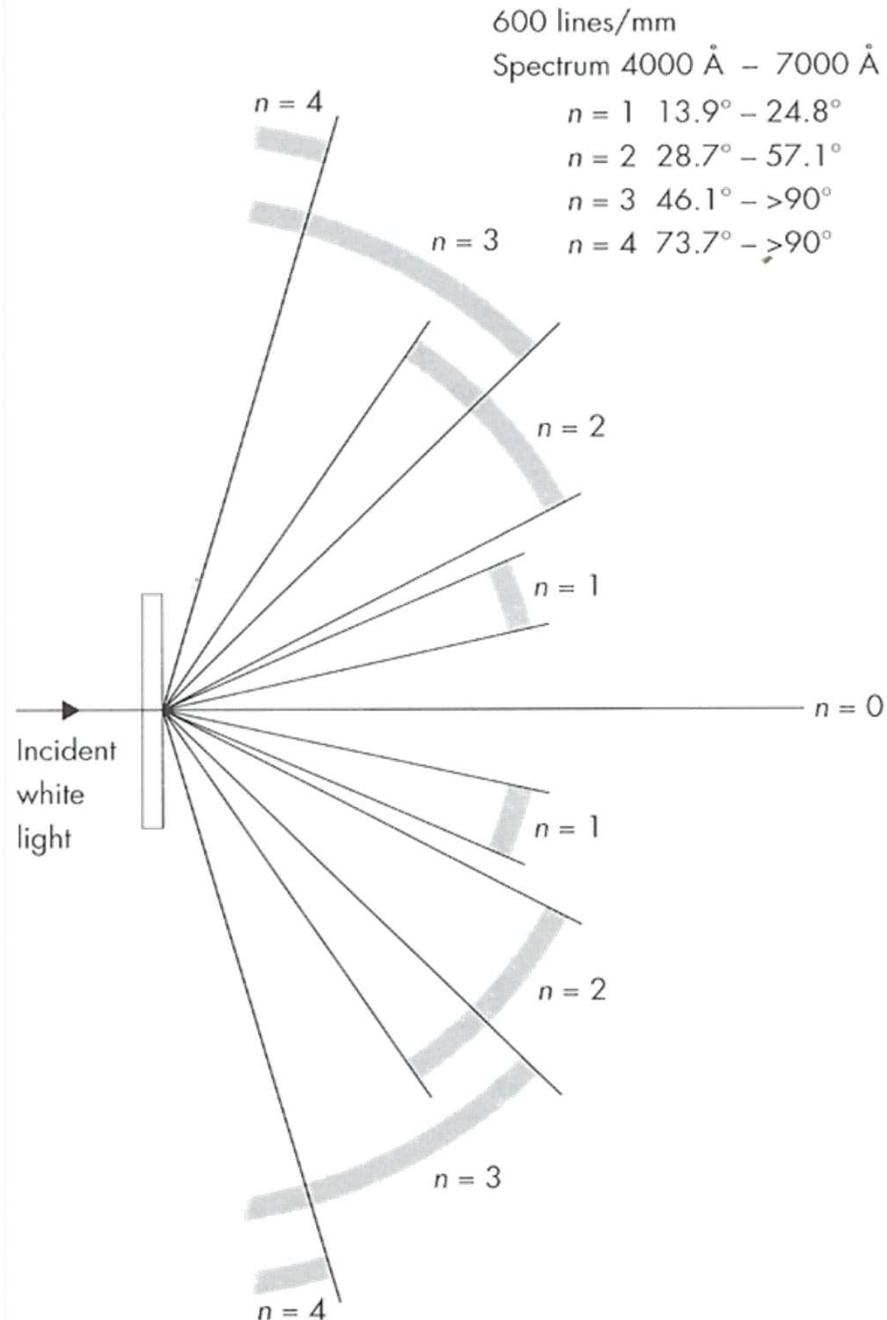
$$\text{Dispersão “Linear”} \equiv D_L = A f_l = f_l n / (a \cos \theta_n)$$

[“linear” pois θ_n é pequeno; f_l é a distância focal da objectiva do telescópio]

Esta última propriedade é importante para conhecer a **dimensão física** do espectro como projectado pelo telescópio no detector (CCD, filme fotográfico, etc.).

Ainda, agora associada à **largura física** (L) da rede de difracção, definimos a resolução (incidência ortogonal) da mesma por:

$$\text{Resolução} \equiv R = \lambda / \Delta\lambda = L \sin \theta_n / \lambda$$



Na Figura apresenta-se a dispersão espectral conforme a ordem dos máximos considerada. Note-se que quanto maior a ordem, maior a dispersão. O caso é o mais simples: **incidência ortogonal** da luz; não há qualquer dispersão para o máximo de ordem zero (que concentra **metade** da luz total).

Embora n grande aumente a resolução espectral, o problema é que também diminui drasticamente a intensidade das riscas (tipicamente $<10\%$ da intensidade incidente – c.f. Figura da pág. anterior).

Este problema resolve-se recorrendo à técnica de “**blazing**” que descrevemos na Secção seguinte. A técnica também permite que a ordem zero tenha dispersão.

Para concluir, uma definição. Quando se combina uma rede de difracção (*grating*) com um prisma obtém-se um **grisma**. Os grismas são muito utilizados no estudo do Sol.

5.1.3 Blazing

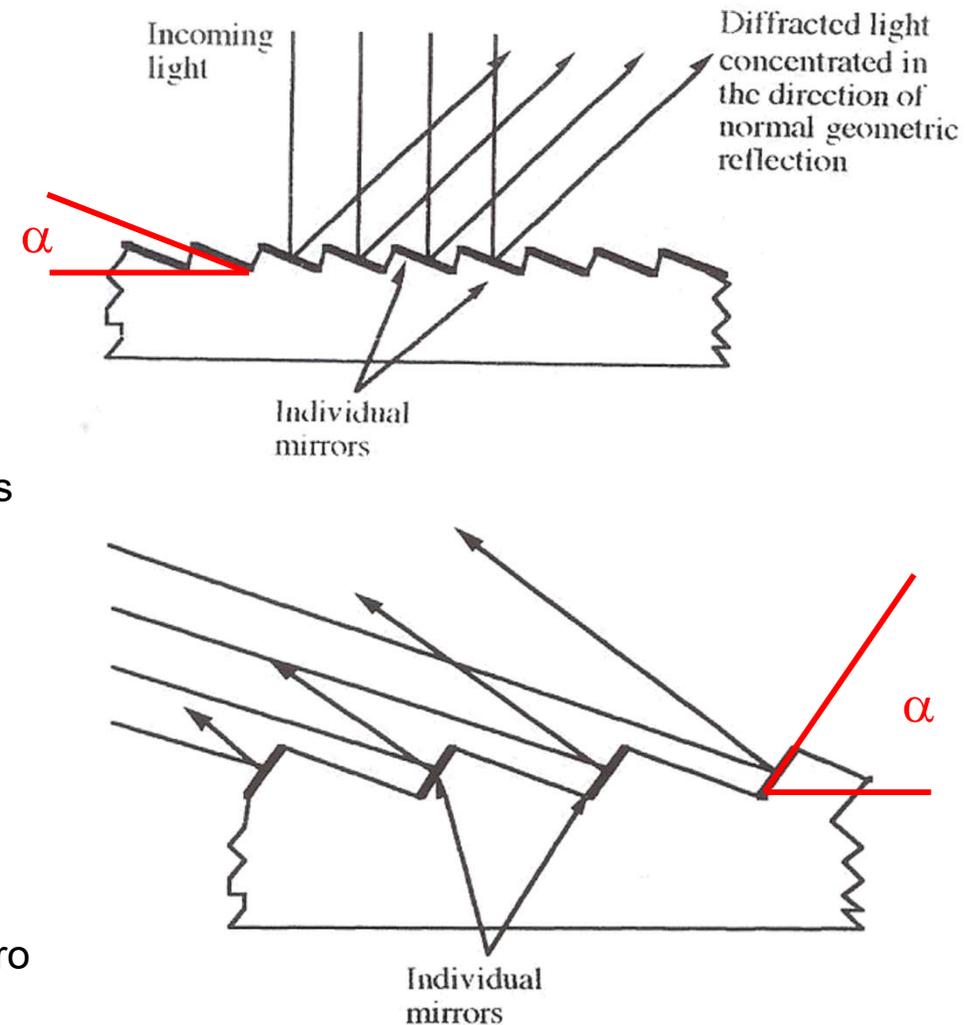
De forma a obter a ordem zero numa posição mais elevada (com dispersão) e a manter maior equilíbrio entre a intensidade das riscas das várias ordens, recorre-se à técnica de “blazing” (aplicável apenas em redes reflectoras). Esta como que “coloca” pequenos espelhos nos sulcos, com um determinado **ângulo** em relação à normal da rede de difracção (isto é, os sulcos deixam de ser simétricos).

A relação entre o comprimento de onda optimizado (de “blaze” – λ_B) e o ângulo do blazing (α) é dada por:

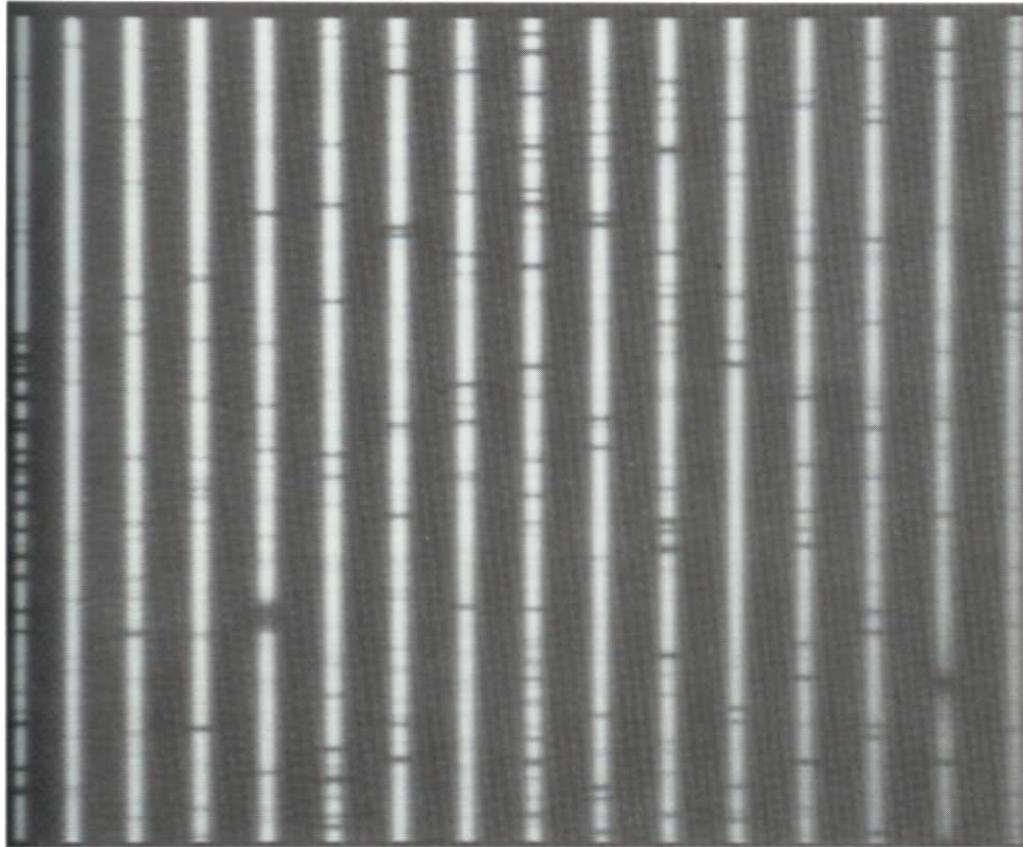
$$\lambda_B = 2a \sin \alpha \cos (\theta_n - \alpha) / n$$

É o ângulo α que permite escolher a porção do espectro electromagnético onde a rede de difracção irá actuar.

Um caso particular muito importante de uma rede de difracção com “blazing” é a **Echelle**. Esta tem apenas 100 linhas/mm e $\alpha \approx 60^\circ$ (elevado). Como agora n pode chegar às centenas, R e D_L são muito elevados.



*Note-se que ambas as redes de dispersão aqui apresentadas são de **reflexão**.*



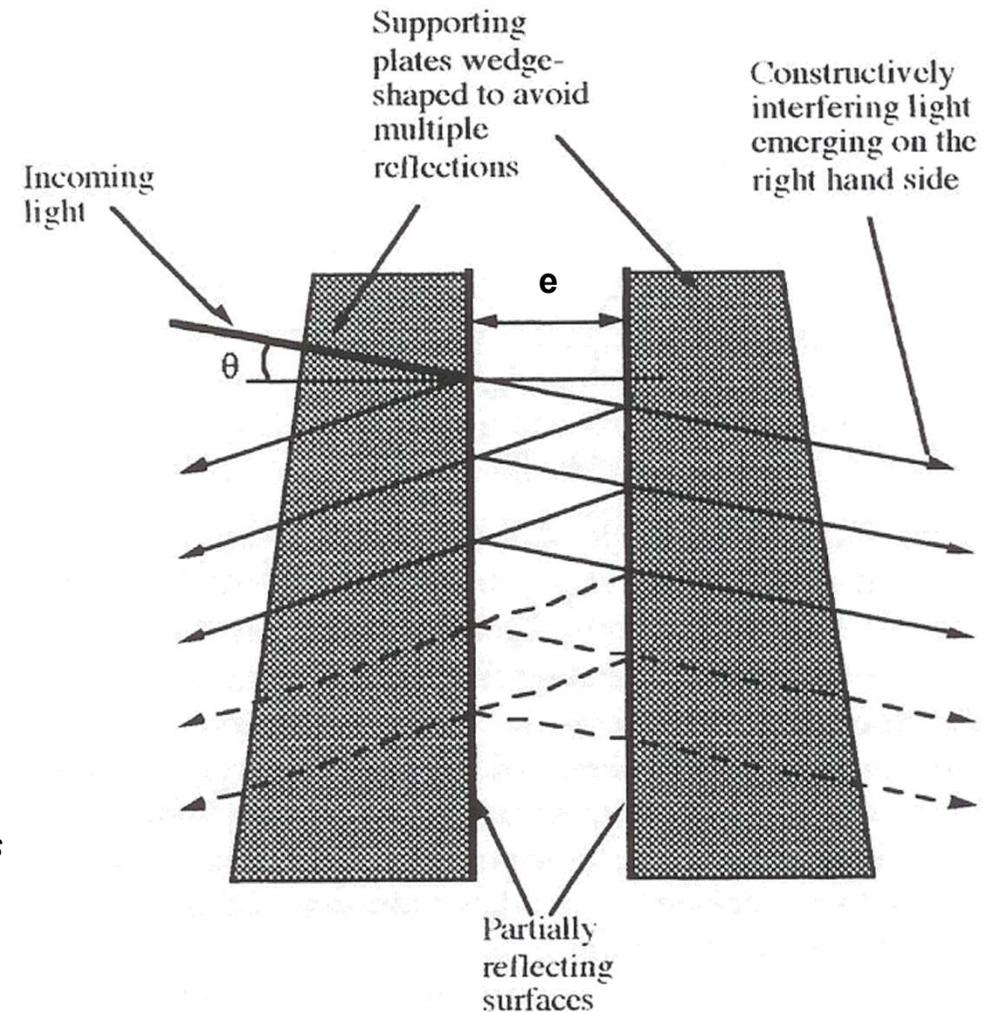
O exemplo de um espectro tirado com uma rede Echelle. As ordens apresentadas são $n = 83, \dots, 98$ ($\lambda_c = 687.3 \text{ nm}$ a $\lambda_c = 581.8 \text{ nm}$). O comprimento de onda decresce de baixo para cima. A risca $H_\alpha = 6563\text{\AA}$ está bem visível em $n = 87$.

5.1.4 Etalons Fabry-Pérot

Estes consistem em duas superfícies paralelas separadas de e , **parcialmente reflectoras** e com um elevado coeficiente de reflexão (ϵ_r); o de transmissão é dado por $1 - \epsilon_r$. Temos para a resolução espectral:

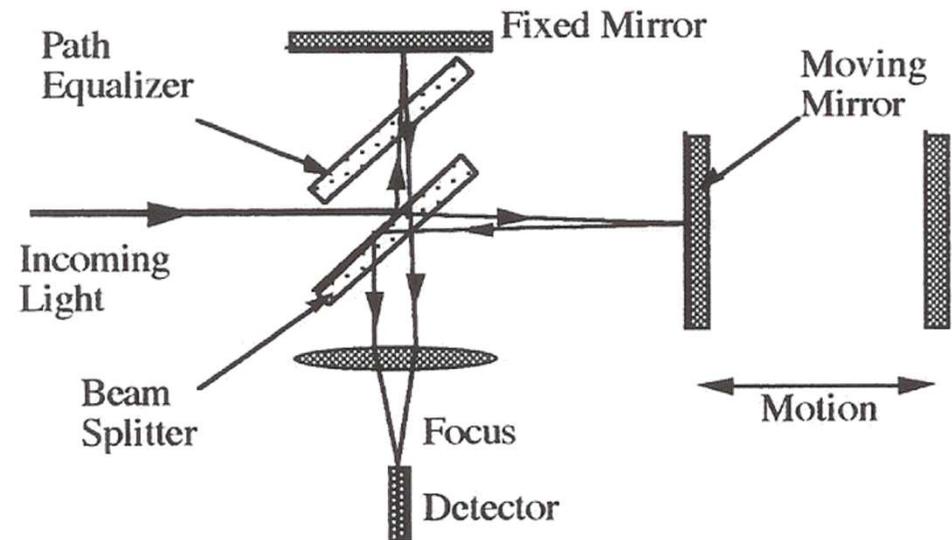
$$R = 2\pi e \sqrt{\epsilon_r} / (1 - \epsilon_r) \lambda$$

O ângulo de incidência θ é pequeno. Quando os raios que emergem da direita têm apenas interferência construtiva, os da esquerda têm apenas interferência destrutiva.



5.1.5 Espectroscópios de Fourier

No fundo, este tipo de espectroscópio é um interferómetro de Michelson a “duas ondas”. O espectro não surge directamente. A ideia é deslocar o **espelho amovível** muito lentamente e registar a luz que se recebe num detector. No caso da fonte ser monocromática obtém-se uma variação sinusoidal cujo período depende do comprimento de onda [$F(\delta(t)) \approx \text{sen}(a\omega + \phi)$].



No caso mais geral obtém-se a simples adição de ondas sinusoidais (que se traduzem em “batimentos” ou modulações nas ondas). Na prática, obtém-se o espectro fazendo a transformada de Fourier inversa da função que se obtém no detector. A resolução é dada por:

$$R = 2\Delta P_{max} / \lambda$$

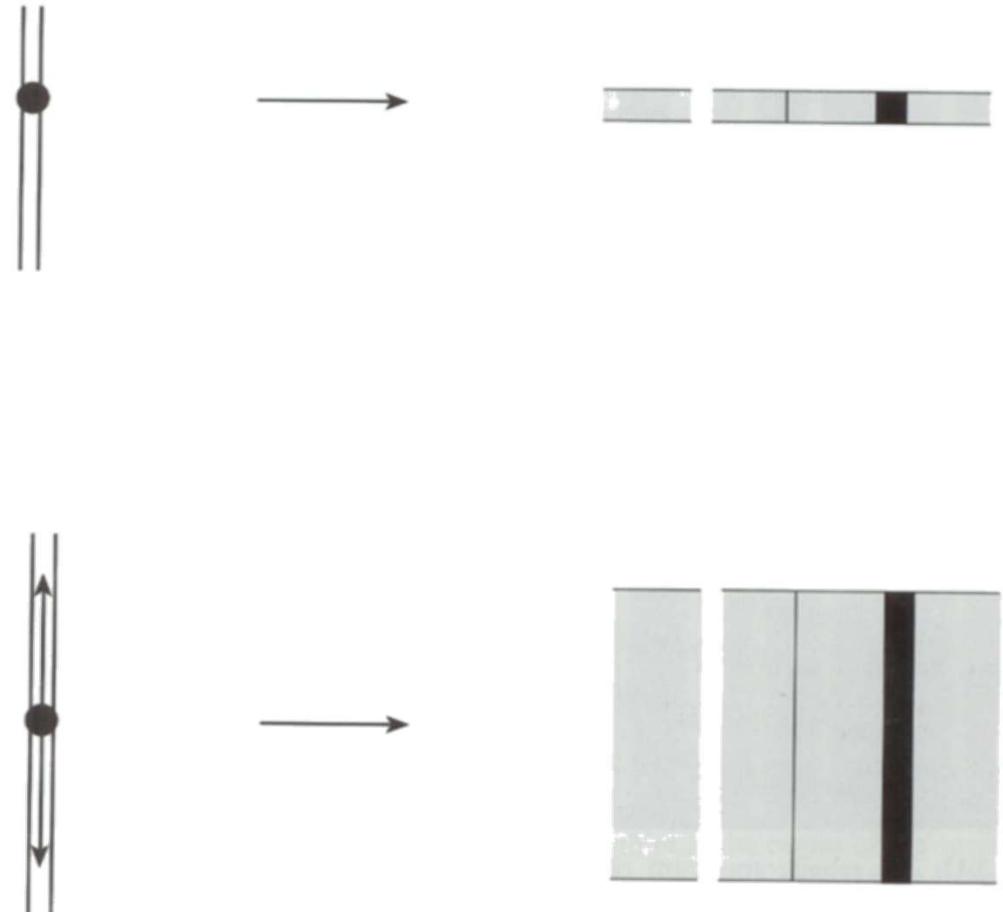
onde ΔP_{max} é a máxima diferença de percurso para os dois feixes (que são separados), ou seja, o máximo percurso possível para o espelho móvel.

Um espectroscópio de Fourier foi enviado para o espaço em cada uma das Voyagers.

5.1.6 O papel da fenda

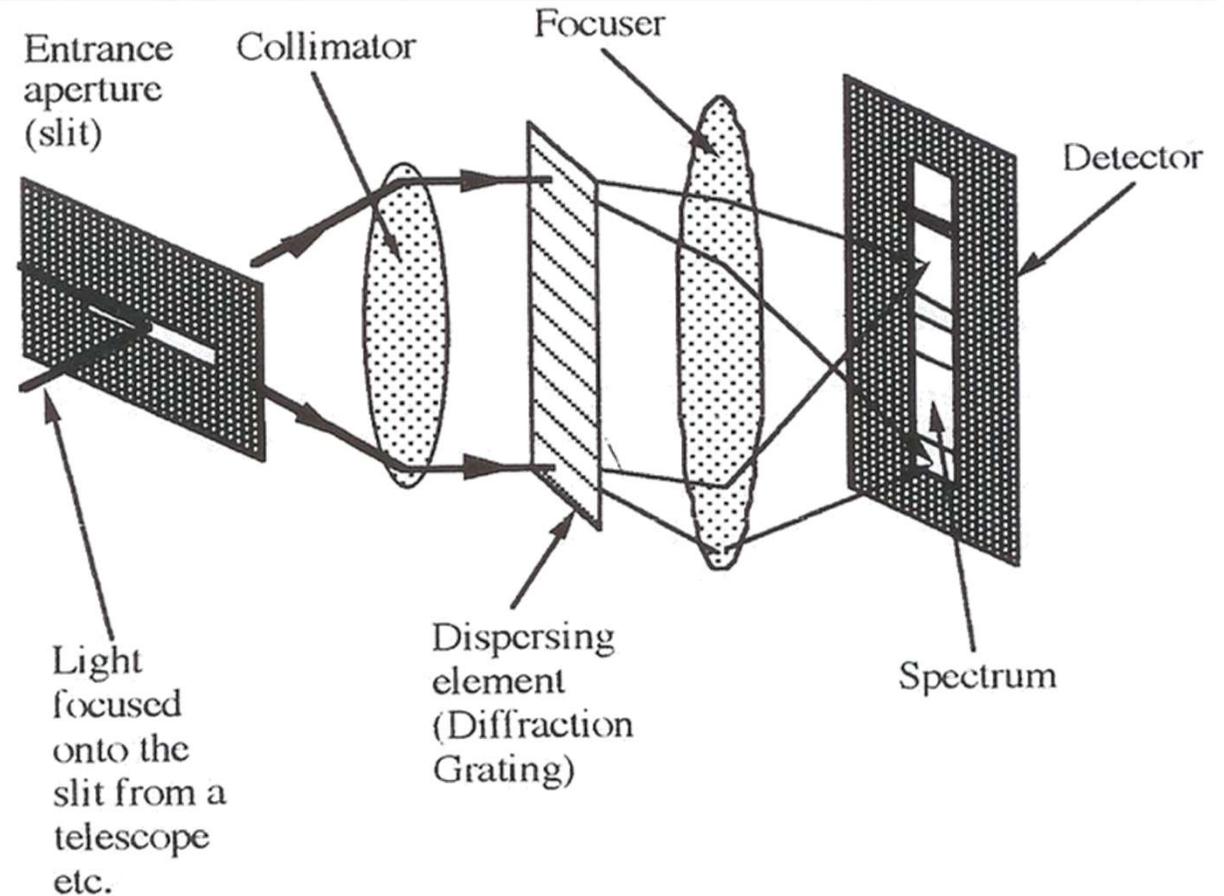
Todos os espectrógrafos necessitam de uma **fenda** logo após a entrada de luz na objectiva, de forma a concentrar a radiação na rede de difracção. Esta é especialmente importante para a observação de **objectos estendidos** (e.g. Lua, Sol, planetas). No caso de estrelas, que já aparecem como pontos, a fenda não é estritamente necessária.

É comum, dispendo de uma montagem equatorial, desligar o motor temporariamente após colocar a fenda paralela ao equador celeste, de forma à estrela se deslocar e gerar um espectro de dimensão suficiente para a maioria das riscas ser facilmente identificada.



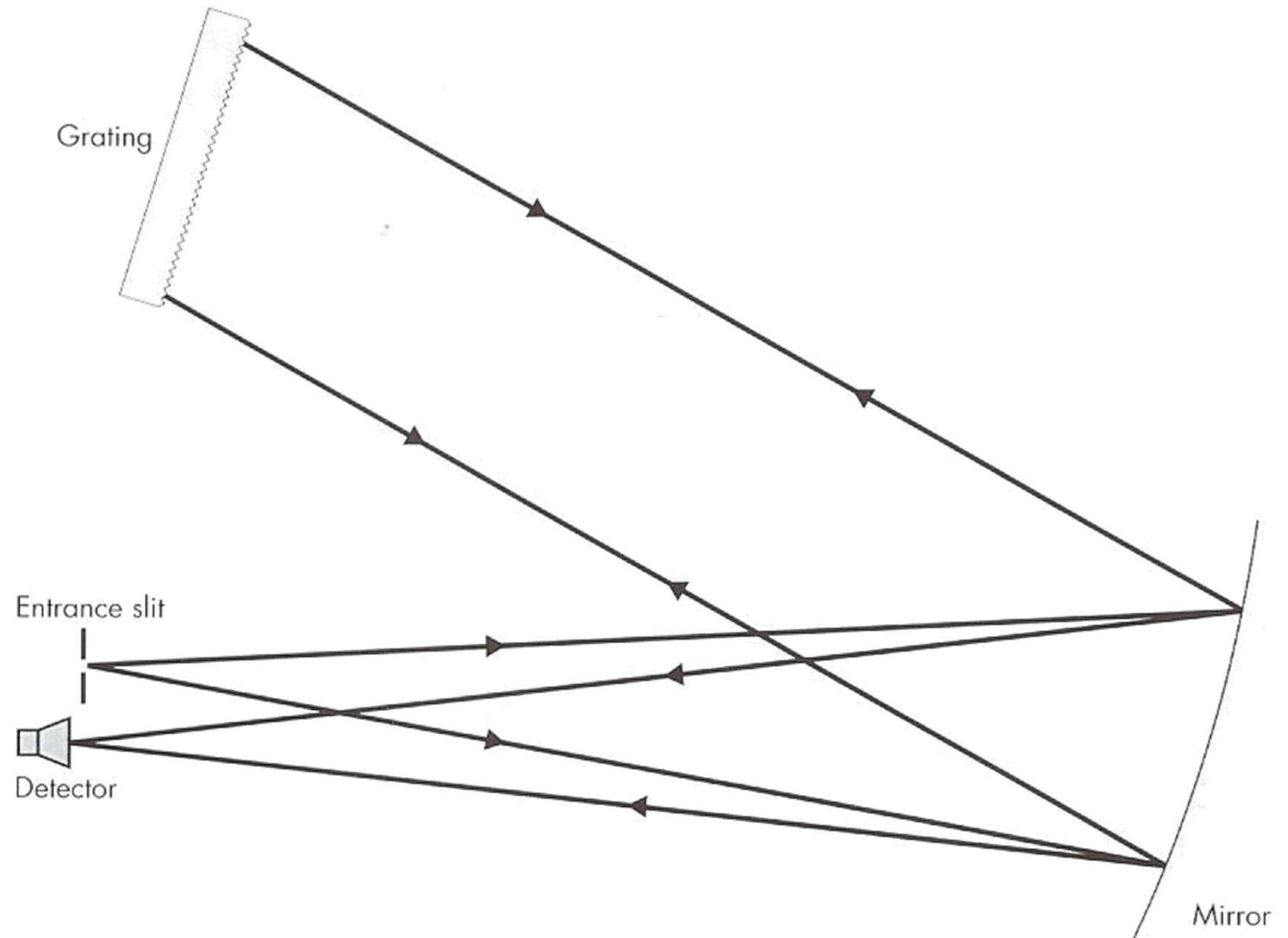
5.1.7 O espectroscópio básico

No mínimo, qualquer espectroscópio deve conter uma **fenda**, uma (duas) lente(s)/espelho(s) (**colimador** – todos os raios incidentes saem paralelos) e uma rede de difracção (tipicamente de reflexão). Está implícita a utilização de um detector (CCD, fotografia, olho humano) para registar o **espectrograma** (espectro em “bruto”).



A fenda deve estar no plano focal do telescópio. Os eixos do colimador e objectiva têm de coincidir. A rede de difracção não deve ser maior que o diâmetro destes pois é um desperdício (a resolução espacial do espectro só depende do diâmetro da objectiva/colimador).

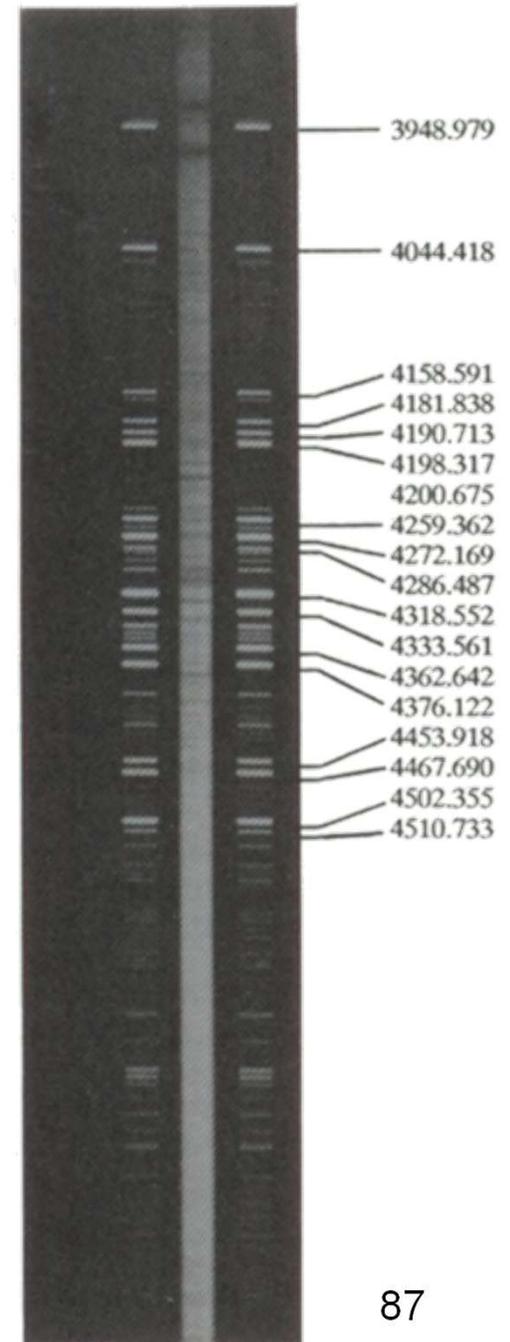
O **espectrógrafo de Littrow** é o mais básico. O **único** espelho tem duas funções: i) colimar os raios que chegam da fenda para a rede de difracção; ii) focar os raios que vêm da rede (reflectora) num detector. Numa versão em espectroscópio, substitui-se a rede por um prisma de 30° (ângulo superior na secção do mesmo), com a parte de trás aluminizada.



5.1.8 Calibração

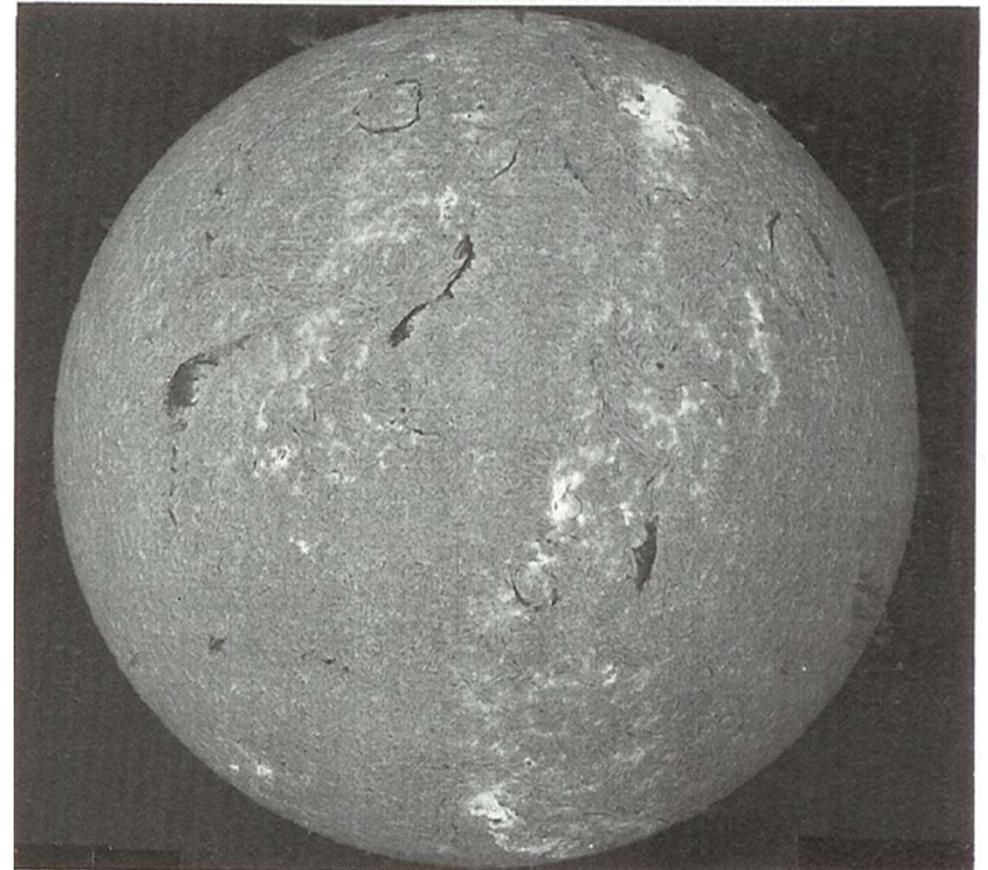
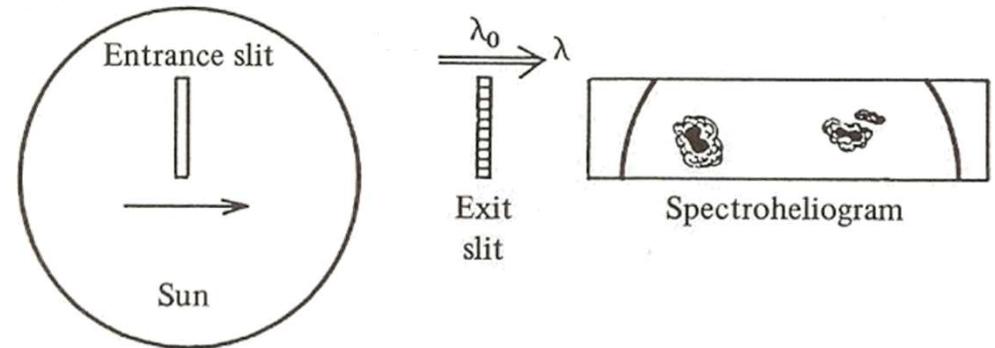
Como no caso de detectores (e.g. CCD), é fundamental **calibrar** as observações com “velas-padrão” (estrelas de magnitude conhecida nos vários filtros, no caso da CCD). No entanto, no caso de espectroscópios, tal é ainda mais importante porque a calibração é de **dois tipos**. Uma, a de **amplitude**, é a mais usual. A outra é a de **comprimento de onda** para a qual se usam lâmpadas monocromáticas de valores bem definidos: usualmente são de mercúrio, néon, árgon, kripton ou combinações destes. Obviamente que estrelas brilhantes de espectro bem conhecido também são utilizáveis.

*A calibração de comprimento de onda de um **espectrograma**. Este coloca-se no centro, entre duas cópias do **espectro de comparação** que se obteve observando uma lâmpada de calibração (de árgon/kripton, neste caso). Neste estão identificadas várias riscas. A habilidade de quem processa os dados vai ser agora encontrar uma sucessão de riscas que coincidam com o espectro de comparação de forma a saber quanto deslocar verticalmente o espectrograma.*



5.1.9 O espectro-heliógrafo

Este tipo especial de espectrógrafo obtém um “espectro” monocromático do Sol – funciona como um filtro “narrow-band”, na prática. A vantagem é a possibilidade de escolha, a priori, do comprimento de onda a observar (e.g. H_{α} , H_{β} , OIII, Call, etc.). Como o Sol é um disco estendido, a técnica consiste em passar a fenda pelo disco do Sol numa direcção, retirando uma “faixa” do mesmo, fazendo depois o mesmo numa “faixa” adjacente, etc., até cobrir todo o Sol.



A “exit slit” é substituída por uma CCD para se produzir a imagem.

5.1.10 Tecnologia recente

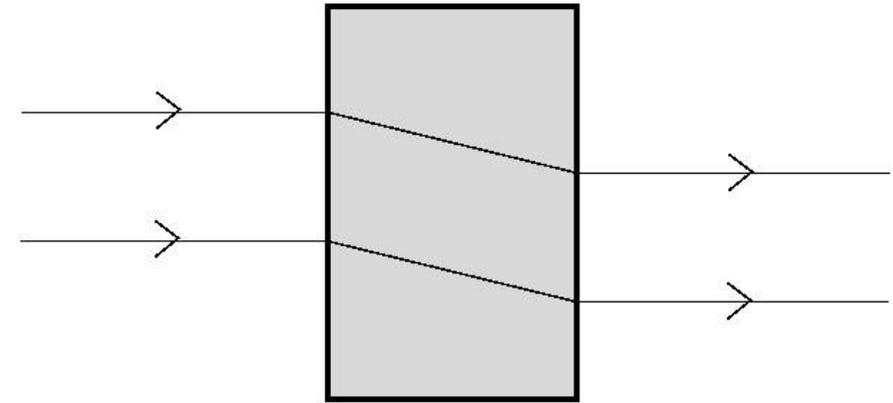
Desde que foi proposta em 1998, a VPHG (Volume Phase Holographic Grating), um novo tipo de rede de difracção de transmissão, tem tido muita aceitação para a sua utilização em telescópios actuais e de futuro.



Na prática, funciona quase como um **grisma**, entre dois prismas. Assim, garante uma transmissão linear. O tipo de refração conseguida pela rede é como a de Bragg (mais típica de espectrometria em raios X – Secção 5.5.4A), em oposição à “normal” devida a sulcos num material.

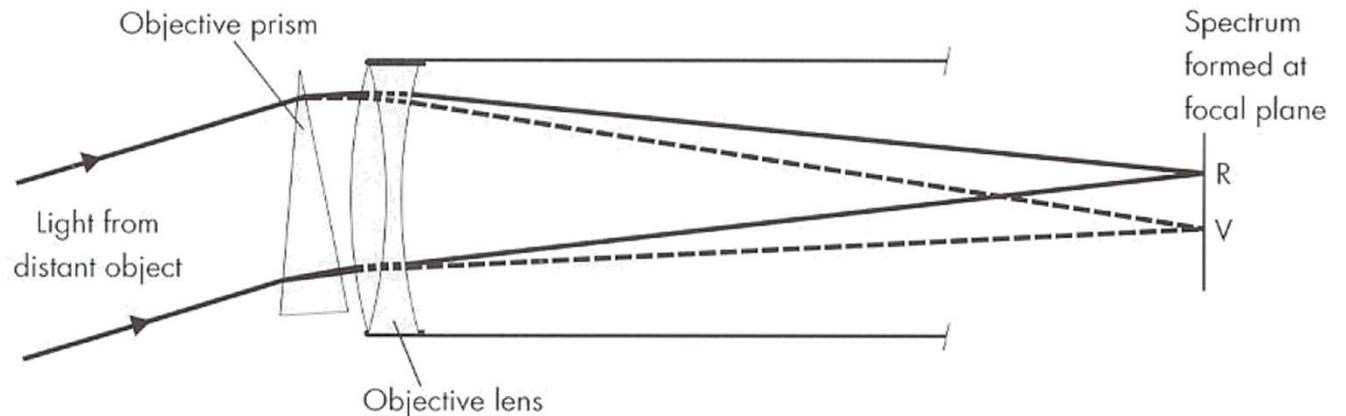
5.2 Espectroscópios

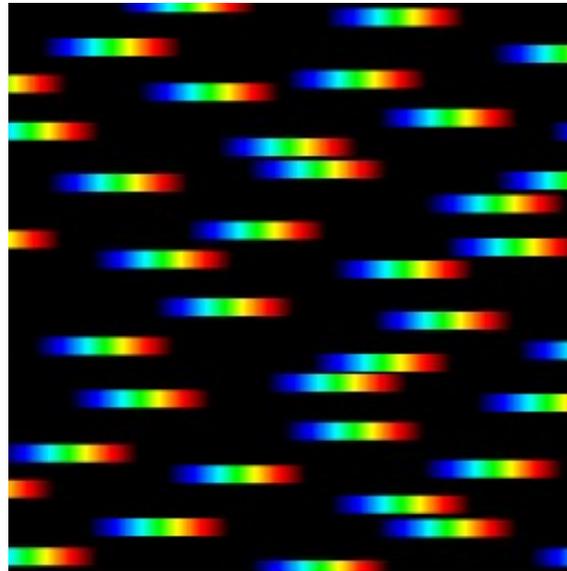
O espectroscópio mais básico é um **prisma**. Este funciona como um refractor que desvia mais a luz azul do que a vermelha (dado que em qualquer meio transparente o índice de refração varia com o comprimento de onda da radiação). Se em vez de um prisma tivéssemos, por exemplo, um paralelepípedo, o efeito resultante seria **nulo** e a radiação não sairia refractada.



Num paralelopípedo a radiação é refractada pela primeira face mas refractada “ao contrário” pela segunda. O efeito resultante é nulo.

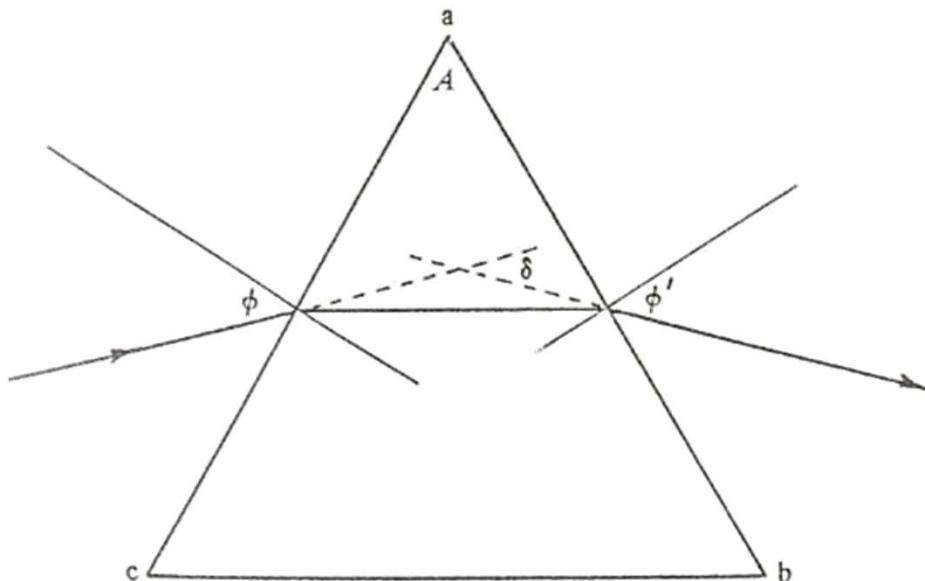
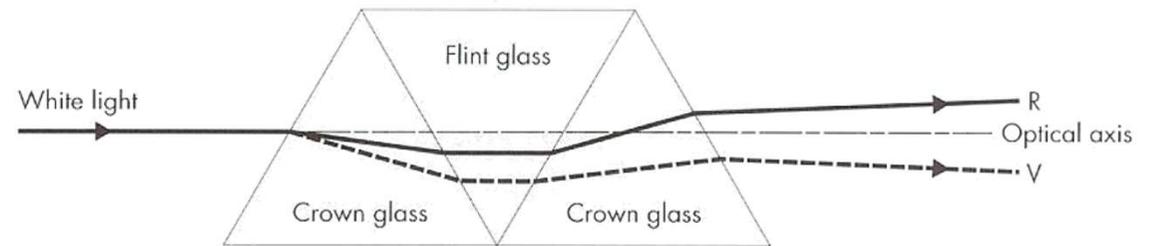
Usualmente chama-se à espectroscopia feita com prismas **espectroscopia de objectiva**. Todos os objectos observados (qualquer um que esteja no campo de visão) são directamente transformados no seu espectro.





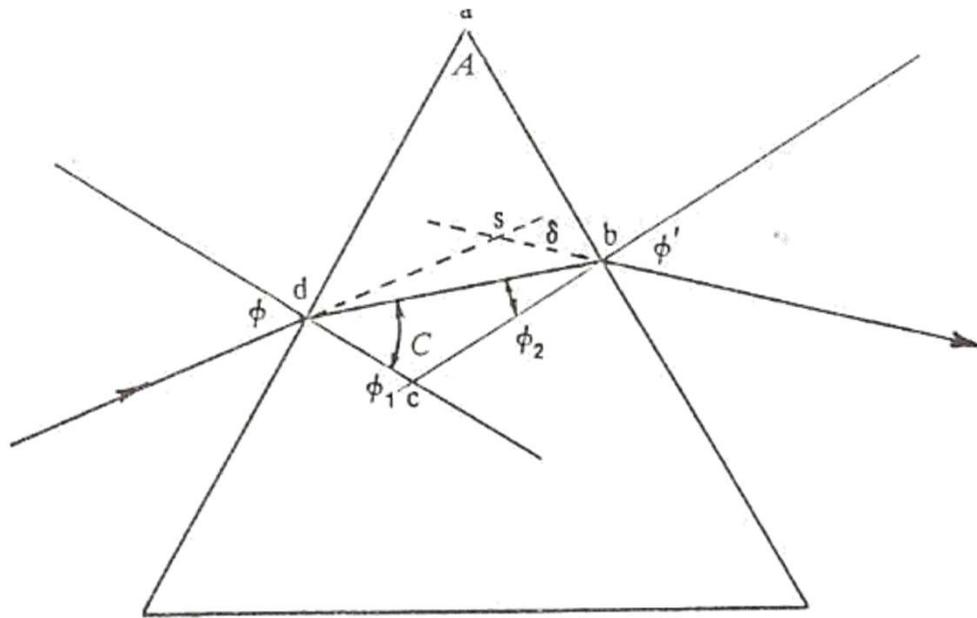
Num espectroscópio de objectiva (e.g. prisma) todos os objectos observados aparecem com o seu espectro. No fundo, é como se fizesse multi-espectroscopia (de baixa resolução, obviamente).

Uma utilização mais eficiente de prismas é juntar um número ímpar dos mesmos com índices de refração diferentes num chamado **Prisma de Amici**. Este é um **espectroscópio de visão directa**.



A geometria do que acontece a um raio incidente num prisma de índice de refração n num caso particular: quando δ é mínimo (δ_{min}) temos $\phi = \phi'$. O valor de δ_{min} pode-se calcular a partir do ângulo “de topo” (A):

$$\text{sen} [(\delta_{min} + A)/2] = n \text{ sen } (A/2).$$



O caso geral é bem mais complexo que o caso particular anterior.

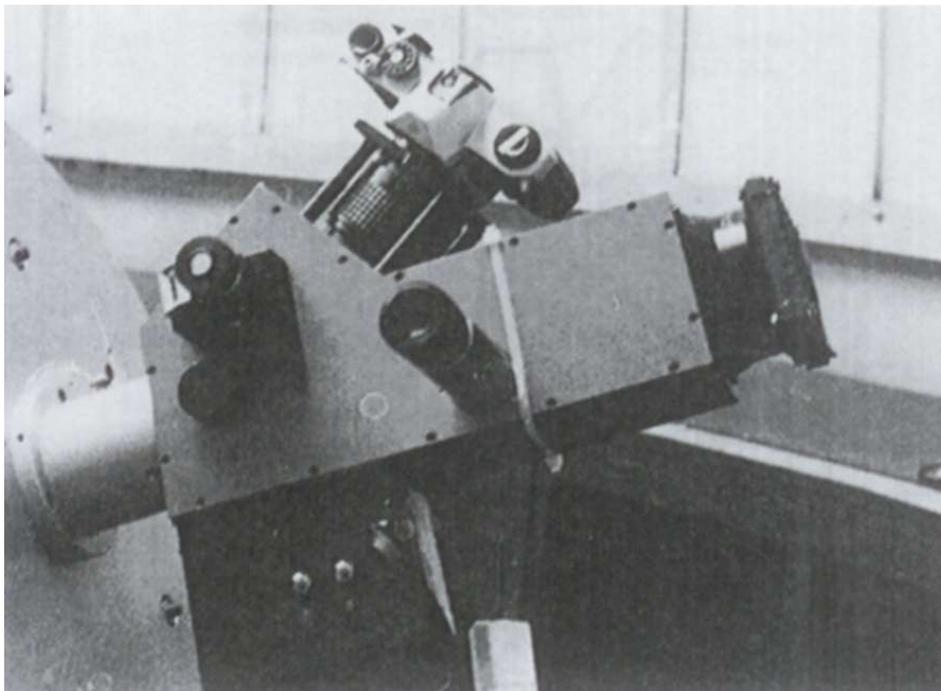
Os espectroscópios têm um valor essencialmente **histórico**, com quase nenhuma utilização na Astronomia profissional. Os actuais instrumentos são essencialmente espectrómetros, sendo já raros também os espectrógrafos.

5.3 Espectrógrafos/Espectrómetros ópticos

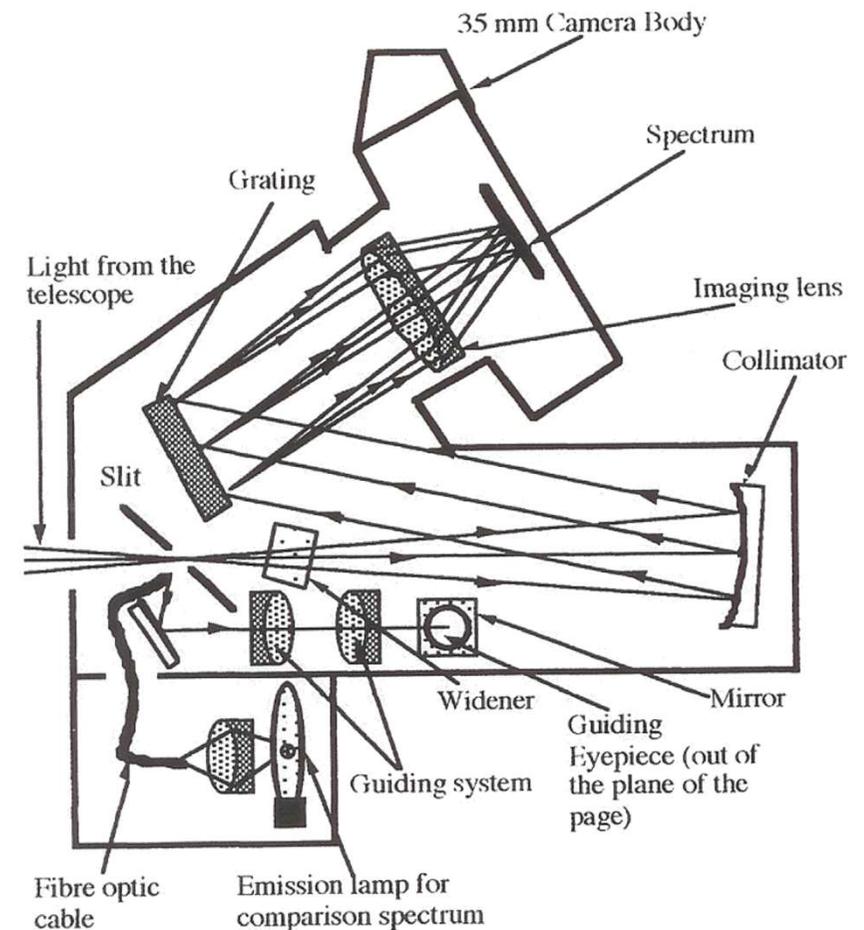
5.3.1 De nível amador

[recordar focos: Nasmyth=Coudé, Cassegrain, etc.]

O exemplo aqui apresentado representa um **espectrógrafo básico**, contendo todos os elementos essenciais.



Note-se que é a lente da máquina fotográfica que serve de elemento final para a captação do espectro e respectiva projecção (impressão) no filme. O espectrógrafo inclui autoguider e lâmpada de calibração.



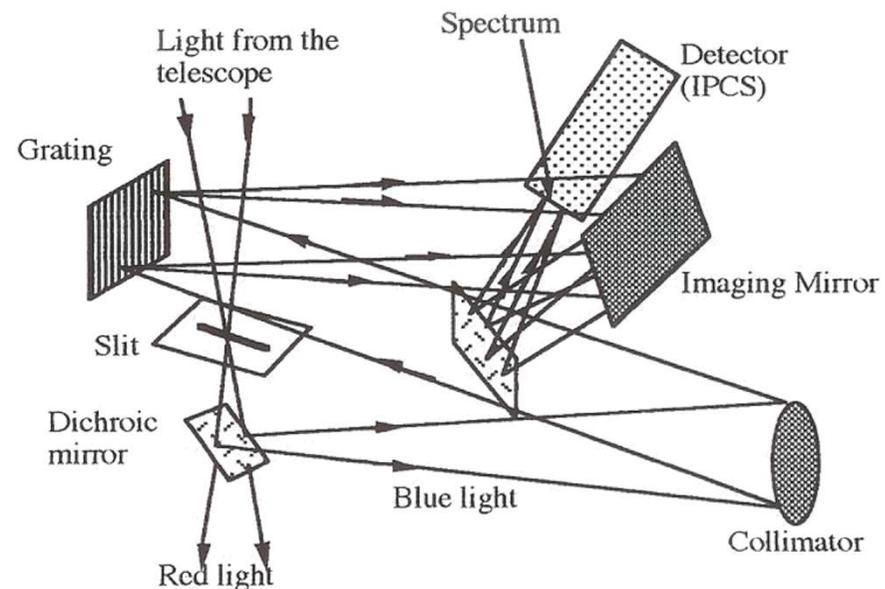
Na Tabela seguinte apresentam-se os detalhes técnicos principais do espectrógrafo.

Optomechanics 10C	
largura da fenda (w)	50 μ m / 100 μ m
colimador (espelho principal)	$f_1=22.5\text{cm}$ (f/9)
redes de difracção (reflectoras; $\lambda_B = 500\text{nm}$ - $n=1$)	i) 600 linhas/mm; R=1000/2000 ii) 1200 linhas/mm; R=500/1000
calibrador	lâmpadas Fe/Ar ou Hg/Ne

5.3.2 ISIS

O típico espectrómetro da Astronomia profissional está no **foco Cassegrain** do telescópio onde acopla. Um exemplo é o ISIS (Intermediate dispersing Spectroscopic and Imaging System) do WHT4.2m (La Palma).

O ISIS tem um espelho dicróico colocado logo a seguir à fenda que separa a radiação visível em duas partes: um feixe “azul” e um “vermelho” (o ponto de separação é escolhido entre 450nm e 550nm). Cada feixe segue depois para o seu “espectrógrafo slitless” individual, um optimizado para o azul (representado) e outro para o vermelho (estaria em baixo no esquema). Cada “Imaging Mirror” tem $f_1=0.5\text{m}$ (f/1).



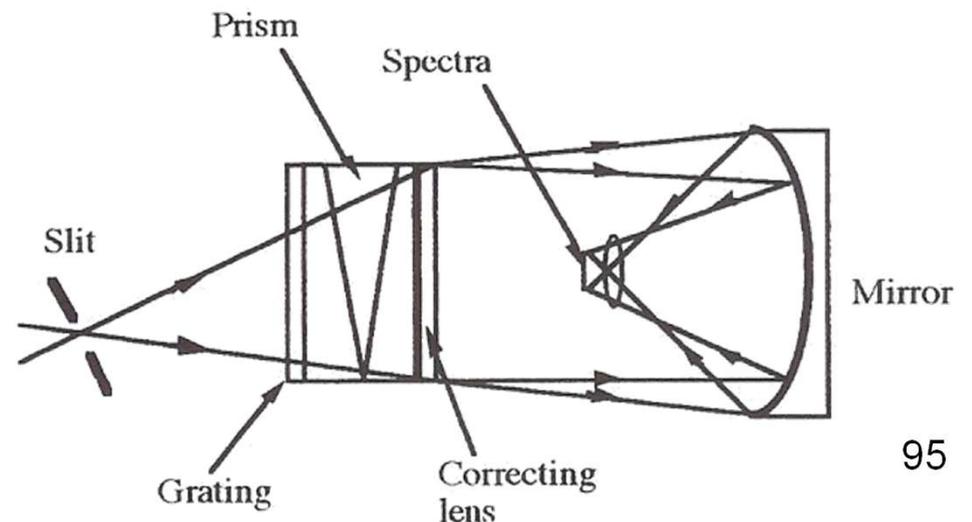
ISIS (*braço vermelho ou braço azul*)

largura da fenda (w)	50 μ m – 5mm (0.2-23" no céu)
colimador (espelho principal)	$f_1=1.65$ m (beam: 15cm de diâmetro)
redes de difracção (reflectoras; $\lambda_B = 360-720$ nm)	150-2400 linhas/mm; R=800-7000 Dimensões: 15.4 × 20.6 cm ²
calibrador	lâmpadas Cu/Ar ou Cu/Ne ou Th/Ar ou contínuo

5.3.3 FOS

Um tipo de espectrómetro atípico mas essencial para obter espectros de objectos muito fracos é de transmissão e usa **grismas** em vez de redes de difracção. Isto permite separar os espectros de primeira e segunda ordem, logo cobrindo maior gama espectral (e.g. 350-1000nm). Um exemplo é o FOS (Faint Object Spectroscope) no WHT4.2m.

O FOS usa um prisma de Amici acoplado a uma rede de difracção como grisma.



FOS

largura da fenda (w)

$50\mu\text{m} - 5\text{mm}$ (0.2-23" no céu)

colimador

Nenhum (o único espelho é o de "Imagem")

redes de difracção
(transmissoras; $\lambda_B = 730\text{nm}$)

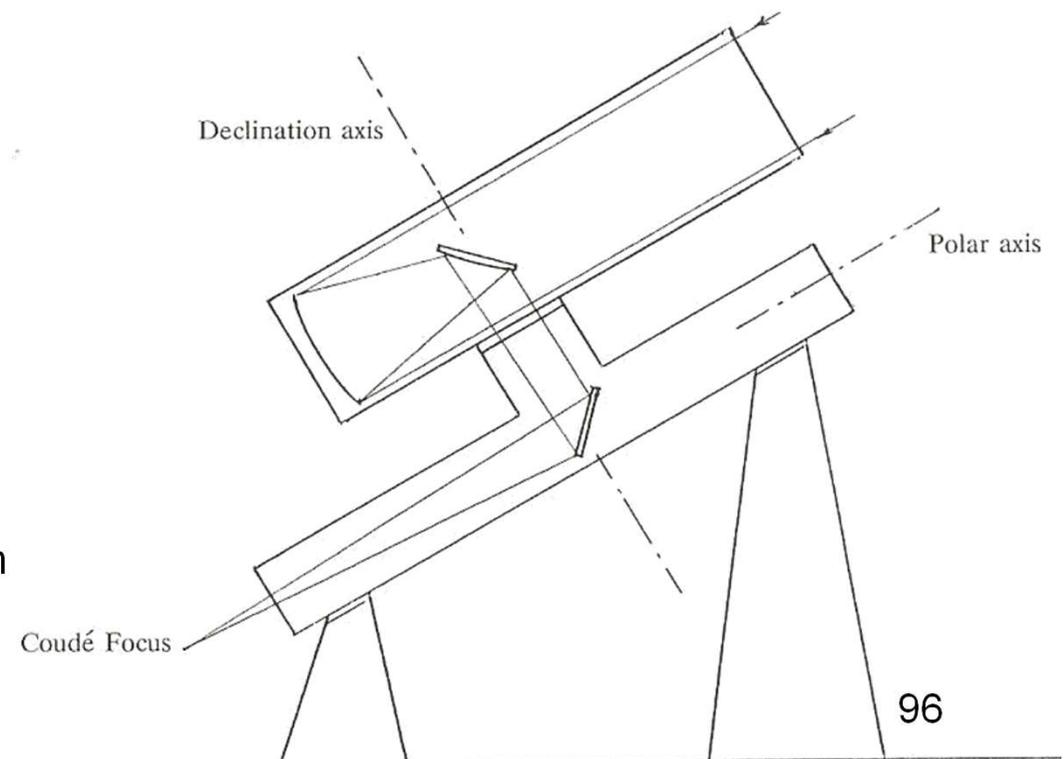
150 linhas/mm; 1ª ordem: $\lambda = 460-970\text{nm}$

2ª ordem: $\lambda = 350-490\text{nm}$

$R=500$ (1ª) / 1000 (2ª)

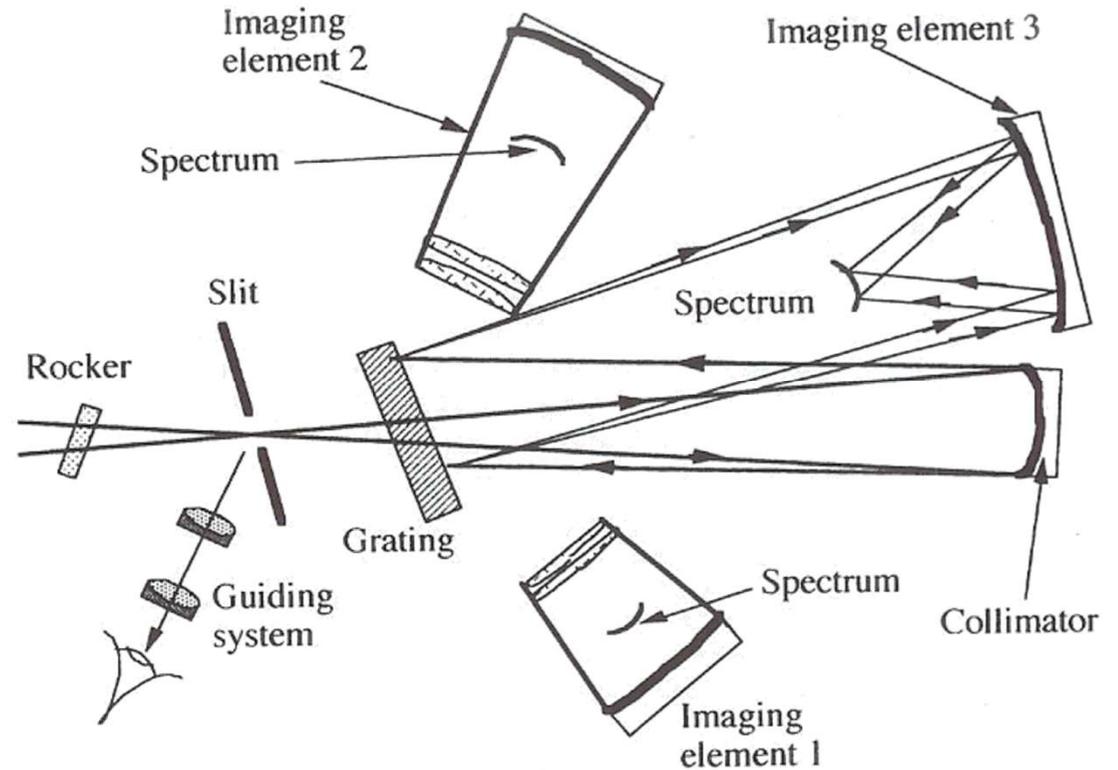
5.3.4 O foco Coudé

Os problemas principais de um espectrómetro montado no foco Cassegrain são o equilíbrio do sistema (existem limites para o peso do espectrómetro) e as distorções internas dos elementos por acção da gravidade. Assim, especialmente porque os espectrómetros são cada vez mais volumosos e mais pesados (para atingir uma excelente resolução espectral), nos maiores e mais recentes telescópios ópticos prefere-se a montagem no **foco Coudé** (montagem equatorial; é **Nasmyth** na altazimutal). Desta forma, o instrumento não roda com o telescópio mas mantém-se estacionário.



Um exemplo de tal espectrómetro é o Coudé do ESO1.52m (La Silla).

O espectrómetro Coudé do ESO1.52m não tem todos os elementos no mesmo plano: note-se que os raios vindos da fenda passam ao lado da rede de difracção. Existem três espelhos para imagem, utilizando-se cada um conforme o ângulo da rede.



Coudé – ESO

largura da fenda (w)	50-300 μ m (0.2-1.3" no céu)
colimador (espelho principal)	$f_1 = 6\text{m}$ (f/30)
redes de difracção (reflectoras; $\lambda_B = 410-750\text{nm}$)	770-1500 linhas/mm; $R=10^4-10^5$ Dimensões: 20 × 30 cm ²
calibrador	lâmpadas Fe ou Ne ou Ar ou contínuo

5.3.6 Histórico: espectrógrafo Hale

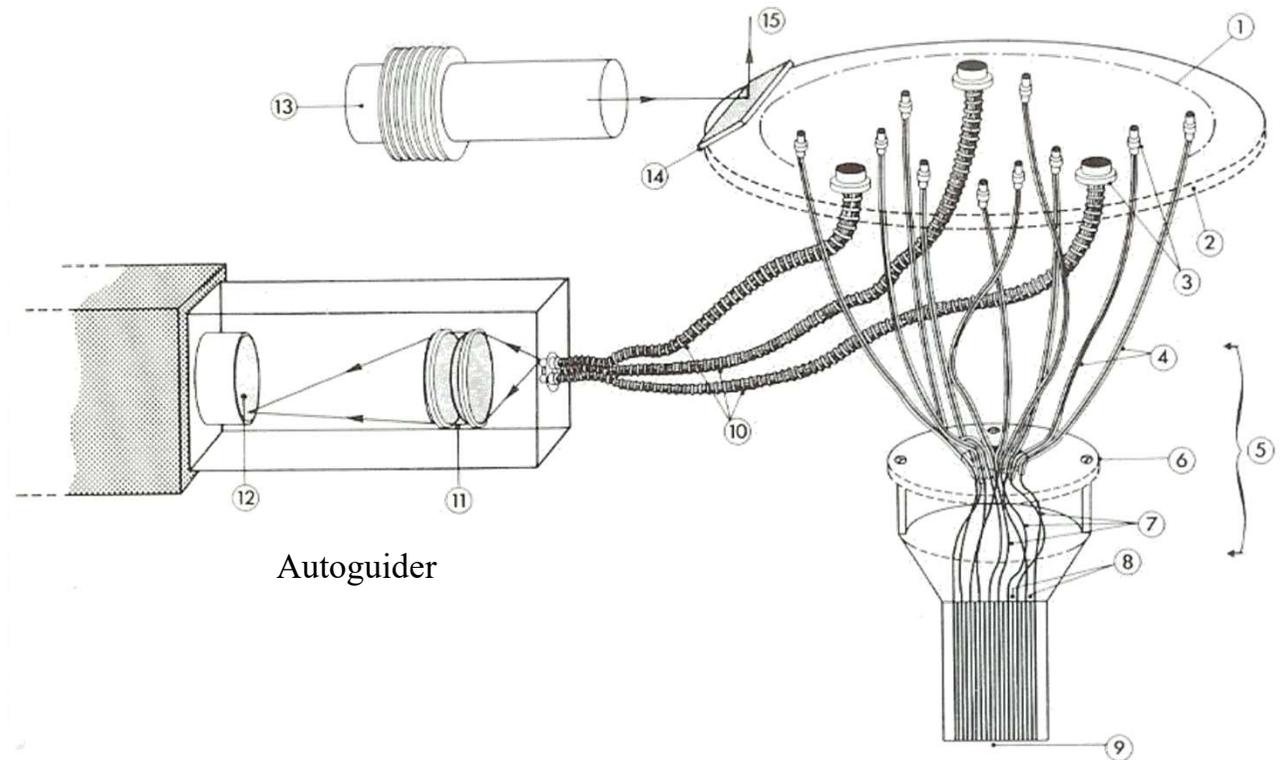
Apenas como um exemplo da época de ouro dos espectrógrafos, mencionamos o espectrógrafo Coudé do telescópio Hale5m (Mt. Palomar).

Espectrógrafo Coudé – Hale

largura da fenda (w)	<100 μ m (<1" no céu)
colimador (espelho principal)	$f_l = 10$ m (beam 30cm)
Quatro redes de difracção (reflectoras)	10000 linhas/mm
	Dimensões (cada): 14 × 18 cm ²

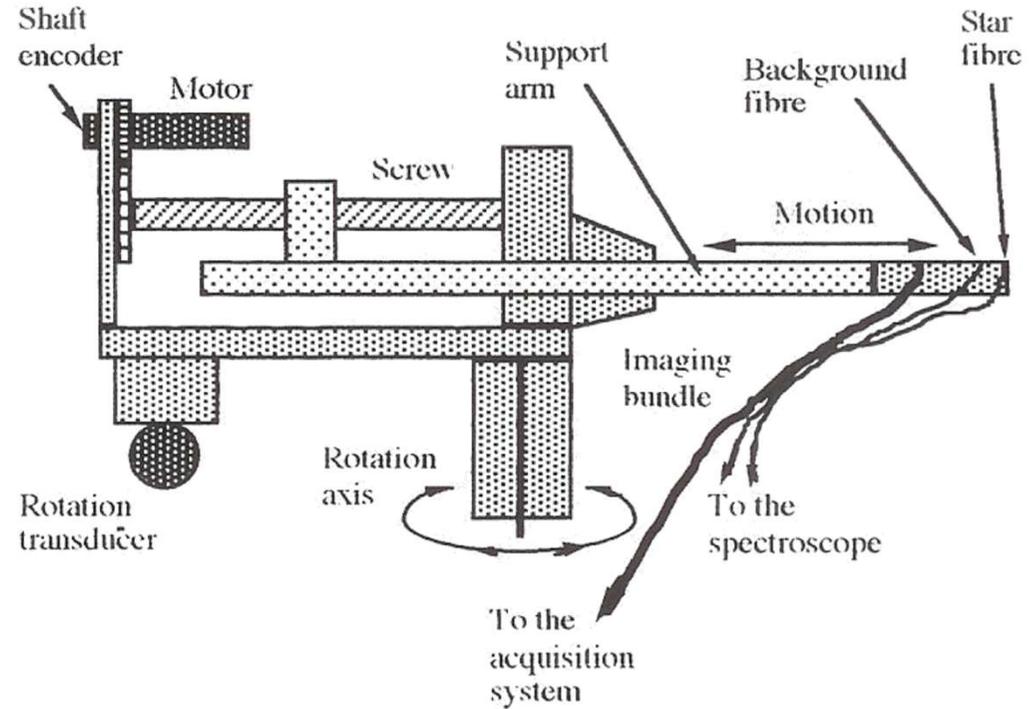
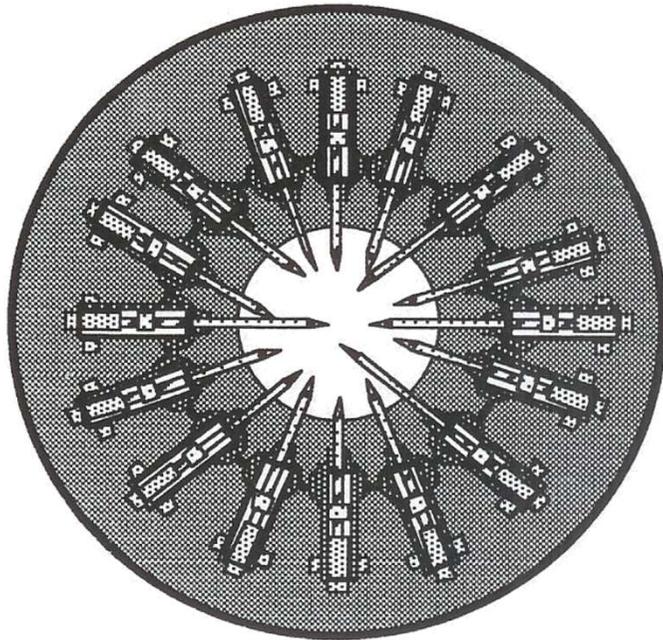
5.4 Multi-espectroscopia

Para a observação do espectro de múltiplos objectos em simultâneo, os sistemas mais antigos usavam uma **máscara** (metálica) específica para cada observação, com buracos correspondentes à posição de cada objecto. **Fibras ópticas** levavam, depois, a radiação de cada objecto até à fenda do espectrógrafo.



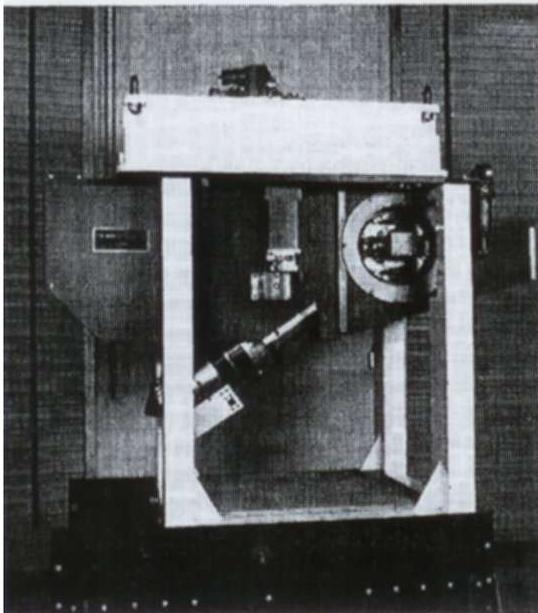
O problema era a necessidade de manufacturar a placa para **cada** observação específica.

Mais recentemente usam-se fibras ópticas (sem necessidade de máscara) em que cada uma leva a luz de um objecto para a fenda do espectrómetro. Deslocam-se por controlo computacional. Um exemplo é o MEFOS (Meudon-ESO Fibre Optics Spectroscopy), com um colimador $f/3$, que permite observar até 30 objectos simultaneamente. O sistema de autoguider recorre a uma das fibras para observar uma estrela brilhante no campo de visão do telescópio.



Na imagem da esquerda apresentam-se apenas 16 das 30 fibras ópticas disponíveis no MEFOS. Na direita apresenta-se o hardware de suporte a cada uma. Notem-se as três fibras: uma para o autoguider, outras para o espectrógrafo (objecto + caracterização do ruído de fundo).

Um outro exemplo mais recente (1993) é o espectrógrafo Norris para o Hale5m. Contém 176 fibras independentes, podendo observar este número de objectos diferentes. Foi a primeira versão **compacta** de um espectrógrafo multi-fibra. Por isso, foi instalado no foco de Cassegrain do telescópio. A seguir apresenta-se uma tabela com mais detalhes técnicos.



Norris

largura de cada fibra (w)

185-290 μ m (1.6-2.5" no céu)

colimador

$f_l = 0.62\text{m}$ (f/4)

redes de difracção
(reflectoras)

158-1200 linhas/mm; R=400-7000
($\lambda=4000-7000\text{\AA}$)

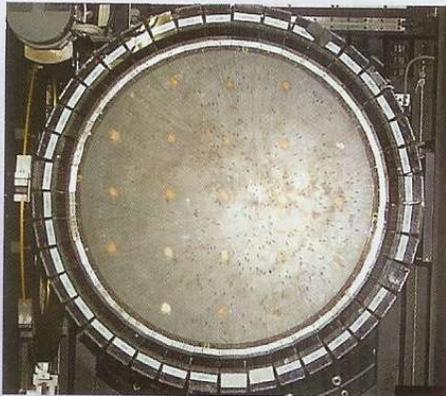
Dimensões: 15 × 20 cm²

calibrador

lâmpadas Hg ou Ne ou Ar ou contínuo

O compacto espectrógrafo multi-fibras Norris.

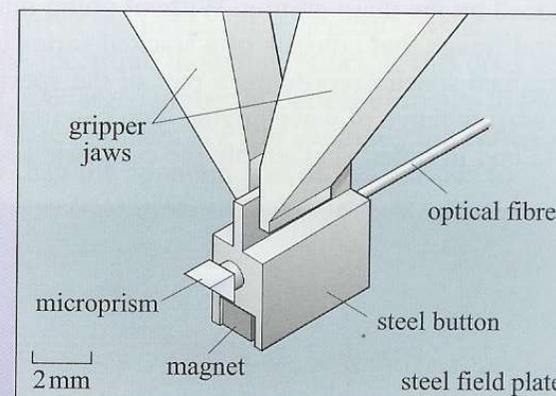
Ainda outro exemplo: o sistema de 400 fibras do espectrómetro 2dF (Two-degree Field) no AAT 3.6m. a) placa completa; b) algumas fibras (notem-se as diferentes posições); c) como funciona cada fibra.



(a)



(b)



(c)

Mas o “último grito” da espectroscopia é a **integral de campo**. Um dos instrumentos precursores foi o COSMIC (Carnegie Observatories Spectroscopic Multislit and Imaging Camera), na altura (1998) ainda chamado de multi-fenda (pode ter até 50 fendas espalhadas pelo campo de visão). O nome actual surgiu poucos anos depois, com o desenvolvimento de verdadeiramente sofisticados espectrómetros integrais de campo. O COSMIC está instalado também no Hale5m (foco principal). Alguns detalhes técnicos seguem.

COSMIC

Dimensões típicas de cada fenda

17" × 1.5" no céu

colimador

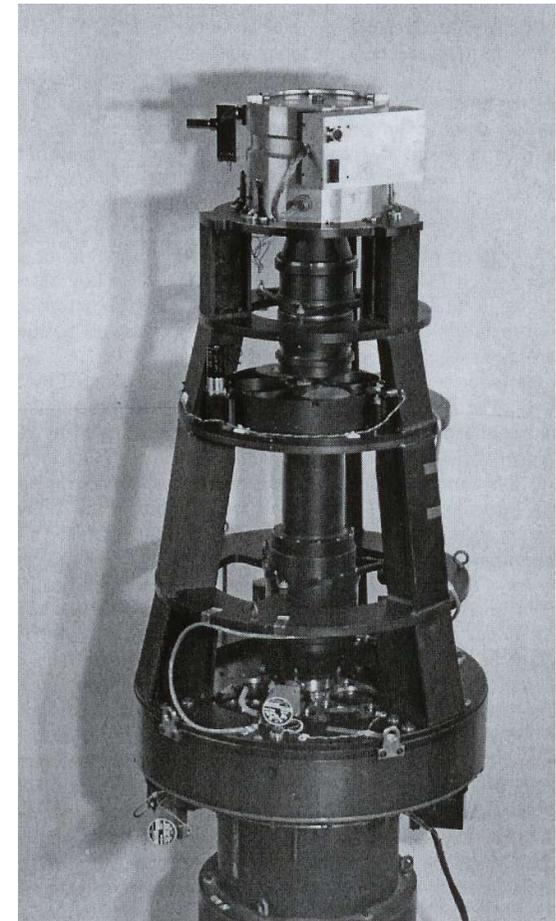
f/3.5; beam 9cm

grisma
(reflector; $\lambda_B = 480/550\text{nm}$)

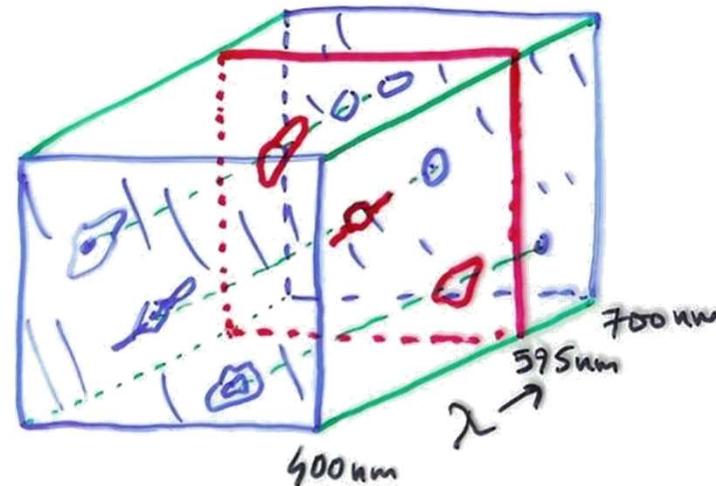
300-600 linhas/mm
($\lambda = 3600-11000\text{\AA}$)

Dimensões: 10 cm (diâmetro)

O COSMIC: a CCD liga em cima (junto com o respectivo sistema criogénico). A forma peculiar do espectrógrafo deve-se à sua instalação no foco principal.



A versão actual de espectroscopia integral de campo (também chamada **espectroscopia 3D**) está tipificada no VIMOS (VIsible Multi-Object Spectrograph), instalado no VLT UT3-Nasmyth. Aliás, todos os actuais telescópios de 8-10m têm espectrómetros 3D. O nome deriva da sua espectacular capacidade de funcionarem como detectores e espectrómetros ao mesmo tempo, construindo imagens 2D e espectros 1D (“profundidade”) em conjunto nos chamados “cubos de dados” (*data cubes*). É como se se obtivesse, de uma vez, informação espectral de muitas fendas encostadas a cobrir toda a imagem.



VIMOS

Multi-object
Integral de campo (cada fibra)
4 braços com 6 grismas cada

~150-750 fendas por braço (7' × 8')
0.33-0.67" no céu (campo ≤ 1' × 1')

R~200-3000
($\lambda=3600-10000\text{\AA}$)

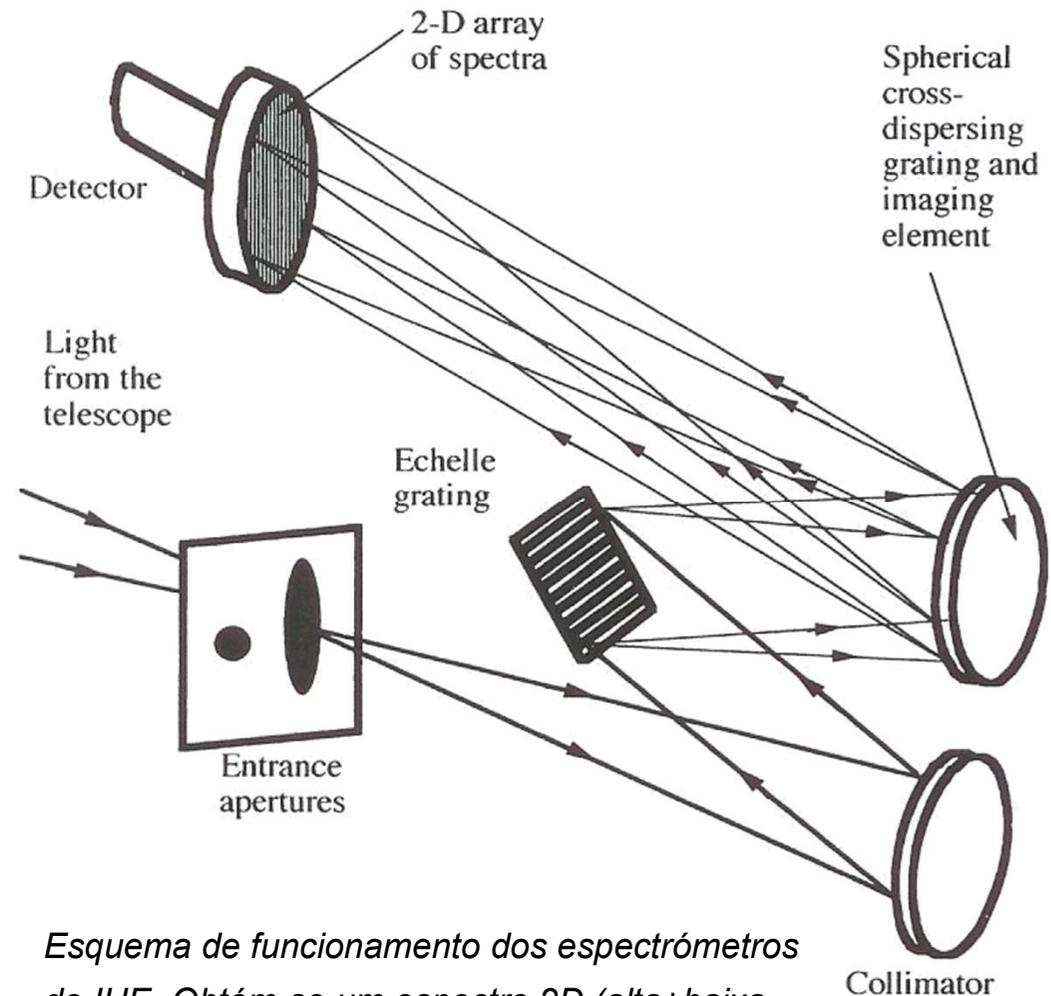
5.5 Espectroscopia não óptica

Técnicas semelhantes ao óptico são utilizadas nos ultra-violeta (UV) e infra-vermelhos (IV). Apenas para o caso do sub-mm, rádio, raios X e raios γ as técnicas de espectroscopia são bem diferentes.

5.5.1 UV

Essencialmente idênticos aos espectrómetros ópticos, os de UV limitam-se a estar acoplados a telescópios sensíveis a esta gama de radiação. Claro que há umas pequenas alterações a fazer tais como mudar a gama de comprimentos de onda de operação (e eficiência máxima) do espectrómetro.

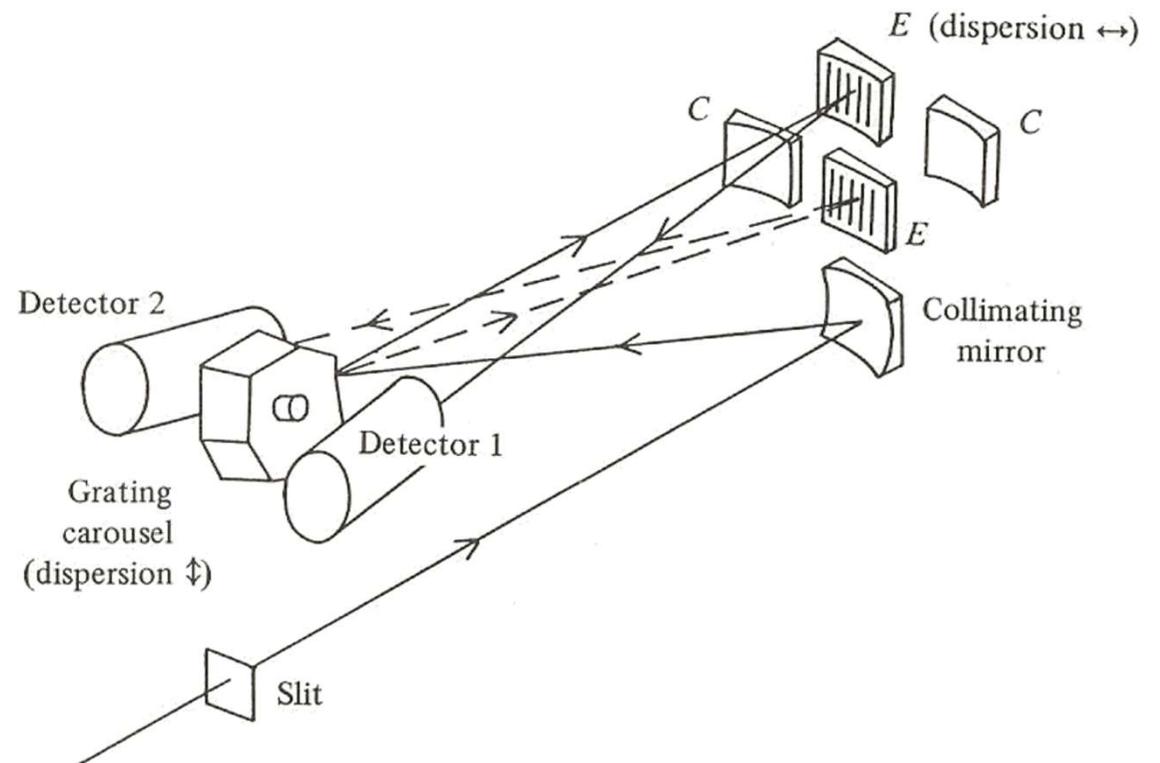
Por exemplo, no caso do IUE existiam dois espectrómetros no foco de Cassegrain, um cobrindo 115-195nm (SW-short wavelength) e o outro 190-320nm (LW-long wavelength). Cada um utilizou uma rede de difracção Echelle e outra esférica (servindo, neste último caso, de espelho final, antes do detector).



Esquema de funcionamento dos espectrómetros do IUE. Obtém-se um espectro 2D (alta+baixa resolução) devido às duas redes de difracção.

IUE

“fendas”	Círculo de 0.1mm diâmetro (3" no céu) Elipse 0.33 × 0.66mm (10"×20" no céu)
Colimador	$f_1 = 1.89\text{m}$
redes de difracção (quatro)	SW Echelle: 102 linhas/mm; R=12000 SW rede esférica: 313 linhas/mm; R=250 LW Echelle: 63 linhas/mm; R=13000 LW rede esférica: 200 linhas/mm; R=300



Outro exemplo é o Goddard High Resolution Spectroscope (GHRS) que funcionou no HST ($\lambda=110\text{-}320\text{nm}$).

GHRs

largura da fenda (w)

72/560 μ m (0.22"/1.74" no céu)

Colimador

f/23

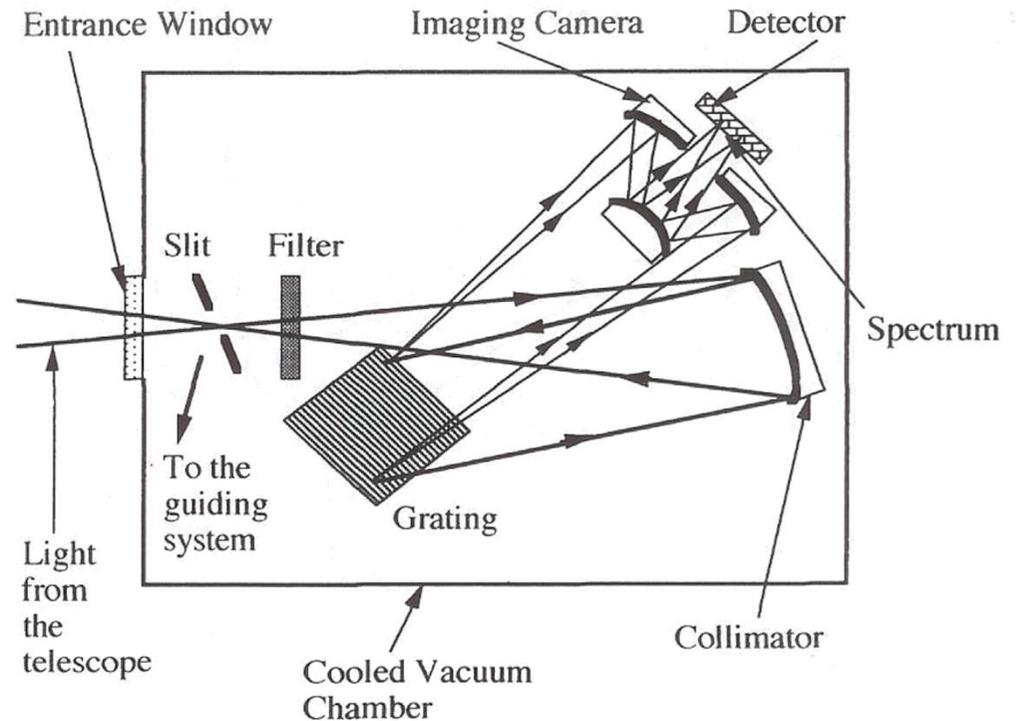
redes de difracção
(seis)

Echelle: 316 linhas/mm; R=80000
duas redes côncavas: 86/195 linhas/mm
quatro convencionais: 600-6000 linhas/mm
R=2000-25000

5.5.2 IV

Também essencialmente idênticos aos espectrómetros ópticos; desta vez, entre as pequenas alterações contam-se a alteração da gama de operação e o **arrefecimento** do espectrómetro de forma a reduzir o imenso ruído de fundo térmico.

Apresenta-se como exemplo o detector IRSPEC do ESO3.6m (que foi mais tarde transferido para o NTT3.5m). Era convencional mas estava numa caixa com vácuo e arrefecida a 80K graças a azoto líquido. O espectrómetro em si estava ainda mais arrefecido (50K) graças a azoto sólido.



IRSPEC

largura de cada fibra (w)

0.8mm (6" no céu)

colimador

f/7.4

redes de difracção várias
(reflectoras)

R=1000-2500 ($\lambda=1-5\mu\text{m}$)

Dimensões: 12 × 15 cm²

calibrador

lâmpadas Ne ou Kr

É no IV que os **espectrómetros de Fourier** têm as suas maiores aplicações. Isto porque podem ser aí competitivos em resolução com os de rede de difracção, chegando a $R \sim 10^6$. Um exemplo é o espectrómetro de Fourier do Canada-France-Hawaii Telescope (CFHT) de 3.6m de diâmetro, o Fourier Transform Spectrometer (FTS). É utilizado no foco de Cassegrain.

FTS

Duas íris

No céu: $\leq 24''$ (52" de separação)

Três braços

0.4-1.1 μm

0.9-2.5 μm

2.5-5.5 μm



5.5.3 Rádio/sub-mm

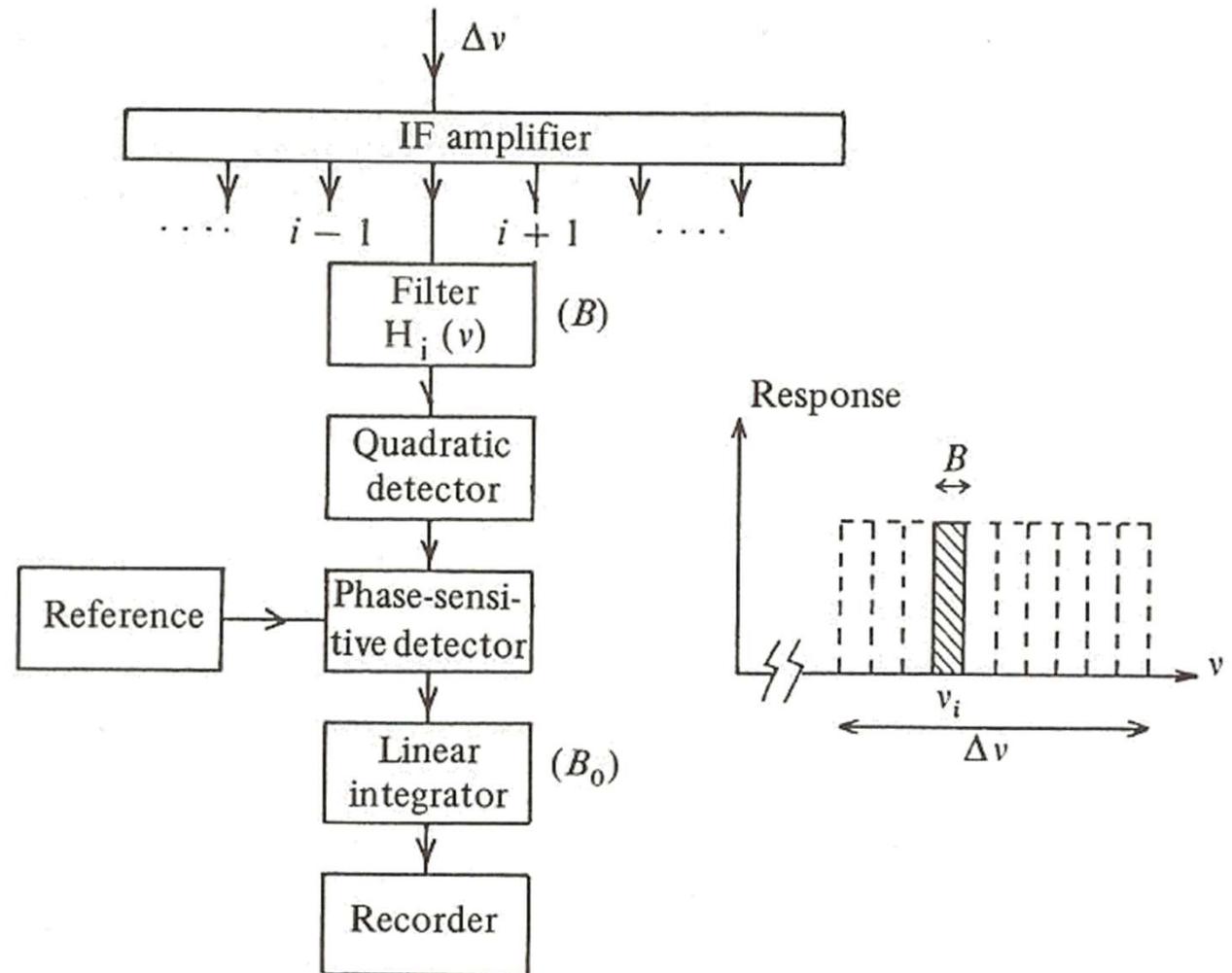
Até aqui (óptico, UV, IV) virtualmente todos os espectrómetros de que se falou são de tipo “interferométrico”, mesmo que utilizando variados processos para causar a interferência de radiação e, conseqüentemente, formar o espectro.

Para as bandas rádio e sub-mm (e, ainda, no IV mais longínquo), contudo, utiliza-se um outro tipo de espectrómetro: o **heterodinâmico**. Este tipo de espectrómetro não interfere a onda incidente consigo mesma mas sim com uma onda produzida por um oscilador local cuja frequência se controla. O sinal obtido resulta da “diferença de frequência” e, tendo baixa frequência, pode ser processado por filtros electrónicos; são estes que vão definir a resolução espectral.

A) Espectrómetros de canais múltiplos (multichannel) – rádio

Este é o tipo mais comum de espectrómetro usado no rádio. A diferença para a simples detecção e mapear no “contínuo” está na colocação não de apenas uma saída de pós-deteção para o conjunto de IFs (intermediate frequencies) mas de **várias saídas (canais)** para cada IF (em paralelo).

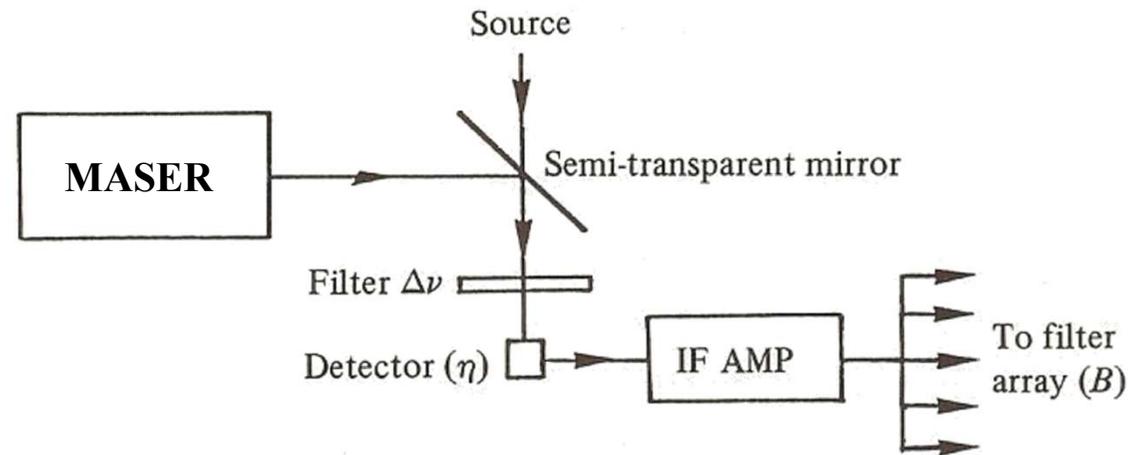
À saída de cada IF (aqui só se representa um) usa-se um filtro estreito de largura B que é a mesma para todos os canais (em número total de N). A frequência central ν_i ($i=1, \dots, N$) de cada um é diferente mas de forma a que todos fiquem adjacentes e $\Delta\nu = NB$. A calibração espectral faz-se com uma fonte local "reference". Um filtro final (B_0) reduz o ruído pois $T = T_S(B_0/B)^{1/2}$ com T_S a temperatura do sistema.



B) Espectrômetros para o sub-mm

Faz-se também espectroscopia **heterodinâmica** no sub-mm onde a única dificuldade está no oscilador local: arranjar um que não seja ruidoso e que funcione de forma eficiente para a espectroscopia de sub-mm.

O funcionamento de um espectrômetro heterodinâmico no sub-mm. Como oscilador local é utilizado um maser molecular (e.g. CH_3OH , $^{14}\text{CO}_2$, etc.).



5.5.4 Altas energias (raios X e raios γ)

Como no caso anterior (rádio/sub-mm), também nos raios X (0.1–10keV; 0.3–30Å) e raios γ se utilizam espectrômetros diferentes. Desta vez não são nem de “interferência” (como os do óptico, IV, UV) nem “heterodinâmicos” (rádio/sub-mm). O problema principal é a **fraqueza** das fontes nestes comprimentos de onda ($\sim 10^{-3}$ fótons/cm²/s/keV). Ainda pior quando se tratam de espectros: é fundamental uma enorme área colectora.

Até há um par de décadas os que dominavam nos primeiros satélites de raios X e raios γ eram ainda espectrômetros de interferência como os de **Cristal de Bragg**. Por razões históricas, vale a pena falar um pouco nestes em primeiro lugar.

A) Cristal de Bragg (raios X)

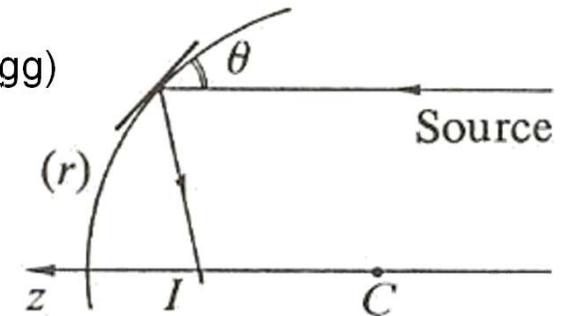
Usa-se um cristal **côncavo** cuja estrutura tem um espaçamento d entre moléculas. A difracção (originada por uma reflexão segundo a Lei de Bragg) surge para um ângulo de incidência θ dado por:

$$\text{sen } \theta = \lambda / 2d$$

A resolução espectral é dada por:

$$R = E / \Delta E = r / (2 \text{ sen } \theta \Delta z)$$

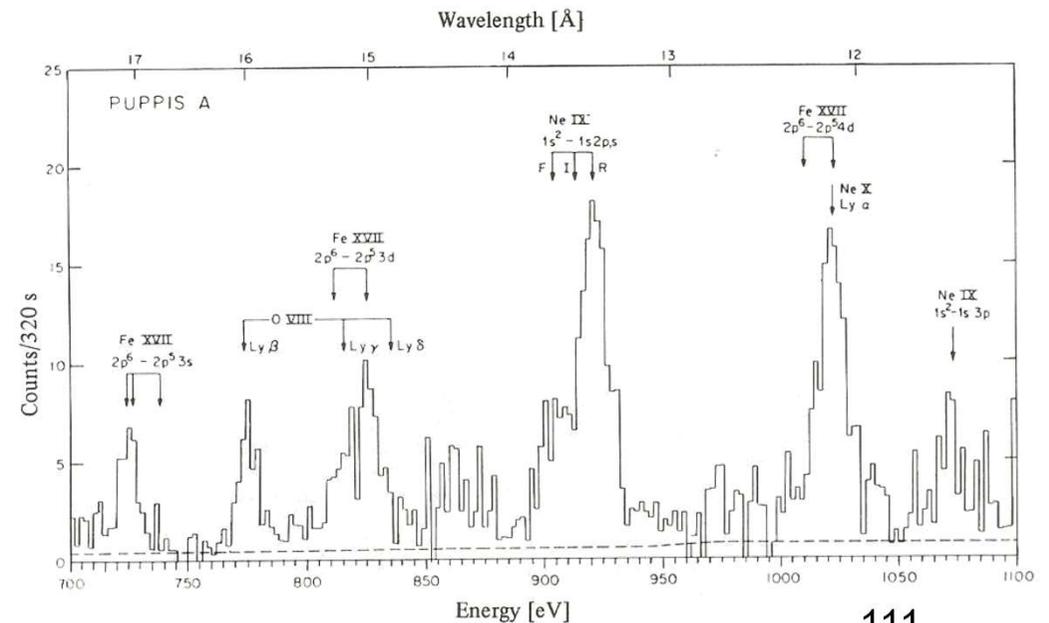
onde r é o raio de curvatura do cristal e Δz a resolução linear da dispersão, que acontece em IC na Figura, sendo C o centro de curvatura do cristal; θ é o ângulo de incidência, consoante a orientação do plano de reflexão no cristal em relação ao fóton incidente.



Por exemplo, um cristal de fluoreto de lítio (LiF; $d=2.01\text{\AA}$) dá uma resolução $R \sim 1000$ mas só para energias elevadas (hard X-ray).

Para baixas energias (soft X-ray: $<0.4\text{keV}$) 50-100 é mais típico (outros cristais).

Um bom exemplo da utilização do cristal de Bragg foi o satélite Einstein. Conseguiu $\Delta E=2\text{eV}$, ou seja, $R \sim 350-550$ na gama de funcionamento ($E=0.7-1.1\text{ keV}$).

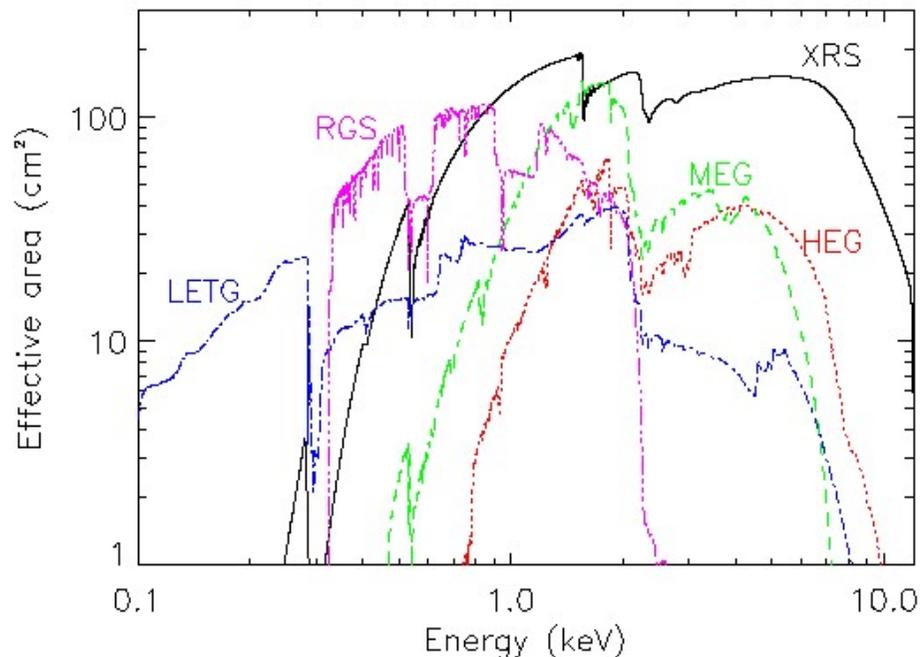


B) Contadores proporcionais (em gás)

Têm baixa resolução, especialmente nos “soft X-ray”: $R \lesssim 10$. Repare-se que, formalmente, tão baixo valor corresponde, de facto, a fotometria da mais larga banda... Por isso, os contadores proporcionais serão tratados como detectores (cadeira de Telescópios e Detectores) e não como espectrómetros.

C) Redes de difracção

Pensadas como de impossível utilização até ao desenvolvimento do Chandra e do XMM-Newton, as redes de difracção **especializadas** para altas energias revolucionaram a espectroscopia nesta região do espectro electromagnético pois chegam a $R > 200$ em **toda** a banda dos raios X (“soft” e “hard”). Ainda antes destas, intermédias entre elas e os contadores proporcionais, CCDs especiais (como as utilizadas no ASCA) funcionaram como espectrómetros de raios X de baixa resolução ($E/\Delta E \sim 100$).

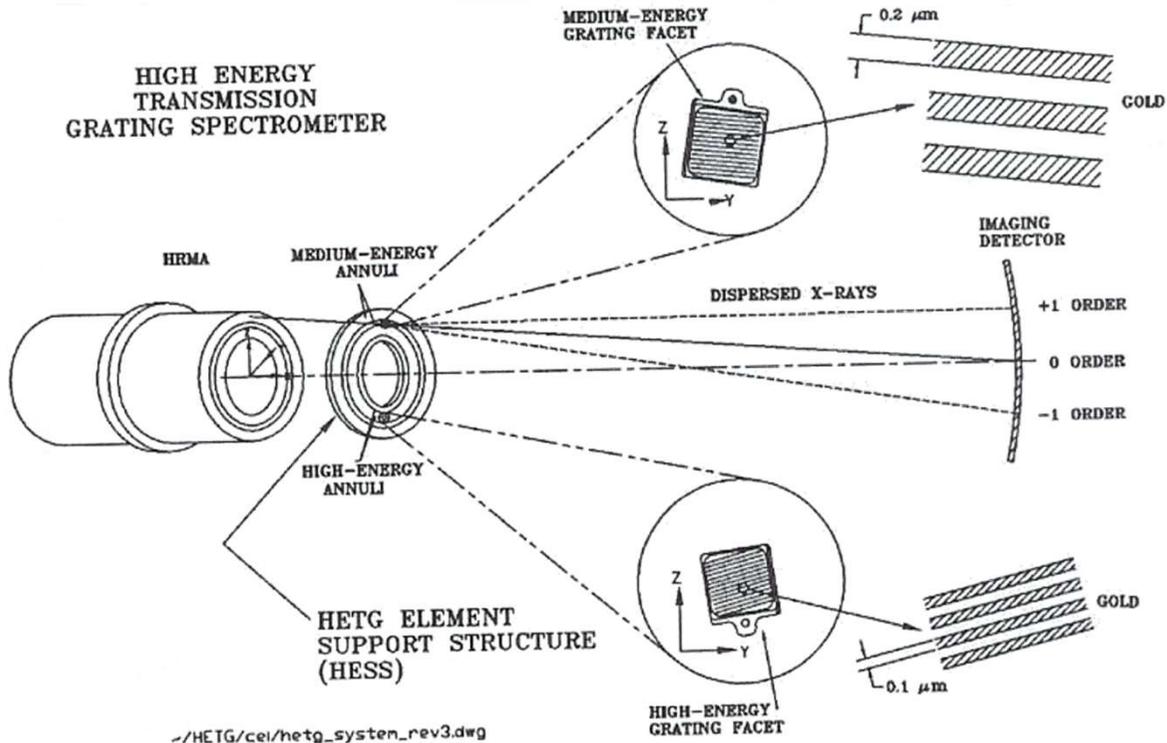
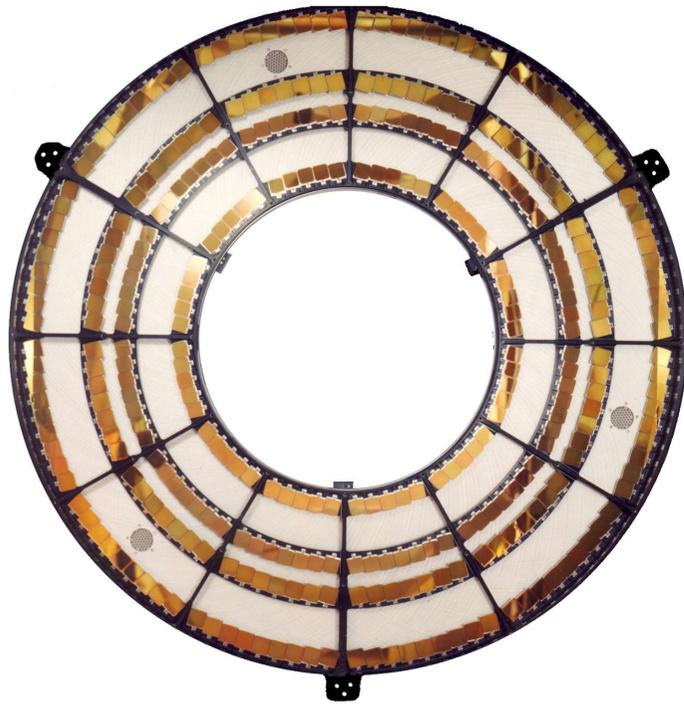


A área efectiva do XMM-Newton (RGS), do Chandra (HETG – MEG e HEG; LETG) e do Suzaku (XRS - proposto). Todas dependem da energia (além do modo espectral).

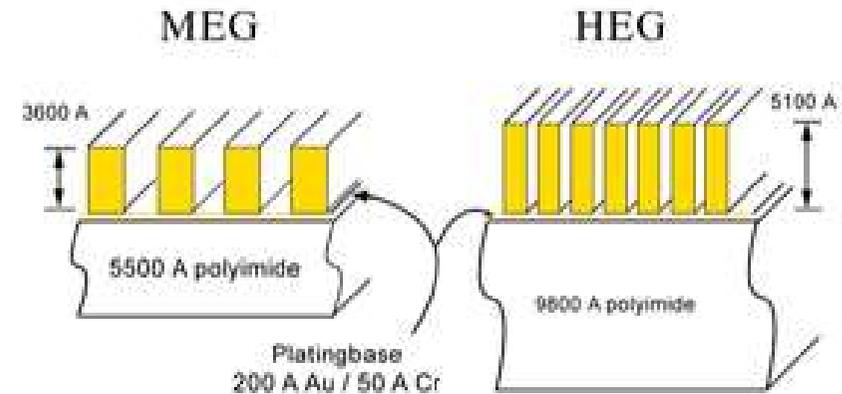
C1) Chandra

No caso do Chandra as redes são de **transmissão** e feitas de ouro. O espectrómetro principal é o High Energy Transmission Grating Spectrometer (HETGS). Existe também o Low Energy Transmission Grating Spectrometer (LETGS), que inclui o UV longínquo na sua gama de detecção.

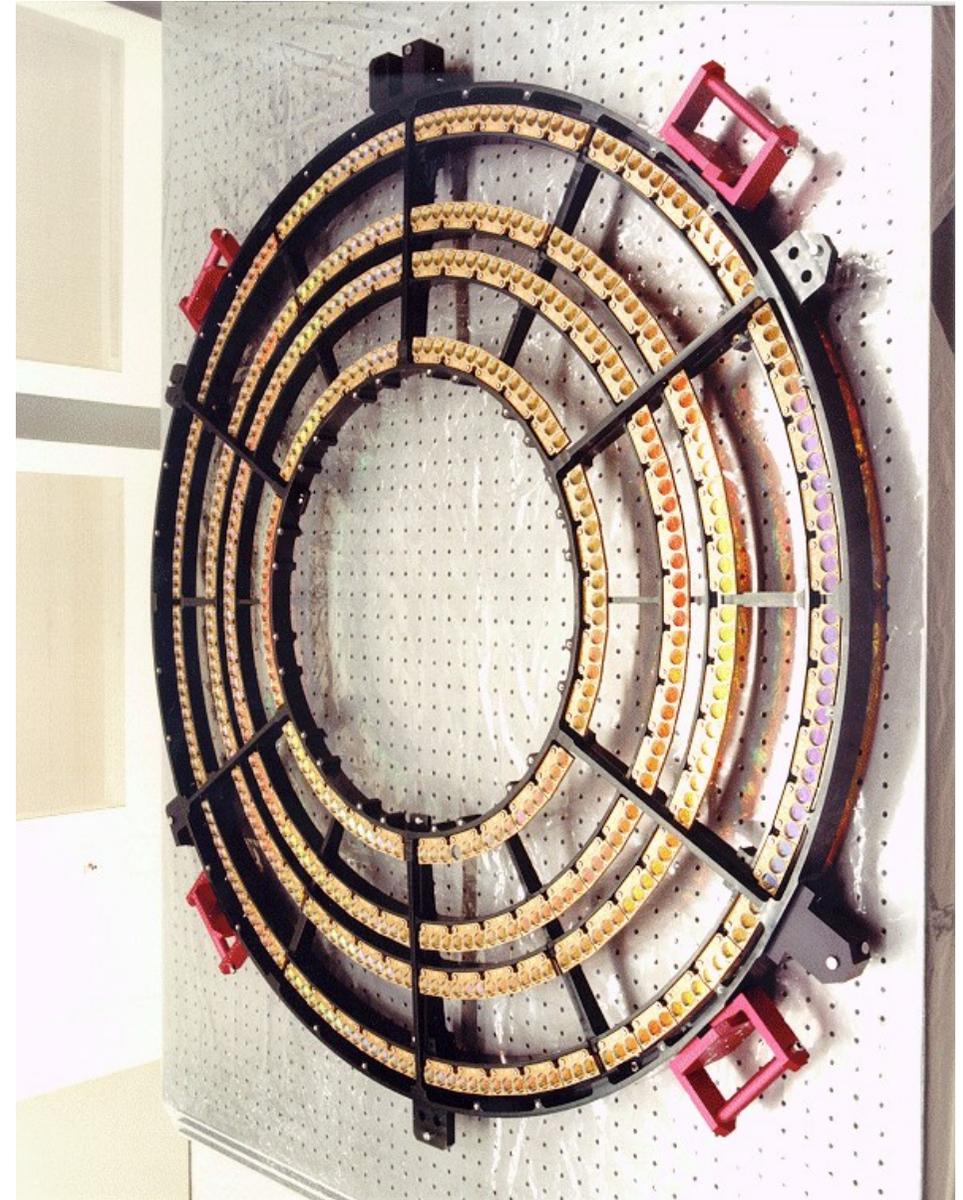
HETGS	
fenda	não há ("slitless": espectrómetro-objectiva)
colimador	não há
336 redes de difracção (transmissão)	5000/10000 linhas/mm R=60-2000 ($\lambda=1.2-30\text{\AA}$; E=0.4-10keV)
LETGS	
fenda	não há ("slitless": espectrómetro-objectiva)
colimador	não há
540 redes de difracção (transmissão)	2500 linhas/mm R=120-3600 ($\lambda=6-160\text{\AA}$; E=80eV-2keV)



O HETGS (em cima visto de frente) é composto por quatro anéis com 336 redes de dispersão feitas de ouro “em barras”. Os dois anéis interiores correspondem ao HEG (high energy grating) enquanto os dois exteriores correspondem ao MEG (medium energy grating). À direita apresentam-se as características das redes de difracção para cada um. Em cima e à direita vê-se o esboço geral do HETGS, incluindo a sua separação em MEG/HEG e a óptica.



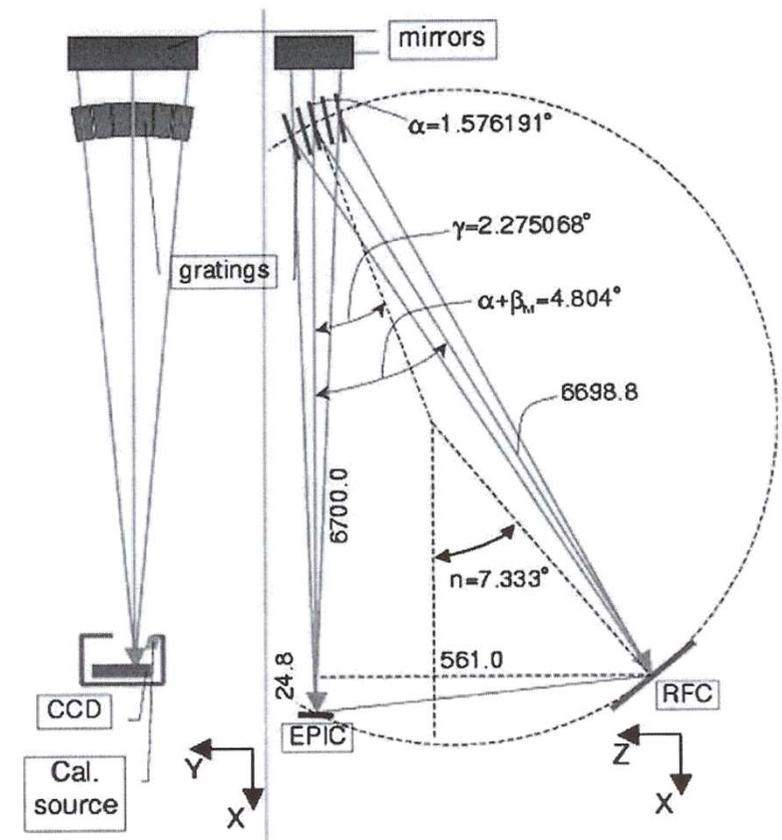
O LETGS (540 redes de difracção) é semelhante ao HETGS em geometria e em funcionamento. As suas redes de difracção também funcionam no visível, como se vê pelo seu colorido na foto ao lado.

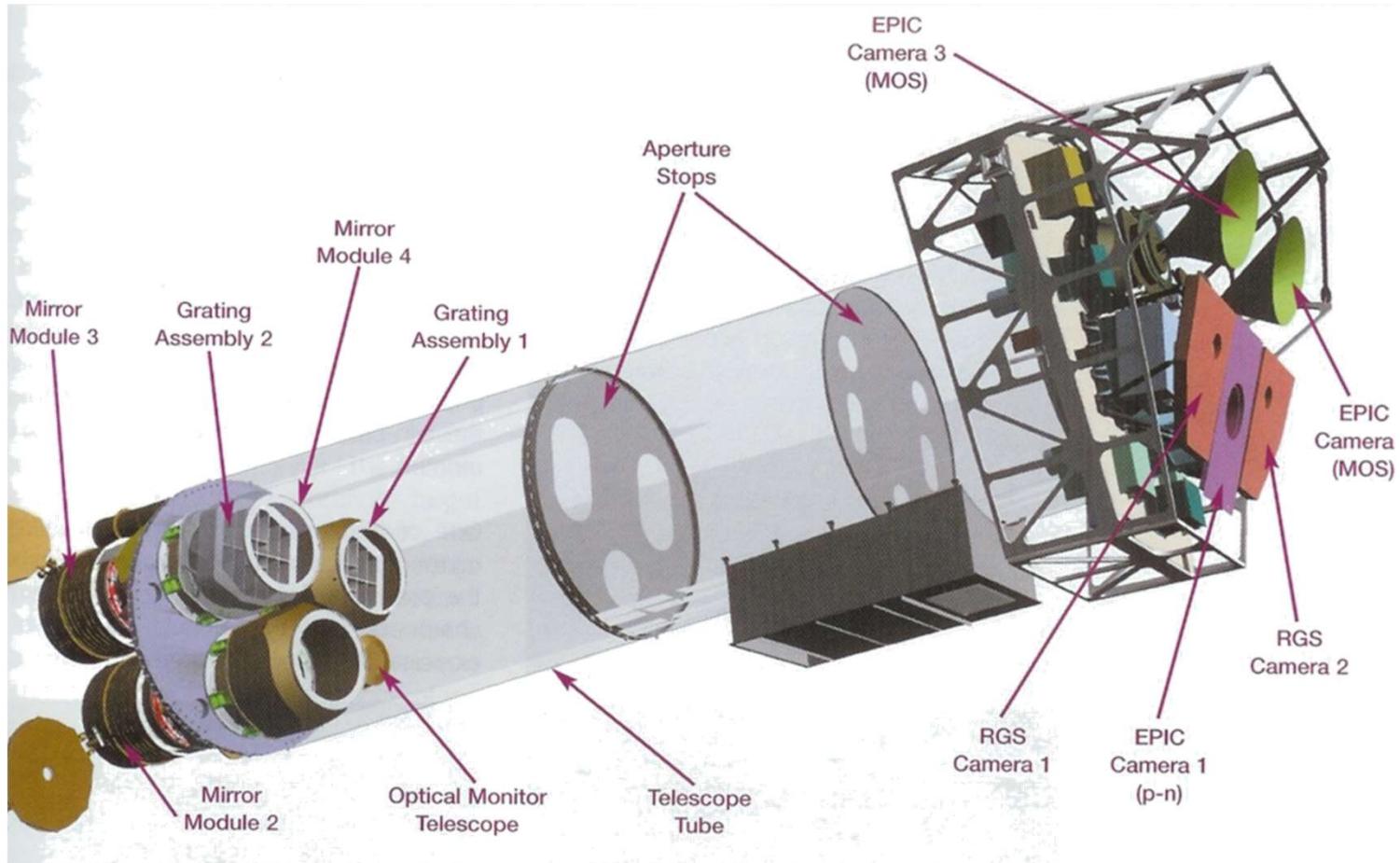


C2) XMM-Newton

No caso do XMM-Newton as redes são de **reflexão**, por isso bem mais revolucionárias (nem tal se pensava possível). Essas redes organizam-se em conjunto dispostas numa circunferência – a incidência dos raios X é feita em ângulos muito pequenos (11.5° ; ainda menos que nos espectrómetros Echelle). Os espectrómetros chamam-se Reflection Grating Spectrometers (RGS).

RGS	
fenda	Máscaras de abertura
colimador	não há
redes de difracção (reflexão)	646 linhas/mm (média: $n=1,2$) $R=80-1200$ ($\lambda=5-38\text{\AA}$; $E=0.3-2.4\text{keV}$)
Calibrador (de fluorescência, junto ao detector)	lâmpadas F ou Al

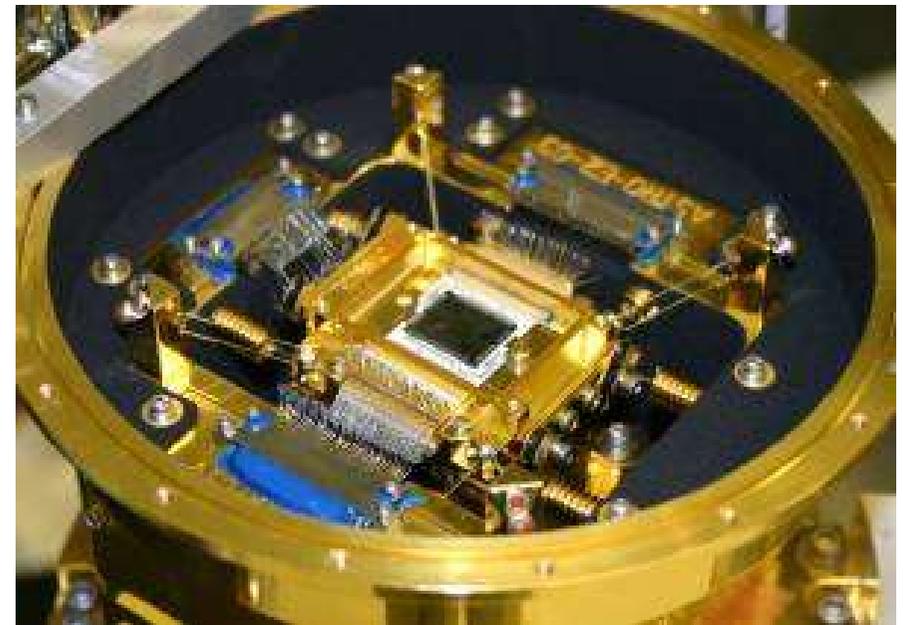




O XMM-Newton: os fótons entram pela esquerda.

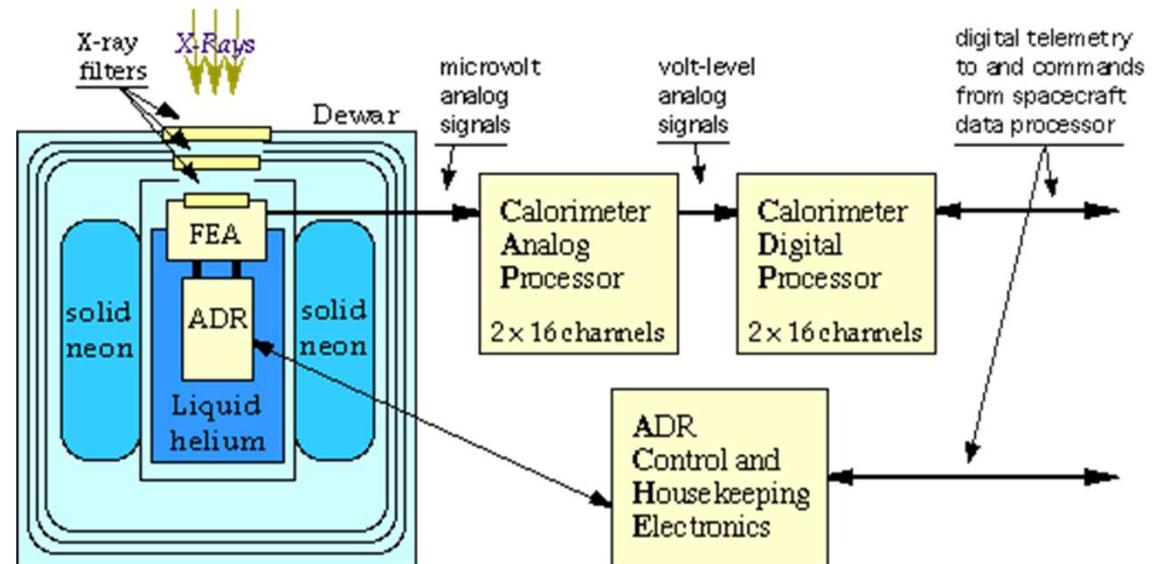
D) Micro-calorímetros

O “state-of-the-art” para a espectroscopia de raios X são micro-calorímetros como os do satélite Suzaku (ex-AstroE2), lançado em Julho de 2005. Era um aparelho criogénico com uma excelente resolução ($\Delta E \sim 6\text{eV} \Rightarrow R = E / \Delta E = 30\text{-}1650$; $E \approx 0.2\text{-}10\text{keV}$). Infelizmente nunca chegou a funcionar, pois falhou logo a seguir ao lançamento para órbita. Chamava-se X-Ray Spectrometer 2 (XRS-2).



O princípio de detecção de fótons de raios X em micro-calorímetros é pela monitorização da temperatura num pequeníssimo “chip” de silício (arrefecido a 60mK com recurso a hélio líquido e néon sólido).

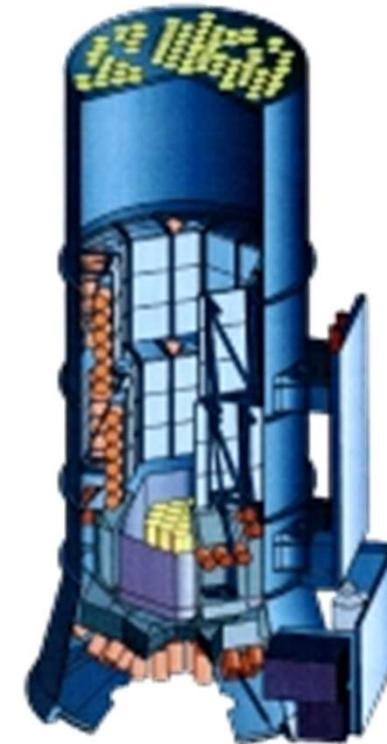
FEA – Front End Assembly é um mosaico de 32 detectores. A criogenia é assegurada pelo ADR – Adiabatic Demagnetization Refrigerator.



E) Raios γ

O exemplo mais recente de espectroscopia nos raios gama é aquela feita no Integral. O instrumento chama-se SPI (SPectrometer on Integral), tem 1.7m de comprimento e uma massa de 1.3 toneladas.

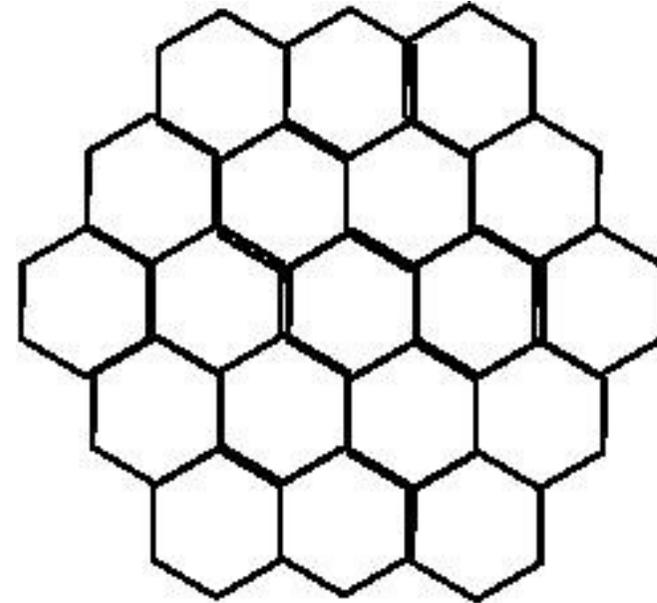
SPI	
fenda	não há ("slitless": espectrómetro-objectiva)
colimador	não há
Espectroscopia por máscara (área efectiva: 500cm ²)	R=9-3400 (R=600 a 1.3MeV) $\lambda=0.0015-0.6\text{\AA}$; E=0.02-8MeV



Como é comum para tão altas energias, o espectrómetro tem apenas uma máscara de entrada e depois um conjunto de detectores (19 hexagonais) de germânio arrefecidos a 85K. A máscara permite uma resolução de 2.5° e um campo de visão de 16°.



A máscara na entrada do telescópio é composta de tungsténio (3cm de espessura) em 127 segmentos hexagonais, 63 opacos e 64 transparentes.



O conjunto dos 19 detectores hexagonais (esquema).

O isolamento/escudamento é feito, na parte de baixo e por todo o lado, por um conjunto de cristais de óxido de bismuto germanado.

5.6 Sumário

Em resumo, as resoluções espectrais típicas (R) em todas as bandas do espectro electromagnético (para os casos estudados) são dados na Tabela seguinte.

Spectrometer	Region	Typical Resolution
Interference filter	Visible, IR	10^2-10^3
Grating	IR, visible, UV	10^3-10^6
Bragg crystal	X-ray	10^3
Fabry-Pérot	Visible, IR	10^4-10^6
Fourier transform	Visible, IR	10^4-10^6
Heterodyne	Radiofrequencies	$> 10^6$
	IR, submillimetric	$> 10^5$
Bolometer	X	10^3-10^4
Energy measurement	Gamma ray	10^2-10^3