



# Atomová spektrometrie - optika

Vítězslav Otruba

# Optika

```
graph TD; A[Optika] --- B[Geometrická optika  
Pracuje s čistě geometrickými představami  
Zanedbává vlnovou a kvantovou povahu světla]; A --- C[Vlnová optika  
Elektromagnetická teorie světla  
Světlo se šíří pomocí elektromagnetických vln]; A --- D[Kvantová optika  
Uvažuje kvantovou povahu záření  
Světlo je vyzařováno po kvantech (fotonech)];
```

**Geometrická optika**  
Pracuje s čistě geometrickými představami  
Zanedbává vlnovou a kvantovou povahu světla

**Vlnová optika**  
Elektromagnetická teorie světla  
Světlo se šíří pomocí elektromagnetických vln

**Kvantová optika**  
Uvažuje kvantovou povahu záření  
Světlo je vyzařováno po kvantech (fotonech)



# Geometrická optika

# Základní předpoklady geometrické optiky

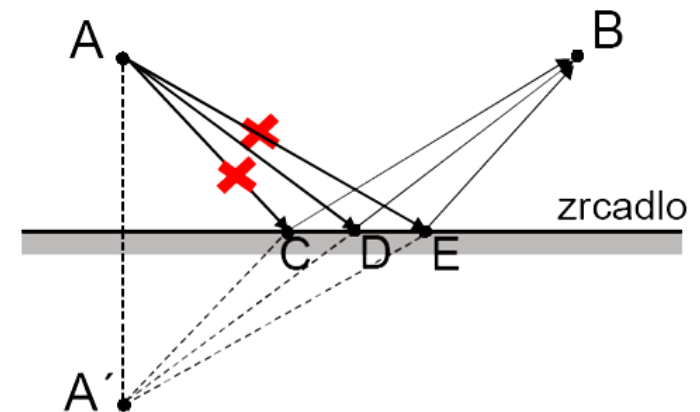
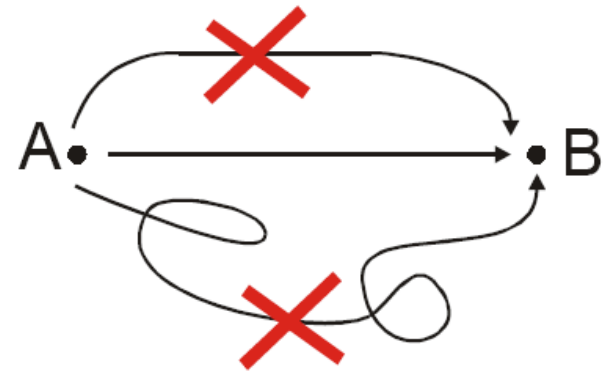
- V homogenním izotropním prostředí se světlo šíří přímočaře
- Světlo se šíří nezávisle na tom, zda prostorem prochází i jiné světlo (jedním bodem může procházet nekonečně mnoho paprsků aniž by se ovlivňovaly)
- Na rozhraní dvou prostředí se světlo odráží pod tímž úhlem, pod kterým dopadá
- Při průchodu do jiného prostředí se světelné paprsky lámou podle Snellova zákona lomu ( $n = \sin\alpha / \sin\beta$ )
- Chod paprsků je záměnný a každý paprsek může svou cestu proběhnout i opačně

# Definice světelného paprsku

- Nejjednodušší představa – světlo se šíří ze zdroje podél přímek (paprsky) Fermatův princip (1679): v opticky stejnorodém prostředí se světlo šíří přímočaře, tj. mezi dvěma danými body po nejkratší dráze (v nehomogenním prostředí se šíří od bodu k bodu s různým indexem lomu).
- Paprsek světla: je dráha, podél níž je v daném optickém systému přenášena světelná energie od jednoho bodu k druhému.

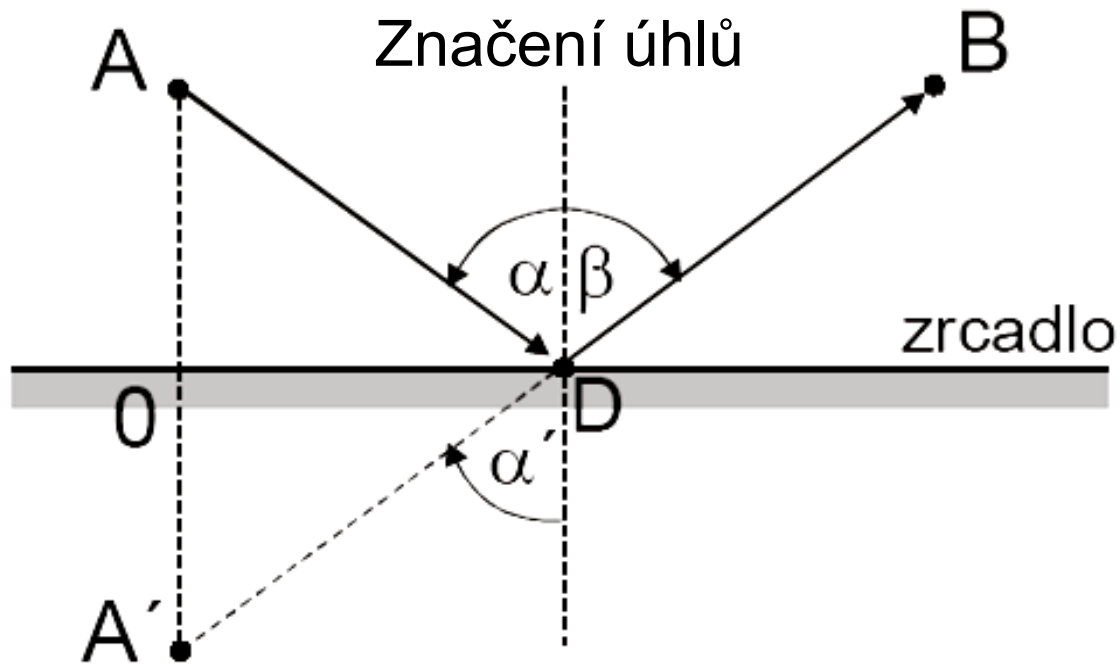
# Zákon odrazu

- Podle Fermatova principu se světlo šíří po nejkratší dráze
- Užitím tohoto předpokladu porovnáme 3 možné dráhy paprsku odrážející se od zrcadlové plochy
- Porovnáním trojúhelníků je nejkratší cesta mezi body A a B při jednom odrazu od zrcadlové plochy přes bod D, který je uprostřed bodů A a B.



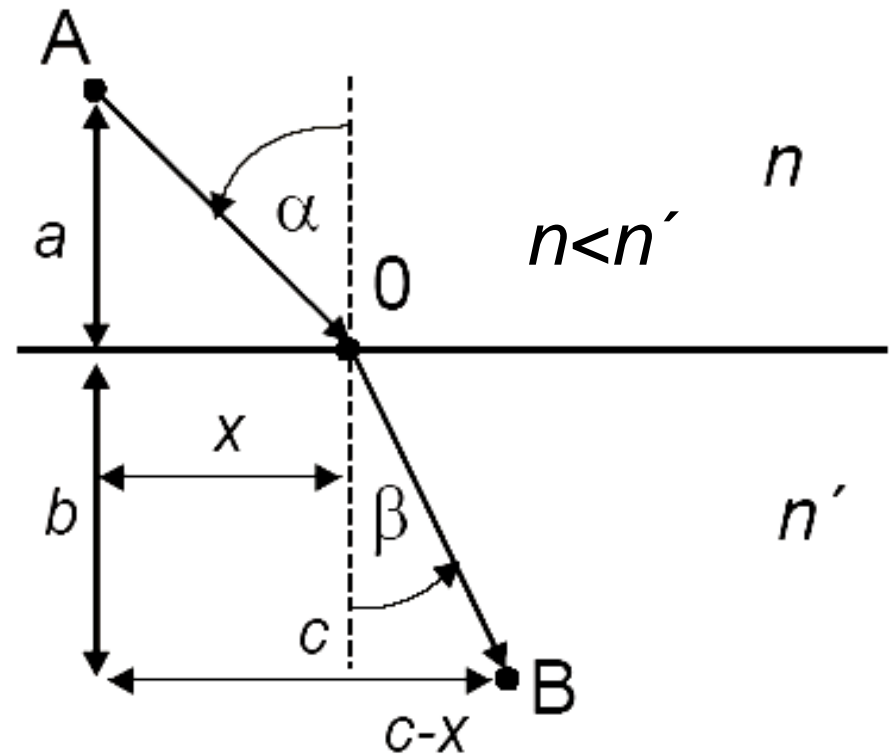
# Zákon odrazu

- Je-li světlo odráženo od povrchu, rovná se úhel odrazu úhlu dopadu,  $\alpha = \beta$



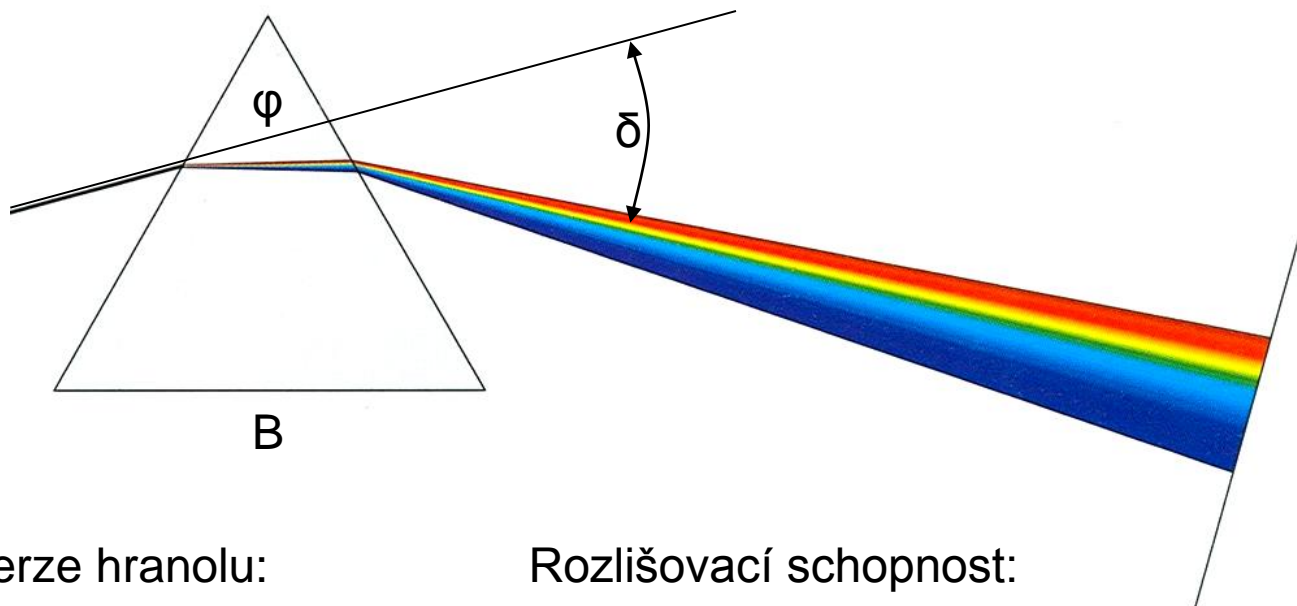
# Zákon lomu světla (Snellův zákon)

- Dvě prostředí s různými indexy lomu  $n$  a  $n'$ , oddělená rozhraním (světlo se v prostředích šíří různou rychlostí  $v=c/n$  a  $v'=c/n'$ ). Z Fermantova principu je možné odvodit, že  $\sin\alpha/v = \sin\beta/v'$  a Snellův zákon  **$n\sin\alpha = n'\sin\beta$**





# Rozklad světla hranolem



Disperze hranolu:

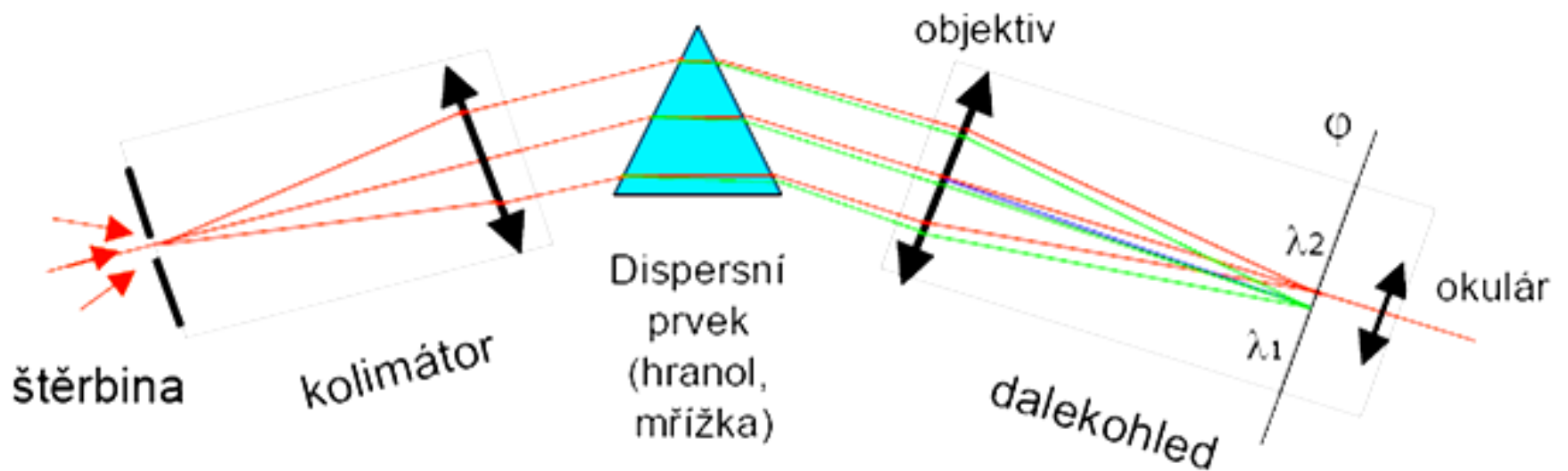
$$\frac{\Delta\delta}{\Delta\lambda} = \frac{2 \sin \frac{\varphi}{2}}{\sqrt{1 - n^2 \sin^2 \frac{\varphi}{2}}} \frac{\Delta n}{\Delta\lambda}$$

Rozlišovací schopnost:

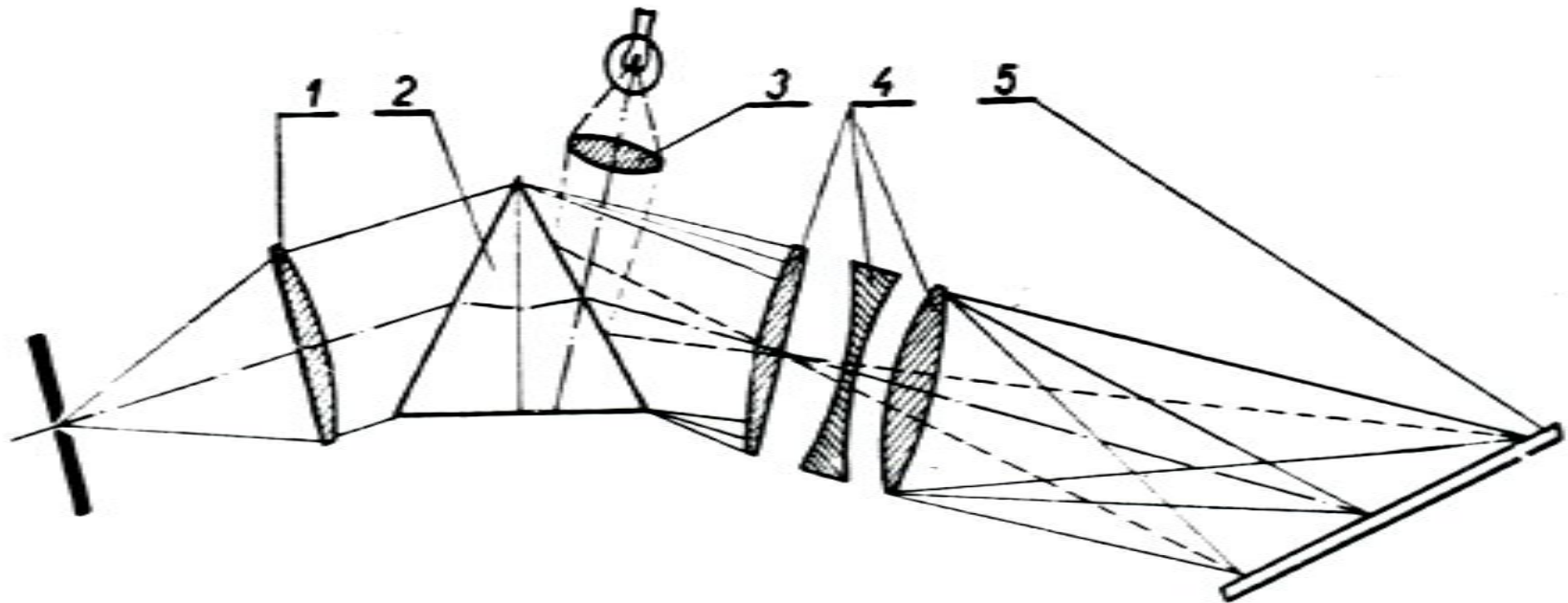
$$R = B \frac{\Delta n}{\Delta\lambda}$$

Př.:  $R = 4200$   
Pro flintové sklo,  
 $B = 100\text{mm}$   
 $\lambda = 400\text{ nm}$   
 $\varphi = 60^\circ$

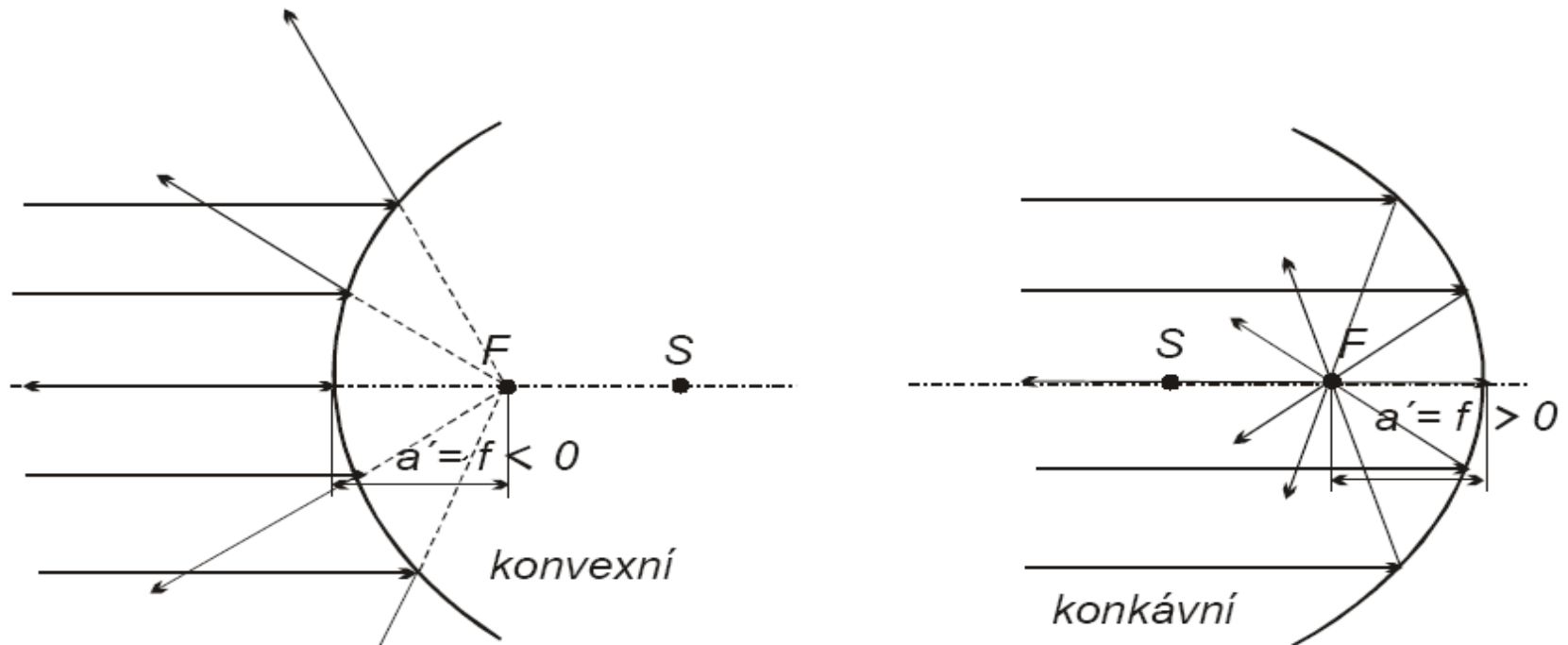
# Hranolový spektroskop



# Spektrograf Q 24 (Carl Zeiss Jena)



# Odraz na kulové ploše

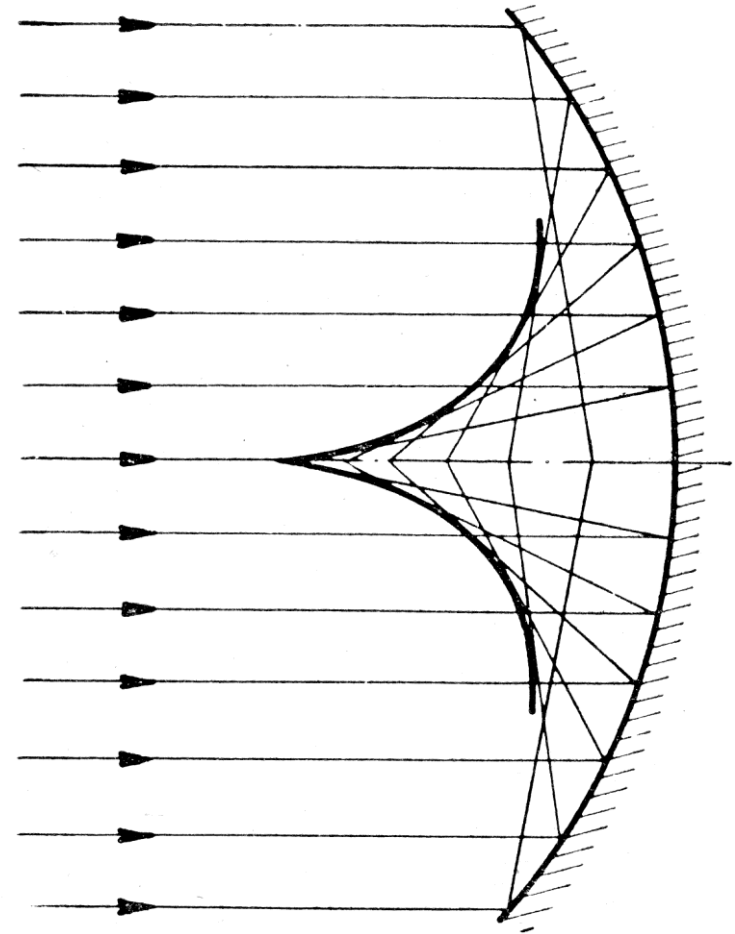


$$f = -\frac{R}{2}$$

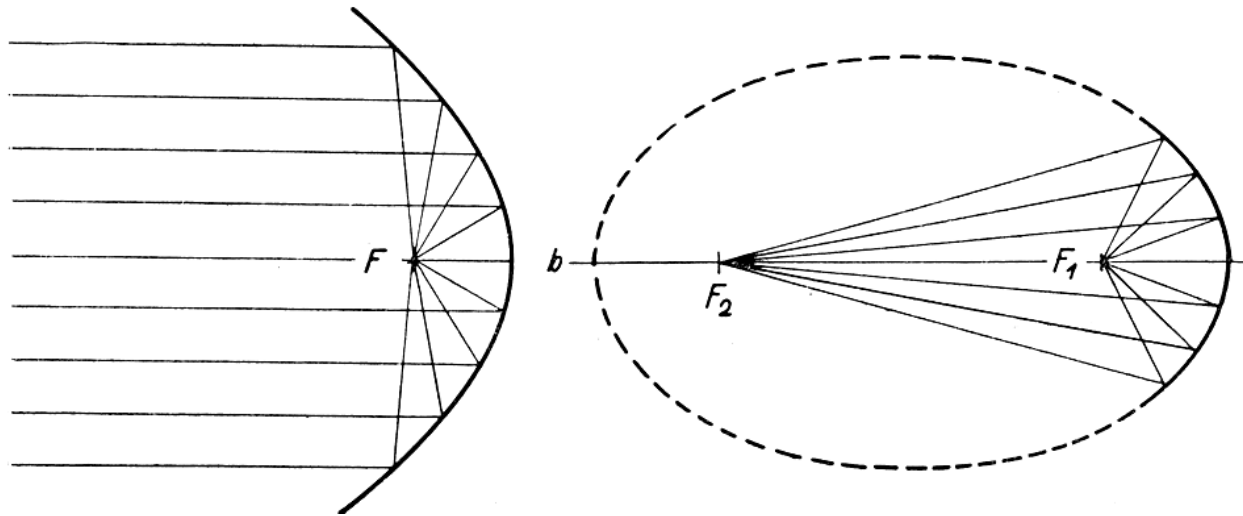
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$$

# Sférická (otvorová) vada zrcadla

- Paprsky, procházející v blízkosti optické osy, jsou odráženy do ohniska, paprsky vzdálenější od osy jsou odráženy mimo ohnisko. Jejich obalová plocha se nazývá kaustika.

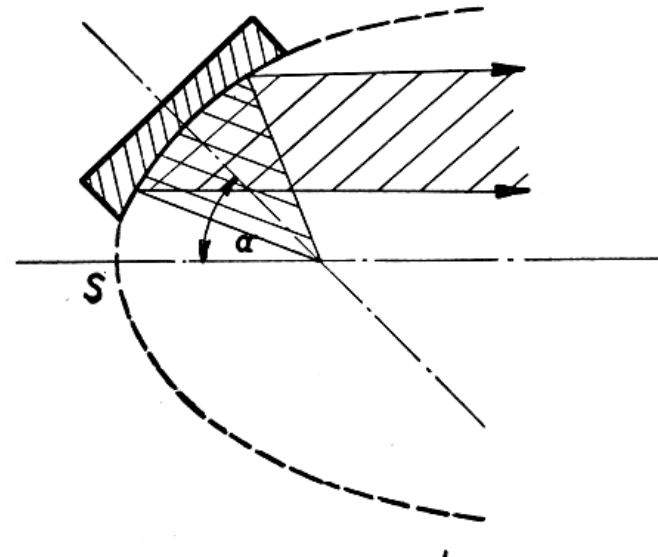
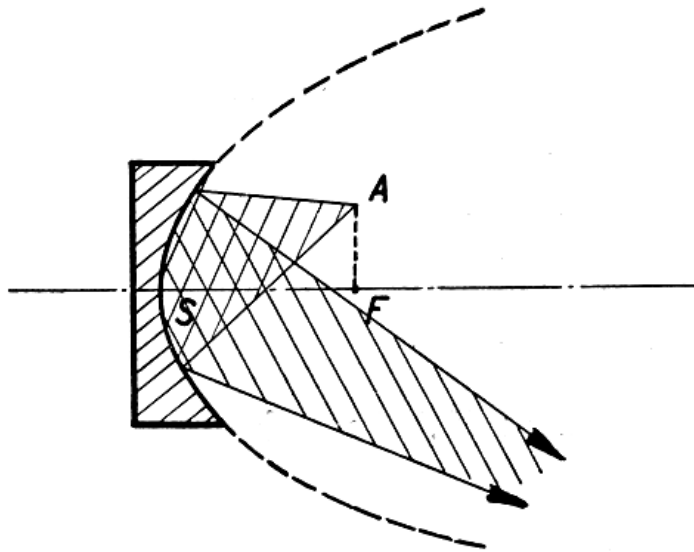


# Bodové zobrazení zrcadly



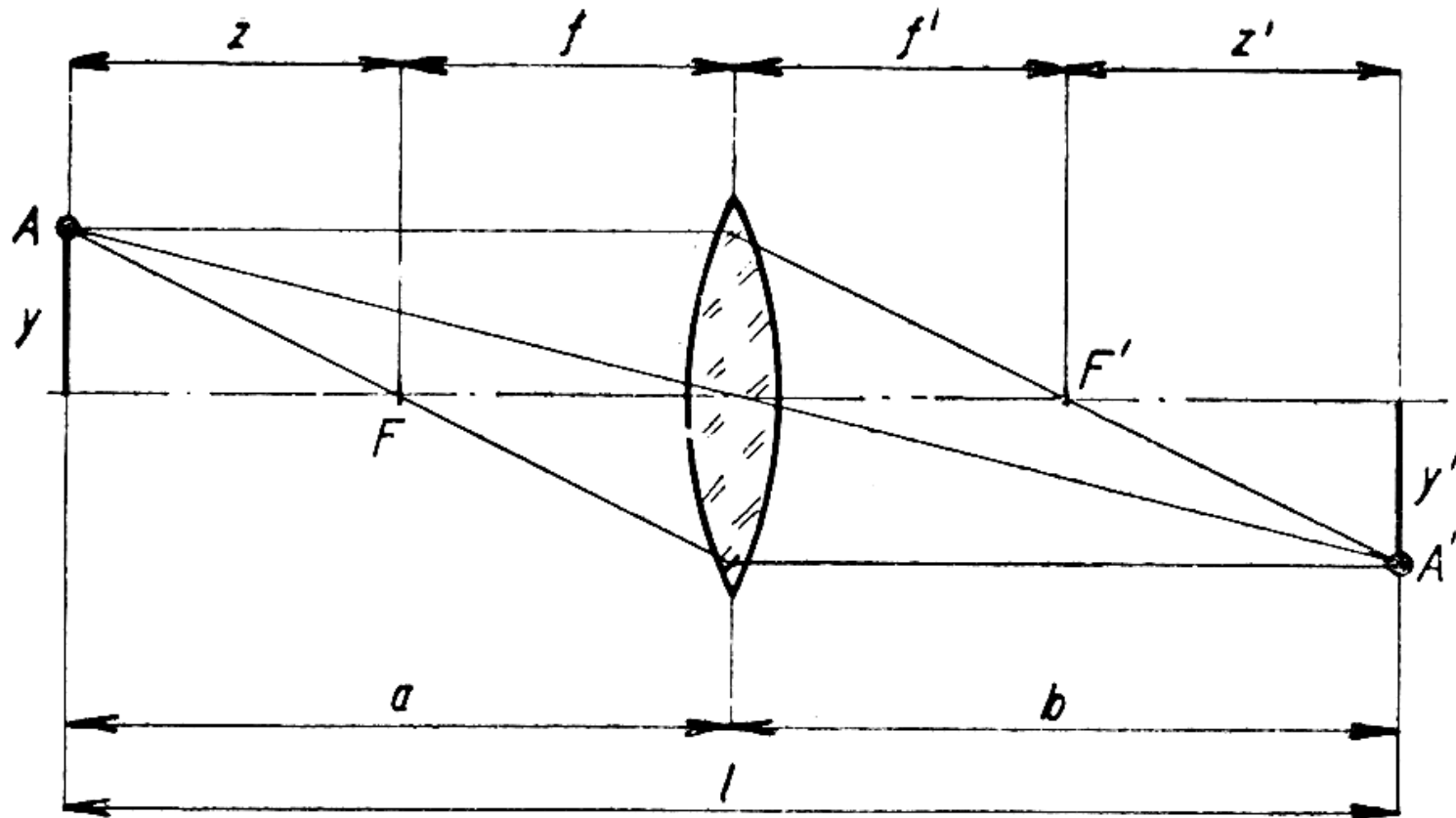
- Zobrazení bodu v nekonečnu parabolickým zrcadlem do ohniska
- Zobrazení bodu v jednom ohnisku eliptické rotační plochy do druhého ohniska

# Excentrické (off axis) zrcadlo



- Je-li světelný zdroj umístěn mimo optickou osu, nejsou ozařené paprsky rovnoběžné
- Je-li světelný zdroj umístěn v ohnisku a pro odraz je použita část zrcadla ležící mimo jeho vrchol jsou odražené paprsky rovnoběžné

# Zobrazení tenkou spojnou čočkou



$$\frac{1}{a} + \frac{1}{b} = \frac{1}{f}$$

$$m = \frac{y'}{y} = \frac{b}{a}$$

$$z \cdot z' = f^2$$

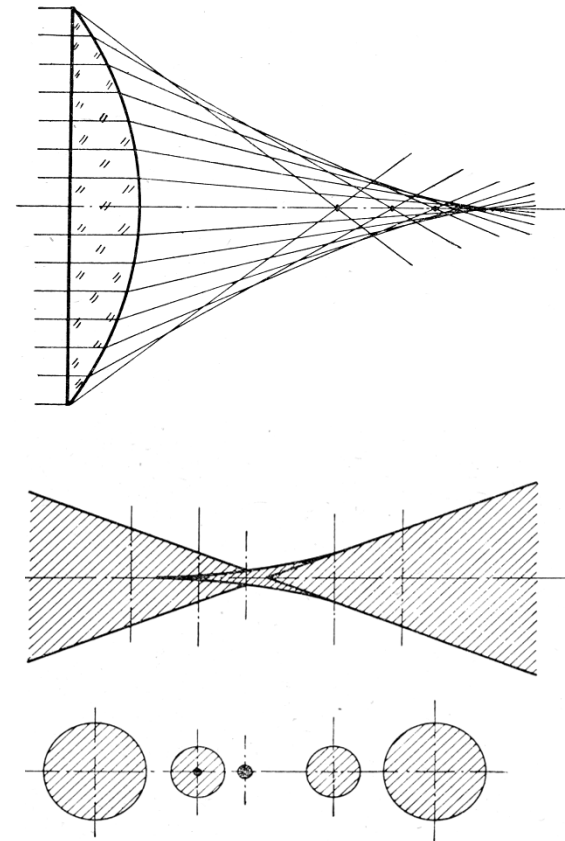


# Optické vady

- **Monochromatické** – vyskytují se i při průchodu jednobarevného světla: otvorová vada, astigmatismus, koma, zklenutí, zkreslení
- **Barevné vady (chromatické)** jsou způsobeny různým indexem lomu pro různé barvy světla: barevná vada zvětšení a barevná vada polohy

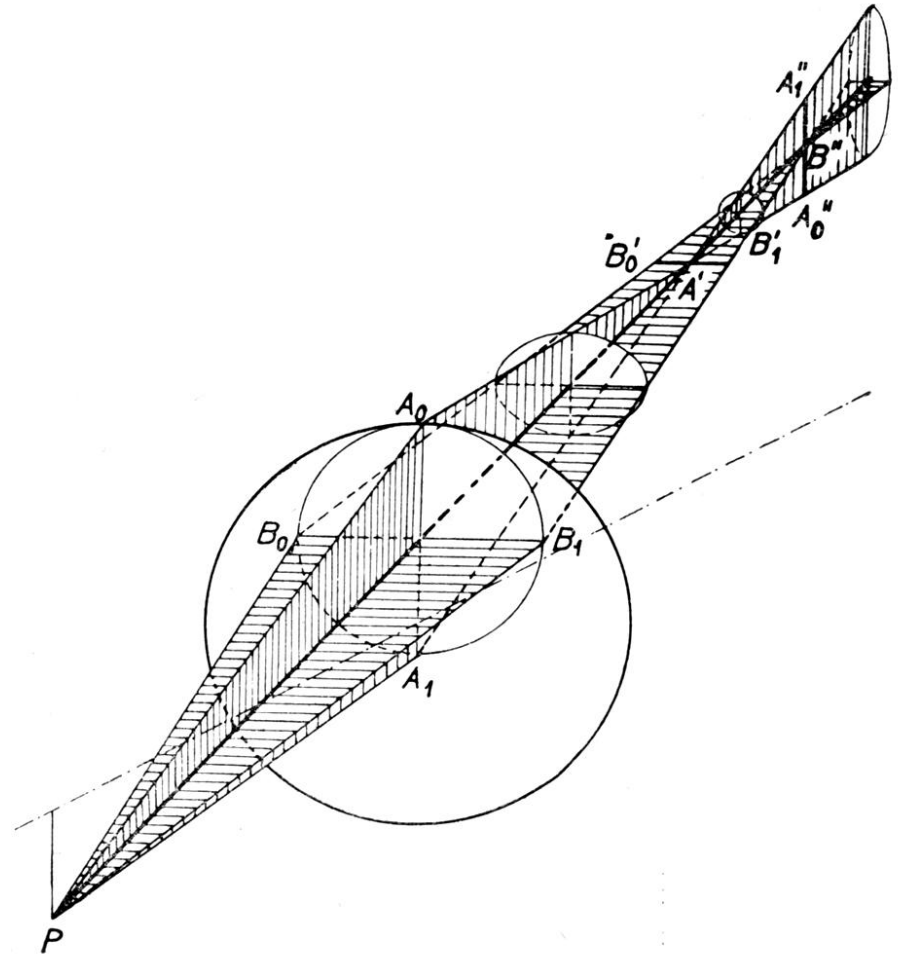
# Otvorová vada (sférická, kulová)

- Pro okrajové části čočky leží ohnisko blíže k čočce než pro paprsky blíže k optické ose. U rozptylky je průběh kulové vady opačný. Korekce je možná např. nekulovou plochou čočky nebo vhodnou kombinací spojky a rozptylky.
- Na vedlejším schématu je přehled rozložení světla ve skutečném paprskovém kuželu u systému s otvorovou vadou.



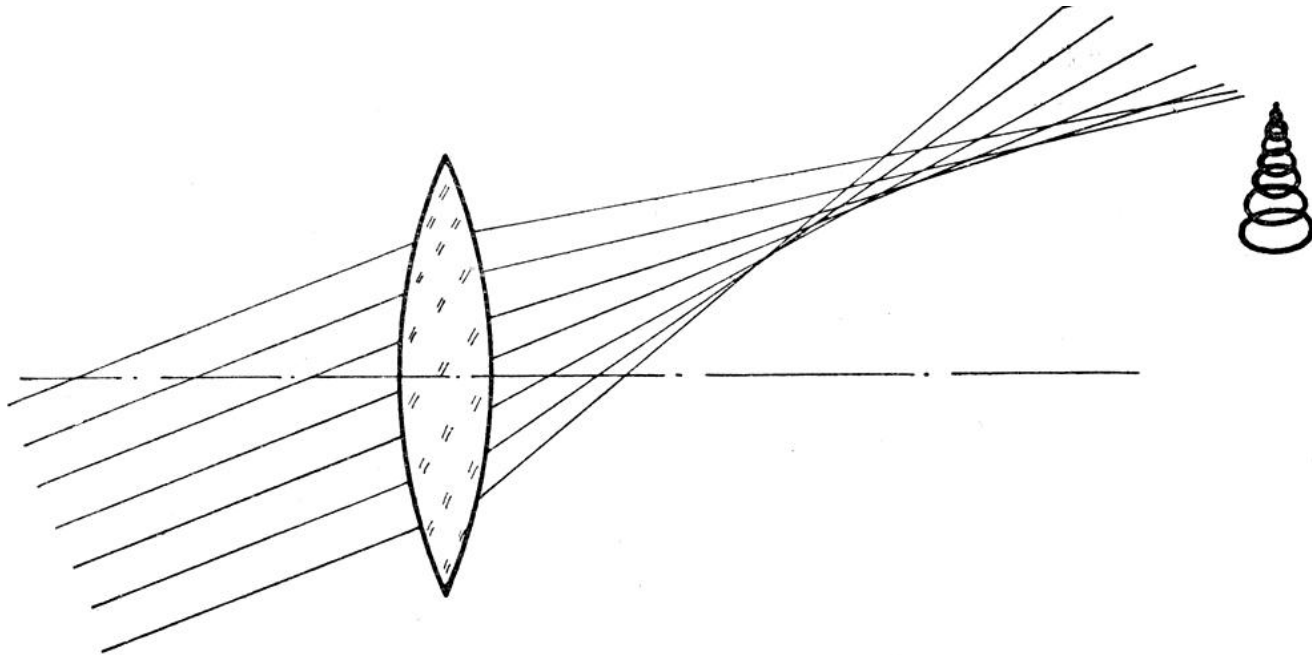
# Astigmatismus

- Paprsky v meridiálním řezu ( $A_0A_1$ ) se protínají v bodě  $A'$ , paprsky v sagitálním řezu ( $B_0B_1$ ) se protínají v jiném bodě  $B''$ . Paprsky druhého řezu vytvářejí v těchto bodech obraz bodu  $P$  ve tvaru úsečky ( $B_0'B_1'$ ), příp. ( $A_0A_1$ ). Mezi oběma těmito body leží rovina optimálního zaostření ( $B_1'$ ).



# Koma

- Jméno koma odpovídá zobrazení bodu jako kruhové plošky se zužujícím se zakončením (jako obraz komety)



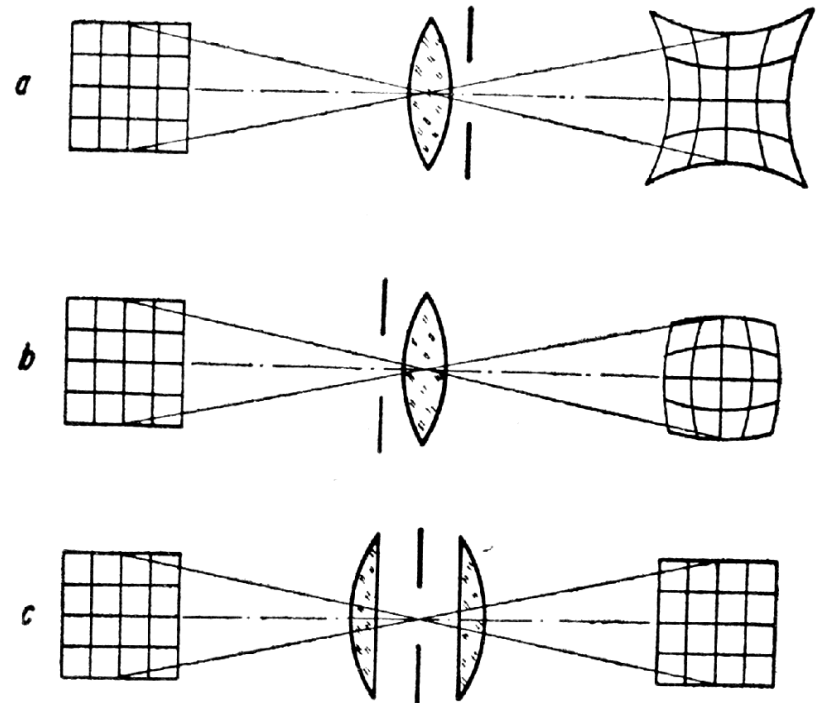
# Zkreslení

- Změna zvětšení k okrajům obrazu má za následek i změnu tvaru zobrazovaných předmětů.

a) zvětšení roste k okrajům – poduškovité zkreslení

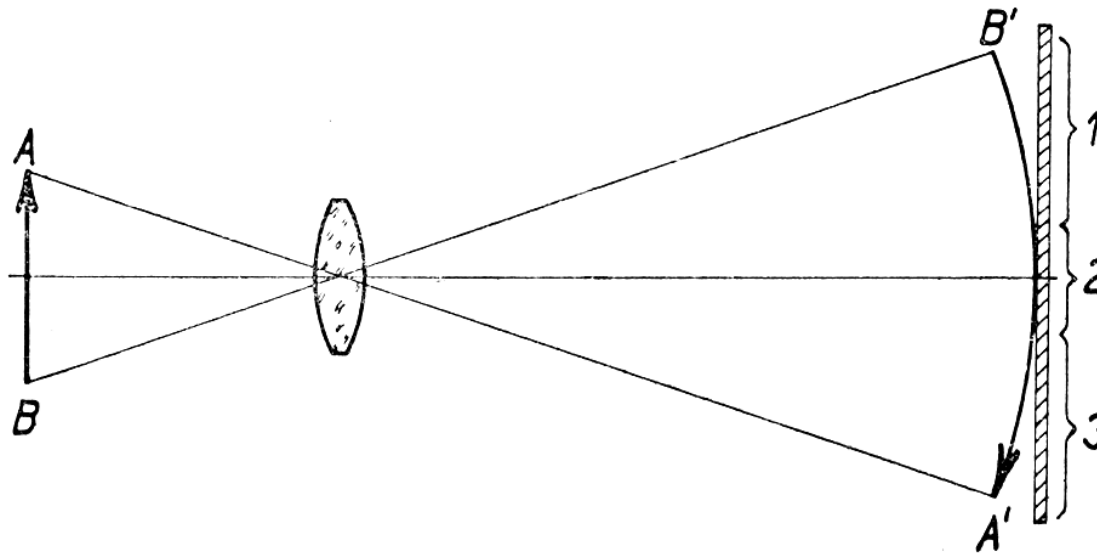
b) zvětšení klesá k okrajům obrazu – poduškovité zkreslení

c) objektiv bez zkreslení



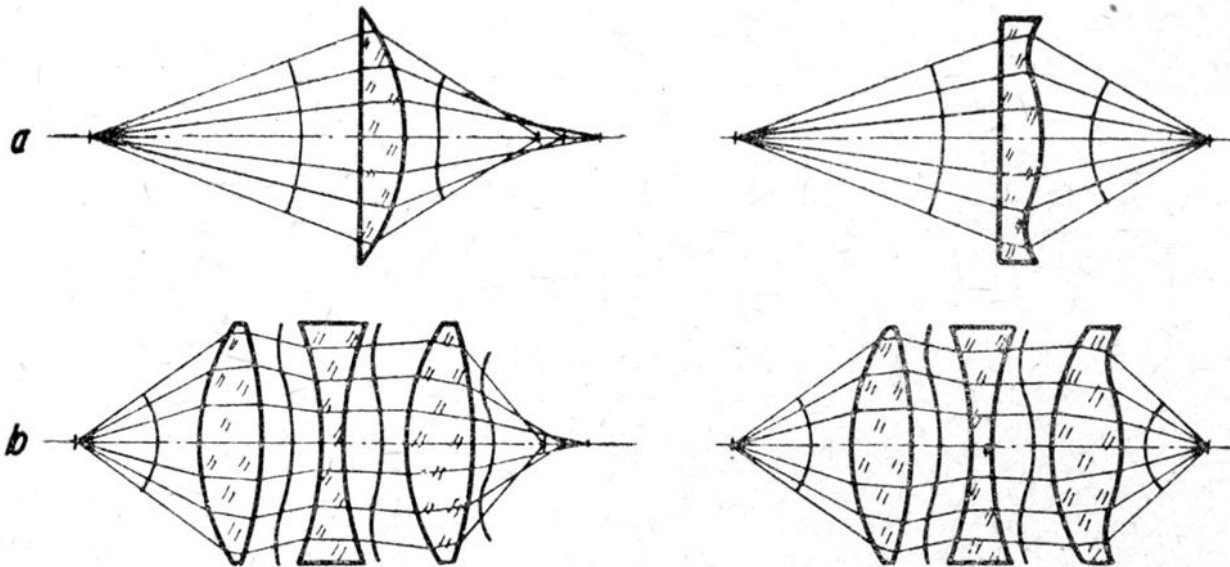
# Zklenutí pole

- Předmět AB je zobrazen na zakřivené ploše A'B'.
- Ostrý obraz je rozložen na rotační ploše a nelze jej zobrazit ostře na rovině. Při přeostržení je možné dosáhnout ostrosti buď ve středu obrazu nebo na okrajích.



# Asférické systémy

- a – obyčejná čočka deformuje vlnoplochu, deformaci lze odstranit asférickým členem
- b – obdobná situace je u objektivu, kde vlnoplocha je deformována složitěji

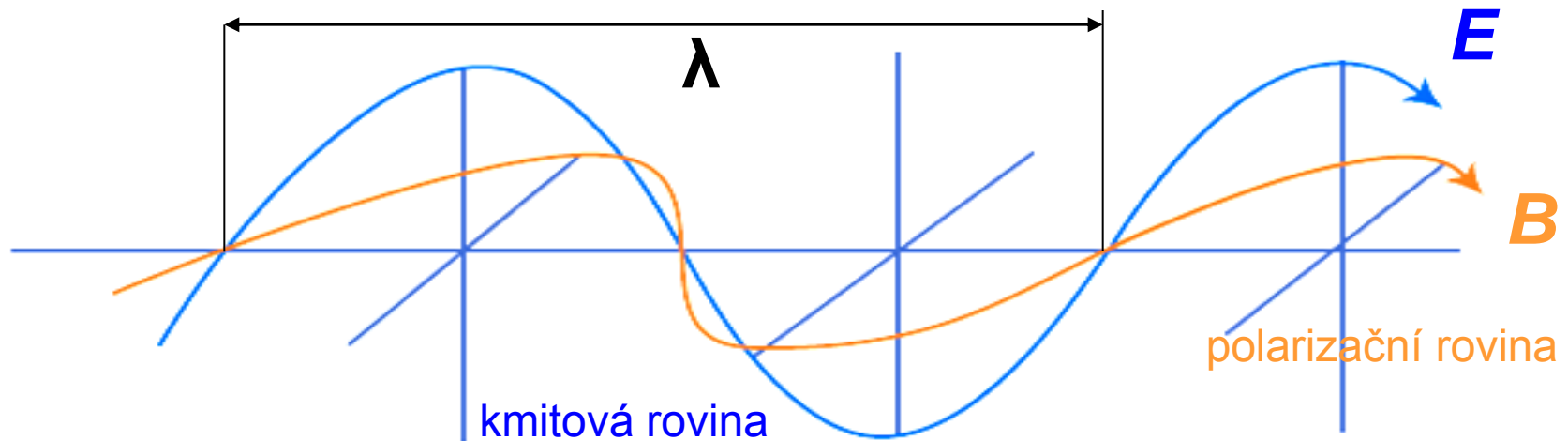




# Vlnová optika

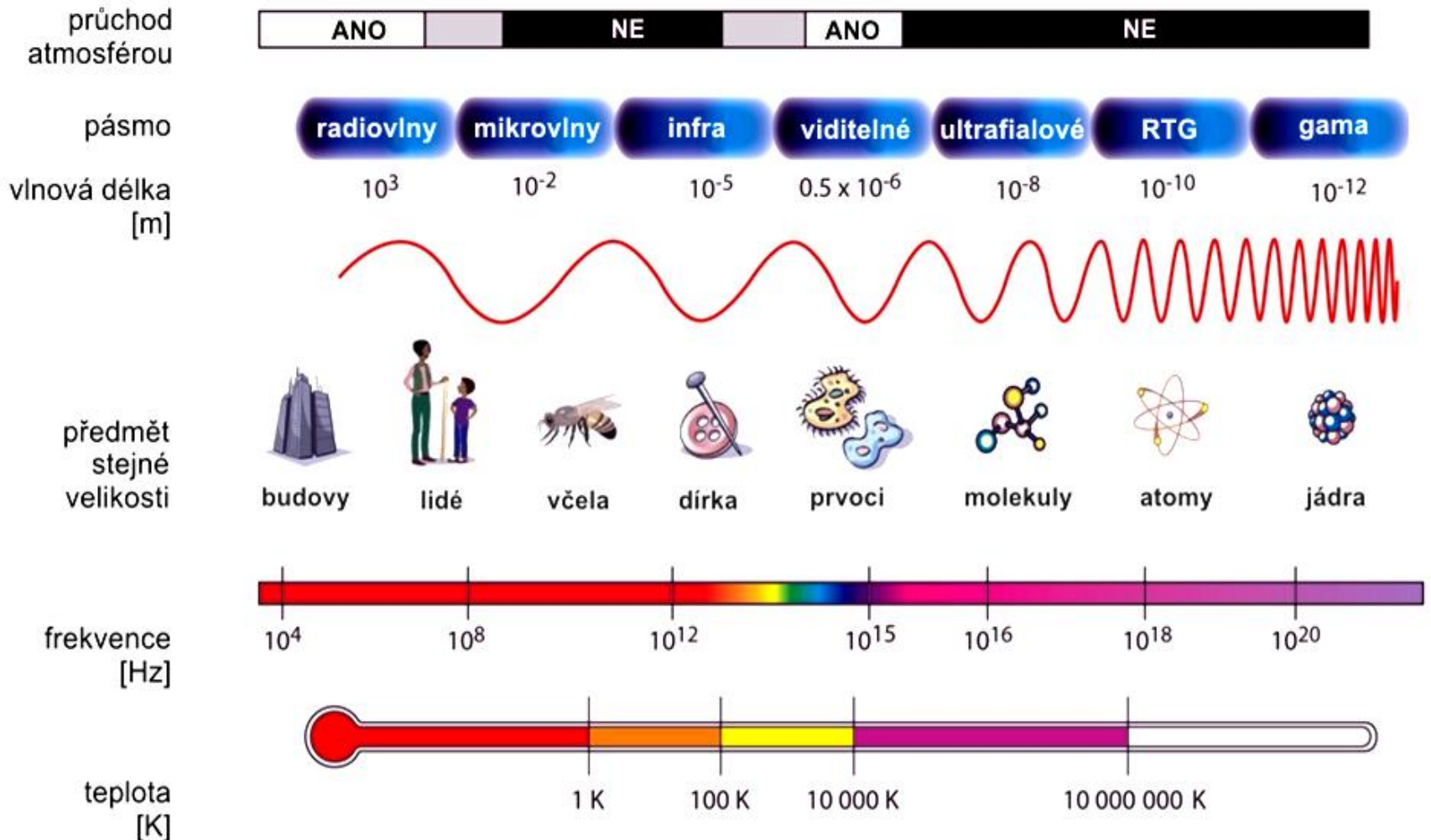


# Rovinná postupná vlna se sinusovým průběhem

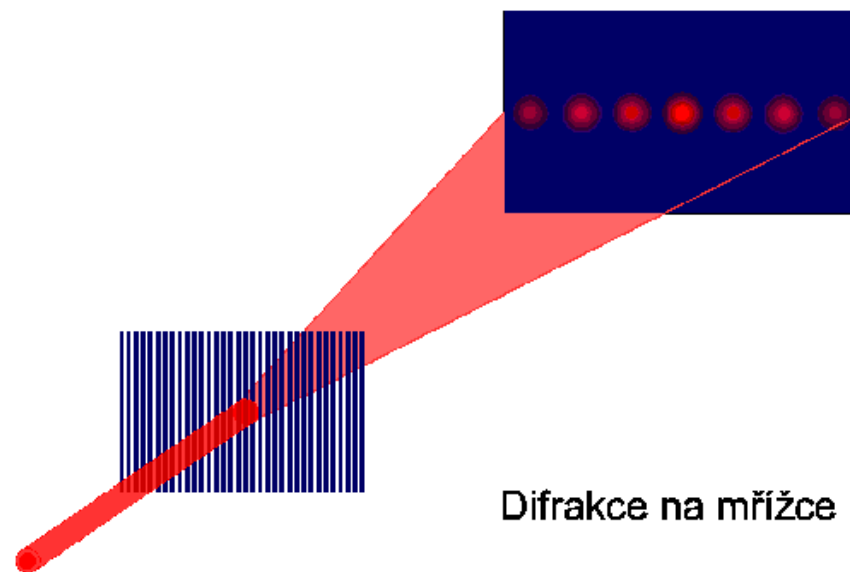
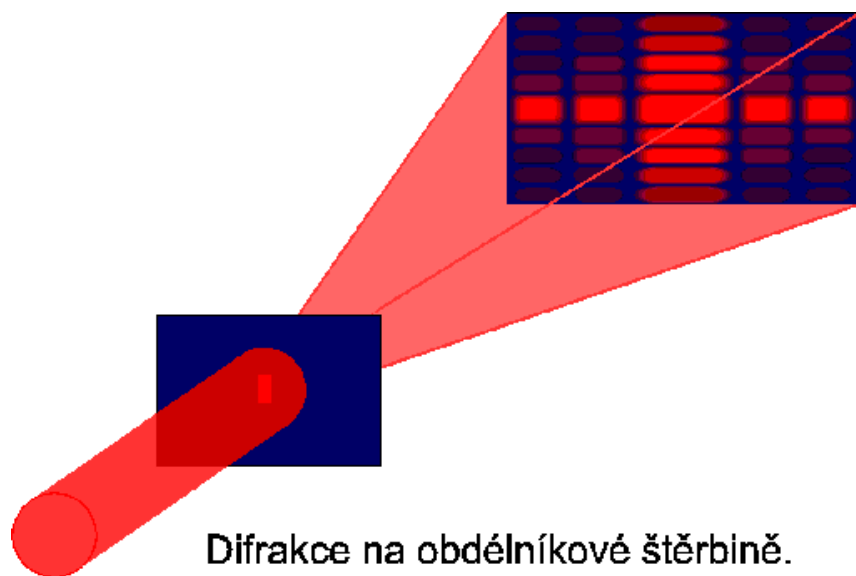


Záření je elektromagnetické vlnění, které se šíří prostředím rychlostí  $v = (\epsilon\mu)^{-1/2}$ , pro neferomagnetická prostředí pak  $v = c_0\epsilon_r^{-1/2}$ , kde  $c_0$  je rychlost šíření záření ve vakuu.

# Elektromagnetické spektrum

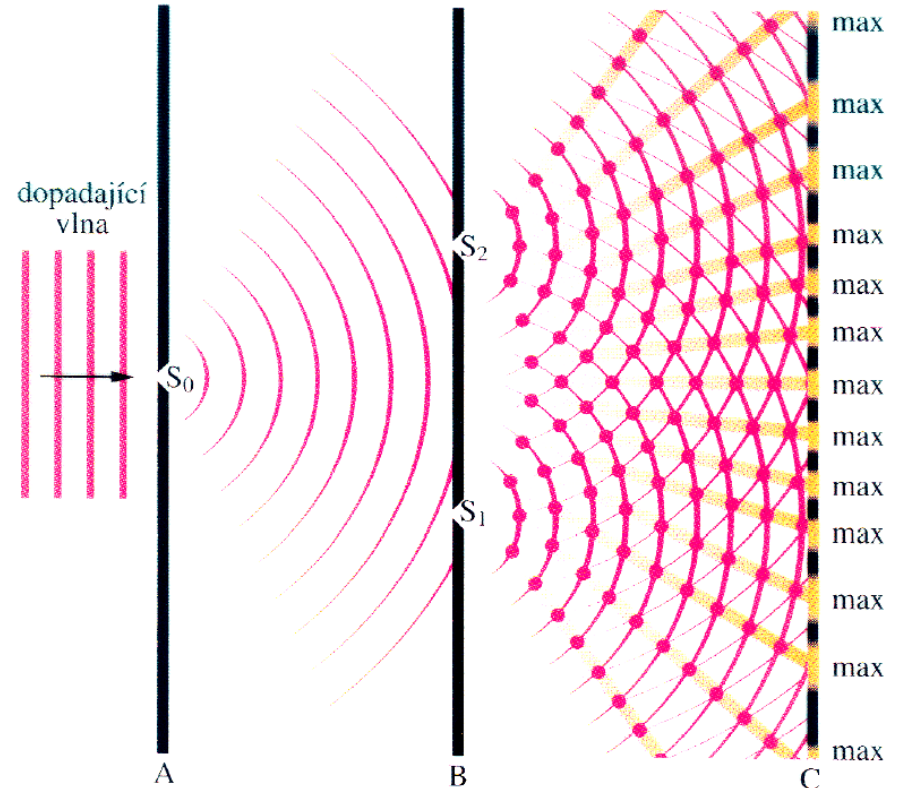


# Světlo jako vlnění - difrakce

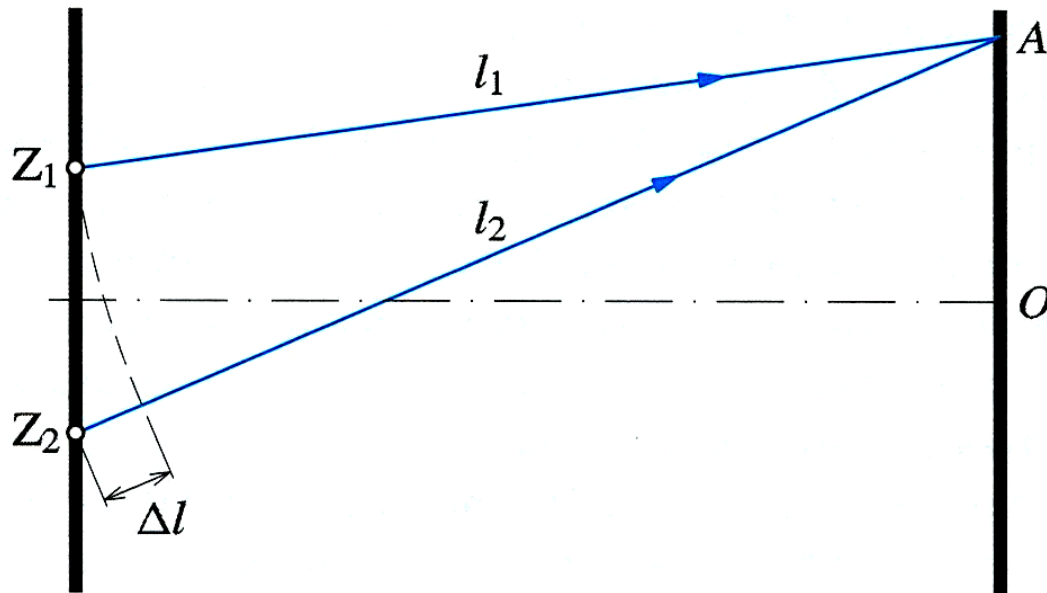


# Youngův interferenční experiment

- Dochází k difrakci monochromatického záření na štěrbině  $S_0$ , která působí jako bodový zdroj světla o polokulových vlnoplochách. Po dopadu na stínítko B je světlo difraktováno na štěrbinách  $S_1$  a  $S_2$ . Světelné vlny postupující z těchto štěrbin se vzájemně překrývají a interferují. Na stínítku C vzniká interferenční obrazec maxim a minim.



# Schema Youngova experimentu

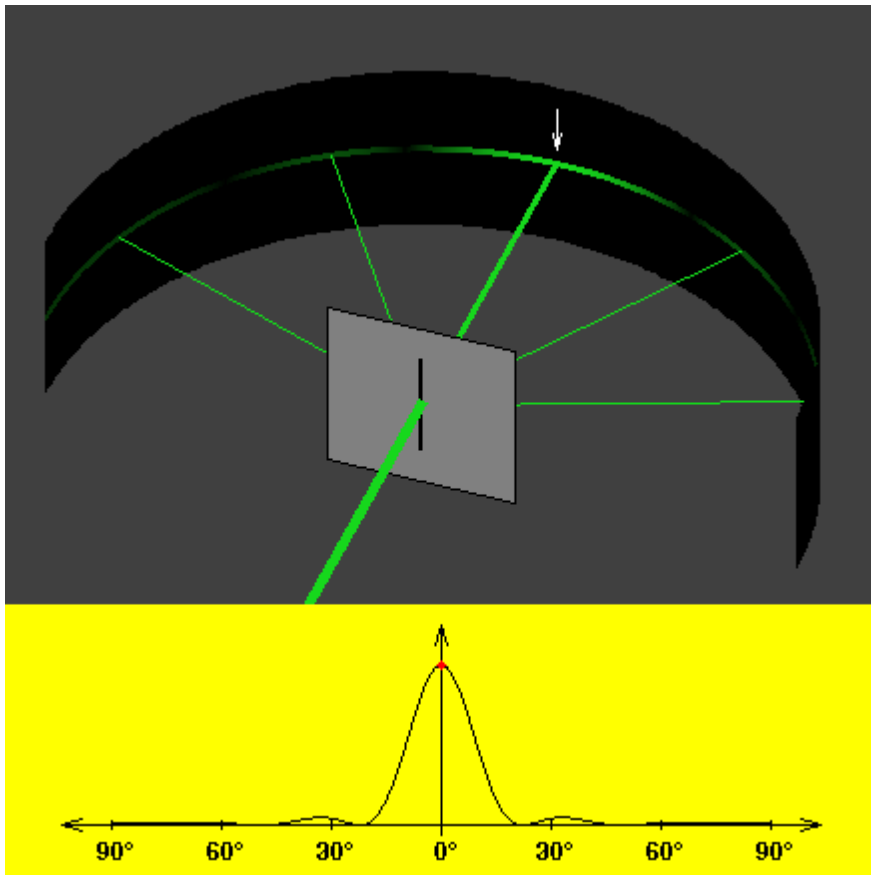


Při interferenci koherentního světelného vlnění o vlnové délce  $\lambda$  vzniká interferenční maximum v bodech, pro které je splněna podmínka  $\Delta l = k\lambda$ ; pro  $k = 0, 1, 2 \dots$

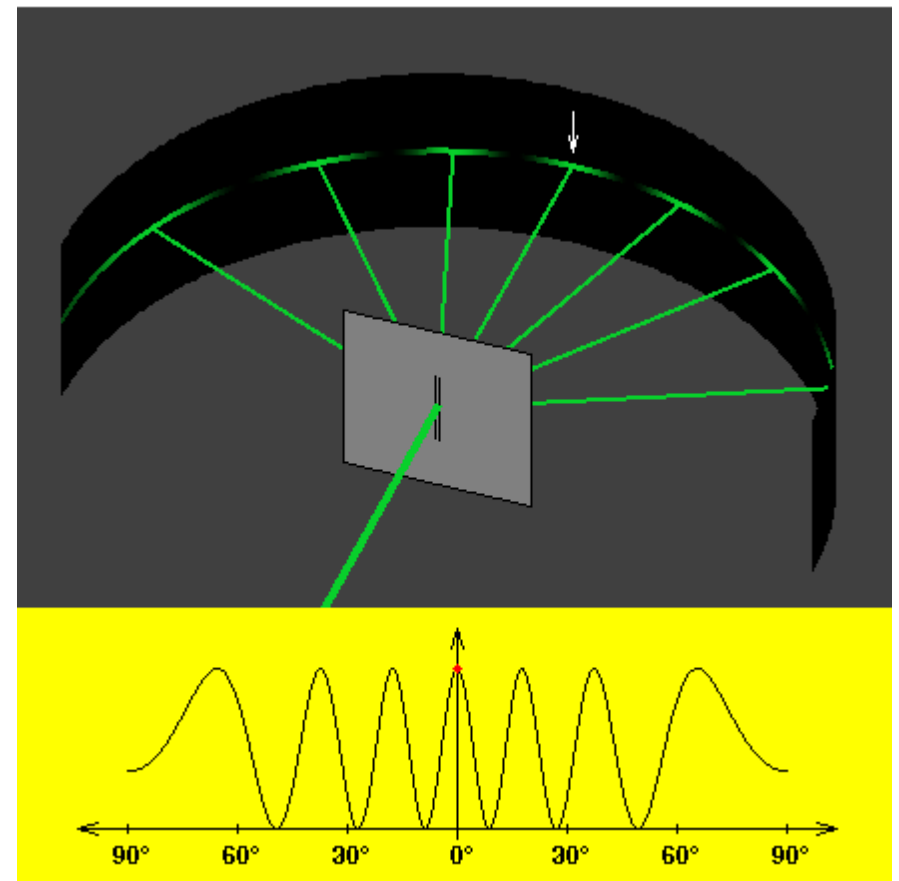
Interferenční minimum naopak nastává, když je splněna podmínka  $\Delta l = (2k-1)\lambda/2$ ; pro  $k = 1, 2 \dots$

Veličina  $k$  udává řád interferenčního maxima (minima).

# Štěrbina a dvojštěrbina



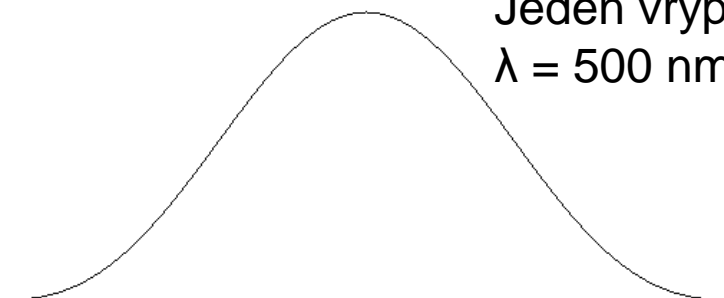
K ohybu na štěrbině dochází díky konečné šířce štěrbině, sčítají se paprsky ze všech bodů štěrbině.



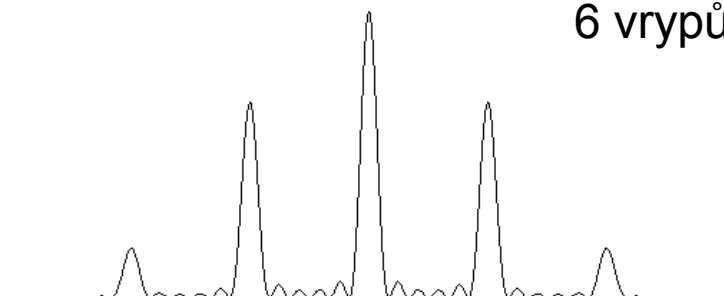
Na dvojštěrbině (Youngův experiment) dochází k interferenci mezi oběma štěrbinami a k ohybu paprsků v rámci jedné štěrbině

# Mřížka

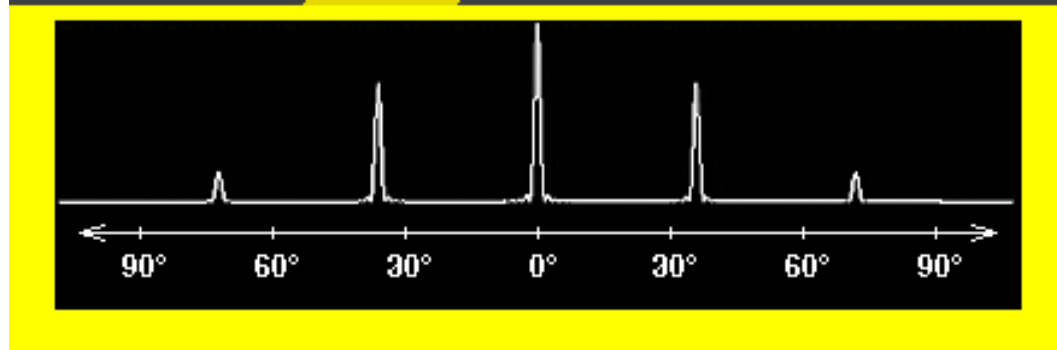
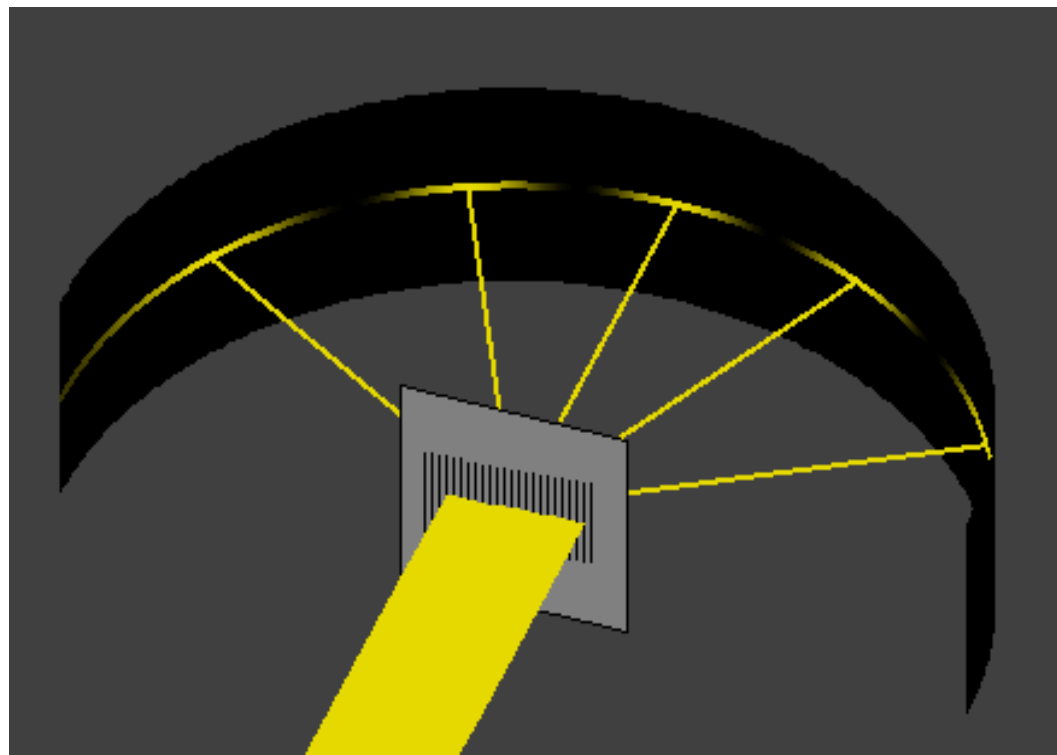
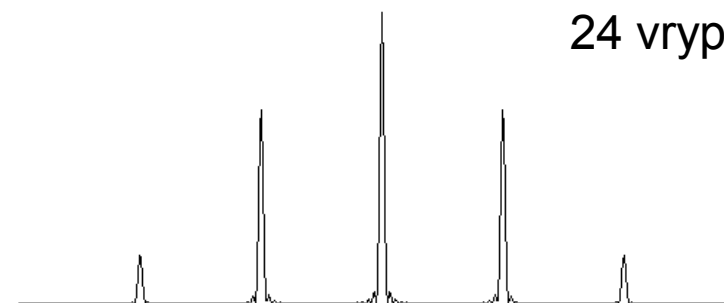
Jeden vryp  
 $\lambda = 500 \text{ nm}$



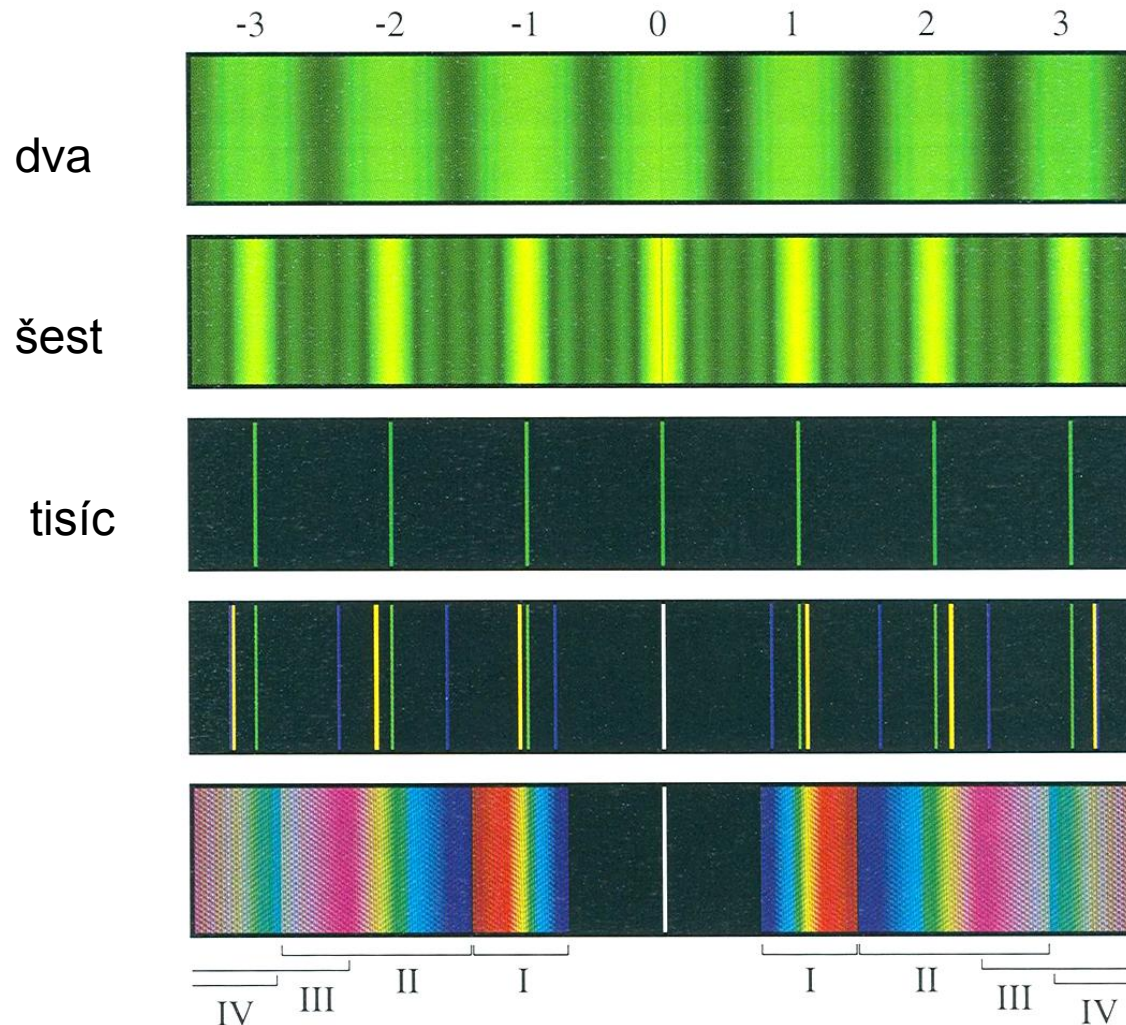
6 vrypů



24 vrypů



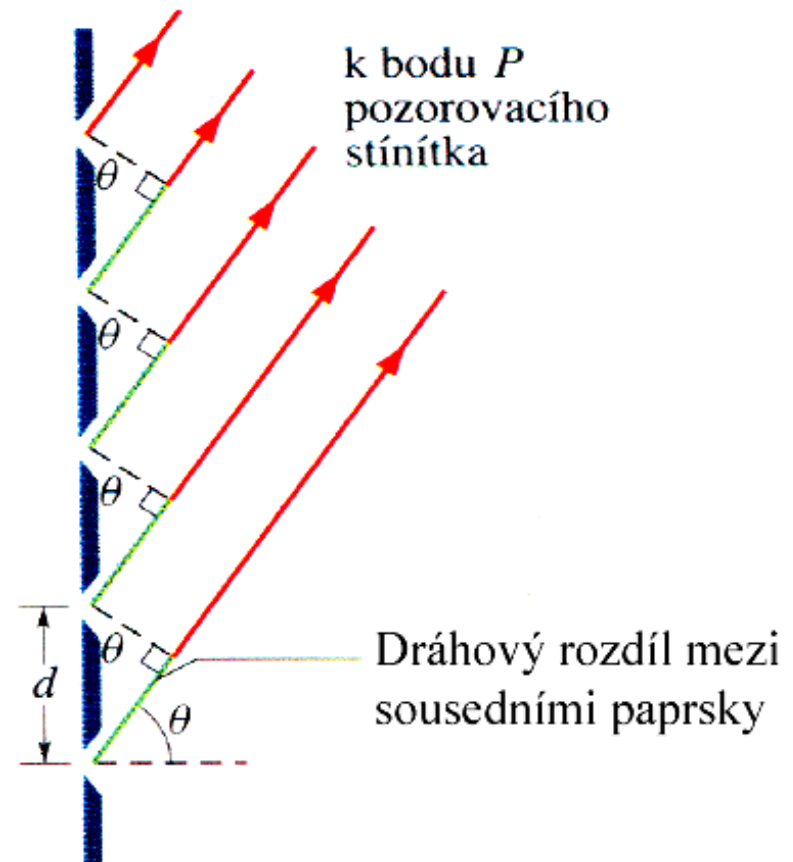
# Mřížkové spektrum pro různý počet vrypů





# Optická mřížka

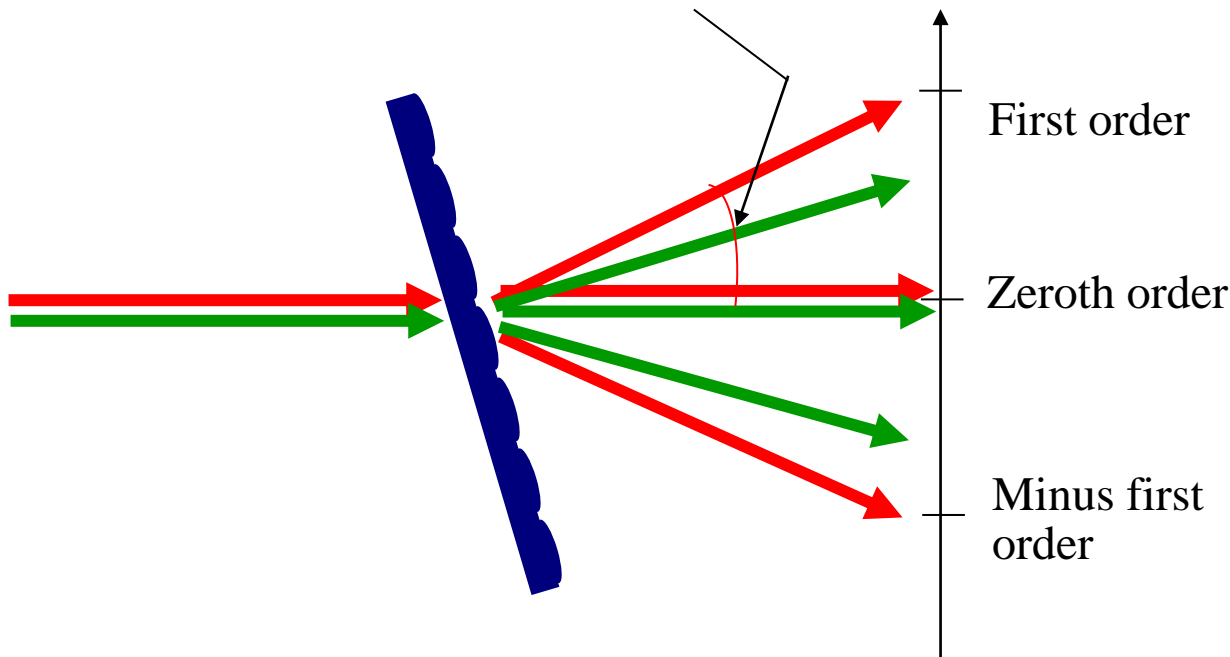
- Paprsky jdoucí ze štěrbin difrakční mřížky ke vzdálenému bodu  $P$  jsou přibližně rovnoběžné. Dráhový rozdíl mezi každými dvěma sousedními paprsky je  $d \sin \Theta$ , kde  $\Theta$  je úhel, vyznačený na obrázku. Pro maxima (čáry) platí:  
 **$d \sin \Theta = m \lambda$ ,  $m = 0, 1, 2, \dots$**



# Diffraction orders

$$d \sin \theta = m \lambda, \quad m=0,1,2\dots$$

Diffraction angle,  $\theta_m$

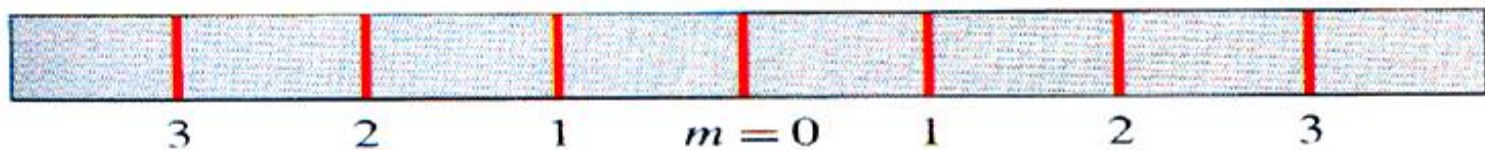
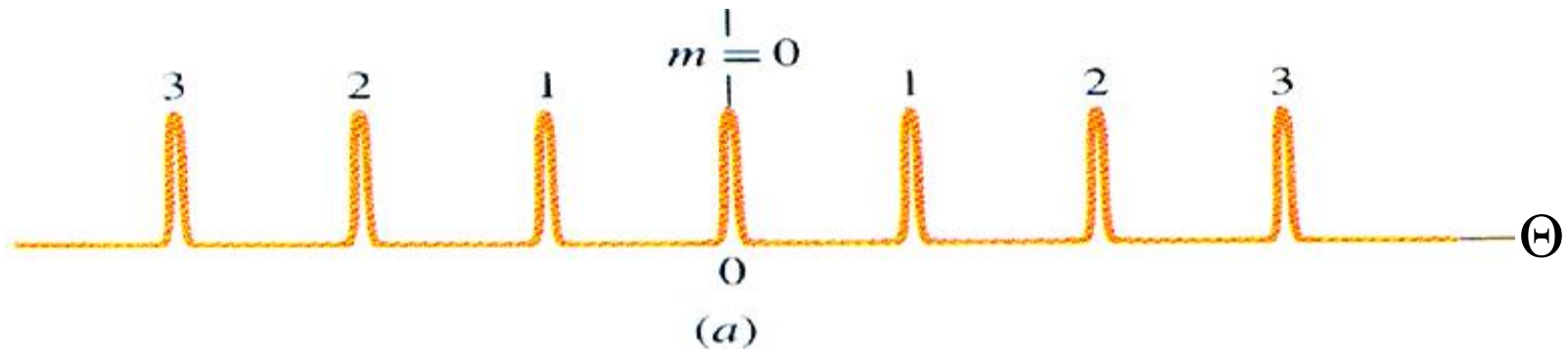


Because the diffraction angle depends on  $\lambda$ , different wavelengths are separated in the +1 (and -1) orders.

No wavelength dependence in zero order.

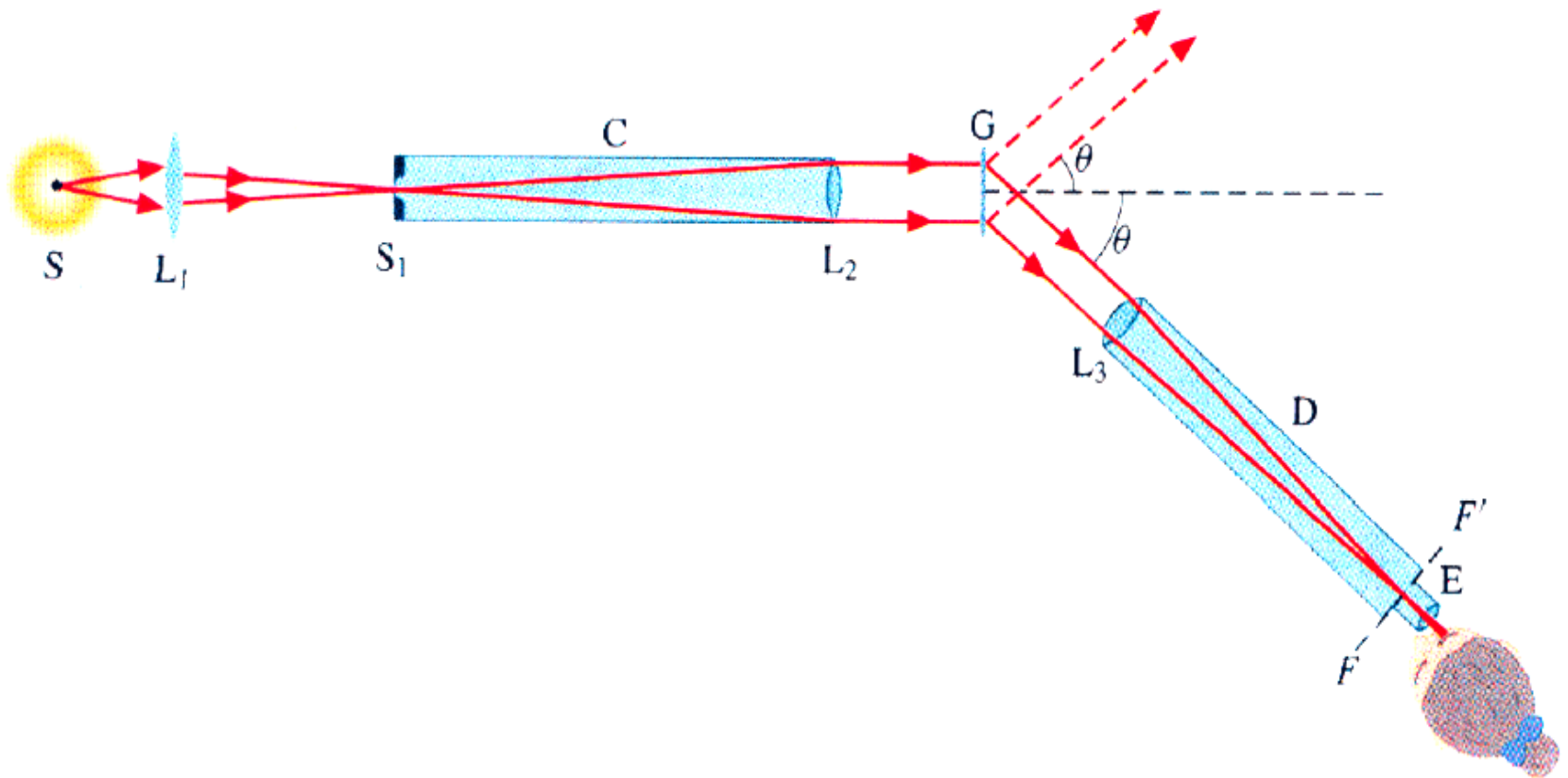
The longer the wavelength, the larger its diffraction angle in nonzero orders.

# Čárové spektrum

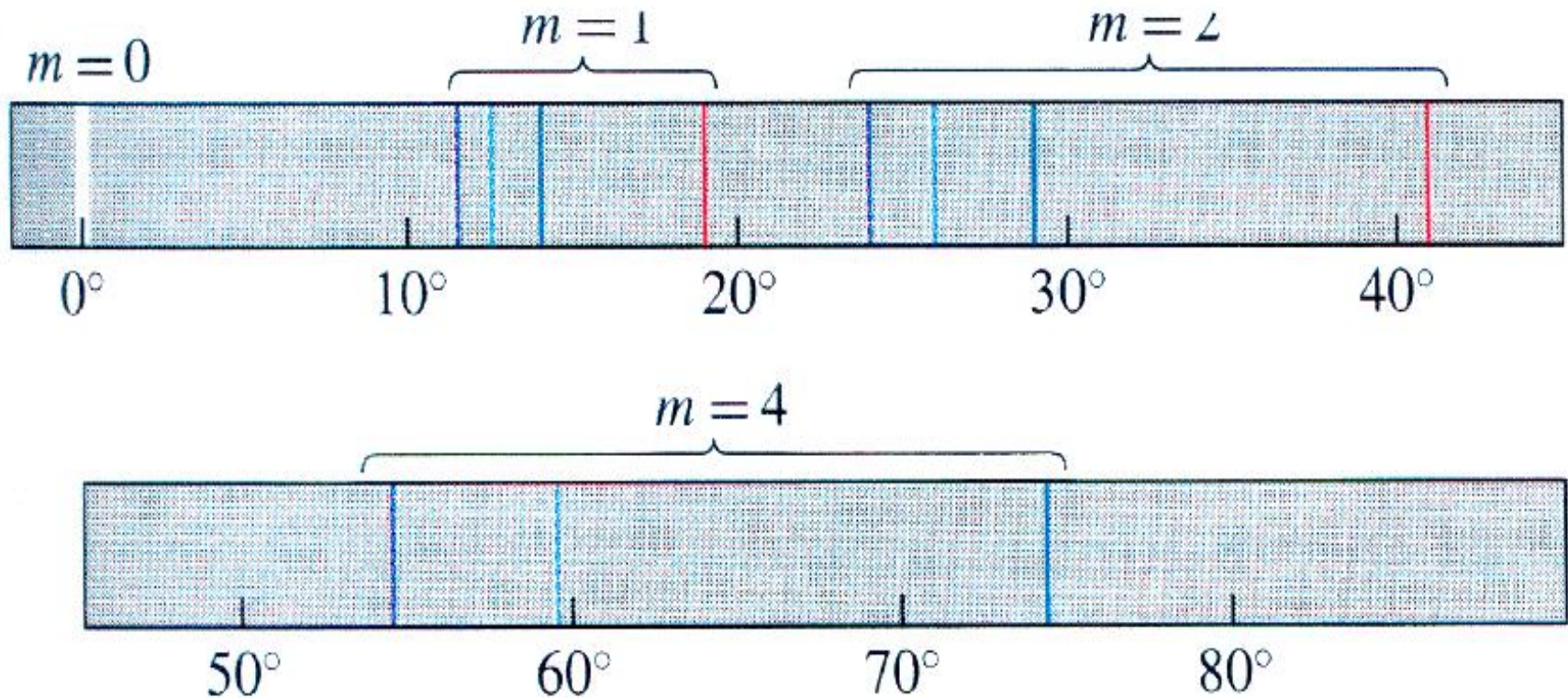


- Rozložení intenzity vytvořené difrakční mřížkou s velkým počtem štěrbin má tvar úzkých píků, kde  $m$  udává řád píku. Obrazem na stínítku (b) jsou úzké proužky (čáry).

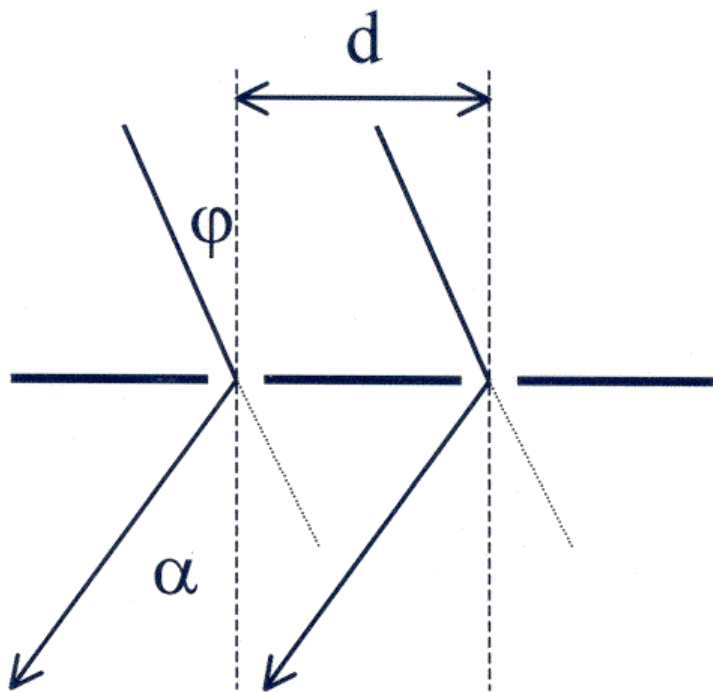
# Jednoduchý mřížkový spektroskop



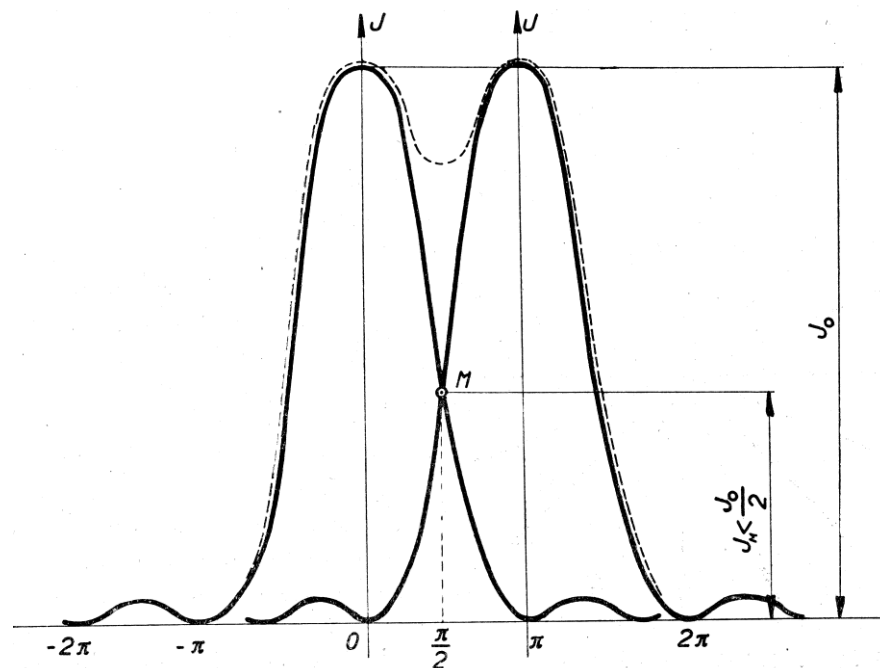
# Mřížkové spektrum vodíku



# Rozlišovací schopnost mřížky



$$m\lambda = d(\sin \phi - \sin \alpha)$$



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

# Disperze

Úhlová:

$$\delta = \frac{d\omega}{d\lambda}$$

Lineární:

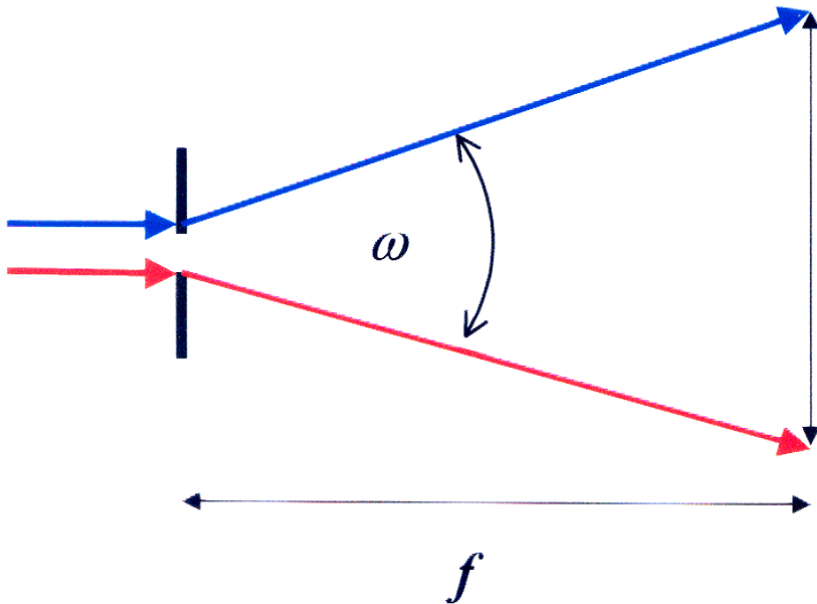
(mm/nm)

$$d = \frac{dl}{d\lambda}$$

Reciproká:

(nm/mm)

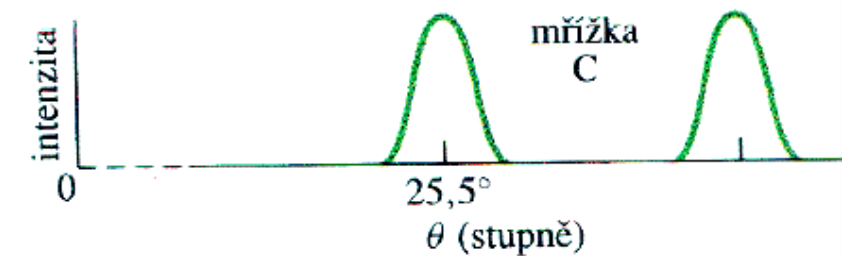
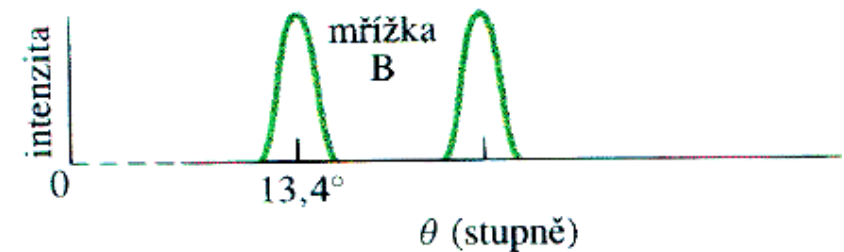
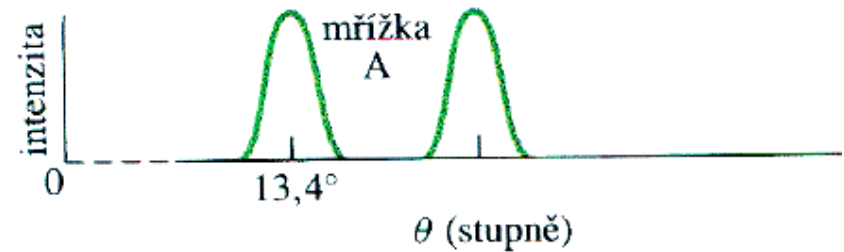
$$\frac{1}{d} = \frac{d\lambda}{dl}$$



$$l = 2f \sin\omega$$

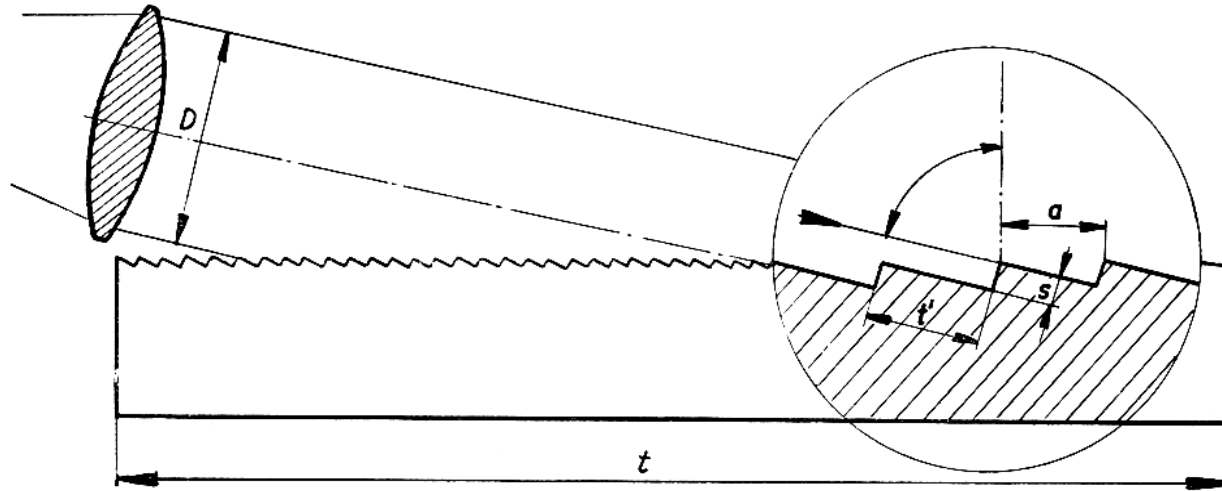
# Tři mřížky

	N	d (nm)	$\theta$ ( $^{\circ}$ )	R
A	10000	2540	13,4	10000
B	20000	2540	13,4	20000
C	10000	1370	25,5	10000



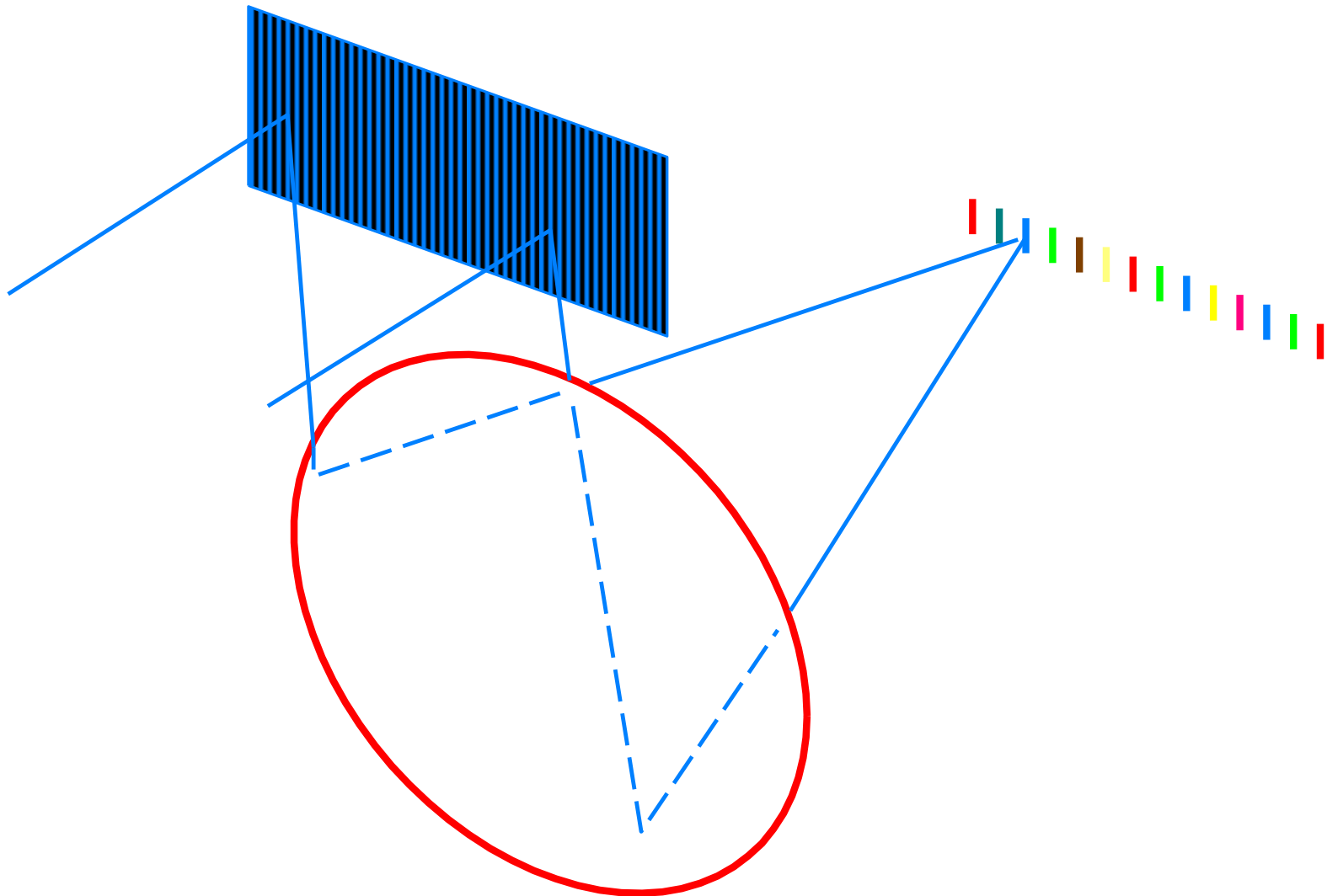


# Mřížka echelle

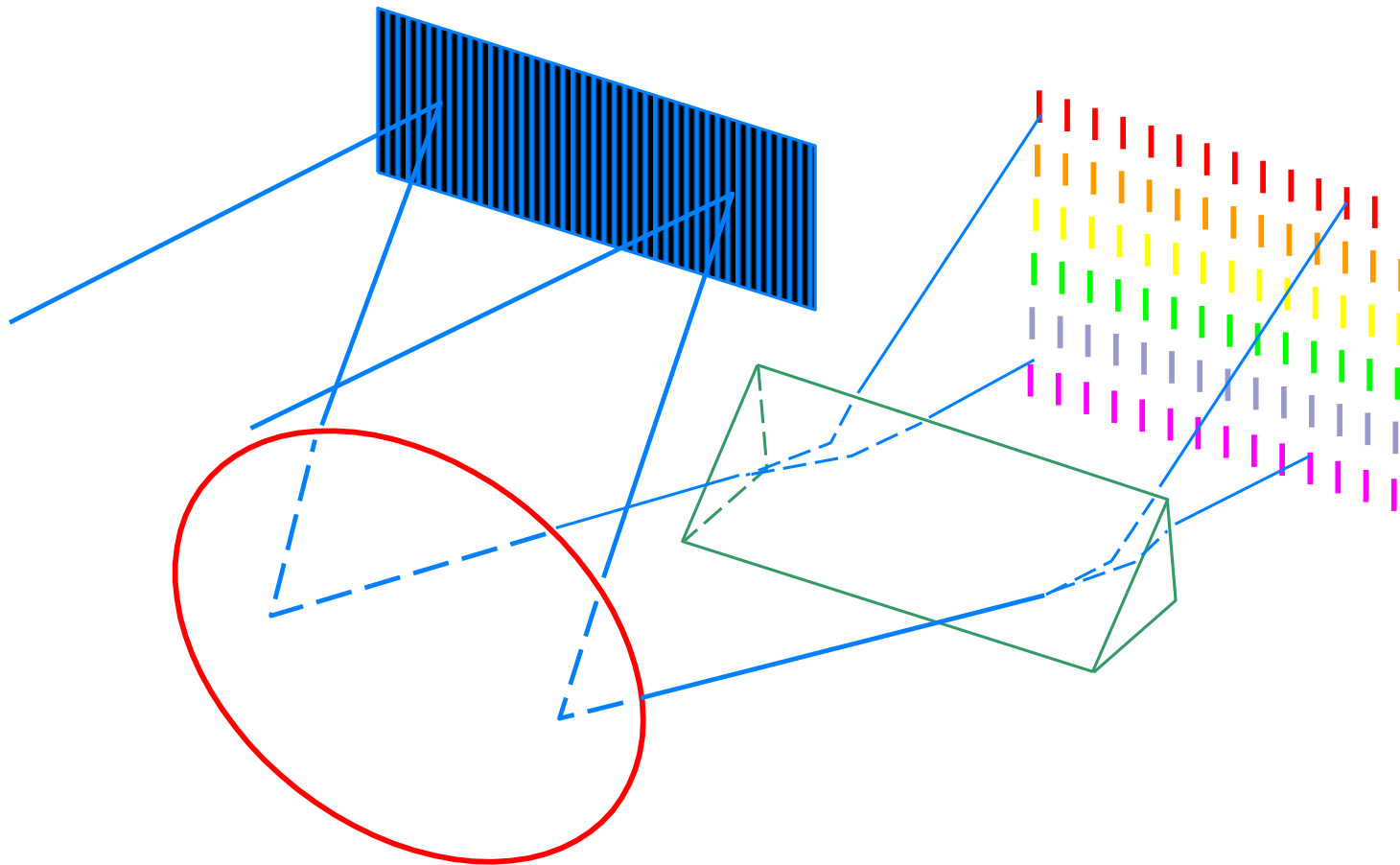


- Tato mřížka tvoří přechod mezi Michelsonovou stupňovou mřížkou („echelon“) a mřížkou „echelette“, která soustřeďuje světlo do úhlu, ve kterém leží jen spektrum určitého řádu.
- Rozlišovací schopnost:  $R=mN$ ,  $m=2t'/\lambda$   
Př.:  $\lambda=500$  nm,  $N=500$ ,  $t'=0,05$  mm  $\rightarrow R=100\ 000$

# Překrývající se řády ve spektru mřížky echelle



# Zkřížená disperze a echelle mřížka



# Interferometer Fabry-Perot

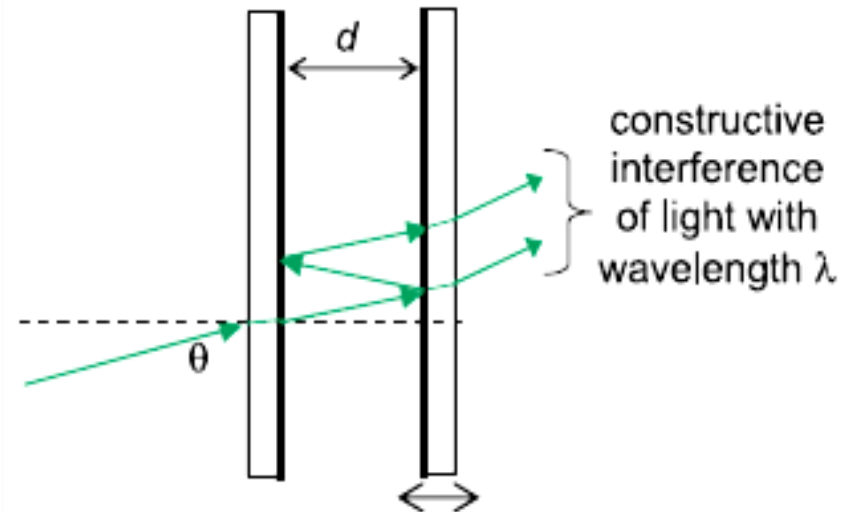
- A the Fabry-Perot interferometer has two parallel, highly reflective mirrors separated by an air gap several millimeters to several centimeters in width.
- Light of wavelength  $\lambda$  constructively interferes when the following relationship is satisfied:

$$m\lambda = 2d \cos\theta$$

- where  $m$  is the order and  $\theta$  is the angle of the incoming light.

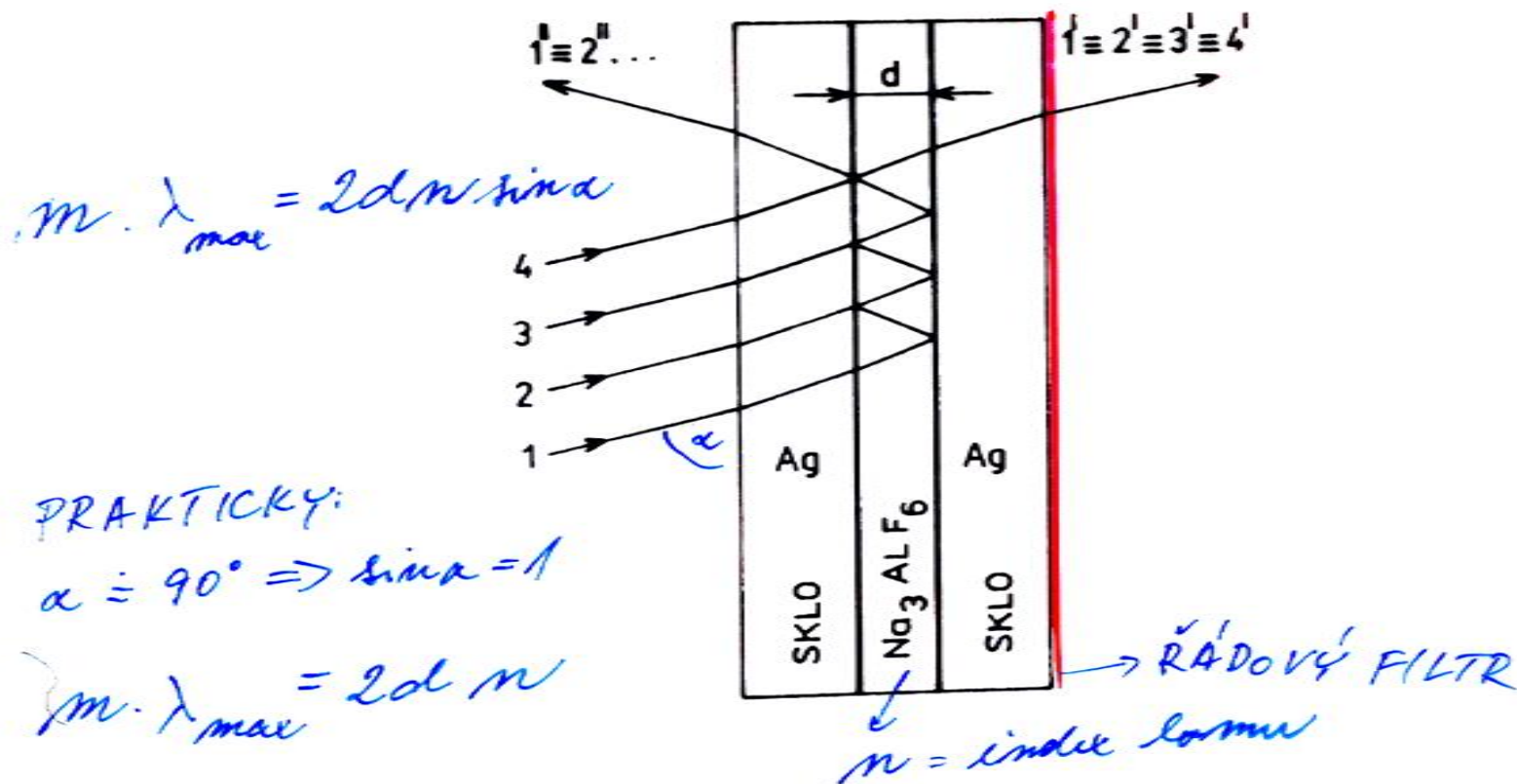
$$R = mN$$

$$N \cong \frac{2,56\sqrt{R_0}}{1 - R_0} \quad R_0 = \text{reflectance}$$



Example:  $R_0 = 0,98$ ;  $N = 127$ ;  $m = 40\ 000$ ;  
 $R = 5 \cdot 10^6$

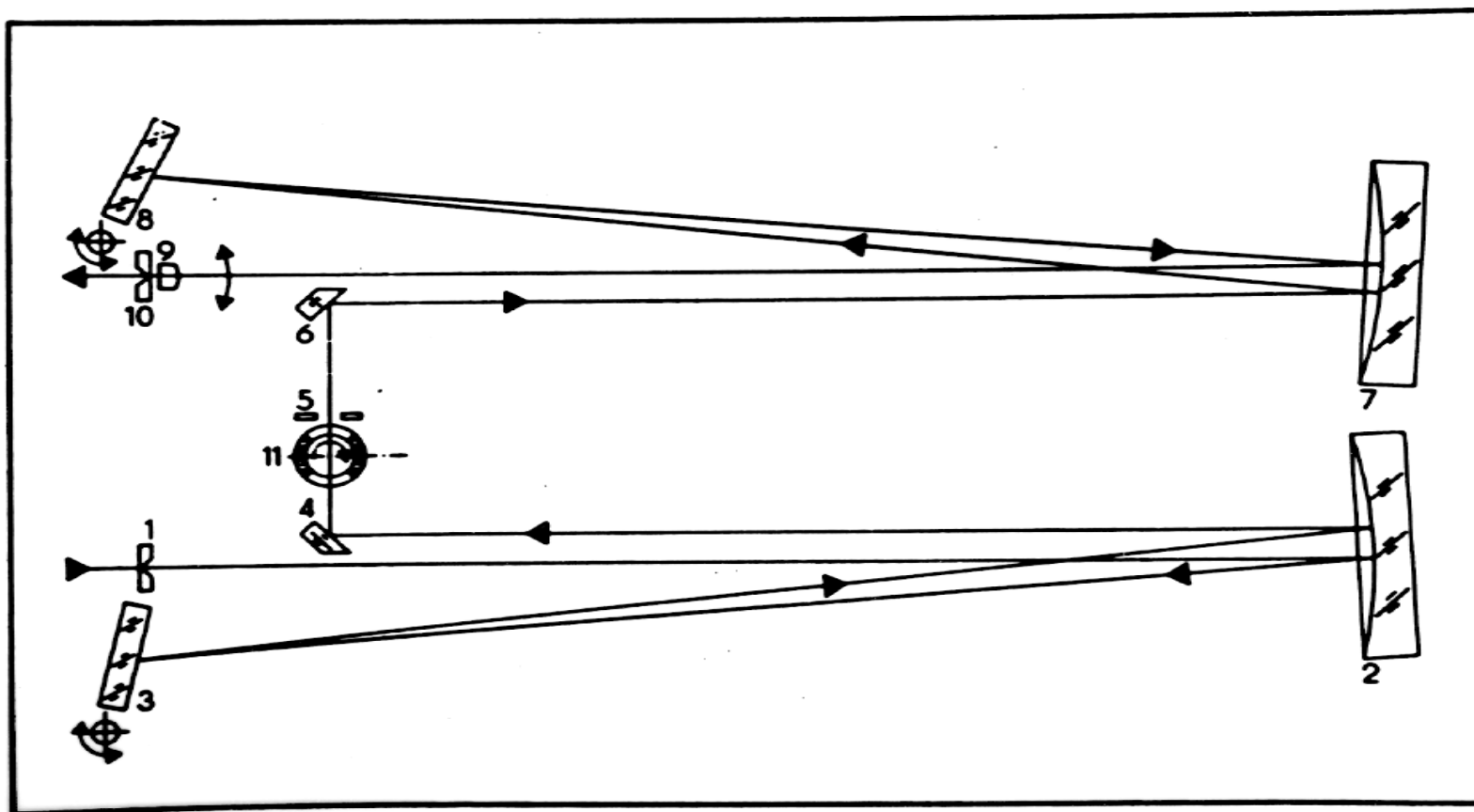
# Interferenční filtr na průchod



obr. 8.10 Interferenční filtr na průchod

- 4 — svazek dopadajících, 1'—4' — svazek prepustených, 1''—4'' — svazek odražených
- $d$  — hrúbka

# Dvojitý monochromátor



Obr. 3.9 Optické schéma monochromátoru GDM-1000. 1 – vstupní štěrba, 2 a 7 dutá zrcadla, 5 – pevná štěrba pro omezení rozptýleného záření, 3 a 8 – rovinné mřížky, 9 – korekční čočka, 10 – výstupní štěrba, 11 – modulátor záření.



# Kvantová optika

# Foton

- Energie fotonu:

$$E = h\nu = \frac{h}{\lambda_0}$$

- Hmotnost fotonu:

$$m = \frac{h\nu}{c_0^2} = \frac{h}{\lambda_0 c_0^2}$$

- Foton  $\lambda_0 = 570 \text{ nm}$

$$(\nu = 5,26 \cdot 10^{14} \text{ Hz})$$

$$m = 3,9 \cdot 10^{-34} \text{ kg}$$

$$(m_e = 9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg})$$

$$E = 2,1 \text{ eV}$$

$$E = 170 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$$

$$E = 2,82 \cdot 10^{-25} \text{ J}$$

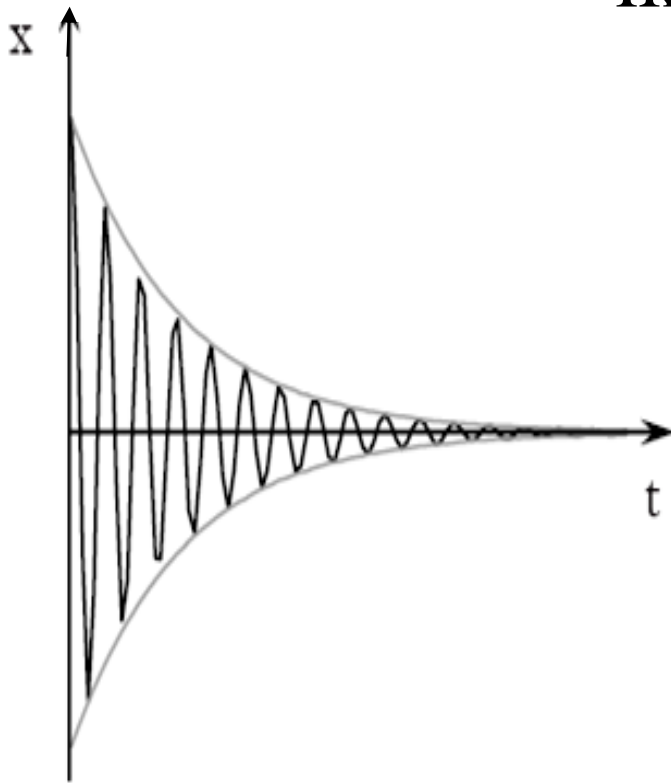


# Foton jako diskrétní částice

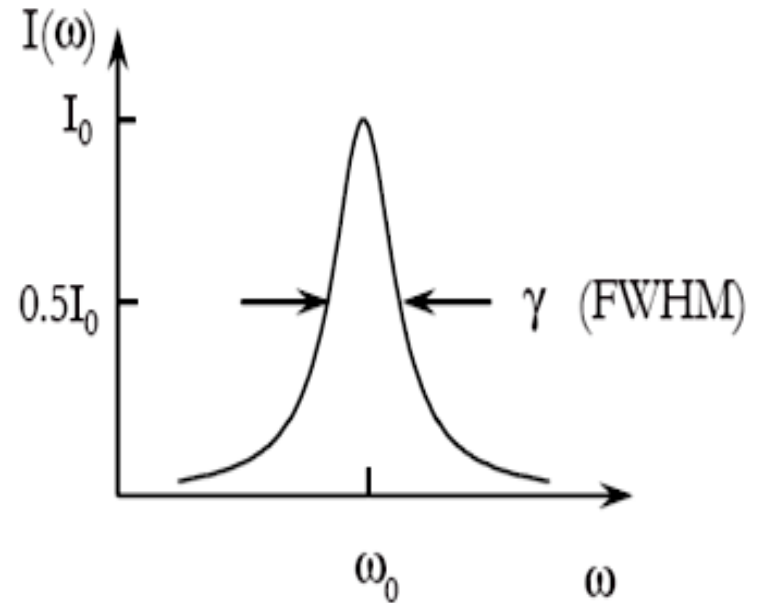
- Záření černého tělesa: Teplotní závislost vyzařování a jeho spektrální rozložení
- Fotoelektrický jev: Foton vyráží elektrony
- Comptonův jev: Foton „rozptyluje“ elektrony

# Přirozená šířka spektrální čáry

$$A_{ik} = \gamma = 1/\tau$$



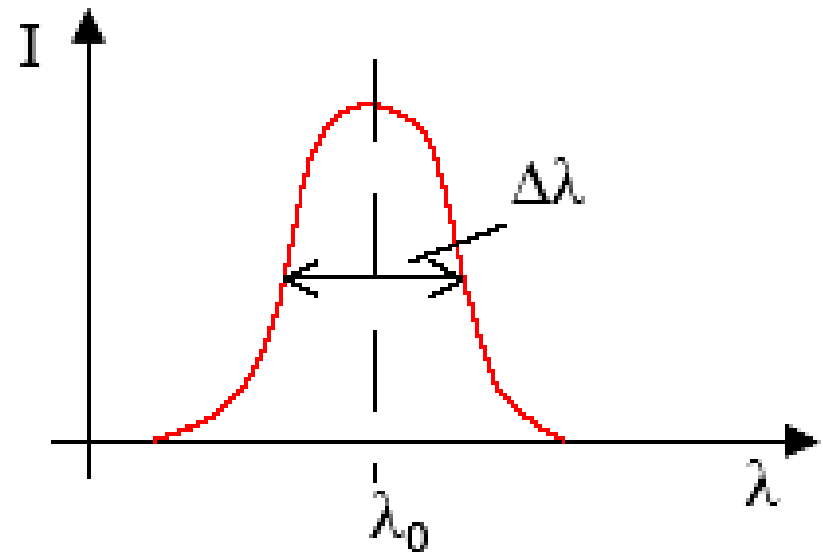
$\mathcal{F}$   
 $\Rightarrow$



# Vlnový balík (klubko)

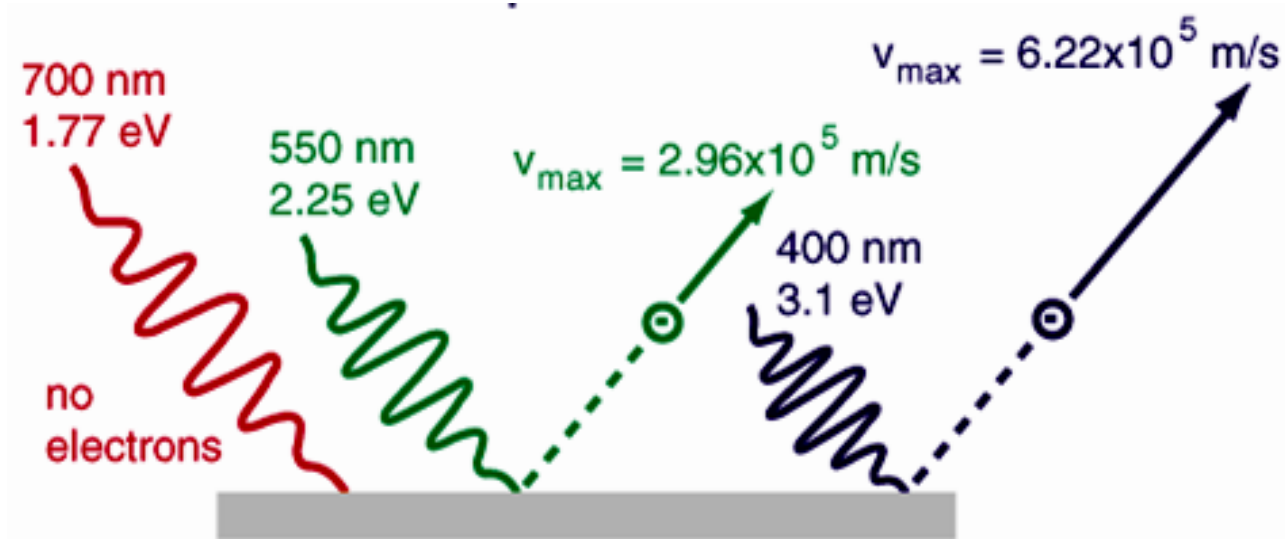
- Představa existence vlnových klubek souvisí s tím, že světlo se nechová jako monochromatické vlnění. Monochromatické světlo neexistuje, takové světlo charakterizujeme střední vlnovou délkou  $\lambda_0$  a příslušným oborem  $\Delta\lambda$ . Délka vlnového balíku:

$$\delta = \frac{\lambda^2}{\Delta\lambda}$$



	$\lambda_0$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)	$\delta$ ( $\mu\text{m}$ )
spektrální čára	500	0,1	2500
interferenční filtr	500	10	25
červený filtr	650	100	4,2
bílé světlo	550	200	1,5

# Einsteinova rovnice fotoelektrického jevu



Příklad: draslík,  $A_v = 2 \text{ eV}$  nutná pro emisi elektronu

$$h\nu = \frac{m_0 v^2}{2} + A_v$$

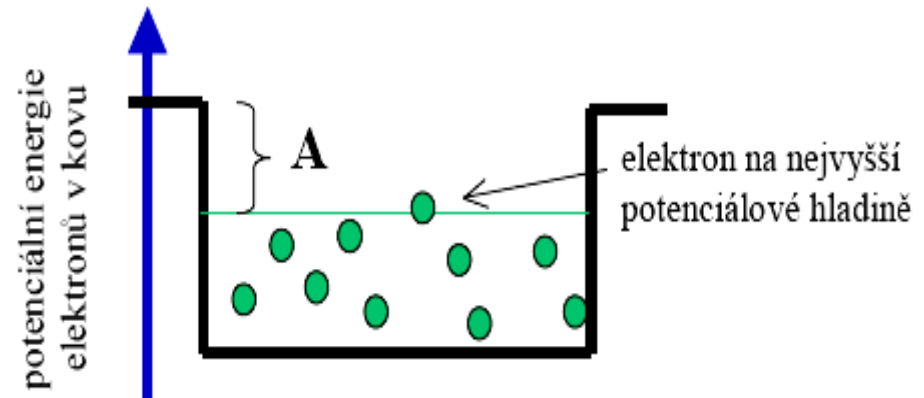
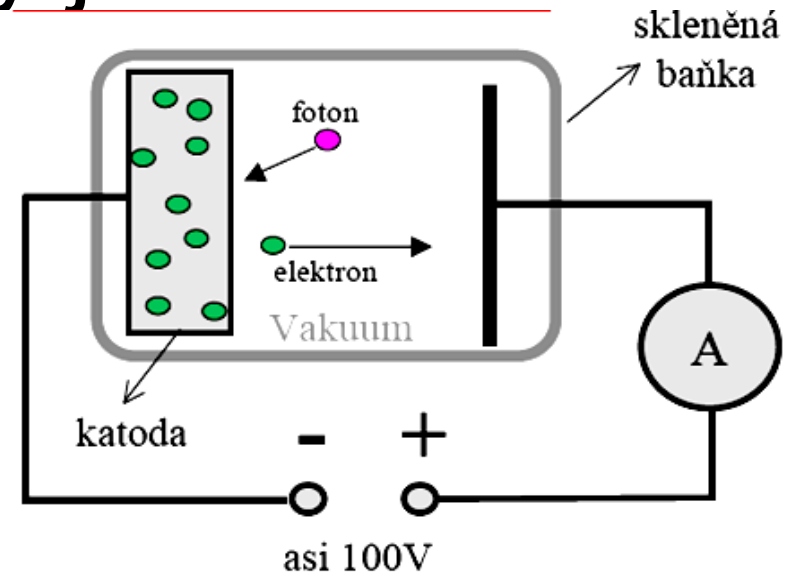
# Fotoelektrický jev

- Vnější fotoelektrický jev se vyznačuje tím, že záření dopadající na polovodičový krystal vyvolá elektronovou emisi, tzn. že elektrony (fotoelektrony) vystupují z krystalu.
- Vnitřní fotoelektrický jev se vyznačuje tím, že při dopadu záření volné nosiče nevystupují z krystalu, ale změní svou energii (energetickou hladinu). Tak se elektrony z valenčního pásu polovodiče dostanou do vodivostního pásu a způsobí vlastní vodivost polovodiče (generace párů elektron — díra).
- Vnitřní fotoelektrický jev ve spojení s působením elektrických nebo magnetických polí v polovodiči můžeme dále dělit na fotonapěťový (fotovoltaický) jev, fotomagnetoelektrický jev, fotovodivostní jev apod.

# Vnější fotoelektrický jev - fotonka

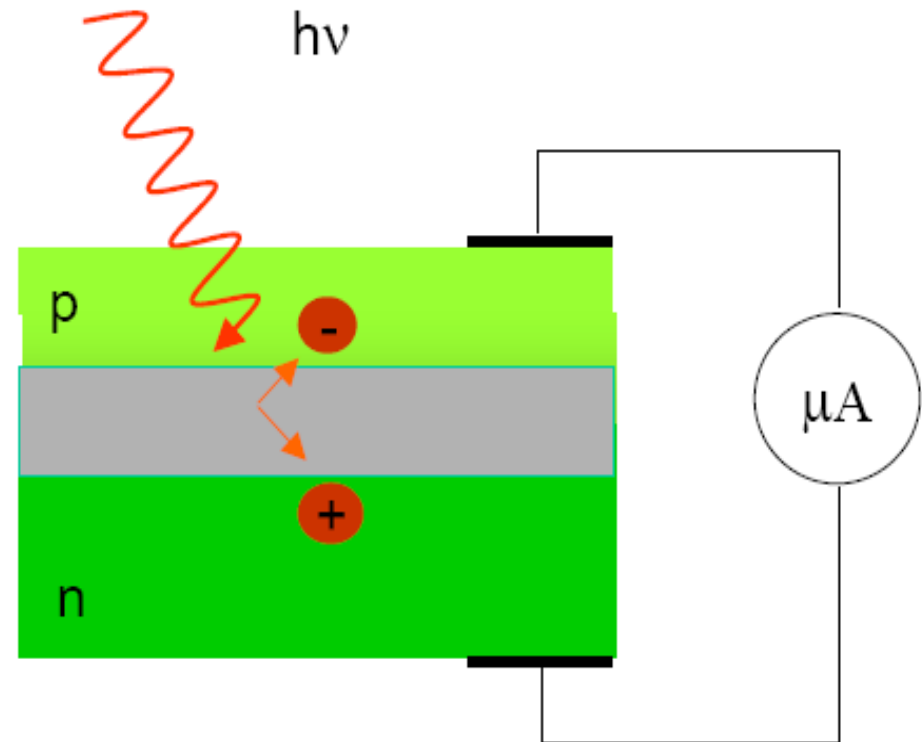
- Elektrony opustí katodu (nastane fotoefekt), až jim foton předá svou energii, s jejíž pomocí jsou teprve schopny překonat **okraj myšlené nádoby** (kovu), v níž jsou uzavřeny.
- Energie fotonu:  $E = h\nu$
- Podmínka vzniku fotoefektu:

$$A < h\nu$$



# Vnitřní fotoelektrický jev - fotodioda

- Foton pronikne horní vrstvou polovodiče, v oblasti p-n přechodu je absorbován a vygeneruje pár elektron – díra. Tímto procesem, kterému se říká **vnitřní fotoefekt**, vznikne elektrický **fotoproud**. Důležitou roli zde hraje i závislost absorpce na  $\lambda$ .





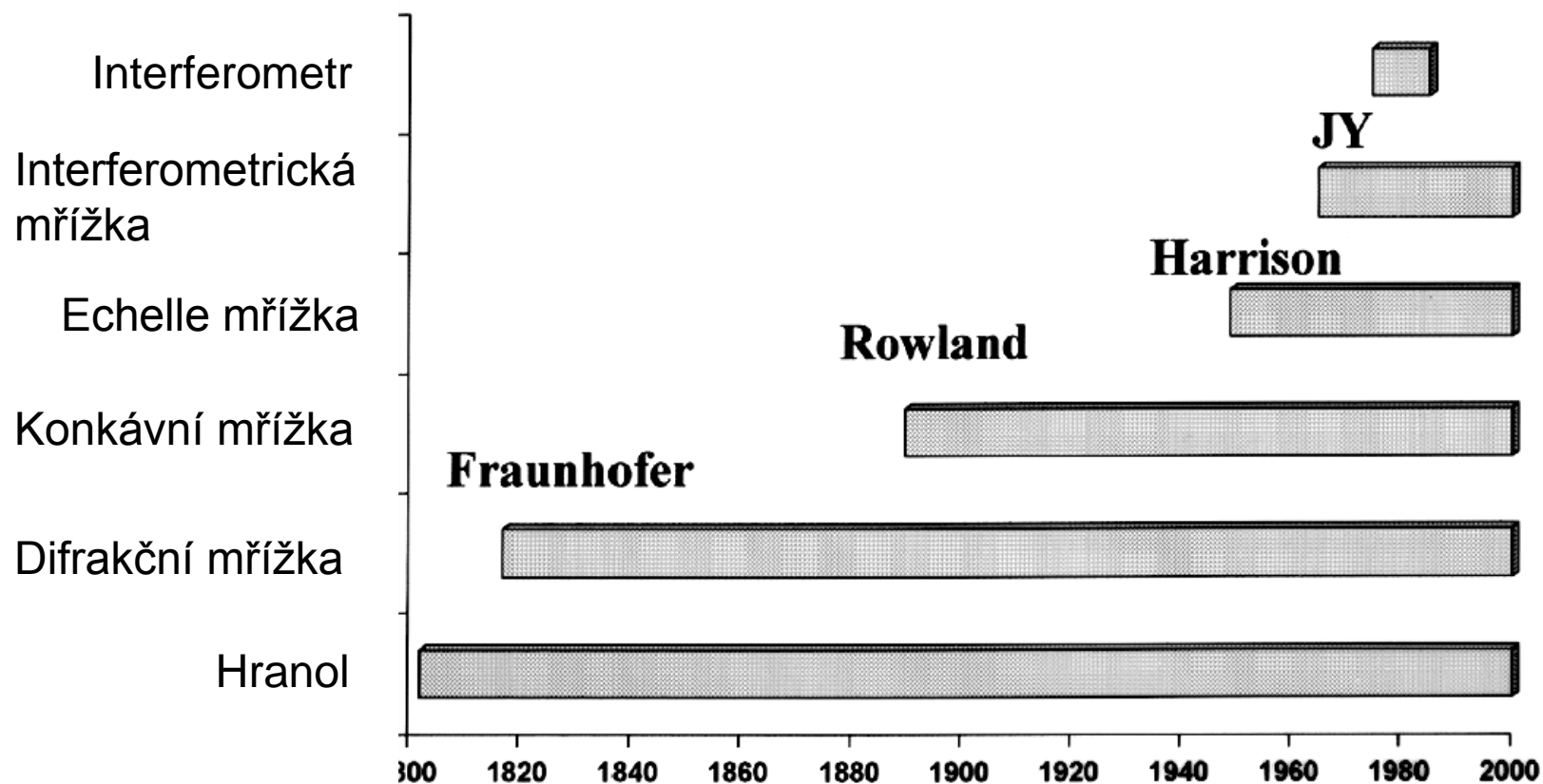
# Optika spektrometrů



# Disperzní moduly

- Prvním disperzním prvkem byl **hranol**. V současnosti se používá ve specifických konstrukcích (např. zkřížená disperze)
- **Difrakční mřížka** z periodických paralelních vrypů či linií na rovném nebo konkávním podkladu způsobující periodické změny amplitudy a fáze dopadají světelné vlny je základním difrakčním prvkem dnešních spektrometrů.
- **Interferometry** pracují ve vysokých řádech spektra (100 – 100 000). Vyznačují se obvykle extrémním  $R$  (až  $10^8$ ) a malým  $\Delta\lambda$  (nm – pm).

# Historie disperzních prvků



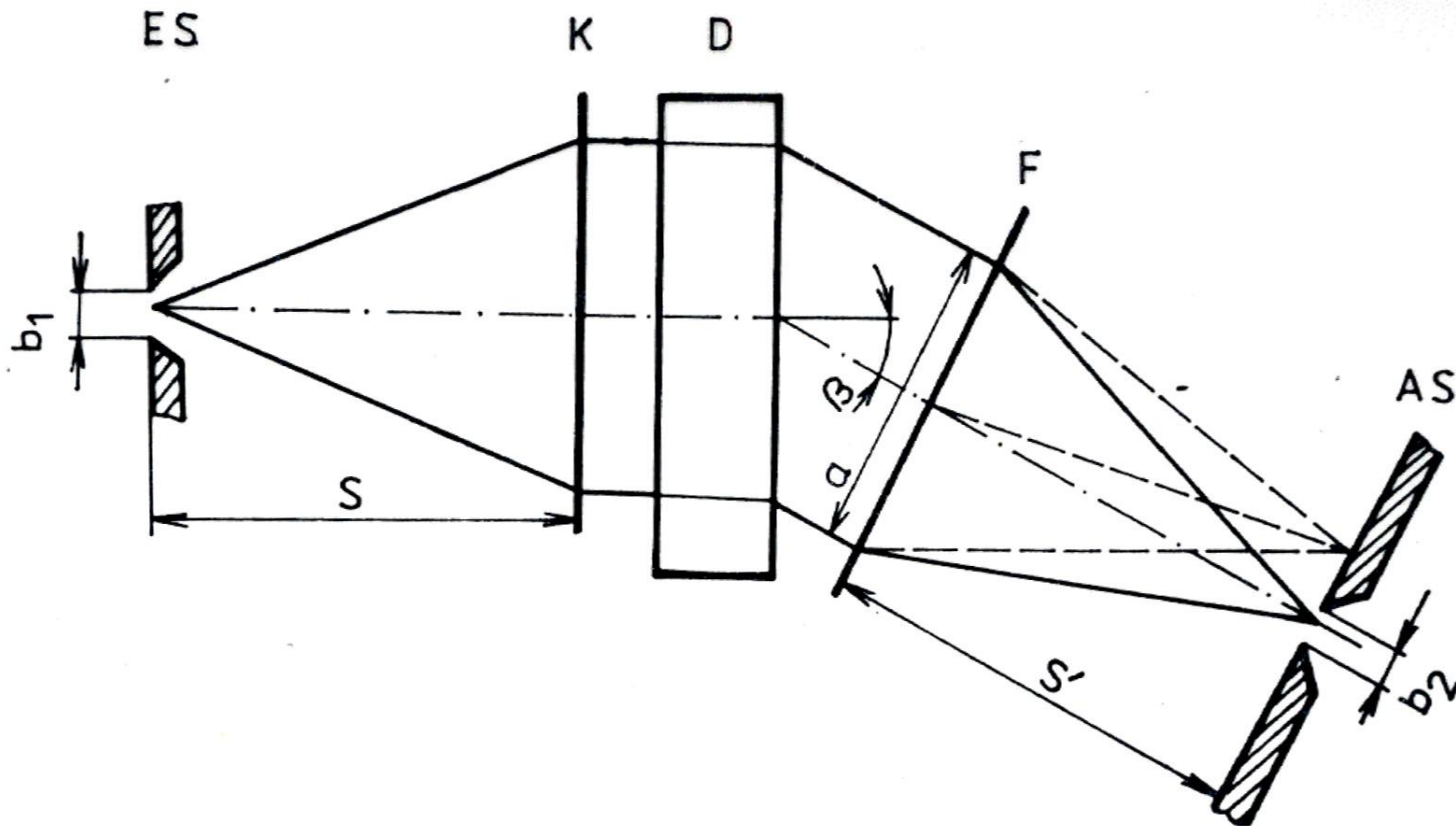
# Spektrální přístroj

Spektrometr slouží k separaci záření podle vlnových délek a k měření emise spektrálních čar. Jako disperzní členy se používají mřížky na odraz. V současné době jsou komerčně vyráběny 3 typy spektrometrů:

- spektrometry s rovinnou mřížkou montáže Czerny-Turner nebo řidčeji Ebert-Fastie;
- spektrometry s konkávní mřížkou, nejčastěji montáže Paschen-Runge;
- spektrometry s mřížkou typu echelle a děličem spektrálních řádů (hranol).

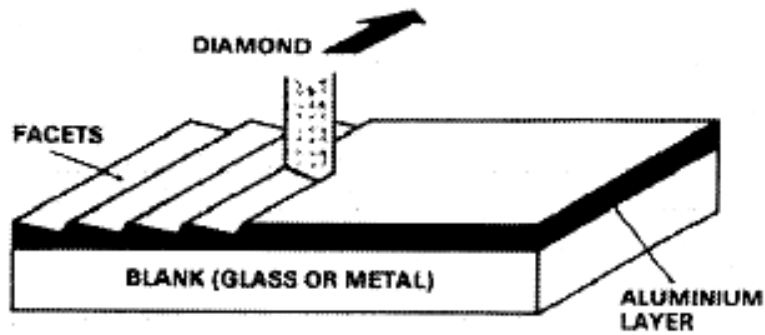
# Součásti spektrometru s rovinnou mřížkou

- osvětlovací soustava,
- vstupní (primární) štěrbina,
- zrcadlový objektiv kolimátoru
- rovinná mřížka, (u spektrometru s konkávní mřížkou místo rovinné zastává mřížka současně funkci kolimátorového a kamerového zrcadla),
- zrcadlový objektiv kamery,
- výstupní štěrbina,
- detektor



Monochromatorprinzip (Schnitt senkrecht zu den Spalten).  
*ES* — Eintrittspalt der Breite  $b_1$ ; *K* — Kollimatoroptik; *D* — Dispersor; *F* — Fokussierungs- oder Kameraoptik; *AS* — Austrittspalt der Breite  $b_2$ ;  $a$  — Aperturbreite

# Rytá mřížka

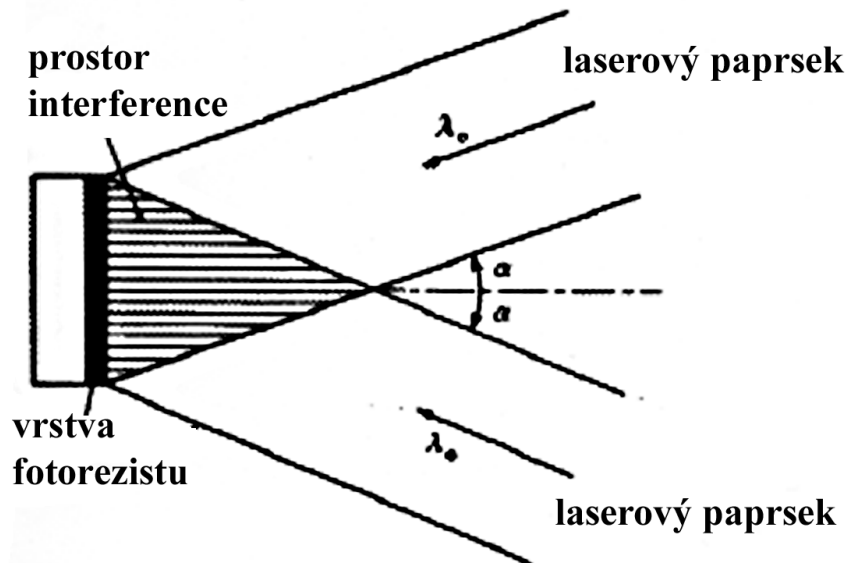


## Typical specifications

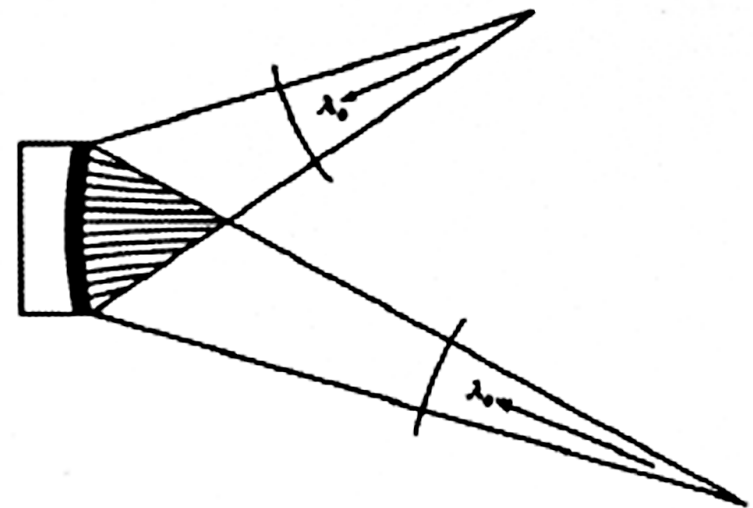
Spectral range : 200 nm to 100  $\mu\text{m}$   
Groove density : 1800 lines/mm down to 20 lines/mm  
Efficiency : 70 % at the blaze wavelength

# Holografická (interferenční) mřížka

- Příprava holografických mřížek – nejprve se exponuje fotorezist interferenčním obrazcem laserových paprsků a poté následuje povrchová úprava s tvarováním profilu vrypů iontovým leptáním.

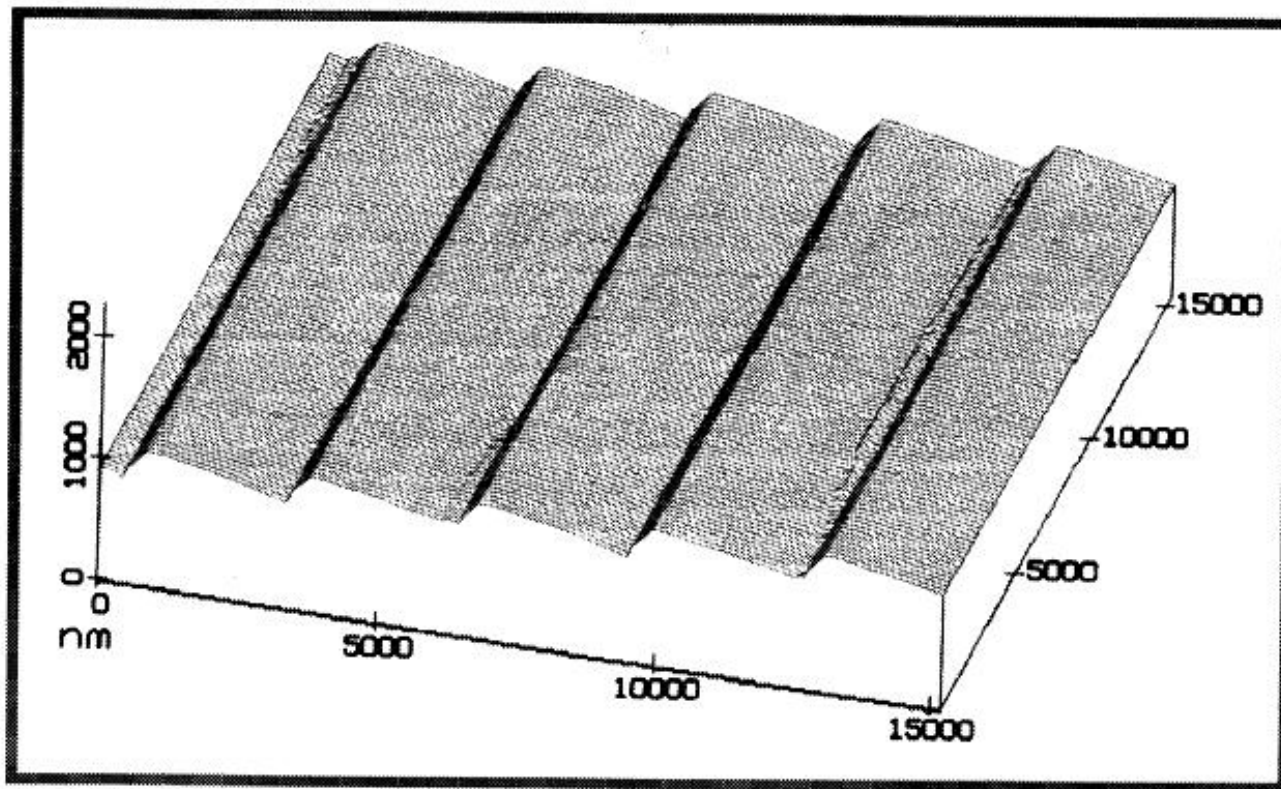


Příprava rovinné holografické mřížky s rovnými a ekvidistantními drážkami



Příprava konkávní mřížky s korekcí optických aberací s nelineárně rozloženými zakřivenými drážkami

# Holografická mřížka profilovaná iontovým leptáním



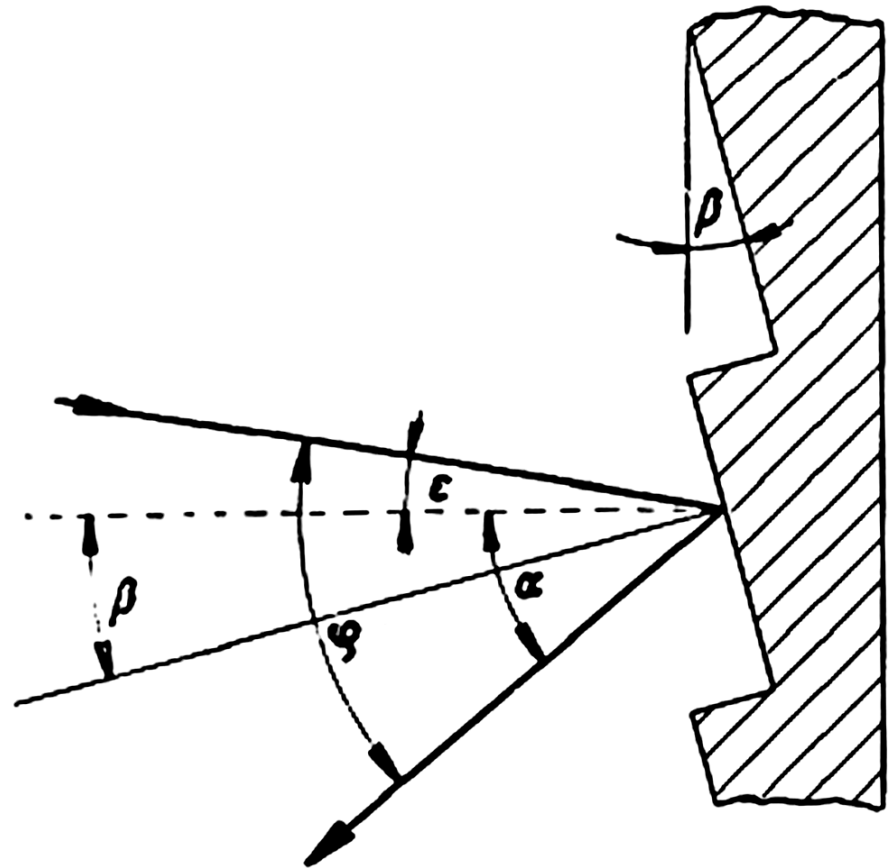
*Blaze profile of an holographic grating blazed by ion etching (STM microscope).*



# Optická mřížka „echelette“

- Zrcadlovým odrazem na delších stěnách vrypu je možné soustředit téměř všechno světlo do určitého, požadovaného úhlu (odlesk, blaze).

$$\sin \beta = \frac{m\lambda}{2a \cos \frac{\varphi}{2}}$$



# Mezní hustota vrypů mřížky

- Mezní vlnová délka, při které ještě dochází k difrakci je určena počtem čar na mm a odpovídá maximální hodnotě úhlů dopadu a difrakce  $90^\circ$ , potom:

$$1 + 1 = \sin \alpha + \sin \beta = k \cdot n \cdot \lambda_{\max} \cdot 10^{-6}$$

$$\lambda_{\max} = 10^6 \frac{2}{k \cdot n}$$

- S mřížkou  $2400 \text{ mm}^{-1}$  lze dosáhnout teoreticky spektrálního rozsahu do  $830 \text{ nm}$ , s mřížkou  $3600 \text{ mm}^{-1}$   $550 \text{ nm}$ , s mřížkou  $2400 \text{ mm}^{-1}$  ve 2. řádu nebo s mřížkou  $4800 \text{ mm}^{-1}$  v 1. řádu  $415 \text{ nm}$  a s mřížkou  $3600 \text{ mm}^{-1}$  ve 2. řádu  $275 \text{ nm}$ . Ve skutečnosti je úhel dopadu vždy menší než  $90^\circ$  a maximální dosažitelná vlnová délka je kratší než teoretická hodnota.

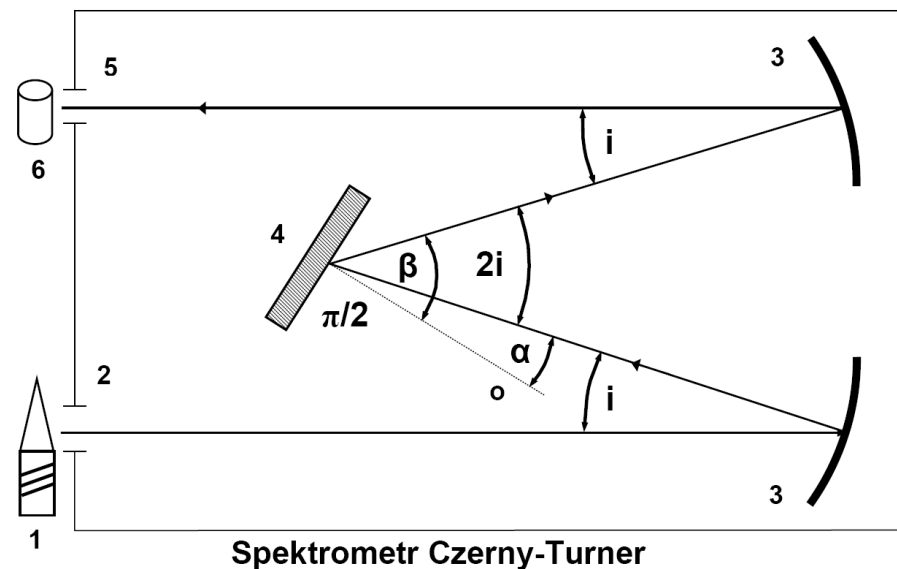
# Disperze monochromátoru s rovinnou mřížkou

Používá se reciproká lineární disperze (nm/mm):

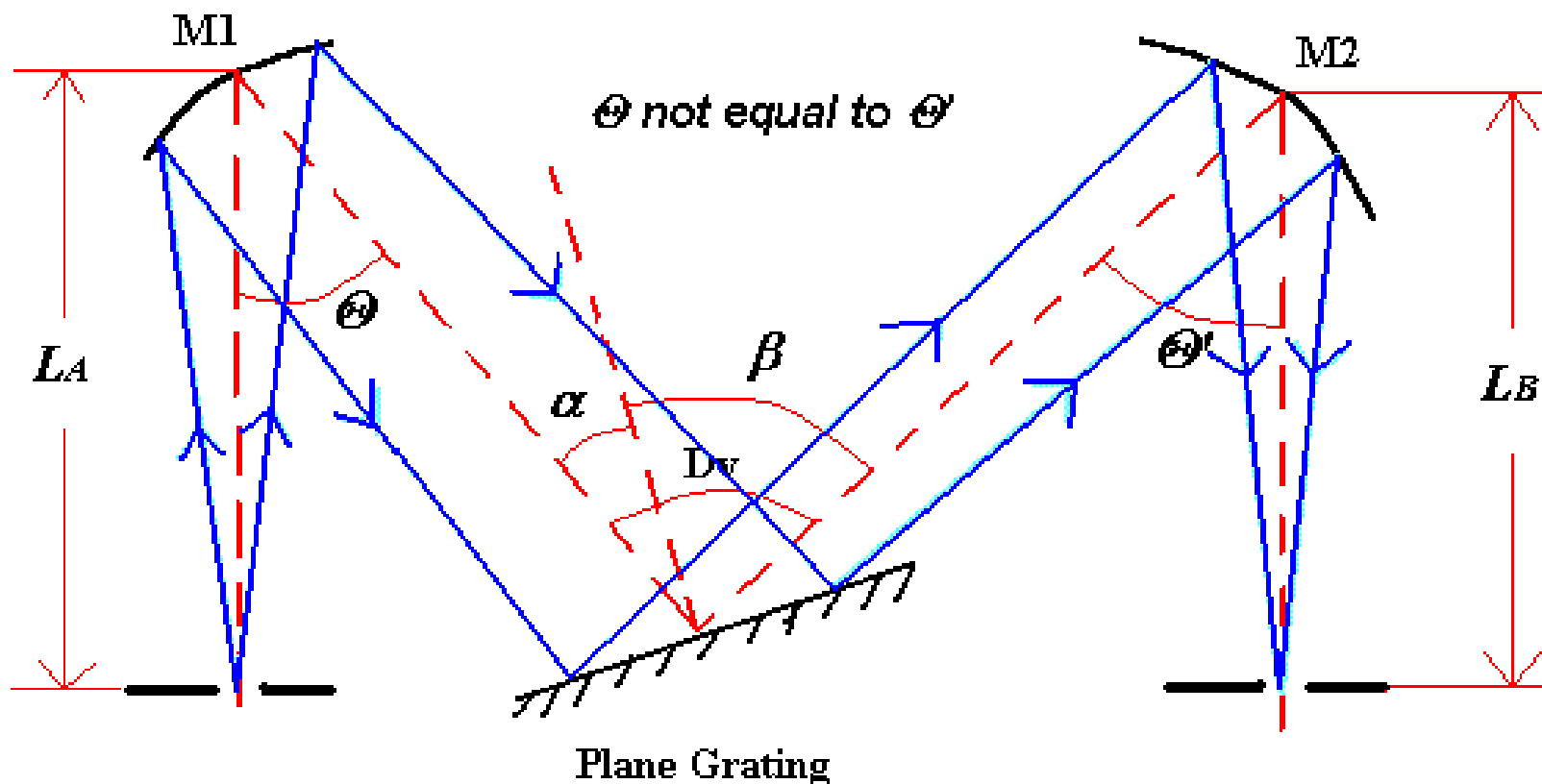
$$\frac{d\lambda}{dx} = \frac{10^6 \cos \beta}{k \cdot n \cdot f} = \frac{\lambda \cdot \cos \beta}{(\sin \alpha + \sin \beta) \cdot f}$$

kde  $f$  je ohnisková délka kamery spektrometru a  $\beta$  je difrakční úhel.

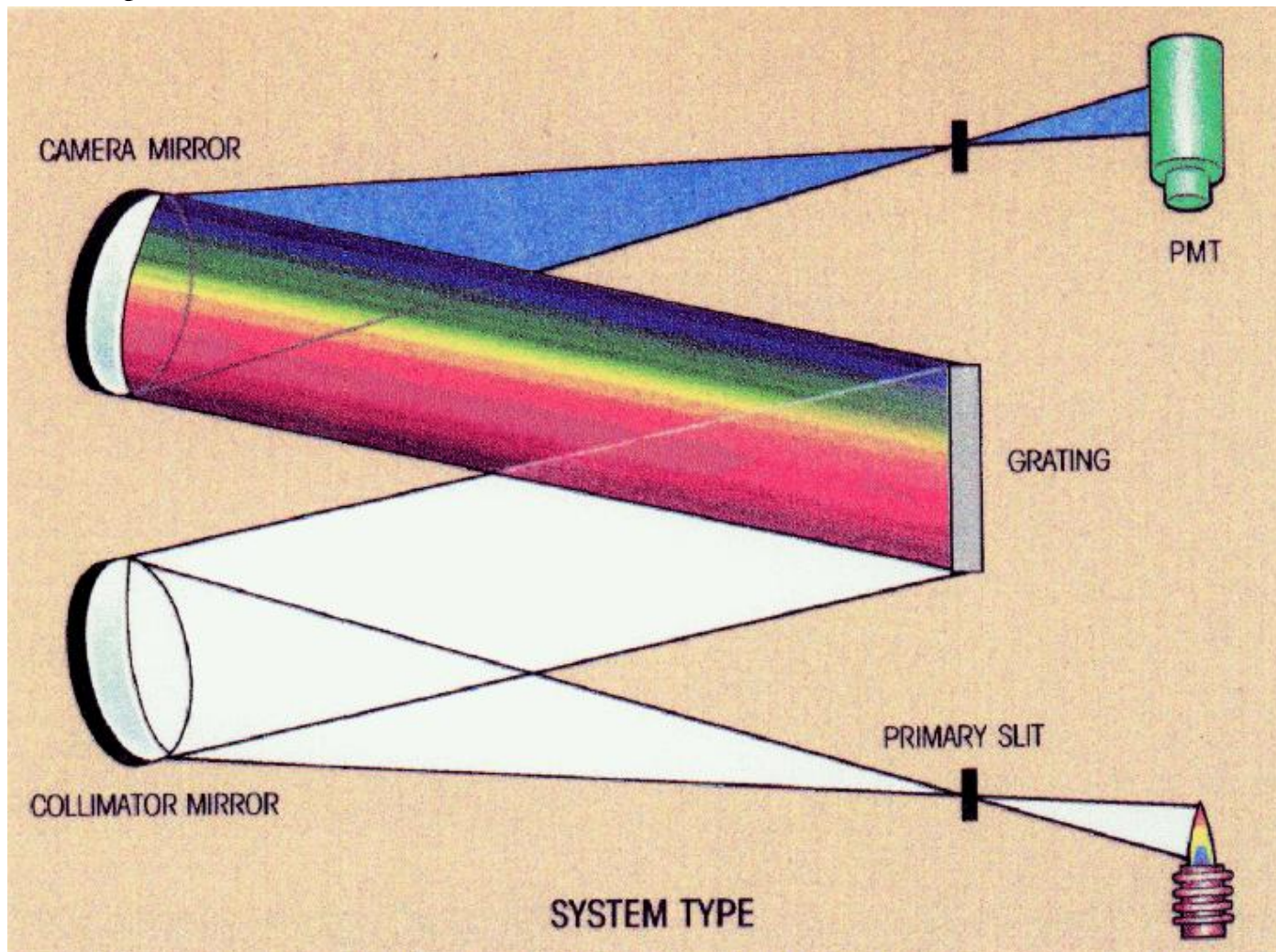
Nejlepší, tedy nejnižší reciproké lineární disperze je dosaženo pro velké úhly  $\alpha$ ,  $\beta$  a velkou ohniskovou vzdálenost kamerového objektivu



# Montáž Czerny-Turner

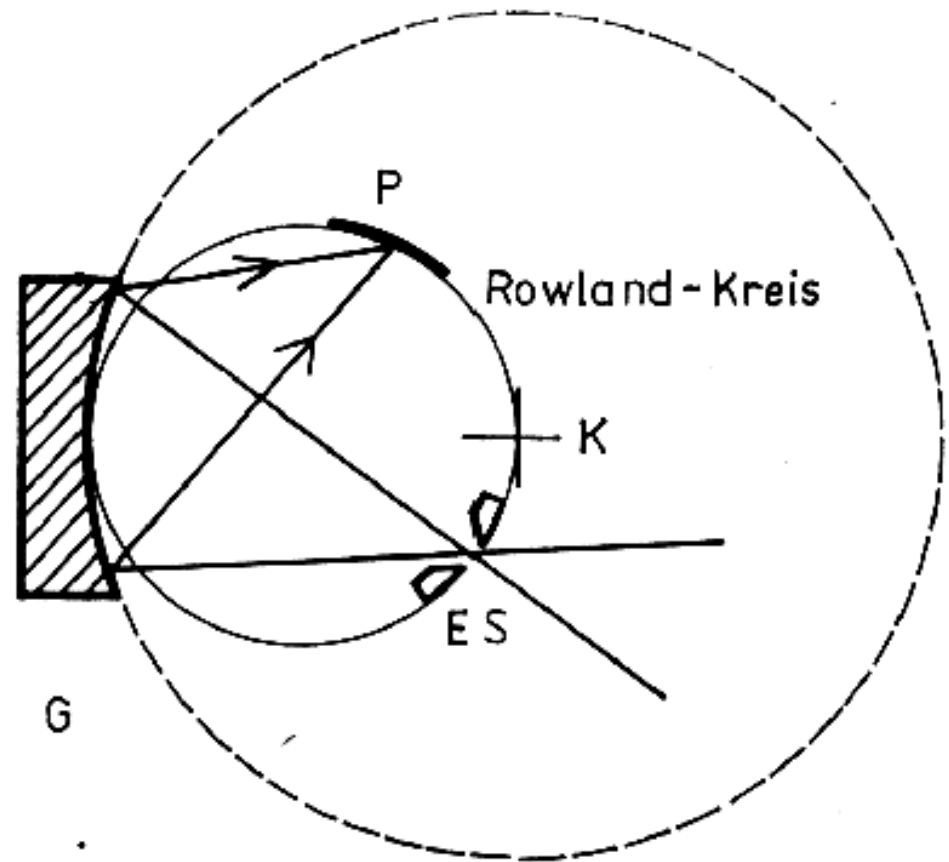


# ICP spektrometr s monochromátorem Czerny-Turner

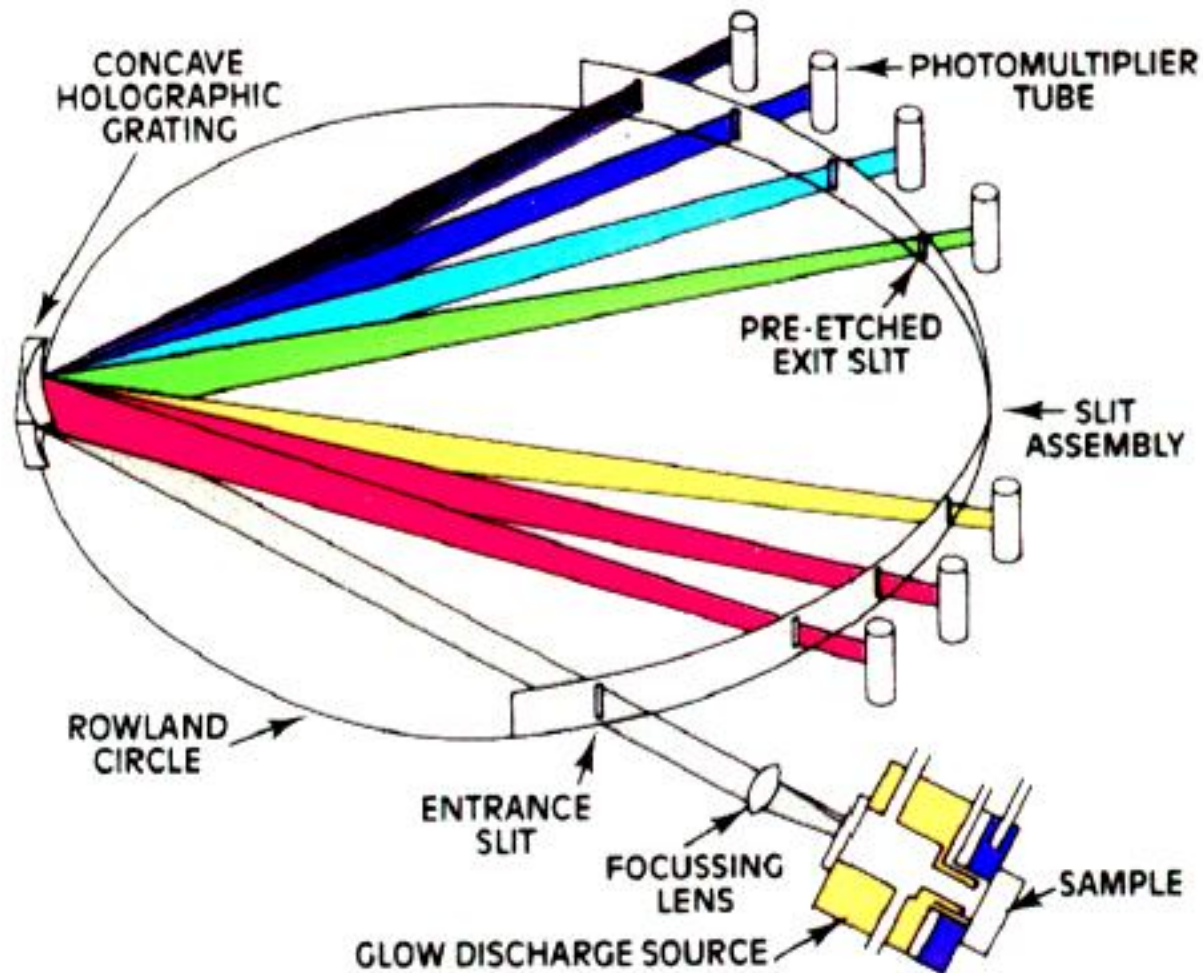


# Montáž Paschen-Runge

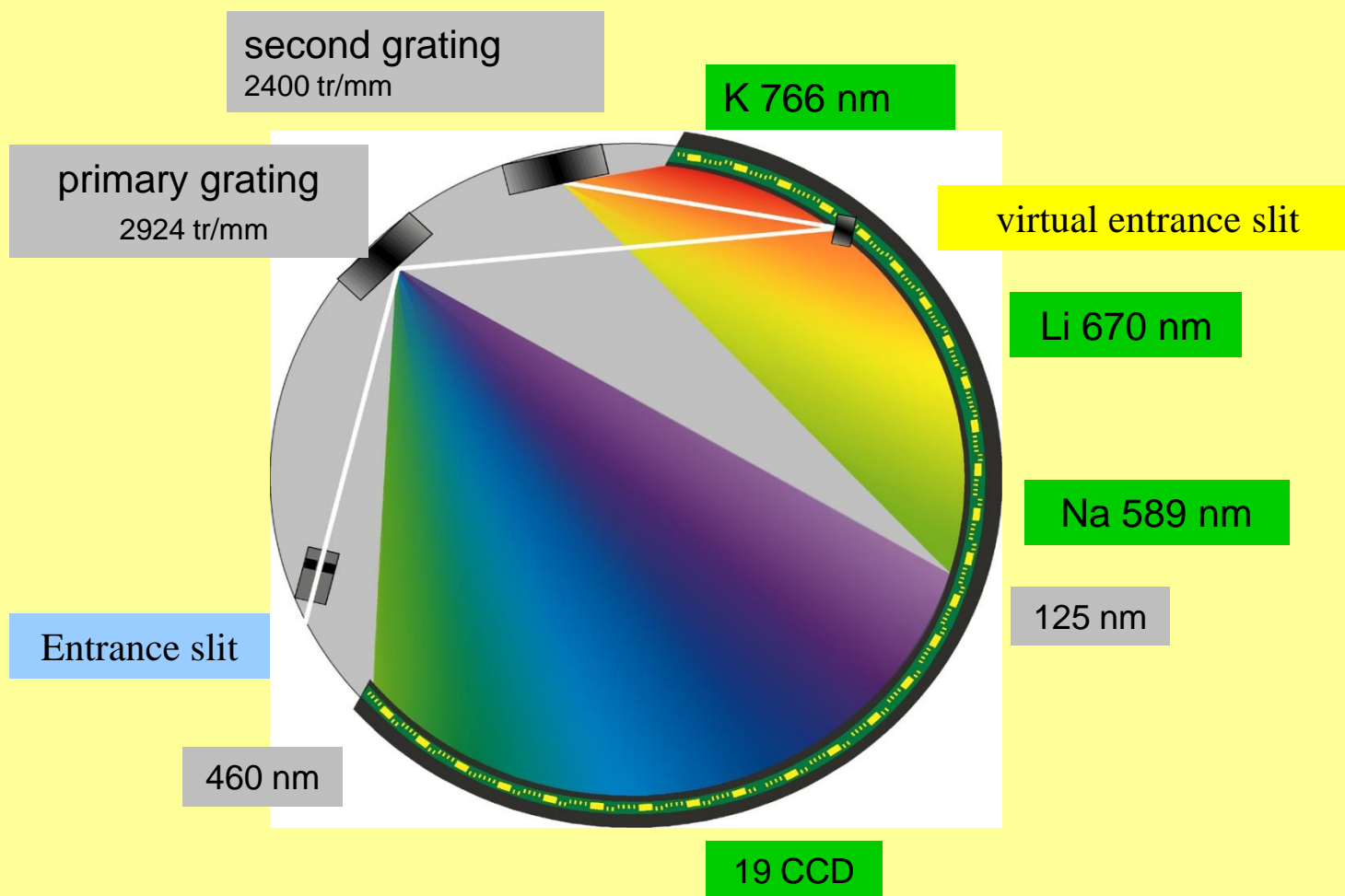
- Nejpoužívanější montáž s konkávní mřížkou.
- Výhody: pouze jedna odrazná plocha, bez optiky na průchod – výhoda ve VUV.
- Nevýhody: silný astigmatismus



# GD spektrometr s PM detekcí



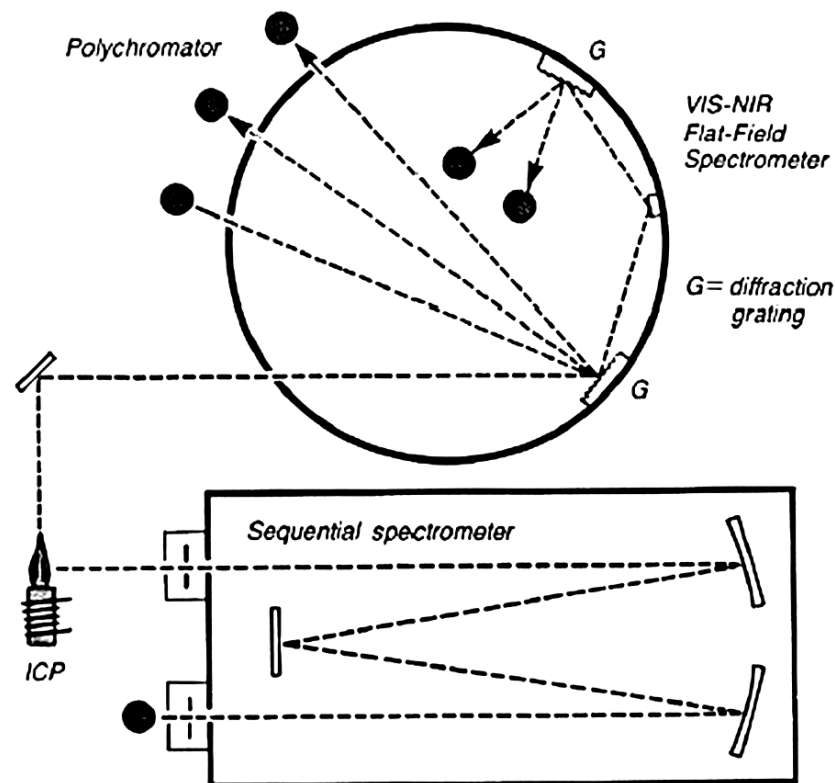
# ICP-OES Spectro Cirros



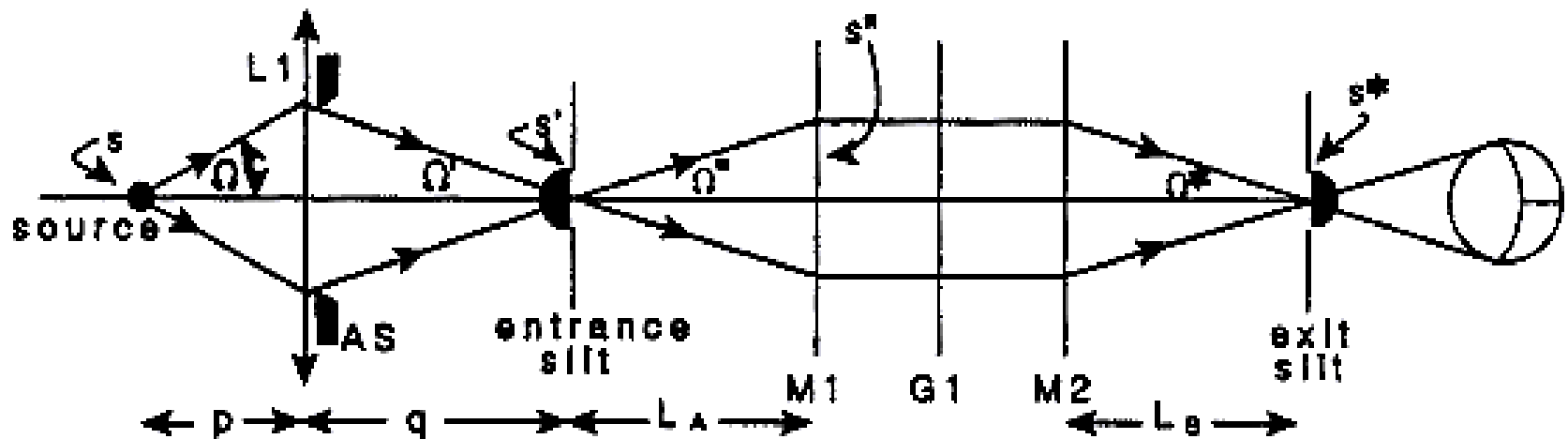


# ICP-OES spektrometr JY Ultrace

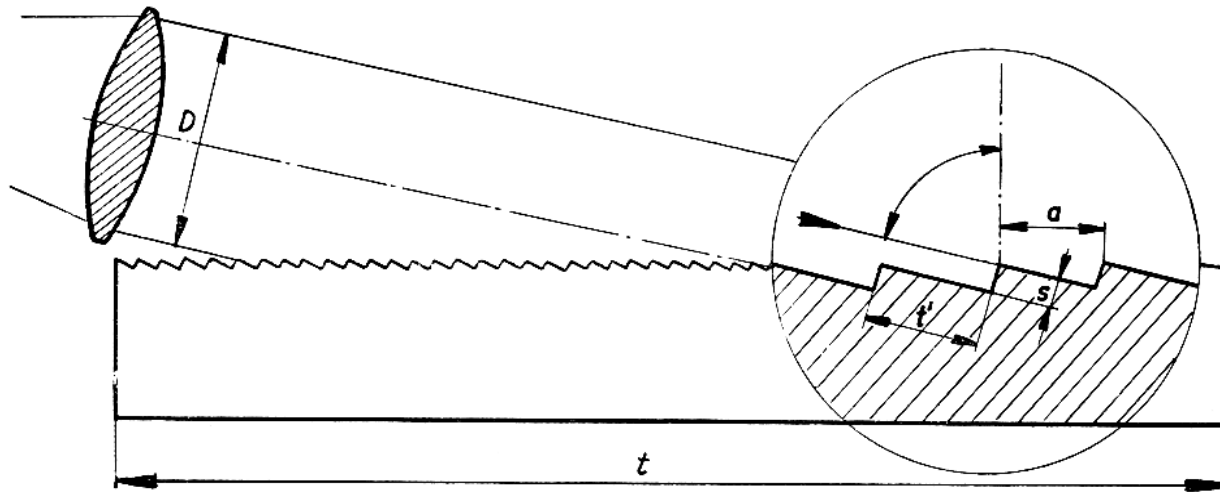
- Kombinace sekvenčního spektrometru (Czerny-Turner) a polychromátoru Paschen-Runge s fotonásobičovou detekcí pro simultánní měření na vybraných čarách. Pro měření ve vzdálenější viditelné oblasti a blízké IR (alkalické kovy) pomocná mřížka.



# Osvětlovací optika monochromátoru

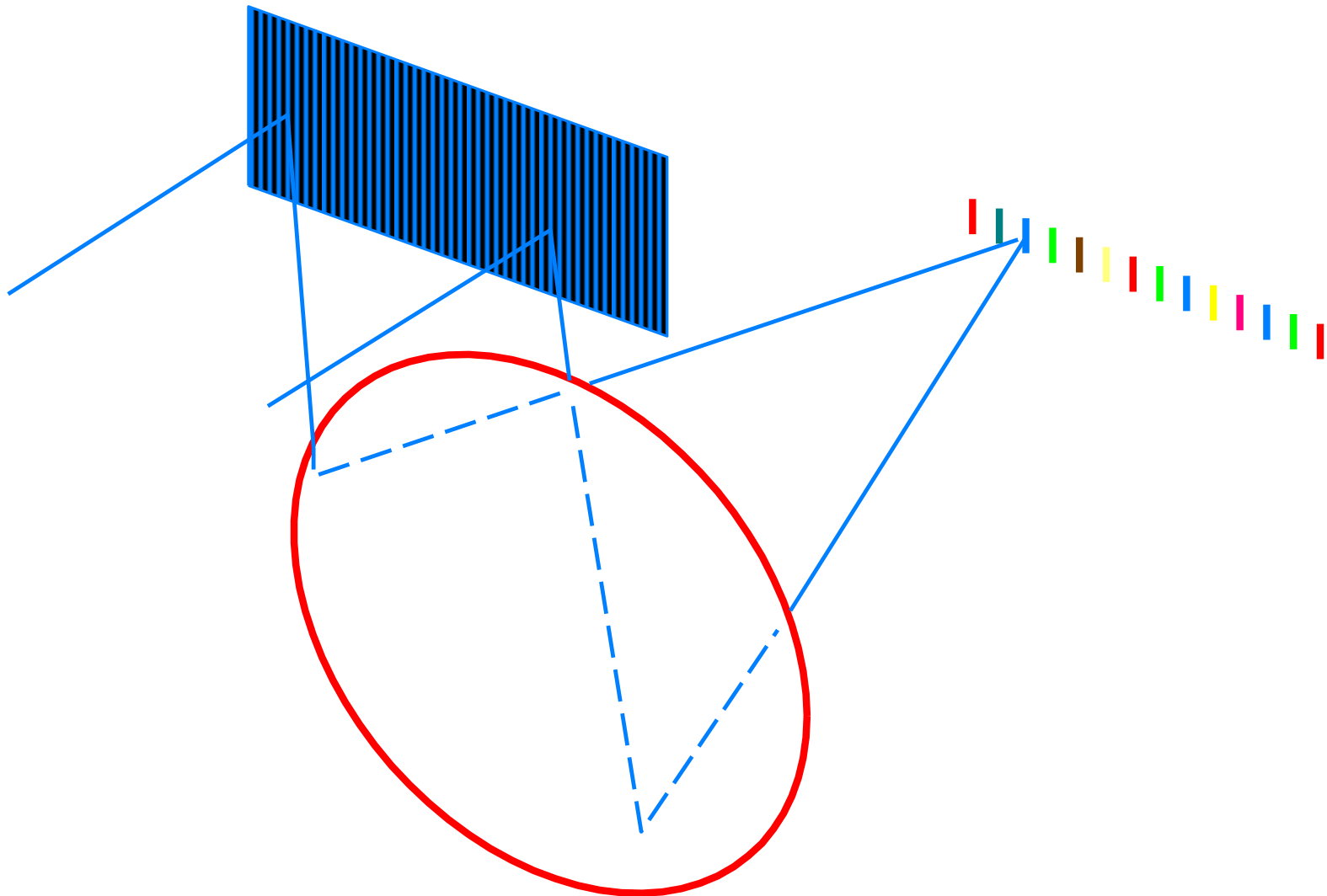


# Mřížka echelle

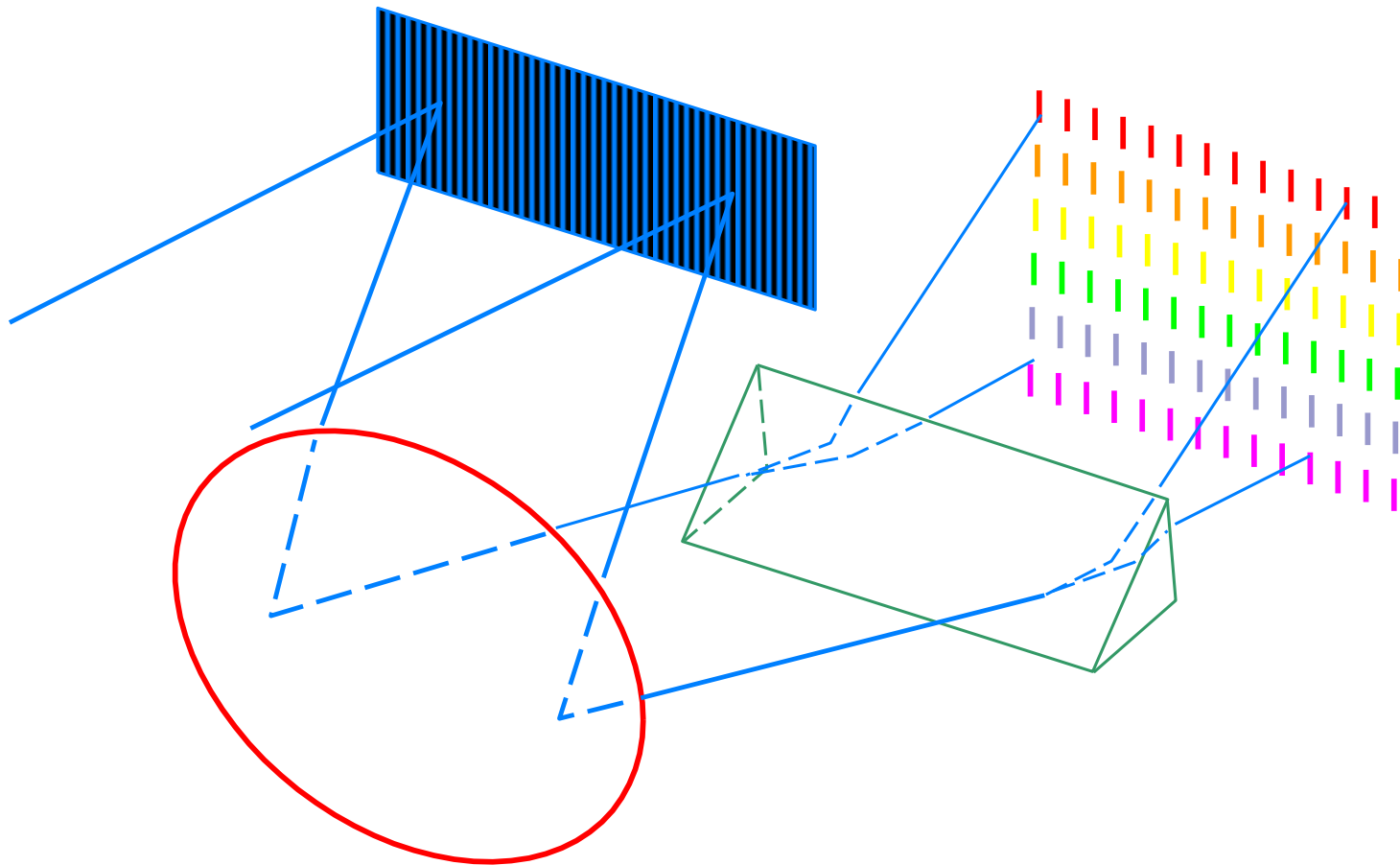


- Tato mřížka tvoří přechod mezi Michelsonovou stupňovou mřížkou („echelon“) a mřížkou „echelette“, která soustřeďuje světlo do úhlu, ve kterém leží jen spektrum určitého řádu.
- Rozlišovací schopnost:  $R=mN$ ,  $m=2t'/\lambda$   
Př.:  $\lambda=500$  nm,  $N=500$ ,  $t'=0,05$  mm  $\rightarrow R=100\ 000$

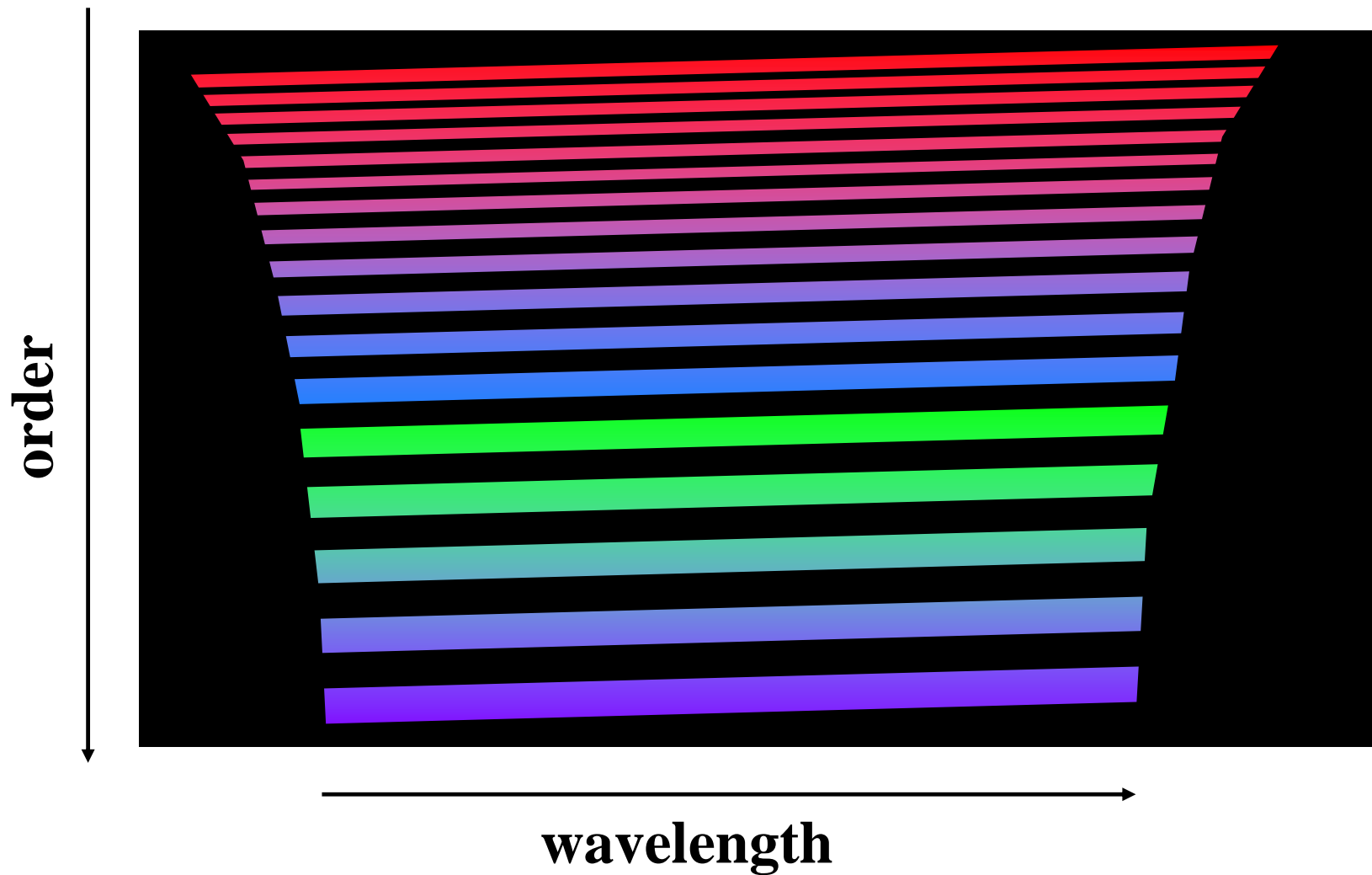
# Překrývající se řády ve spektru mřížky echelle



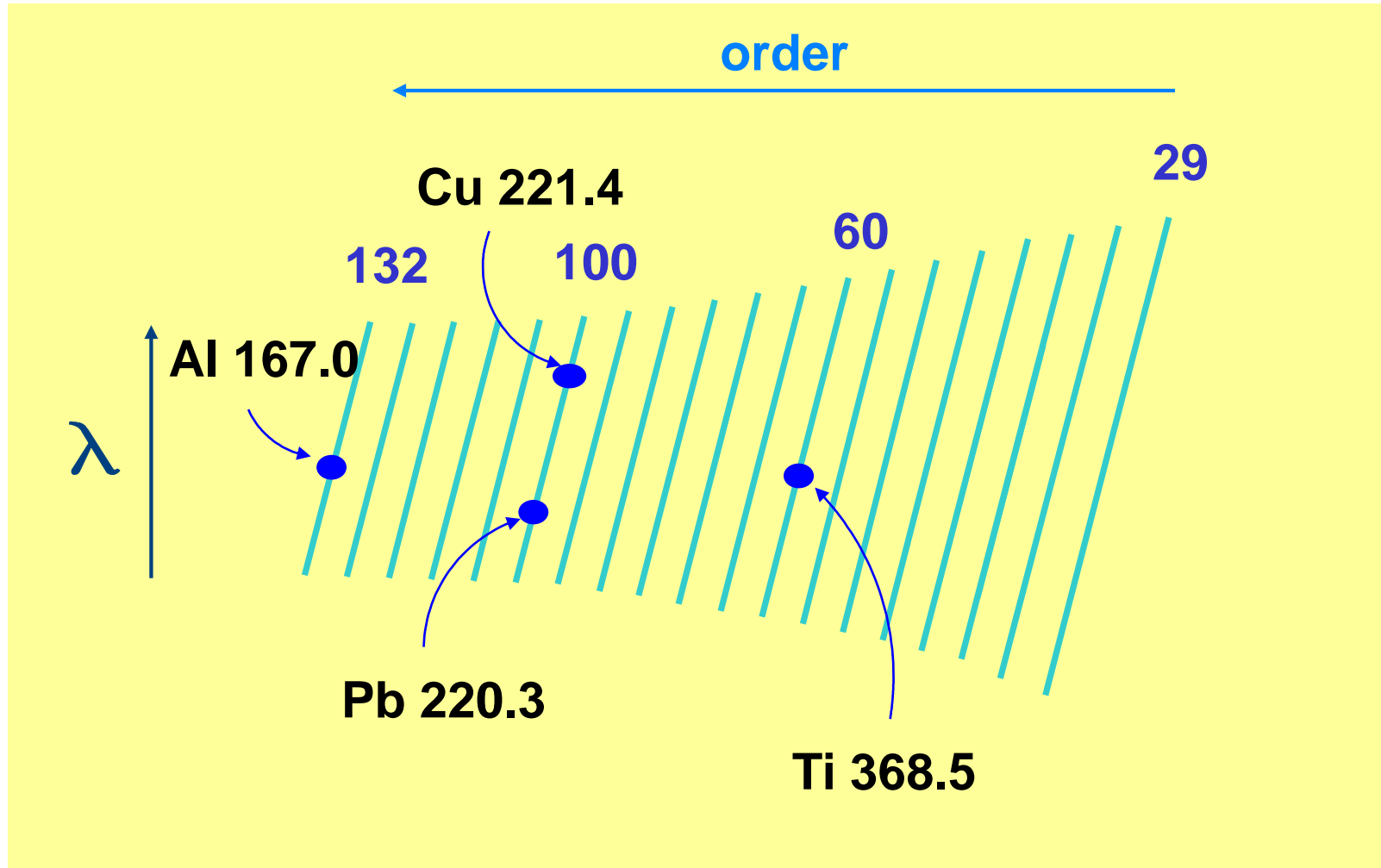
# Zkřížená disperze a echelle mřížka



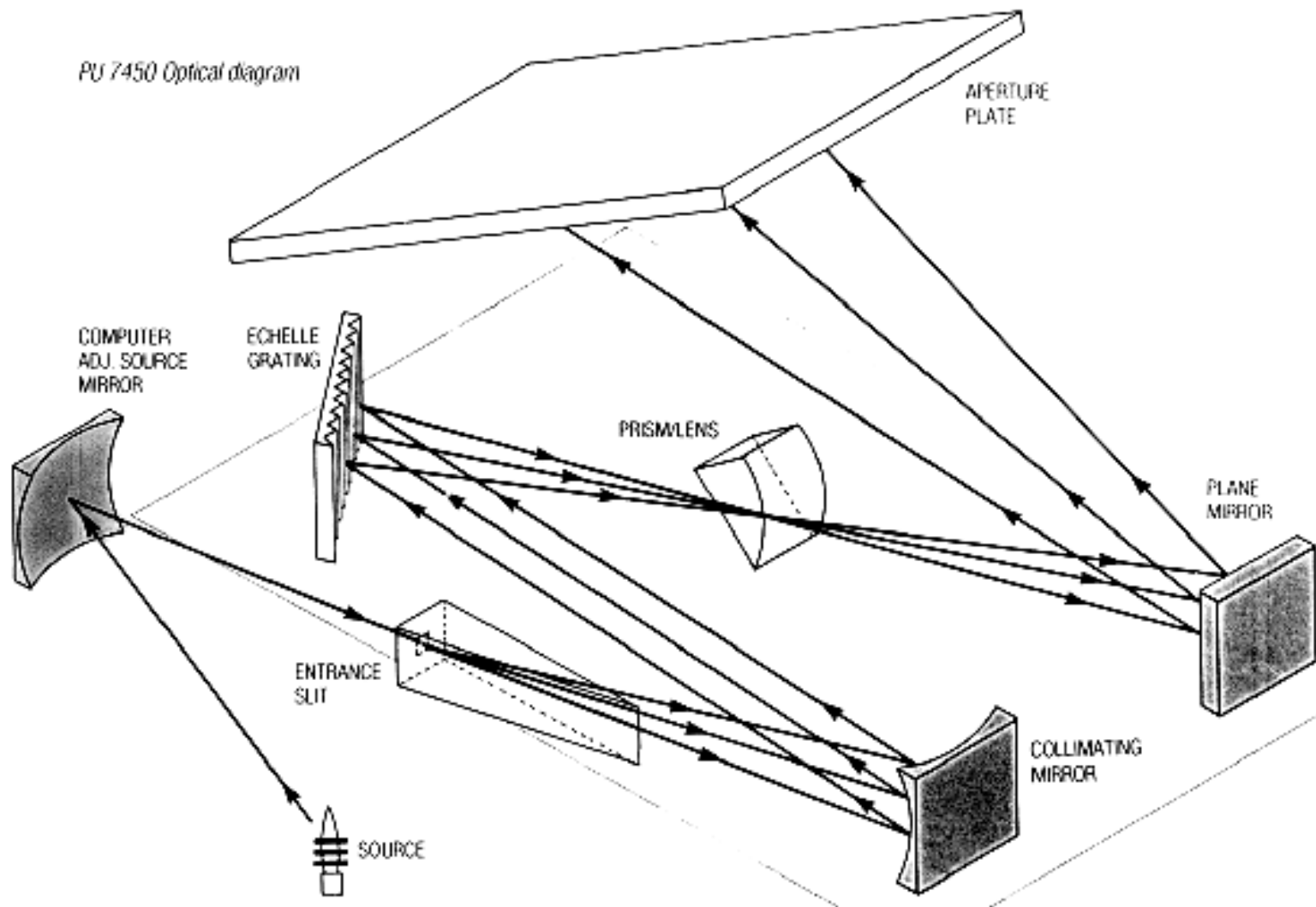
# Echellogram



# Echellogram

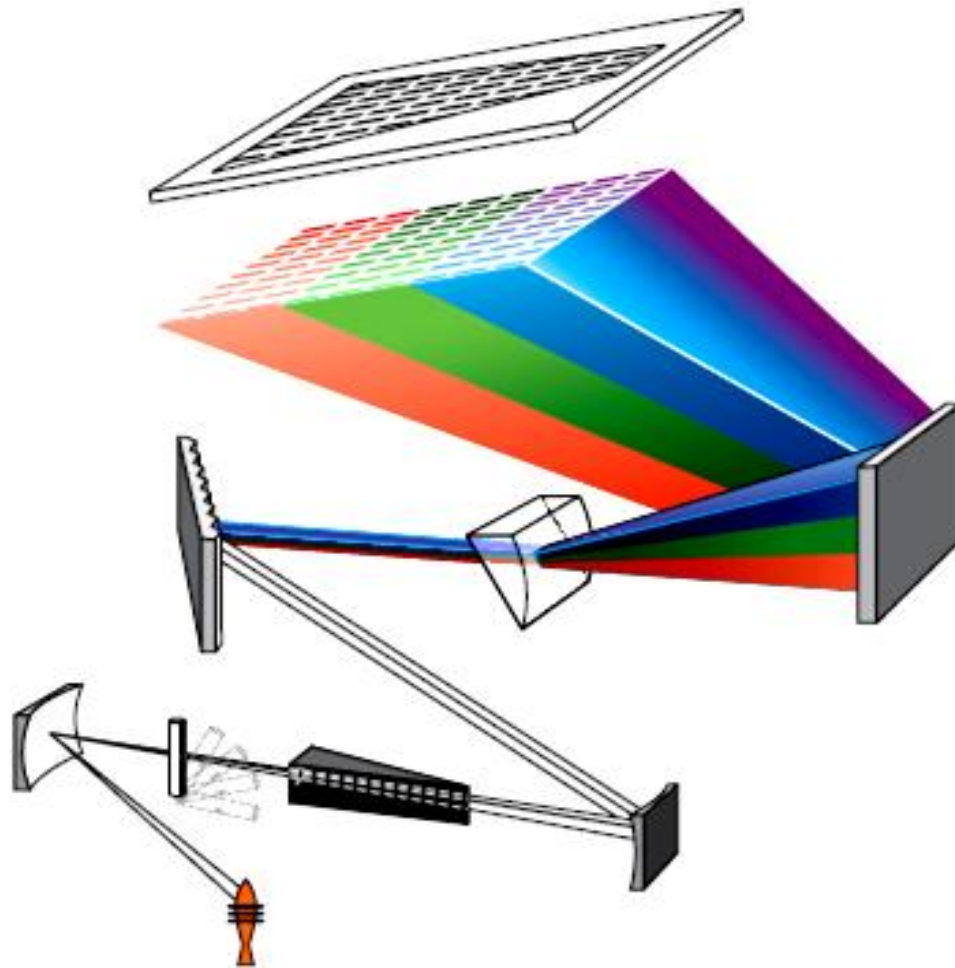


# Echelle spektrometr PU 7450

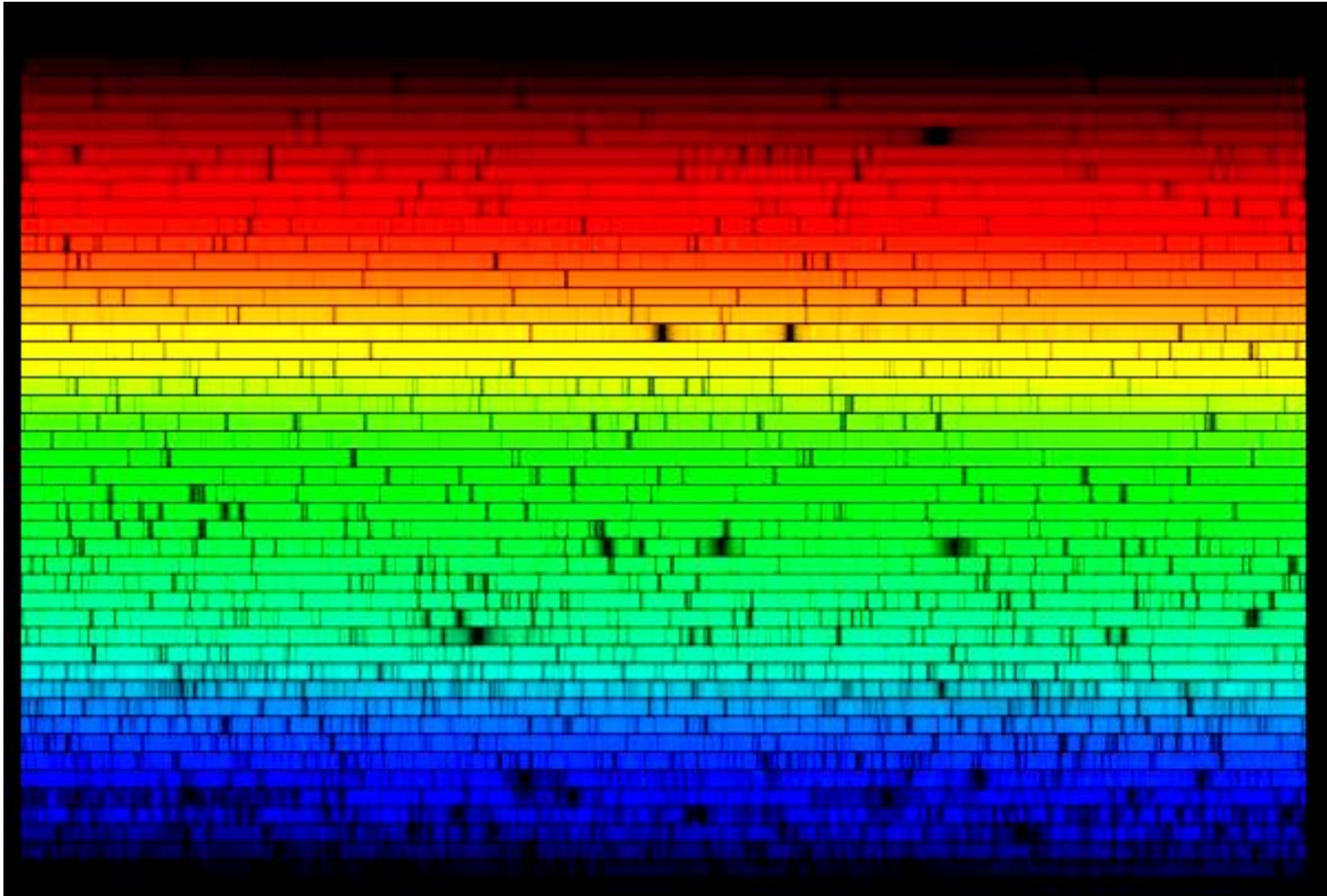




# Spektrometr s s echelle mřížkou



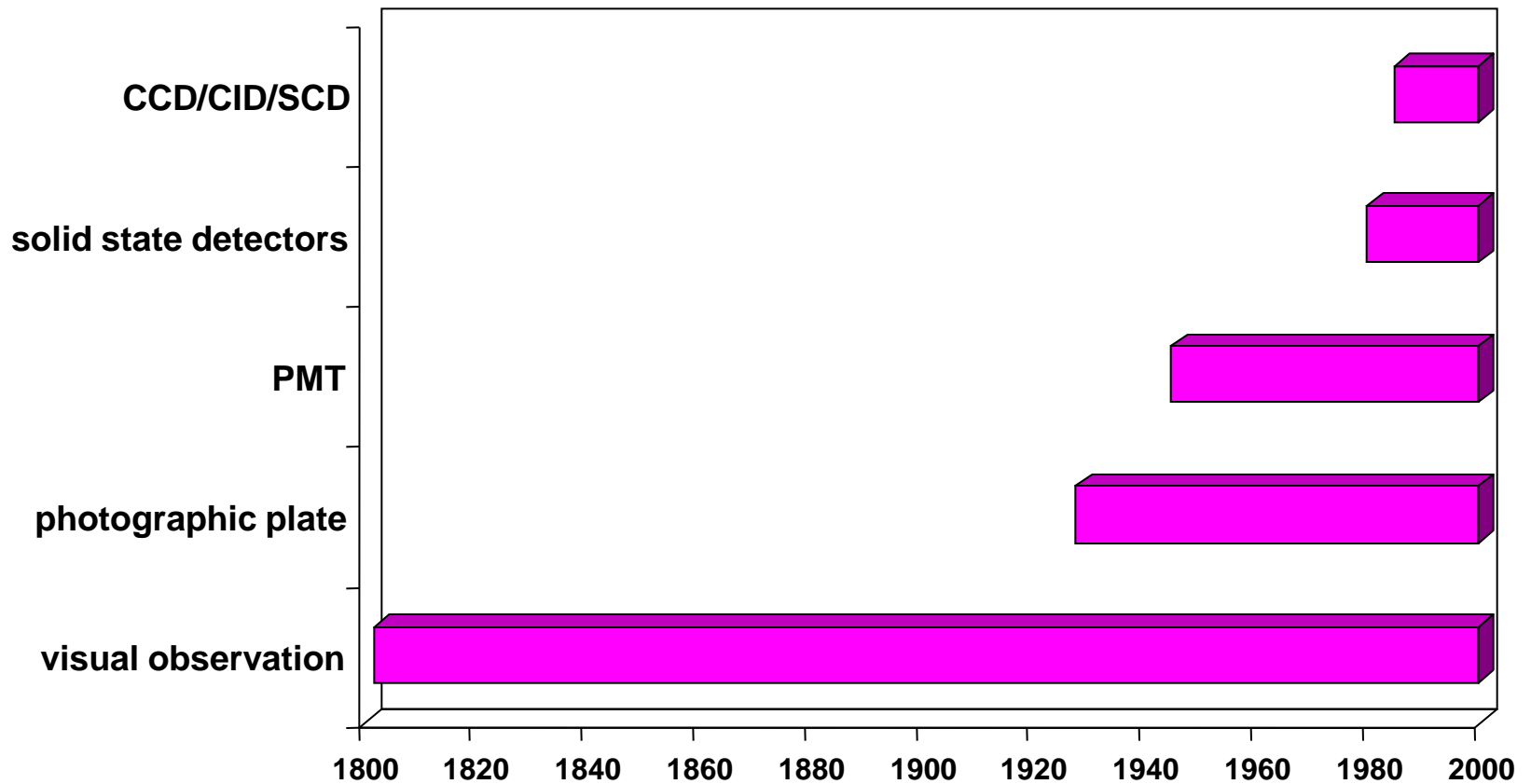
# Sluneční spektrum (mřížka echelle se zkříženou disperzí s druhou mřížkou)





# Detektory

# Historie detektorů



# Citlivost fotodetektoru

- Citlivost fotodetektoru je poměr výstupní veličiny (většinou proud) k veličině záření dopadající na detektor. Z hlediska spektrálního složení záření dopadajícího na detektor se rozlišuje **integrální citlivost**  $S_{\Phi_e}$  a **monochromatická spektrální citlivost**  $S_{\lambda}$ :

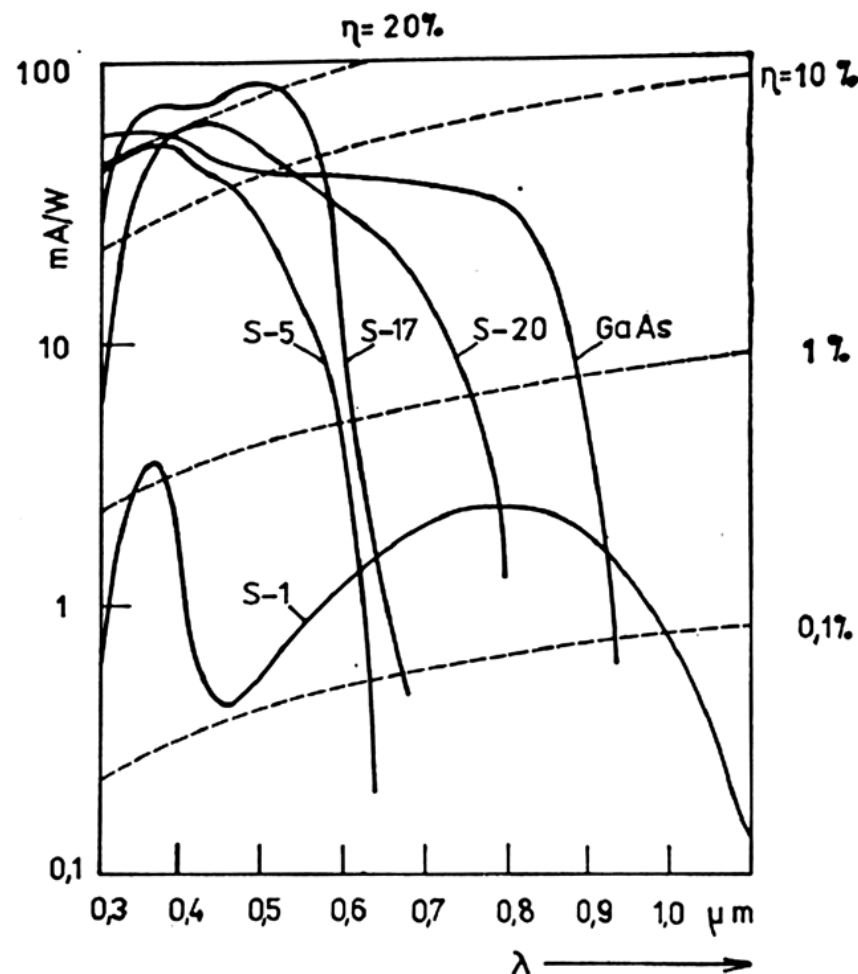
$$S_{\Phi_e} = \frac{I_{\Phi}}{\Phi_e} \quad [A.W^{-1}; A; W] \quad S_{\lambda} = \frac{I_{\lambda}}{\Phi_{\lambda}} \quad [A.W^{-1}; A; W]$$

**Kvantová účinnost** detektoru pro danou vlnovou délku je definována jako poměr počtu emitovaných nosičů náboje na počet fotonů, které dopadly na detektor:

$$\eta_{\gamma} = \frac{N_e}{N_{h\nu}}$$

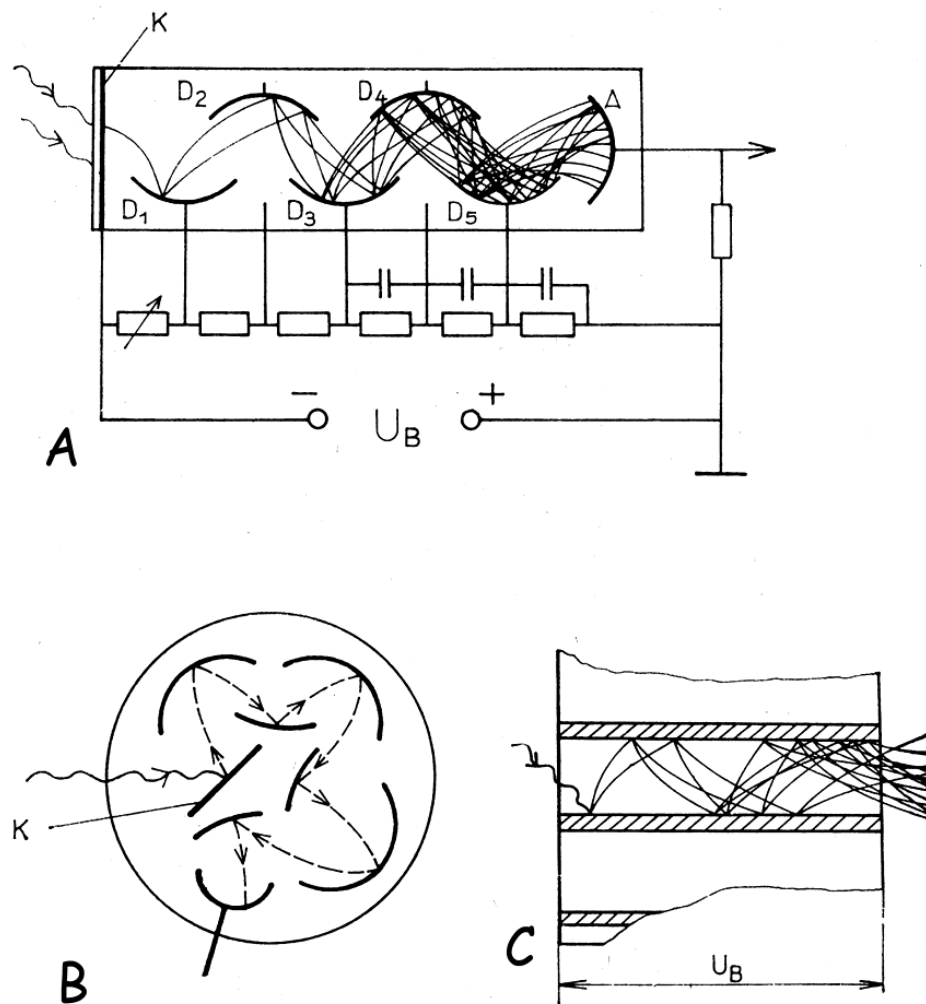
# Fotokatody (vnější fotoelektrický jev)

- Multialkalické fotokadody typu Sb-Na-K-Cs (S20) – nejpoužívanější
- Monoalkalické antimonidy typu Cs-Sb
- Bialkalické antimonidy Sb-Na-K
- Pro dlouhovlnnou oblast Ag-O-Cs (S1)
- Monokrystaly polovodičů GaAs-Cs-Rb, InP-Cs-O apod.
- „Solar blind“ pro UV, VUV (RbTe, CsTe) a FUV oblast spektra (KBr, CsI)



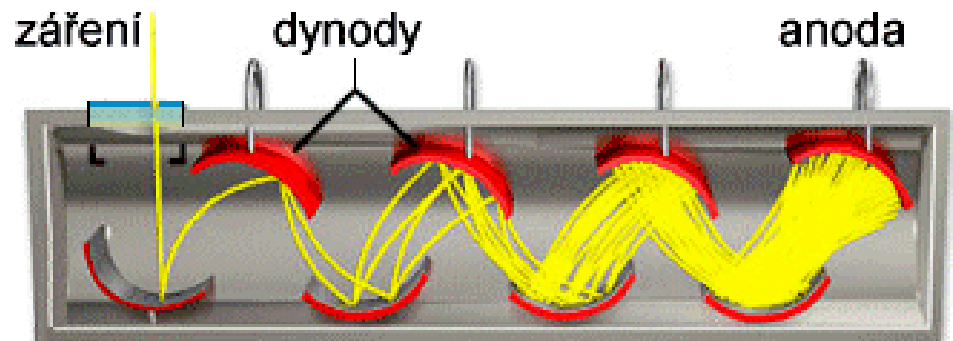
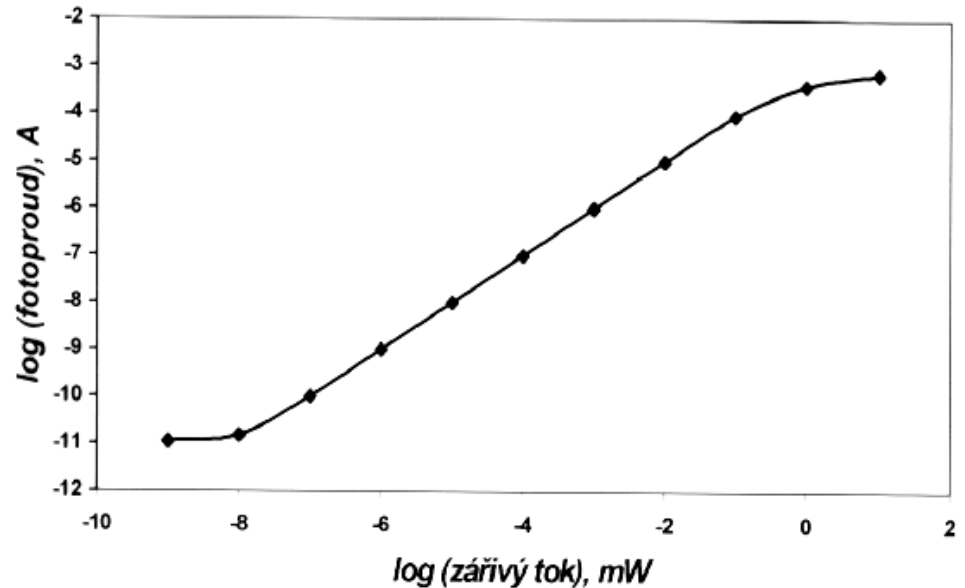
# Násobiče elektronů

- Fotokatody s emisí elektronů do vakua se používají především ve spojení s násobiči elektronů, i když teoreticky je vlastnost fotodetektoru dána fotokatodou, tedy ve fotonásobičích (A, B) a kanálových násobičích (C), používaných v intenzifikovaných plošných detektorech (ICCD).



# Fotonásobič (PM)

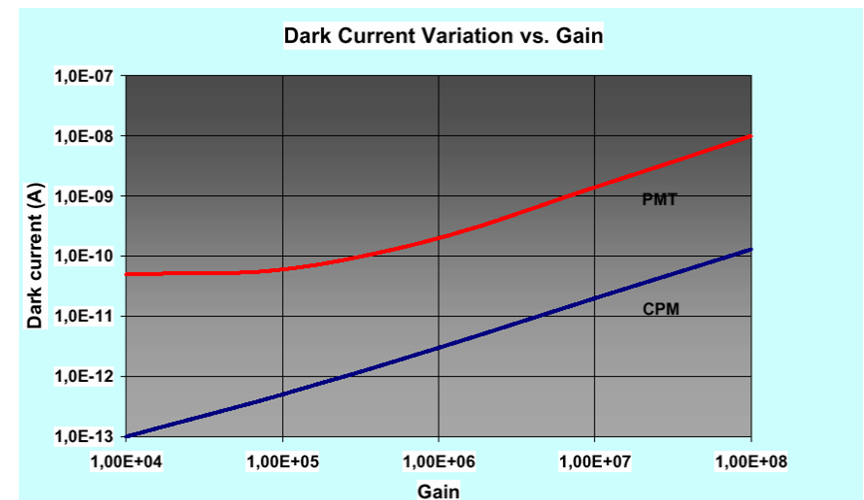
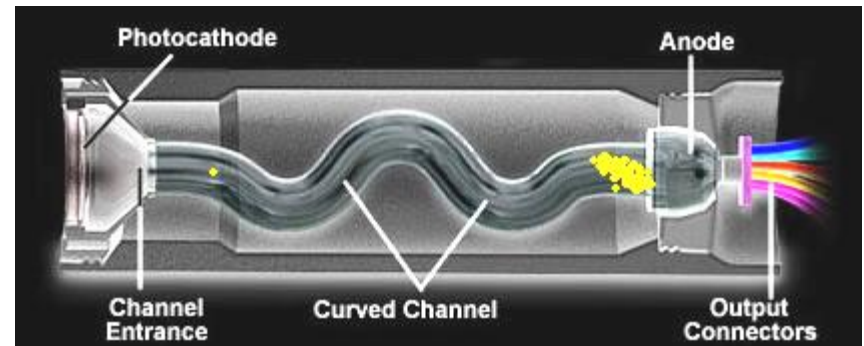
- Je vakuová fotonka kombinovaná se zesilovacím prvkem založeném na sekundární emisi elektronů z dynod. Proti fotonce se dosahuje lepšího poměru signál/šum a nezávislost na kmitočtu do stovek MHz. PM je schopen detekovat jednotlivé fotony (viz čítače fotonů) a pracovat v širokém rozsahu intenzity vstupního záření.





# Kanálové fotonásobiče - CPM

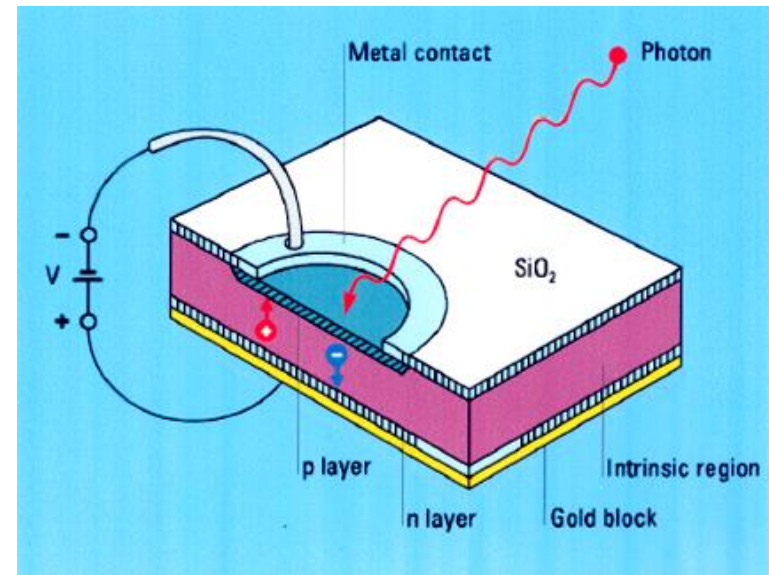
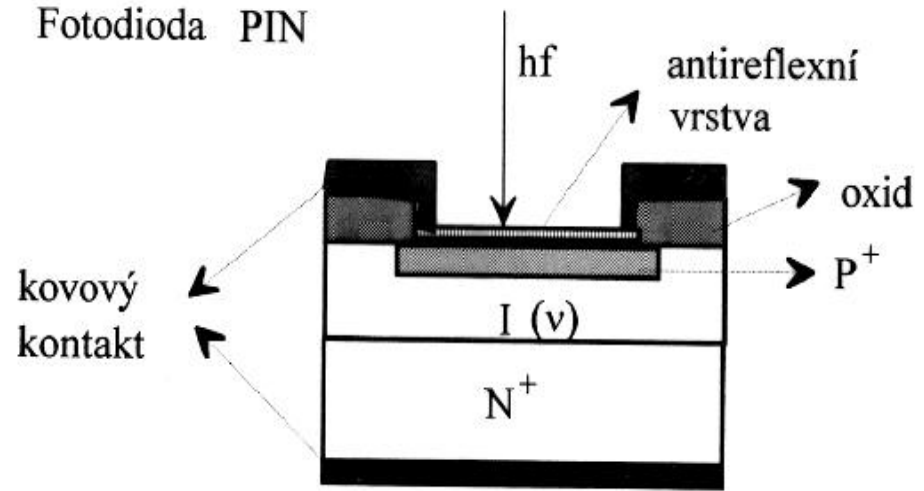
- **Channel Photo Multiplier** jsou robustní detektory se semitransparentní fotokatodou napařenou na vnitřní straně vstupního sklíčka fotonásobiče
- Konstrukce CPM umožňuje detekovat každý dopadající foton, a CPM tak mají zcela výjimečnou **citlivost** při zachování **širokého dynamického rozsahu a linearity se zesílením v řádu až  $10^9$**
- CPM má až **3x nižší temný proud než PMT**



# Fotodiody

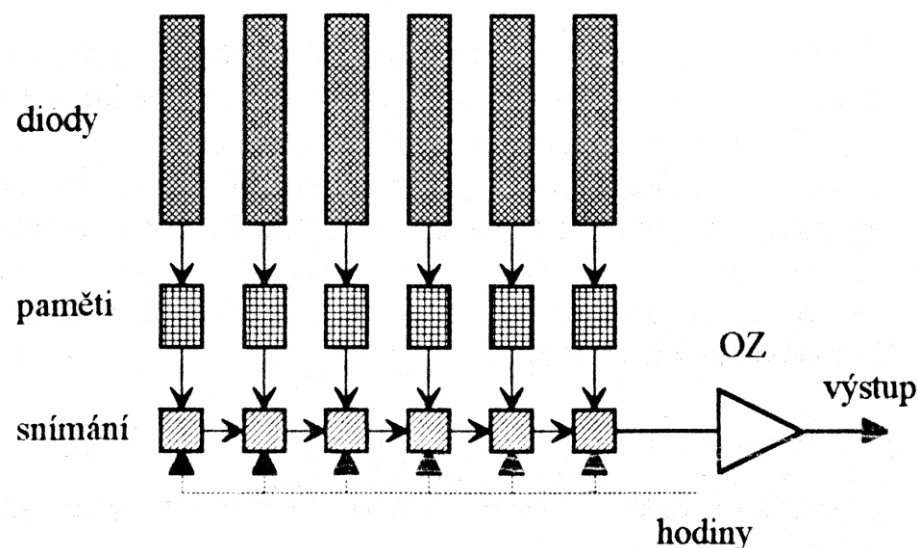
- Fotodiody se realizují nečastěji jako PIN diody z křemíku, příp. dalších polovodičů. V polovodiči vzniká při absorpci fotonu dvojice nosičů nábojů (elektron-díra), které difundují k příslušným elektrodám. Důležitou roli hraje závislost absorpce na vlnové délce záření.
- Přednosti fotodiod:
  - Velký dynamický rozsah, až 11 řádů
  - Vynikající poměr signál/šum pro vysoké signály
  - Technologie výroby integrovaných obvodů v pevné fázi
  - Možnost integrace až milionů diod do jednoho elektronického celku

Fotodioda PIN

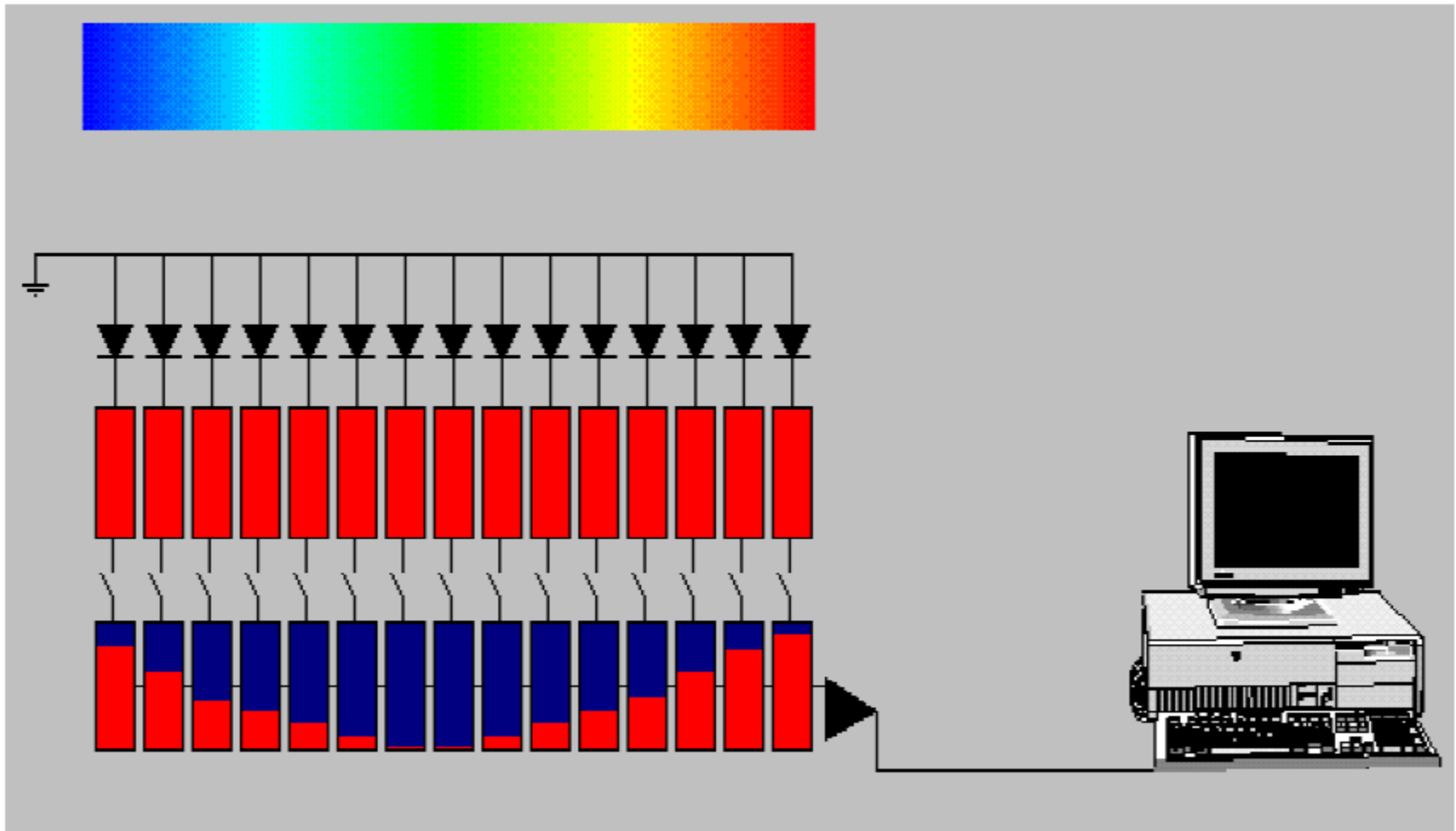


# Nábojově vázané obvody (charge couple devices, CCD)

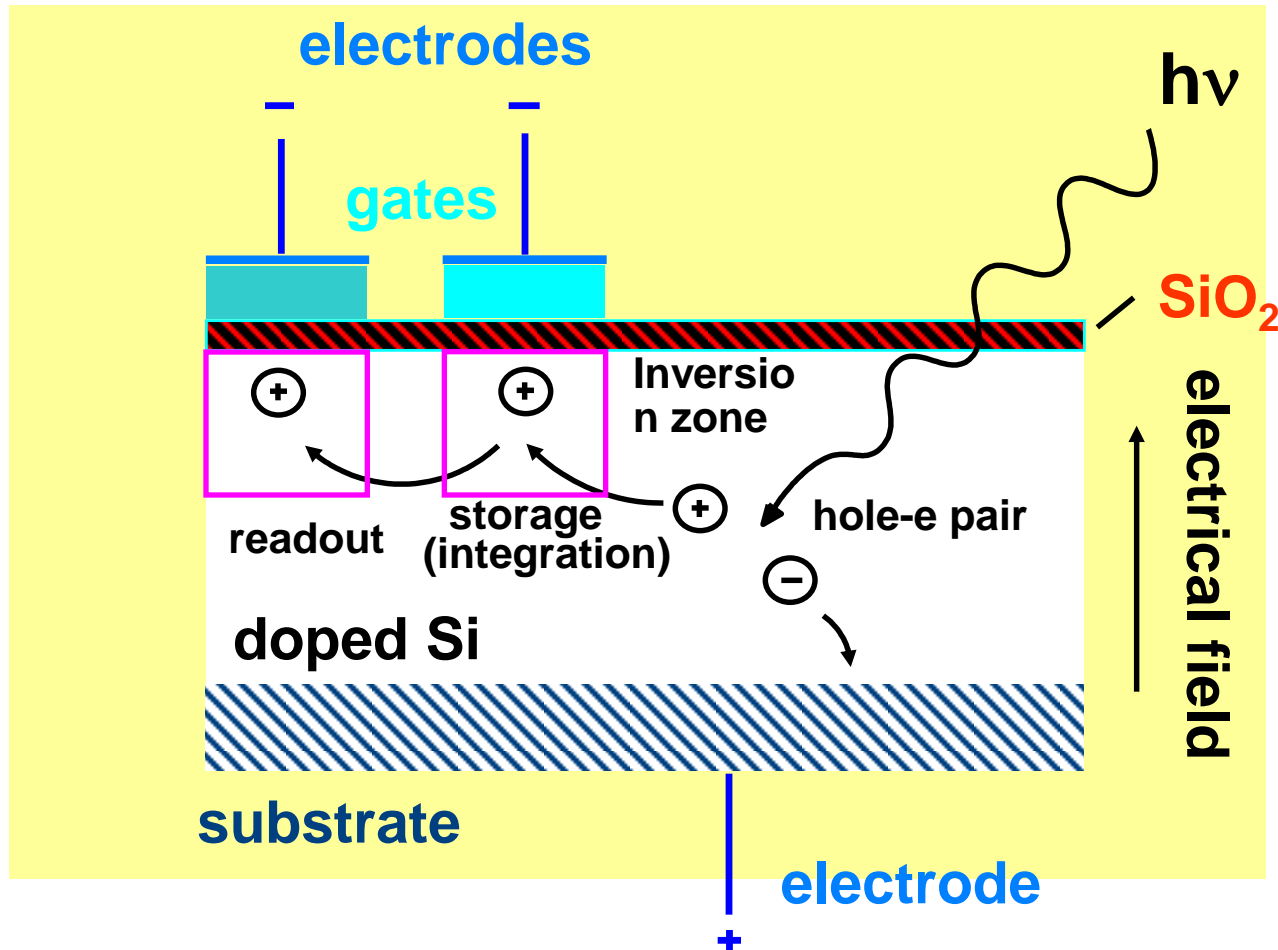
- Každá z integrovaných diod generuje fotoproud, úměrný ozáření diody. Tento se integruje v kapacitách, spojených s diodami. Kapacity fungují jako analogové paměti. Akumulované náboje se postupně čtecími obvody převádí na vstup operačního zesilovače, na jehož výstupu dostáváme postupně napěťové impulzy odpovídající velikosti náboje u jednotlivých diod. Celý cyklus se opakuje 10 – 100 000 x za vteřinu.



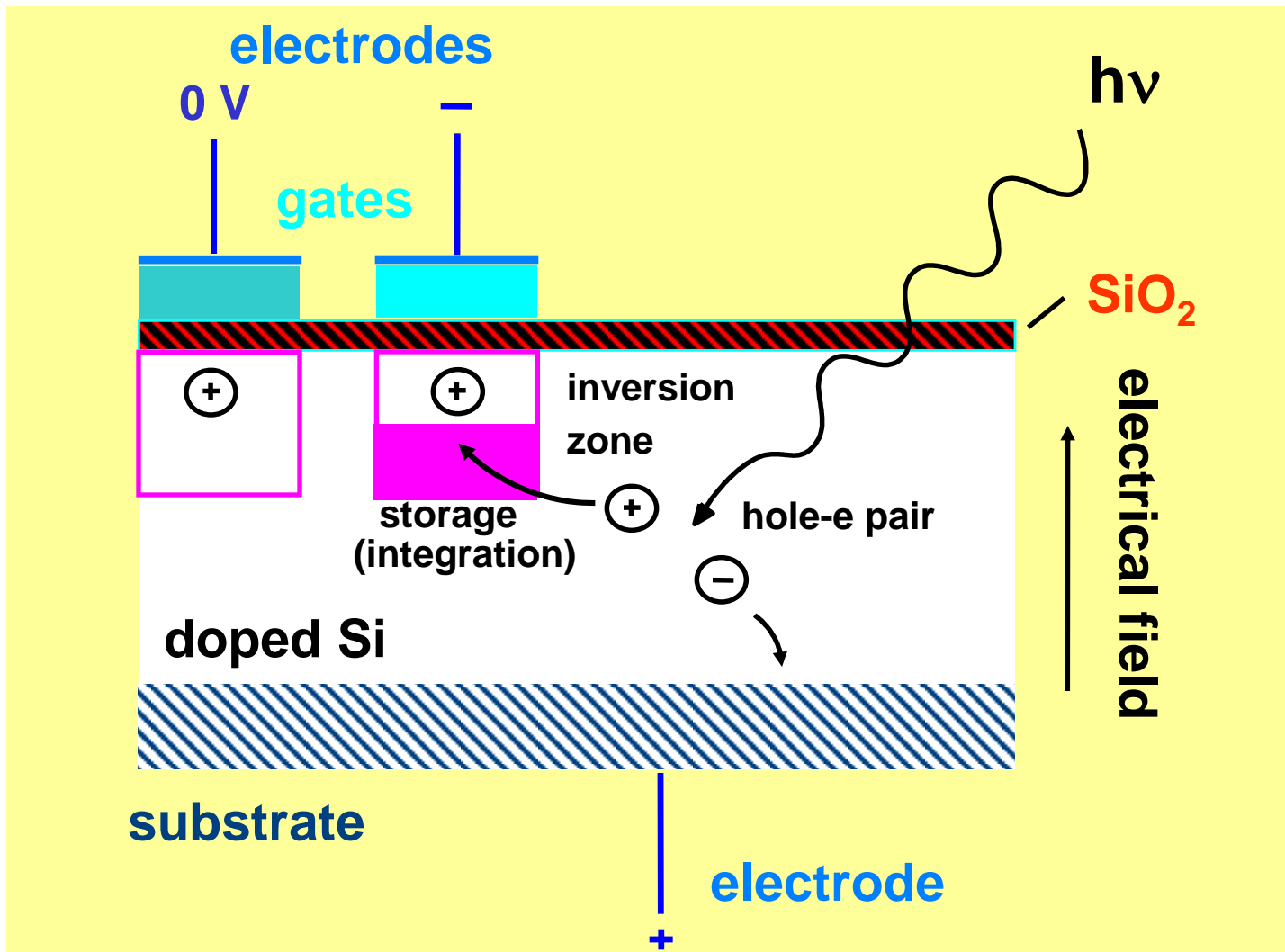
# Činnost CCD detektoru



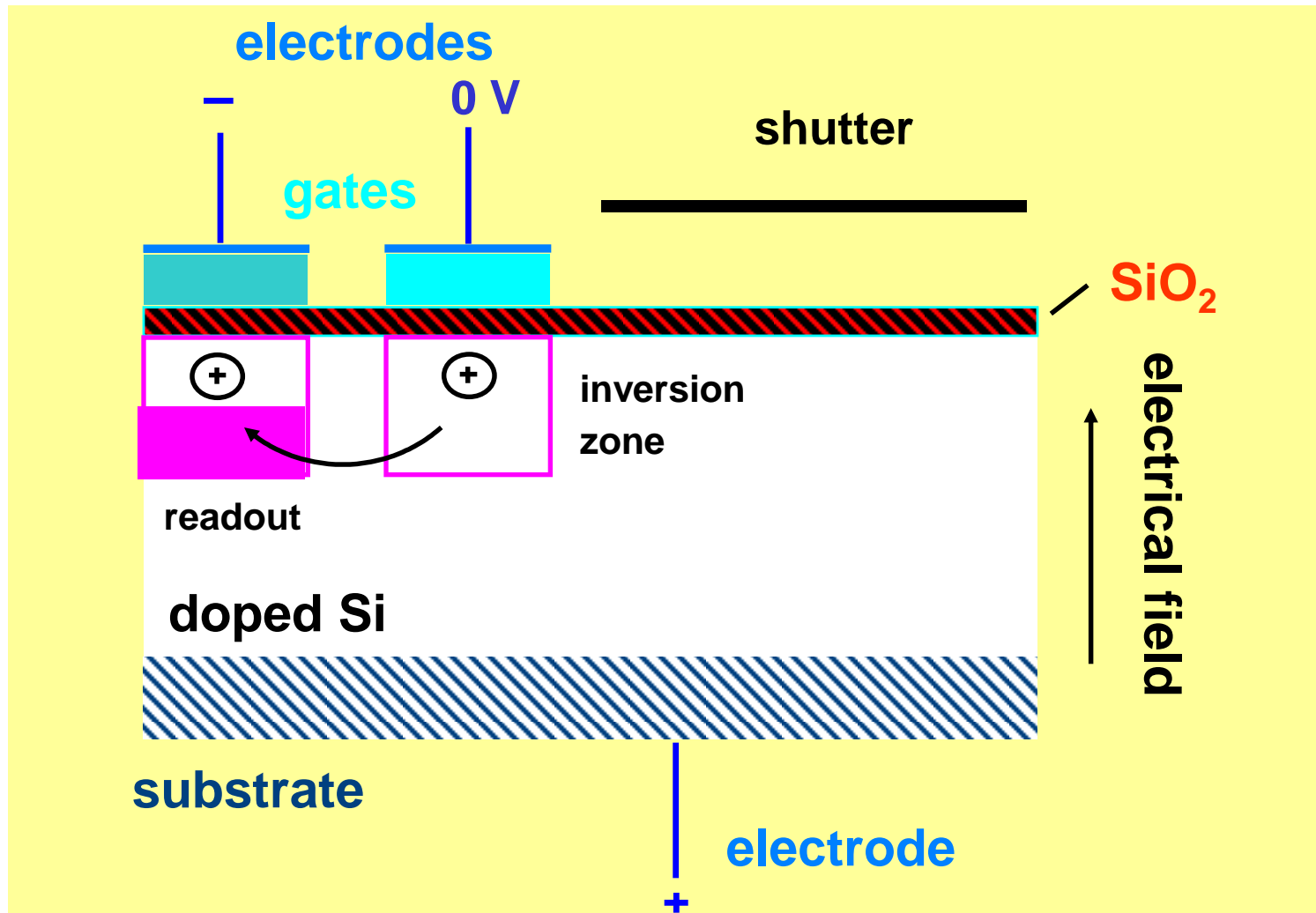
# Schema pixelu CCD



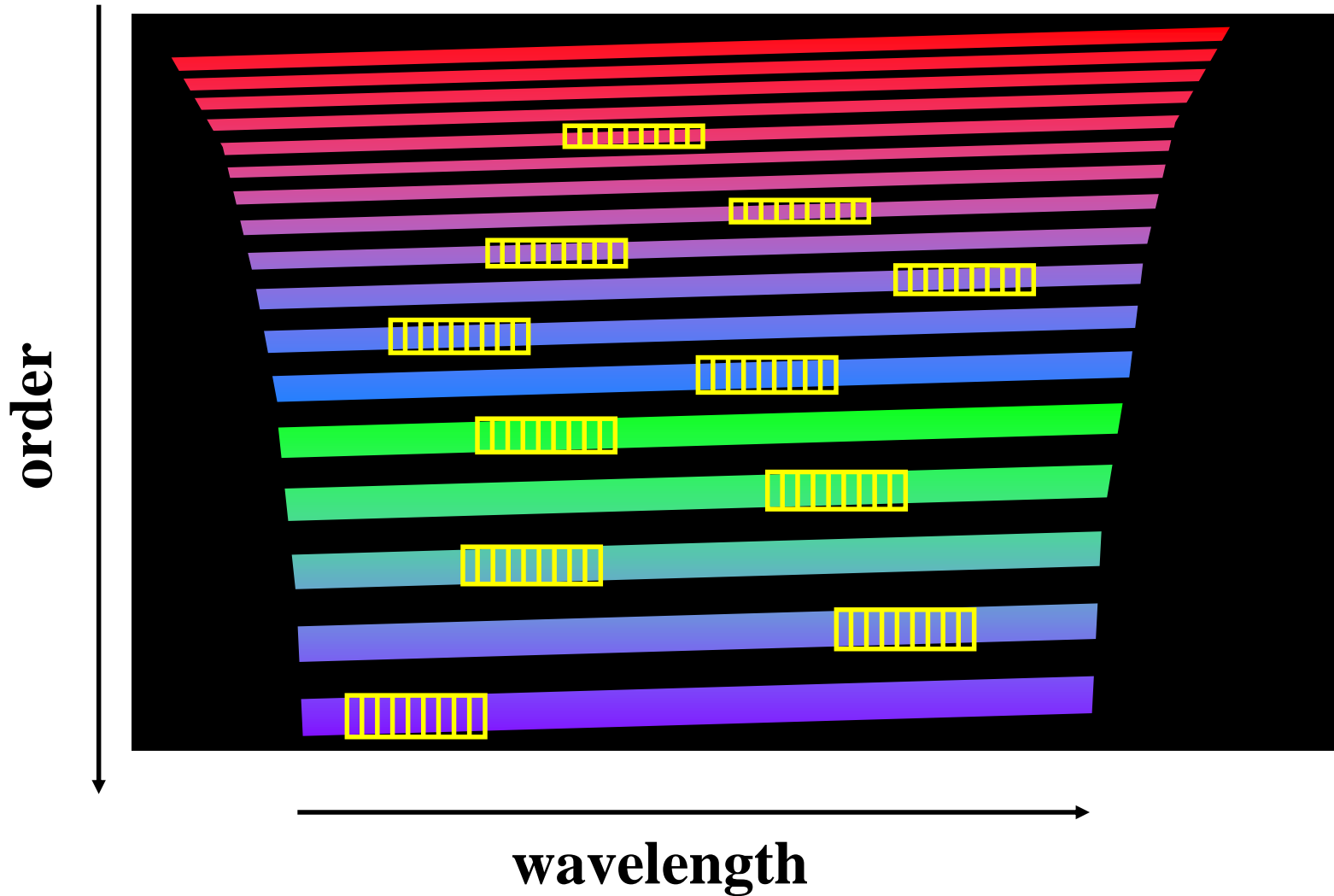
# Akumulace náboje



# Čtení



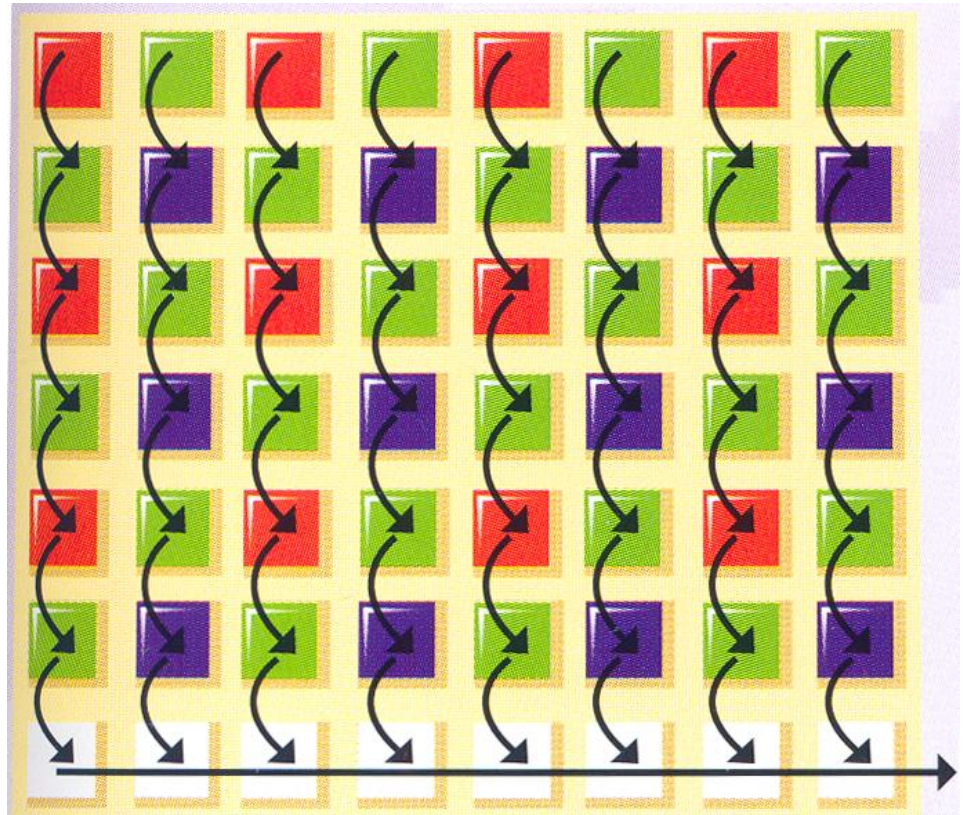
# Segmented detectors (SCD)



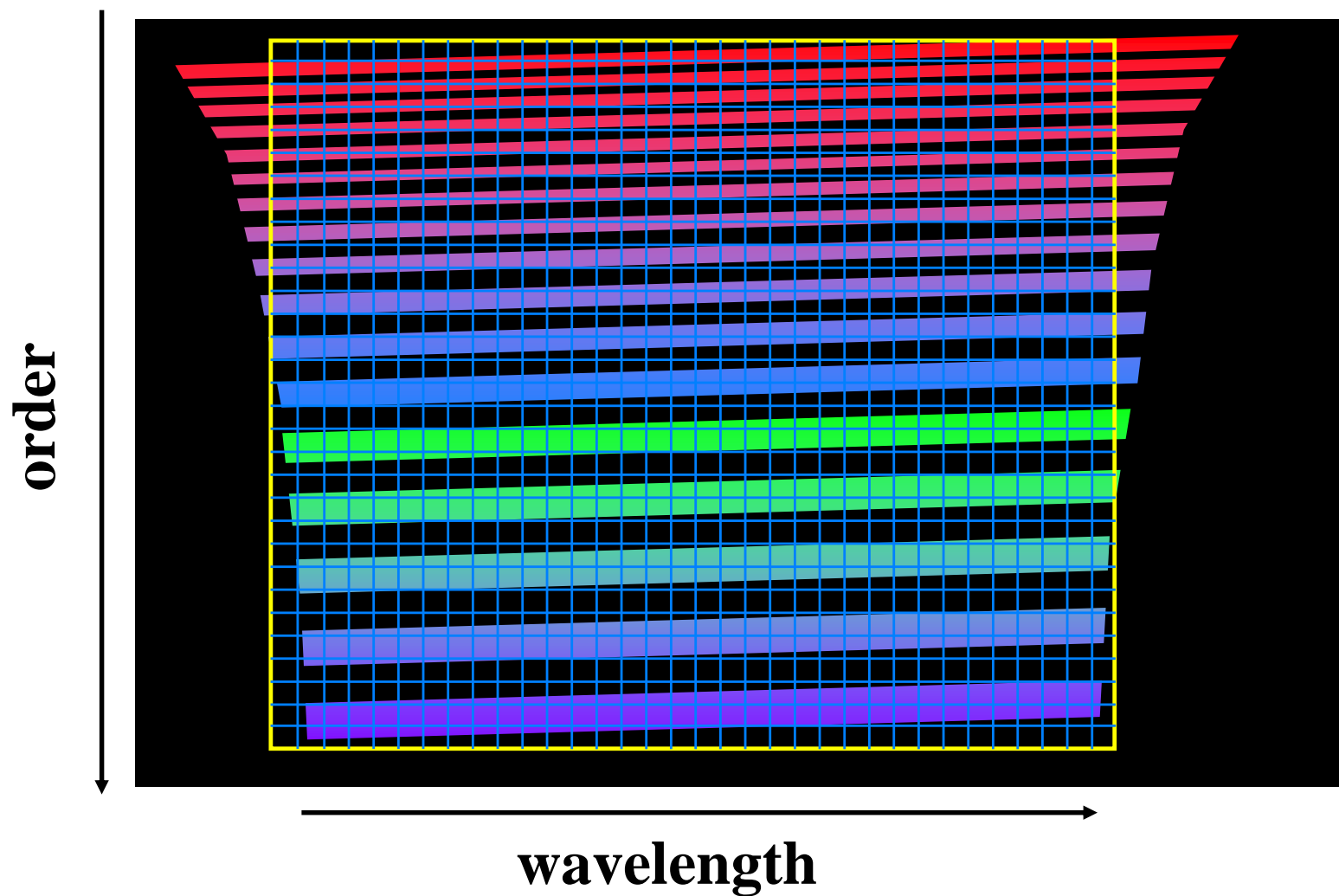


# Plošné CCD detektory

- CCD – integrovaný obvod s vazbou nábojem (charge-coupled device) je tvořen maticí křemíkových fotodiod. Jednotlivé senzory jsou uspořádány v řadách a postupně po řadách se zpracovávají vzniklé elektrické náboje na jednotlivých senzorech. První řada se načte do paměti, pak do výstupního zesilovače a data jsou pak převedena do digitální podoby.

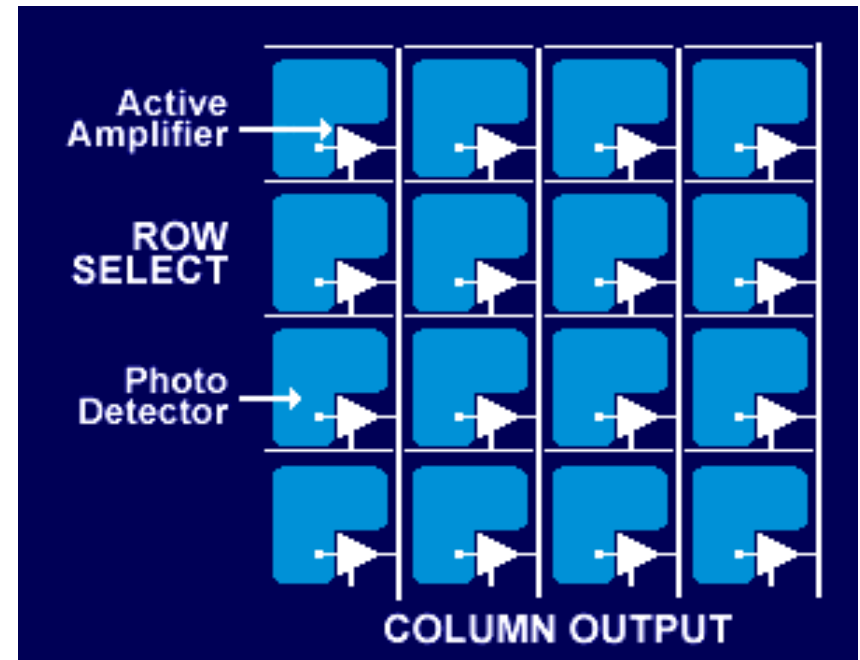


# Plošný detektor CID

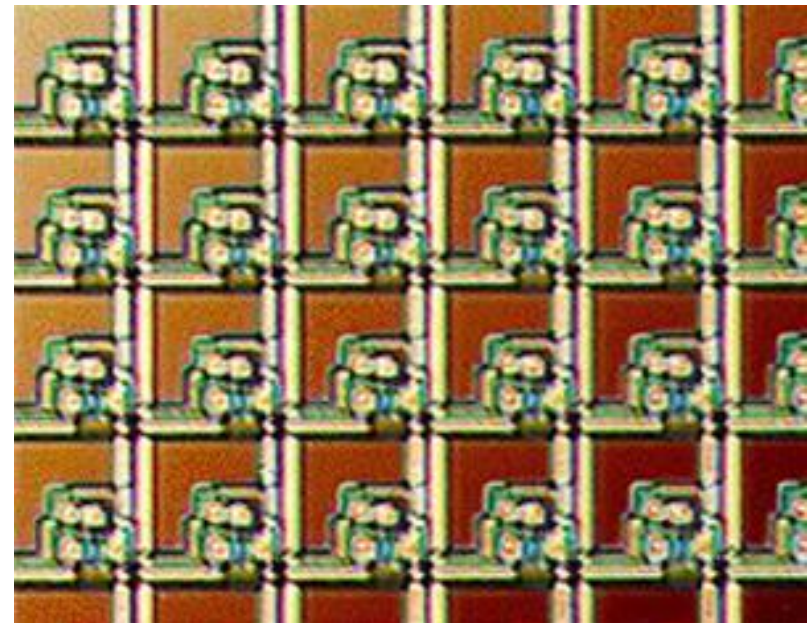
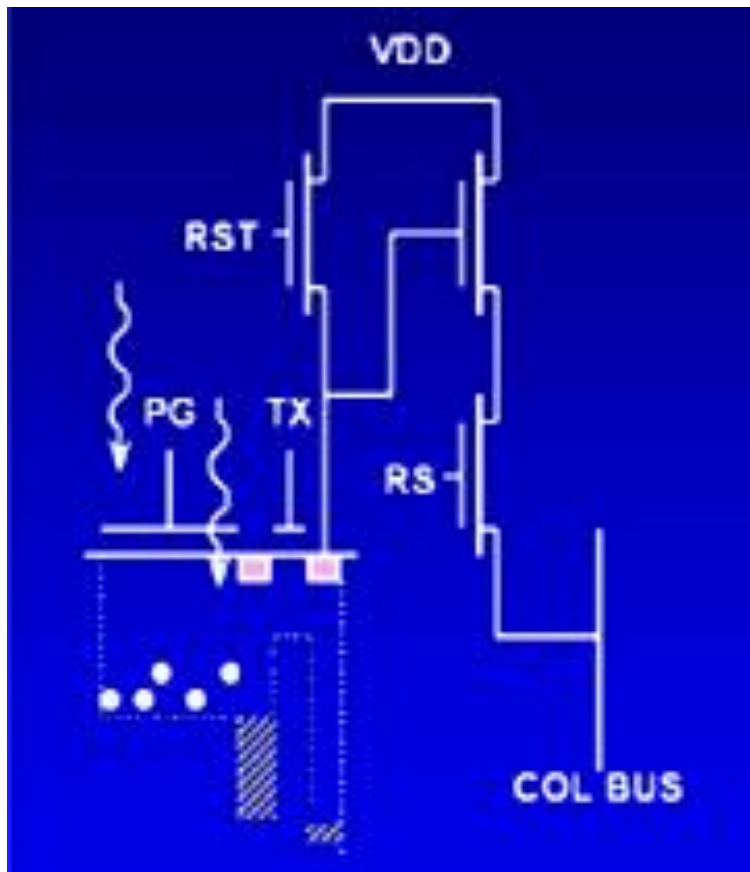


# CMOS detektory (Complementary Metal Oxide Semiconductor)

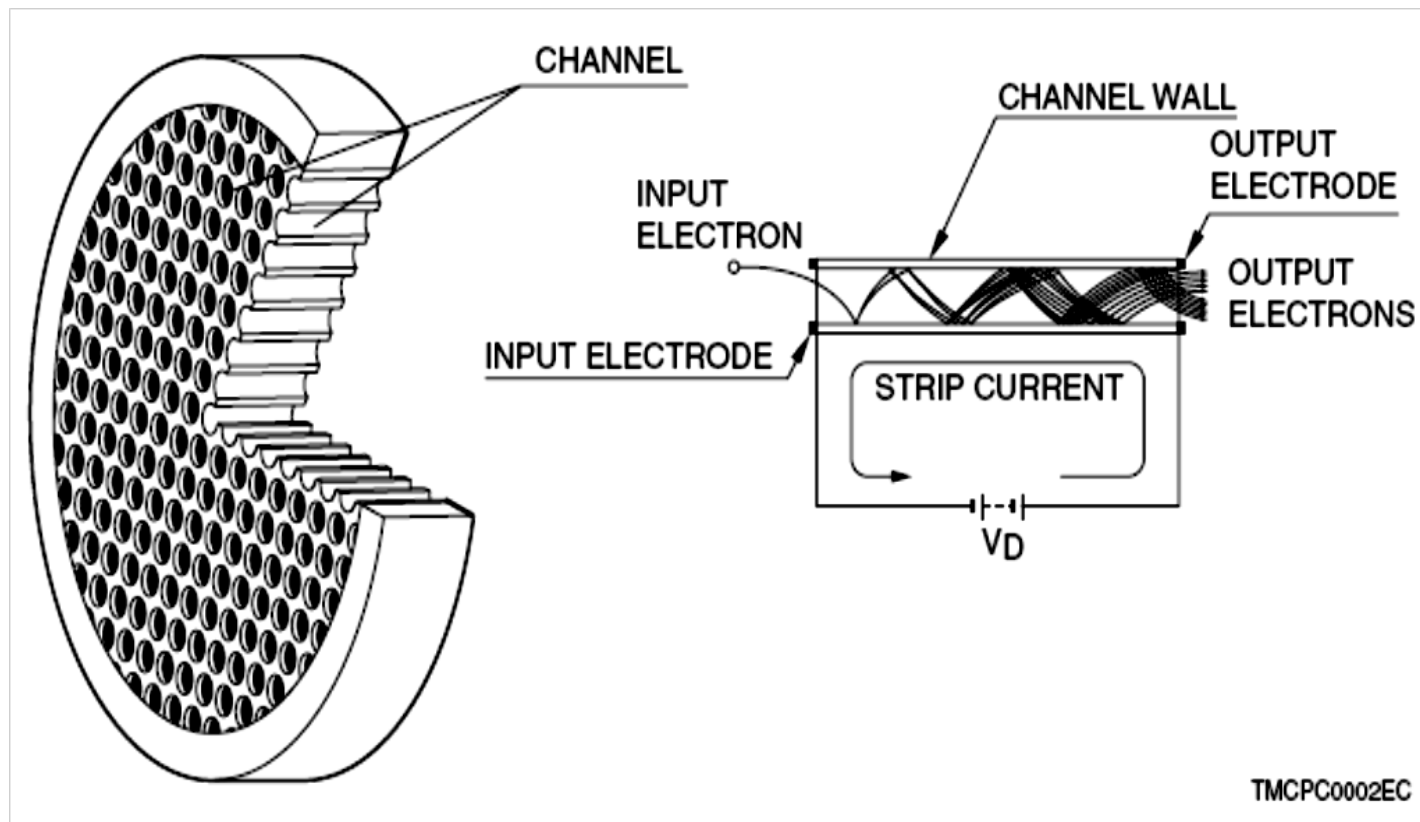
- každá elementární buňka má vlastní obvody pro odvedení a měření vygenerovaného náboje. Jednotlivé CMOS buňky pak fungují víceméně nezávisle. Speciální obvody pro každou buňku jsou nutné, neboť je třeba odfiltrout náhodný (šumový) náboj, který je jiný u každé elementární buňky.



# CMOS detektor



# Kanálkový násobič (microchannel plate, intensifier)



# Mikrokanálový zesilovač obrazu

