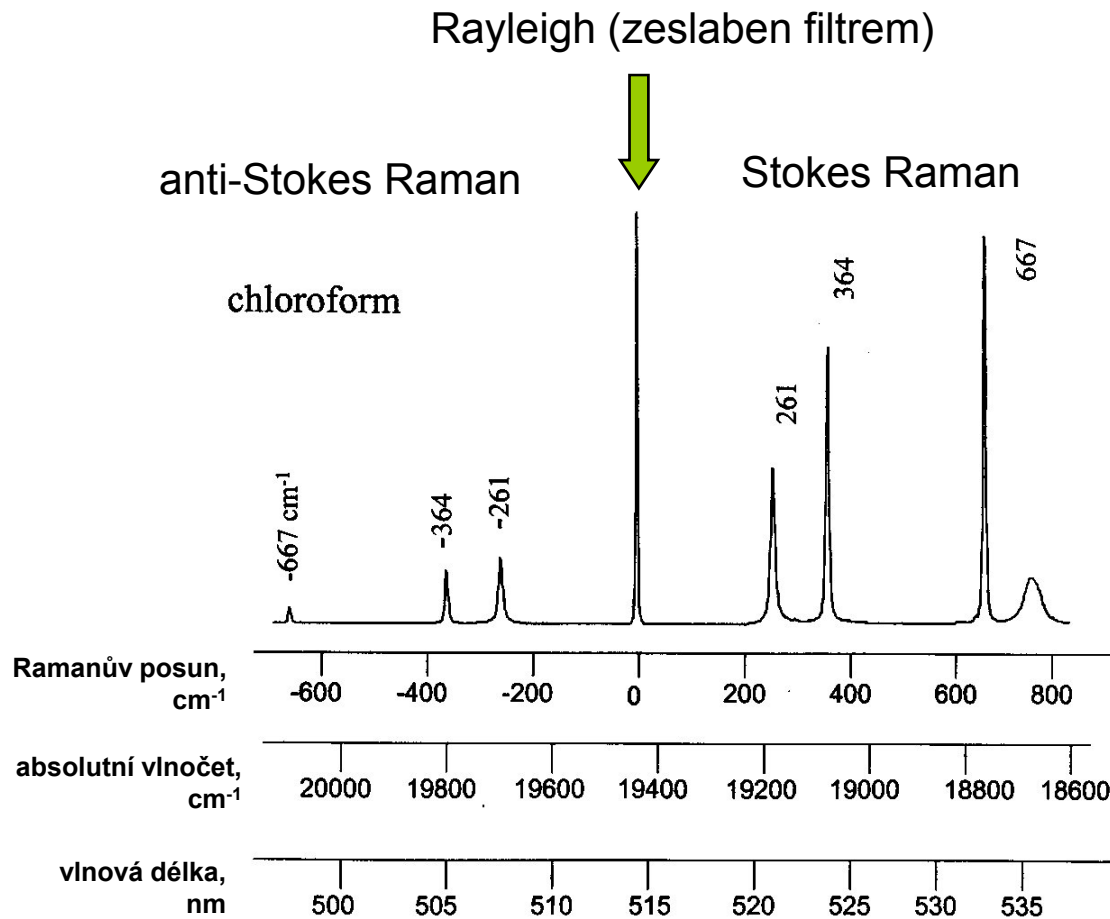


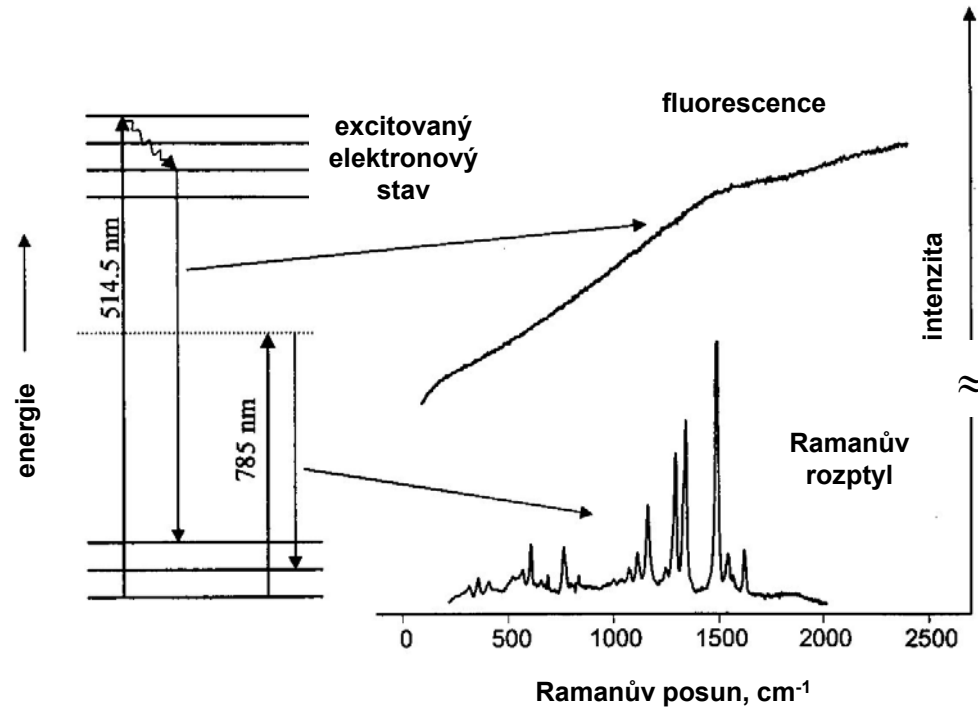
# Instrumentace Ramanovy spektroskopie

Vladimír Baumruk

Univerzita Karlova v Praze, Matematicko-fyzikální fakulta

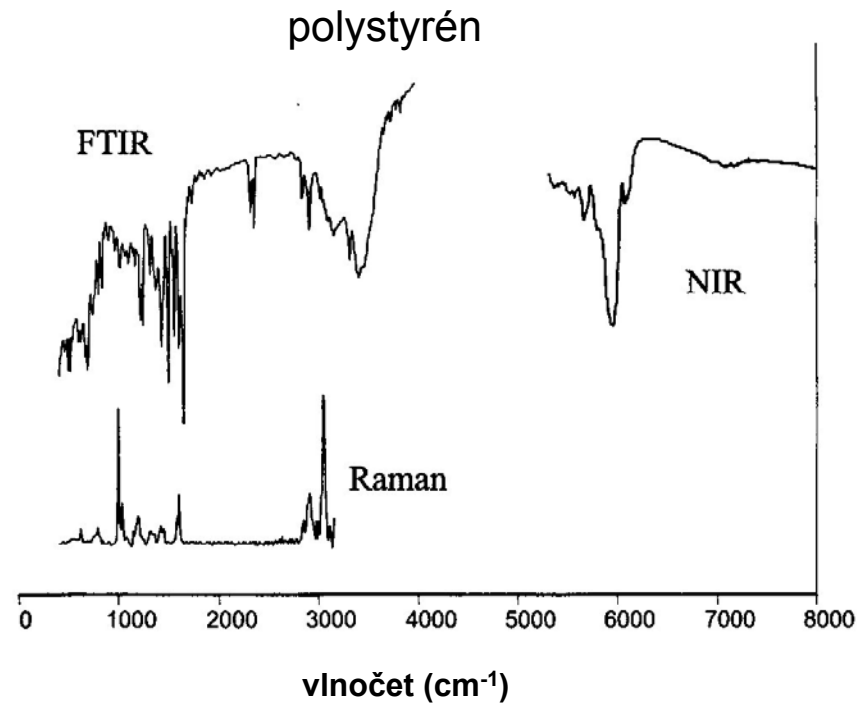
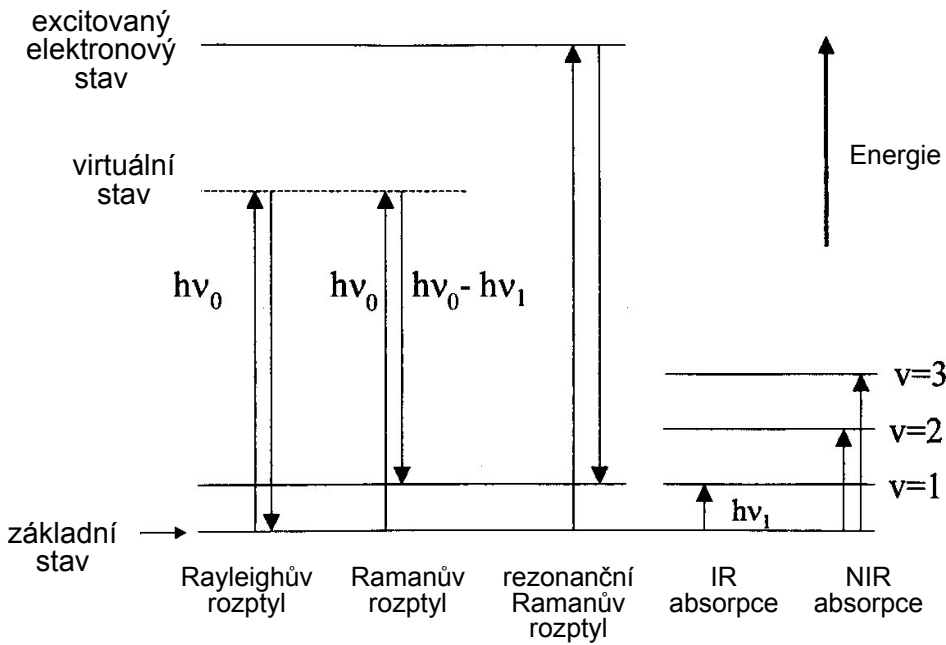


# Ramanovo spektrum fluoreskujícího vzorku



Vhodná volba excitační vlnové délky

# Metody vibrační spektroskopie

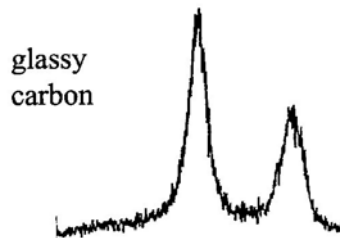
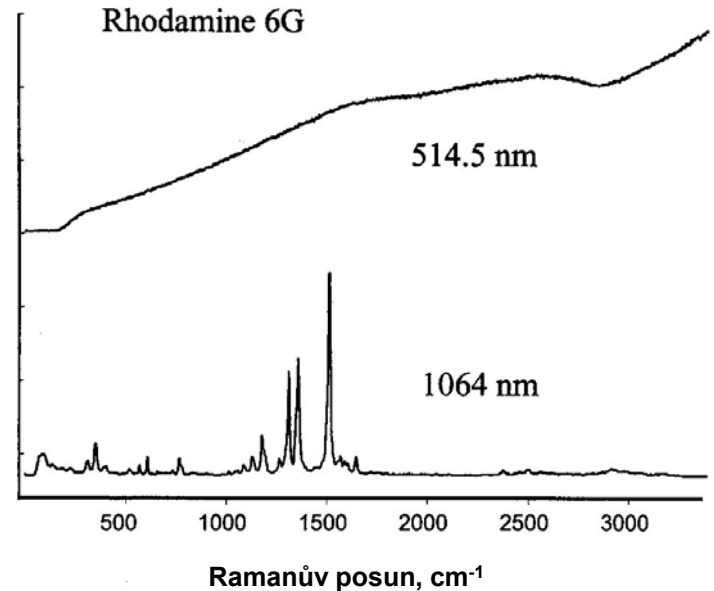


# Technologický pokrok v Ramanově spektroskopii v uplynulých 20 letech

## 1. FT Ramanova spektroskopie

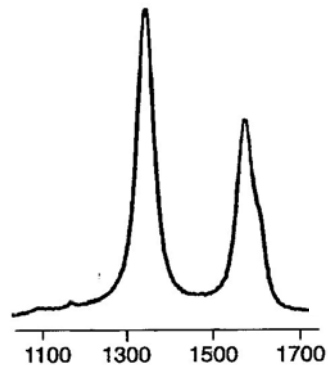
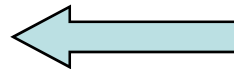


- + excitace v NIR oblasti → řeší problém s fluorescencí
- + vysoká přesnost určení vlnočtu
- nižší intenzita rozptylu, obtížnější detekce



jednokanálový/PMT

Spex 1403  
20 minut  
SNR ~ 28



mnohokanálový/CCD

Chromex 250  
5 sekund  
SNR ~ 280

## 2. Mnohokanálové CCD detektory

- + výrazné zlepšení poměru signál/šum (SNR)
- + zkrácení doby měření

Ramanův posun,  $\text{cm}^{-1}$

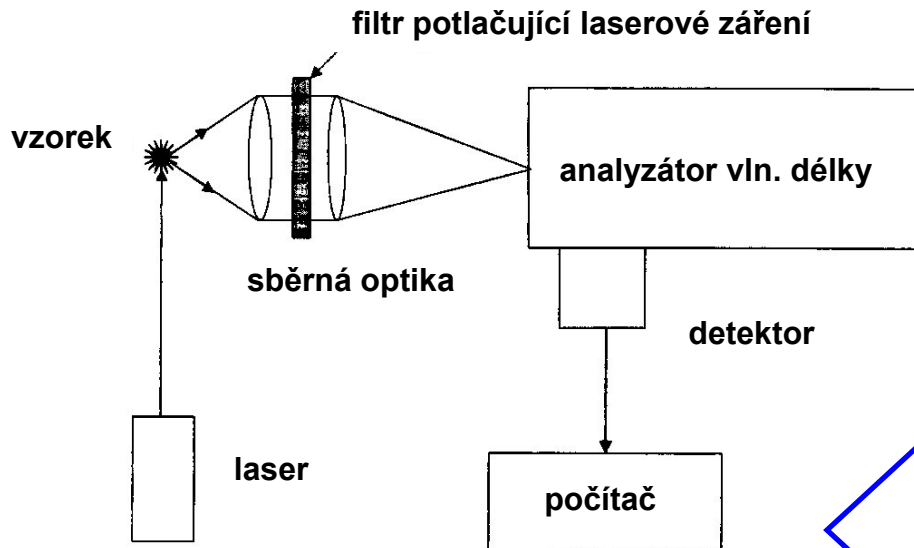
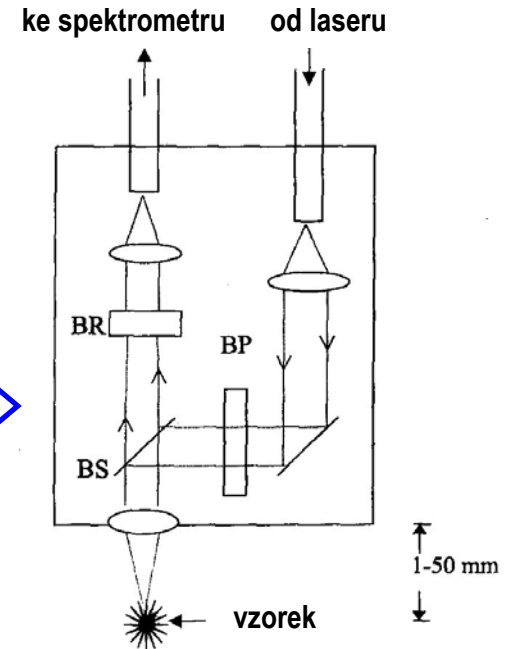
(v obou případech excitace 514.5 nm / 50 mW)

# Technologický pokrok v Ramanově spektroskopii v uplynulých 20 letech

## 3. Vlákňová optika (integrované sondy)

- + využití pro monitorování a kontrolu procesů
- + výrazné zvýšení aplikačního potenciálu RS
- + „vzdálený“ spektrometr

Integrovaná vlákňová sonda obsahující nezbytné filtry (BP, BR) i fokusační optiku



## 4. Holografické filtry

- + výrazné snížení rozměrů spektrometrů i jejich ceny
- + více záření na detektoru
- ke každé excitační vlnové délce je potřeba filtr

schéma kompaktního Ramanova spektrometru

# Technologický pokrok v Ramanově spektroskopii v uplynulých 20 letech

## 5. Nové excitační lasery (diodové Al:GaAs, diodami čerpané Nd:YAG)

- + kompaktní
- + levný provoz
- + rozšíření o další excitační vlnové délky v NIR oblasti

## 6. Integrované spektrometry

- + kompaktní (přenosné, ruční)
- + snadná obsluha
- + vyšší spolehlivost
- + využití pro rychlou identifikaci látek



FirstDefender  
(Ahura)

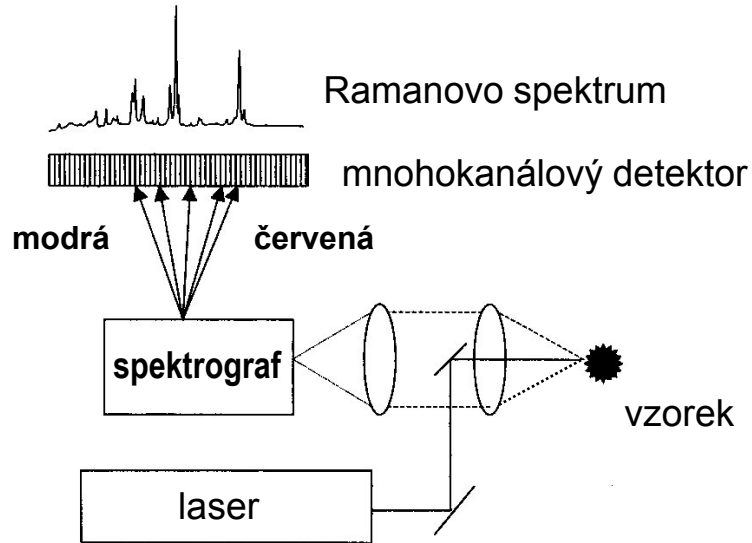


R-3000R/R-3000HR  
(Raman Systems)



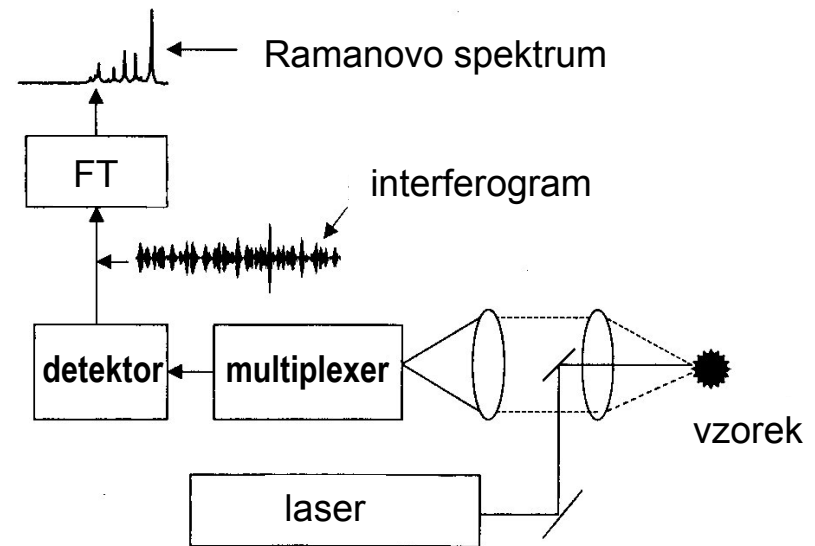
RSLplus (Raman Systems)

## Disperzní mnohokanálový Ramanův spektrometr



- citlivost
- vyšší poměr signál/šum
- $\lambda_{\text{exc}} = 200 - 800 \text{ nm}$   
(limitováno odezvou CCD)

## Nedisperzní FT-Ramanův spektrometr



### Výhody

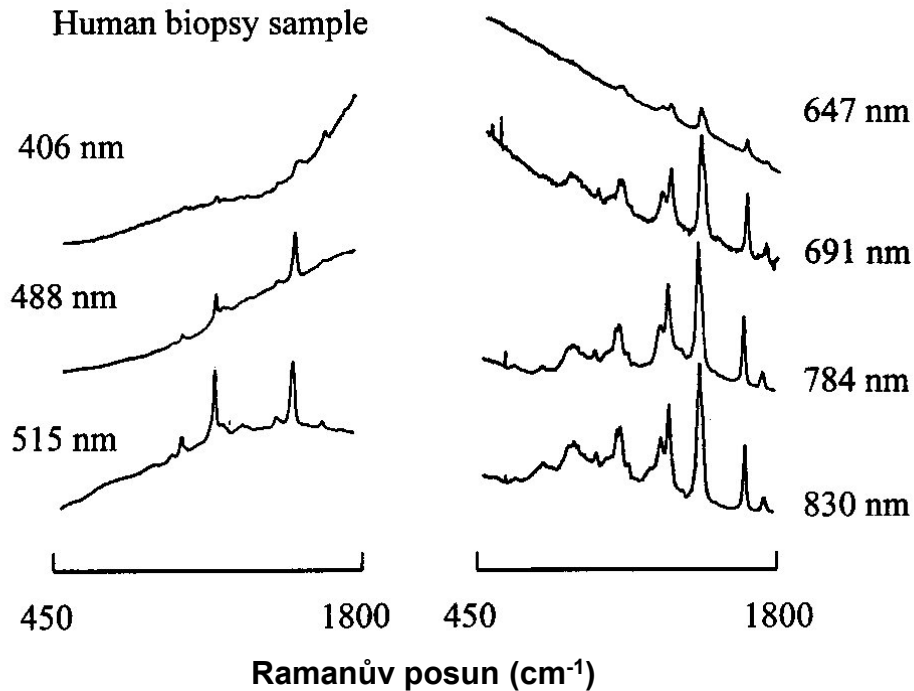
- vysoká přesnost určení frekvence
- vyšší světelnost
- vždy  $\lambda_{\text{exc}} \geq 1064 \text{ nm}$
- zpravidla bez fluorescence

### Nevýhody

- kompromis mezi rozlišením a pokrytím
- více fluorescence
- měnící se spektrální rozlišení

- horší poměr signál/šum
- často vysoký výkon budícího laseru

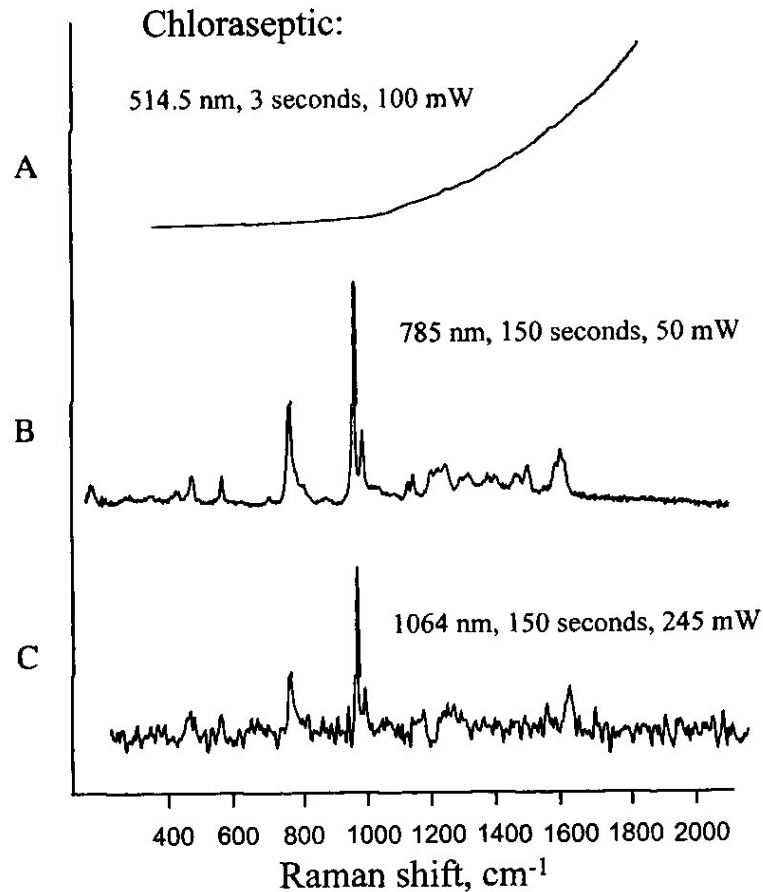




Nekorigovaná Ramanova spektra tkáňového vzorku měřená s různými excitačními vlnovými délkami.

kratší vlnové délky	delší vlnové délky
vyšší účinný průřez rozptylu	nižší účinný průřez rozptylu
nižší šum detektoru	
disperzní spektrometr	nedisperzní spektrometr
vyšší pozadí	nižší pozadí
často background shot noise limited	obecně detector noise limited
obecně mnohem vyšší SNR	nižší SNR vyžaduje vyšší výkon laseru

# Volba excitační vlnové délky (a spektrometru)



## Ramanova spektra kloktadla měřená na různých spektrometrech.

- A. disperzní mnohokanálový, 514.5 nm laser, 100 mW, 3 s akumulace
- B. disperzní mnohokanálový, 785 nm, 50 mW, 150 s akumulace,  $4 \text{ cm}^{-1}$  rozlišení
- C. FT Raman 1064 nm, 245 mW, 150 s akumulace,  $4 \text{ cm}^{-1}$  rozlišení

$\lambda_{\text{exc}} < 900 \text{ nm} \Rightarrow$  disperzní Ramanovy spektrometry (omezení křemíkovými CCD detektory)

$\lambda_{\text{exc}} = 1064 \text{ nm} \Rightarrow$  nedisperzní FT Ramanovy spektrometry

### Kontinuální (cw) lasery pro Ramanovu spektroskopii

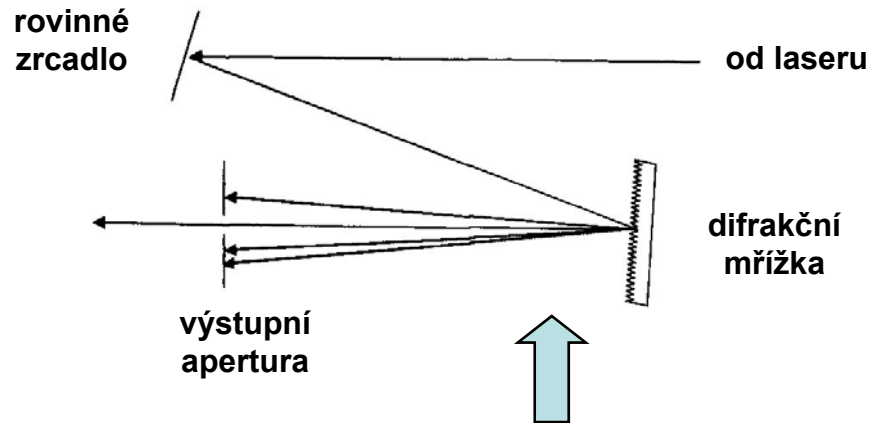
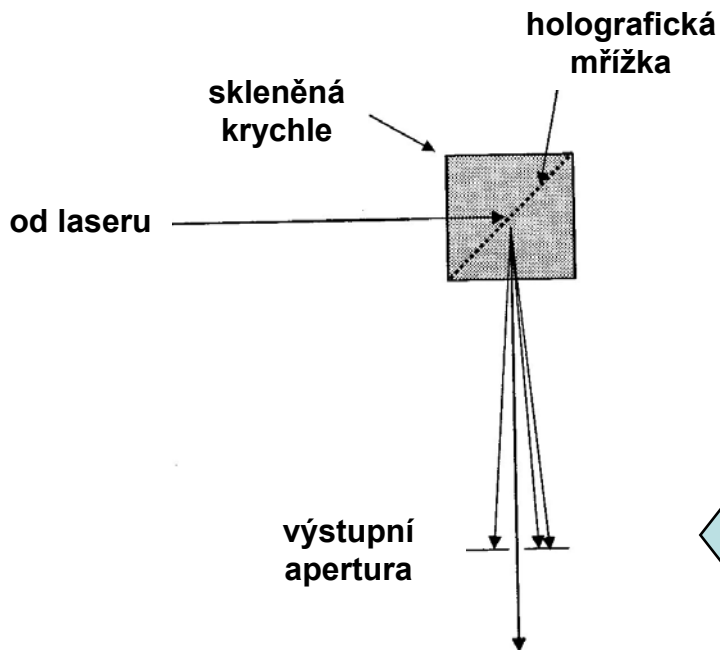
typ	$\lambda$ (nm)	typický výkon
druhá harmonická Ar <sup>+</sup>	224, 257, 229	15-200 mW
Ar <sup>+</sup> (vzduchem chlazený)	488, 514.5	5-50 mW
Ar <sup>+</sup> (vodou chlazený)	351.1, 454.5, 457.9, 465.8 476.5, <b>488</b> , 496.5, 501.7, <b>514.5</b>	0.1-10 W
He-Ne	632.8	5-100 mW
He-Cd	442 nm	5-50 mW
Kr <sup>+</sup>	406.7, 413.1, <b>647.1</b> , 752.5	0.1-4 W
Nd:YAG	1064	0.1-10 W
druhá harmonická Nd:YAG	532	0.05-5 W
diodový (external cavity, fixed $\lambda$ )	785	300 mW
diodový (external cavity)	780-1060	500 mW
barvivové, Ti: safír	spojitě přeladitelné	

## PROČ ?

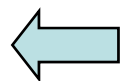
pro potlačení nežádoucí spontánní emise (např. plasmové linie v iontových laserech, široké pozadí z Nd:YAG a diodových laserů)

## JAK ?

- interferenční filtry
- předmonochromátor jako filtr



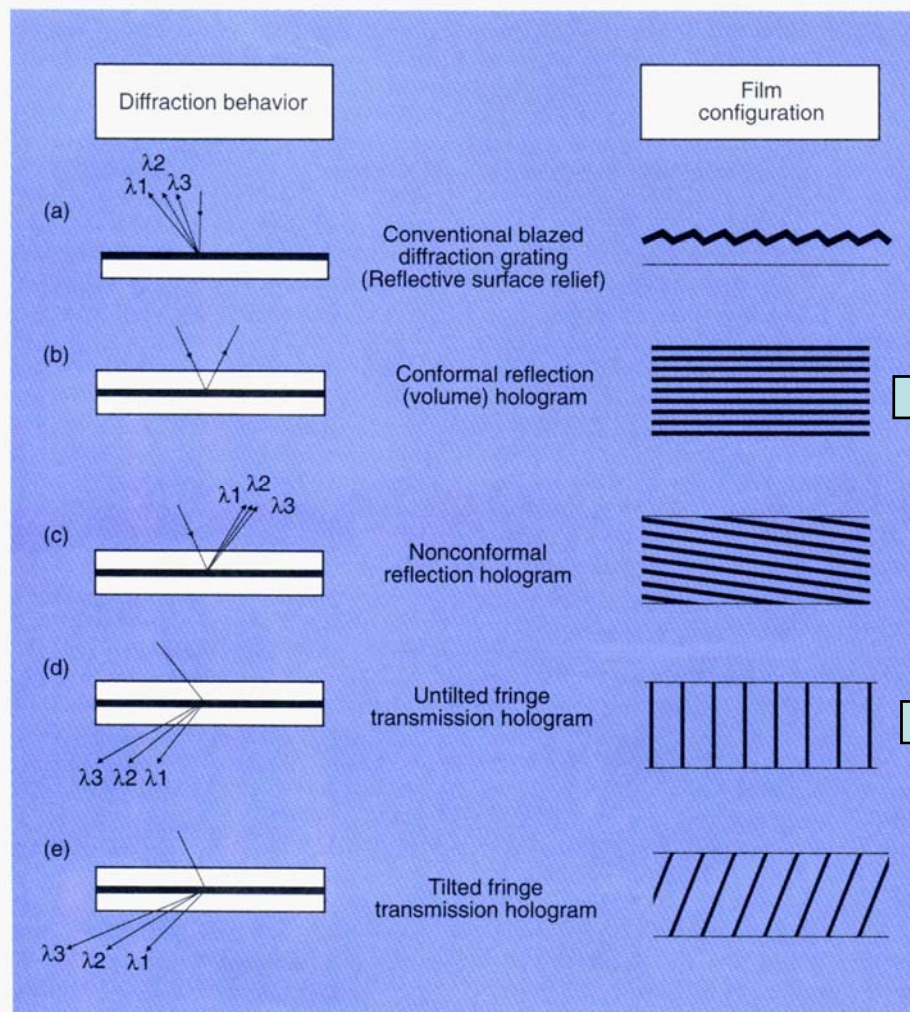
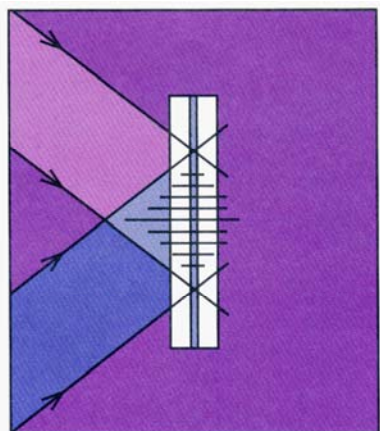
Mřížkový premonochromátor pro odfiltrování plasmových linií z kolimovaného svazku



Holografický pásmový filtr s vysokou propustností, až 80% (Kaiser Optical Systems)

# Objemová holografická optika

## a její spektroskopické aplikace

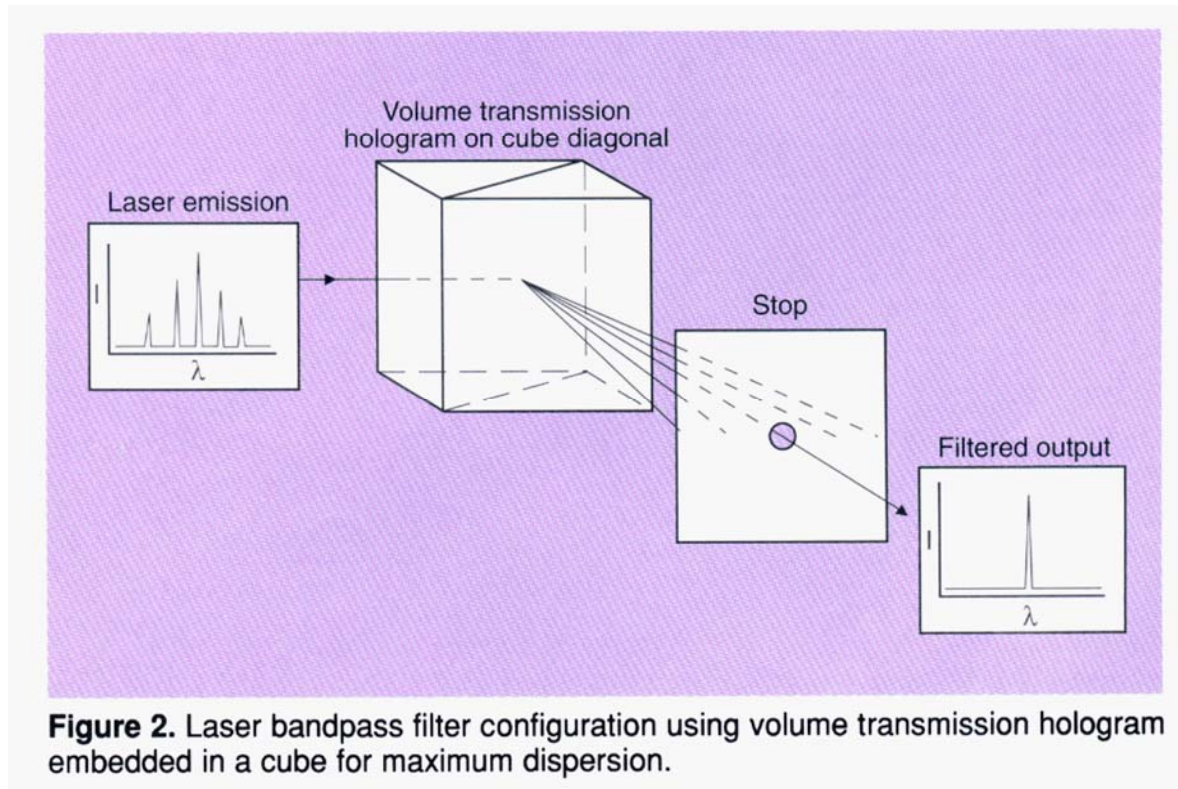


**Holographic notch filters**

**Laser band-pass filters**

Figure 1. Comparison of conventional surface-relief grating used in spectroscopy (a) with various volume holographic element configurations (b–e).

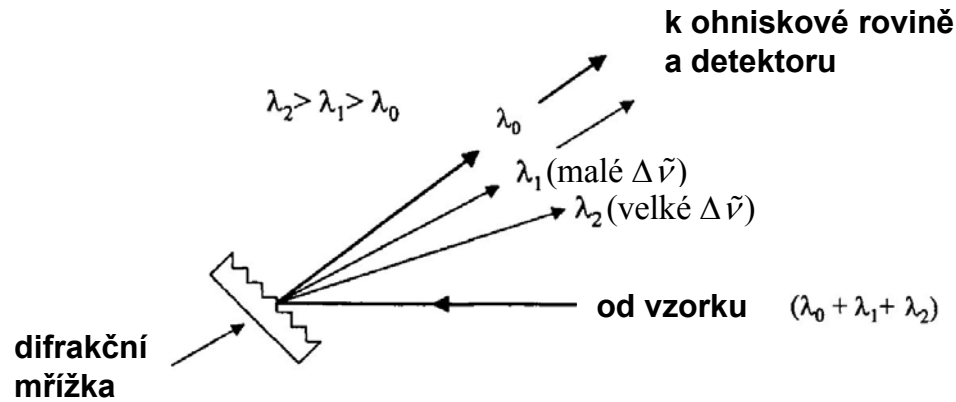
# *Laser band-pass filters*



**Figure 2.** Laser bandpass filter configuration using volume transmission hologram embedded in a cube for maximum dispersion.

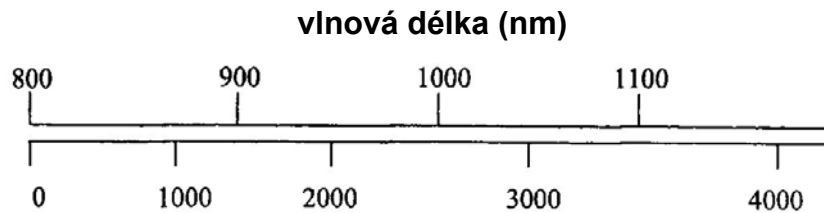
Velmi účinné potlačení plasmových čar iontových laserů

# Optická mřížka jako disperzní element



**mřížková rovnice**

$$d(\sin \vartheta_m - \sin \vartheta_i) = m\lambda$$



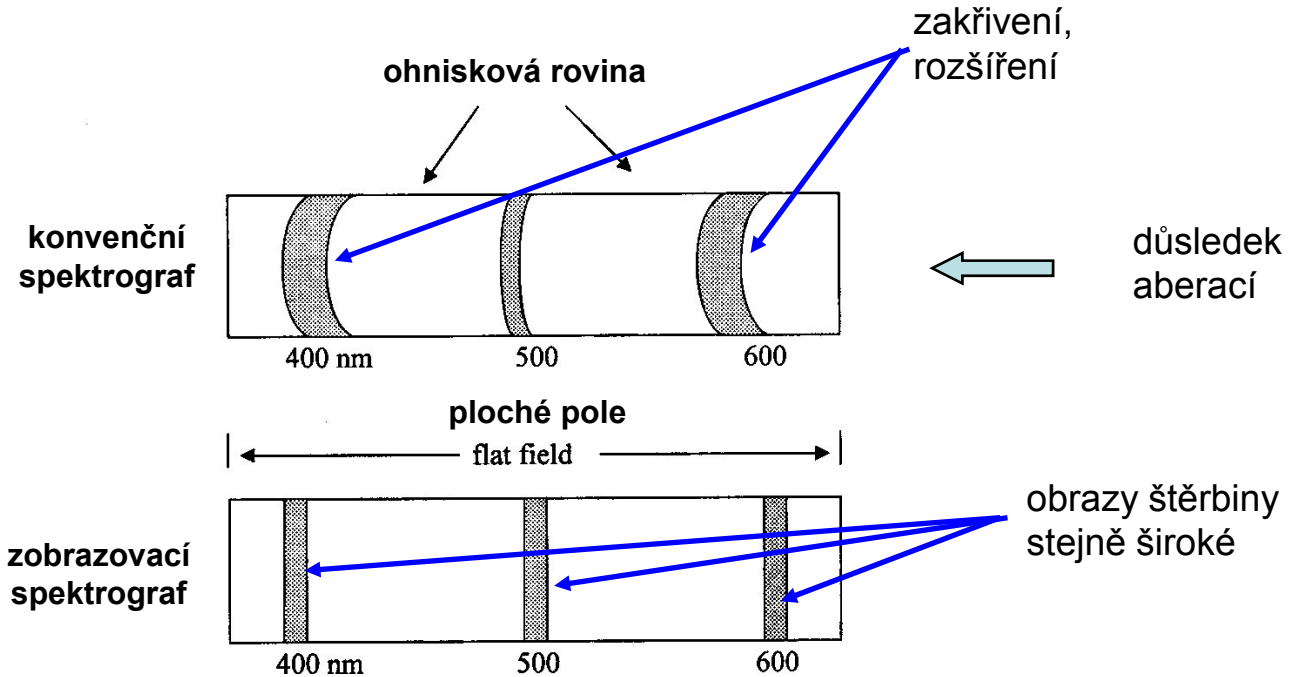
Ramanův posun  $\Delta \tilde{\nu}$  ( $\text{cm}^{-1}$ ) relativně vůči 800 nm

**úhlová disperze**  $D_{\vartheta} \equiv \frac{d\vartheta}{d\lambda} = \frac{m}{d \cos \vartheta_m}$  ( $d$  mřížková konstanta,  $m$  řád difrakce)

**rozlišovací schopnost**  $R \equiv \frac{\lambda}{(\Delta\lambda)_{\min}} = mN$  ( $N$  celkový počet osvětlených vrypů)

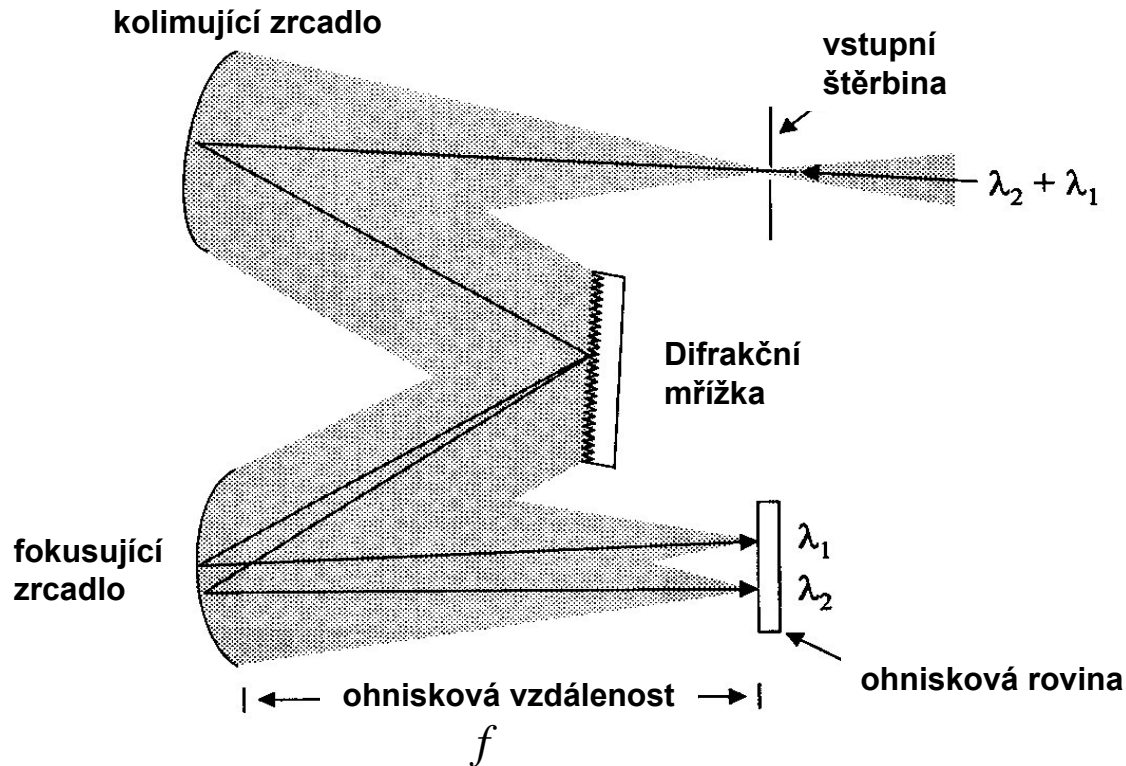
**volný spektrální obor**  $(\Delta\lambda)_{fsr} = \frac{\lambda}{m}$

## Konvenční versus zobrazovací (imaging) spektrograf



Zobrazovací spektrograf – má ploché pole velikosti standardního CCD detektoru (25 mm dlouhé, několik mm vysoké)





**světelnost**  $f / \#$

(krátká ohnisková vzdálenost a velká zrcadla a mřížky znamenají nízké  $f / \#$ )

**lineární disperze**

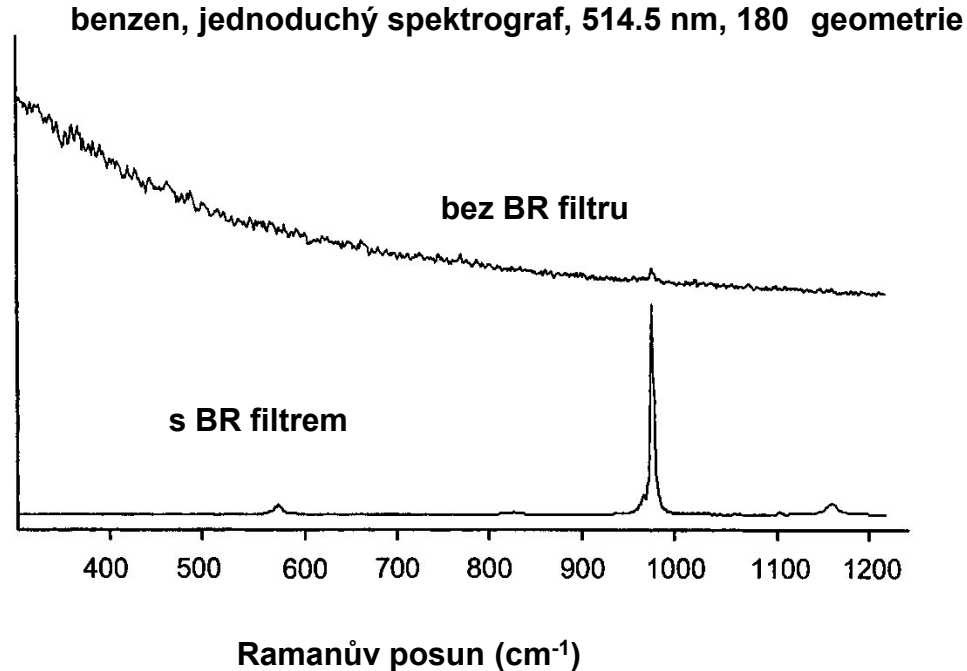
$$D_l \equiv \frac{dl}{d\lambda} = fD_g \text{ (mm/nm)}$$

**reciproká lineární disperze**

$$\frac{1}{D_l} \equiv \frac{d\lambda}{dl} \text{ (nm/mm)}$$

Jednoduchý mřížkový spektrograf v Czerny-Turnerově uspořádání  
(možnost dvou mřížek s různou hustotou vrypů na společném otočném držáku – turret)

Problém – pozadí (stray light)  $\Rightarrow$  je nutné odfiltrovat Rayleighův rozptyl

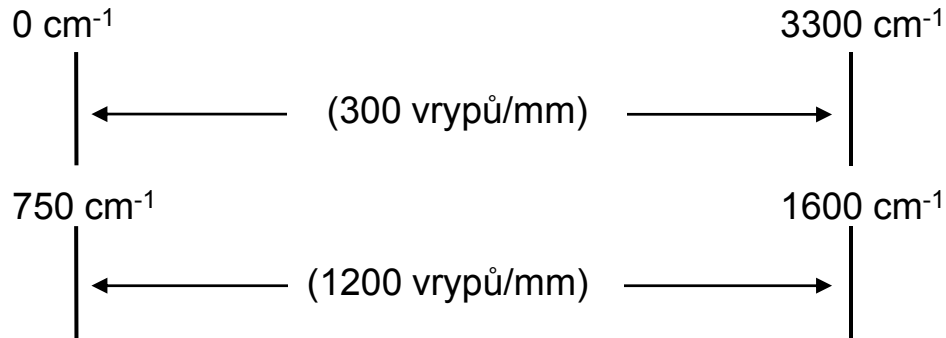


JAK ?

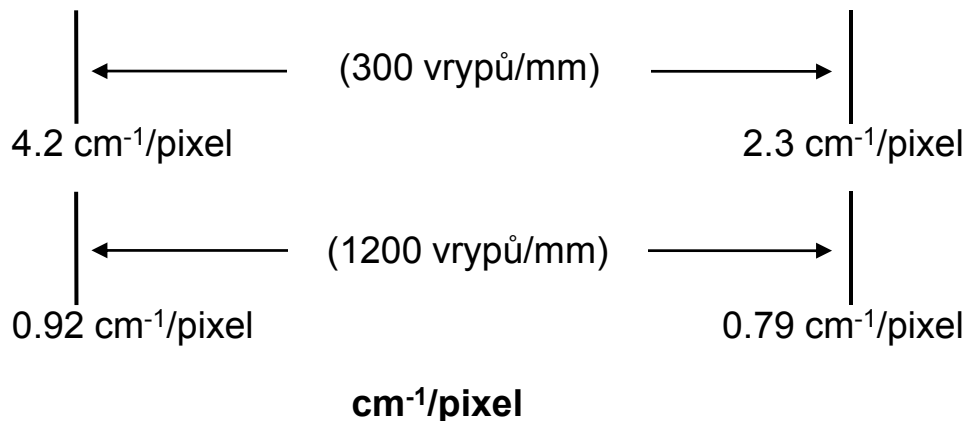
více stupňů (dvojitý monochromátor, trojitý spektrograf)

holografické filtry (notch, edge) – obecně **band rejection (BR)** filters

## Rozsah Ramanových posunů



CCD detektor 1024 x 256 pixelů



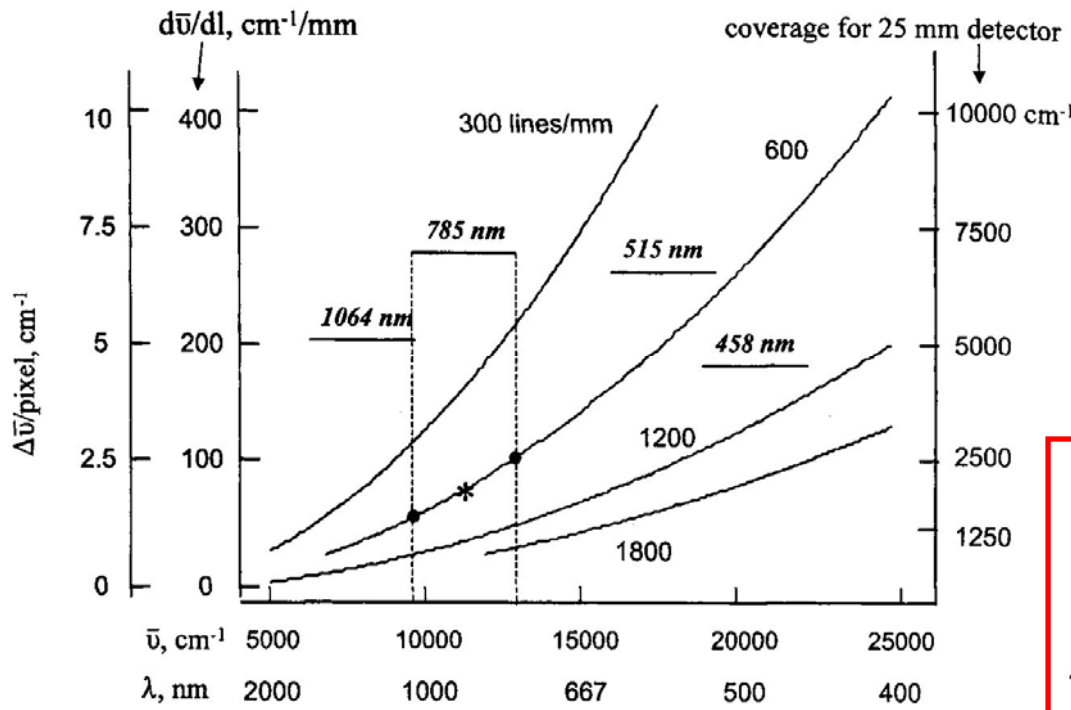
Pokrytí a rozlišení pro dvě různé mřížky (300 a 1200 vrypů/mm) a 25 mm široký CCD detektor ve spektrografu  $f = 250$  mm

Vzdálenost dvou sousedních pixelů je konstantní ve vlnové délce ale není konstantní ve vlnočtech, neboť

$$\tilde{\nu} = \frac{1}{\lambda} \quad \text{potom} \quad d\tilde{\nu} = -\frac{1}{\lambda^2} d\lambda$$

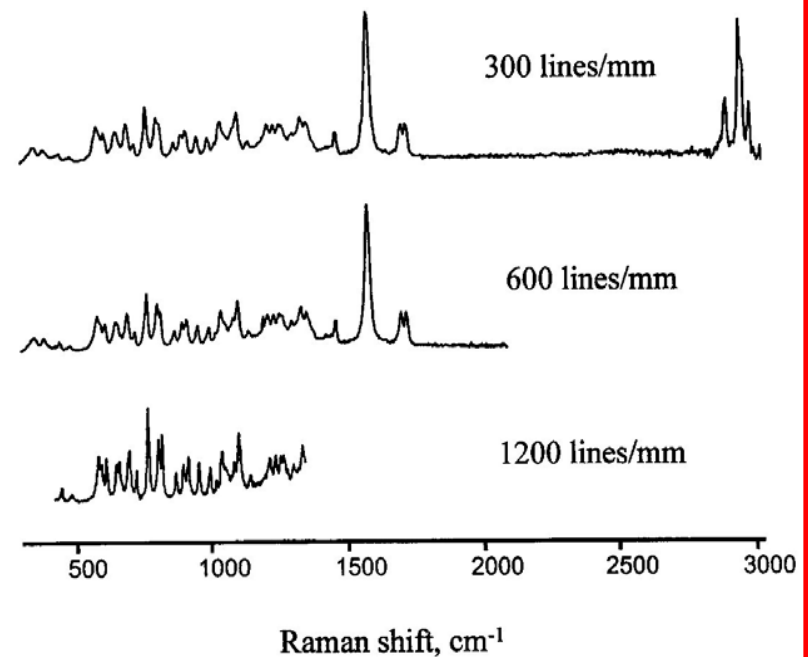
a tedy disperze  $dl/d(\Delta\tilde{\nu})$  (mm/cm<sup>-1</sup>) není přes rozměr detektoru konstantní !!!

# Spektrální rozlišení a spektrální pokrytí



Spektra askorbátu vápenatého měřená se třemi různými mřížkami

Calcium ascorbate, 785 nm



Disperze a spektrální pokrytí pro spektrograf ( $f = 250$  mm), 25 mm široký CCD detektor s 25  $\mu\text{m}$  pixely a mřížky 300, 600, 1200 a 1800 vrypů na mm.

## Spektrální rozlišení a spektrální pokrytí

excitační vlnová délka (nm)	hustota vrypů (vrypy/mm)	ohnisková vzdálenost (mm)	$\Delta\nu$ (cm <sup>-1</sup> ) na 25 $\mu$ m pixel @ 1500 cm <sup>-1</sup>	spektrální pokrytí 25 mm detektoru (cm <sup>-1</sup> )
514.5	600	250	5.4	4756
514.5	1200	250	2.7	2709
514.5	1800	250	1.8	1894
785	600	250	2.11	2231
785	1200	250	1.05	1223
785	1200	500	0.53	642

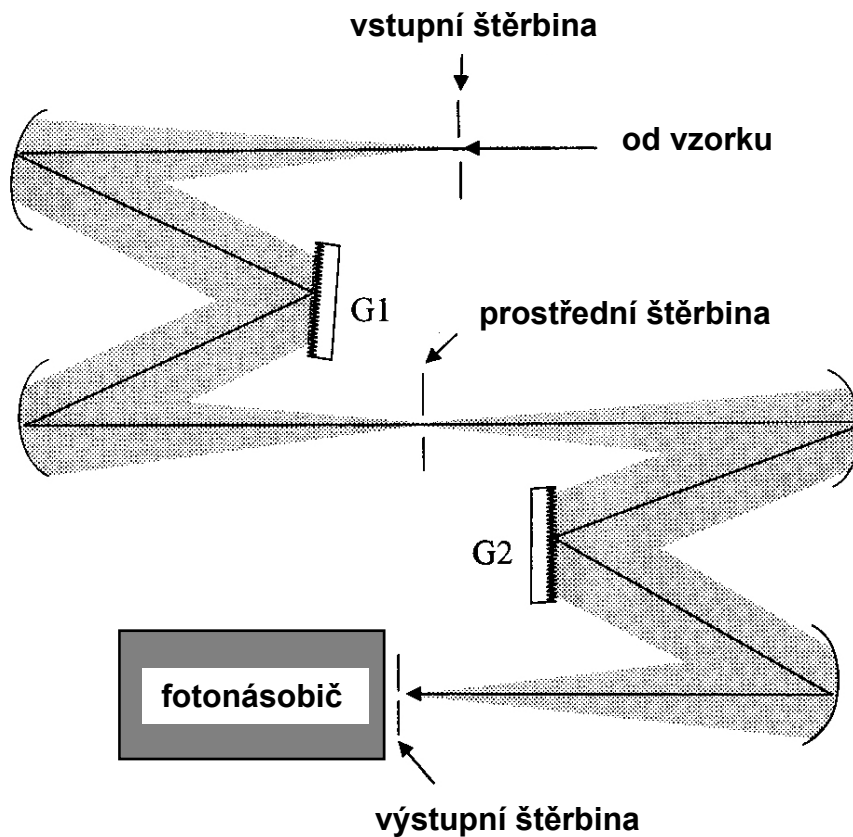


Schéma dvojitého monochromátoru  
(např. Spex 1403)  
70. až 80. léta

## Výhody:

- vysoké rozlišení
- výborný odstup od pozadí ( $10^{-12}$  –  $10^{-14}$ )
- měření v blízkosti excitační linie

## Nevýhody:

- pomalé měření (bod po bodu)
- příliš velká disperze pro mnohokanálovou detekci

filtrující dvojitý monochromátor  
v subtraktivním módu

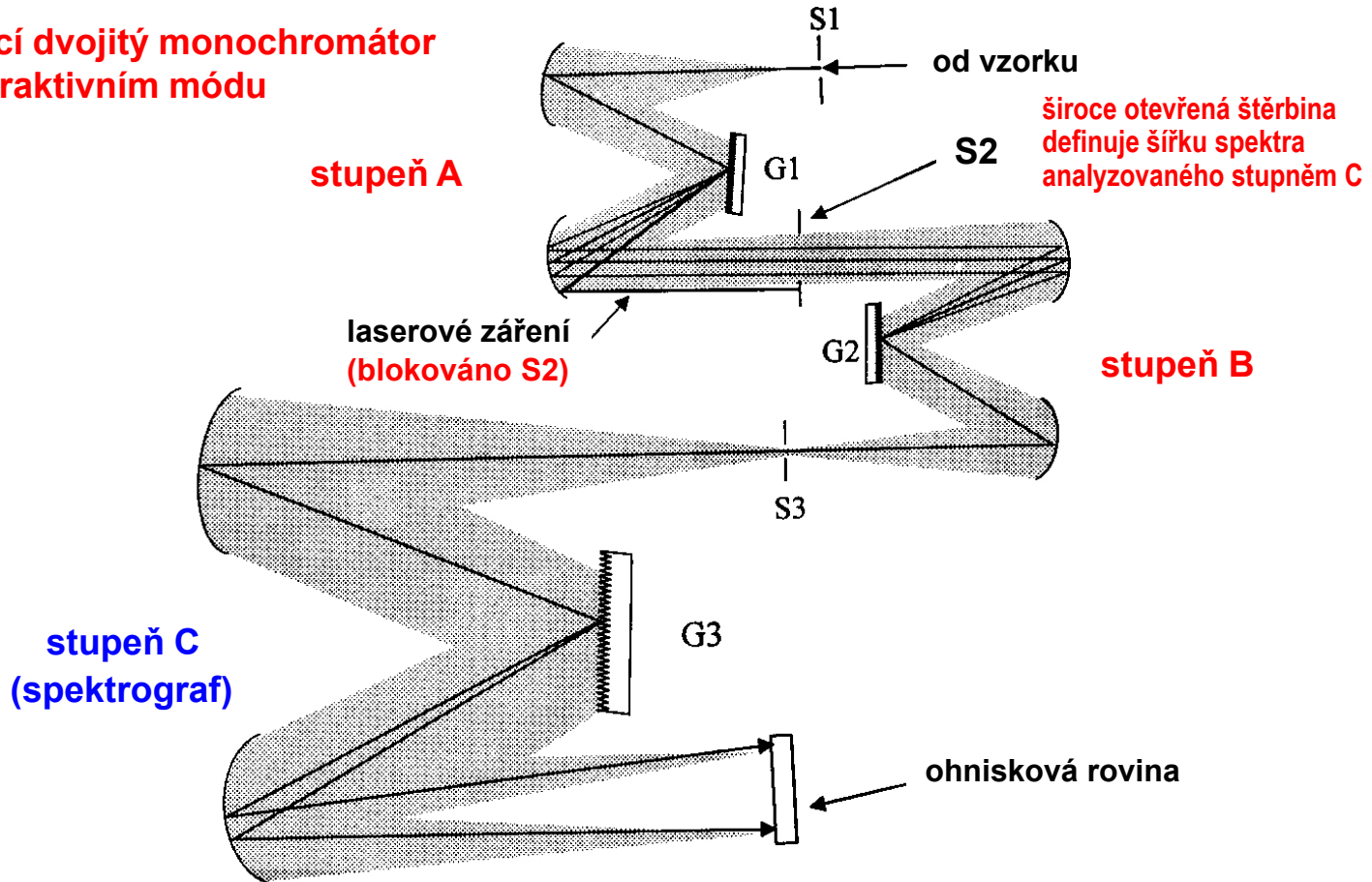


Schéma trojitého spektrografu (např. Jobin Yvon T64000)

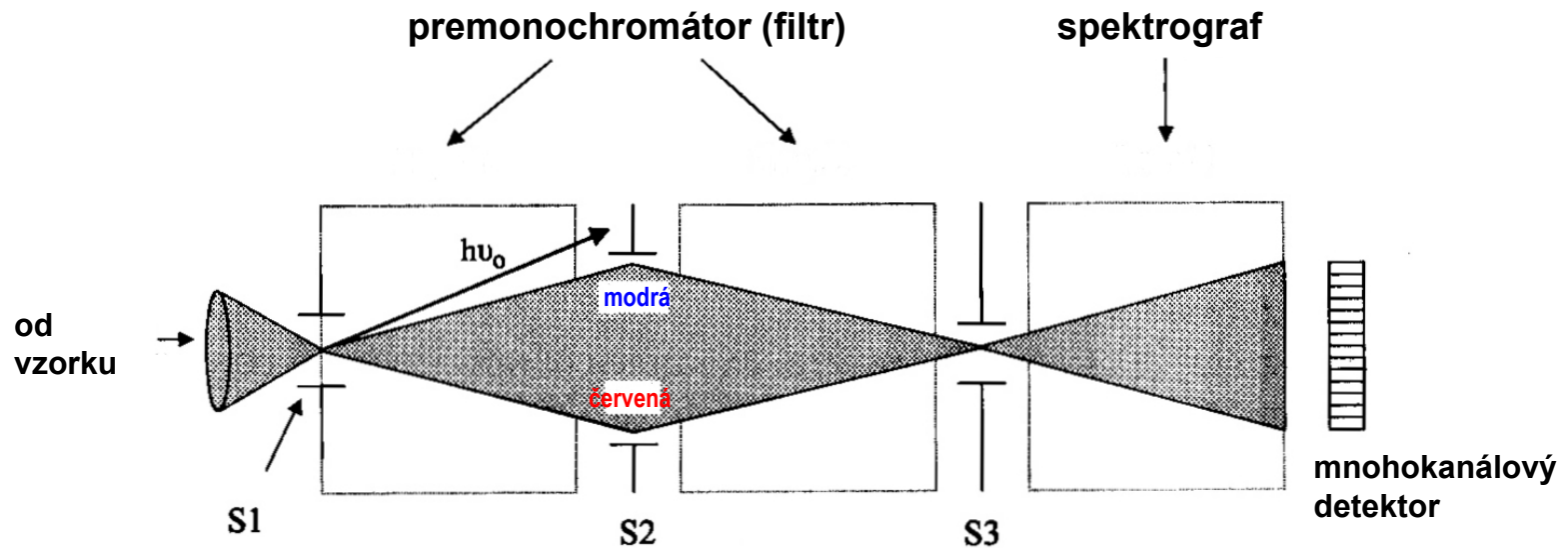


Diagram ilustrující fungování trojitého spektrografu

## Výhody:

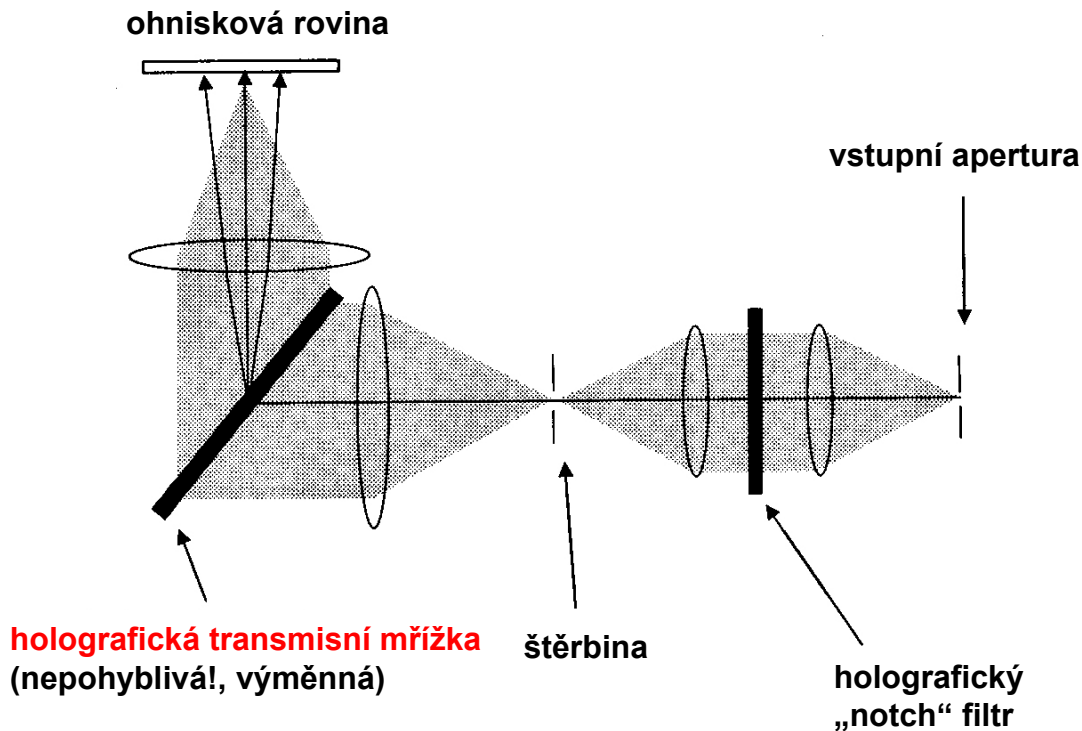
- výborný odstup od pozadí ( $10^{-12}$  –  $10^{-14}$ )
- měření v blízkosti excitační linie
- univerzálnost

## Nevýhody:

- nízká světelnost ( $\Rightarrow$  málo světla na detektoru)
- vysoká cena



# Holografický zobrazovací spektrograf s vysokou světelností



## Schéma osového transmisního holografického spektrografu (např. Kaiser 1.8i)

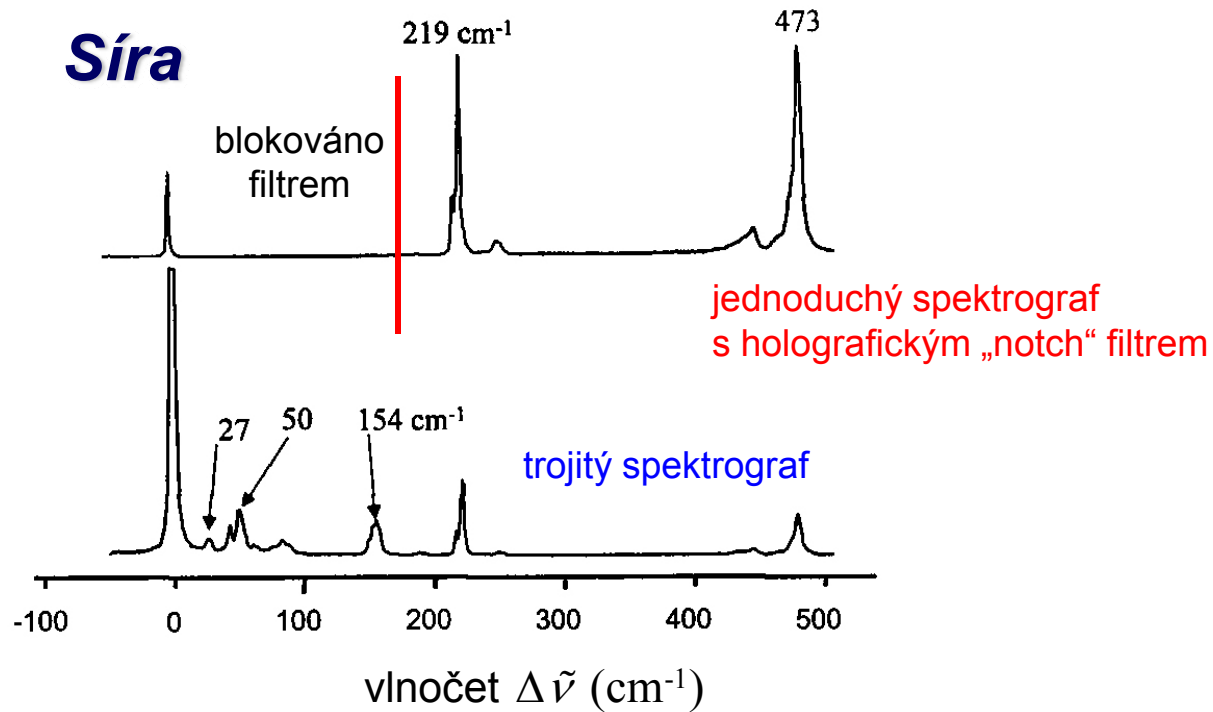
### Výhody:

- světelnost (přechod od  $f/4$  k  $f/1.4$  představuje téměř **řádové zvýšení signálu** na detektoru,  $4/1.4)^2 = 8.2$ )
- kompaktnost (malé rozměry)
- velká disperze

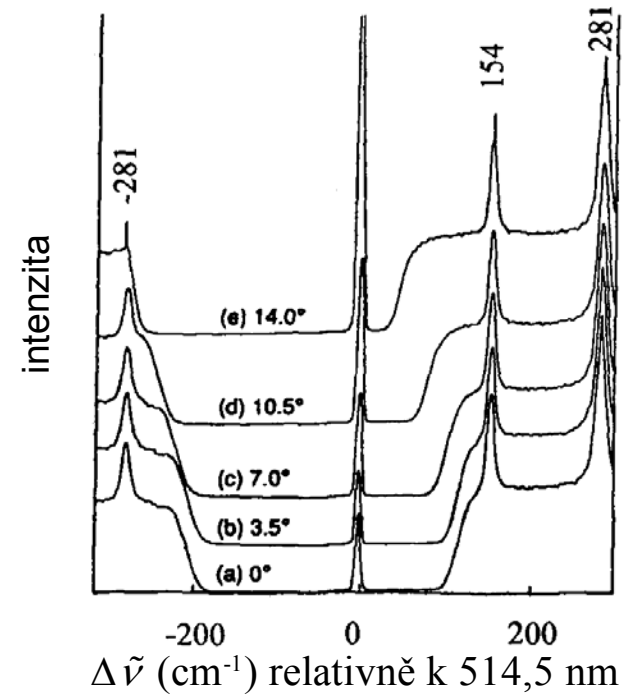
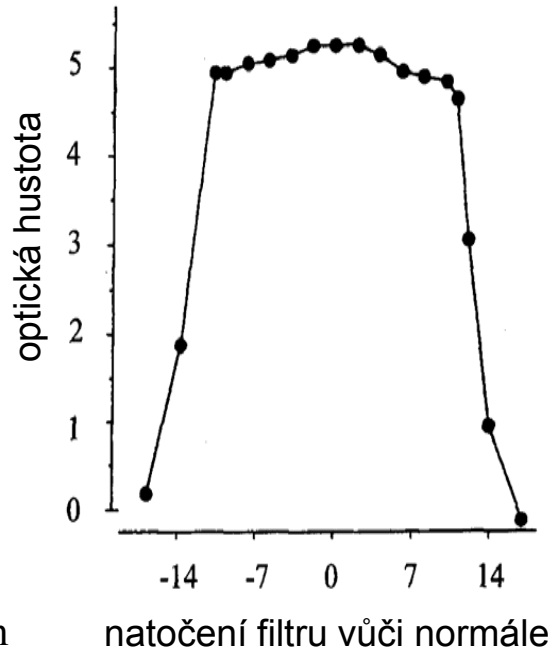
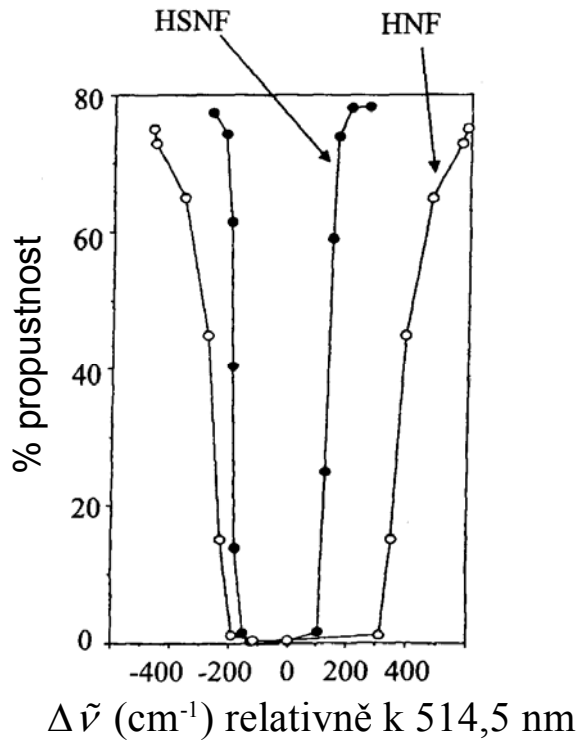
### Nevýhoda:

- různé mřížky pro různé excitační vlnové délky

# Srovnání jednoduchého a trojitého spektrografu



Spektrum síry změřené na jednoduchém spektrografu s holografickým notch filtrem a na trojitém spektrografu



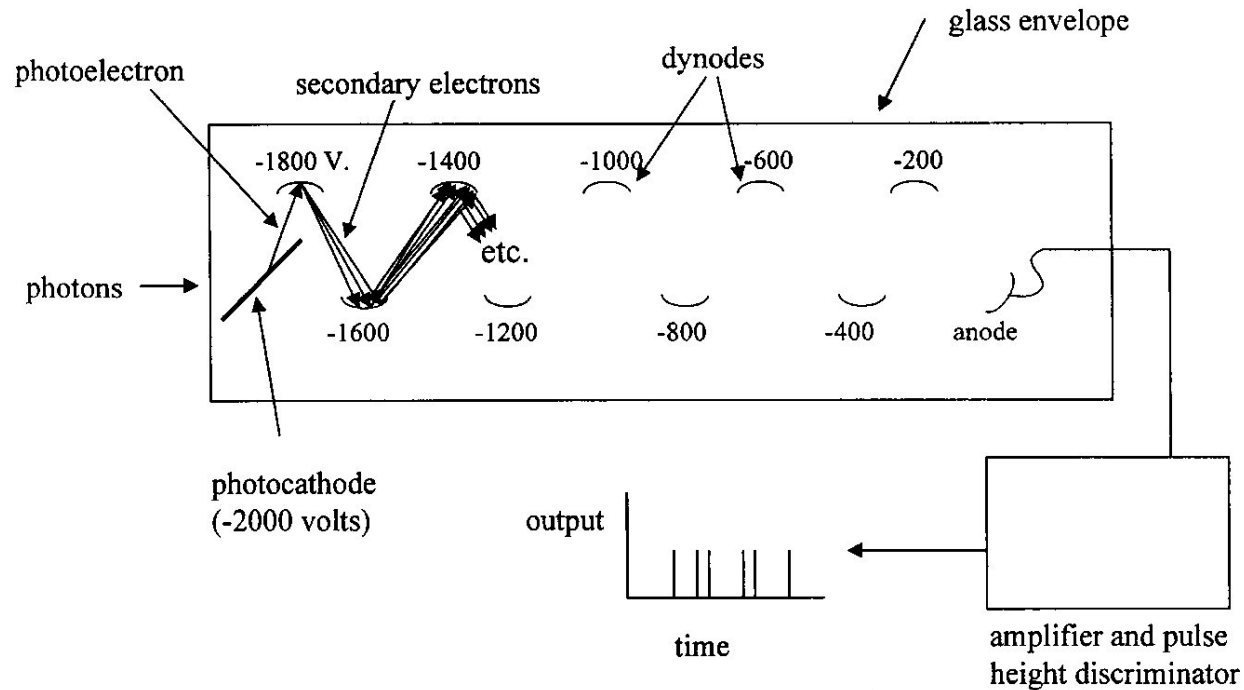
Propustnost holografického notch filtru (HNF) a holografického super notch filtru (HSNF).

Závislost optické hustoty HNF na úhlu natočení filtru.

Úhlové ladění HNF filtru (spektrum kalcitu).

<b>Notch</b>	OD > 4.0	šířka pásma 700 $\text{cm}^{-1}$	šířka hrany 300 $\text{cm}^{-1}$
<b>Notch Plus</b>	OD > 6.0	šířka pásma 700 $\text{cm}^{-1}$	šířka hrany 300 $\text{cm}^{-1}$
<b>Super Notch</b>	OD > 4.0	šířka pásma 350 $\text{cm}^{-1}$	šířka hrany 150 $\text{cm}^{-1}$
<b>Super Notch Plus</b>	OD > 6.0	šířka pásma 350 $\text{cm}^{-1}$	šířka hrany 150 $\text{cm}^{-1}$

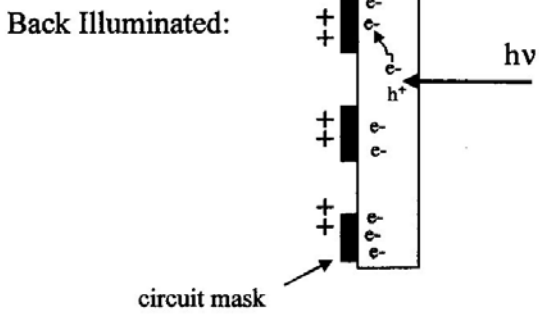
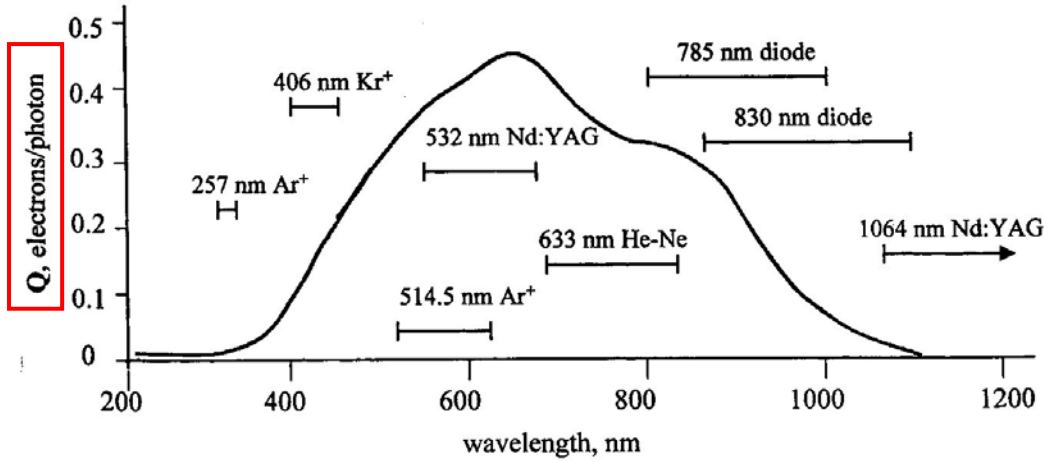
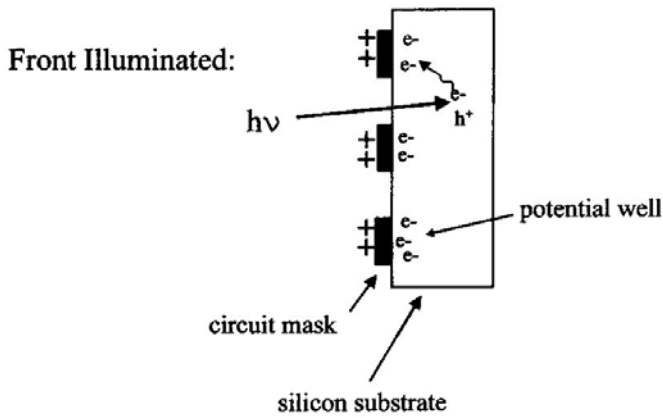
# Detektory pro jednonálové spektrometry



Fotonásobič (PMT) pracující v režimu čítání fotonů

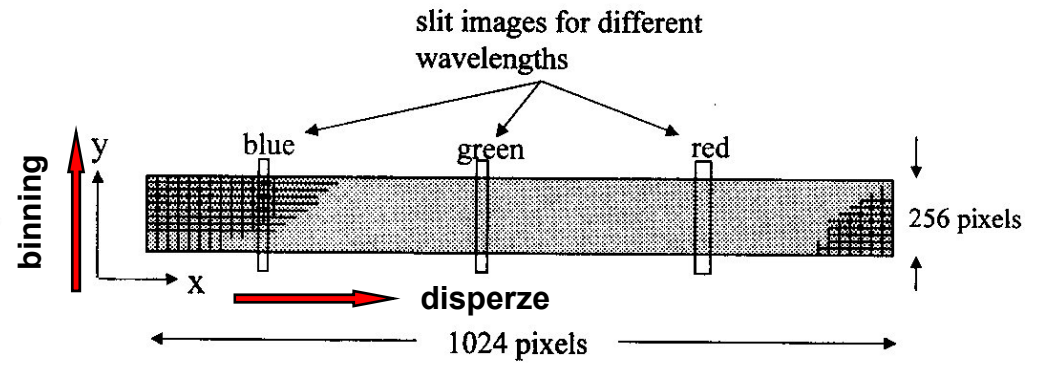
parametry	PMT v režimu čítání fotonů (RCA 31034a)	Lavinová fotodioda
Maximální Q	25%	90%
Rozsah odezvy	185-930 nm	300-1050 nm
Fotocitlivá plocha	3 x 15 mm	průměr 5 – 20 mm
Temný signál	<10/sec	<25/sec
Maximální rychlost čítání	>10 <sup>5</sup> /sec	>10 <sup>6</sup> /sec

# Mnohokanálové detektory (CCD)



Typická  $Q$  versus  $\lambda$  charakteristika čelně osvětlovaného křemíkového CCD s vyznačenými rozsahy Ramanových posunů (0 až 3000  $\text{cm}^{-1}$ ) pro několik běžných  $\lambda_{\text{exc}}$ .

Čelně ( $Q_{\text{max}} \sim 0.45$ ) a zpětně osvětlované ( $Q_{\text{max}} \sim 0.9$ ) CCD



Orientace CCD v ohniskové rovině spektrografu

## Některé reprezentativní CCD užívané v Ramanově spektroskopii

typ	formát	velikost pixelu ( $\mu\text{m}$ )	$Q_{\text{max}}$	Temný proud ( $\text{e}^-/\text{pixel}/\text{sec}$ )
EEV 15-11	256 x 1024	27 x 27	0.45 (FI)	< 0.002 ( $\text{LN}_2$ )
			0.92 (BI)	< 0.02 (TE)
ISA "MRC"	2000 x 800	15 x 15	0.45 (FI)	< 0.001 ( $\text{LN}_2$ )
			0.88 (BI)	< 0.01 (TE)
SPE-10:100B	1340 x 100	20 x 20	0.92 (BI)	< 0.001 ( $\text{LN}_2$ )

### Základní parametry:

$$S(\text{photons}) = \frac{\gamma S'(\text{counts})}{Q}$$

**gain** ( $\gamma$  zisk) – počet zachycených elektronů potřebných pro jednu digitální jednotku (ADC unit)

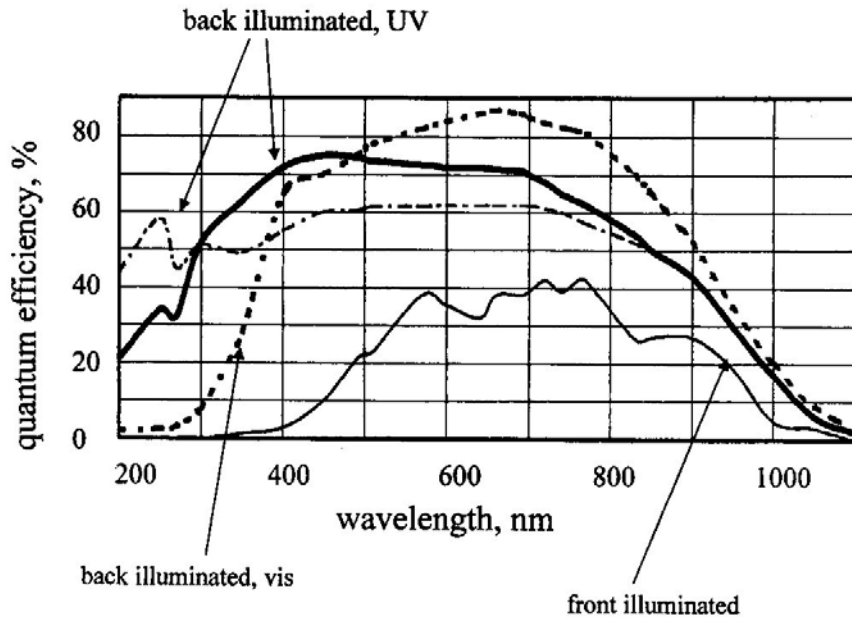
**dark current** ( $\text{e}^-/\text{pixel}/\text{sec}$ ) – nízký u scientific grade spectroscopic CCDs ( $\Rightarrow$  drahé!)

**readout noise** – nezávisí na počtu počítaných elektronů, činí řádově jednotky elektronů, projeví se pouze při velmi malém počtu počítaných elektronů, při stovkách elektronů je již zanedbatelný

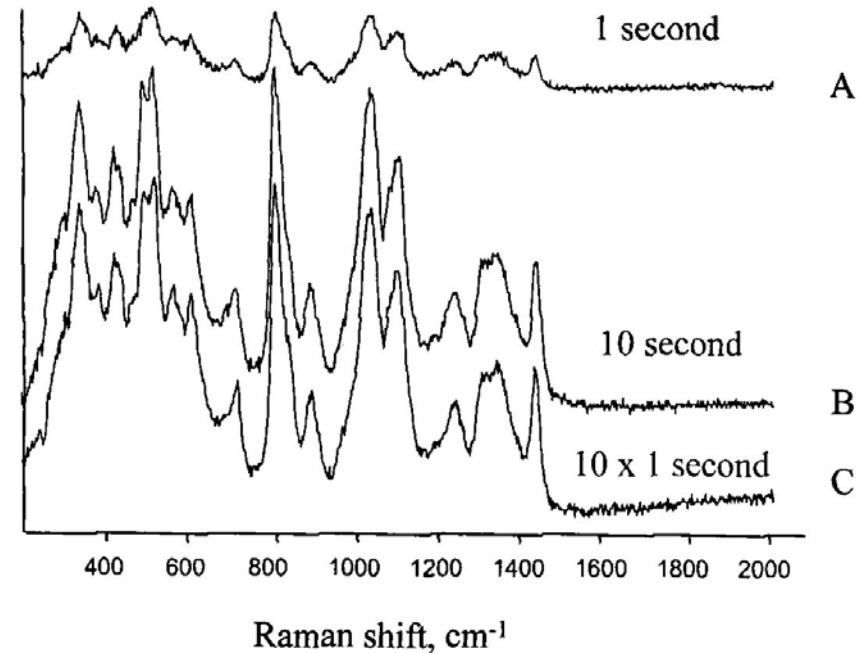
**full well capacity** – limit počtu zachycených elektronů, obecně  $10^4$  až  $10^6$  elektronů, překročení limitu  $\Rightarrow$  blooming, může být podstatná při binningu

**dynamic range** – efektivní rozsah pozorovatelných intenzit, poměr full well capacity a readout noise

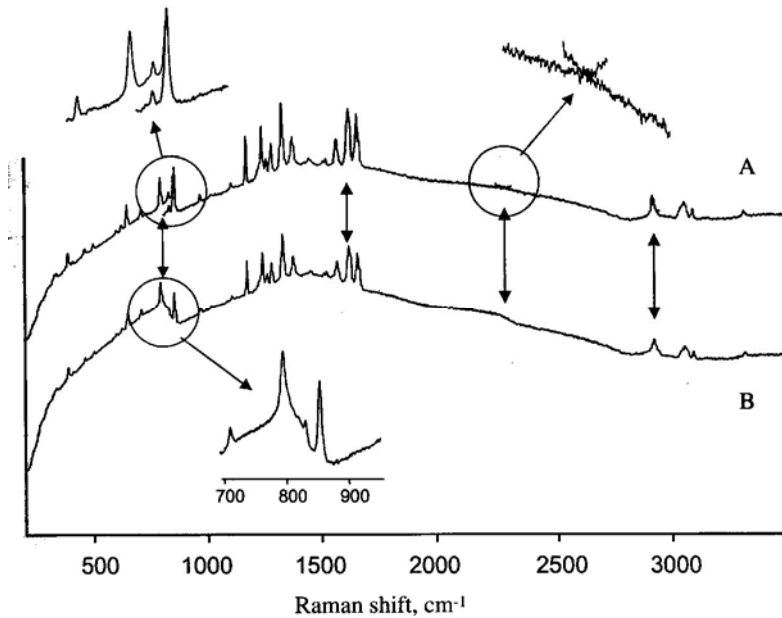
**binning** – sčítání elektronů ze dvou či více pixelů při nebo po odečtu (hardware binning, software binning), možné podél obou os



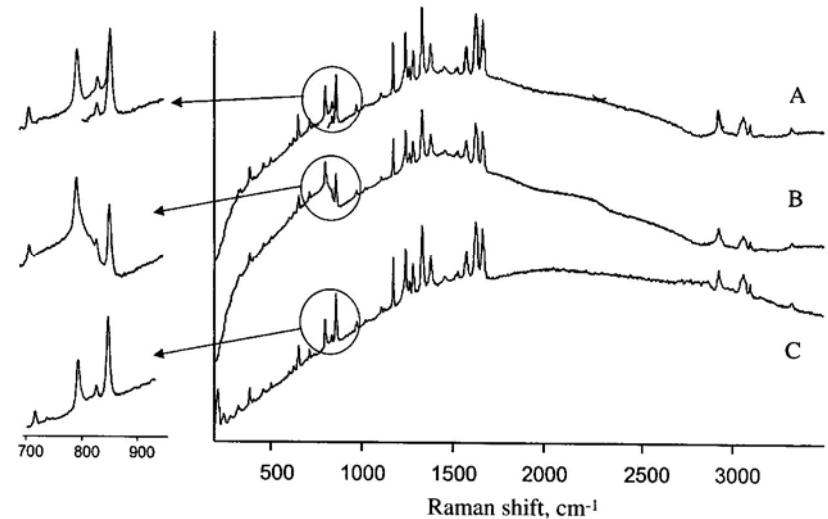
## Kvantová účinnost různých CCD užívaných v Ramanově spektroskopii



Ilustrace průměrování (akumulace) signálu:  
A – doba akumulace 1 sekunda  
B – doba akumulace 10 sekund  
C – součet 10 jednosekundových akumulací  
SNR v B a C je srovnatelný (~3x lepší než v A)

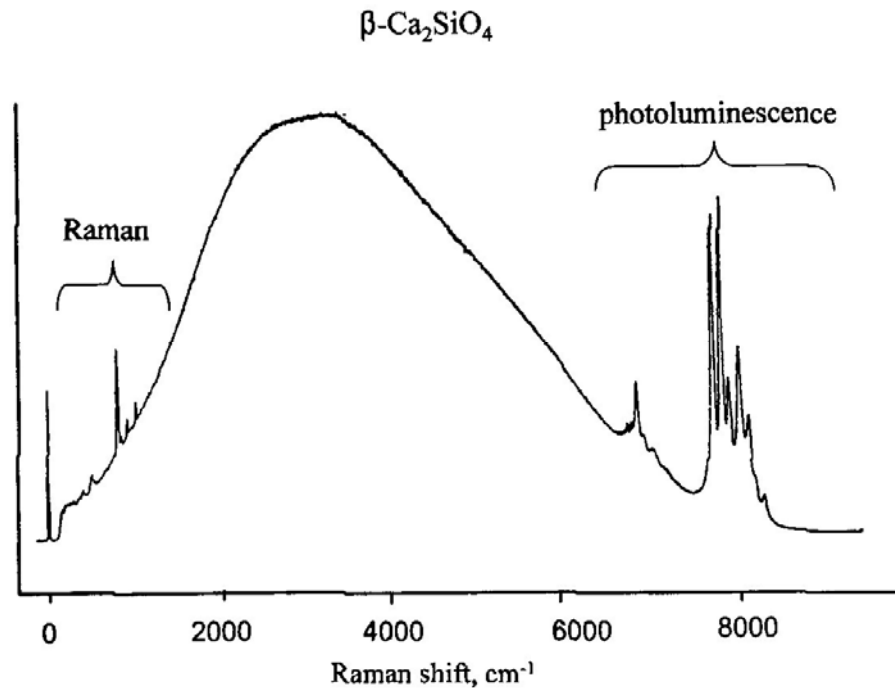


**Multi segment acquisition** – problémy se „slepováním“ jednotlivých úseků



**Multi segment acquisition** – problémy se „slepováním“ jednotlivých úseků může pomoci vyřešit korekce na odezvu spektrometru (instrument response function).





**Scanning multichannel technique** (SMT) – mřížka při odečítání CCD stojí, poté se nepatrně pootočí (o malý krok srovnatelný s posunem spektra o 1 pixel). Výsledkem je velký počet silně se překrývajících úseků, ze kterého je potom zrekonstruováno výsledné spektrum.

Možné je i kontinuální skenování, kdy je pohyb mřížky synchronizován s odečtem CCD.

**Mnohokanálový systém** –  $N_R$  detekčních elementů detekuje mnoho vlnových délek

**Multiplexový systém** – fotony různých vlnových délek jsou detekovány jediným detektorem

**FT-Raman** – multiplexová technika, kdy je mnoho vlnových délek modulováno interferometrem, který generuje interferogram zaznamenávaný jediným detektorem

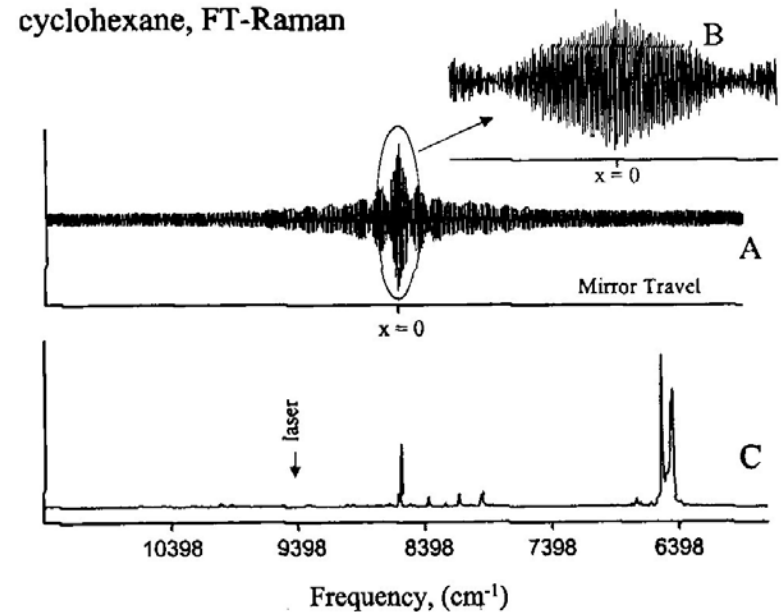
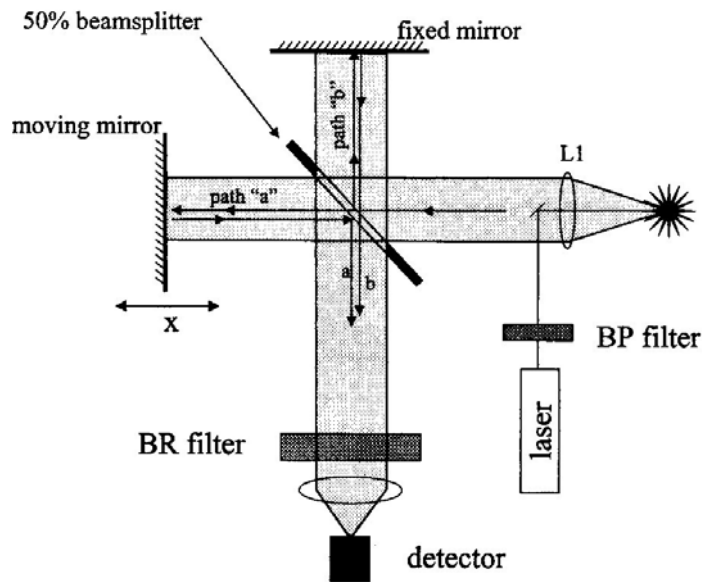
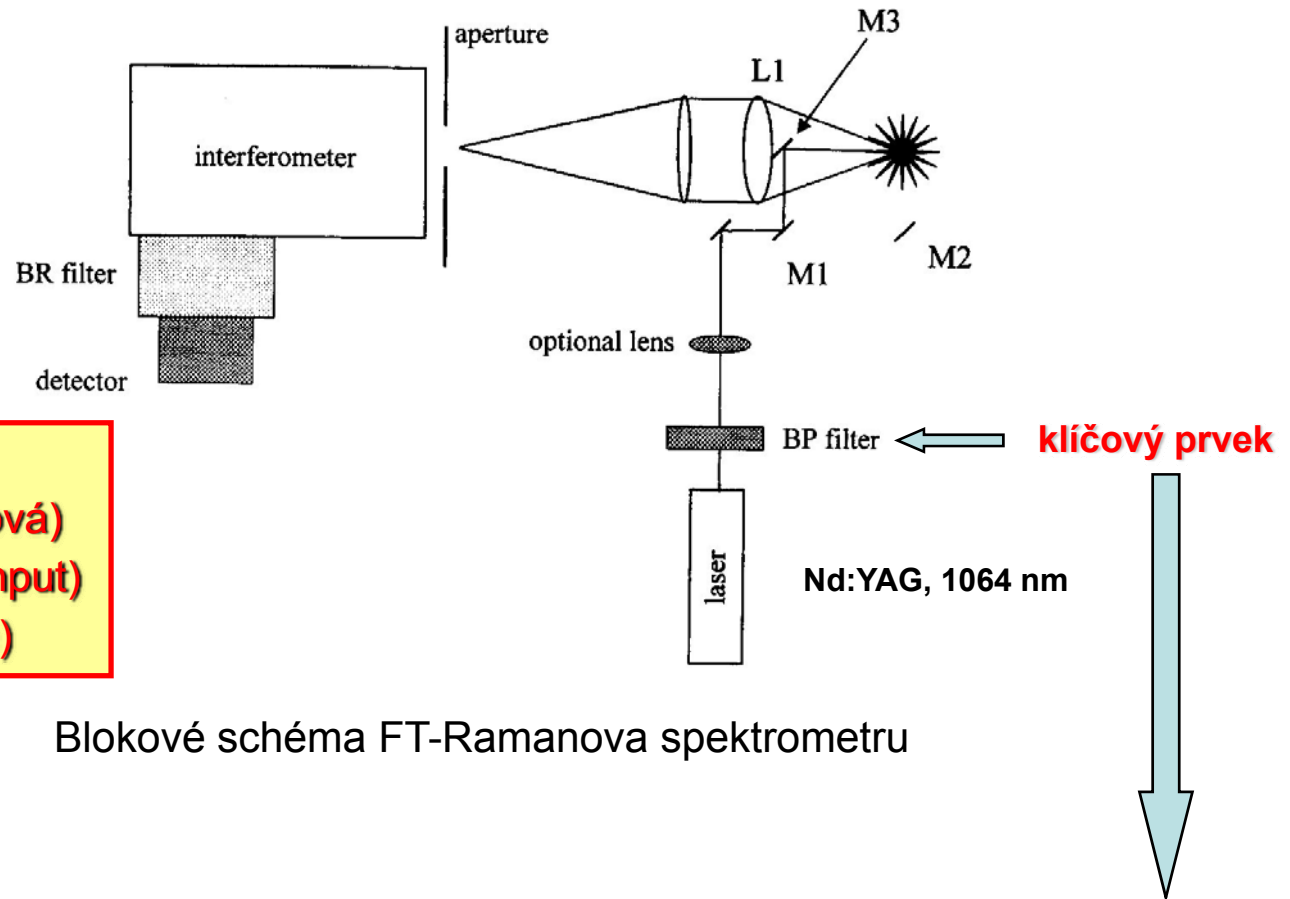


Schéma FT Ramanova spektrometru založeného na Michelsonově interferometru

modulace – lineárním pohybem zrcadla, který generuje dráhový rozdíl  $a - b = 2x$

Interferogram (A) pro cyklohexan excitovaný 1064 nm a Ramanovo spektrum (C).

rozlišení  $\delta\tilde{\nu} = \frac{1}{\Delta x_{\max}}$  ← maximální dráha zrcadla



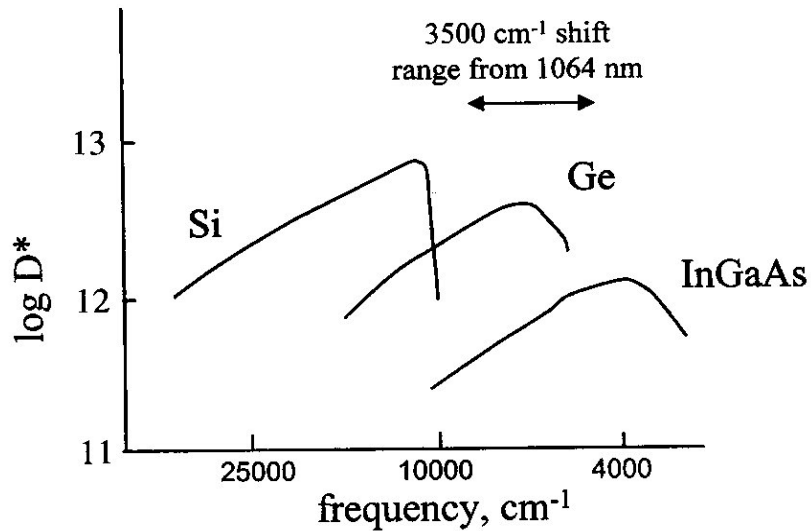
Blokové schéma FT-Ramanova spektrometru

## výhody FT:

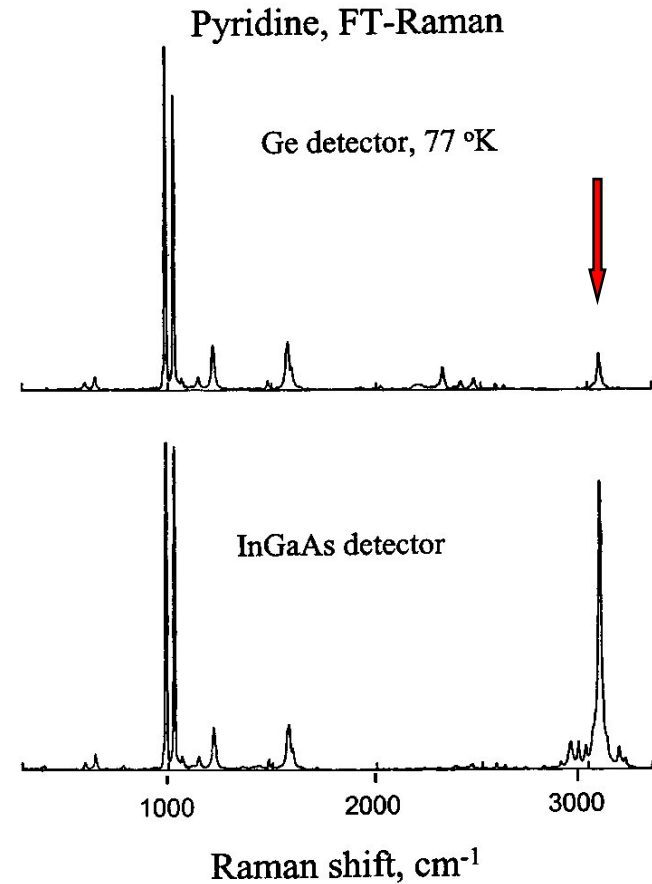
Felgettova (multiplexová)  
Jacquinotova (throughput)  
Connesové (kalibrace)

neboť šum v FT-Ramanově spektru je úměrný odmocnině ze **střední intenzity světla přes celé spektrum**, takže jestliže se podstatná část budícího laserového záření dostane do interferometru, celé spektrum bude degradováno (**distributed noise**)

⇒ je potřeba excelentní filtr pro potlačení laserového záření

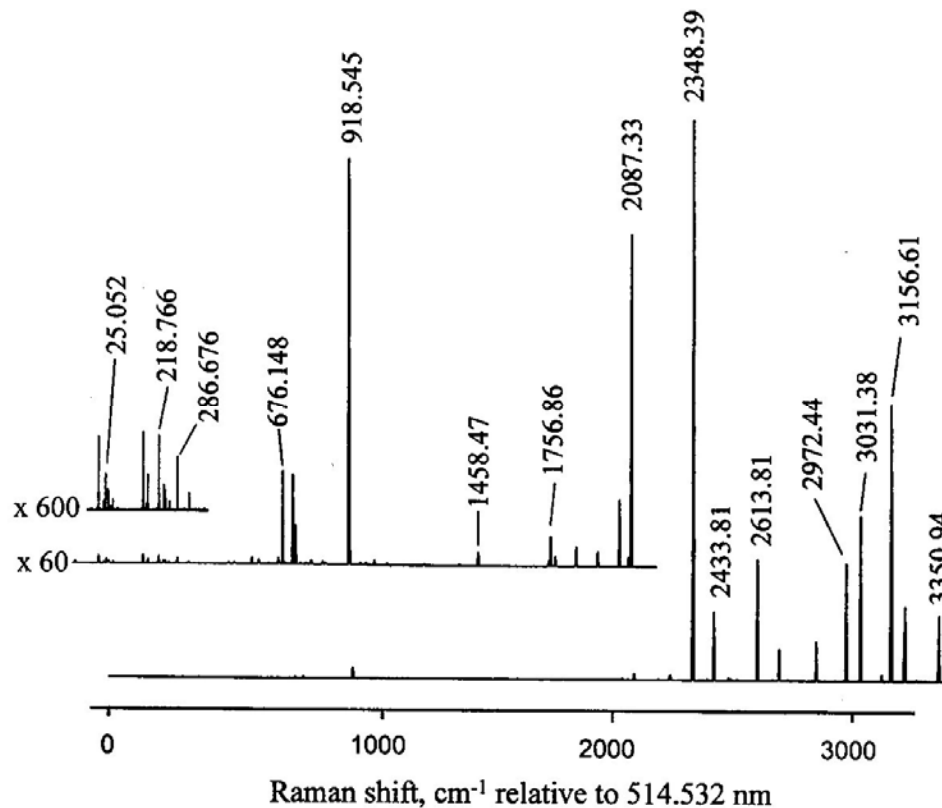


Frekvenční průběh logaritmu detektivit  $D^*$  polovodičových detektorů s naznačeným rozsahem Ramanových posunů při excitaci 1064 nm.



Nekorigovaná FT-Ramanova spektra pyridinu měřená s různými detektory ilustrující zkreslení relativních intenzit způsobené změnami kvantové účinnosti přes spektrum.

kalibrace vlnočtové škály – klíčová procedura, které je třeba věnovat potřebnou péči



přesnost 1 cm<sup>-1</sup> u vibrace 1000 cm<sup>-1</sup>:

**FTIR:** 1/1000 = **0.1%** chyba

**Raman** s excitací 514.5 nm:

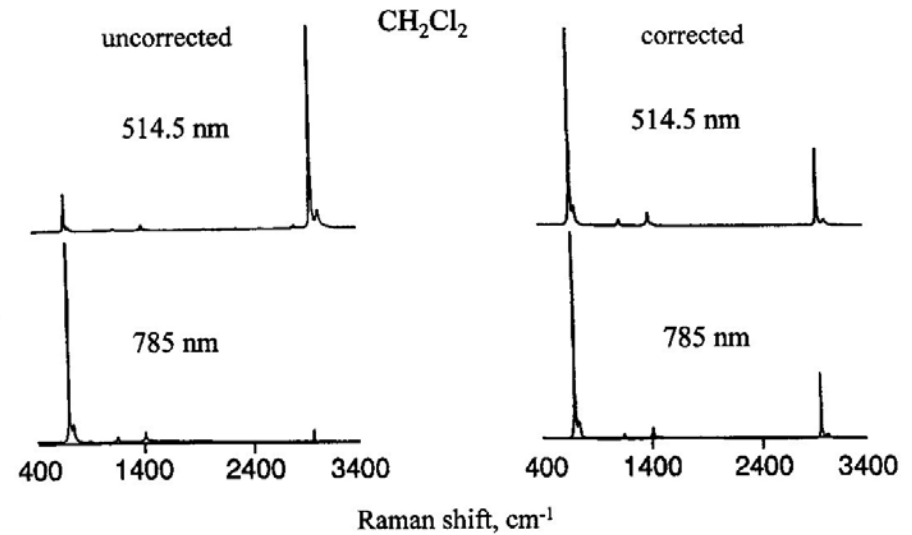
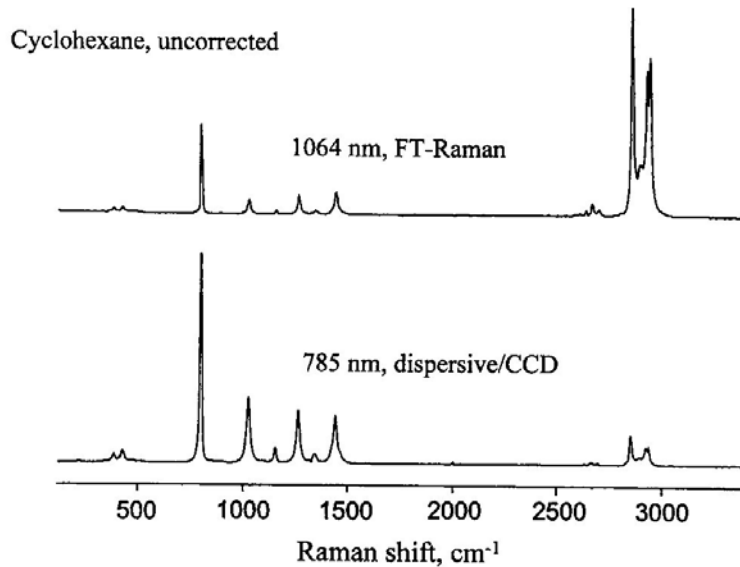
1/(19435-1000) = 1/18435 = **0.005%**

**POZOR** – vztah mezi Ramanovým posunem (cm<sup>-1</sup>) a pixelem je nelineární je aproximován zpravidla polynomem 3. stupně.

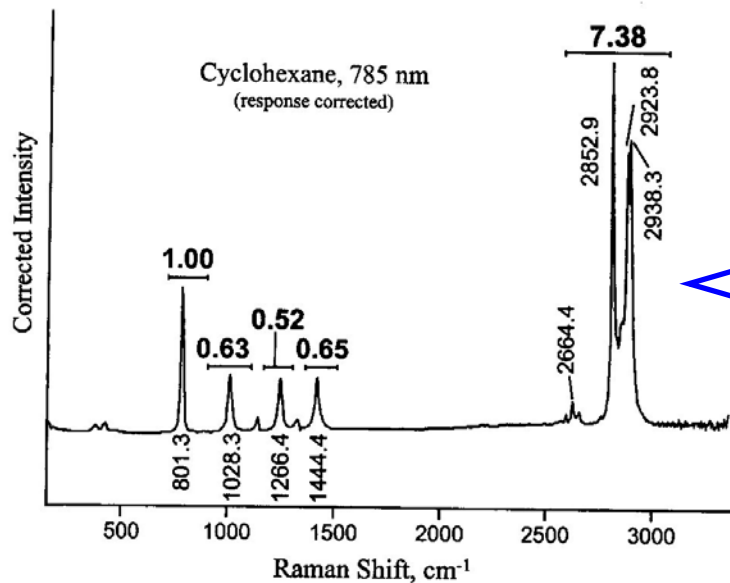
Emisní spektrum neonové lampy – jeden z kalibračních standardů, dále třeba plasmové linie Ar<sup>+</sup>, Kr<sup>+</sup>

Raman shift standards from ASTM (American Society for Testing and Materials) – např. cyklohexan, inden, síra, ... jsou tabelovány polohy standardní odchylka ⇒ **výhoda:** univerzálnost (nezávisí na excitaci !)

# Kalibrace přístrojové funkce

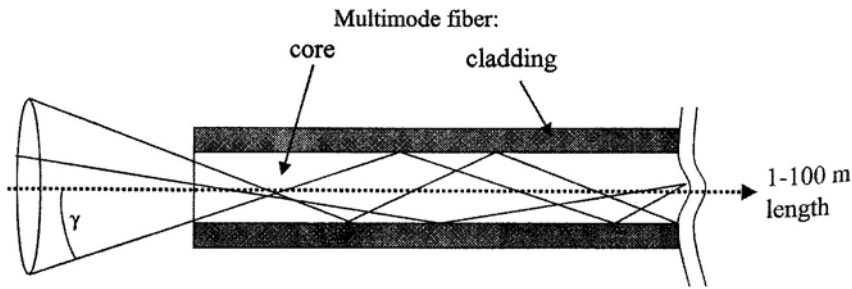


## Nekorigovaná spektra cyklohexanu

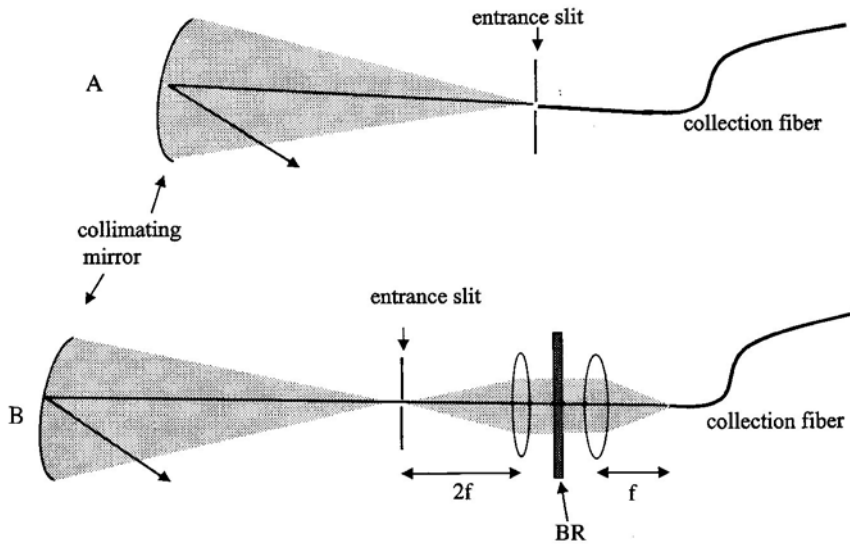


Spektra methylen chloridu při dvou excitacích před a po korekci pomocí **standardní wolframové lampy**. Alternativně lze využít i **luminiscenční standardy**.

Korigované spektrum cyklohexanu s integrálními intenzitami vztaženými k linii 801  $\text{cm}^{-1}$ .

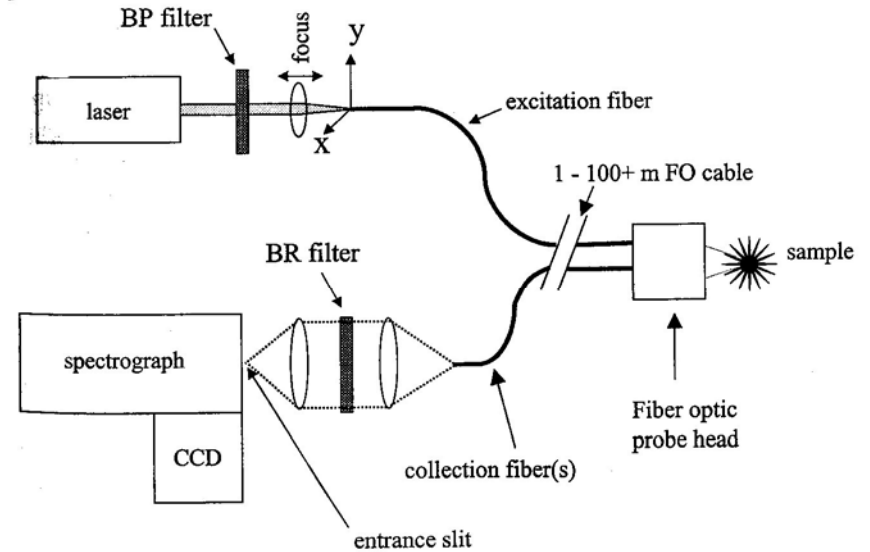


## Šíření světla v optickém vlákně.

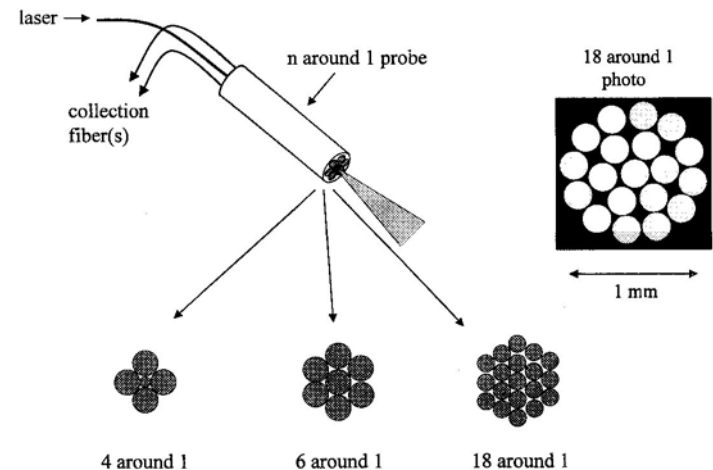


## Dvě metody připojení optických vláken ke spektrometru

- A. přímé připojení bez možnosti přizpůsobení  $f/\#$  spektrometru
- B. běžný způsob umožňující i umístění BR filtru do kolimovaného svazku

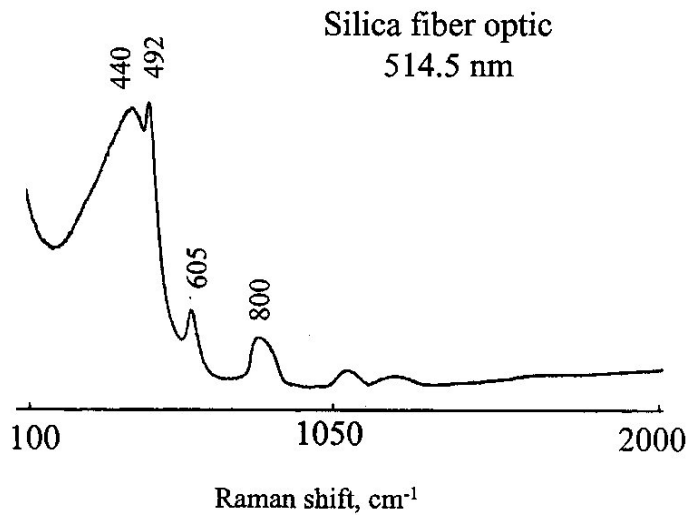


## Obecné schéma použití optických vláken v RS.

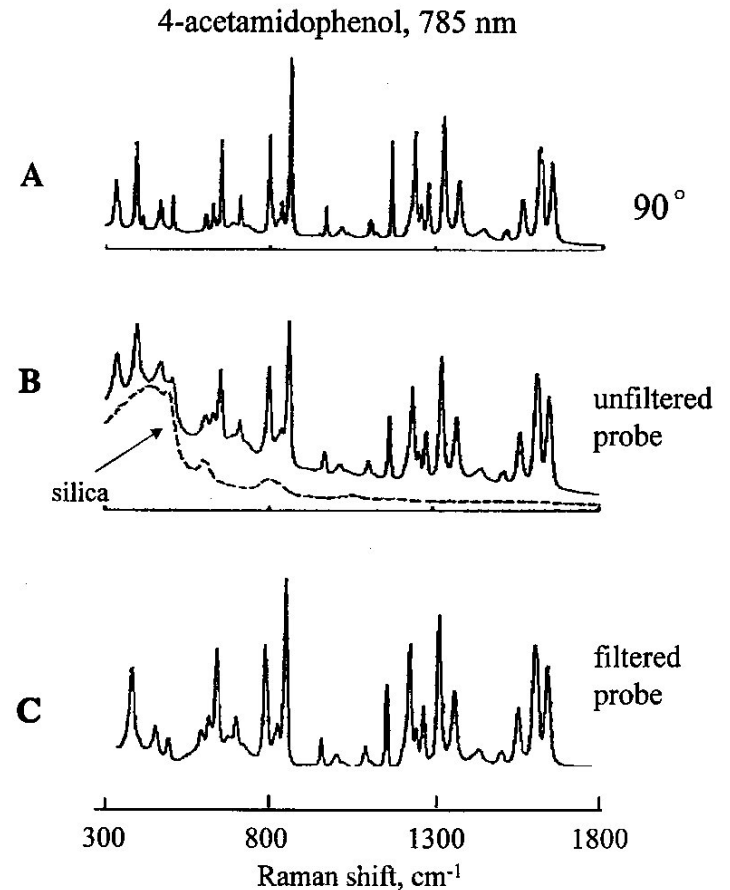


## Uspořádání vláknových sond (n-around 1).



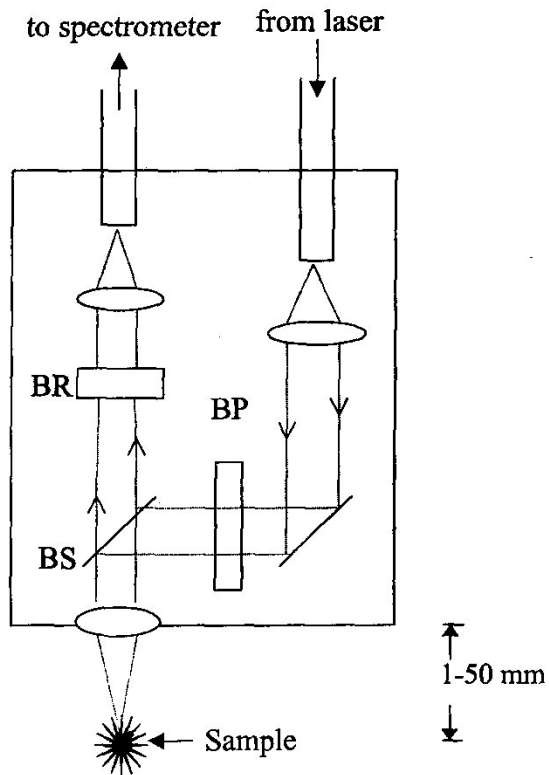


Ramanovo spektrum typického křemenného optického vlákna, excitace 514.5 nm.

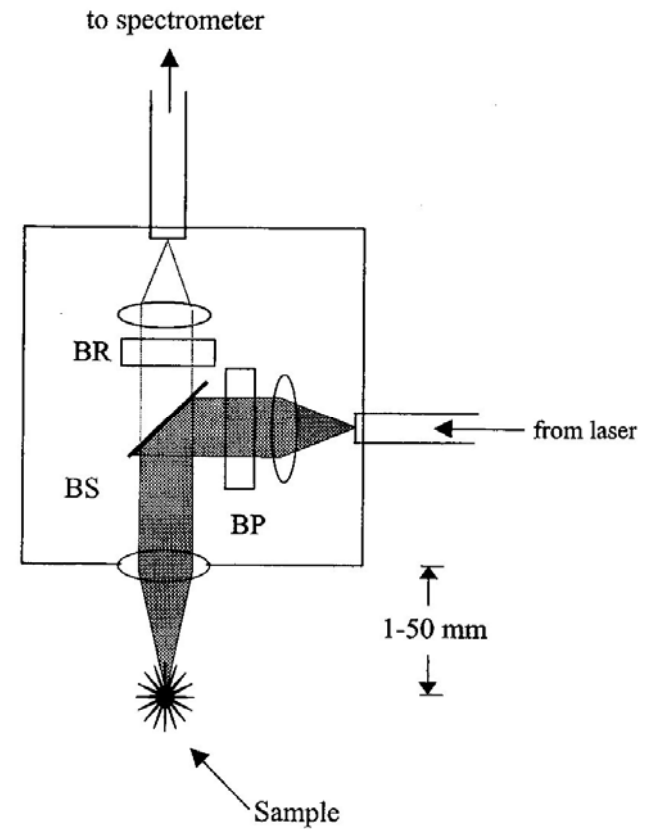


Ramanovo spektrum 5-acetamidofenolu, excitace 785 nm.

- A. konvenční měření ve 180° geometrii
- B. měření vláknovou optikou bez korekce
- C. korigované spektrum B



Integrovaná vláknová sonda obsahující nezbytné filtry (BP, BR) i fokusační optiku (vnější průměr cca 2 cm, velmi odolná ve srovnání s běžnou laboratorní optikou)



Integrovaná vláknová sonda obsahující nezbytné filtry (BP, BR) i fokusační optiku (krychle o hraně cca 5 cm)

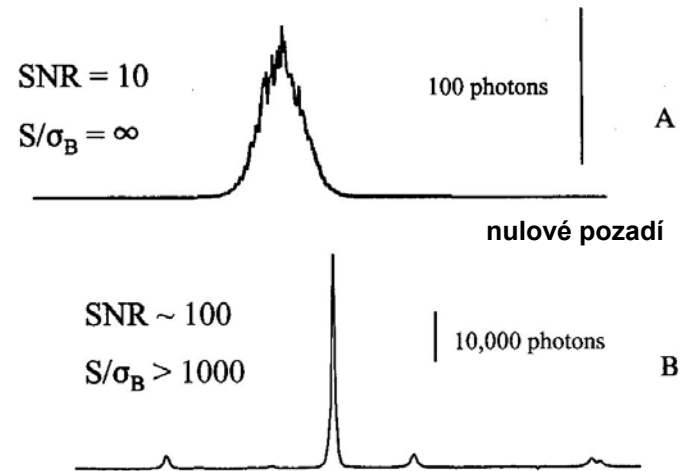
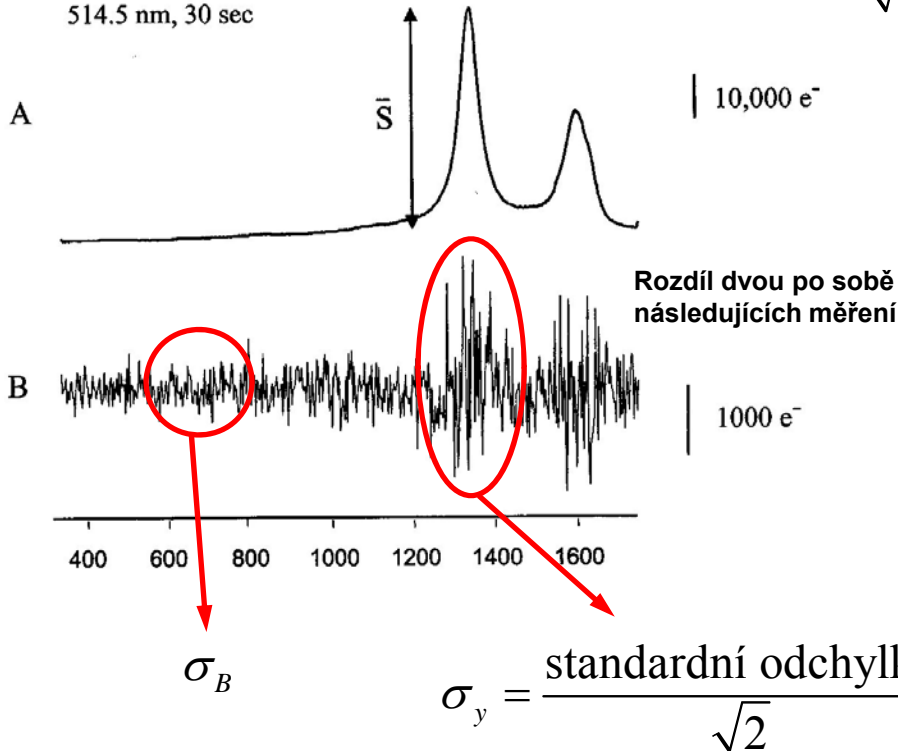
# Poměr signál/šum v Ramanově spektroskopii

poměr signál/šum (SNR, signal-to-noise ratio)

rigorózní definice 
$$\text{SNR} = \frac{\bar{S}}{\sigma_y} = \frac{\text{střední výška pásu (nad pozadím)}}{\text{standardní odchylka výšky pásu}}$$

shot noise limited  $\Rightarrow \text{SNR} = \frac{S}{\sqrt{S}} = \sqrt{S}$

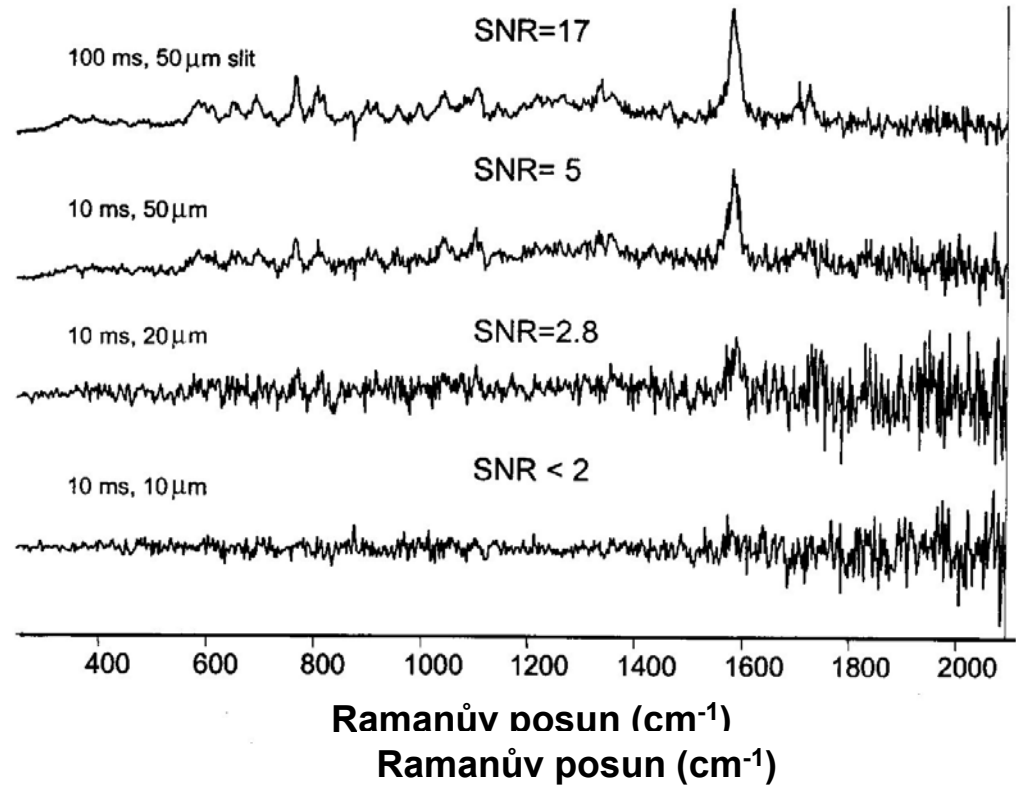
Glassy Carbon,  
514.5 nm, 30 sec



Poměr signál/(šum pozadí) může podstatně zveličt skutečný SNR.

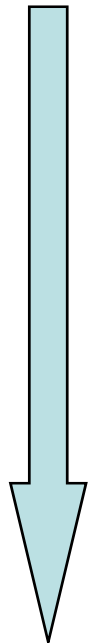
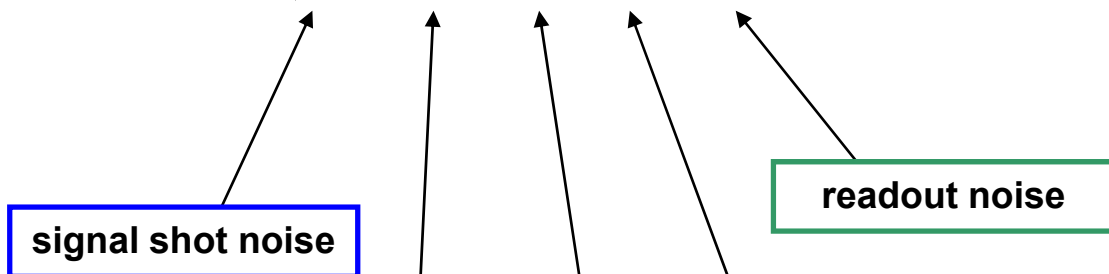
# Poměr signál/šum v Ramanově spektroskopii

SNR dostatečný  
pro identifikaci  
pásu 1548 cm<sup>-1</sup>.



SNR klesající se zkracující se dobou akumulace a snižující se šířkou štěrbin.

$$\sigma_y = \sqrt{(S + B + \phi_d t + \sigma_F^2 + \sigma_r^2)}$$

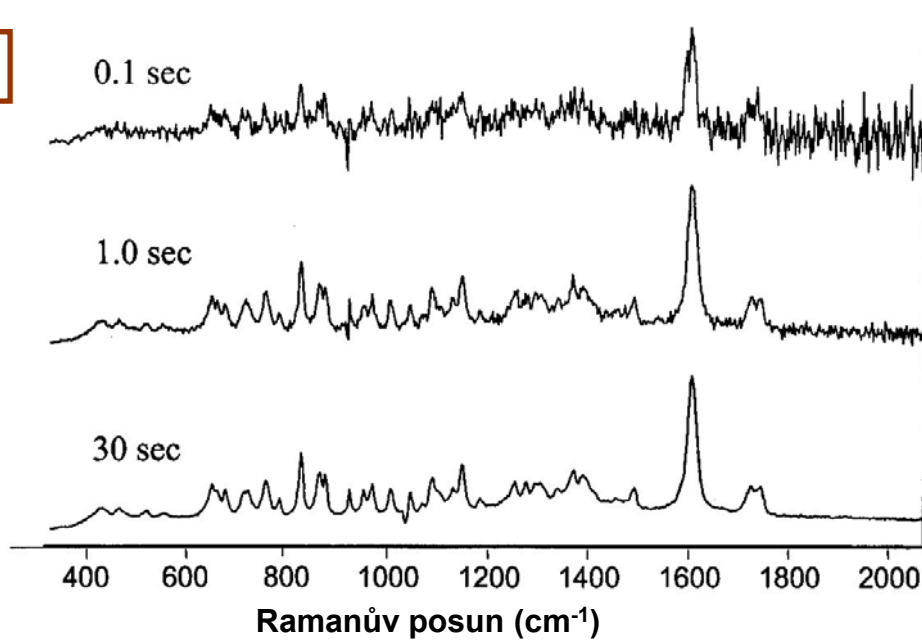


background shot noise

flicker noise

temný signál detektoru

(uplatňuje se u FT Ramana)

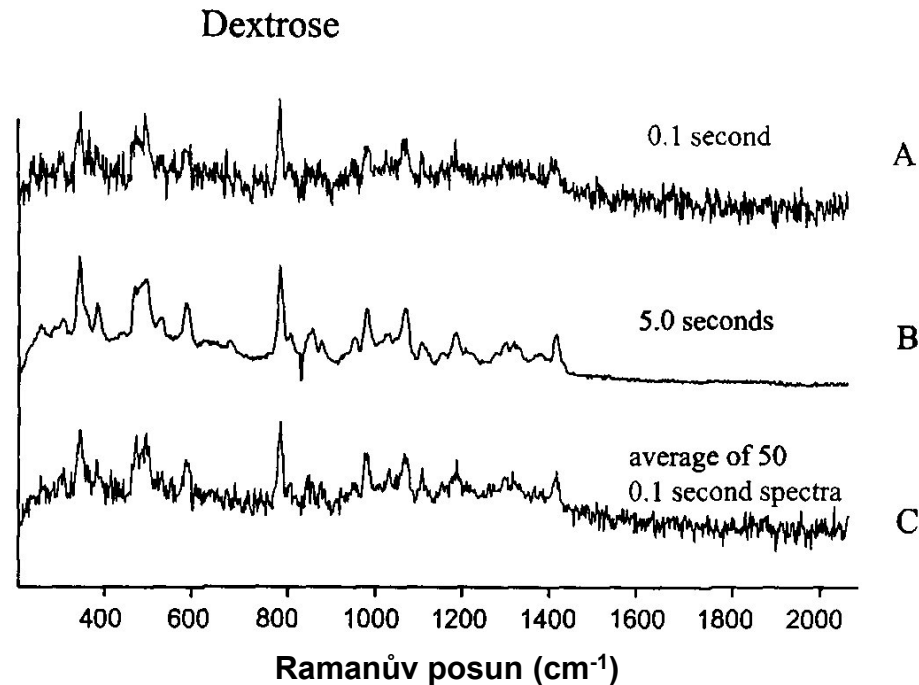


shot noise limited  $\Rightarrow$   $SNR = \frac{S}{\sqrt{S}} = \sqrt{S}$   $\longrightarrow$

**Zlepšení SNR s rostoucí dobou akumulace je způsobeno poklesem výstřelového šumu.**

**Šum odečtu (readout noise)**

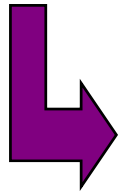
Zpravidla nehraje roli; může se uplatnit v případě nízkého signálu a extrémně krátké doby akumulace. Středování signálu nepovede ke zlepšení SNR, pokud šum odečtu bude dominantní.



Spektra dextrózy v pevné fázi měřená s excitací 785 nm na disperzním/CCD spektrometru. Spektrum C, které je průměrem 50 0,1 sekundových akumulací, nevykazuje zlepšení SNR ve srovnání s jedinou 0,1 sekundovou integrací (spektrum A) díky dominujícímu příspěvku šumu odečtu (readout noise).

Sample shot noise limit  $\sigma_y \gg \sigma_B, \sigma_d, \sigma_r \Rightarrow \text{SNR} = \sqrt{S} = \sqrt{\dot{S}t}$

Background shot noise limit  $\sigma_B = \sqrt{(\dot{B}t)} \Rightarrow \text{SNR}_B = \frac{\dot{S}t}{\sqrt{(\dot{B}t)}} = \frac{\dot{S}}{\sqrt{\dot{B}}} \sqrt{t}$



nastává u vzorků s fluoreskujícími příměsemi, kdy slabý Ramanův pás je překryt vysokým pozadím

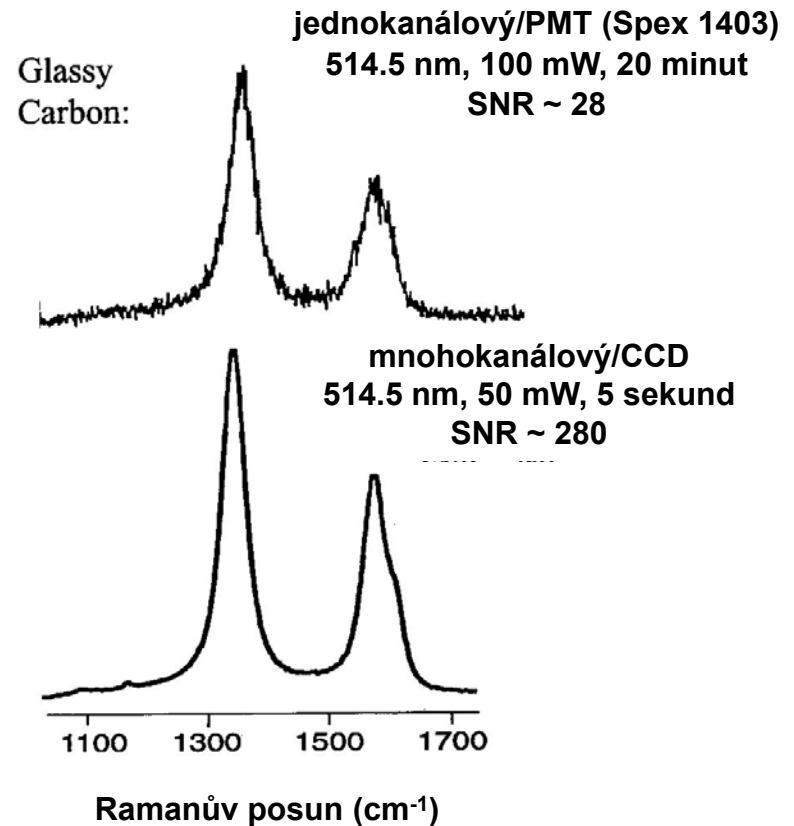
Vliv výstřelového šumu pozadí na SNR  
(při zanedbání temného a odečtového šumu)

S	B	$\sigma_y$ (šum)	SNR
1000	0	31	31
1000	1000	31	31
1000	$10^4$	105	9.5
1000	$10^6$	1000	1.0
$10^5$	$10^8$	$10^4$	10

Šum pozadí nelze odečíst a příliš vysoké pozadí může způsobit, že signál nebude možné pozorovat. Pomoci může zvýšení signálu+pozadí např. delší akumulací

# Mnohokanálové versus jednokanálové spektrometry

$$\frac{\text{SNR}_A(\text{multichannel})}{\text{SNR}_A(\text{single channel})} = \sqrt{\left(\frac{t_M}{t_S}\right)} = \sqrt{N_R}$$



Mnohokanálový systém ( $N_R = 512$ ) dosáhl vyšší SNR za kratší dobu měření a s nižším excitačním výkonem.