

## Lasery v ochraně kulturního dědictví

**2x2 h** Úvod do světla: elmag. záření, vznik, vlastnosti (šíření, polarizace, interference, koherence), související veličiny a jejich měření, spektrum, úvod do statistického popisu souborů částic, vybrané aplikace: interferometry, holografie, zdroje polarizovaného světla

**2x2 h** Makroskopické zdroje záření/světla, rozdíly mezi zářeními z „klasických“ zdrojů a laseru, pojem laser a princip činnosti, rozdělení laserů a obecný přehled jejich aplikací, získávání kratších vlnových délek (VIS, UV) z IR laserů, šíření a směřování laserového záření

**4x2 h** Bezpečnost práce s lasery, interakce záření s látkami, multifotonové procesy (excitace, absorpce, disociace, ionizace) a další procesy s využitím laseru (fluorescence, fosforescence, Ramanův rozptyl, infračervená spektrometrie), laserová ablace, přímé čištění pevných látek, kombinované parní, elektrochemické čištění, kavitace, ukázky (kámen, beton, dřevo, papír, pergamen, plátno, kovy), identifikace pigmentů, hloubkové profilování

**1x2 h** Úvod do fyzik plazmatu, definice, vznik, popis, vlastnosti, vybrané aplikace

**1x2 h** Laserem buzené mikroplazma a jeho spektroskopie (LIBS), vznik, vlastnosti, aplikace, laboratorní a přenosné aparatury LIBS na kontaktní i dálkovou analýzu, spektra z LIBS a jejich vyhodnocení, kvantitativní analýza, prostorově rozlišená analýza

**1x2 h** Vybrané metody diagnostiky plazmatu obecně i u LIBS, metody normalizace/standardizace signálu u LIBS, kvantitativní analýza

**1x2 h** Laserové skenování, dálková laserová analýza (atomová a molekulová spektrometrie a fotografie z družic, letadel a dronů), úvod do konfokální mikroskopie a technik zesíleného Ramanova rozptylu a zesílené LIBS s využitím laseru

**1x2 h** Exkurze na pracoviště laserové spektroskopie a mikro/nanotomografie VUT-FSI, stolní aparatury jedno a dvoupulzní LIBS, interakční komora pro LIBS, přenosná aparatura na dálkovou LIBS

## Doporučená literatura

Peter Hábovčík, Lasery a fotodetektory, Alfa, Bratislava 1989

Jeremy I. Pfeffer, Shlomo Nir, Modern physics – An introductory text, Imperial College Press, London 2000

Arthur Beiser, Úvod do moderní fyziky, Academia, Praha 1978

Jagdish P. Sing, Surya N. Thakur, Laser Induced breakdown spectroscopy, Elsevier, Amsterdam 2007

Helmut H. Telle, Ángel Gonzáles Ureña, Robert J. Donovan, Laser chemistry, Wiley, Chichester 2007

C. Fotakis, D. Anglos, V. Zafiropulos, S. Georgiou, V. Tornari, Lasers in the Preservation of Cultural Heritage Principles and Applications, CRC Press, Taylor & Francis Group, New York, London, 2006

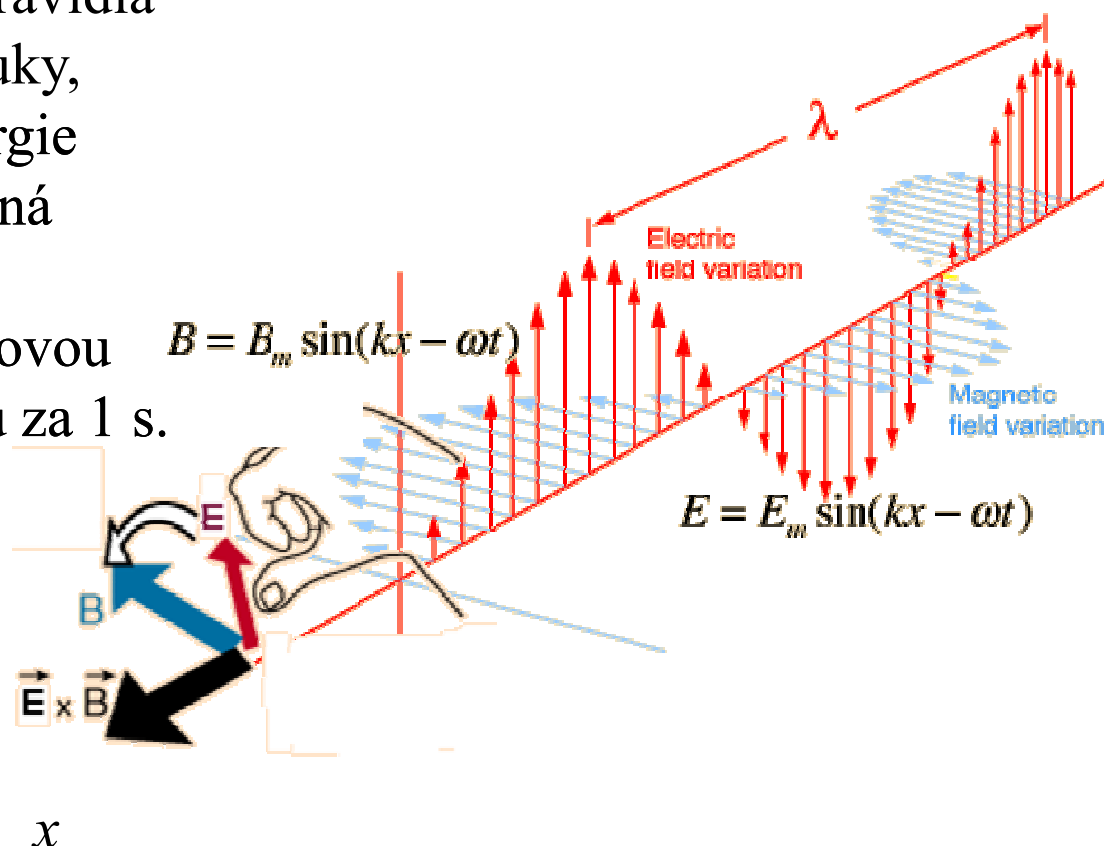
K. Dickmann C. Fotakis J.F. Asmus (Eds.), Lasers in the Conservation of Artworks, LACONA V Proceedings, Osnabrück 2003

Československý časopis pro fyziku, č. 4-5, 2010, č. 5-6, 2015, Fyzikální ústav AVČR Praha

# Podstata světla: elektromagnetické záření - vlnové i částicové vlastnosti

Poyntingův vektor – směr šíření elmag. vlny a energie podle pravidla pravé ruky,  $S$ ...energie přenesená vlnou jednotkovou plochou za 1 s.

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} \times \vec{B}$$



Kvantum elektromagnetického záření - foton

Energie 1 fotonu o frekvenci  $f$ :

$$E = hf = hc/\lambda$$

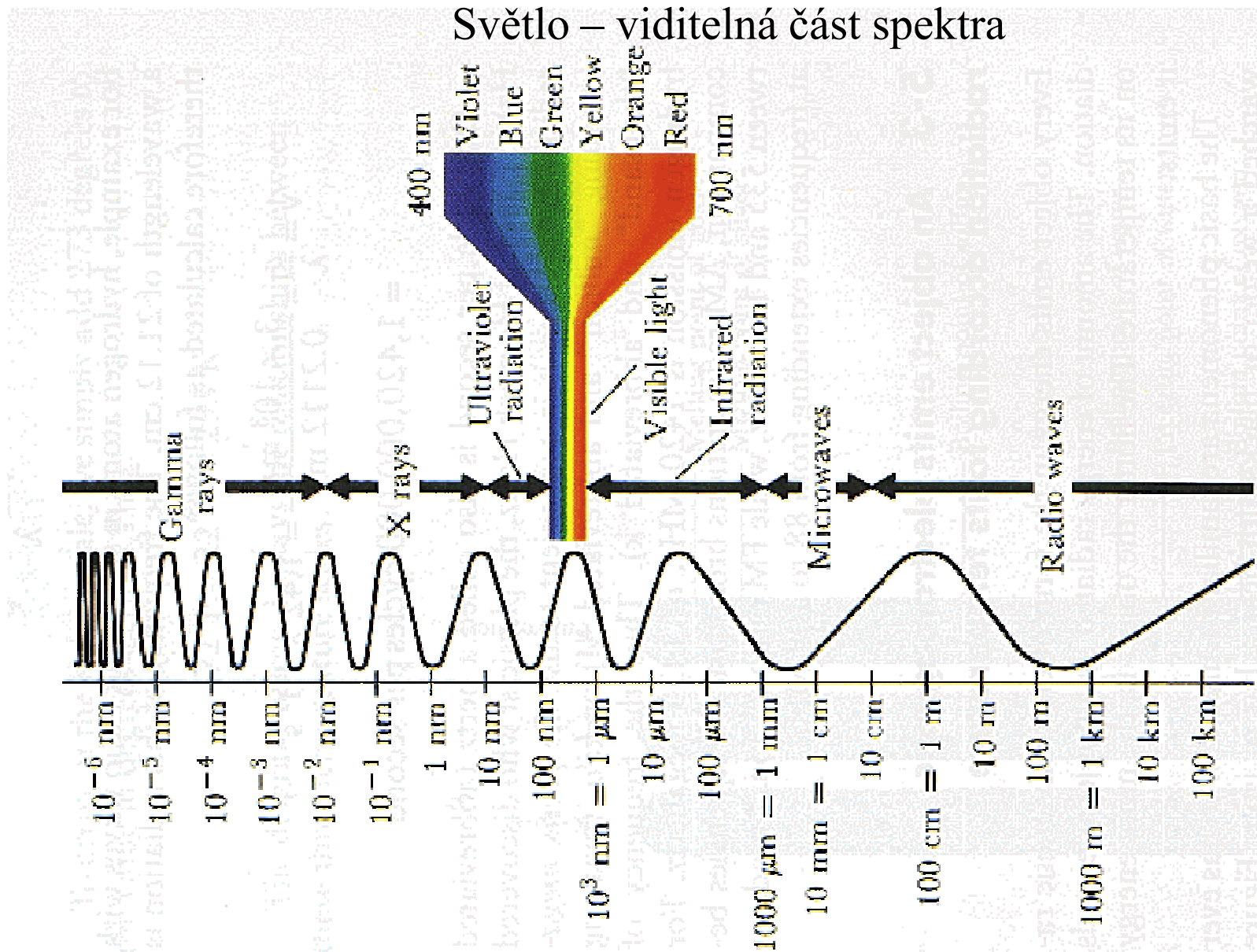
Planckova konstanta  $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$  Js

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$$

$$\omega = 2\pi f$$

$k = 2\pi/\lambda$ ,  $k$  vlnový vektor

# Přehled elektromagnetického záření podle vlnové délky



## Některé definice používaných jednotek a veličin

Intenzita  $I$  je relativní veličina úměrná energii zachycené detektorem za jednotku času. Protože energie harm. oscilátoru je přímo úměrná 2. mocnině výchylky, která má v čase sinusoidní průběh, platí pro elmag. vlnění  $I \sim E^2$  (1),  $\sim \psi^* \psi$ ,

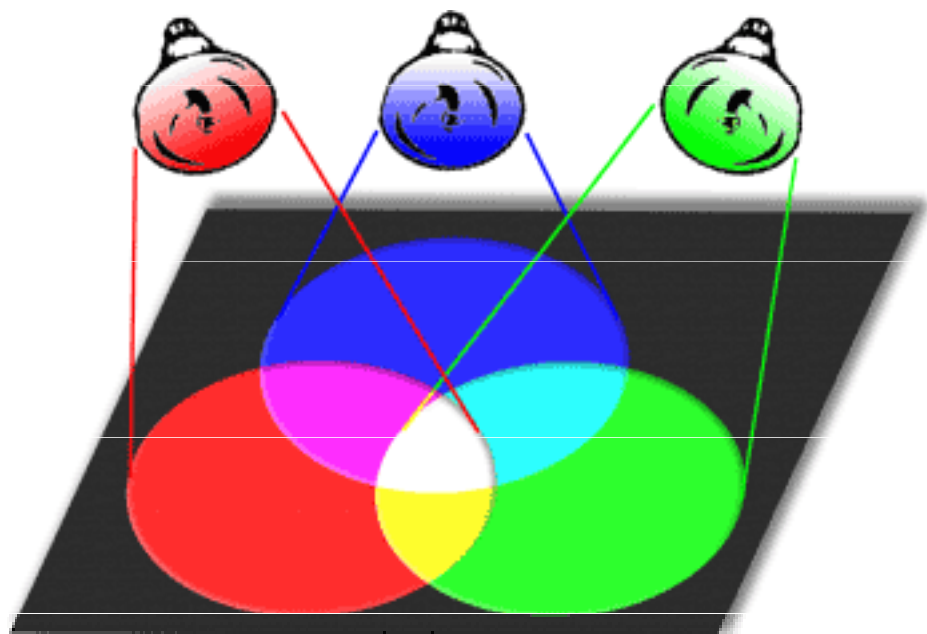
$\psi = E \sin(kx - \omega t + \varphi)$  ...integroujeme (sčítáme) určitou dobu dopadající fotony (nebo elektrony nebo co měříme) – střední hodnota energie v čase

Energie... 1 eV (elektronvolt) je energie, kterou potřebuje částice s elementárním nábojem ( $1,602 \cdot 10^{-19}$  C) k překonání potenciálového rozdílu 1 V  $\Rightarrow 1 \text{ eV} = 1,602 \cdot 10^{-19}$  J (=  $8065,73 \text{ cm}^{-1}$ )

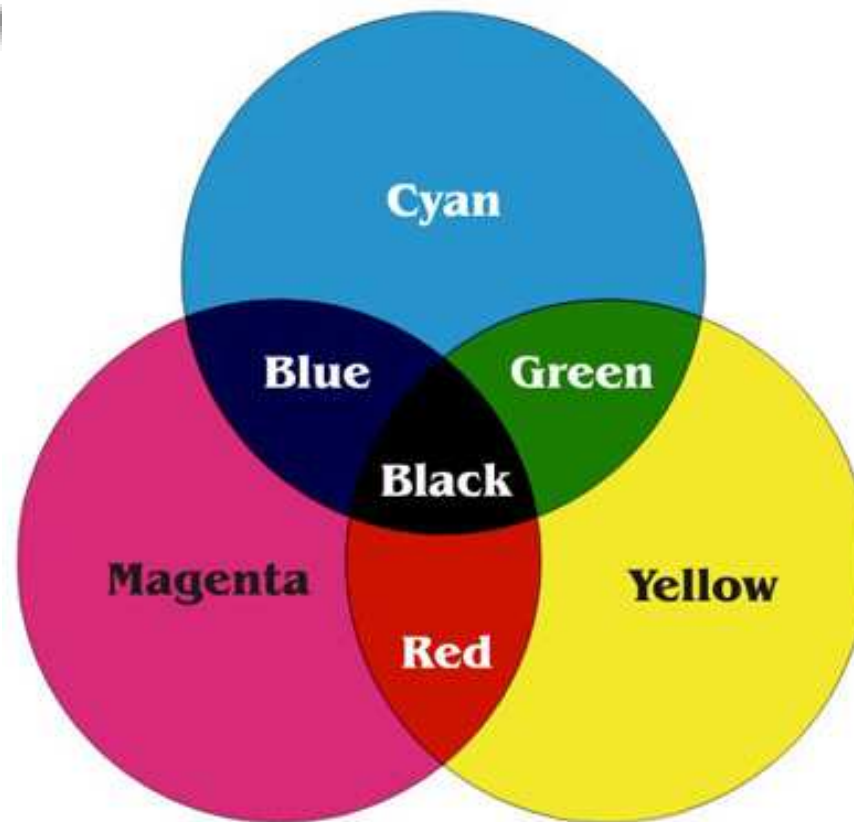
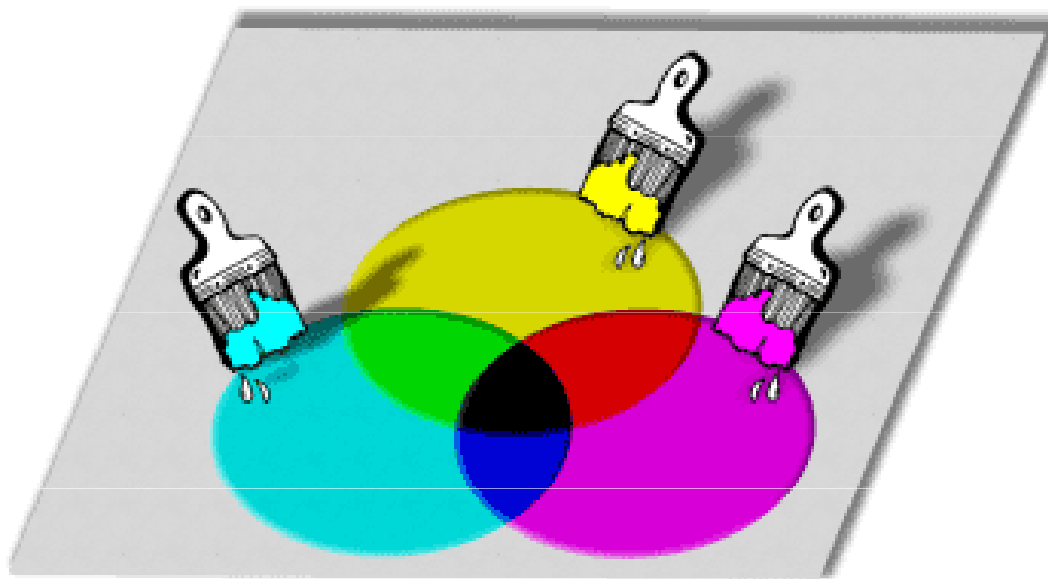
Energie – vlnočet  $\nu$ ...  $1 \text{ cm}^{-1}$  udává, kolik vlnových délek se vejde do délky 1 cm, potom  $E = hc/\lambda$ , kde  $\lambda = 1/\nu$

Vlnová délka: 1 Angström [ $\text{\AA}$ ] = 0,1 nm

## Skládání barev



RedGreenBlue model je aditivní model, založený na přidávání RGB světél na tmavou (nesvítící) podložku (typicky klasický monitor či televize). Přidáním všech světél naplno se vytvoří bílá.



CyanMagentaYellowKblack model je subtraktivní model, založený na odčítání RGB barev při odrazu bílého světla od barviv. Přidáním všech barviv naplno se vytvoří černá barva, neboli všechno světlo je pohlceno.

**Azurová** je doplňková barva k červené. **Purpurová** je doplňková k zelené a **žlutá** k modré. Pomocí CMY barev je tak možné řízeně "ubírat" RGB světlo - ubíráním z bílé. K-black je přidána jen pro snazší realizaci tmavých barev – černý inkoust do tiskáren



**Důsledky:** pohlcování a odraz světla z laseru různě barevnými povrchy – větší/menší účinnost ablace – je to speciální případ pro viditelnou část spektra, kdy obecně látka určitou vlnovou délku pohlcuje resp. odráží více než jinou. Z odražených vlnových délek se poskládá výsledná „barva“ předmětu.

Černá absorbuje vše, předmět se snadno zahřívá, popř. zapaluje  
Bílá odráží vše

To platí hlavně pro nízké plošné hustoty výkonu, je-li svazek světla dostatečně výkonný, budou se pohlcovat i delší vlnové délky



# Vznik světla

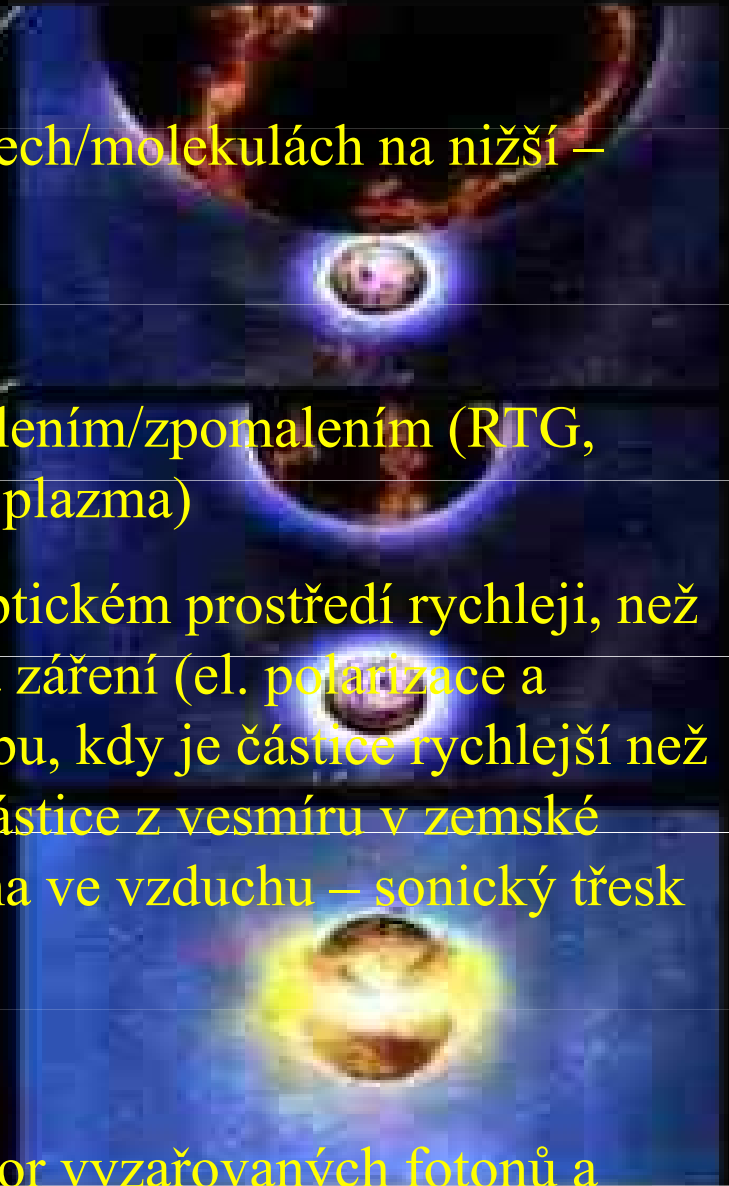
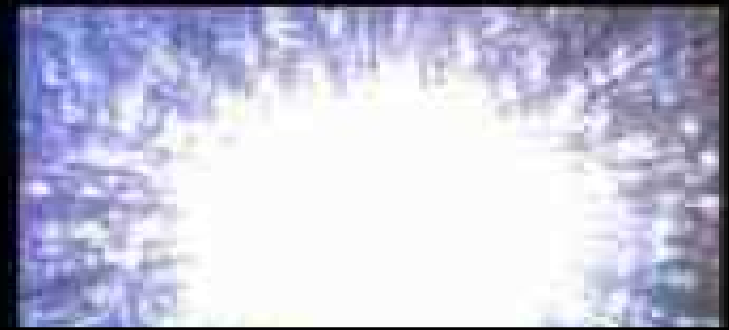
– přechody elektronů z vyšších energ. hladin v atomech/molekulách na nižší –  
diskrétní spektrum

Spojité spektrum:

-brzdné záření – pohyb elektrického náboje se zrychlením/zpomalením (RTG,  
elektrické výboje, urychlovače, laserem indukované plazma)

-Čerenkovovo záření: částice, která se pohybuje v optickém prostředí rychleji, než  
je fázová rychlost světla pro toto prostředí, vyvolává záření (el. polarizace a  
depolarizace okolního prostředí), které trvá po tu dobu, kdy je částice rychlejší než  
světlo (gama fotony z jaderného reaktoru ve vodě, částice z vesmíru v zemské  
atmosféře, ve vodě), mechanická obdoba: rázová vlna ve vzduchu – sonický třesk  
od nadzvukových letadel

Částice při těchto jevech ztrácejí energii právě na úkor vyzařovaných fotonů a  
zpomalují se.



**Vznik světla v atomech:** Struktura atomového obalu – energ. hladiny elektronů – stav elektronu popsán kvantovými čísly: n...hlavní, l...orbitální, m...magnetické, s...spinové

		n=1	n=2	n=3	n=4		n	l	m	$s$	
s -- sharp	$l = 0$	1s	2s	3s	4s	1s	1	0	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2
p -- principal	$l = 1$		2p	3p	4p	2s	2	0	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2
d -- diffuse	$l = 2$			3d	4d	2p	2	1	-1,0,+1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	6
f -- fundamental	$l = 3$				4f	3s	3	0	0	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	2
g	$l = 4$					3p	3	1	-1,0,+1	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	6
h	$l = 5$					3d	3	2	-2,-1,0,1,2	$+\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}$	10
...											

} 8  
 } 18

Obsazení jednotlivých hladin elektrony až po hladinu valenční platí pro všechny atomy v souboru přesně jen tehdy, pokud by se soubor nacházel ve stavu s teplotou 0 K. Prakticky tedy vždy jsou některé atomy excitovány s elektrony na vyšších hladinách, než je valenční.

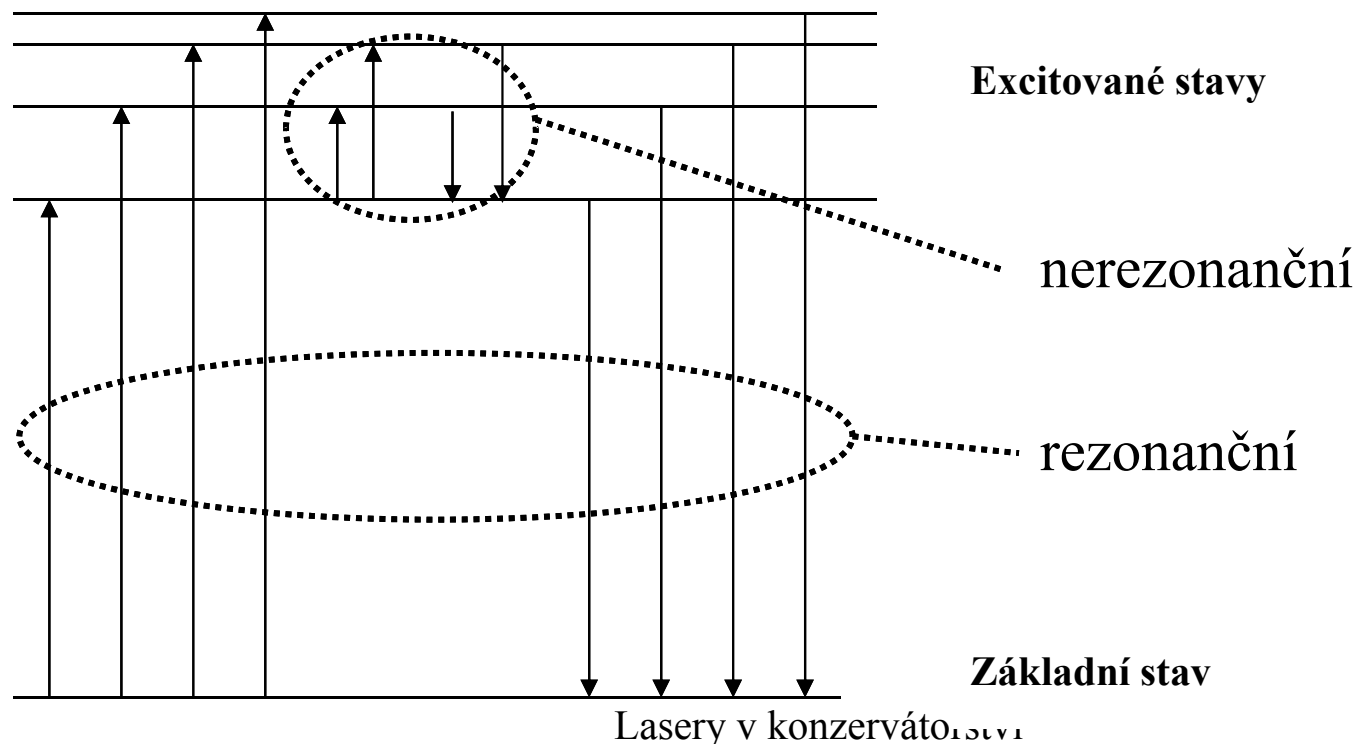
Atom se musí excitovat – elektron je vyražen na vyšší hladinu

Mechanismy: srážkou s fotonem o vhodné energii, nepružnou srážkou s jinou částicí – část kinetické energie se spotřebuje na přechod elektronu na vyšší hladinu

Energie vyzářeného fotonu při relaxaci  $\Delta E = E_{\text{vyšší}} - E_{\text{nižší}} = hf$

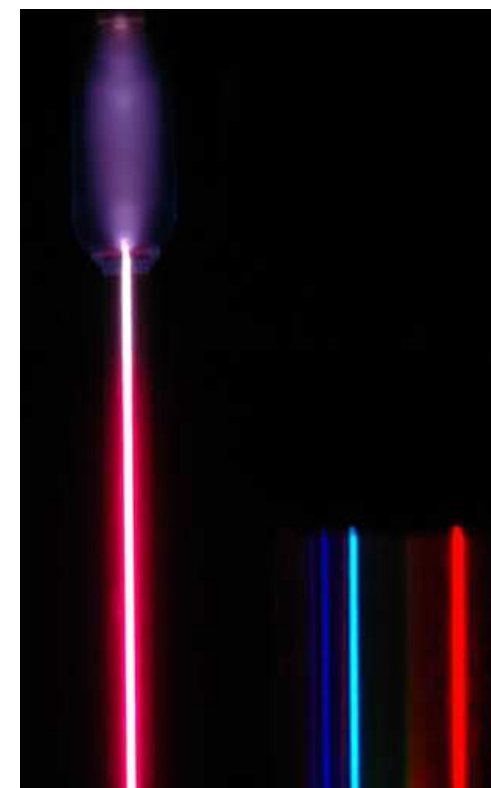
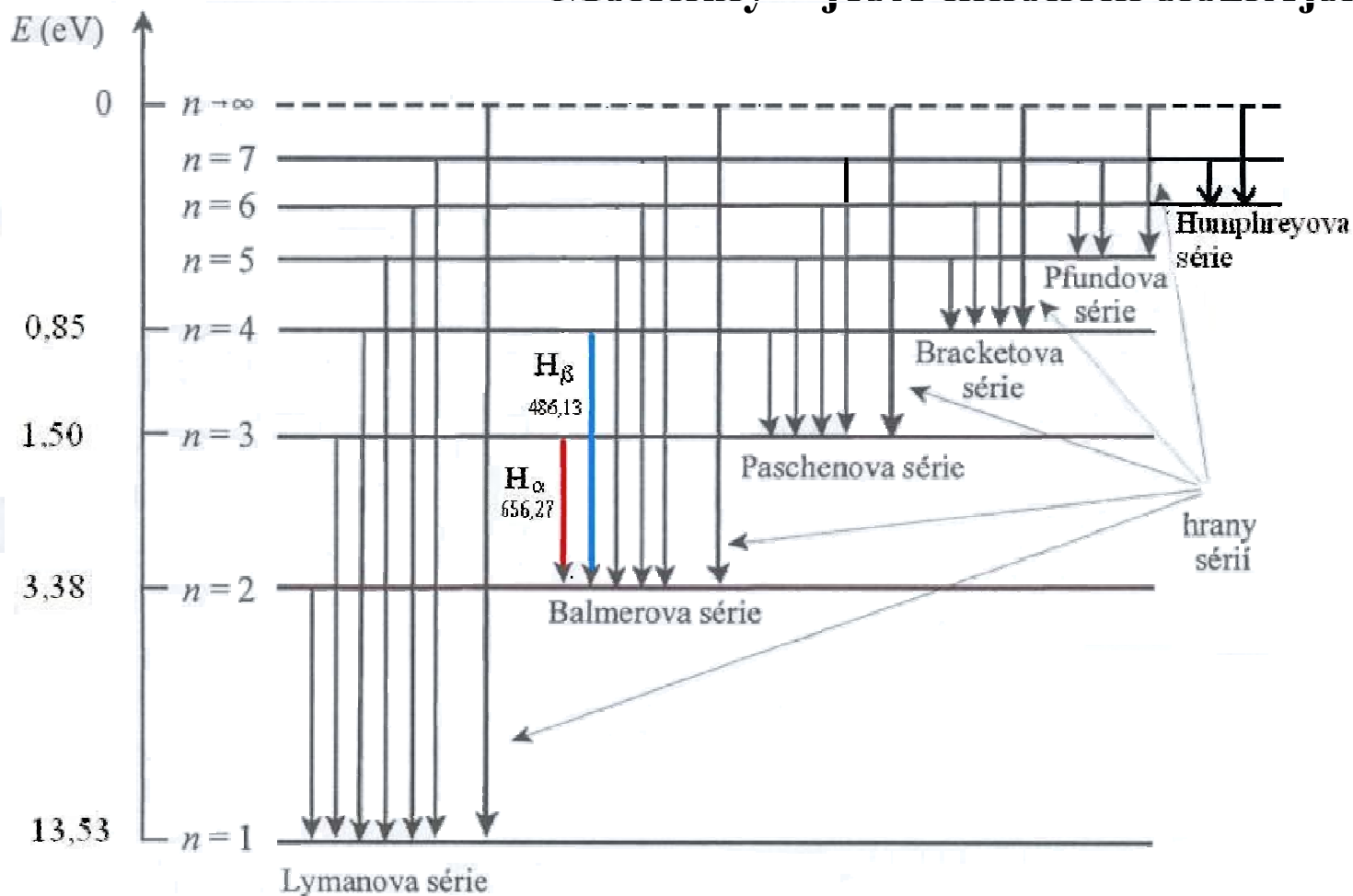
Vrátí-li se elektron na základní hladinu => rezonanční spektrální čára

Elektron může relaxovat i nezářivě –  $\Delta E$  se uvolní v jiných formách



**Atom vodíku – pouze 1 elektron – nejjednodušší spektrum** Víceelektronové atomy – elektrony se navzájem ovlivňují: Momenty hybnosti elektronů orbitální a spinové => magnetické momenty – interagují mezi sebou (štěpení čar na multiplety) i s momenty jádra (hyperjemná struktura čar)

### Molekuly – ještě mnohem složitější, pásová spektra



Spektrální čáry přechodů mezi energetickými hladinami atomu vodíku  
Lasery v konzervátorství

Mikročástice (atomy, molekuly, ionty) schopné excitace a zářivé relaxace se vyskytují ve velkých souborech – např. 1 mol ideálního plynu  $6,023 \cdot 10^{23}$  molekul má za normálních podmínek objem 22,4 l.

Pouze při teplotě 0 K (absolutní nula – nedosažitelné) by byly všechny mikročástice v základním stavu. Prakticky vždy některé jsou excitovány s 1 nebo více elektrony na vyšších než základních hladinách.

Vyšetřovaný soubor jedinců (molekuly apod...) tvoří tzv. statistický *ensemble*. 1 makrostav systému lze uskutečnit mnoha mikrostavy jedinců systému

Je-li úplně izolován od okolí, bez výměny energie a jedinců => mikrokanonický ensemble – všechny stavy systému jsou stejně pravděpodobné...  $n$ ...počet všech možných stavů systému

Je-li v kontaktu s okolím a slabě si s ním vyměňuje energii, ale ne jedince (plyn v uzavřené nádobě) – kanonický ensemble, pravděpodobnost  $P$  určitého stavu  $n$  systému je úměrná  $1/\exp(E_n/kT)$ , kde  $E_n$  je energie tohoto stavu

Je-li v kontaktu s okolím a vyměňuje si s ním energii i jedince (plyn v nádobě s probíhající reakcí, výtok a/nebo přítok částic) – grandkanonický ensemble, pravděpodobnost  $P$  určitého stavu  $n$  systému je úměrná  $1/\exp[(E_n + \sum \mu_i N_i)/kT]$ , kde  $\mu$  je tzv. chemický potenciál,  $N_i$ ...počet částic druhu  $i$

## Důsledky

Popis ideálního plynu v nádobě:

Navzájem identické, ALE rozlišitelné částice

Počet částic (zde molekul)  $N_i$  na hladině s energií  $E_i$  z celkového počtu částic  $N_0$

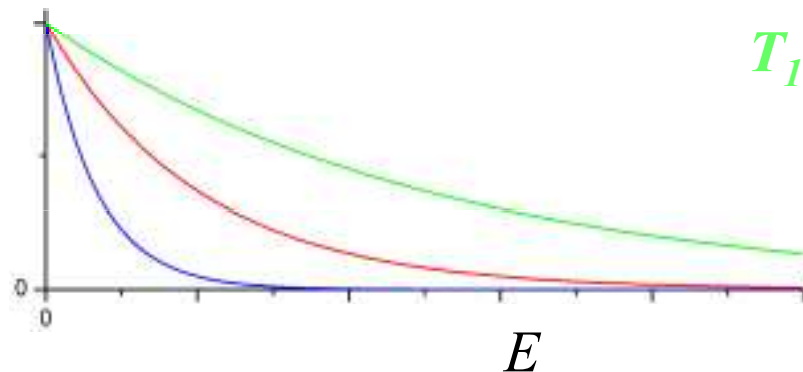
Boltzmannovo rozdělení:  $N_i = 1/Z * g_i N_0 * 1/\exp(E_i/kT)$

$g_i$ ...statistická váha, stupeň degenerace hladiny  $E_i$  neboli počet podhladin, na které se hladina rozštěpí:  $g = 2l + 1$

$Z$ ...stavová suma (partiční funkce) – má funkci normovací konstanty

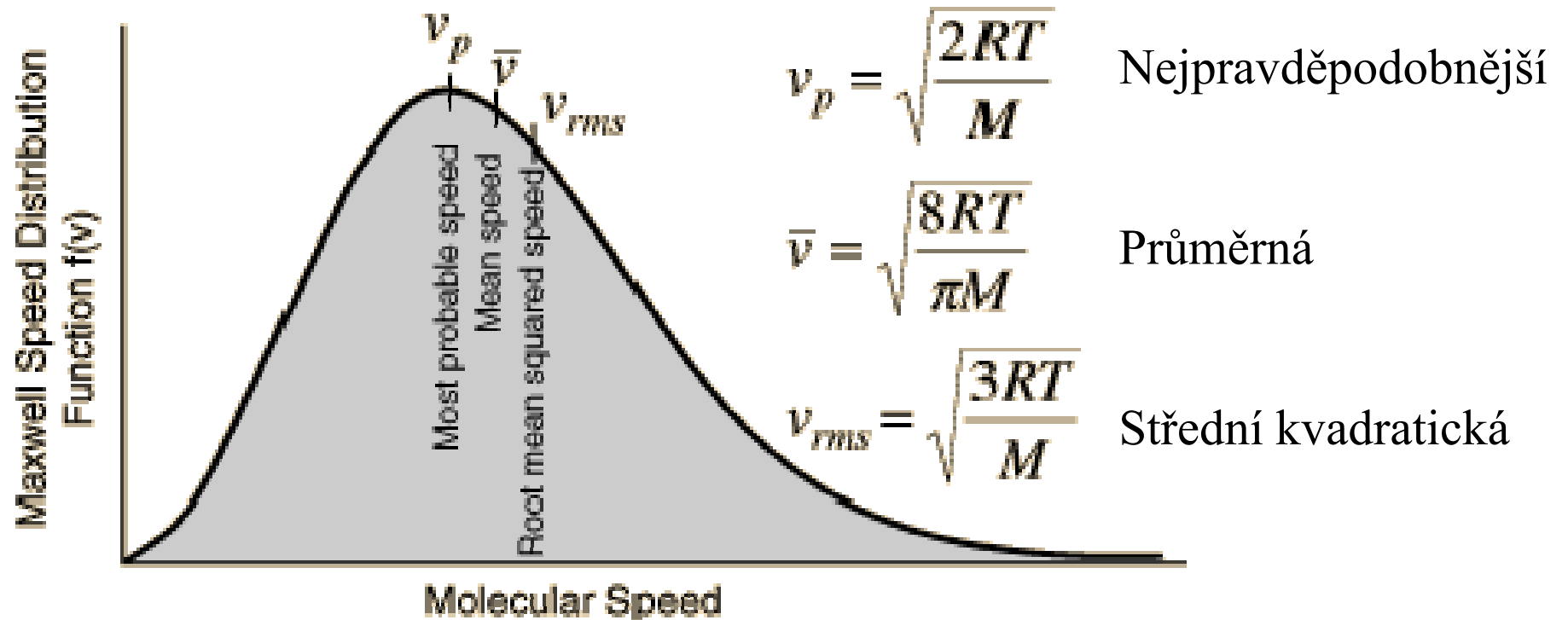
$Z = \sum_i g_i 1/\exp(E_i/kT)$ ...součet všech možných stavů  $i$  s energiemi  $E_i$

Pravd.  
obsazení  
hladiny  
 $E$



Maxwellovo rozdělení velikostí rychlostí  $v$  v libovolném směru molekul plynu – formálně = Boltzmannovo rozdělení kinetické energie molekul převedené na rychlost

$$f(v) = 4\pi \left[ \frac{M}{2\pi RT} \right]^{\frac{3}{2}} v^2 \exp \left[ \frac{-Mv^2}{2RT} \right]$$





Popis degenerovaného (nízká teplota vzhledem k  $E_F$ ) elektronového plynu v kovech a plovodičích:

Nerozlišitelné částice se spinem = násobku  $1/2$ ...fermiony

Počet částic  $N_i$  na hladině s energií  $E_i$  z celkového počtu částic  $N_0$

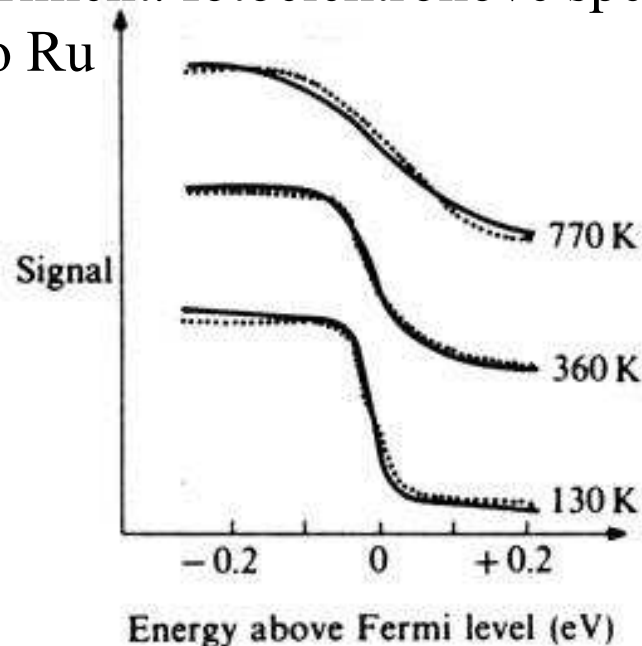
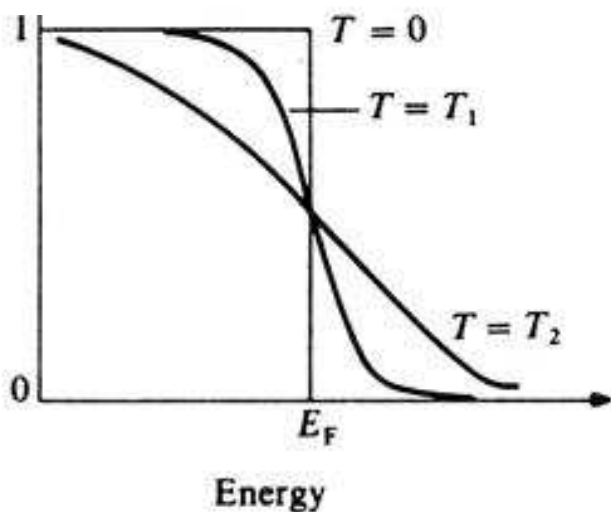
Fermi – Diracovo rozdělení:  $N_i = N_0 * \rho(E) / [\exp(E_i - E_F / kT) + 1]$

$E_F$ ...Fermiho energie – nejvyšší obsazená hladina při  $T = 0$  K.

$\rho(E)$ ...hustota stavů; pro elektrony v pevné látce  $\rho(E) = 8\sqrt{2\pi m^3/2} \sqrt{E/h^3}$

Př.: Experiment. fotoelektronové spektrum kovového Ru

Pravd.  
obsazení  
hladiny E



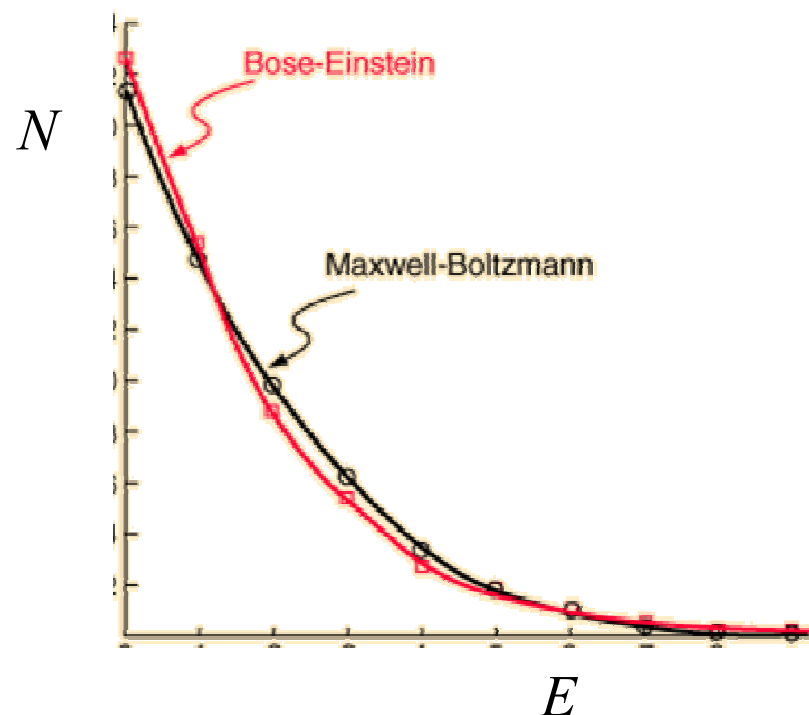
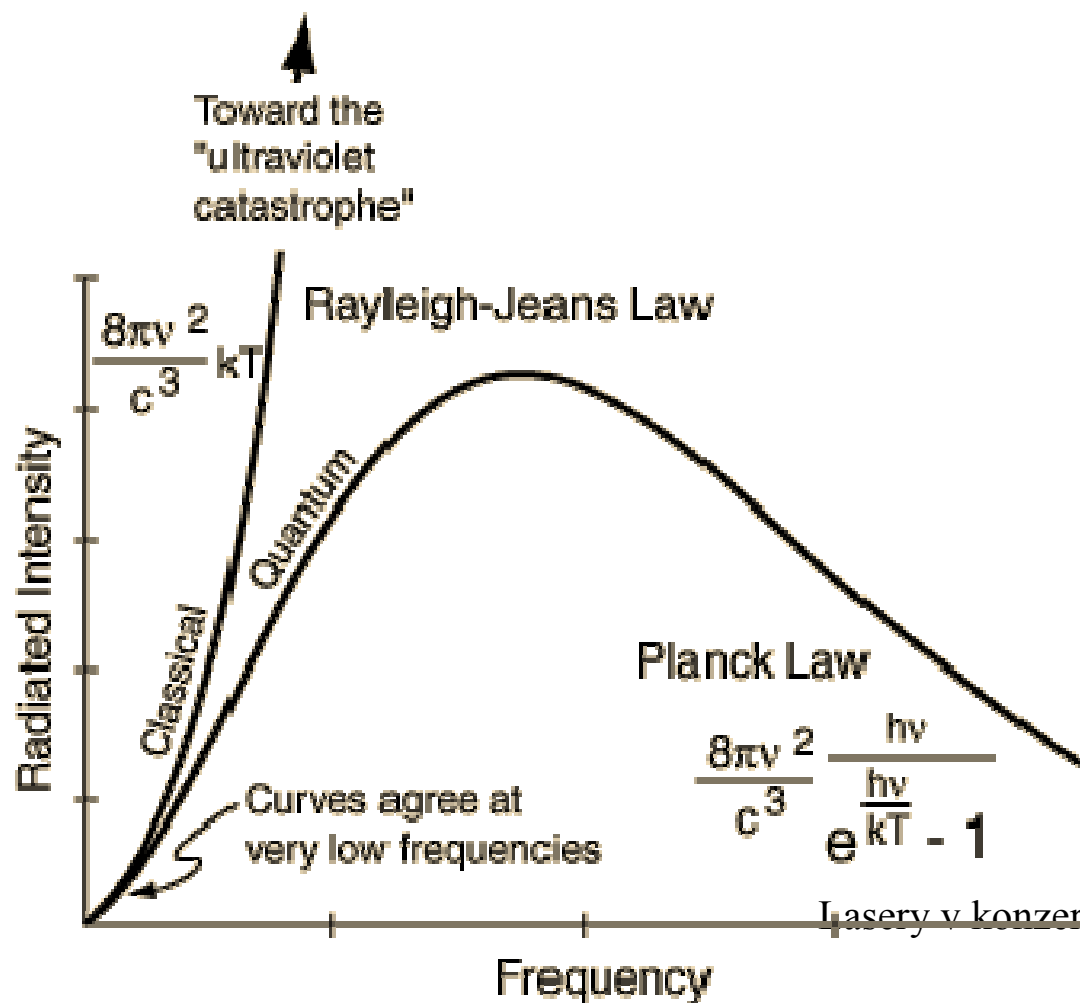
Popis fotonového plynu – záření černého tělesa:

Nerozlišitelné částice s celočíselným spinem ...bosony (zde fotony se spinem 1)

Počet částic  $N$  s energií  $E$  z celkového počtu částic  $N_0$  –zde fotony

Bose – Einsteinovo rozdělení:  $N = N_0 * \rho(E) / [\exp(E/kT) - 1]$ , pro fotony  $E = hf$ ,

$\rho(E)$  ...hustota stavů, pro černé těleso  $\rho(E) = 8\pi f^2 hf/c^3$



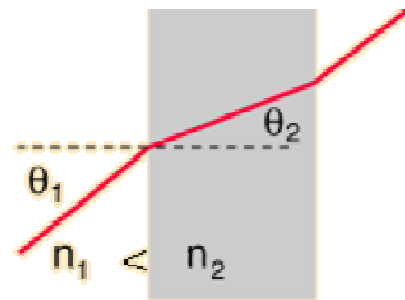
# Vlastnosti světla

Chová se podle principu nejmenší akce: Hmotný bod se pohybuje tak, aby jeho dráha byla extrémální, tj. energeticky co nejvýhodnější.

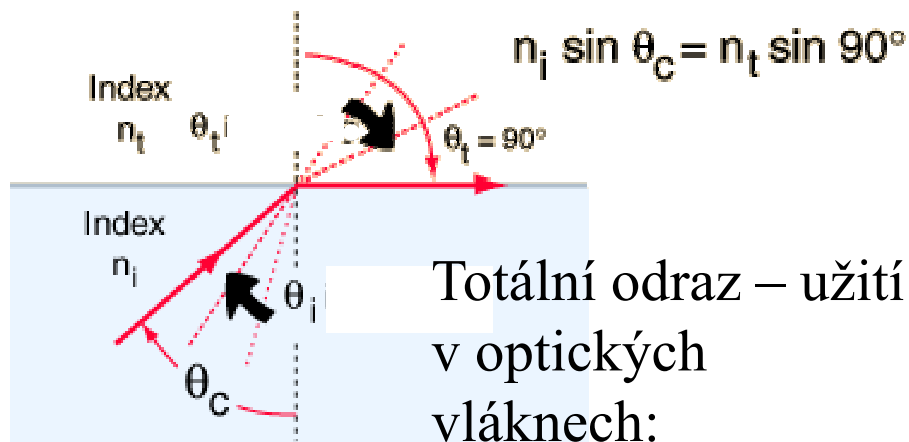
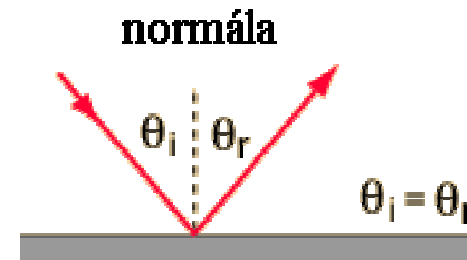
V optice – Fermatův princip => důsledky: ohyb, lom a odraz světla

Snellův zákon lomu

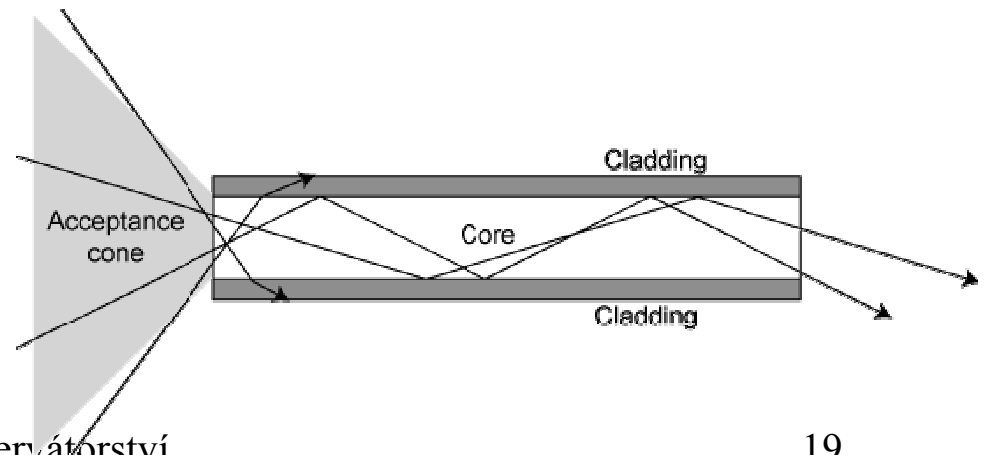
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{\sin \theta_2}{\sin \theta_1}$$

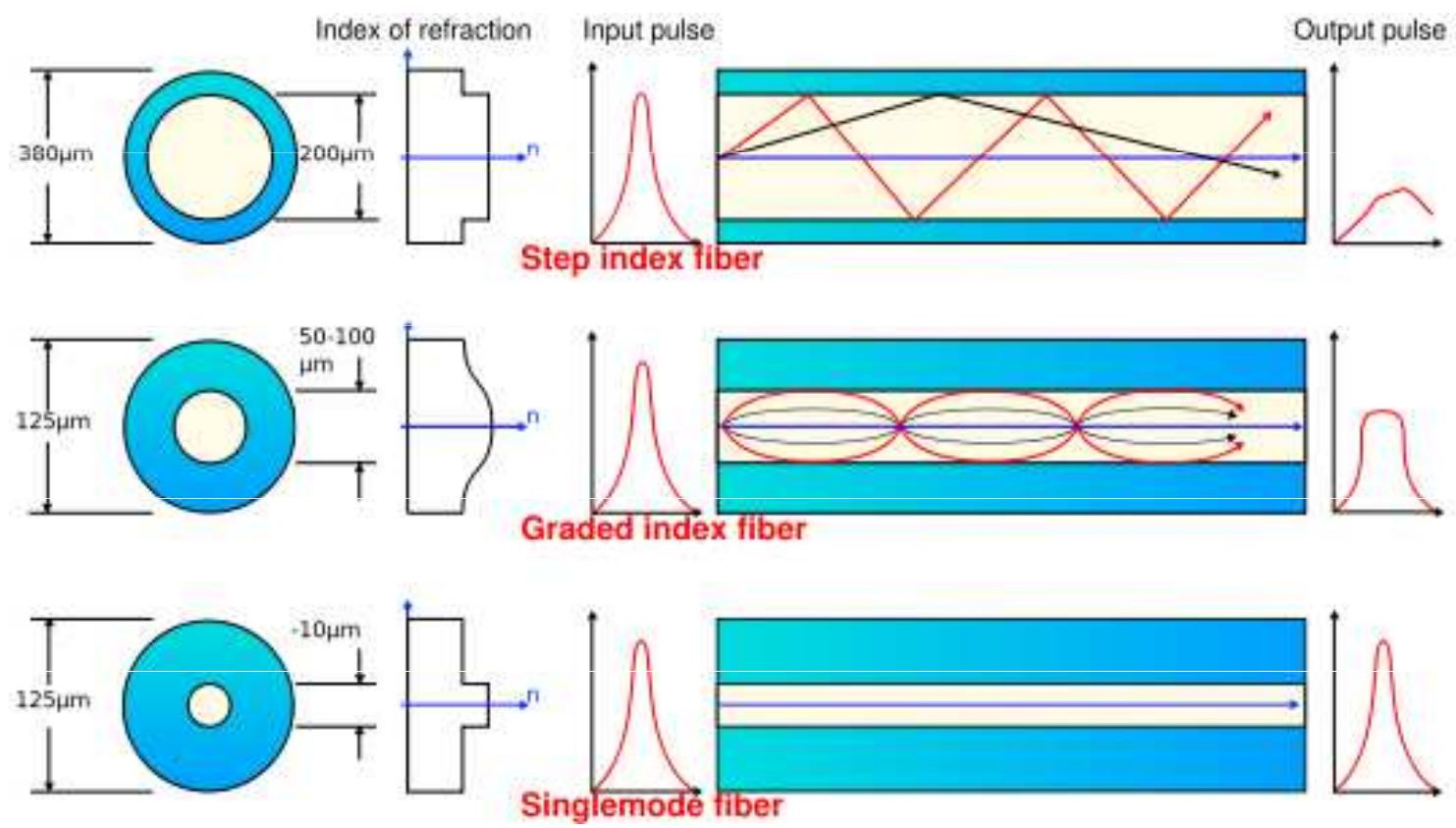


zákon odrazu



Totální odraz – užití  
v optických  
vláknech:





## 1. Mnohavidová vlákna

jádro až 1000x větší než u jednovidových, velký počet drah po nichž paprsky procházejí - proto se vlákna nazývají mnohavidová.

SI= Step index (skokový index lomu)

Do vlákna vstupují vidy (paprsky) pod mnoha úhly, šíří se totálním odrazem , vytváří mnohavidový způsob šíření signálu

Používá se na krátké vzdálenosti

Nevýhoda: vidová disperze = rozptyl, což omezuje šířku přenášeného pásma

GI = gradient index (plynulá změna indexu lomu)

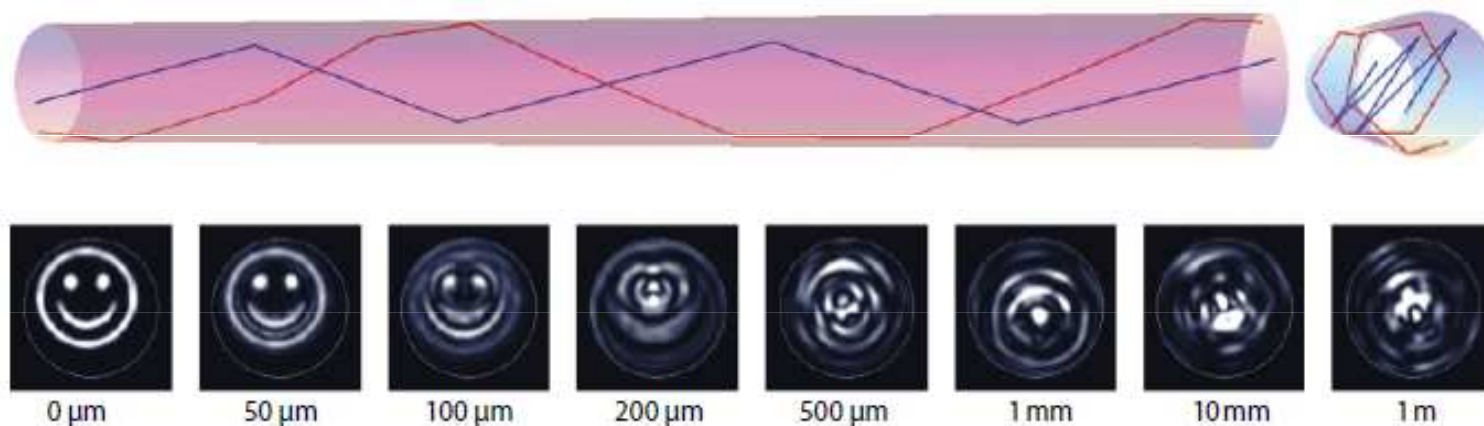
z tisíce tenkých vrstev, které se liší  $n$  lomu . Čím je paprsek dál dál od osy jádra tím je  $n$  lomu menší, až paprsek přejde do kolmice a nakonec se vrátí k ose jádra

Výhoda : eliminace vidové disperze = menší zkreslení, jednotlivé vidy dojdou na konec vlákna zhruba ve stejném časovém okamžiku

Velmi často používané v datových aplikacích

## 2. Jednovidová SI (single mode)

nejlepší parametry optické přenosové cesty. Mají nejmenší průměr jádra do 10  $\mu\text{m}$ .  
velký úhel odrazu ve vlákně, vede k menšímu prodloužení dráhy paprsku:  
signál tvořen jedním videm, který se šíří podél osy jádra, při ohybu se odráží od jádra  
téměř nemá vidovou disperzi, pouze chromatickou a polarizační vidovou disperzi  
nejrozšířenější vlákno v telekomunikacích  
výroba z homogenní skloviny



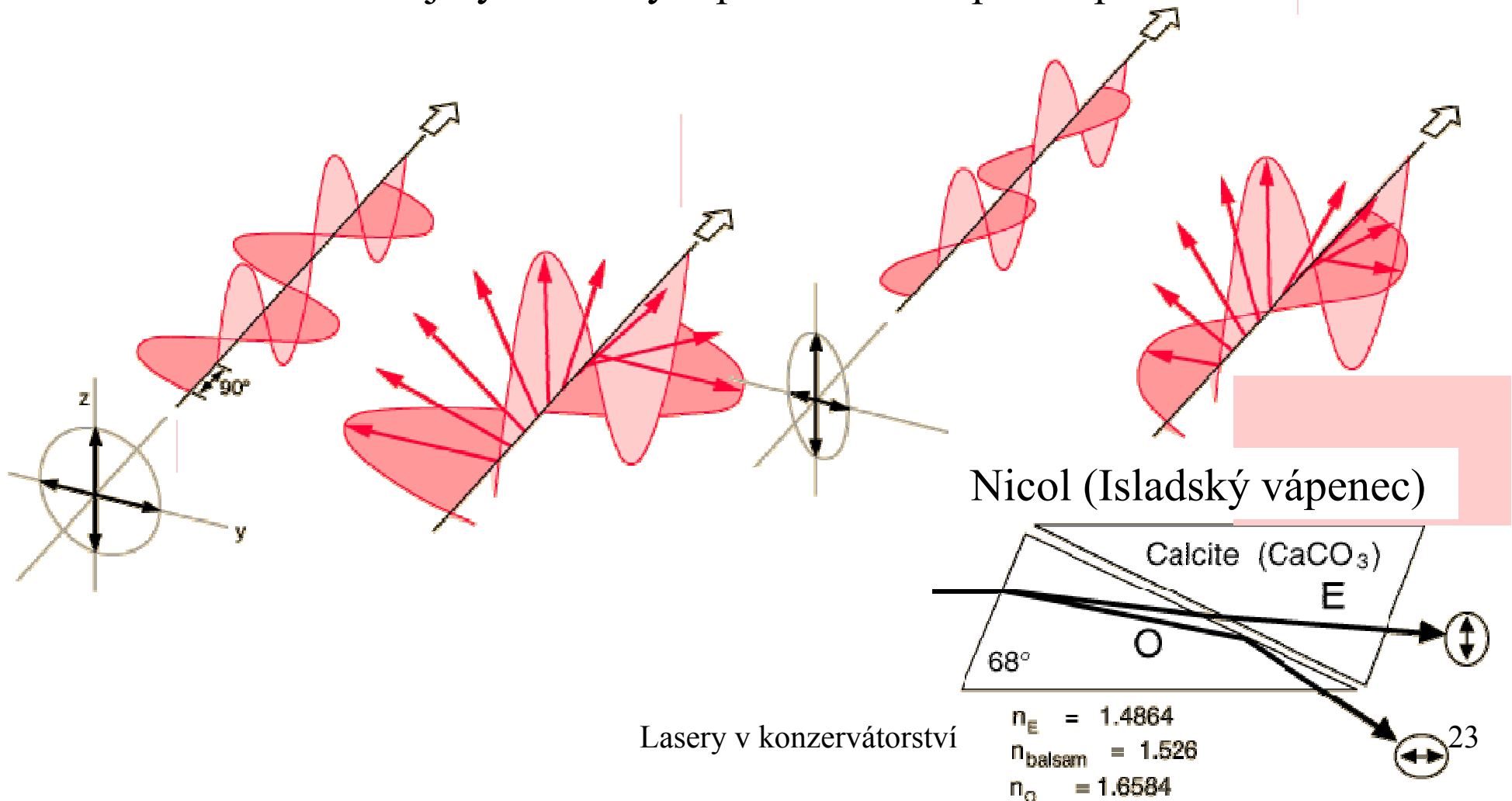
Vlákno s jádrem 25  $\mu\text{m}$  – zkreslení přenosu obrazu již na velmi krátkou vzdálenost – „smajlík“ se rozpadá

# Vlastnosti příčného vlnění - Polarizace

U světla z tepelného zdroje vektor **E** kmitá rovnoměrně všemi směry

– vektor **E** kmitá v jednom směru – lineární polarizace

-vektor **E** kmitá ve dvou navzájem kolmých směrech – 2 vlny: fázový posuv  $90^\circ$  a stejná intenzita obou kolmých složek – kruhová polarizace, s různou intenzitou nebo jiným fázovým posuvem – eliptická polarizace



Lasery v konzervátorství

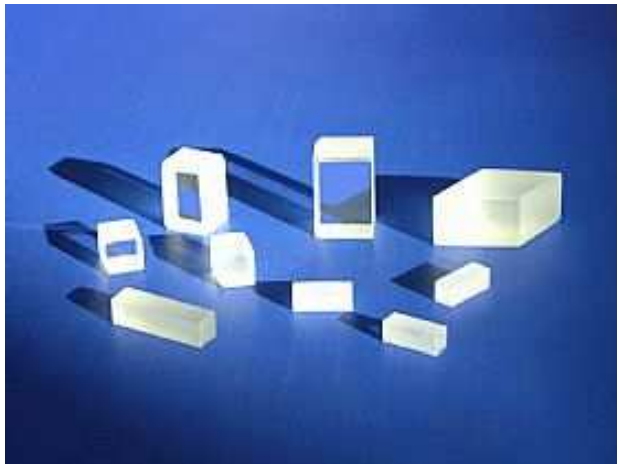
**Lineární polarizace** vhodnými anizotropními krystaly (turmalín-složité silikát-1, islandský vápenec-2, (D)KD(2)P ((Deuterated) Potassium (Di)hydro Phosphate)-3, BBO ( $\beta$ -Barium Borate  $\text{BaB}_2\text{O}_4$ ), LBO ( $\text{LiB}_3\text{O}_5$ ) (Lithium triborat) )



3



2

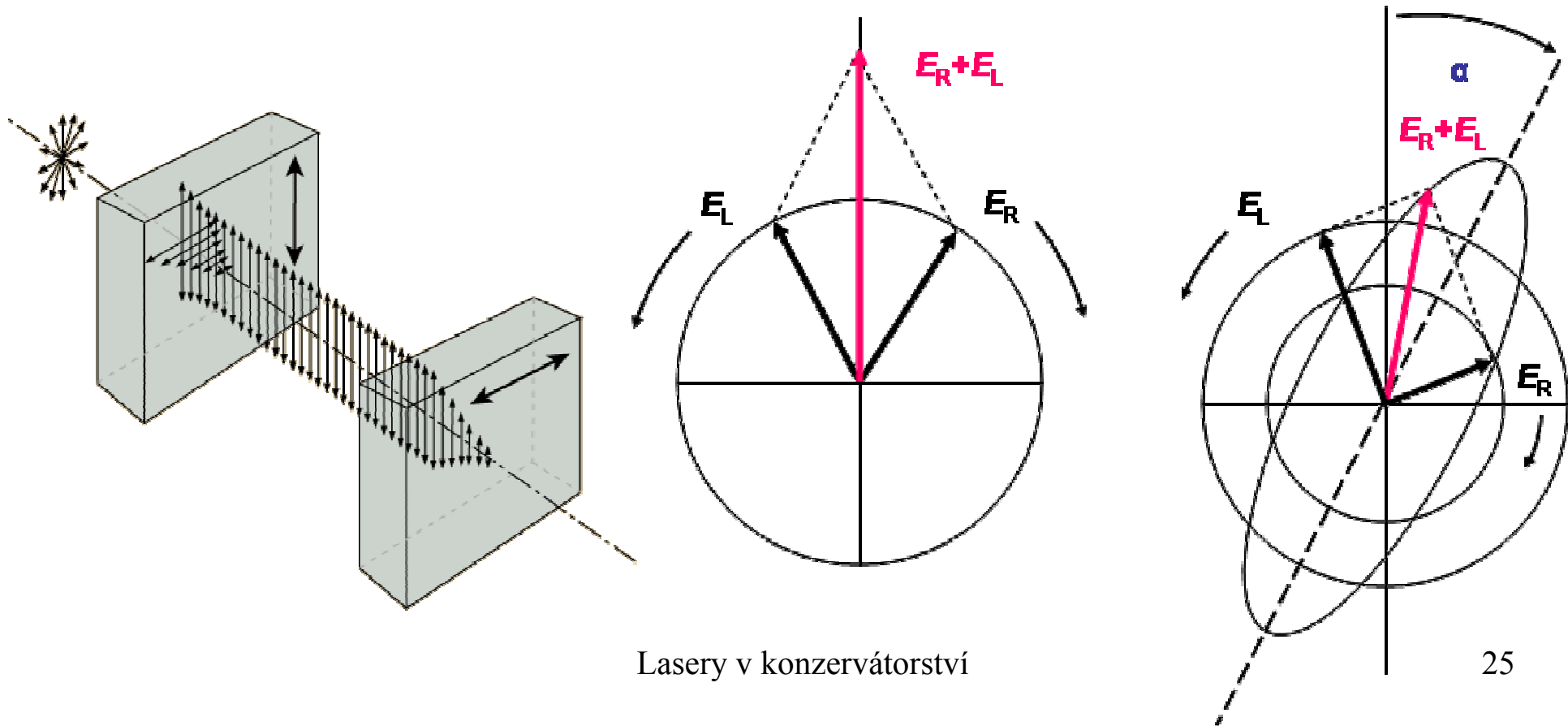


Nd:YAG Lasery – generace 2. harmonické



Zkřížení 2 krystalů – polarizátor a analyzátor – užití v analytické chemii – sacharimetr – kyveta s cukerným roztokem stáčí rovinu lineárně polarizovaného světla o úhel přímo úměrný délce prostředí a koncentraci sacharózy

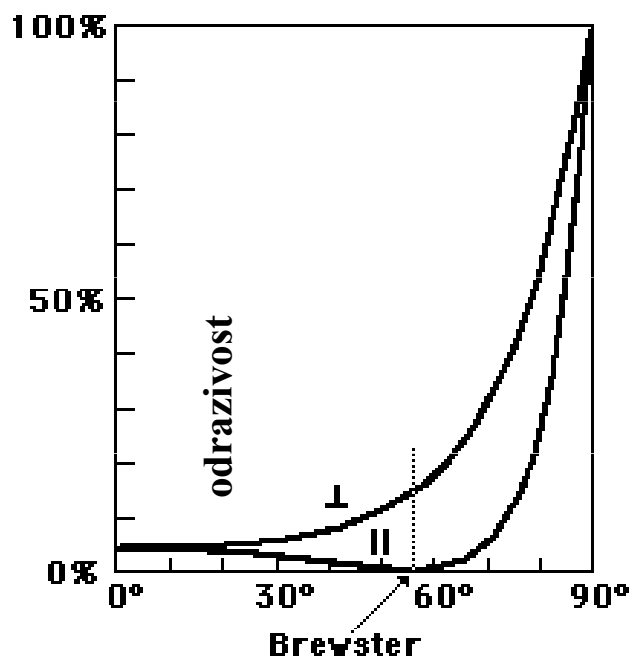
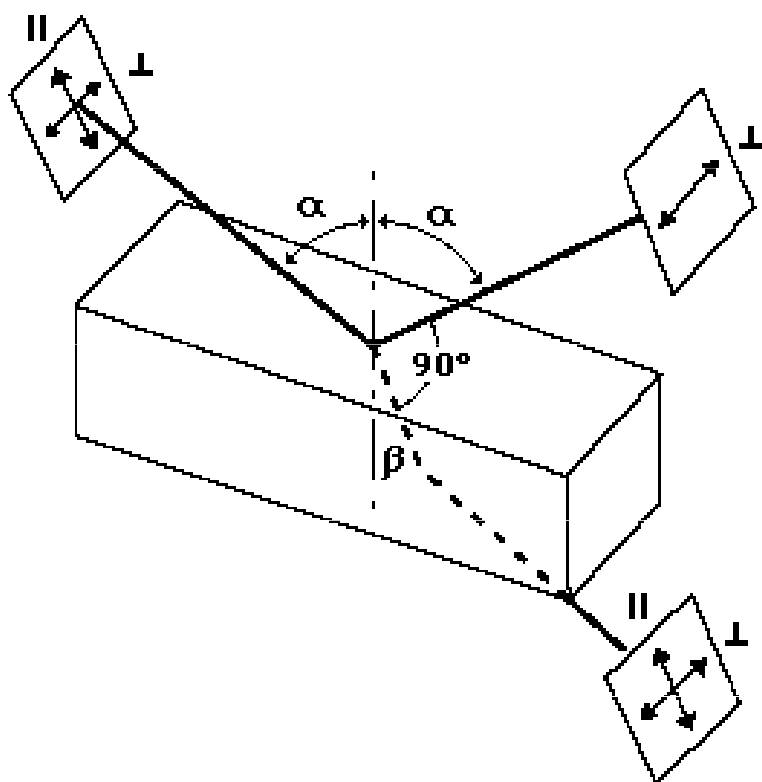
**Cirkulární dichroismus** – lineární polarizaci lze rozložit na 2 stejně intenzivní složky – pravo a levotočivě kruhově polarizovanou; některé látky pohlcují různě levo a pravotočivou složku polarizovaného světla a tyto mají různé indexy lomu => užití v chem. analýze



**Brewsterův úhel** je takový úhel dopadu (odrazu)  $\alpha$ , při kterém odražený a lomený paprsek svírají pravý úhel.

**David Brewster**

(1781-1868)



Světlo odražené pod B. úhlem je úplně polarizováno kolmo na rovinu dopadu neboli v rovině předmětu. Pro kovy toto nikdy nenastane

Široké užití – polarizační filtry – fotografování apod...

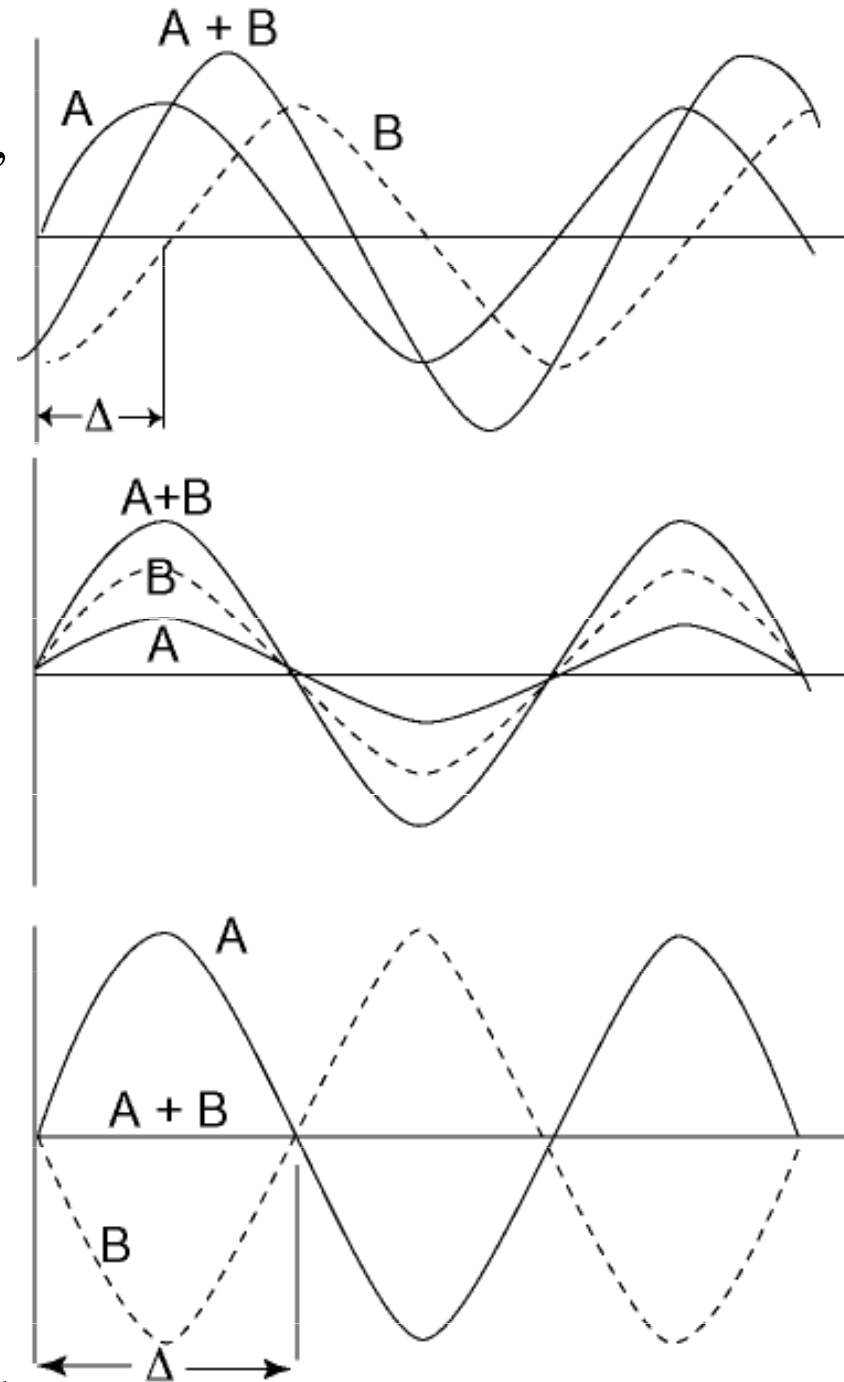
Obecně je odražené světlo od dielektrika i kovu elipticky polarizované, i když dopadající polarizované není => elipsometrie – měření indexu lomu a absorpce látek

# Vlnové vlastnosti světla

**Interference** – superpozice (skládání)  
dvou a více vln,  $\Delta$ ...fázový rozdíl vln A,  
B

$\Delta = 0$ ...konstruktivní

$\Delta = \pi$ ...destruktivní



Lasery v k

## Podmínky vzniku interference

**Koherence** – míra neměnnosti fáze superponujících vln, pokud se fáze s časem \* nebo se vzdáleností\*\* zdrojů vln mění, mění se i interferenční obrazec, je-li to příliš rychle, tak se rozmaže až zanikne ↓

\*Časová

\*\*Prostorová

Koherenční délka – vzdálenost mezi projekčním stínítkem a zdrojem vlnění, při které právě vymizí interferenční obrazec, posuzuje se podle stupně koherence z↓

Viditelnost interference:  $(I_{\max} - I_{\min}) / (I_{\max} + I_{\min})$  , určuje kontrast int. proužků

Tepelné zdroje (plamen, černé těleso, žárovka) i výboje vyzařují náhodně fotony s různými fázemi z různých míst – velmi malá koherenční délka mm

Lasery – 0,1-100 m (ve vakuu tisíce km, nejlepší pro viditelnou oblast, rasery pro RTG

LC/RC Oscilátory – nejlepší pro ostatní radiové vlny, masery pro MW

Synchrotrony – nejlepší pro RTG a gama

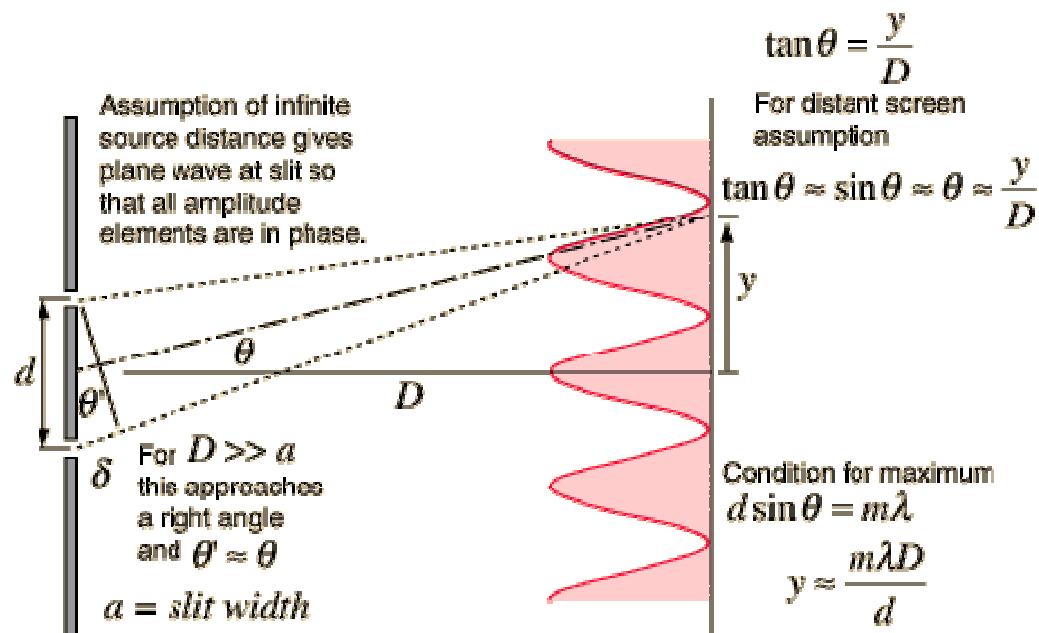
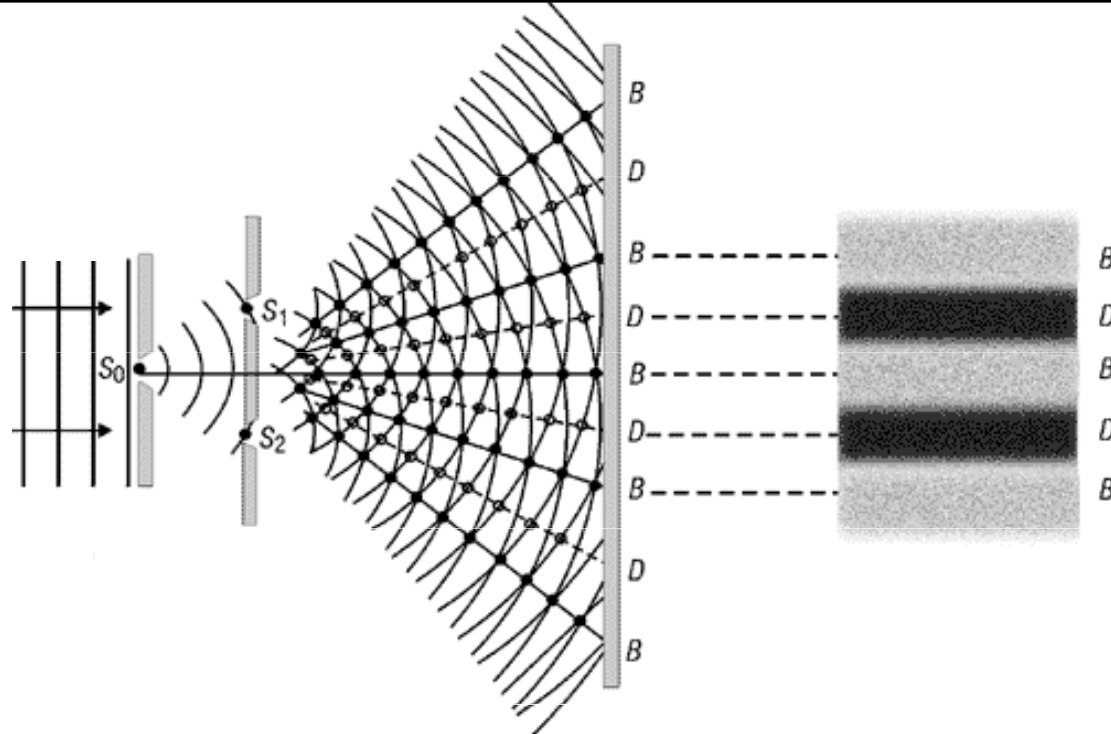
# Interference na dvojštěrbíně – Youngův pokus

Interference průchodem:

Maxima: sudé násobky půlvln

Minima: liché

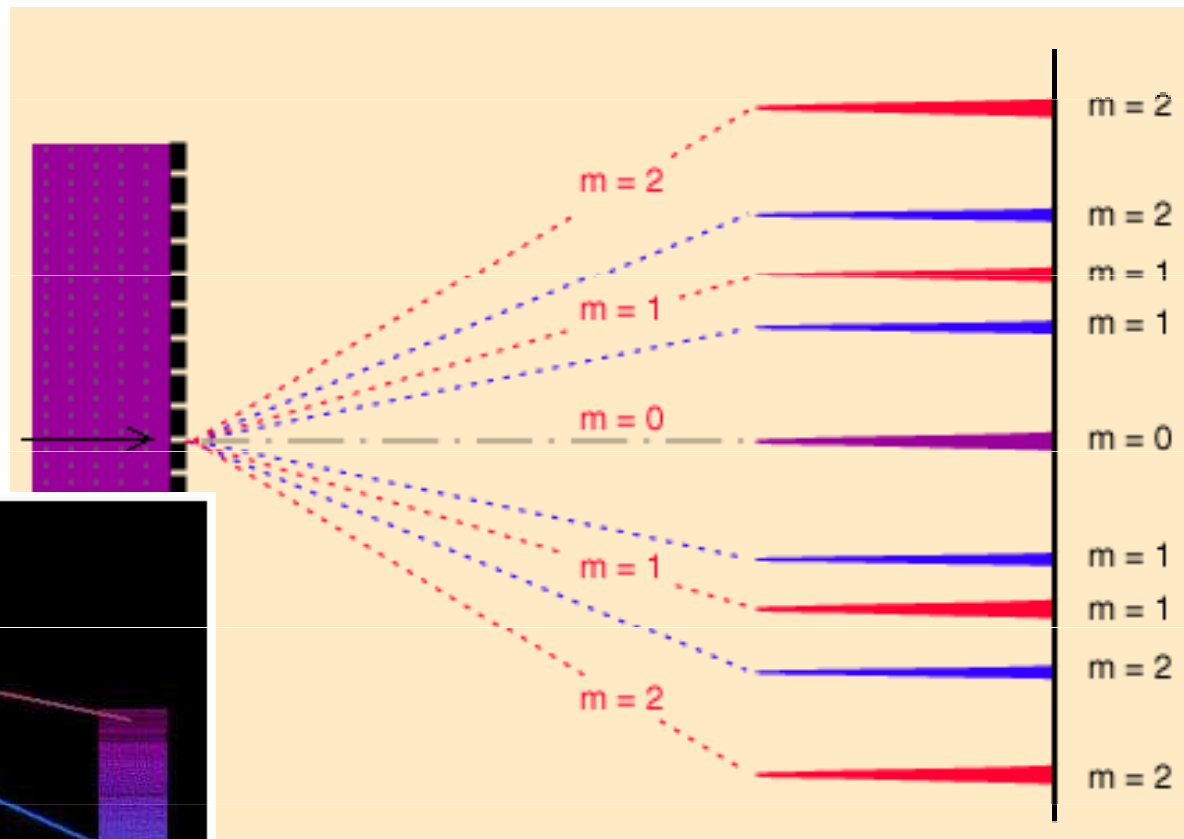
To vše důsledek Huygensova – Fresnelova principu: Každý bod vlnoplochy se stává zdrojem kulových vln, proto ohyb (difrakce) na rohu, na štěrbině



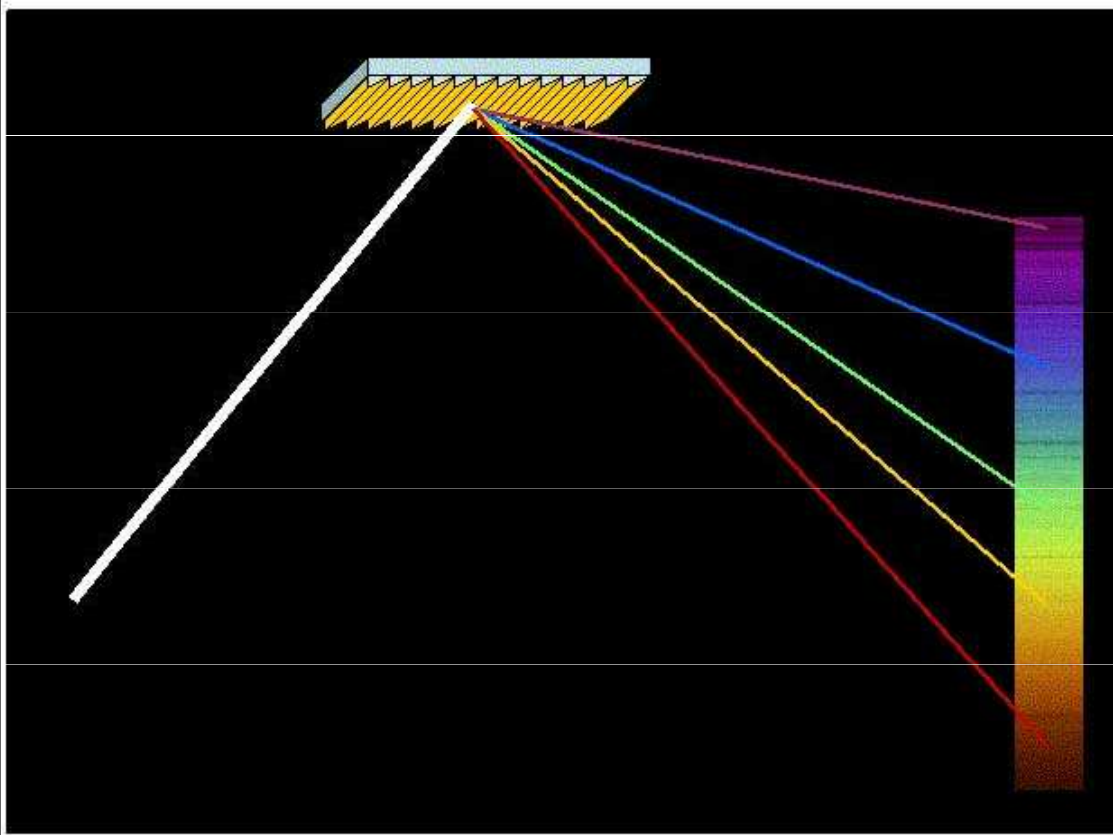
# Průchod rovinných vln přes mřížku – př.: směs červené a modré

Maximum nultého řádu  $m = 0$  se nerozkládá

Na průchod:



Na odraz:



**Difrakce** – daleké pole – Fraunhoferova – aproximace: na stínítko dopadají rovinné vlny (Youngův pokus a mřížka)

-blízké pole – Fresnelova – složité matematické vyjádření

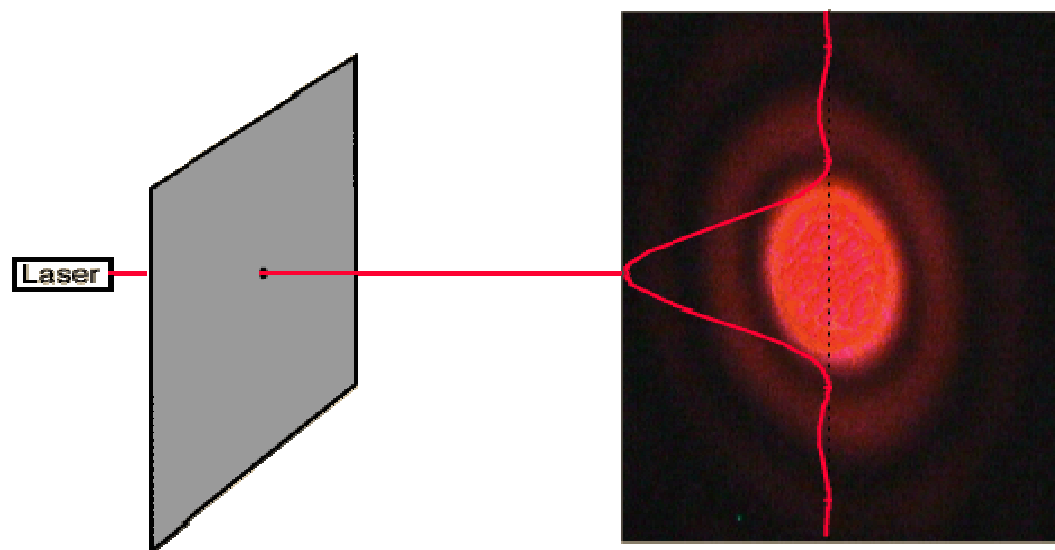
-Důsledek difrakce: Světlo nelze zaostřit na libovolně malou plochu, ideální spojná čočka o ohn. vzdálenosti  $f$  a průměru  $D$  zaostří monochromatický svazek (z laseru) na plošku o průměru  $d$ :

Plochý profil  
paprsku:

$$d = 2.44 \frac{\lambda}{D} f$$

Gaussovský (viz dále)  
profil paprsku:

$$d = 1.27 \frac{\lambda}{D} f$$



# Interferometrie

## Michelsonův interferometr

Posuvné zrcadlo  
mikrometrickým  
šrubem

Vzdálenost  
interferenčních maxim

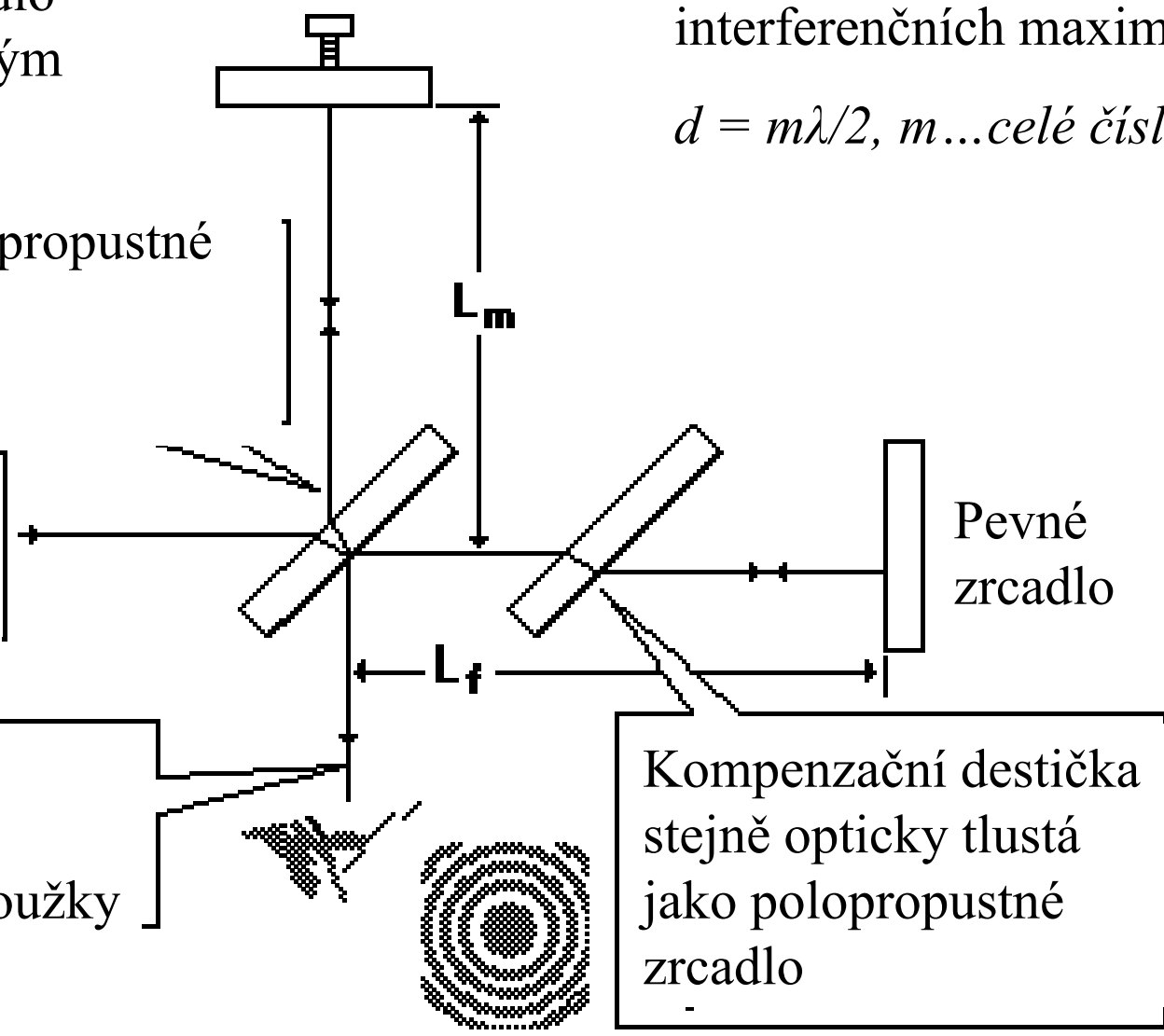
$$d = m\lambda/2, m \dots \text{celé číslo}$$

Polopropustné  
zrcadlo

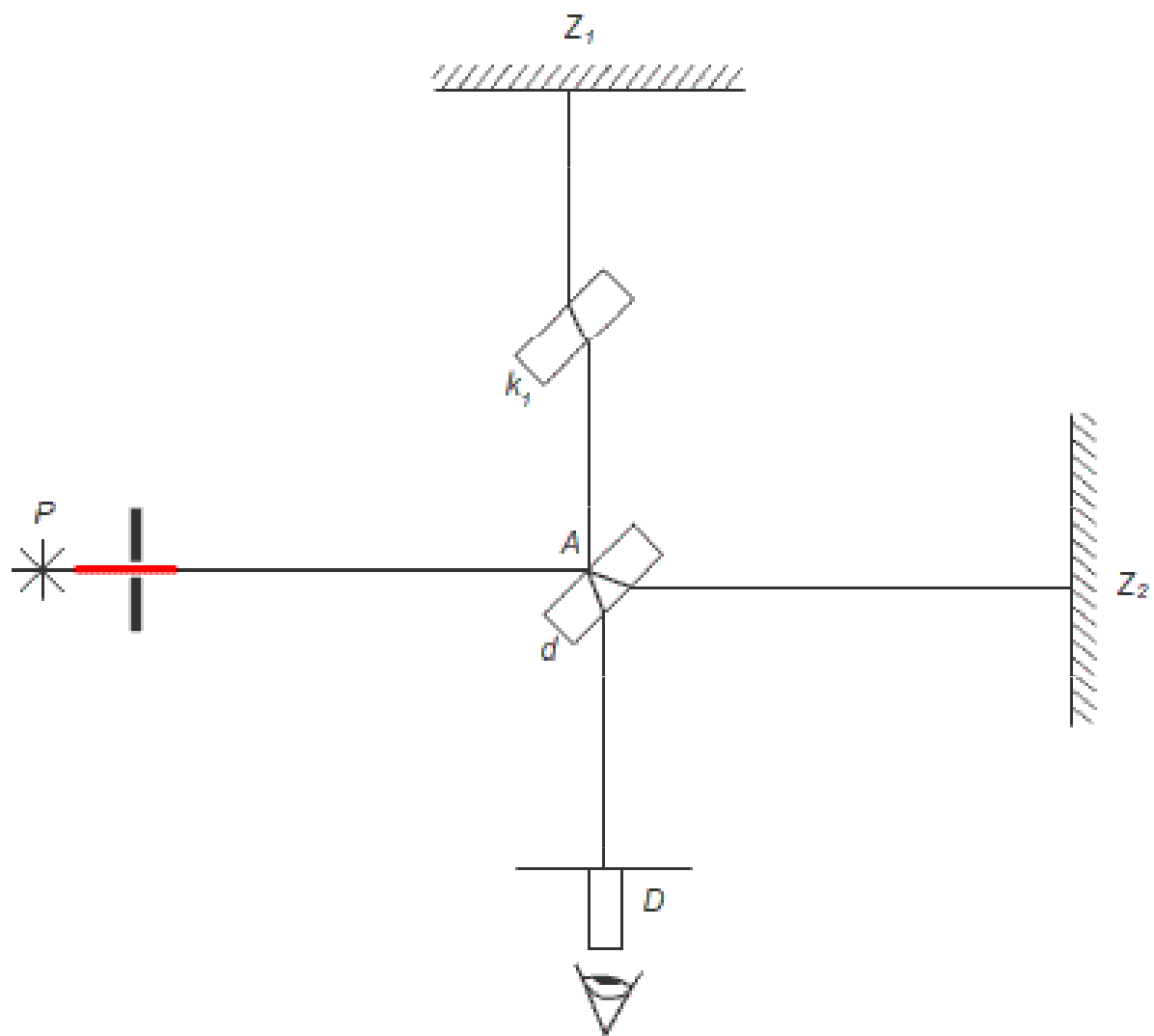
Plošný zdroj  
monochrom.  
světla - laser

Pozorovatel –  
detektor –  
interferenční kroužky

Kompenzační destička  
stejně opticky tlustá  
jako polopropustné  
zrcadlo

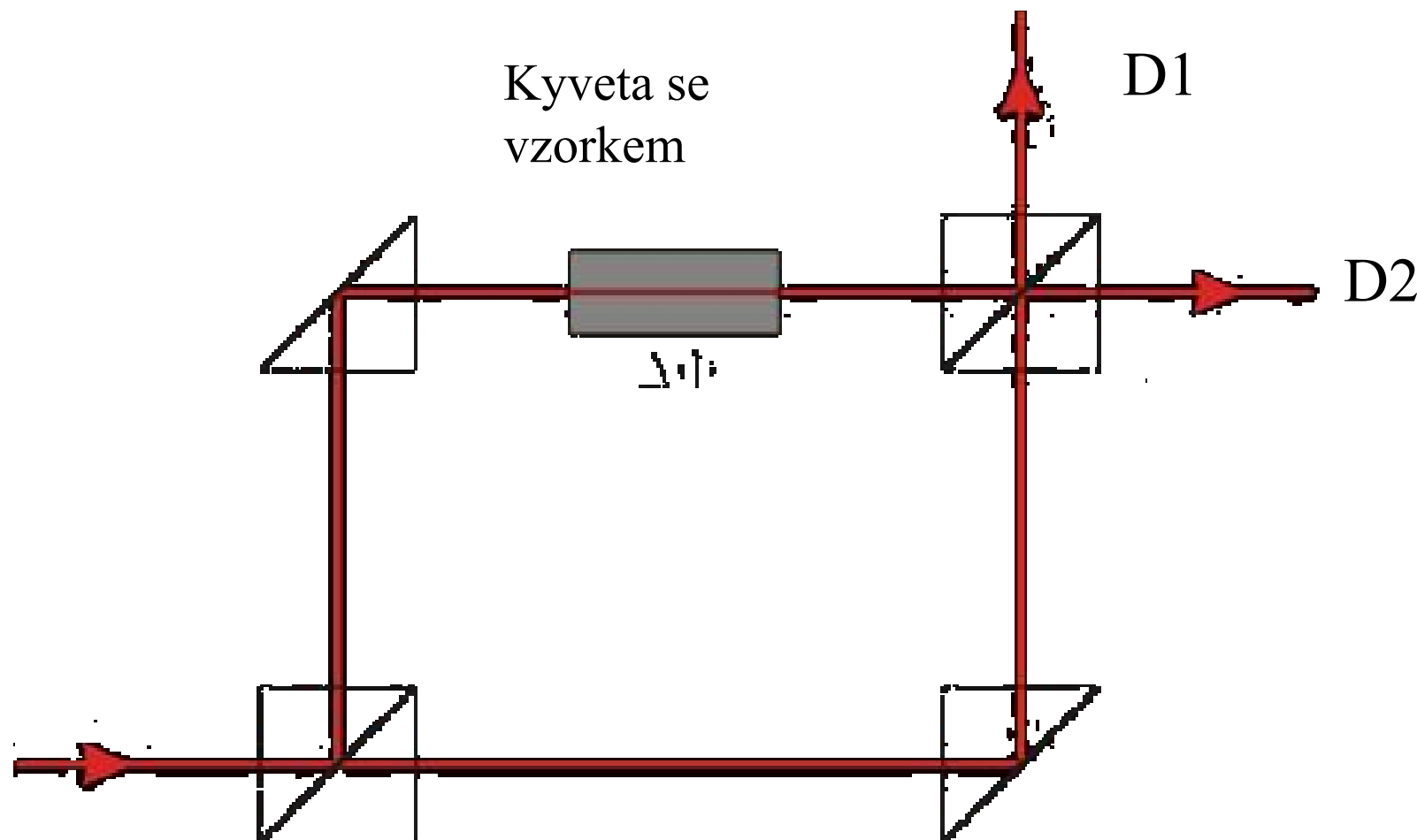






## Mach-Zehnderův interferometr

Index lomu  $n$  větší než okolní vzduch v kyvetě se vzorkem, výbojové trubici, plameni, otevřeném výboji, způsobí zpomalení světla a fázový rozdíl po dopadu na detektor a posuv interferenčních proužků



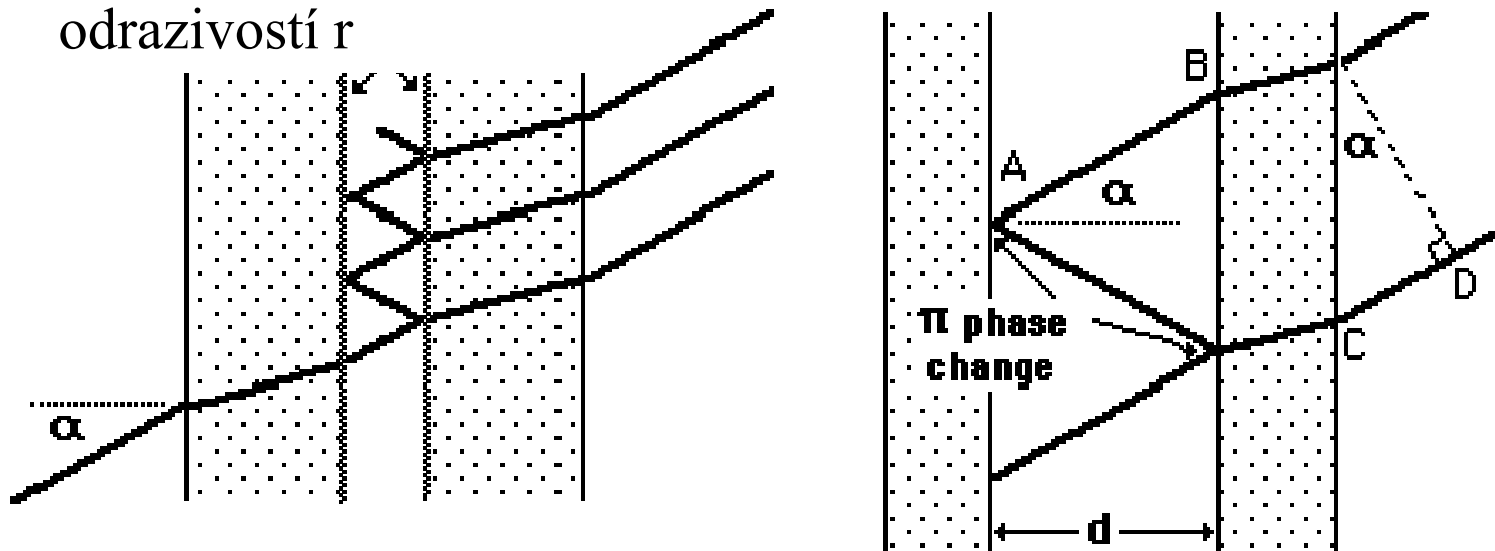
Př. Měření hustoty elektronů  $N_e$  ve výboji –  $n-1 \approx e^2 / (8\pi^2 * \epsilon_0 m_e c^2) * (\lambda^2 N_e)$

# Fabry-Perotův interferometr a interferenční filtr

## Interference na planoparalelní vrstvě

Skleněné desky s  
odrazivostí  $r$

Maximum  $m\lambda = \overline{2AB} - \overline{CD} = 2d \cos \alpha$

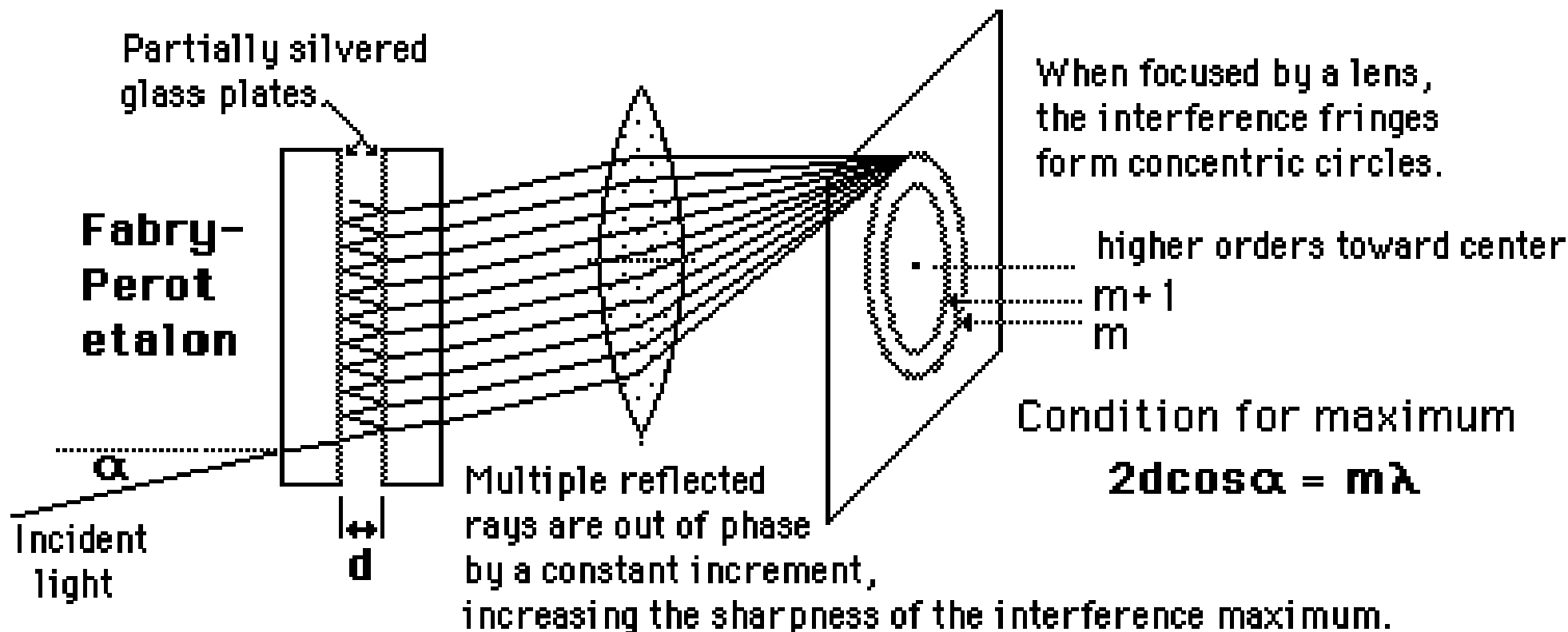


Rozlišovací schopnost

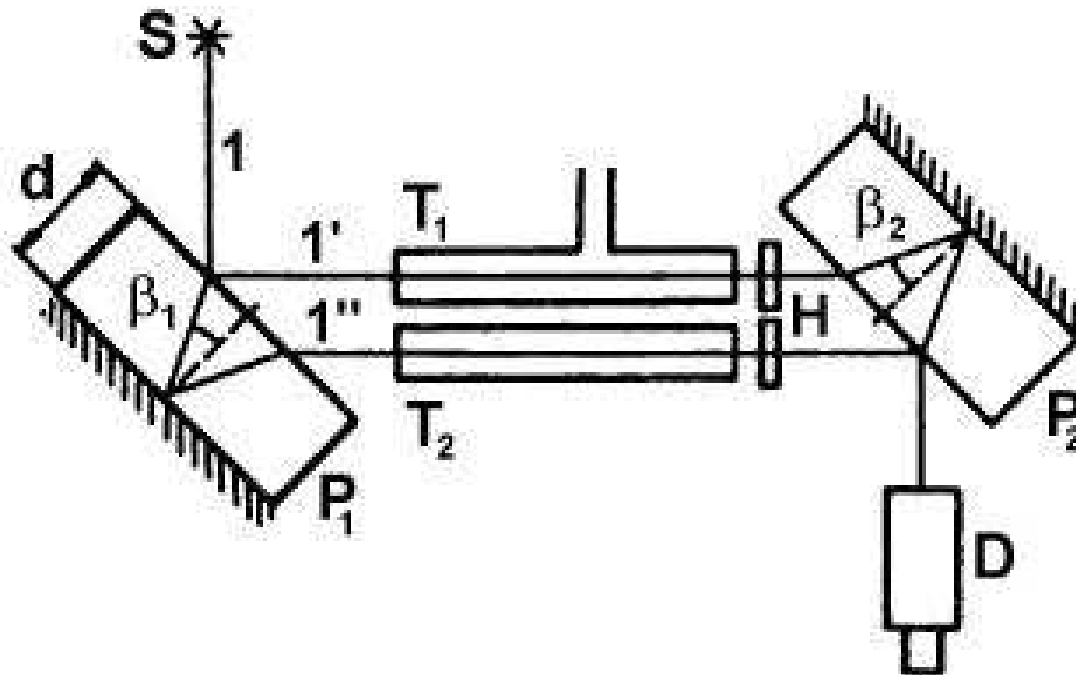
$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = \frac{m\pi\sqrt{r}}{1-r}$$

$m \dots$  celé číslo

Pod vhodným úhlem projde jen určitá vlnová délka – monochromatizace záření, laserové rezonátory



## Jaminův interferometr



Př. Měření indexu lomu  $n$  plynu srovnávací metodou

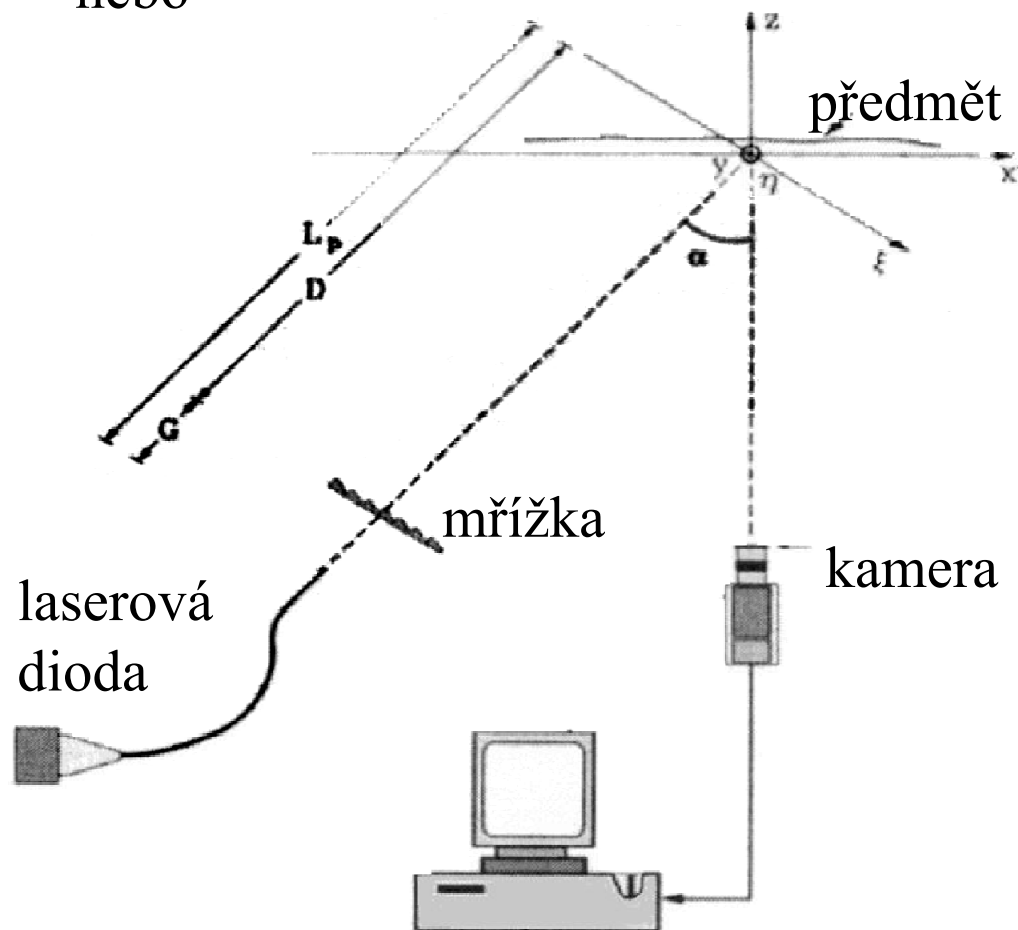
S... sodíková výbojka, T...propustnosti kyvet o délce  $l$  s referenčním a měrným prostředím, H... kompenzační destičky, D... dalekohled s nitkovým křížem pro odečet počtu proužků,  $k$ ... počet prošlých interferenčních proužků

$$n_2 = n_1 + k\lambda/l$$

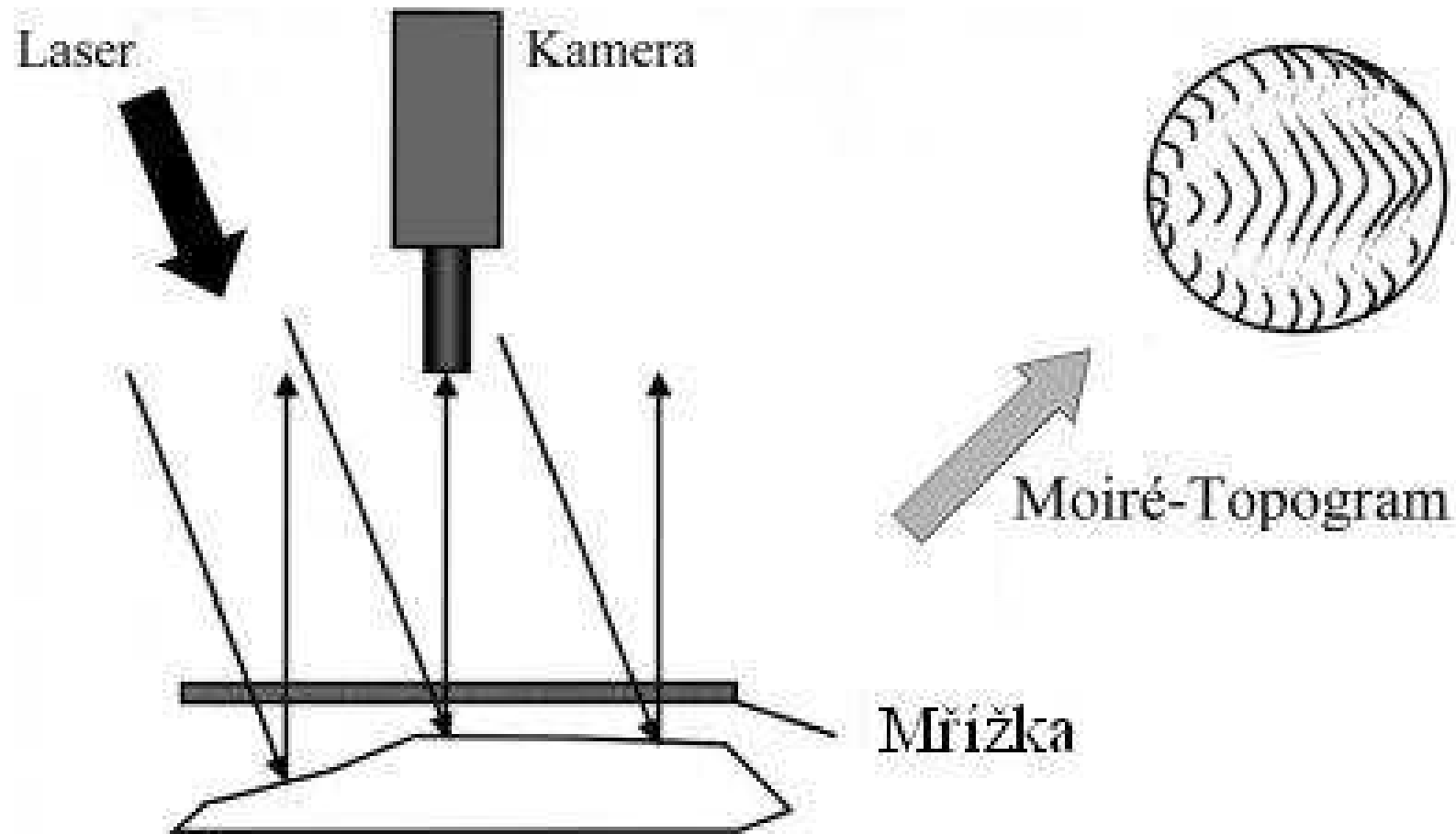
## Moiré interference

vzor vznikající při vzájemném složení obrazů v různých rozlišeních. Může se objevit například při zobrazení drobného kosočtverečného vzoru na obrazovce.

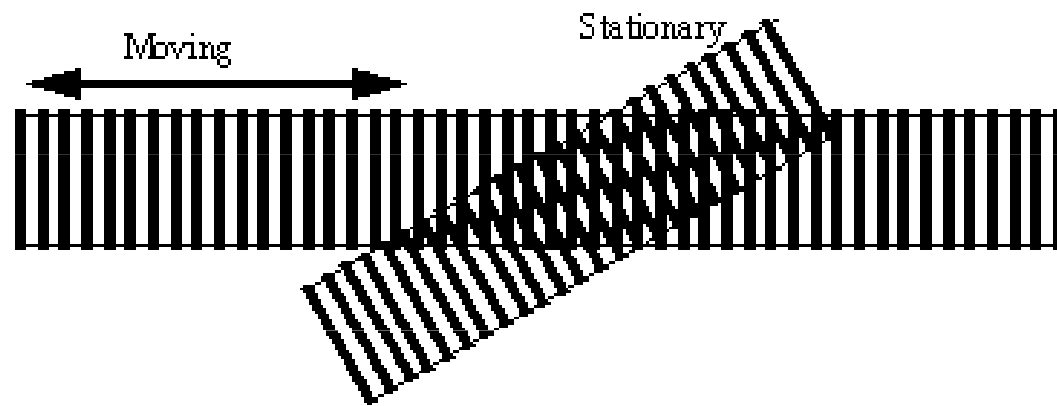
Moiré vzniká tehdy, když pravidelný obrazec pole buněk snímače fotoaparátu nebo zobrazovacích bodů obrazovky nebo displeje interferuje s nějakým pravidelným vzorem na ploše zobrazení (např. struktura tkaniny, tašky na střeše, ...). Překrývání dvou pravidelných obrazců, jež jsou si podobné, ale nejsou dokonale vyrovnané, vede ke vzniku sady vzorů - moiré efektu. Ten se projevuje jako barevné pruhy nebo kruhy.



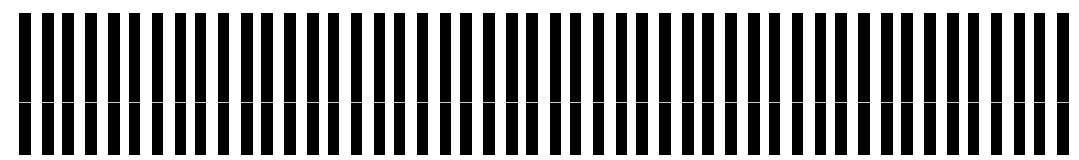
Měření členitosti povrchů předmětů: Záření z laserové diody prochází mřížkou, difraktuje a dopadá na zkoumaný povrch, odráží se od něj a složený interferenční obrazec z pruhů z mřížky deformovaný odrazem od nerovností povrchu se zaznamenává a analyzuje.



Literatura např.: Isaac Amidor, The Theory of the Moiré Phenomenon: Volume I: Periodic Layers, Springer, London 2009

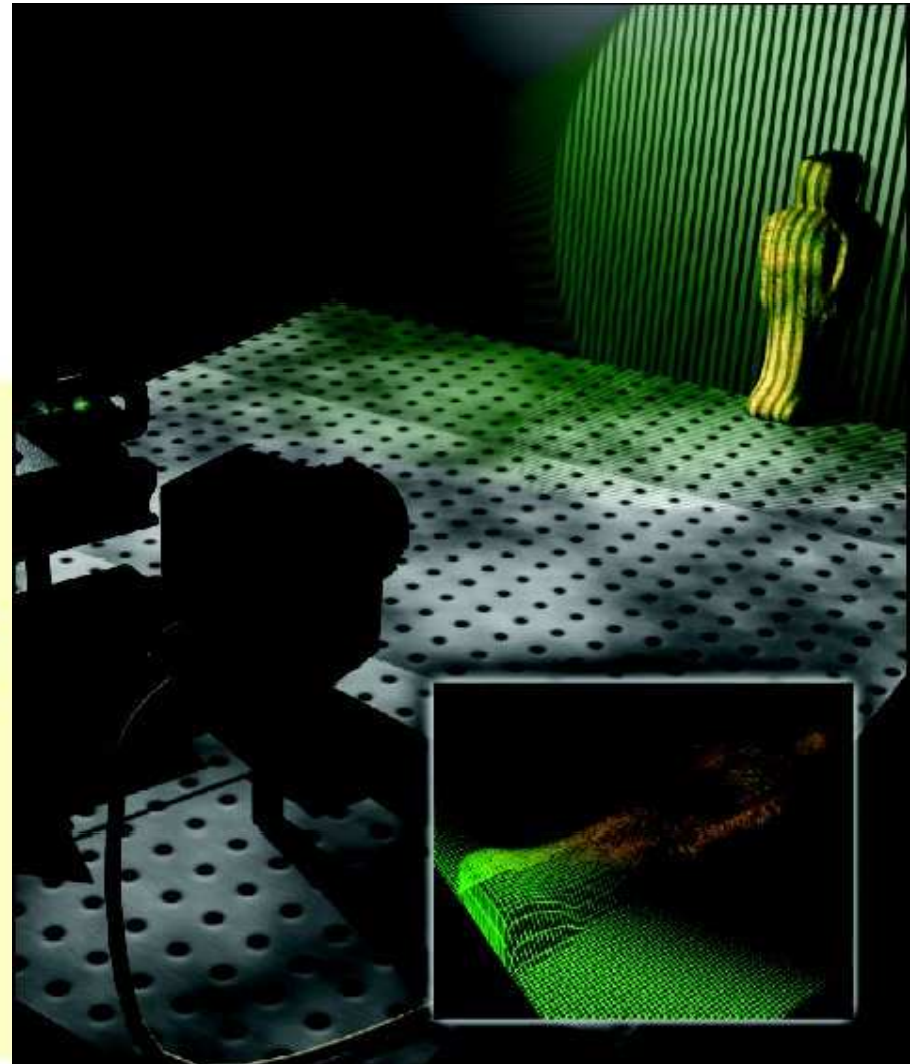
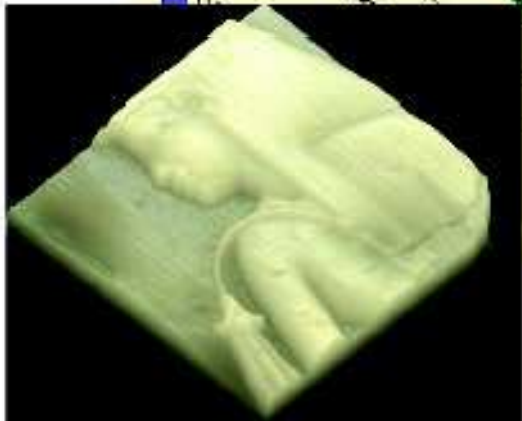
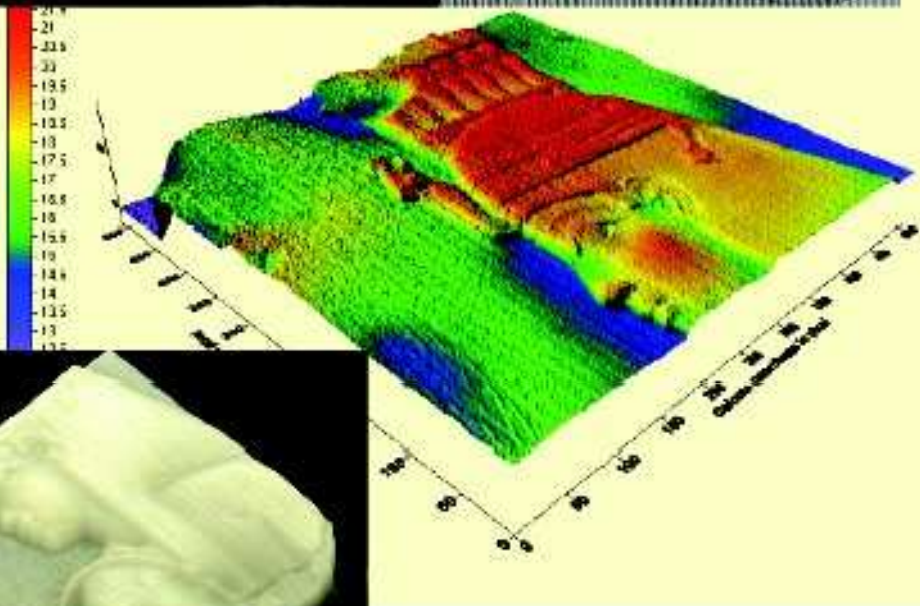
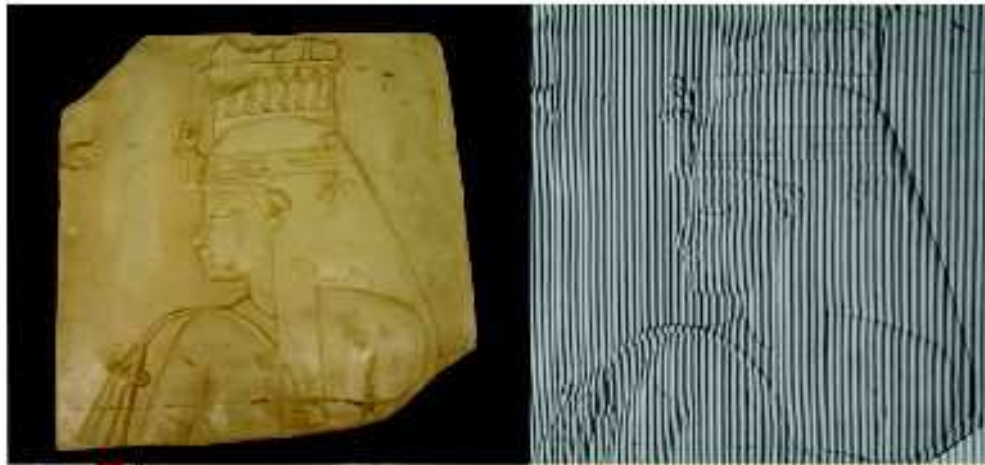


Note: you can recreate this effect with the strips below. Photocopy the pattern twice, overlay the sheets and hold them up to the light. You will notice that shifting one sheet will cause the stripes to move up or down.





Pomocí moiré efektu lze měřit členitost povrchů – interfer. proužky jako vrstevnice, -odhalování defektů



# Holografie – prostorový záznam předmětu, 1948 Denes Gabor

*Řecky „holos“ = úplný*

Koherentní světlo - používá plynové lasery (He-Ne, pulsní málokdy)

Potřebuje velmi citlivou fotografickou emulzi - až 1400 bodů na mm - , nejčastěji AgBr nebo dichromanová želatina

Záznam: Na fotodesku dopadá zároveň nosná vlna (laser) i odražená od předmětu.

Interferují spolu a interferogram se zaznamená => záznam intenzity i fáze vlny.

Fotografie – jen záznam intenzity. Při rekonstrukci je potřeba úzký paprsek světla pod určitým úhlem, sebemenší kousek záznamové desky obsahuje veškerou informaci => uvidíme jej zase celý, poklesne však rozlišení

## Rozdělení hologramů

Plošné – na průchod

Objemové – na odraz, kopie se lisují, bílé světlo => každá barva se odrazí jinak - jako duha a difrakční mřížka

## Využití

hologramy, paměťová média, mikroskopie, fokusace laseru, srovnávání objektů



Záznam hologramu

Rekonstrukce  
- odraz

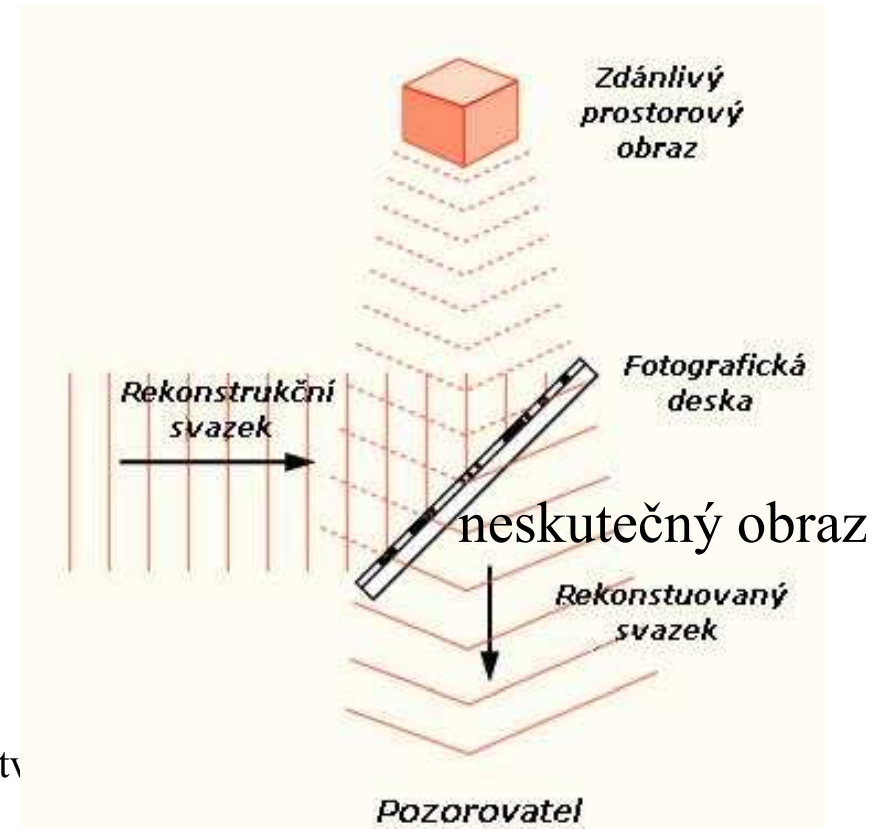
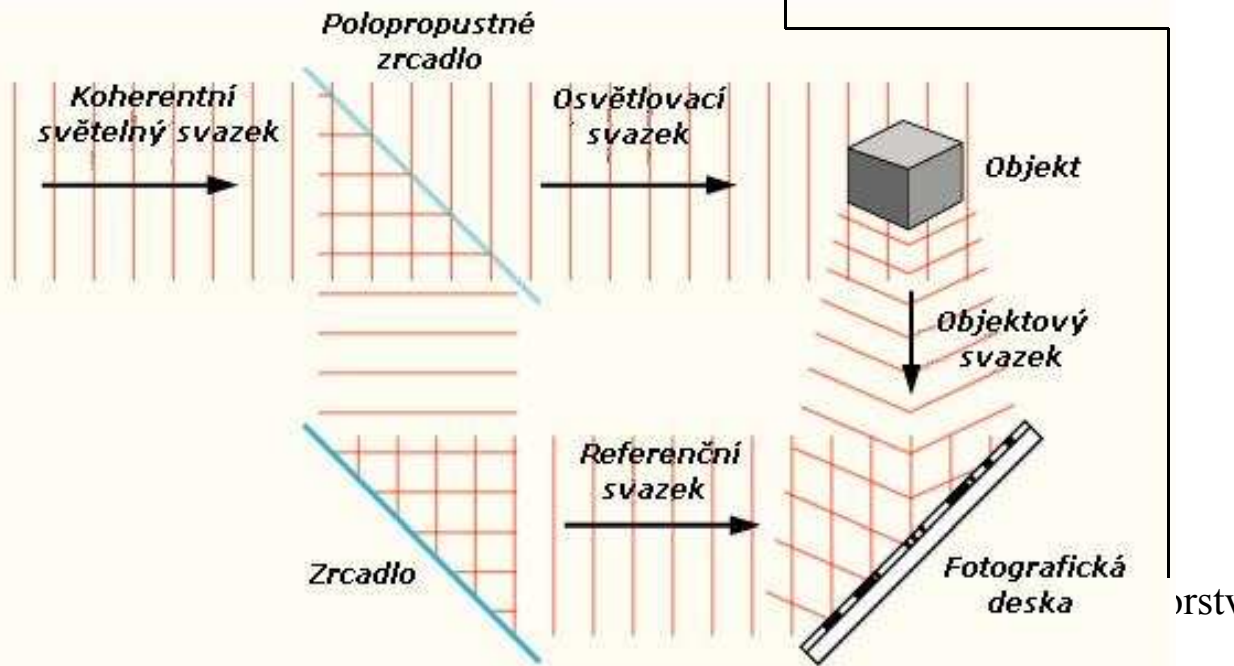
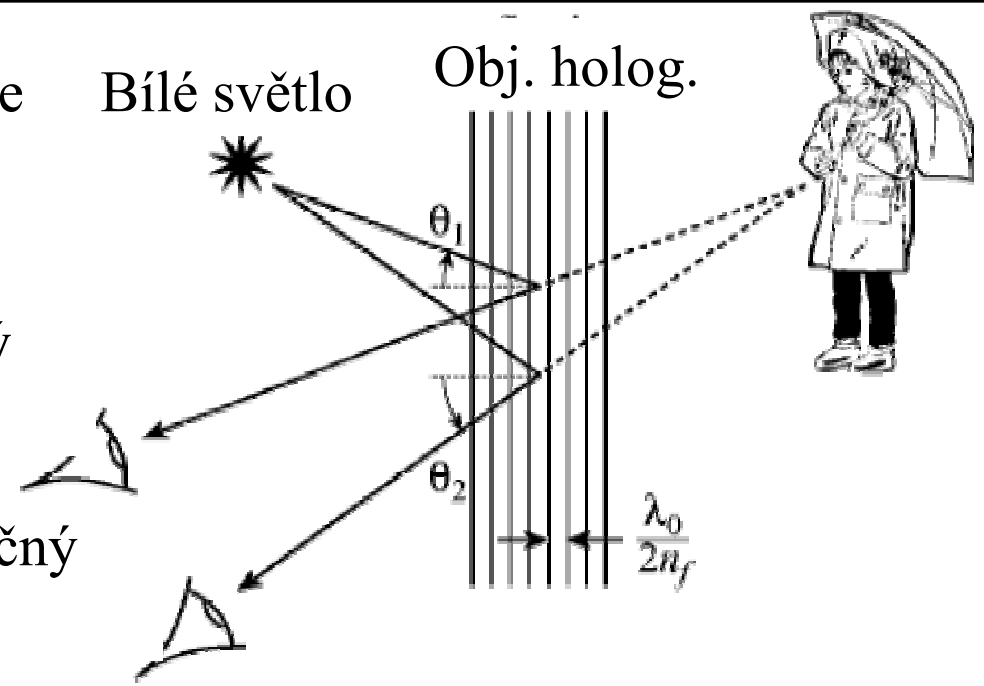
Bílé světlo

Obj. holog.

Neskutečný  
obraz  $\lambda_1$

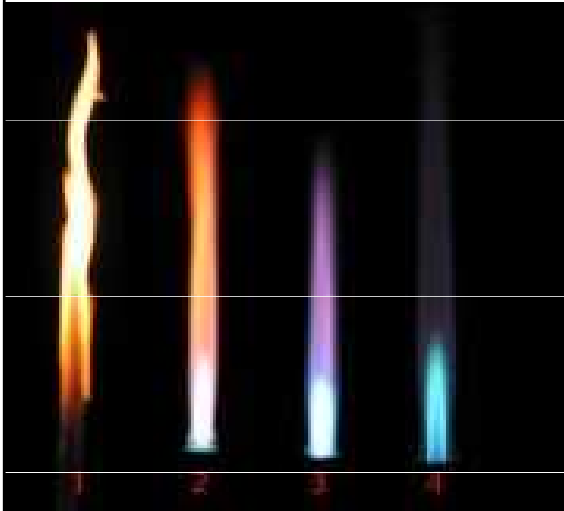
Neskutečný  
obraz  $\lambda_2$

Rekonstrukce  
- průchod



# Makroskopické zdroje světla

Plamen (chemické reakce), elektrický výboj, žárovka, světelná dioda (Light Emitting Diode), luminiscenční stínítko obrazovky, laser



# **LASER – Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation**

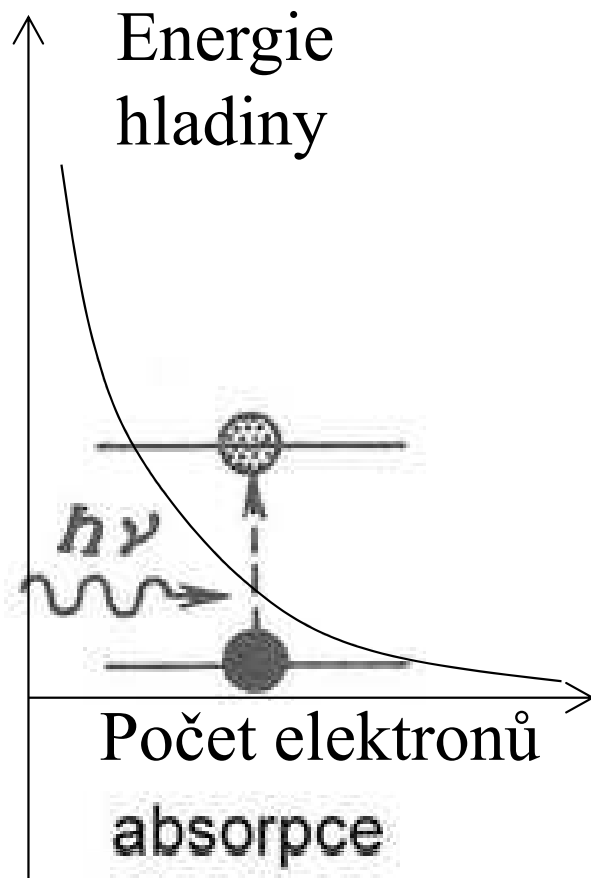
Zesílení světla stimulovanou emisí záření

Pro laser je nutná tzv. populační inverze – na vyšší hladině udržovat přebytek elektronů než na nižší a elektrony z vyšší hladiny řízeně (stimulovaně) deexcitovat na nižší hladinu

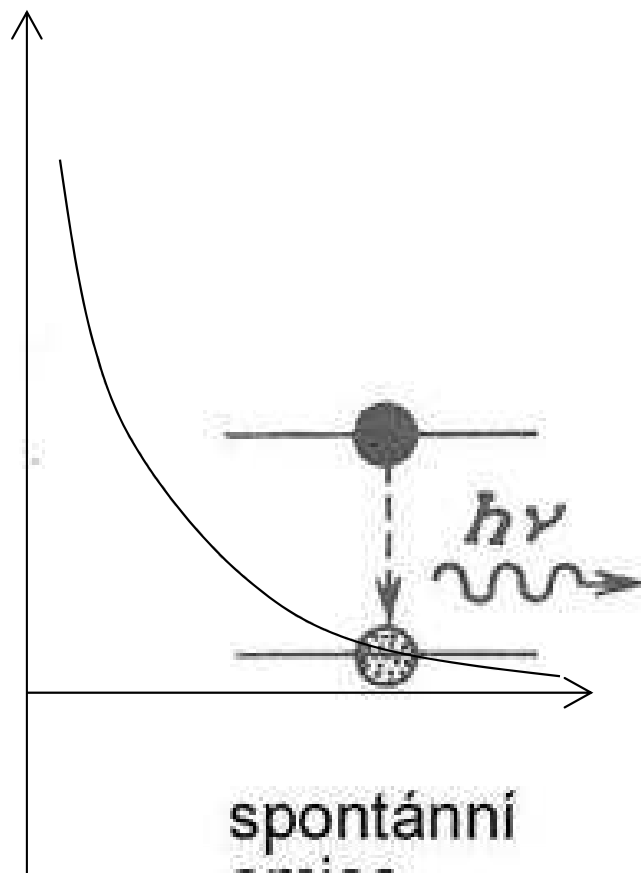
**Spontánní emise** – pravděpodobnost excitace elektronů na vyšší než základní hladinu se řídí Boltzmannovým rozdělením

Pro 2 hladiny platí, že s růstem populace na horní úrovni klesá rozdíl mezi populacemi na horní a dolní úrovni, a tím se zmenšuje schopnost pohlcovat energii záření. Mezní stav nastane při rovnosti populací při velké intenzitě čerpání => elektronů se nemůže na vyšší hladině hromadit více než na spodní. Pro populační inverzi nutné alespoň 3 hladiny.

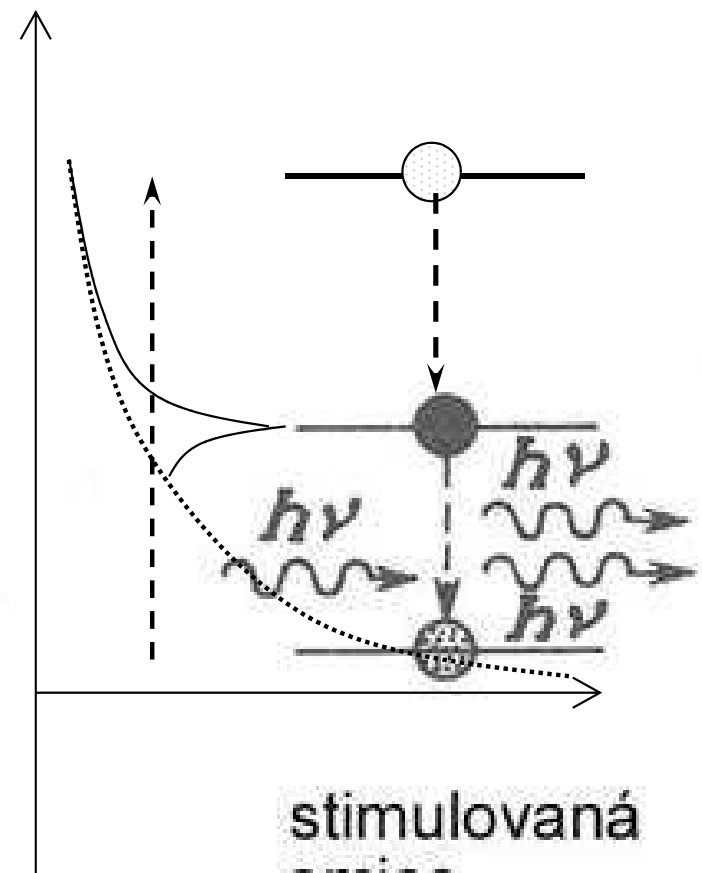
**Stimulovaná emise** – elektrony na hladině s relativně dlouho dobou života (metastabilní) jsou stimulovány dopadajícím fotonem k sestupu na nižší hladinu a emisi zcela shodného fotonu (polarizace, směr, energie, fáze), který emisi vyvolal



a)



b)



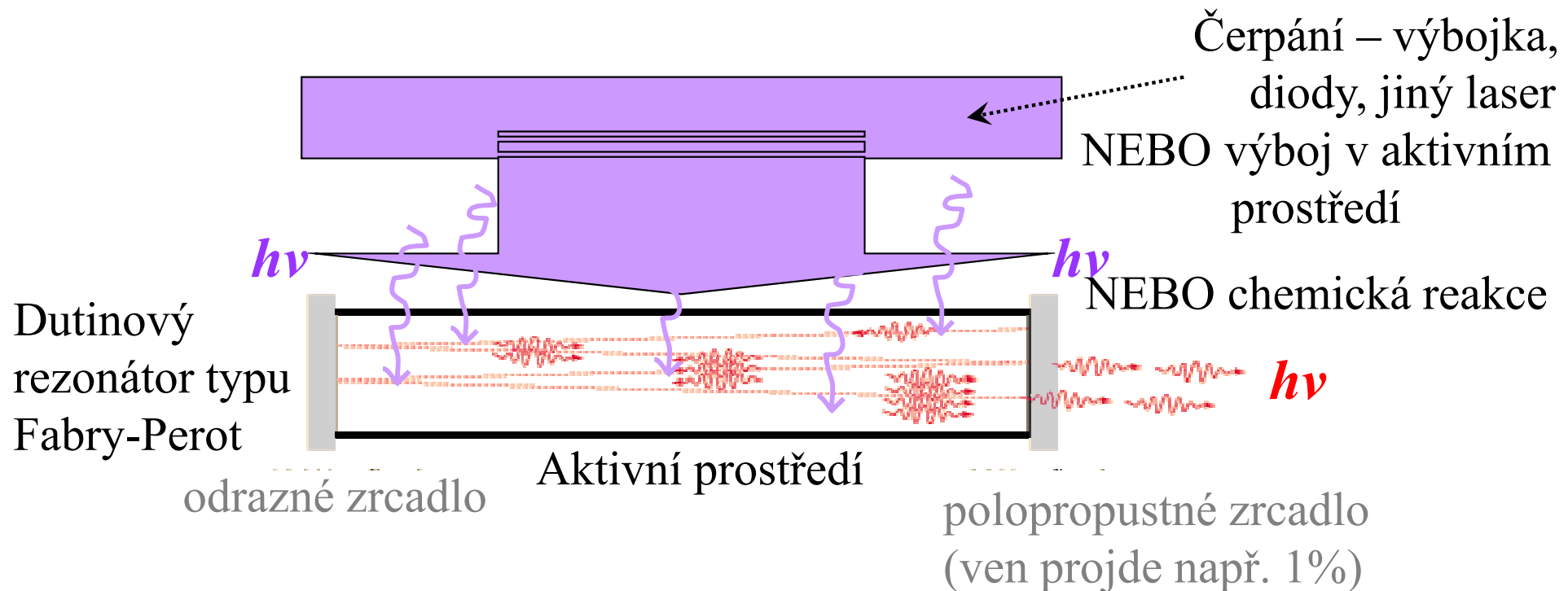
c)

a), b) přirozené procesy

c) 3-hladinový proces s prostřední metastabilní hladinou

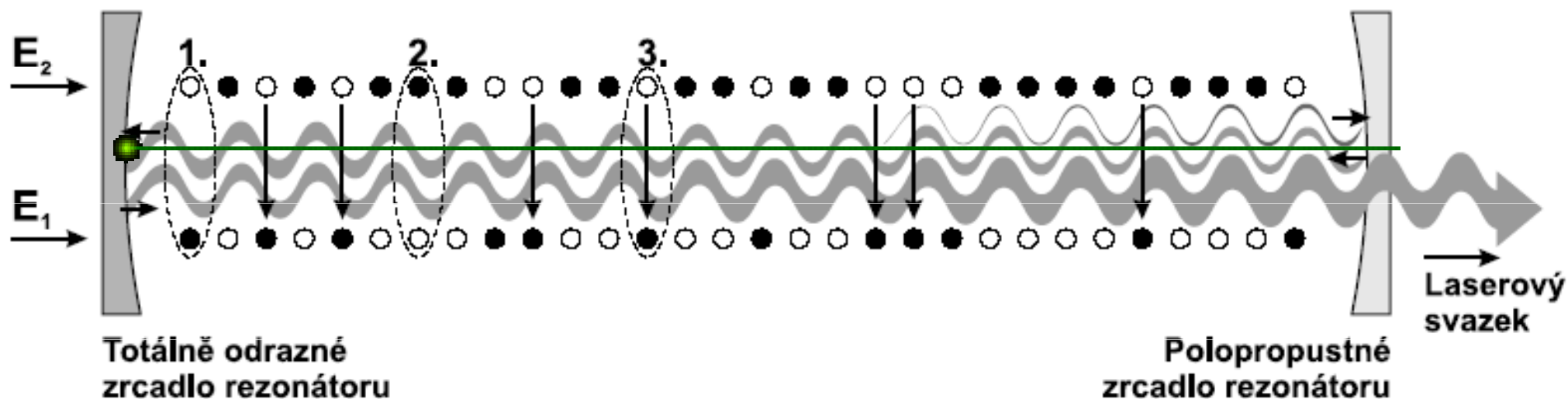
Pro laser musí být aspoň 3 hladiny

# Obecné schéma laseru



- vybuzení elektronů akt. prostředí na metastabilní hladinu jinými fotony (čerpání)
- přechod elektronu z metastabilní na nižší hladinu spontánně a emise fotonu
- ten cestuje akt. prostředím, ale odrazí se zpět od zrcadla a po srážce s částicí akt. prostředí „shodí“ elektron s metastab. hladiny dolů => další **úplně stejný foton** a cyklus se opakuje (zpětná vazba u zesilovače) => exponenciální lavina
- vniká stojaté vlnění, je-li délka rezonátoru  $L = m\lambda/2$  – rezonuje v dutině
- fotonů je pak tolik, že výsledný světelný paprsek opouští tělo laseru průchodem přes polopropustné zrcadlo

# Typický F-P rezonátor



Obrázek 1: Pokud je aktivní prostředí s inverzním obsazením hladin uzavřeno v optickém rezonátoru (tvořeném obvykle dvěma navzájem proti sobě umístěnými rovinnými nebo také sférickými zrcadly), zpětná vazba laserového záření (odraz zpět do aktivního prostředí) umožní vznik generátoru elektromagnetických kmitů. Překročí-li zesílení světla v aktivním prostředí ztráty při jednom průchodu mezi zrcadly, začne laser emitovat záření na vlnové délce charakteristické pro dané aktivní laserové prostředí. Aby bylo možné vyvézt laserový paprsek z rezonátoru, je jedno ze zrcadel částečně propustné. Na obrázku jsou vyznačeny kvantové soustavy v základním (1.) a v excitovaném (2.) stavu, stimulovaná emise (3.) a energetické hladiny kvantových soustav  $E_1$  a  $E_2$ .

Podmínka laserování:  $(R_1R_2)^{1/2}G > 1$ ,  
 $G$ ...zesílení,  $R_{1,2}$ ...odrazivosti zrcadel



# Dělení laserů

## podle aktivního prostředí na

**pevnolátkové** (př. rubín, yttrium aluminium granát, skla, keramika). Výhodou skel je jejich snadná výroba oproti metodě pěstování krystalů. Je jednodušší u nich dosáhnout homogenity prostředí, mají dobrou optickou kvalitu povrchu, lze je dobře opracovávat, ale za to mají mnohem větší rozměry, menší tepelnou vodivost a menší tvrdost. Keramika je oproti krystalům levným materiálem a má lepší tepelnou vodivost nežli sklo.

**kapalinové** (roztoky organických barviv odolné proti rozkladu benzenových jader vlivem světla a času)

**plynové** (atomární, molekulové, iontové). Prostedí plynů je více homogenní oproti kondenzovaným látkám, proto je výstupní svazek méně deformován. Nevýhodou je ale malá objemová hustota částic, z čehož plynou menší výstupní výkony. Lasery proto musí být mnohem rozměrnější.

## **plazmatické**

**polovodičové**. Mají velkou účinnost, malé rozměry, jsou levné. Výstupní paprsek má velkou rozbíhavost.

**podle vysílaných vlnových délek:**

**mikrovlnné (MASER)**

**infračervené**

**viditelné pásmo**

**ultrafialové**

**rentgenové (RASER)**

**podle zúčastněných energetických hladin na kvantovém přechodu**

**elektronové**

**molekulární (rotační, rotačně - vibrační, vibrační)**

**elektronové**

**podle časového provozu laseru**

**impulsní (dlouhé, krátké, velmi krátké)**

**pulsní**

**kontinuální**

**podle typu buzení**

**opticky (pro pevnolátkové a kapalinové)**

**elektrickým výbojem (pro plynové)**

**elektronovým svazkem**

**tepelnými změnami**

**chemicky**

**rekombinací (pro polovodičové)**

**injekcí nosičů náboje.**

# Přehled laserů

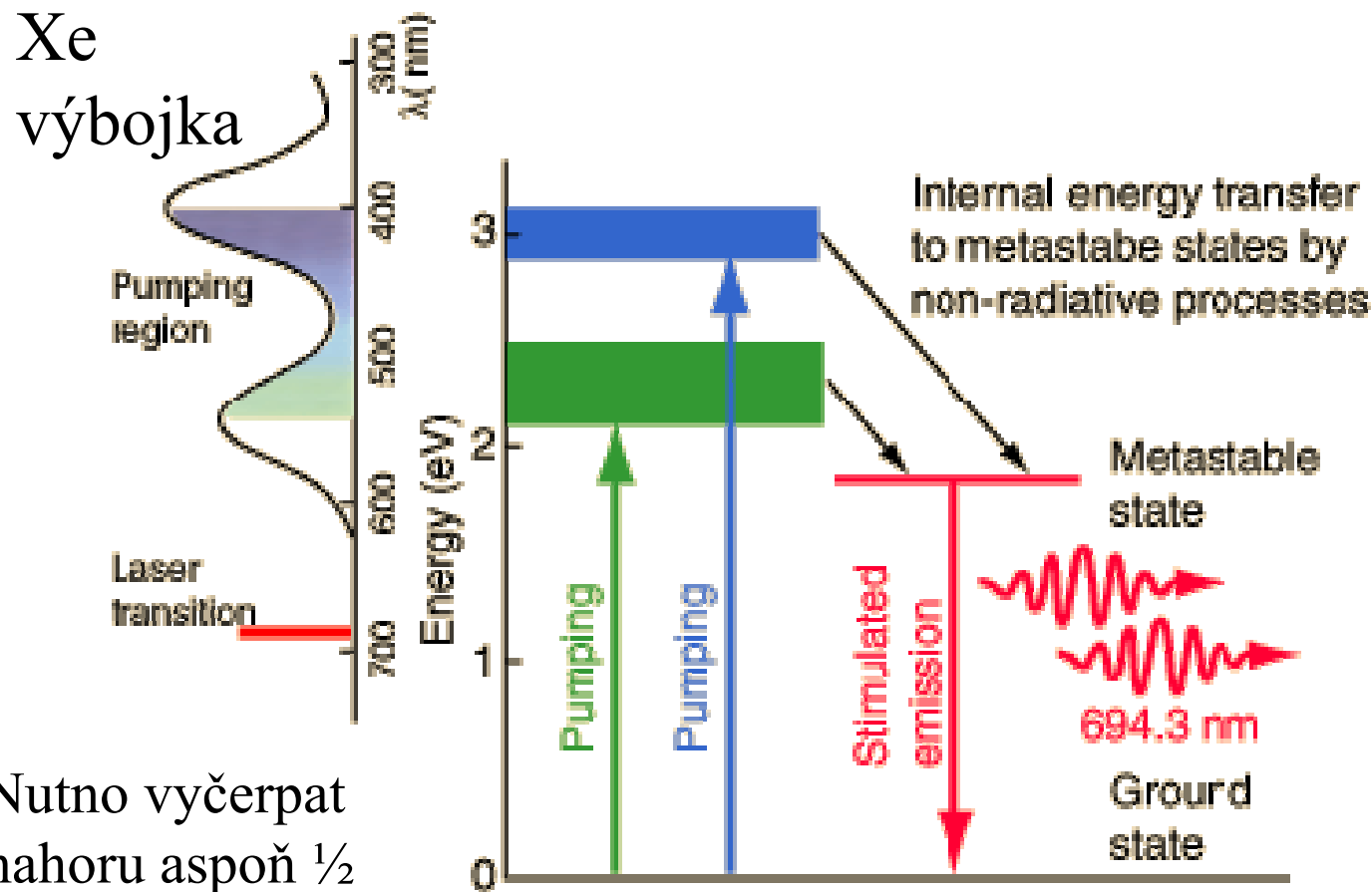
Typ laseru	Aktivní prostředí	Vlnová délka	Spektrální oblast	Příklady použití
<b>Pevnolátkové</b>				
Rubínový	Rubín	694,3 nm	červená	holografie, odstraňování tetování
Nd:YAG	Neodym, YAG	1064 nm	IR	litografie, chirurgie, strojírenství, spektroskopie
Ho:YAG	Ho:YAG	2,1 μm	IR	chirurgie, stomatologie
Er:YAG	Erbium, YAG	2,94 μm	IR	chirurgie, stomatologie
Titan-safírový	titan, safír	690 - 1000 nm	červená, IR	spektroskopie, fs pulsy
Alexandritový	Alexandrit	700 - 800 nm	červená, IR	žihání, řezání
<b>Kapalinové: vzácné zeminy, barvivové</b>				
Rhodamin 6G	Rhodamin 6G	570-650 nm	žlutá, oranžová, červená	dermatologie
Kumarin C30	Kumarin C30	504 nm	zelená	oftalmologie, chirurgie

<b>Plynové - Atomární</b>				
He-Ne laser	hélium, neon	543 nm, 633 nm	zelená, červená	zaměřování polohy
Měděný laser	měď	510 nm, 578 nm	zelená	podmořská komunikace a lokace
Jodový laser	jód	342 nm, 612 nm, 1315 nm	viditelné, IR	věda, termojaderná syntéza
<b>Plynové - Iontové</b>				
Argonový laser	argon	488 nm, 514 nm	modrá, zelená	oftalmologie, spektroskopie
Hélium- kadmiový laser	hélium, kadmium	325 nm, 442 nm	UV, modrá	
<b>Plynové - Molekulární</b>				
Vodíkový laser	vodík	100 - 120nm, 140 - 165nm	UV	
CO <sub>2</sub> laser	Oxid uhličitý	10,6 μm	IR	sváření, řezání, stomatologie, dermatologie
CO laser	Oxid uhelnatý	5 - 6,5μm	IR	
Excimerové lasery	ArF, KrCl, KrF, XeCl, XeF	193 - 351 nm	UV	oftalmologie, laserová ablace, fotolitografie, fotochemie
Dusíkový laser	dusík	328 - 337 nm	UV	MALDI

<b>Polovodičové</b>				
GaAs laser	GaAs	650 nm, 840 nm	červená, IR	laserová ukazovátka, laserová tiskárna
GaAlAs laser	GaAlAs	670-830 nm	červená	telekomunikace, přehrávače CD, displeje
AlGaInP laser	AlGaInP	650 nm	červená	přehrávače DVD
GaN laser	GaN	405 nm	modrá	Blu-ray disky
InGaAlP laser	InGaAlP	630-685 nm	červená	lékařství

# Vybrané typy laserů

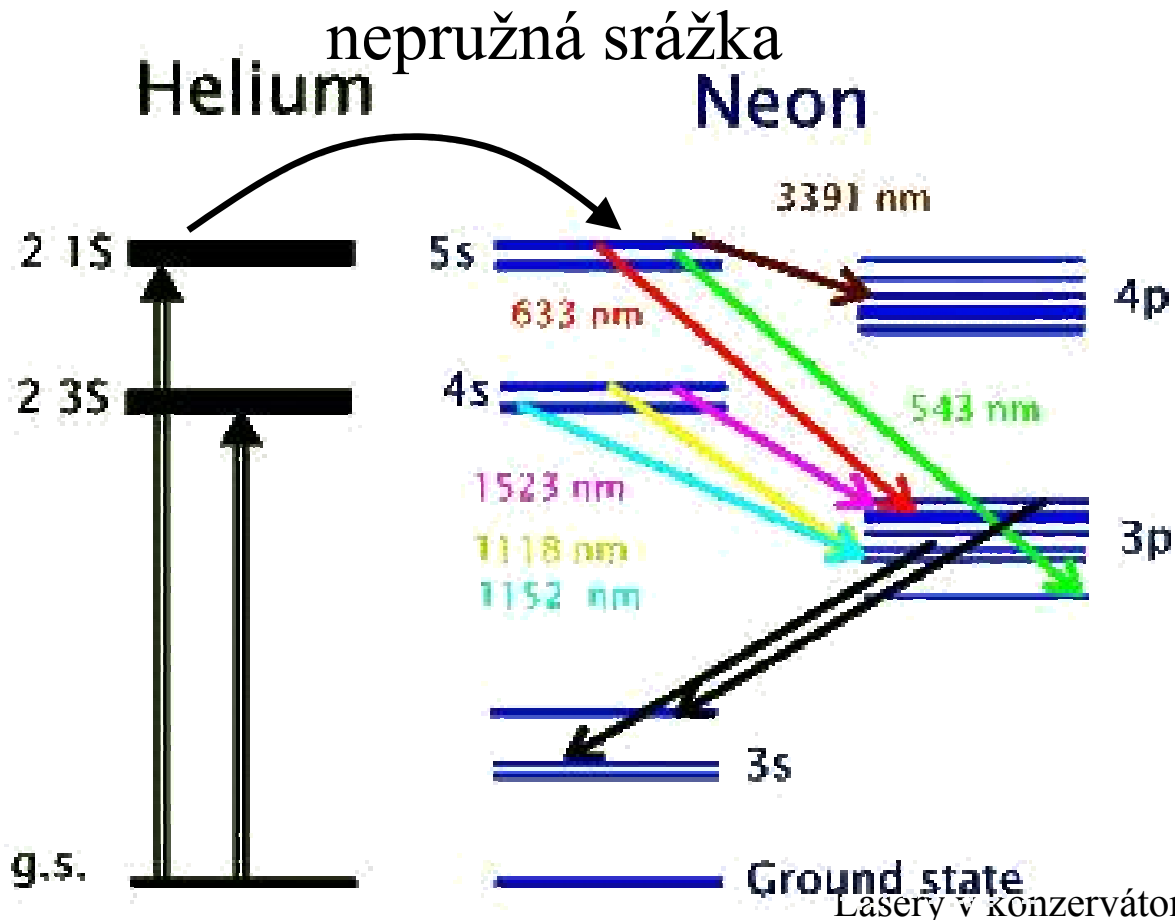
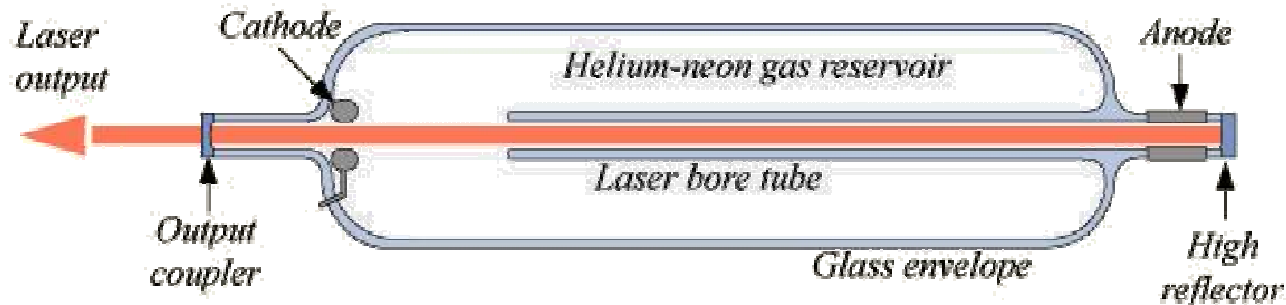
Theodor H. Maiman 1960: **Rubínový laser**: Aktivní prostředí – krystal  $\text{Al}_2\text{O}_3$  s příměsí  $\text{Cr}^{3+}$  jako 0,05 wt.%  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ , v  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pulzní (až  $10^9$  W) i kontinuální (nutno chladit), je 3-hladinový



Nutno vyčerpat nahoru aspoň  $\frac{1}{2}$  zákl. hladiny

Ali Javan, W. R. Bennet a D. R. Herriott 1961

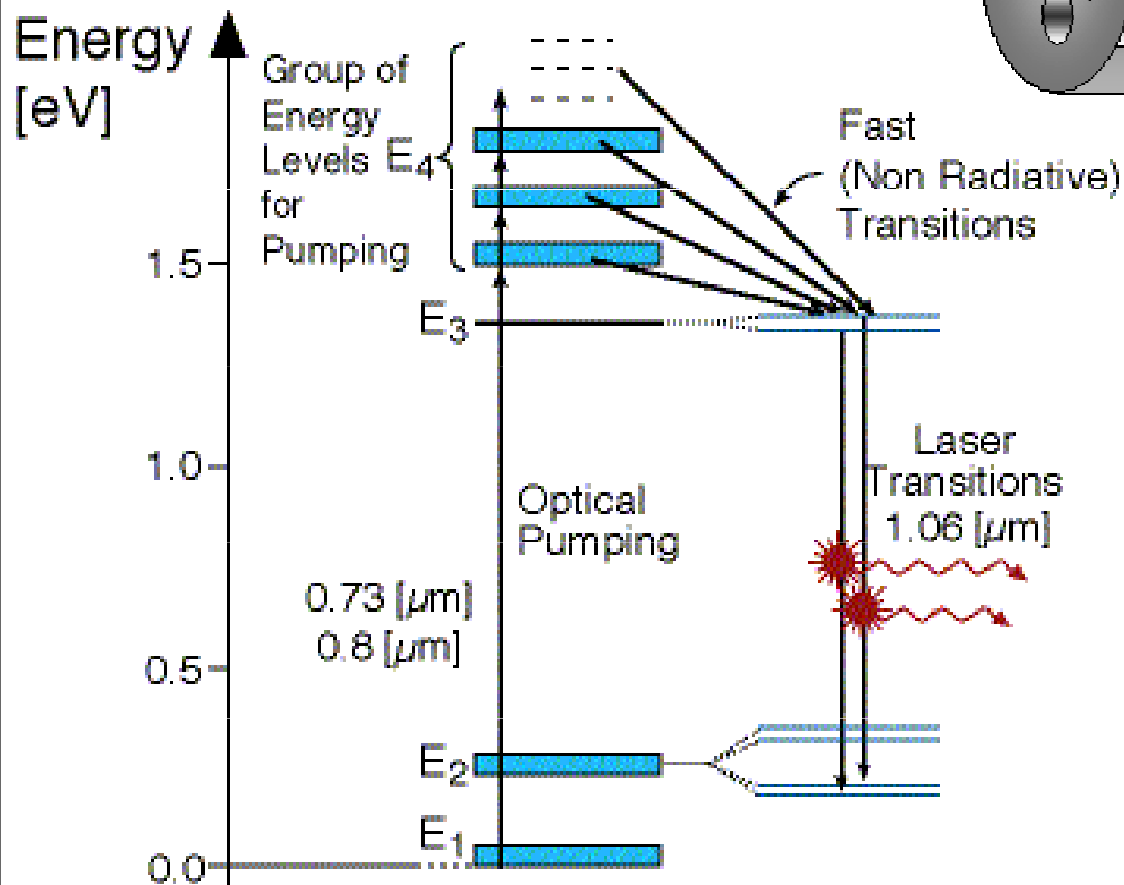
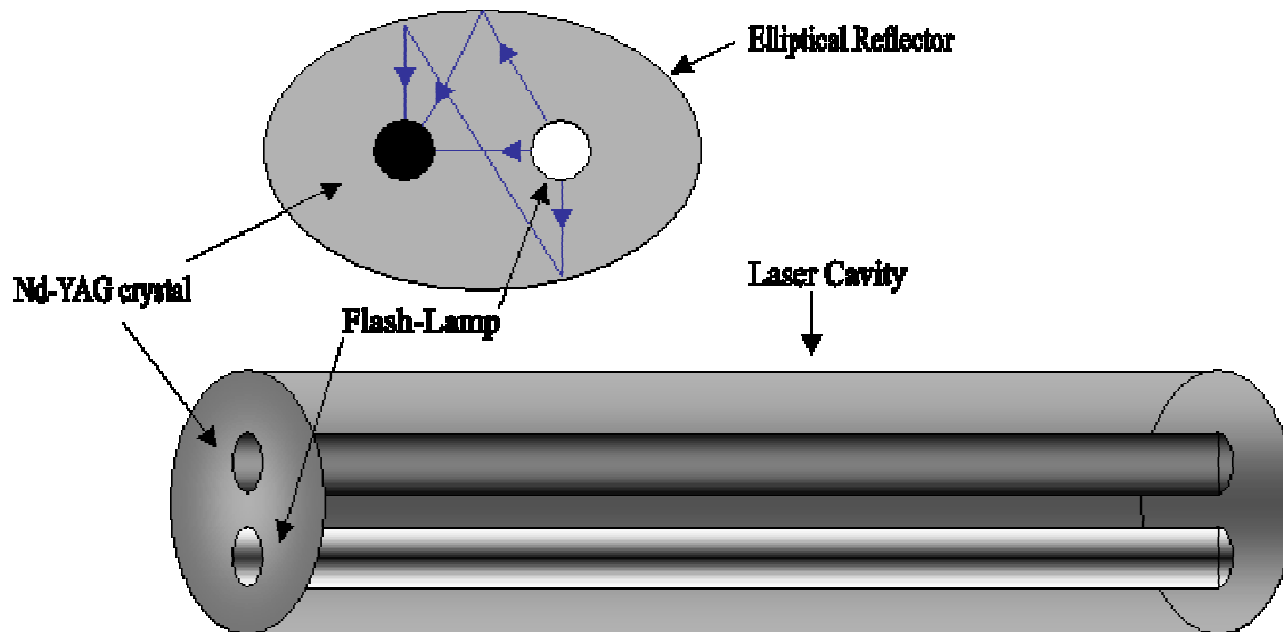
**Helium-neonový laser: 543, 594, 612, 633, 1150, 3390 nm**



He:Ne 5:1 - 20:1, výbojka 50 Pa na každý cm délky,  $I = 5 - 100$  mA  
kontinuální, typicky 15-50 cm,  
výkon 1 - 100 mW, účinnost max  
0,1 %

## Nd:YAG – Aktivní prostředí: krystal $Y_3Al_5O_{12}$ s ionty $Nd^{3+}$

1064 nm, puls i kont., buzení Kr- resp. Xe-výbojkou nebo diodami, pulzy typicky 4-20 ns, typicky 10-stovky mW kont., jinak až kW, účinnost běžne jednotky %



Délka běžně 10 cm, průměr tyčinky Nd:YAG 6 mm

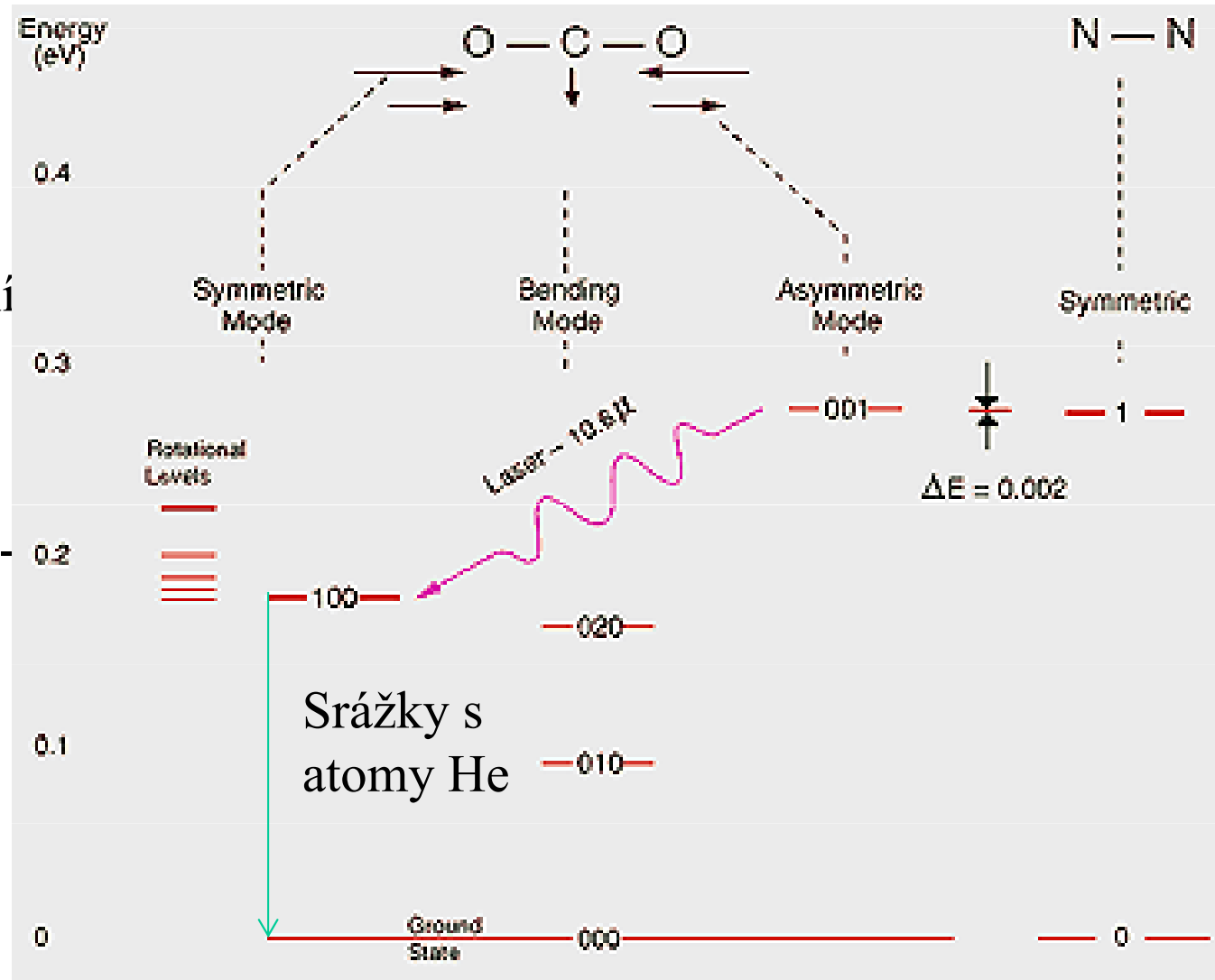
Velmi rozšířený ve výzkumu: ablace, čištění, možnost konverze z IR do VIS (532 nm) nebo UV (335, 266, 213 nm)



**CO<sub>2</sub>** C.K.N. Patel, 1964, 10,6 μm, puls 0,1 ms až kont., akt. prostředí je směs nejčastěji CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub>, He (např. 3:4,5:7,5) přenos energie jako u He-Ne laseru z N<sub>2</sub> na CO<sub>2</sub>

řezání a svařování, dermatologie, pulsní i kontinuální, axiální nebo příčná excitace aktivního prostředí, do 20 kW, typicky 500-5000 W, účinnost i 30 % Špičkový výkon v pulsu normálně stejný jako maximální cw výkon, tzn. že průměrný výkon se při pulsaci sníží. Některé CO<sub>2</sub> lasery špičkový výkon až 5x vyšší, než je kont. - tzv. superpulsace . různé konstrukce rezonátorů, systému proudění plynu a elektrického výboje, každá s vlastní specifickou charakteristikou.

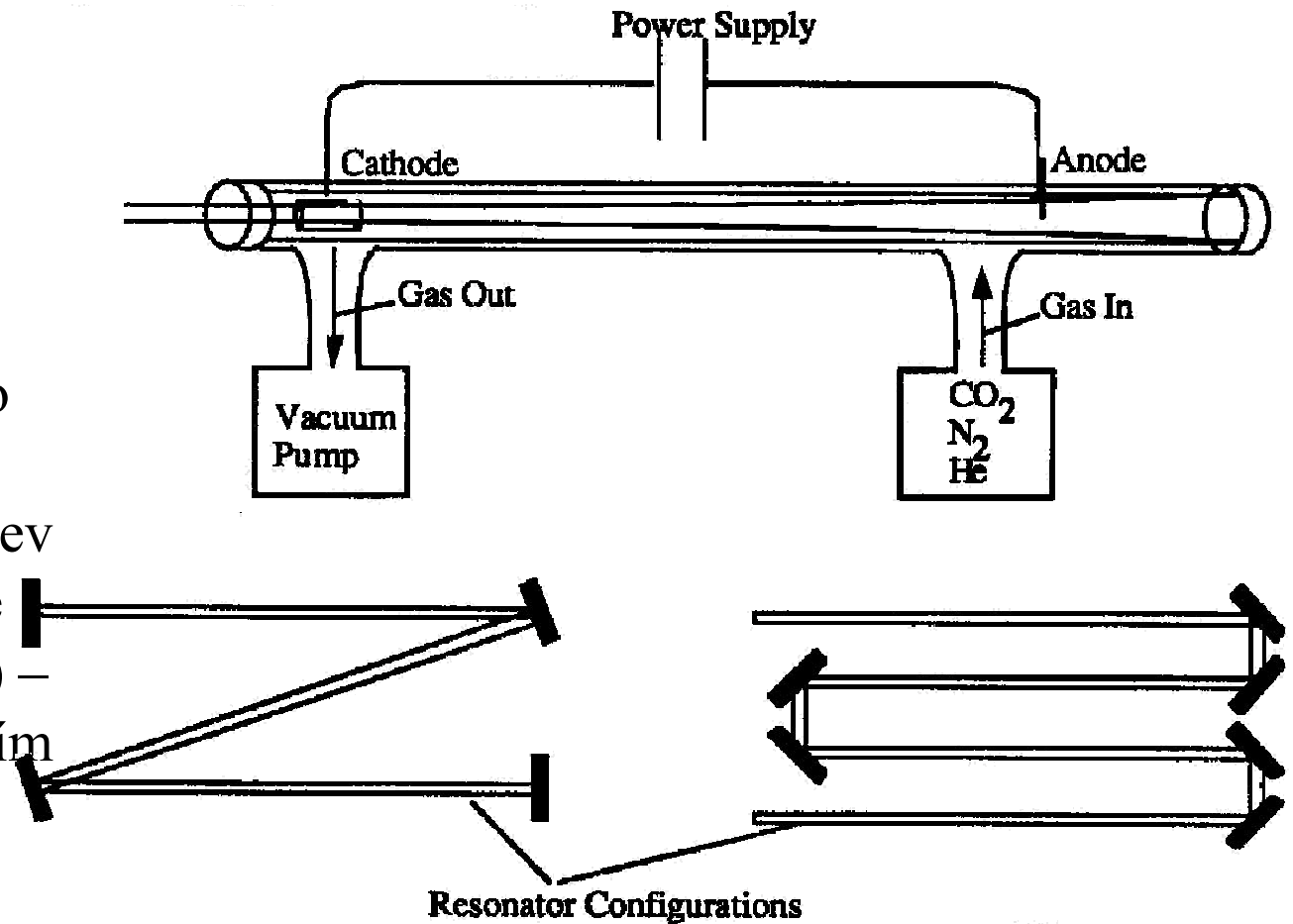
### Vibrační hladiny



## CO<sub>2</sub> lasery s pomalým prouděním (axiální)

(slow axial flow asi 1 l/s)

-tradiční nejstarší CO<sub>2</sub> laser s pomalým prouděním plynů rezonátorem. Prostřednictvím stejnosměrného nebo střídavého elektrického výboje se přivádí energie aktivnímu prostředí-ohřev směsi plynů a následná expanze tryskou do nižšího tlaku (1 kPa) – v tento okamžik se stává aktivním laser. prostředím.



Výboj má směr shodný s osou rezonátoru i svazku vystupujícího záření.

Výkon cca 50 W na jeden metr délky výbojové trubice v rezonátoru. Výstupní výkon na metr délky rezonátoru je limitován možností chlazení.

Dosahuje se stabilní výstupní výkon a dobrá modová charakteristika svazku záření, což je příčinou hladkých a jakostních řezů. Využívají se asi do 1000 W výstupního výkonu. Provoz je pulsní i kontinuální.

## **CO<sub>2</sub> lasery s rychlým prouděním (axiální)**

(fast axial flow asi 300 l/s)

Aktivní plyn proudí dutinou laseru vysokou rychlostí. Potřebné chlazení plynu a jeho regenerace jsou zajišťovány mimo dutinu rezonátoru.

Tento typ laserů je kompaktní konstrukce, výkon se dosahuje 500 až 1000 W na jeden metr délky rezonátoru. Výsledná modová struktura svazku záření je obecně poměrně dobrá, často však dochází k rychlým fluktuacím modu, což může vést ke zhoršení kvality řezu. Fast axial flow lasery mohou pracovat také v pulsním provozu a to v širokých mezích, ale pomíjející fluktuace mohou způsobit horší stabilitu pulsů.

Typický výkon laserů tohoto typu je v oblasti 500 až 5000 W.

Elektrické napájení těchto typů laserů je běžně typu DC (stejnoseměrné). V poslední době se objevily na trhu RF - excitované lasery, které jsou napájeny proudem vysoké frekvence v oblasti kHz AC (střídavě). Toto vede ke zvýšení stability paprsku. Dnes jsou využívány RF buzené lasery o výkonu cca 5 kW i více, jak s pulsním i kontinuálním provozem. Jsou často používány k řezání.

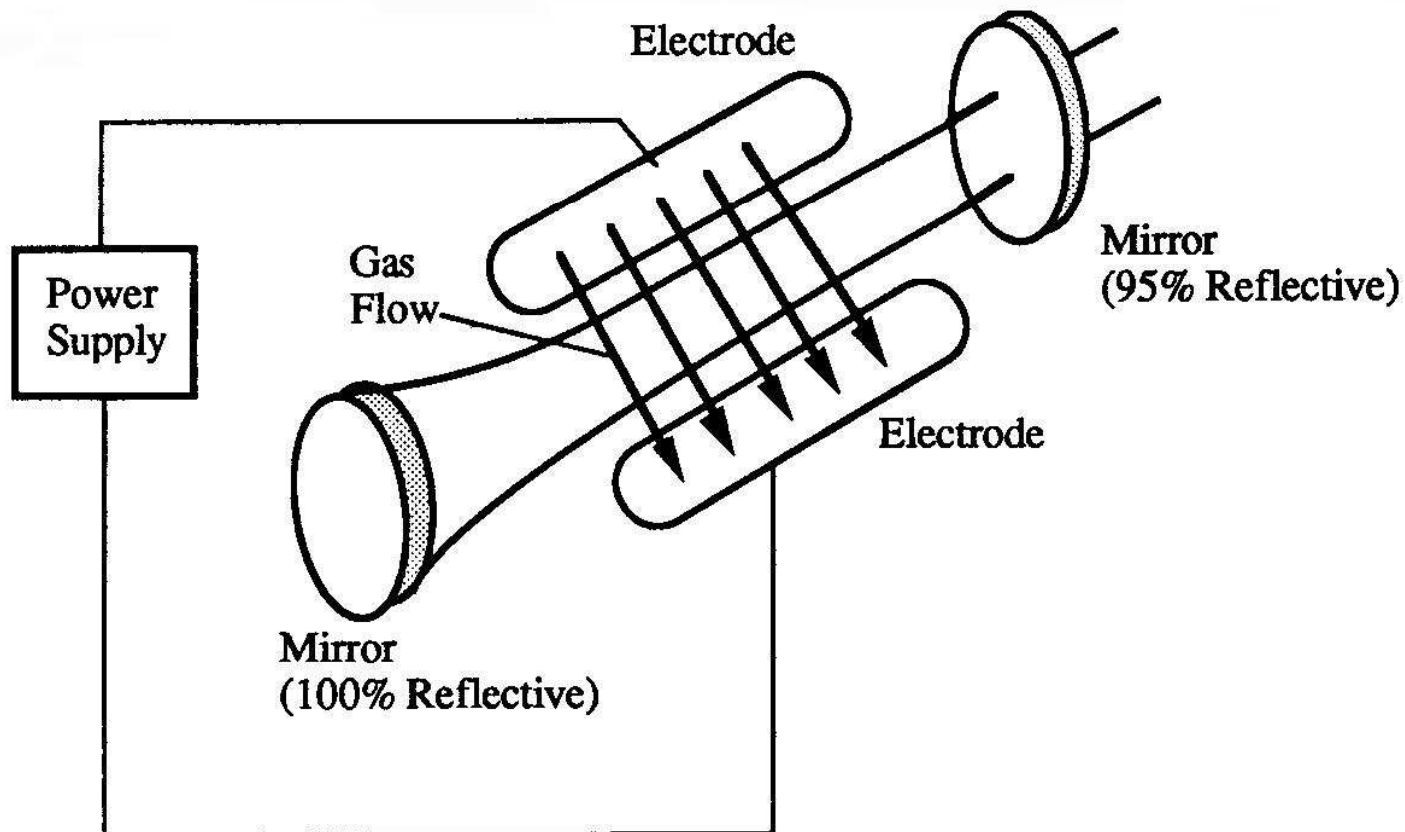
## CO<sub>2</sub>lasery s příčným prouděním

(transverse - výhodnější)

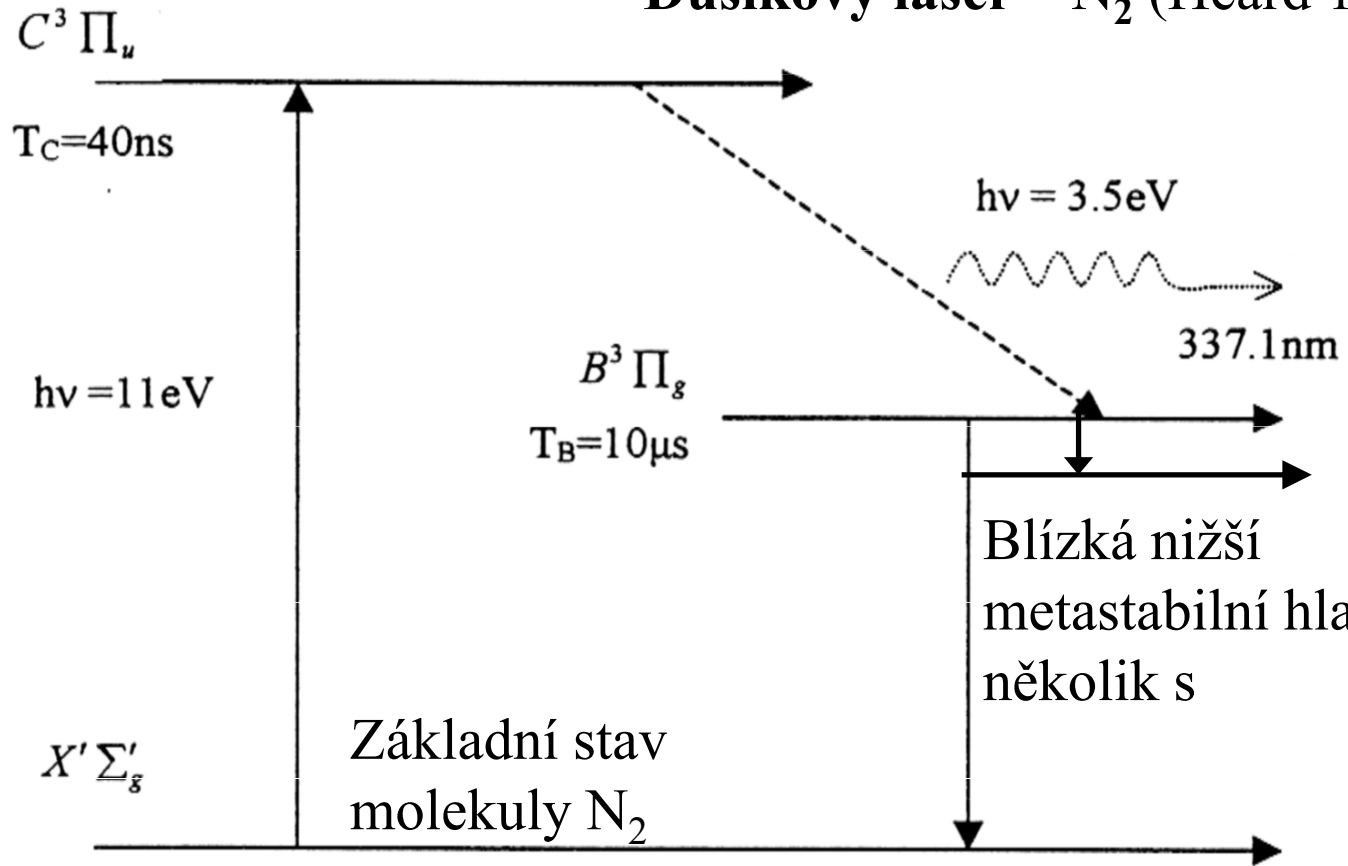
velmi kompaktní konstrukce: Laserový svazek, proudění plynu a elektrický výboj jsou ve třech různých směrech.

až 1 kW na metr rezonátoru, celkem 1-20 kW, těžko říditelný, tento typ laserů nemůže být obecně pulsován

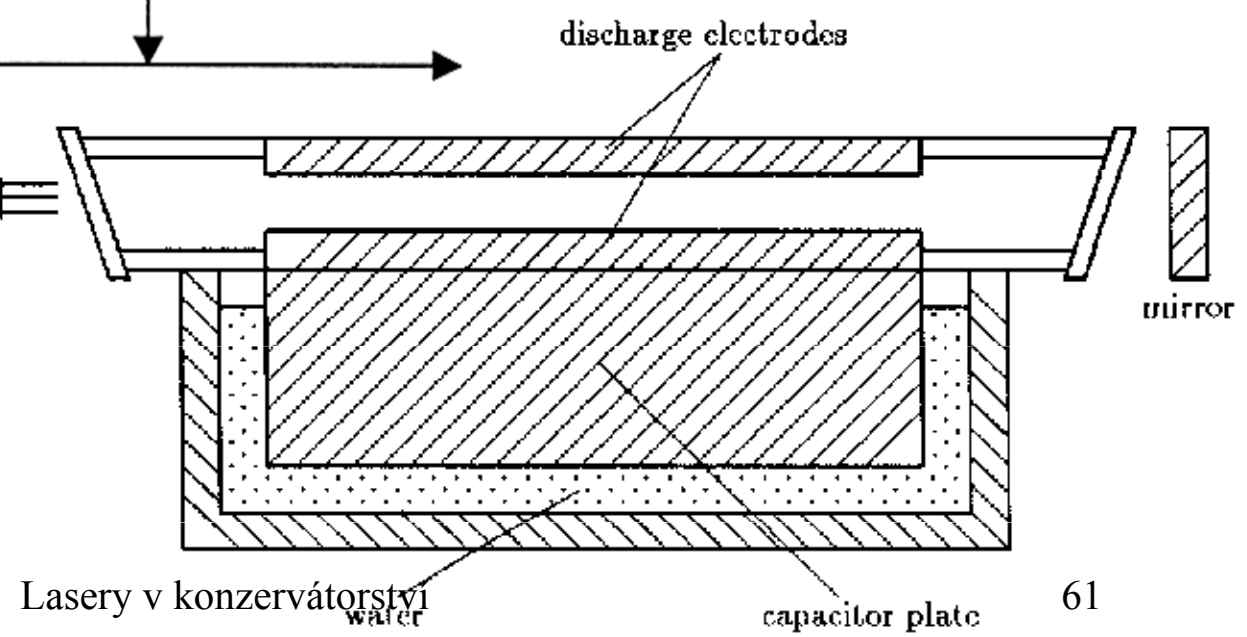
hlavně pro svařování a tepelné zpracování, jen velmi málo pro řezání  
buzen DC výbojem, výjimečně RF- mnohem lépe říditelné než při DC



# Dusíkový laser – N<sub>2</sub> (Heard 1963)



Pulzní: jednotky (3) ns,  
 obvykle <100 Hz, E pulzu  
 obvykle pod 1 mJ  
 (obvykle 40 - 370 μJ)  
 Nízká účinnost (promile),  
 široká čára (cca 0,1 nm)

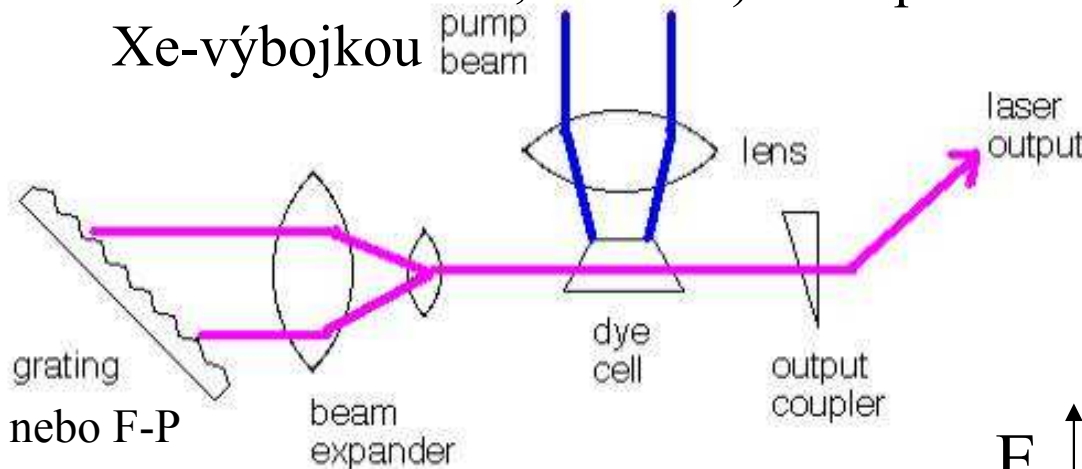


Buzení příčným  
 výbojem (5-40 kV), tlak  
 desítky torr  
 Obrovské zesílení –  
 nepotřebuje ani výstupní  
 zrcadlo rezonátoru

Lasery v konzervátorství

**Barvivový laser** – laditelný, celé viditelné spektrum, pulzní i kont., akt.  
 prostředí – kyveta s org. barvivem (rhodamin, kumarin, pyronin, tripoflavin),  
 dermatologie – ošetření lézí a fluoresc. spektroskopie novotvarů, spektroskopie

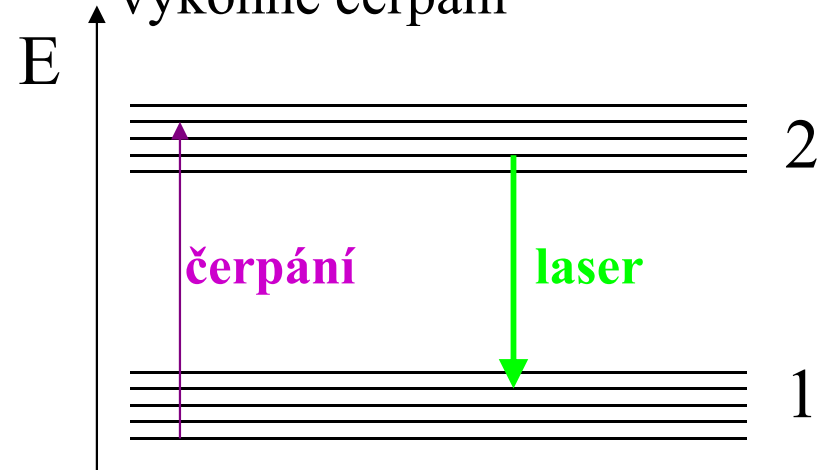
Čerpání jiným laserem, pro VIS zeleným  
 ( $N_2$  337 nm) nebo UV (frekv. ztrojený  
 Nd:YAG 335 nm, excimer) nebo pulzní  
 Xe-výbojkou



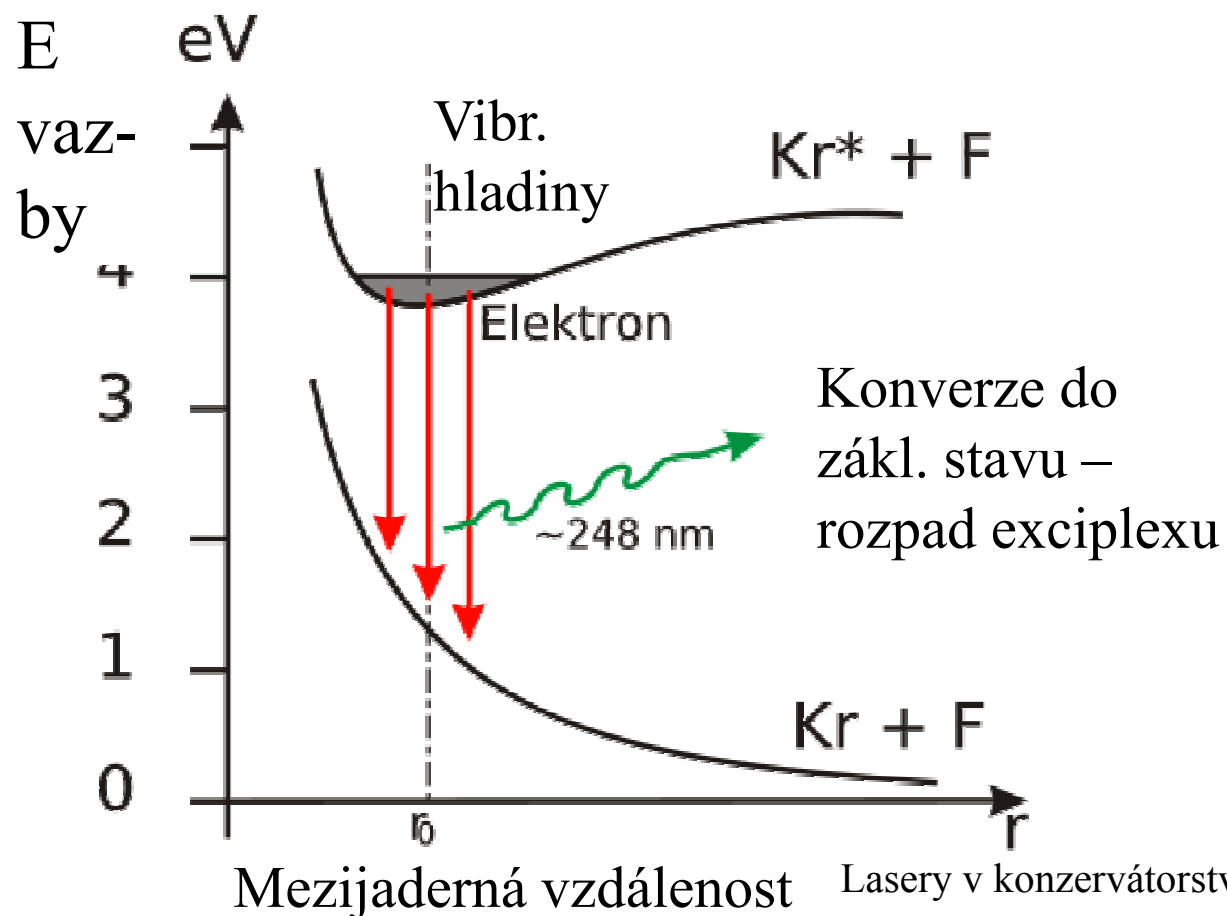
Mřížka nebo F-P  
 interferometr:  
 Ladění – výběr  $\lambda$   
 desítky nm

Rhodamin 6G až  
 75% účinnost  
 konverze, běžně ve  
 VIS 20 %, při  
 buzení výbojkou  
 asi 10 %

Široké pásy hladin barviva,  
 krátká doba života hladin 2 =>  
 výkonné čerpání

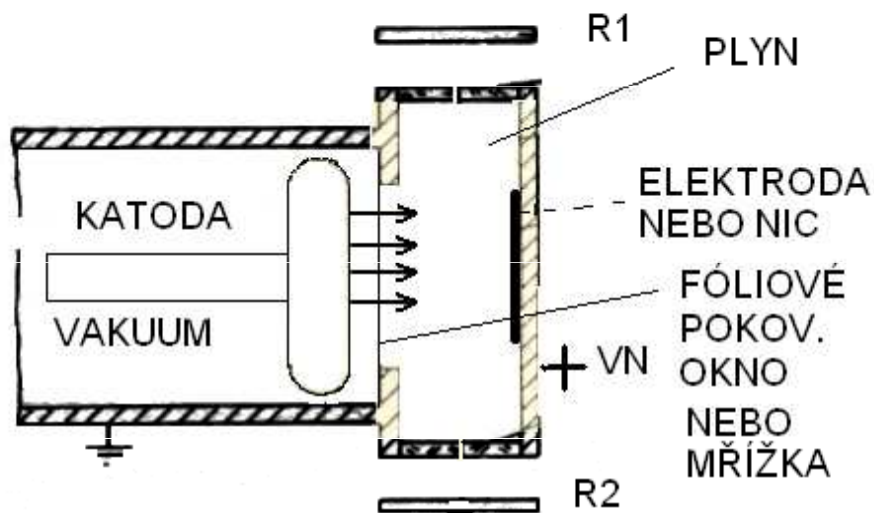


**Excimerové lasery:** 1970 Nikolaj Basov, pouze pulzní 4-40 ns, energie do asi 0,3 J, opak. frekvence až kHz, jako plynové lasery, ale vyšší tlak (nad 200 Pa), nutné intenzivní čerpání el. výbojem v akt. prostředí nebo elektronovým svazkem ( $10^2 \text{ A cm}^{-2}$ ), hladiny vytvořené v excitovaných 2-atomových komplexech (exciplexech) - dimerech – hlavně molekuly s aspoň 1 atomem vzácného plynu existující jen v exc. stavu

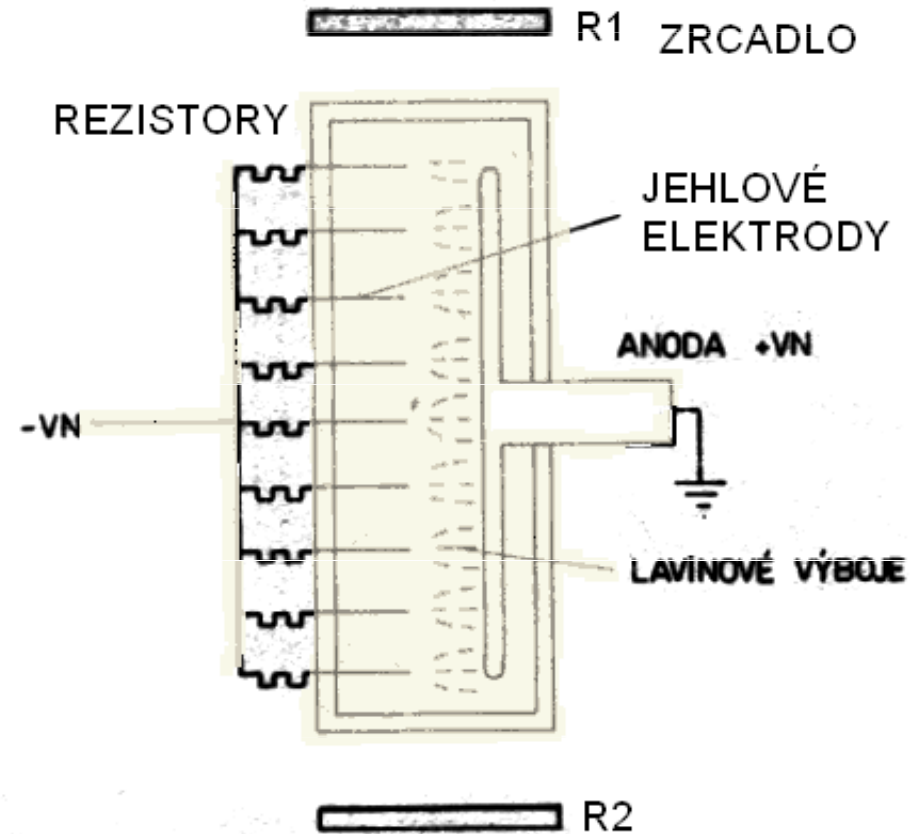


Excimer	$\lambda$ [nm]
$\text{Ar}_2^*$	126
$\text{Kr}_2^*$	146
$\text{Xe}_2^*$	172, 175
ArF	193
KrF	248
XeBr	282
XeCl	308
XeF	351
$\text{CaF}_2$	193
KrCl	222

Bud' elektrony pronikají přes tenkou kov. fólii a budí plyn pod vyšším tlakem nebo přes kovovou urychlující mřížku na anodu – excitují nárazem atomy plynu



## Buzení jiskrovými výboji



Kvalitní profil paprsku, výborné obrábění, oftalmologie, LA-ICP-MS, nestabilní náplň (difuze apod...), nákladná optika pod 200 nm (absorpce)

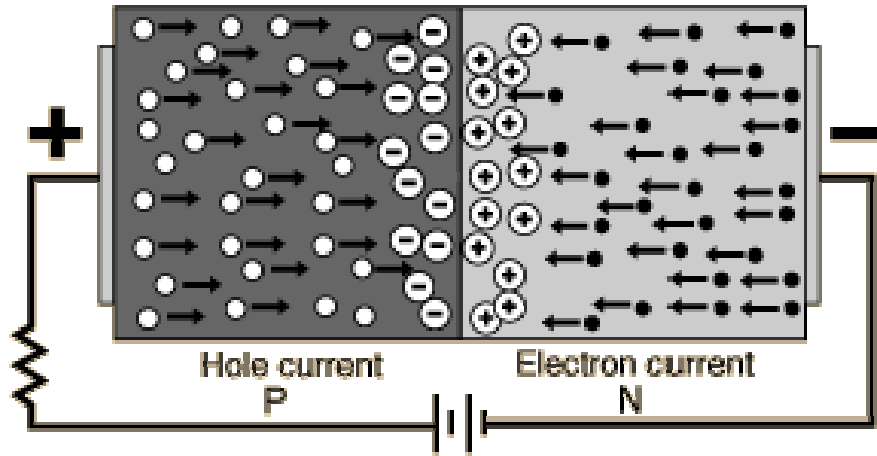
Účinnost 0,06-přes 1 %



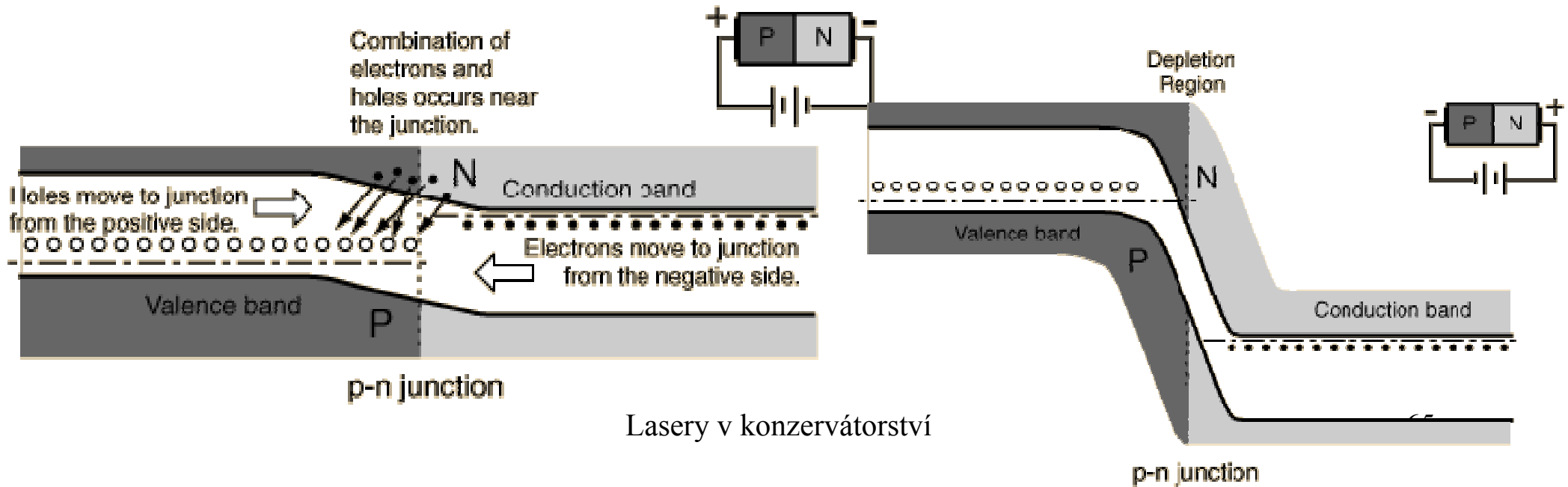
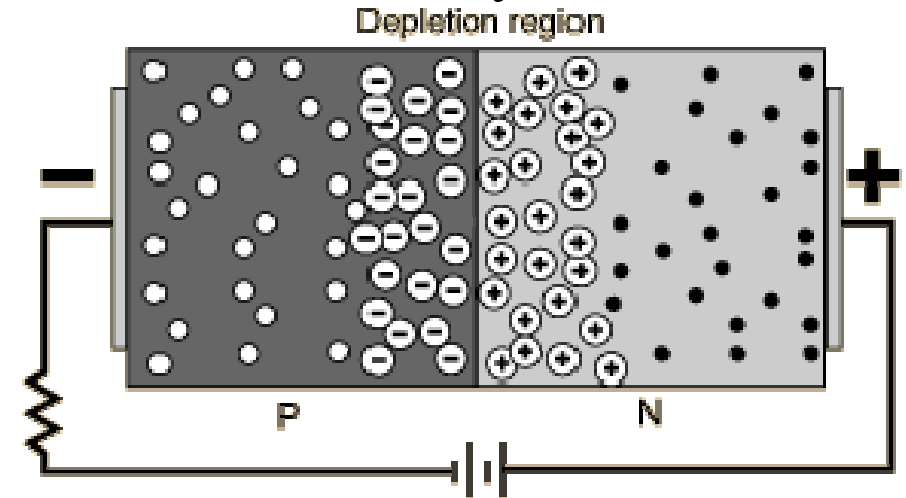
# Polovodičové lasery

Schéma polovodičového přechodu

propustný směr

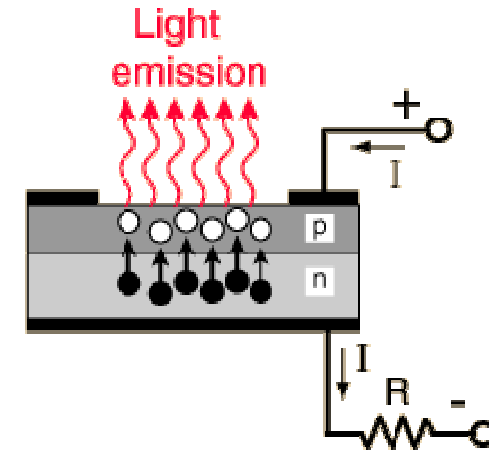
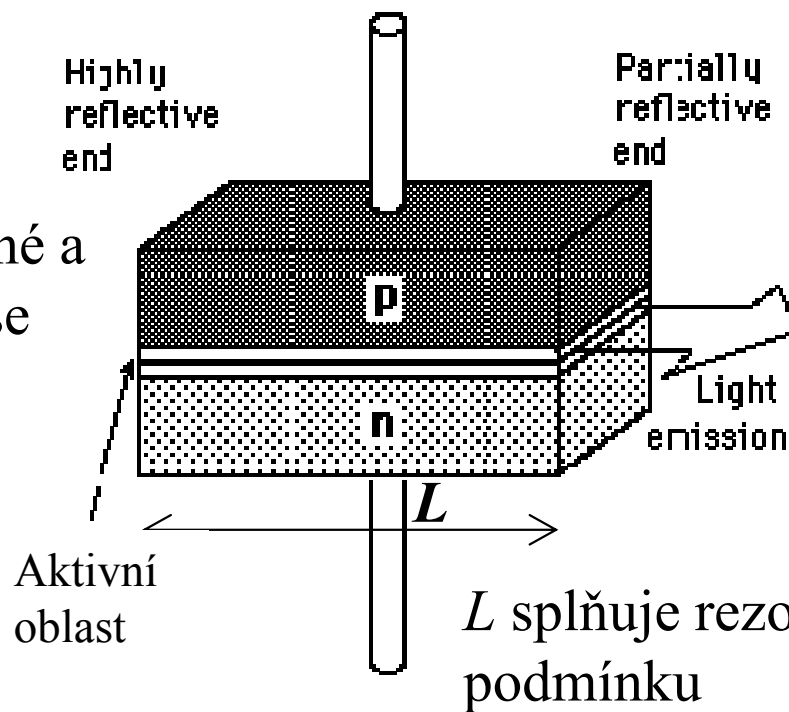


závěrný směr

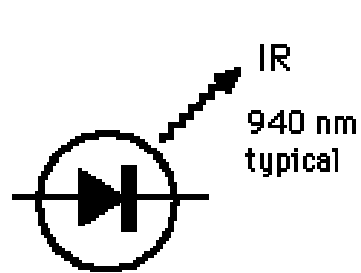


Lasery v konzervátorství

Přesně obrobene a  
hladké konce se  
zrcátky

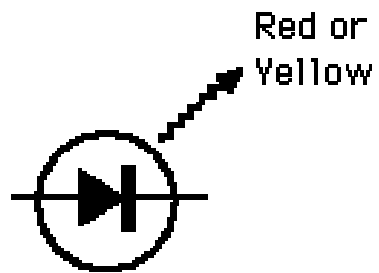


Nosiče injektované přes přechod PN mohou rekombinovat zářivě nebo nez. Rekombinační záření může interagovat s valenčními elektrony a být jimi pohlceno nebo s elektrony vodivostního pásu a indukovat vyzáření identického fotonu. Je-li koncentrace injektovaných nosičů dostatečně velká, úroveň indukovaného záření může převýšit absorpci => inverze a zesílení, laser – od hodnoty proudu zvané **prahový proud**, je-li nižší, svítí jako LED. Spodní hladiny vodivost. pásu mají delší dobu života než horní – elektron shozený z ní fotonem do valenčního pásu je okamžitě nahrazen pádem jiného el. z vyšší vodivostní hladiny – udržování inverzní populace.

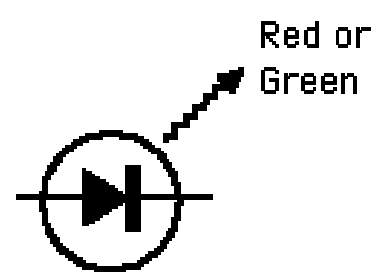


Gallium Arsenide  
GaAs

Threshold 1.3volts



Gallium Arsenide Phosphide  
GaAsP



Gallium Phosphide  
GaP

630-650 nm



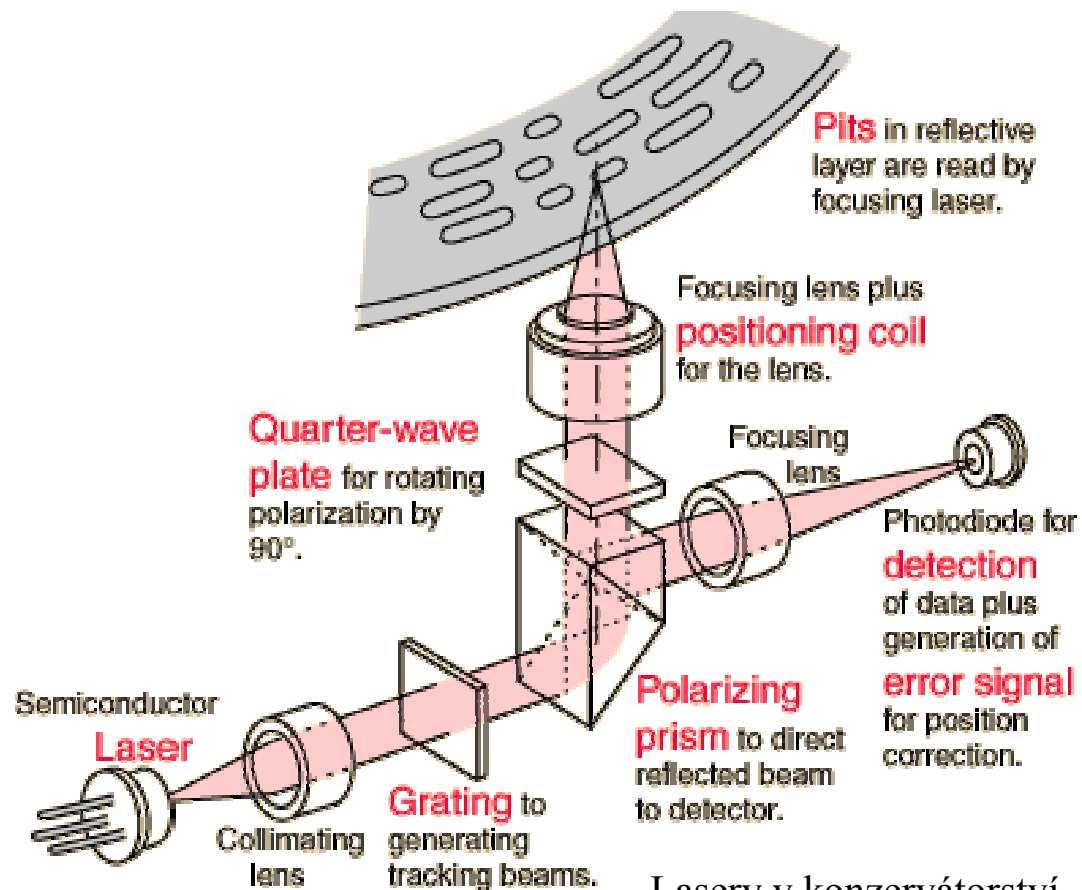
Sanyo: 405 nm,  
až 85 mW



Velká rozbíhavost svazku, široké čáry, levné

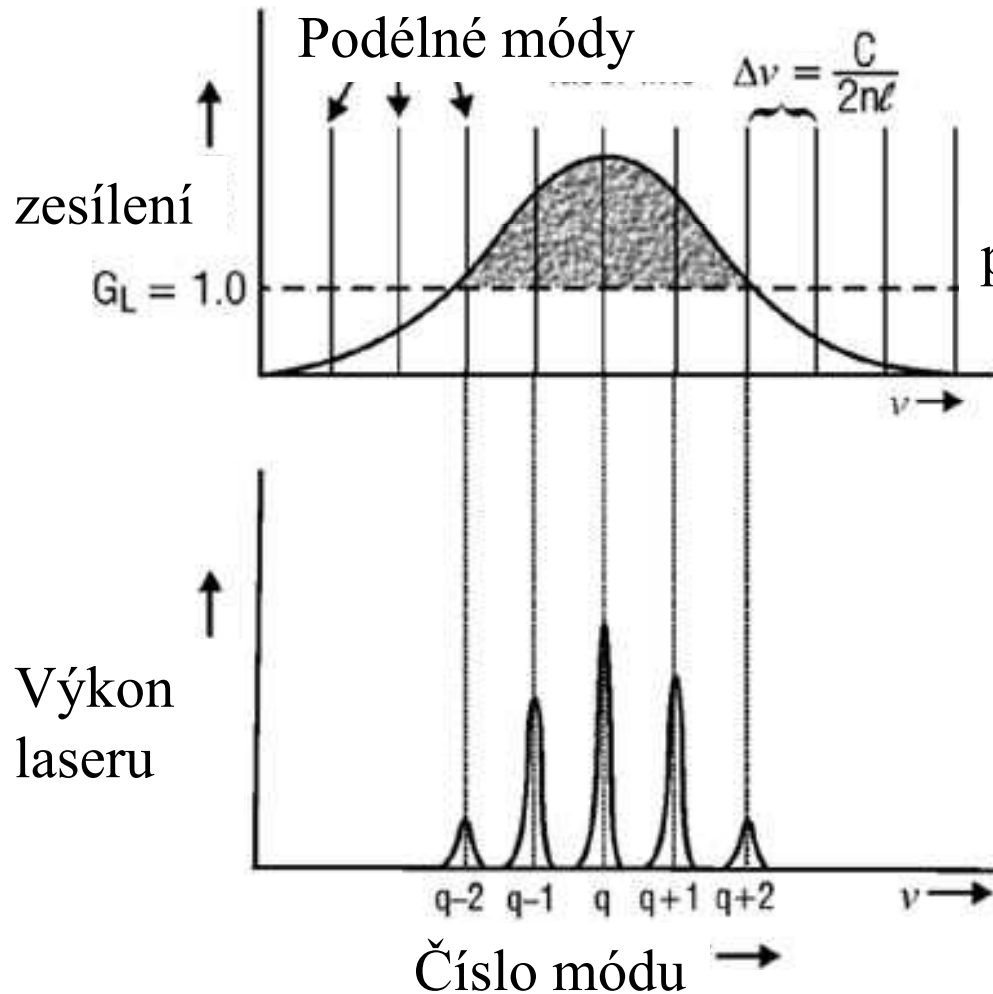
Typ	výkon	$\lambda$	Použití
GaAs	5 mW	840 nm	CD přehrávače
AlGaAs	50 mW	760 nm	tiskárny
GaInAsP	20 mW	1300 nm	optická vlákna

Př.: Philips CQL10 laser 790 nm ve vzduchu. Hloubka výpalu = asi  $\frac{1}{4} \lambda$



## Rezonátor, šířka čáry, podélné módy

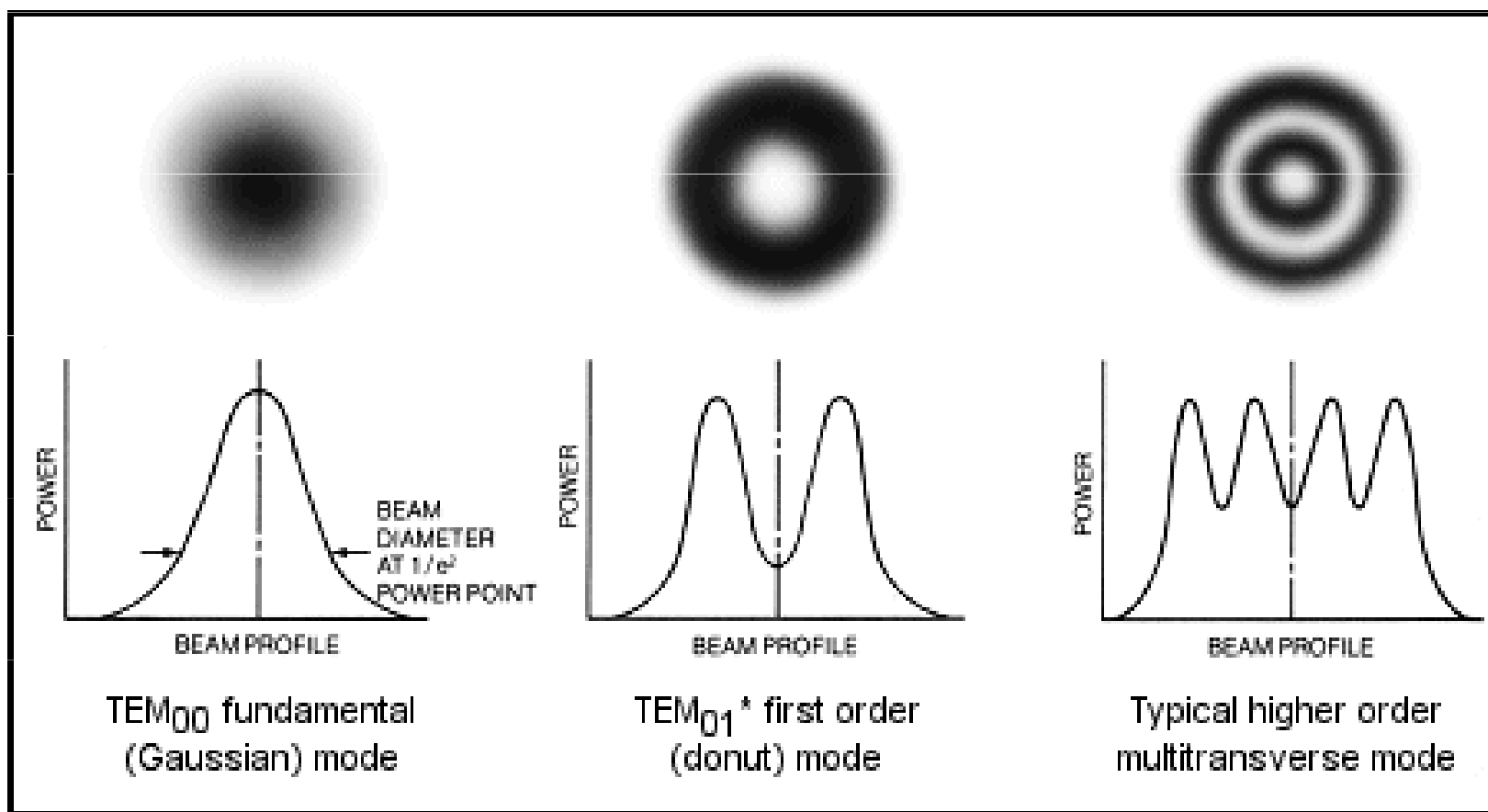
Délka rezonátoru  $L =$  několik set tisíc  $\lambda$ , zesilují se jen násobky půlvlnné délky  $\Rightarrow$  extrémně úzké čáry ( $10^{-4-5}$  nm) – téměř jen přirozená šířka



## Rezonátor, příčné módy

Transversálně elektromagnetické ( $TEM_{pqr}$ )...indexy p, q – počet minim v příčných směrech, r...počet podélných minim – velmi vysoký

Z teorie elmag. pole plyne pro válcový rezonátor, že energeticky nejvýhodnější je  $TEM_{00}$ . Je-li profil jiný, něco nebývá v pořádku.



**Interakce s materiálem** – nutná velká plošná hustota výkonu, běžně u kont. laserů „rozumné velikosti“ nedosažitelná

## **Proto generování pulzů**

Q-switch: režim modulované kvality rezonátoru

Jakost (kvalita) rezonátoru

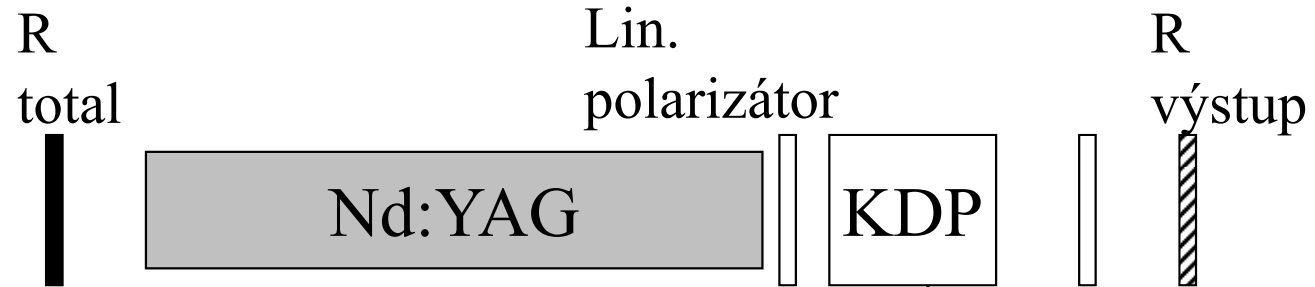
*$Q = \text{výkon obsažený v rezonátoru} / \text{výkon přeměněný na teplo}$*

U laserů více než  $10^8$ , běžně  $10^9$ , přímo ovlivňuje šířku zesilované čáry  $\Delta f = f/Q \Rightarrow$  velmi tenké čáry  $\approx$  desetiny MHz u plynových, u polovod. široké  $\approx 0.1$  nm (10 GHz) a více

Ztráty jsou:           nerovnoběžností, nerovností, absorpcí, difrakcí na okrajích zrcadel, absorpcí v rezonátoru

Toho lze využít pro generaci pulzů s mnohem větším výkonem než v kont. režimu.

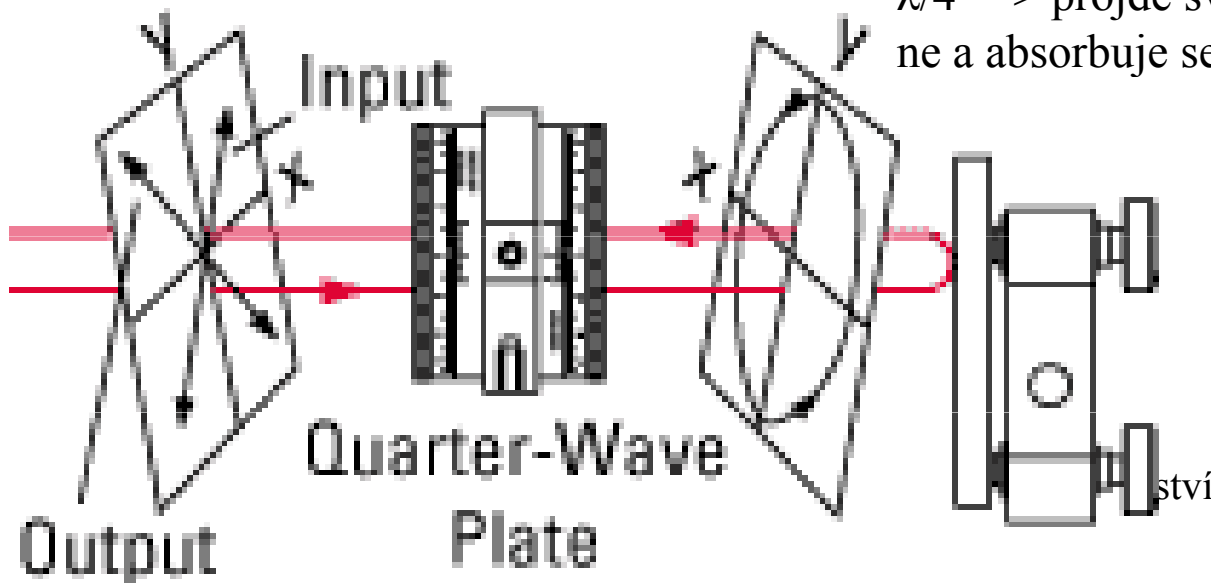
**Aktivní Q-spínání:** Po dobu čerpání výbojkou uměle udržujeme zhoršenou Q rezonátoru – světlo jdoucí na R výstupní a zpět  $2\times$  prochází čtvrtvlnnou destičkou a pak neprojde zpět do akt. prostředí, dokud se nezapne U na celu, která jej otočí zpět. Po dobu vypnutého U není proto dostatek fotonů na stimulovanou emisi a na metastabilní hl. se hromadí elektrony. Pak se zapne U a fotony projdou zpět a „srazí“ nahromaděné el. z metastab. hladiny dolů => krátký výkonný puls



Pockelsova cela - kruhový polarizátor, opt. aktivní při zapnutí =  $U \approx \text{kV}$  nastaveno proti  $\lambda/4^\circ$  => projde světlo zpět, jinak ne a absorbuje se

$\lambda/4$

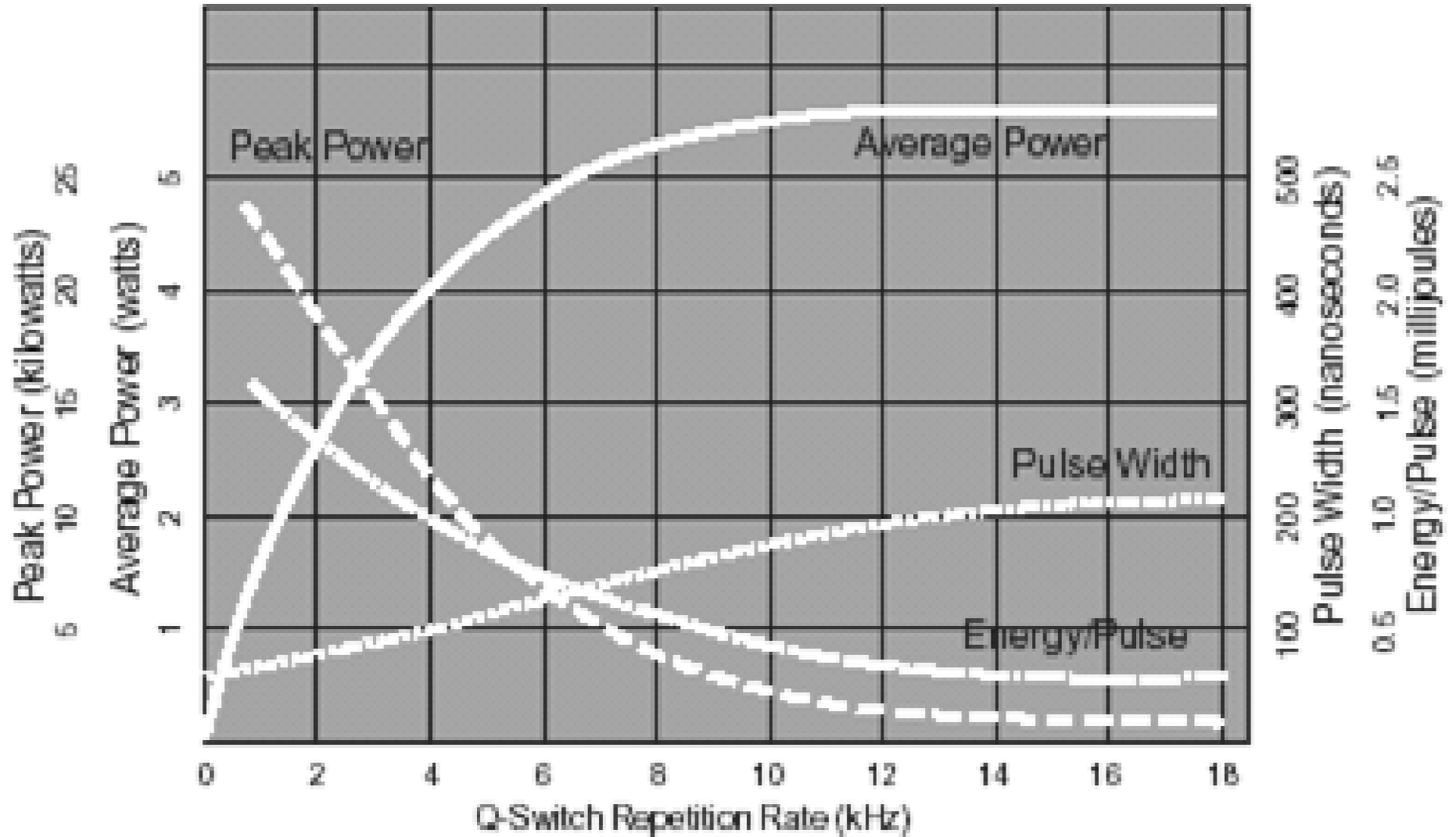
Kruhový pol. - tam a zpět - výsledně  $90^\circ$  lineárně





Velká opakovací frekvence snižuje výkon v pulzu – nestačí se populovat metastabilní hladina.

Bývá běžně 1-25 Hz pro Nd:YAG, pro N<sub>2</sub> i 100 kHz (MALDI)



Počet pulzů za 1s...opakovací frekvence

Lasery v konzervátorství

# Generace vyšších harmonických frekvencí

## Vlnové vysvětlení

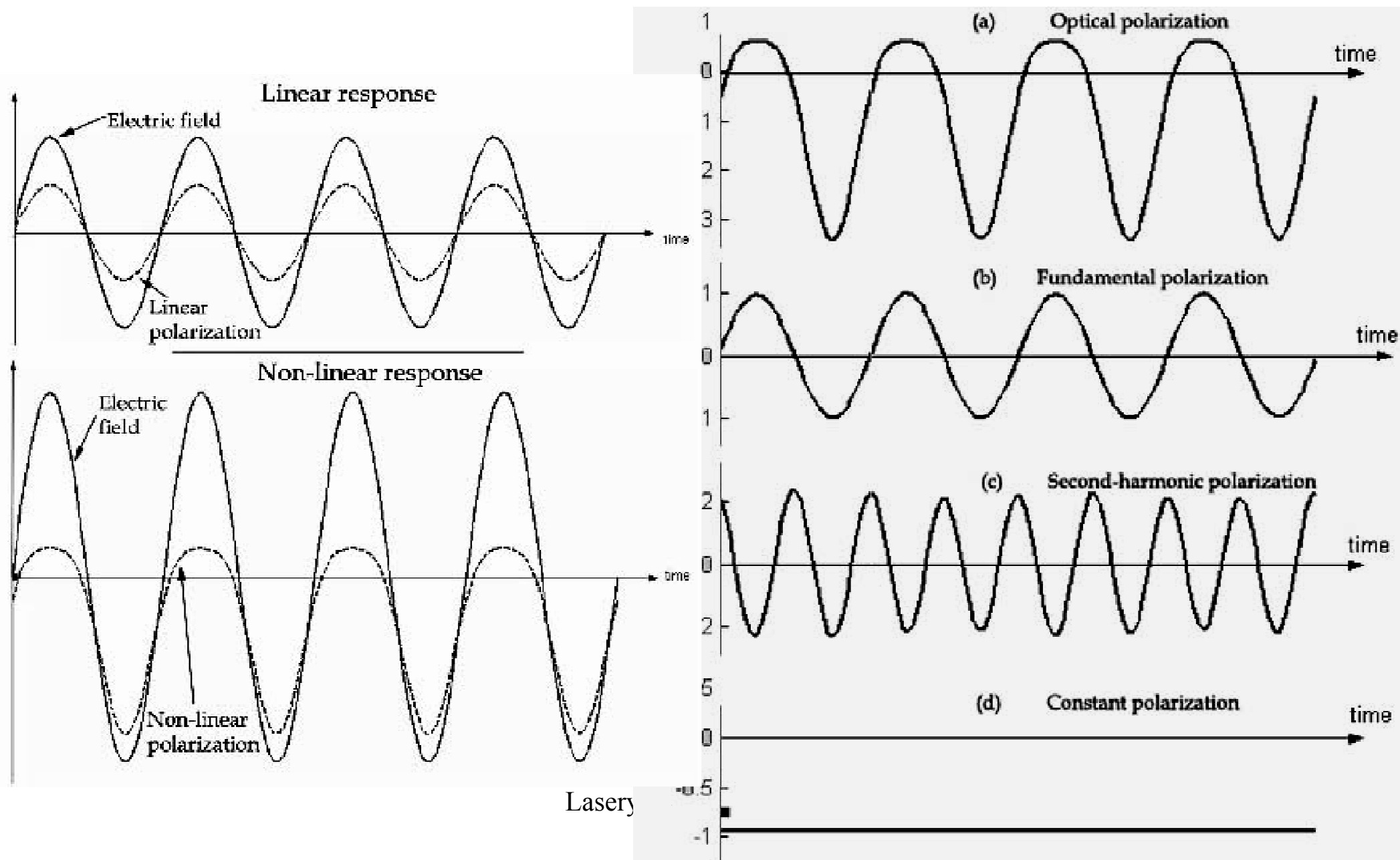
El. pole dopadající vlny pod vhodným úhlem na vhodný krystal jej polarizuje – vychýlení elektronu od iontu jako oscilátor na pružině. Je-li el. pole silné, neplatí přímá úměra mezi silou a výchylkou  $F = -kx$ , ale přibližně  $F \approx -kx^2$  a výchylka je asymetrická. Při depolarizaci se navrátí elektrony do rovnovážné polohy a přitom vyzařují ne stejnou  $\lambda$ , ale spektrum, protože kmitají anharmonicky – ne sinusoidně, ale deformovaně, spíše obdélníkově v čase. Každý takový průběh lze rozložit do Fourierovy řady složené z nekonečně mnoha sinusovek.

Výběr požadované  $\lambda$  selektivním (dichroickým) zrcadlem.



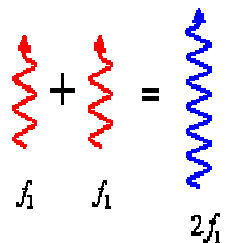
Řazení krystalů za sebou pro vyšší násobky, ale klesá účinnost. Účinnost závisí na úhlu dopadu, teplotě a intenzitě dopadající vlny

Rozklad deformovaných asymetrických kmitů (a) na základní (stejná  $f$  jako budící vlna) (b), 2. harmonickou s  $2f$  (c) a konstantní posuv (d)

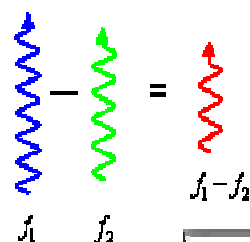


Částicové vysvětlení: Při velké intenzitě světla se mohou 2 a více fotonů spojit do jednoho o větší energii. Je možné generovat součtové i rozdílové frekvence

Second Harmonic Generation (SHG)



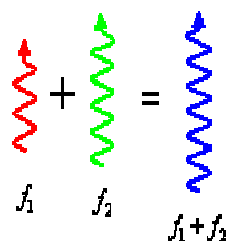
Difference Frequency Generation (DFG)



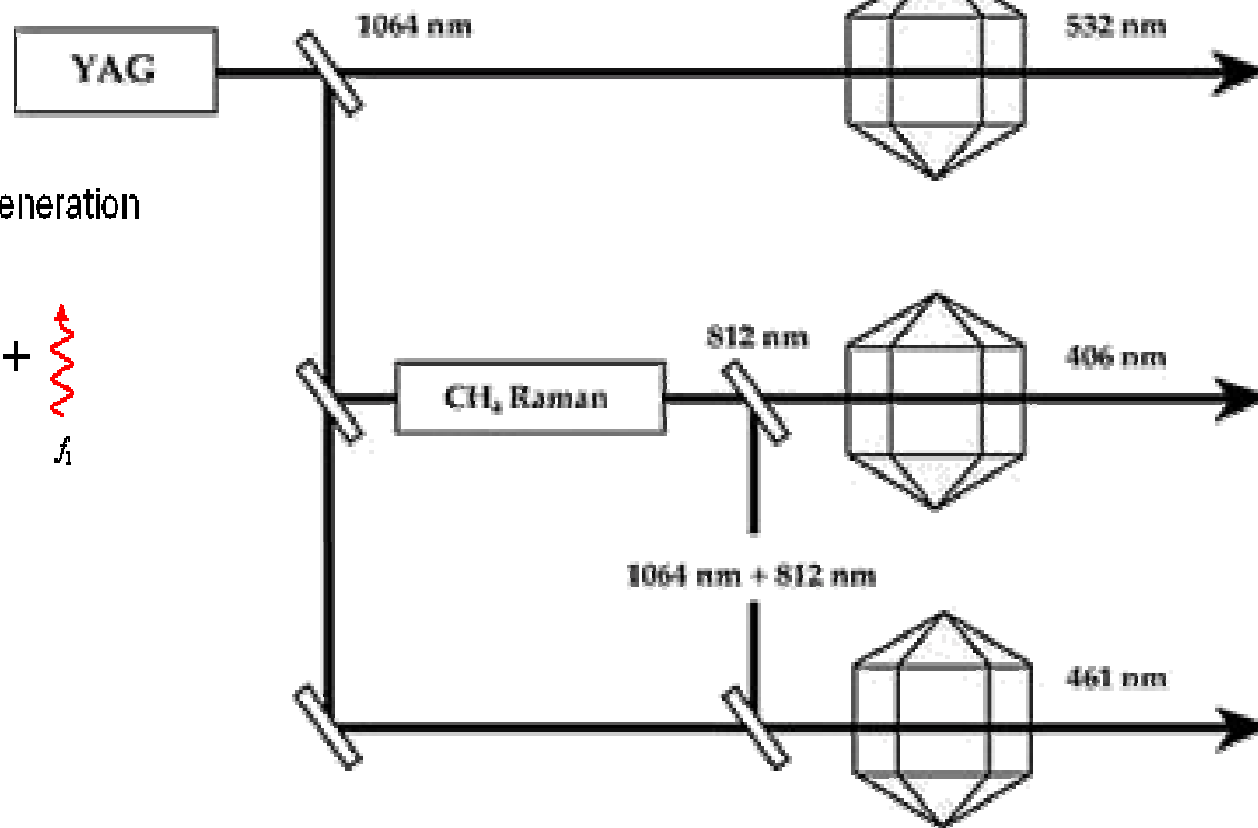
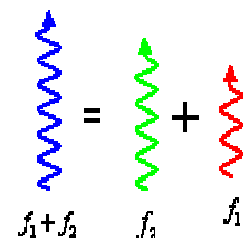
Krystaly s hexagonální symetrií

Př.

Sum Frequency Generation (SFG)



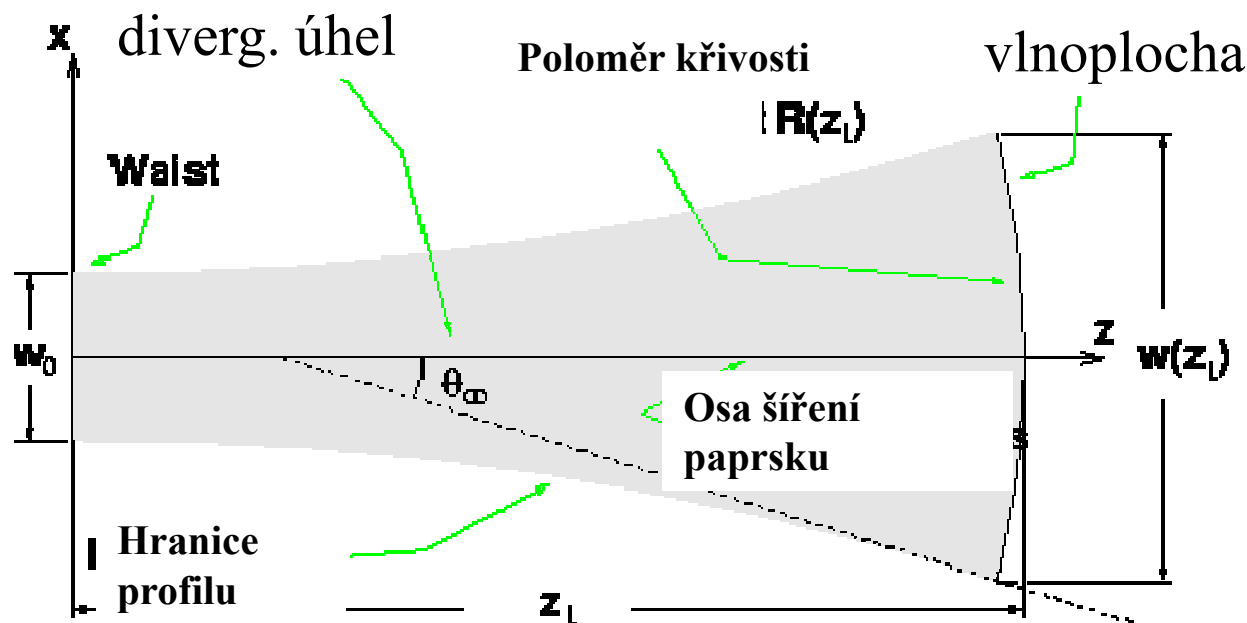
Parametric Generation



# Rozbíhavost (divergence) laserového svazku

pro ideální profil tvaru rotačního gaussoidu

$$\theta_{\infty} = \frac{\lambda}{\pi w_0}$$



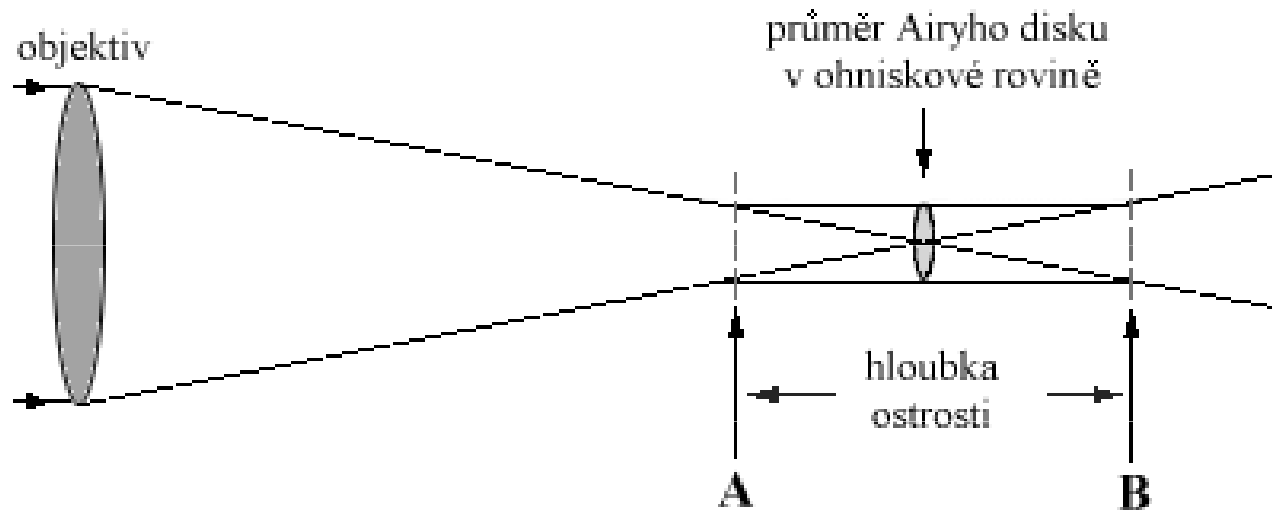
$w$ ...průměr gaussovského svazku – hranice pro pokles intenzity z centrálního maxima na  $1/e^2$ , obsahuje 86,5 % energie svazku

Průměr  $w$   
Gaussovského paprsku  
ve vzdálenosti  $z$

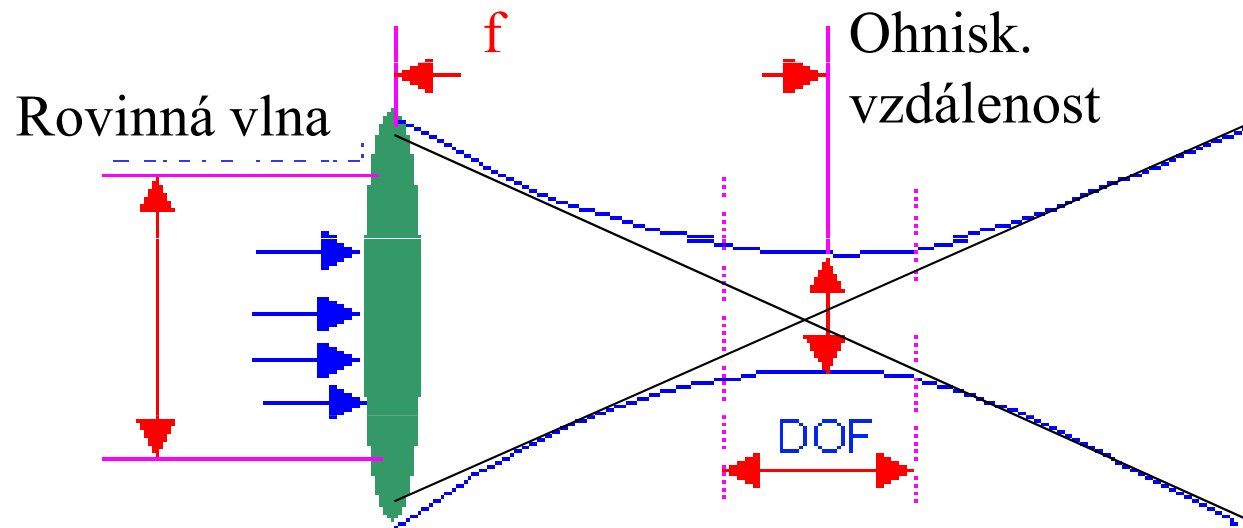
$$w^2(z) = w_0^2 \left[ 1 + \left( \frac{\lambda z}{\pi w_0^2} \right)^2 \right]$$

$$R(z) = z \left[ 1 + \left( \frac{\pi w_0^2}{\lambda z} \right)^2 \right]$$

# Zaostřování – spojná čočka



Optická mohutnost  
[D...dioptrie] =  
1/ohnisková  
vzdálenost



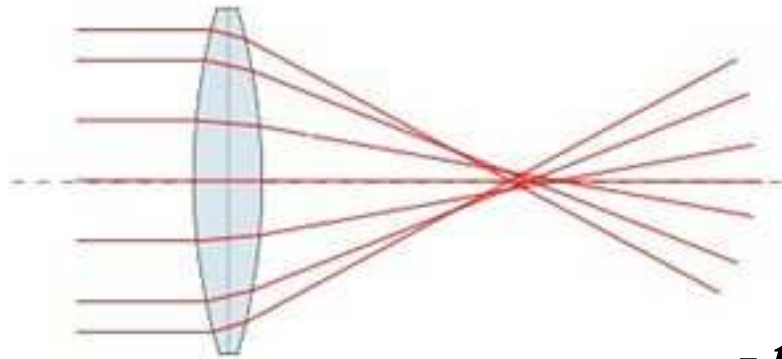
Hloubka ostrosti – Depth Of Field  $DOF = (8\lambda / \pi) (f/D)^2 = 2.44 \lambda (f/D)^2$

Pro ideální čočku je průměr kotouče ve středu  $DOF =$  průměru Airyho disku (centrální minimum Fraunhof. dif. - viz dříve).



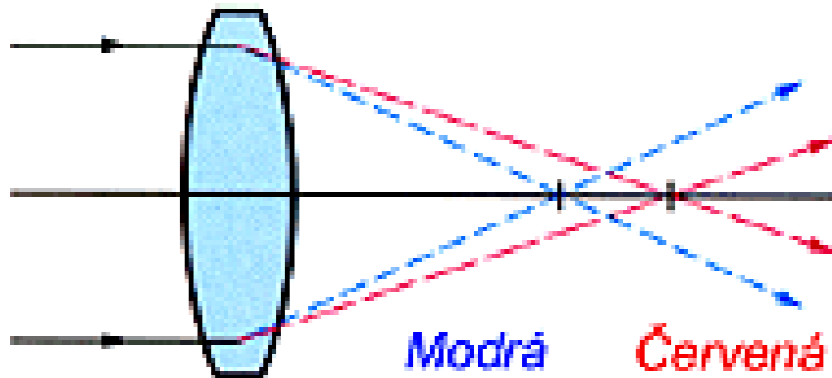
# Čočky a jejich vady, zaostřování

Běžné čočky – sférické, nemají skutečné ohnisko – mají jej jen v paraxiálním přiblížení = paprsky jdoucí blízko optické osy



**Sférická aberace**

*- také otvorová vada – roste s poměrem průměru k ohn. vzdálenosti*



**Chromatická aberace – barevná vada**

Každá vlnová délka má jiný index lomu – rozklad na barvy jako spektrometr

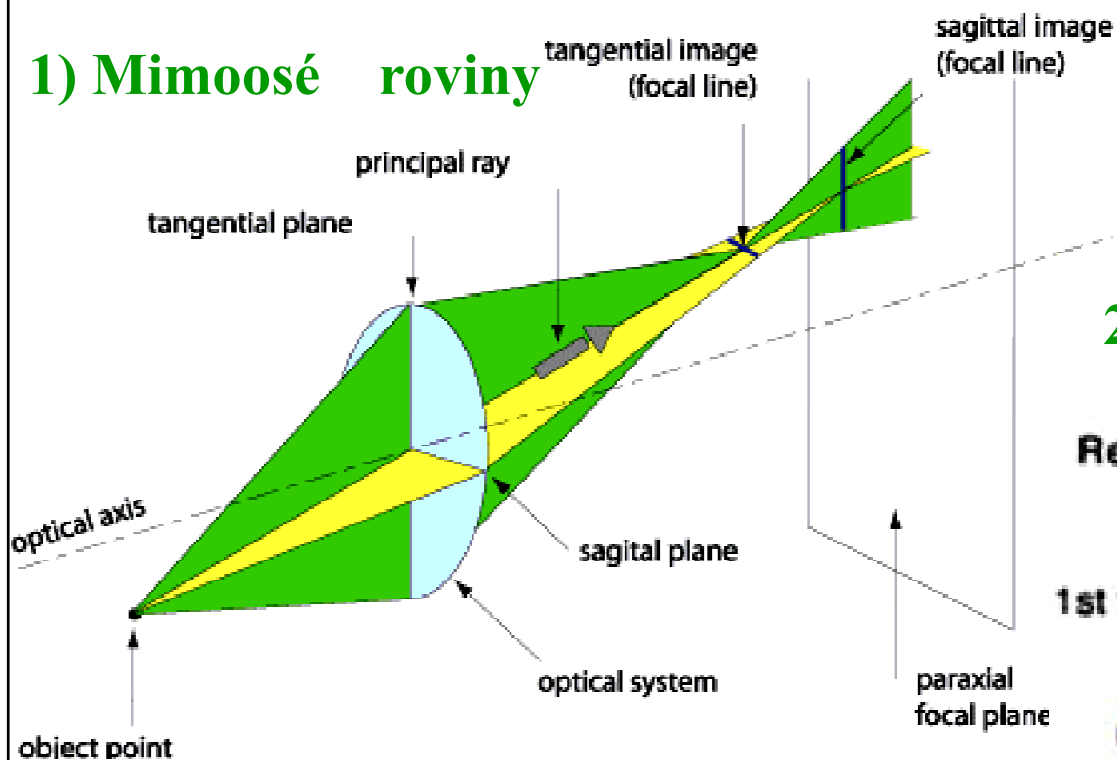




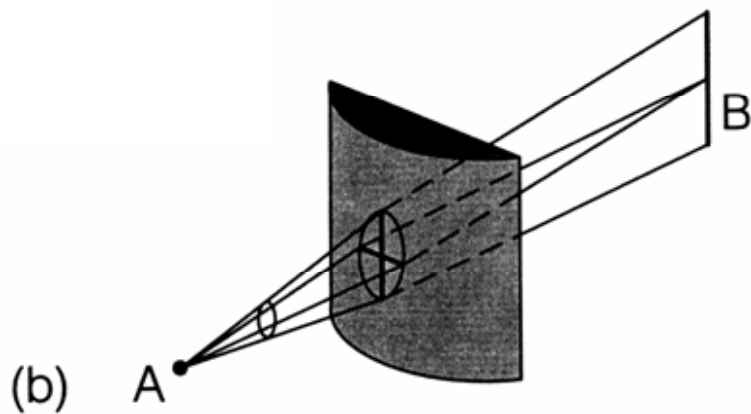
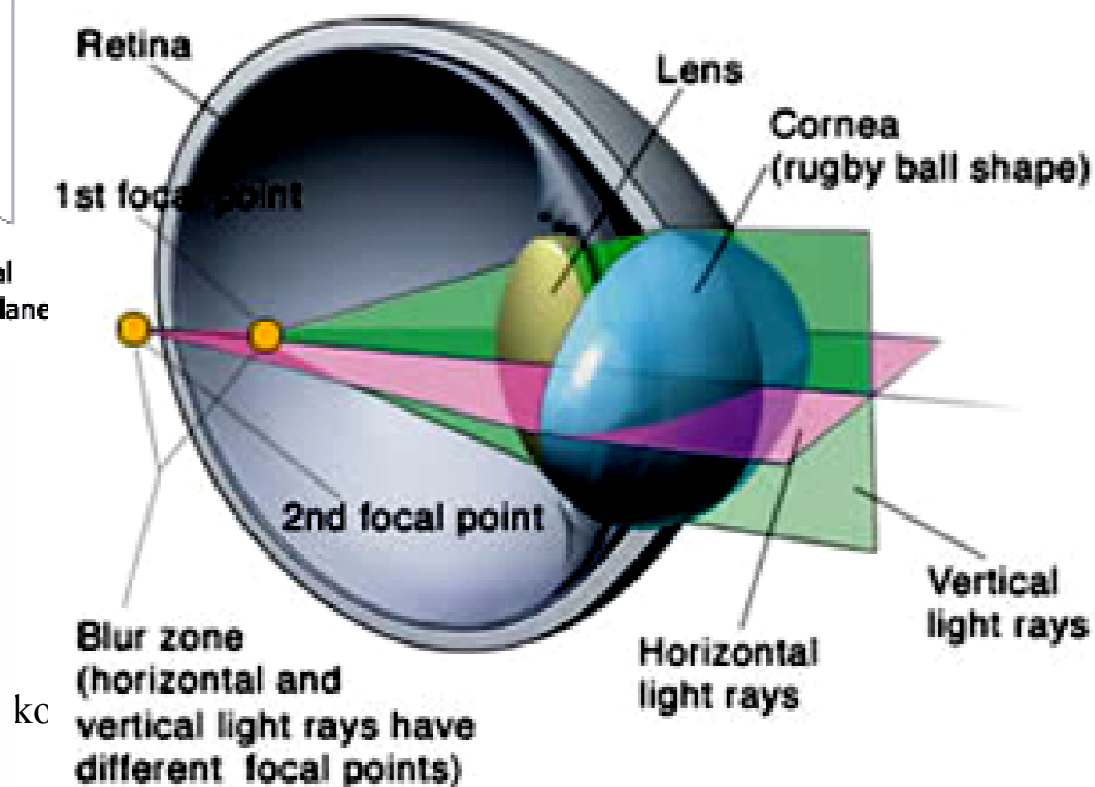
**Astigmatismus** – pro paprsky jdoucí ve dvou navz. kolmých rovinách je v každém směru jiná ohn. vzdálenost – jakoby přidána cylindrická čočka – místo 1 ohniska 2 kolmé úsečky

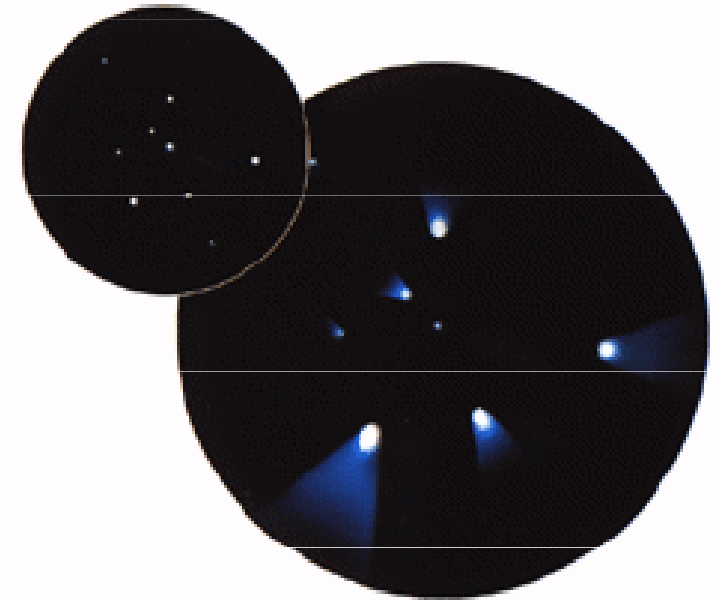
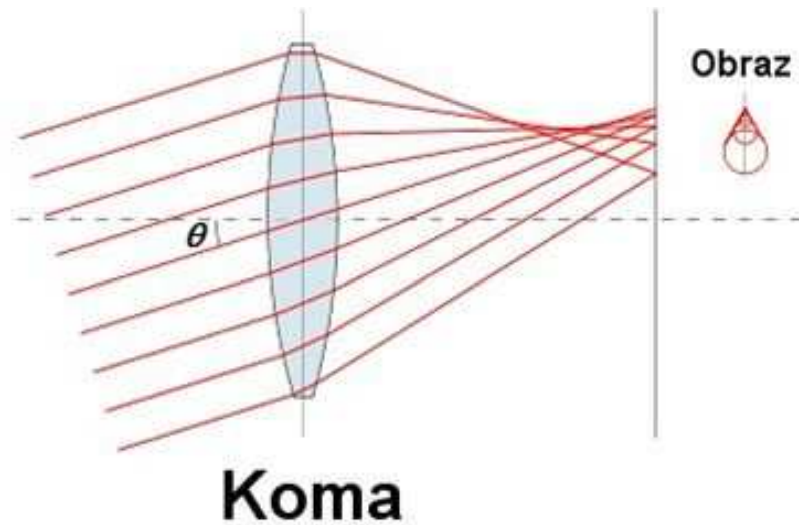


### 1) Mimoosé roviny



### 2) Souosé roviny – např. oko





Protažení a rozmazání obrazu do 1 směru pro paprsky vstupující nerovnoběžně s osou

Běžně výše uvedené efekty daleko přesahují difrakční limit uvedený dříve. Je nutné vést paprsek středem čočky optickou osou – nejmenší zkreslení. Eliminace sférické vady – asférické čočky – velmi drahé nebo omezení vhodnou kombinací tvarů více sférických čoček

Eliminace barevné vady není nutná pro laser (monochromatické záření) – vhodná kombinace spojky a rozptylky rozdílných indexů lomu

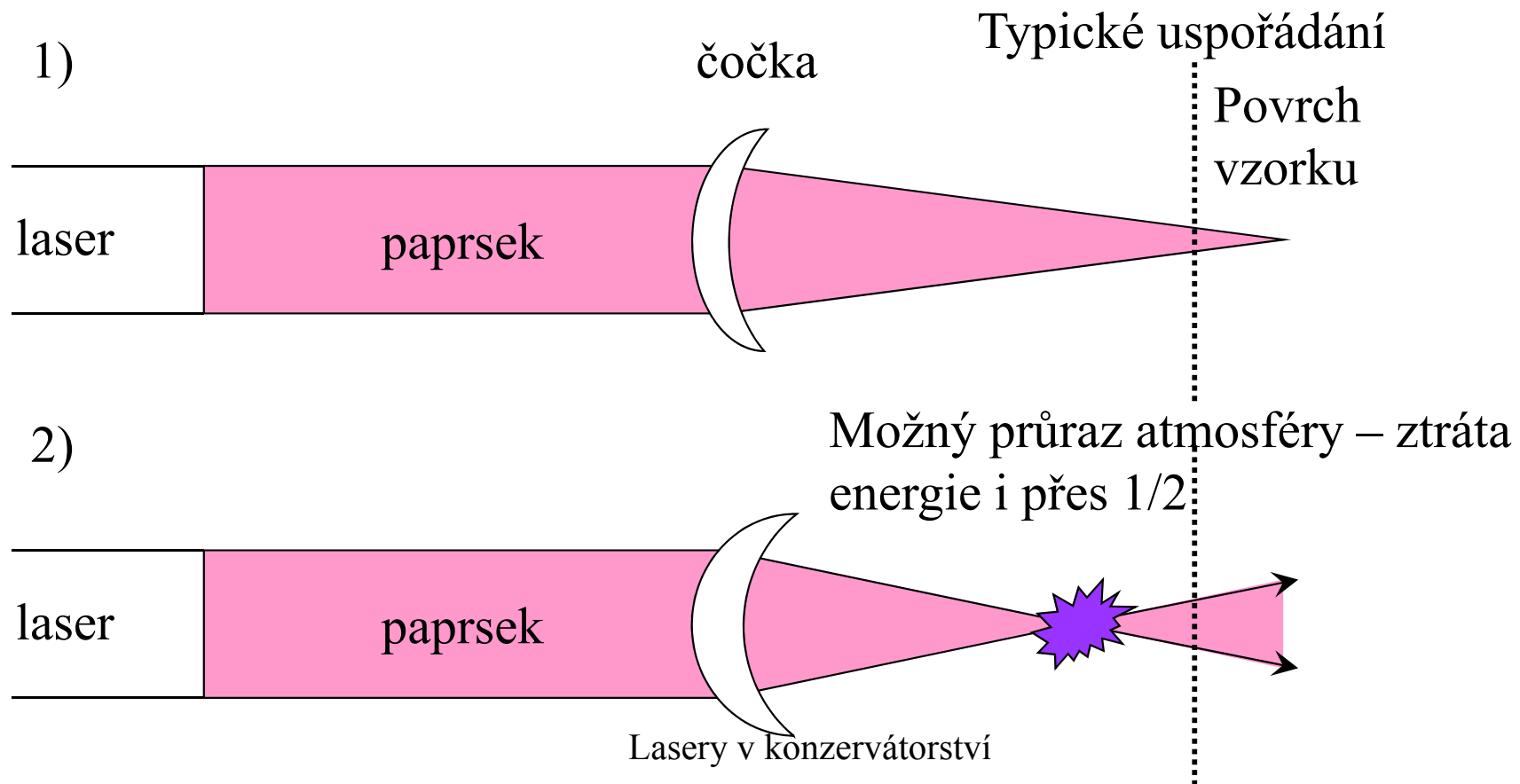
# Interakce laserového paprsku s látkou

## Absorpce, odraz v IC, UV, multifotonové procesy

Paprsek ztrácí energii již před dopadem na vzorek

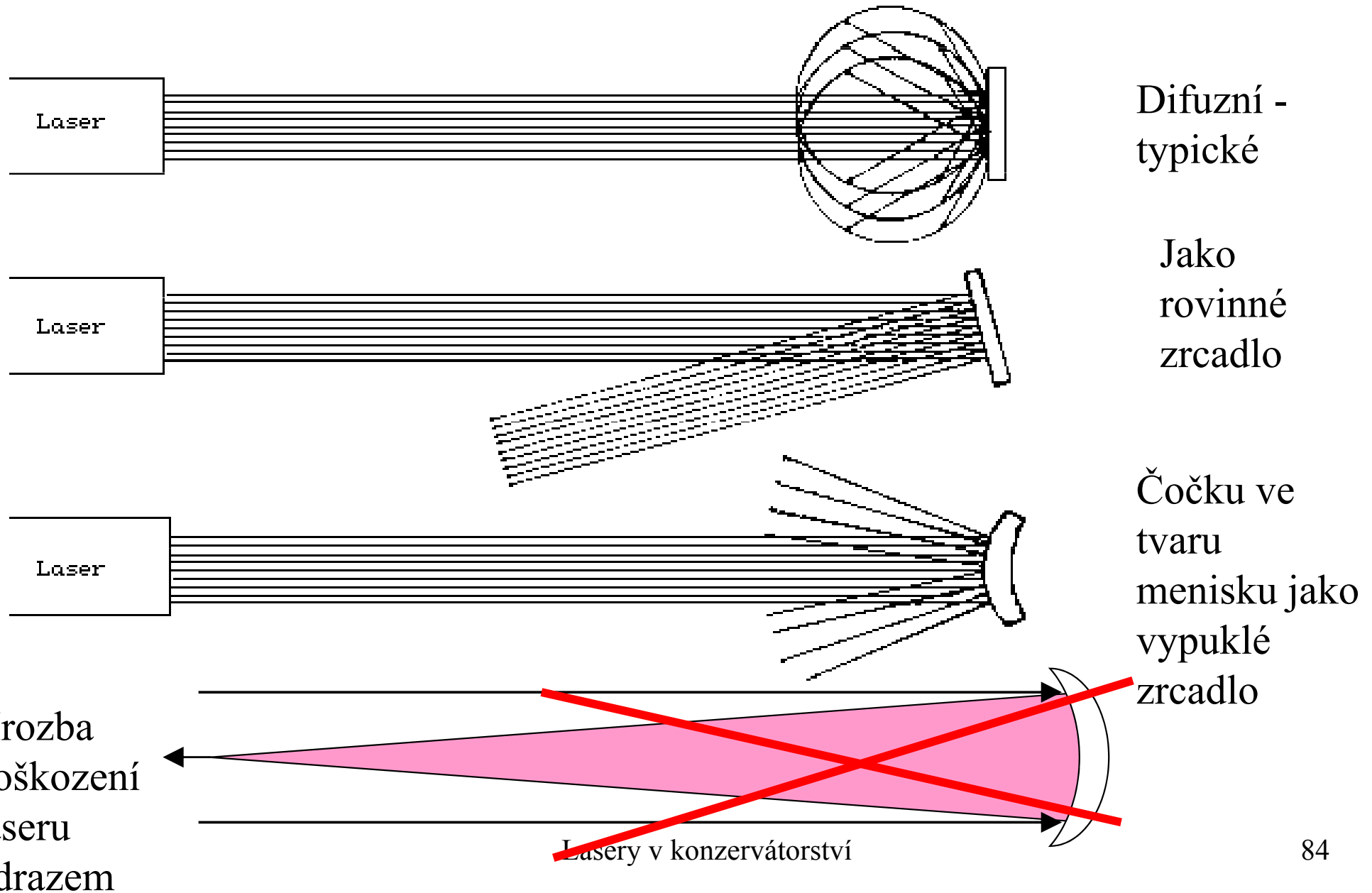
Absorpce atmosférou, rozptyly, průraz (breakdown)

Absorpce optickou soustavou – v materiálu čočky, okénku před vzorkem + odraz na každém rozhraní – jednotky %



# Odraz paprsku

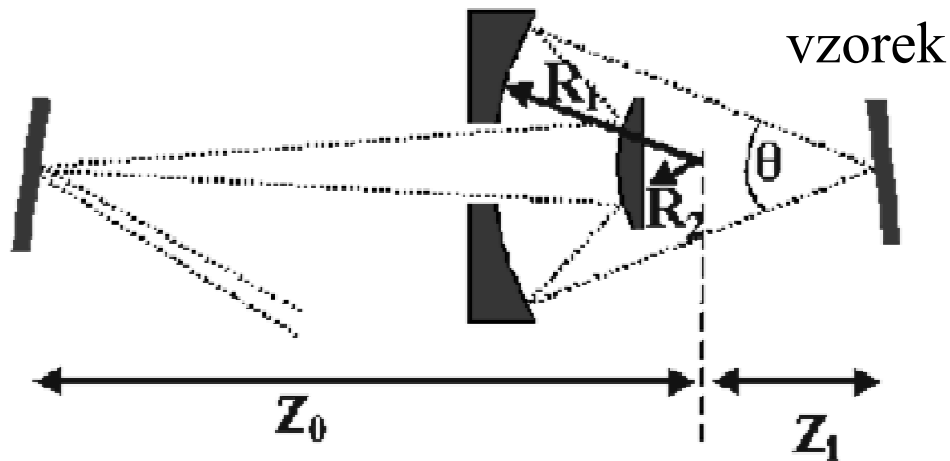
Bezpečnost práce – odrazy a rozptyl - ochranné brýle, ochrana laseru před odrazy od předmětu i od čočky



Zaostřování paprsku pomocí Schwarzschildova objektivu – kombinace vypuklého a dutého zrcadla – absence barevné vady, menší otvorová vada – parabolické zrcadlo s geometrickým ohniskem

U zrcadla větší nároky na odolnost odrazné vrstvy vůči velké hustotě výkonu

S otvorem uprostřed  
dutého zrcadla



Bez otvoru šikmo

