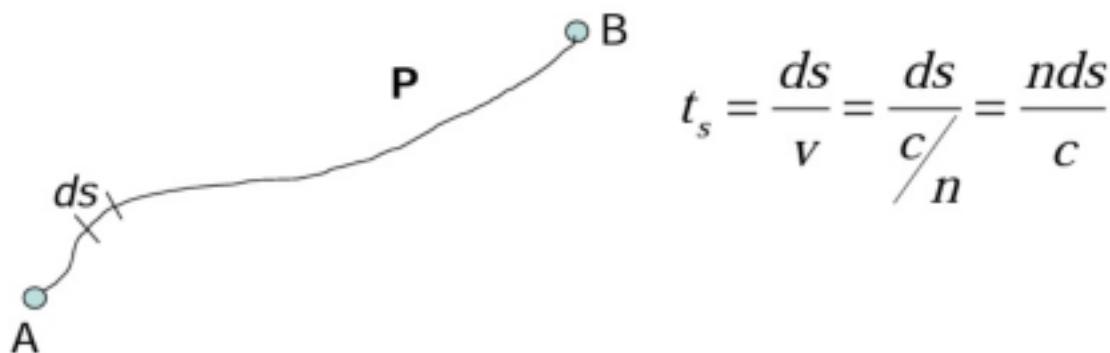


1) Fermatovo princip - vysvětlení a jeho aplikace

- nutlo se šíří po zakouhé dráze, aby unesilo vzdálenost za co nejkratší čas

$n(x, y, z)$ - index lomu materiálu $v = \frac{c}{n}$

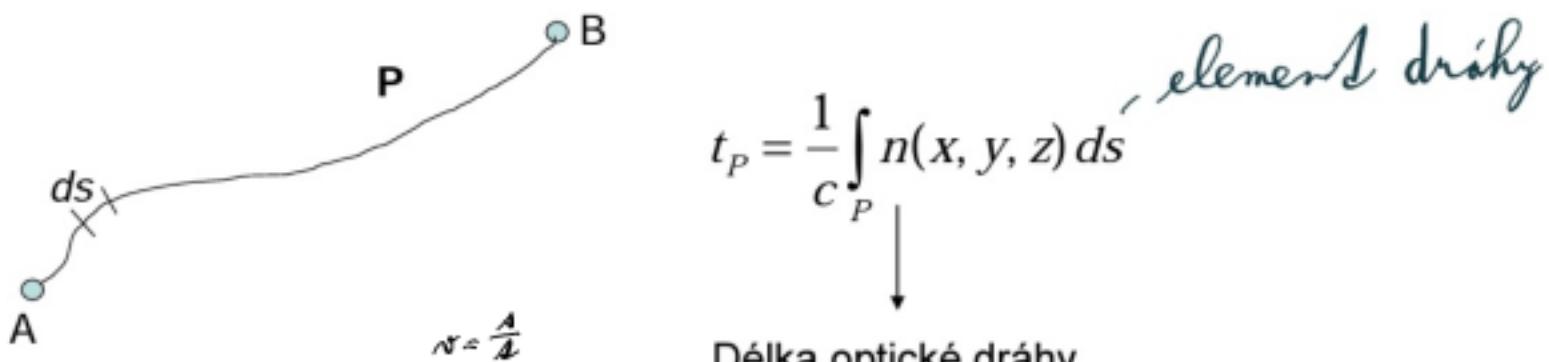
□ Paprsek se šíří po extrémní dráze, nejkratší čas



$$t_s = \frac{ds}{v} = \frac{ds}{\frac{c}{n}} = \frac{n ds}{c}$$

t_s - Čas za který paprsek urazí elementární dráhu ds

□ Paprsek se šíří po extrémní dráze, nejkratší čas



$$t_p = \frac{1}{c} \int_P n(x, y, z) ds$$

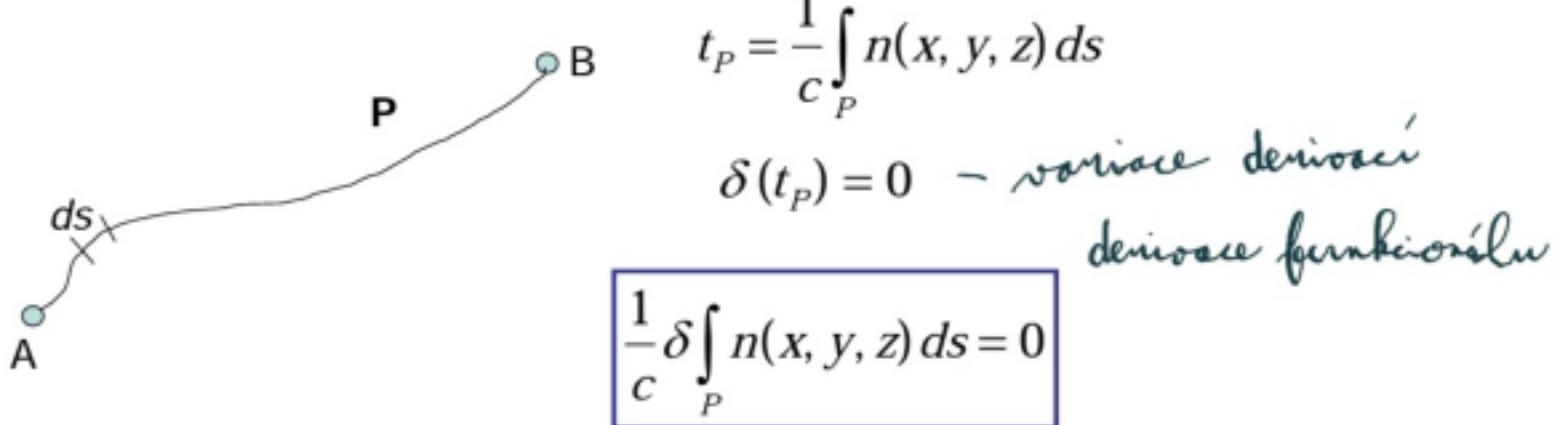
Délka optické dráhy

$$n = \frac{c}{v} = \frac{\frac{\ell}{x}}{\frac{x}{\lambda}} = \frac{\ell}{x} \quad \ell = n x$$

Čas za který paprsek urazí dráhu P mezi body A, B

$n x, n \ell$ - délka optické dráhy

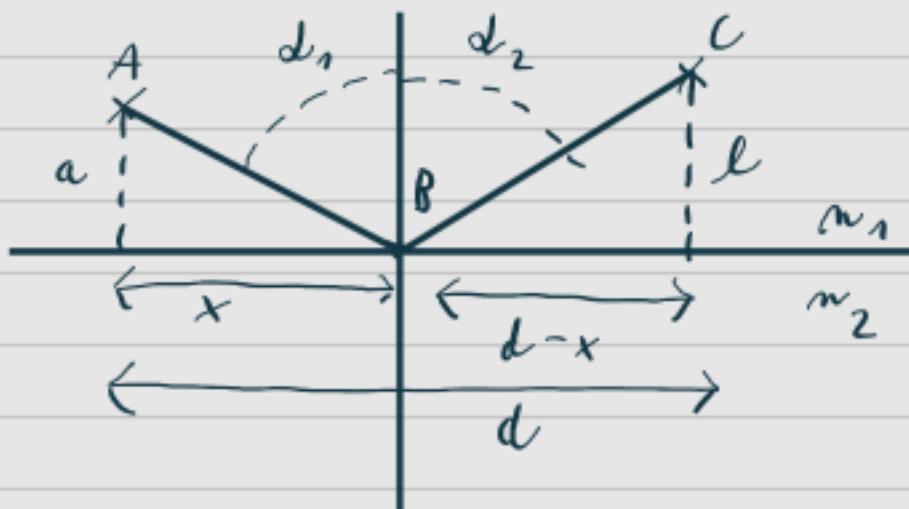
□ Hledání extrémní hodnoty délky optické dráhy



Fermatův princip - extrémní dráha,
někdy označován jako princip nejmenšího času

- odvození Snelllova zákonu lomu, nebo rázovné odrazu

2) Délka optické dráhy, Snellův úhel, merní úhel



$$\overline{AB} = n_1 \cdot \sqrt{a^2 + x^2} \quad \overline{BC} = n_1 \sqrt{l^2 + (d-x)^2}$$

$$\overline{AC} = \overline{AB} + \overline{BC} = n_1 \sqrt{a^2 + x^2} + n_1 \sqrt{l^2 + (d-x)^2}$$

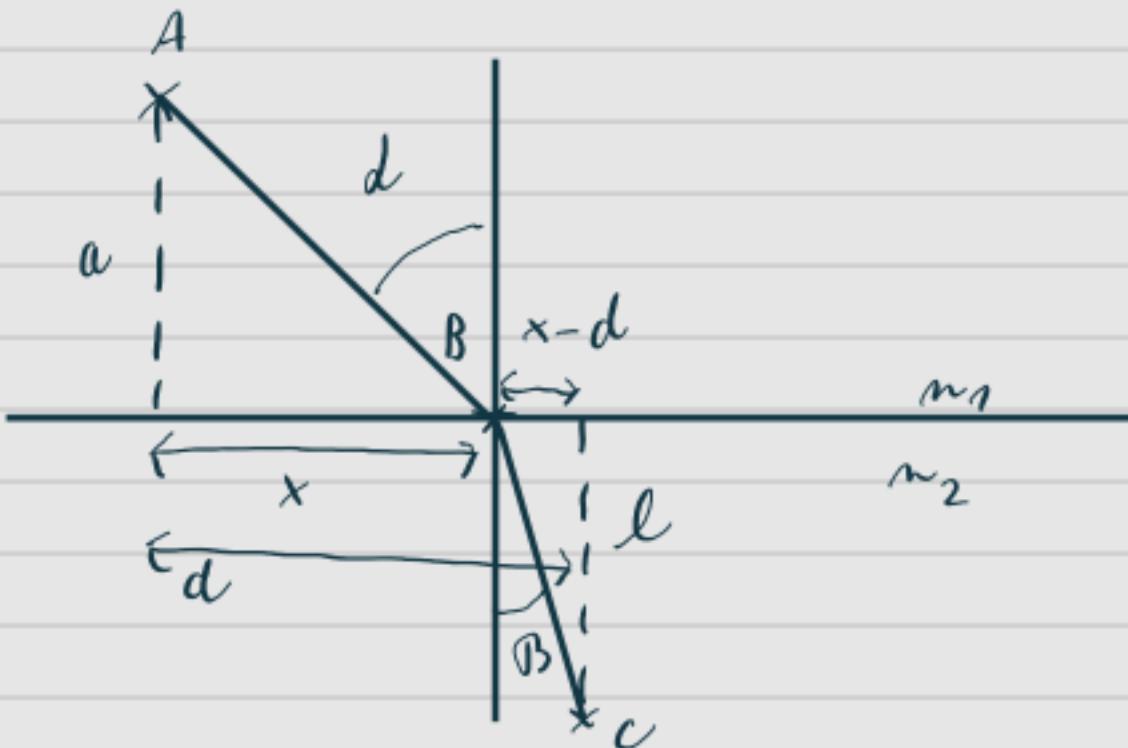
- derivace podle x (minimizace vzdálenosti)

$$\frac{d \overline{AC}}{d x} = n_1 \cdot \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} - n_1 \cdot \frac{d-x}{\sqrt{l^2 + (d-x)^2}} = 0$$

$$\frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}} = \frac{d-x}{\sqrt{l^2+(d-x)^2}}$$

$\sin d = \frac{\text{průlehlá}}{\text{hypotenusa}}$

$$\sin d_1 = \sin d_2 \Rightarrow \underline{d_1 = d_2} \quad \text{zákon odrazu}$$



$$\overline{AB} = n_1 \sqrt{a^2+x^2}$$

$$\overline{BC} = n_2 \sqrt{l^2+(d-x)^2}$$

$$\overline{AC} = \overline{AB} + \overline{BC} = n_1 \sqrt{a^2+x^2} + n_2 \sqrt{l^2+(d-x)^2}$$

- derivace podle x (minimální hodnota)

$$\frac{d \overline{AC}}{dx} = n_1 \frac{x}{\sqrt{a^2+x^2}} - n_2 \frac{d-x}{\sqrt{l^2+(d-x)^2}} = 0$$

$$\underline{n_1 \sin d = n_2 \sin B}$$

Snellův zákon

' $f_1 f_2 \Rightarrow 110^\circ$ cizokut mezi $n_1 \rightarrow n_2$

- mezi námi \rightarrow rovnice výrazu - pro $n_1 > n_2$

$$\Rightarrow \beta = 90^\circ$$

$$n_1 \sin \vartheta = n_2$$

$$\underline{\vartheta = \arcsin \frac{n_2}{n_1}}$$

- délka optické dráhy

$$l = n \cdot d$$

n - index lomu

d - vložená dráha paprsku

3) Geometrická optika, zobrazovací rovnice, spojky, mapse, hledání kardinálních bodů, jedna a více senzorů čid

- předmětový \times obrazový prostor
- hladký směr ve směru chodu paprsku
- úhly se počítají od osy k paprsku a pouze osy, hladné jsou proti směru hodinových ručiček
- polohu hmotnosti je hladký, pokud je vynutou sférou otocen směrem k paprskům
- optické zobrazení - signifikantní - bod se zobraší na bod
 - kolineární - přímka na přímku, rovina na rovinu
- Avan objektu zachovává projektivní zobrazení
- předmětová ohniskočová rovina - body z roviny se zobrazí do osy

- obrazová ohniskořovina - body z nekonečna se
sobrazí do roviny

Newtonova sobrazování roviny

$bz' \Rightarrow$ předměst

$f \Rightarrow$ obraz

$$ZZ' = ff'$$

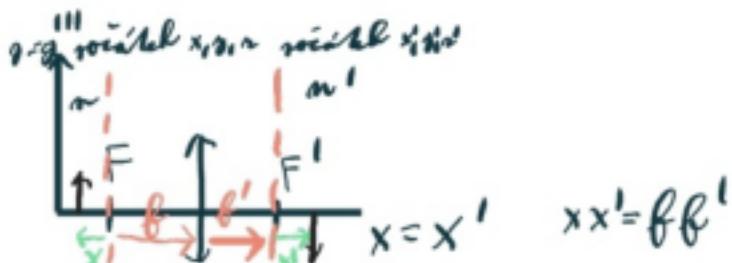
$f \Rightarrow$ ohnisko

$$\frac{Y'}{Y} = \frac{f}{Z} = \frac{Z'}{f'}$$

$Z \Rightarrow$ hlavní rovina - měří se od ohnisek

$Y \Rightarrow$ velikost

$$m = m' \Rightarrow f = f'$$



roviny:

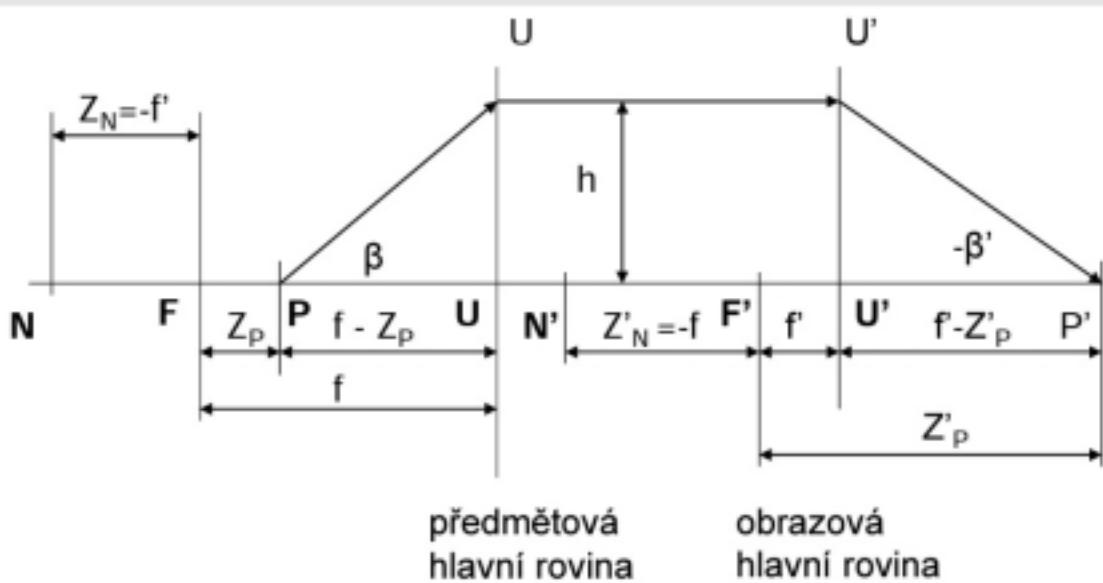
1) Ohniskořové

2) Hlavní *

3) Ustrojné body S

* průměrné zvětšení $= 1 \left(\frac{x'}{x} = 1 \right)$

ustrojné body: s úhlové zvětšení $= 1$



$$\frac{\tan \beta'}{\tan \beta} = -\frac{Z_p}{f'} = -\frac{f}{Z_p}$$

Gaussova rovnice

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

a - předměst

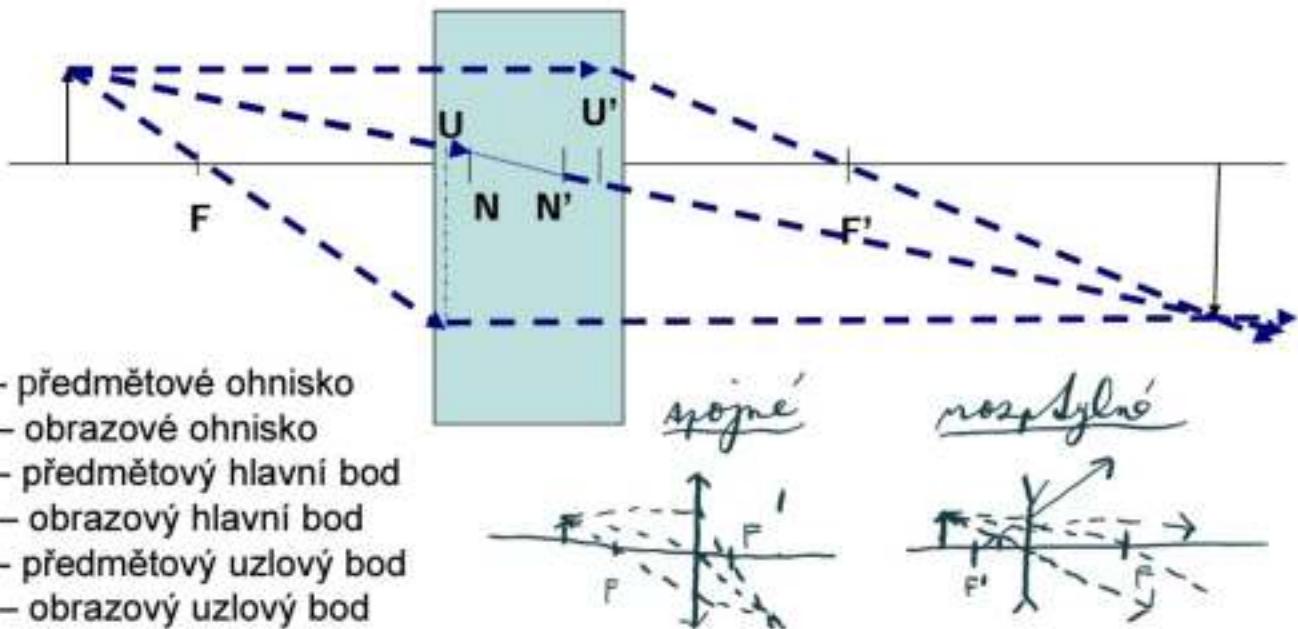
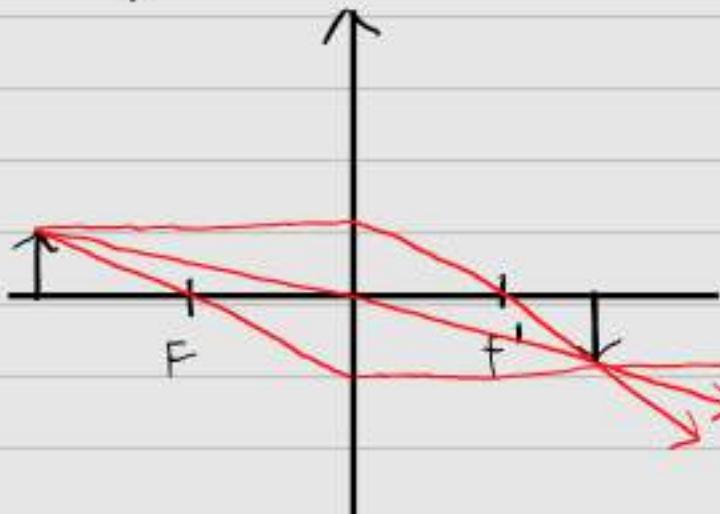
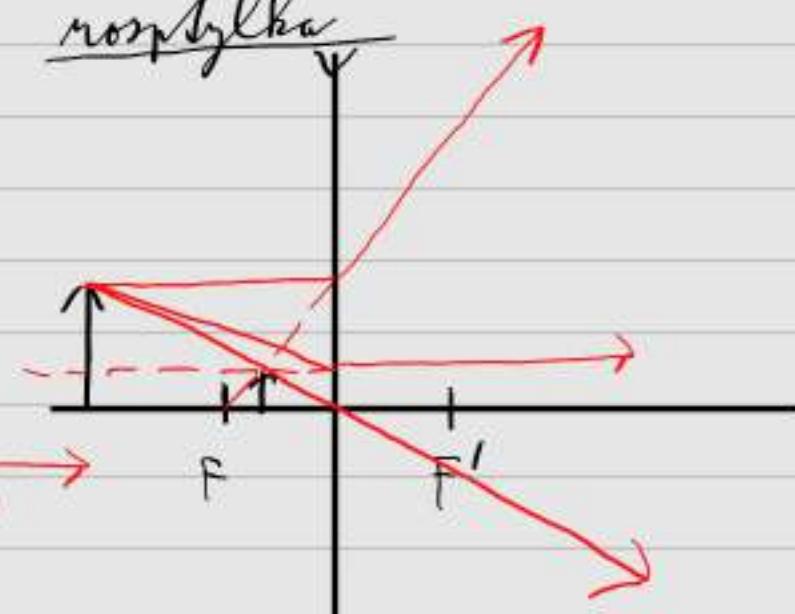
a' - obraz

f' - obrazové ohnisko

= rovnice denké čočky

Kardinalní body optické soustavy

Optická soustava

SnopSnop rozptylky

- paraxiální prostor - blízko optické osy
- platí pro $\theta < 5^\circ$ (úhel v rad)

Lom na sférické ploše

$N_{1(2)}$ - indexy lomu prostředí

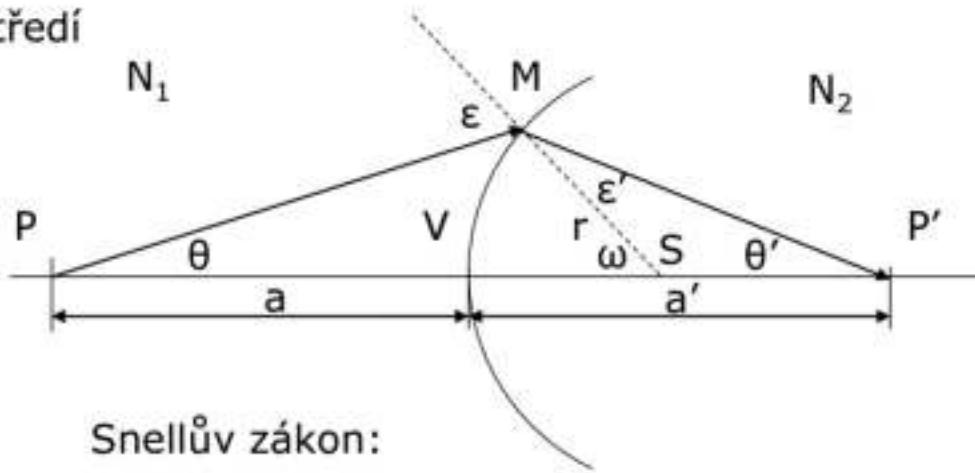
P, P' - předmět, obraz

a - předmětová vzd.

a' - obrazová vzd.

r - poloměr křivosti

povrchu



Platí pro trojúhelníky:

$$\Delta PMS: \epsilon = \theta - \omega$$

$$\Delta MSP': -\omega = \epsilon' - \theta'$$

(znaménková konvence)

Snellův zákon:

$$\frac{N_2}{N_1} \cong \frac{\epsilon}{\epsilon'} = \frac{\theta - \omega}{\theta' - \omega}$$

$$\frac{Y'}{Y} = - \frac{N_1 r}{(N_2 - N_1) a - N_1 r}$$

□ Poloha ohnisek
(zobraz. z nekonečna)

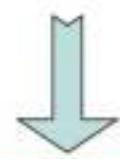
$$\frac{N_1}{a} + \frac{N_2}{a'} = \frac{N_2 - N_1}{r}$$

distanční vzdálenost k lámavé ploše

$$a' \rightarrow \infty \quad a = |f| = \frac{N_1 r}{N_2 - N_1}$$

$$a \rightarrow \infty \quad a' = |f'| = \frac{N_2 r}{N_2 - N_1}$$

$$\frac{Y}{Y} = 1 \quad \frac{Y}{Y} = - \left(\frac{a' - r}{a + r} \right)$$



$$a = 0 \wedge a' = 0$$

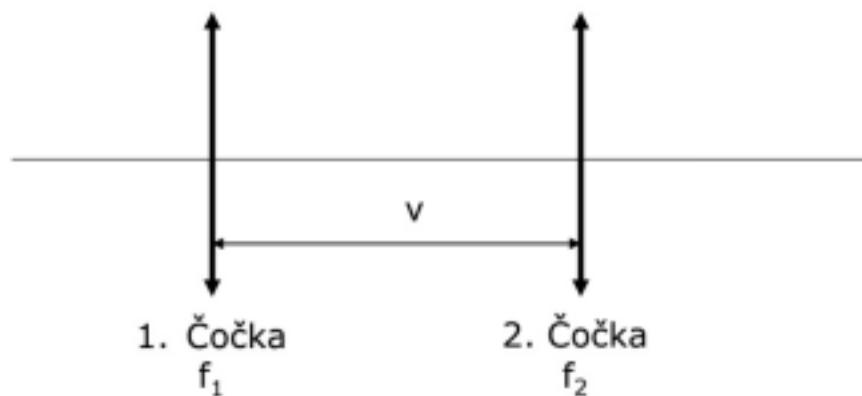
Obrazová a předmětová rovina splývá protíná průsečík lámavé plochy V a opt. osy

- D = optická mohutnost lámavé soustavy dioptrie

$$D = \frac{1}{f}$$

: - srojba \oplus - rovník
- rozdílná \ominus - menší
optickou vzdálenost

- dočlenění čočky



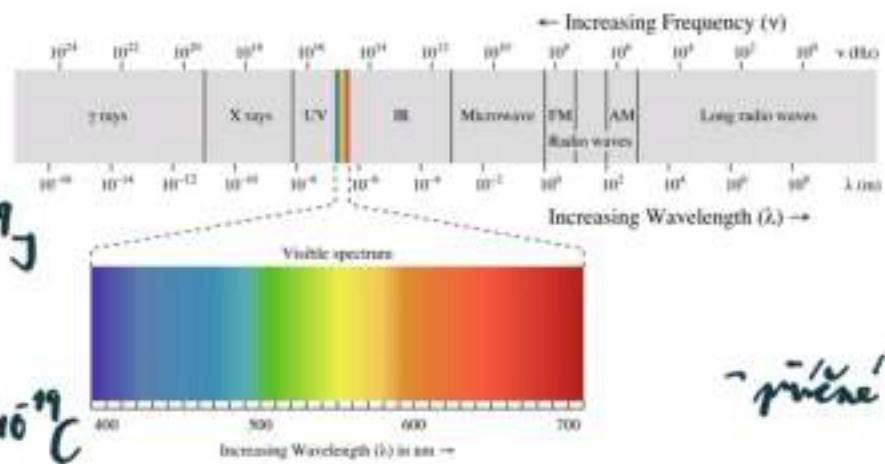
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{v}{f_1 f_2}$$
$$D = D_1 + D_2 - v D_1 D_2$$

4) Světlo × elektromagnetické záření - rozdíly

- světlo - odstelná část elektromagnetického záření

- v případě světla změna, že funguje v úvahu vlastnosti lidského oka

- elektromagnetické záření je přímo posuzné ohledně elektromagnetického pole



$$1_{eV} = 1,602 \cdot 10^{-19} J$$

$$E = q \cdot \Delta U$$

$$\Delta U = 1V \quad q = 1,602 \cdot 10^{-19} C$$

- první ohnění

- Vymezení pojmu: světlo x elmag záření

- Foton

$$E = h\nu; \quad p = \frac{h\nu}{c}; \quad \lambda = \frac{c}{\nu}$$

energii

souvisí s metodou
průměr
vlnové délky



ognivostní

- Lze omezit na lineární, homogenní a izotropní prostředí
- Vlnová rovnice – bez zdrojů

$$\text{rot rot} = \text{grad div} - \Delta$$

$$\Delta \vec{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

prostor

- Rychlosť světla z vlnové rovnice

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}}$$

$$v = \frac{1}{\sqrt{\epsilon \mu}}$$

- Index lomu $v = \frac{c}{n}$ $n = \sqrt{\epsilon_r \mu_r}$ - souvisí s rychlosťí šíření v dané látky

→ sloučený výkon (W/m^2)

- Poyntingův vektor – směr šíření energie [J/m^2s] (izotropní prostředí) [3]

E, H - jsou na sebe rovnající polohy
- polohy na směr šíření

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}$$

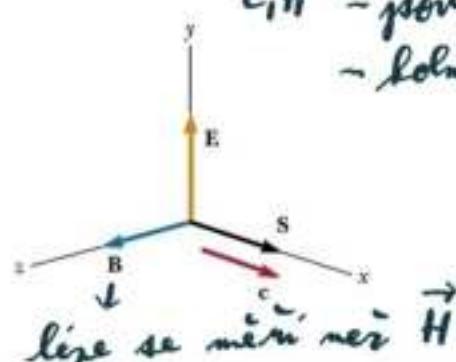


Figure 34.7 The Poynting vector \vec{S} for a plane electromagnetic wave is along the direction of wave propagation.

- Elementární vlnoplocha, Huygensův princip [4]

Huygensův princip

New wavefront

Rovinná vlna

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin(\vec{k}\vec{x} - \omega t)$$

lze zjistit, že $\vec{k} \perp \vec{x}$ → lze zjistit, že \vec{k} je souběžný s \vec{x}

 Vlnový vektor

$$\vec{k} = \frac{2\pi}{\lambda} \hat{k}_0$$

 Frekvence

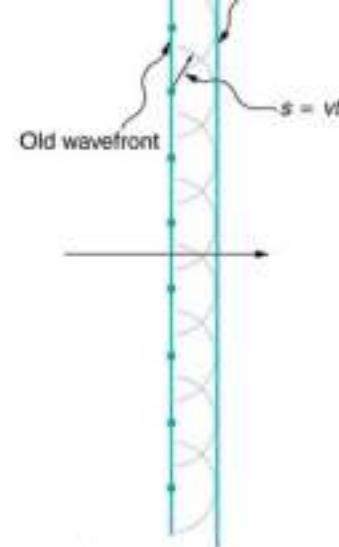
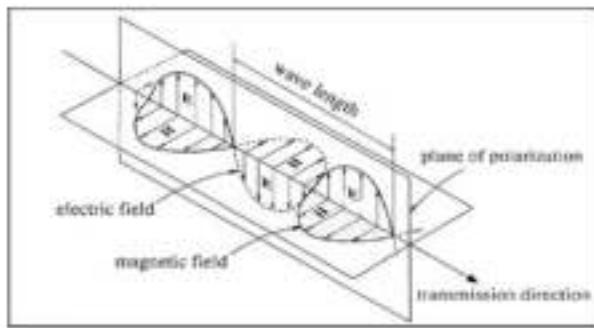
$$\omega = 2\pi\nu$$

 Obecnější zápis

$$\vec{E}(x, y, z, t) = \vec{E}_0(x, y, z, t) e^{i\omega t - k\vec{R}}$$

 Polarizace [5]

- lineární
- kruhová
- eliptická



- do nejméně rovinu polarizace, jen její intenzitu

 Materiálové vztahy

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E}$$

$$\vec{B} = \mu \vec{H}$$

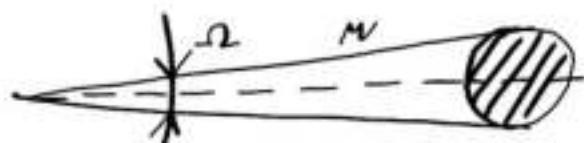
 Lze omezit na lineární, homogenní a izotropní prostředí **Vlnová rovnice – bez zdrojů**

$$\text{rot rot} = \text{grad div} - \Delta$$

$$\Delta \vec{E} - \mu \epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0$$

prostor vln

5) Radiometrie a fotometrie veličiny (řešení základních jednotek)

 Světlo x elmag. záření **Definice prostorového úhlu (steradián)** **Radiometrie – měření elmag. záření, W, W/m², počet fotonů** **Fotometrie – světlo, vnímané lidským zrakem** **Kolorimetrie – barevný vjem**

$$\frac{S_A}{S_E} = \frac{\Omega}{4\pi}$$

$$1 \text{ sr} = 1 \text{ m}^{-2}$$

$$\underline{\omega = 0 - 4\pi \text{ rad}}$$

$$\omega = 4\pi \cdot \frac{S_1}{4\pi r^2}$$

$$\boxed{S_1}$$

S_1 - plocha senzoru

$$\underline{\underline{\Omega = \frac{S_1}{r^2}}}$$

$$\underline{\underline{r_s}}$$

Fotometrie \Rightarrow charakterizace výkonu zdroje

Zářivý tok Φ_e [W] \Rightarrow v daném zdroji, "výkon zdroje"

- rozšíření do všech směrů \nearrow

Zářivost
"svítivosť" $I_e = \frac{d\Phi_e}{d\omega} [\text{Wsr}^{-1}]$ - osvěření do daného směru

Ozáření
- bolný průměr $L_e = \frac{d\Phi_e}{dS \cos \alpha} = \frac{d\Phi_e}{dS_\perp} [W\bar{m}^2 \text{sr}^{-1}]$ $\begin{matrix} \text{plocha zdroj} \\ L = I_e \cos \alpha \cdot d \end{matrix}$ [sr = steradian]

Zář $L_e = \frac{d\Phi_e}{dS} [W\text{m}^{-2}]$ $\begin{matrix} \text{bolný zdroj} \\ I = I_e \cos \alpha \end{matrix}$

- činitel osvěřnosti

$$S = \frac{I_e(\theta)}{I_e} \quad \leftarrow \quad \frac{I_{\text{bol}}}{I_e} \quad \rightarrow \quad \begin{matrix} \text{větší } \Delta\theta \Rightarrow \text{Lumen} \\ \text{větší } \cos \alpha \Rightarrow \text{candela} \\ \text{osvětlení } \Rightarrow \text{Lux} \end{matrix}$$

$$\begin{matrix} \text{větší } \Delta\theta \Rightarrow \text{Lumen} \\ \text{větší } \cos \alpha \Rightarrow \text{candela} \\ \text{osvětlení } \Rightarrow \text{Lux} \end{matrix}$$

$$\text{Joule} \Rightarrow \text{Lumen/m}^2$$

osvěření - pro odrazové plochy
zář - pro zdroje

Fotometrie

$\Phi_e [W]$ Zářivý tok - fyzikální veličina

$\Phi [Lm]$ Světelný tok - vzhledem k oku

$$\Phi = k_n \int_{\lambda_1}^{\infty} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

$V(\lambda)$ Poměrná citlivost lidského zraku

$$\left. \begin{array}{l} k_{n1} = 683 \text{ lm/W} \\ k_{n2} = 1700 \text{ lm/W} \end{array} \right\} \text{čísky a dýcinby} \Rightarrow \text{barevné / černobílé}$$
$$\lambda = 555 \text{ nm}$$

- veličiny fotometrie \Rightarrow analogie k radiometrii

Zářivý tok Φ_e [W]

Světelný tok [1 Lumen / Lm]

Ozáření

Osvětlení 1 Lux = lx

Zářivost

Svítivost 1 Candela = cd

Zář

Jas cd/m²

Osvětlení

- dopadá-li světelný tok na těleso, je jeho rovné osvětlení, plocha o obsahu 1 m^2 má osvětlenost 1 lx, dopadá-li na ní rovnoměrně světelný tok 1 lumen
- lidské oko je schopno rozlišovat předmět, jehož osvětlenost je alespoň 2 lx, na světlo osvětlenost reagují pouze dýcinby, čísky až na věci, osvětlenost předmětu za jasného slunecního dne je asi 0,1 Mlx
- doporučené hodnoty pro čtení 100 lx

nýsované 20 le
osvětlení chodeb 20 le

6) Světelný tok, osvětlení, odezva senzorem

- Světelný tok Φ [lumen]

= množství světelné energie, kterou přenese záření nebo zdroj za časovou jednotku s pohlédnutím k citlivosti průměrného lidského oka na různé vlnové délky světla

$\Phi_e[W]$ Zářivý tok - fyzikální veličina

$\Phi[Lm]$ Světelný tok - vzhledem k oku

$$\Phi = k_n \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) V(\lambda) d\lambda$$

$V(\lambda)$ Poměrná citlivost lidského zraku

$$k_{n1} = 683 \text{ lm/W}$$
$$k_{n2} = 1700 \text{ lm/W}$$

$\lambda = 555 \text{ nm}$

čísky a žínky \Rightarrow barevné / černobílé

- Odezva senzorem

$\Phi_e[W]$ Zářivý tok - fyzikální veličina

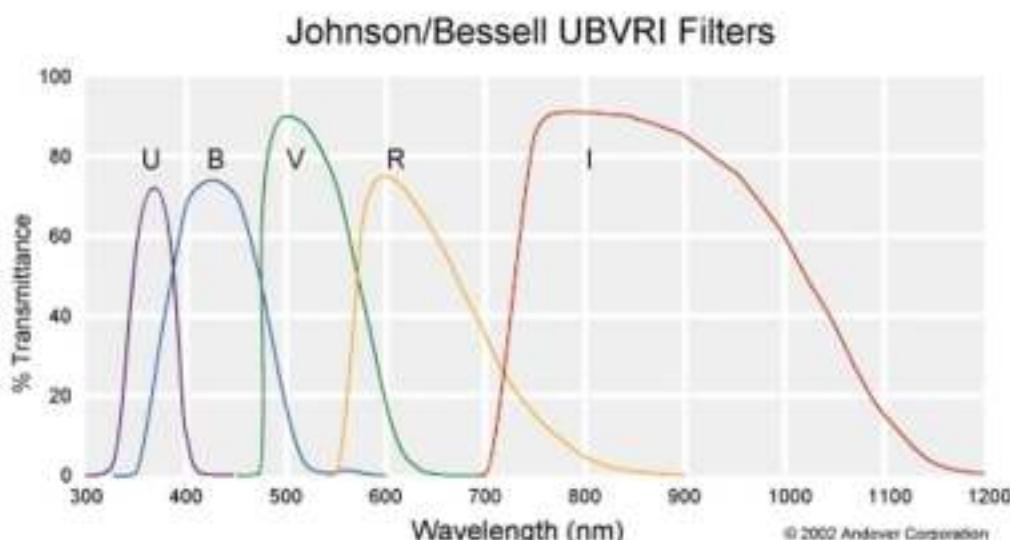
Φ_S Odezva na dopadající záření - vzhledem ke snímači

$$\Phi_S = k \int_0^{\infty} \Phi_e(\lambda) C(\lambda) d\lambda$$

$C(\lambda)$ Poměrná spektrální citlivost snímače.

7) Hodorivne sice, popis světla, barev vymenitelné okem, gomus

Bareva (barevný odstín) rozumíme smyslový (psychofyzikální) vjem vnímaný okem



jas - fotonebil
sín - zelená, modrá
ryžovas - ryzbledlá, ryžová
↳ množství bílé - množství

- U filter (P/N JOHN-U-XX)
- B filter (P/N JOHN-B-XX)
- V filter (P/N JOHN-V-XX)
- R filter (P/N JOHN-R-XX)
- I filter (P/N JOHN-I-XX)

- množství sloužby
 R, G, B $\approx g, b = 1$
 $n = \frac{R}{R+G+B}$ $I = " "$
- množství součinu

RGB x CIE

RGB \Rightarrow 3 barevné kanály
 \Rightarrow 8 bitů na barevný signál

x, y, z y -jaslost
 Y, C_b, C_r C_b, C_r - chrominacení slošky

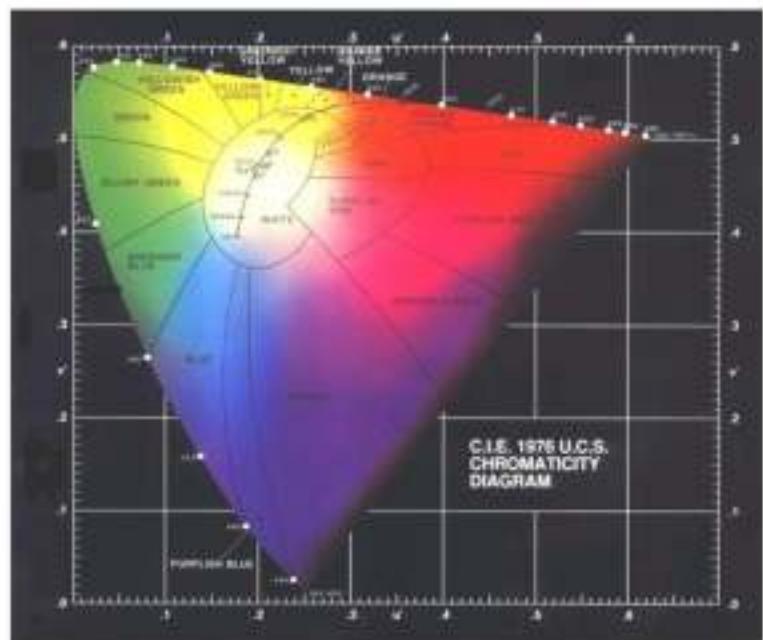
CIE \Rightarrow 3 baróly \Rightarrow L - ředitelnoosty (luminosity)
 a - chrominacní
 b - chrominacní

Srovnání RGB – CIE Lab

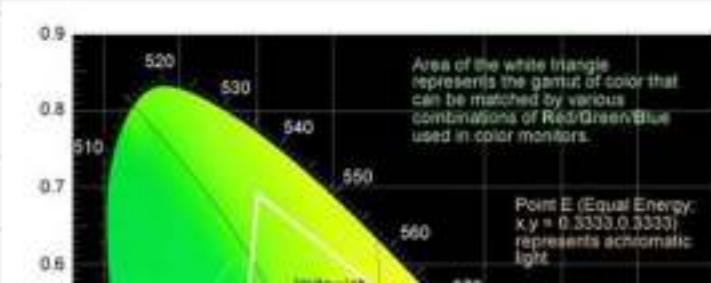
$$u = \frac{4x}{-2x + 12y + 3}$$

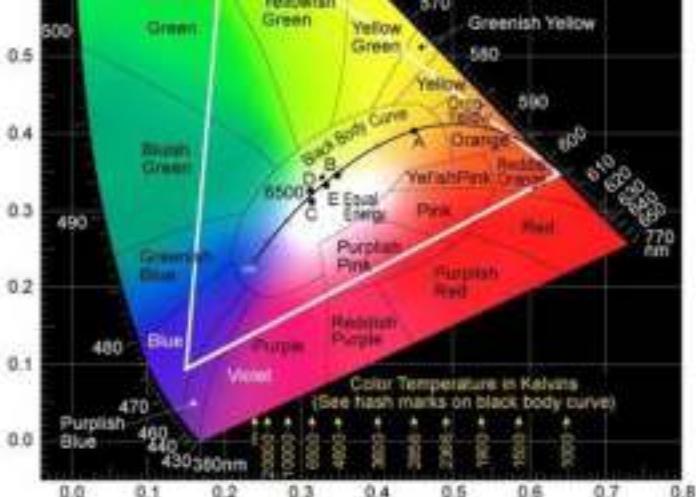
$$v = \frac{9y}{-2x + 12y + 3}$$

Kolorimetrický diagram
stejných rozdílů



- gamut je dosažitelná oblast barev v barevném prostoru, čím větší prostor je, tím věrněji dokáže barevy monitor/malíř vykreslit



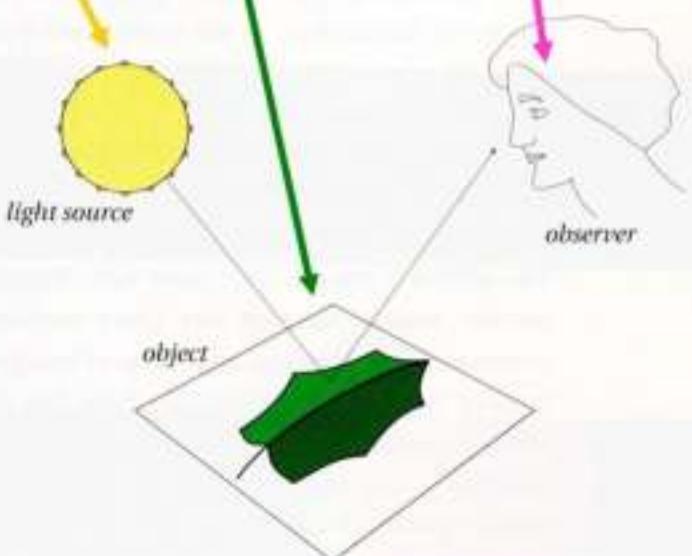


\Rightarrow gamut

Holorime trichý zapis sočka

$$G = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} p(\lambda) \cdot R(\lambda) \cdot \bar{g}(\lambda) d\lambda$$

trichromatická složka



barevý snímanec okem

- čípky sítnice lidského oka obsahují tři světlozářivé

složky s různými absorpcemi spektra jejich pigmentů:

- modrou (fialové modrou)

- žlutou (žlutozelenou)

- červenou (purpurově červenou)
- dopadající polychromatické světlo odráží všechny tři světlocitlivé složky, ale každou z nich v jiném mříž
- barevný vjem vzniká složením tří odpovídajících neurofysiologických procesů ve svabovém centru mozkové kůry člověka

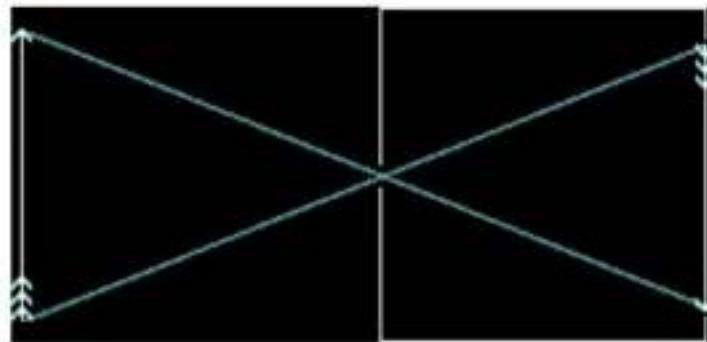
8) Dírková horora - princip, konstrukce, neostrost, difrakce světla, rozlišovací schopnost

- nejjednodušší zobrazovací systém
- funguje na základě projekce, paprsková optika
- zanedbáváme difraci na hraničních vrstvách
- obraz je menší a přepracován
- se zmenšujícím se odstupem je obraz ostřejší, ale zároveň se snižuje jeho jas, je-li ale odstup příliš malý, ostrost se opět ráčne zkrašovat vlivem difrakce
- difrakce (ohýb) - za překážkou se ohněm ohýbá od svého původního směru, odchylkou od původně určeného

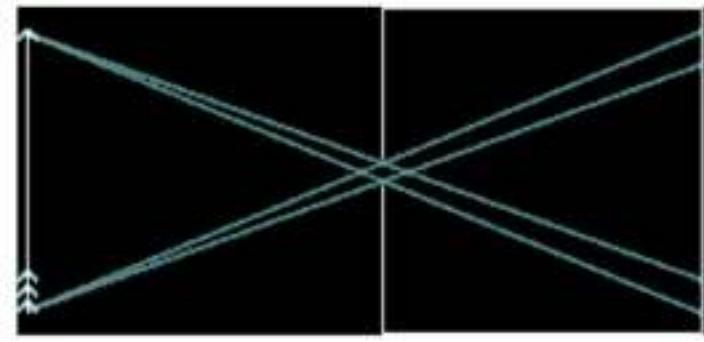
na přesazování se srovná s vlnou vlnovou délka

vlnová délka světla

- difrakční limit - teoretická rozlišovací schopnost soustavy



Princip



Vznik neostrosti

Optimální velikost dírky? $d = 1,9 \cdot (\lambda \cdot f)^{1/2}$

λ - vlnová délka

f - vzdálenost matnice od dírky

- rentgenové a gamma záření - využití

- difrakční limit soustavy (dnyho dírky)

- teoretická rozlišovací schopnost



$$x = 1,22 \lambda \frac{f}{d}$$

$$\sin \theta = 1,22 \frac{\lambda}{d}$$

θ, λ, d, f Úhel, vlnová délka, průměr otvoru
ohnisková vzdálenost (vzd. matnice)

$$\frac{f}{d} = c$$

F - number, clonové číslo

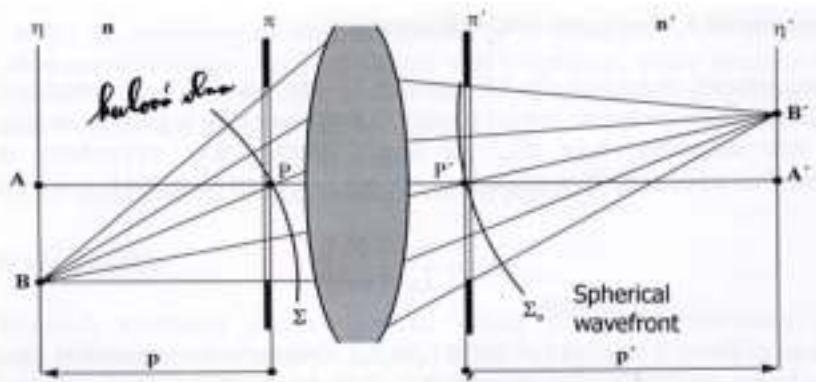
- realisace



9) Vady zobrazení - Seidelovy polynomy, elementární vady, projekce a jejich kompenzace

Optické vady odchylky obrazu vytvořeného reálnou optickou soustavou při porovnání s obrazem vytvořeným ideální optickou soustavou.

Ideální optická soustava - zobrazuje bod na bod, přímku na přímku a rovinu na rovinu. Rozbíhavá sférická vlnoplocha je transformována na sbíhavou kulovou vlnoplochu.



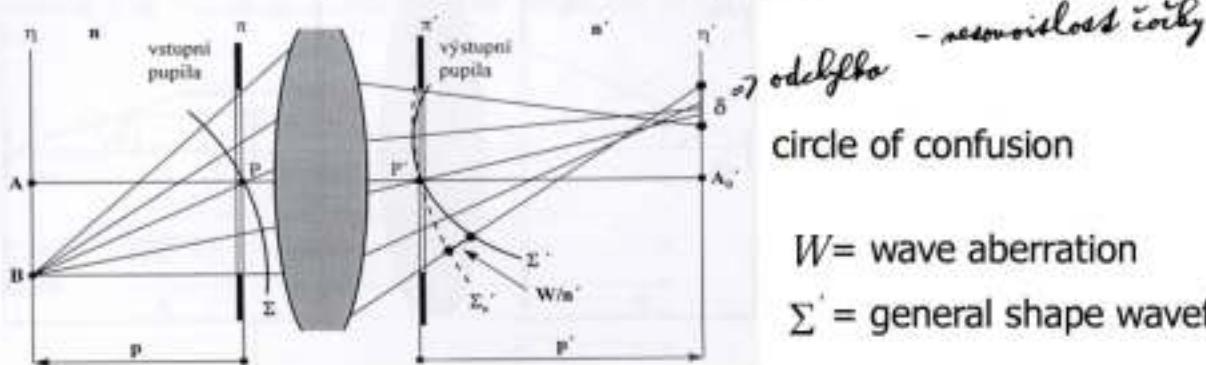
Optické vady vznikají z řady důvodů vlivem omezení optických komponent:

- výrobní proces, použitý materiál,
- fyzikální omezení

• některé paprsky vycházející z předmětu vůbec neprochází optickou soustavou (úbytek paprsků vede k tvorbě nezřetelného obrazu vlivem difrakce a jevu

souvisejících s vlnovou povahou světla

- některé z paprsků procházejících optickou soustavou nedorazí do obrazové roviny z důvodu absorpce, odrazu, difúzního odražu a lomu.



circle of confusion

W = wave aberration

Σ' = general shape wavefront

Paraxiální oblast

$$n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

Dráhu paprsku určuje Snellův zákon.
Proto funkce sinus.

Taylorův rozvoj pro funkci sinus.

$$\sin \alpha = \alpha - \frac{\alpha^3}{3!} + \frac{\alpha^5}{5!} - \frac{\alpha^7}{7!} + \frac{\alpha^9}{9!} - \dots$$

$$\alpha \leq 2^\circ \Rightarrow \sin \alpha \approx \alpha$$

Paraxiální oblast – prostor prvního řádu, bez aberací, kulová vlnoplocha

$$\alpha \leq 15^\circ \Rightarrow \sin \alpha \approx \alpha - \frac{\alpha^3}{3!}$$

- přesné - vysoká deformace
- aberacie

Seidelova oblast – prostor třetího řádu, primární aberace (sférická vada, koma, astigmatismus, zklenutí pole, zkreslení)

- pro přesný popis vlnové aberacie optických systémů

používáme Seidelovy (a Zernikovy) polynomy

- Seidelovy polynomy jsou vhodné pro popis primárních aberací (Zernikovy pro popis aberací vysšího řádu)

Vyjádření pomocí Seidelových polynomů

$$W(\rho, \theta) = \frac{1}{2} S_I \rho^4 + \frac{1}{2} S_{II} \rho^3 \cos \theta + \frac{1}{2} S_{III} \rho^2 \cos^2 \theta + \frac{1}{4} (S_{IV} + S_{IV}) \rho^2 + \frac{1}{2} S_V \rho \cos \theta.$$

$\frac{1}{8} S_I$

Sférická vada

polární souřadnice $S; \theta$ $\frac{1}{2} S_{II}$

Koma

 $\frac{1}{2} S_{III}$

Astigmatismus

 $\frac{1}{2} S_V$

Zkreslení

 $\frac{1}{4}(S_{III} + S_{IV})$

Zklenutí pole

 S_{III} definiční obor ortonomální

Pozdělení aberací

➤ Chromatické (barevné) vady – vada polohy a velikosti

- způsobené použitím kompozitního přírodního světla (bílé světlo), které je rozptýleno lomem

➤ Monochromatické vady – základní Seidelovy vady

➤ vady ostrosti obrazu

➤ znemožňují bodové zobrazení každého svítícího bodu předmětu (otvorová vada, koma, astigmatismus a zklenutí)

➤ vady měřítka zobrazení

➤ zkreslují obrazu tak, že tvar obrazu není podobný tvaru předmětu (zkreslení poduškovité, soudkovité).

Monochromatické vady

Sférická vada

Sférická vada vzniká při zobrazení bodů na optické ose soustavy sférickou čočkou, protože tato čočka fokusuje paralelní paprsky podél optické osy místo do jednoho bodu. Paprsky vzdálenější optické ose jsou soustředěny bliže optickému systému než paprsky blízko optické osy.

Paprsky blízko optické osy jsou fokusovány blízko polohy paraxiálního ohniska. S rostoucí

dopadovou výškou se vzdaluje poloha dílčích ohnisek od paraxiálního směrem k čočce.

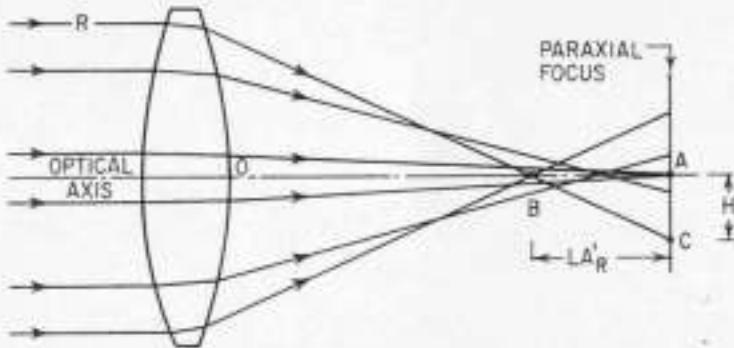
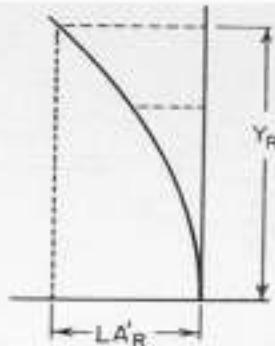


FIG. 3.1. A simple converging lens with undercorrected spherical aberration. The rays further from the axis are brought to a focus nearer the lens.



Sférickou vadu obvykle vyjadřujeme graficky. Podélná sférická vada je vynášena v závislosti na dopadové výšce paprsků.

FIG. 3.2. Graphical representation of spherical aberration.

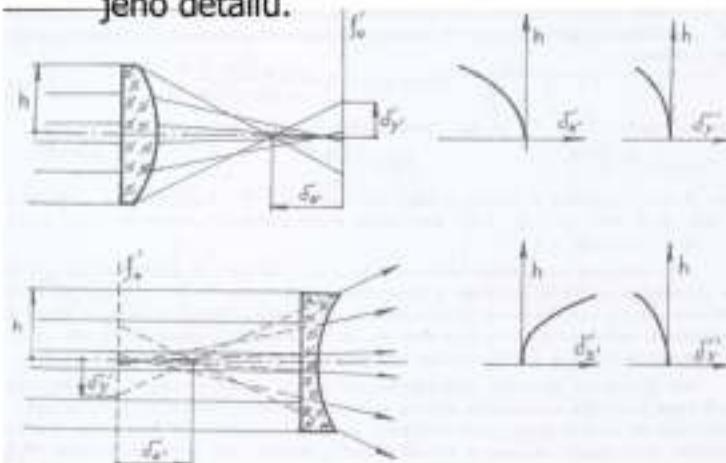
Otvorová vada spojních čoček je soporná kladná, zatímco u rozptylných čoček kladná.

Vzdálenost od paraxiálního ohniska k ohnisku vytvořenému okrajovými paprsky se nazývá podélná sférická vada. Pokud měření provádíme ve vertikálním směru pak sférickou vadu nazýváme přičnou.

Vliv sférické vady

Obraz bodu vytvořený optickým systémem se sférickou aberací je tvořen jasným bodem s kruhovým rozptylovým kroužkem.

Vliv sférické vady na rozšířený obraz je zmírnění kontrastu obrazu a rozmažání jeho detailů.



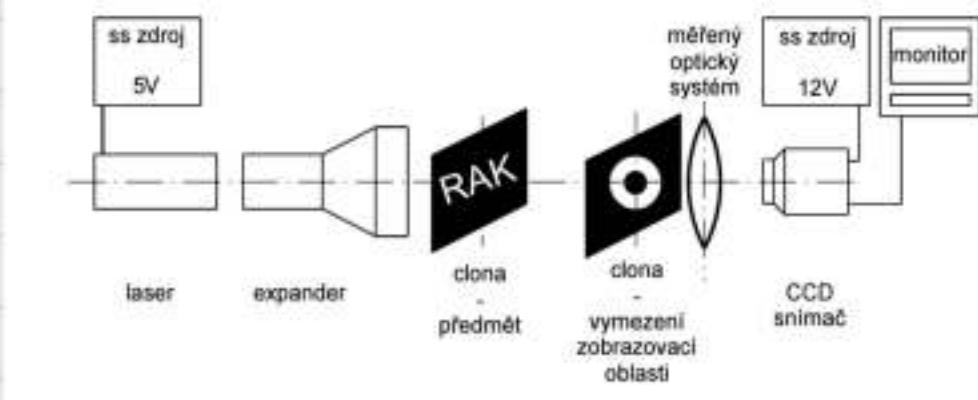
- minimizace vady

- súčení obojí paprsků
- správná orientace čoček
- kombinace spojné a rozptylné čočky (doubles)

- měření vady



Apertury clon



Koma

Koma vzniká protože mimoosové paprsky se zcela nesbíhají v jedné ohniskové rovině. Koma je kladná když se mimoosové paprsky sbíhají dál od optické osy a záporné když se sbíhají bliže k optické ose než hlavní paprsek.

Pokud zobrazujeme šikmým svazkem paprsků pomocí čočky s komou, potom paprsky procházející okraji čočky jsou zobrazeny v rozdílné výšce v ohniskové rovině než paprsky procházející středem čočky.

$$COMA^T = H_{AB} - H_P$$

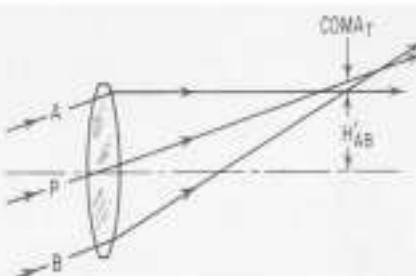
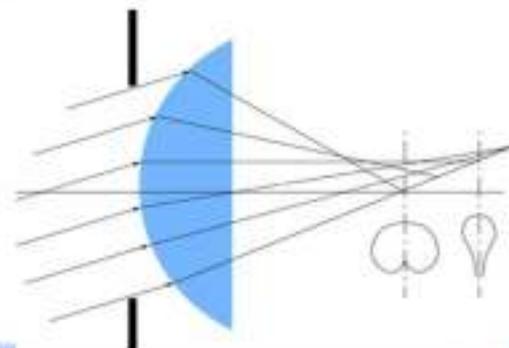


FIG. 3.3. In the presence of coma, the rays through the outer portions of the lens focus at a different height than the rays through the center of the lens.



Koma je zvláště rušivá vada, protože její vliv je nesymetrický.

Její přítomnost velmi ovlivňuje přesnost určení polohy obrazu.

Je mnohem složitější lokalizovat těžiště rozptylového kroužku komy než je tomu u otvorové vady.

Koma se mění podle tvaru čoček a podle pozice apertur, které limitují svazek paprsků vytvářejících obraz

- minimalizace vady

- zvýšení osudní pupily

- astigmatická čočka - čočka s konvexním povrchem
a sférickou vadou

Astigmatismus

Astigmatismus vzniká na sférických čočkách protože mají rozdílné ohniskové vzdálenosti pro paprsky v různých rovinách. V zásadě platí, že paprsky z horizontální a vertikální roviny v předmětovém prostoru nejsou soustředovány do stejné obrazové roviny.

- zobrazí se jinak než jako bod

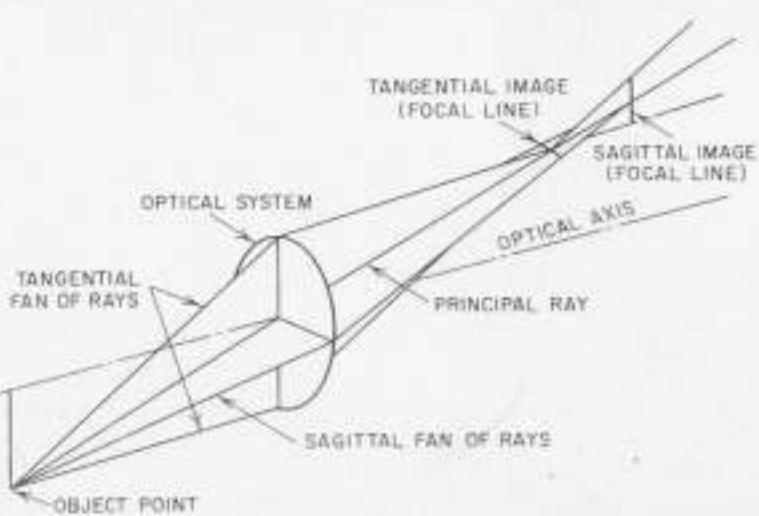
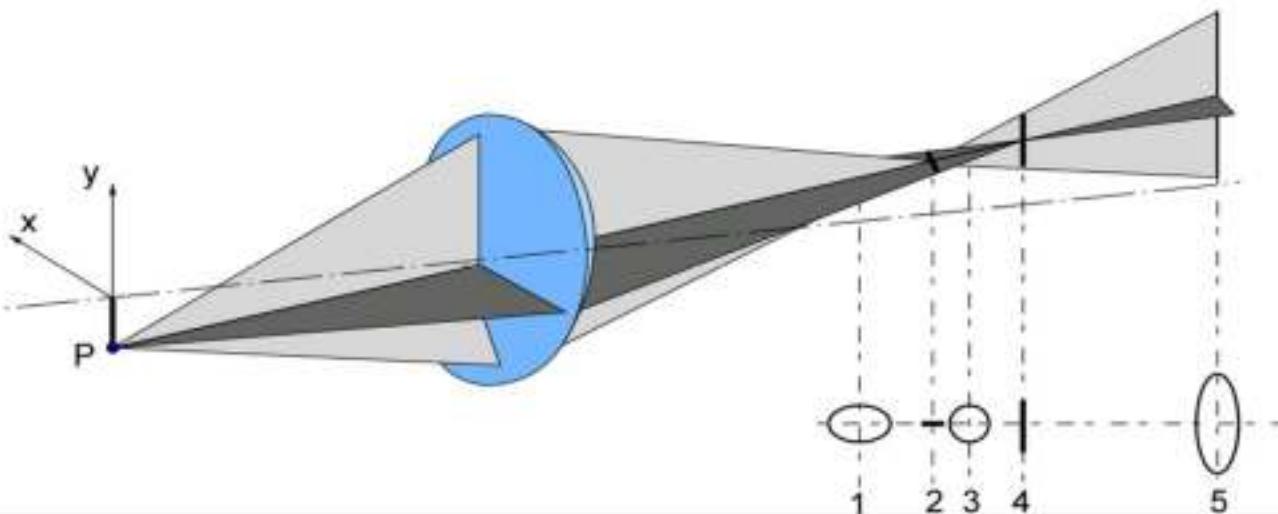


FIG. 3.6. Astigmatism.

Obraz bodu zobrazovaný pomocí paprsků tangenciální roviny bude úsečka (rovina 2 – tangenciální obraz ležící v sagitální obrazové rovině). Naopak obraz vytvořený paprsky sagitální roviny bude ležet v obrazové tangenciální rovině 4 a nazývá se sagitální obraz.

Astigmatické čočky nemají tangenciální a sagitální obrazy v jedné rovině.

Mimo těchto obrazových tangenciálních a sagitálních rovin je obrazem bodu rozptylový kroužek či elipsa.





- válcovou čočkou
- kombinací optických elementů s opačným astigmatismem \Rightarrow anastigmat

Zklenutí pole

Zklenutí pole neboli Petzvalovo zklenutí vzniká protože ohnisková rovina není vlastně kolmá, ale kulová.



Pokud nemá optický element astigmatismus potom sagitální a tangenciální obrazy leží v jedné rovině, která se nazývá Petzvalova.

Obrazy leží na rotačně symetrické ploše.

Obrazem bodu - osově symetrické kroužky

Na kolmém senzoru je ostrá (bodově) jen určitá oblast

Ostatní oblasti jsou rozostřené (prstencové symetrické kroužky) např. střed ostrý, okraje rozostřené

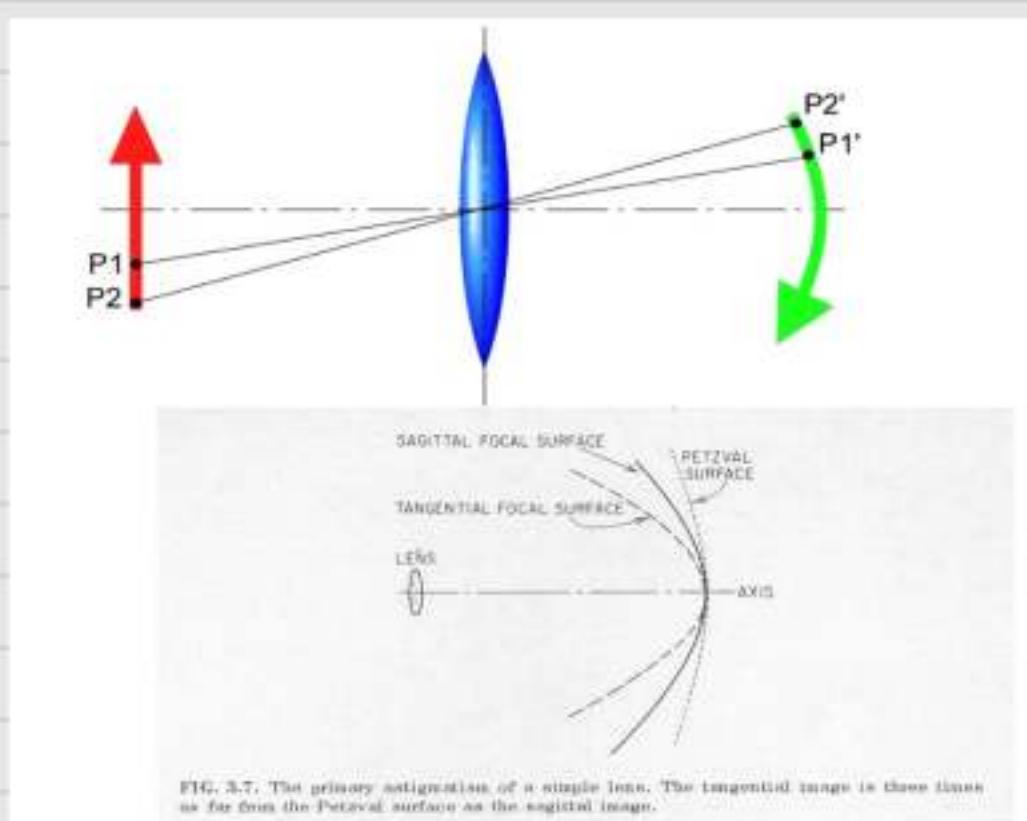


FIG. 3.7. The primary astigmatism of a simple lens. The tangential image is three times as far from the Petzval surface as the sagittal image.

- minimizace

- zlepšení CCD snímače

- zobrazení pomocí sférických ploch

Zkreslení

Zkreslení se projevuje v důsledku změny příčného zvětšení v závislosti na úhlu zorného pole narušením podobnosti obrazu a předmětu – orthoskopickost systému. Podle toho jestli se příčné zvětšení se zorným úhlem zmenšuje nebo zvětšuje, hovoříme o zkreslení soudkovitém a nebo poduškovitém.

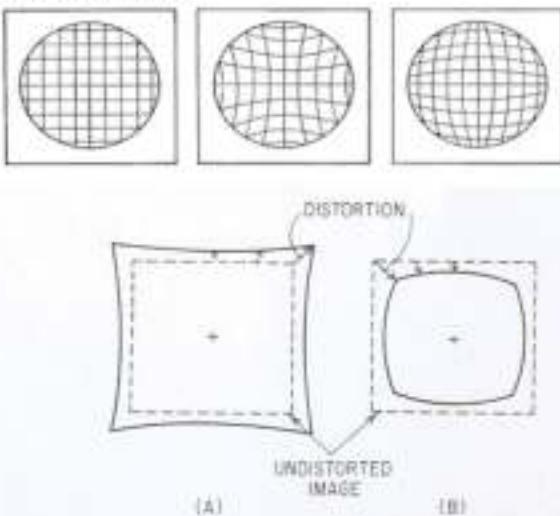


FIG. 3.8. Distortion. (a) positive, or pincushion distortion. (b) negative, or barrel distortion. The sides of the image are curved because the amount of distortion varies as the cube of the distance from the axis. Thus, in the case of a square, the corners are distorted $3/2$ as much as the center of the sides.

- minimalizace
- opačné zkreslení

Chromatické vadby

Barevná vada

Barevná vada je zapříčiněna tím, že ohnisková vzdálenost daného optického elementu je závislá na barvě světla (zobrazujeme bílým světlem).

V zásadě platí, že index lomu optického materiálu je vyšší pro kratší vlnové délky než pro delší – takže kratší vlnové délky (modrá barva) je lámáno více než delší vlnové délky (červená barva).

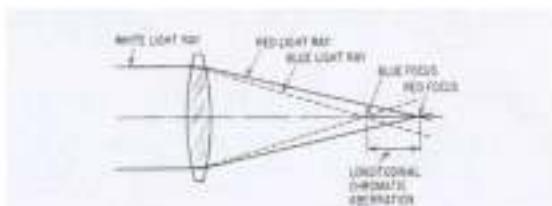
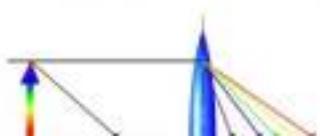


FIG. 3.9. The uncorrected longitudinal chromatic aberration of a single lens is due to the blue rays undergoing a greater refractive time than the red rays.



- Výskyt u všech prvků, kde prochází světlo s více frekvencemi skrz materiál
- Normální disperze – n klesá pro λ rostoucí
- f pro fialové světlo je kratší než pro červené



- Chromatická vada zvětšení x polohy ohniska

-minimalizace

- použití odražných ploch
- kombinace spojka, rozptylka
- volba materiálu s vhodným průběhem n , korekce na některé vlnové délky *APO sklo*
- korigovaná soustava - achromaty - *volitelné konstrukce*

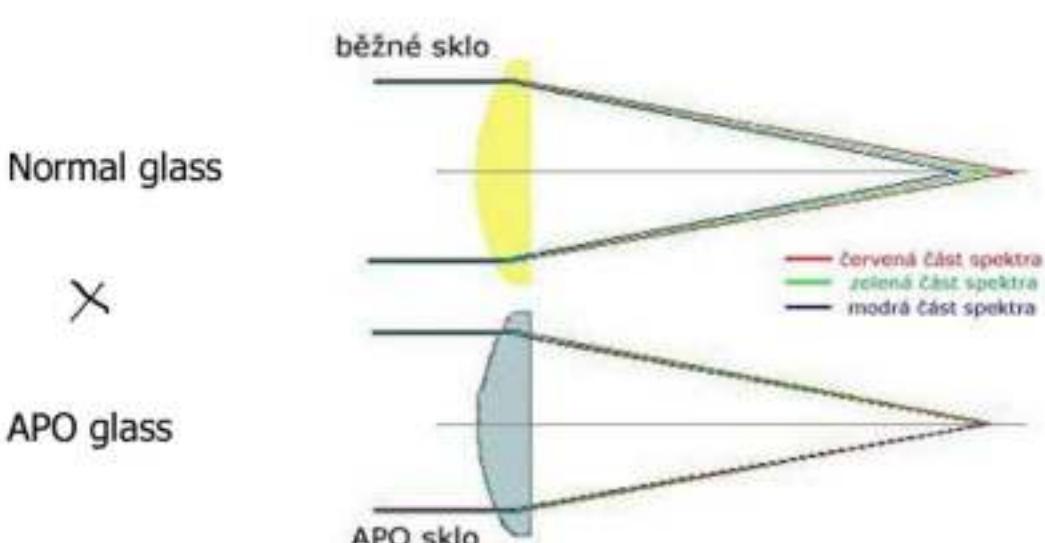
Máme-li soustavu dvou čoček s obrazovými ohniskovými vzdálenostmi f_1 a f_2 , jejichž vzájemná vzdálenost je v , platí pro minimalizaci barevné vady vztah:

$$\frac{f_2 - v}{f_1 - v} = -\frac{ve_1}{ve_2}$$

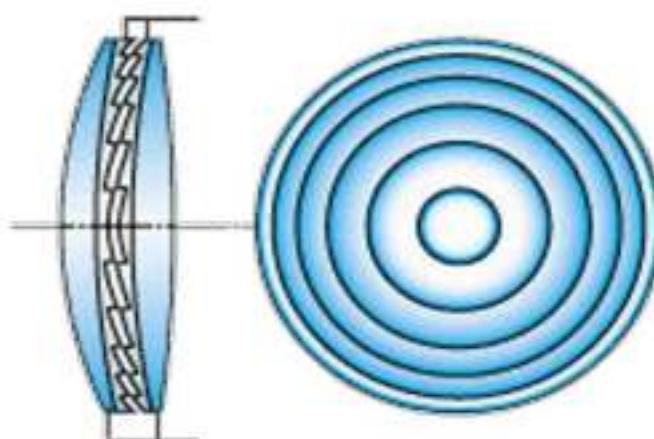
kde jsou tzv. Abbeova čísla.

Z této podmínky pro minimalizaci barevné vady vyplývá, že pokud jsou Abbeova čísla kladná (normální disperze) a vzájemná vzdálenost obou čoček se blíží k nule, musí být jedna z čoček spojná a druhá rozptylná. Naopak pokud máme dvě stejné čočky pak pro minimalizaci barevné vady bude jejich vzájemná vzdálenost.

$$v = \frac{f_2 + f_1}{2}$$



optický prvek s difraktivní strukturou. Vykazuje přesně opačnou barevnou vadu než běžná čočka, zařazuje se proto pro korekci barevné vady.



Optické systémy jsou v praxi vždy zatíženy různými druhy vad a zkreslení, které negativně ovlivňují kvalitu obrazu a přenosové vlastnosti těchto systémů. Proto je potřeba se soustředit na odstranění těchto vad a zkreslení.

↳ Seidelovy a Zernikoovy polynomy pro popis vad

10) Absolutně černé těleso, Planckovo zákon, barevná výplň

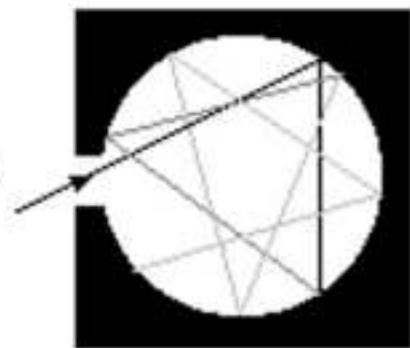
- počtuje veškeré elektromagnetické záření dopadající na jeho povrch
- vysílá elektromagnetické spektrum v závislosti pouze na své teplotě dle Planckova vysílače zákona
- příklad: hořadlo
- realizace \Rightarrow dutá koule s malou dírkou pro vstup

záření, záření se vnitřku odráží solikrát, že všechna jeho energie je absorbována a vysázena stěnami

- ideální těleso
- pro všechny frekvence světla (el.mag. záření) $\alpha = 1$
- díky experimentálnímu měření je známo, že α a ε jsou funkce frekvence v a teploty T
- platí Kirchhoffův zákon o spojitém spektrálním vyzařování (tělesa, která hodně absorbuji zároveň hodně vyzařují)

$$\frac{\varepsilon}{\alpha} = f(T, v)$$

- emitované záření nezávisí na směru (je vyzařováno všemi směry)
- aproximace dutým tělesem s malým otvorem
 - záření vniká do dutiny s černým povrchem
 - záření zůstává uvnitř a je odrazeno pohlceno
 - otvor dutiny se pak jeví jako absolutně černý
 - zahřátím můžeme pozorovat elektromagnetické záření



Planckův zákon

- Popis intenzity vyzařování jednotlivých frekvencí / vlnových délek el.mag. vlnění abs. černého tělesa
- Využívá se spektrální výkonová hustota ρ [W/m³]

$$\rho = f(T, \lambda)$$

Černé těleso nemůže vyzařovat nebo pohlcovat energii v libovolném množství spojité, ale nespojitě po kvantech



$$\rho(T, \lambda) d\lambda = \frac{8\pi h c_0 d\lambda}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\lambda k_B T} - 1}$$

Maximum vyzařování pro danou teplotu

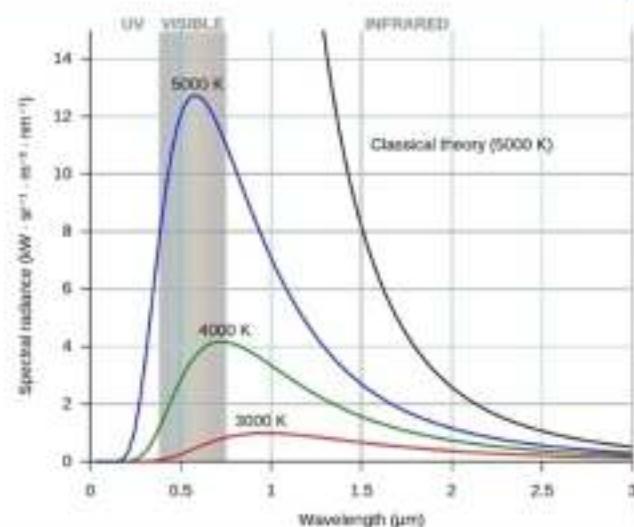
$$\lambda_{max} = \frac{b}{T}$$

Wienův posunovací zákon

Celková hustota energie tepelného záření přes všechny vlnové délky

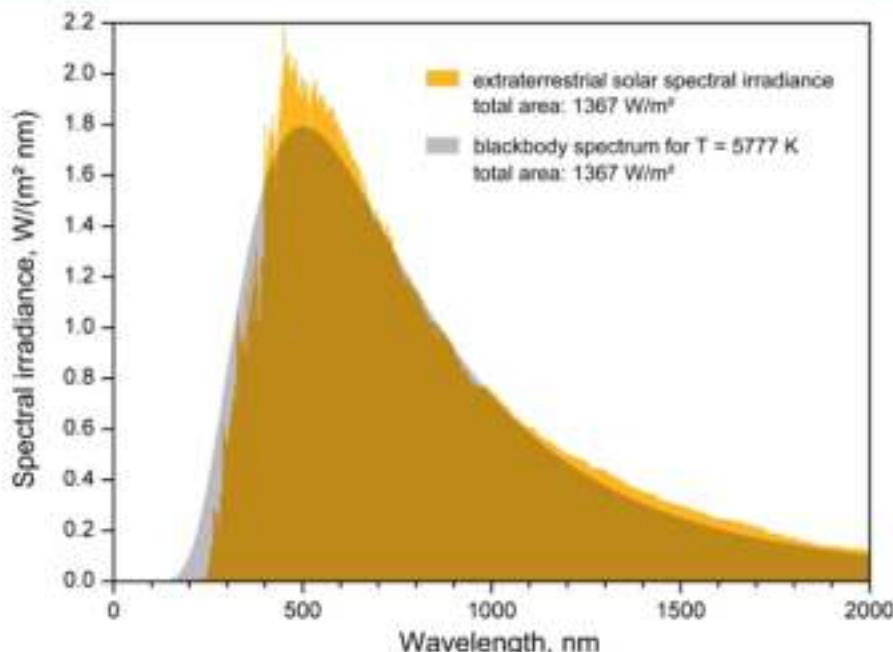
$$M_e = \sigma_{SB} \cdot T^4$$

Stefan-Boltzmanův zákon



Slnce a absolutně černé těleso

- Slunce – bliží se vyzařování abs. černého tělesa
- cca. 5800K
- Objem, v němž záření vzniká, je veliký v porovnání s povrchem, kterým se záření dostává ven

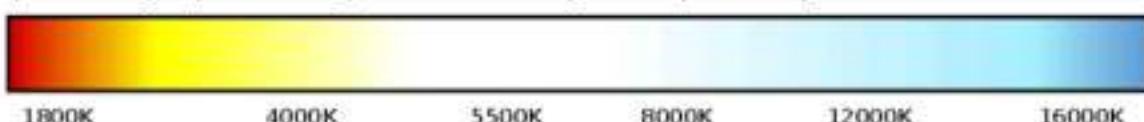


https://commons.wikimedia.org/w/index.php?title=EffectiveTemperature_5777_K.png

Barevná teplota

Barevná teplota (také známá jako teplota chromatičnosti)

taková teplota, jakou by mělo AČT, abychom vnimali stejný barevný vjem jako je daná barva.
tj. např. hvězdy – podle barvy můžeme určit jakou teplotu mají



11) Elektromagnetická vlna - parametry a popis, Comptonův efektor

- během první poloviny 20. století se částicím s nenulovou klidovou hmotností začaly přidávat vlnové charakteristiky – návrh de Broglie (1923)
- Částicím s hmotností m pohybující se rychlostí v , mající hybnost $p = mv$ se začaly přiřazovat rovinné vlny o vlnové délce

$$\lambda_{částice} = \frac{h}{mv}$$
- Vlnové chování hmotných částic – využíváno u experimentů s **neutronovou difracíí**, **elektronovým mikroskopem** a jiné.
- Oklikou se tak dostáváme k původním principům optiky a uvažování nad světlem jako vlněním a paprsky
- Částicový popis světla je velice důležitý pro práci s nízkými světlenými toky

Vlnový charakter světla

Projeveno především jevy jako:

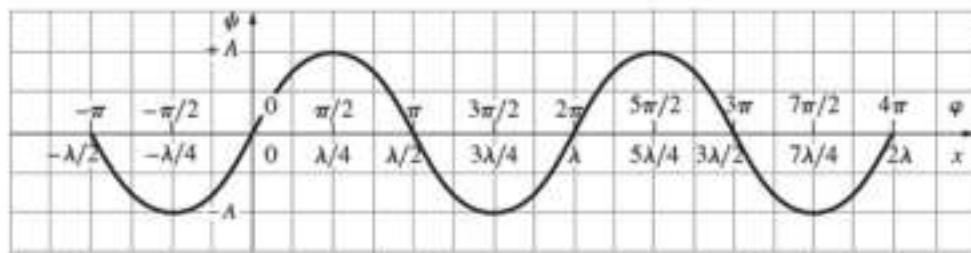
- **Interference (koherence)**
- **Polarizace**
- **Difrakce**

Nejjednodušší řešení – harmonická funkce/vlnění

$$\psi(x, t) \Big|_{t=0} = \psi(x) = A \sin kx = A \sin 2\pi x \lambda = A \sin \varphi$$

Jednodimensionální diferenciální vlnová rovnice

$$\frac{\partial^2 \psi}{\partial x^2} = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 \psi}{\partial t^2}$$



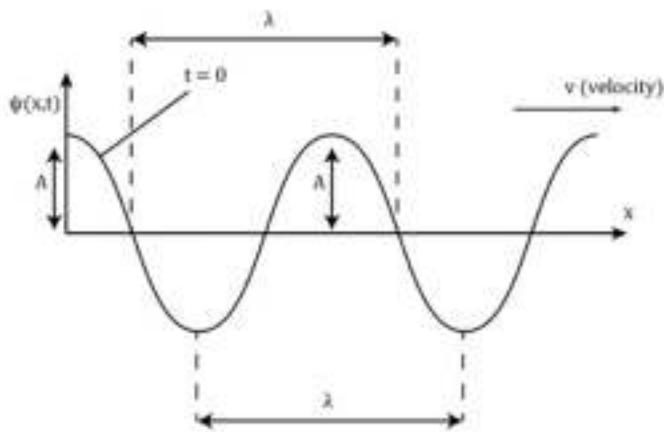
Harmonická vlna

- ❖ Několik ekvivalentních vyjádření harmonické vlny
- ❖ Jedna daná frekvence (monochromatická)
- ❖ Reálné vlny obsahují celé skupiny frekvencí

$$\psi(x, t) = A \sin(kx \mp vt)$$

$$\psi(x, t) = A \sin k(x \mp \omega t)$$

$$\psi(x, t) = A \sin 2\pi v \left(\frac{x}{v} \mp t \right)$$



$$\text{Vlnové číslo: } k = 2\pi/\lambda$$

$$\text{Frekvence: } \omega = 2\pi v, v = \nu/\lambda$$

$$\text{Perioda: } \tau = 1/v, \tau = \lambda/v$$

Při šíření světlené vlny ve vakuu $v = c$, ($v = c/n$)

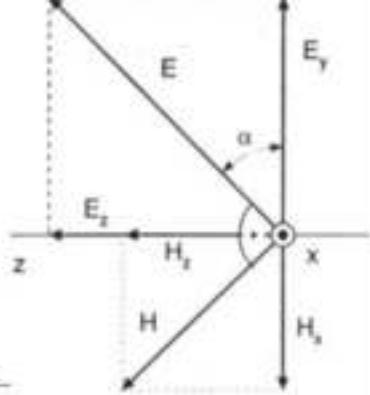
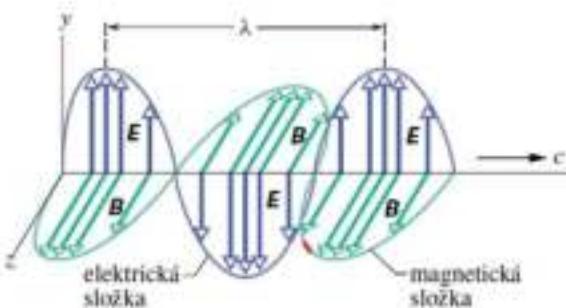
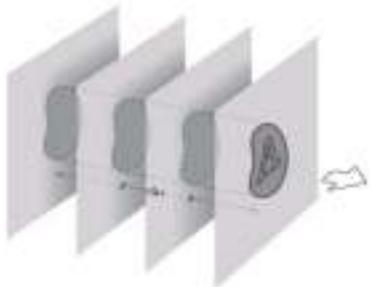
Rychlosť světla $c = 299\,792\,458\text{ m/s}$

Přenos energie

Tok energie v elektromagnetickém poli
(Poyntingův vektor)

Vektory intenzity elektrického a magnetického pole u rovinného elektromagnetického vlnění

$$\mathbf{S} = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} \text{ [W/m}^2\text{]}$$



12) Huygensův princip

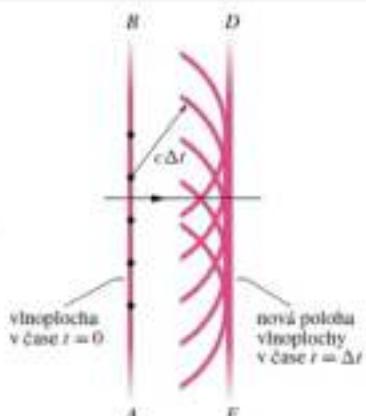
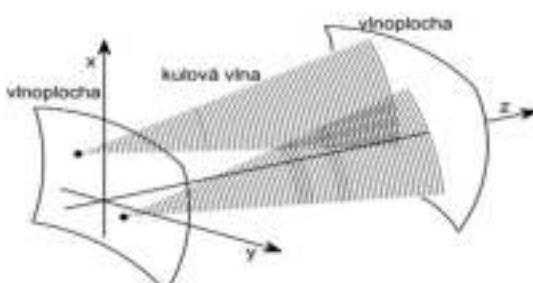
Hyugensův princip

- Všechny body na vlnoploše složí jako zdroj dalších kulových vln

Světlo odpovídá přičnému vlnění

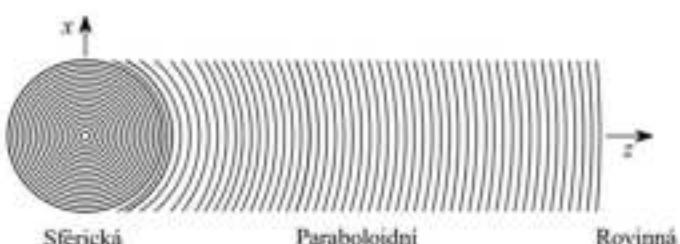
Šíření vlny

- Kulová
- Paraboloidní
- Rovinná vlna (vzdálené pole)

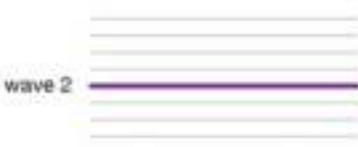
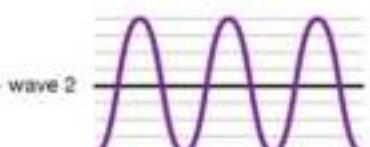
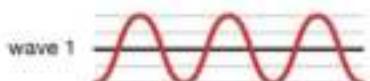


Setkání více vln – může (nemusí) nastat jev zvaný **Interference**

- konstruktivní
- destruktivní



Wave interference



Celočíselné násobky vlnové délky

- **konstruktivní interference**

Poločíselné násobky vlnové délky

- **destruktivní interference**

wave 1 + wave 2

wave 1 + wave 2

- důsledek - experiment: Youngovo pokus na doaji řeřbině

13) foton - popis, charakteristika

- z makroskopického hlediska se můžeme dívat na elektromagnetické vlnění o korpuskulární podobě, světlo jsou 'částice' - částice

- Planck pozorováním zjistil, že světelná energie je vyzařována v balíčcích (kvantech) a nikoliv spojitě
- potvrzeno A. Einsteinem
 - světlo samotné jsou kvanta (vysvětleno fotoelektrickým jevem)
 - světlo je složeno z částic - fotónů
- energie světla je tedy kvantována
- nejmenší rozdíl mezi 2 hodnotami energie světla je energie fotona
- každý foton má zároveň hybnost $p = \hbar k = h\lambda$
- Vlnová délka je vyjádřena jako $\lambda = \frac{c}{\nu}$
- Spin (směr hybnosti, pravotočivá a levotočivá kruhová polarizace) $s = \pm \hbar$

$$E = 0 \text{ (klidová energie)}$$

$$E = h\nu$$

k - vlnový vektor

\hbar - redukovaná Planckova konstanta

$$\gamma = \frac{E}{c} = \frac{\hbar f}{c} = h\nu \quad m = \frac{E}{c^2} = \dots \text{ (relativistické)}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

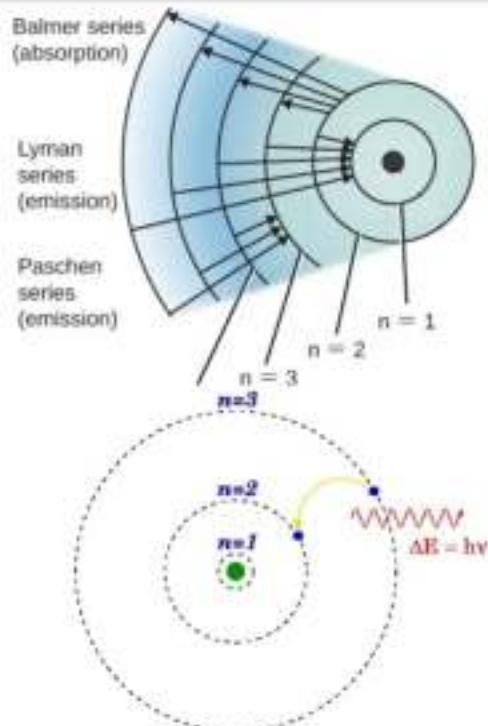
$$\text{klidová } m_0 = 0$$

- vlnově částicový dualismus

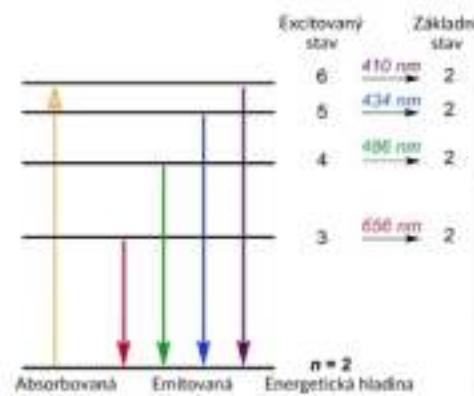
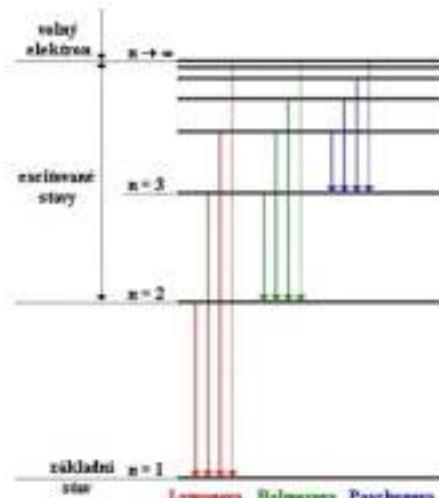
- jako částice: fotoelektrický jev
- jako vlna

14) Bohrův model atomu

- Atom je stabilní soustava složená z kladně nabitého jádra, v němž je soustředěna téměř celá hmotnost atomu, a z elektronového obalu.
- Pokud jsou náboje navzájem kompenzovány atom je elektricky neurální.
- Atom se může nacházet pouze v **kvantových stacionárních stavech** s určitou hodnotou energie (na určitých **energetických hladinách**). V takovém stavu atom nevydává ani nepřijímá energii a rozložení elektronů v jeho obalu je časově neproměnné.
- Elektrony se tak pohybují v určitých hladinách nebo trajektoriích kolem jádra
- První model atomu založený na principu kvantování energie
- Popis atomu vodíku (aplikovatelný na systémy s jedním elektronem)



- S rostoucím kvantovým číslem n
 - Stoupá energie elektronu
 - Energie elektronu – záporná
 - Nulová energie (jádro a elektron na sebe nepůsobí)
 - Elektron pro vstup na vyšší hladinu potřebuje **energií z vnějšku** (atom excitován) – extrémem je ionizace (elektron odstraněn)
 - Excitovaný atom – nestabilní částice s krátkou dobou života
 - Přeskok elektronu z vyššího do nižšího stavu – **vyzáření fotonu!**



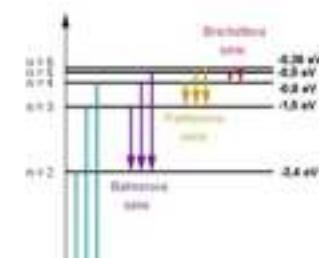
Viditelné emisní spektrum vodíku

- Předpoklad, že na elektron působi 2 sily
 - Odstředivá F_c
 - Elektrostatická F_e
 - Obě stejně velké opačně orientované
 - Energie elektronu E_n
- Energie vyzářeného fotonu musí odpovídat

$$F_c = F_e$$

$$\frac{m_e v^2}{r} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \cdot \frac{e^2}{r^2}$$

$$E_n = -\frac{e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}, \text{ kde } n = 1, 2, 3, \dots$$



$$hf = E_n - E_m$$

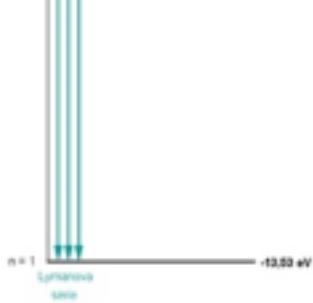
$$hf = E_n - E_m = -\frac{e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n_n^2} + \frac{e^4 m}{8\epsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n_m^2}$$

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{e^4 m}{8\epsilon_0^2 c h^3} \cdot \left(\frac{1}{n_m^2} - \frac{1}{n_n^2} \right)$$

Bohrův model dnes již překonán

Vhodný pro jednoelektronový popis (vodík)

Osvědčil se jako myšlenka popisující kvantový stav systému (atomu)



15) Fotoelektrický jev

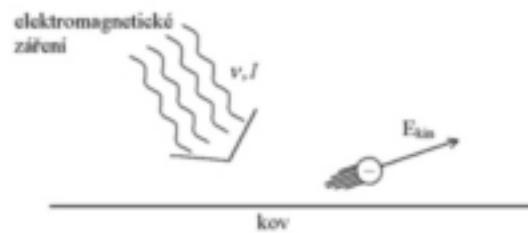
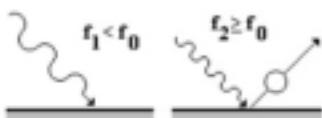
- dopadající foton o dané energii uvolní e^- (excitace)
z obalu atomu, energie fotonu odpovídá přesné
změně potenciální energie fotonu

- Výzkum působení záření a látky (pozorováno Herz 1887)
- Záření uvolňuje z povrchu některých látok elektrony
- Tyto elektrony pak mohou přenášet el. proud
- Popsáno A. Einsteinem 1905 (Nobelova cena 1921)
- Musí být dodrženy zákony zachování energie a hybnosti

$f_1 \leq f_0$ - nedochází

$$E = hf = W_{ioniz} + E_{kin} = W_{ioniz} + \frac{1}{2} m_e v^2$$

$f_1 \geq 0$ - dochází *



Rozlišujeme 2 typy fotoelektrického jevu

- Vnější (elektron uvolněn z materiálu)
- Vnitřní (elektron uvolněn uvnitř materiálu)

W_{ioniz} – výstupní práce (minimální potřebná energie k uvolnění elektronu)
 E – energie dopadajícího fotona

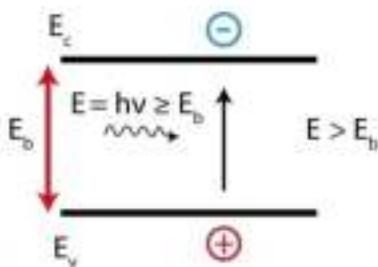
* Aby došlo k fotoefektu $E \geq W_{ioniz}$

□ Vnější fotoelektrický jev

- ❖ elektrony uvolněny mimo materiál
- ❖ „fotoelektrony“ – pouze označení
- ❖ cesium – $\lambda_0 = 642$ nm, stříbro – $\lambda_0 = 264$ nm
- ❖ fotokatoda, fotonka, fotonásobič, ...
- ❖ rentgen (inverzní fotoefekt)

□ Vnitřní fotoelektrický jev

- ❖ elektrony uvolněny do materiálu, často PN přechod polovodiče
- ❖ změna vodivosti materiálu
- ❖ totožně jako u vnějšího fotoefektu – každý polovodič má jinou „absorpční hranu“ (různé velikosti a typy zakázaných pásů)
- ❖ fotodiody, fotoodpory, CCD



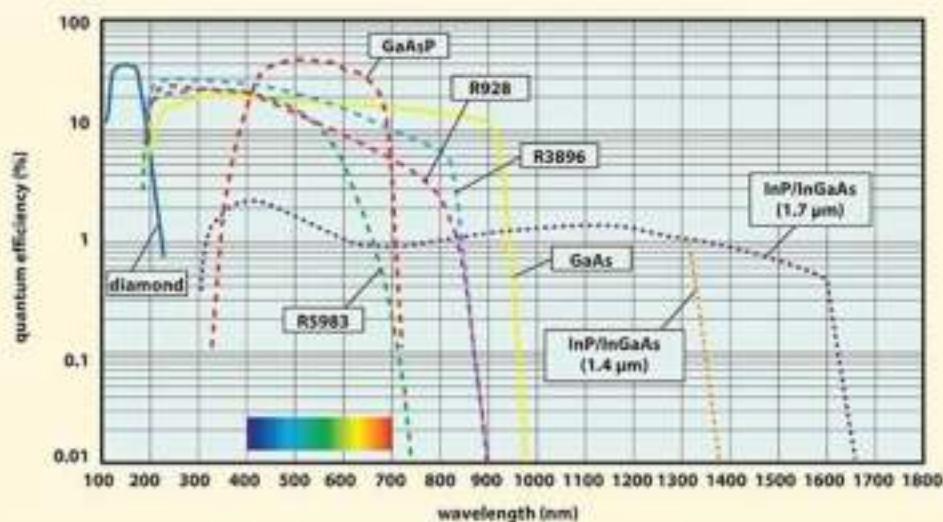
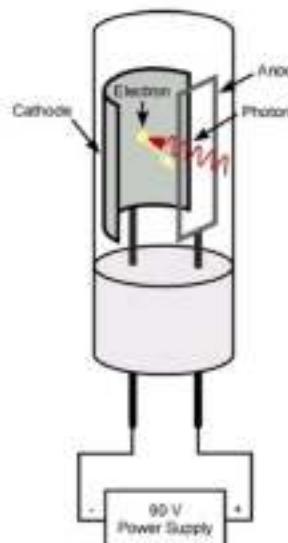
$$\lambda \leq \frac{1,24}{E_b}$$

Fotonka, Fotokatoda

□ Různé materiály pro fotokatodu, různá spektrální odezva

□ Fotonka – detekce světla, uvolnění elektronů z fotokatody po dopadu fotonu

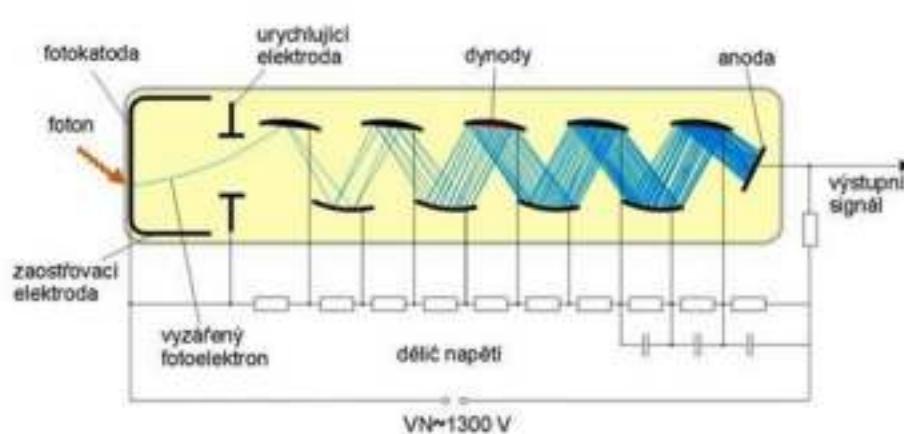
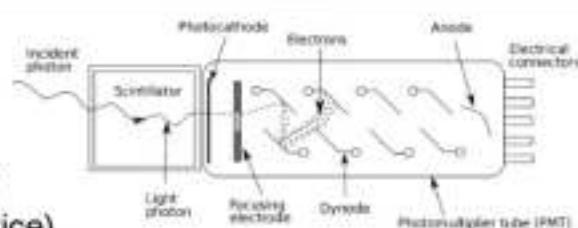
□ Evakuovaný prostor



Fotonásobič

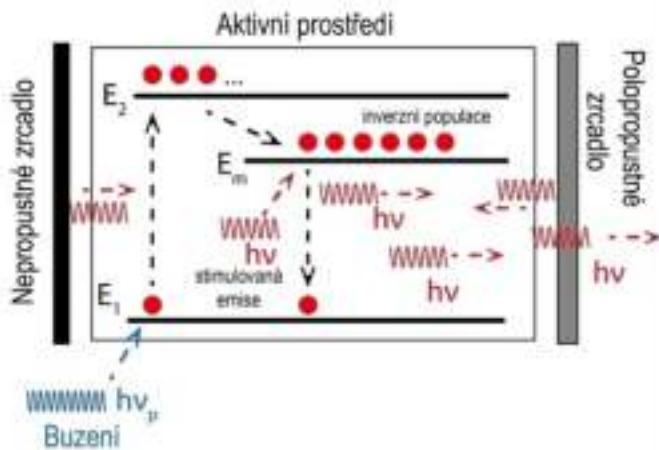
□ Vznik prvního fotonásobiče 1934

- Znásobení paprsků viditelného světla pomocí fotoefektu
- Urychlení elektronů – 1 – 2 kV, kaskáda dynod
- Princip fotonky využitý v televizních snímačích (do CCD)
- Často se scintilátorem na vstupu (detektory v jaderné fyzice)



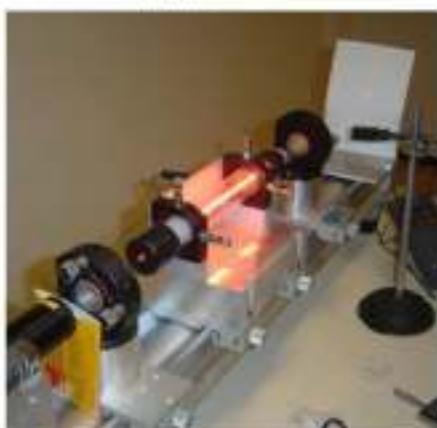
16) Láčkovní princip laseru

- Různé druhy energie pro vytvoření luminiscence lze využít k výrobě laseru
- Dodání energie (osvětlení, el. proud, chemická reakce)
 - Vybuzení atomů na vyšší energetickou hladinu (aktivní prostředí)
 - Vytvořena inverzní populace elektronů
 - Stimulovaná emise díky invaznímu prostředí pravděpodobnější než absorpcie
- Stimulovaná emise
- Zpětná vazba
 - Akumulace energie pomocí zpětné vazby
 - Laserové oscilace
 - Soustava zrcadel (min. 2)
 - Jedno s maximální odrazivostí, druhé částečně propustné
- Zesílení světla v rezonátoru (replikace fotonů pomocí stimulované emise)



Parametry

- Koherence
- Monohromatičnost
- Směrovost
- Malá divergence výstupního laserového paprsku

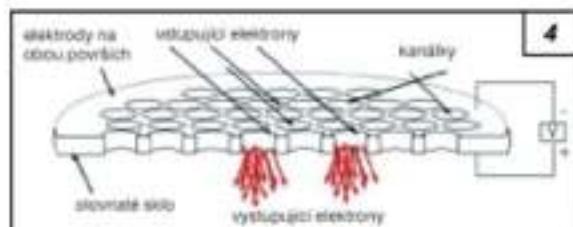


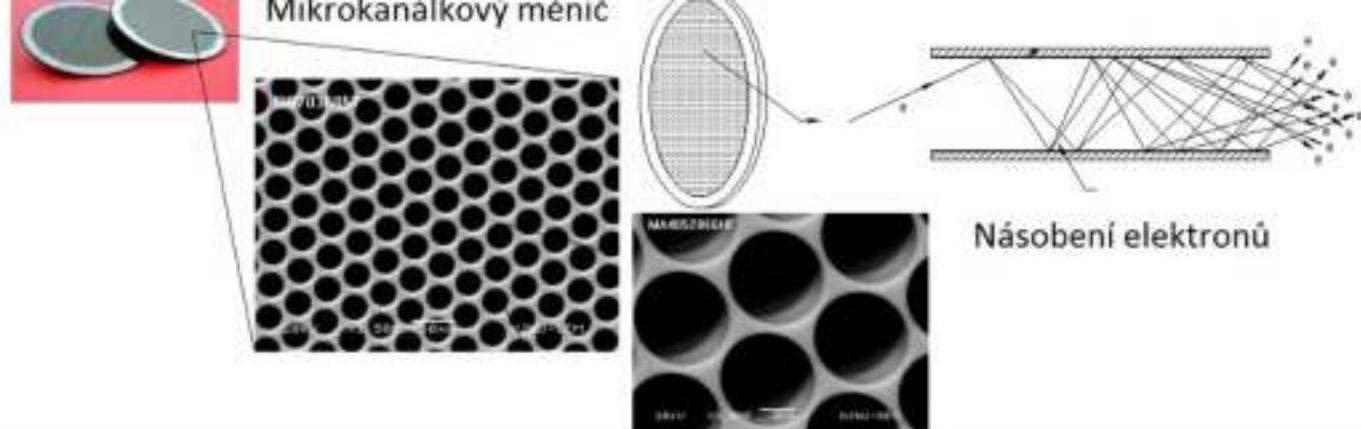
Typy

- Pevnolátkové
 - Excitace většinou optická
 - Aktivní prostředí – krystalické nebo amorfni izolanty s příměsi
 - VIS - IR
- Kapalinové
 - Aktivní prostředí – roztoky organických barviv (krátká životnost)
 - UV - MWIR
- Plynné
 - HeNe, CO₂, Ar
 - Kontinuální i pulzní režim
- Polovodičové
 - Zdrojem je LED
 - Vyšší divergence svazku
 - Snadná modulace výkonu

17) Zesilovače obrazu a mikrokanálová detektorka

- ❖ Sekundární emise elektronů uvnitř válce
- ❖ Využití pro zesilovače obrazu a noční vidění
- ❖ Rozlišení ovlivňuje počet kanálků





Několik generací zesilovačů obrazu

□ Generace 1

- Pouze zachycení fotonu fotokatodou
- Zobrazení na fosforovém stínítku
- Fokusace elektronovou optikou
- Proximální fokusace na fos. stínítko
- Vysoká rozliš. schopnost

□ Generace 2

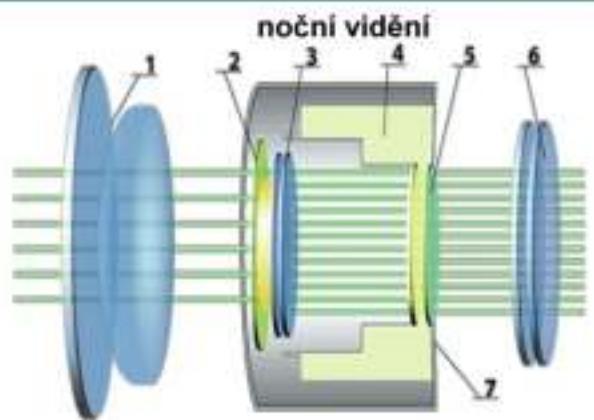
- Použití MCP a sekundární emise elektronů
- Vyšší zesílení, hroší rozlišovací schopnost

□ Generace 3

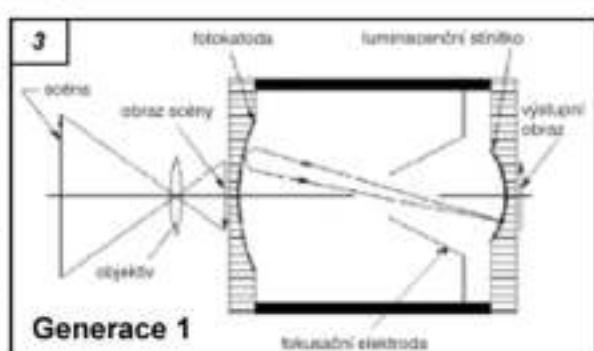
- Kombinace proximitní fokusace a MCP
- Vyšší citlivost v IR, slabší v zelené a špatná v modré, náchylnost k tepelnému šumu

□ Generace 3-4

- Modifikace 3. generace
- Zvýšení citlivosti fotokatody, odolnost vůči šumu, až 3x lepší rozlišovací schopnost

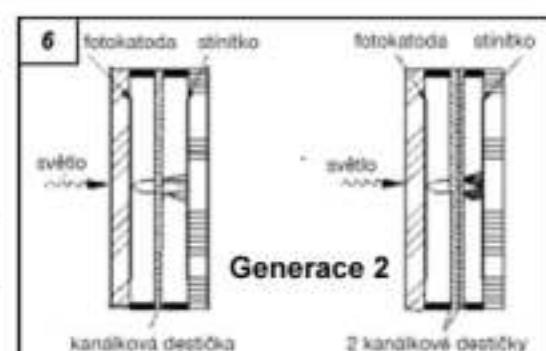
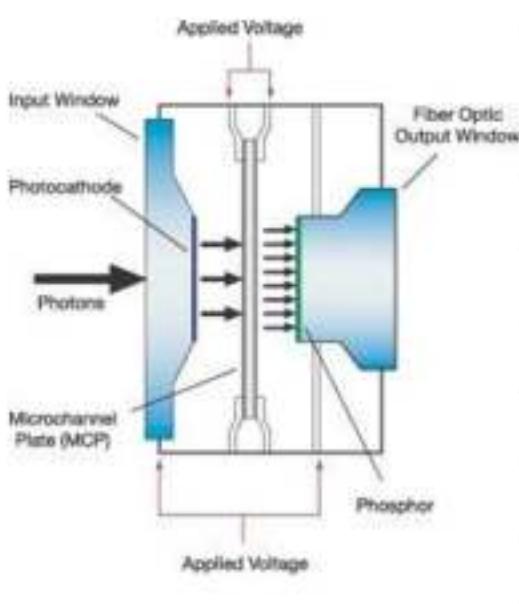


1. Čočka objektivu
2. Fotokatoda
3. Mikrokanálová deska (MCP)
4. Zdroj napětí
5. Fosforové stínítko
6. Čočka okuláru
7. Obal měniče



Generace 1

ICCD (intensified CCD)



Generace 3

a) Absorpce

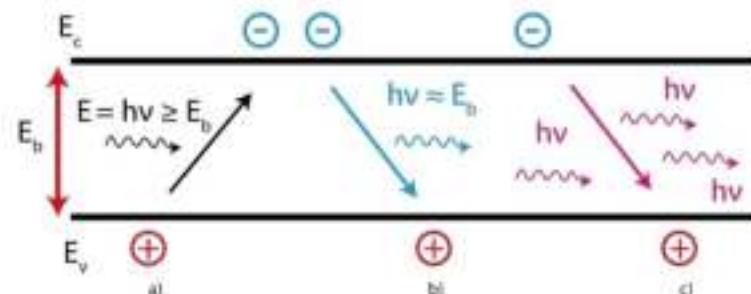
- Využívané u polovodičových detektorů
- Výběr materiálu dle aplikace (absorpční hrana)

b) Spontánní emise

- Excitovaný elektron spontánně rekombinuje s dírou
- Energie vyzářená ve formě fotonu
- LED, fluorescence, fosorescence, ...

c) Stimulovaná emise

- Rekombinace elektronu s dírou stimulovaným fotonem
- Vyzáření fotonu o stejných parametrech
- Vznik koherentního záření (stejná fáze, polarizace, vlnová délka jako stimulační foton)
- LASER (Light Amplification by the Stimulated Emission of Radiation)



- Energie elektronů v atomech krystalu se překrývají – vznikají pásy
- Energetické pásky se mohou překrývat
- Zakázaný pás odděluje dva nepřekrývající se pásky
- Valenční a vodivostní pásky energií

□ Luminiscence – vybuzení atomu do exc. Stavu a následné vyzáření fotonu

- ❖ Fluorescence – mezi povolenými stavami elek., velice krátký jev (nanosekundy)
- ❖ Fosorescence – mezi zakázanými stavami - až minuty dlouhý jev

-metastabilní stav

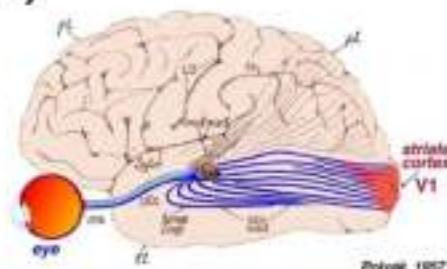
Mechanismus vybuzení

- Fotoluminiscence – luminiscence je vyvolána elektromagnetickým zářením (např. v případě zářivky)
- Elektroluminiscence – luminiscence je vyvolána elektrickým polem (LED)
- Katodoluminiscence – luminiscence je vyvolána dopadajícími elektrony (např. stínítka televizní obrazovky)
- Chemoluminiscence – luminiscence je vyvolána chemickou reakcí (např. v bioluminiscenci)
- Termoluminiscence – luminiscence je vyvolána vztřístem teploty
- Radioluminiscence – luminiscence je vyvolána působením jaderného záření
- Triboluminiscence – luminiscence je vyvolána působením tlaku
- Luminofory – látky u nichž nastává luminiscence
- Scintilace - Vznik slabých světelných záblesků po průchodu ionizující částicí (jaderná fyzika)

19) Anatomie lidského oka, sítnice a očního mozu

- ❖ Lidské oko umožnuje pozorování optických jevů
- ❖ Zprostředkování **vnímání světa, necitlivé** na polarizaci
 - Hlavní parametr: **Detekce dopadajícího světla**
- ❖ Přímá návaznost na mozek
 - složité na přesný popis funkcionality
 - **výzkum** a zájem především v **medicinských oborech**

Optická cesta: **dopadající světlo** -> **rohovka** (*cornea*) -> **přední komora vyplněna kapalinou** (*humor aqueus*) -> **čočka** (*lens crystallina*) -> **sklivec** (*corpus vitreum*) -> **stínice** (*retina*) -> **optický nerv** (*optical nerve*) -> **zrakové centrum** (*striate cortex*)

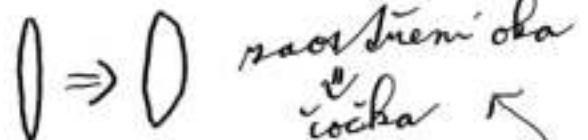


□ Kulový tvar, párový orgán

- průměr přibližně **24 mm**

□ Největší **relativní index lomu** na rozhraní vzduch rohovka (přibližně **1,00 / 1,38**)

□ Čočka ve tvaru dvojvypuklé **spojky**



□ Změna optické **mohutnosti** pro zaostření na různou vzdálenost

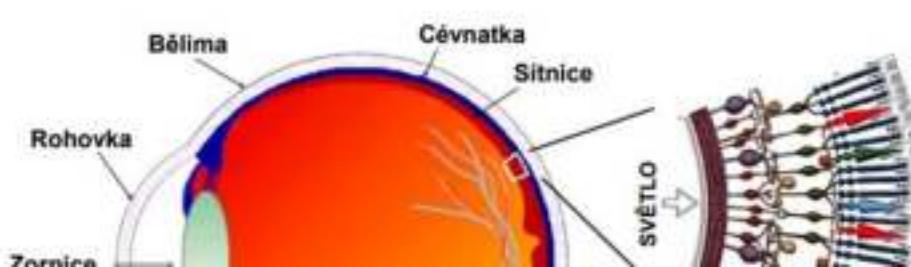
- **Akomodace!** – umožněna prstencovým svalem na obvodu čočky
- **Blízký bod:** nejbližší bod v předmětovém prostoru (střední hodnota **cca 20 cm**), který oko vidí ostře při maximální akomodaci.
- **Optická mohutnost** (rohovka 42 D, čočka 18 D, kapaliny 2-3 D)

□ Nitrooční tlak 2 až 3 kPa

□ **Rozlišovací schopnost** oka (rozlišení dvou blízkých bodů) 1', někdy až 1'' (tj. 10 – 12 čar/mm pro vzdálenost 25 cm)

- **iris** – duhovka
- **pupil** – zornice, zřítelnice
- (vstupní pupila)
- **sclera** – bělima
- **cornea** – rohovka
- **lens** – oční čočka
- **conjunctiva** – spojivka
- **vitreous** – sklivec

- **ciliary body** – řasnaté tělíska
- **retina** – sítnice
- **choroid** - cévnatka
- **fovea** - jamka v oblasti žluté skvrny
- **macula lutea** - žlutá skvrna
- **optic nerve** – optický nerv
slepá skvrna





□ Duhovka

- hladké svalstvo s kruhovým otvorem uprostřed, mění velikost vstupního otvoru – **clona**
- Barevné pigmenty zamezují průniky světla okolo (modré – nejméně, hnědá a černá nejvíce).

□ Zornice – vstupní otvor o průměru 2 – 6 mm

□ Bělima – tuhá vazivová blána (tloušťka – 0,3 – 2 mm).

- Upnutí okohybných svalů, zrakového nervu.
- Žlutá barva – příměs tukové tkáně.

□ Rohovka

- bez nervů, nepodmíněný reflex (dotek), sklíčko u hodinek
- deformace – astigmatismus, dvojité vidění

□ Čočka

- tloušťka 4 mm,
- vypuklo - vypuklá **spojka**

□ Spojivka

- slizniční blána
- kryje bělimu

□ Sklivec

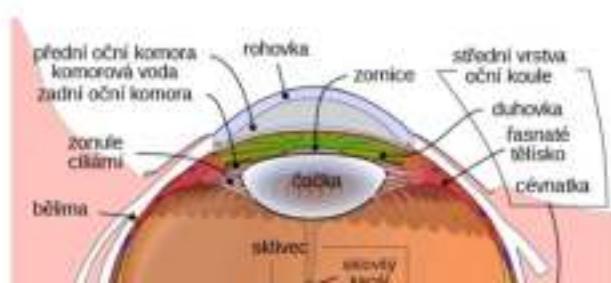
- vyplňuje většinu vnitřního prostoru oční koule
- rosolovitá průhledná hmota

□ Řasnaté tělíska

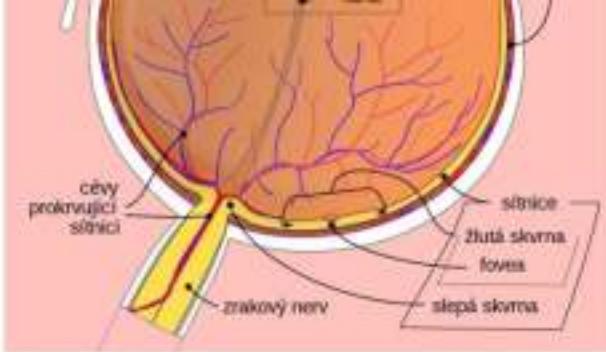
- paprsčitě uspořádaný sval z hladké svaloviny na něž je tenkými vlákny zavěšena čočka (stahy svalstva mění **zakřivení svalstva - akomodace čočky**)

□ Sítnice

- jemná několika vrstevná blána silná asi 0,2 – 0,4 mm



- smyslovými buňkami sítnice jsou **tyčinky a čípky**



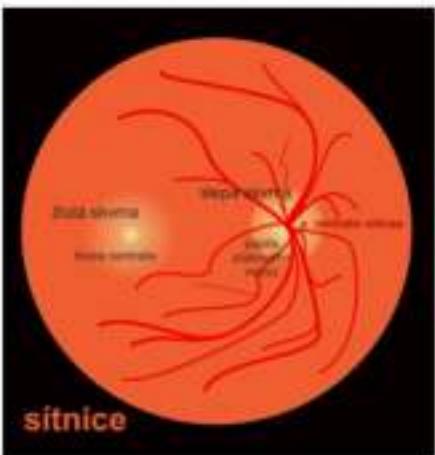
□ Cévnatka + živnatka (uvea)

- obsahuje velké množství cév a pigmentových buněk
- hnědočervená
- v zadní části je tvořena cévnatkou (choroidea)
- v předu přechází v řasnaté tělíska

□ Sítnice (retina)

- snímání obrazu $\Rightarrow 42 \text{ mm}^2$
- vychlípenina mozku
- slepá skvrna (oční nerv)
- žlutá skvrna (osa oka)
- Několik typů **neuronových buněk**

□ Optická nerv - 800 000 axonů



□ Hustota rozložení světlocitlivých buněk $\Rightarrow 130/\text{vlákno}$

- Není rovnoměrná** na celé sítnici \Rightarrow *optický nerv*

□ Čípky (cones), průměr 4 mikrony, počet 7E6

- Největší** koncentrace ve **žluté skvrně** (fovea)

□ Tyčinky (rods), průměr 2 mikrony, počet 1,3E8,

- reakce na 1 až 2 fotony
- Nejmenší** koncentrace ve **žluté skvrně** (fovea)

- čípky - víčení barev
- v noci neaktivní

- tyčinky - monochromatické
- citlivost pohyb a jas

□ Slepá skvrna

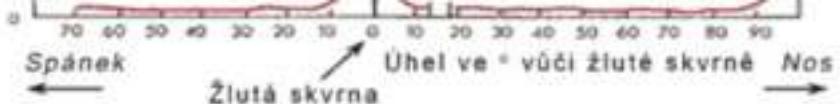
- napojení zrak. nervu
- hustota tyčinek - max. 5 – 6 mm od centra - cca 160 000 tyčinek/mm² - citlivost na **pohyb a změny jasu**

□ Jeden optický nerv (celkem 1 milion nervů)

- napojení více tyčinek – tj. **menší prostorové rozlišení** ale **vyšší citlivost**
- v průměru **130 světlocitlivých buněk** na jedno vlákno – tj. **kompres!**

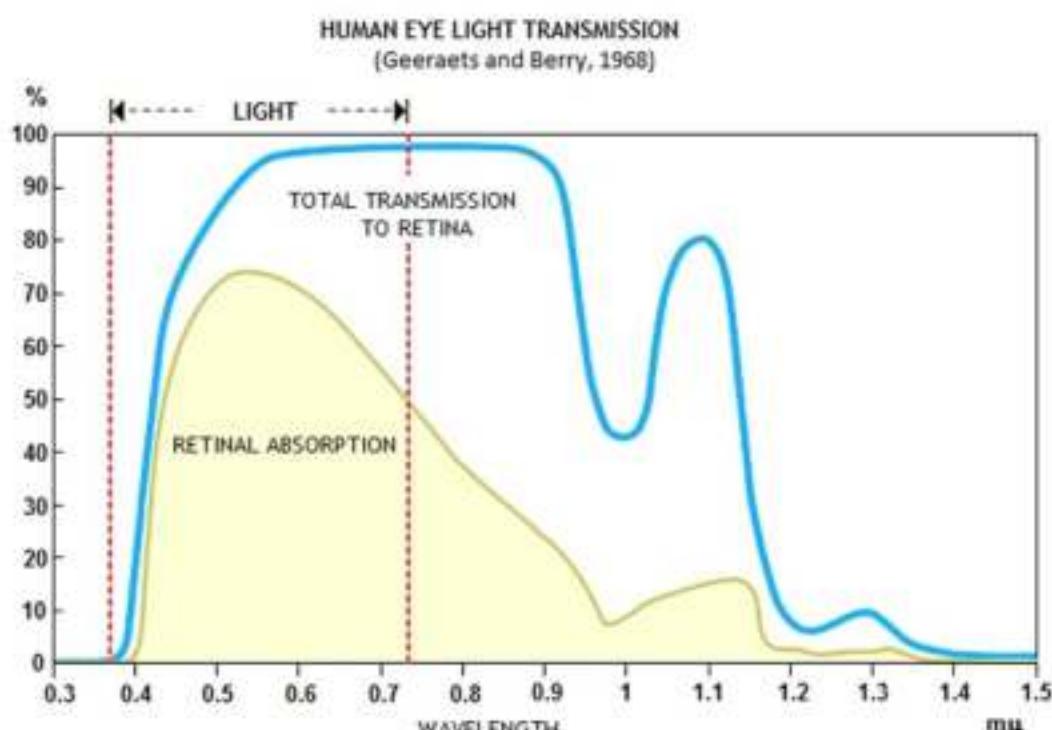
Graf horizontální hustoty čípků a tyčinek





□ Propustnost různých vlnových délek

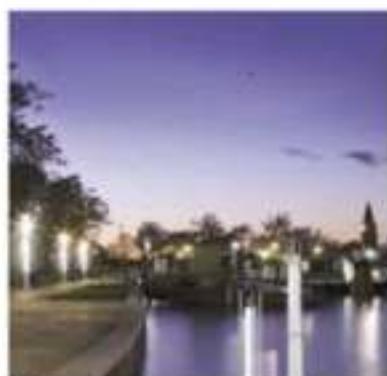
- VIS absorpcie na sítnici
- Propustnost část spektr UV, VIS a NIR na sítnici
- Světlocitlivé receptory **pouze na VIS** (cca 380 - 780 nm)



- Uplatnění **3 typů** vnímání světla pod rozlišnými světelnými podmínkami
- **Fotopické** (dostatečné přímé osvětlení) – čípky
- **Skotopické** (slabé světlené osvětlení) – tyčinky
- **Mesopické** (průměrné osvětlení) – kombinace čípky, tyčinky



Photopic



Mesopic



Scotopic

Allows color perception, mediated by cone cells.

Just enough light for color perception.

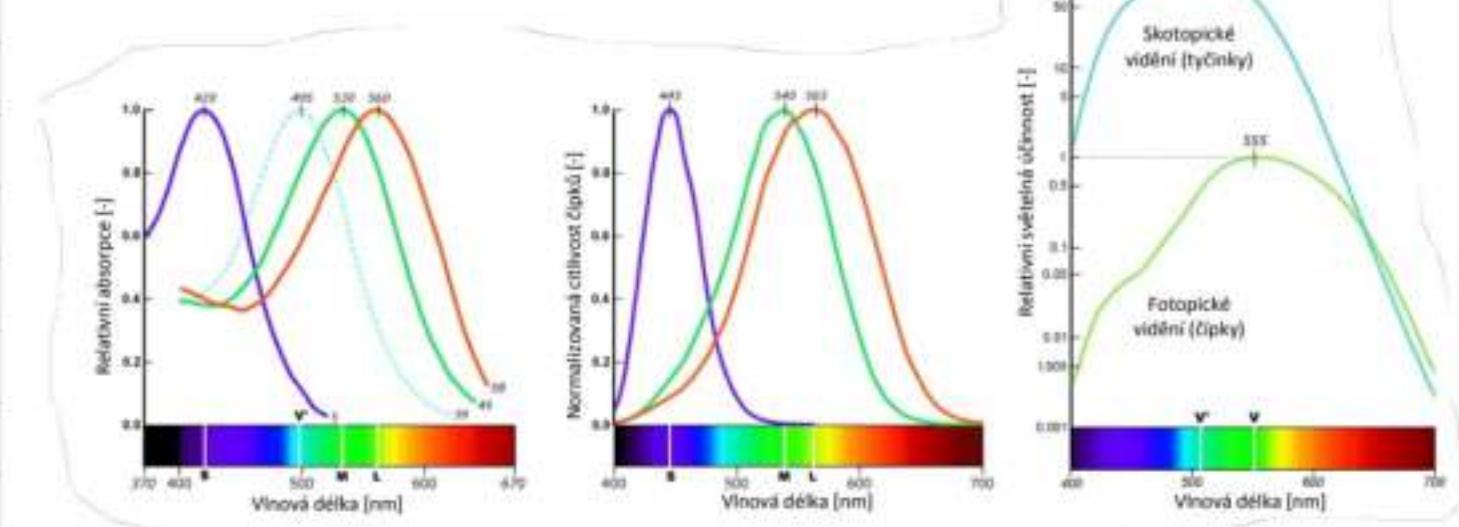
Vision mediated by rod cells, most

cone cells, most sensitive at blue, bluish-green and yellowish-green lights.

change in color sensitivity towards green-blue light.

sensitive at lime-green lights.

- Různé spektrální oblasti pro světlocitlivé receptory
 - Monochromatické (**skotopické**) vidění umožněné tyčinkami
 - 495 nm (505 nm)
 - Tři typy receptorů (**čípků**) pro **fotopické** vidění
 - 560 nm (565 nm) - **R**
 - 530 nm (540 nm) - **G**
 - 495 nm (445 nm) - **B**



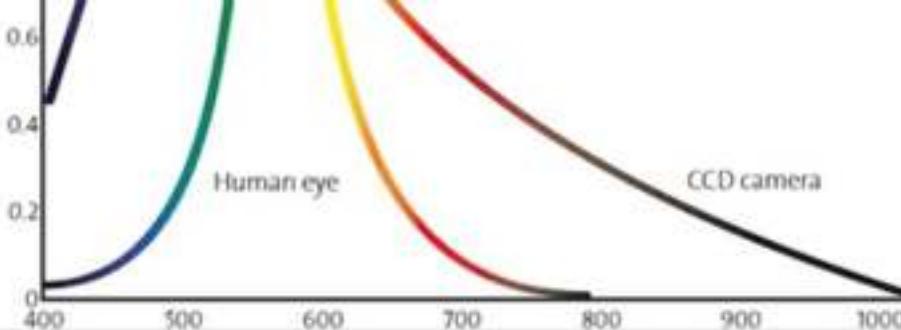
- říduška skorina =) největší počet světlocitlivých buněk

- asi 150 000 čípek/mm² (ekvivalent 10 000 dpi)
- neměří bez slýcinek
- každý čípek souběžně vlastní optický nero

- Oko nejcitlivější na **zelenou barvu 555 nm**
- Lidské oko necitlivé na UV a IR (receptory nejsou citlivé)
- CCD kamera, dle materiálu, citlivost přes různá pásma, často i UV, a IR
 - Používají se různé typy filtrů
 - Omezení pásma dopadajícího záření
 - Využití pro multispektrální aplikace

Relative sensitivity of a camera sensor vs. the human eye

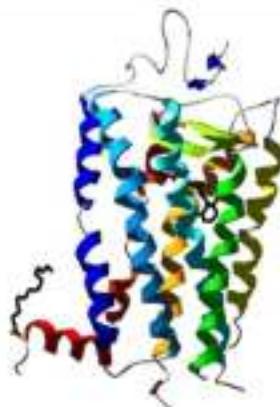




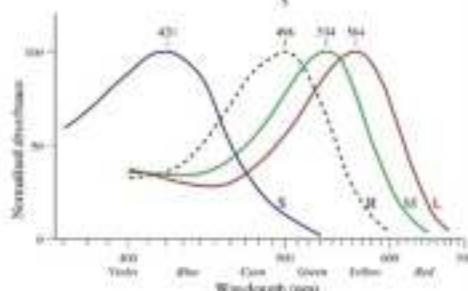
Enzymy

Rodopsin

- **pigment** (zrakový purpur) citlivý na světlo
- obsažen v **tyčinkách**, v membránovém disku
- transmembránový protein
- základní molekulární princip vidění
- schopný na základě **přicházejícího světla** vyvolat v buňce biochemickou dráhu, **biochemickou dráhu**, která směruje ke vzniku **nervových impulsů**



Čípky mají své **RGB pigmenty** (fotopsiny či jodopsiny)



Melanopsin (objeven na přelomu 21. století)

- fotosenzitivní bílkovinné barvivo světlocitlivých **ganglionových buněk (ale neobrazové)**
- Nejvyšší citlivost na **modrou barvu**
- aktuálně předmětem výzkumu v souvislosti vlivu modrého světla na **cirkadiální rytmus** člověka

20) Vidění, vady lidského zraku a záblesková sluch

Weber - Fechnerův zákon

- Vztah mezi **intenzitou podnětu** a **intenzitou subjektivního vjemu** (odezvou lidského oka, počítkem)
- Zjištěno, že intenzita smyslového vjemu (sluch, zrak) závisí **logaritmicky** na podnětu
- Využití adaptačních mechanismů pro rozsah osvětlení až **9 řádů** (100 : 1 → 100 000 : 1)

- **otvírání zornice** 2 – 8 mm (rychlé)
- **organizace receptorů** na sítnici
- **chemické a morfologické změny**
(koncentrace pigmentu)
až 40 minut

- Dynamicky
 - 1:10 skotopické
 - 1:1000 fotopické



Německý lékař Ernst Heinrich Weber (1795 - 1878)



Německý psycholog Gustav Theodor Fechner (1801 - 1887)

Obecně jasová dynamika scény

- **detailly až 1:30000** – tj. **15 EV** (200 úrovní)
- nízké úrovně jasu 1:10, denní osvětlení 1:10000 (tj. zachytitelný kontrast)
- jasové rozlišení (JND) 2% $C_0 = \frac{\Delta L}{L_0} = 0,02$

$$\Delta S = C_0 \frac{\Delta L}{L} \rightarrow S = C_0 \ln \frac{L}{L_0}$$

S – intenzita subjektivního vjemu;
 C_0 – konstanta;
 L – fyzikální intenzita podnětu působícího na receptor;
 L_0 – prahová intenzita, tedy absolutně nejnižší možná intenzita, jakou je schopný jedinec vnímat.

Analogie: V místnosti nainstalujeme na strop dostatečné množství stejných žárovek, a určitý počet jich rozsvítíme. Druhý člověk bude sledovat osvětlení knihy na stole. Pak rozsvítíme dvojnásobný počet žárovek než poprvé. Čtenářovi se bude zdát, že se osvětlení nezvýšilo dvakrát, ale jen o malý přírůstek.

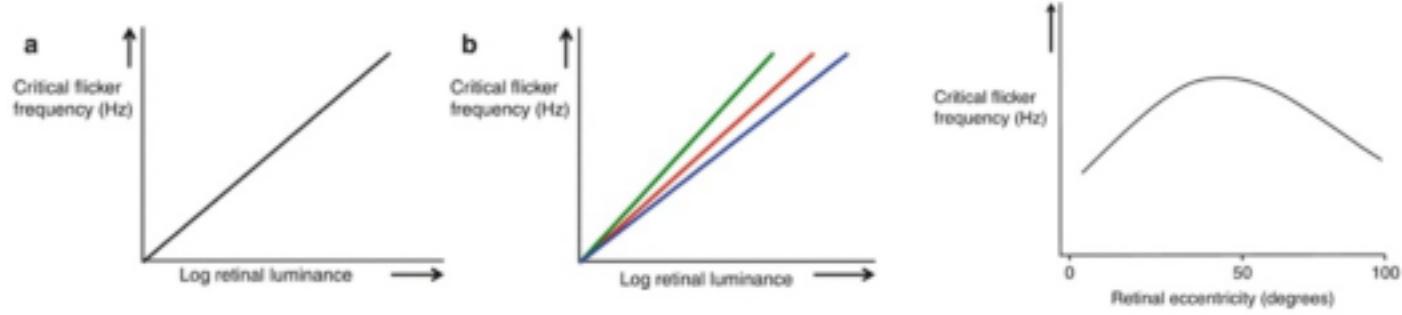
Jerry - kontrastní rámec

– jasovo-moslisovou schopnost zraku

- Zákon **kritické frekvence** blikání
- Kritický kmitočet blikání (cca 50 Hz)

$$f_k = k_1 + k_2 \log L$$

- ☐ Nad kritickým kmitočet se jeví daný světlený zdroj jako „**kontinuálně zářící**“
- ☐ Závisí na L jasu a barvě daného světleného zdroje
- ☐ k_1, k_2 - experimentálně zjištěné konstanty



- uvedeném fyziologické se pravděpodobností odesety si dnešní
pro časových směrů jasu - ta určuje kritický
kmitočet blikání, který je podle F-Psákona
závislý logaritmickou intenzitě bladné fáze podél sv

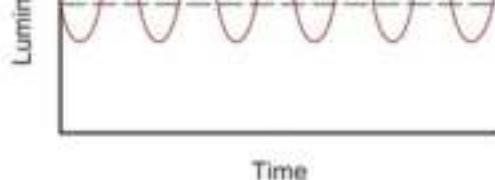
Talbotův zákon

- ☐ Pro časově měnící se osvětlení s frekvencí vyšší než je **frekvence kritická** se nám jeví světlo jako neměnící se, odpovídající jeho průměrované hodnotě

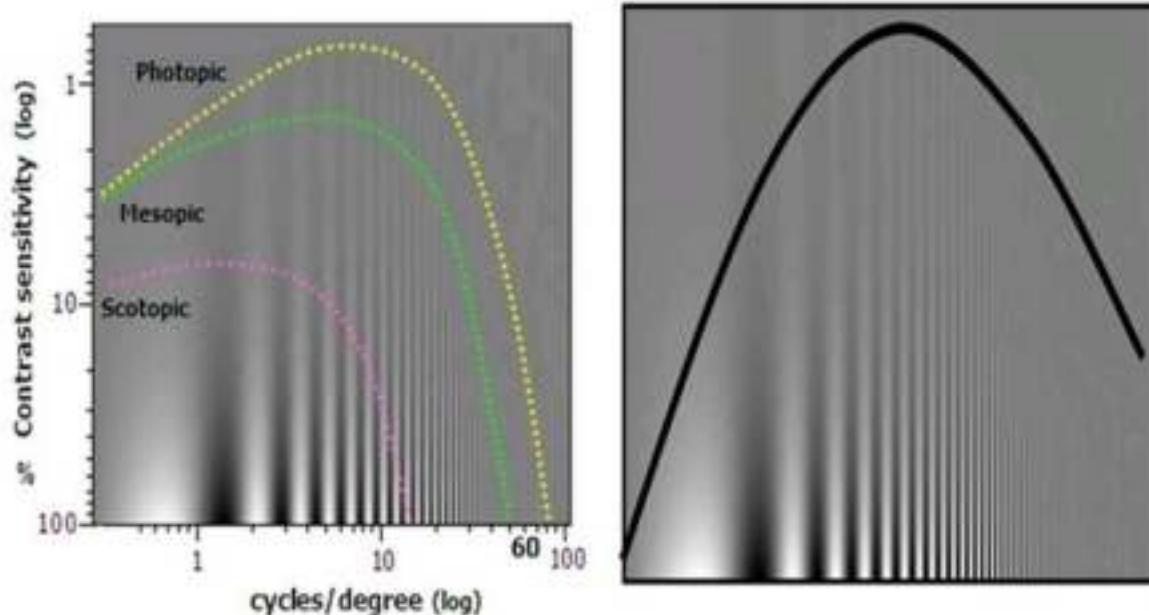
$$\bar{L} = \frac{1}{T} \int_0^T L(t) dt \quad \text{pro } f \geq f_k$$



- *Avgemá hodnota osvětlení*



Kontrastová citlivost oka



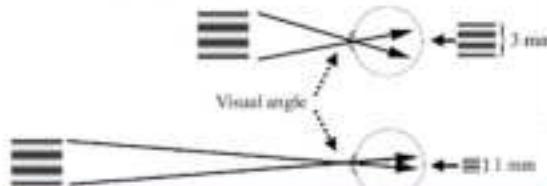
□ Kontrastová citlivost (CSF – contrast sensitivity function)

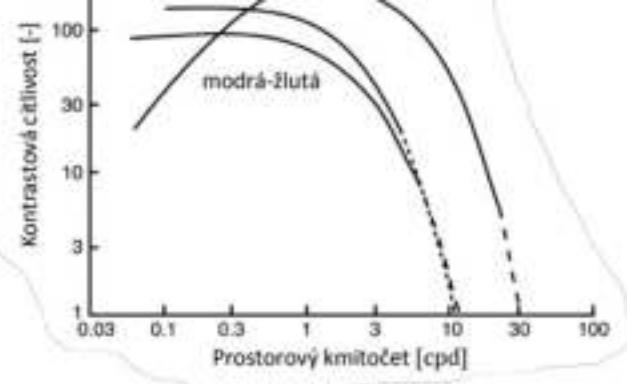
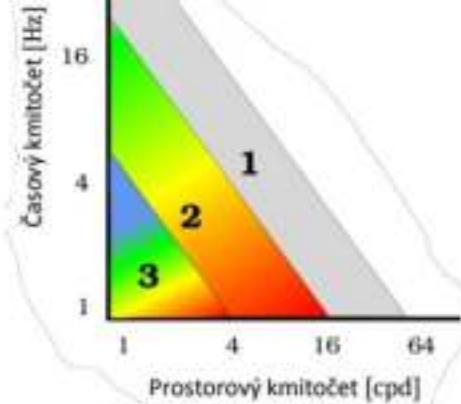
- odezva soustavy na harmonické buzení s proměnnou frekvencí
- pokud vzor nevyvolá odezvu v oku je nutné **zvýšit kontrast**
- určování prahového kontrastu
- odpovídá převrácené hodnotě CS (contrast sensitivity)
- charakter **pásmove propusti**

$$CFD = \frac{\text{Jas pozadí}}{\text{Pozorovatelná amplituda prostorové sinusovky}}$$

□ Kontrastová citlivost je závislá jak na **prostorovém kmitočtu** tak **časovém kmitočtu**

Cycles per Degree of Visual Angle

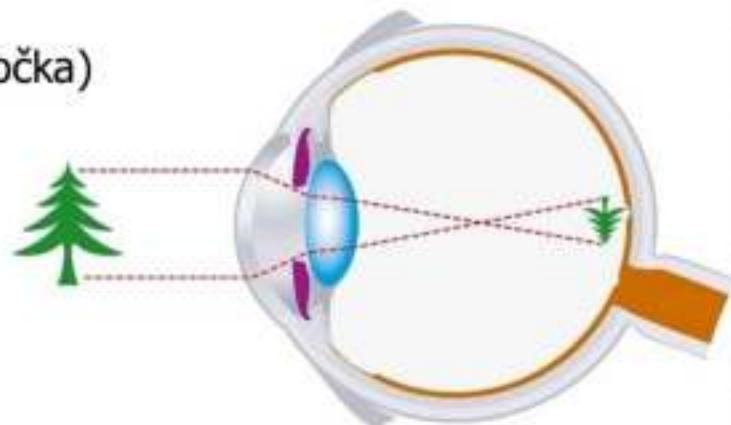




- Kontrastová citlivost je závislá jak na **prostorovém kmitočtu** tak **časovém kmitočtu**
- Nad prostorový kmitočet nad **3-4 cpd** nevnímáme vzory **modrá, žlutá**
- Nad prostorový kmitočet nad **16 cpd** nebo časový kmitočet **16 Hz** vnímáme pouze monochromatické vzory

Lidské oko jako fotoaparát

- Objektiv – dva členy (rohovka, čočka)
- Clona – duhovka
- Senzor – sítnice



Sítnice

- Velikost – kruh **42 mm²** (větší než kinofilm)

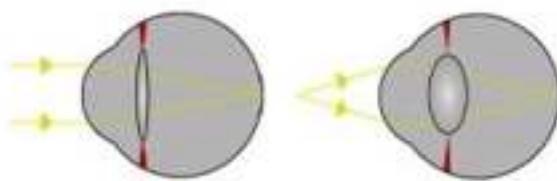
Pixely

- 130 miliony tyčinek (rods)
- 7 miliony čípků (cones)
- Ekvivalent – **137 Megapixelů!**



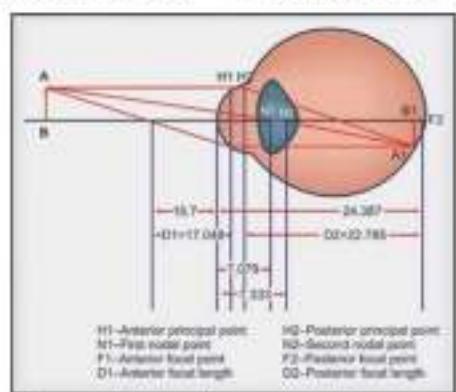
Akomodace

- Možnost získání obrazu z **různých vzdáleností** Změna tvaru oční čočky - akomodace
- Změna tvaru čočky
- Umožněno prstencovitým svalstvem v oku



- Pokud sval **není napnutý**
 - ohnisková vzdálenost **největší**
 - akomodace na **nekonečno**

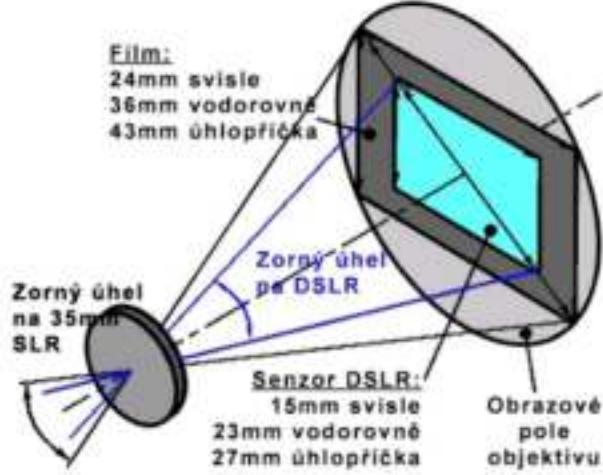
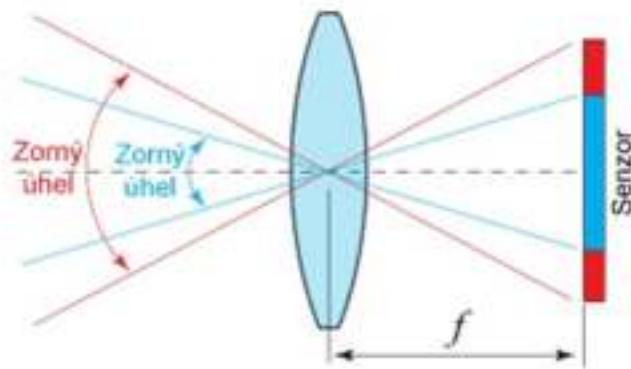
- Předmět **není v nekonečnu**
 - oční sval mění **zakřivení čočky**
 - mění se **ohnisková vzdálenost**



- **Blízky bod a Vzdálený bod**
 - Mezi nimi je **akomodační interval**
 - **Vzdálený bod (v nekonečnu)**
 - s věkem zkracování
 - **Blízký bod (nejmenší vzdálenost** na kterou je oko schopné **akomodovat**)
 - V rozmezí **10-20 cm**, často se udává více (**25-30 cm**)
 - mění se s věkem

Zorné pole

- Sítnice oka je **zakřivená** (rozdíl oproti klasickému filmu)
- Mozek zpracovává tři obrazy najednou (různé zorné úhly)
 - **periferní vidění** může mít zorný úhel kolem 170°
 - **normální vidění** se schopností rozlišovat detaily má úhel cca 45°
 - **mimořádná rozlišovací schopnost** (koncentrace) zorný úhel cca 1°



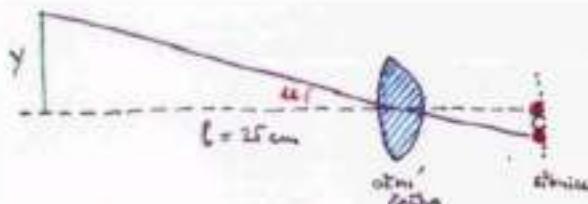
- Díky značnému **množství receptorů** je oko schopné zachytit velké **množství informací** o objektu, **detailů**
- Záleží na **vzdálenosti** pozorování (dálce vidění), **jasu** a **kontrastu** objektu
- Zavádí se **min. zorný úhel** w_{min} pod kterým lze **rozlišit 2 objekty** od sebe

- **Rozlišovací schopnost** dána **rozměry receptorů** (čípků, asi 0,005 mm), konvenční **zrakovou vzdáleností** (cca 25 cm), vzdálenost **sítnice** od **obrazového uzlového bodu oka** přibližně 17 mm, vzdálenost mezi pozorovanými body y

- úhel detailu rozlišení →

$$w_{min} \approx \frac{0,005 \text{ mm}}{17 \text{ mm}} \approx 0,0003 \text{ rad} \approx 1'$$

$$y \approx 0,0003 \text{ rad} \times 250 \text{ mm} \approx 0,0075 \text{ mm}$$

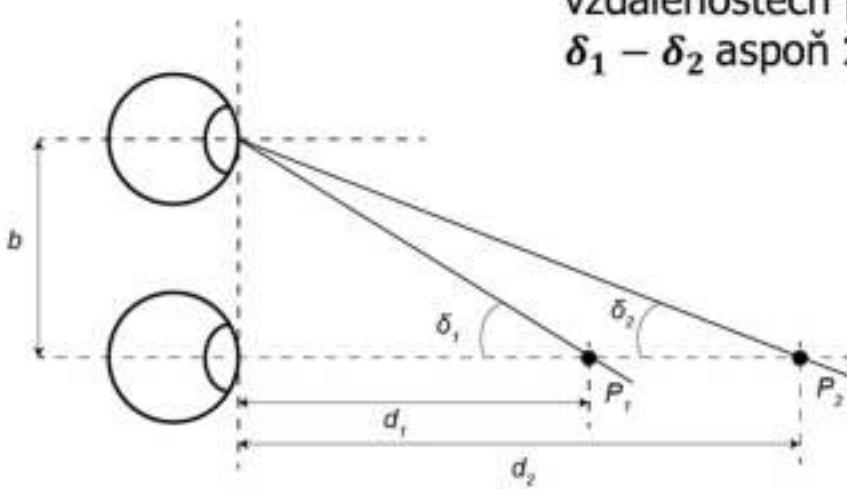


binokulární vidění

- Oko je **párový orgán**
 - vzdálenost mezi nimi cca 65 mm
- Dvě oči umožňují prostorové **3D vidění světa**
 - pro každé oko **jiný obraz na sítnici** (2 různé obrazy trojrozměrných předmětů)
 - v mozku je vyvolán **stereoskopický** (prostorový) vjem

Stereoskopická paralaxa δ

- P_1 a P_2 vnímáme v rozdílných vzdálenostech pokud je $\delta_1 - \delta_2$ aspoň $20''$



$$\delta \approx \frac{b}{d}$$

Oční vadky

□ Myopie (krátkozrakost)

- korekce rozptylkou
- obraz před sítnicí

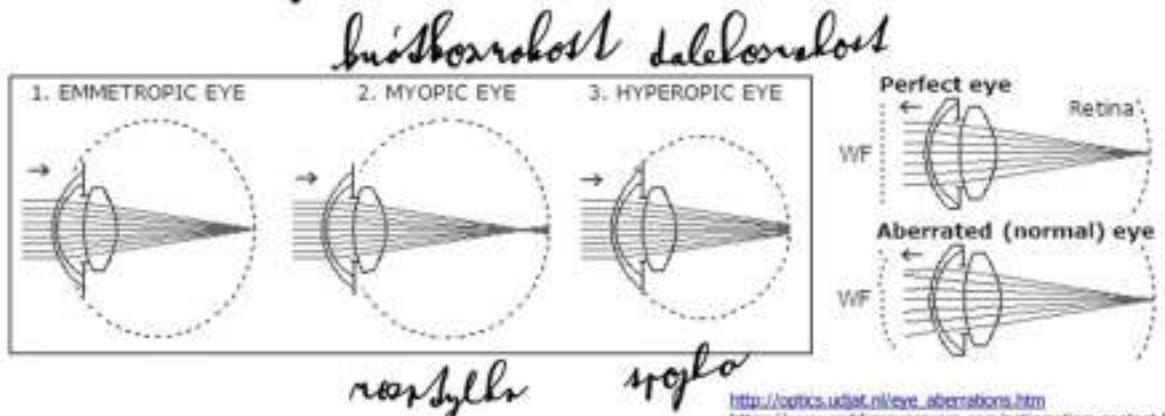
□ Hypermetropie (dalekozrakost)

- korekce spojkou
- obraz za sítnicí

□ Astigmatismus (porušení lomných ploch rohovky nebo čočky)

- do 0,2 D nevadí, následně korekce válcovou čočkou, *anastigmat*
- cylindrická vada

▪ Barvená vada nebývá moc častá



http://optics.udel.edu/eye_aberrations.htm
<https://www.reddinovecareca.com/astigmatism-contact-lenses/>

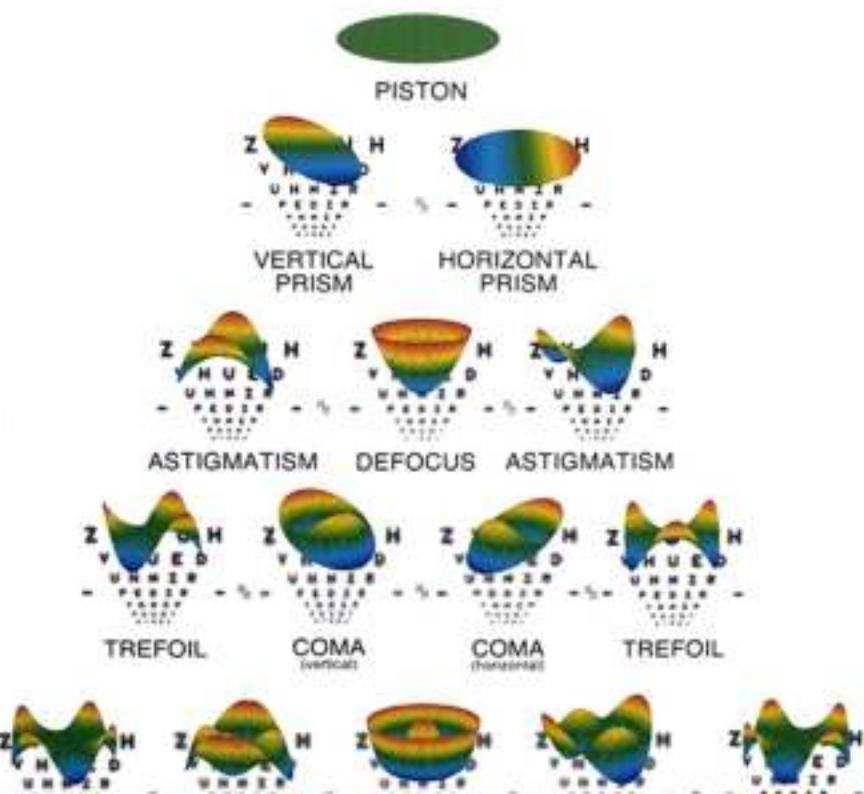
Aberace vyššího řádu

□ Aberrometrie

□ Odchylky a nepravidelnosti optického systému oka (koma, sférická aberace, sekundární astigmatismus, trefoil a kvadrufoil).

□ Korekce – obtížná až nemožná (předmětem výzkumu)

□ Zdroj zrakových obtíží (horší vidění za tmy, za šera, dvojité vidění, duchy apod.).



další vadys**□ Presbyopie (Vetchozrakost)**

- Ztráta pružnosti oční čočky s věkem
- Korekce – brýle obecně

□ Zelený zákal (glaukom)

- Vyšší nitrooční tlak
- Zrakový nerv je velmi citlivý na změnu nitroočního tlaku!
- Může vést k zániku vláken zrakového nervu a **zmenšení zorného pole oka**
- asymetrie očních nervů vede taktéž na glaukom
- pokročilé stádium – tunelové (trubicové) vidění.

▪ Šedý zákal (katarakta)

- Zakalené čočky a následná slepota
- Léčba nahrazením lidské čočky spojkou alespoň o 15D
- Faktory jsou pohlaví, genetika, živ. Styl, UV, a další.



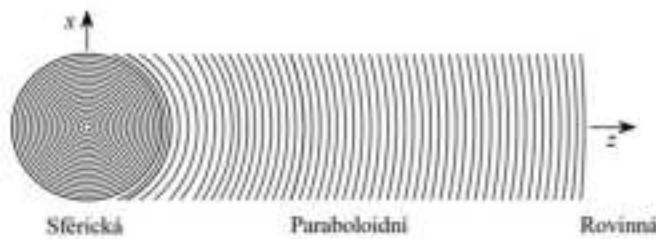
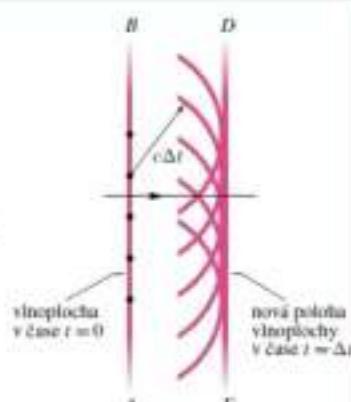
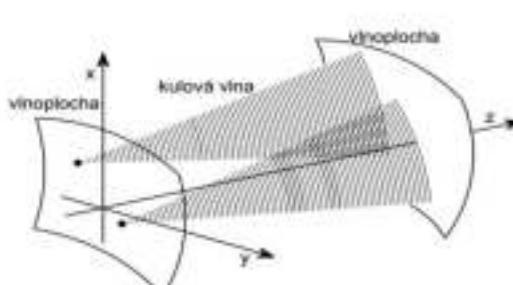
<https://cs.wikipedia.org/wiki/Glaukom>
<https://www.wikiatlas.cz/wk/glatoma>

2.1 Interference - význam a rodinný vztah k využitím**Hyugensův princip**

- Všechny body na vlnoploše složí jako zdroj dalších kulových vln

Světlo odpovídá přičnému vlnění**Šíření vlny**

- Kulová
- Paraboloidní
- Rovinná vlna (vzdálené pole)

**Setkání více vln****□ Interference**

- konstruktivní
- destruktivní

Popis opt. vlny

$$E(r, t) = E_0 \cos(k \cdot r - \omega t + \delta_0)$$

$$k = ks = \frac{2\pi}{\lambda} s$$

Fázorový popis opt. vlny

$$E(r, t) = E_0 \exp[-i(\omega t - k \cdot r)]$$

Zjednodušený zápis intenzity opt. vlny

$$I(r) = E_0(r) \cdot E_0^*(r)$$

$$I(r) = |E_0|^2$$

Setkání dvou světelných rovinných vln

$$E_1(r, t) \text{ a } E_2(r, t)$$

- výsledné pole je dáno součtem

$$E(r, t) = E_1(r, t) + E_2(r, t)$$

- Nemusí ale platit u intenzit (výsledná intenzita může být větší než součet intenzit nebo nulová) – popsáné **interferenčními jevy**

- Pro nekoherentní zdroje (změna fáze s časem $\delta_{1,2} = \delta_{1,2}(t)$) a tedy fázovým rozdílem $\delta = \delta(t)$, interference nenastává

$$\int_0^{\Delta t} \cos \delta(t) dt = 0$$

$$\langle I \rangle = E_{01}^2 + E_{02}^2 = I_1 + I_2$$

- Pro navzájem kolmé vektory $E_{01}(r) \cdot E_{02}(r) = 0$ interference také nenastává $\Rightarrow \langle I \rangle = I_1 + I_2$
- Pro navzájem rovnoběžné vektory $E_{01}(r) \cdot E_{02}(r) = E_{01} \cdot E_{02}$ a fázový rozdíl roven $\cos \delta = 1$ nebo $\cos \delta = -1$ nastane interferenční maximum resp. minimum
- V případě, že fázový rozdíl δ nabývá hodnot $(0; \pi/2)$ resp. $(\pi/2; \pi)$ nastane částečně konstruktivní resp. destruktivní interference

$$I_1 = I_2 \equiv I_0$$

$$I = I_0 + I_0 + 2I_0 \cos \delta = 2I_0(1 + \cos \delta) = 4I_0 \cos^2 \frac{\delta}{2}$$

Analogicky, při konstantním fázovém rozdílu δ bude záviset na úhlu α mezi vektory $E_{01}(r) \cdot E_{02}(r)$. Výsledná intenzita je pak závislá na součinu $\cos \alpha \cdot \cos \delta$.

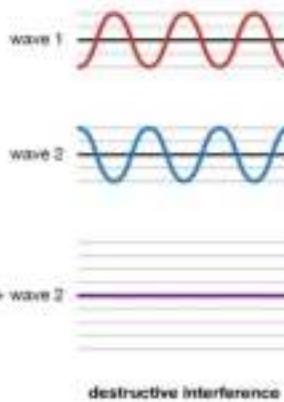
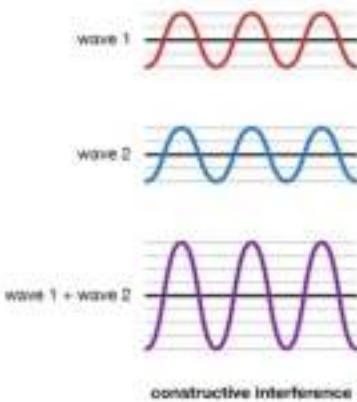
Celočíselné násobky vlnové délky

- konstruktivní interference**

Poločíselné násobky vlnové délky

- destruktivní interference**

Wave Interference

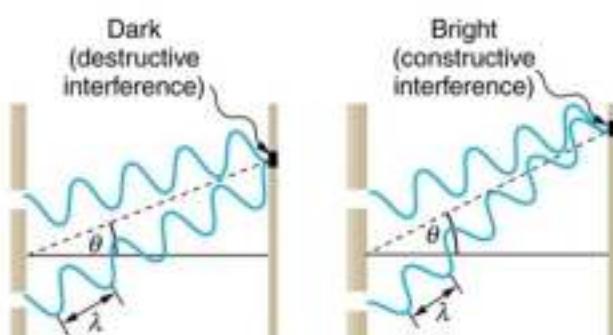


Podmínky interference:

- stejná frekvence

- máme k dispozici dve a více vlnění
- všechna uvažovaná vlnění mají stejnou, nebo téměř stejnou vlnovou délku (resp. frekvenci)
- mezi interferujícími vlněními je vytvořen dráhový resp. fázový rozdíl
- vlnění jsou koherenti

Interferenci lze pozorovat i u vln s rozdílnou frekvencí – výsledný obrazec není tak výrazný



Youngův pokus

Difrakce monochromatického světla na štěrbině – bodový zdroj

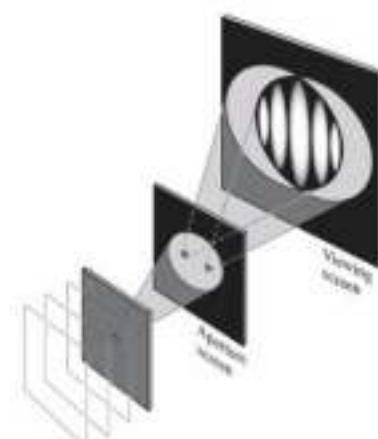
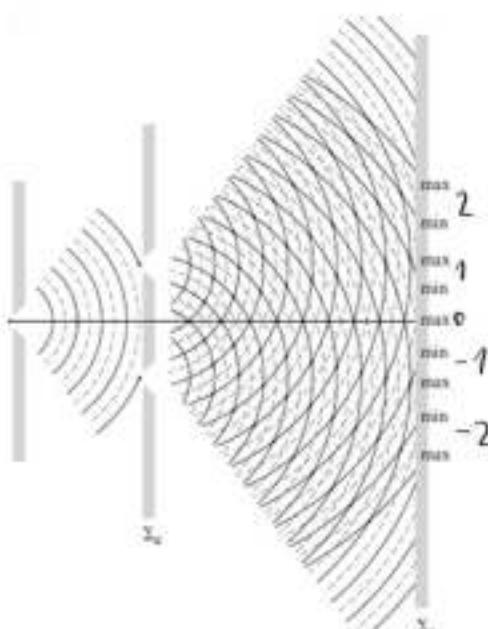
Ohyb na překážce s otvorem - difrakce

Druhé stínítko – 2 bodové zdroje

Vlny z těchto zdrojů – se propojují a interferují

Maxima - svítící řady

Minima – temné řady



dráhový rozdíl vln

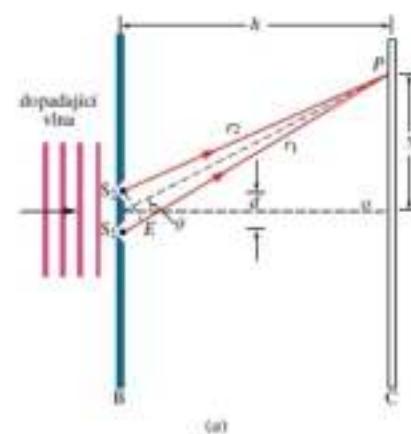
Jestliže se 2 vlny šíří dvěma drahami jejich fázový rozdíl se může měnit

Změna fázového rozdílu je způsobena dráhovým rozdílem ΔL

$$\Delta L = d \sin \theta$$

Aby vzniklo interferenční max ΔL musí být celočíselný násobek λ .

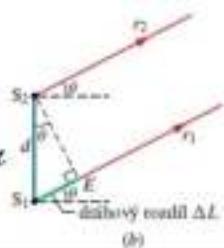
$$m\lambda = d \sin \theta \quad \Rightarrow \text{se shodí se ve fázi}$$



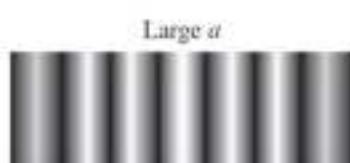
Aby vzniklo interferenční min ΔL musí být nasobkem poloviny λ .

$$(m + 0.5)\lambda = d \sin \theta \rightarrow \text{seboužst s prošízí}$$

pro $h \gg d$. - vzdálosť štěrbin závisí na vlnové délce

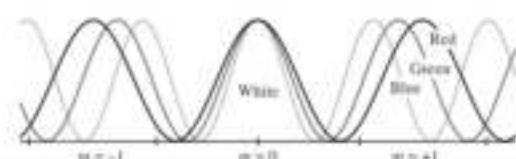
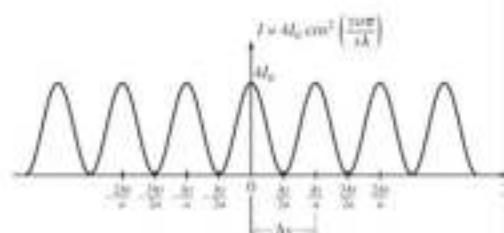
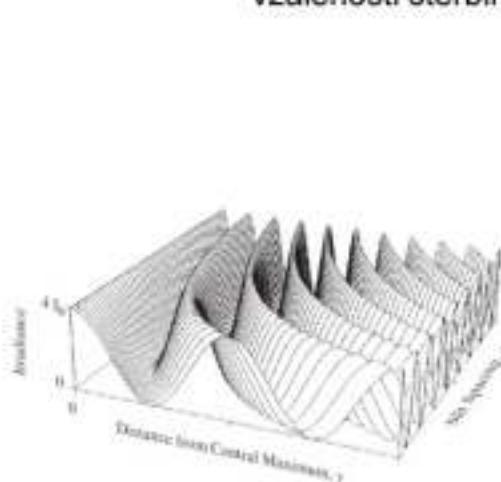


- Rozšíření separace štěrbin zmenšuje velikost interferenčních pruhů



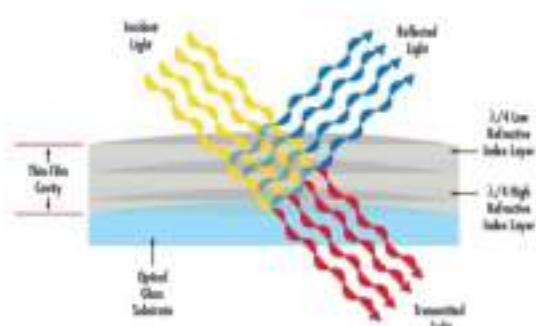
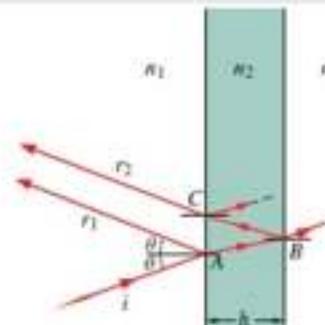
- S vyšší vlnovou délkou se interferenční pruhy zvětšují

Idealizované interferenční ozáření v závislosti na vzdálenosti štěrbin



22) Interference na tenké vrstvě, antireflektivní vrstvy a interferenční filtry

- Fázový rozdíl mezi vlnami se může měnit pokud došlo k odrazu z opticky řidšího do opticky hustšího prostředí
- Destruktivní interference odraženého světla
- Konstruktivní interference průchozího světla
- Optické filtry, Antireflexní vrstvy
- Moderní interferenční filtry modelovány podle Fabry-Perotova interferometru – tenká interferenční vrstva



Dráhový rozdíl Δl – odraz světla na tenké vrstvě

Optická dráha – vzdálosť, kterou světlo urazi ve vakuu za stejný čas jako v daném prostředí



Geometrická dráha $2d$ odpovídá 2nd optické – určuje dráhový rozdíl Δl

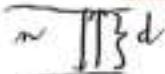
2 rozhrani s indexy lomu $n_1 < n$

Dopad vlny na první rozhraní – změna fáze o 180°

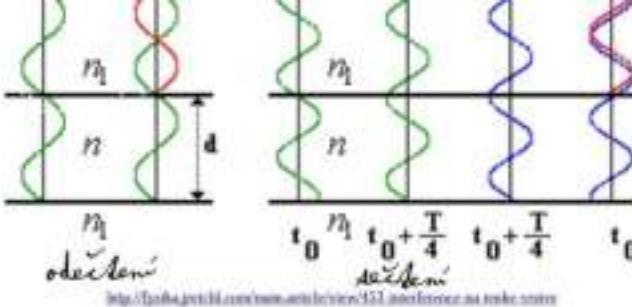
odpovídá změně λ vlny o $\frac{\lambda}{2}$

Interferenční minimum

$$2nd + \frac{\lambda}{2} = (2m+1) \frac{\lambda}{2}$$



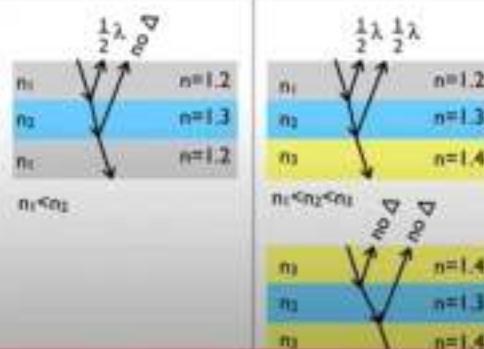
$$m \in N_0$$



<http://fyzika.jepis.cz/online/uvod/uvod.html#13> Interferencia na tloušťce

$$\text{Interferenční maximum } 2nd + \frac{\lambda}{2} = m\lambda$$

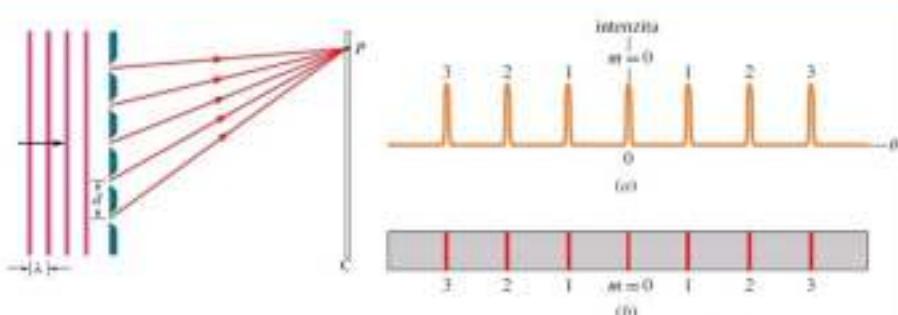
Equation $m=0, 1, 2, \dots$	1 phase shift	0 or 2 phase shifts
$2nt = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda$	constructive	destructive
$2nt = m\lambda$	destructive	constructive



difrakční mřížka

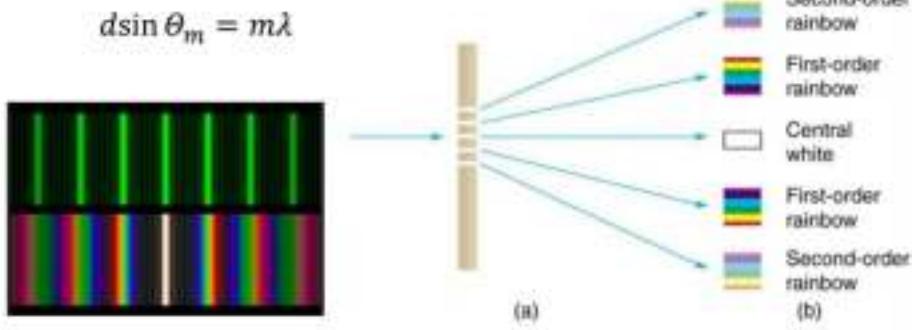
Může být

- Transparentní destička s periodickou změnou tloušťky / indexem lomu
- Periodické vrypy
- Kovový film na skle
- Holografické mřížky



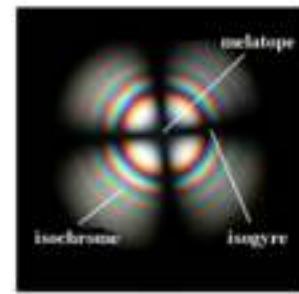
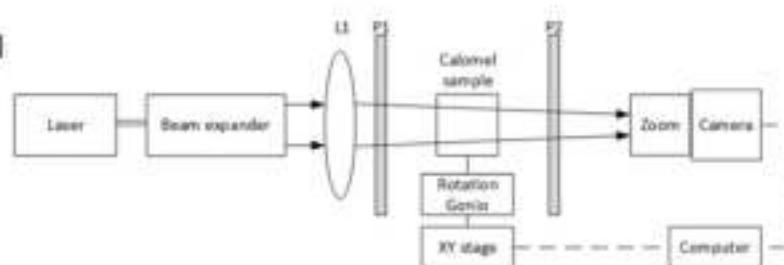
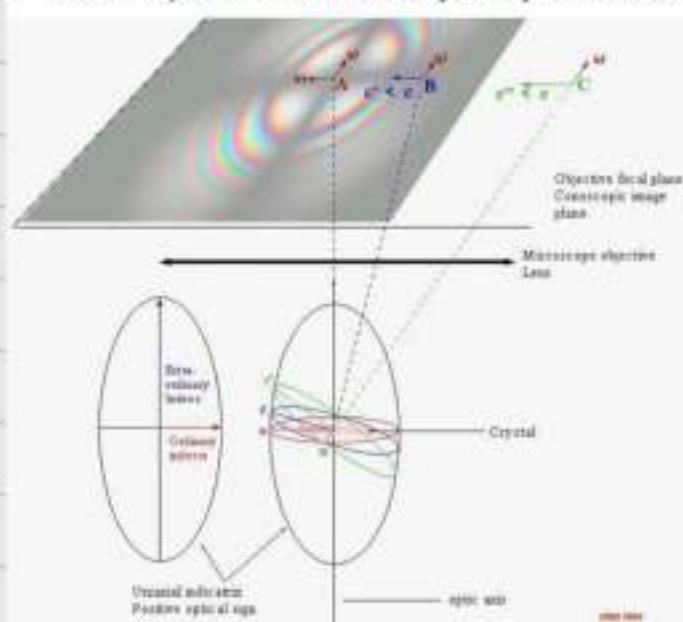
Interferenční minima a maxima, které jsou od sebe vzdáleny tím více, čím je perioda mřížky menší

Způsobení periodických změn v amplitudě a fázi

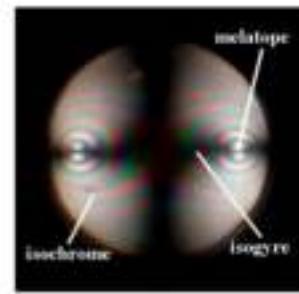


Konoskopie

- Měření pro hodnocení dvojlohných materiálů



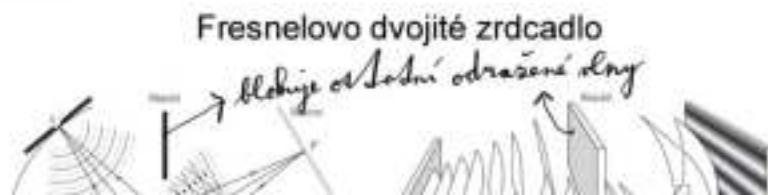
(a) a



(b) b

23) druhý interferometr

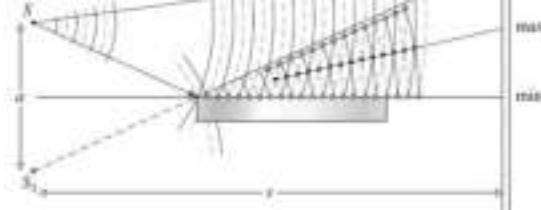
- přístroj pro velmi přesná měření, jehož princip je založen na interferenci světla
- používají se k:
 - měření vlnových délek (Michelsonův komparátor)
 - určení indexů lomu u plynů a kapalin (refraktometry)
 - určení jemné struktury spektrálních čar (spektroskopy)



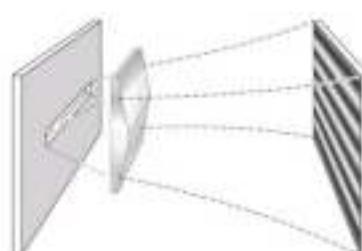
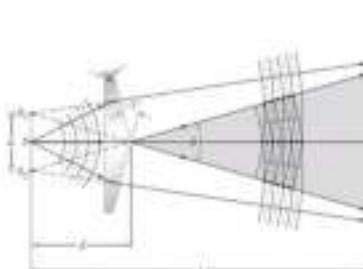
Fresnelovo dvojité zrcadlo

Lloydovo zrcadlo

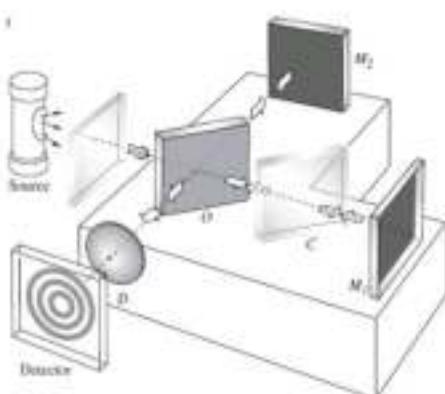




Fresnelova biprisma

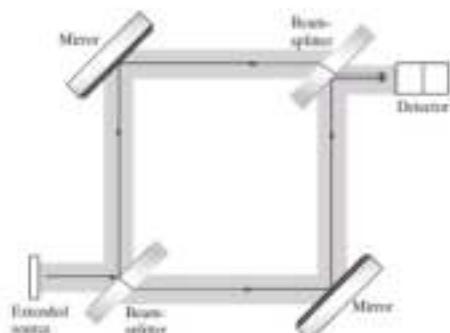


Michelson



$$\Delta d = N(\lambda_0/2)$$

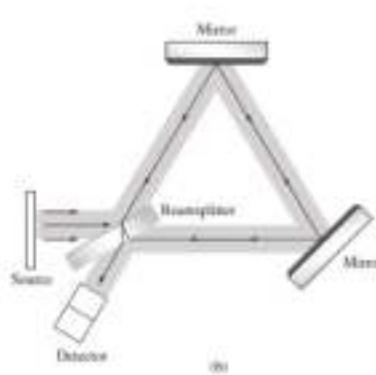
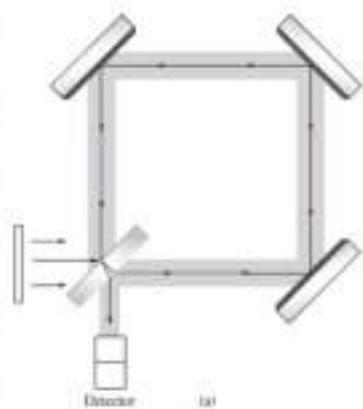
Mach-Zender



- Měření rychlosti světla
- Extrémně přesné měření vzdálenosti
- Měření indexu lomu
- Měření délky koherence
- Měření vlnové délky zdroje

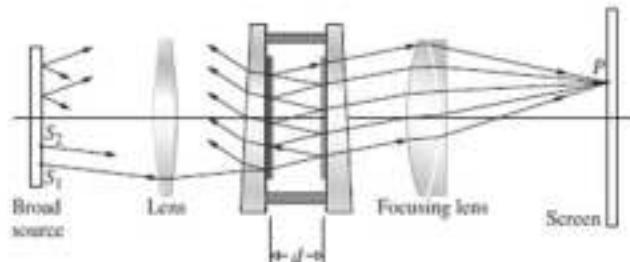
- 2 separátní větve
- složitější na nastavení

Sagnac



Využiti jako gyroskop, spektrometr...

Fabry-Perot



- Multisvazkový interferometr
- Často jako resonanční část laserů
- nebo spektroskop

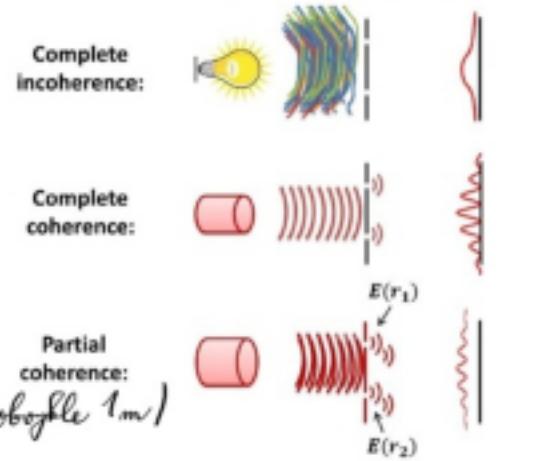
L4) Koherencie

- Podminkou interference – fázový rozdíl interferujících světelných vln se nesmí měnit s časem
 - Takové světlo je koherentní
- Většina zdrojů je nekoherentních
- Skvělé koherentní zdroje světla jsou lasery

Rozdělení na **časovou a prostorovou koherenci**

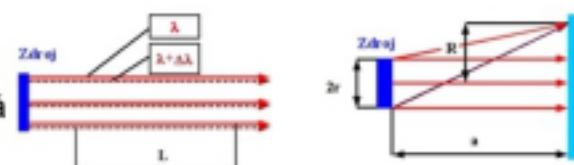
Kontrast interferenčních proužků je přímo úměrný modulu stupně koherence

$$K = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}} \Rightarrow \propto \text{mezech (obopky } I_m)$$



Různé zdroje mají různé **koherenční délky** - vzdálenost po kterou má světlo zdroje určitý stupeň koherence.

- Obecně čím lépe světlo z daného zdroje interferuje tím má vyšší stupeň koherence
- Koherence odpovídá **statistickému popisu světla**



- **prostorová** \Rightarrow vlnění vycházejí ze dobu několika míst na povrchu tělesa
- **časová** \Rightarrow vlnění vycházejí z jednoho místa, ale s časovým odstupem

25) Polarisace - význam, druhy, Malusův zákon

- směr kmitání \Rightarrow proloží síme, ře magnetická složka je vždy kolmá na sv. elektrickou a směru šíření, stojí se rovnou jen směrem kmitám elektrické intenzity (nádř. Poincaréova reálnost)

- druhý:
- provožová součást
- Lineární - \vec{E} leží v jedné rovině - nemění směr
- zdroj: laser, Brewsterův úhel odrazu
- Kruhová - vektor \vec{E} obíhá po kružnici
při pohledu ve směru šíření
- Elipsická - v pohledu ve směru šíření vypadá jako elipsa
- Polarisované světlo se od nepolarizovaného liší tím, že vektor \vec{E} v myšlené rovině prostínající svazek světla stejný směr (nepolarizované má nahodilý směr)
- Je-li směr vektoru \vec{E} v rovině neměny, hovoříme o lineární polarizaci, pokud se ale směr vektoru \vec{E} o čase mění, bude opisovat elipsu. Speciální případy eliptické polarizace jsou lineární a kruhová

- zdroje polarizovaného světla

- odrazem - dochází k částečné polarizaci (jeden směr vektoru \vec{E} převažuje), při Brewsterově úhlu ústek může dojít k úplné polarizaci

- lomem - částečná polarizace

- dozvukem - nekteré kryrstaly jsou anizotropní

- polaroidem

- Elektromagnetické vlnění

$$\nabla \times \mathbf{H} = j\omega \epsilon \mathbf{E}$$

Materiálové vztahy

$$\nabla \times \mathbf{E} = -j\omega \mu \mathbf{H}$$

$$\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E} + \mathbf{P} = \epsilon \mathbf{E} = \epsilon_0 n^2 \mathbf{E}$$

$$\nabla \mathbf{D} = \rho$$

$$\mathbf{B} = \mu \mathbf{H}$$

$$\nabla \mathbf{B} = 0$$



U anizotropních materiálů závisí index lomu na směru intenzity \mathbf{E} přiloženého pole a vektory \mathbf{D} a \mathbf{E} nejsou navzájem rovnoběžné.

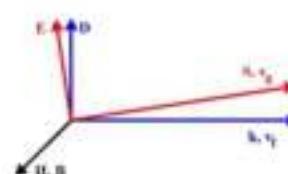
Permitivita ϵ je v tomto případě tenzor.

Tok energie v elektromagnetickém poli
(Poyntingův vektor)

$$S = \frac{1}{\mu_0} \mathbf{E} \times \mathbf{B} [\text{W/m}^2]$$

Polarizace

$$\mathbf{P} = \epsilon_0 \chi_e \mathbf{E}$$

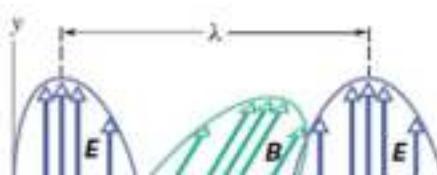


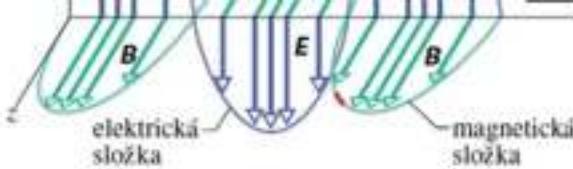
- Polarizace

- Složky \mathbf{E} a \mathbf{B} (případně \mathbf{H}) jsou navzájem ortogonální

Pokud známe jednu, druhou lze dopočítat

Při popisu světleného vlnění většinou uvažujeme

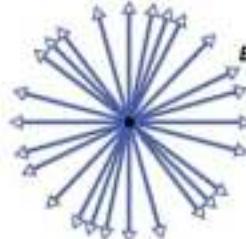
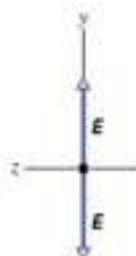




- Kmitání vektoru E v rovině y-z určuje jak je prostupující světlo polarizované

- Lineárně
- Kruhově
- Elipticky
- Částečně polarizované
- Nepolarizované

- Světelné vlny z běžných zdrojů nejsou polarizovány
 - Polarizace se mění náhodně

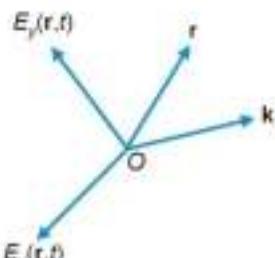


- Obecně – optické pole se skládá z 2 ortogonálních složek v rovině kolmé ke směru šíření

- lze popsát vlnovými rovnice

$$\nabla^2 E_x(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_x(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}$$

$$\nabla^2 E_y(\mathbf{r}, t) = \frac{1}{v^2} \frac{\partial^2 E_y(\mathbf{r}, t)}{\partial t^2}$$

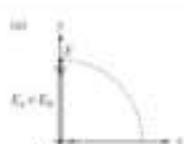
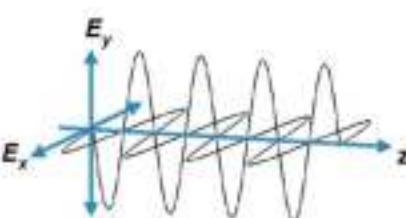


E_y - označováno jako p-polarizace

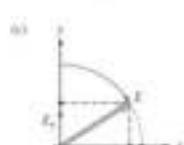
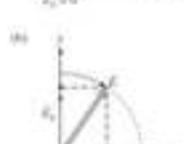
E_x - označováno jako s-polarizace

- Řešení v případě šíření v rovině z

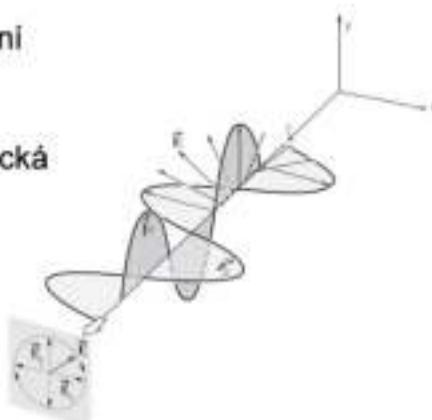
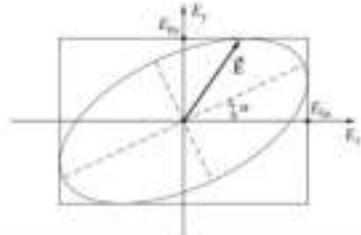
$$\left. \begin{aligned} E_x(z, t) &= E_{0x} \cos(\omega t - kz + \delta_x) \\ E_y(z, t) &= E_{0y} \cos(\omega t - kz + \delta_y) \end{aligned} \right\} \text{resp.} \Rightarrow$$

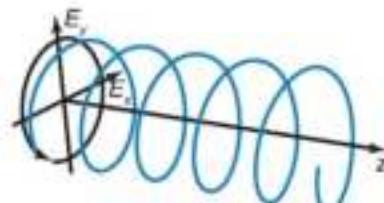
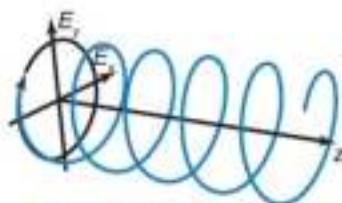
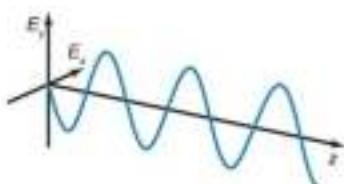


- Kruhová polarizace
 - Vektor elektrické intenzity postupující po kružnici
 - Pravidelná změna velikosti intenzity E ve složkách E_x a E_y
- Superpozici 2 polarizací v horizontální a vertikální rovině (E_x a E_y) získáme nepolarizované světlo
- Nejobecnější případ polarizace – polarizace eliptická



$$\mathbf{E} = a_x \hat{x} \cos(kz - \omega t + \delta_x) + a_y \hat{y} \cos(kz - \omega t + \delta_y)$$

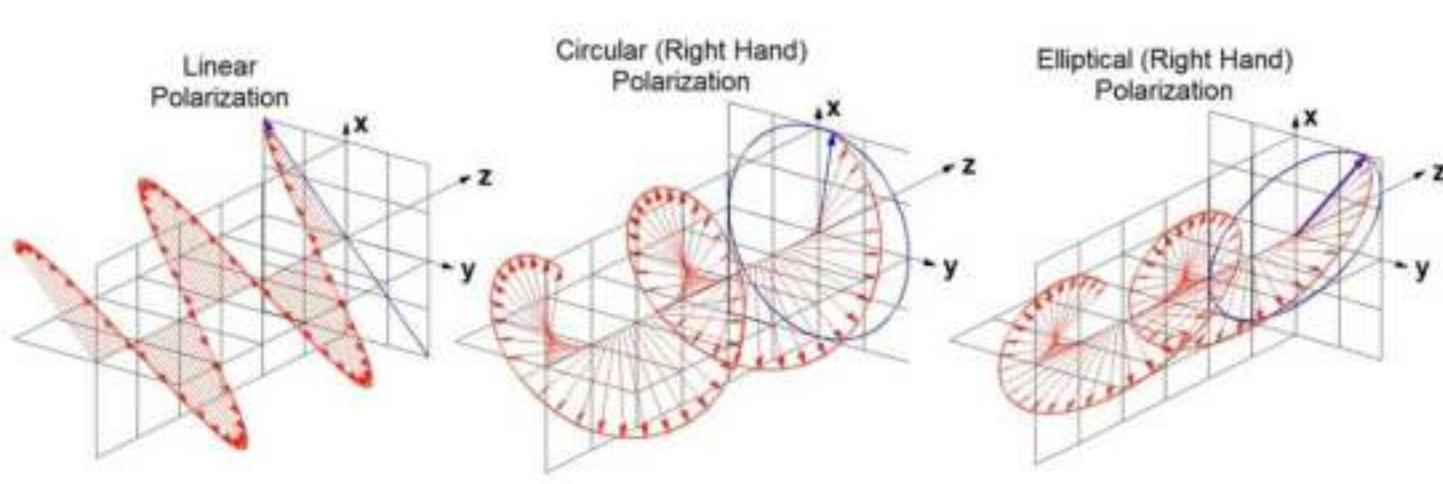




$$\begin{aligned} \mathbf{E}_0 &= \operatorname{Re}[A e^{i(kz - \omega t + \phi_0)} (\hat{x} \cos \theta + \hat{y} \sin \theta)] \\ &= A(\hat{x} \cos \theta + \hat{y} \sin \theta) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{LCP} &= \operatorname{Re}\left[\frac{A}{\sqrt{2}} e^{i(kz - \omega t + \phi_0)} (\hat{x} + \hat{y} e^{-i\pi/2})\right] \\ &= \frac{A}{\sqrt{2}} [\hat{x} \cos(kz - \omega t + \phi_0) - \hat{y} \sin(kz - \omega t + \phi_0)] \end{aligned}$$

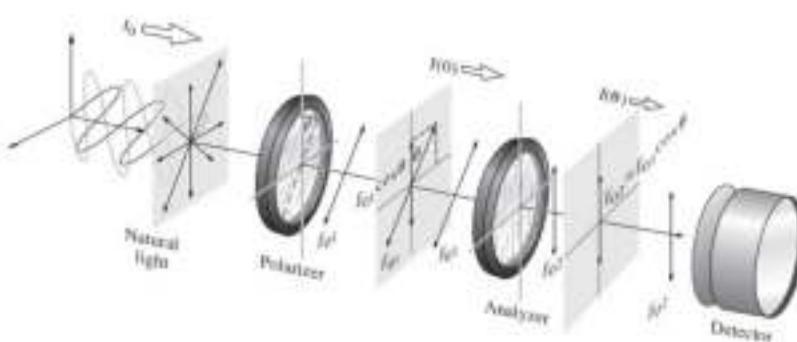
$$\begin{aligned} \mathbf{E}_{RCP} &= \operatorname{Re}\left[\frac{A}{\sqrt{2}} e^{i(kz - \omega t + \phi_0)} (\hat{x} + \hat{y} e^{+i\pi/2})\right] \\ &= \frac{A}{\sqrt{2}} [\hat{x} \cos(kz - \omega t + \phi_0) + \hat{y} \sin(kz - \omega t + \phi_0)] \end{aligned}$$



Mallusův zákon

Náhodně polarizované světlo dopadající na setup s polarizátorem a analyzátem

- Na detektoru měříme intenzitu el. pole
- Za prvním polatizátorem - propuštěna polarizace, respektive intenzita el. pole E_{01} pouze ve směru transmisivní osy polarizátoru
- Analyzátor (veritkální transmisivní osa) – na detektor prochází pouze poměrná část $E_{02} = E_{01} \cos \theta$



Intenzita na detektoru

$$I(\theta) = \frac{c\epsilon_0}{2} E_{01}^2 \cos^2 \theta$$

Mallusův zákon

$$I(\theta) = I(0) \cos^2 \theta$$

26) Fresnelovy rovnice, polarizace odrazem

- Fyziky - udávají intenzitu odraženého a lomeného světla

- pro 2 navzájem kolmé polarizace dopadající na rozhraní 2 prostředí
 - výkonové odrazivosti R (reflectance) a propustnosti T (transmittance)
⇒ poměry toku výkonů

Pro 2 navzájem kolmé polarizace dopadající na rozhraní 2 prostředí

Vlny často označovány jako

- TM nebo TE
- S nebo P
- ortogonální a paralelní

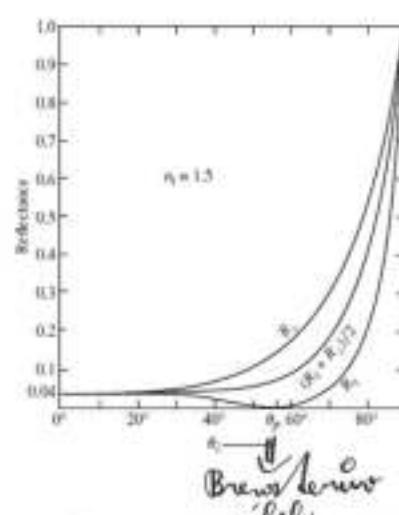
Komplexní amplitudové propustnosti a odrazivosti – určeny Fresnelovými vztahy

$$r_s = \frac{n_1 \cos \theta_i - n_2 \cos \theta_t}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

$$t_s = \frac{2n_1 \cos \theta_i}{n_1 \cos \theta_i + n_2 \cos \theta_t}$$

$$r_p = \frac{n_2 \cos \theta_i - n_1 \cos \theta_t}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$

$$t_p = \frac{2n_2 \cos \theta_i}{n_2 \cos \theta_i + n_1 \cos \theta_t}$$



Výkonové odrazivosti R

(reflektance) a propustnosti T (transmittance) – poměry toku výkonů

Zákon zachování energie

$$T_s = 1 - R_s \quad T_p = 1 - R_p$$

$$R + T = 1$$

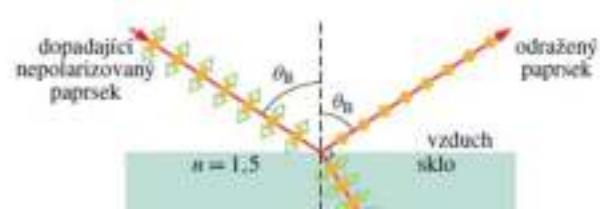
Pro nepolarizované světlo

$$R = \frac{1}{2}(R_s + R_p) \quad T = \frac{1}{2}(T_s + T_p)$$

- Polarizace odrazem

Dopad obecně nepolarizovaného světla na rozhraní dvou prostředí

- Pokud je splněn Brewsterův úhel θ_B , odražené světlo má pouze kolmou složku.
- Odražený paprsek
 - úplně polarizováno
 - polarizace kolmá k rovině dopadu
- Lomený paprsek



- Ponechává obě polarizace

Brewsterův zákon

- Polarizační brýle
- Polarizátory
- Brewsterská okénka u laserů

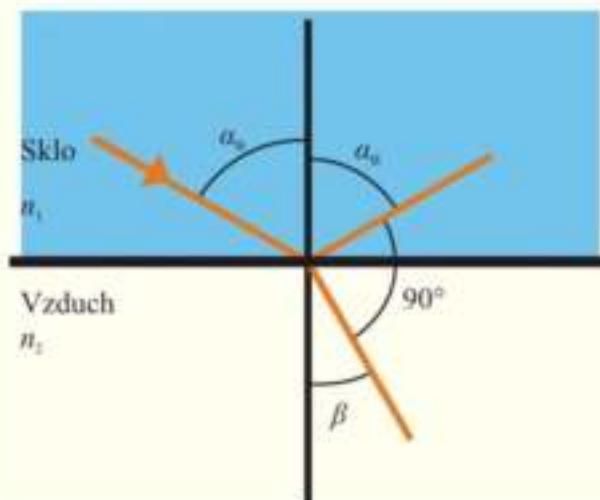
$$\theta_B = \arctg \frac{n_2}{n_1}$$

- složka kolmá k rovině stránky
- složka rovnoběžná s rovinou stránky

- Vychází ze Snellova zákona

$$\alpha_B + \beta = 90^\circ$$

$$\frac{\sin \alpha_B}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = \tan \alpha_B$$

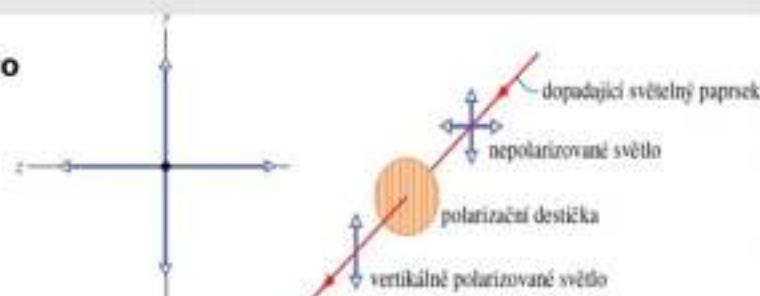


27) Polarizační zařízení - princip, typy, dojASN, dojASN polarizátory

princip

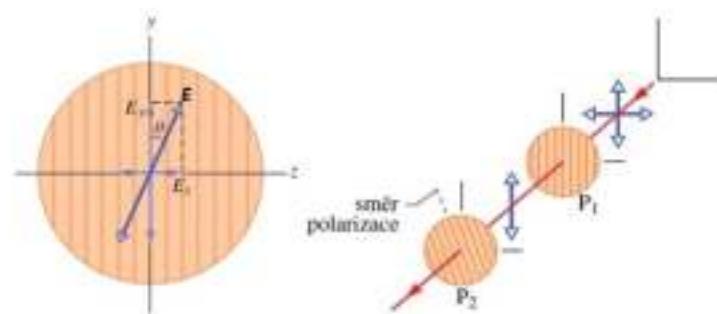
Nepolarizované (náhodně polarizované) světlo

- Superpozice dvou lin. polarizovaných vln
- Roviny kmitů navzájem kolmé



Polarizační destička ve směru šíření

- prochází pouze složka rovnoběžná s jejím směrem polarizace
- pro nepolarizované světlo – projde pouze polovina intenzity dopadajícího světla
- Pro polarizované světlo – závisí proslá intenzita na úhlu θ mezi směrem polarizace světla a destičky (Malusův zákon)

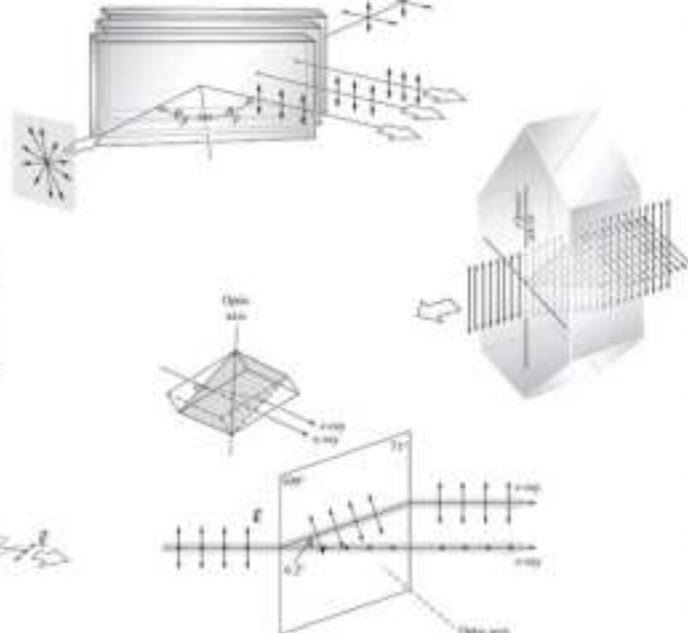
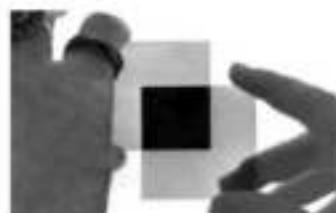


druhy

□ Lineární vs. Cirkulární

1. Absorpční (Dichroické)

- Polaroid
- Dichroické krystaly
- Wire-Grid polarizátory



2. Odrazivé

- Foliové polarizátory
- Wire-Grid
- Založené na principu Brewsterova úhlu



3. Dvojlomné polarizátory

polarizace dvojlonem

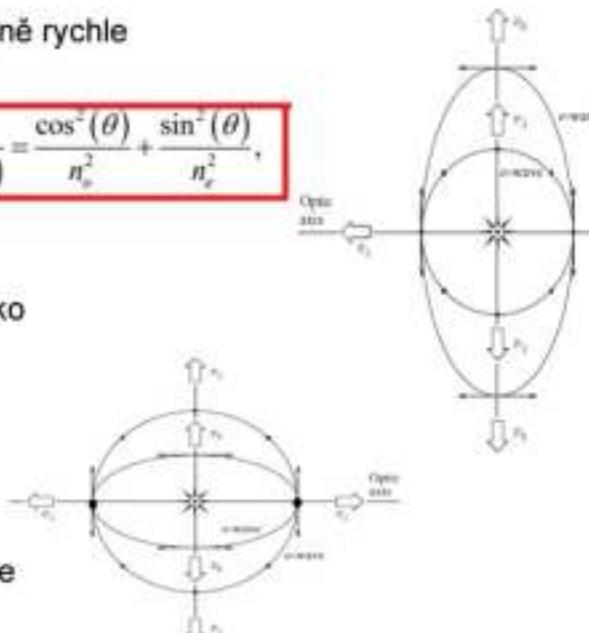
Izotropní prostředí

- Světlo libovolné polarizace se všemi směry šíří stejně rychle
- Molekuly umístěny náhodně

Anizotropní prostředí

- Molekuly nejsou zcela náhodně orientovány
- Index lomu je různý pro různé směry
- Optická osa – směr, ve kterém se materiál chová jako izotropně
- Jednoosé či dvojosé krystaly
- Indexový elipsoid
- Ordinární a extraordinární vlna díky rozdílným indexům lomu
- Rozdílné chování pro obecné ortogonální polarizace
- Fázový rozdíl mezi těmito vlnami
- Ideální pro separaci, změnu polarizací

$$\frac{1}{n^2(\theta)} = \frac{\cos^2(\theta)}{n_p^2} + \frac{\sin^2(\theta)}{n_e^2},$$



Pozitivní vs. Negativní anizotropické krystaly

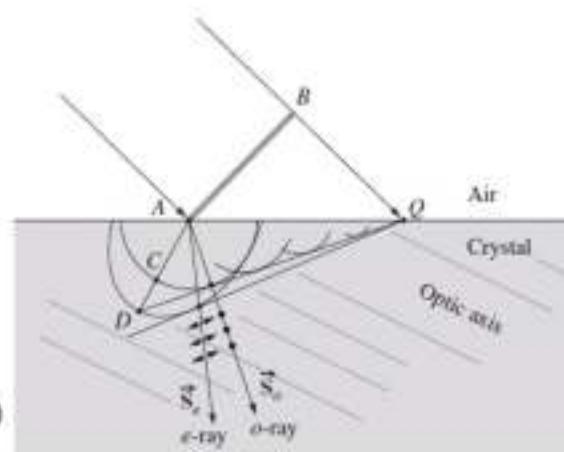
$$\Delta n = (n_e - n_o)$$

Kladný rozdíl – pozitivní dvojlomný krystal

Záporný rozdíl – negativní dvojlomný krystal

Směr šíření paprsků v dvojlomných krystalech

- Určeno podle směru dopadajících paprsků ve vztahu k poloze elipsoidu krystalu (orientace optických os krystalu)
- V určitých směrech neplatí Snellův zákon

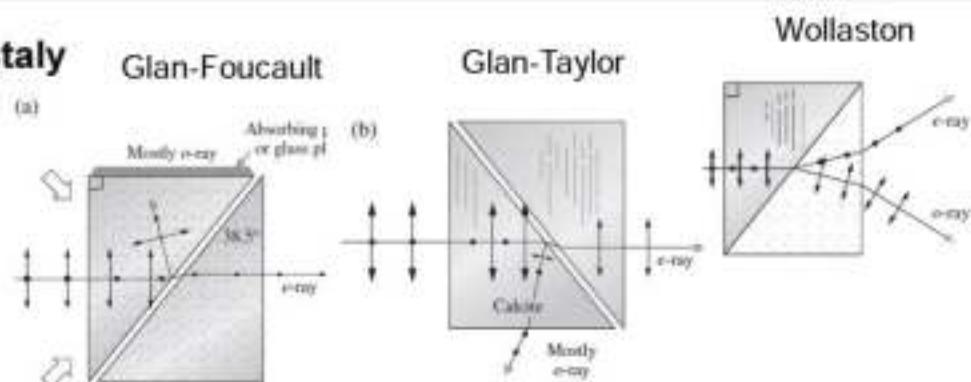




- dvojité polarizátory

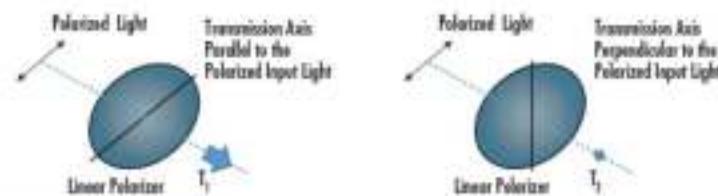
Jednoosé a Dvojosé krystaly

- Kalcitové
- TeO₂
- Kalomel (Hg₂Cl₂)
- spousta dalších prvků



Extinction ratio (PER) – poměr prošlého výkonu při otevřeném a zkříženém polarizátoru (např. 1:100 000)

$$\varepsilon_R = \frac{T_2}{T_1}$$



http://www.schott.com/lighting/lighting_en/lighting_technology/lighting_technology.html#extinction_ratio

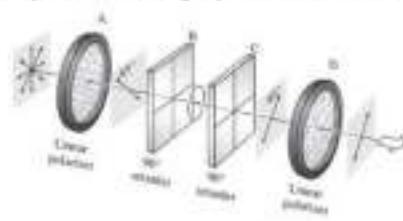
- fázové retardaciční destičky

- Uváděny i jako Cirkulární polarizátory
- Řízení intenzity světla
- Fázové zpoždění

Závisí na tloušťce fázové destičky

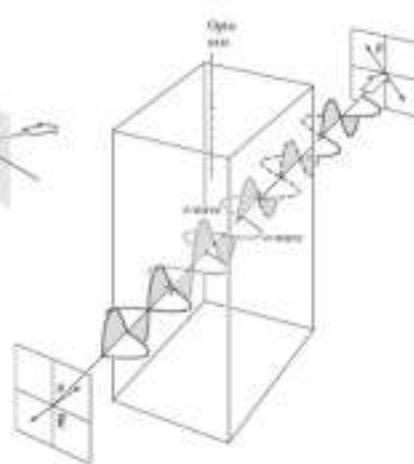
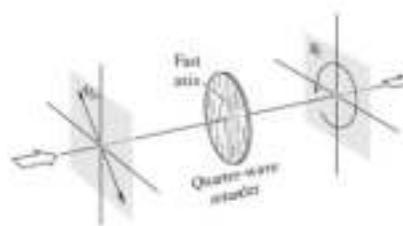
Citlivost na vlnovou délku (slouží i jako filtr)

- Celovlnné
- Půlvlnné
- Čtvrtvlnné
- Kompenzátory (Babinetův, Soleil)



$$\Lambda = d(|n_o - n_e|)$$

$$\Delta\phi = \frac{2\pi}{\lambda} d(|n_o - n_e|)$$

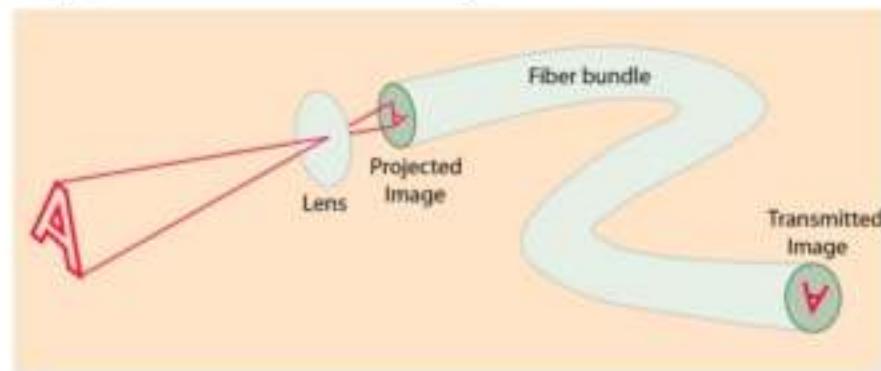
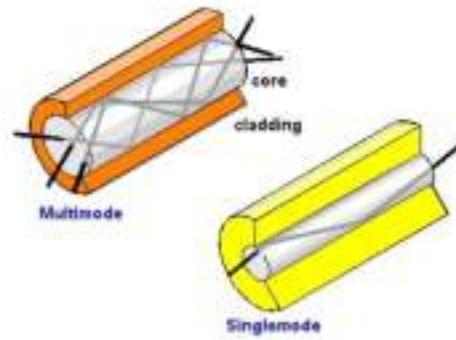


28) Vlnky a obecné přírode - elastostika, hydro, gravimetrie, optika

- optická vlákna

Světlovody

- **válcovitý tvar**
- průměr 5 - 200 µm
- **jednovláknové**
 - jednovidové (single-mode)
 - mnohavidové (multi-mode)
- **svazek** (bundle) několika vláken
 - neuspořádané (vedení světla – **osvětlování**)
 - uspořádané svazky (rastrové **zobrazování**)



Optická vlákna využívána již řadu let

- **Zobrazování** (sběr světla a dopravení na detektor)
- **Osvětlování** (dopravení světla na špatně přístupná místa)

Řada nejrůznějších **aplikací v biomedicíně**

- Fototerapie (světloléčba)
- Chirurgické nástroje
- Diagnostické nástroje
- Endoskopy
- Optické spektroskopie
- Rentgenové zobrazování
- Dentální nástroje
- mnoho dalších...

4 základní typy vlnovodů

- **s dutým jádrem** (hollow-core)
 - vedení světla pomocí odrazů
- **s pevným jádrem** (solid-core)
 - vedení světla pomocí totálních odrazů (TIR)
- **s tekutým jádrem** (liquid-core)
 - vedení světla pomocí totálních odrazů (TIR)
- **fotonická vlákna** (photonic crystal fibres)

Plastové vs Skelné vlákno

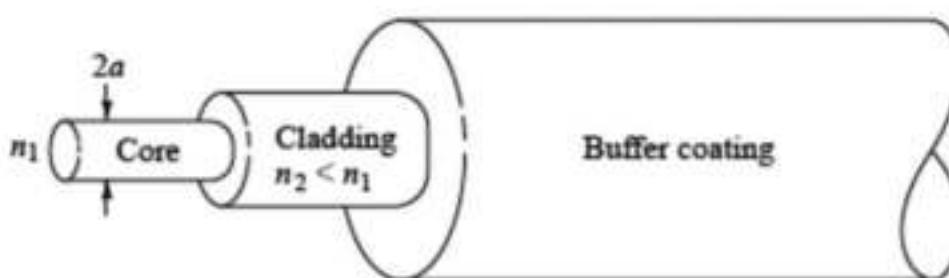
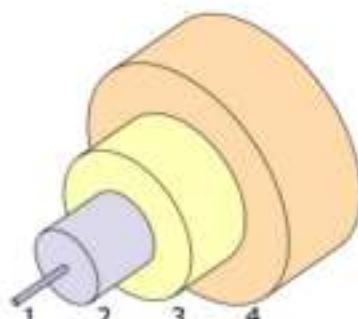
- Oba materiály jak v jádru tak v plášti
- Plast - **plusy**: flexibilnější, větší vstupní apertura, větší průměr jádra, nižší cena
- Plast - **mínusy**: větší množství ztrát (vyšší vlastní absorpcce, více nečistot)
- Plast - **mínusy**: autofluorescence, nevydrží tolik tepelného zatížení

složka

- Optické vlákno je skleněný nebo plastový vlnovod, který vede světlo napříč celým vláknem

- Skládá se ze **3 částí**

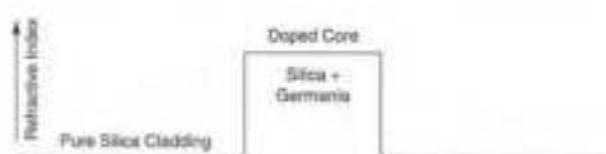
1. **jádro** (core)
2. **plášt'** (cladding)
3. **ochranná vrstva** (buffer),
4. volitelné – **obal** (jacket)



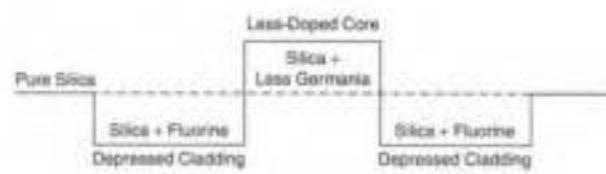
- materiály

- Nejčastěji – jádro – **oxid křemičitý** (SiO_2) nebo **plast**

- index lomu **1.46** (550 nm)
- index lomu **1.44** (1 810 nm)
- Co nejvíce **transparentní** materiály



a. Matched-Cladding Fiber



b. Depressed-Clad Fiber



c. Plastic-Clad Silica
(not used for single-mode fiber)

- základy optických vláken

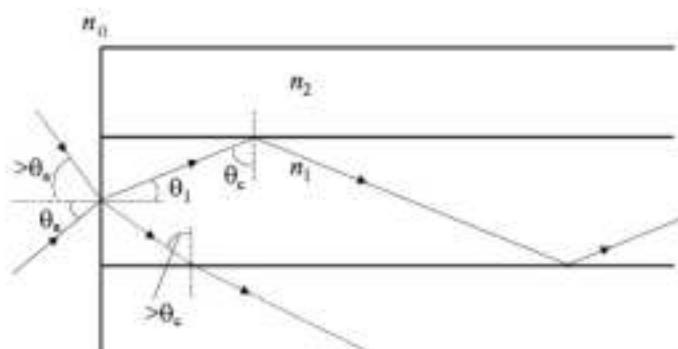
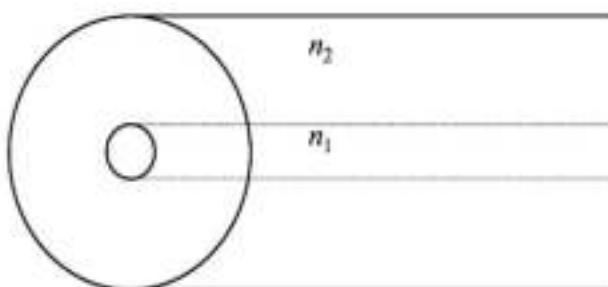
- Jádro musí mít vyšší index lomu n_1 než plášt' n_2
- Standardní optická vlákna

Vztah pro kritický úhel θ_c

$$\sin \theta_c = \frac{n_2}{n_1}$$

- **skokový index lomu** (uniformní index lomu přes celé jádro)
- vstupní světlený paprsek by měl dopadat pod větším než kritickým úhlem na rozhraní jádro plášt'

 - Tím pádem je paprsek veden bez ztrát dále do vlákna (**TIR**)
 - tato podmínka by měla být zachována napříč celým vláknem
 - minimalizace **rozptylových ztrát**



- Numerická apertura

- Maximální akceptační úhel θ_a pro vstupní paprsek (pro vedení totálním odrazem uvnitř vlákna)

$$n_0 \sin \theta_a = n_1 \sin \theta_1 = n_0 \sin \theta_c = n_1 \cos \theta_c = n_1 \sqrt{1 - \left(\frac{n_2}{n_1}\right)^2} = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

- Numerická apertura $n_0 \sin \theta_a$, v případě vzduchu $n_0 = 1$,

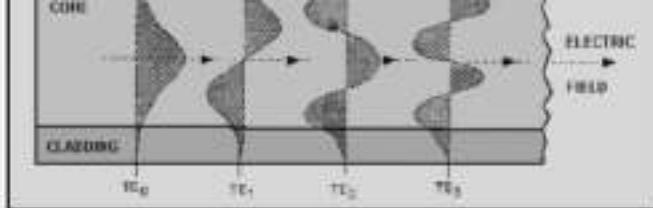
$$\boxed{\text{NA} = n_0 \sin \theta_a = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}}$$

- Pokud je vstupní úhel světla větší než akceptační, dochází k lomu světla do pláště (ztráty)
- Ne všechno světlo se vstupním úhlem menším než akceptační ale bude dovedeno až na konec vlákna
 - Vliv bude mít **rozptyl, disperze, útlum, odrazy** a další parametry

- vedení světla

- Nejjednodušší představa - popis pomocí geometrické (**paprskové**) optiky
 - Popis **numerické apertury** a **základních parametrů vedení** daného vlákna
- Paprskový popis – nevhodný na **malé průměry** jádra vlákna
 - Paprsek tak pouze popisuje **směr** šíření
 - Není brán popis **interference rovinných vln** světla uvnitř vlnovodu
- Přesnější popis je **vidový pohled** (elektromagnetický popis světla)





- rozdělení vláken

- Rozdělení determinováno strukturálními parametry
 - **rozměry jádra**
 - **indexy lomu**

- **Jednovidová** (single-mode) vlákna
 - malý průměr vlákna (méně než 10 mikronů)

- **Mnohavidová** (multi-mode) vlákna
 - průměr vlákna více než 50 mikronů

- Určující je tzv. V parametr
 - a - průměr jádra
 - λ_0 - pracovní vlnová délka

$$V = 2\pi \frac{a}{\lambda_0} NA$$

- Pro $V < 2,405$ se vláknem může šířit pouze jeden základní mód (vid)
 - (čím menší průměr jádra, tím je vlákno náchylnější na ohybové ztráty)

- Pro $V \gg 1$ lze počet módů M approximovat jako

$$M \approx \frac{4}{\pi^2} V^2$$

□ **Jednovidová** (single-mode) vlákna

- malý průměr vlákna (méně než 10 mikronů)
- malá NA
- menší signálové ztráty
- citlivé na výběr použitelných vlnových délek
- biomedicínské aplikace kde je použit **laser** jako zdroj světla

□ **Mnohavidová** (multi-mode) vlákna

- průměr vlákna více než 50 mikronů
- NA – vyšší než 0,2
- jednodušší navázání vlákna
- jednoduché navázání světla přímo z LED diody

- Vyšší ztráty (vidová disperze) – značně se projevuje u vláken se skokovým indexem lomu

□ Skokový index lomu

□ Gradientní index lomu

- maximum od středu vlákna po minimum na rozhraní jádro/plášt'
- **paraboloidní** index lomu
- hlavní využití pro **mnohavidová** vlákna
- **redukce** vidové disperze
- Numerická apertura klesá s úhlovou vzdáleností od středu vlákna
- navázání **menšího množství světla** než u vláken se skokovým indexem lomu
- při stejném V – gradientní více vidové vlákno vede asi jen **polovinu vidů** než vlákno se skokovým indexem lomu

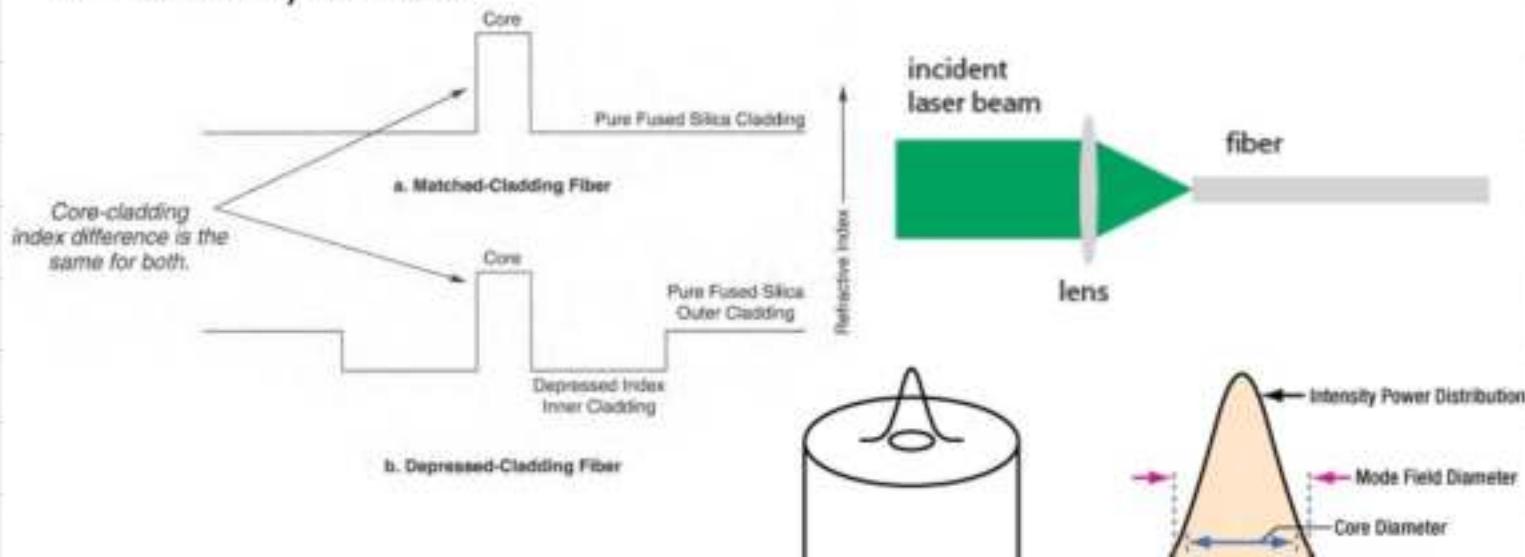
Jednovidové vlákno

□ Složité navázání světla do vlákna

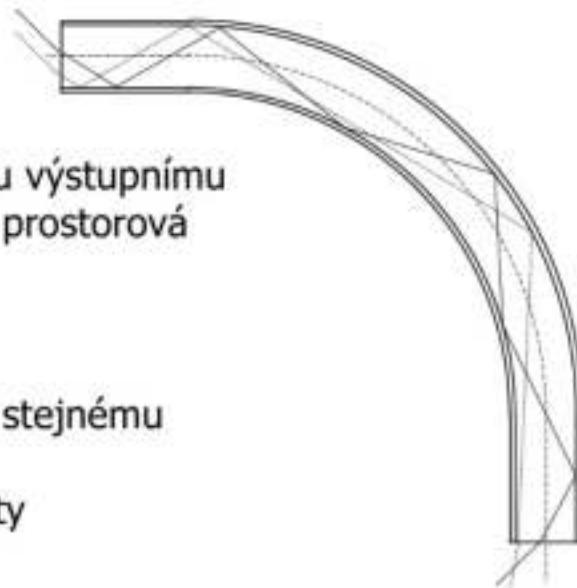
- Pokud je světlo špatně navázáno – značná část světla ztracena na rozhraní jádro-plášt'

□ Požadavky na **kvalitu vstupního světla**

- Stabilní **optomechanický setup** (**fokusační čočka** s ohniskem dle parametrů vstupního světla a velikost vlákna, řada držáků)
- Požadavky na fixaci



- Mnohoočkové vlákno

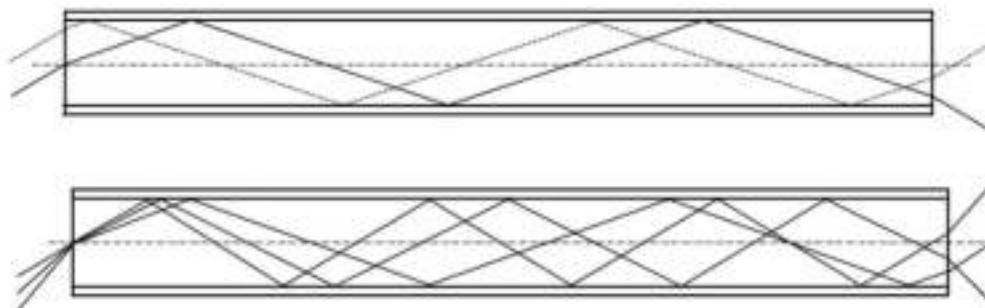


Rovné vlákno

- stejný vstupní úhel odpovídá stejnemu výstupnímu
- různý vstupní úhel (různý výstupní) – prostorová distribuce intenzity

Zahnuté vlákno

- stejný vstupní úhel nemusí odpovídat stejnemu výstupnímu
- úhlová a prostorová distribuce intenzity

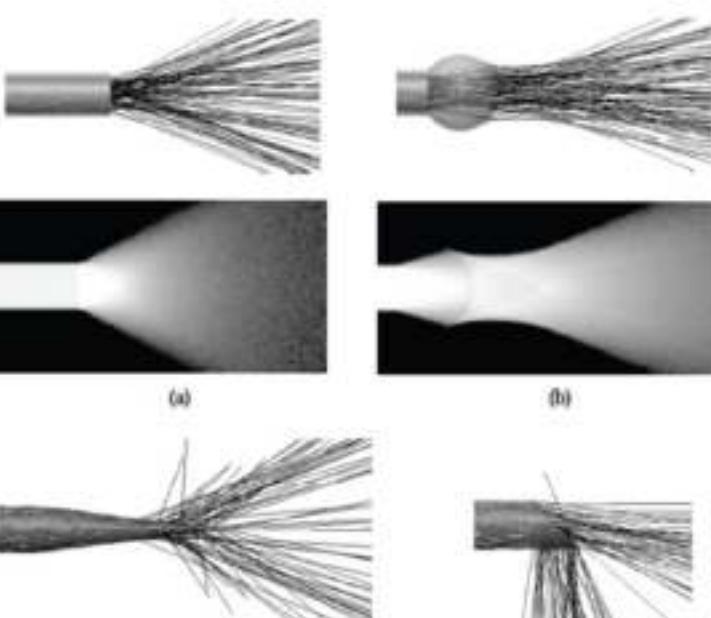


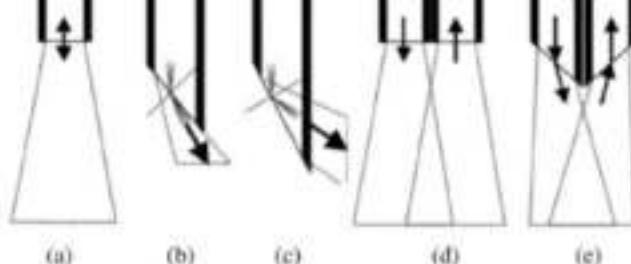
Lypy zakončení

Pro průzkumná vláknová zařízení v biomedicíně

zakončení (hroty) vlákna dle aplikace

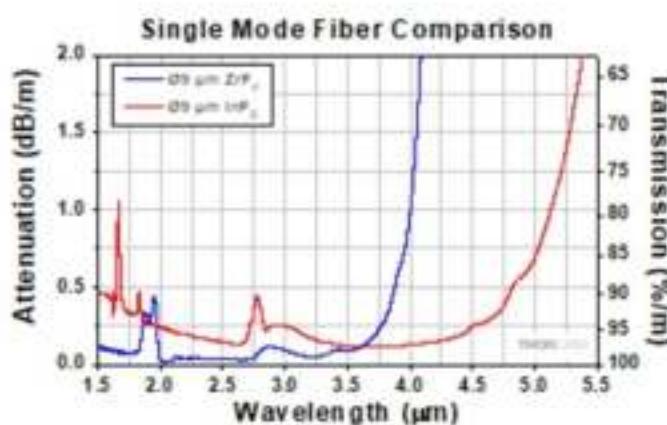
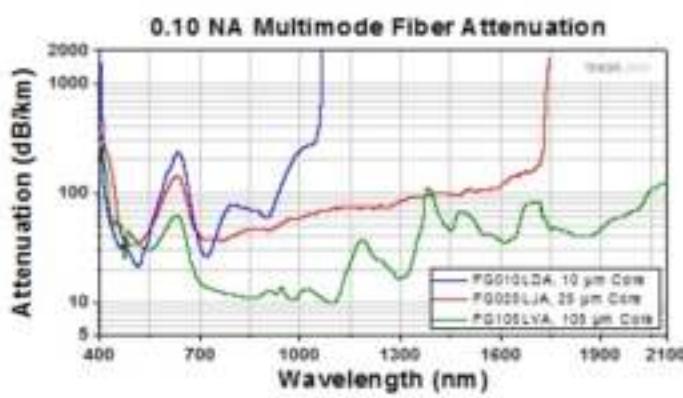
- difúzní
- rovné hladké
- zkosený konec
- vícevláknové zakončení





- přenos, útlum

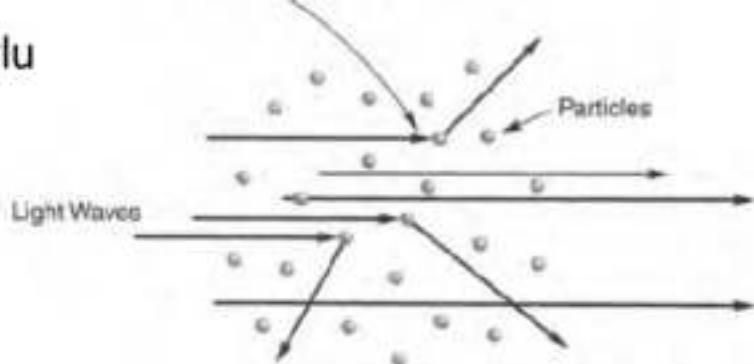
- Efektivita přenosu světla světlovodem **nezávisí pouze na NA**
- Dalšími faktory jsou:
 - **Fresnelovy ztráty** na rozhraní vlákna (cca 4 % na každém konci)
 - **kvalita zpracování** vlákna (rozštěpení vlákna, opracování, leštění)
 - **absorpce světla** uvnitř vlákna (přítomnost oxidů různých kovů)
 - úměrné celkové délce světleného paprsku ve vláknu
 - **nedokonalé totální odrazy** na rozhraní jádro pláště
 - značné množství odrazů
 - **lom a rozptyl** světla



- Rayleighova rozptyl

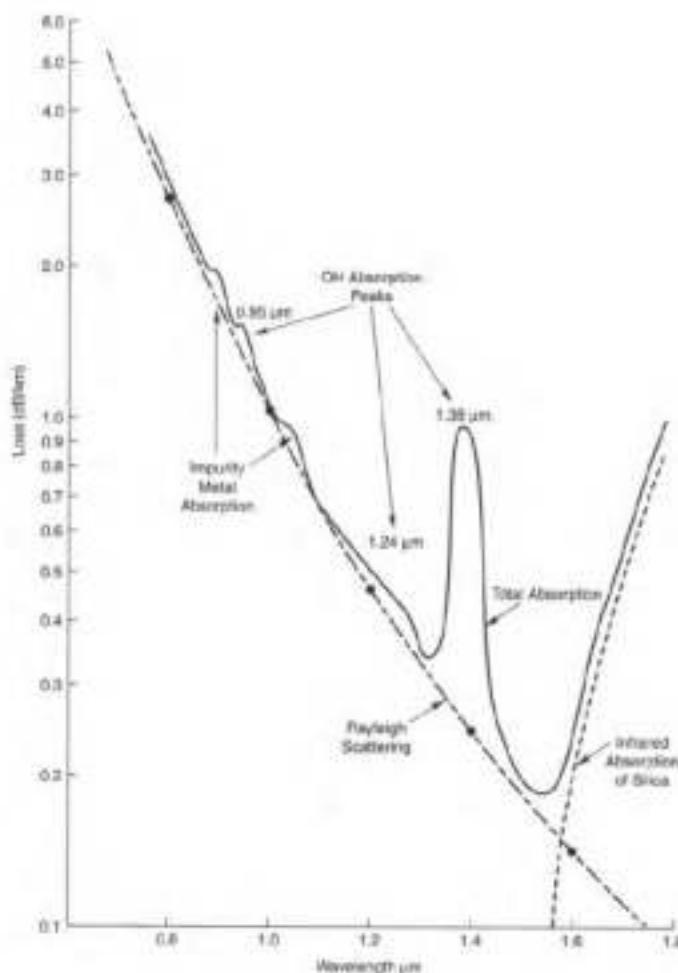
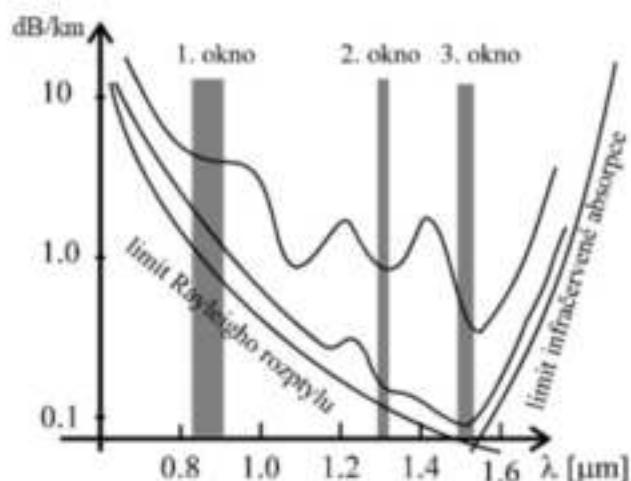
- kumulativní charakter
- rozptyl na částicích
- podobný charakter jako absorpcie
 - světlo nenávratně ztraceno
- **čím déle** se bude světlo šířit vlnovodem **tím je pravděpodobnější** uplatnění **rozptylu**
- závislost na **materiálu** a **velikosti** jednotlivých **částic** **vzhledem k vlnové délce světla**

- S nižším vlnovodem délka rozptylu přibývá



ztráty, vlivy

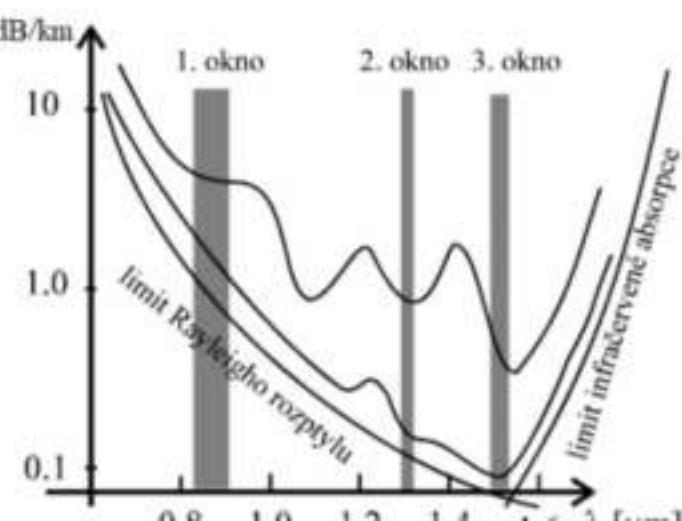
- ztráty v [dB/km]
- Absorpce**
 - hydroxyl ion (OH) absorption
- rozptyl**
- materiálově závislé
- v komunikacích (**3 hlavní okna**)



- ztráty v [dB/km]
- celkové ztráty P
- z – celková délka optického vlákna

$$\alpha = \alpha_R + \alpha_O + \alpha_M + \alpha_A + \alpha_N$$

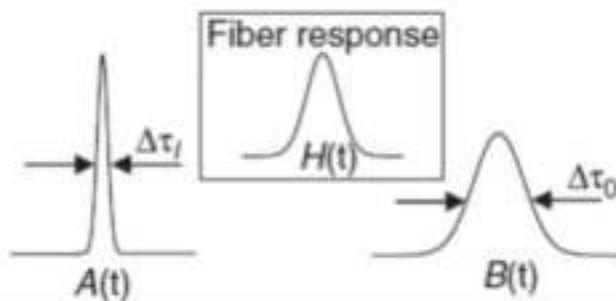
$$P \approx e^{-\alpha z}$$



- α_R - koeficient Rayleighova rozptylu
- α_O - koeficient rozptylu na ohybech a jiných deformacích
- α_M - koeficient rozptylu na mikroohybech
- α_A - koeficient absorpce
- α_N - koeficient rozptylu na makroskopických neregularitách

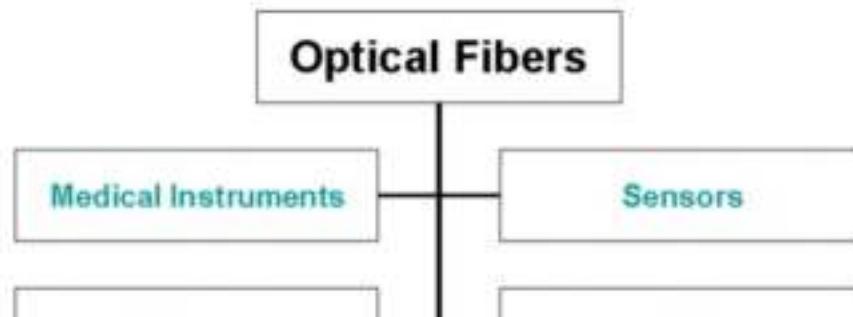
- disperze

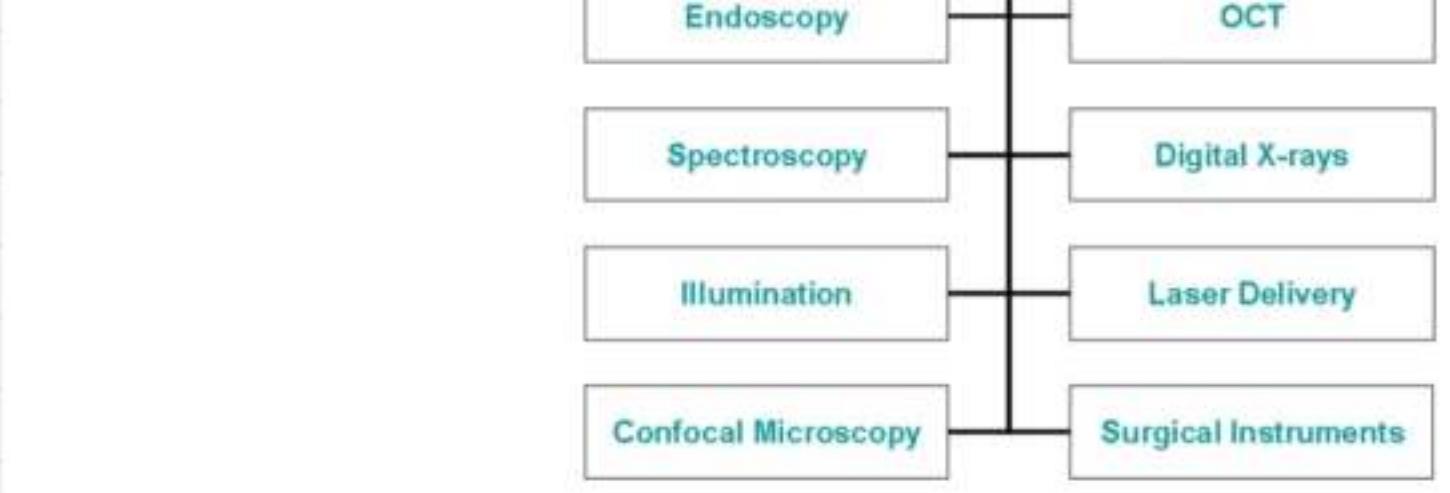
- Příčina zkreslení výstupního signálu z vlákna
- Několik typů
 - **chromatická**
 - pulsy s balíkem vlnových délek (každá jiná rychlosť šíření)
 - různý index lomu vlákna pro danou vlnovou délku
 - **materiálová**
 - disperze způsobená typem materiálu
 - **vidová**
 - každý mód dorazí na výstup v různých časových úsecích
 - redukce vláknem s **gradientním** indexem lomu
 - **polarizační**
 - jedna ze 2 složek polarizace se šíří ve vláknu jinak rychle



- využití v biomedicíně

- Typ vlákna vždy dle aplikace
 - jednovidové
 - mnohavidové
 - ponechávající polarizaci
 - s dvojitým pláštěm
 - a jiné...

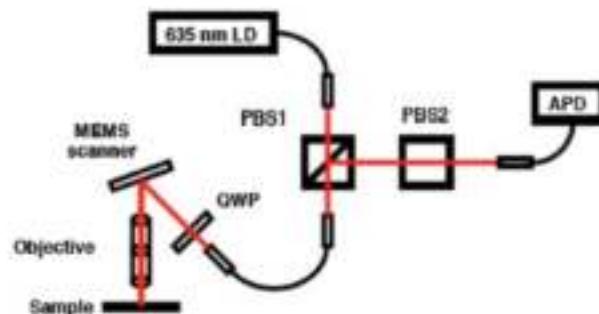
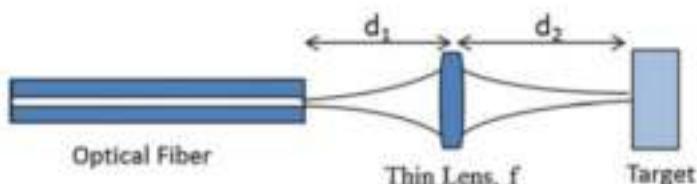




- konfokální mikroskopie

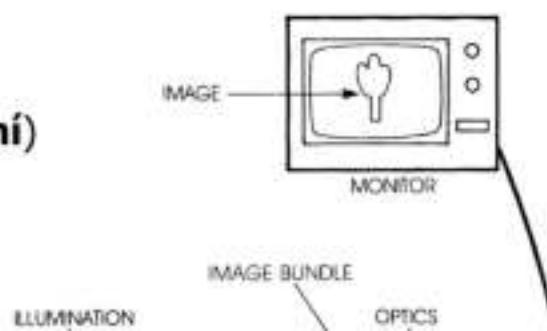
- Pro standardní konfokální mikroskopii – potřeba objemné optiky
 - Pozorování buněčných struktur
 - běžně hlavně *in vitro*, a snadno dostupná *in vivo* měření
- **Nahrazení pinhole (dírkové apertury) optickým vlákном**

- Např. přes **MEMS** řízené skenování
- **Jednovidové** vlákno
- Detekce např. pomocí **fotodiody**
- Doplňkové děliče svazku
- Polarizátory

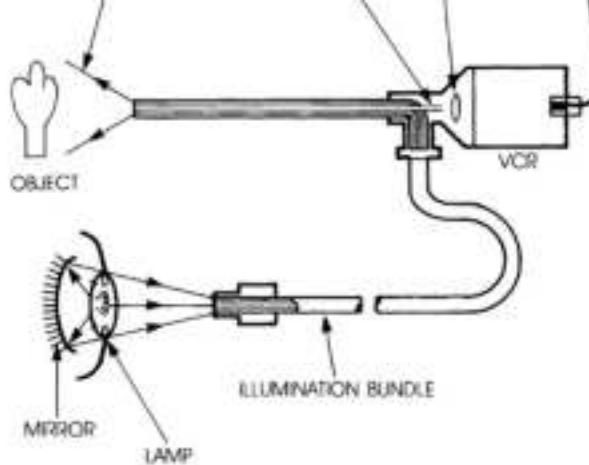
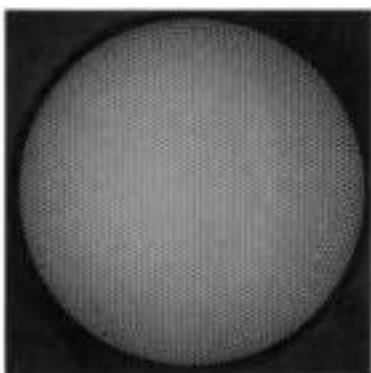


- fiberoptiky

- Inspekční zařízení
- Několik typů vedení optických vláken
- Svazek vláken (**zobrazování**)
- Mnohavidová vlákna (vedení světla – **osvětlení**)
- Další **vstupy a výstupy** na konci endoskopu
 - vzdálená kontrola
 - Prouždění vzduchu, vody.



- další nástroje (biopsie, cytologii)



https://cs.wikipedia.org/wiki/Endoskopie#/media/Soubor:Endoscopy_nci-vol-1982-300.jpg

- endoskop, videoendoskop,

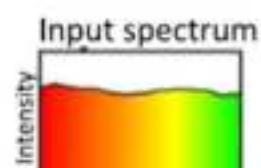
- Hyperspektrální snapshot endoskopie
- Rozšířená realita (více pohledů, doplňková data)
- VR testování a simulace
- Nové obrazové modality (zapojení fáze, polarizace)

- slábnové interferometry, optická mikroskopie
- fibero - bragg grating

- Periodické změny indexu lomu uvnitř vlákna
 - pomocí dopantů
- Vytvoření Braggovské mřížky
- Vlnová délka odpovídající Braggovské podmínce **odražena** zpět
- Při změně parametrů vlákna (teplota, tlak a jiné) se mění parametry mřížky -> **odražená vlnová délka** se mění

□ Biosenzory

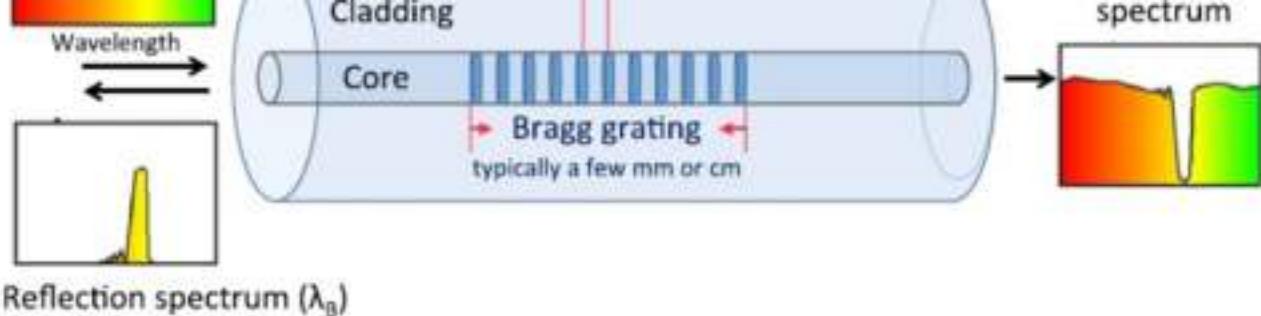
$$\lambda_B = 2n_{eff}\Lambda$$



n_{eff} - mezi indexy jádra a pláště



Transmission



2.9) Hyperspektrální snímání - techniky, použití, aplikace

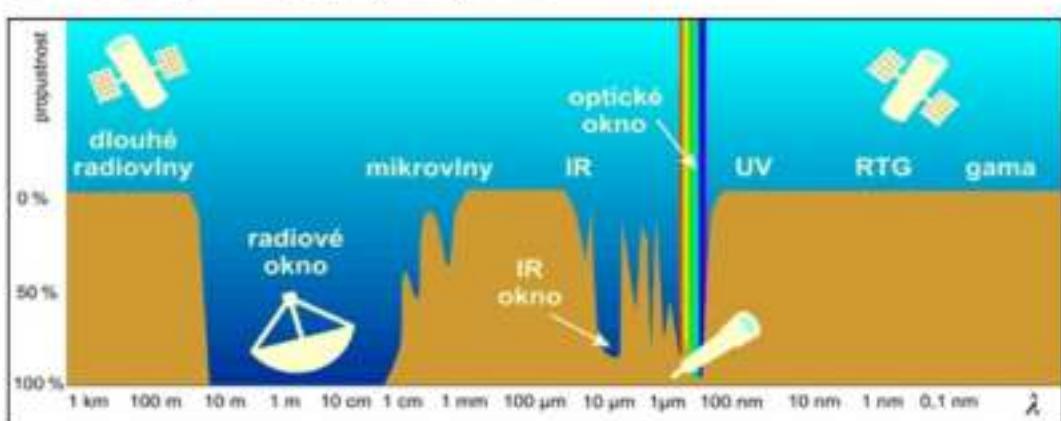
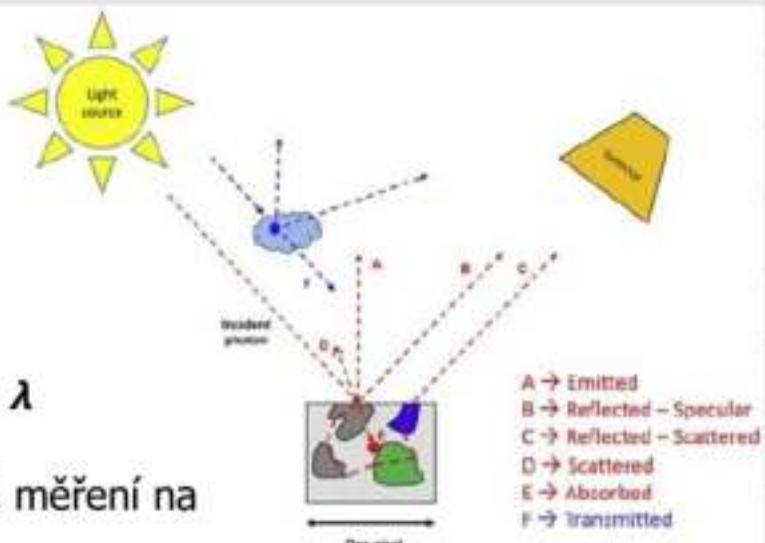
interakce světla s hmotou

□ Interakce světlo x hmota

- Absorpce
- Odraz (+ rozptyl)
- Transmise
- Emise

□ Atmosféra propouští pouze záření na λ

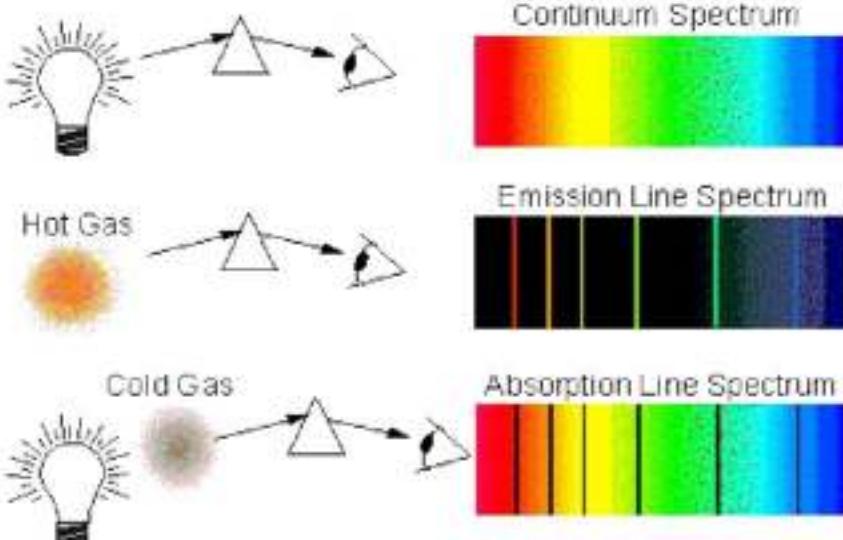
- **Spektrální okna**
- Důležité pro **dálkové snímání**, měření na delší vzdálenosti
- Zdroje útlumu atmosféry – voda, kyslík, oxid uhličitý....



spektroskopie x spektrometrie

- často **zaměnitelné** (vyjadřující totéž)
- spektroskopie – **vznik a vlastnosti spekter** (interakce světla a hmoty)
- spektrometrie – **aplikace spektroskopie, měření určitého spektra, kvantifikace**, ale i hmotností spektrometrie (náboj vs hmota)

- Absorpční** spektroskopie
- Transmisní** spektroskopie
- Emisní** spektroskopie
- Reflektanční** (rozptylová)



Dle spekter lze identifikovat jednotlivé prvky

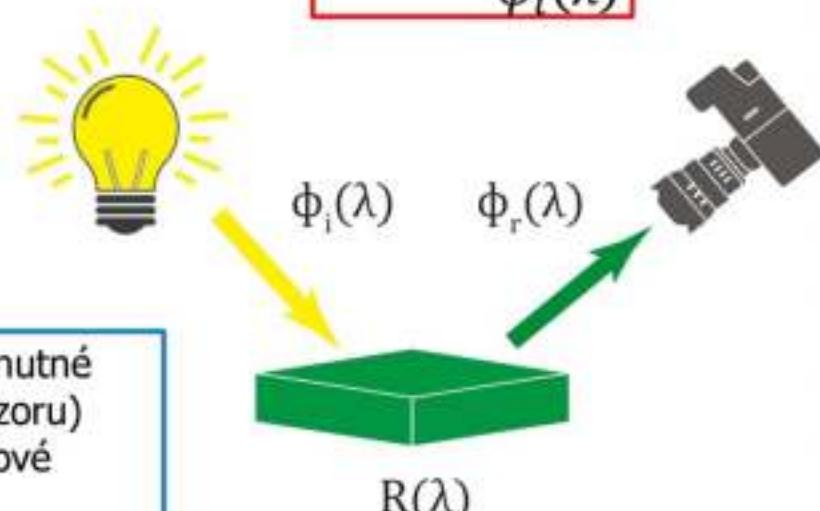
Spektrální zobrazování

2D záznam obrazu + spektroskopie (nejčastěji reflektančí)

měření odrazivosti

- Značně závisí na **typu světelného zdroje** (jeho **vlnové délce λ**)
- Změna odrazivosti dle typu materiálu/hmoty**

$$R(\lambda) = \frac{\phi_r(\lambda)}{\phi_i(\lambda)}$$



Při snímání optickým systémem je nutné uvažovat i **citlivost snímače** (senzoru) daného systému v závislosti na vlnové délce $\psi(\lambda)$.

V případě přidání prostorové informace (2D) se souřadnicemi x_s, y_s a uvažování **diskretizace**, můžeme získaný **multi/hyperspektrální** snímek popsat jako

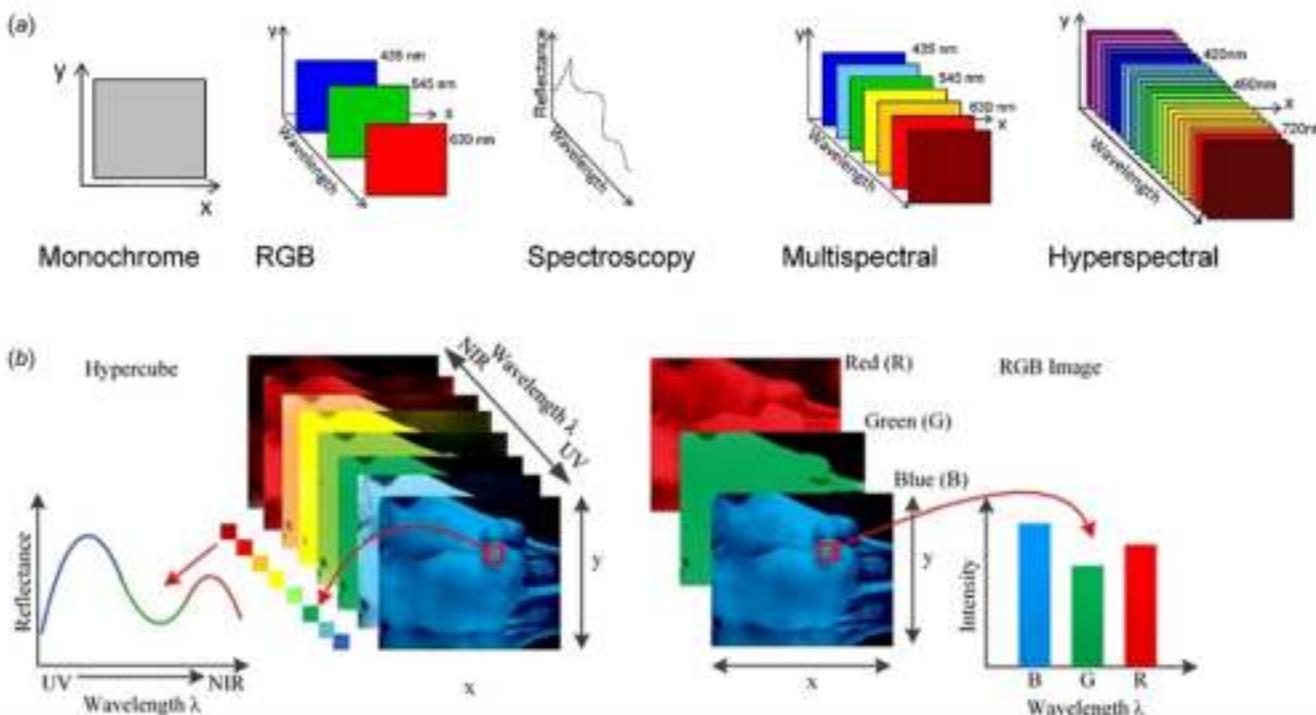
$$I_{HS}(x_s, y_s, \lambda) = \phi_i(x_s, y_s, \lambda) R(x_s, y_s, \lambda) \psi(x_s, y_s, \lambda)$$

- Zářivý tok $\phi_i(\lambda)$
- Odražený zářivý tok $\phi_r(\lambda)$
- Reflektance $R(\lambda)$

snímání obrazu + spektra

- Rozdílné způsoby srovnávání

- ❑ Rozdílné způsoby zaznamenávání prostorové a spektrální informace
- ❑ **různá technika snímání**
- ❑ **různé spektrální rozsahy**
- ❑ důležitý je **počet kanálů**
- Monochromatické
- RGB
- Spektroskopické
- Multispektrální
- **Hyperspektrální (HSI)**
- Ultraspektrální

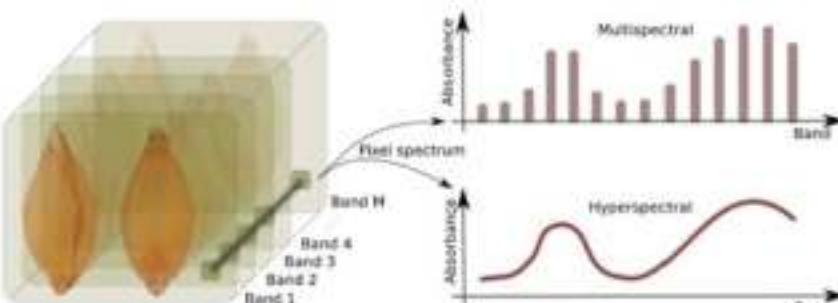


MULTIx HSI

- ❑ Odlišení v **počtu** snímaných **kanálů**

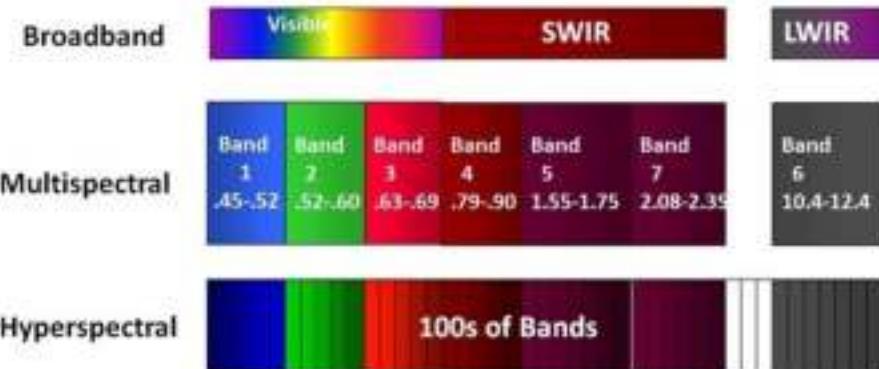
❑ Multispektrální

- **diskrétní** spektrum
- jednotky až desítky spektrálních kanálů
- Např. monitorování lesní plochy,...



❑ Hyperspektrální

- **spojité** spektrum
- **citlivější na** energetické změny v různých λ
- zachycení **více rozdílů**
- **desítky až stovky** spektrálních **kanálů**
- Např. detekce jednotlivých druhů stromů v dané lesní ploše,...



- mono \Rightarrow jedno vysílačo,
- RGB \Rightarrow 3 fotonové vysílače na sobě

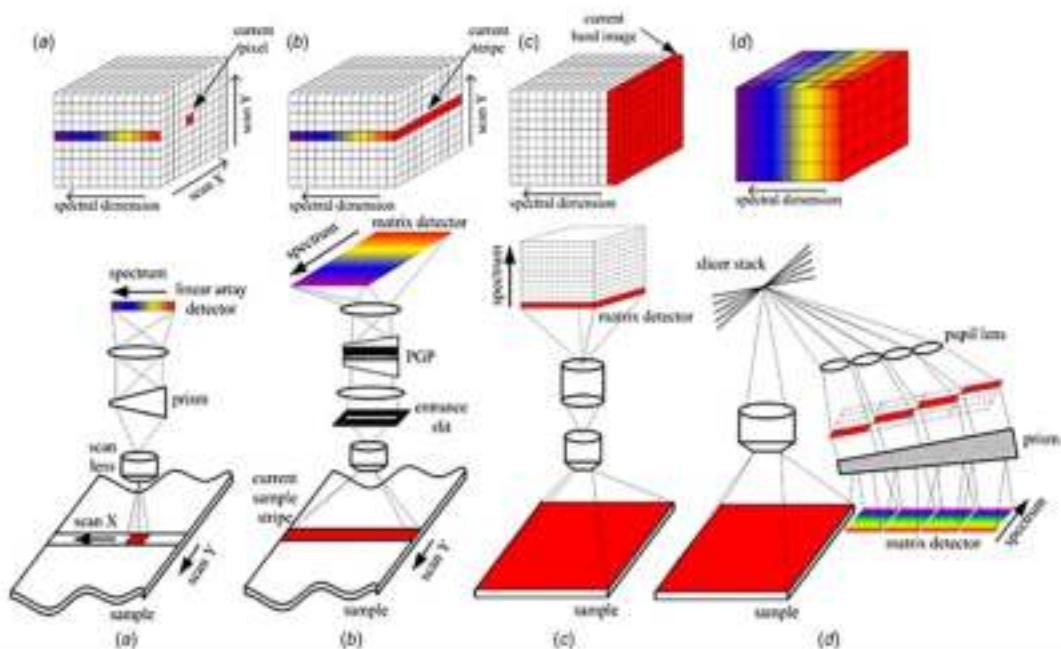
- aplikace HSI

- dálkové snímání, seismický, biotechnologie, životní prostředí, počítačová grafika, farmacie, medicína, forenzní vědy, výrobní optika, vojenské aplikace, dálkový průzkum vegetace

- Techniky snímání

- Prostorově skenovací systémy
 - **Whisk-broom**
 - **Push-broom**
- Spektrálně skenovací systémy (**Staring**)

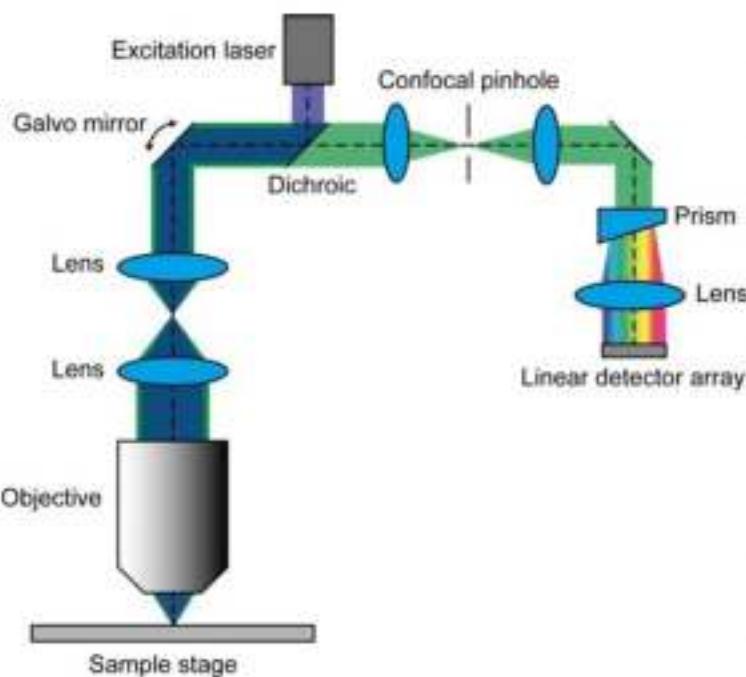
- Prostorovo-spektrálně skenovací systémy
- Snapshot** systémy (pole mikročoček, pole zrcadel...)



- push - broom

Point-scan

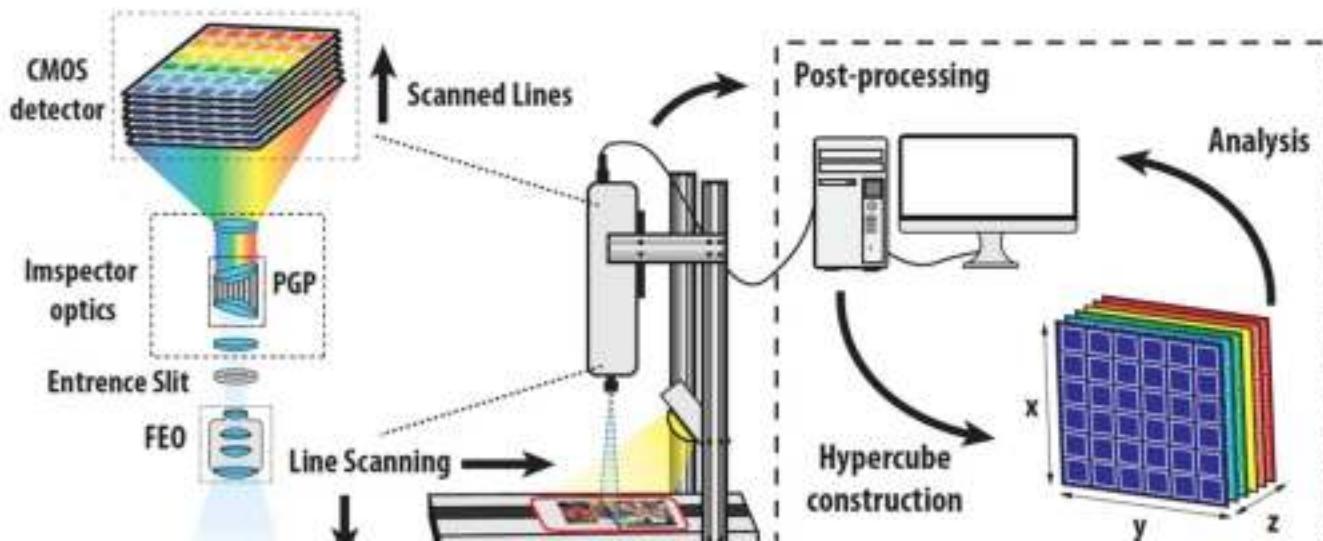
- Technika často používaná v konfokální mikroskopii (ale i jinde)
- Rastrové snímání (**bod po bodu**)
- **Pinhole** – limitace dopadajícího světla mimo ohnisko
- **Disperzní hranol či mřížka**
- Detekce lineárním detektorem snímající spektrum daného bodu
- Počet spektrálních kanálů u komerčních zařízení – 32 až 512 kanálů
- Používáno při fluorescenční mikroskopii
- **Nevýhody** při zkoumání **dynamicky se měnících procesů**



Hyperspektrální konfokální mikroskop

- push broom

- Nejrozšířenější technika HSI technika
- **Liniové skenování (rádek po rádku)**
- Každá linka rozložena do spektra
- Použití **slitu** (štěrbina)

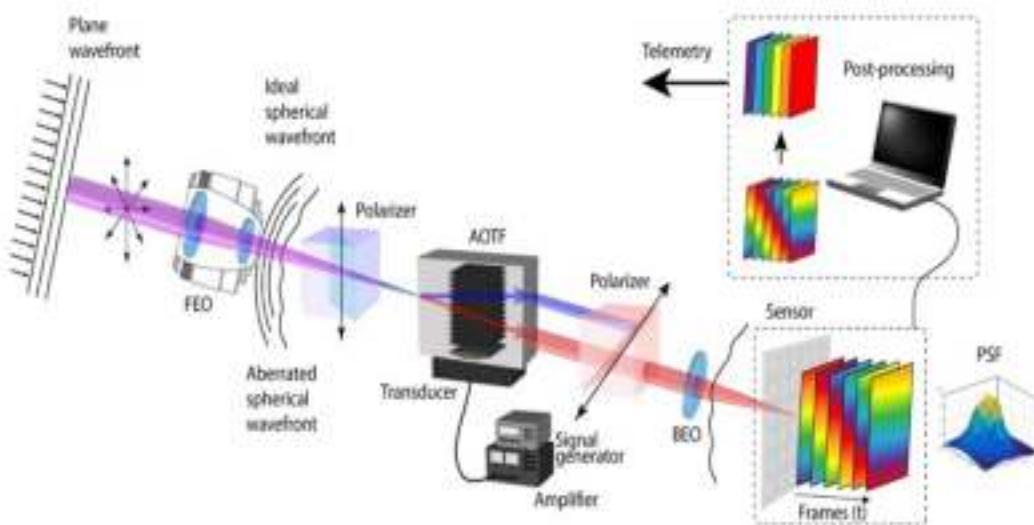


- Prostorové spektrální HSI

Spektrální rozklad pomocí laditelných filtrů

- AOTF** (Acousto-optic-tunable-filter)
- LCFT** (Liquid crystal tunable filter)

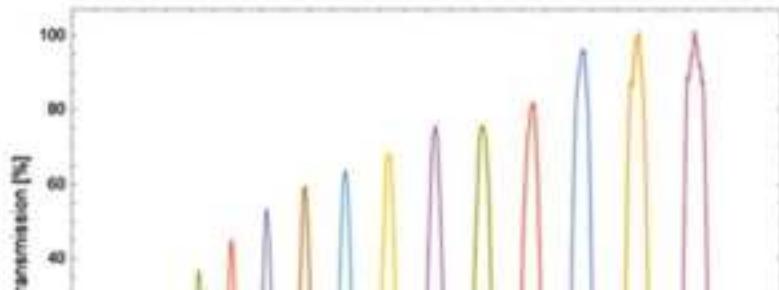
- Nastavitelné podle vyžadované vlnové délky**
- Využití **dvojlomných** optických materiálů
- Složitá optimalizace** a návrh systému
- Nutný **složitější post-processing**

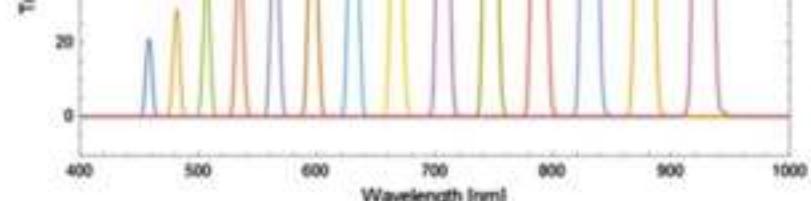


- parametry HSI systémů

- Spektrální rozsah
- Spektrální rozlišení (FWHM)
- Počet rozlišitelných spektrálních pásem
- Počet snímků za vteřinu
- Časové rozlišení – u skenovacích systémů
- Prostorové rozlišení (optika, detektor)
- Velikost slitu (vstupní štěrbiny, nebo pinhole)
 - šířka, délka, průměr
- Parametry elektroniky
- FOV, IFOV
- Ohnisková vzdálenost optiky
- Zvětšení
- a mnoho dalších...

$$R = \left| \frac{\lambda}{\Delta\lambda} \right|$$

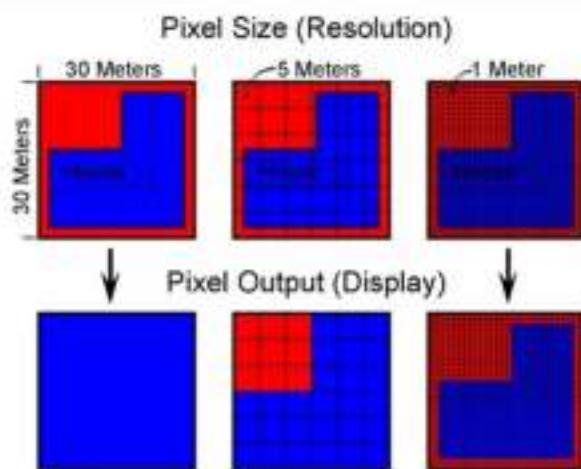




- Prostorové a spektrální rozlišení

□ Spektrální rozlišení a spektrální rozsah

- **Počet a šířka spektrálních čar**
detekovaných senzorem daného systému
- šířka spektrální čáry měřena v **FWHM**
(full-width half maximum)

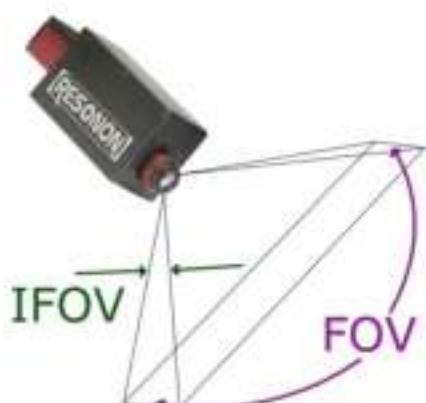


□ Prostorové rozlišení

- **nejmenší objekt** který lze rozlišit pomocí daného senzoru
- často také – jako **IFOV** (instantaneous field of view)
- Oblast povrchu, reprezentovanou každým pixelem
- Optika (difrakční limit)
- Rozlišení senzoru
- Důležitá je vzdálenost snímače od povrchu

□ Časové rozlišení (doba ze kterou je nasnímáno)

- remote sensing (družice, dron, letadlo)



- reprezentace HS dat

□ Zaznamenaná data

- **3D data cube**
- 2 prostorové dimenze a spektrální dimenze
- $I(x, y, \lambda)$

□ Takto reprezentovaná data náročná na uložení

- **kompresní algoritmy**
- neustálý vývoj v oblasti komprese
- **redundance ve spektrální i v prostorové oblasti**

□ Bezeztrátová komprese

- **Vektorová kvantizace**
- **Prediktivní kódování**

□ Ztrátová

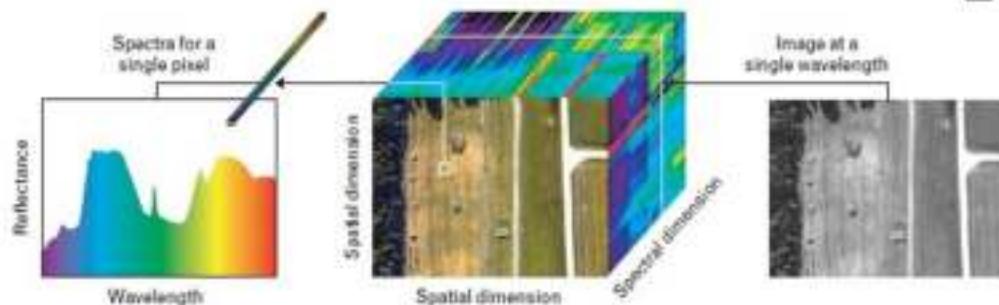
- Metody založné na **PCA**

□ Využívané **transformace** pro ztrátovou komprezi HS dat

- **DWT**
- **DCT**
- **KLT**

□ Organizace dat

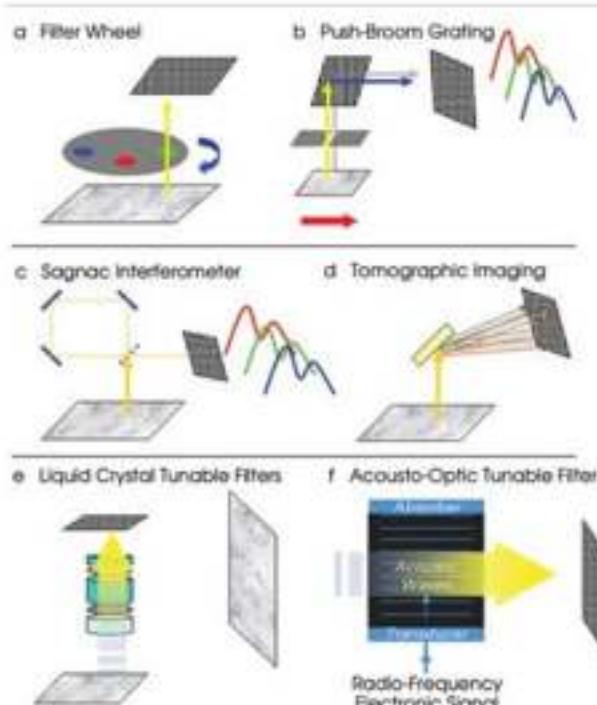
- **BSQ** (band sequential) – dostupnost všech kanálů
- **BIP** (band-interleaved-by-pixel) – rychlé nalezení daného kanálu
- **BIL** (band-interleaved-by-line)



- dispersní proky

□ Zařízení používaná pro barevný rozklad

- Filtry (interferenční,...)
- Dispersní hranoly
- Dispersní mřížky (**difrakční mřížky**)
- Kombinace dispersních hranolů a mřížek
- Laditelné filtry (**AOTF, LCTF**)
- Interferometry
 - Michelson
 - Sagnac
 - Fabry-Perot)
- Mikročočky



30) Mikroskopie - techniky, porovnání, aplikace

- rozlišení mikroskopu

- podle typu objektivu a ohniové délky

- jedou se základních porovnání pro rozlišení

$$\text{je } \lambda$$

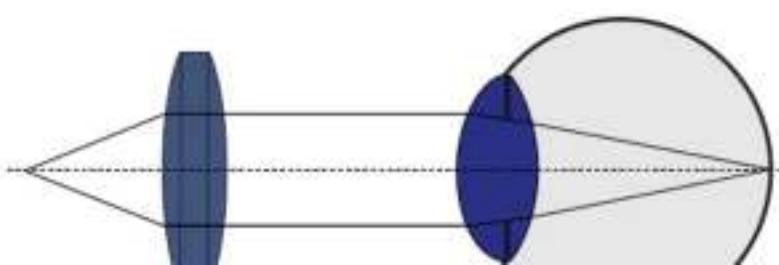
- limit rozlišení = $\frac{0,61}{NA}$

Komponenty

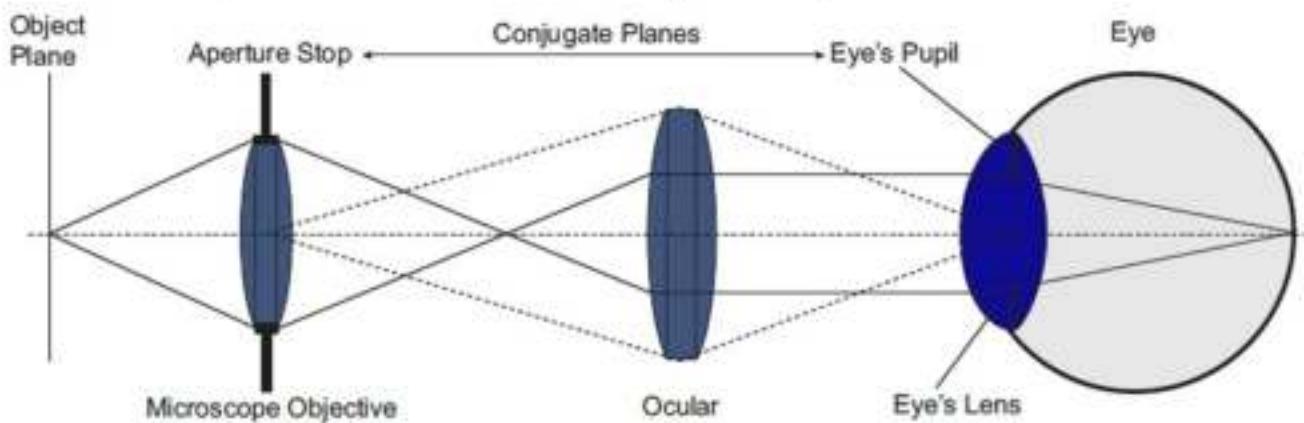
Microscope Component	Attributes
Illuminator	Light Source, Collector Lens, Field Diaphragm, Heat Filters, Light Balancing Filters, Diffuser, Neutral Density Filters
Light Conditioner	Condenser Iris, Darkfield Stop, Aperture Mask, Phase Annulus, Polarizer, Off-Center Slit Aperture, Nomarski Prism, Fluorescence Excitation Filter
Condenser	Numerical Aperture, Focal Length, Aberrations, Light Transmission, Immersion Media, Working Distance
Specimen	Slide Thickness, Cover Glass Thickness, Immersion Media, Absorption, Transmission, Diffraction, Fluorescence, Retardation, Birefringence
Objective	Magnification, Numerical Aperture, Focal Length, Immersion Media, Aberrations, Light Transmission, Optical Transfer Function, Working Distance
Image Filter	Compensator, Analyzer, Nomarski Prism, Objective Iris, Phase Plate, SSEE Filter, Modulator Plate, Light Transmission, Wavelength Selection, Fluorescence Barrier Filter
Eyepiece	Magnification, Aberrations, Field Size, Eye Point
Detector	Human Eye, Photographic Emulsion, Photomultiplier, Photodiode Array, Video Camera

Mikroskop obecně

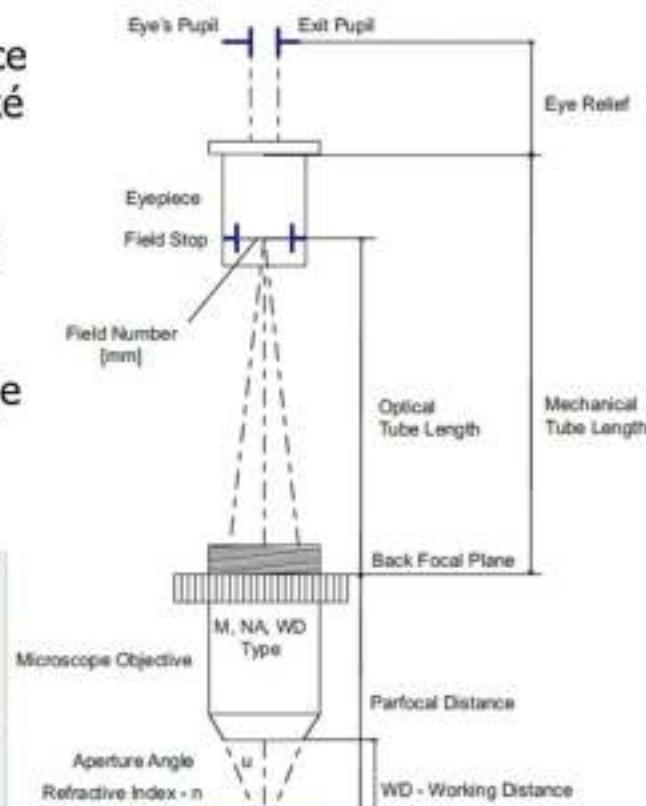
- Primárním cílem je rozlišení velmi malých detailů objektů či samotné objekty**
- Historicky**
 - mikroskop dodá **takové zvětšení objektu** abychom ho následně **mohli pozorovat lidským okem** (tyčinky, čípky)
 - **Nejjednoduší** systém
 - čočka s krátkou ohniskovou vzdáleností (zvětšení)
 - objekt je umístěn v ohniskové vzdálenosti
 - čočka zobrazuje do nekonečna
 - lidské oko pak vytvoří finální obraz na sítnici



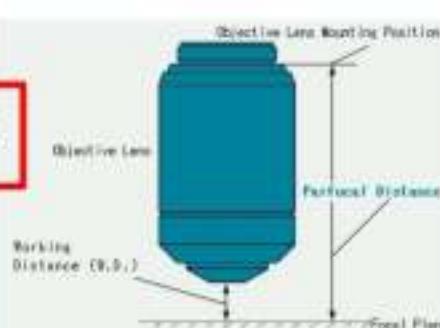
- Pro vyšší rozlišení (Robert Hooke 17. století)
 - mikroskop složený z **více čoček** (compound microscope)
 - **objektiv + okulár**
 - objektiv (krátká ohnisková vzdálenost)
 - **bлизко** objektu
 - vytvoří **reálný obraz** v **ohniskové rovině** okuláru
 - **okulár** zobrazí následně **obraz** do **nekonečna**
 - vyrovnávání vstupní apertury se zornicí oka
 - **lidské oko** pak následně zobrazí **výsledný obraz** na **sítnici**



- Historicky mikroskopy stavěny s **trubicí konečné délky** (finite tube length)
 - Objektiv zobrazuje předmět na konec trubice
 - Okulárem je pak předmět zobrazen na lidské oko (sítnici)
 - Dle výrobce se rozměry trubice mění (např. Zeiss 160 mm)
 - Konstantní **parfokální** vzdálenost umožňuje konstantní zaostření (změna **zvětšení** dle **objektivu bez ostření**)

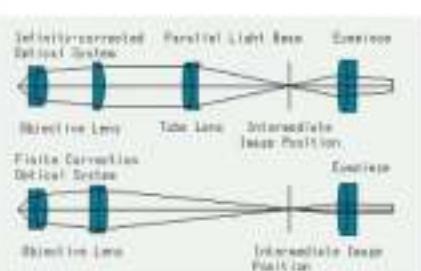
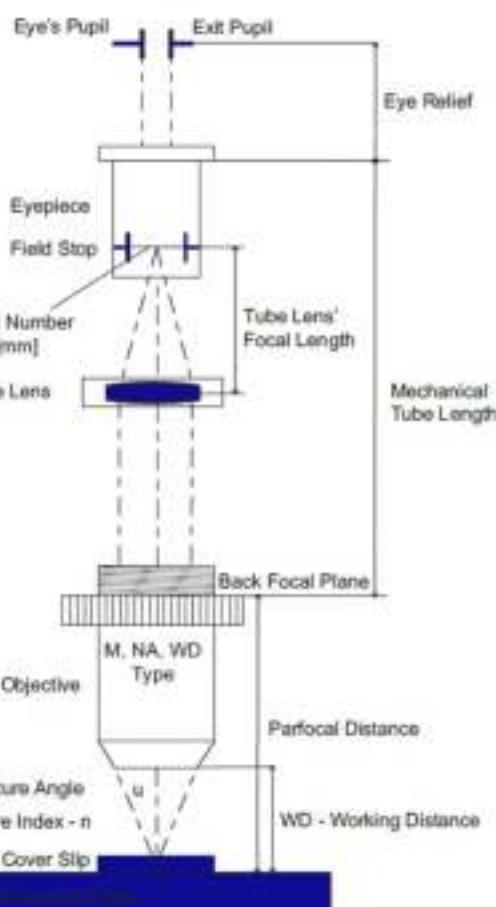


$$FOV [mm] = \frac{Field\ Number}{M_{objektivu}}$$



□ Zakomponování další optiky (**tube lens**) do optické cesty

- objektiv **zobrazuje do nekonečna**
 - infinity-corrected objective lens
- pomocí dodatečné čočky zobrazíme „meziobraz“
- obraz může být nasnímán **sensorem**, či znova zobrazen **okulárem**
- **eliminace** optických **vad** objektivu
- lze do optické cesty **vkládat filtry, beamsplittery, polarizátory** atd.
 - není narušena optická cesta



<https://www.olympus-lms.com/cs/microscope/terms/feature15/>

- zvětšení mikroskopu

□ Zvětšení jak objektivu tak okuláru

$$M = M_{\text{objektiv}} \cdot M_{\text{okular}}$$

□ Pro **průměrnou populaci** min. ostríci **vzdálenost 250 mm**

$$M_{\text{okular}} \approx \frac{250 \text{ mm}}{f_{\text{okular}}}$$

□ Pro mikroskopy **bez korekce** na nekonečno (objektiv zvětšení z řady 10; 12,5; 16, 20, 25, 32, 40, 63, 80, 100)

□ Pro mikroskopy korigované na nekonečno s doplňkovou optikou

$$M_{\text{objektiv}} \approx \frac{f_{\text{tube lens}}}{f_{\text{objektiv}}}$$

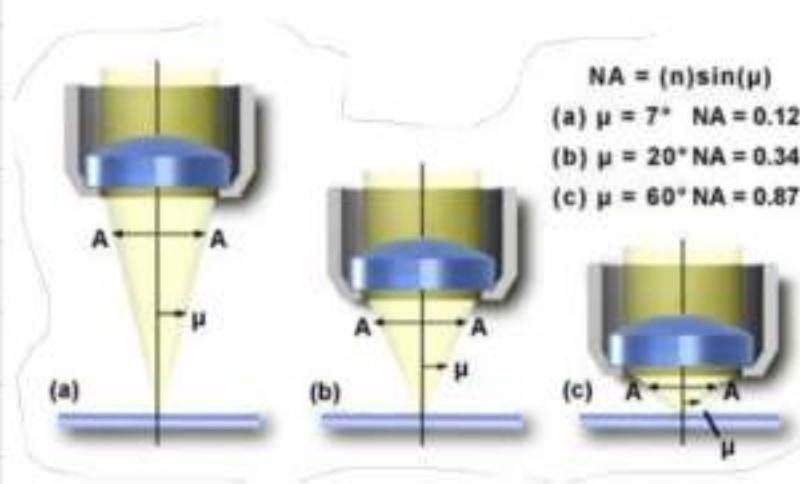
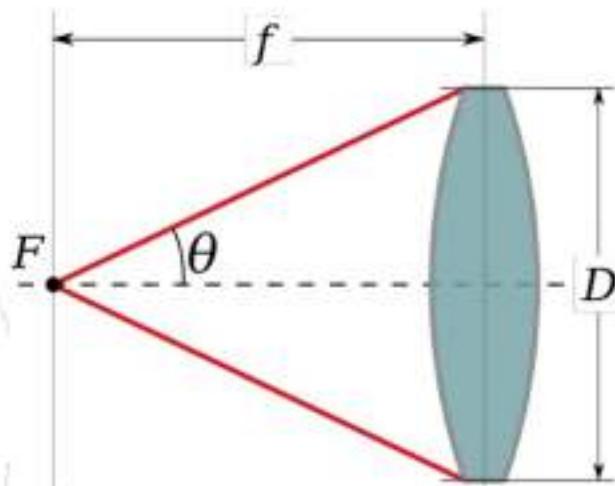
□ Celkové zvětšení

$$M = \frac{f_{\text{tube lens}}}{f_{\text{objektiv}}} \cdot \frac{250 \text{ mm}}{f_{\text{okular}}}$$

Numerická apertura

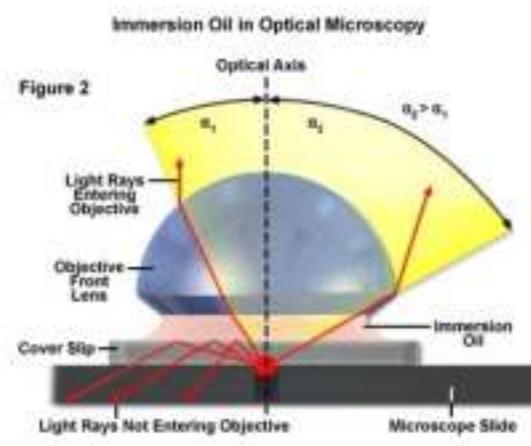
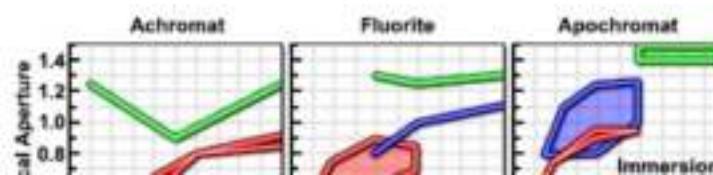
- Jeden z nejdůležitějších parametrů pro návrh mikroskopu a určení jeho parametrů
- Účinná světelnost objektivu
- Čím vyšší tím lepší
- Pro bezimerní měření max. cca 0,95

$$NA = n \cdot \sin \theta$$

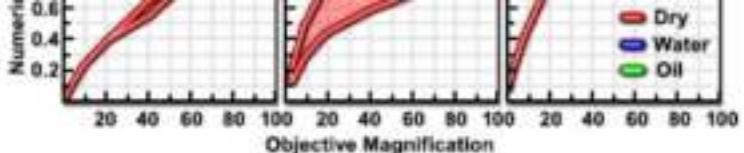


$$NA = n \cdot \sin \left[\arctan \left(\frac{D}{2f} \right) \right] \approx n \frac{D}{2f}$$

- Imerze a numerická apertura
- Schopnost objektivu zobrazit i vychýlené paprsky (zvětšení numerické aperty)
- 3 základní typy
 - voda ($n = 1.33$)
 - glycerine ($n = 1.47$)
 - imerzní olej ($n = 1.51$)



Rat Cremaster Muscle in Physiological Saline



<https://www.microscopyu.com/microscopy-basics/numerical-aperture>

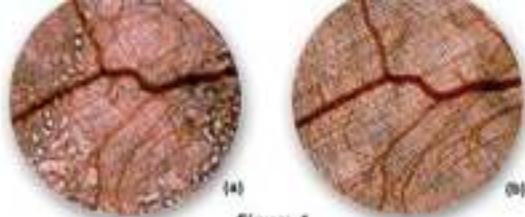


Figure 4

- rozlišení mikroskopu

- Rayleighho rozlišení (**Airyho disk**) mikroskopu
- Závislost na **vlnové délce**
- **Besselova funkce**

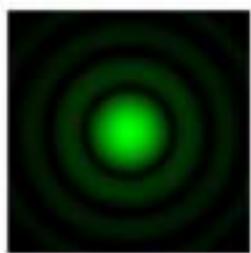
$$r_A = \frac{1.22\lambda}{NA}$$

$$E = E_0 \left[\frac{2J_1\left(\frac{\pi r}{\lambda f}\right)}{\frac{\pi r}{\lambda f}} \right]^2$$

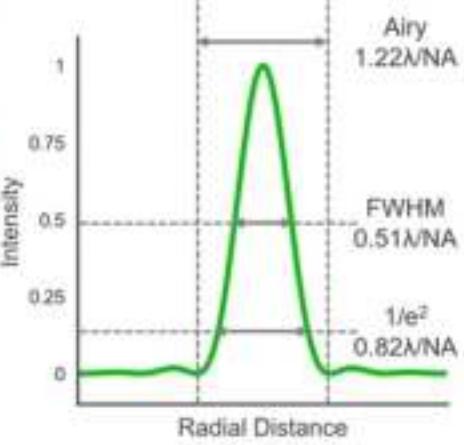
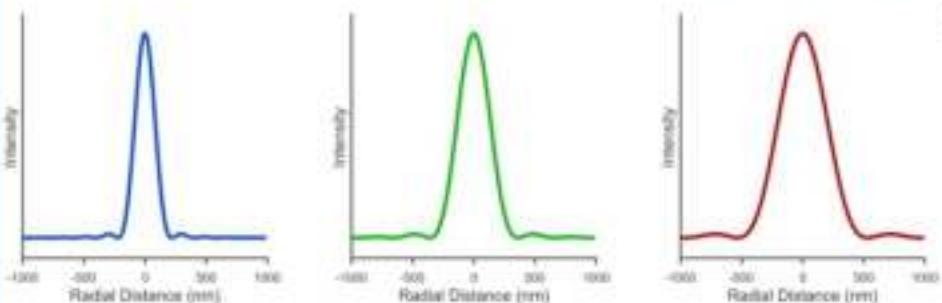
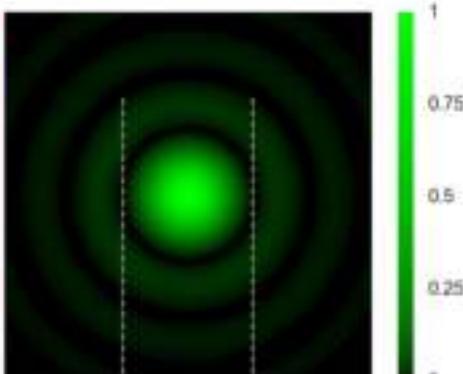
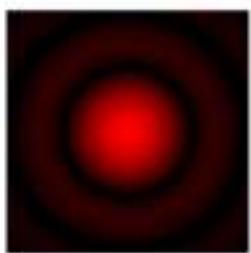
$\lambda = 325 \text{ nm}$
Airy Disc Diameter = 440 nm



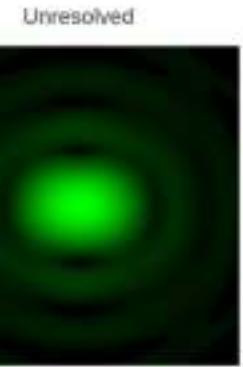
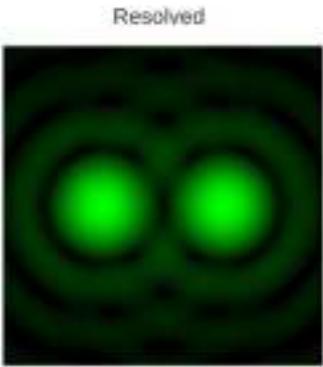
$\lambda = 532 \text{ nm}$
Airy Disc Diameter = 720 nm



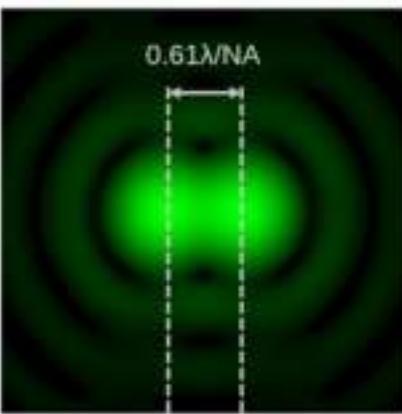
$\lambda = 785 \text{ nm}$
Airy Disc Diameter = 1064 nm

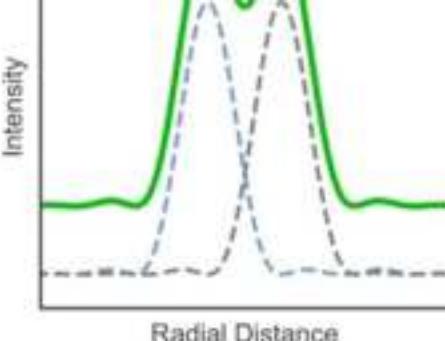
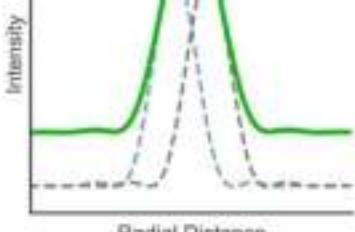
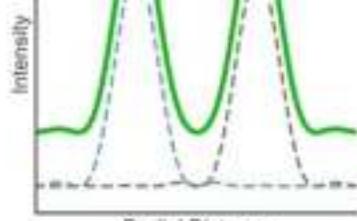


- Odlišení 2 zobrazovaných bodů od sebe



Rayleigh Resolution Limit

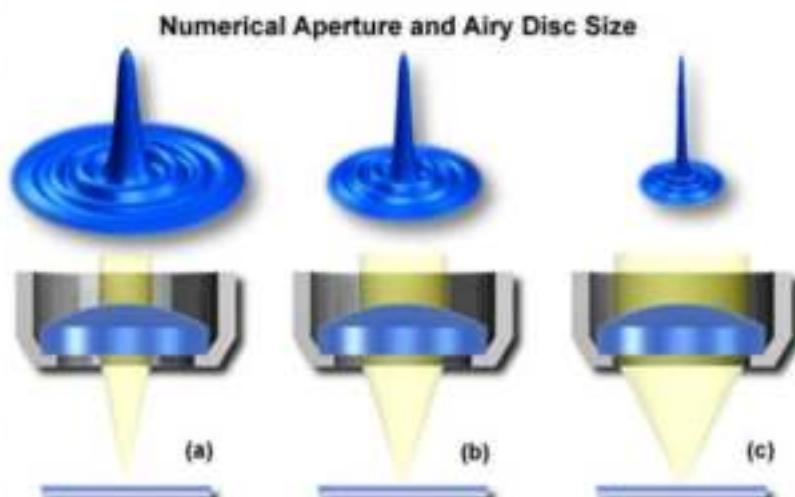




$$\text{Limit rozlišení} = \frac{0.61\lambda}{NA}$$

- rozšíření a NA

- Numerická apertura má značný vliv na rozlišení
 - Menší apertury generují větší rozptylové body (Airyho disky) a naopak
 - Stejně tak objekty korigující aberace generují menší Airyho disky



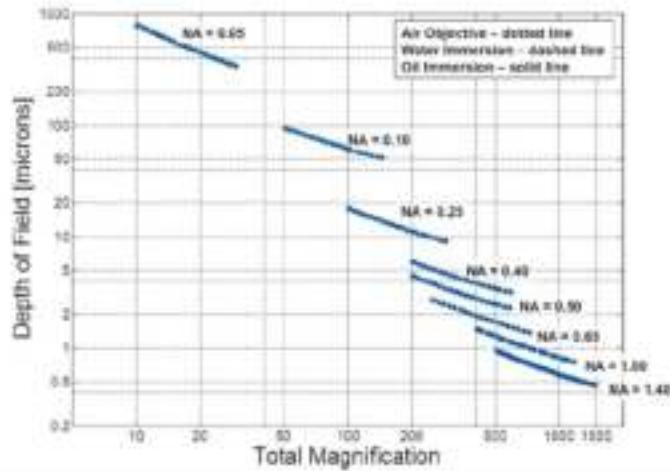
Objective Type						
	Plan Achromat		Plan Fluorite		Plan Apochromat	
Magnification	N.A.	Resolution (µm)	N.A.	Resolution (µm)	N.A.	Resolution (µm)
4x	0.10	2.75	0.13	2.12	0.20	1.375
10x	0.25	1.10	0.30	0.92	0.45	0.61
20x	0.40	0.69	0.50	0.55	0.75	0.37
40x	0.65	0.42	0.75	0.37	0.95	0.29
60x	0.75	0.37	0.85	0.32	0.95	0.29
100x	1.25	0.22	1.30	0.21	1.40	0.20

- *klonka ostrosti*

- Vzdálenost o nejbližšího ku nevzdálenějšímu objektu, který se jeví ostře
 - Závisí jak na zvětšení mikroskopu, tak na numerické apertuře
 - Index lomu a vlnová délka mají také vliv

$$hloubka_ostrosti = \frac{n\lambda}{NA^2} + \frac{n \cdot velikost_pixelu}{M \cdot NA}$$

- Vliv hraje ještě akomodace oka (pro určení vizuální hloubky ostrosti)
- Graf visuální hloubky ostrosti



- objektivy

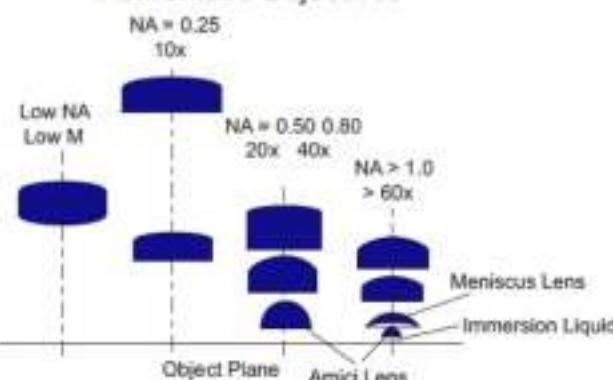
- Imerzní a bezimerzní
- Korekce aberací (Apo/Achromát)
- NA
- Zvětšení
- Pracovní vzdálenost (WD)
- Výrobce
- Tloušťka krycího sklíčka
- Fixní nebo nekonečná délka trubice mikroskopu
- Barva pro jasné odlišení zvětšení
- Mnoho dalších informací



- Objektivy korigující optické vady
 - **Achromatické** objektivy
 - korigovány na 2 vlnových délkách (656 nm, 486 nm)
 - koma a sférická aberace korigována pro zelenou (546 nm)
 - nízký astigmatismus
 - značné zakřivení pole
 - většinou **nižší NA** (pod 0,5) a **zvětšení pod 40x**

- dобра **funkcionalita** pro **bílým světlem** nebo na **jednotlivých spektrálních čarách**
- pokud jsou korigované na zakřivení pole – **plan-achromaty**

Achromatic Objectives



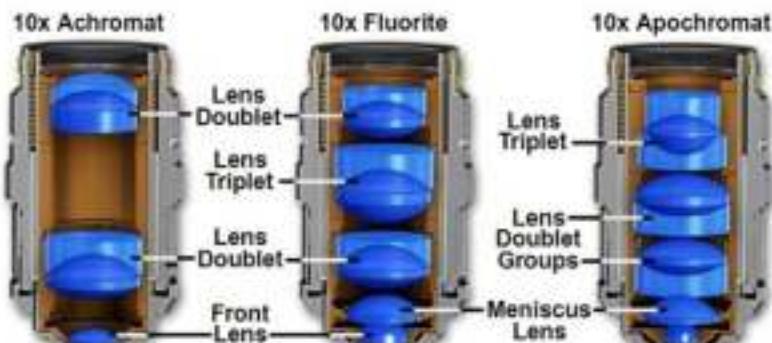
Type	Number of wavelengths for spherical correction	Number of colors for chromatic correction
Achromat	1	2
Fluorite	2-3	2-3
Plan-Fluorite	2-4	2-4
Plan-APOCHROMAT	2-4	3-5

(Adapted from Murphy, 2001 and <http://www.microscopyu.com/>)

□ Objektivy korigující optické vady

▪ **Semi-apochromatické objektivy**

- stejná barevná korekce jako achromaty
- „**Fluorites**“ – historicky dle materiálů použitých v objektivech
- Vyšší NA (např. 1,3) a zvětšení pro polarizační aplikace, diferenční interferometrickou kontrastní mikroskopii fluorescenci atd.



M	Type	Medium	WD	NA	d	DOF
10	Achromat	Air	4.4	0.25	1.34	8.80
20	Achromat	Air	0.53	0.45	0.75	2.72
40	Fluorite	Air	0.50	0.75	0.45	0.98
40	Fluorite	Oil	0.20	1.30	0.26	0.49
60	Apochromat	Air	0.15	0.95	0.35	0.61
60	Apochromat	Oil	0.09	1.40	0.24	0.43
100	Apochromat	Oil	0.09	1.40	0.24	0.43

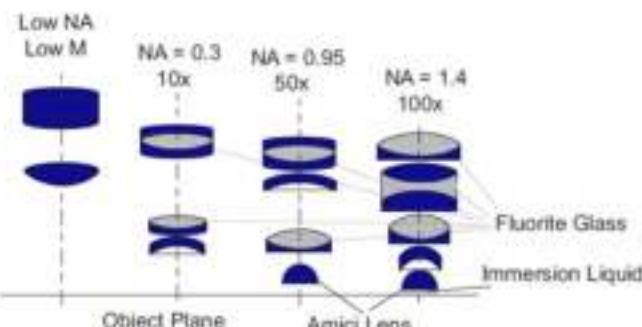
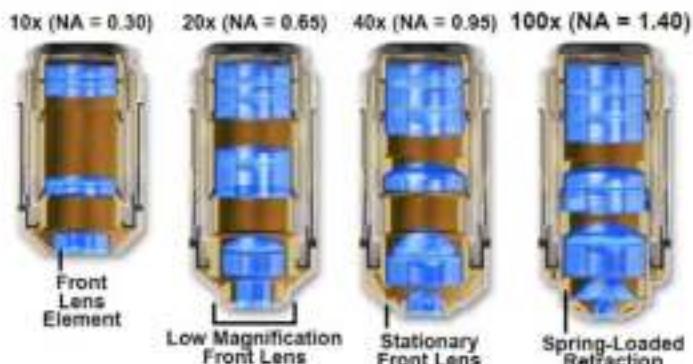
Refractive index of oil is $n = 1.515$

(Adapted from Murphy, 2001)

□ Objektivy korigující optické vady

▪ **Apochromatické objektivy**

- **korigovány na 3 vlnových délkách**
- **sférická aberace** korigována alespoň na **2 vlnových délkách**
- podobné konstrukci jako semi-apochromaty
 - Různá tloušťka a povrch optických komponent
- pokud jsou korigované na zakřivení pole – **plan-apochomaty**
- využití hlavně pro **fluorescenční** mikroskopii s rozdílnými barvami
- **vysoká numerická apertura** (1,4).
- vhodné i pro **aplikace s nízkým osvětlením**

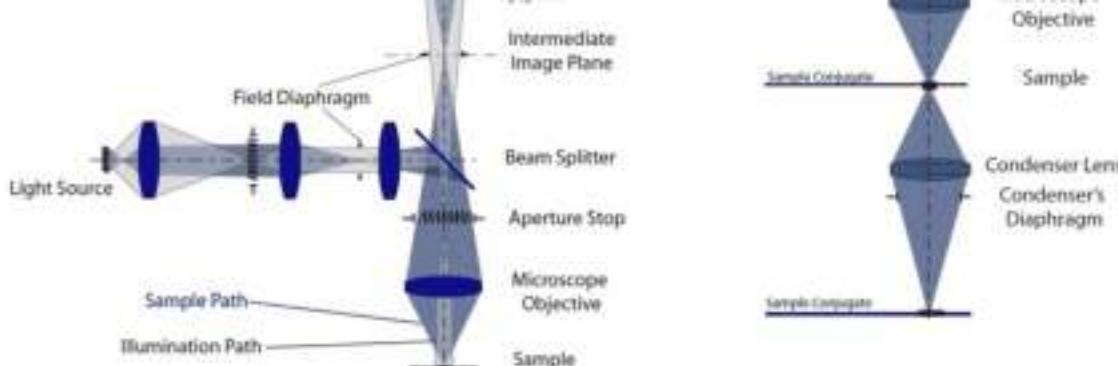


- Abyly osvětlení

- Pro zobrazování mikroskopem je velice důležitý správně zvoleny **typ osvětlovacího systému**
- Mikroskopie ve světelném poli (**bright field illumination**)
 - na barvené či přirozeně pigmentované preparáty s vysokým kontrastem
- Mikroskopie v poli zkřížených polarizátorů (**cross-polarization illumination**)
 - nastavení polarizovaného světla na vstupu a výstupu
 - světlo vycházející rotací polarizace objektem samotným
- Mikroskopie v temném poli (**dark field illumination**)
 - šikmě osvětlení, přímé osvětlení zakryto clonou
 - světlo rozptýlené objektem samotným
 - svítící objekty na temné pozadí
- Mikroskopie s fázovým kontrastem (**phase contrast illumination**)
 - objekt zobrazen díky interferenci prostupujícího světla, které prochází různými vzdálenostmi skrz objekt

- Pro zobrazování mikroskopem je velice důležitý správně zvoleny **typ osvětlovacího systému**
- Bright field osvětlení nejčastěji
 - Köhlerovo osvětlení**
 - není potřeba uniformní zdroj světla
 - vytváří uniformní osvětlení
 - díky **konjugovaní optické rovině**
 - Kritické osvětlení**
 - potřebuje uniformní zdroj světla
 - veteší hustota světla na vzorku





- kondensor

- Většinou **spojná čočka** (případně **soustava čoček**)
- Soustředění světla do **kolimovaného** svazku (rovnoměrný a rovnoběžný)
- Pro co nejlepší **uniformní** osvětlení

- Většinou asférické čočky (montáž plochou stranou směrem ke zdroji)

- Nastavení apertury kondensoru
 - změna světelného kuželu
 - Dle NA objektivu

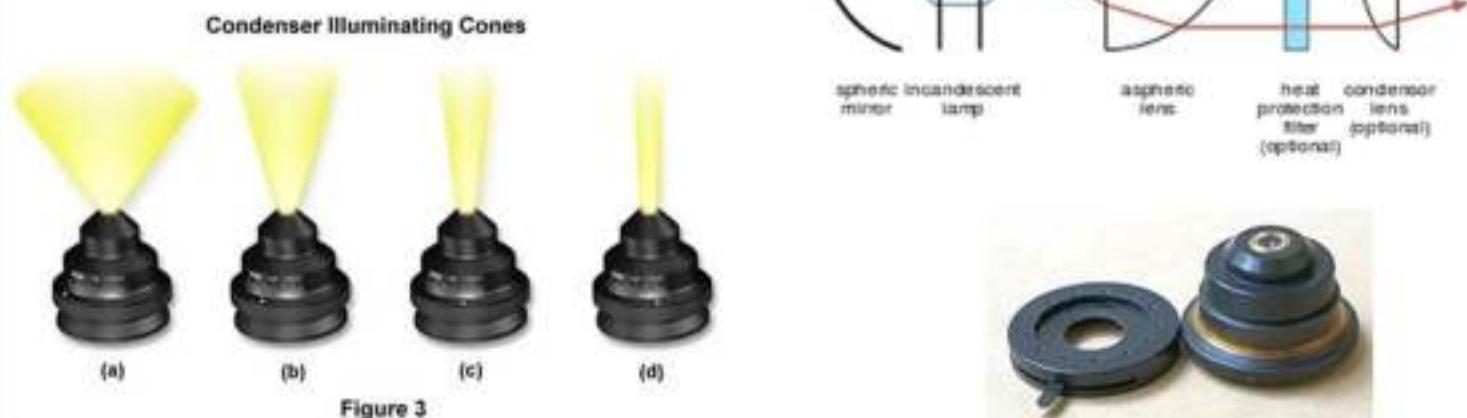
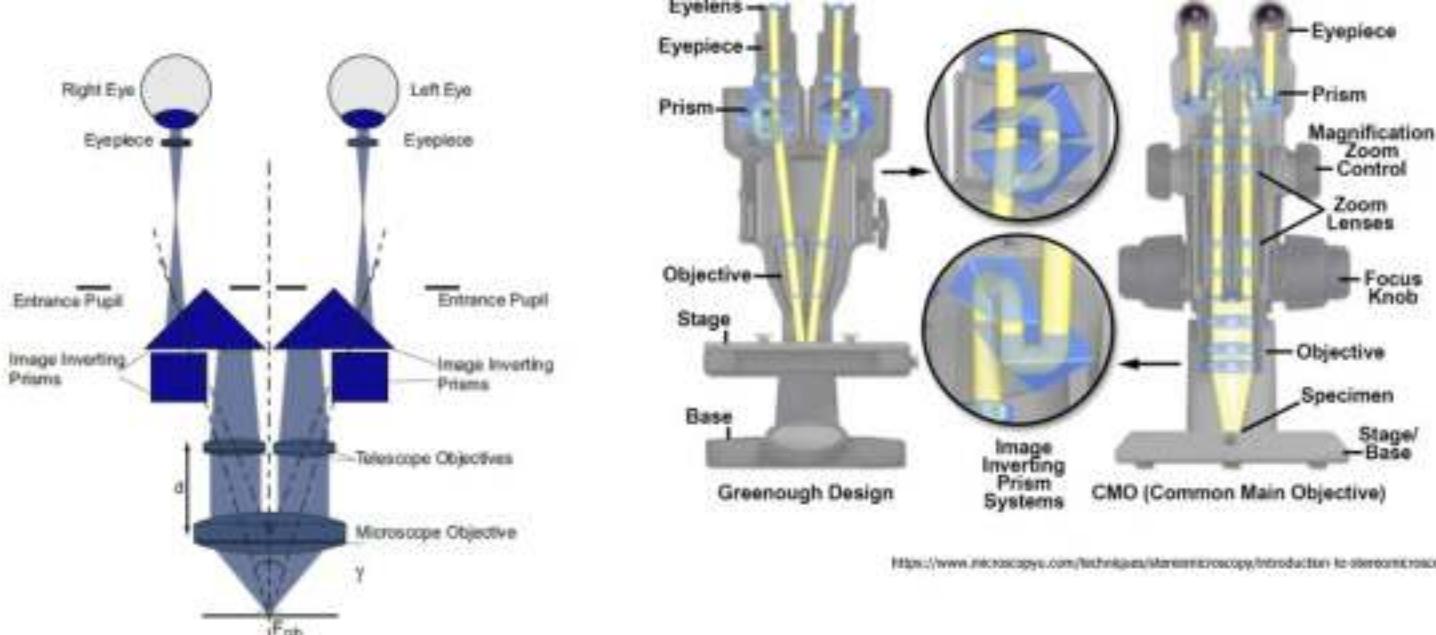


Figure 3

Syzy

- stereomikroskop

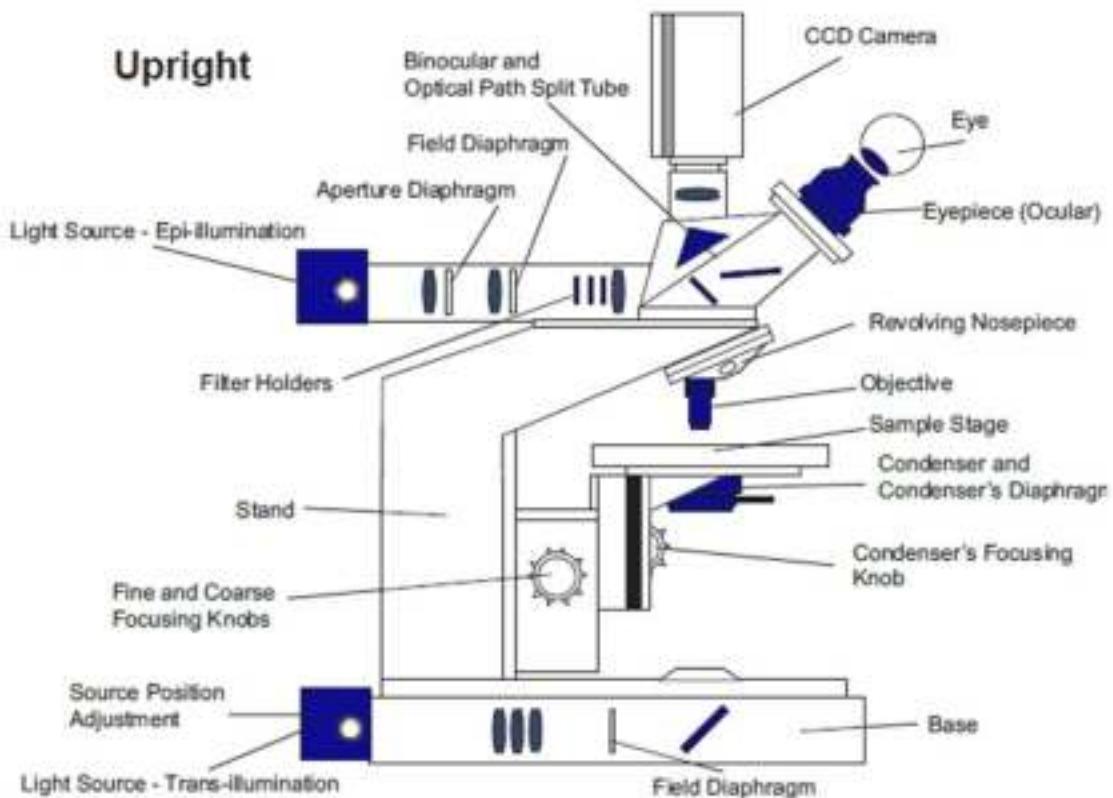
- Stavba pro vjem hloubky **zobrazovaného objektu** (3D)
- **Dva** základní **přístupy**
 - 2 nakloněné separované systémy
 - binokulární systém s jedním objektivem



<https://www.microscopy.com/techniques/stereomicroscopy/introduction-to-stereomicroscopy>

- se dívá vzpřímený

- Funkce, jak v **transmisním (DIA)**, tak **reflekčním (EPI)** módu

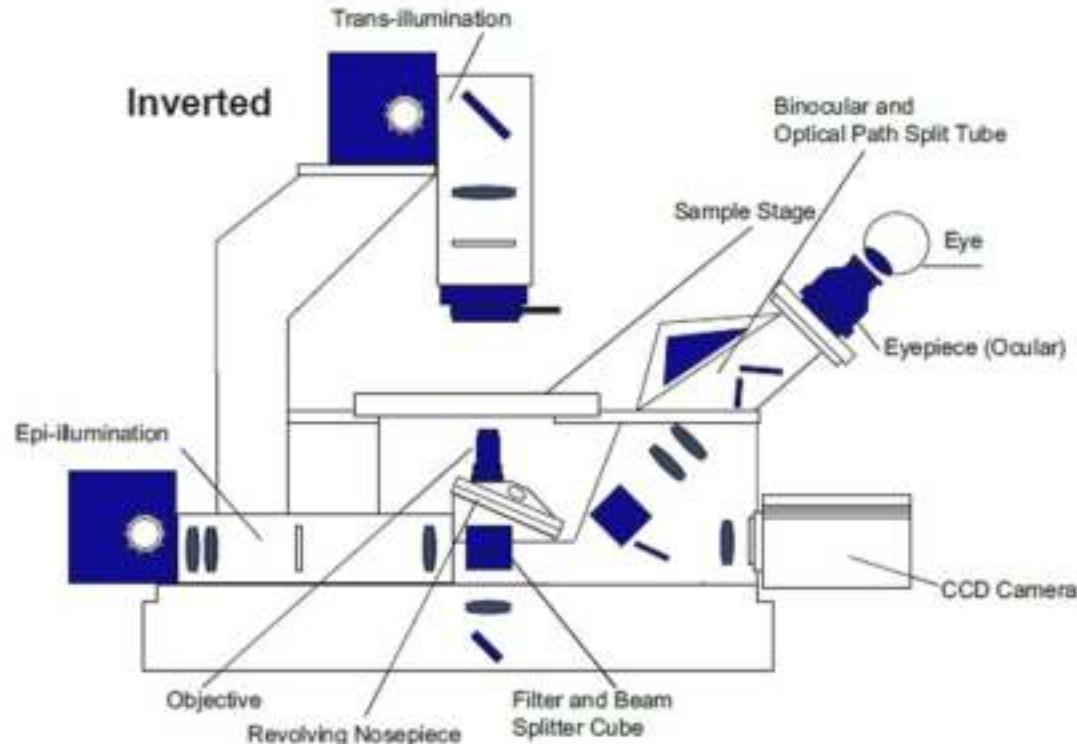


- se dívá inverzovaný

- Funkce, jak v **transmisním (DIA)**, tak **reflekčním (EPI)** módu
- Jednodušší a lenší manipulace se vzorky – více místa

Je možné manipulovat se vzorkem, vše málo

Kondensor dostatečný výkon na další vzdálenost



Achiniky

-fázová kontrastní mikroskopie

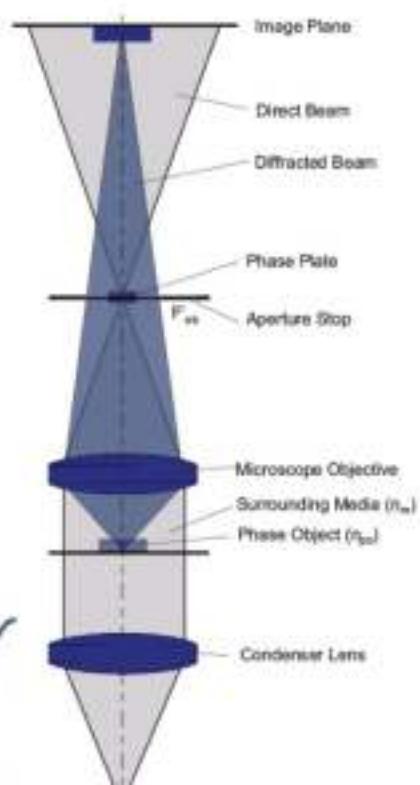
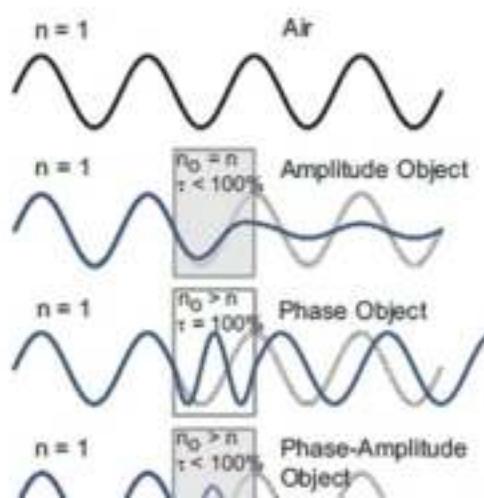
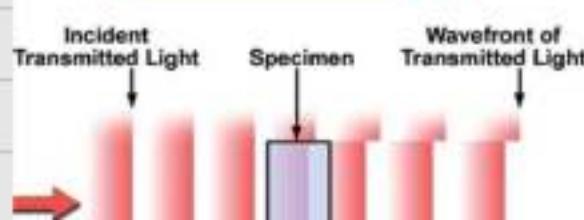
1934 – Fritz Zernike

Lze získat snímky s vysokým kontrastem pro průhledné objekt

- Živé buňky, mikroorganismy
- Vlákna, litografické znaky
- čistě fázové objekty neovlivňují intenzitu
- **fázový posun** δ (různá optická dráha - OPL)

$$OPL = (n_2 - n_1) \cdot t$$

$$\delta = \frac{2\pi OPL}{\lambda}$$



□ 1934 – Fritz Zernike

□ Lze získat snímky s vysokým kontrastem pro průhledné objekt

- Živé buňky, mikroorganismy
- Vlákna, litografické znaky
- čistě fázové objekty neovlivňují intenzitu
- **fázový posun** δ (různá optická dráha - OPL)
- Podobný setup jako bright field
- Vložení **kruhové apertury**
- Vložení **kruhové fázové** destičky („ring“)
- Doplňkové šedé (**ND**) filtry

$$\delta = \frac{2\pi}{\lambda} (n_m - n_r) \cdot t$$

Bright field vs phase contrast



darkfield mikroskopie

□ Levnější varianta fázového kontrastu

□ Zobrazování **rozptylu světla** uvnitř **vzorků**

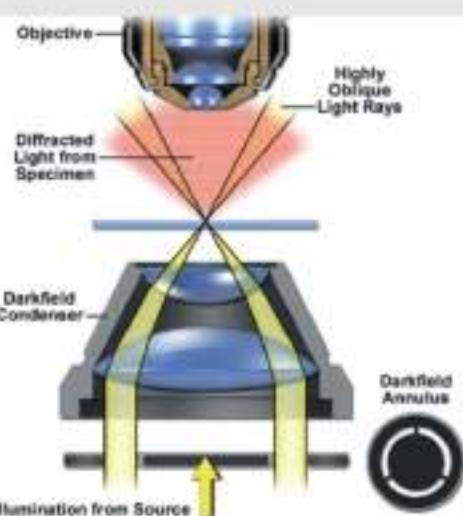
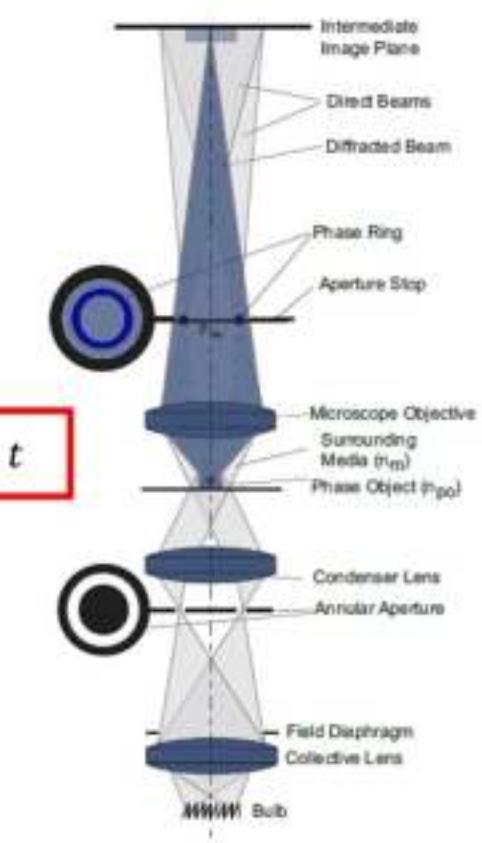
□ **Blokace centrální části osvětlení**

□ Výhody

- Vhodné pro hladké vzorky
- Vhodné pro vzorky s malým lomem
- Pro živé buňky
- kombinace s hyperspektrálním snímáním

□ Nevýhody

- Při vyšších intenzitách mohou být vzorky zničeny
- Musíme uvažovat rozdílnou interpretaci



oproti bright-field mikroskopii

- Nižší prostorové rozlišení



fluorescenční mikroskopie

Excitace vzorku **specifickou vlnovou délkou (energií záření)**

- Xenonová lampa
- Rtuťová lampa
- Vysoko výkonná LED
- Laser

Detekce **emise** vzorku na rozdílné vlnové délky

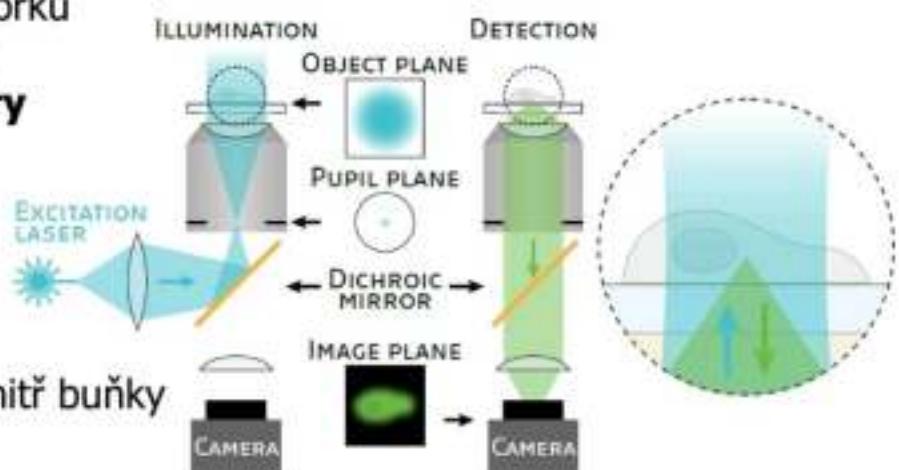
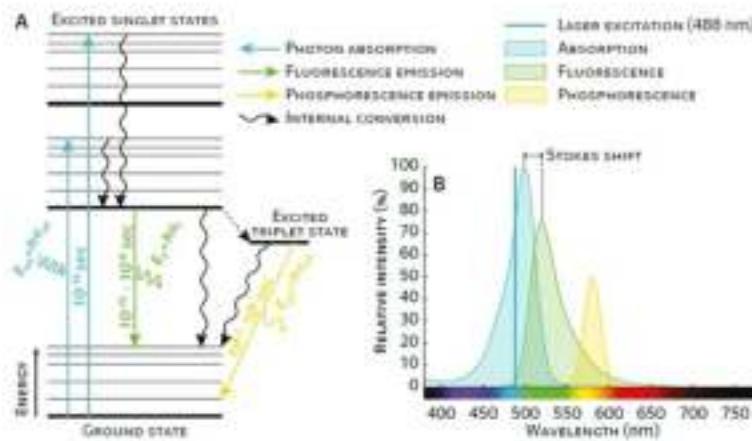
Nutná příprava vhodných vzorků

- fluorescentní vzorky**
- fluorescenční markery**

Sub-difrakční technika

difrakční limit

Např. genetický materiál uvnitř buňky



konfokální mikroskopie

Marvin Minsky (1957)

Skenovací metoda (x,y)

Laserová excitace

Ideální pro **fluorescenční mikroskopii**

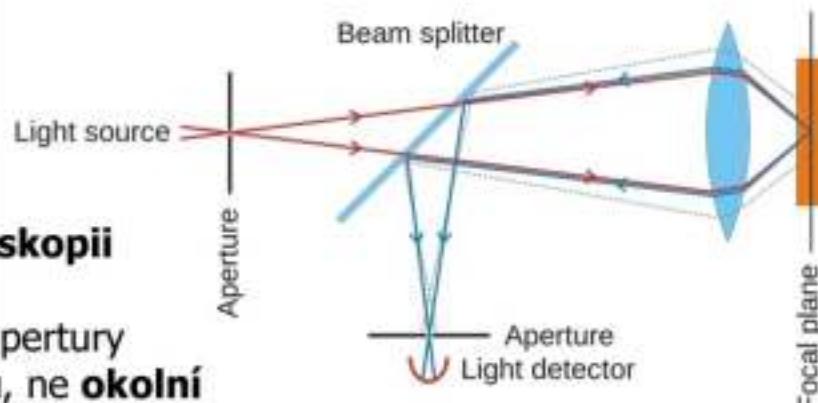
Blokace světla pomocí **pinhole** apertury

- světlo pouze z **daného bodu**, ne **okolní**
- Zároveň i **iluminační pinhole**

Pro velmi ploché objekty

Fotonásobiče, lavinové diody

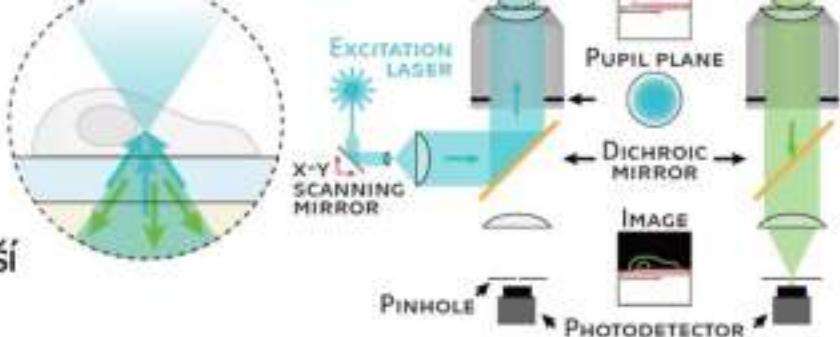
- Někdy CCD



A



- ☐ Lze i refektanční režim



- ☐ Rozlišení a kontrast lehce lepší než wide-field (bright-field)

- ☐ Blokace světla pomocí pinhole apertury

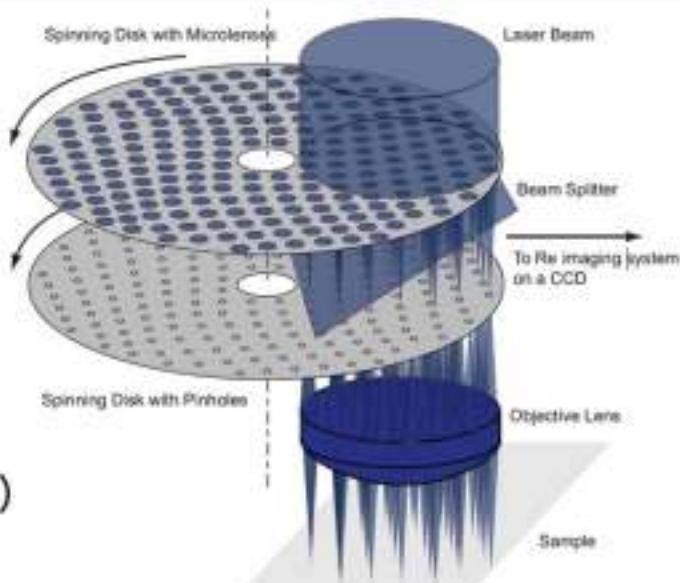
- ☐ Point scanning (whisk-broom)

- ☐ Někdy line scanning (push-broom)

- rychlejší
- ztráta rozlišení
- Sectioning

- ☐ Otáčivý disk (spinning disc, Nipkow disc)

- paralelní zobrazování
- pole pinhole apertur
- použití lepších kamer s vyšší QE
- Často i s dalším diskem mikročoček



Feature	Point Scanning	Slit Slit Scanning	Disk Spinning
<i>z</i> resolution	High	Depends on slit spacing	Depends on pinhole distribution
x,y resolution	High	Lower for one direction	Depends on pinhole spacing
Speed	Low to moderate	High	High
Light sources	Lasers	Lasers	Laser and other
Photobleaching	High	High	Low
QE of detectors	Low (PMT) Good (APD)	Good (CCD)	Good (CCD)
Cost	High	High	Moderate

- polarizační mikroskopie

- ☐ Zakomponování polarizátorů do optické cesty

- ☐ Polarizátor + analyzátor

- ☐ Výzkum anizotropních systémů
 - dvojstrom

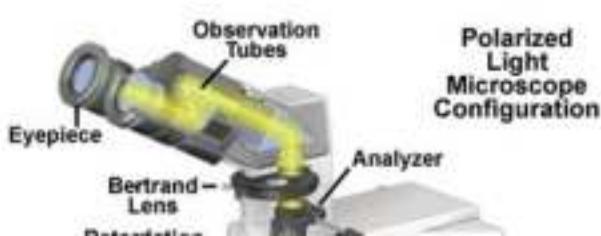
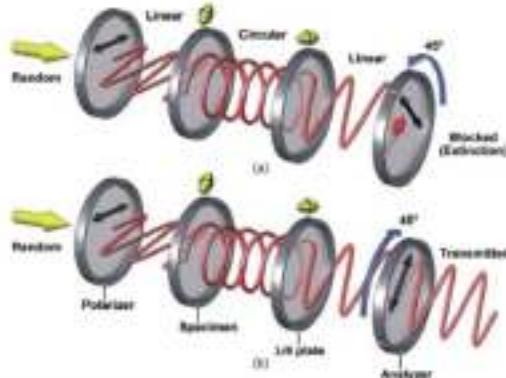


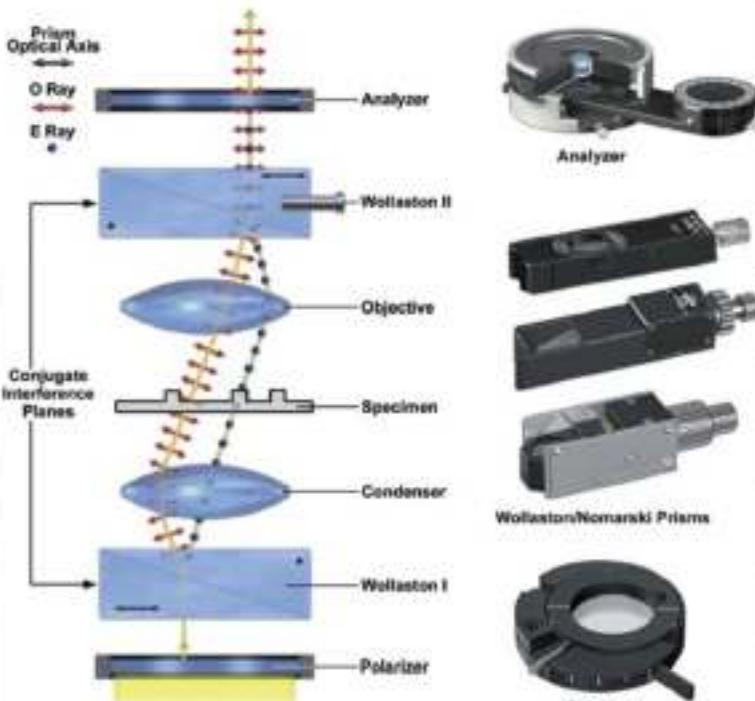
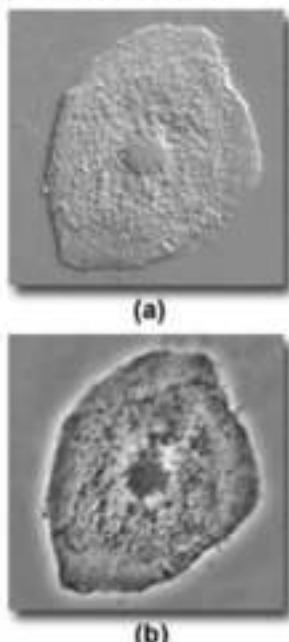


Figure 1



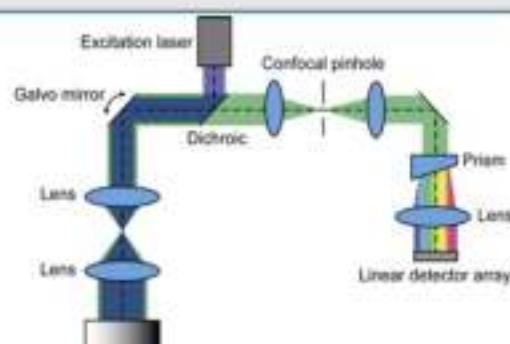
- DIC mikroskopie

- Využití prostorového a fázového rozdílu polarizací (řádný a mimořádný paprsek)
 - Wollastonův polarizátor
- Kombinace **fázového kontrastu a polarizace**
- Diferenciace fázového rozdílu
- Setup:
 - Polarizátor
 - Wollaston 1
 - Kondesor
 - Vzorek
 - Objektiv
 - Wollaston 2
 - Analyzátor



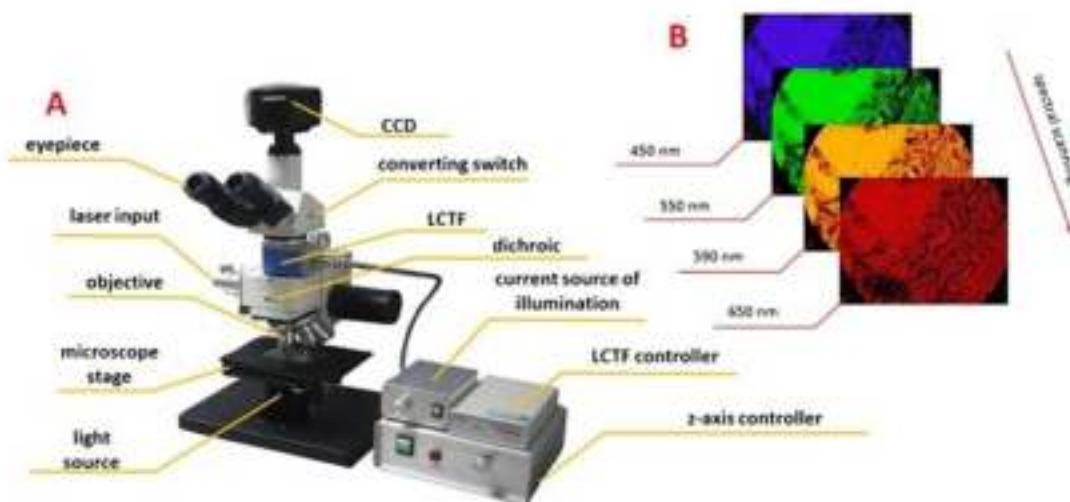
- Hyperspektrální mikroskopie

- Často použití na bázi filtrů s laditelnými tekutými krystaly (LCTF)
 - filtry elektricky laditelné tak, aby propouštěli danou vlnovou délku
 - přeladění pro několik vlnových délek (milisekundy)





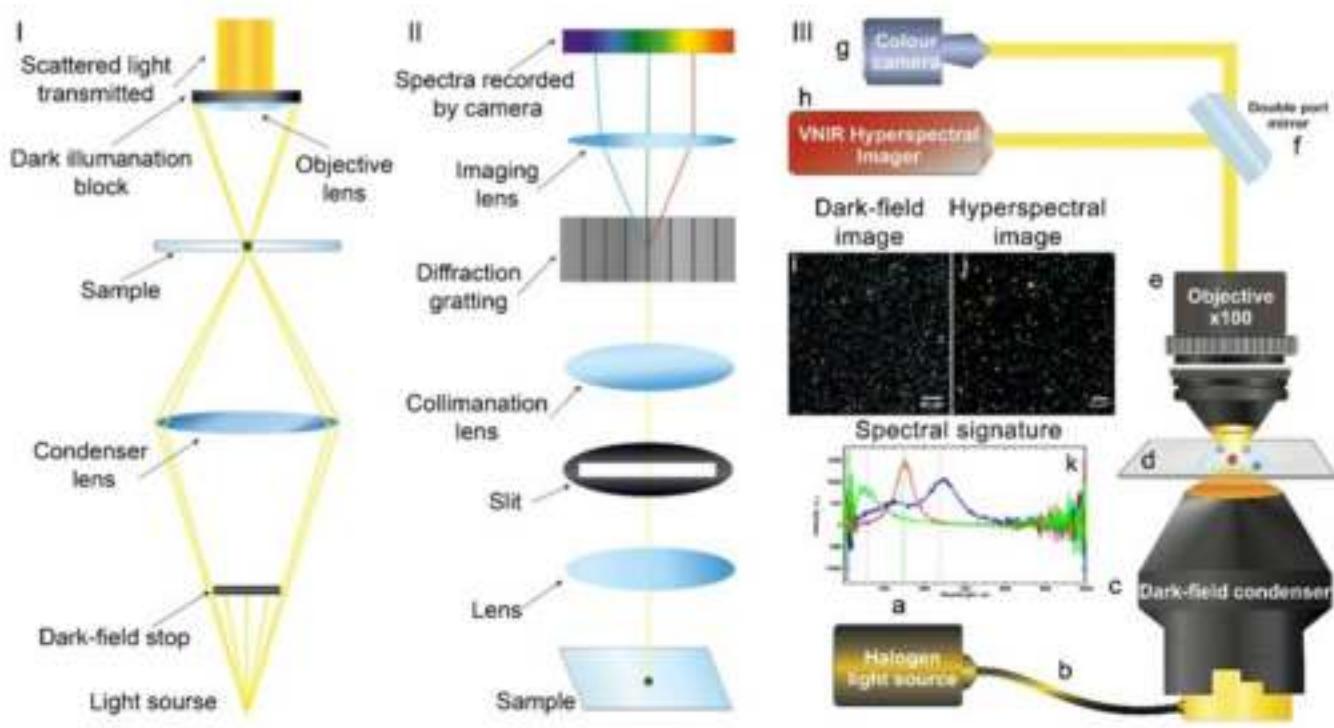
- Využití i pro konfokální mikroskopii
 - Prismy, difrakční mřížky, (whisk-broom)



- Dark-field mikroskopie

- Řada konfigurací
 - Nejčastěji **push-broom** (liniové skenování)

Rozptýlené světlo objektu pozorované na **řadě vlnových délek**



- super-resolution mikroskopie

- Techniky pro **zobrazování detailů pod difrakčním limitem**
- Celá řada přístupů
- Vědecky velice **populární**

• SIM

- Osvětlování vzorku různými pruhovanými vzory
- Moire efekt (interference vzorů)
- Posprocessing ve Fourierovském spektru a složení obrazu

• STED

• STORM

- Statistické vyhodnocení obrazu
- Excitace a deexcitace fluoroforů

