

Aplikovaná optika I.

Josef Kuběna

Učební pomůcka zejména pro
studenty optometrie na LF

Teorie světla

Všechny **zdroje světla** pracují na stejném **principu**: foton je emitován atomem při přechodu elektronu na nižší hladinu, při přechodu z vybuzeného do základního stavu. Vznik světla je možné vysvětlit jen v rámci **kvantové fyziky**. Nelze jej vysvětlit v rámci **elektromagnetické teorie**. Tato teorie rovněž **selhává** při vysvětlení činnosti **detektorů světla**, ale je **velice funkční** pro popis šíření světla prostorem a prostředím. Detekci světla lze vysvětlit zase jen v rámci **kvantové fyziky**.

Pro šíření světla prostředím je podstatná jen **elektrická složka E elektromagnetické vlny**. Ta odpovídá za index lomu, rozptyl světla a jiné procesy (např. stimulovaná emise). Obě složky **E** i **B** jsou svázány Maxwellovými rovnicemi, tj. nejsou nezávislé.

Zdůvodnění tohoto tvrzení lze opřít o silové působení elektromagnetické vlny, to je veličin **E** a **B** na atomy. Pro odhad **maximální velikosti** této síly **F** postačí odhadnout sílu, která působí na elektron pohybující se rychlostí **v**:

$$F = F_e + F_m = eE \pm evB \sin \alpha$$

Z Maxwellových rovnic plyne, že $B=E/c$. Maximální velikost pak bude dána vztahem:

$$F_{\max} = eE + ev \frac{E}{c} = eE \left(1 + \frac{v}{c}\right) \cong eE = F_e$$

Předpoklad, že $v/c \ll 1$, je pro pohyb elektronů kolem jádra dobře splněn. Výsledné silové působení určuje tedy jen elektrická složka, magnetickou není třeba uvažovat. 2

Jak vzniká světlo (1)

aneb, jak dochází k excitaci atomů?

Žárovka

Svítil wolframové vlákno, které se ve skleněné baňce žhívá elektrickým proudem. V baňce je vakuum nebo netečný plyn, aby vlákno neshořelo. Atomy vlákna jsou buzeny **vzájemnými srážkami**, které vyvolává vysoká teplota.

Zářivka

Svítil stěny trubice, na nichž je nanesena látka, jejíž atomy jsou buzeny jednak ionty plynu, jednak fotony, které vznikají při elektrickém výboji v plynové náplni uvnitř trubice. Tento proces vzniku světla se nazývá **fluorescence**.

Televizní obrazovka

Na vnitřní straně obrazovky je nanesena látka, jejíž atomy jsou buzeny dopadem elektronů s velkou kinetickou rychlostí. Tento proces vzniku světla se nazývá **luminiscence**. Obraz se obnovuje s frekvencí 50 Hz.

Svíčka

Roztavený vosk vzlíná do knotu, kde se odpařuje a vzniklé páry se chemicky slučují s kyslíkem. Tento proces se nazývá hoření. Atomy jsou buzeny **chemickou reakcí**.

Jak vzniká světlo (2)

aneb, jak dochází k excitaci atomů?

Horské sluníčko

V křemenné baňce, kde je kapka rtuti, vznikne elektrický výboj a tím se odpaří i zbytek rtuti. Atomy rtuťových par jsou buzeny vzájemnými **srážkami při elektrickém výboji**. Takovým zařízením se říká **výbojky**.

Výbojky

Světlo zde vzniká na stejném principu, jako u horského sluníčka (ve rtuťové výbojce). Náplň však tvoří buď sodíkové páry, nebo jiné plyny při sníženém tlaku.

Ledky (LED)

Světlo vzniká v oblasti p-n přechodu polovodičového materiálu (často krystaly galium arsenidu). Atomy se vybudí průchodem elektrického proudu přes p-n přechod. Název ledka vznikl počestěním zkratky slov Light Emitting Diode

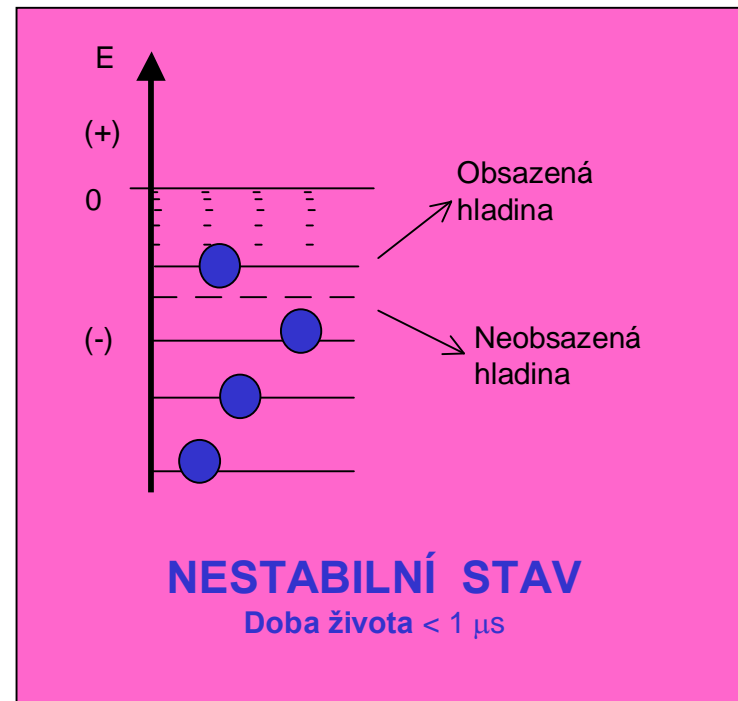
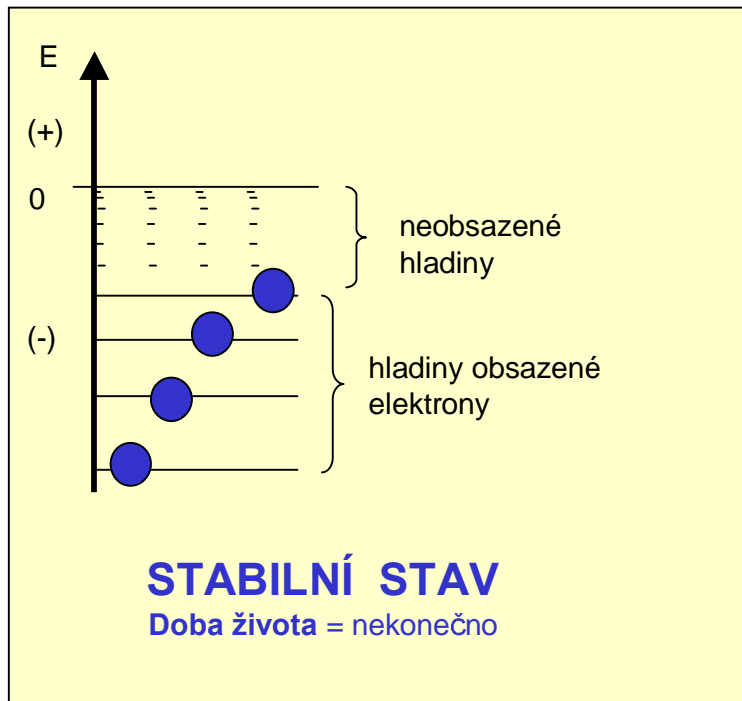
Lasery

Lasery tvoří **aktivní prostředí** (u polovodičových ledky, u plynových výbojky, u eximerových chemické reakce), a dále **optický rezonátor** vyvolávající **stimulovanou** emisi fotonů. U všech výše uvedených zdrojů šlo o **spontánní** (náhodnou) emisi fotonů. Název laser je zkratka slov Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation.

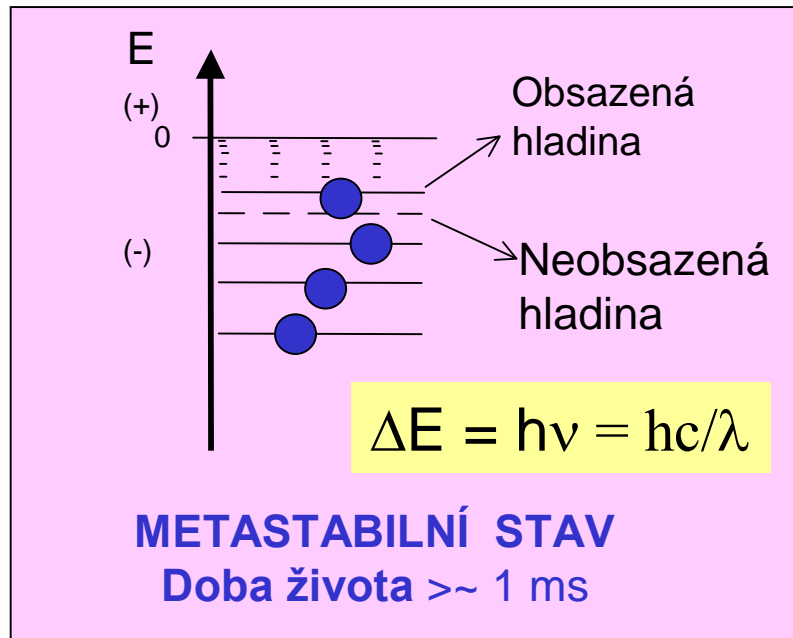
Princip činnosti laserů

Laser = aktivní prostředí + optický rezonátor

Schéma potenciální energie elektronů v atomu



Metastabilní stav



Přechod atomů z nestabilního (i metastabilního) stavu do stabilního stavu se děje tzv. **spontánní emisí** fotonů s energií $h\nu$.

Stabilní jsou jen stavy s minimální potenciální energií (elektrony jen na nejnižších hladinách).

Pro viditelné světlo je $\Delta E = 2$ až 4 eV

Ale !

Metastabilní stav atomů

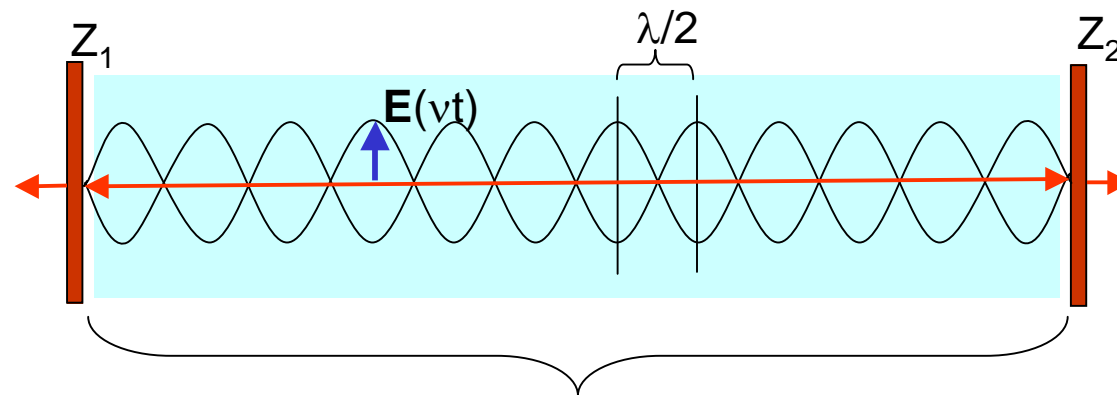
+

Elektrické pole o frekvenci ν



Stimulovaná emise fotonů s energií $h\nu$

Optický rezonátor

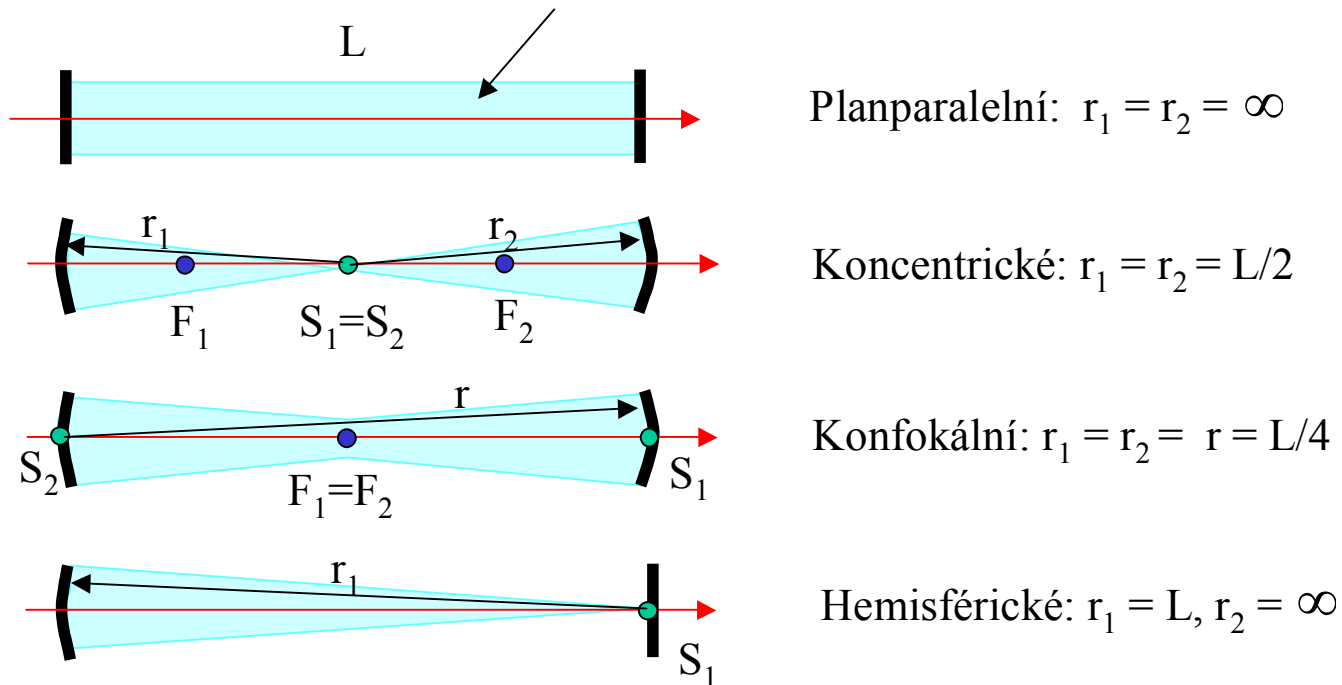


$$L = M \frac{\lambda_M}{2} = M \frac{c}{2\nu_M}$$

1. Z1 a Z2 jsou rovnoběžná **zrcadla** s odrazivostí větší než 99%.
2. Délka rezonátoru L je M násobkem půlvlny (M je celé číslo). Délce L odpovídají **vlastní frekvence** rezonátoru ν_M (**podélné módy laseru**).
3. Uvnitř rezonátoru je **stojaté vlnění** elektrického pole E o frekvenci $\nu_M = c/\lambda_M$

Optické rezonátory

Objem optického (elektrického) pole náležející rezonátoru, kde dochází v aktivním prostředí ke stimulované emisi

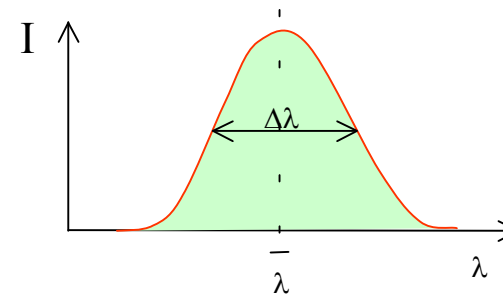
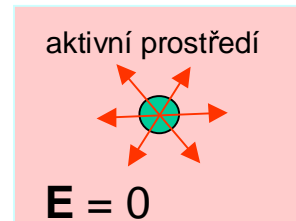


Kvalita rezonátoru je určována především odrazivostí zrcadel. Uvedené 4 typy patří mezi tzv. **stabilní rezonátory**.

Spontánní emise fotonu

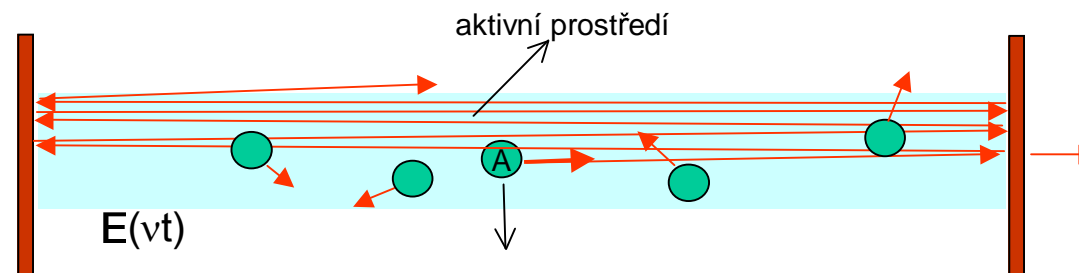
Spontánní emise

atomy září do všech směrů



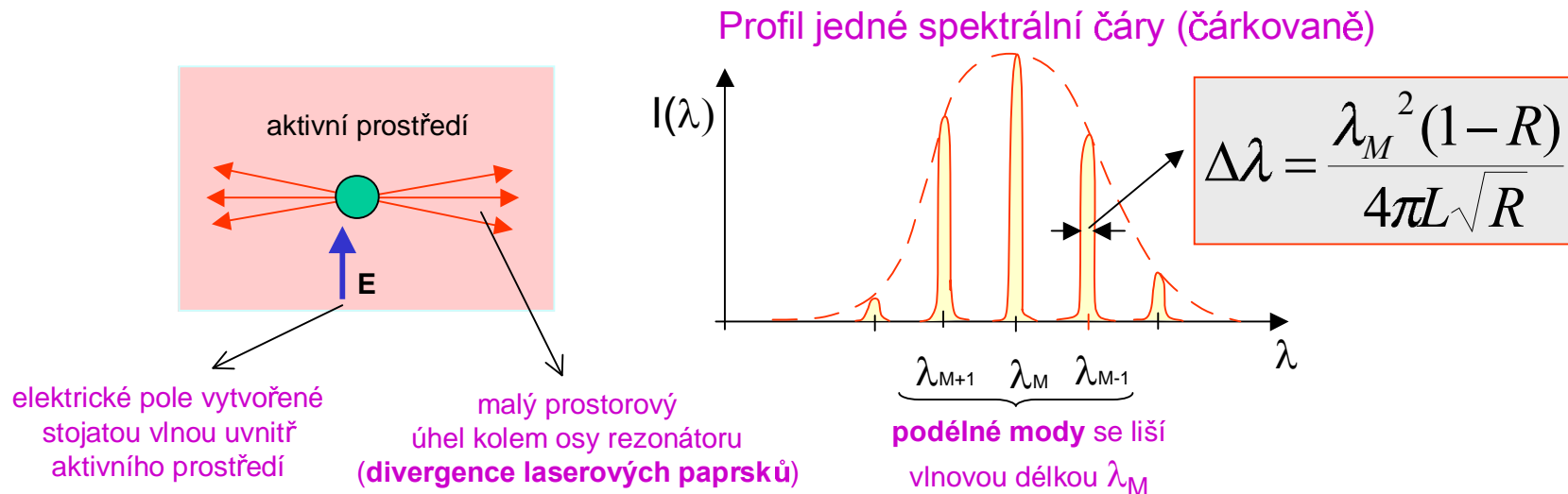
1. Když se atom **nenachází** v elektrickém poli, přechází do stabilního stavu **samovolně**.
2. Foton je vyzářen do **libovolného směru** a v **libovolné polarizaci**.
3. Pozorujeme obvyklou **spektrální čáru** o šířce $\Delta\lambda \sim 1/\tau$ (τ = doba života) .

Laser



Spontánní emise atomu A vyvolá vznik stojaté vlny.
Jiné atomy vyzáří mimo rezonátor.

Stimulovaná emise fotonu

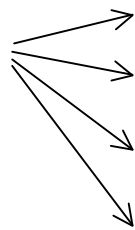


- 1) Atom v metastabilním stavu vyzáří **spontánně** foton (EM vlnu) ve **směru optické osy** rezonátoru. Tím vznikne v rezonátoru **stojatá elektrická vlna**.
- 2) Záření zbývajících atomů v metastabilním stavu je **nyní stimulováno** elektrickým polem oné stojaté vlny.
- 3) Tyto atomy vyzáří teď fotony přibližně (s přesností divergence) **do směru optické osy rezonátoru** a v **polarizaci a fázi**, která odpovídá stavu vektoru **E** stojaté vlny. Tím se dosahuje **prostorové koherence** v celém průřezu svazku.
- 4) Malá šířka $\Delta\lambda$ podélných módů (odpovídá za velkou **koherenční délku**) je důsledek vysoké odrazivosti zrcadel **R** a délky **L** rezonátoru.

Druhy laserů

Lasery rozlišujeme především podle druhů aktivního prostředí, to znamená, jakým procesem dochází k jeho excitaci:

Excitace atomů do metastabilního stavu



Srážkami mezi atomy dvou druhů (He-Ne, CO₂)

Optickou excitací - čerpáním (rubín, neodymové sklo)

Excitací při **chemické reakci** (eximery)

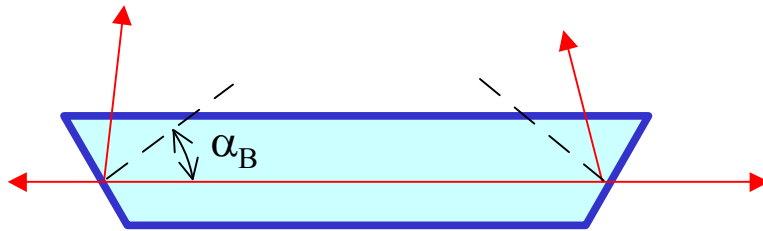
Průchodem elektrického proudu (polovodiče, GaAs)

a jiné způsoby

Světelný výkon laserů:

1. **Kontinuální** laser až desítky mW
2. **Pulsní laser** při středním výkonu $P = 10 \text{ mW}$
může mít parametry: $P = 10^6 / 10^{-9} = 10^{-3} \text{ W} = 1 \text{ mW}$
 - délka pulsu = 1 ns,
 - energie v pulsu = 1 MJ,
 - opakovací frekvence = 10 Hz

He – Ne a CO₂ laser



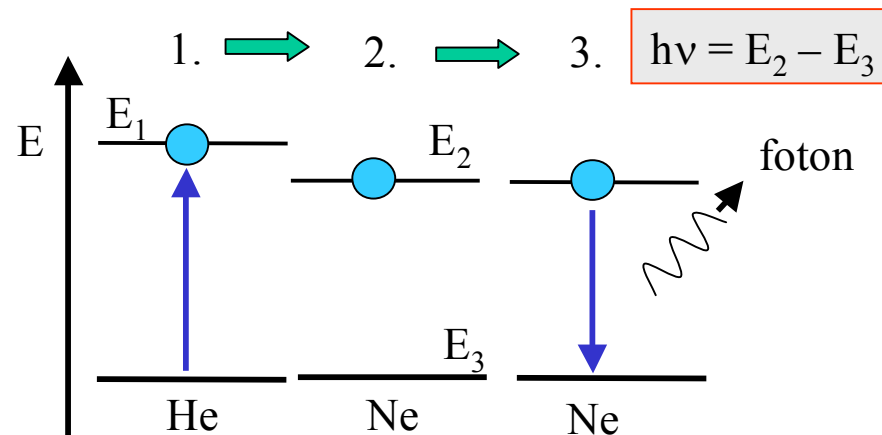
1. Jsou-li výstupní okénka skloněna pod Brewsterovým úhlem, pak svazek laserových paprsků je lineárně polarizován
2. Skleněná výbojová trubice s náplní He (tlak asi 100Pa) a Ne (tlak asi 10 Pa).
3. U CO₂ laseru přebírá funkci He dusík a neonu molekula CO₂

Typické kontinuální lasery.

$\lambda(\text{He-Ne}) = 632.8 \text{ nm}$

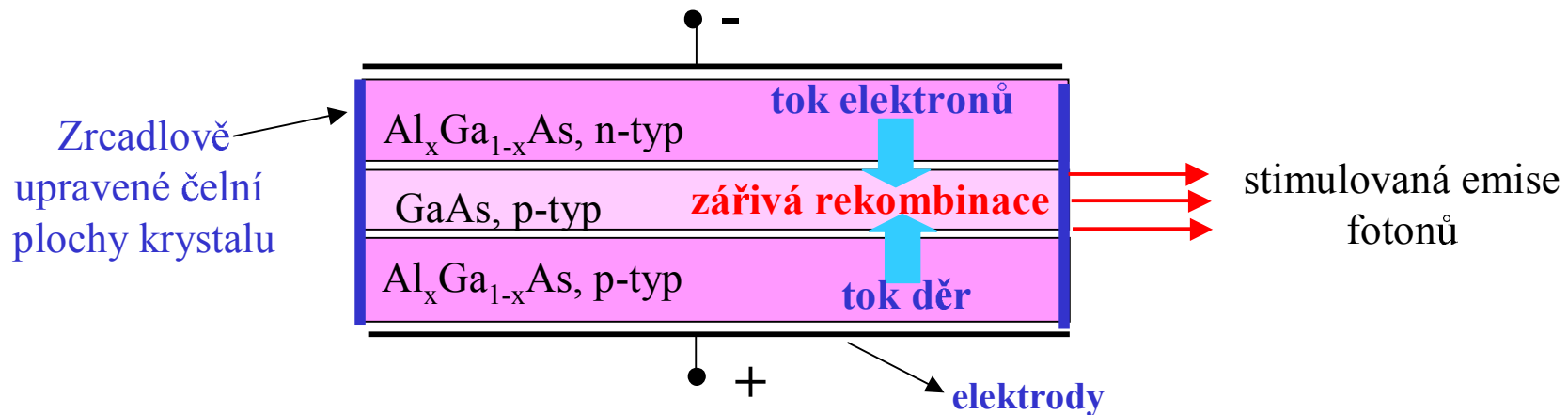
$\lambda(\text{CO}_2) = 10.6 \text{ }\mu\text{m}$

Energiové schéma buzení (tzv. tříhladinový systém)



1. Výbojem se excituje atom He na E_1
2. Srážkou atomů He s Ne se excituje atom Ne do metastabilního stavu
3. Za přítomnosti elektrického pole o frekvenci ν_M vyzáří Ne foton stimulovaně, jinak spontánně

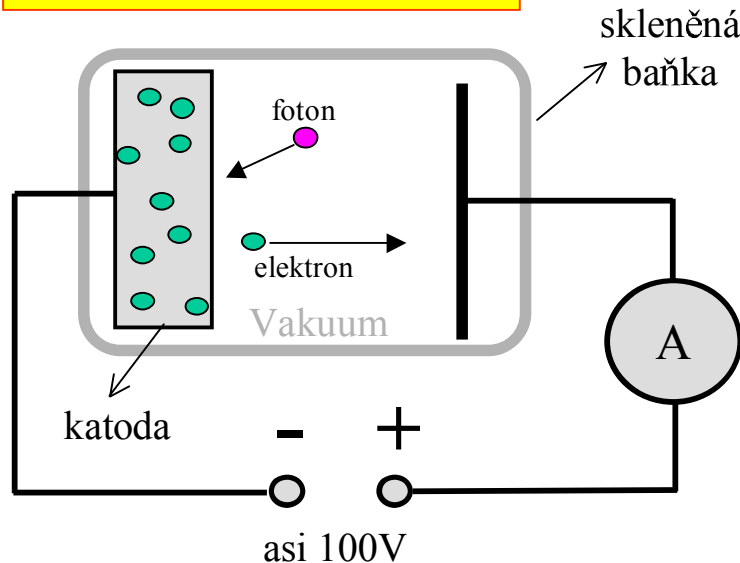
Polovodičový laser



1. Vnější napětí uvedené polaroty způsobí, že se v **opticky aktivní vrstvě krystalu GaAs** nahromadí současně velké množství elektronů a děr (s dostatečně dlouhou dobou života), které spolu mohou **rekombinovat** převážně jen **zářivými přechody**.
2. Zrcadlově upravené čelní plochy krystalu vytvářejí planoparalelní **optický rezonátor** délky asi 1 mm. Ten zaručí, že při rekombinaci elektronů a děr vznikne stimulovaná emise fotonů.
3. Vlnová délka emitovaného světla je z intervalu 700 až 900 nm podle obsahu Al.
4. Na podobném principu pracují **luminiscenční fotodiody (LED)**. Nemají rezonátor a elektrony a díry v aktivním prostředí téměř hned rekombinují.

Detektor světla - fotonka

Princip činnosti fotonky:



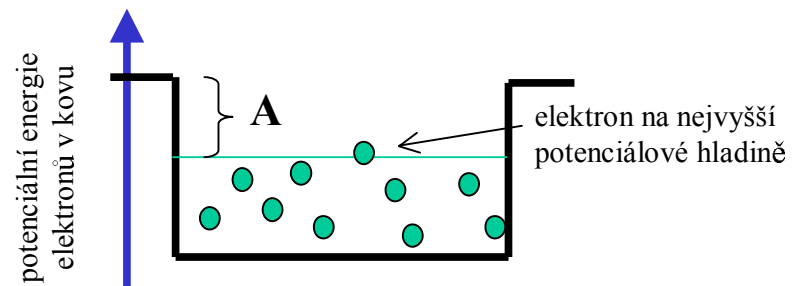
Elektrony opustí katodu (nastane fotoefekt), až jim foton předá svou energii, s jejíž pomocí jsou teprve schopny překonat **okraj myšlené nádoby** (kovu), v níž jsou uzavřeny.

$$\text{Energie fotonu} = h\nu$$

$$\text{Podmínka vzniku fotoefektu: } A < h\nu$$

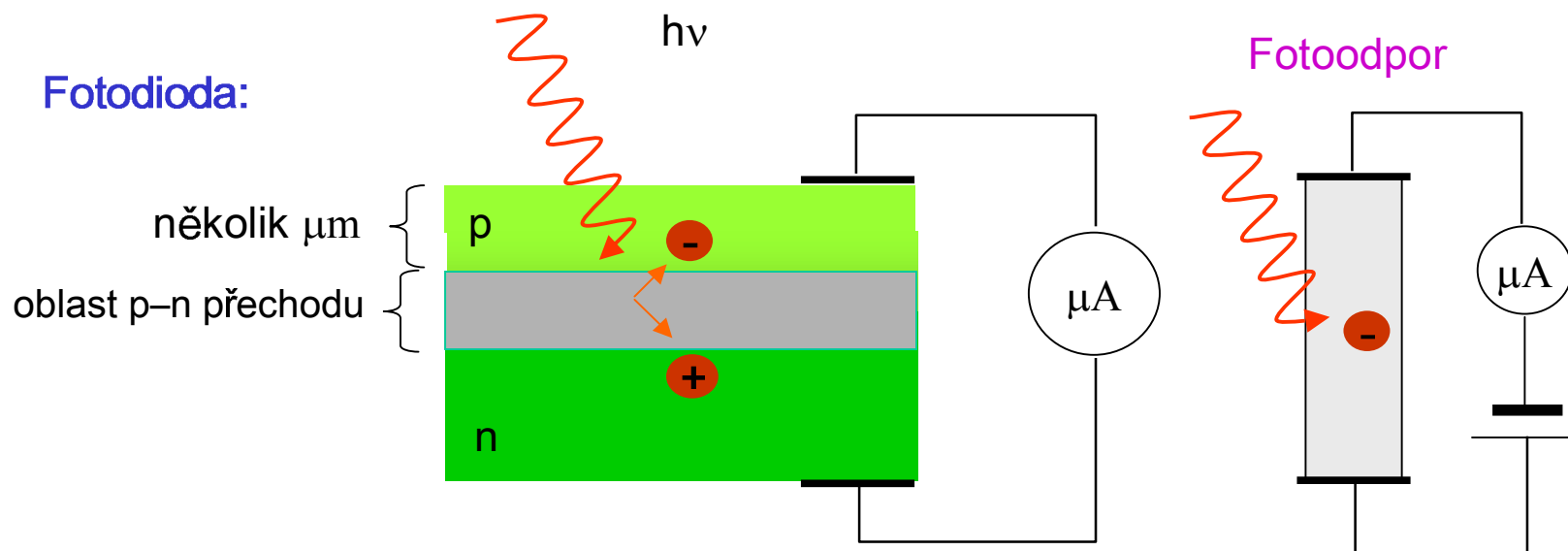
Když na katodu nedopadá světlo (fotony), tak obvodem neprochází elektrický proud. Když ale na katodu dopadne foton, vyrazí z ní elektron a ten je elektrickým polem přitážen ke kladně nabitě elektrodě. Svým elektrickým nábojem přispěje ke vzniku elektrického proudu.

Potenciálová nádoba, elektrony v ní mají menší potenciální energii než mimo ni.



A = energie, která **chybí** elektronům, aby vyletěly z kovu (výstupní práce).

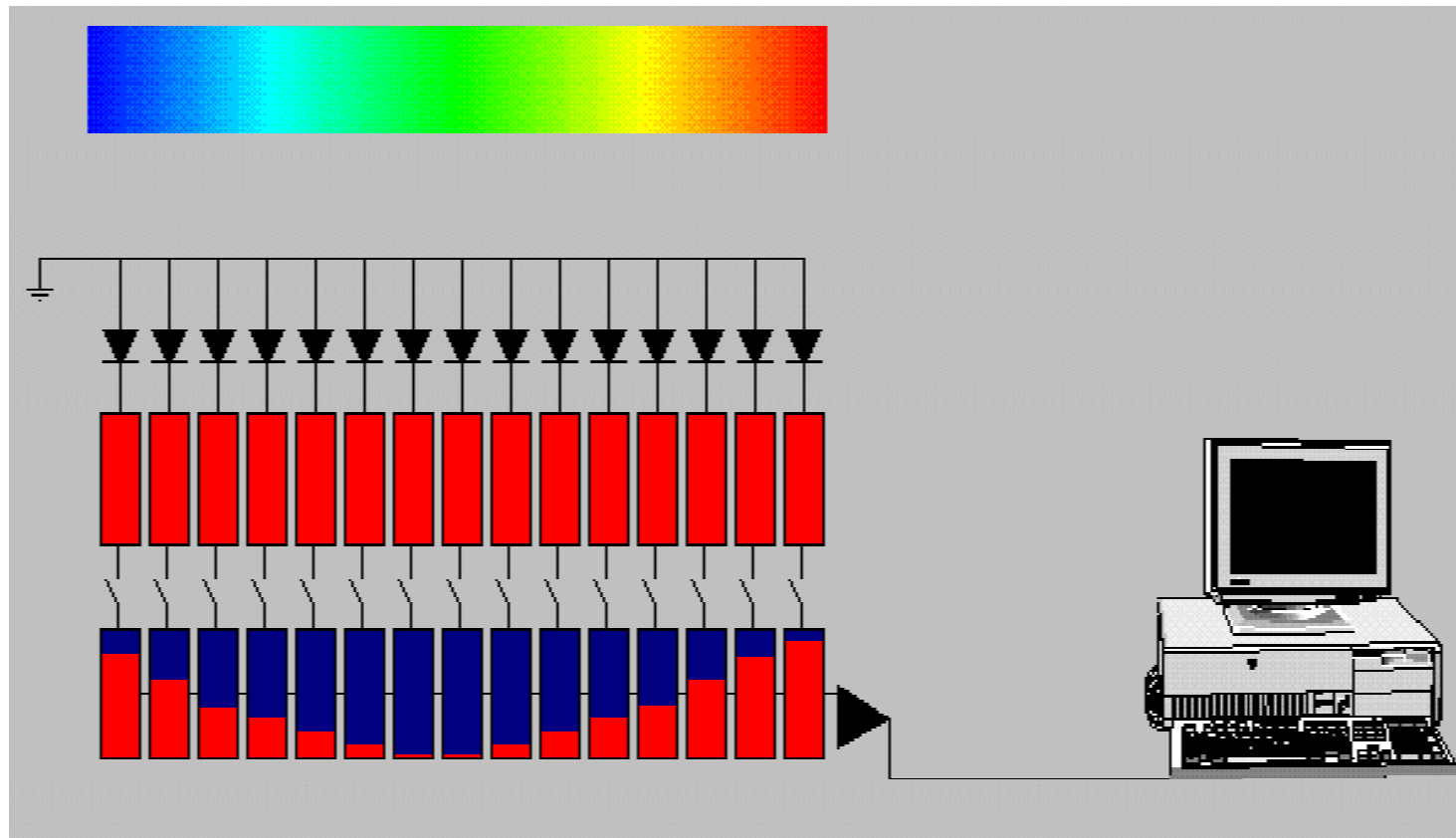
Polovodičová fotodioda



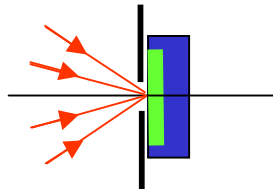
Foton pronikne horní vrstvou polovodiče a když se v oblasti p-n přechodu se absorbuje, tak vygeneruje pár elektron – díra. Tímto procesem, kterému se říká **vnitřní fotoefekt**, vznikne elektrický fotoproud. Důležitou roli zde hraje i závislost absorpce na λ .

V praxi se ještě používají k detekci světla tzv. **fotoodpory** (např. selenové), u nichž absorbovaný foton sníží hodnotu jejich odporu (zvýší se vlastně počet vodivostních elektronů v materiálu fotoodporu).

Činnost CCD detektoru



Plošný detektor světla



Plošný (všesměrový) detektor

(např. fotodioda) nerozliší intenzitu paprsků přicházející z různých směrů.

Clona s otvorem vytváří z plošného detektoru bodový detektor.

- 1) Plošné detektory jsou fotonky, **fotodiody**, **fotografický film**, apod.
- 2) **Signál detektoru i** (fotoproud, fotonapětí) je úměrný intenzitě **J** , (ta je úměrná kvadrátu amplitudy elektromagnetické vlny E_0), ploše detektoru **S** ,

$$i = C(\lambda)SJ \sim C(\lambda)S \langle E_0^2 \rangle$$

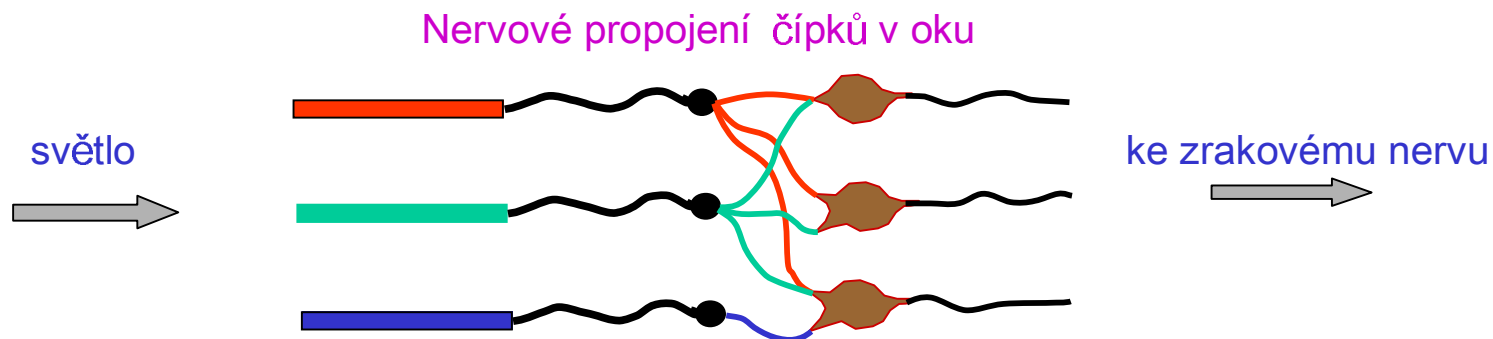
- 3) Každý detektor má svou charakteristickou **spektrální citlivost $c(\lambda)$**
- 4) Měří **střední časovou** hodnotu kvadrátu amplitudy světla za tzv. **integrační dobu detektoru** (např. pro oko to je 0.1 s, pro fotodiodu asi 10^{-3} s, pro fotonku 10^{-6} s). Tento experimentální fakt úzce souvisí s **koherenčními vlastnostmi světla** (o nich pojednáme později).

Vnímání barev

Spektrální barvy, kde každé barvě odpovídá jedna vlnová délka. Spektrální barvu určíme jednoznačně spektrometrem. Člověk však vnímá daleko širší paletu barev, tzv. **složené barvy**.

Složené barvy vzniknou osvětlením plochy světelnými svazky o různém spektrálním složení a intenzitě. Všechny tyto složené barvy lze vytvořit **kombinací tří svazků o různých intenzitách a o spektrálním složení, které odpovídá spektrální citlivosti tří druhů čípků** na sítnici lidského oka (čípky citlivé na modrou, zelenou a červenou barvu).

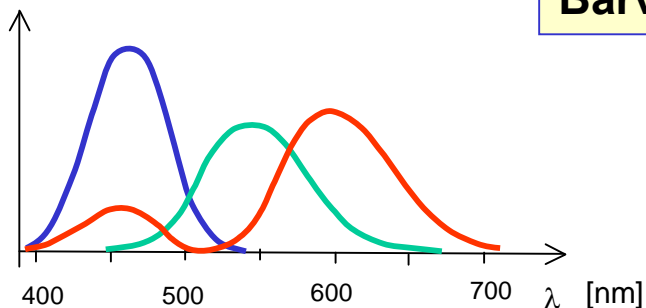
Vnímání barev je tedy **subjektivní jev**, závisí na vybavenosti našeho oka a na naší zkušenosti (jakou barvu nazýváme purpurovou, oranžovou, apod.). Vjem barev se vyznačuje **barevným tónem, barevnou sytostí a jasem**.



Barevný trojúhelník

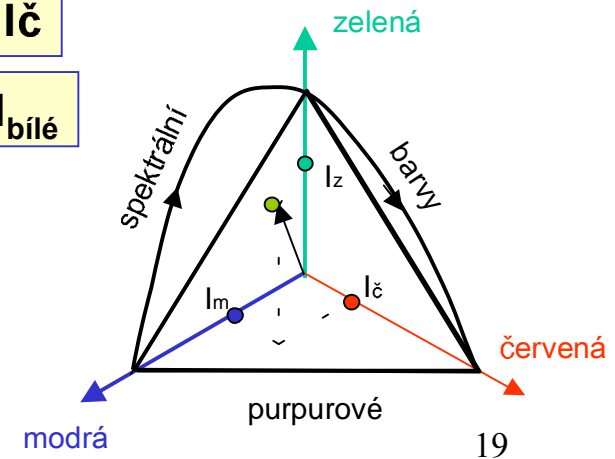
- 1) **Barevný tón** závisí na poměru intenzit jednotlivých složek podobně, jako směr vektoru na svých souřadnicích. **Barevná sytost** odpovídá délce vektoru, tedy intenzitě jednotlivých složek.
- 2) Barevný tón lze tedy zakreslit **jako vektor** do kartézských souřadnic. Na jejich osy se kreslí intenzity modré, zelené a červené.
- 3) Každému bodu ve vyznačeném trojúhelníku přísluší jeden barevný tón (vektor). Tento tzv. **barevný trojúhelník** leží rovině se **souřadnicemi** X_b a Y_b . Jeho poloha v (X_b, Y_b) je stanovena mezinárodní dohodou.

Spektrální citlivost jednotlivých druhů čípků



$$\text{Barevný tón} = I_m : I_z : I_č$$

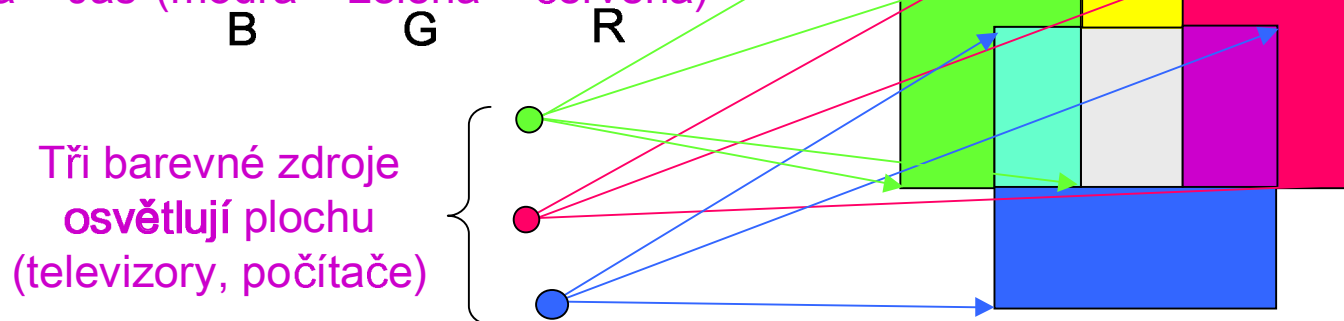
$$\text{Barva} = \text{Barevný tón} + I_{\text{bílé}}$$



Barevné plochy

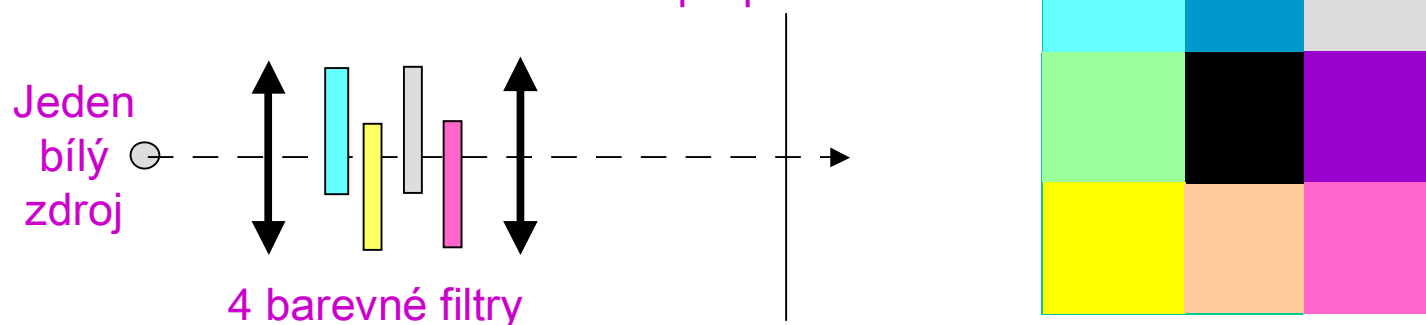
Aditivní vytváření barev (RGB):

Barva = Jas*(modrá + zelená + červená)



Substraktivní vytváření barev (CMYK)

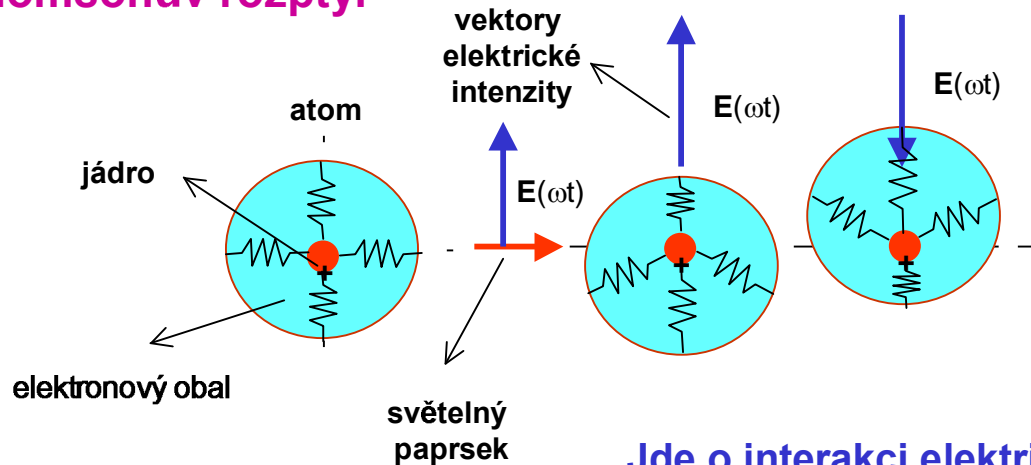
Barva = šedá – azurová – žlutá – purpurová



Tohoto principu užívají tiskaři. Barvy jsou naneseny na bílém papíru. Původní bílé světlo prochází dvakrát vrstvou barev a po odrazu na bílém papíru změní spektrální složení. 20

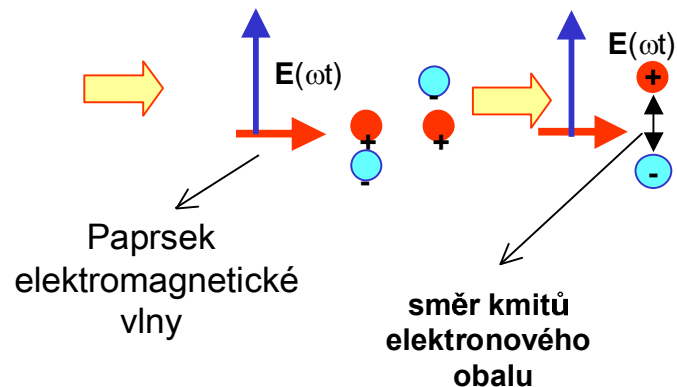
Interakce světla s atomem

Thomsonův rozptyl



Jádro zůstává na místě, pohybuje se významně jen elektronový obal (jádro má hmotnost 1000 x větší než elektronový obal).

zjednodušeně



Jde o interakci elektrické vlny s elektrony

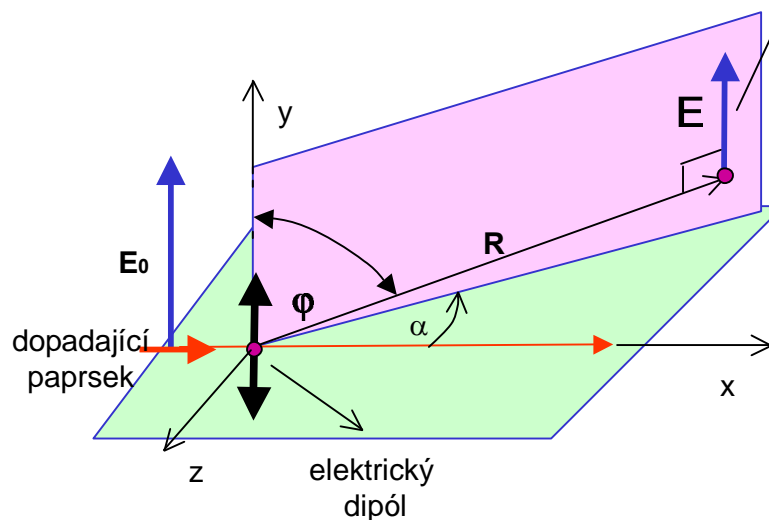
Vznikne kmitající elektrický dipól, který generuje dipólové vlny podobně jako dipól televizního vysílače.

Toto je **základní princip** interakce EM vln s atomy.

Tak vzniká difrakce rtg. záření na krystalech, lomená a odražená vlna v optickém prostředí a v nehomogenním prostředí ještě **rozptyl světla (Rayleighův rozptyl)**.

Dipólová světelná vlna

Frekvence dipólové vlny je **stejná** jako vlny budící



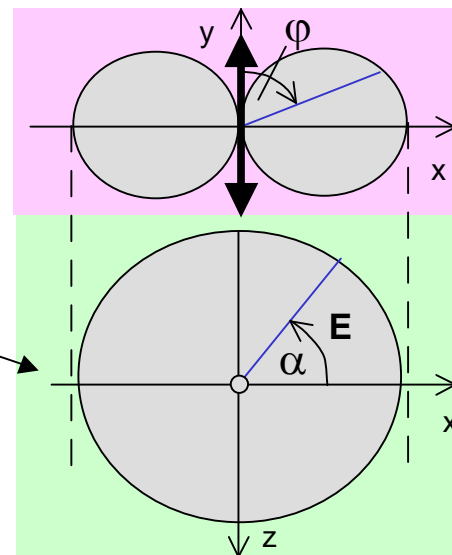
Velikost vektoru amplitudy dipólové vlny **E** je dána vztahem

$$E(\varphi) = \frac{E_0 \sin \varphi}{R}$$

Amplituda závisí na φ

Jeho **směr E** je určen směrem kmitů dipólu

Vyzařovací diagram dipólu

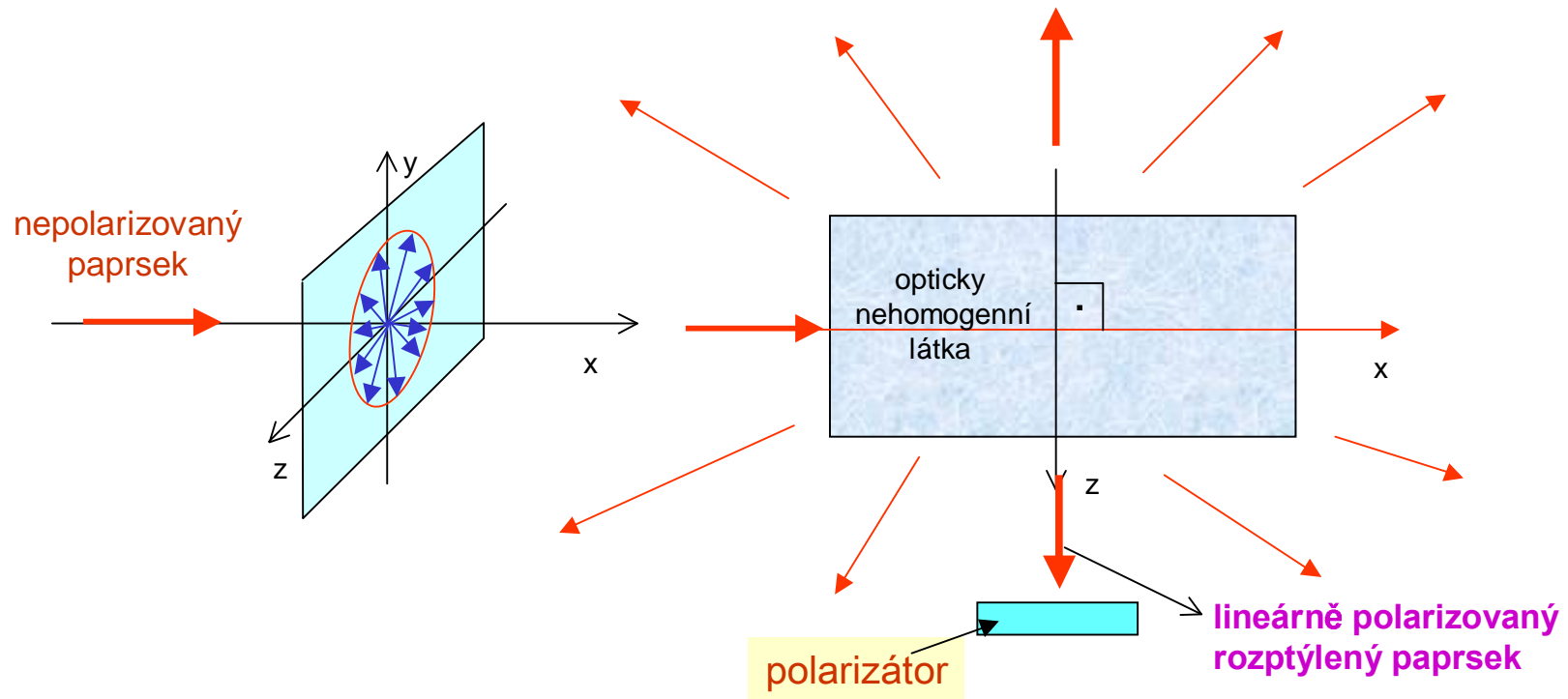


Vyzařovací diagram je geometrické místo koncových bodů amplitudy **E** pro všechny možné úhly α a φ .

pohled ve směru kmitů dipólu

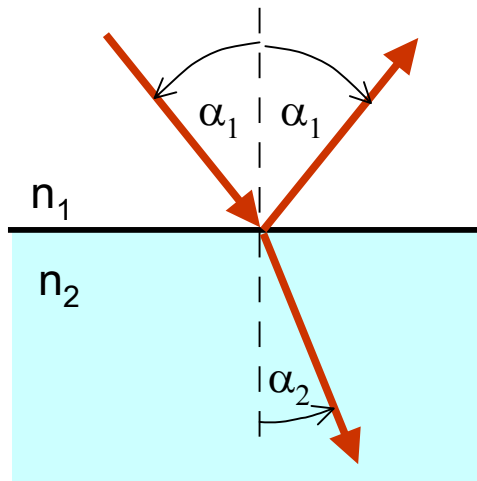
Amplituda dipólové vlny **nezávisí** na úhlu α

Polarizace rozptýleného světla



- 1) Výrazný rozptyl světla (**Rayleighův rozptyl**) se pozoruje v opticky **nehomogenním prostředí**, kde **rozměr Λ** nehomogenit indexu lomu je menší než vlnová délka světla (kouř, kalná voda, makromolekuly plexiskla, aj.).
- 2) Rozptýlené paprsky (dipólové vlny) se šíří všemi směry. Ve směrech **kolmo** na primární paprsek jsou však lineárně polarizované, (vektory **E** leží v **rovině kolmé na budící svazek**).
- 3) **Fluorescenční záření** buzené v látce, **na rozdíl od rozptylu**, není v žádné směru lineárně polarizované (ve všech směrech je nepolarizované).

Odraz a lom světla



Odraz a lom na rovinném rozhraní

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

Index lomu: $n_1 = \frac{c}{u_1}$

Frekvence světla se při průchodu rozhraním nemění:

Vlnová délka: $\lambda_1 = \frac{u_1}{\nu}$

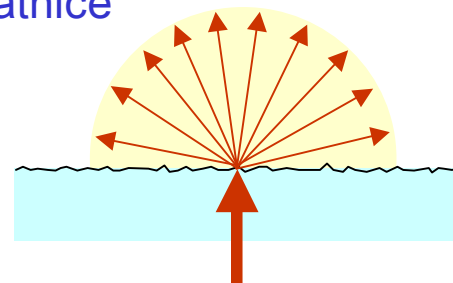
$$\nu_1 = \nu_2 = \nu$$

Odraz na drsném rozhraní

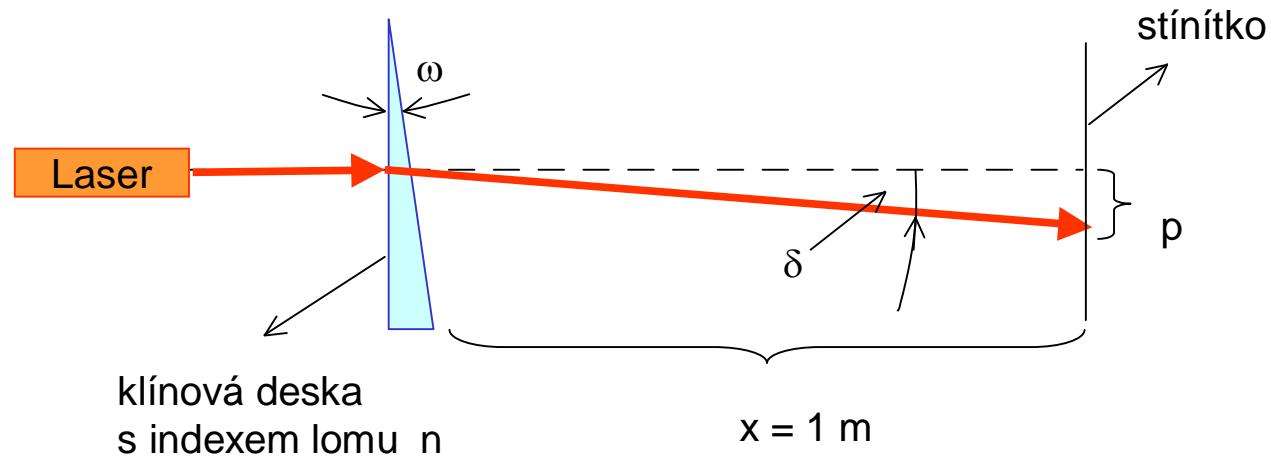
Charakteristická velikost nerovností Λ je mnohem větší než vlnová délka λ . Taková rozhraní jsou důležitá pro zobrazování předmětů.



matnice



Prizmatický účinek

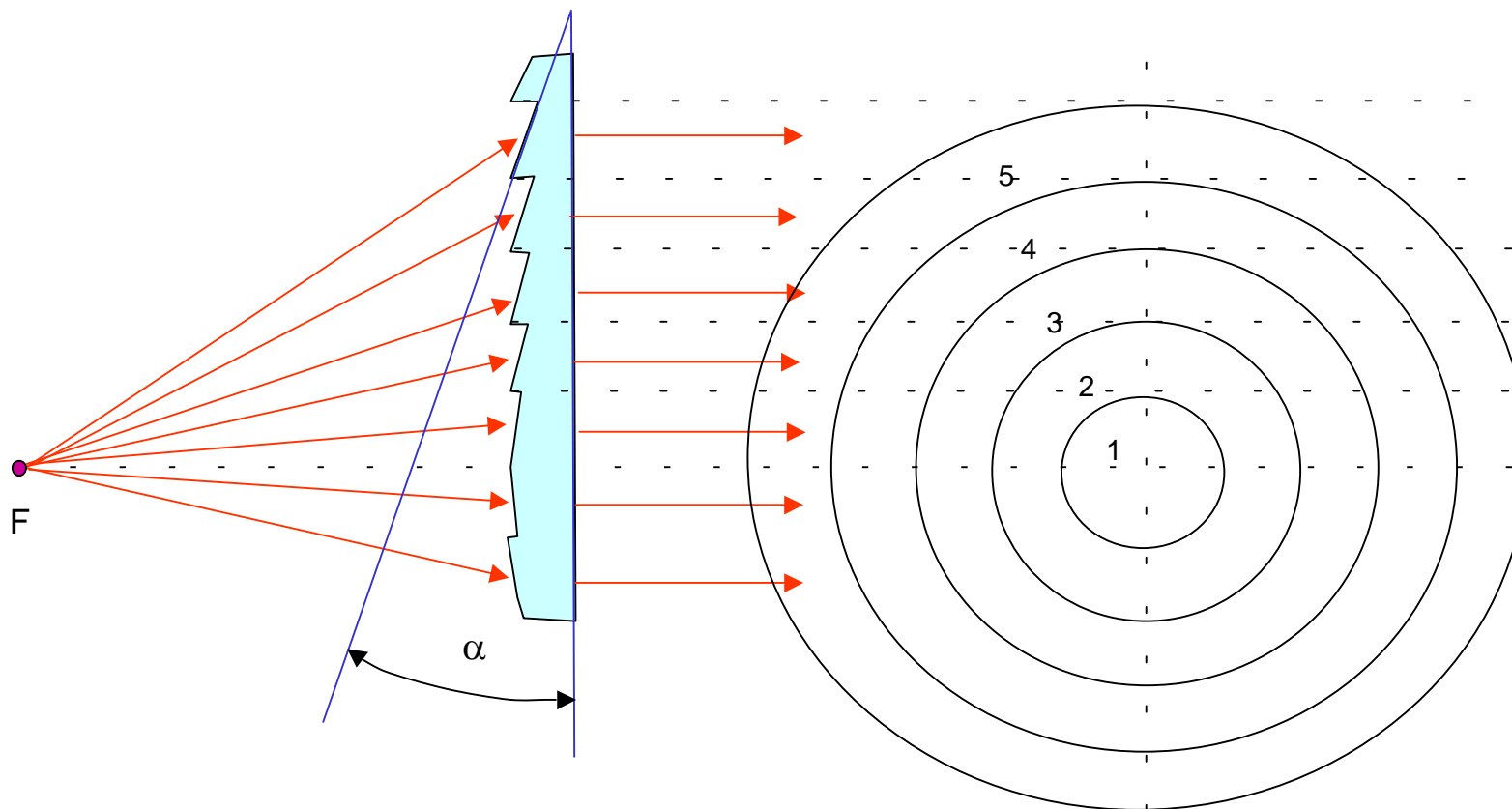


Prizmatický účinek: $p = x (n - 1)\omega$

Index lomu klínové desky: $n = 1 + \delta/\omega = 1 + p/(x \omega)$

Klínová deska vložená **před** spojkou posune příčně obraz o úhel δ .

Fresnelova čočka



- 1) Fresnelova čočka se skládá z prizmatických mezikruží, jejichž vrcholový úhel α se volí tak, aby paprsek vycházející z ohniska **F** se pak šířil rovnoběžně s optickou osou.
- 2) Tato čočka se užívá jako velkoplošný kondenzor (zpětné projekory, reflektory, majáky, jako plochá lupa).
- 3) Tloušťka bývá asi 1 mm , šířka mezikruží asi 1mm.

Odrazivost rozhraní

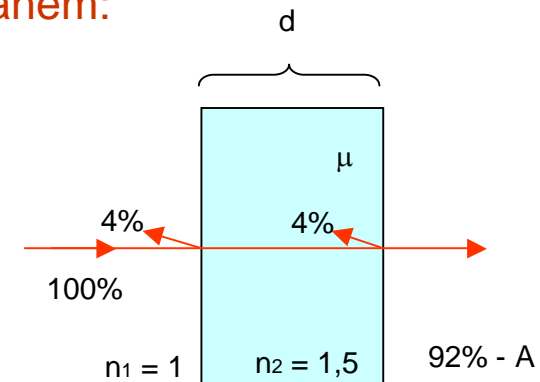
Při průchodu světla optickými prvky nastávají ztráty intenzity **odrazem**, **absorpcí** a **rozptylem**.

Odrazivost R světla na rozhraní závisí obecně na úhlu dopadu (Fresnelovy vzorce)
Při dopadu **kolmo** na rozhraní je odrazivost dána vztahem:

$$R = \frac{I_r}{I_0} = \frac{(n_1 - n_2)^2}{(n_1 + n_2)^2} * 100 \%$$

Neabsorbující látky mají index lomu reálný na rozdíl od kovů, které silně absorbují, a index lomu je komplexní. Imaginární část je úměrná absorpci.

hliník	1.44 +i5.23
zlato	0.47 +i2.83
křemík	3.98 +i0.07
diamant	2.41 +i10 ⁻⁶
sklo	1.5
voda	1.33



Zákon zachování toku energie:

$$R + T + A = 1 \quad (= 100\%)$$

T ... propustnost
A ... absorpce

Absorpce

Ztráta intenzity absorpcí průchodem přes vrstvu tloušťky **d** s koeficientem lineární absorpce $\mu(\lambda)$ je dána vztahem :

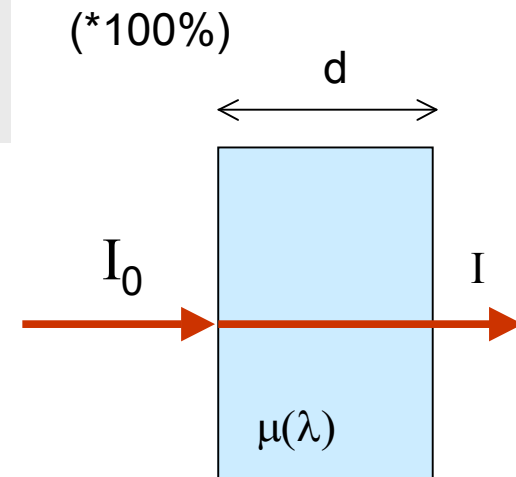
$$\mu(\lambda) = \frac{4\pi}{\lambda} n_i(\lambda)$$

$$A = \frac{I}{I_0} = e^{-\mu d}$$

Absorpce světla v přímém směru je důsledek procesů:

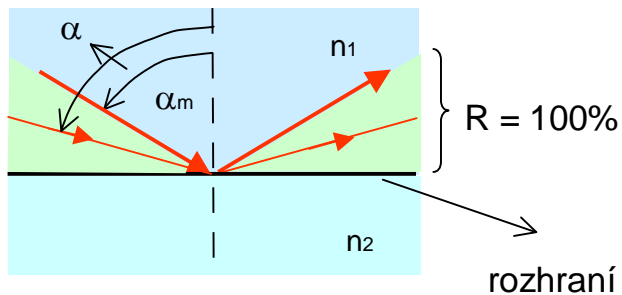
1. **excitace atomů a molekul** (fluorescence, růst teploty)
2. **rozptylu světla** v nehomogenním prostředí

Absorpční spektra $I(\lambda)$ v infračervené oblasti slouží k identifikaci zejména organických látek a dále k měření koncentrace látek v roztoku.



Mezi významné aplikace **absorpce** RTG záření náleží **tomografie (CT)** a v optice zobrazení pomocí **laserové skanovací optiky**.

Totální odraz světla



Mezní úhel α_m existuje, jen když platí:
 $n_1 > n_2$.

Odrazivost $R = 100\%$, pro úhly
 $\alpha > \alpha_m$

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

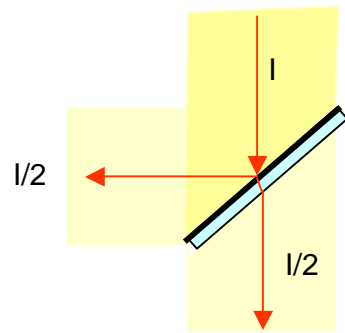
Aplikace totálního odrazu:

1. totálně odrážející hranoly (v triedrech)
2. děliče optických svazků
3. světlovody
4. optická vlákna ve sdělovací technice

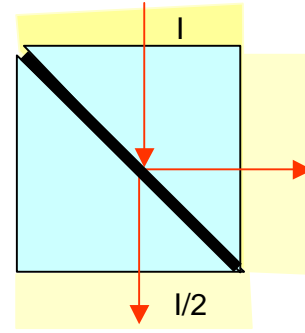
Děliče svazků

Optické prvky na ovládání chodu paprsků

Děliče svazku paprsků (dělením amplitud)



deska s **tenkou vrstvou**

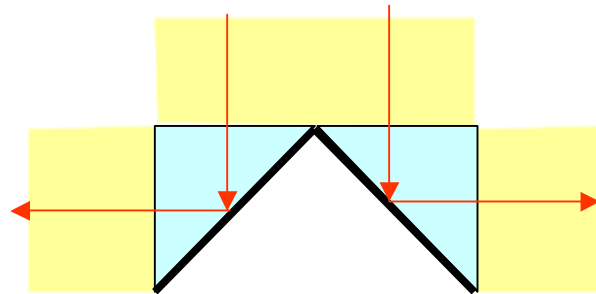


kostka s **tenkou vrstvou**

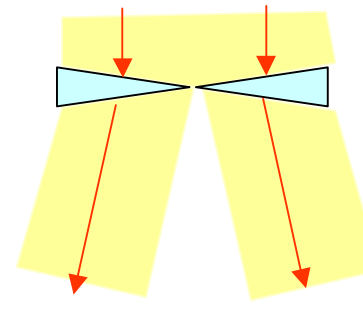
Každý z paprsků má pak poloviční intenzitu

$I/2$

Dělič svazku dělením vlnoploch (příklady)

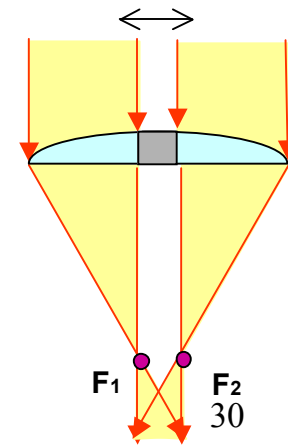


Totální odraz

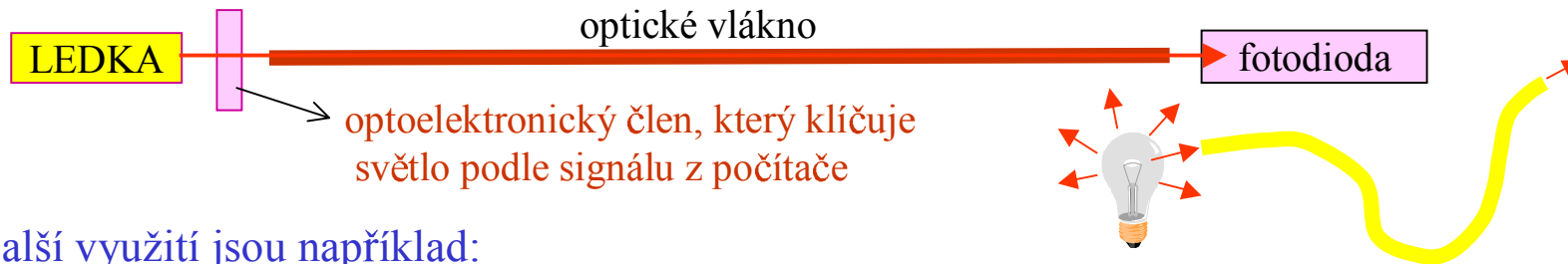


Prizmatický dělič

Čočka rozříznuta a posunuta

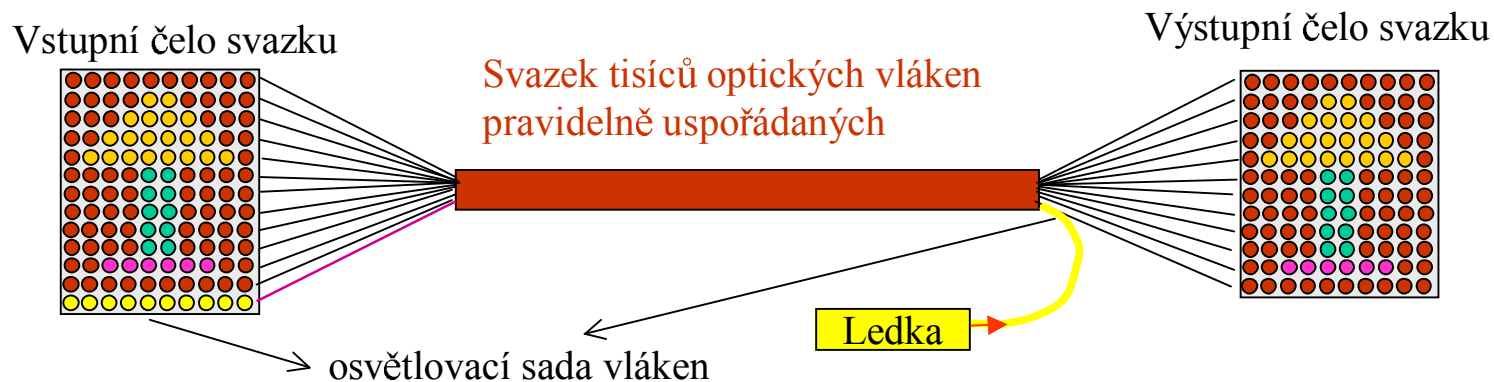


Optická vlákna



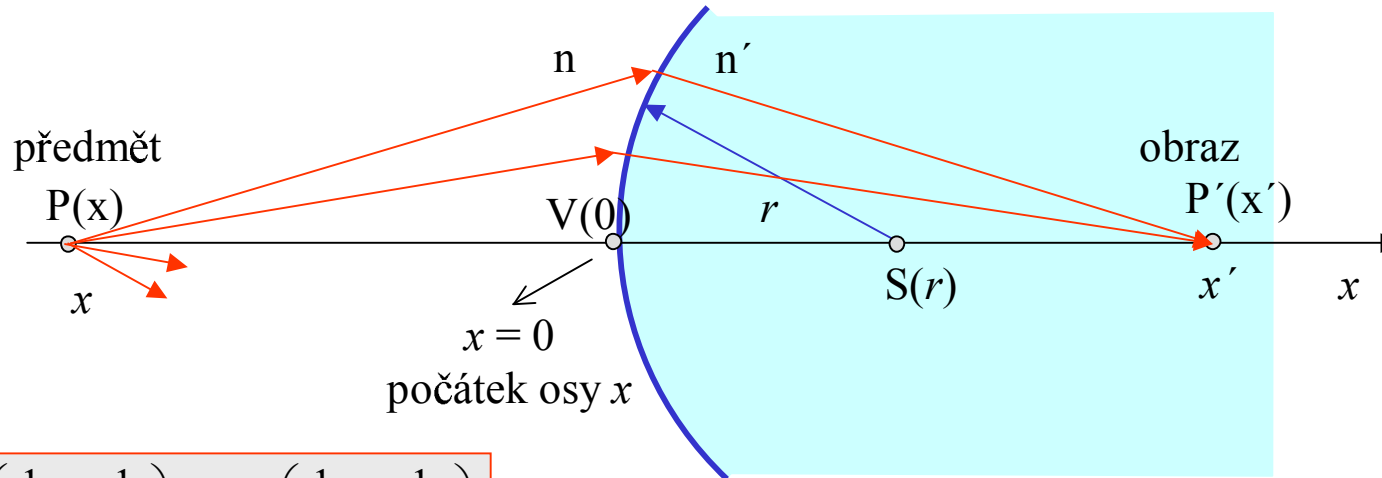
Další využití jsou například:

- **osvětlování** nepřístupných míst svazkem optických vláken
- **přenos obrazu** z nepřístupných míst. Obě tyto techniky se využívají zejména v lékařství (např. kontrola vnitřku žaludku)



Na čelo svazku v nepřístupném místě se promítne obraz a tím do každého vlákna vstoupí paprsek různé barvy a intenzity. Tak se obraz přenesení z jednoho konce svazku na druhý.

Abbeho rovnice zobrazení



$$1. \quad n \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right) = n' \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x'} \right)$$

$$2. \quad \frac{n'}{x'} - \frac{n}{x} = \frac{n' - n}{r}$$

$$D = \frac{n' - n}{r}$$

Abbeho zobrazovací rovnice lámavé plochy (tenké čočky)

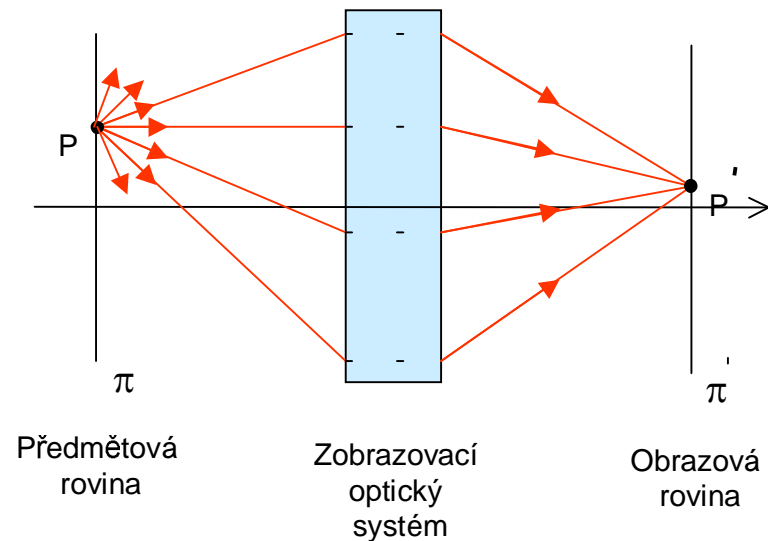
D ... "síla" lámavé plochy (dioptrie)

$1/D = f$... ohnisková vzdálenost (dioptrie⁻¹, m)

- 1) osa x je orientována ve směru chodu světelných paprsků
- 2) r je poloměr kulové plochy. Znaménka r a x -ové souřadnice S jsou shodná.
- 3) x a x' jsou **souřadnice** předmětu a obrazu

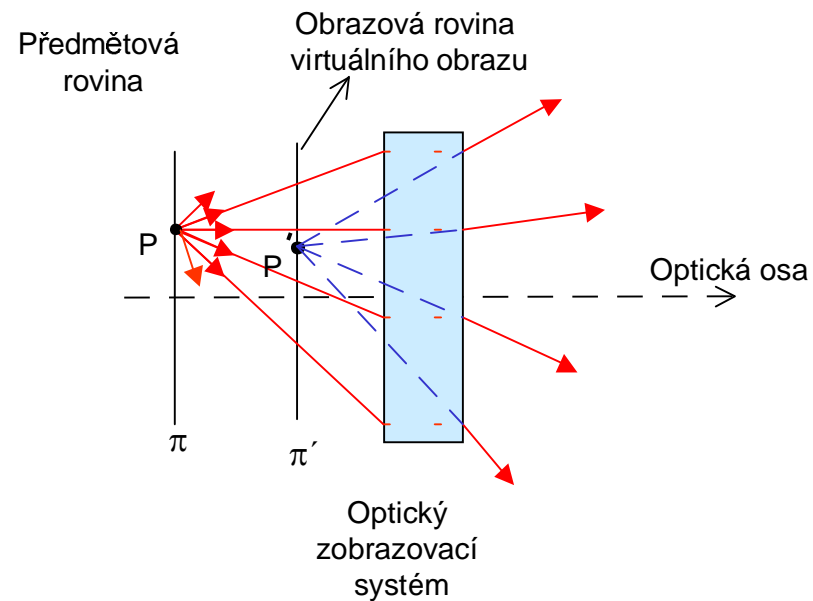
Reálný obraz

Princip optického zobrazování



- 1) Zobrazovací optický systém soustředí **všechny** paprsky vycházející z **jednoho bodu** předmětu **do příslušného bodu obrazu**.
Podstatné jsou jen ty paprsky, které **projdou optickým** systémem (čočkou)
- 2) Když tento bod leží za zobrazovacím systémem, mluvíme o **reálném obrazu**

Virtuální obraz

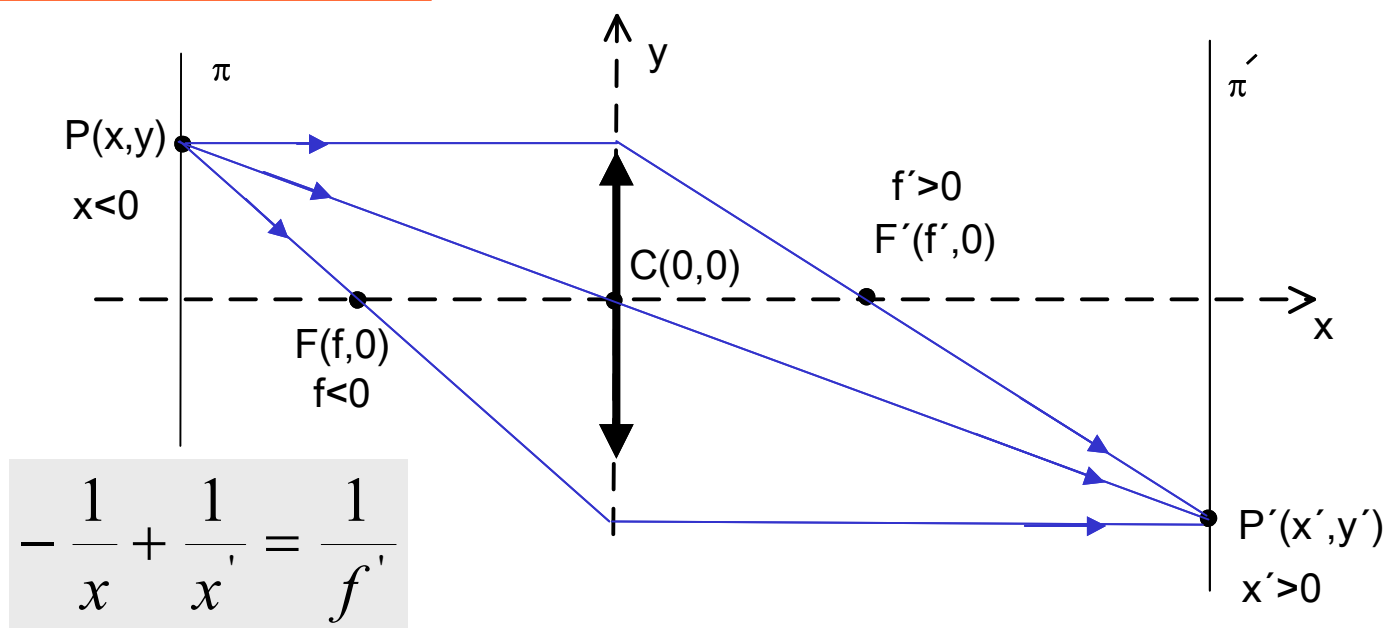


- 1) Bodu P' říkáme **virtuální obraz**, když paprsky po průchodu optickým systémem se šíří tak, **jako by** vycházely z tohoto bodu. Důležité je zde použití sousloví ... jako by ...
- 2) Virtuální obraz leží tedy na **stejně straně** od optického systému, jako předmět.

Geometrická konstrukce obrazu (1)

Tenká spojná čočka

Konstrukční paprsky budeme kreslit **modře**, skutečné **červeně**

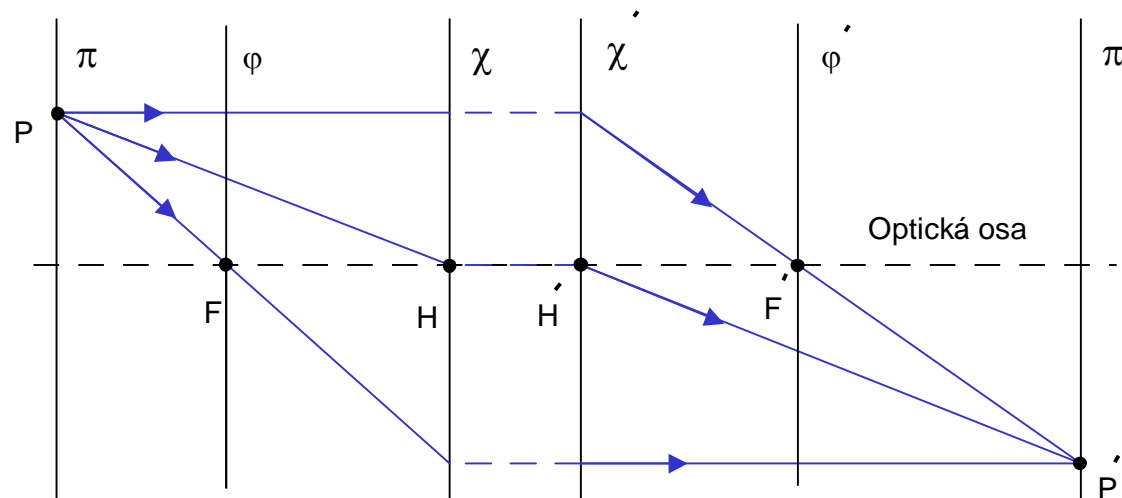


Pravidla pro geometrickou konstrukci polohy obrazu (tenká čočka):

- 1) Paprsek **rovnoběžný** s osou se lomí do obrazového ohniska F'
- 2) Paprsek jdoucí **středem** čočky nemění svůj směr
- 3) Paprsek procházející **předmětovým ohniskem** pokračuje rovnoběžně optickou osou. Kde se tyto paprsky protnou, tam je obraz P' a prochází jí **obrazová rovina π'** .

Geometrická konstrukce obrazu (2)

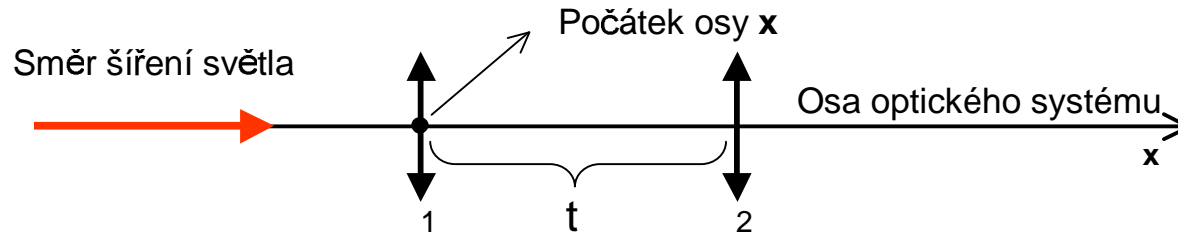
Obecný zobrazovací systém



Charakteristika obecného zobrazovacího systému:

- 1) Hlavní roviny χ a χ' a hlavní body H a H', ohniskové roviny φ a φ' a ohniska F a F'.
- 2) Bod předmětu P a jeho obraz P' nalezený geometrickou konstrukcí.
- 3) Úsečky PH a H'P' jsou rovnoběžné, mezi hlavními rovinami není chod paprsků znám.
- 4) Na χ' pokračují paprsky ve stejné výšce od osy, kde na χ skončily.
- 5) U tenké čočky hlavní roviny a hlavní body splývají.
- 6) Na tyto obecné charakteristiky lze redukovat každou soustavu čoček.

Složený optický systém



Optický systém je tvořen **dvěma tenkými čočkami**, jejichž středy mají souřadnice **0** a **t**, a obrazové ohniskové vzdálenosti **f_1** a **f_2** . Spojka má obrazové ohnisko **$f > 0$** , rozptylka **$f < 0$** .

Obrazová ohnisková vzdálenost tohoto systému je:

$$f_s = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - t}$$

Souřadnice obrazového ohniska:

$$x_{F'} = t + f_s \left(1 - \frac{t}{f_1}\right)$$

Souřadnice předmětového ohniska:

$$x_F = -f_s \left(1 - \frac{t}{f_2}\right)$$

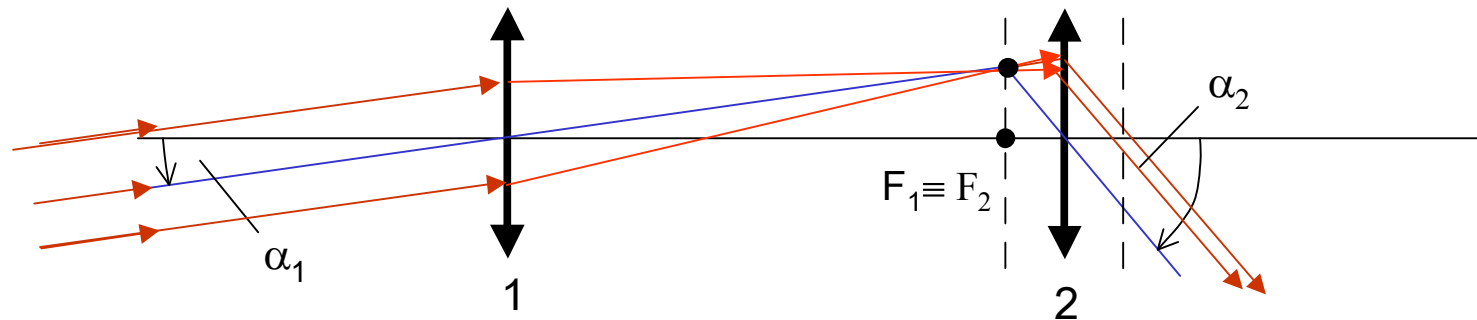
Souřadnice obrazového hlavního bodu

$$x_{H'} = t - f_s \frac{t}{f_1}$$

Souřadnice předmětového hlavního bodu:

$$x_H = f_s \frac{t}{f_2}$$

Teleskop (dalekohled)



$$\gamma = \frac{\alpha_2}{\alpha_1} = \frac{f_1}{f_2}$$

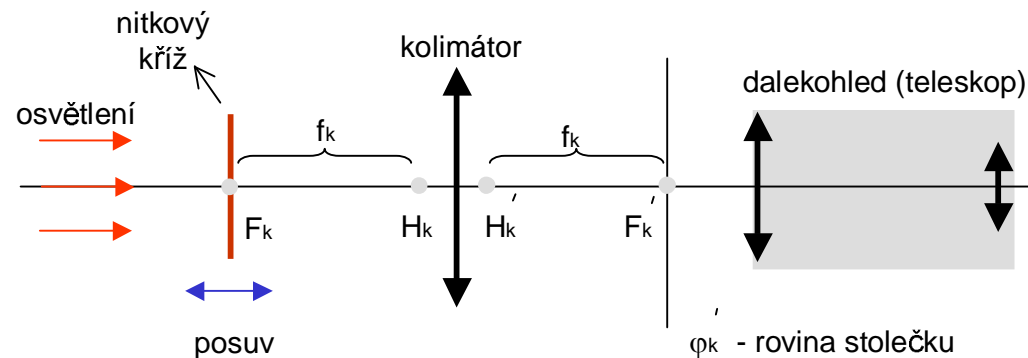
Teleskop není fokusační optický systém, nezobrazuje, jen mění směr chodu paprsků.

1. Jde prakticky o dalekohled **zaostřený na nekonečno**. Bývá součástí různých optických přístrojů, např. spektroskopu, fokometru, aj.
2. Teleskop tvoří obvykle dvě spojky, kdy obrazové ohnisko první je totožné s předmětovým ohniskem druhé (teoretická poloha, **u dalekohledu to tak přesně není!**).
3. U teleskopu má význam jeho **úhlové zvětšení** $\gamma = f_1/f_2$, **nikoliv příčné (nezobrazuje)**.
4. Okem pozorujeme obraz v ohniskové rovině druhé čočky, tam se dává např. i **nitkový kříž** či jiné optické značky. Oko zaostřuje automaticky na zřetelný obraz!

Schéma fokometru

Zařízení pro měření optické mohutnosti brýlových čoček (veličin $D_{\check{c}}$, $f_{\check{c}}$)

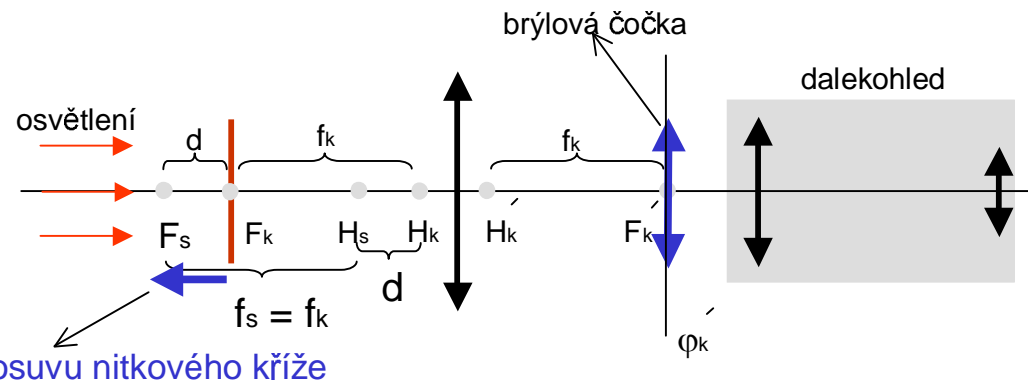
Optické schéma **před** vložením brýlové čočky



- 1) **Nitkový kříž** leží v ohniskové rovině kolimátoru, stupnice posuvu na nule
- 2) Dalekohled zaostříme na nitkový kříž **okulárem**

Princip měření fokometrem

Optické schéma **po vložení** brýlové čočky na stoleček



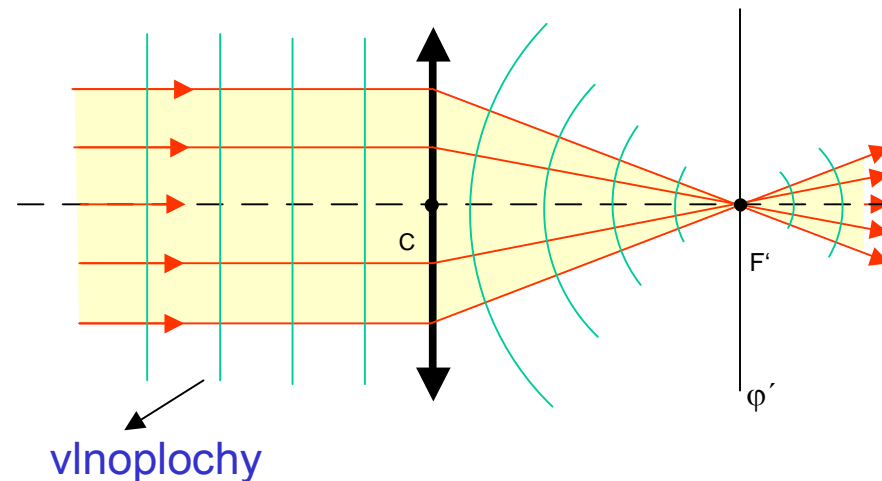
Směr posuvu nitkového kříže

Z výpočtu plyne, že ohnisková vzdálenost **systemu kolimátor a brýlová čočka** se nezmění vložím brýlové čočky ($F_k = F_s$, $f_k = f_s$), ale hlavní předmětový bod systemu H_s se posune o d od H_k Pro posuv platí

$$d = -\frac{f_k^2}{f_c} \Rightarrow D_c = -dD_k^2$$

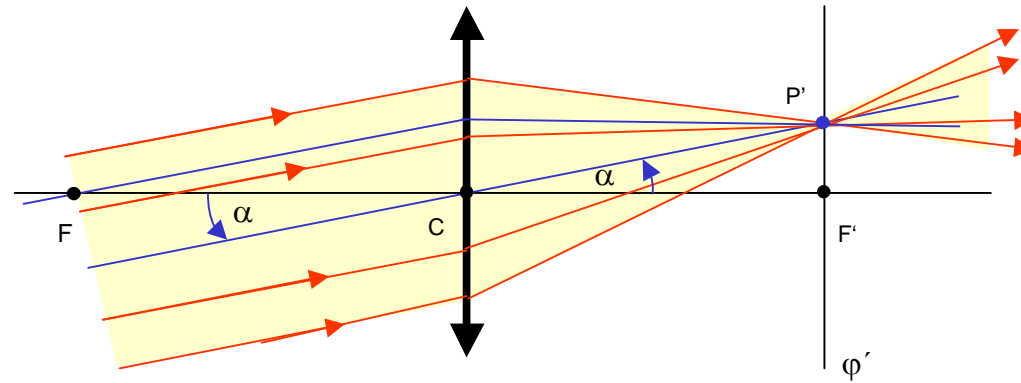
O směru posuvu rozhoduje tedy znaménko ohniskové vzdálenosti brýlové čočky. Naznačený posuv na horním obrázku by tedy odpovídal rozptylce. Hodnotu d odečteme z posuvu nitkového kříže do zaostřené polohy, tj. do F_s . D_c je dioptrická hodnota čočky, D_k je konstanta fokometru.

Chod paprsků čočkou (1)



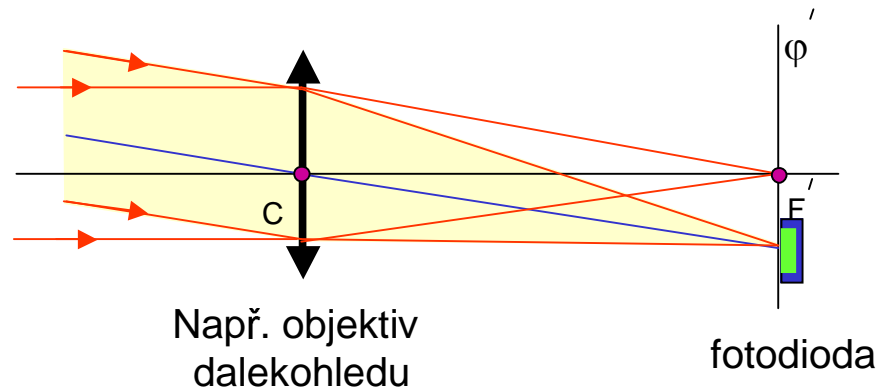
- 1) **Paprsky rovnoběžné** s optickou osou se po průchodu čočkou protínají v obrazovém ohnisku.
- 2) **Rovinnou vlnu** změnila čočka ve vlnu kulovou.
- 3) Čočka při zobrazování **nemění fázový rozdíl** mezi paprsky.
- 4) **Princip reverzibility** v geometrické optice říká, že dráhy paprsků optickým systémem, nezávisí na směru šíření světla.

Chod paprsků čočkou (2)



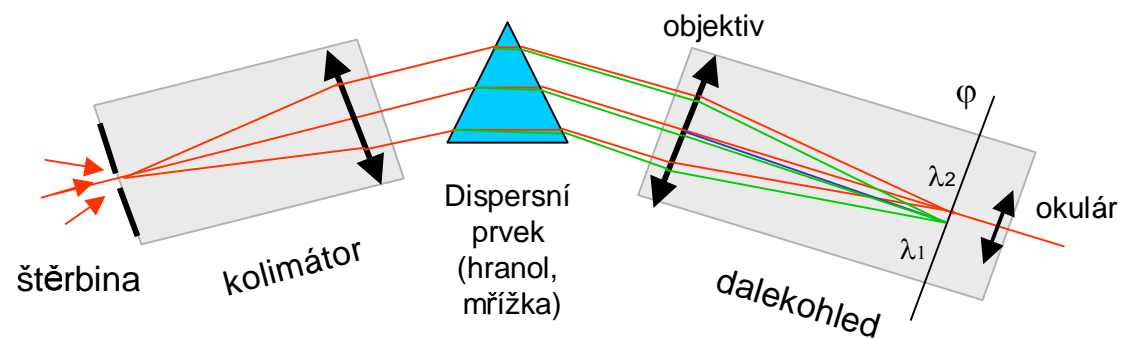
- 1) Rovnoběžný svazek paprsků svírající s optickou osou **úhel** α se protíná v obrazové ohniskové rovině φ' .
- 2) Polohu tohoto **průsečíku** určí paprsek jdoucí středem čočky a předmětovým ohniskem (modře).
- 3) Podle **principu reversibility** se paprsky z **bodu ohniskové roviny** šíří za čočkou navzájem rovnoběžně.

Směrový detektor



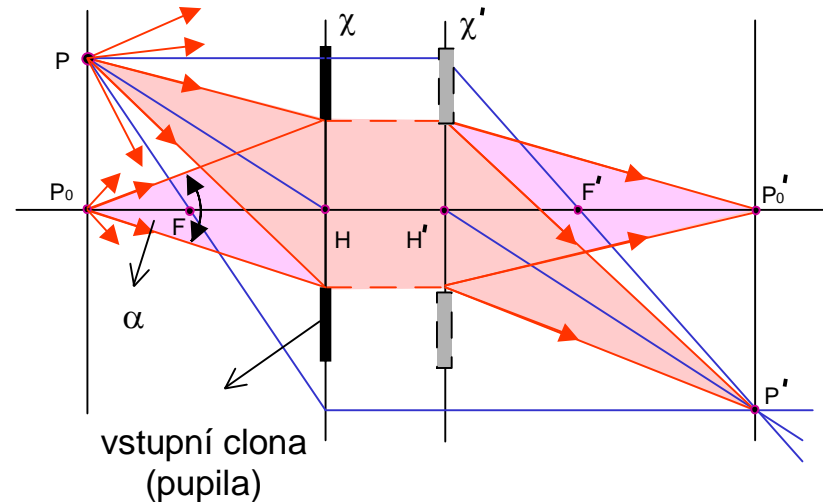
1. Abychom získali **směrový detektor**, použijeme ještě spojku.
2. Detektor pak dáme do ohniskové roviny. Zde reaguje na paprsky přicházející do spojky jen z vybraného směru.

Optické schéma spektrometru



1. **Analyzované světlo** dopadá na štěrbinu
2. **Kolimátor** vytvoří 'rovnoběžný' svazek paprsků
3. Po průchodu dispersním prvkem mají paprsky o **různém λ různý směr**
4. V ohniskové rovině objektivu pozorujeme okulárem **obrazy štěrbin** v jednotlivých vlnových délkách λ .

Aperturní clona (pupila)

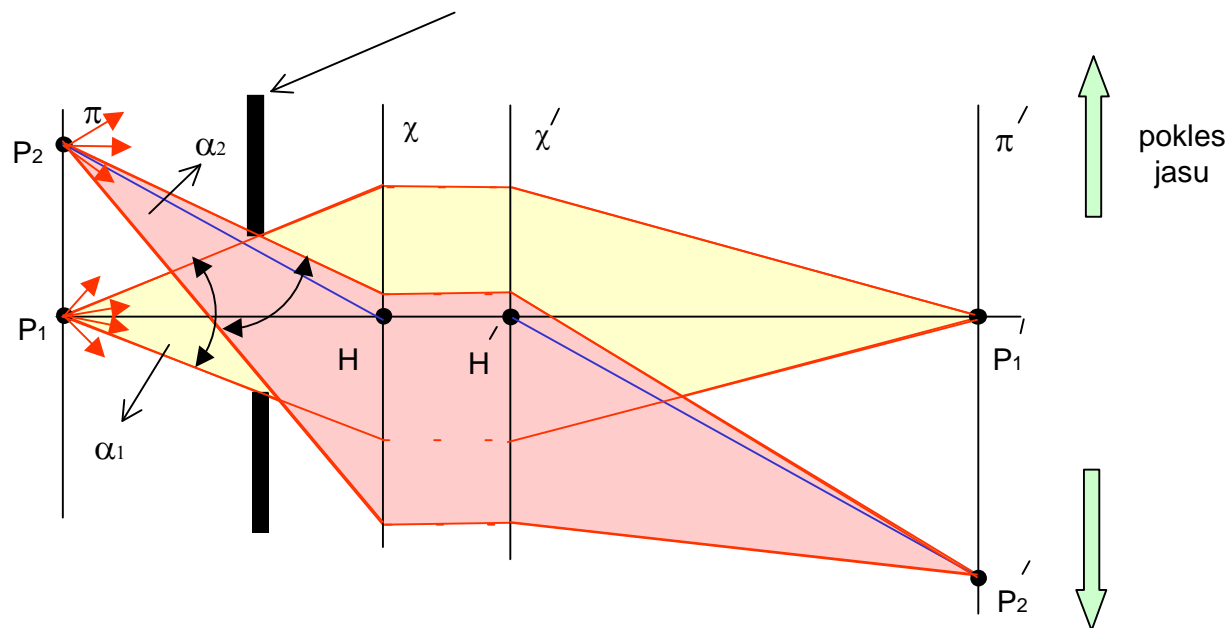


Aperturní clona (pupila), průměr D :

- 1) **Ideální poloha pupily** je v hlavní předmětové rovině χ nebo obrazové χ'
- 2) Paprsky realizující zobrazení (skutečné paprsky) jsou jen ty, které projdou vstupní pupilou
- 3) **Úhlová apertura** soustavy je α (se vzdáleností od osy α klesá).
- 4) **Jas obrazu** je přímo úměrný ploše vstupní pupily, to je D^2 , nebo $1/C^2$.
- 5) Clonové číslo $C = f/D$

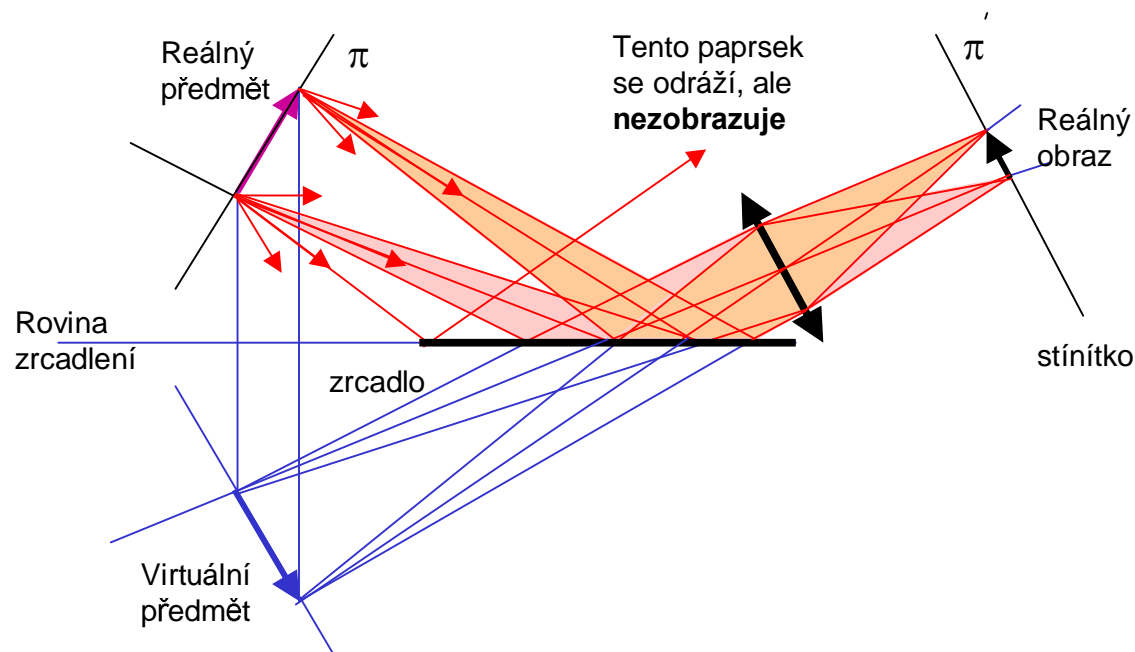
Vignetace obrazu

Nesprávně umístěná aperturní clona



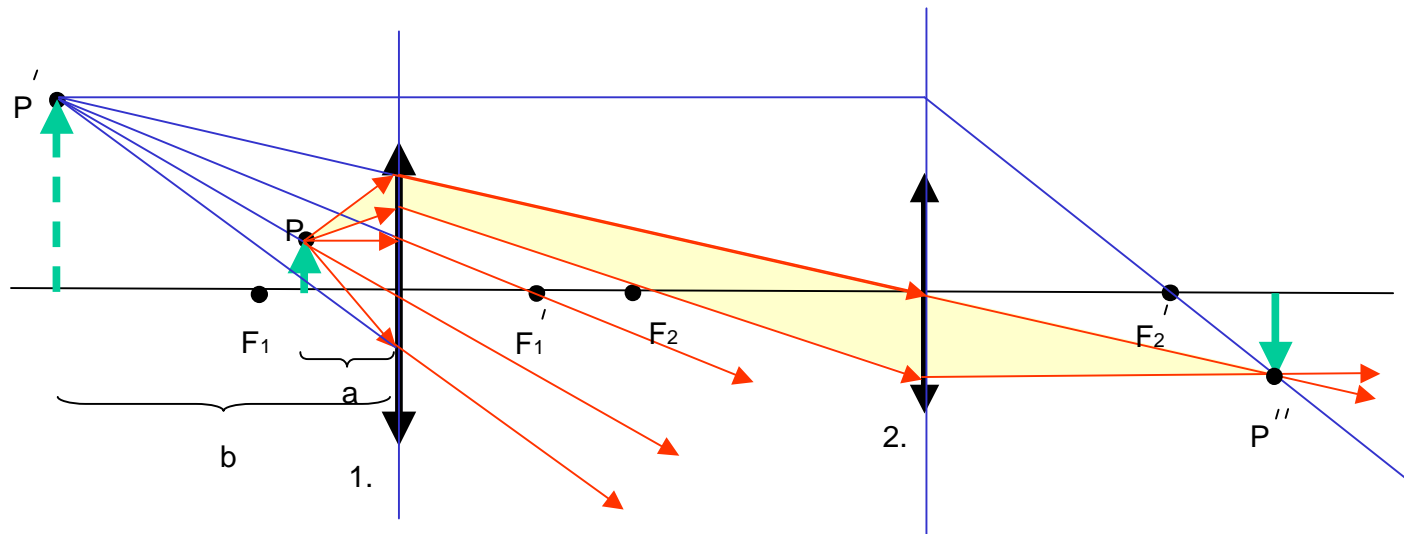
Takto chybně umístěná aperturní clona silně omezuje aperturní úhel (efektivní velikost vstupní pupily) a tím **klesá jas obrazu** směrem od optické osy (tento jev se nazývá **vignetace**).

Virtuální obraz a zrcadlení



- 1) Virtuální obraz zde vzniká **zrcadlením** reálného předmětu v rovinném zrcadle. Po odrazu jdou paprsky tak, **jako by** vycházely z virtuálního obrazu.
- 2) Z každého bodu předmětu vycházejí paprsky na všechny strany, ale obraz vyvářejí jen ty z nich, které se **odrazí** na zrcadle a **projdou** vstupní pupilou čočky.

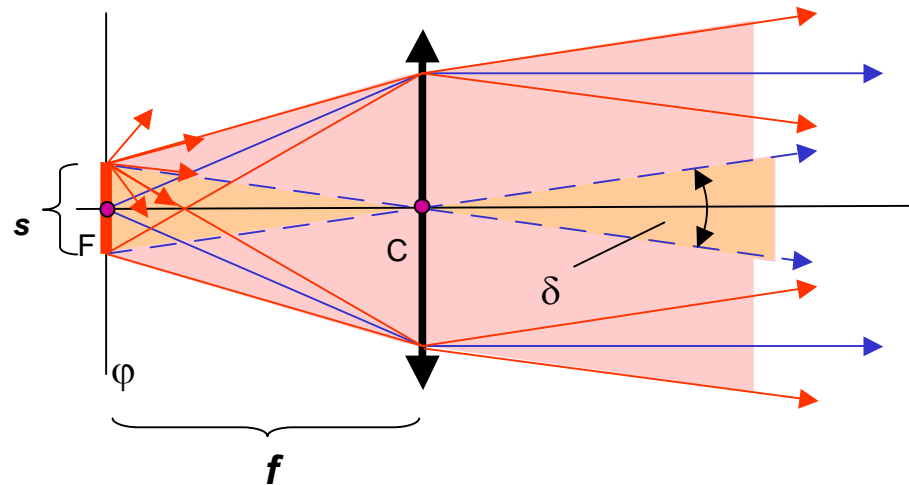
Lupa a virtuální obraz



- 1) **Virtuální obraz vytváří 1. spojka** a 2. spojka jej zobrazuje jako reálný obraz na stínítko.
- 2) Obraz P'' vytváří jen malý svazek paprsků ze širokého svazku procházejícího 1. čočkou.
- 3) Poloha předmětu na schématu připomíná **pozorování lupou**. Dáme jej do takové vzdálenosti a , aby obraz vznikl ve vzdálenosti $b = 25$ cm (**konvenční zřaková vzdálenost**). Oko (čočka 2), pak vidí virtuální obraz (přímý, zvětšený).

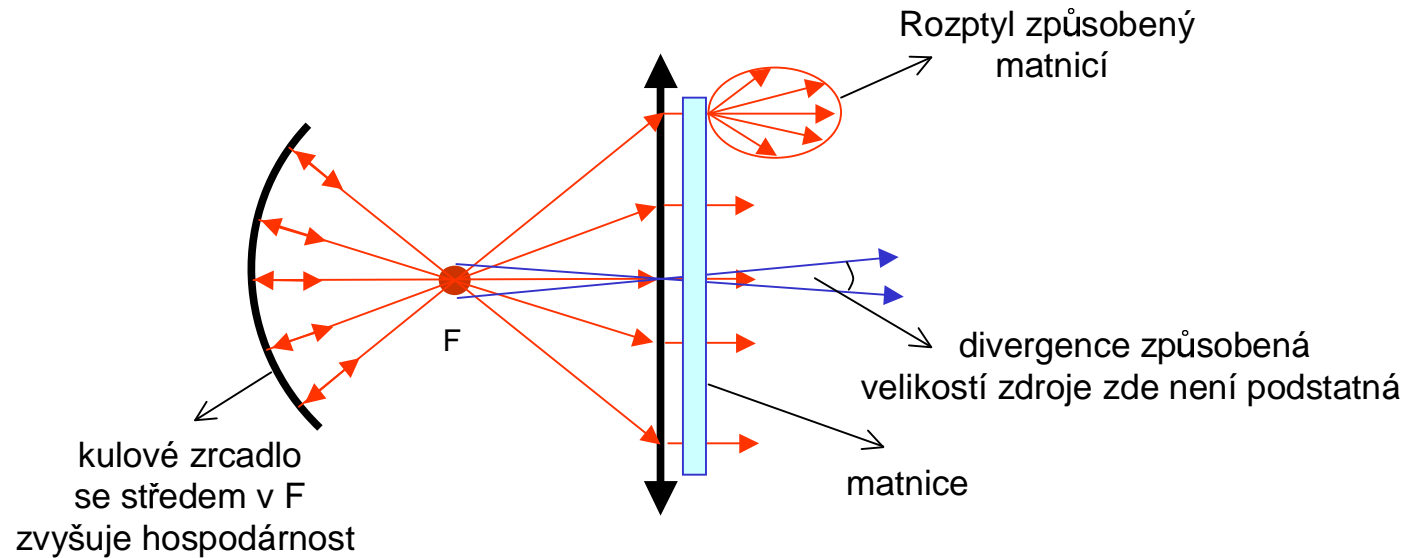
Kolimátor

Zařízení na vytváření rovnoběžných svazků



- 1) Ideálně rovnoběžný svazek paprsků **nelze vytvořit**, protože neexistuje bodový zdroj světla.
- 2) Rovnoběžnost svazku charakterizujeme **divergencí δ** . Tento úhel je dán vztahem
$$\delta = s/f$$
,
kde **s** je velikost svítícího zdroje a **f** je ohnisková vzdálenost spojky.
- 3) V různých **meridiálních rovinách** je divergence různá, když zdroj nemá kruhový tvar (štěrbina nebo svítící vlákno).

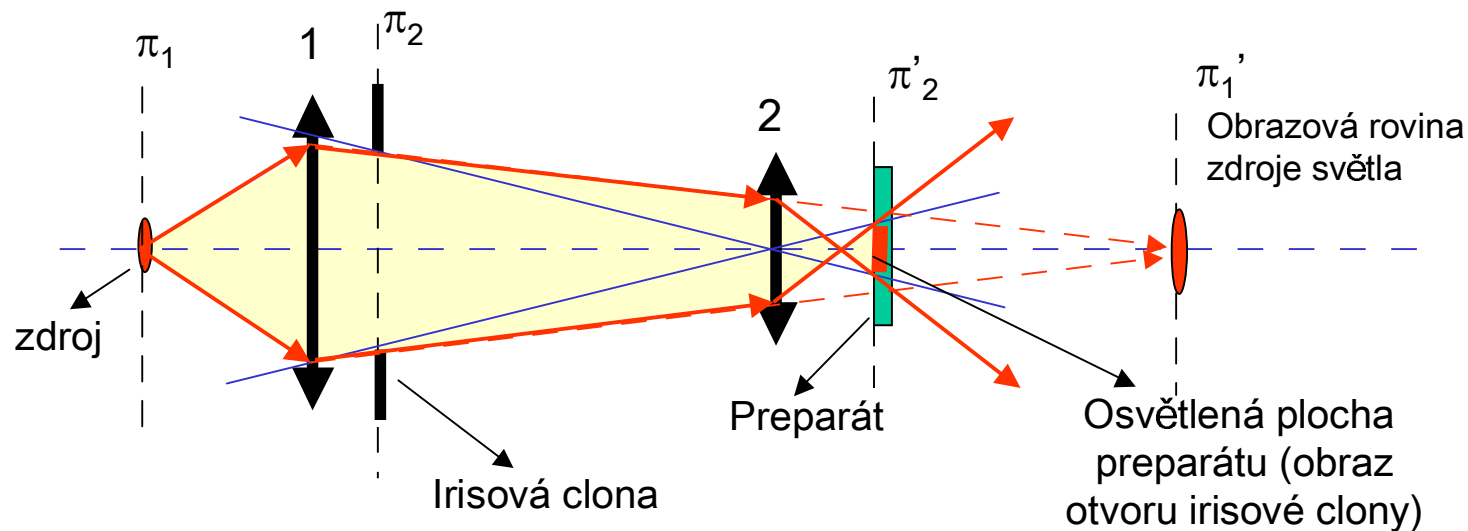
Kondenzor



- 1) Kondenzor má za úkol soustředit do roviny čočky co **největší intenzitu** světla, a dále v rovině čočky dosáhnout **rovnoměrného osvětlení**.
- 3) Spojka je realizována často celou soustavou čoček a využívá se i kulových zrcadel.

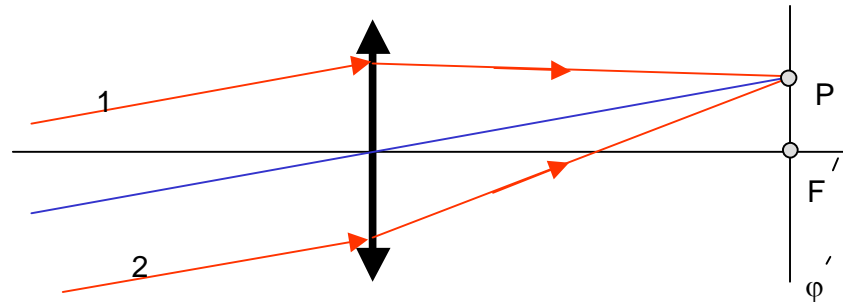
Kondenzor pro mikroskopy

Úkolem mikroskopového kondenzoru je intenzivně a rovnoměrně osvětlit malou plošku preparátu. K tomu se užívá dvoustupňový kondenzor.



V rovině irisové clony je první čočkou vytvořeno velké, homogenně osvětlené pole. Toto pole je pak druhou čočkou zmenšeně zobrazeno do roviny preparátu. Tím se dosáhne intenzivního osvětlení malé plošky na preparátu. Tento způsob osvětlení se někdy nazývá nekoherentním.

Čočka a fázový posuv



- 1) **Fázový rozdíl** rovnoběžných paprsků 1 a 2 po průchodu spojkou v bodě P je **stejný, jako byl před průchodem** .
- 2) **Superposice** paprsků nastane až v jejich průsečíku. Tam vznikne jimi vyvolaný **interferenční jev**, jehož výsledek závisí na jejich fázovém rozdílu.
- 3) Spojkou bývá často **lidské oko** (např. Newtonovy kroužky, duha na obloze, ...)

Interference dvou paprsků

$$u_1(x, t) = E_1 \sin(2\pi(vt - \frac{x}{\lambda})) = E_1 \sin \alpha_1(x, t)$$

$$u_2(x, t) = E_2 \sin(2\pi(vt - \frac{x}{\lambda}) + \varphi) = E_2 \sin \alpha_2(x, t)$$

Předpoklady:

1. Vektory elektrické intenzity \mathbf{E}_1 a \mathbf{E}_2 leží v jedné rovině (amplitudy).
2. Obě vlny mají stejnou frekvenci ν a tedy i λ .
3. Fázi paprsku 1 jsme označili α_1 , paprsku 2 α_2 .
4. Mezi paprsky je **fázový posuv** φ .

Hledáme výraz pro výslednou intenzitu $I \sim E^2$, kde E je amplituda výsledné vlny, která vznikla superpozicí elektrických polí u_1 a u_2 . Stačí tedy najít výslednou amplitudu E .

Označme intenzity:

$$I_1 \sim E_1^2 \quad \text{a} \quad I_2 \sim E_2^2$$

Fázory

Skaláry, vektory, tenzory, fázory (komplexní amplitudy) – matemat. tvar fyzikálních veličin

Vycházejí z definice funkce *sinus* lze stav vlnění (paprsku) znázornit jako fázory. Při superpozici vln se pak fázory sčítají jako vektory. Toto pravidlo nám pomůže najít výslednou amplitudu.

Rovnice vlny

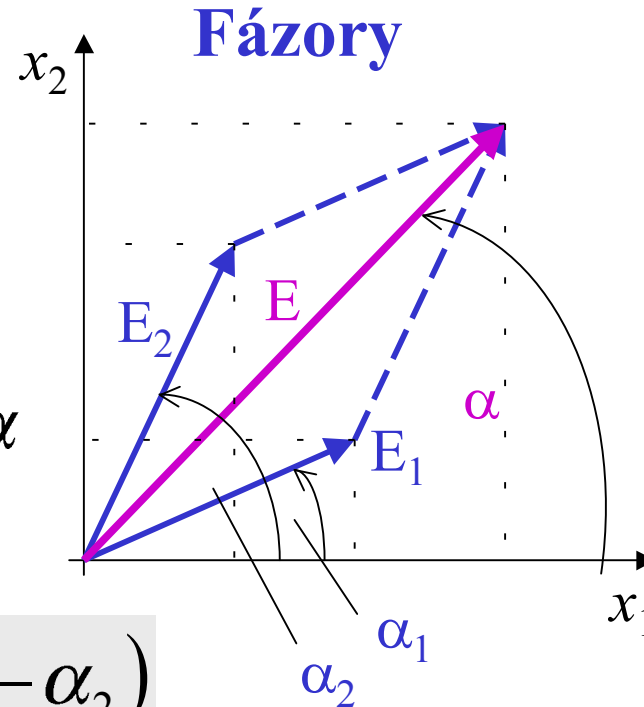
$$u_1 = E_1 \sin(2\pi\nu t - nx/c) = E_1 \sin \alpha$$

Z geometrické konstrukce výsledného vektoru plyne (kosinová věta)

$$E^2 = E_1^2 + E_2^2 + 2E_1E_2 \cos(\alpha_1 - \alpha_2)$$

Po dosazení původního označení je pak **interferenční intenzita** dána vztahem

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1I_2} \cos \varphi$$



Interference dvou reálných paprsků

Nikdo a žádný detektor neumí u světla naměřit časovou závislost intenzity elektrického pole světla (u rádiových vln to jde!). Detektory světla měří časovou střední hodnotu intenzitu světla I za **integrační dobu detektoru**. Je třeba počítat **střední časovou hodnotu E^2** .

Při výpočtu **interferenční intenzity** světla dvou reálných paprsků je pak třeba vzít v úvahu ještě **koherenční vlastnosti** obou paprsků

Tomuto sčítanci ve vzorci pro intenzitu se říká **interferenční člen**

$$I = I_1 + I_2 + \gamma 2\sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi$$

$$\gamma = \gamma_t \gamma_s \gamma_p$$

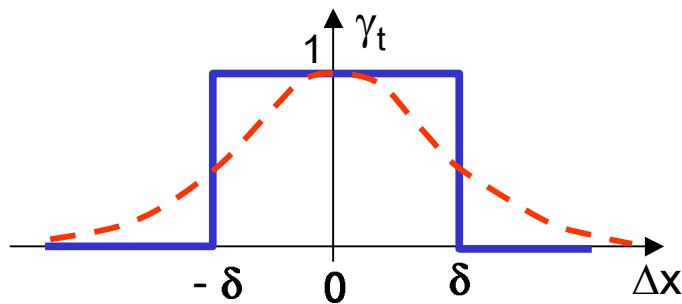
Veličina γ , která se zde objevila navíc, se nazývá **stupeň koherence** paprsků 1 a 2. ($0 < \gamma < 1$)

γ_t ... stupeň **časové koherence**
 γ_s ... stupeň **prostorové koherence**
 γ_p ... stupeň **polarizační koherence**

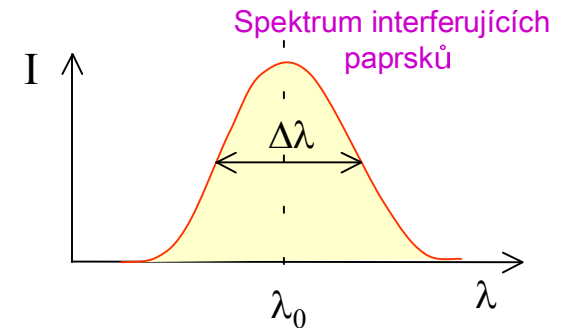
$\gamma = 0$... paprsky 1 a 2 jsou **nekoherentní**
 $\gamma < 1$... **částečně koherentní**
 $\gamma = 1$... **koherentní**

Časová koherence

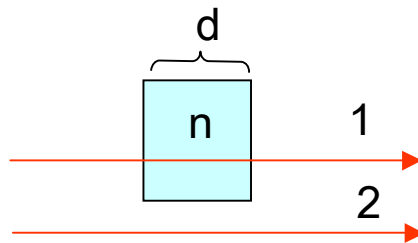
Stupeň časové koherence (červeně a čárkovaně) závisí na Δx a tvar této funkce určuje spektrální složení interferujících paprsků. Zjednodušeně (modře) ji charakterizujeme tzv. koherenční délkou δ , pro níž platí



$$\delta = \lambda_0 \frac{\lambda_0}{\Delta\lambda} = \frac{\lambda_0^2}{\Delta\lambda}$$



kde λ_0 je střední vlnová délka spektrálního oboru a $\Delta\lambda$ charakterizuje jeho šířku (např. šířku spektrální čáry, šířku spektra barevného filtru apod).

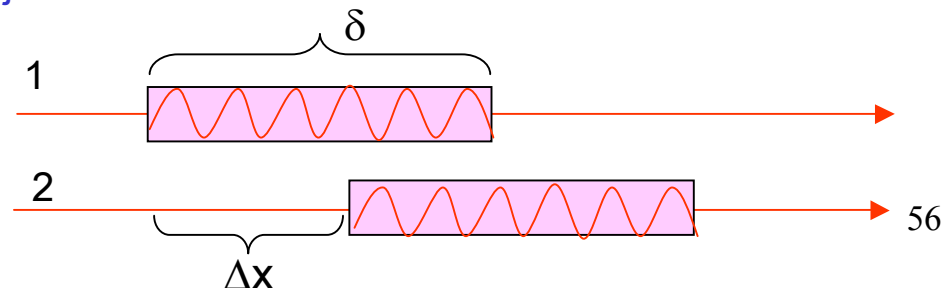


Rozdíl optických drah

$$\Delta x = d(n - 1)$$

Dva paprsky jsou časově koherentní, když rozdíl jejich optických drah Δx bude menší než δ .

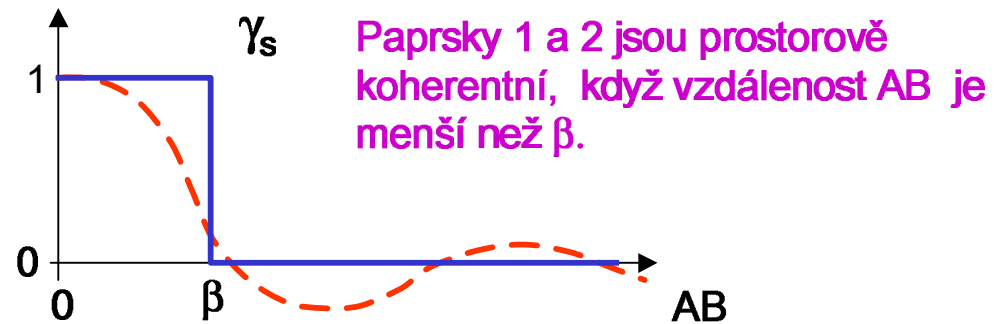
Koherenční délku paprsku si můžeme názorně představit jako **délku vlnového klubka**



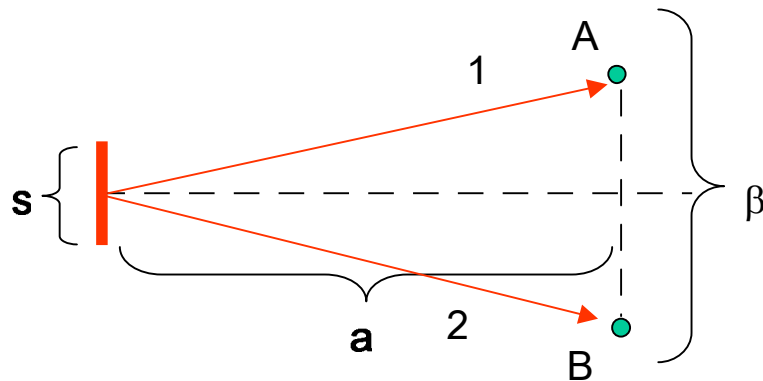
Prostorová koherence

Stupeň prostorové koherence světla závisí na vzdálenosti bodů **AB**. Např. pro plošný zdroj světla má tato funkce tvar naznačený na obrázku červeně čárkovaně. Zjednodušeně ji charakterizujeme pomocí tzv. koherenční šířky β , která je dána vztahem.

$$\beta = \lambda_0 \frac{a}{s},$$



kde **a** je vzdálenost od zdroje světla a **s** je jeho šířka měřená kolmo na směr šíření světla. Koherenční šířka pak odpovídá směru, v němž měříme **s**.

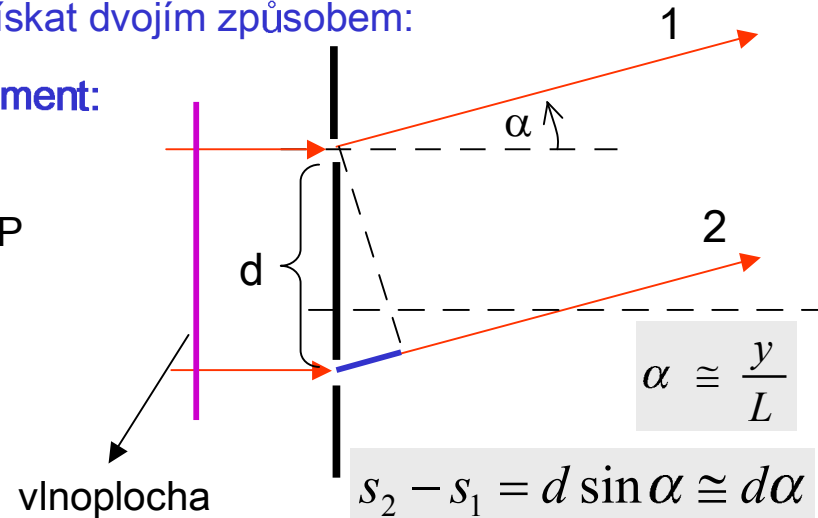
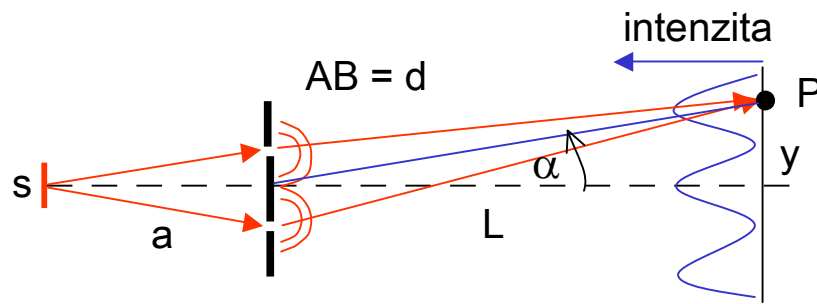


Jinými slovy řečeno, časová a prostorová koherence světla určují experimentální meze, za nichž je možné považovat světelný svazek za ideálně monochromatický a rovnoběžný.

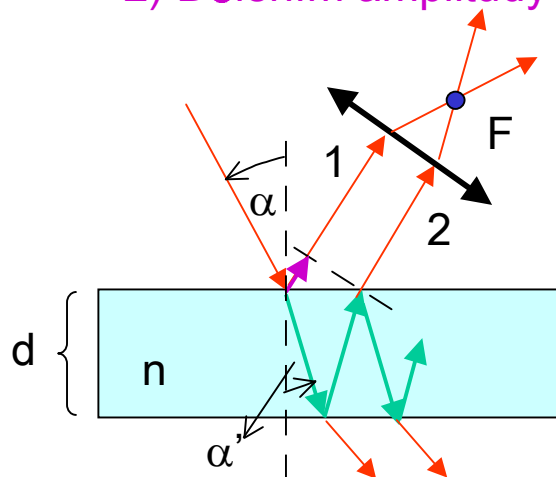
Dvoupaprsková interference

Interferující dvojici paprsků lze v principu získat dvojím způsobem:

1) Dělením vlnoplochy Youngův experiment:



2) Dělením amplitudy



Interference na tenké vrstvě

Rozdíl optických drah

$$s_2 - s_1 = 2nd \cos \alpha'$$

Fázový posuv je:

$$\varphi \approx \frac{2\pi}{\lambda} (s_2 - s_1) = \frac{2\pi}{\lambda} d \frac{y}{L}$$

Polarizační koherence

Stupeň polarizační koherence souvisí se stavem polarizace interferujících paprsků.

$\gamma_p = 1$, když interferující paprsky jsou **nepolarizované**, nebo když jsou **lineárně polarizované a jejich polarizační roviny jsou totožné**

$\gamma_p = 0$, když jsou lineárně polarizovány v rovinách na sebe **kolmých**

Stupeň polarizační koherence hraje významnou roli při vzniku **obrazu v polarizačních projektorech (mikroskopech)**, kde dochází k interferenci paprsku řádného a mimořádného, které jsou lineárně polarizovány v rovinách na sebe kolmých.

Když ale oba paprsky projdou analyzátozem, pak kmitají jejich vektory **E** v jedné rovině, a stupeň polarizační koherence $\gamma_p = 1$.

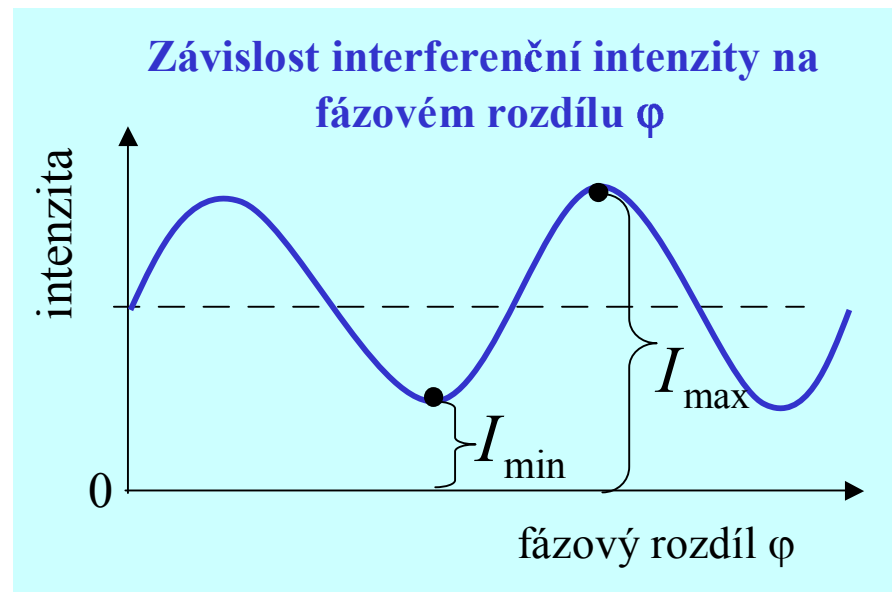
Stupeň viditelnosti - definice

Stupeň viditelnosti je definován pro všechny jevy dvoupaprskové interference stejně. Označme I_{\min} a I_{\max} minimum a následující maximum intenzity nějakého interferenčního jevu.

Stupeň viditelnosti $\mu(\varphi)$ je pak číslo dané vztahem

$$\mu(\varphi) = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}$$

Důležité je, že μ je **měřitelná veličina** světelnými detektory! Její hodnota úzce souvisí se stupněm koherence.



Stupeň viditelnosti $\mu(\varphi)$ závisí na fázovém rozdílu

$$\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} (x_2 n_2 - x_1 n_1)$$

Souvislost μ a γ

Interferenční intenzita je dána vztahem

$$I = I_1 + I_2 + \gamma 2 \sqrt{I_1 I_2} \cos \varphi (\Delta x)$$

Maximum intenzity nastane pro $\cos(\varphi) = 1$

$$I_{\max} = I_1 + I_2 + \gamma 2 \sqrt{I_1 I_2}$$

rozdíl optických drah

Minimum intenzity nastane pro $\cos(\varphi) = -1$

$$I_{\min} = I_1 + I_2 - \gamma 2 \sqrt{I_1 I_2}$$

Poslední dvě rovnice dosadíme do definice **stupeň koherence** a dostaneme

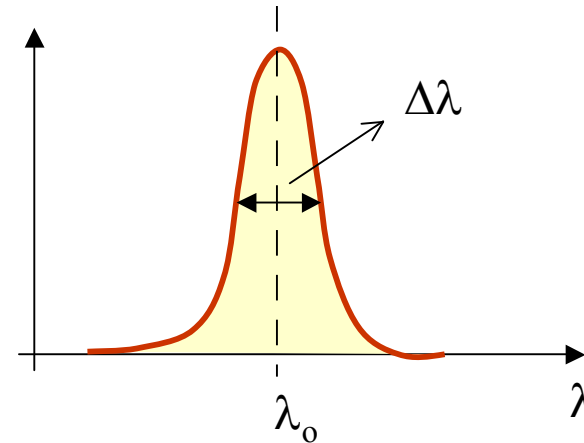
$$\mu = \frac{2 \sqrt{I_1 I_2}}{(I_1 + I_2)} \gamma \quad \text{a tedy pro } I_1 = I_2 \text{ je } \boxed{\mu(\Delta x) = \gamma(\Delta x)}$$

Měřením viditelnosti μ lze tedy experimentálně určit stupeň koherence paprsků.
Ze znalosti funkce $\gamma(\Delta x)$ lze zpětně Fourierovou transformací určit spektrální složení interferujícího světla (Fourierovy spektrometry)

Příklad interference

Parametry paprsků:

Střední vlnová délka: $\lambda_0 = 1 \mu\text{m}$,
šířka čáry: $\Delta\lambda = 0.2 \mu\text{m}$,
koherenční délka tedy je : $\delta = 5 \mu\text{m}$
gaussovský profil spektrální čáry.



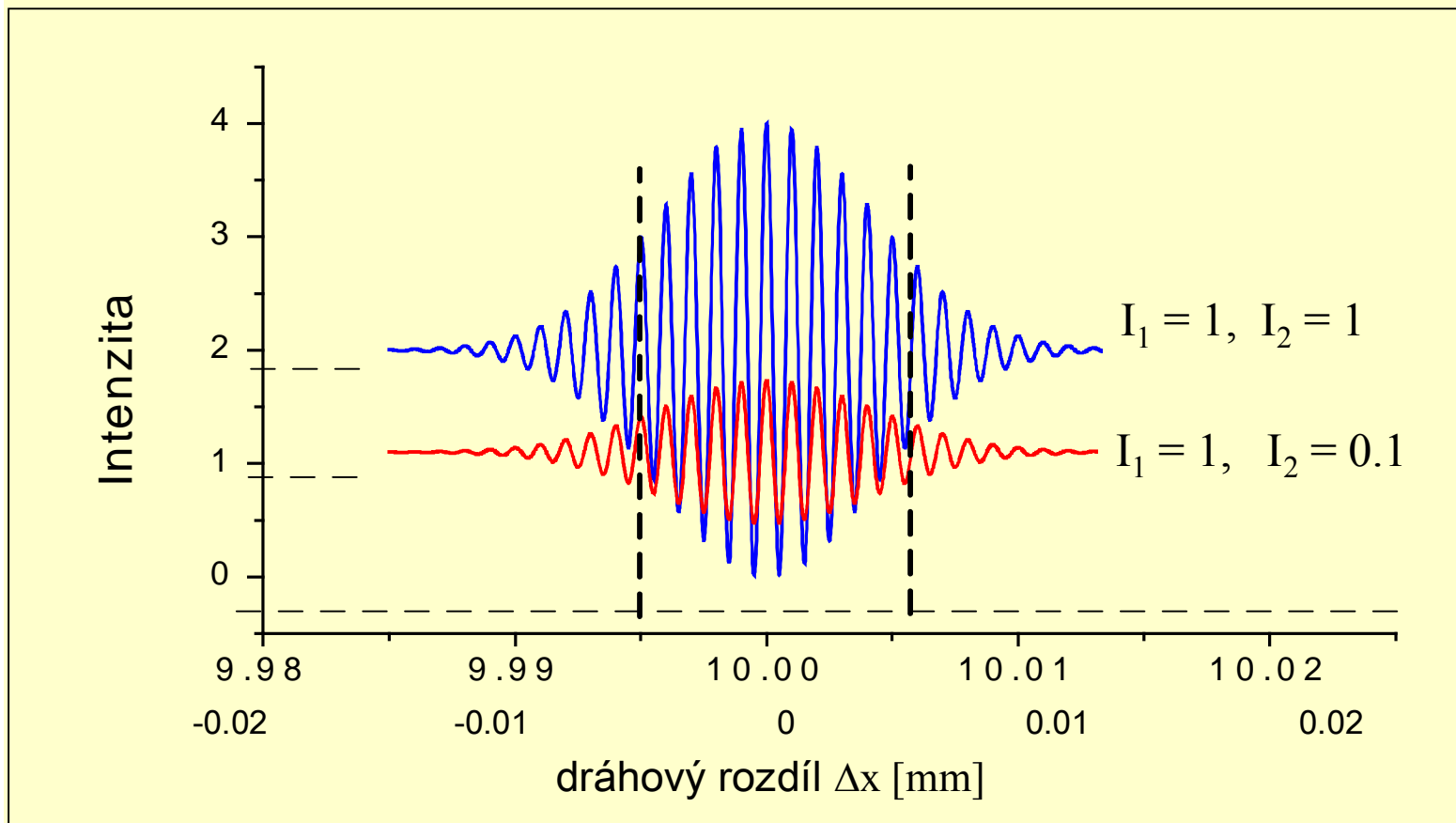
Následují výpočty interferenční intenzity a viditelnosti pro výše uvedené parametry a pro tyto intenzity paprsků $I_1 = 1$ a $I_2 = 1$, resp. $I_2 = 0.1$.

Všimněte si na následujících grafech viditelnosti dvou vlastností:

1. maximum viditelnosti nastane, když **dráhový rozdíl je nulový**
2. viditelnost klesá, čím více se liší intenzita paprsků 1 a 2, ale její maximum polohu nemění.

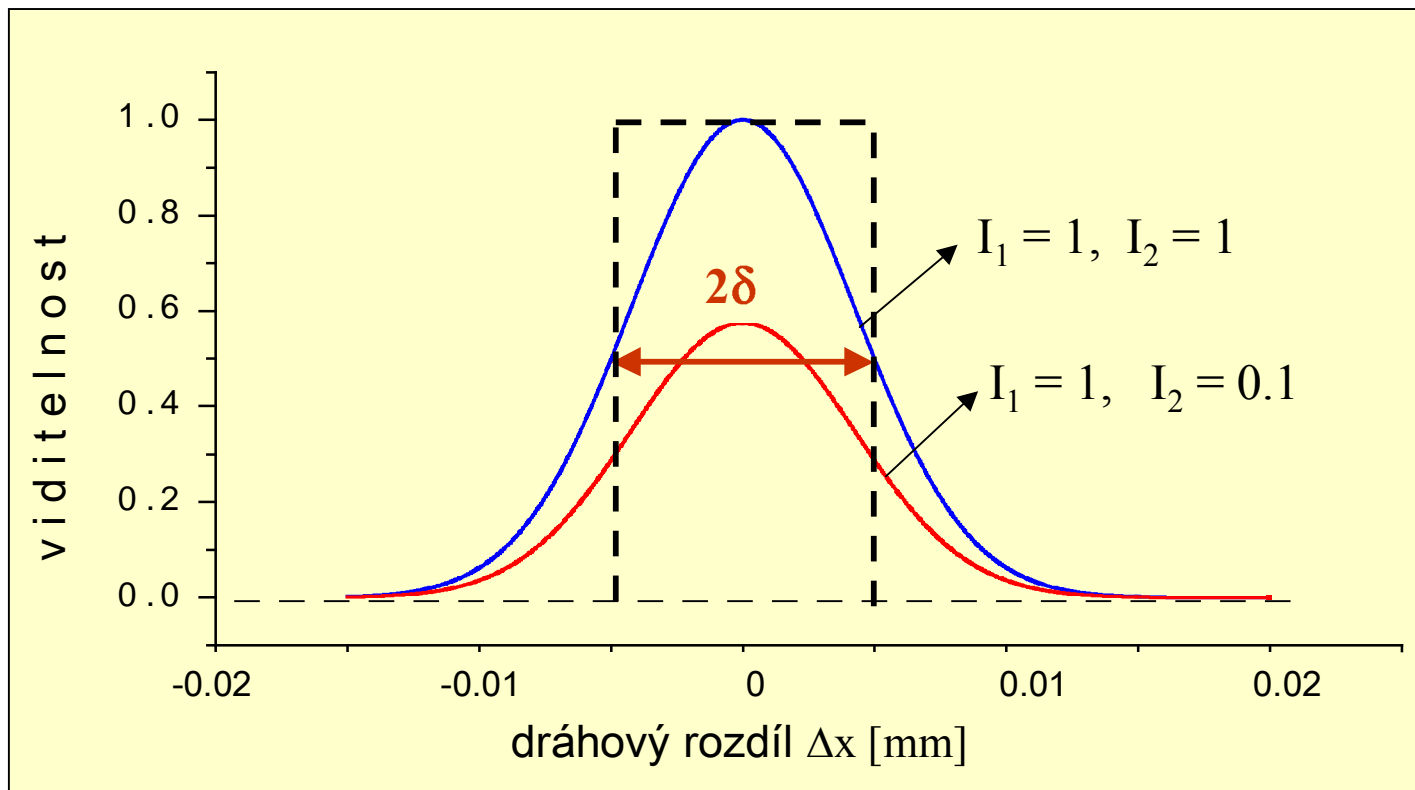
Interferenční intenzita

Závislost intenzity na dráhovém rozdílu Δx



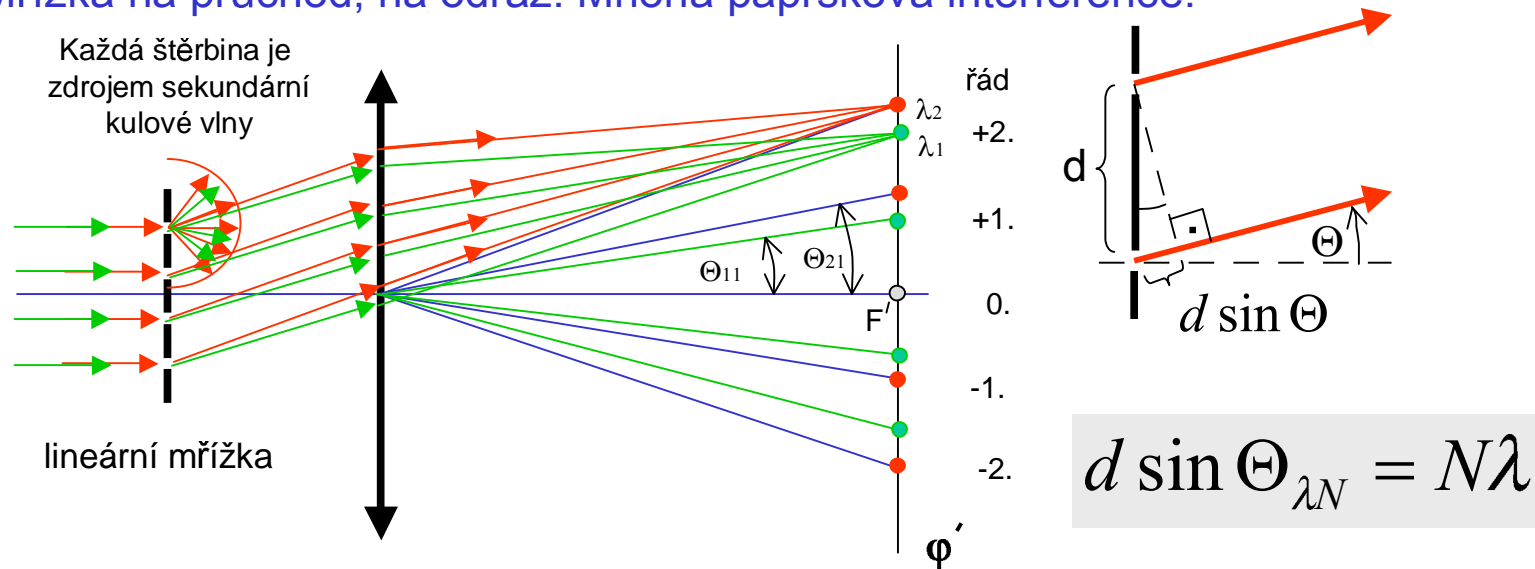
Viditelnost interference

Závislost viditelnosti interference na dráhovém rozdílu Δx



Lineární optická mřížka

Užívá se jako vlnově disperzní optický prvek ve spektrometrech místo hranolu. Mřížka na průchod, na odraz. Mnoha paprsková interference.

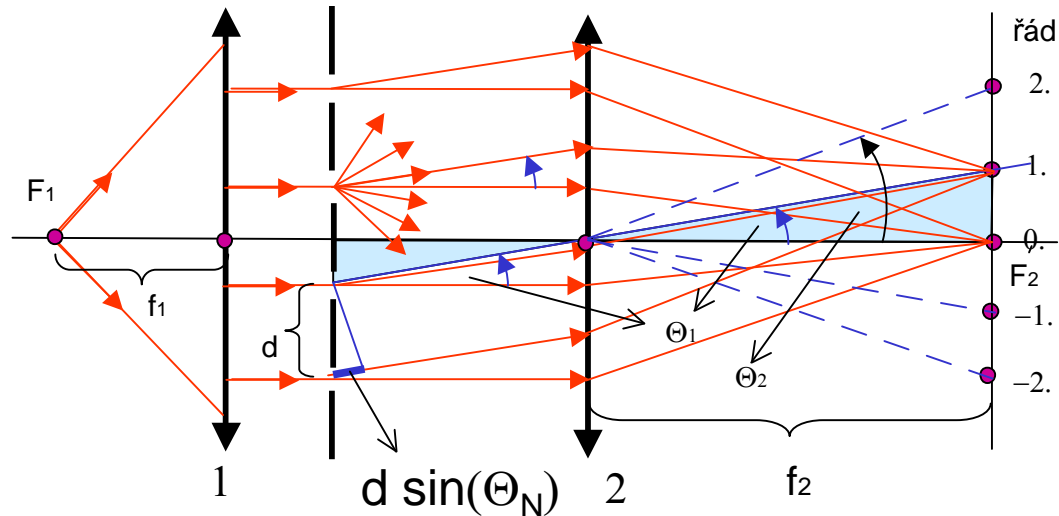


- 1) Lineární optická mřížka má mřížkovou konstantu d .
- 2) **Dráhový rozdíl** libovolných dvou sousedních rovnoběžných paprsků je $d \sin \Theta$. Čočka dráhový rozdíl paprsků nezmění.
- 3) Maximum interferenční intenzity N řádu pro vlnovou délku λ nastane pro úhel $\sin(\Theta) = N\lambda/d$.
- 4) Čočka zajistí splnění aproximace rovinných vln v konečné vzdálenosti stínítka od mřížky

Optický difraktograf

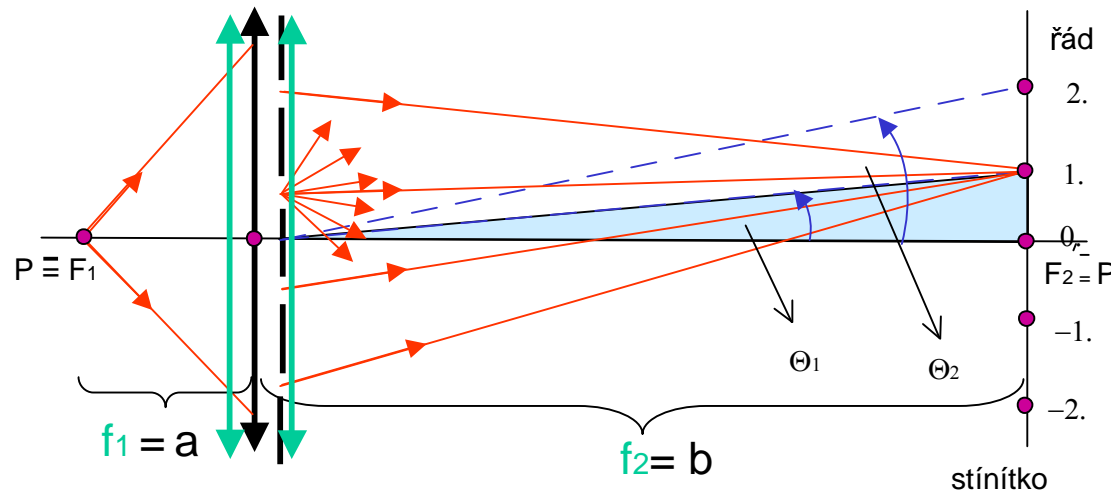
Difraktograf je zařízení pro pozorování **Fraunhoferovy difrakce**.

Jde o mnohapaprskovou **interferenci** rovnoběžných paprsků šířících se pod úhlem Θ .



- 1) **První čočka** vytváří rovnoběžný svazek světla. Paprsky tohoto svazku jsou po částech prostorově koherentní. Při bodovém ohnisku je koherentní celý svazek.
- 2) Propustné části mřížky jsou podle **Huygensova principu** zdrojem paprsků šířících se všemi směry
- 3) **Druhá čočka** soustředí navzájem rovnoběžné paprsky do příslušného bodu ve své ohniskové rovině
- 4) Interferenční maxima intenzity nastanou pro úhly Θ_N , které vyhovují rovnici **$d \sin \Theta_N = N \lambda$** , kde N jsou celá čísla $0, \pm 1, \pm 2, \dots$ a označují **řád difrakce**

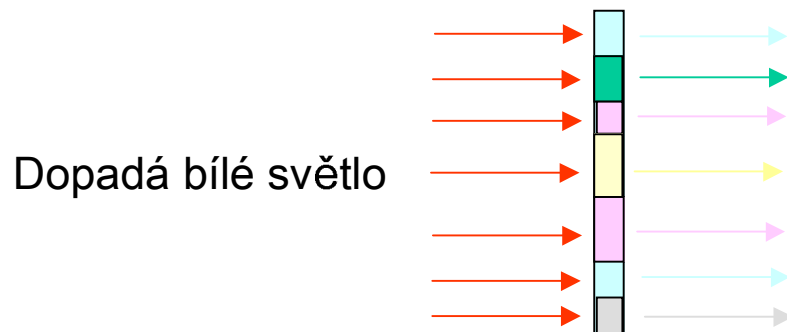
Jednoduchý difraktograf



- 1) Čočku si můžeme **představit jako** dvě tenké čočky přiložené k sobě, mezi nimiž je difrakční mřížka. Tyto dvě hypotetické čočky jsou zde nakresleny **zeleně**.
- 2) Mezi f_1 a f_2 platí při zobrazení bodu P na stínítko **formálně stejný vztah**, jako platí mezi a a b zobrazovací rovnice. ($1/a + 1/b = 1/f$, $1/f_1 + 1/f_2 = 1/f$)
- 3) Na stínítku vytvoříme **obraz štěrbin**y a pak přiložíme mřížku těsně k čočce.

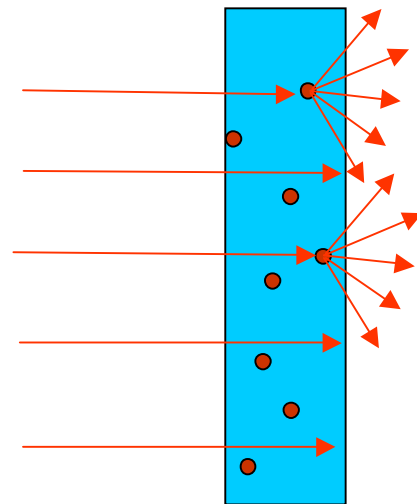
Absorbující preparát

Preparátem rozumíme předmět určený pro zobrazování v mikroskopu nebo projektoru. **Optickou strukturou** rozumíme nejružnější materiálové objemové, plošné nebo povrchové nehomogenity preparátů, které ovlivňují procházející nebo odražené světlo. Postupně probereme jednotlivé **typy** optických struktur. Reálný preparát je jejich směs.



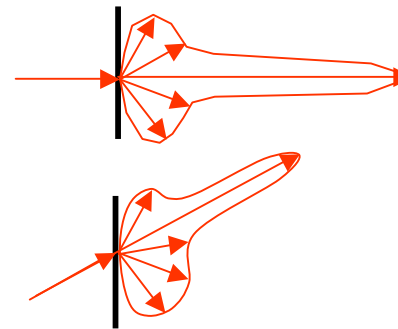
1. Optická struktura mikroskopických preparátů vzniká často **absorpcí** prošlých paprsků (např. diapositivy, tisk na foliích apod.)
2. Preparáty **se barví**, aby se zvýraznila absorpční optická struktura.

Rozptylující preparát



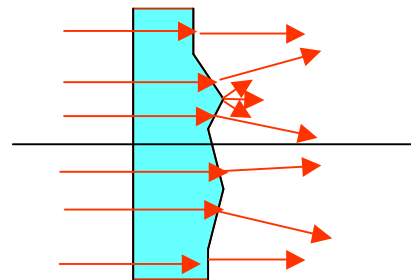
Rozptylové diagramy:

Délka šipek zde znázorňuje intenzitu paprsků v daném směru po průchodu preparátem.



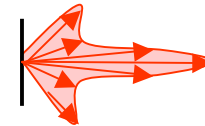
1. Dopadající paprsky se **rozptylují** na nehomogenitách indexu lomu rozměrově menších než vlnová délka světla.
2. Takovou nehomogenitou je i každé reálné **rozhraní** dvou indexů lomu (např. bublinka) nebo **drsnot** povrchů.

Nerovný povrch preparátu



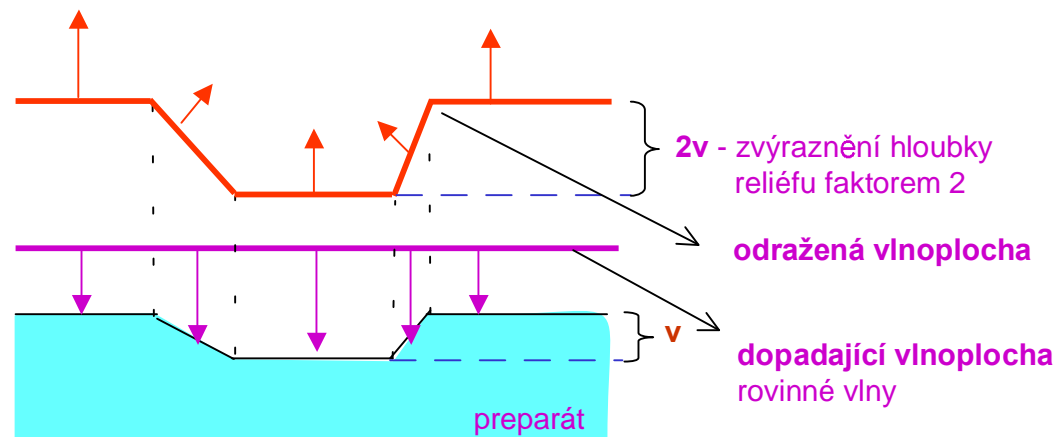
Rozptylový diagram:

silně závisí na **povrchovém reliéfu**,
např.



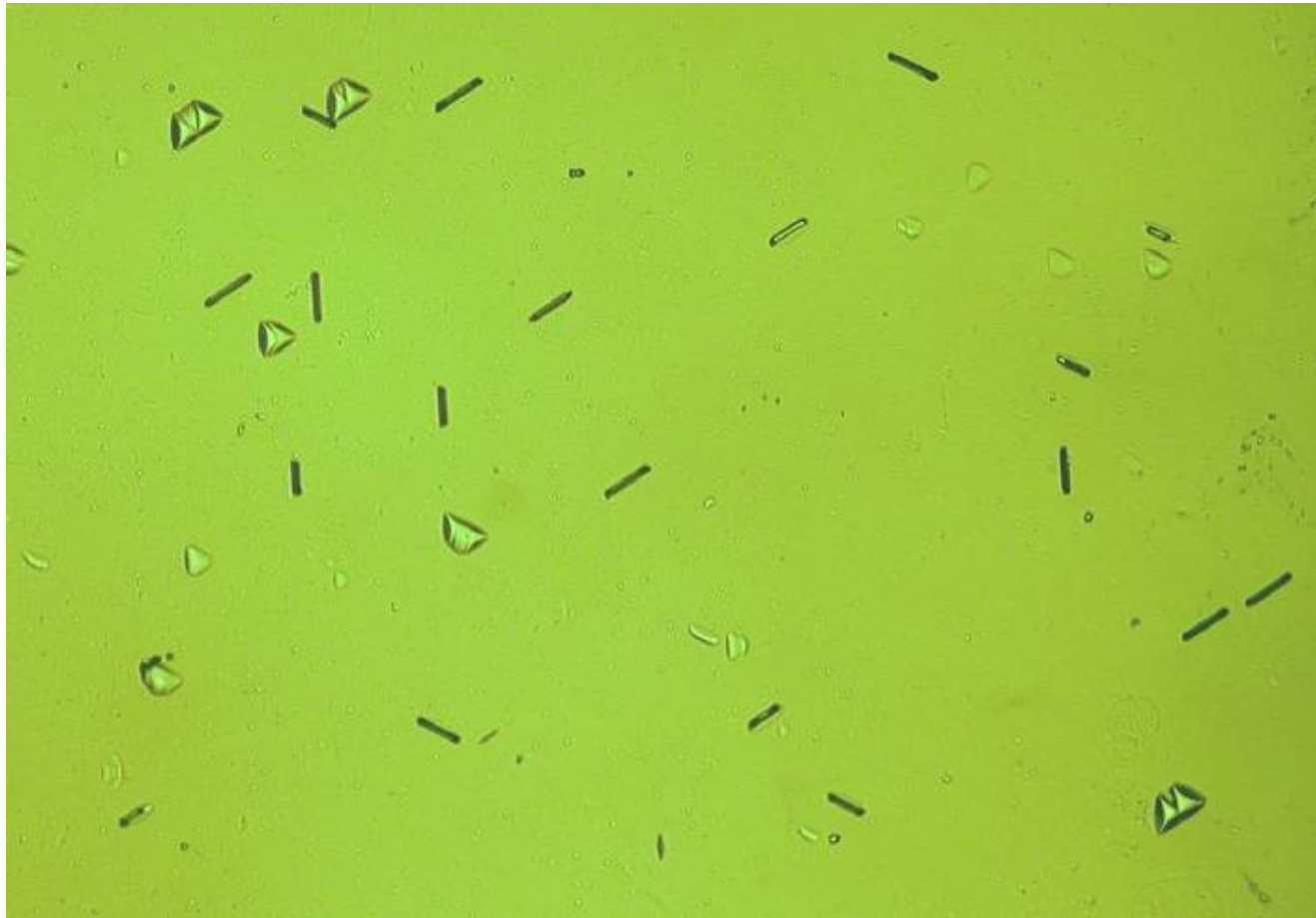
- 1) Optická struktura vzniká též **lomem** prošlých paprsků na nerovném povrchu a rozptylem na hranách nerovností.
- 2) Nerovné bývají často oba **dva povrchy** preparátu.

Odraz na nerovném povrchu



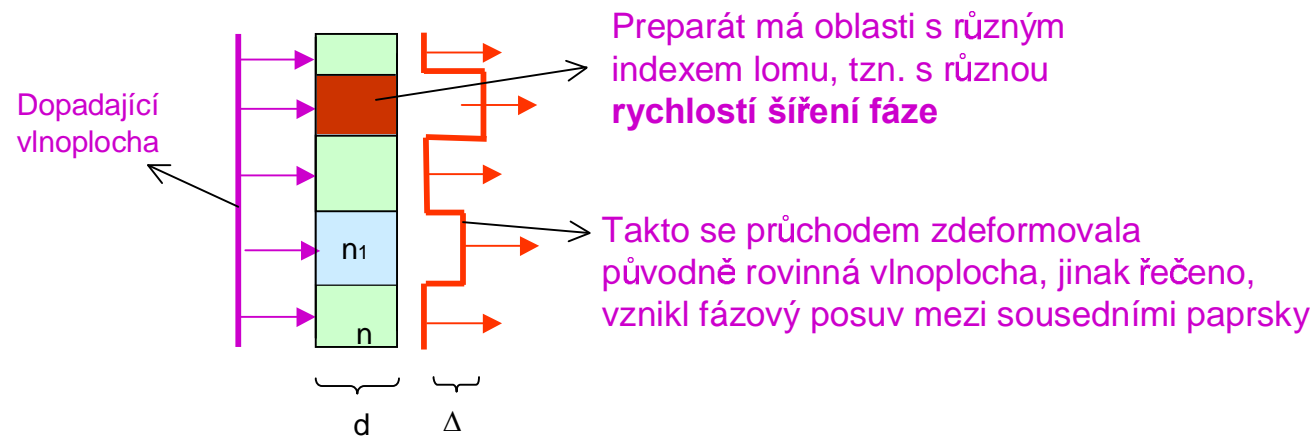
- 1) Optická struktura se v **mikroskopech na odraz** vytváří **odrazem na nerovném povrchu preparátu (reliéfu)**. Metalografické preparáty.
- 2) Jsou znázorněny vlnoplochy a jim odpovídající paprsky **bezprostředně** před dopadem a **bezprostředně** po odrazu. Pro zviditelnění reliéfu je nutné využít metody **temného pole** nebo **interferenční kontrast**.

Zobrazení reliéfu povrchu Si



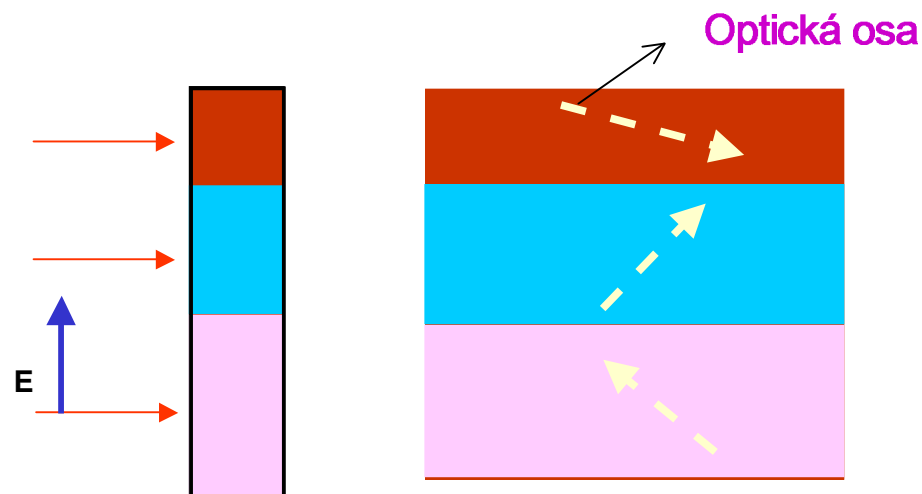
50 μm

Fázový preparát



- 1) **Fázový preparát bez absorpce** (v různých místech preparátu je různý index lomu). Biologické preparáty.
- 2) Rozdíl optických drah je $\Delta = d(n - n_1)$. Tuto strukturu lze zviditelnit různými modifikacemi **interferenčního kontrastu**.

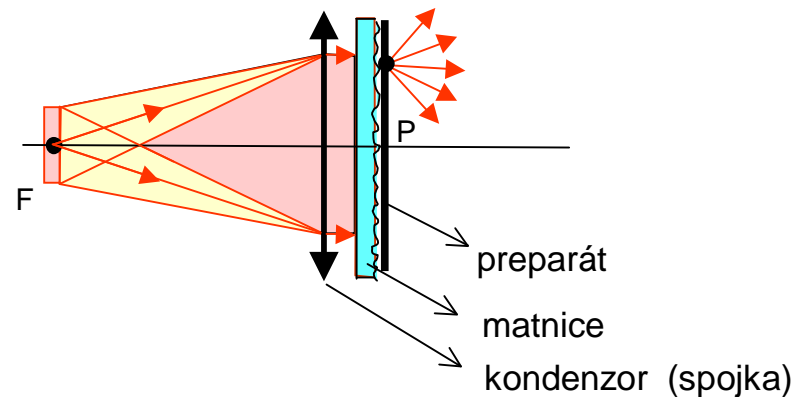
Dvojlomný preparát



- 1) Optická struktura je tvořena neabsorbujícím **dvojlomným krystalem** s různě orientovanou optickou osou v jednotlivých částech výbrusu. **Mineralogické** preparáty. Dvojlom vykazují rovněž biologické preparáty, jako např. **nervová vlákna**.
- 2) Lineárně polarizované dopadající světlo průchodem přes preparát obecně **změní směr** kmitů vektoru elektrické intenzity **E** prošlého světla. Vznikne světlo **elipticky polarizované**.
- 3) Optická struktura (**kontrast**) se vyjeví v **polarizačním mikroskopu** (projektoru).

Nekoherentní osvětlení

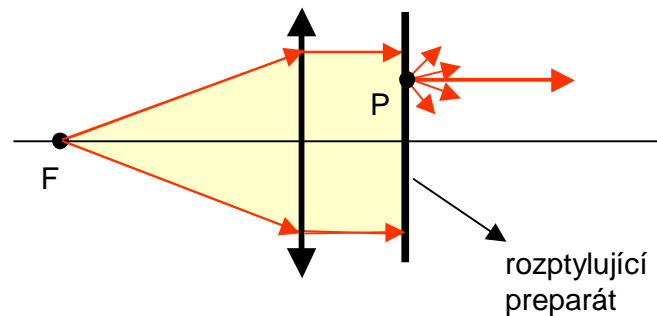
1) Nekoherentní osvětlení



- 1) Ideální **nekoherentní osvětlení** vyžaduje, aby každý bod preparátu byl osvětlen silně divergentním svazkem. Teprve matnice zajistí, že z každého bodu P předmětu se pak šíří paprsky všemi směry.
- 2) Používá se u **absorbujících preparátů** (projektory diapositivů, zvětšovací přístroje filmových negativů, apod.)
- 3) Vignetace obrazu je slabá, **jas obrazu** lze ovládat aperturní clonou objektivu.

Koherentní osvětlení

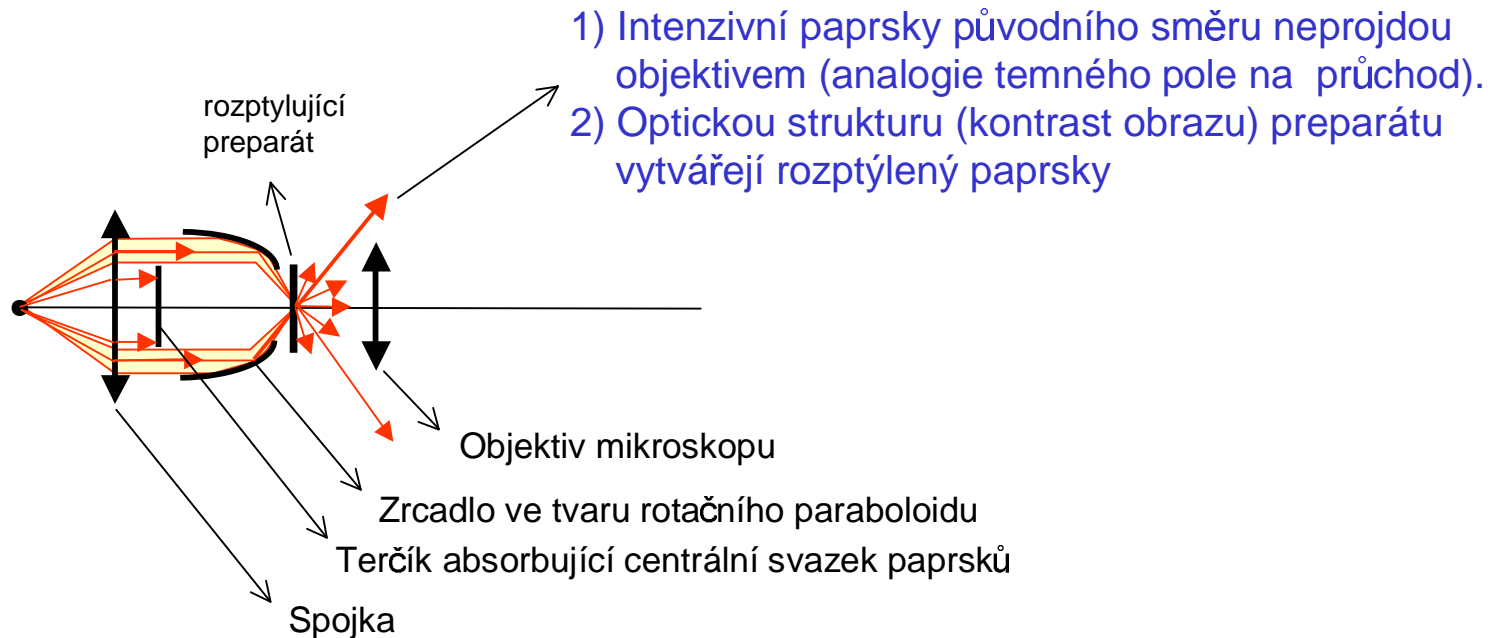
2) Koherentní osvětlení (osvětlení rovnoběžným svazkem)



- 1) Z každého bodu preparátu se šíří intenzivní paprsky v původním směru a slabé rozptýlené záření do ostatních směrů. (Preparáty typu 2 až 5.)
- 2) Pro vyvolání kontrastu je vhodná metoda **temného pole** na průchod a různé modifikace **interferenčního kontrastu**.
- 3) Jako zdroj světla slouží často **štěrbina**, kterou lze ovládat **prostorovou koherenci** pro interferenční kontrast, ale jen ve směru kolmém na štěrbinu.

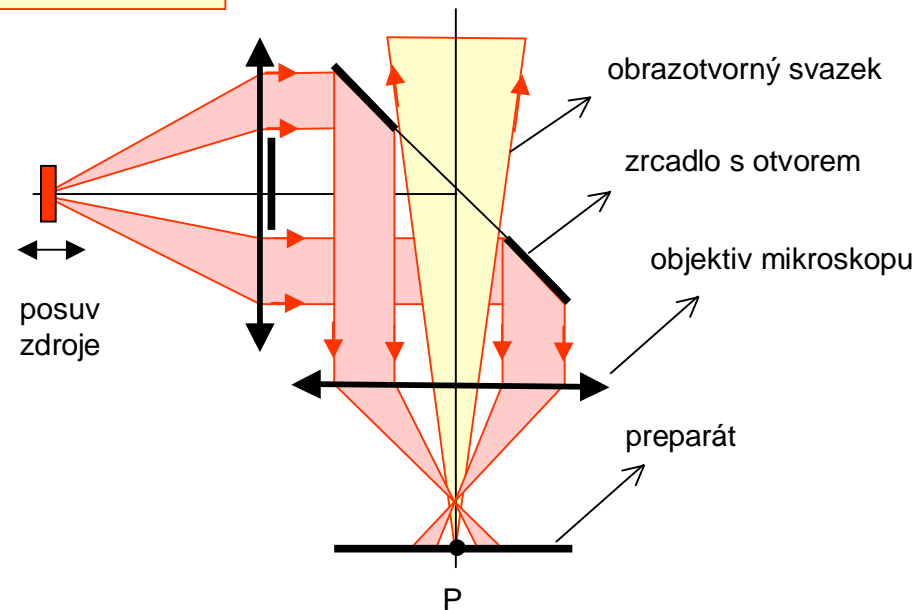
Rozbíhavé svazky

Osvětlení silně rozbíhavým svazkem na průchod



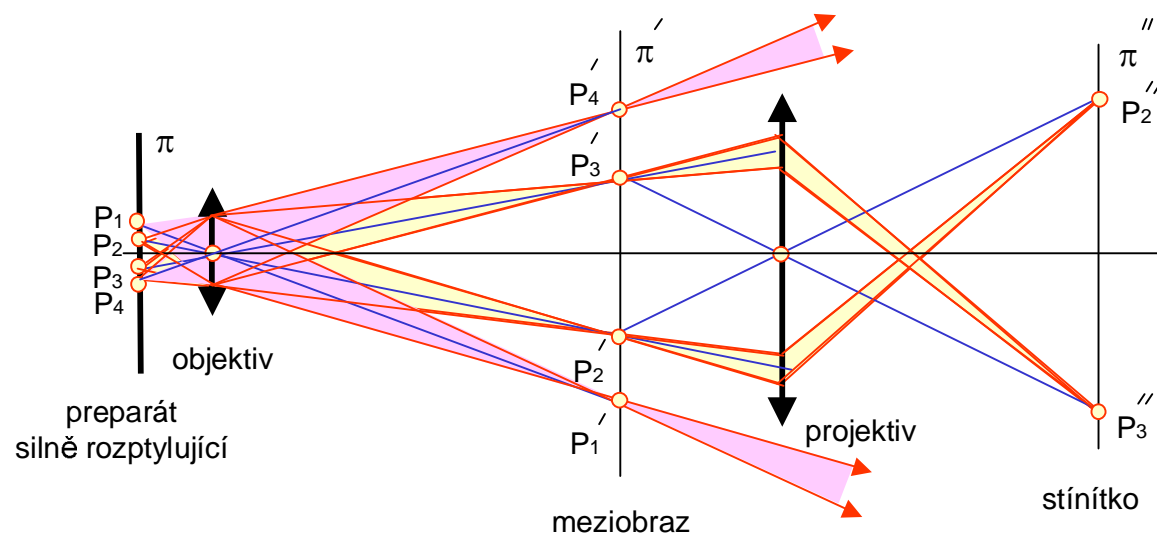
Duté osvětlovací svazky

Horní osvětlení preparátu



- 1) Tato modifikace horního světlení využívá k osvětlení okrajových svazků a zrcadla s otvorem (**duté osvětlovací svazky**).
- 2) Jiné soustavy používají pro horní osvětlení **polopropustná zrcadla**.
- 3) Osvětlení preparátu bývá **částečně koherentní** (závisí na velikosti plošného zdroje a jeho poloze vzhledem k ohnisku kondenzoru).

Dvoustupňový projektor



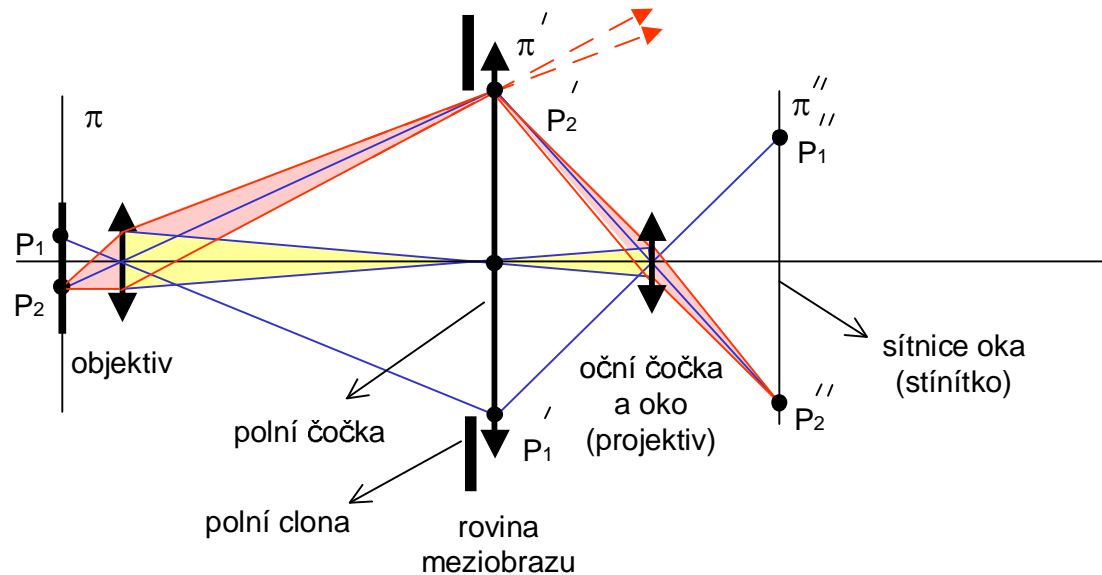
- 1) **Objektiv** vytvoří **meziobraz** preparátu. Na obrázku jsou vyznačeny svazky paprsků zobrazující jednotlivé body P_1 , P_2 , P_3 a P_4 .
- 2) **Projektiv** zobrazí jen část meziobrazu na stínítka, protože některé paprsky projektivem vůbec neprojdou.
- 3) **Do roviny meziobrazu** se vkládá tzv. polní clona, (omezuje zorné pole obrazu), případně nitkový kříž nebo měřítko (projektiv je zobrazí na stínítka současně s meziobrazem)

Mikroskop jako projektor

Mikroskop se podobá dvoustupňovému projektoru

- 1) Mikroskop má okulár a při pozorování obrazu přikládáme oko těsně k okuláru. **Okulár a oko pak představují projekтив**, který promítá meziobraz na sítnici.
- 2) Při **ostření mikroskopu** měníme vzdálenost mezi preparátem a objektivem tak, abychom viděli ostrý obraz, bez ohledu na to, zda nosíme brýle nebo ne.
- 3) Při **fotografování** obrázků z mikroskopu se meziobraz zaostří přímo na film fotoaparátu (fotoaparát bez objektivu!). Podobně se umísťuje i televizní kamera.
- 4) **Objektivy mikroskopů** jsou tvořeny složitou soustavou čoček, aby bylo dosaženo perfektní korekce optických vad meziobrazu.
- 4) Mikroskopy mají **složitější okuláry**. Jednoduchou čočkou okuláru nemusí projít všechny paprsky, které projdou objektivem (viz uvedené schéma projektoru). Tento problém odstraní tzv. **polní čočka**, která bývá součástí okulárů.

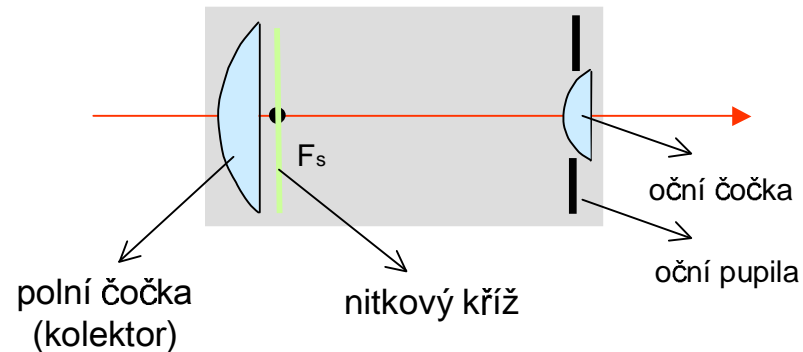
Mikroskop s polní čočkou



- 1) Ohnisková vzdálenost **polní čočky** se volí tak, aby pupilu objektivu zobrazila do pupily oční čočky okuláru.
- 2) **Okulár** mikroskopu tvoří **polní čočka** (někdy nazývaná **kolektor**) a **oční čočka**.
- 3) Do hlavní roviny polní čočky se umísťuje též:
 - a) **polní clona** (tvoří pupilu polní čočky) a tak omezuje velikost zorného pole
 - b) **nitkový kříž** nebo okulárové měřítko
- 4) **Oční čočkou** nejdříve zaostříme nitkový kříž a pak posuvem preparátu jeho mikroskopický obraz. Velikost pupily oční čočky bývá téměř stejná, jako pupila oka.

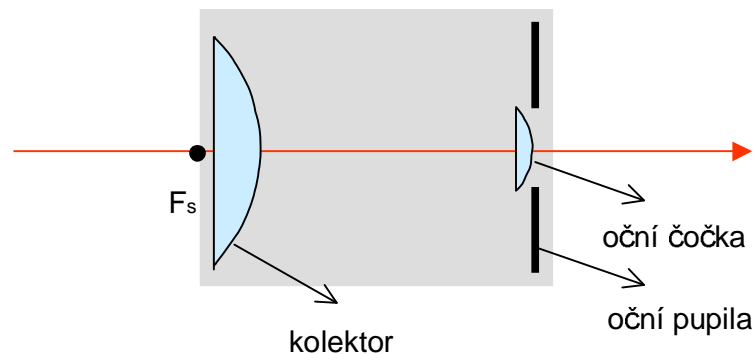
81

Huygensův okulár



- 1) Předmětové ohnisko této soustavy F_s leží **uvnitř okuláru** v těsné blízkosti kolektoru. Tímto bodem prochází tedy rovina meziobrazu.
- 2) **Nitkový kříž** je chráněn před poškozením, protože leží uvnitř okuláru.
- 3) Tento okulár **nelze použít jako lupu**.
- 4) Vzdálenost mezi kolektorem a oční čočkou je polovina součtu jejich ohniskových vzdáleností.

Ramsdenův okulár



- 1) Poloha předmětového ohniska této soustavy F_s je před kolektorem. Tímto bodem prochází rovina meziobrazu (**nevhodné pro nitkový kříž**).
- 2) Ohnisková vzdálenost **kolektoru** je rovna $3/4$ ohniskové vzdálenosti oční čočky. **Oční čočka** leží přibližně v obrazovém ohnisku kolektoru.
- 3) Tento okulár poznáme podle toho, že jej lze použít **jako lupu**.
- 4) Velikost pupily oční čočky bývá přibližně stejná, jako má oko.

Zvětšení mikroskopu Γ

- a) Při subjektivním pozorování: $\Gamma = \text{zvětšení objektivu} \times \text{zvětšení okuláru}$
- b) Při fotografování - $\Gamma_f =$ podle fotografie známého objektivového měřítka

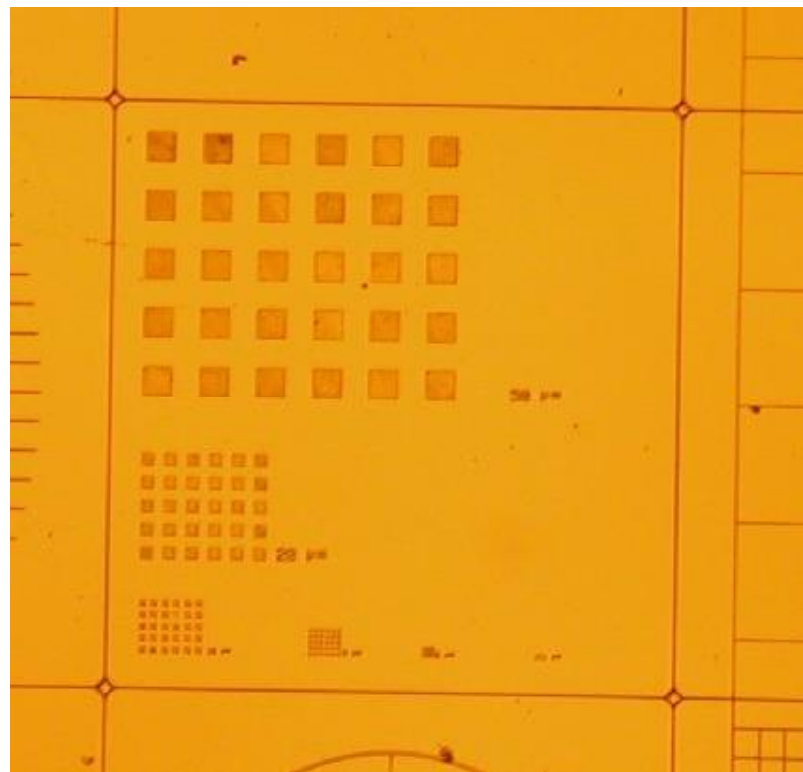
Užitečné zvětšení

- 1) Lidské oko **rozliší dva body**, když je vidí pod úhlem $\varphi_m > 1'$, (tj. $3 \cdot 10^{-4}$ rad.).
Při vzdálenosti oka 25 cm tomu odpovídá vzdálenost 0,1 mm (300 čar na palec)
- 2) Při pozorování okem nemá smysl větší zvětšení Γ , než je mezní zvětšení Γ_m .
Platí $\Gamma_m = A / \varphi_m$, kde A je numerická apertura objektivu.
- 3) Větší zvětšení než Γ_m je neúčinné (**prázdné**).
- 4) Na preparátu je minimální vzdálenost bodů x_{\min} , které ještě rozlišíme, dána vztahem $x_{\min} = \lambda / A$. (Na fotografii je tato vzdálenost $x'_{\min} = x_{\min} \Gamma_f$).
- 5) Film (nebo CCD kamera) by měl mít lepší rozlišovací schopnost, to je menší velikost pixelů než x'_{\min} .

Objektivová měřítká (1)

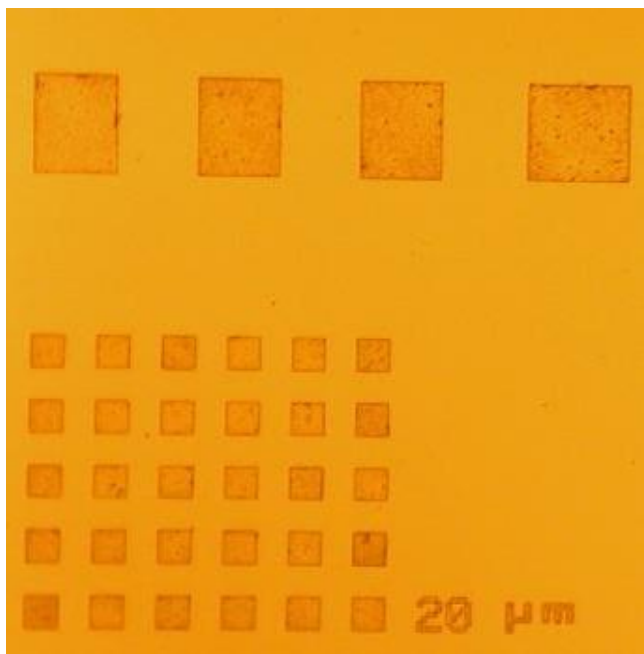


1 mm

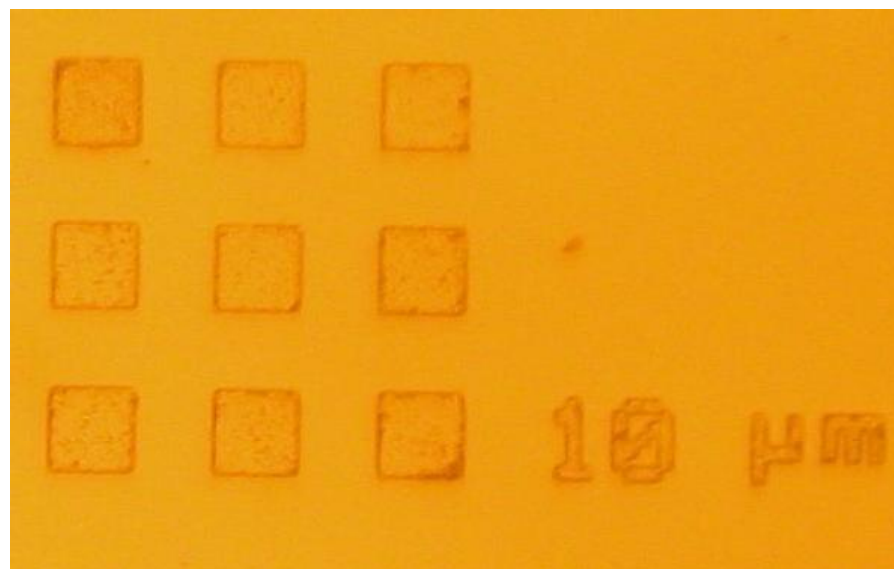


1 mm

Objektivová měřítká (2)

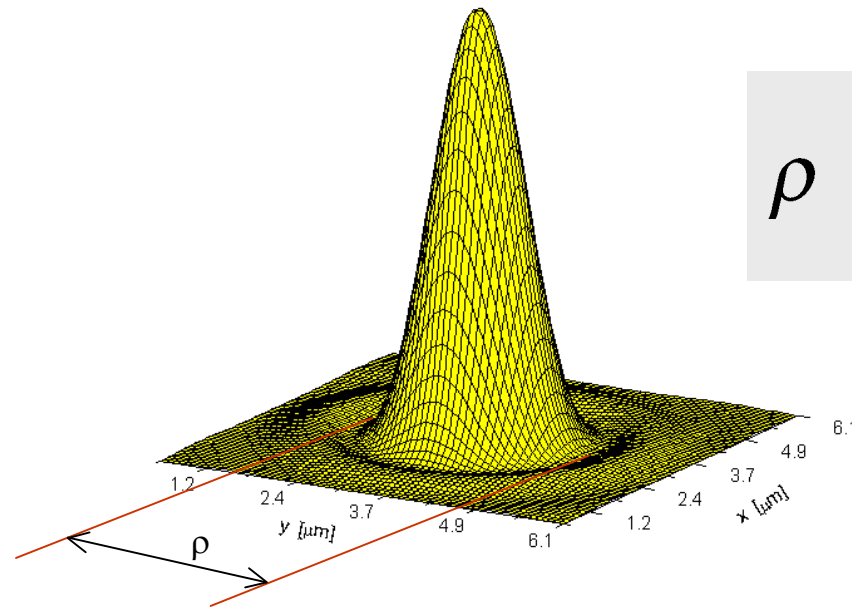


100 μm



20 μm

Difrakce na pupile

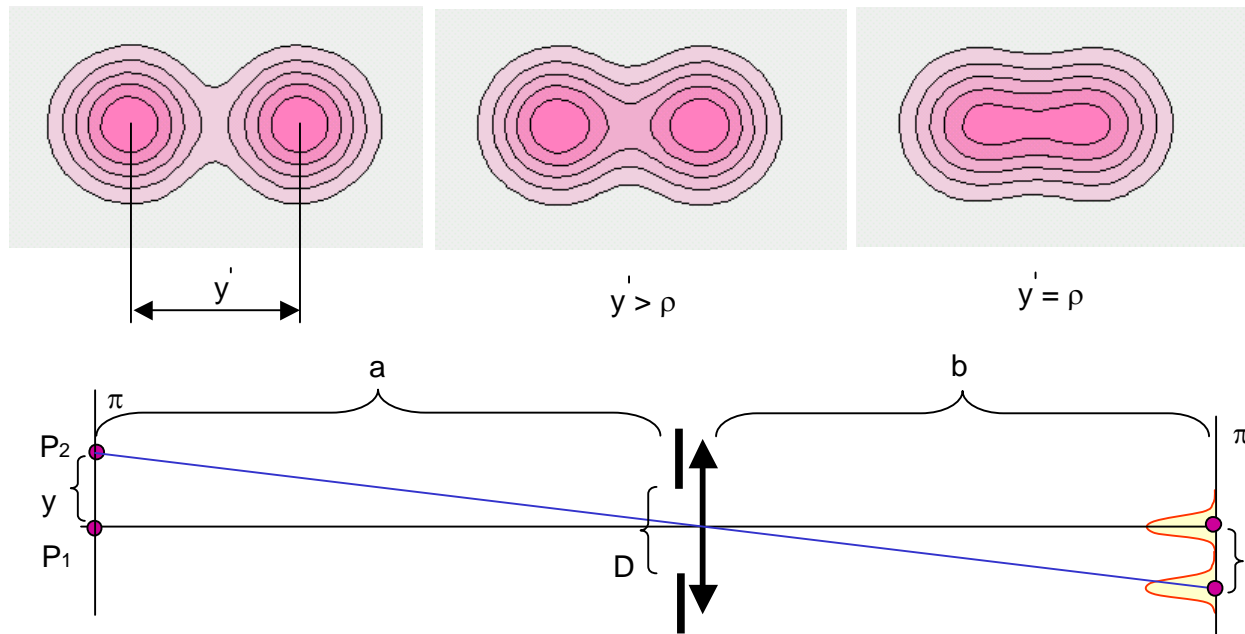


$$\rho = \lambda \frac{f}{D}$$

- 1) **Rozlišovací schopnost čoček** je principiálně omezena **difrakčním jevem** na vstupní pupile.
- 2) Rozložení intenzity v ohniskové rovině při **Fraunhoferově difrakce** na kruhové pupile (výpočet pro: $\lambda=0,0005$ mm, průměr pupily $D=20$ mm, $f= 50$ mm).
- 3) Při zobrazování čočkou se podobně zobrazí každý bod předmětu v obrazové rovině (při výpočtu ρ dosadíme pak za f **obrazovou vzdálenost**) .

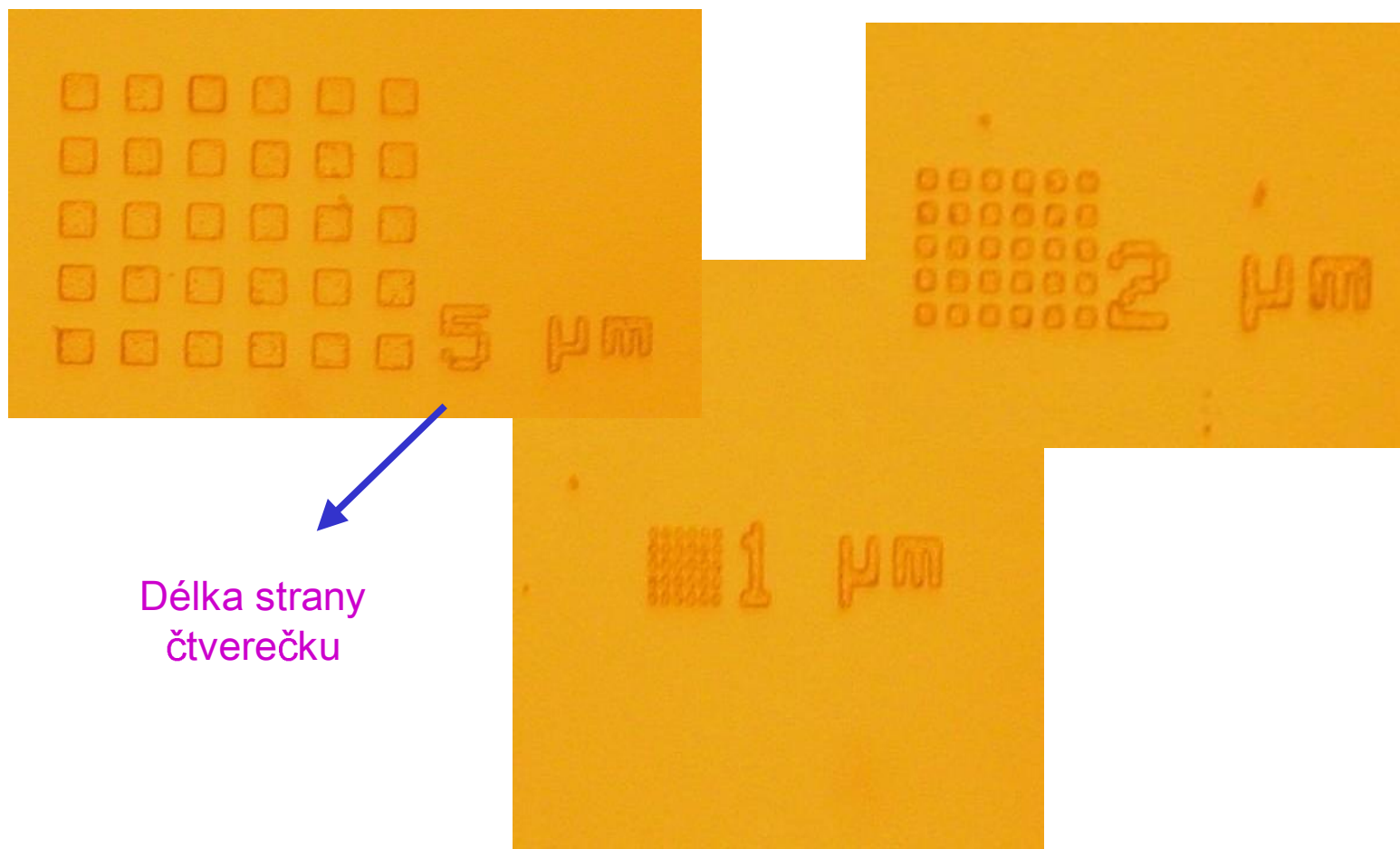
87

Mezní rozlišovací schopnost

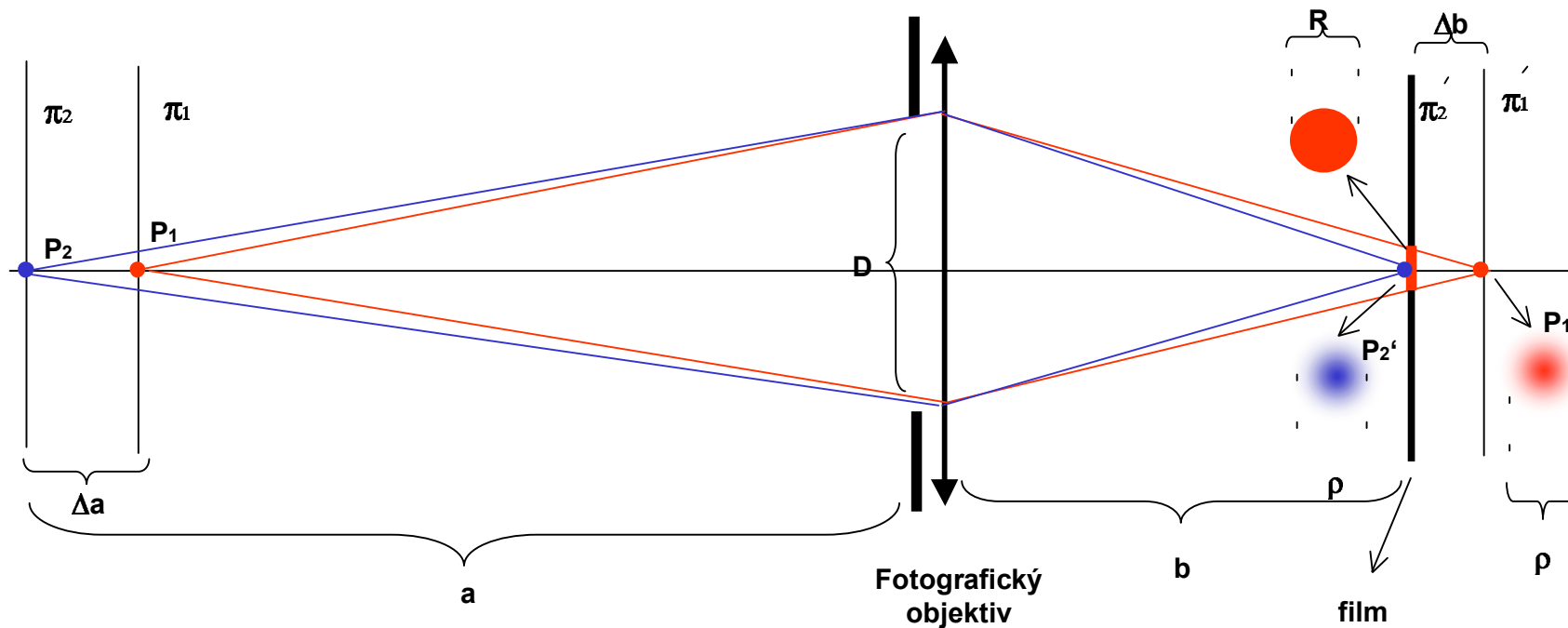


1. Každý bod předmětu se zobrazí v nejlepším případě jako **ploška o průměru $\rho = \lambda b / D$** .
2. Velikost obrazu $y' = \Gamma y$, kde $\Gamma = b/a$ je příčné **zvětšení obrazu**.
3. V obraze budou body P_1 a P_2 rozlišeny, když $y' > \rho$.

Mez rozlišení mikroskopu

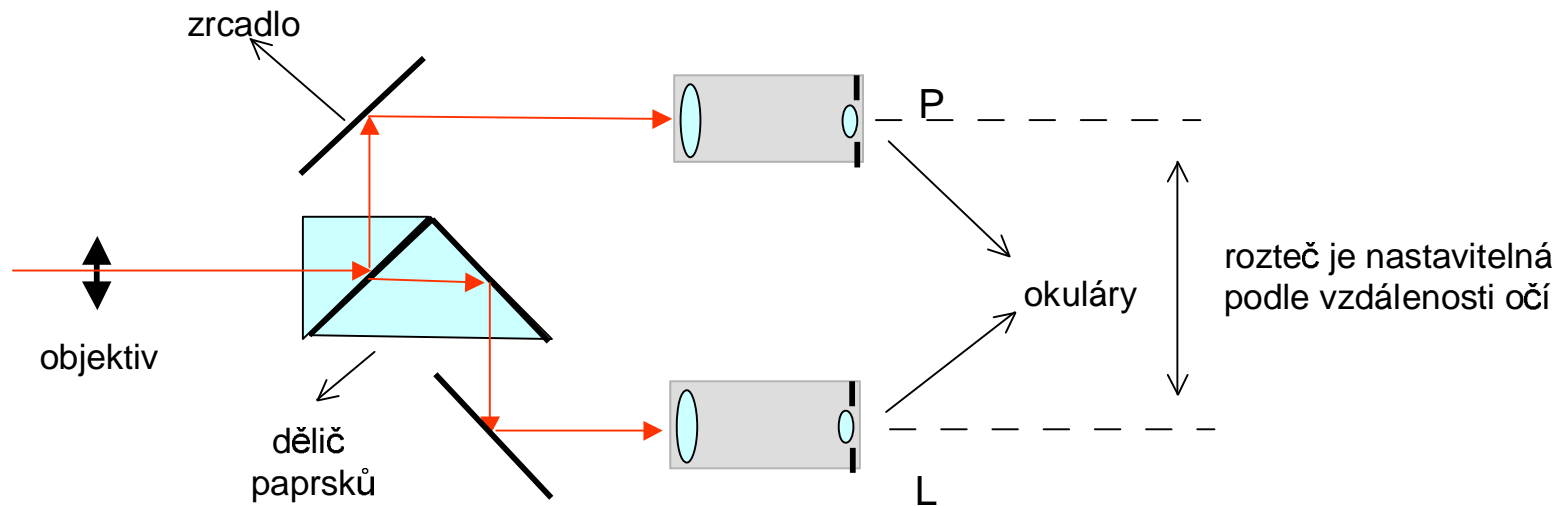


Hloubka ostrosti obrazu



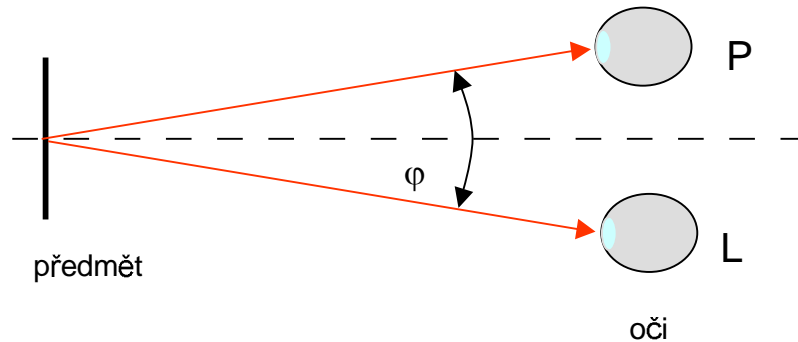
- 1) Mezní rozlišení čočky zobrazí bod předmětu na film jako kroužek o průměru ρ .
Rozlišení v rovině filmu je dáno jeho rozlišovací schopností (udává se v počtu N rozlišených čar na 1 mm).
- 2) Pokud bude obraz bodu P_2 daný kroužkem o průměru R menší než rozlišovací schopnost filmu, nepoznáme, že tento bod je rozostřený. Této situaci odpovídá hloubka ostrosti v předmětovém prostoru označená zde jako Δa .
- 3) Pro fotoaparáty je vzdálenost b přibližně rovna f . Pro hloubku ostrosti pak platí $\Delta a = (CaR)/f$, kde $C = f/D$ je **clonové číslo** objektivu.
- 4) V mikroskopu je hloubka ostrosti nepřímo úměrná **numerické apertuře** objektivu.

Binokulární mikroskop

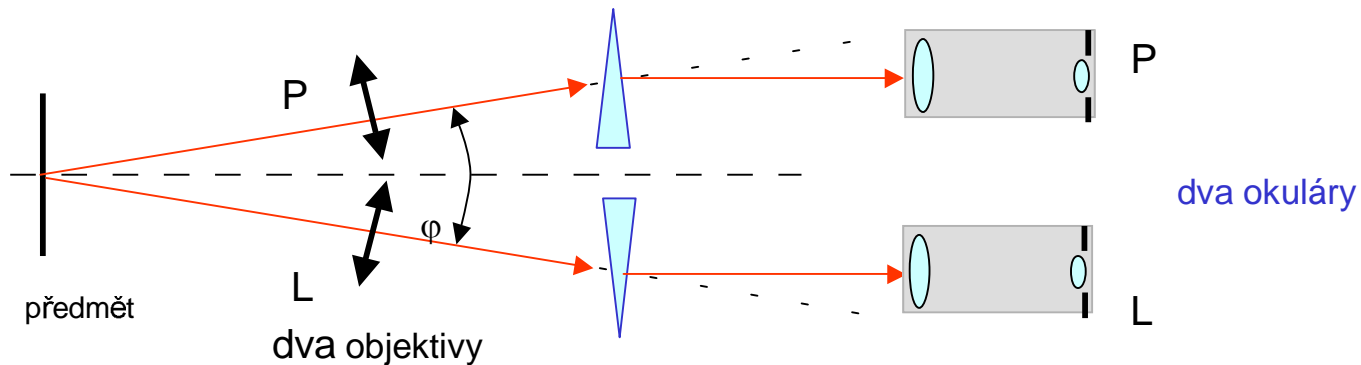


- 1) Binokulární mikroskop **není** stereo mikroskop.
- 2) Každé oko pozoruje svým okulárem meziobraz preparátu. Pozorování oběma očima je méně únavné než jedním okem.
- 3) Současnou **ostrost obou** obrazů je třeba postupně doladit jednotlivými okuláry.

Stereomikroskop



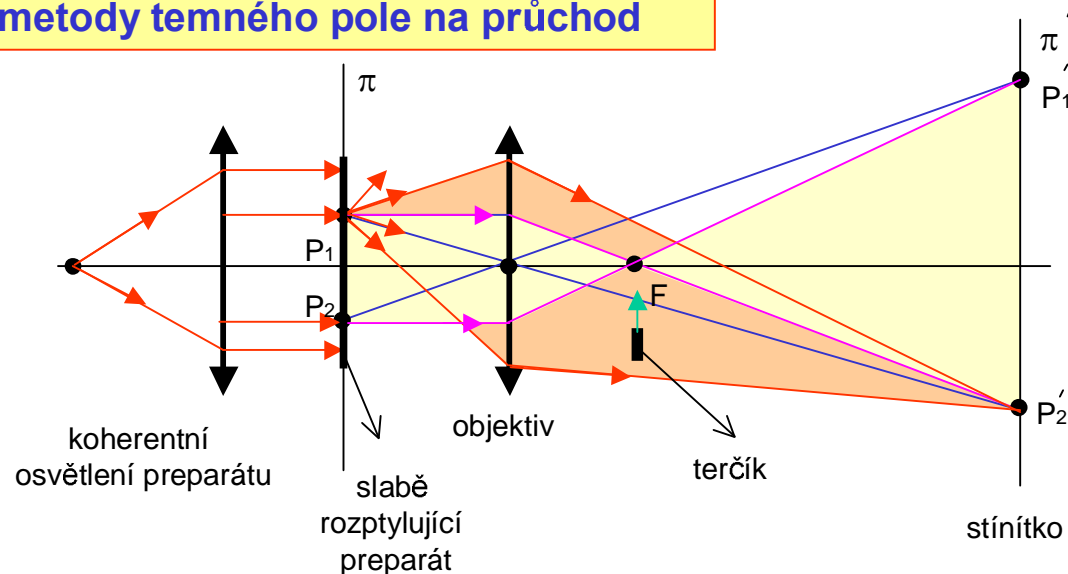
- 1) Každé oko vytváří **v mozku** samostatný obraz předmětu. Ty se trochu od sebe liší.
- 2) Na základě zkušenosti chápeme rozdílnost obrazů prostorově.
- 3) **Význam zkušenosti** vynikne, když si uvědomíme, že prostorově vidíme i jen jedním okem (změna zákrytu předmětů v různých hloubkách).



- 1) Stereomikroskop se skládá ze dvou samostatných mikroskopů, jeden pro levé a druhý pro pravé oko.
- 2) Čím větší je úhel φ , tím výraznější je stereovjem.

Zobrazení v temném poli

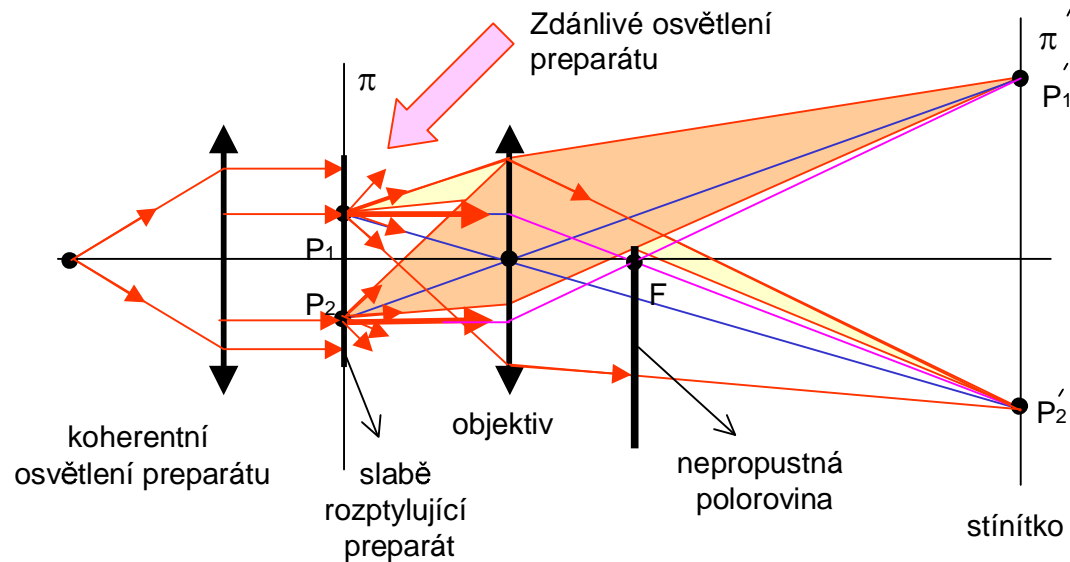
Princip metody temného pole na průchod



- 1) Když vložíme terčik do ohniska bez preparátu, nebude stínítko osvětleno. Vznikne **temné pole**.
- 2) Když vložíme do předmětové roviny preparát (terčik mimo ohnisko), vznikne jeho **obraz ve světlem poli**, ale s malým kontrastem. Kontrast teď pomáhají vytvářet jen rozptýlené paprsky, jdoucí objektivem.
- 3) Vložením **terčíku do ohniska** vznikne kontrastní obraz preparátu v temném poli. Vytváření jej jen rozptýlené paprsky, které prošly čočkou.
- 4) Když terčik neabsorbuje, ale jen posune fázi o 1/4 periody, pak na stínítku vznikne tzv. **fázový kontrast** (interferují rozptýlené paprsky s nerozptýlenými).

Modifikace temného pole

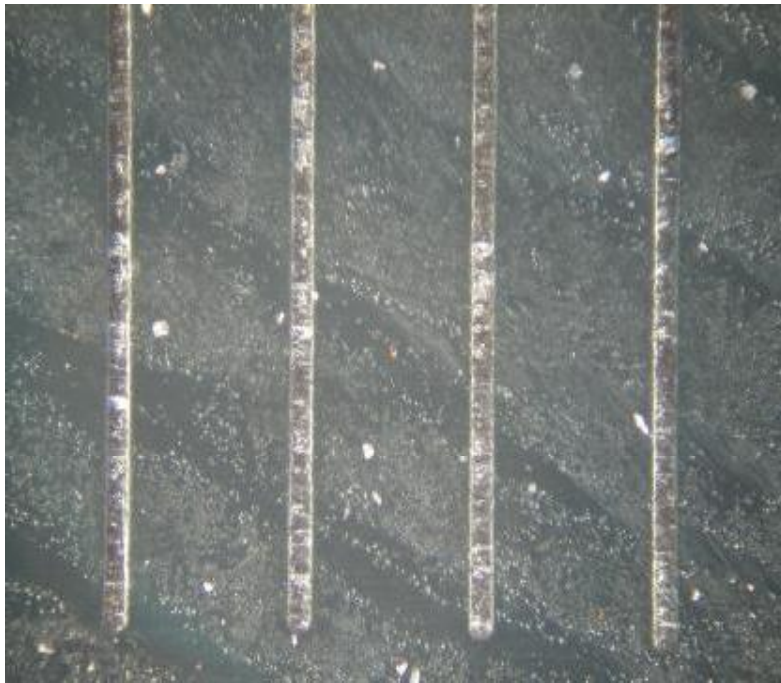
Modifikace metody temného pole



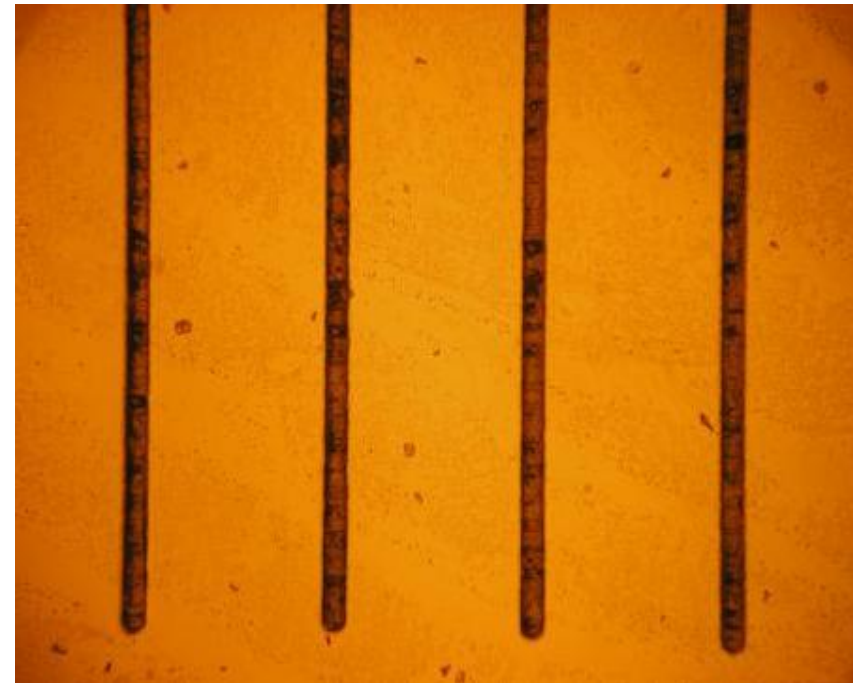
- 1) Nepropustná **polorovina** vložená do ohniska pohlí mimo intenzivní paprsky i polovinu rozptýlených paprsků. Vznikne zvláštní kontrast podobný osvětlení reliéfu předmětu shora.
- 2) Vložením nepropustného **stínítka s otvorem** do ohniskové roviny vyvoláme tzv. **difrakční kontrast** (užívá se i v transmisní elektronové mikroskopii).
- 3) Na podobném principu je založen i tzv. kontaktní epitelový mikroskop při oftalmologickém vyšetření rohovky.

Příklady mikrofotografie

Temné pole

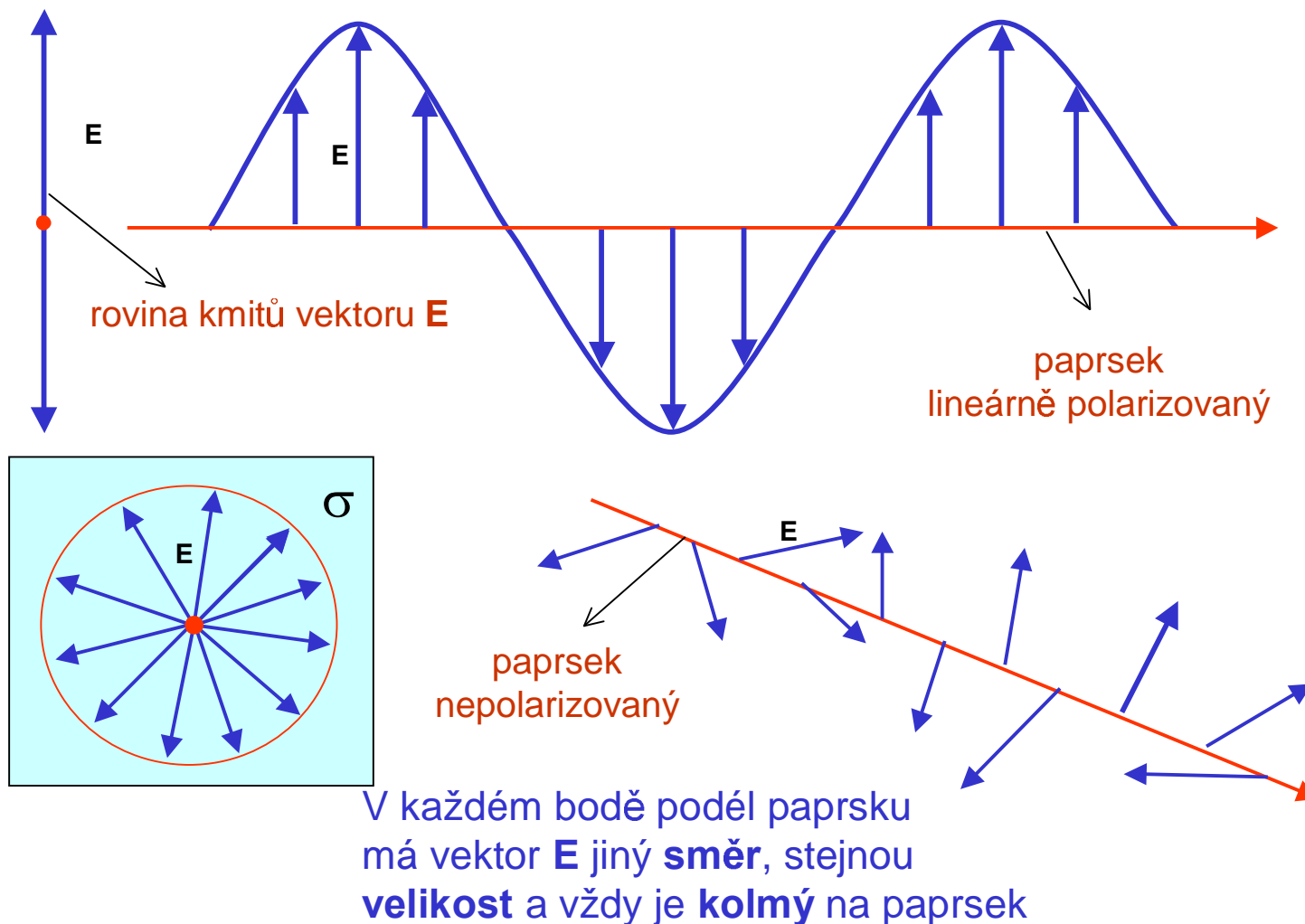


Světlé pole

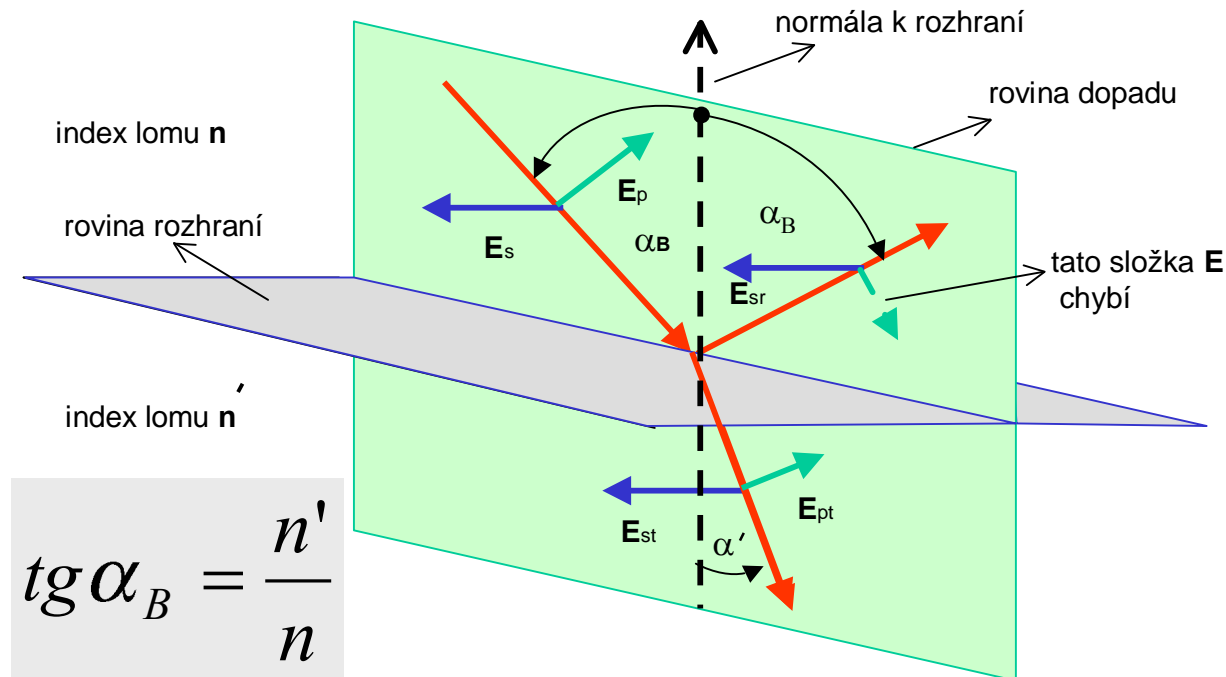


0.5 mm

Lineární polarizace



Polarizace odrazem



Odrazivosti jednotlivých složek pro úhel dopadu α

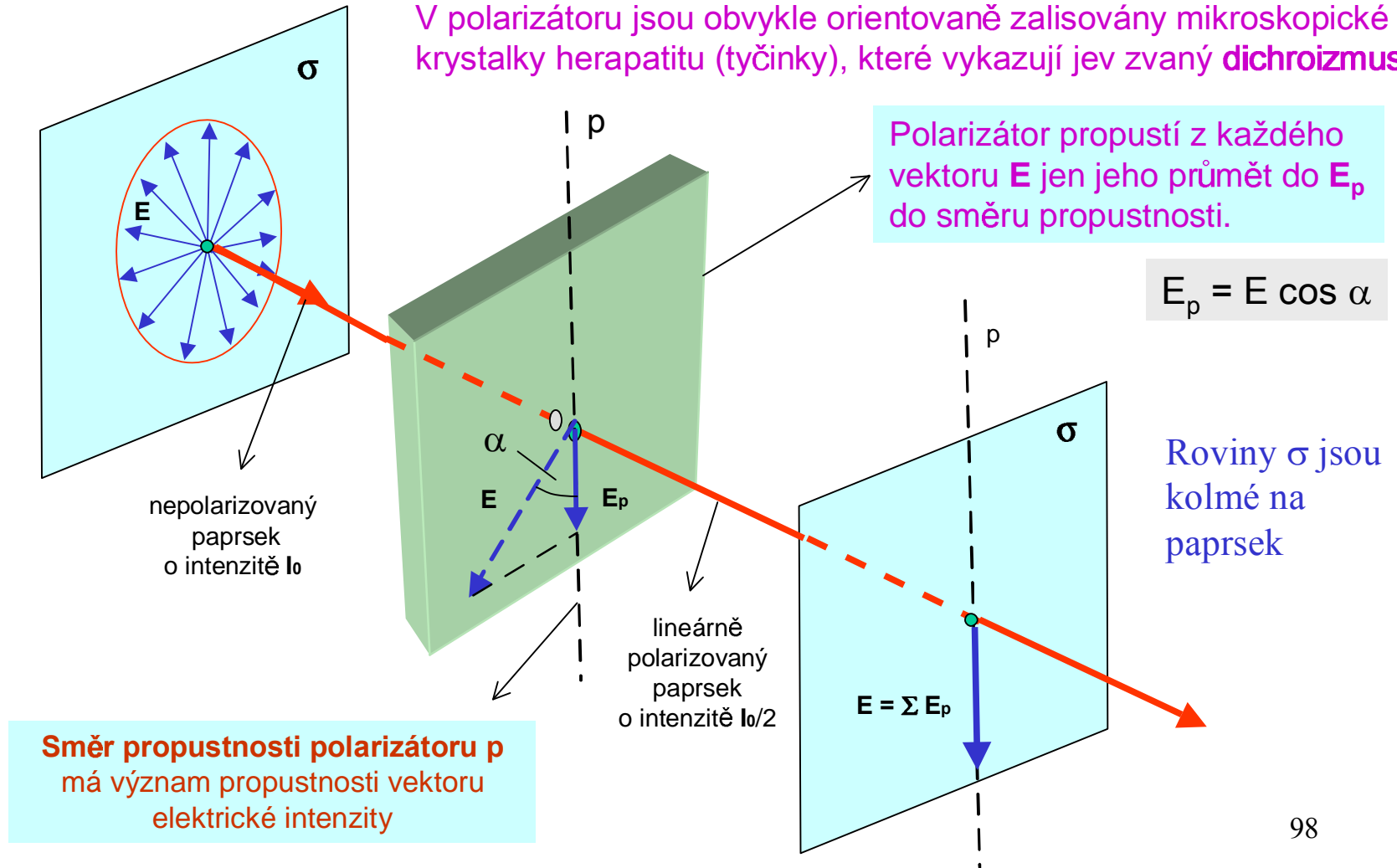
$$R_s = \left(\frac{\sin(\alpha - \alpha')}{\sin(\alpha + \alpha')} \right)^2$$

$$R_p = \left(\frac{\tan(\alpha - \alpha')}{\tan(\alpha + \alpha')} \right)^2$$

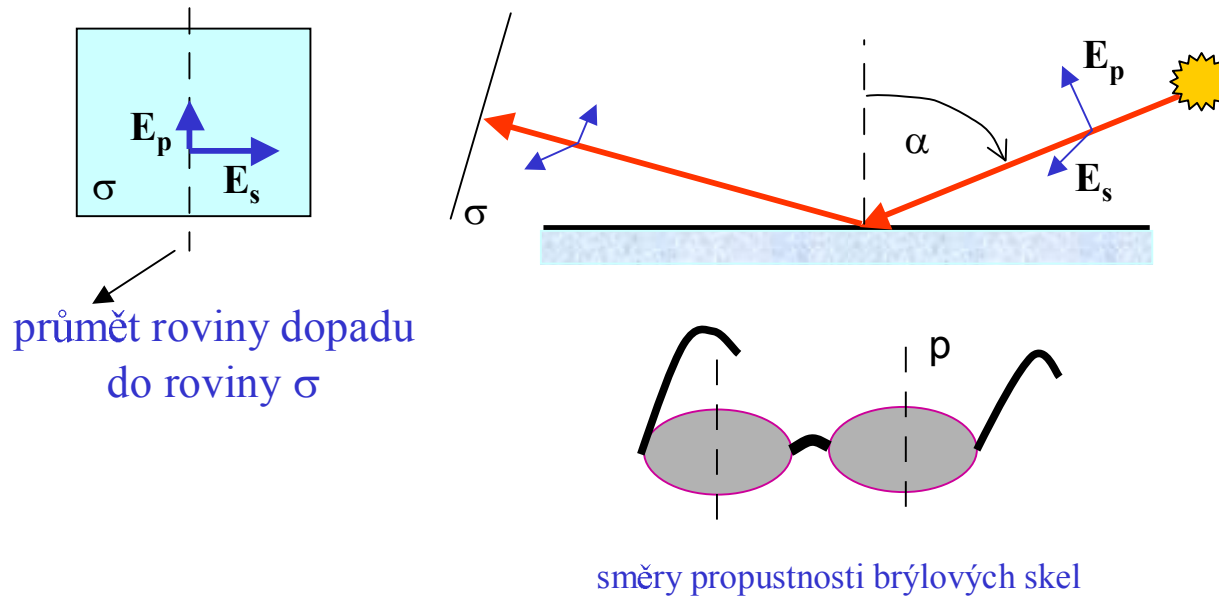
- 1) Při **Brewsterově úhlu** dopadu α_B se odráží jen složka E_{sr} ($E_{pr} = 0$).
- 2) Úhel mezi odraženým a lomeným paprskem je **90 stupňů**.
- 3) **Lineární polarizace** odrazem nastává jen pro rozhraní dvou dielektrik.
- 4) Na rozhraní **vakuum - kov** nebo povrchu s tenkými vrstvami vzniká odrazem **eliptická polarizace** (důsledek komplexního indexu lomu kovů).

Polarizátor

V polarizátoru jsou obvykle orientovaně zalisovány mikroskopické krystalky herapatitu (tyčinky), které vykazují jev zvaný **dichroizmus**.

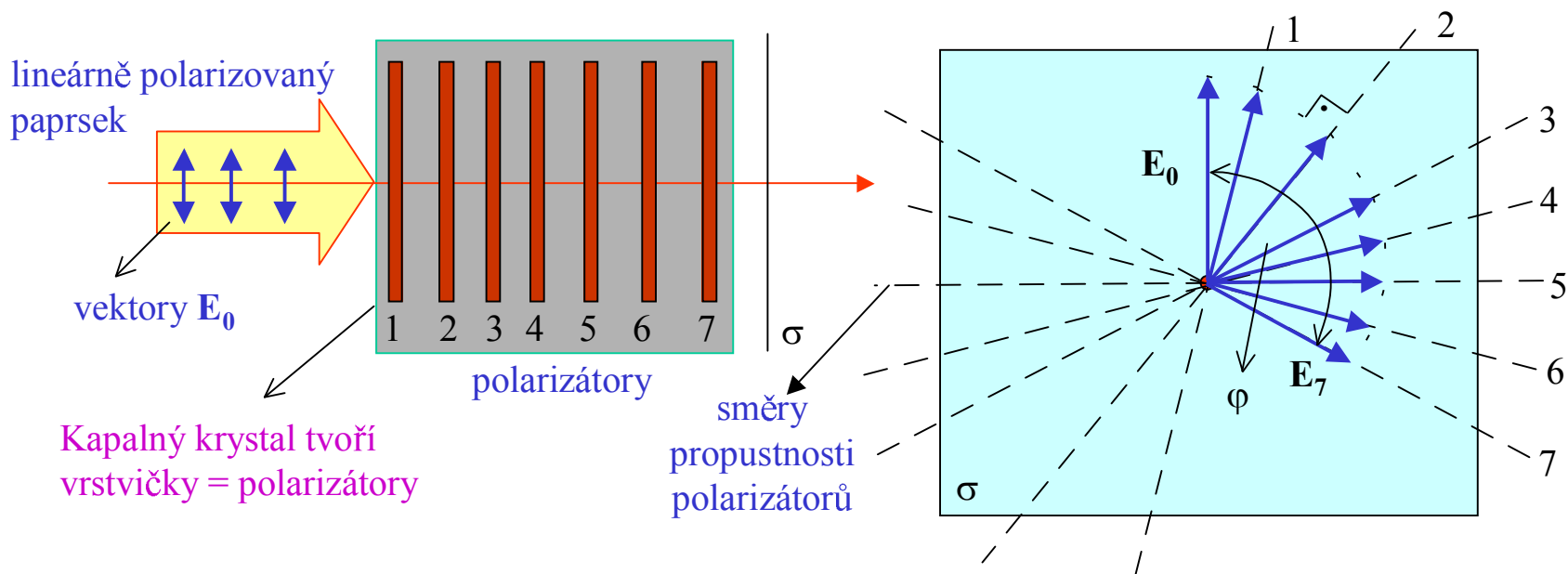


Polarizační brýle



Polarizační brýle by měly snížit intenzitu odražených slunečních paprsků od povrchu vody nebo sněhu nebo jiných přibližně vodorovných povrchů.

Stáčení polarizační roviny



Do série 7 polarizátorů s vyznačenými směry propustnosti vstupuje lineárně polarizované světlo s amplitudou E_0 . Každý polarizátor propustí jen **průmět amplitudy do svého směru**. Polarizační rovina se průchodem světla **stočila o úhel ϕ** a paprsek je neustále lineárně polarizovaný.

$$E_1 = E_0 \cos \alpha_1 \quad E_2 = E_1 \cos \alpha_2 = E_0 \cos \alpha_1 \cos \alpha_2 \quad \phi = \sum \alpha_i$$

Displeje (mobilní telefony) pracují na principu kapalných krystalů.

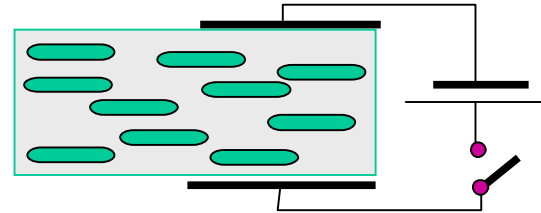
Co **vrstvička kapalného krystalu**, to **polarizátor** s trochu pootočeným směrem. Celkové otočení polarizační roviny závisí na počtu vrstviček, to je na tloušťce kapalného krystalu.

Pasivní displeje mobilů

Existují některé látky, jejichž **molekuly mají tvar tyčinek** a za pokojové teploty jsou už částečně uspořádané do jakýchsi **vrstviček**. V každé vrstvičce jsou ale trochu pootočený.



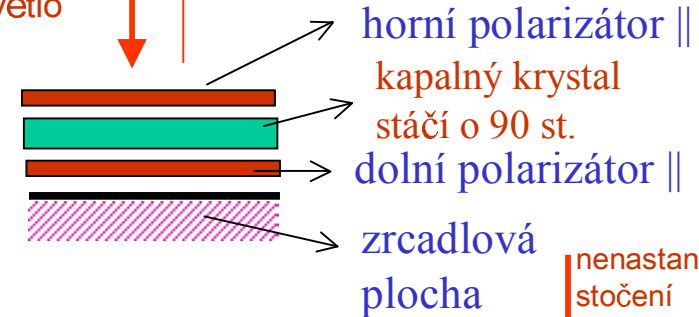
Neuspořádané molekuly obvyčejné kapaliny



Částečné uspořádání molekul kapalného krystalu do vrstev. Elektrody jsou průhledné.

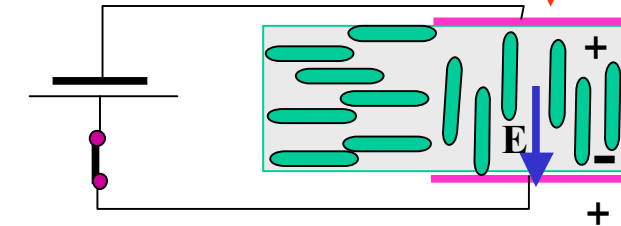
Každá vrstvička funguje jako **velice tenký polarizátor**. Mnoho vrstviček molekul způsobí **stáčení polarizační roviny** procházejícího světla.

nepolarizované světlo $I(R) = 0$



stočení p.r. nastane

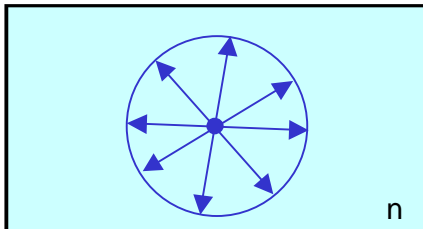
nenastane stočení



Při zapnutí klíče se mezi elektrodami vytvoří **elektrické pole**. Tím se molekuly natočí do jeho směru a vrstevnatá struktura kapalného krystalu zanikne.

Optické prostředí

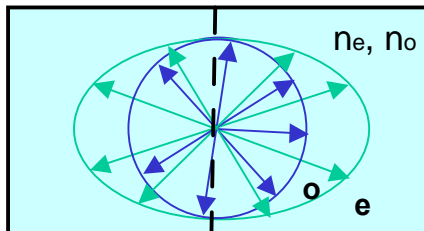
Izotropní látky



Plocha indexů lomu:

Délka šipek je úměrná velikosti indexu lomu v daném směru šíření světla. Koncové body leží na **kouli**.

Anizotropní látky (látky dvojlomné)



Dvojlomná látka je charakterizována dvěma indexy lomu n_o a n_e a dále **optickou osou**

Plocha indexů lomu:

Koncové body n_o leží na kouli, zatím co n_e leží na **rotačním elipsoidu**.

Indexy lomu pro $\lambda 0,63 \mu\text{m}$:

	n_o	n_e	$n_o - n_e$	
TiO ₂	2,583	2,865	-0,282	hexagon.
CaCO ₃	1,656	1,485	+0,171	rhomb.
SiO ₂	1,543	1,552	-0,009	hexagon.

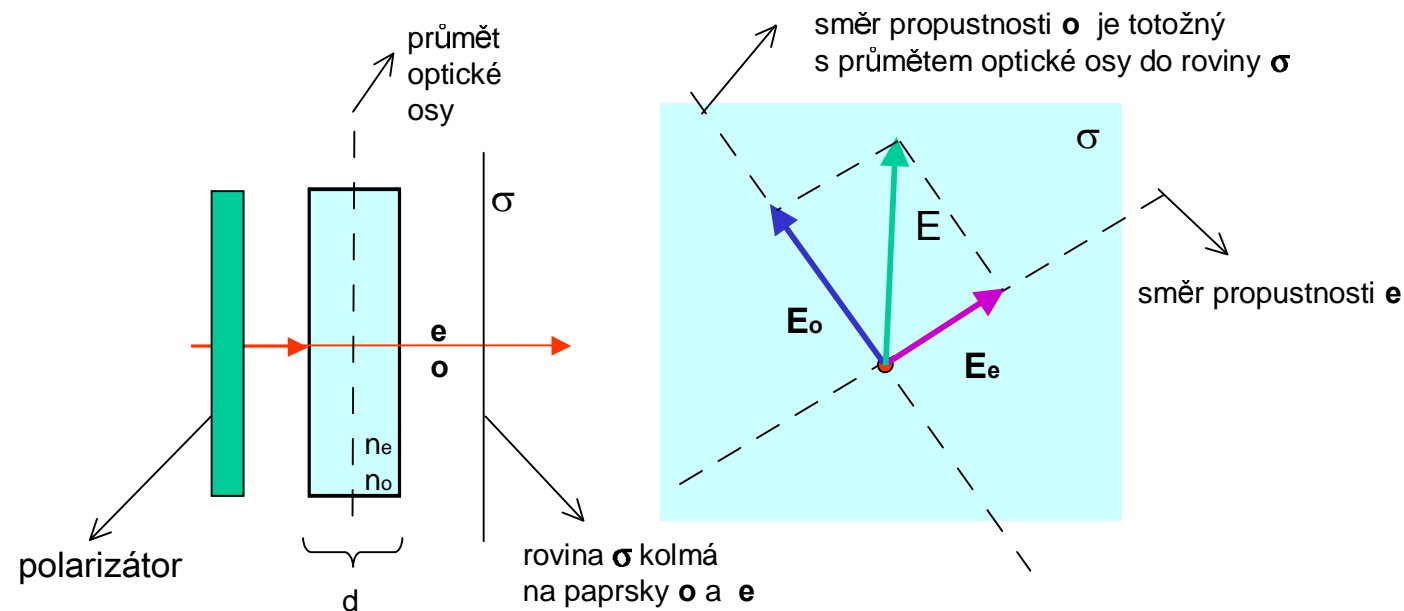
V tabulkách jsou pro danou vlnovou délku uváděny hodnoty n_o a n_e , které odpovídají poloosám rotačního elipsoidu.

Dvojlomné látky

Každému dopadajícímu paprsku odpovídají ve dvojlomné látce **dva paprsky**:
řádný (**ordinarius**) a mimořádný (**extraordinarius**):

- a) látkou šíří různou **fázovou rychlostí**, protože mají různý index lomu
- b) jsou **lineárně polarizované** navzájem kolmo (uvažujeme vektory \mathbf{E}_o a \mathbf{E}_e)

Optická osa rovnoběžná s povrchem preparátu

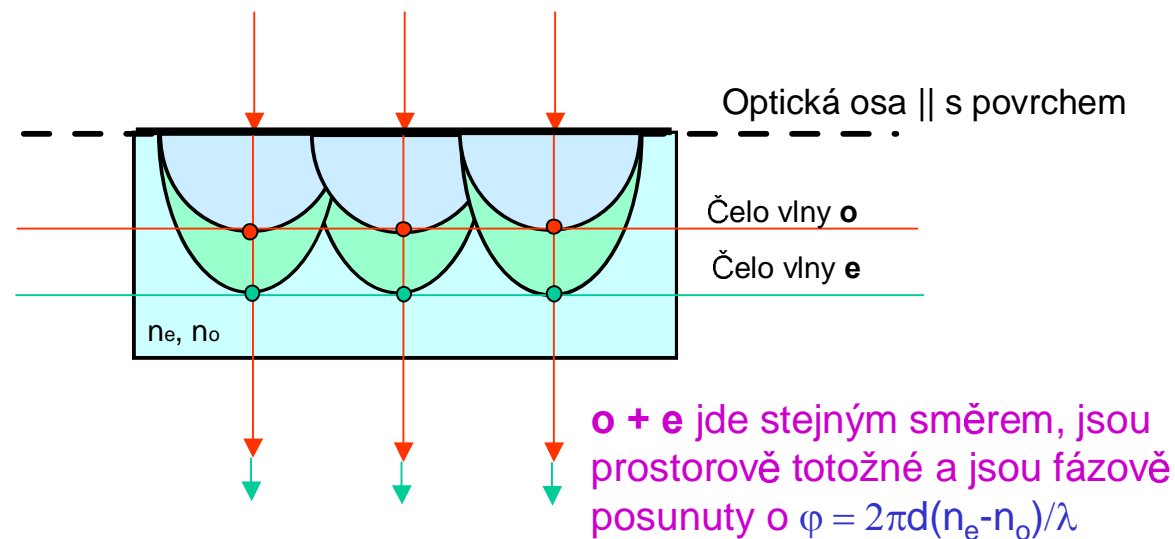


V tomto případě jdou paprsky \mathbf{o} a \mathbf{e} **stejným směrem, ale mají různou polarizaci a fázový posuv** mezi paprsky \mathbf{o} a \mathbf{e} je: $\varphi = 2\pi d(n_e - n_o)/\lambda$

103

Průchod světla dvojlomnou látkou (1)

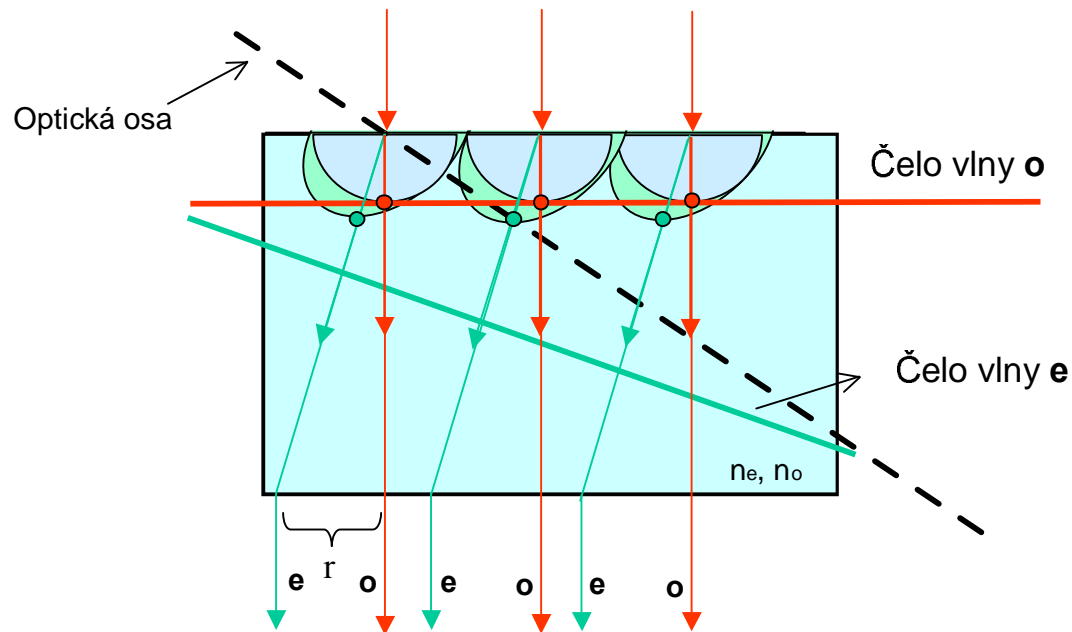
a) Optická osa rovnoběžná s povrchem



Podle Huygensova principu každý dopadající paprsek vybudí v látce sekundární vlnu. Kolmice k čelu těchto vln určuje směr dalšího šíření paprsku v prostředí.

Průchod světla dvojlomnou látkou (2)

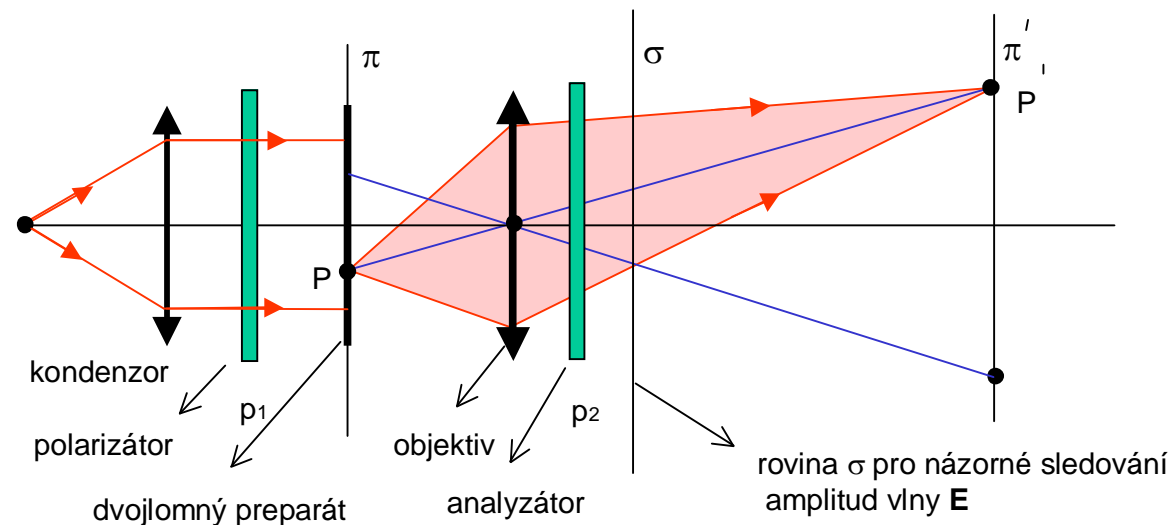
b) Optická osa neleží v rovině povrchu



- 1) Když optická osa **není rovnoběžná s povrchem**, pak se uvnitř planparalelní destičky z dvojlomné látky šíří paprsky **o** a **e** různými směry.
- 2) Mimo tuto látku jdou pak zase rovnoběžně (**fázový posuv** zachován).
- 3) Na výstupu z dvojlomné látky jsou paprsky **o** a **e** **laterálně rozštěpeny** o **r**. Je důležité si uvědomit, že rozštěpení je úměrné tloušťce preparátu **d** a rozdílu $n_o - n_e$,

Polarizační mikroskop

Schéma polarizačního mikroskopu je v podstatě stejné jako projektoru (zřízení pro fotoelasticimetrii). Kontrast obrazu vzniká **interferencí** řádného a mimořádného paprsku.

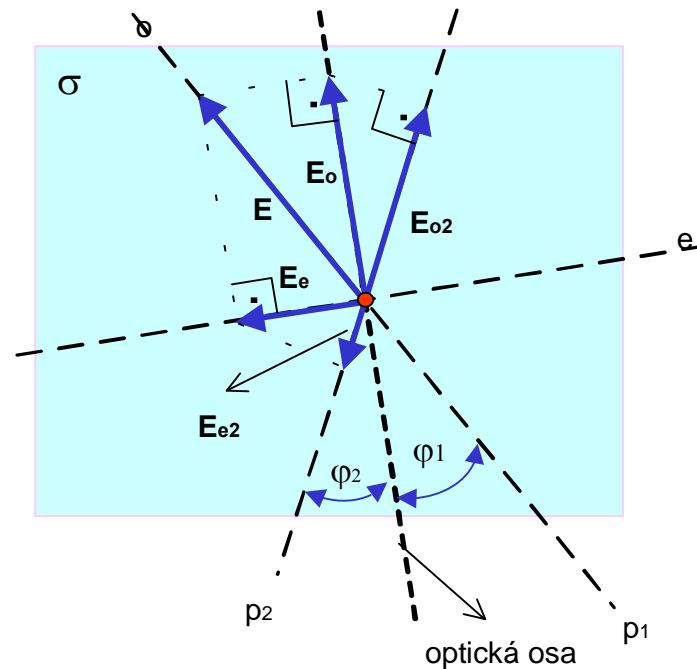


1. Použije se koherentní osvětlení preparátu.
2. U polarizátorů p_1 a p_2 jsou známy **směry propustnosti vektorů E** . Analyzátor zajistí, aby stupeň polarizační koherence byl roven 1.
3. Maximální kontrast nastane, když paprsky řádný a mimořádný budou mít stejnou amplitudu.

Amplitudy koherentních vln

V rovině σ postupně sledujeme, jak se mění amplitudy, když procházejí polarizačním mikroskopem, to znamená postupně polarizátorem, dvojlomným preparátem a analyzátozem

$$\begin{aligned}E_o &= E \cos \varphi_1 \\E_e &= E \sin \varphi_1 \\E_{o2} &= E_o \cos \varphi_2 = E \cos \varphi_1 \cos \varphi_2 \\E_{e2} &= E_e \sin \varphi_2 = E \sin \varphi_1 \sin \varphi_2\end{aligned}$$



- 1) Do roviny σ jsou zakresleny směry **propustnosti vektorů E** pro 1. polarizátor p_1 , pro řádný paprsek o a mimořádný e dvojlomné látky a pro 2. polarizátor (analyzátor) p_2 .
- 2) Jak paprsek prochází danou soustavou, tak se **vektor E postupně promítá** do příslušných směrů propustnosti.
- 3) Na stínítku **interferují paprsky E_{o2} a E_{e2}** pro něž **stupeň polarizační koherence** už není roven nule, ale jednička. Interferenční intenzita závisí na fázovém posuvu mezi paprsky o a e a na jejich amplitudách.