

Vlnové vlastnosti světla

Odraz a lom světla

Disperze světla

Interference světla

Ohyb (difrakce) světla

Polarizace světla

Infračervené světlo je definováno jako

- a) podélné elektromagnetické kmity o frekvenci přibližně 1 MHz**
- b) příčné elektromagnetické kmity o frekvenci nižší než přibližně $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz**
- c) podélné elektromagnetické kmity o frekvenci vyšší než zhruba $3,8 \cdot 10^{14}$ Hz**
- d) příčné elektromagnetické kmity o frekvenci přibližně 1 GHz**

Které barvě světla přísluší nejdelší vlnová délka?

B

- a) zelené**
- b) modré**
- c) červené**
- d) fialové**

C

Vlnová délka ultrafialového světla

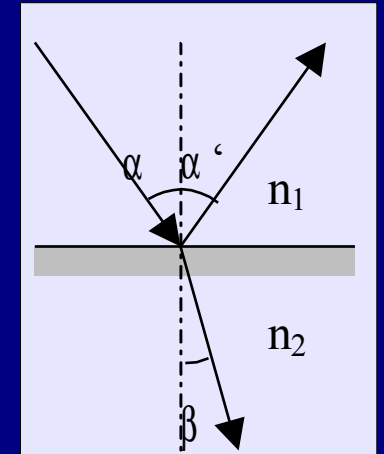
- a) je kratší než zhruba 400 nm**
- b) spadá do rozmezí přibližně 400 až 800 nm**
- c) je delší než přibližně 800 nm**
- d) je delší než přibližně 800 μm**

A

Odraz světla

Zákon odrazu světla:

- Velikost úhlu odrazu se rovná velikosti úhlu dopadu.
- Odražený paprsek zůstává v rovině dopadu.
- Úhel odrazu nezávisí na vlnové délce světla.



Př:

V jaké výšce nad hladinou vody jezera u skály je oblak, který pozorujeme ze skály vysoké 76 m ve výškovém úhlu 56° a jeho obraz na vodní hladině jezera u skály v hloubkovém úhlu 58° ?

1989 m

index lomu daného prostředí udává, kolikrát je rychlost světla ve vakuu větší než rychlost světla v daném prostředí.

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

$$c = 2,99\,792\,458 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$
$$c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$$

Lom světla



Lom světla: Snellův zákon –
kde n je **relativní index lomu** a
 n_1, n_2 je **absolutní index lomu** prostředí:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{n_2}{n_1} = n$$

Prostředí opticky **hustší** je prostředí,
ve kterém se světlo šíří pomaleji (větší index lomu),
v prostředí opticky **řidším** se světlo šíří rychleji (menší index lomu).

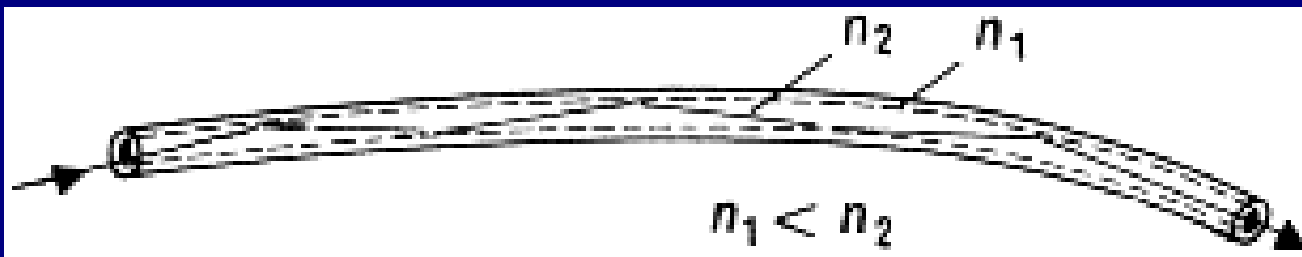
Lom světla

Prochází-li paprsek z prostředí opticky hustšího do opticky řidšího, nastává **lom od kolmice** (úhel lomu je větší než úhel dopadu).

Pokud je úhel dopadu tzv. **mezní úhel** α_m , je úhel lomu 90° – paprsek odchází po rozhraní.

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

Je-li úhel dopadu větší než mezní úhel, nastává tzv. **úplný odraz**.



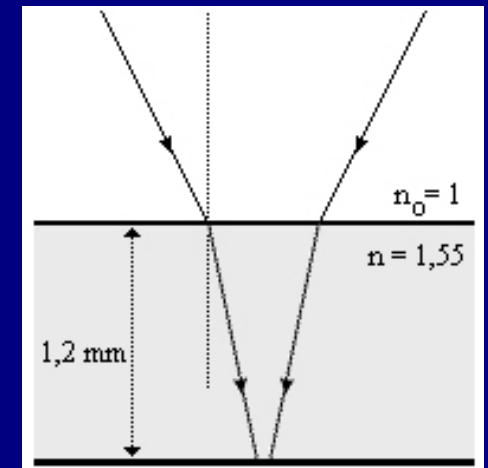
Př:

Na dně potoka je cíl 40 cm hluboko. Střelec jej chce zasáhnout střelou z pušky. Míří-li přesně na cíl, svírá tento směr s vodorovnou rovinou úhel 60° . O kolik se střelec mine za předpokladu, že by cíl zasáhl, kdyby nebylo vody? Index lomu vody je $1,33$.

$6,87\text{ cm}$

Př:

Polykarbonát na CDčku, který chrání vlastní médium se zaznamenanými informacemi, má index lomu 1,55 a je silný 1,2 mm (viz obr.). Svazek laserových paprsků, který dopadá na povrch polykarbonátu má průměr 800 μm , průměr stejného svazku při dopadu na vlastní médium je 1,7 μm . Určete, pod jakým úhlem dopadá svazek na polykarbonát a pod jakým úhlem se do něj láme. Index lomu okolního vzduchu uvažujte roven jedné.



28,26° ; 18,4°

Disperze světla

ČERVENÁ ORANŽOVÁ ŽLUTÁ ZELENÁ MODRÁ FIALOVÁ

růst frekvence světla

pokles velikosti rychlosti světla v daném prostředí

růst indexu lomu daného prostředí



Index lomu optického prostředí závisí na frekvenci světla a při normální disperzi se s rostoucí frekvencí zvětšuje => fialová se láme více než červená.



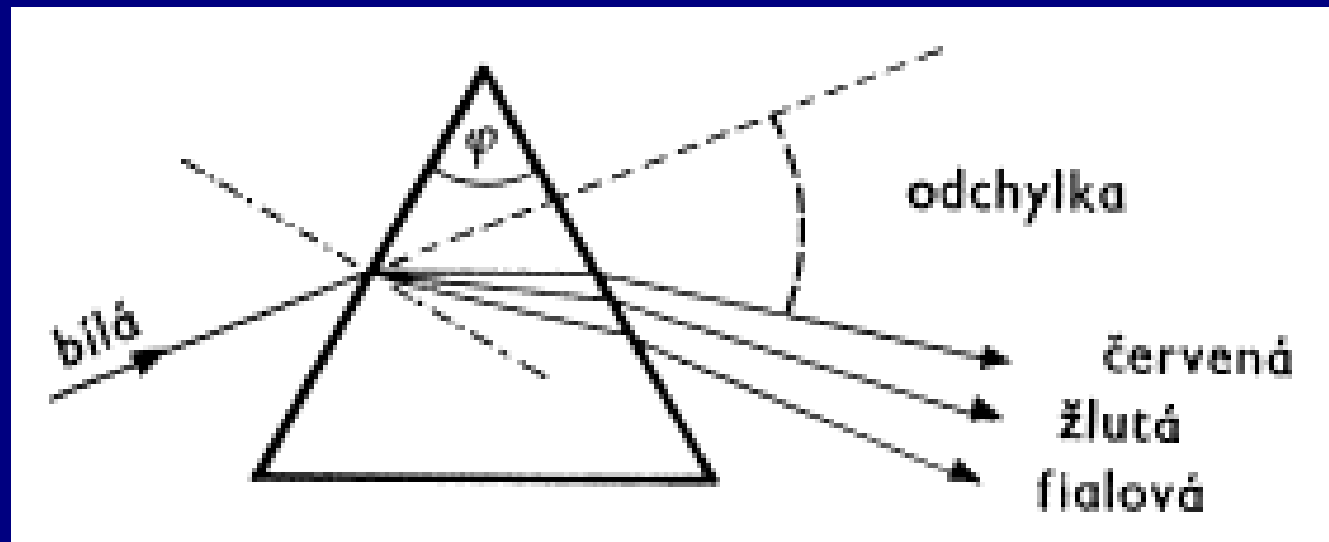
Disperze světla

Při průchodu světla rozhraním optických prostředí se frekvence nemění, ale protože se mění rychlost šíření, mění se i vlnová délka.

Vlnová délka červeného světla ve vakuu je 789,9 nm a fialového je 389 nm.

K rozkladu světla lomem se využívá optický hranol → vzniká hranolové spektrum

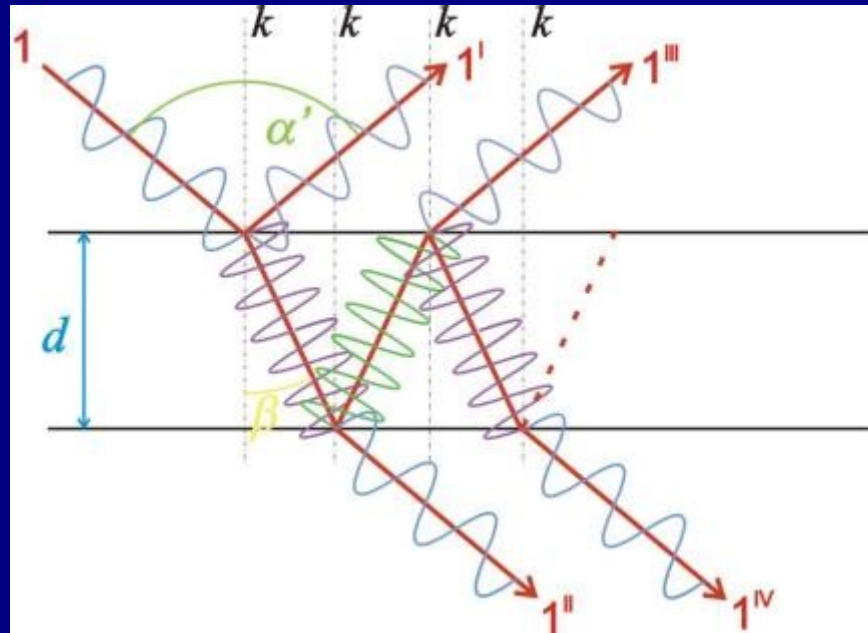
Spektrum pozorujeme spektroskopem - spektrální analýza (zjištění složení hvězd)



Interference světla

Koherentní jsou světelná vlnění stejné frekvence, jejichž vzájemný fázový rozdíl v daném bodě prostoru se s časem nemění.

Proto můžeme interferenci na tenké vrstvě pozorovat buď v odraženém světle (interference paprsků 1^I a 1^{III}) nebo v propuštěném světle (paprsky 1^{II} a 1^{IV}).



Interferenční maximum vzniká v místech, kde se koherentní světelná vlnění setkávají se stejnou fází :

$$\Delta l = k\lambda$$

Interferenční minimum je v místech, kde mají koherentní vlnění opačnou fázi :

$$\Delta l = \frac{\lambda}{2} + k\lambda$$

Interference světla

Při odrazu světelného vlnění na rozhraní s opticky hustším prostředím se fáze vlnění mění v opačnou a dráhový rozdíl se o $\lambda / 2$ zvětšuje.

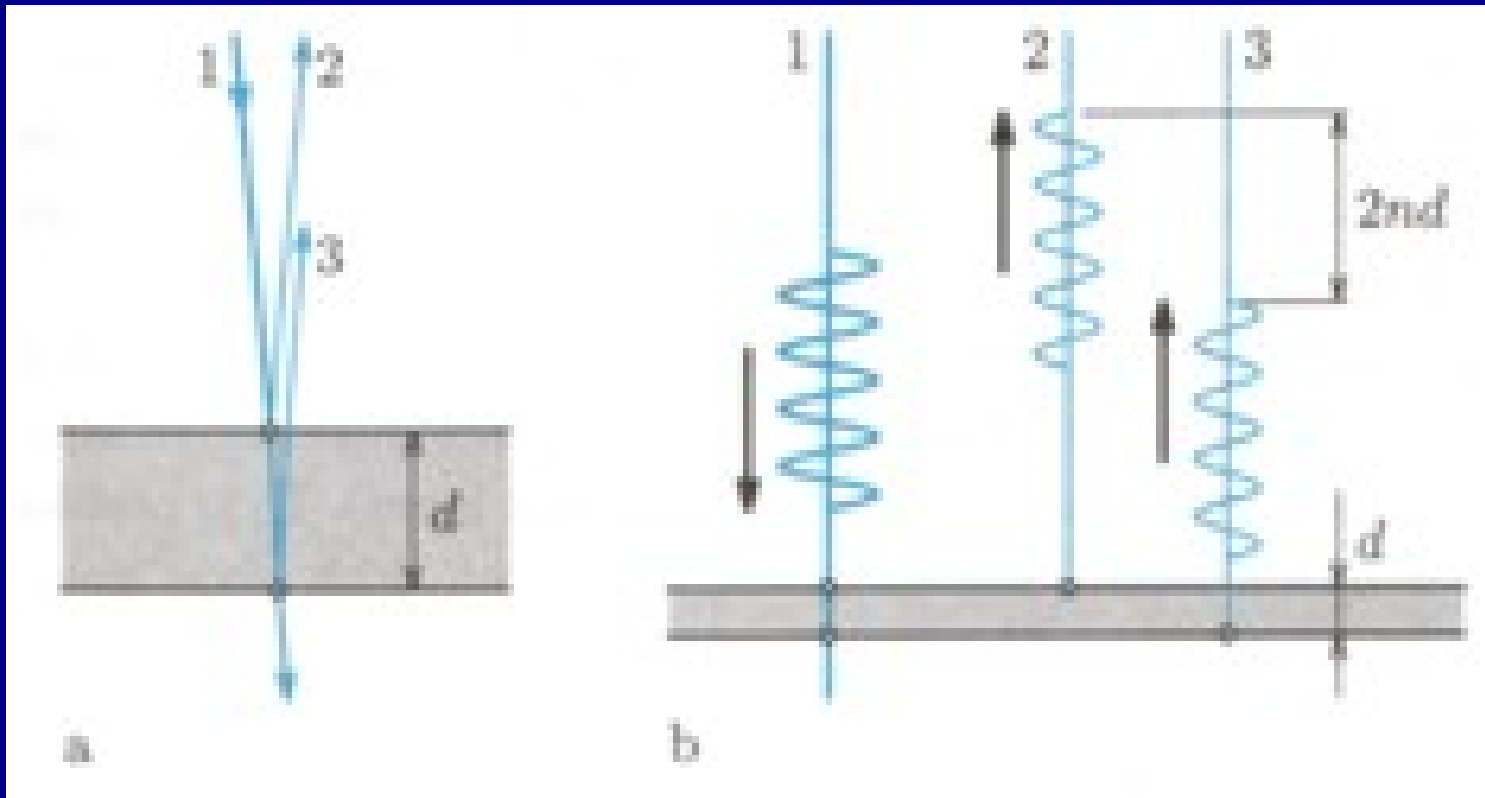
Při odrazu na rozhraní s opticky řidším prostředím se fáze vlnění nemění.

Optická dráha = součin indexu lomu a délky geometrické dráhy světla.

$$l = n \cdot s$$

Rovnost optických drah je ekvivalentní stejné době průchodu světla po nich.

Interference na tenké vrstvě



Pro kolmý dopad světla :

Světlo urazí ve vrstvě dráhu $s = 2d$ (tam a zpátky), čili dráhový rozdíl mezi světlem, které do vrstvy nevstoupilo a světlem, které prošlo vrstvou je: dráhový rozdíl $\Delta l = 2 n d$.

Při odrazu světelného vlnění na rozhraní s opticky hustším prostředím se fáze světelného vlnění mění v opačnou (fázový posun $\lambda / 2$ - půlvlna).

Interference na tenké vrstvě

$$\text{maximum (zesílení): } 2 \cdot n \cdot d + \frac{\lambda}{2} = 2 \cdot k \cdot \frac{\lambda}{2}$$

$$\text{minimum (zeslabení): } 2 \cdot n \cdot d + \frac{\lambda}{2} = (2 \cdot k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}$$

Rozhraní kombinace tmavých a světlých pruhů je jen pro monochromatické světlo.

Sluneční světlo reaguje tak, že se zobrazí pruhy různých barev, protože různé barvy mají jiný fázový posun. Proto jsou bubliny barevné, stejně jako olejové skvrny na vodě.

Tloušťka pruhů se vzdáleností od středu zmenšuje.



V důsledku interference světla na tenké vrstvě křídel mouchy se křídla jeví v různých barvách - podle toho, jaké vlnové délky světla se při odrazu na tenké vrstvě zesílí či zeslabí.

Díky interferenci světla, které se odráží od vnějšího a vnitřního povrchu mýdlové blány bubliny, se mýdlová bublina jeví v různých barvách.

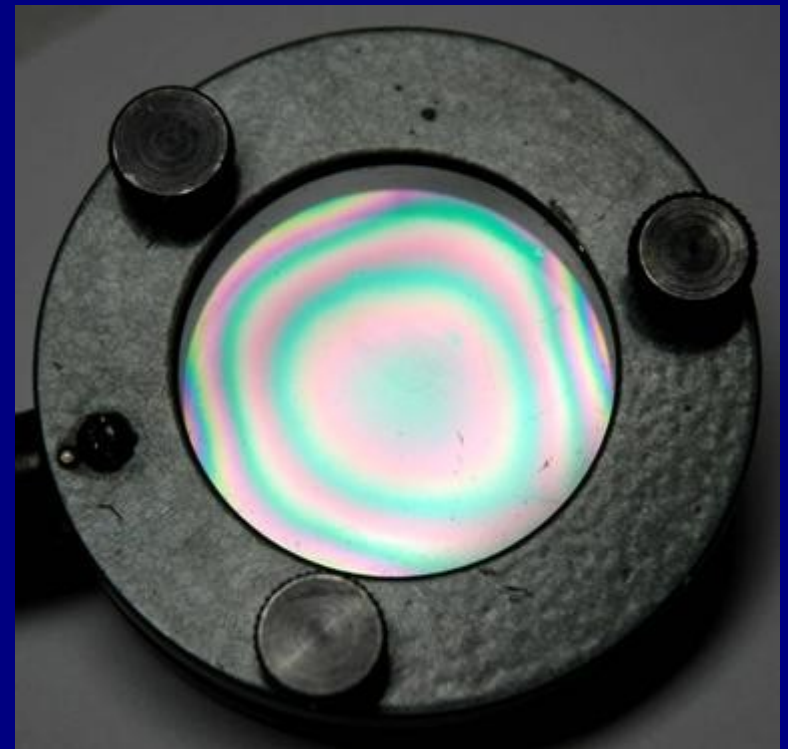
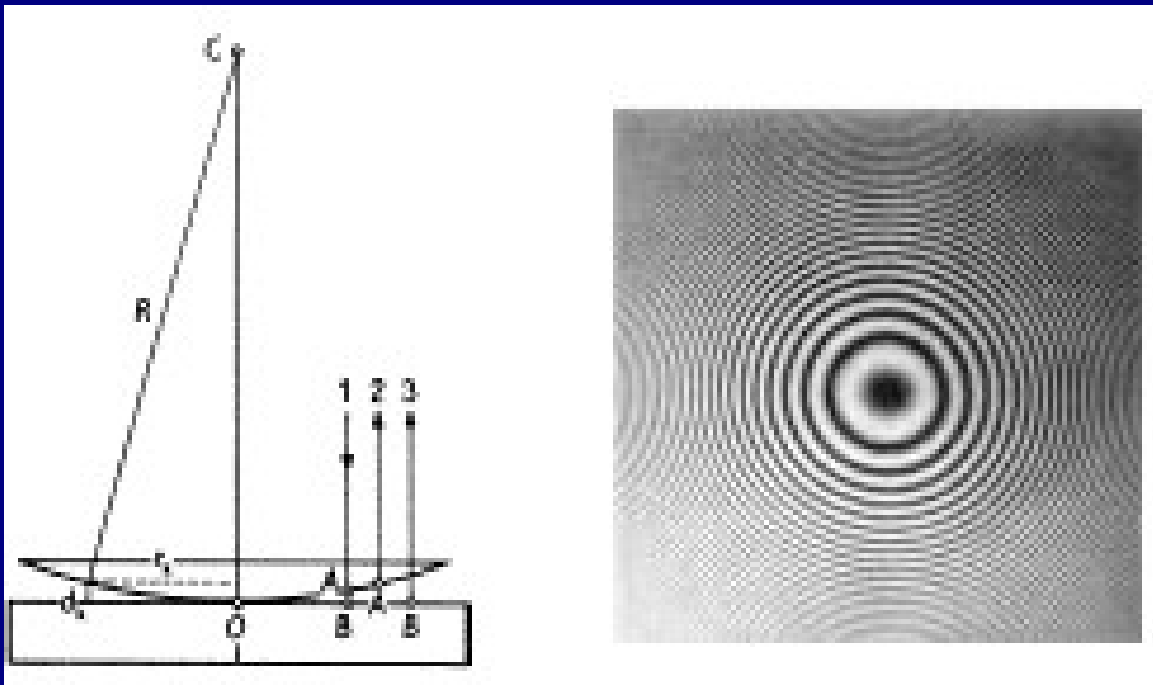


Interference světla

Newtonova skla

Newtonova skla tvoří deska, k níž je přiložena ploskovypuklá čočka o velkém poloměru křivosti. Mezi deskou a čočkou vzniká tenká vrstva vzduchu. Interferenční obrazec má podobu soustavy světlých a tmavých kroužků (Newtonovy kroužky).

Pomocí Newtonových kroužků lze měřit vlnová délka světla, nebo kontrolovat opracování.



Interference světla

další užití:

měření velmi malých délek (měření jakosti povrchu obráběných ploch),

Např. vyrobená čočka se přidá ke kalibru ze skla, který má přesnou křivost. Tak se mezi oběma skly vytvoří tenká vzduchová vrstva, na níž vznikne interferenční obraz. Čím přesněji je čočka vyrobena, tím méně vznikne proužků a jsou širší.

určení indexu lomu prostředí, optické vrstvy a vlnové délky

tvorba protiodrazových (antireflexních) vrstev

plochy optických skel se pokrývají tenkou planparalelní vrstvou z průhledné látky o indexu lomu menším, než je index lomu skla. Světlo se nejméně odráží (resp. zesiluje), dopadá-li na planparalelní vrstvu kolmo. Splňuje-li tloušťka vrstvy podmínku pro vznik interferenčního minima, bude odraženého světla nejméně.



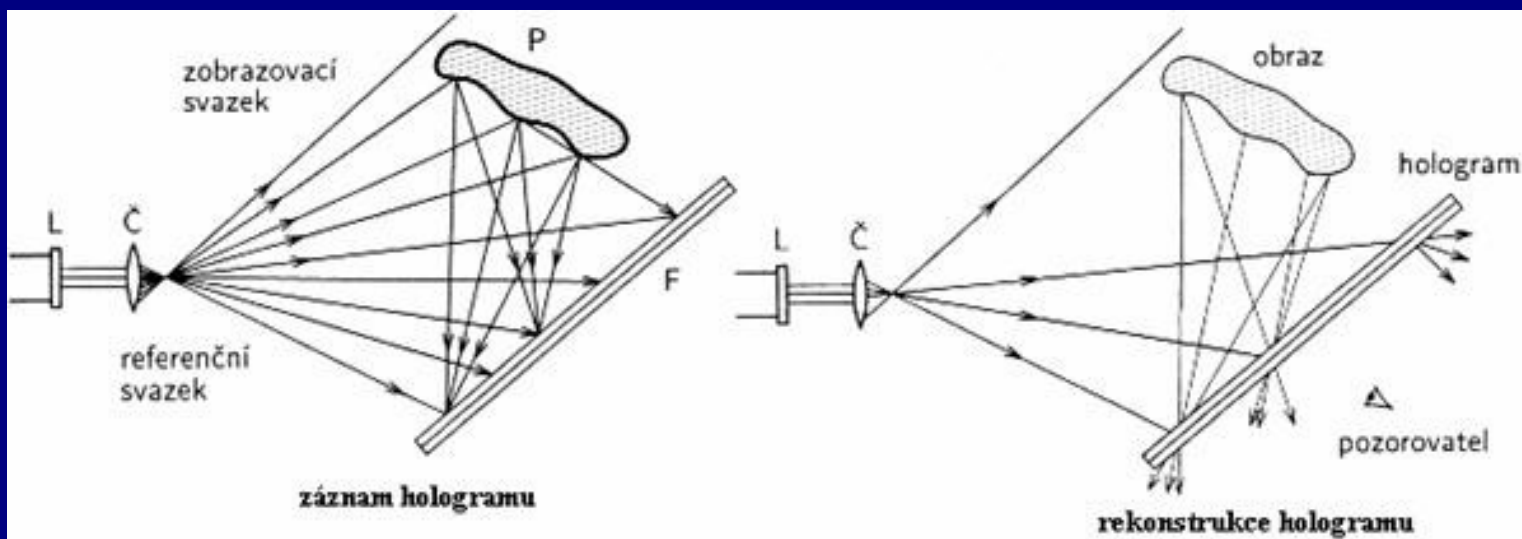
barevné skvrny na fotografii vznikají v důsledku interference světla na drobných nečistotách na antireflexní vrstvě objektivu.

Interference světla

další užití:

Holografie = metoda záznamu a trojrozměrného vybavování obrazu

záznam předmětu v citlivé vrstvě fotografického filmu (hologram) nese informaci nejen o intenzitě (tak jako klasická fotografie, která je přímočarým záznamem světla odraženého a rozptýleného daným objektem), ale také o fázi světla odraženého od zaznamenávaného předmětu.



Př:

Do určitého bodu na stínítku dopadají dva paprsky s dráhovým rozdílem $3 \mu\text{m}$. Rozhodněte, zda nastane interferenční maximum nebo minimum, je-li světlo:

a) červené ($\lambda_1 = 750 \text{ nm}$); b) fialové ($\lambda_2 = 400 \text{ nm}$).

Řešení:

Při řešení budeme vycházet z podmínky pro interferenční maximum. Řád interferenčního maxima k nahradíme počtem půlvln. Bude-li tento počet sudý, nastává interferenční maximum, bude-li lichý, nastane interferenční minimum, bude-li výsledek číslo desetinné, nenastává ani maximum ani minimum. Počet půlvln nejprve vyjádříme obecně:

$$\Delta l = N \frac{\lambda}{2} \Rightarrow N = \frac{2\Delta l}{\lambda}$$

Po dosazení číselných hodnot získáme následující výsledky:

$$\Delta l = N \frac{\lambda}{2} \Rightarrow N = \frac{2\Delta l}{\lambda}$$

$$N_1 = \frac{2.3 \cdot 10^{-6}}{750 \cdot 10^{-9}} = 8$$

$$N_2 = \frac{2.3 \cdot 10^{-6}}{400 \cdot 10^{-9}} = 15$$

Při použití červeného světla je násobek poloviny vlnové délky sudý, proto nastává interferenční maximum, při použití fialového světla je násobek lichý, a proto nastává interferenční minimum.

Pozn.: U tohoto typu příkladu nestačí pouze vypočítat velikost násobku poloviny vlnové délky. Je třeba ještě říct, který z dějů v daném případě nastává.

Př.: Mydlinová blána ($n=1,33$) se při kolmém dopadu světla jevila v odraženém světle modrá (450 nm). Určete její tloušťku.

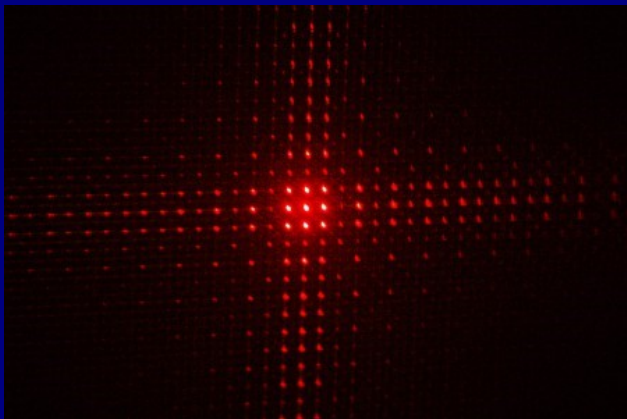
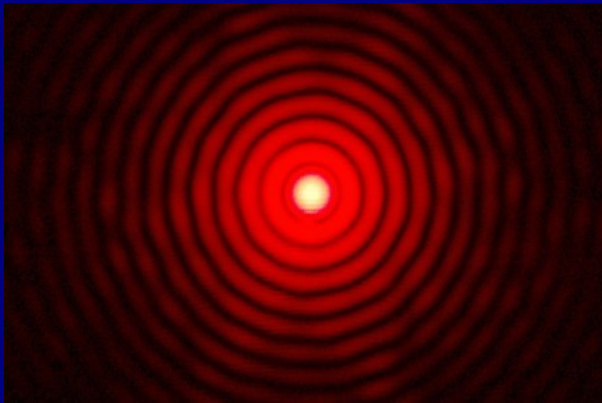
2. Podmínka pro interferenční maximum v odraženém světle:

$$2nd = (2k - 1) \frac{\lambda}{2} \text{ pro } k = 1 \text{ je } d = \frac{\lambda}{4n} = \frac{450 \cdot 10^{-9}}{4 \cdot 1,33}, \underline{\underline{d = 0,846 \cdot 10^{-7} \text{ m}}}$$

Difrakce (ohyb) světla

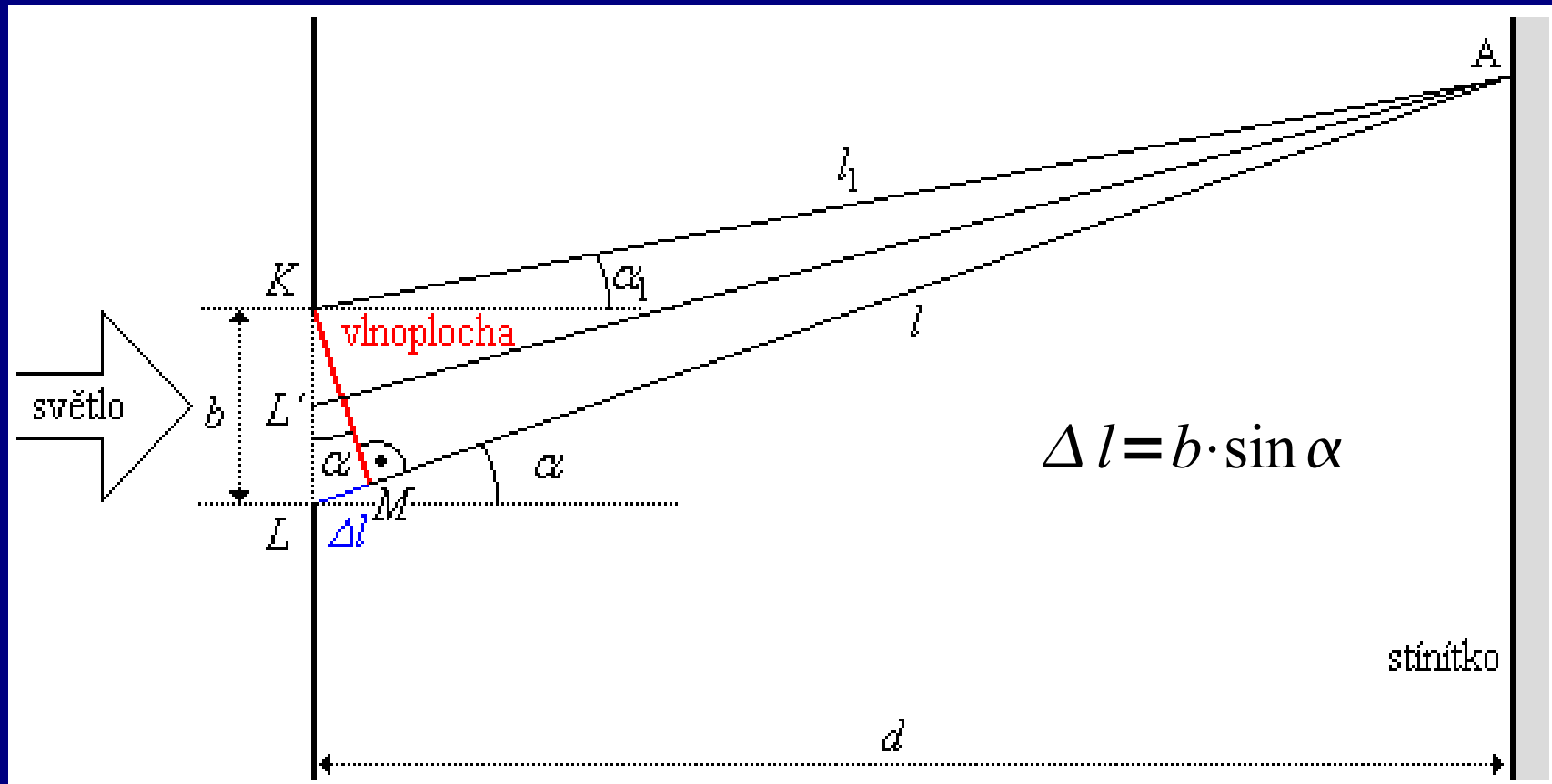
Tento jev se projevuje tak, že se světlo šíří částečně i do prostoru za překážkou, kam by se podle paprskové optiky nikdy šířit nemělo, tzn. světlo se šíří i do oblasti geometrického stínu.

Hranice mezi světlem a stínem potom není ostrá a na stínítku za překážkou se vytváří ohybový (= difrakční) obrazec.

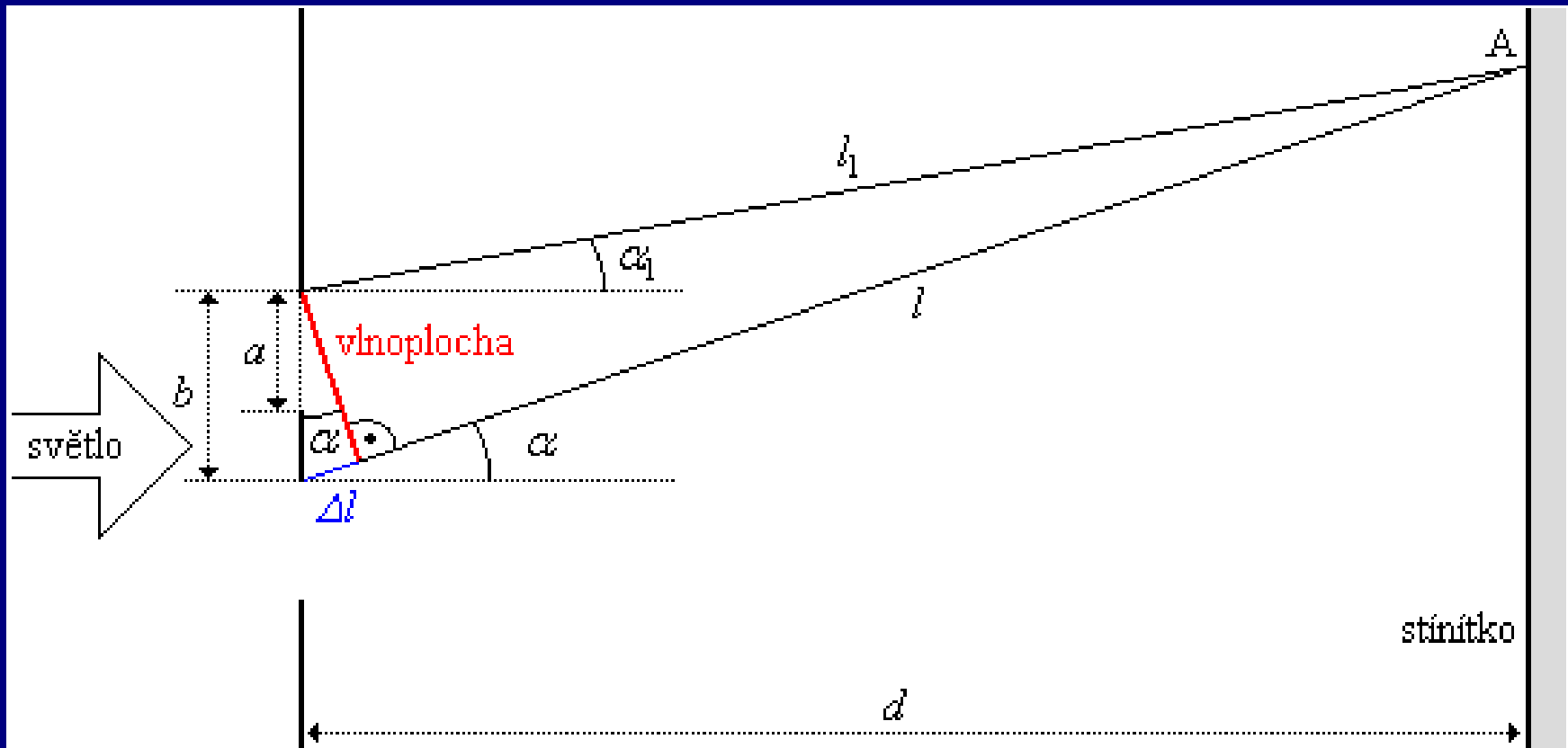


Difrakce (ohyb) světla

Aby byl jev dobře pozorovatelný, musí mít štěrbina rozměr srovnatelný s vlnovou délkou světla.



Difrakce (ohyb) světla



$$MAX : b \cdot \sin \alpha = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}, k = 0, 1, 2, \dots$$

$$MIN : b \cdot \sin \alpha = (2k - 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, k = 1, 2, \dots$$

pro malé úhly lze nahradit:

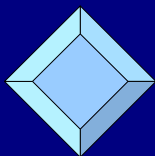
$$\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha$$

x ... vzdálenost bodu A od
středu stínítka

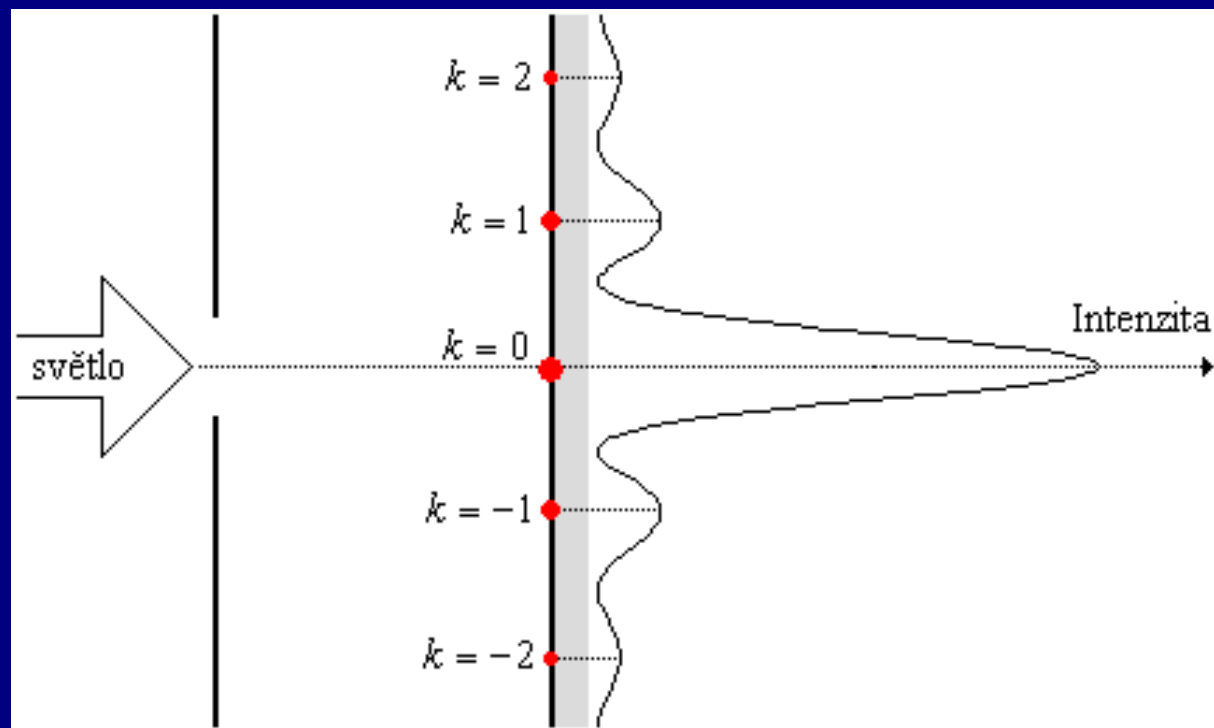
$$\sin \alpha = \frac{y}{d}$$

Difrakce (ohyb) světla

Vlivem ohybu světla vzniká na stínítku ohybový obrazec, v jehož středu je nulté interferenční maximum a po obou stranách se střídají interferenční minima a interferenční maxima. Jejich rozložení závisí na šířce štěrbině a na vlnové délce světla. Bude-li při dané vlnové délce štěrba uží, bude větší vzdálenost mezi interferenčními minimy stejného řádu. Tedy uží štěrba způsobuje výraznější ohyb světla.



Ohyb světla ovlivňuje i zobrazování velmi malých předmětů. Vlnovými vlastnostmi je tedy omezena rozlišovací schopnost optických přístrojů. Rozlišovací schopnost přístroje je tím větší, čím kratší je vlnová délka použitého světla.



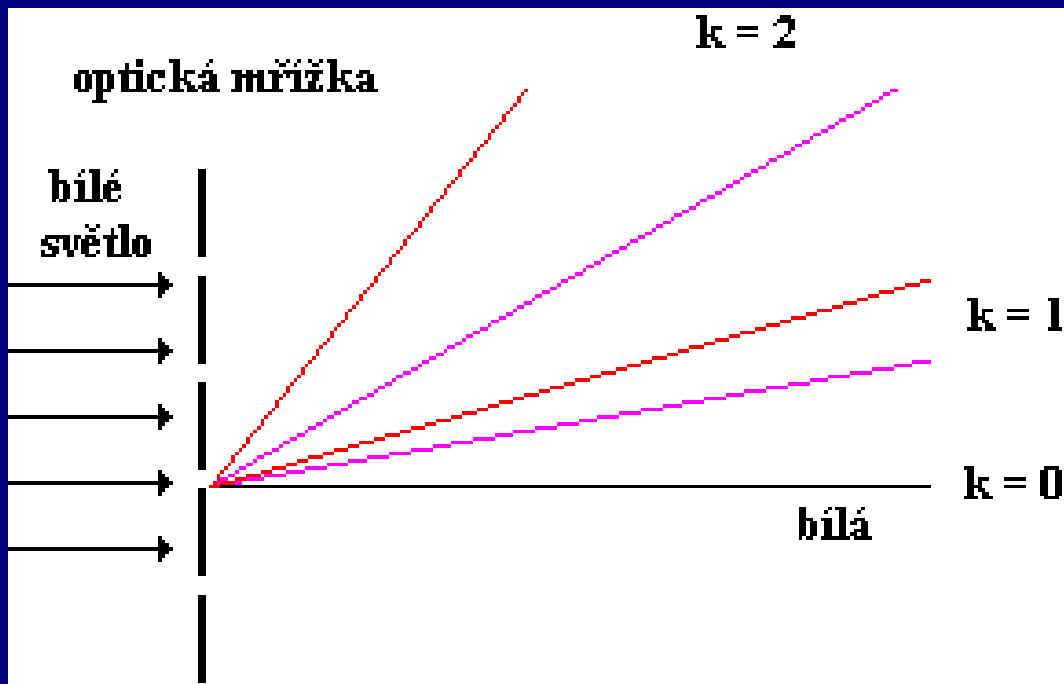
Proto se také v moderních mikroskopech, která se využívají ke studiu velmi malých objektů (viry, molekuly, ...) používají místo světla svazky urychlených elektronů. Ty za určitých podmínek vykazují vlnové vlastnosti a proto je lze použít právě v tzv. elektronových mikroskopech.

Optická mřížka

je tvořena soustavou velkého počtu stejně širokých rovnoběžných štěrbin, které jsou v malé vzdálenosti od sebe.

Vzdálenost štěrbin b ... perioda mřížky (mřížková konstanta).

Ohybový obrazec vytvořený optickou mřížkou má velmi úzká interferenční maxima, která jsou od sebe vzdálena tím více, čím menší je perioda mřížky.



Dopadá-li na mřížku bílé světlo, je nulté maximum bílé, ale v dalších interferenčních maximech lze pozorovat rozklad světla (viz obr.). Vznikají zde spektra symetricky rozložená na obě strany od nultého maxima. Blíže k nultému maximu je fialová část, dále od něj část červená.

Př.: Optická mřížka má 120 vrypů na 1 mm délky mřížky. Určete vlnovou délku monofrekvenčního světla štěrbinového zdroje, jestliže směry k maximum 1. řádu navzájem svírají úhel 8° .

1. Mřížková konstanta $b = 120^{-1}$ mm, $k=1$, odchylka od přímého směru je 4° .

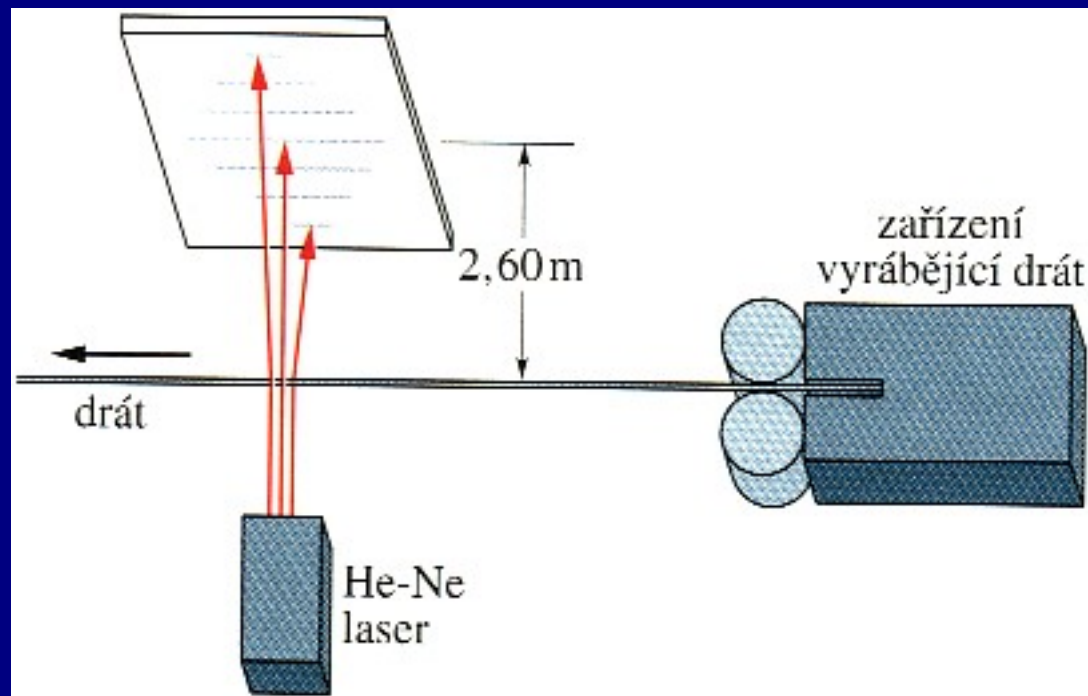
$$\lambda = \frac{b \sin \alpha}{k} = \frac{1}{120} \cdot \sin 4^\circ = 0,000\,581\,mm, \quad \underline{\underline{\lambda = 581\,nm}}$$

Výrobci drátů (a jiných věcí s malými rozměry) používají někdy laseru, aby kontinuálně kontrolovali tloušťku výrobku.

Na drát dopadá laserový svazek světla a vzniká difrakční obrazec, který je prakticky stejný jako difrakční obrazec od štěrbin o šířce rovné průměru vlákna (viz obr.).

Předpokládejte, že na drát svítí He-Ne laser, jehož světlo má vlnovou délku $632,8 \text{ nm}$, a že difrakční obrazec pozorujete na stínítku ve vzdálenosti $2,6 \text{ m}$. Požadovaná šířka drátu je $1,37 \text{ mm}$.

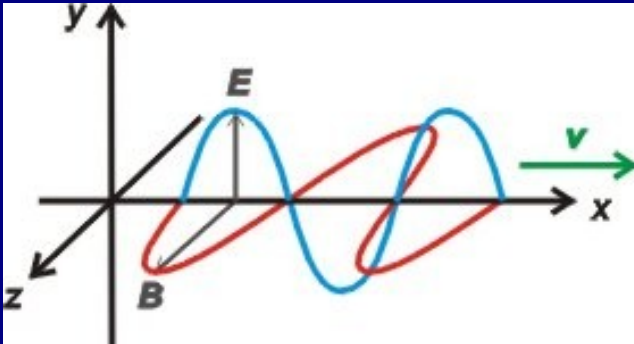
Jaká je vzdálenost mezi oběma minimy desátého řádu?



2, 28 cm

Polarizace světla

Světlo chápeme jako elmag vlnění - jak se šíří světlo prostorem, mění se intenzita elektrického a magnetického pole.



Polarizace vlnění znamená, že výchylky probíhají pouze v určitém směru a ne chaoticky v různých směrech



Polarizace světla

Světlo je obecně nepolarizované a zpolarizuje se například odrazem od předmětů pod určitým úhlem, nebo průchodem speciálními krystaly.

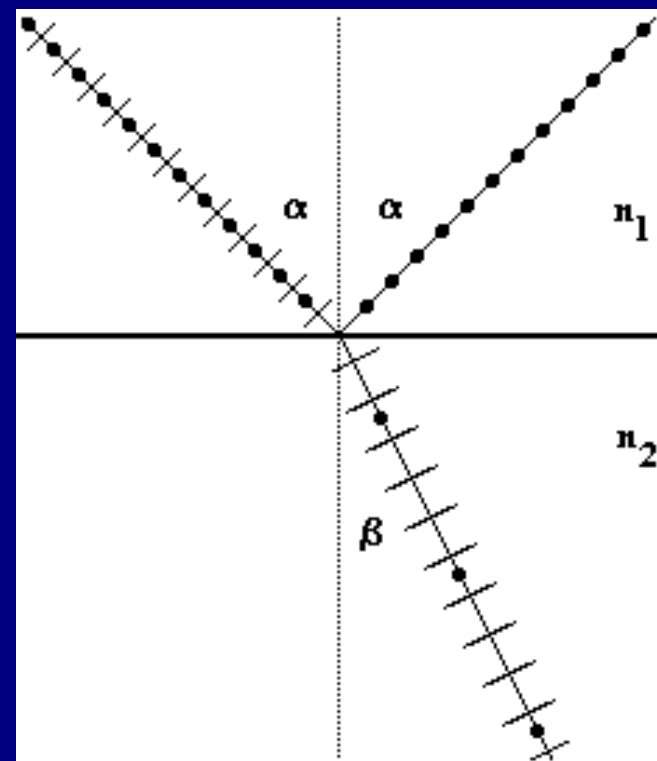
Existují tyto druhy polarizace:

1. lineárně polarizované světlo - vektor kmitá stále v jedné přímce
2. kruhově polarizované světlo - konce vektoru opisují kruh, tj. velikost tohoto vektoru je konstantní, ale mění se jeho směr
3. elipticky polarizované světlo - konce vektoru opisují elipsu (jedná o obecný typ polarizace)

Polarizace světla odrazem a lomem

Při dopadu nepolarizovaného světla na rozhraní 2 prostředí pod úhlem α , polarizuje se tak, že v odraženém světle kmitá vektor v kmitové rovině převážně kolmo k rovině dopadu (tj. v přímce rovnoběžné s rovinou rozhraní).

Polarizace odraženého světla je jen částečná a závisí na úhlu dopadu světla.



Odražené světlo je úplně polarizované jen při určitém úhlu dopadu, který závisí na indexu lomu uvažovaných dvou prostředí.

Lomené světlo je polarizované jen částečně.

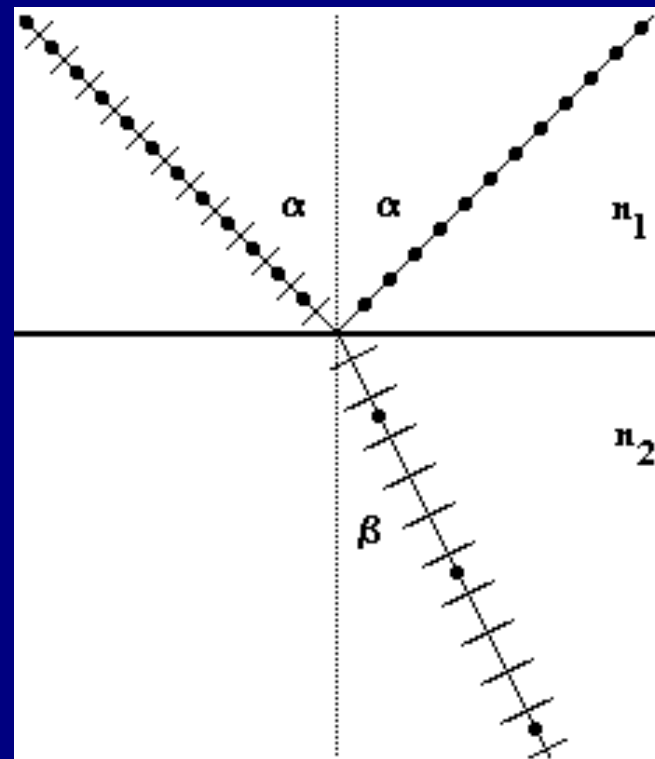
Polarizace světla odrazem a lomem

Svírají-li směry dopadající a lomené vlny 90° , úhel dopadu α se nazývá Brewsterův úhel α_B a podle Snellova zákona lomu platí:

$$\frac{\sin \alpha_B}{\sin (90 - \alpha_B)} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\sin \alpha_B}{\cos \alpha_B} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\operatorname{tg} \alpha_B = \frac{n_2}{n_1}$$



Polarizace světla odrazem a lomem

světlo se při odrazu a lomu na vodních kapkách částečně polarizuje



foceno bez polarizačního filtru

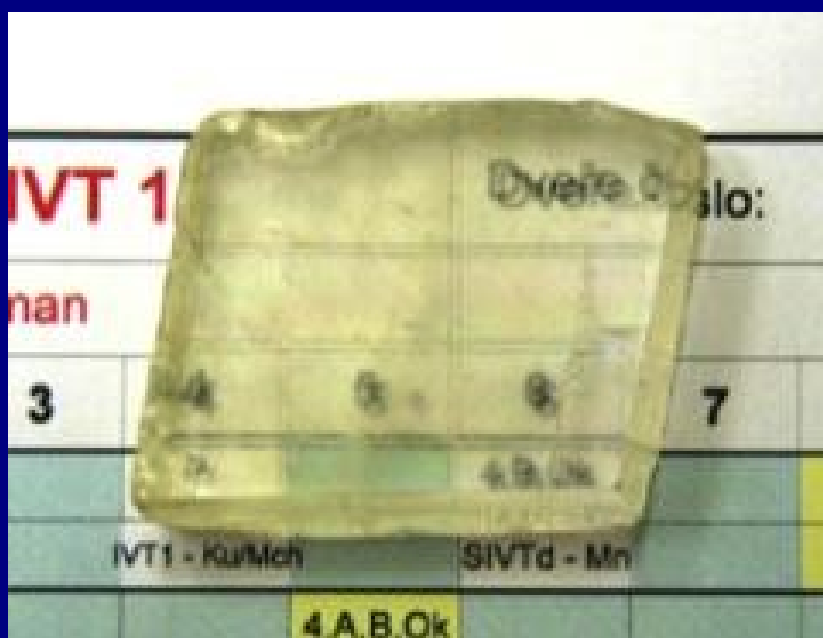


foceno s polarizačním filtrem

Polarizace světla dvojlomem

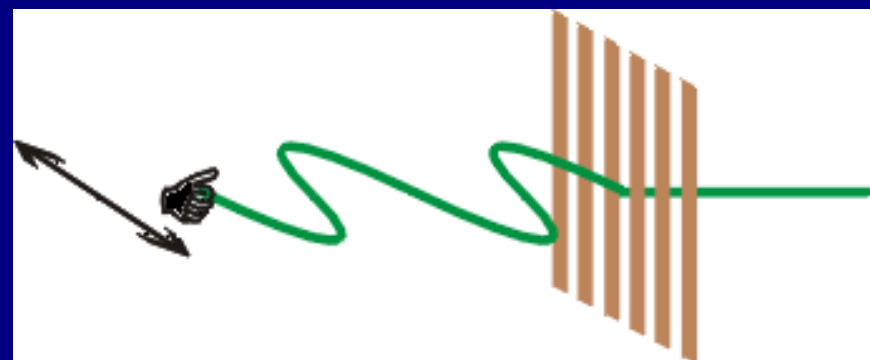
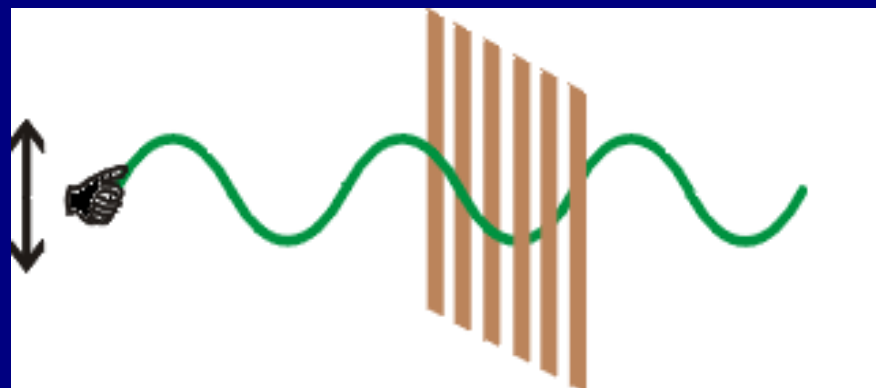
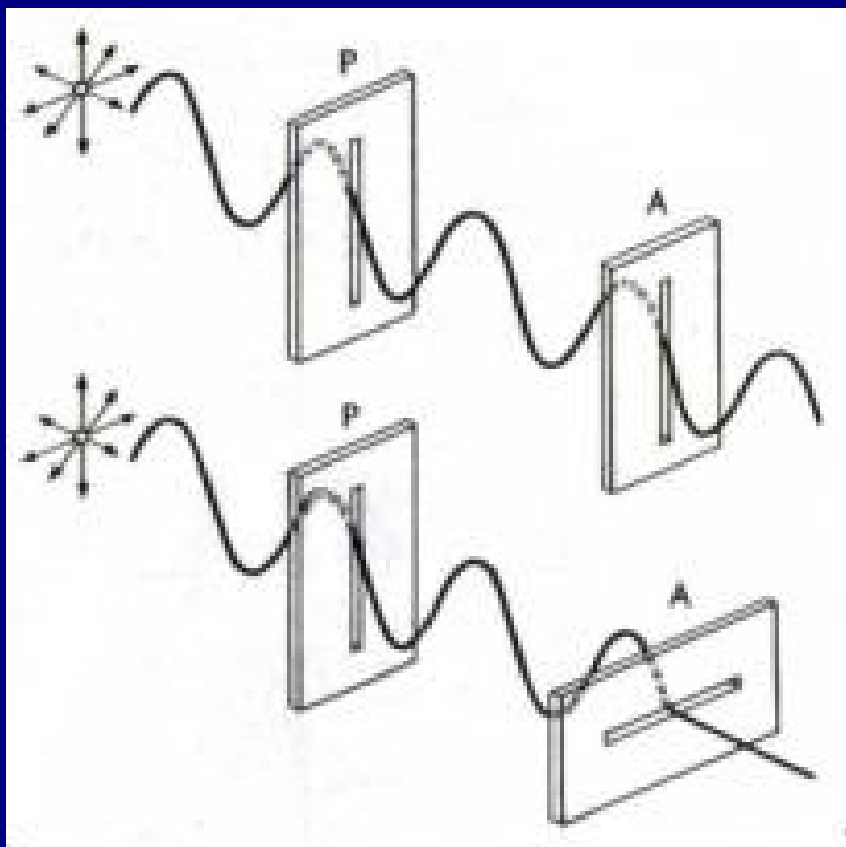
Dvojlom vzniká u anizotropních látek - př. islandský vápenec. Světelný paprsek se na rozhraní s krystalem rozdělí na paprsky dva, které jsou úplně lineárně polarizované a jejich E kmitají v navzájem kolmých rovinách:

1. paprsek řádný - splňuje zákon odrazu a lomu
2. paprsek mimořádný - vzniká v důsledku anizotropie krystalu.



Polarizace světla polaroidem

Polaroid = polarizační filtr (2 vrstvy plastu+ herapatit)
propouští pouze světlo polarizované v určitém směru



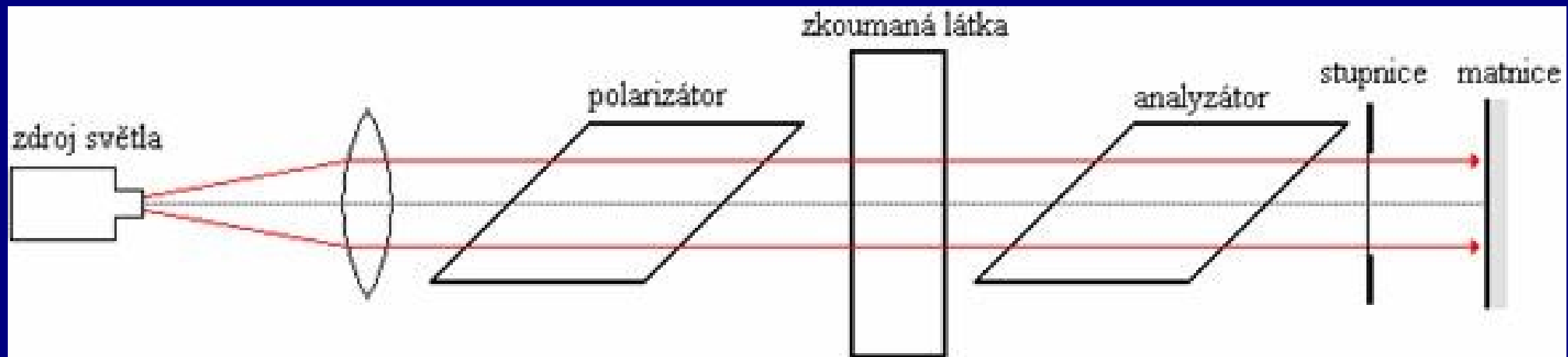
polarizátor - zařízení, které mění nepolarizované světlo na polarizované

analyzátor - umožňuje rozlišit polarizované světlo od nepolarizovaného - lidské oko to neumí

Polarizace světla - využití

Zkoumání opticky aktivních látek - měření koncentrace cukru v roztoku

Stáčení kmitové roviny polarizovaného světla se měří polarimetrem:



Polarizace světla - využití

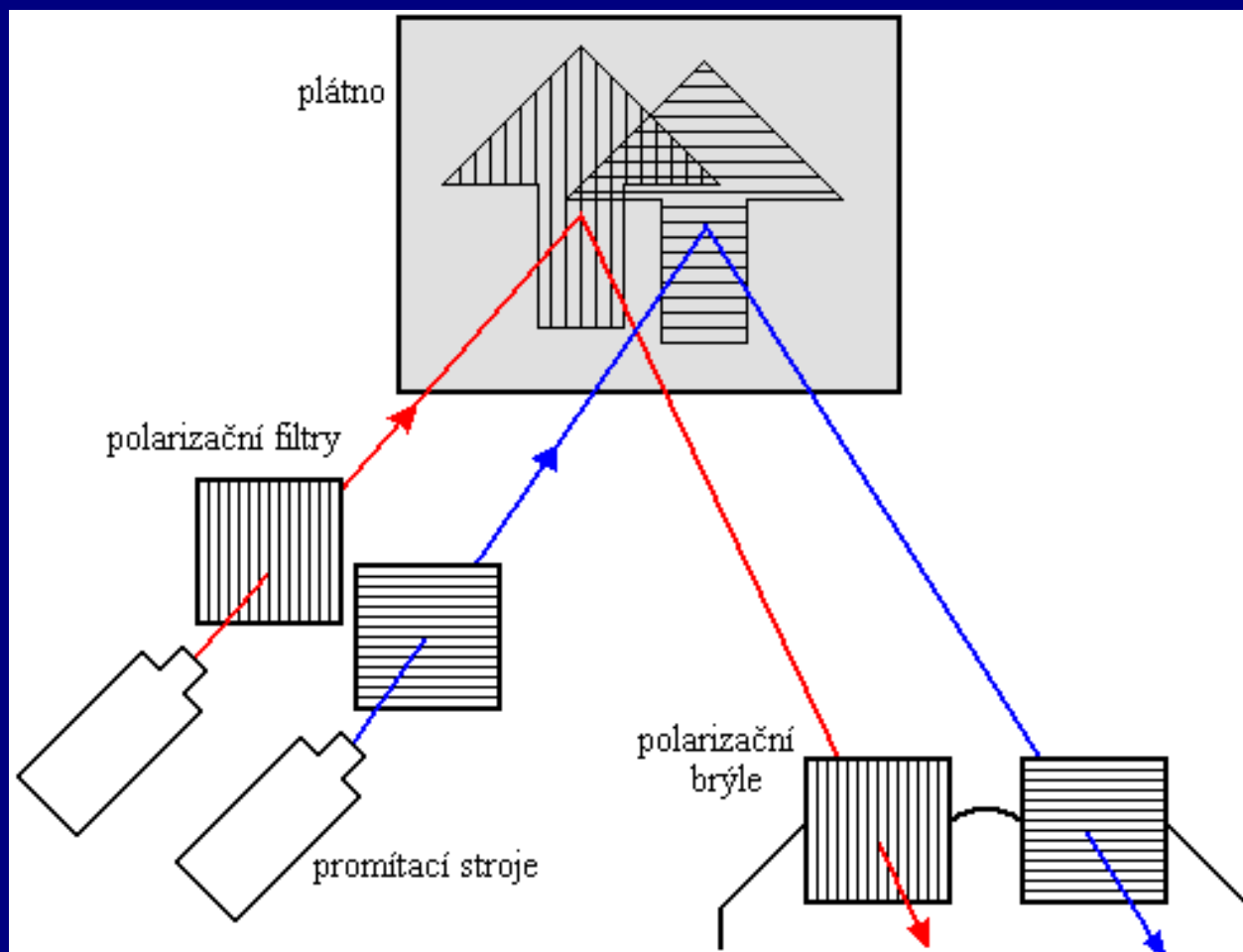
Zabránění nechtěným odrazům - fotoaparáty,
brýle pro rybáře či motoristy



nastavením filtru
před fotoaparátem
můžeme omezit
světlo odražené
například od
skleněných stěn
výloh, vitrín, vodní
hladiny apod.

Polarizace světla - využití

Zabránění nechtěným odrazům - 3D brýle



Polarizace světla - využití

Polarizace světla v displejích

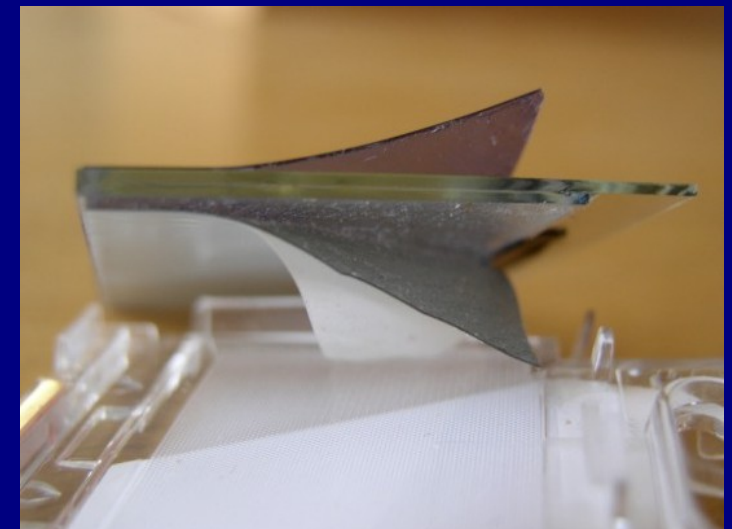
Displej je složen ze dvou polarizačních fólií, mezi nimiž je vrstva tzv. kapalných krystalů. To jsou látky, které dokáží pod působením elektrického napětí stáčet rovinu polarizovaného světla.

Polarizační fólie a kapalně krystalové vrstvy jsou uspořádány tak, že v klidovém stavu propouštějí světlo z jedné strany displeje na druhou - displej je světlý.

Pokud chceme na displeji zobrazit například číslici, přivedeme elektrické napětí na krystaly v příslušných místech displeje.

Světlo zpolarizované spodním filtrem prochází krystaly, které v daných místech stočí jeho rovinu polarizace, takže v těchto místech už neprojde světlo horním filtrem.

Zapnuté úseky displeje proto vidíme černě.



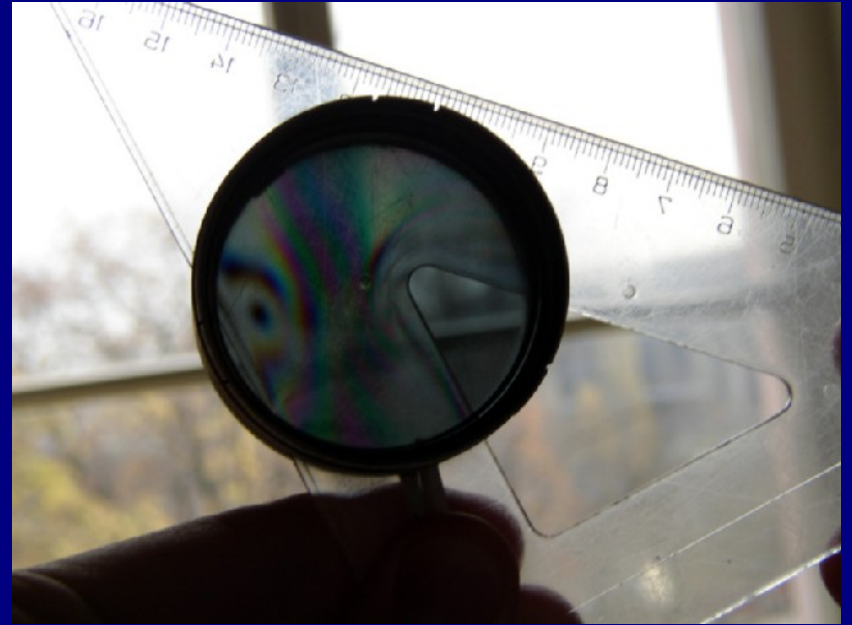
Polarizace světla - využití

Fotoelasticimetrie

zkoumá mechanické napětí
v různých tělesech

Využívá se umělé vyrobené
anizotropie v látce.

Předmět je vložen mezi polarizátor
a analyzátor a po prosvětlení lze
pozorovat charakteristické
obrazce, které poskytují informaci
o mechanických vadách uvnitř
materiálu.



Světelný paprsek přechází z vody s indexem lomu 1,33 do flintového skla tak, že se láme pod úhlem $37^{\circ}30'$. Určete index lomu flintového skla, je-li odražený paprsek zcela polarizován.

1,73

Když červené světlo dopadá ve vakuu pod Brewsterovým úhlem na skleněnou desku, je úhel lomu 32° .
Jaký je index lomu skla? Jaký je Brewsterův úhel?

1,6 58°

Opakování před písemkou

Na 500 nm silnou vrstvu oleje, která plave na vodorovné vodní hladině, dopadá kolmo bílé světlo.

V odraženém světle se vrstva jeví v barvě, jíž přísluší vlnová délka 640 nm . Určete index lomu použitého oleje a velikost rychlosti světla v tomto oleji.

$$n = 1,6 \text{ (pro } k=3), v = 1,875 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}$$

Dva zdroje koherentního světla osvětlují stínítko, které je ve vzdálenosti 4 metry od obou zdrojů. Vzájemná vzdálenost zdrojů je 2 mm a vlnová délka světla 650 nm. Jak daleko od maxima nultého řádu je maximum prvního řádu?

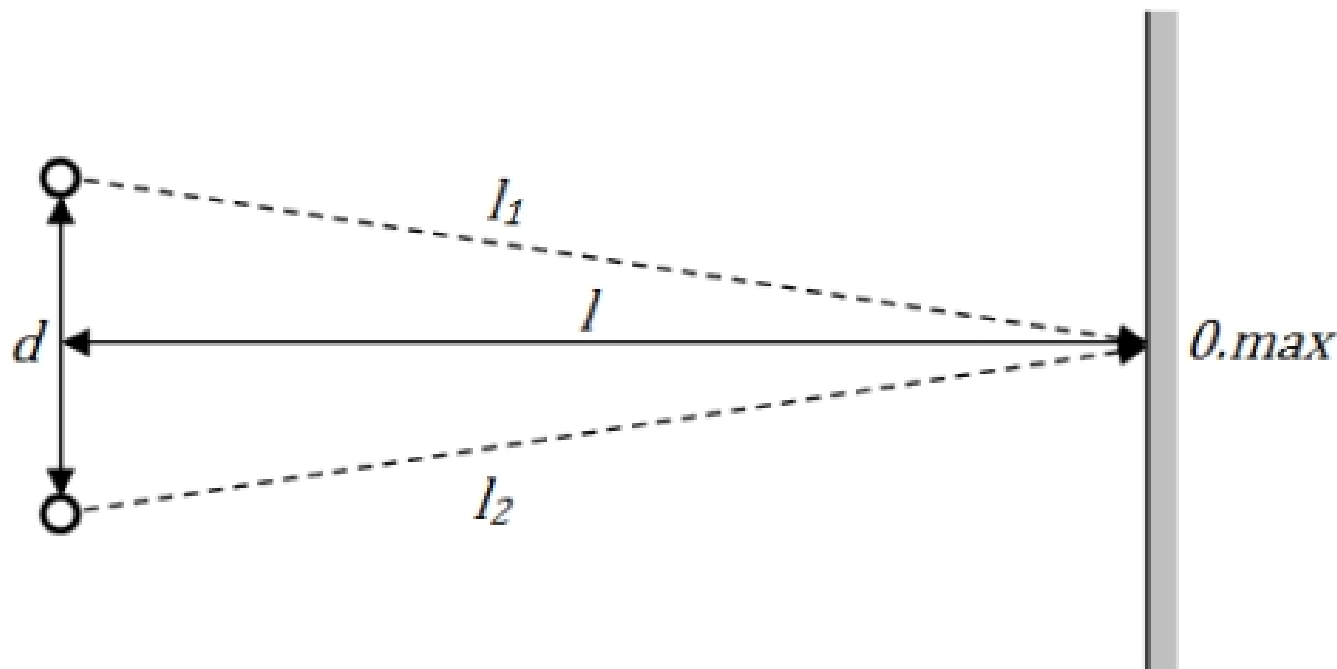
Řešení:

$$l = 4 \text{ m}, d = 2 \text{ mm} = 2 \cdot 10^{-3} \text{ m}, \lambda = 650 \text{ nm} = 650 \cdot 10^{-9} \text{ m}, y = ? \text{ m}$$

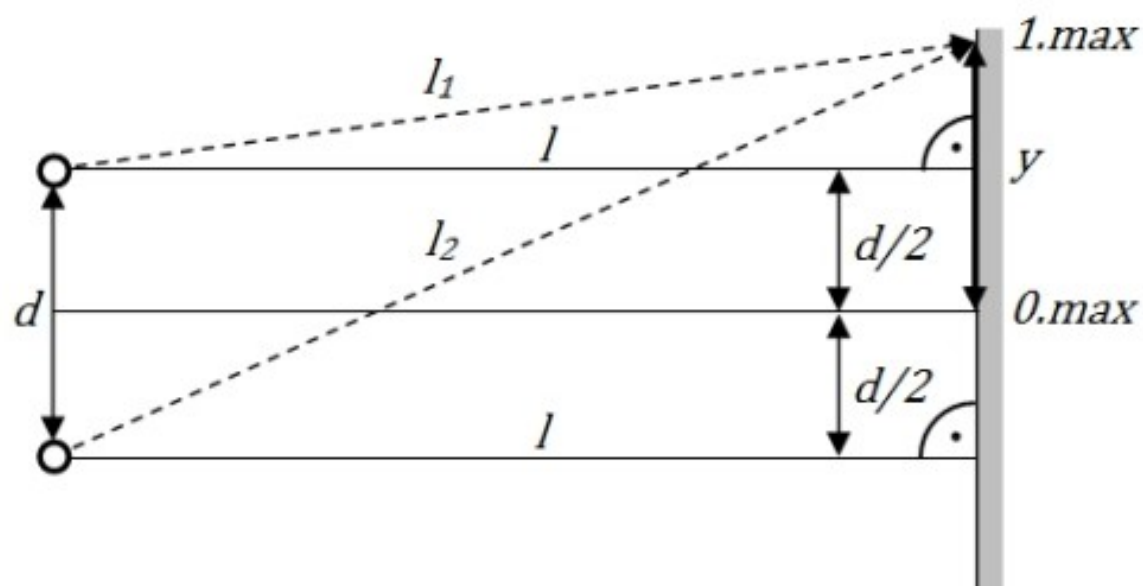
Maximum vzniká v místě, kde se vlnění setkává se stejnou fází. Dráhový rozdíl musí být

$$\Delta l = l_2 - l_1 = k\lambda$$

Pro nulté maximum platí $l_1 = l_2$ a $\Delta l = 0 \cdot \lambda = 0$.



Nyní určíme podmínku pro maximum prvního řádu.



Ze dvou pravoúhlých trojúhelníků vyplývá

$$l_1^2 = l^2 + \left(y - \frac{d}{2}\right)^2$$

$$l_2^2 = l^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2$$

Z rovnic určíme dráhový rozdíl

$$l_2^2 - l_1^2 = l^2 + \left(y + \frac{d}{2}\right)^2 - l^2 - \left(y - \frac{d}{2}\right)^2 = 2yd$$

$$l_2 - l_1 = \frac{2yd}{l_2 + l_1}$$

Je-li y mnohem menší než l , pak $l_1 + l_2 \approx 2l$, a pro dráhový rozdíl platí

$$\Delta l = \frac{yd}{l} = k\lambda$$

kde číslo k určuje řád maxima. Nyní upravíme a vypočítáme polohu prvního maxima

$$y = \frac{k\lambda l}{d} = \frac{1 \cdot 650 \cdot 10^{-9} \cdot 4}{2 \cdot 10^{-3}} = 1,3 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Odpověď:

Maximum prvního řádu je ve vzdálenosti 1,3 mm od maxima nultého řádu.