Vlnové vlastnosti světla

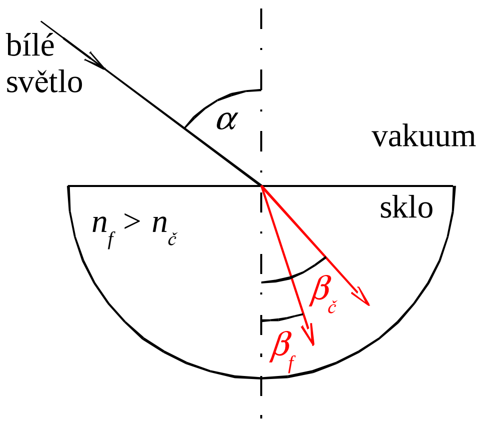
Disperze světla. Spektrální barvy

$$v = \frac{\lambda}{T} = \lambda \cdot f$$

různé $f \Rightarrow$ různá barva

$v = F(f)$ rychlost světla v prostředí závisí na f = disperze světla

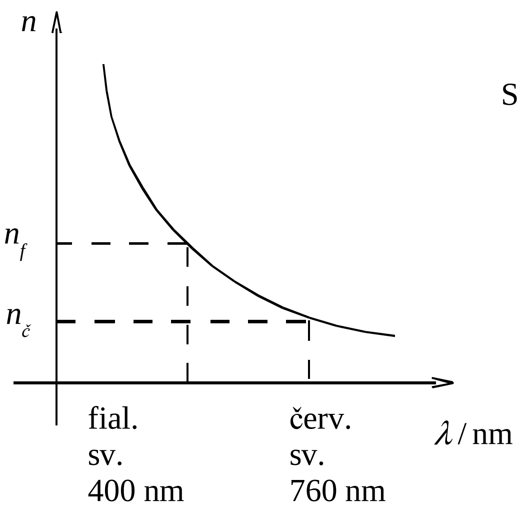
$n = \frac{c}{v} \quad \Rightarrow \quad n = F(f)$ index lomu daného optického prostředí závisí na frekvenci světla – viz pokus $\downarrow$



$\Rightarrow$ rozklad bílého světla na barevné složky = spektrum
nejvíc se láme fialové světlo
nejméně červené světlo

$\beta_č > \beta_f \Rightarrow n_č < n_f$ (ze Snellova zákona)

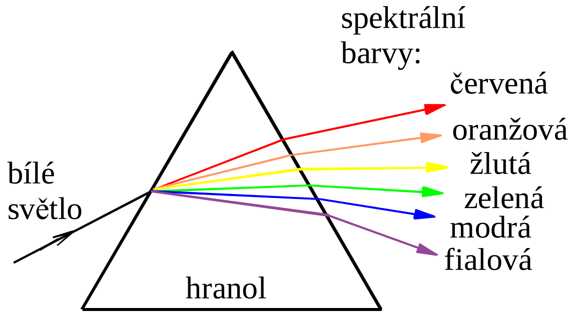
Graf závislosti indexu lomu na vlnové délce světla:



Se vzrůstající vlnovou délkou index lomu klesá

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{n_2}{\underbrace{n_1}_{=1}} = n \qquad \Rightarrow$$

rozložení bílého světla hranolem na spektrální barvy:



Monofrekvenční (monochromatické) světlo se nerozkládá.
Složením všech spektrálních barev vzniká bílé světlo.

Frekvence světla nezávisí na optickém prostředí:

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda_0} \Rightarrow$$

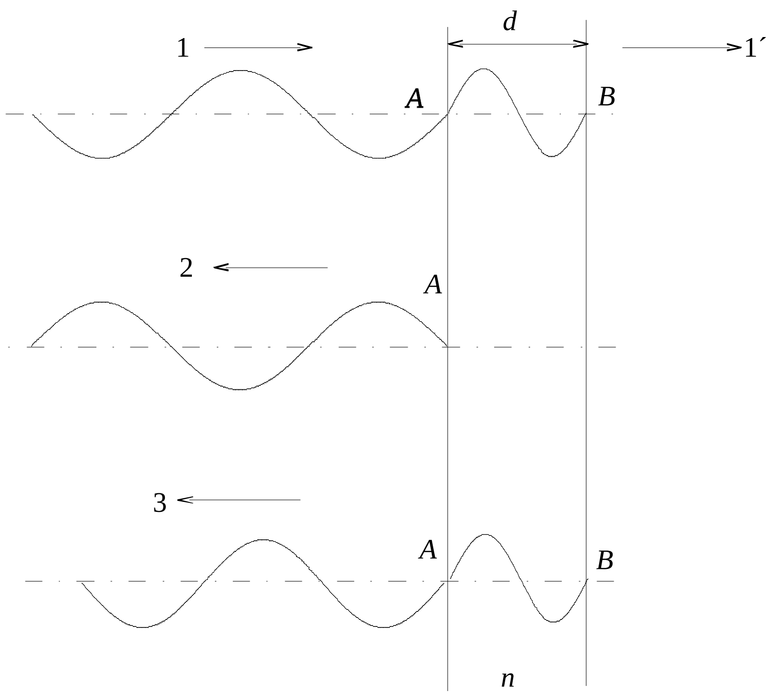
$$\lambda = \lambda_0 \cdot \frac{v}{c} \quad \Rightarrow \lambda = \frac{\lambda_0}{n}$$

Vlnová délka světla je v daném prostředí $n \times$ menší než ve vakuu.

Důkaz, že světlo je elmg. vlnění:
- interference světla
- ohyb světla
- polarizace světla

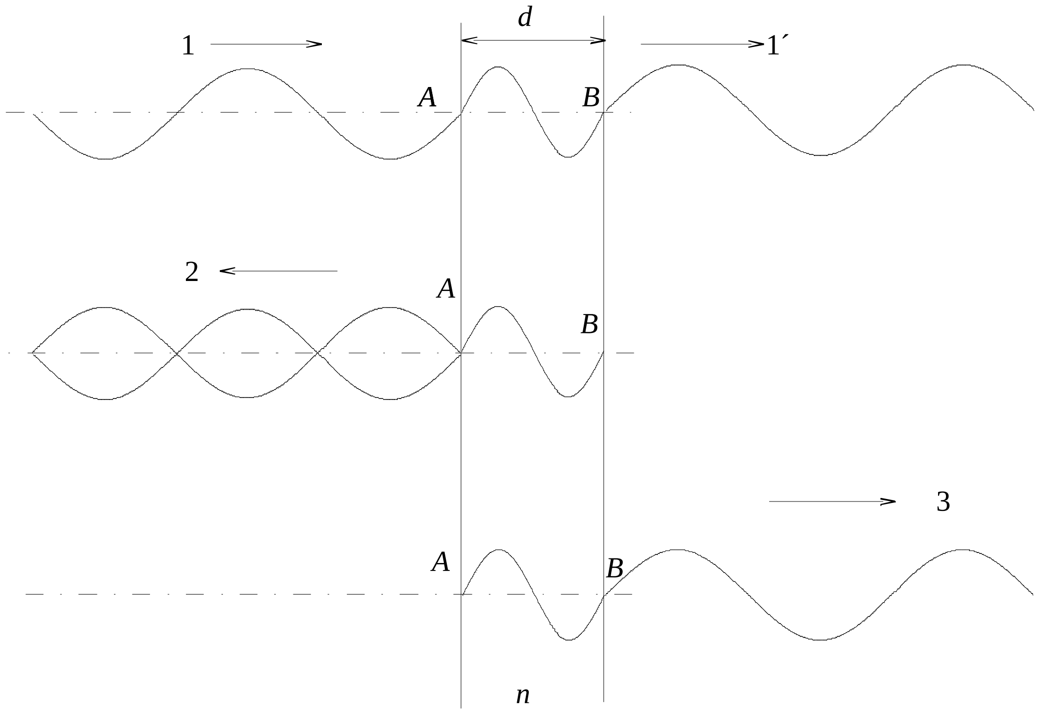
Interference světla

<u>Interference ve světle odraženém:</u>
Tenká vrstva o tloušťce *d*, na ni kolmo dopadá monochromatické světlo 1. Část světla 2 se odrazí v bodě *A* a část 3 v bodě *B*. Část 1´ projde vrstvou:



Skládají se pak vlnění 2 a 3.
Je dokázáno, že světelné vlnění při odrazu na opticky hustším prostředí změní fázi na opačnou (analogické odrazu mech. vlnění na pevném konci), viz část světla 2. Při tomto odrazu vzniká fázový rozdíl odpovídající dráhovému rozdílu $\frac{\lambda}{2}$. Při odrazu na opt. řidším prostředí se fáze nemění.

<u>Interference ve světle prošlém</u>: Monochr. světlo dopadá na rozhraní, část 2 se odrazí. Světlo, které se dostane do prostředí vrstvy, částečně projde (část 1´) a část se v bodě *B* a *A* odrazí. Vrstvou pak projde další část 3.



Skládají se vlnění 1´ a 3.
- aby obecně nastala interference, musí být skládající se vlnění koherentní = stejná frekvence, neproměnný fázový rozdíl
(nejčastěji rozdělíme jedno vlnění na dvě, a ty složíme)

V prostředí o indexu lomu *n* se světlo šíří $n\times$ pomaleji než ve vakuu $\Rightarrow$
doba potřebná na uražení dráhy *d* v látkovém optickém prostředí je stejná jako doba pro uražení dráhy *nd* ve vakuu (vzduchu). Tj. optická dráha v daném prostředí je $l = n \cdot d$

dráhový optický rozdíl v našem případě je: $\Delta l = 2nd$

<u>Interference ve světle odraženém:</u>

podmínka pro zesílení:

$$2nd + \frac{\lambda}{2} = 2k\frac{\lambda}{2}$$

$$\Rightarrow \boxed{2nd = (2k-1)\frac{\lambda}{2}}$$

Dráhový rozdíl musí být lichý násobek půlvln $k = 1, 2, 3, \ldots$

<u>Interference ve světle prošlém:</u>

podmínka pro zesílení:

$$2nd = k\lambda$$

$$\boxed{2nd = 2k\cdot\frac{\lambda}{2}}$$

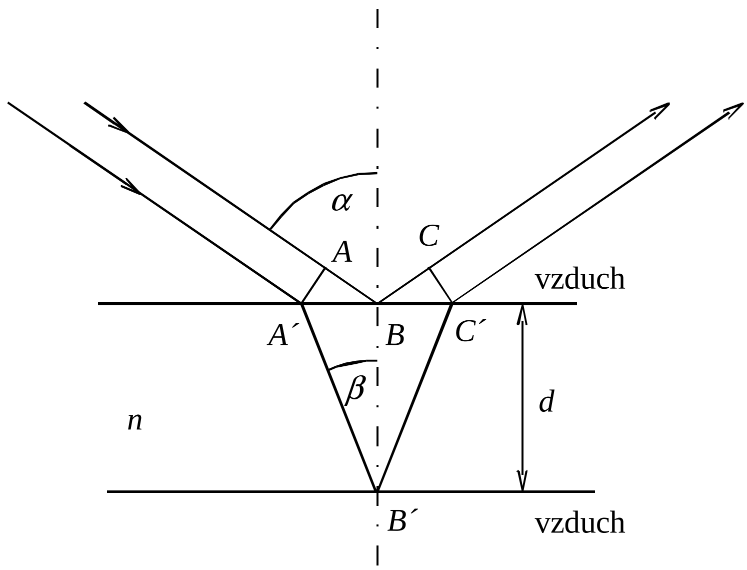
Dráhový rozdíl musí být sudý násobek půlvln $k = 1, 2, 3, \ldots$

Pro zeslabení platí opačné vztahy: interference v odraženém světle … $\boxed{2nd = 2k\cdot\frac{\lambda}{2}}$

v prošlém … $\boxed{2nd = (2k-1)\frac{\lambda}{2}}$

zesílení světla = interferenční maximum
zeslabení světla = interferenční minimum

Výpočet dráhového rozdílu při obecném úhlu dopadu α:



Dráhový rozdíl $\delta = 2n\,|A'B'| - 2|AB|$

$$|AB| = |A'B|\sin\alpha = d\cdot \mathrm{tg}\,\beta\cdot\sin\alpha \qquad \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n$$

$$|A'B'| = \frac{d}{\cos\beta} \qquad \sin\beta = \frac{\sin\alpha}{n}$$

$$\delta = 2n\frac{d}{\cos\beta} - 2d\,\mathrm{tg}\,\beta\cdot\sin\alpha$$

$$\cos\beta = \sqrt{1-\frac{\sin^2\alpha}{n^2}} = \frac{1}{n}\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}$$

$$\delta = 2d\left(\frac{n}{\frac{1}{n}\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}} - \frac{\frac{\sin\alpha}{n}\cdot\sin\alpha}{\frac{1}{n}\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}}\right)$$

$$\delta = 2d\,\frac{n^2-\sin^2\alpha}{\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}}$$

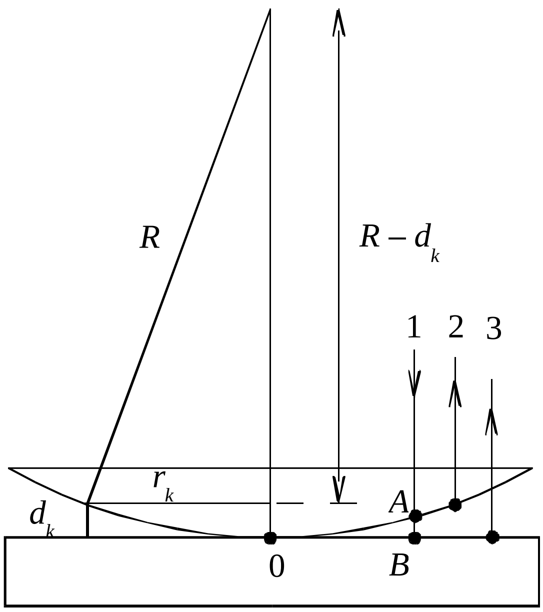
$$\boxed{\delta = 2d\cdot\sqrt{n^2-\sin^2\alpha}}$$

Speciálním případem je kolmý dopad.

Použití interference světla

Měření vlnové délky monochr. světla Newtonovými skly

Newtonova skla: Ploskovypuklá čočka s velkým poloměrem křivosti R a rovná deska. Mezi deskou a vypuklou plochou čočky vznikne tenká vzduchová vrstva. Tloušťka vzduch. vrstvy d_k se od středu O spojitě zvětšuje a místa se stejnou tloušťkou vyplňují kroužky se středem O.



Z obrázku plyne:

$$\left(R-d_k\right)^2+r_k^2=R^2$$

$$R^2-2Rd_k+\underbrace{d_k^2}_{0}+r_k^2=R^2$$

0 (d_k je malé $\Rightarrow d_k{}^2 \to 0$)

$$\boxed{d_k=\frac{r_k^2}{2R}}$$ pro k-tý kroužek o poloměru r_k

Celkový optický dráhový rozdíl je:

počítáme ve vzduchu $\rightarrow$ $2d_k+\dfrac{\lambda}{2}$ $\leftarrow$ odraz na opt. hustším prostředí

<u>Interference ve světle odraženém</u>:

Podmínka pro maximum:

$$\frac{r_k^2}{R}+\frac{\lambda}{2}=2k\cdot\frac{\lambda}{2}$$

$$\boxed{\frac{r_k^2}{R}=\left(2k-1\right)\cdot\frac{\lambda}{2}}$$

$$\Rightarrow \quad \lambda=\frac{2r_k^2}{R\left(2k-1\right)}$$

$k=1,\ 2,\ 3,\ \dots$

… dostaneme soustavu světlých soustředných kroužků se středem v bodě O

Podmínka pro minimum:

$$\frac{r_k^2}{R} + \frac{\lambda}{2} = (2k+1)\cdot\frac{\lambda}{2}$$

$$\boxed{\frac{r_k^2}{R} = 2k\cdot\frac{\lambda}{2}}$$

$$\Rightarrow \quad \lambda = \frac{r_k^2}{k\cdot R} \qquad\qquad k = 1,\ 2,\ 3,\ \ldots$$

V odraženém světle se mezi světlými kroužky objeví tmavé kroužky $\rightarrow$ dohromady dostaneme soustavu soustředných tmavých a světlých kroužků se středem *O*. Uprostřed je tmavý kroužek.

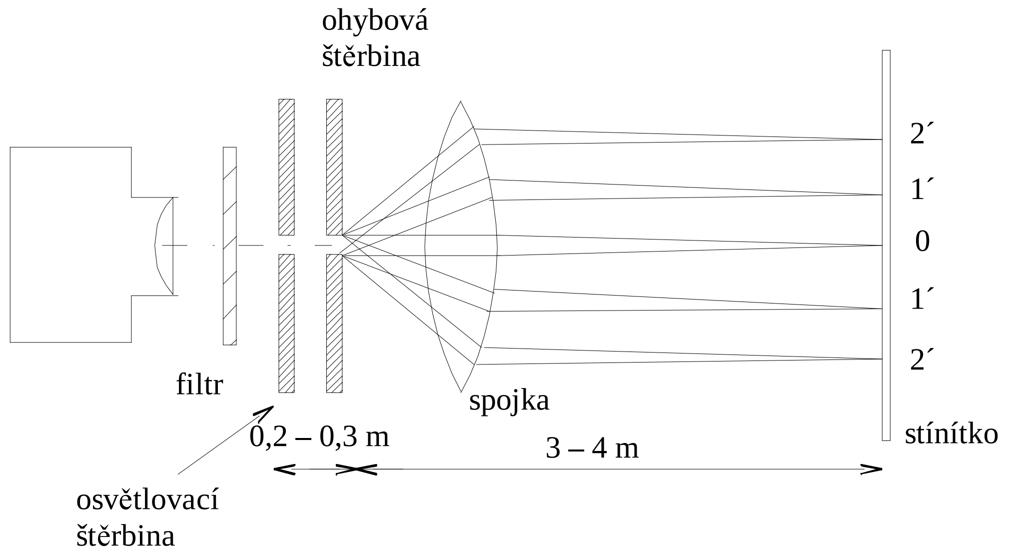
- další užití interference světla: kontrola rovinných a kulových ploch, konstrukce protiodrazových vrstev.

Ohyb světla

nastává, když vlnění narazí na překážku (štěrbinu), jejíž rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou vlnění

ohyb = difrakce

Ohyb světla na štěrbině:



Při zužování štěrbiny se na stínítku v oblasti geometrického stínu objeví světlé a tmavé proužky – interferenční maxima a minima.

Ohyb na vlasu – místo štěrbiny se užije natažený vlas – ve středu geom. stínu vzniká světlý proužek, okolo něj střídavě tmavé a světlé proužky
Ohyb světla na kruhovém otvoru – analogické ohybové jevy jako výše

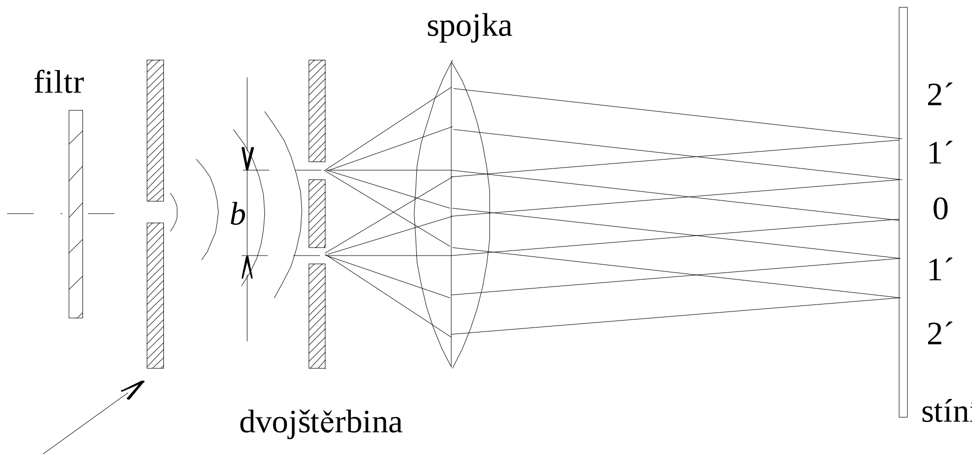
V důsledku ohybu světla se při zobrazování malých předmětů mikroskopem bod zobrazí jako kroužek.
Příliš velké zvětšení tedy neumožní rozlišit detaily (jsou rozmazané).

Rozlišovací schopnost mikroskopu = převrácená hodnota rozlišovací meze *y*
rozlišovací mez je nejmenší vzdálenost dvou bodů, které vidíme odděleně
$y \doteq 0{,}5 \cdot \lambda$

Příklad:
$\lambda = 400$ nm
$y \doteq 0{,}2 \cdot 10^{-3}$ mm
pro elektronový mikroskop
$y \doteq 0{,}35 \cdot 10^{-6}$ mm

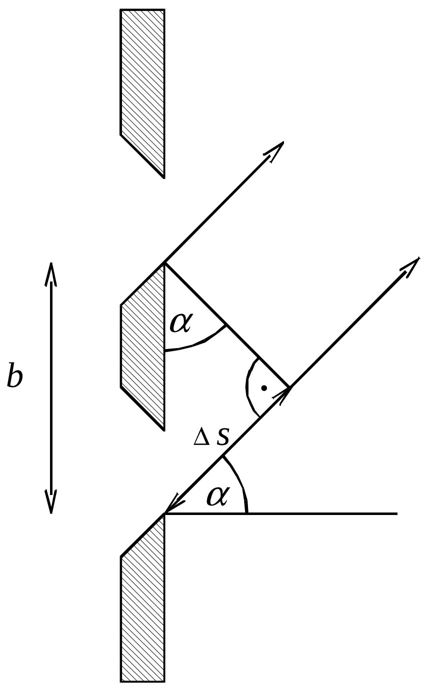
Ohyb světla na dvojštěrbině

R. 1801 Thomas Young: metoda jak získat dva koherentní zdroje světla



Koherentní vlnění postupují od obou štěrbin všemi směry - nastává ohyb a současně interference světla

V bodě *0* zesílení: obě vlnění jsou se stejnou fází



$$\frac{\Delta s}{b} = \sin\alpha$$
$$\Delta s = b\sin\alpha$$

Zesílení: $b \cdot \sin \alpha_k = k \cdot \lambda$ $k = 1, 2, 3, \dots$

- dostaneme interferenční obrazec – maximum nultého řádu (hlavní maximum), je nejintenzivnější, a po stranách střídavě tmavé a světlé proužky – maxima prvého, druhého řádu, atd., jejichž intenzita prudce klesá

Ohyb světla na mřížce

Mřížková konstanta … b
Vzdálenost středů sousedních štěrbin

platí $\Delta s = b \cdot \sin \alpha$ (jako u dvouštěrbiny)

Ohybový obraz na mřížce při osvětlení bílým světlem:

Spektrum na mřížce: nejvíc se láme červené světlo(nejvíce se odchyluje od původního směru)
- šířka spektrálních barev není rovnoměrná (fialová a modrá nejširší)
- čím vyšší řád, tím širší spektrum - spektra vyšších řádů se částečně překrývají $\rightarrow$ na stínítku se v určitých směrech může objevit bílé světlo
- čím vyšší je počet štěrbin, tím je ohybový obrazec intenzivnější a má užší maxima
- jasná a čistá jsou spektra 1. řádu

Uplatnění mřížky: měření λ, ve spektroskopii při zjišťování složení látek

Příklad:
Kolik vrypů na 1 mm má optická mřížka, jestliže světlo o vlnové délce 589,6 nm se ve 2. maximu odchyluje od směru kolmého k rovině mřížky o úhel 43°15´?

$$b \sin \alpha = k \cdot \lambda$$

$$b = \frac{2\lambda}{\sin 43°15'}$$

$$\underline{\underline{\frac{1}{b} = 581\,\mathrm{mm}^{-3}}}$$

Polarizace světla

- světlo je příčné elektromagnetické vlnění, ve kterém vektor intenzity elektrického pole $\vec{E}$ a vektor intenzity mgn. pole $\vec{H}$ kmitá kolmo na směr postupného vlnění. Vektory $\vec{E}$ a $\vec{H}$

jsou vždy na sebe kolmé $\Rightarrow$ pro polarizaci světla stačí vyšetřovat jen chování vektoru $\vec{E}$

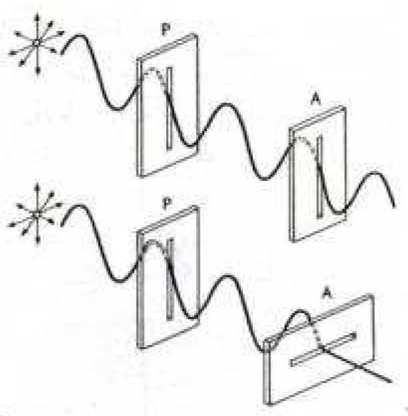
- pokud $\vec{E}$ kmitá v jedné rovině proložené směrem postupu vlnění, světlo je lineárně polarizované
  (někteří živočichové polarizované světlo rozlišují – včely, vosy, mravenci, krabi, někteří ptáci)

- přirozené světlo je nepolarizované, vektor $\vec{E}$ kmitá ve všech rovinách (je vyzařováno velkým množstvím atomů (molekul) zdroje – každý atom (molekula) vysílá polarizované světlo v jiném směru)

Polarizátor: zařízení, které slouží k získávání polarizovaného světla – propouští jen takové vlnění, které kmitá v jednom směru

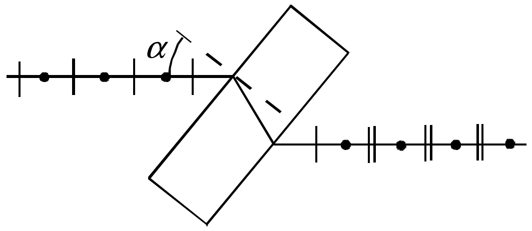
Analyzátor: = polarizátor, jen použit jinak - např. slouží ke zjištění, zda je dané světlo polarizované
- měření stočení polarizační roviny polarizovaného světla opticky aktivní látkou (viz dále)

Polarizátor a analyzátor:



Polarizace světla odrazem
- odražené světlo kmitá kolmo na rovinu dopadu
- úplná polarizace při úhlu dopadu α_B (Brewsterův úhel, pro sklo $\alpha_B \doteq 57°$)

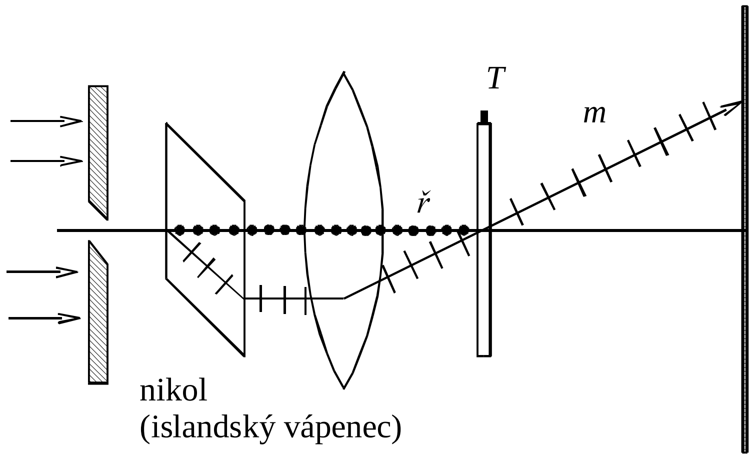
Polarizace lomem
- získáme částečně polarizované světlo



Polarizace dvojlomem

izotropní prostředí: rychlost světla ve všech směrech stejná

anizotropní prostředí: světlo se nešíří ve všech směrech stejně



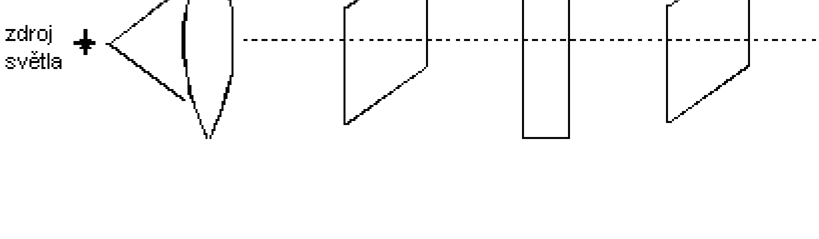
dvojlom: základní vlastnost anizotropních krystalů (ex. jeden směr, tzv. optická osa krystalu, ve kterém dvojlom nenastává)

Anizotropní krystal (např. islandský vápenec) umístíme tak, že světlo dopadá kolmo na jeho stěnu a současně směr šíření světla není rovnoběžný s optickou osou krystalu.

Pak nastane dvojlom a dostaneme dva paprsky:
- paprsek řádný – splňuje zákon lomu (postupuje dále v původním směru)
- paprsek mimořádný – při kolmém dopadu se láme

Světlo řádného i mimořádného paprsku získané dvojlomem je úplně lineárně polarizované, vektory $\vec{E}$ řádného a mimořádného paprsku jsou v navzájem kolmých rovinách.

Využití:
- zkoumání průhledných látek v polarizovaném světle:



- opticky aktivní látky - stáčí rovinu polarizovaného světla
    - pravotočivé (roztok cukru)
    - levotočivé (křemen- levo- i pravotočivý)
  - měří se tak koncentrace cukrů, bílkovin, olejů atd.

- umělá anizotropie - způsobená namáháním průhledné izotropní látky (plexisklo atd.)
  $\rightarrow$ fotopružnost