Vlnová optika

Ing. Stanislav Jakoubek

Přehled studijních materiálů

Číslo DUMu	Název DUMu
1	Základní pojmy
2	Šíření světla
3	Frekvence a vlnová délka světla
4	Jiné druhy záření
5	Jevy na rozhraní dvou prostředí
6	Rozklad světla a barevné vnímání
7	Interferenční jevy
8	Ohybové jevy
9	Polarizace světla

Základní pojmy

Ing. Stanislav Jakoubek

Úvodní pojmy

- Optika: nauka o světelných jevech a jejich zákonitostech
- Světlo vzniká ve **světelném zdroji** – v něm probíhají energetické změny provázené vyzařováním energie do prostoru
- Světlo je hmotné podstaty – má svoji **energii**
- Energii může odevzdat oku (a způsobit zrakový vjem) nebo přístroji (detektoru), který ji přemění na jinou energii (fotoaparát, kamera, solární článek, …)

Elektromagnetické vlnění

vlnová délka $\frac{\lambda}{m}$	10^{-15}	10^{-14}	10^{-13}	10^{-12}	10^{-11}	10^{-10}	10^{-9}	10^{-8}	10^{-7}	10^{-6}	10^{-5}	10^{-4}	10^{-3}	10^{-2}	10^{-1}	10^{0}	10^{1}	10^{2}	10^{3}	10^{4}	10^{5}	10^{6}	10^{7}	10^{8}
rozdělení vlnění				záření γ				ultra-fialové				světlo								infra-červené				
								optické záření																
				rentgenové záření																			rádiové vlny	
frekvence $\frac{f}{Hz}$	10^{23}	10^{22}	10^{21}	10^{20}	10^{19}	10^{18}	10^{17}	10^{16}	10^{15}	10^{14}	10^{13}	10^{12}	10^{11}	10^{10}	10^{9}	10^{8}	10^{7}	10^{6}	10^{5}	10^{4}	10^{3}	10^{2}	10^{1}	
společné vlastnosti	rychlost šíření ve vakuu $3 \cdot 10^{8}\,m\,s^{-1}$															interference, ohyb, polarizace								
příklady zdrojů				jaderné přeměny				Slunce, elektrické výboje																
				rentgenky																elektrické kmitavé obvody				

Světlo

- Elektromagnetické vlnění s frekvencemi od $3{,}8.10^{14}$ Hz do $7{,}7.10^{14}$Hz
- Elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami od 390 nm do 790 nm
- Poznámka: v různých učebnicích se mohou krajní meze mírně lišit (například od 400 nm do 800 nm)

Dělení světla

- Monochromatické – o určité jedné konkrétní frekvenci či vlnové délce
- Chromatické = složené – složeno z více vlnových délek; příklad: denní bílé světlo

Optické prostředí

- Světlo se šíří od zdroje prostředím
- **Prostředí průhledné** – světlo prochází prostředím v podstatě beze změn; vidíme skrz; např. sklo
- **Prostředí průsvitné** – světlo prochází, ale nevidíme (mléčné sklo, mléko rozmíchané ve vodě,…)
- **Prostředí neprůhledné** – světlo jím neproniká, ale jen se od něj odráží

Dvojí povaha světla

- Elektromagnetické vlnění daných frekvencí (**vlnová povaha**)
- Částice světla – fotony (**částicová povaha**)
- Ve skutečnosti: „něco mezi tím“

Literatura

- [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.

Šíření světla

Ing. Stanislav Jakoubek

Šíření světelných vln

- Světlo se šíří od zdroje ve formě světelných vln
- Může se šířit nejen látkami, ale i ve vakuu (na rozdíl od mechanického vlnění)
- Světlo se šíří od zdroje rychlostí světla
- Rozdělujeme rychlost světla ve vakuu a rychlost světla v látkovém prostředí (tam je menší)

Poznámky k rychlosti světla

- Že je rychlost světla ve vakuu veliká, to se vědělo vždycky (až do 17. století byla považována za nekonečnou)
- S rozvojem metod pozorování byla snaha změřit její velikost

Galileo Galilei – neúspěšný pokus

- 1600

Olaf Roemer

- Dánský astronom; 1675
- Pozoroval nepravidelnosti v časech počátků zatmění Jupiterových měsíců
- Zjistil: cca $2{,}2.10^8$ $m.s^{-1}$
- Na tehdejší možnosti neuvěřitelný výsledek!

Další experimenty

- Armand Fizeau (1849)– první měření rychlosti světla na Zemi (tedy ne astronomickými metodami)
- Leon Foucault – metoda rotujícího zrcadla
- …
- Metoda radaru, metoda dutin rezonátoru, laserová metoda

- Hodnota se neustále zpřesňovala

Dnešní hodnota rychlosti světla (ve vakuu)

$$c = 2{,}99792458.10^{8}\, m.s^{-1}$$

Pro naše výpočty: $c \doteq 3.10^{8}\, m.s^{-1}$

Poznámka: touto rychlostí se šíří ve vakuu elektromagnetické vlnění libovolné frekvence.

Šíření světla v látkovém prostředí

- V látkovém prostředí je rychlost světla **vždy** menší, než ve vakuu
- Pomocí rychlosti světla v dané látce zavádíme veličinu **index lomu**

Relativní index lomu

- Mějme dvě látková prostředí
- V prvním se světlo šíří rychlostí v_1
- Ve druhém se šíří rychlostí v_2
- Relativní index lomu 2. prostředí vůči 1. prostředí:

$$\boxed{n_{21} = \frac{v_1}{v_2}}$$

Poznámka: relativní index lomu závisí na vlastnostech obou látek. Potřebujeme veličinu, která se dá přiřadit k dané konkrétní látce.

Absolutní index lomu

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

c … rychlost světla ve vakuu
v …rychlost světla v dané látce

Poznámky:

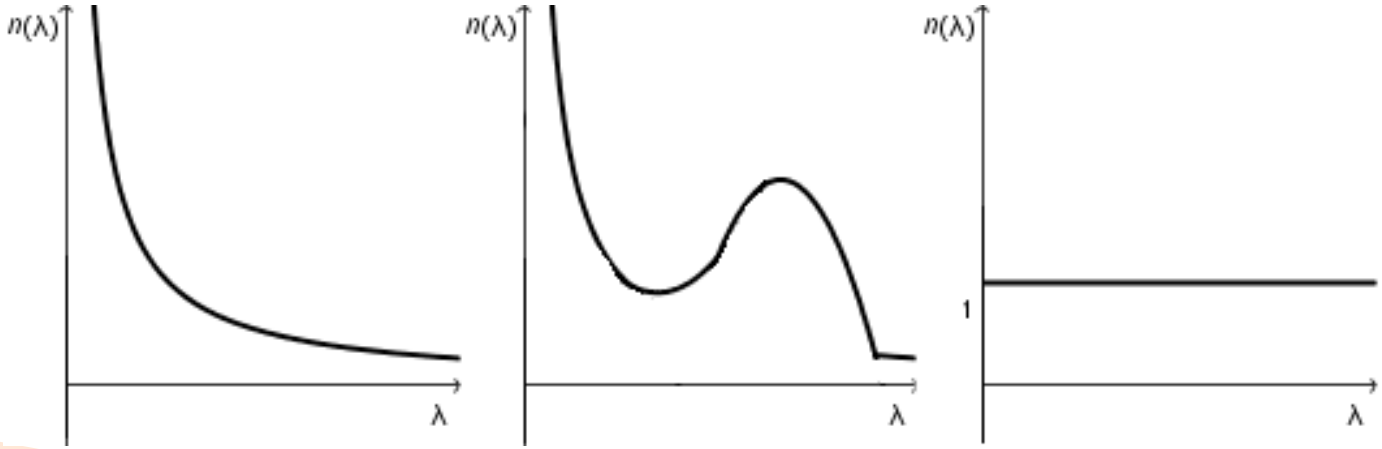
- Udává, kolikrát je rychlost světla v dané látce menší, než rychlost světla ve vakuu
- vždy $n \geq 1$
- S indexem lomu souvisí tzv. **optická hustota látky**. Čím má index lomu větší, tím je opticky hustší.

Disperze prostředí

- Závislost indexu lomu na vlnové délce
- Pro každé prostředí lze naměřit **disperzní křivku lomu**
- Je pro každé prostředí charakteristická

Dělení prostředí dle disperze

- **Normální disperzní prostředí** – index lomu s rostoucí vlnovou délkou klesá
- **Anomální disperzní prostředí** – index lomu s rostoucí vlnovou délkou roste
- **Prostředí bez disperze** – index lomu na vlnové délce nezávisí



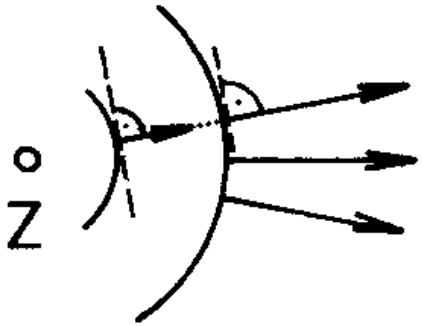
Absolutní index lomu některých látek (pro λ=589,3 nm)

Látka	Absolutní index lomu
Vakuum	1
Vzduch (za normálního tlaku)	1,00026
Voda	1,33
Led	1,31
Křemenné sklo	1,46
Korunové sklo lehké	1,52
Flintové sklo těžké	1,75
Kuchyňská sůl	1,54
Diamant	2,42

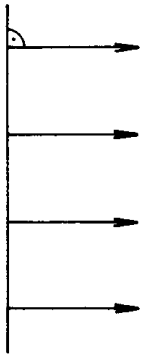
Šíření světla

- Izotropní prostředí – světlo se v něm šíří všemi směry stejně rychle

Kulová vlnoplocha



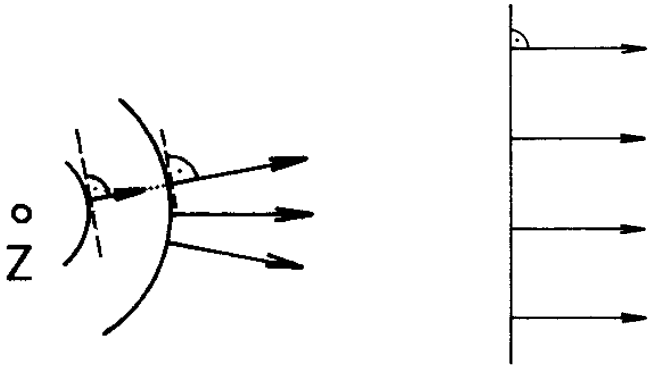
Rovinná vlnoplocha



Při velké vzdálenosti od zdroje je zakřivení zanedbatelné.

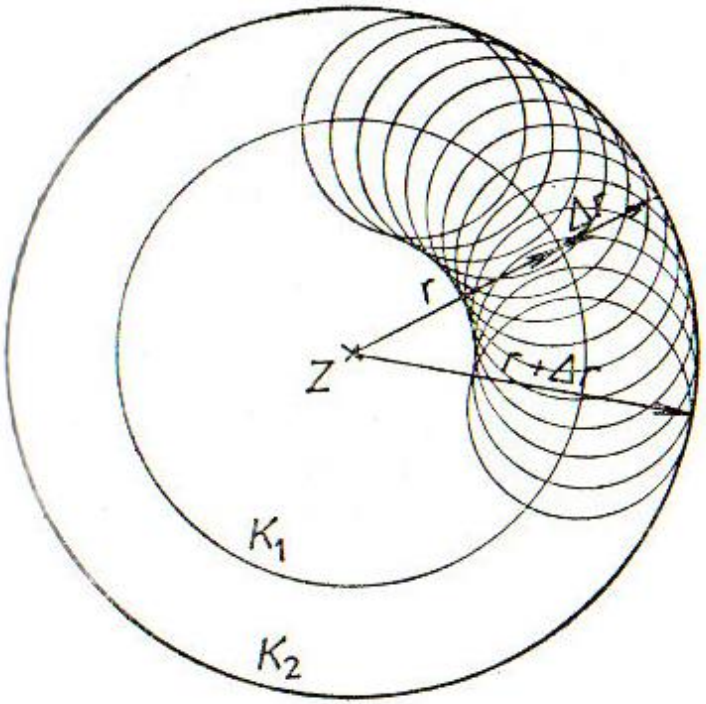
Světelný paprsek

- Používáme ho pro názornost
- Paprsek má vždy **směr normály** (kolmice) **k vlnoploše**
- Představu můžeme realizovat úzkým svazkem světla vycházejícího ze zdroje
- Dobrý model pro tzv. paprskovou (geometrickou) optiku



Huygensův princip – připomenutí

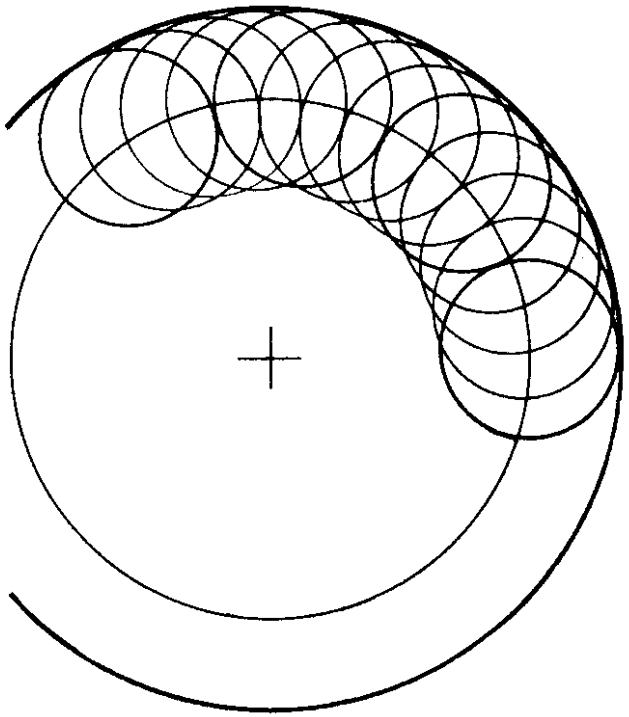
- Známe z výkladu o mechanickém vlnění



- Každý bod vlnoplochy K_1 je zdrojem elementárního vlnění
- Za čas Δt vytvoří elementární vlnoplochu o poloměru $\Delta r = v.\Delta t$
- Všechna vlnění z vlnoplochy K_1 jsou koherentní $\Rightarrow$ interferují
- Interferencí se vyruší elementární vlnění ve všech bodech s výjimkou bodů na vnější obalové ploše
- Vnější obalová plocha vytvoří vlnoplochu K_2.

Huygensův princip – šíření vlnoploch

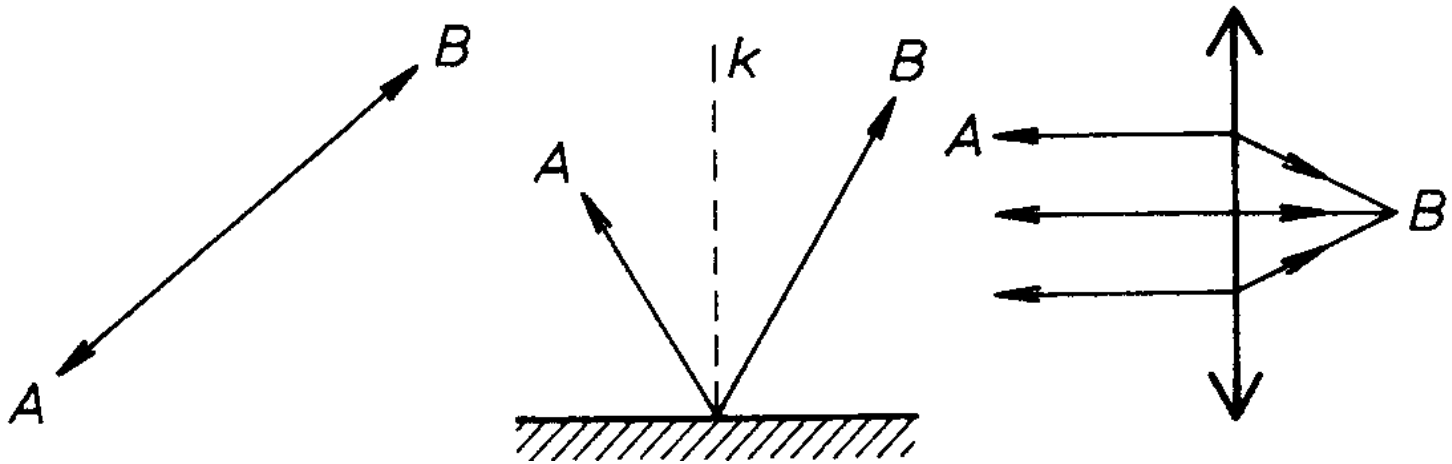
kulová



rovinná

Zákon záměnnosti chodu paprsků

- Šíří-li se světlo z bodu A do bodu B po jisté trajektorii, šířilo by se z bodu B do bodu A po té samé trajektorii



Příklad

- Určete rychlost světla ve vodě.

$$c = 3.10^8 m.s^{-1}, n = 1{,}33; v = ?$$

$$n = \frac{c}{v} \Rightarrow v = \frac{c}{n} = \frac{3.10^8}{1{,}33} m.s^{-1} \doteq 2{,}26.10^8 m.s^{-1}$$

Příklad

- Jakou rychlostí se šíří světlo v prostředí s absolutním indexem lomu n=0,9?

$$n = 0{,}9, c = 3.10^8 m.s^{-1}; v = ?$$

Z definice: $n \geq 1 \Rightarrow$ Takové prostředí neexistuje!

Příklad

- Jak dlouho trvá světlu cesta ze Slunce na Zem?

$$s = 1AU \doteq 150000000km, c = 3.10^8 m.s^{-1}; t = ?$$

$$t = \frac{s}{c} = \frac{150000000000}{3.10^8} s = 500s = 8\min 20s$$

Literatura

- [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.
- [2] BEDNAŘÍK, Milan; KUNZOVÁ, Vlasta; SVOBODA, Emanuel. *Fyzika II pro studijní obory SOU*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, n.p., 1986, ISBN 14-209-86.
- [3] TECHMANIA.CZ. *techmania.cz* [online]. [cit. 15.4.2014]. Dostupný na WWW: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74726f6d61676e657469636be920766c6e79h&key=692

Frekvence a vlnová délka světla

Ing. Stanislav Jakoubek

Frekvence

- Patří mezi nejdůležitější charakteristiky vlnění obecně (a tedy i světla)
- Na frekvenci závisí vlastnosti světla a jeho účinky
- Důležitá vlastnost: frekvence se při průchodu světla látkovým prostředím nemění (na rozdíl od rychlosti a vlnové délky!!)

Frekvence, rychlost, vlnová délka

- Vztah mezi nimi známe, protože je stejný pro libovolné vlnění
- Vlnová délka světla je při konstantní rychlosti nepřímo úměrná jeho frekvenci

$$\boxed{\lambda = \frac{v}{f}} \quad \Rightarrow f = \frac{v}{\lambda} \Rightarrow v = \lambda f$$

Poznámka pro vakuum (a přibližně pro vzduch):

$$\boxed{\lambda = \frac{c}{f}}$$

Příklad

- Určete interval vlnové délky světla ve vakuu.

$$c = 3.10^8\, m.s^{-1},\ f_{\min} = 3{,}8.10^{14}\, Hz,\ f_{\max} = 7{,}7.10^{14}\, Hz;\ \lambda_{\min}, \lambda_{\max} = ?$$

$$\lambda_{\min} = \frac{c}{f_{\min}} = \frac{3.10^8}{3{,}8.10^{14}}\, m \doteq 7{,}89.10^{-7}\, m = 789\, nm \doteq 800\, nm$$

$$\lambda_{\max} = \frac{c}{f_{\max}} = \frac{3.10^8}{7{,}7.10^{14}}\, m \doteq 3{,}9.10^{-7}\, m = 390\, nm \doteq 400\, nm$$

Příklad

- Určete interval vlnových délek světla ve vodě.

$$n = 1{,}33,\ f_{\min} = 3{,}8.10^{14}\,Hz,\ f_{\max} = 7{,}7.10^{14}\,Hz;\ \lambda_{\min}, \lambda_{\max} = ?$$

$$\lambda_{\min} = \frac{v}{f_{\min}} = \frac{\frac{c}{n}}{f_{\min}} = \frac{c}{nf_{\min}} = \frac{3.10^{8}}{1{,}33.3{,}8.10^{14}}\,m \doteq 5{,}94.10^{-7}\,m = 594nm$$

$$\lambda_{\max} = \frac{v}{f_{\max}} = \frac{\frac{c}{n}}{f_{\max}} = \frac{c}{nf_{\max}} = \frac{3.10^{8}}{1{,}33.7{,}7.10^{14}}\,m \doteq 2{,}93.10^{-7}\,m = 293nm$$

Poznámka

- (Už víme) Jestliže se ve vakuu světlo šíří rychlostí *c*, pak v látce s absolutním indexem lomu *n* se šíří rychlostí

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

- V témže poměru se zmenšují i vlnové délky (λ_0 – vlnové délka ve vakuu)

$$\boxed{\lambda = \frac{\lambda_0}{n}}$$

Literatura

- [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.

Jiné druhy záření

Ing. Stanislav Jakoubek

Druhy záření

- Víme: viditelné světlo je elektromagnetické záření z určitého intervalu vlnových délek
- Existují záření mimo viditelné světlo
- Infračervené záření – větší vlnové délky (a tedy menší frekvence), než viditelné světlo
- Ultrafialové záření – kratší vlnové délky (a tedy větší frekvence), než viditelné světlo
- Rentgenové záření – velmi krátké vlnové délky

Infračervené záření

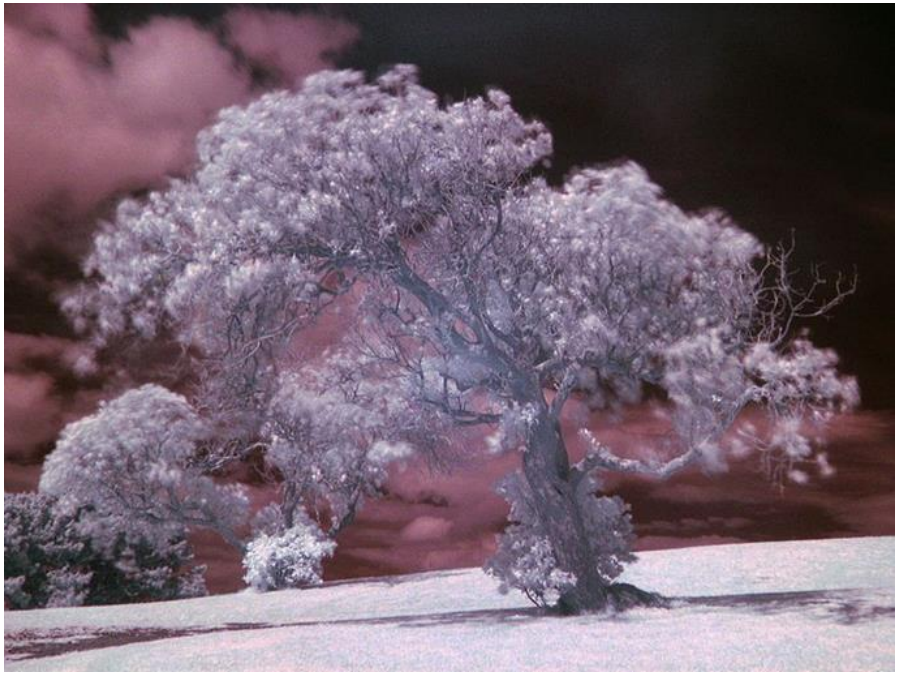
- λ v intervalu 800 nm až 400000 nm
- Okem ho nevnímáme
- Má výrazné tepelné účinky
- Působí na speciálně upravenou fotografickou emulzi (na normální ne), lze fotografovat v noci, v mlze, …
- CCD snímače jsou na něj citlivé, vhodné pro IR fotografie pro dokumentární, vědecké i umělecké účely

Infračervená fotografie

- Infračervený filtr – propouští jen IR záření, ostatní pohltí (IR fotografie jsou tmavé)
- Vhodné pro krajinářskou fotografii – díky tmavosti jsou potřeba dlouhé (několikavteřinové) expozice
- Barvy na IR fotografii jsou falešné; o barvě má smysl se bavit jen ve viditelném světle

Infračervená fotka – ukázka 1

Viditelné záření



Infračervené záření

Infračervená fotka – ukázka 2

Ultrafialové záření

- λ v intervalu 1 nm až 400 nm
- Působí na živé organismy (má fyziologické účinky)
- Ničí mikroorganismy
- Pigmentová vrstva v pokožce – brání UV záření pronikat do hlubších vrstev těla
- Značně pohlcováno různými látkami (například sklem; proto se za oknem neopálíte, proto nosíte sluneční brýle, …)
- Ionizuje plyn, …

Rozdělení UV záření

Název	Zkratka	Vlnová délka
Blízké	NUV	400 nm – 200 nm
Dlouhovlnné, „černé světlo“	UVA	400 nm – 320 nm
Středněvlnné	UVB	320 nm – 280 nm
Krátkovlnné, „desinfekční“	UVC	Pod 280 nm
Hluboké ultrafialové	DUV	Pod 300 nm
Daleké, „vzduchoprázdné“	FUV, VUV	200 nm – 10 nm
Extrémní , „hluboké“	EUV, XUV	31 nm – 1 nm

Poznámky

- 99 % UV záření dopadajícího na Zem spadá do oblasti UVA
- UVB záření – je značně pohlcováno ozónem ve stratosféře; má velmi negativní fyziologické účinky (schopnost rozkládat nebo narušovat bílkoviny a jiné životně důležité organické sloučeniny) s vážnými následky pro metabolismus; je-li poškozena DNA, může vést ke vzniku rakoviny;
- Má škodlivé účinky na zrak (schopnost poničit tyčinky a čípky, gangliové buňky a nervová zakončení v rohovce)

Poznámky – opalovací krém

- Ochranný faktor *SPF* (Sun Protection Factor)– má udávat celkovou míru ochrany před UV zářením při nanesení krému v množství $2 mg.cm^{-2}$
- Je to povinný údaj
- Fakticky udává jen míru ochrany před UVB zářením
- Ochrana před UVA je často zanedbávána (a na obalech neuváděna), ačkoliv dlouhodobě škodí také; je-li uvedena, má zkratku *UVA PF*

Jaký volit ochranný faktor?

- Dobu, kterou chceme strávit při opalování podělíme dobou, během které se při opalování bez ochrany na naší pokožce ještě neprojeví známky začervenávání. Tento podíl udává vhodné SPF.

- Doba, kterou chci strávit při opalování: 120 minut.
- Doba, při které se ještě neprojeví začervenávání, je 15 minut.
- SPF = 120 minut / 15 minut = 8
- Měl(a) bych použít opalovací krém s ochranným faktorem 8 nebo více.

Sluneční brýle

- Jsou-li ze skla, ochrana proti UV záření je dostatečná
- Jsou-li z plastu, je nutné aby plast obsahoval UV filtr
- Jeho přidání do materiálu je natolik levné (a proto se tam běžně dává), že i levné brýle ze stánku vás proti UV záření ochrání
- Parametry: propustnost světla (5-30 %), propustnost UVA (0 – 3,03 %) a propustnost UVB (0,15 – 1,82 %) (dle [6])

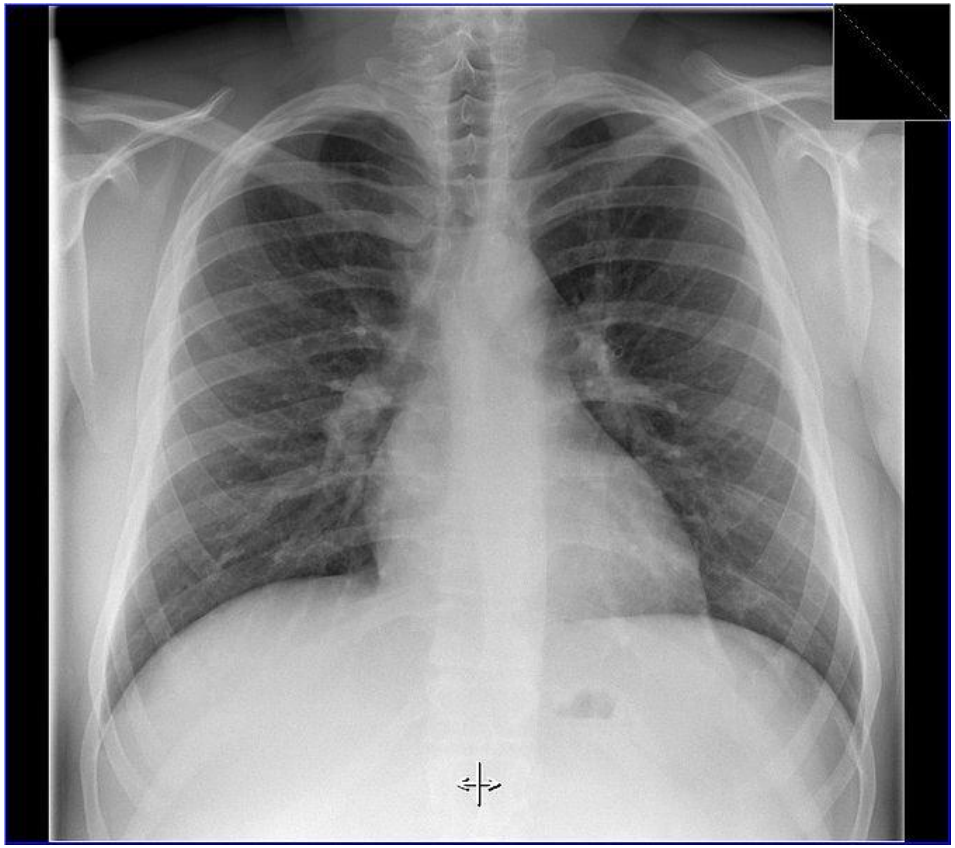
Rentgenové záření

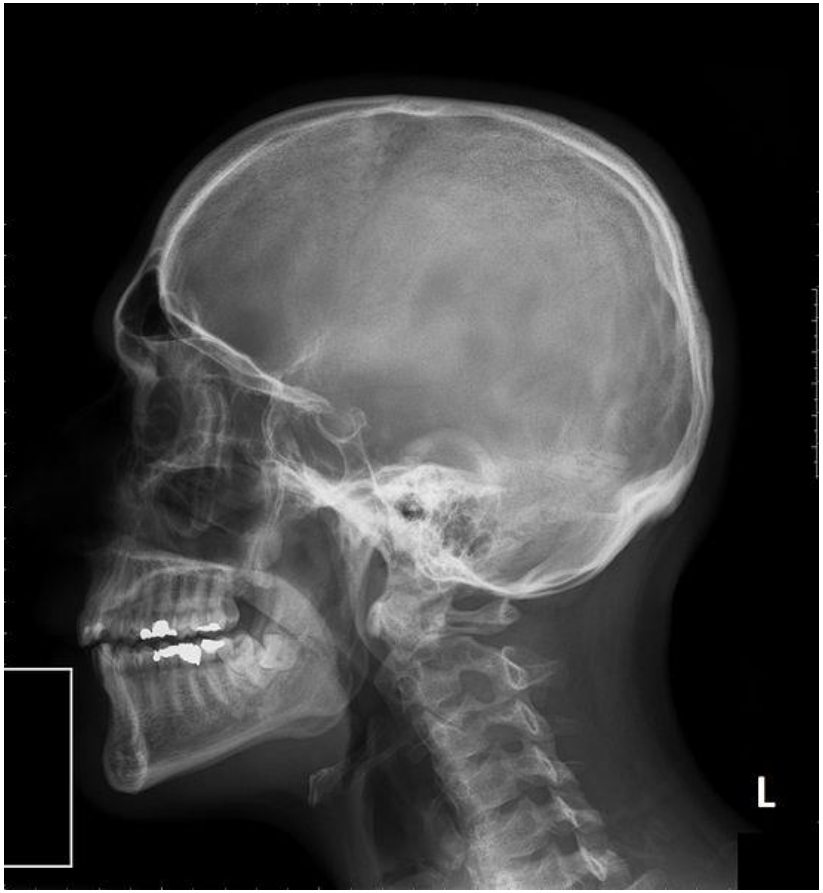
- λ v intervalu 10^{-8} až 10^{-11} m
- Má silné ionizační účinky
- Proniká částečně všemi látkami, je jimi zároveň pohlcováno
- Různé pronikavosti tohoto záření se využívá například v rentgenové defektoskopii (v průmyslu), v rentgenové diagnostice (v lékařství), atd.

Rentgenová diagnostika

- Kosti obsahují prvky s větším protonovým číslem, víc pohlcují RTG záření, na fotografickém negativu jsou světlejší
- Měkké tkáně (třeba svaly) – přesně naopak, jsou tedy na negativu tmavší

Rentgenové snímky





Jeden z prvních rentgenových snímků

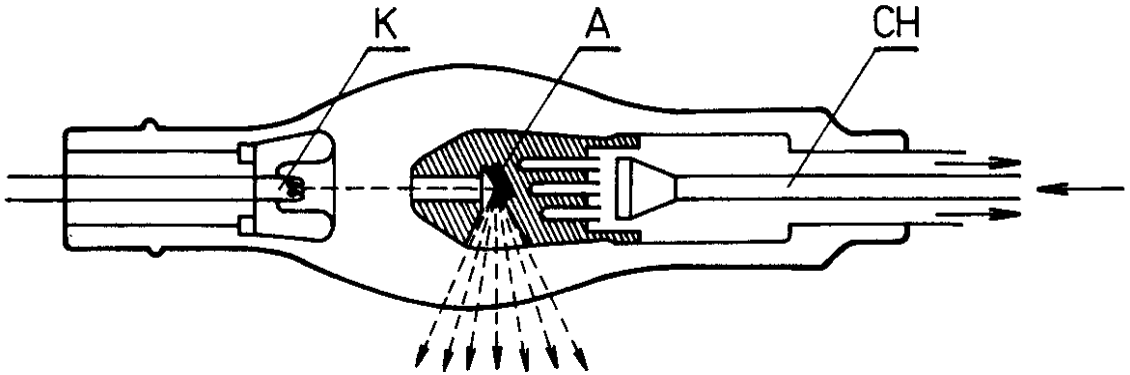
Ruka manželky
Wilhelma Rőntgena
(pořízeno 22.12.1895)

Wilhelm Conrad Rőntgen (1845 – 1923)

- Německý fyzik
- Velmi talentovaný experimentátor
- Za objev rőntgenového záření mu byla v roce 1901 udělena vůbec první Nobelova cena za fyziku

Zdroj rentgenového záření

- Vakuová trubice zvaná **rentgenka**



K – katoda
A – anoda
CH – chlazení

Elektrony emitované ze žhavené katody jsou silným elektrickým polem (10–400 kV) urychlovány. Při dopadu na anodu jsou brzděny, 99 % kinetické energie se změní v teplo a 1 % se změní na energii rentgenového záření.

Poznámky

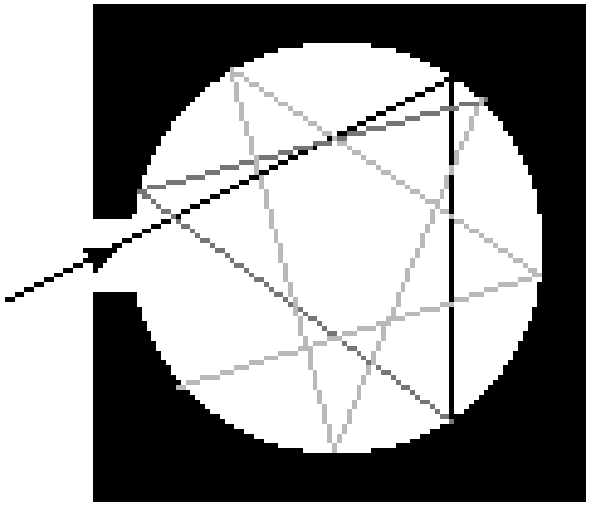
- Látky s velkým protonovým číslem RTG záření pohlcují více, proto se používají jako ochrana proti jeho účinkům (například olověné desky)
- Pohltivost RTG záření závisí také na jeho frekvenci (**měkké** o větších vlnových délkách je více pohlcováno a **tvrdé** o kratších vlnových délkách je méně pohlcováno, tedy lépe prochází materiály)
- Měkké – využívá se v rentgenové terapii
- Tvrdé – defektoskopie, diagnostika

Tepelné záření

- Vzniká při termickém pohybu částic látek všech skupenství
- Je to elektromagnetické záření různých frekvencí
- Rozdělení energie ve vyzařovaném spektru závisí na teplotě, na chemickém složení a na struktuře tělesa

Absolutně černé těleso

- Je to model, tzn. neexistuje, ale různá tělesa se mu více či méně přibližují
- Pohlcuje všechno dopadající záření a potom ji vysílá ve formě tepelného záření



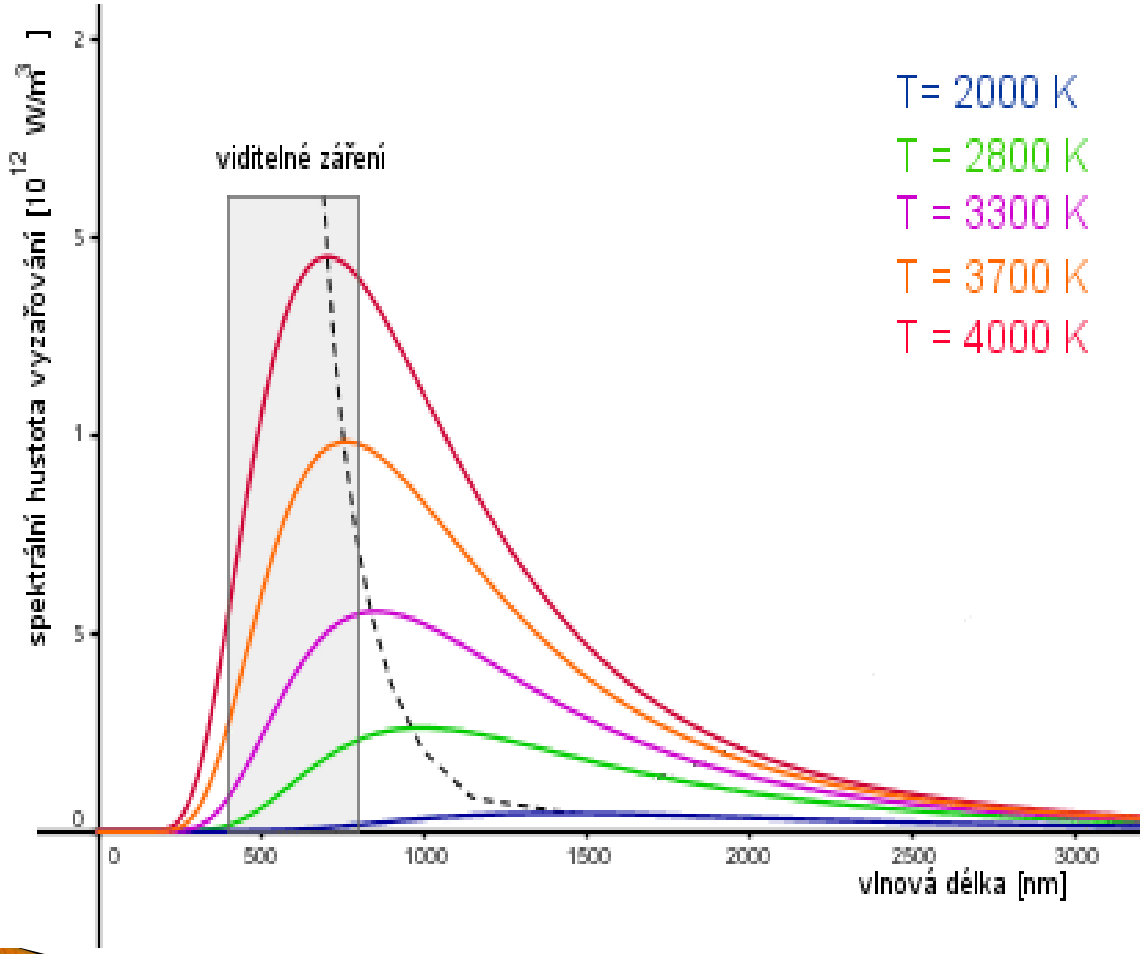
Wienův posunovací zákon

- Těleso tepelně září na všech vlnových délkách
- Na různých vlnových délkách vyzařuje různě
- Zákon udává, na jaké vlnové délce září nejvíce

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

$$b = 2{,}8977685.10^{-3} m.K \doteq 2{,}9.10^{-3} m.K$$

Wienův posunovací zákon – graf



S rostoucí teplotou se vyzařované maximum **posunuje** ke kratším vlnovým délkám.

Stefanův – Boltzmannův zákon

- Intenzita vyzařování absolutně černého tělesa (a tedy vyzářená energie) se zvětšuje se čtvrtou mocninou termodynamické teploty.

$$M_e = \sigma T^4$$

$$\sigma \doteq 5{,}67.10^{-8} W.m^{-2}.K^{-4}$$

Poznámka: σ – Stefanova – Boltzmannova konstanta:

Příklad

- Určete maximální vlnovou délku, na které vyzařuje člověk s tělesnou teplotou 37°C.

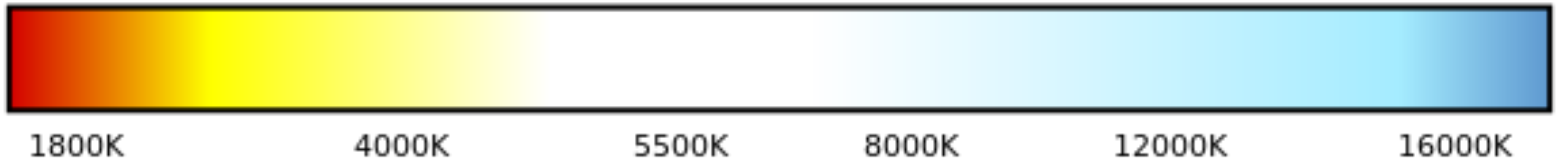
$$t = 37°C \Rightarrow T = 310{,}15K, b \doteq 2{,}9.10^{-3} mK; \lambda_{\max} = ?$$

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T} = \frac{2{,}9.10^{-3}}{310{,}15} m \doteq 9{,}35.10^{-6} m = 9{,}35 \mu m = 9350 nm$$

Poznámka: infračervené záření; kamery pro noční vidění

Využití – barevná teplota ve fotografii

- Červená – 1300K, světle červená – 3000K, oranžová – 4500K, žlutá – 6000K, bílá – 10000K, modrobílá – 25000K
- Funkce vyvážení bílé – závisí právě na barevné teplotě (fotky mají nádech podle zdroje osvětlení)
- Lze nastavit ve foťáku a nebo následná úprava v editoru (funkce Upravit teplotu barev)



Zdroje světla a jejich barevné teploty

Zdroj	Barevná teplota	zdroj	Barevná teplota
Svíčka	1200 K	Jasné polední světlo	6000 K
Žárovka, Slunce při východu a západu	2800 K	Standardizované denní světlo	6500 K
Studiové osvětlení	3000 K	Lehce zamračená obloha	7000 K
Obvyklé denní světlo, zářivky	5000 K	Oblačno, mlhavo (mraky zabarvují světlo do modra)	8000 K
Fotografické blesky	5500 K	Silně zamračená obloha; modré nebe bez Slunce	10 000 K

Literatura

- [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.
- [2] SCHWEN, Daniel. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 10.6.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Tree_example_IR.jpg
- [3] AUTOR NEUVEDEN. *infrafotografie.estranky.cz* [online]. [cit. 10.6.2013]. Dostupný na WWW: http://www.infrafotografie.estranky.cz/fotoalbum/krajinky/
- [4] AUTOR NEUVEDEN. *Ultrafialové záření* [online]. [cit. 10.6.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Ultrafialov%C3%A9_z%C3%A1%C5%99en%C3%AD#UVA
- [5] AUTOR NEUVEDEN. *Opalování, SPF* [online]. [cit. 10.6.2013]. Dostupný na WWW: http://www.syncare.cz/poradna/opalovani-mereni-spf-fototyp-kuze/
- [6] ŠVIDRNOCH, Roman. *Vyhovující UV filtr mají i levné brýle* [online]. [cit. 10.6.2013]. Dostupný na WWW: http://data.idnes.cz/soubory/test/A060602_PLZ_BRYLE2.HTM
- [7] VENDIŠ, Tomáš. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 10.6.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Lat_lebka.jpg
- [8] VENDIŠ, Tomáš. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 10.6.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Rtgplic.jpg
- [9] RŐNTGEN, Wilhelm. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 10.6.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:X-ray_by_Wilhelm_R%C3%B6ntgen_of_Albert_von_K%C3%B6lliker%27s_hand_-_18960123-01.jpg
- [10] AUTOR NEUVEDEN. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 10.6.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Wilhelm_Conrad_R%C3%B6ntgen_(1845--1923).jpg
- [11] REICHL, Jaroslav. *fyzika.jreichl.com* [online]. [cit. 10.6.2013]. Dostupný na WWW: http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/538-zareni-absolutne-cerneho-telesa
- [12] TECHMANIA. *techmania.cz/edutorium* [online]. [cit. 10.6.2013]. Dostupný na WWW: http://www.techmania.cz/edutorium/clanky.php?key=1051
- [13] HOŁEK. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 10.6.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Color_temperature.svg

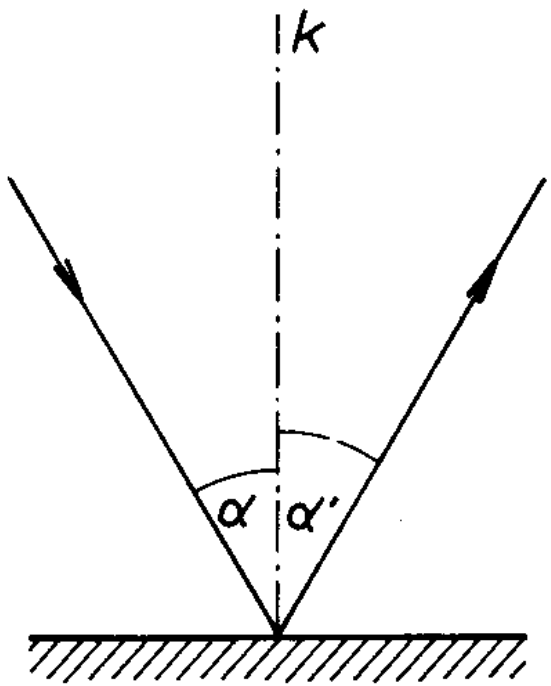
Jevy na rozhraní dvou prostředí

Ing. Stanislav Jakoubek

K jakým jevům dochází?

- Světlo dopadá na rozhraní dvou izotropních prostředí
- V tenké vrstvě těsně pod rozhraním se rozkmitají částice, vznikají elementární vlnění
- Ta se podle Huygensova principu skládají a vzniká odražené vlnění a vlnění postupující dále za rozhraní
- Dochází k: **odrazu** a **lomu**
- Poznámka: část vlnění je látkou **pohlceno**
- V různé míře vždy nastanou tyto tři jevy

Odraz světla – zákon odrazu

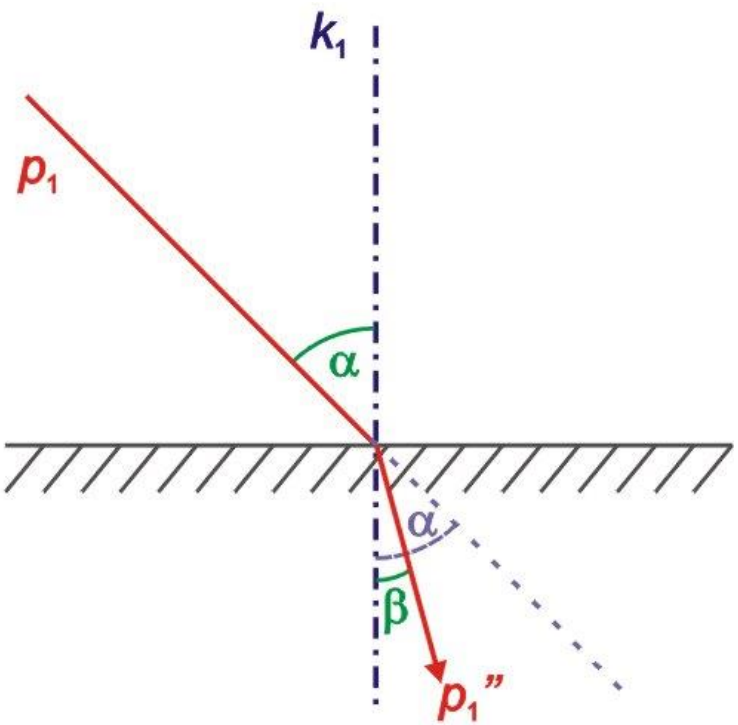


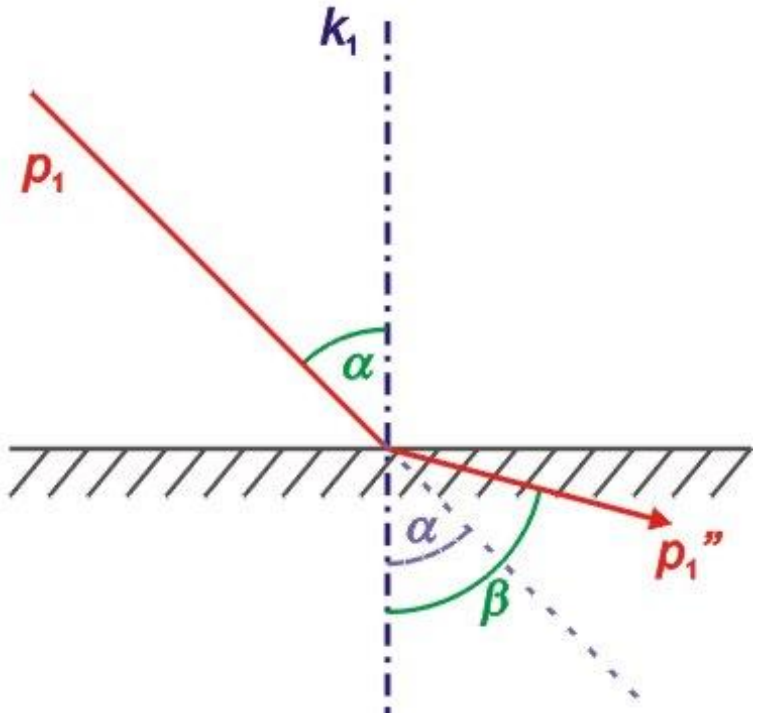
- V místě dopadu vztyčíme kolmici dopadu *k*.
- α – úhel dopadu
- α´ – úhel odrazu
- **Velikost úhlu odrazu se rovná velikosti úhlu dopadu. Odražený paprsek zůstává v rovině dopadu.**
- Úhel odrazu nezávisí na frekvenci dopadajícího světla (protože se celý děj odehrává v jednom prostředí).

Lom světla

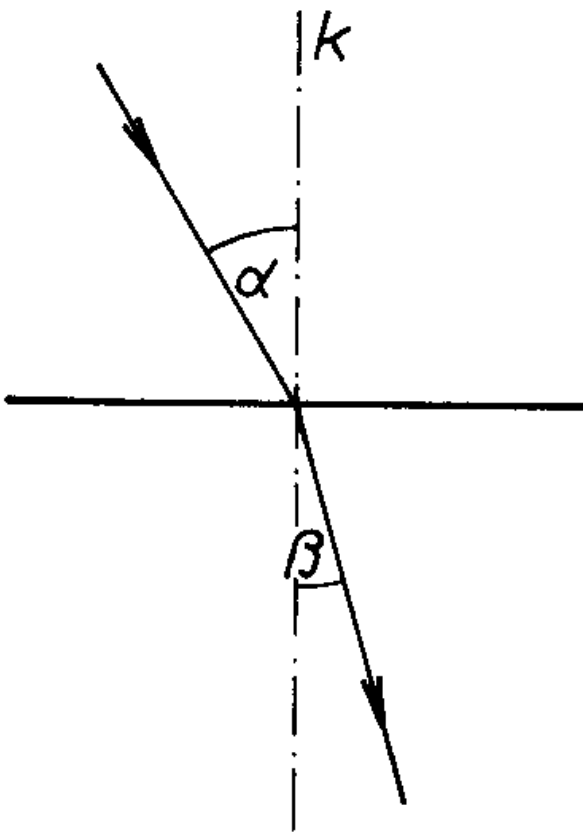
- Dochází k němu, proniká-li světlo z jednoho prostředí do druhého
- Světlo se láme **z** prostředí opticky **řidšího do** opticky **hustšího ke kolmici**.
- Světlo se láme **z** prostředí opticky **hustšího do** opticky **řidšího od kolmice**.
- Lomený paprsek zůstává v rovině dopadu.
- Úhel lomu závisí díky **disperzi** na frekvenci dopadajícího záření (červené světlo má větší vlnovou délku ⇒ má menší index lomu ⇒ láme se méně.

Lom ke kolmici a od kolmice





Snellův zákon



Označení: α – úhel dopadu, β – úhel lomu, k – kolmice dopadu, v_1 – rychlost světla v prvním prostředí, v_2 – rychlost světla v druhém prostředí, n_1 – index lomu prvního prostředí, n_2 – index lomu druhého prostředí

$$\boxed{\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}}$$

Poznámka – praktičtější znění

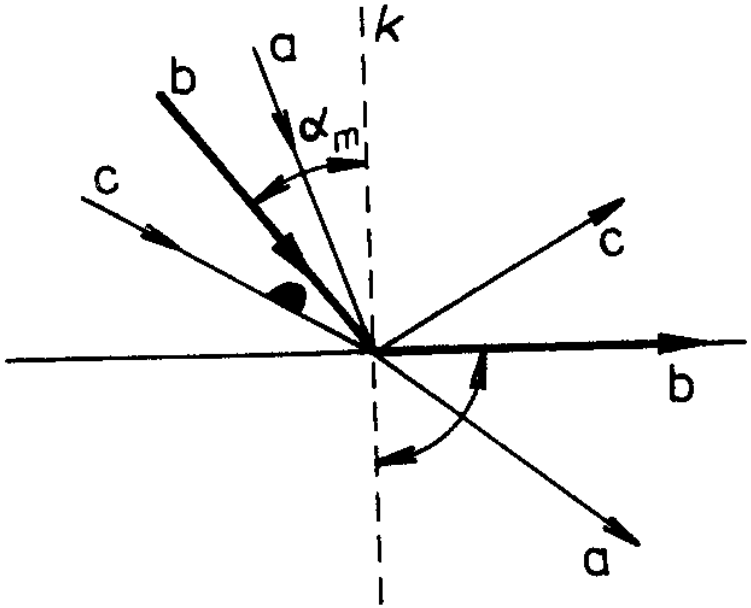
- Vyjádříme pomocí absolutního indexu lomu

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2} = n_{21} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{cn_2}{cn_1} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \boxed{\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}}$$

Poznámka: index lomu prostředí, **KAM** vstupuje, lomeno indexem lomu prostředí, **ODKUD** vstupuje!!!

Úplný odraz

- Může k němu dojít **pouze** při přechodu světla z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího (tedy při lomu od kolmice)



S rostoucím úhlem dopadu roste úhel lomu. Pro určitou hodnotu úhlu dopadu α_m (**mezný úhel**) se láme po rozhraní ($\beta = 90°$) a při větším úhlu lomu se láme dovnitř (neprochází do druhého prostředí).

Odvození mezného úhlu

- Využijme Snellova zákona

$$\frac{\sin\alpha_m}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \frac{\sin\alpha_m}{\sin 90°} = \frac{n_2}{n_1} \Rightarrow \boxed{\sin\alpha_m = \frac{n_2}{n_1}}$$

Příklad

- Vypočtěte mezný úhel pro dvojici prostředí sklo – vzduch. Odkud kam jde paprsek?

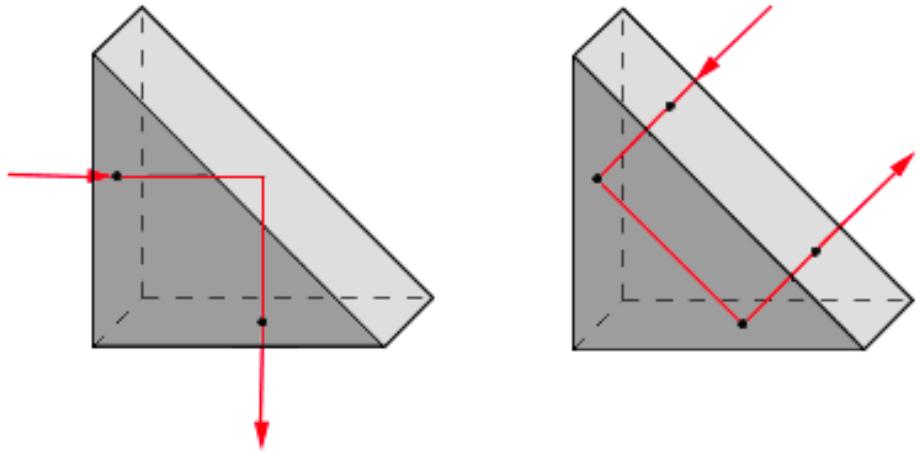
$$n_v = 1, n_s = 1{,}5; \alpha_m = ?$$

Ze skla do vzduchu (z opticky hustšího do opticky řidšího).

$$\sin\alpha_m = \frac{n_v}{n_s} = \frac{1}{1{,}5} = \frac{2}{3} \doteq 0{,}67 \Rightarrow \alpha_m = arcisn0{,}67 \doteq 42°$$

Využití úplného odrazu 1

- Odrazné hranoly v optických přístrojích (když je potřeba měnit směr paprsků)



Na vnější hranu dopadá kolmo, na vnitřní hranu pod úhlem 45° (tedy víc, než $\alpha_m = 42°$).

Příklad

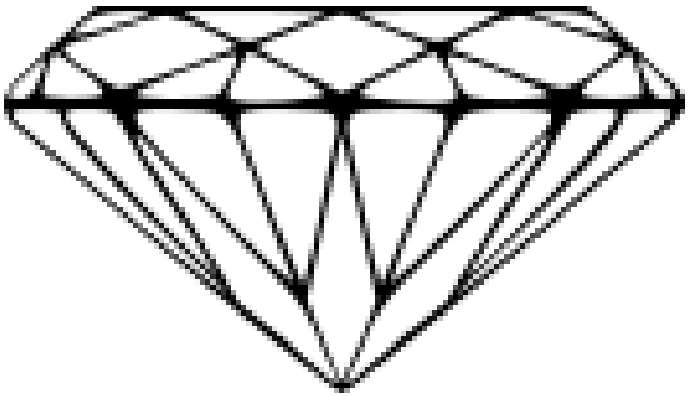
- Vypočtěte mezný úhel pro dvojici prostředí diamant – vzduch.

$$n_v = 1, n_d = 2{,}42; \alpha_m = ?$$

$$\sin\alpha_m = \frac{n_v}{n_d} = \frac{1}{2{,}42} \doteq 0{,}4132 \Rightarrow \alpha_m \doteq 24°24'$$

Využití úplného odrazu 2

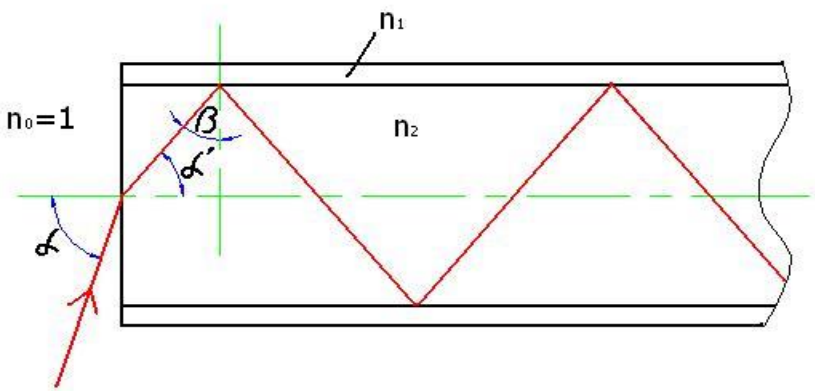
- Pravost diamantů



Diamant má malý mezný úhel Světlo často dopadá na vnitřní stěnu pod větším úhlem, odráží se od ní. To způsobuje jeho silný třpyt.

Využití úplného odrazu 3

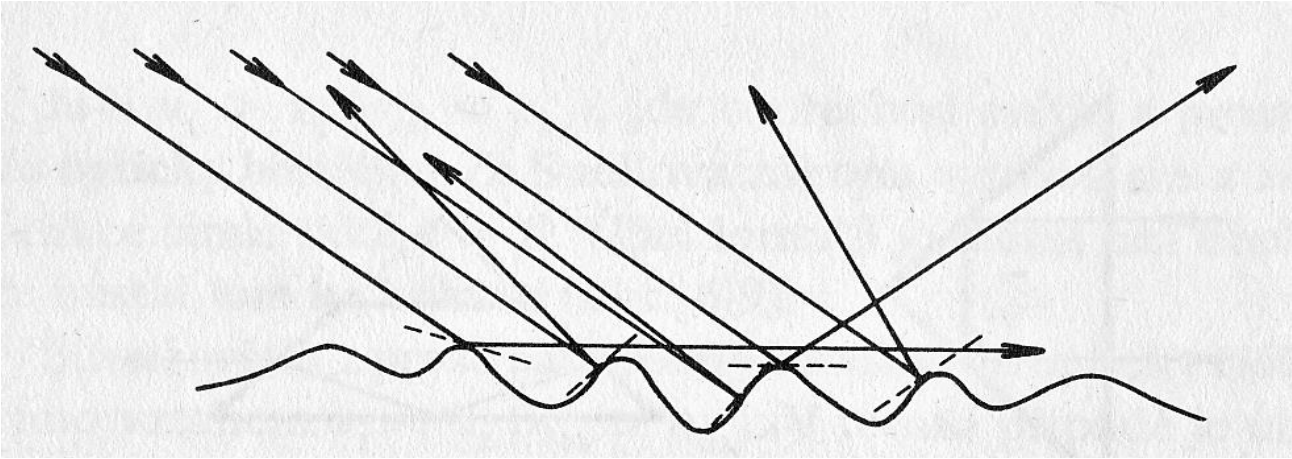
- Optické vlákno



Základem je skleněné vlákno (tzv. světlovod). Sklo v jeho střední části má větší index lomu, než sklo ve vnější části. Světelný paprsek se na vnější části úplně odráží a světlo se šíří po trajektorii dané tvarem optického vlákna.

Rozptyl světla

- Pokud na rovinné rozhraní dopadá rovnoběžný svazek paprsků, každý se odrazí pod stejným úhlem a odražený svazek je rovněž rovnoběžný.
- Pokud rozhraní není rovinné, paprsky se odrážejí různými směry ⇒ **rozptyl světla**.



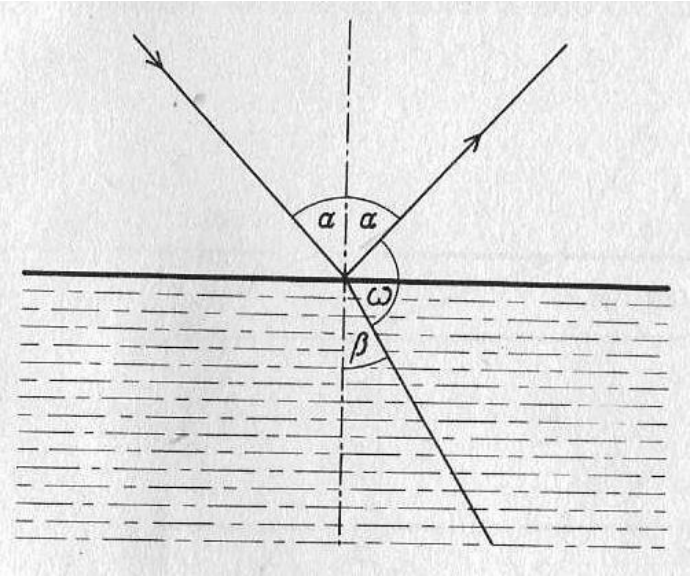
Příklad

- Světlo dopadá ze vzduchu na vodní hladinu a na ní se odráží i láme. Jaký úhel svírají odražený a lomený paprsek při úhlu dopadu 42°?

$$\alpha = 42°, n = 1{,}33 \doteq \frac{4}{3}; \omega = ?$$

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_{voda}}{n_{vzduch}} \Rightarrow \frac{\sin 42°}{\sin\beta} = \frac{4}{3}$$

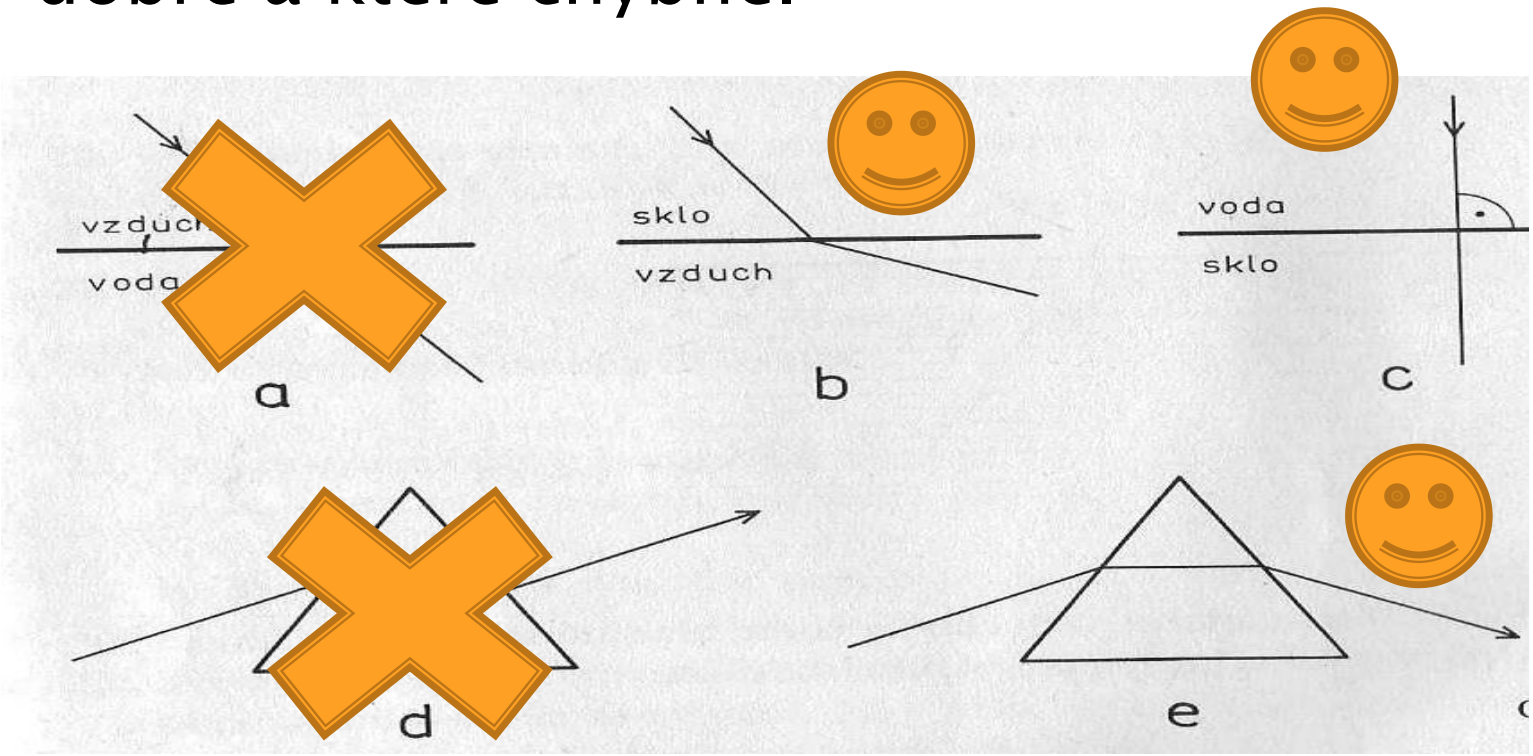
$$\sin\beta = \frac{3\sin 42°}{4} \doteq 0{,}5 \Rightarrow \beta = 30°$$



$$\omega = 180° - \alpha - \beta = 180° - 42° - 30° = 108°$$

Příklad

- Rozhodněte, které z uvedených obrázků jsou dobře a které chybně.



Literatura

- [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.
- [2] TECHMANIA. *techmania.cz/edutorium* [online]. [cit. 12.6.2013]. Dostupný na WWW: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=8aedf8656eed207376ec746c61h&key=697
- [3] AUTOR NEUVEDEN. *gymhol.cz* [online]. [cit. 12.6.2013]. Dostupný na WWW: http://www.gymhol.cz/projekt/fyzika/02_odraz_a_lom/02_odraz.htm
- [4] DAVIDE 101. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 12.6.2013]. Dostupný na WWW: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Diamond.svg?uselang=cs
- [5] BLACK MOON. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 12.6.2013]. Dostupný na WWW: http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/20/AEW_diamond_solo_white.gif?uselang=cs
- [6] ŠKOLOUD. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 12.6.2013]. Dostupný na WWW: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Optick%C3%A9_vl%C3%A1kno.JPG
- [7] BARTÁK, František a kol. *Sbírka úloh z fyziky pro studijní obory SOU a SOŠ*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství Praha, n.p., 1988, ISBN 14-423-88.

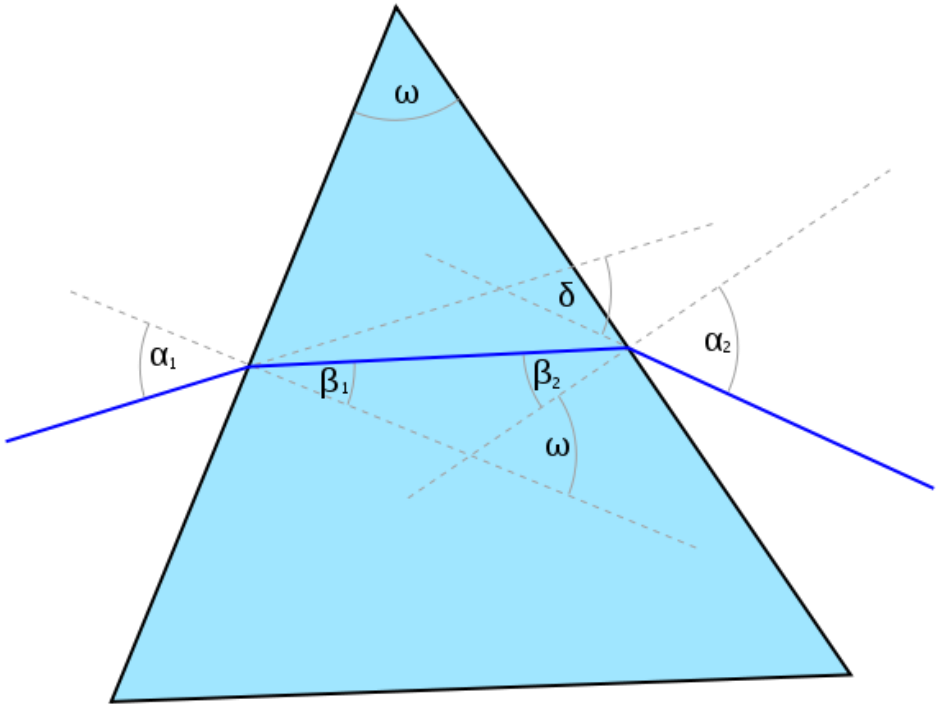
Rozklad světla a barevné vnímání

Ing. Stanislav Jakoubek

Lom světelného paprsku v hranolu

- Optický hranol = čiré prostředí ohraničené dvěma různoběžnými rovinami

ω – lámavý úhel
δ – deviace (odchylka mezi dopadajícím a vystupujícím paprskem)

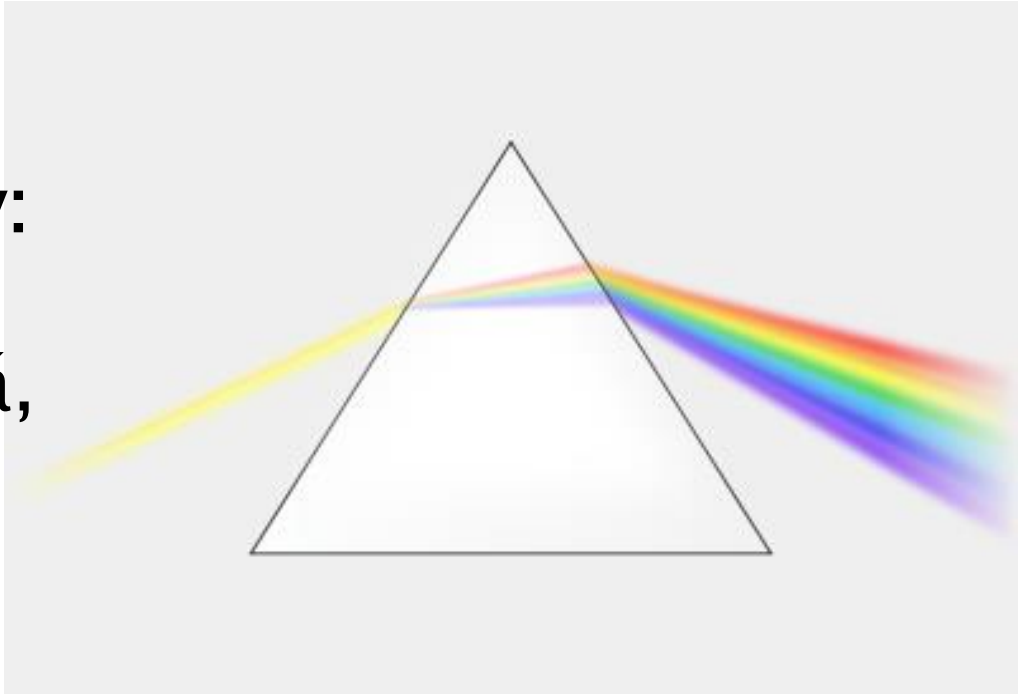


Poznámka:
monochromatické světlo!

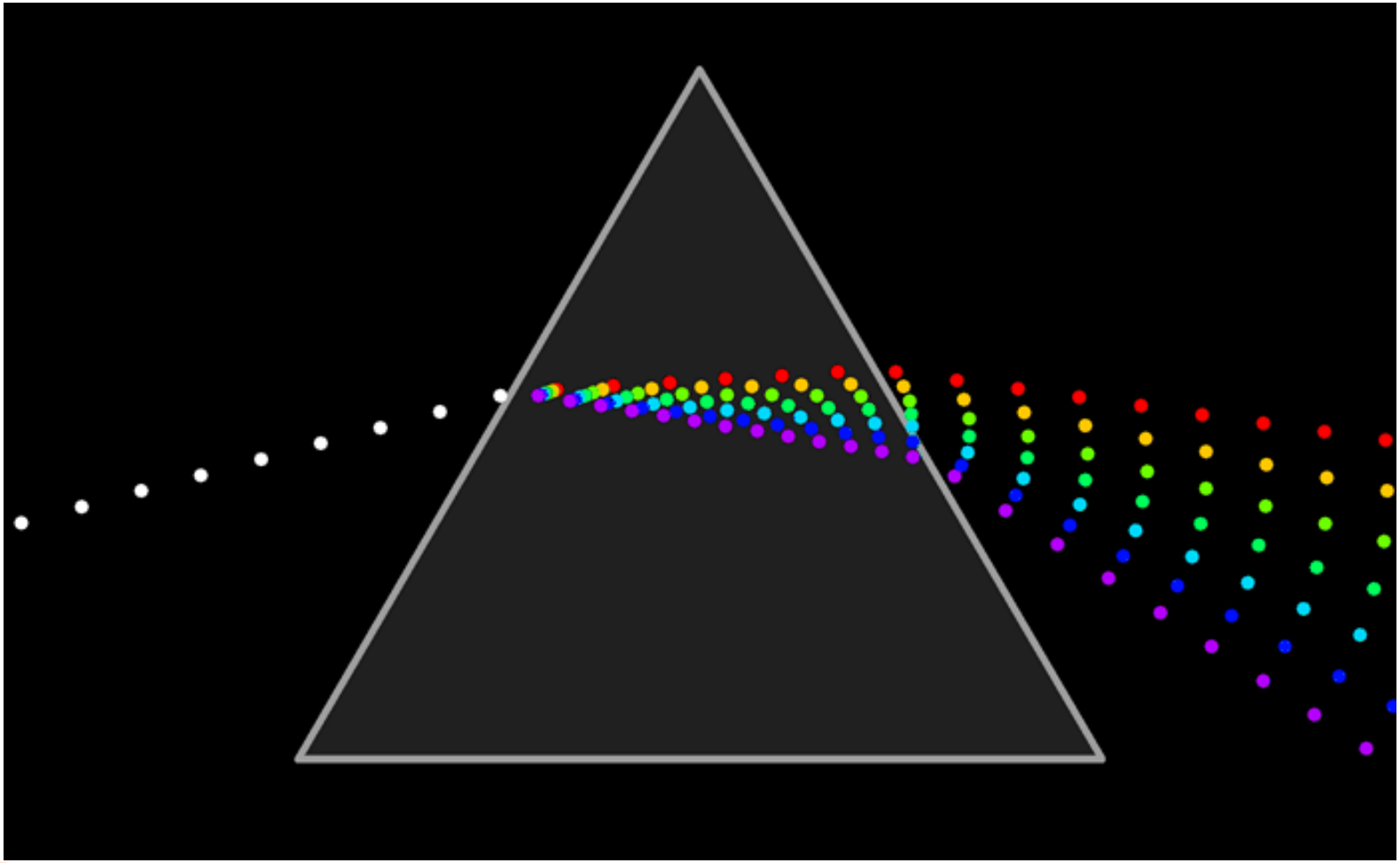
Rozklad světla hranolem

- Pro složené světlo se díky disperzi každá vlnová délka láme trochu jinak (fialové světlo se láme víc než červené) ⇒ rozloží se na jednotlivé **spektrální barvy**, které jsou lomem dále nedělitelné

7 spektrálních barev: červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá, indigová, fialová



Rozklad světla hranolem – animace



Bílé světlo

- Jde o světlo složené ze světel základních barev
- Tato světla jsou v něm zastoupena ve zcela konkrétním poměru
- Sluneční světlo – přestože v něm některé úzké pásy vlnových délek chybí, považujeme ho za bílé

Barevné vnímání

- Předměty různě odrážejí nebo pohlcují různé frekvence (tedy různé barvy)
- Tím ovlivňují spektrum světla, které se od předmětu **odrazí** nebo jím **projde**
- Toto světlo tedy nemá poměr základních barev, jako bílé světlo a proto se nám jeví barevné

Poznámky

- Předmět, kterým prochází světlo, má barvu těch vlnových délek, které propouští
- Bezbarvý předmět propouští všechny vlnové délky (viditelného světla)
- Předmět, od kterého se světlo odráží, má barvu vlnových délek, které odráží
- Pokud pohltí všechny vlnové délky, jeví se nám černý
- Důležité: barva předmětu není fyzikální veličina; závisí na složení dopadajícího světla

Literatura

- [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.
- [2] PAJS. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 25.6.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Lom_hranol.svg
- [3] SUIDROOT. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 25.6.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Prism-rainbow.svg
- [4] LUCASVB. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 25.6.2013]. Dostupný na WWW: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Light_dispersion_conceptual.gif?uselang=cs

Interferenční jevy

Ing. Stanislav Jakoubek

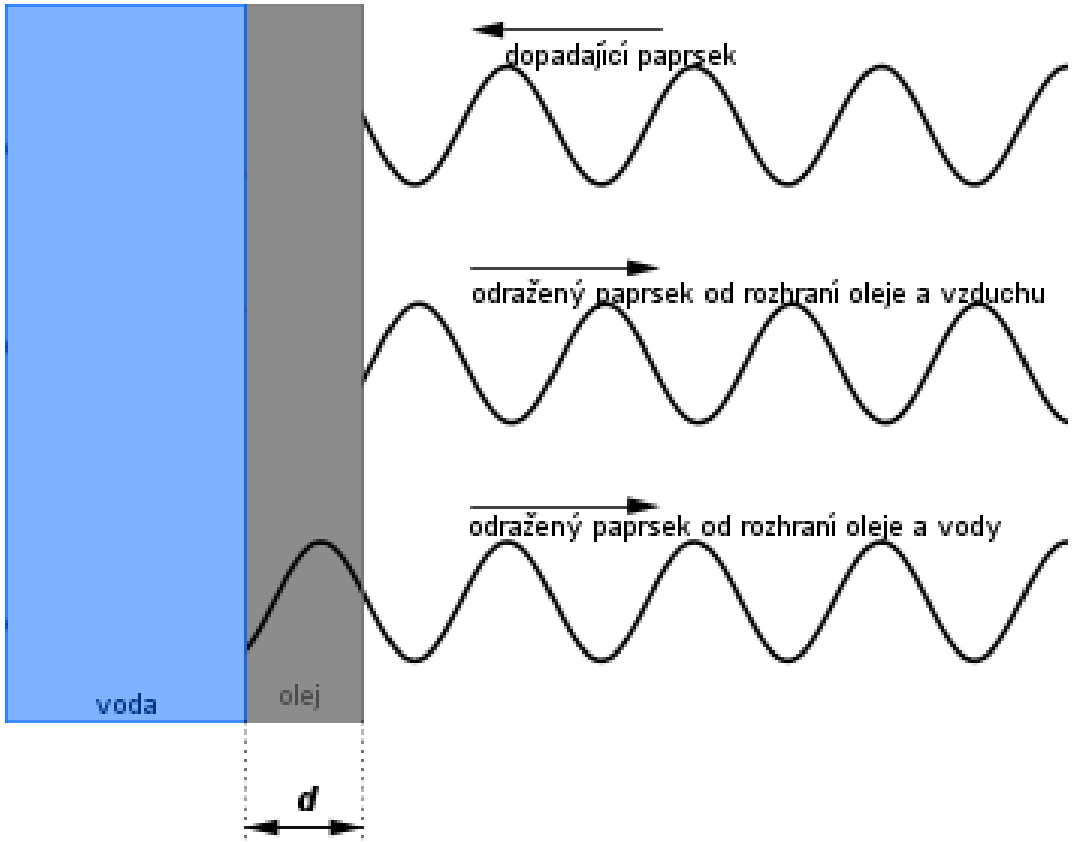
Kde se s ní potkáme?

- Barevné úkazy na olejových vrstvách
- Barvy na mýdlových bublinách, bublifuk, křídla hmyzu, …
- Jde o skládání světelného vlnění; platí pro něj stejné zákonitosti, jako pro skládání mechanického vlnění

Koherentní vlnění

- Aby bylo možné jevy pozorovat, skládaná vlnění musí být koherentní
- Koherentní vlnění: mají stejnou frekvenci a jejich vzájemný fázový rozdíl v uvažovaném bodě se nemění
- Existují různé možnosti získání koherentního vlnění

Interference na tenké vrstvě



Interference odraženého světla se světlem, které se odrazilo od rozhraní olej – voda

Optický dráhový rozdíl Δs

- Světelná vlna, která prošla olejovou vrstvou, urazila dráhu *2d*
- Světlo ve vzduchu urazí za stejnou dobu dráhu *2nd*
- Při odrazu světla od opticky hustšího prostředí se mění fáze vlny na opačnou ⇒ přičteme člen *λ/2*

$$\boxed{\Delta s = 2nd + \frac{\lambda}{2}}$$

Interferenční maxima a minima

- Je-li dráhový rozdíl roven sudému násobku půlvln, dochází k sečtení amplitud a tedy k zesílení intenzity světla

$$\Delta s = 2nd + \frac{\lambda}{2} = 2k\frac{\lambda}{2}; k = 1,2,3,\ldots$$

- Je-li roven lichému násobku půlvln, dochází k zeslabení intenzity či k vymizení

$$\Delta s = 2nd + \frac{\lambda}{2} = (2k-1)\frac{\lambda}{2}; k = 1,2,3,\ldots$$

Poznámky

- Pro k=1 mluvíme o maximu či minimu prvního řádu, pro k=2 druhého řádu atd.
- Vztahy jsou uvedeny pro zjednodušený případ kolmého dopadu, lze je zobecnit pro libovolný úhel
- Dopadá-li složené světlo, některé vlnové délky se zesílí, jiné vyruší $\Rightarrow$ vznikají barevné obrazce

Příklad

- Na mýdlovou bublinu o indexu lomu 1,33 dopadá kolmo bílé světlo. Maximum prvního řádu pozorujeme pro zelené světlo 530 nm. Určete tloušťku bubliny.

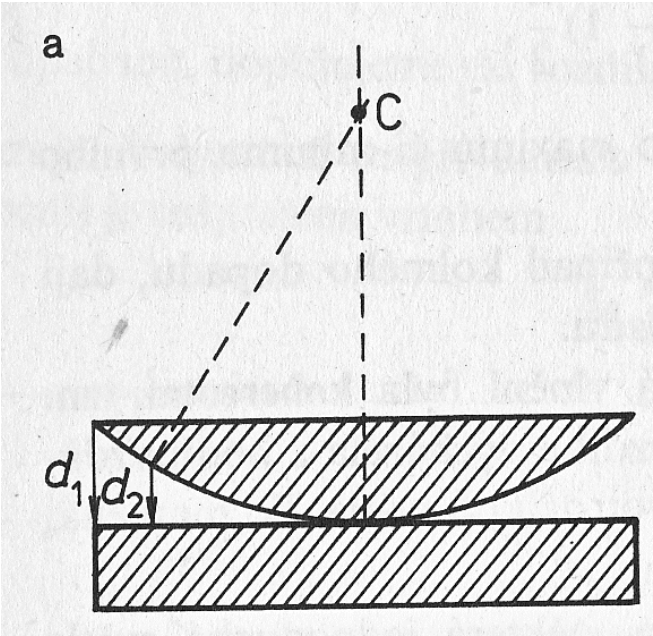
$$n = 1{,}33, k = 1, \lambda = 530nm; d = ?$$

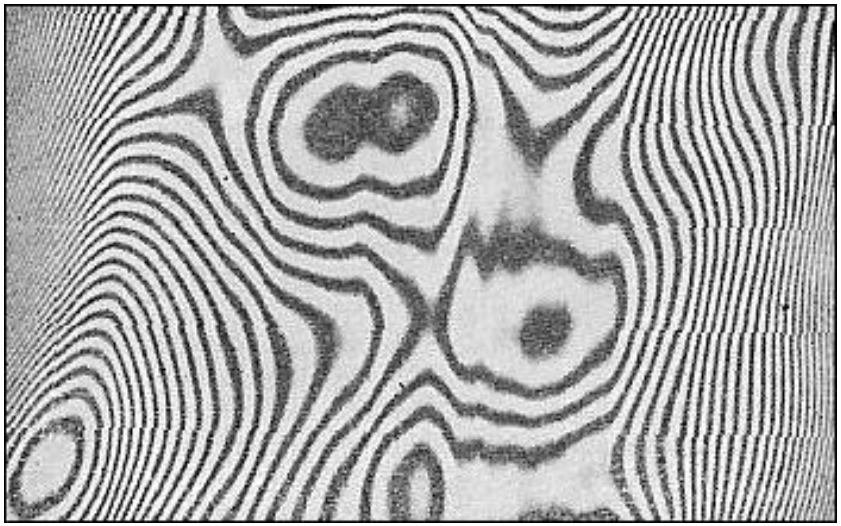
$$2nd + \frac{\lambda}{2} = 2k\frac{\lambda}{2} = 2.1.\frac{\lambda}{2} = \lambda \Rightarrow d = \frac{\lambda}{4n}$$

$$d = \frac{530.10^{-9}}{4.1{,}33} m \doteq 9{,}96.10^{-8} m \doteq 100nm$$

Newtonova skla

- K interferenci může dojít i při nestejné tloušťce vrstvy





Pro monochromatické světlo vznikají světlé a tmavé proužky.

Využití interference

- Měření tloušťky různých materiálů
- Měření poloměru křivosti čoček
- Kontrola kvality povrchů
- Antireflexní vrstva objektivů (při správné volbě indexů lomu antireflexních vrstev vede interference k minimalizaci zpětných odrazů a tím pádem omezuje světelné ztráty); zajímavý článek na dané téma: http://www.fotoradce.cz/antireflexni-vrstvy-proc-jsou-tolik-dulezite-a-jak-nam-pomahaji-pri-fotografovani-clanekid45
- …

Příklad

- V jednom bodě se skládají dvě koherentní světelná vlnění s vlnovou délkou 600nm. Jejich optický dráhový rozdíl je a) 300nm, b) 600nm, c) 900nm, d) 1200nm. Kdy dojde k zesílení a kdy k zeslabení světla?

O tom rozhoduje sudý nebo lichý násobek půlvlny.

Zesílení: b), d)
Zeslabení: a), c)

Příklad

- Na vrstvu oleje tloušťky 0,2μm dopadá kolmo bílé světlo. Rychlost světla v oleji je $2.10^8 m.s^{-1}$. Která barva se nejvíce zesílí a která se vyruší?

$$d = 2\mu m = 2.10^{-6} m, v = 2.10^8 m.s^{-1}; \lambda = ?$$

Literatura

- [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.
- [2] INAGLORY, Brocken. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 25.6.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Reflection_in_a_soap_bubble_edit.jpg
- [3] TECHMANIA. *techmania.cz/edutorium* [online]. [cit. 25.6.2013]. Dostupný na WWW: http://www.techmania.cz/edutorium/data/fil_2482.gif

Ohybové jevy

Ing. Stanislav Jakoubek

Ohybový jev – příklad

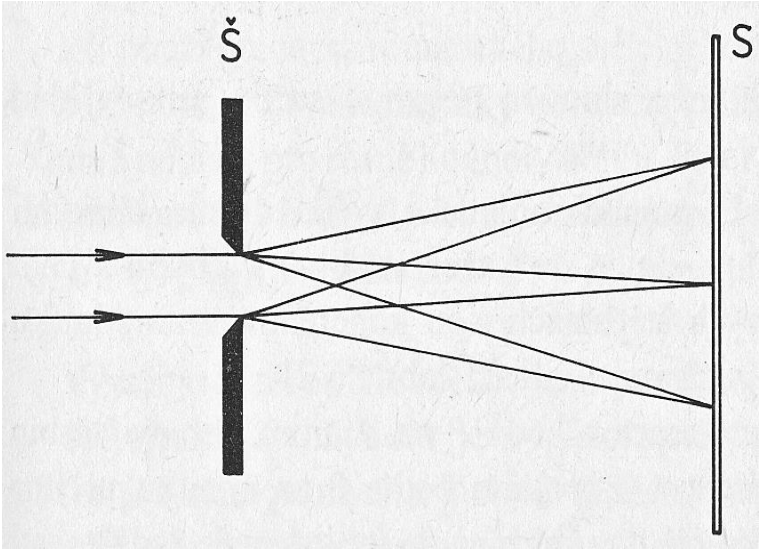
Připomenutí

- Známe ohyb mechanického vlnění, například zvukového
- Důležitá vlastnost: k ohybu dochází na překážkách, jejichž rozměr je srovnatelný s vlnovou délkou ohýbaného vlnění
- Například pro zvukové vlnění o frekvenci 440Hz ve vzduchu ($v=340 m.s^{-1}$):

$$\lambda = \frac{v}{f} = \frac{340}{440} m \doteq 0{,}77 m$$

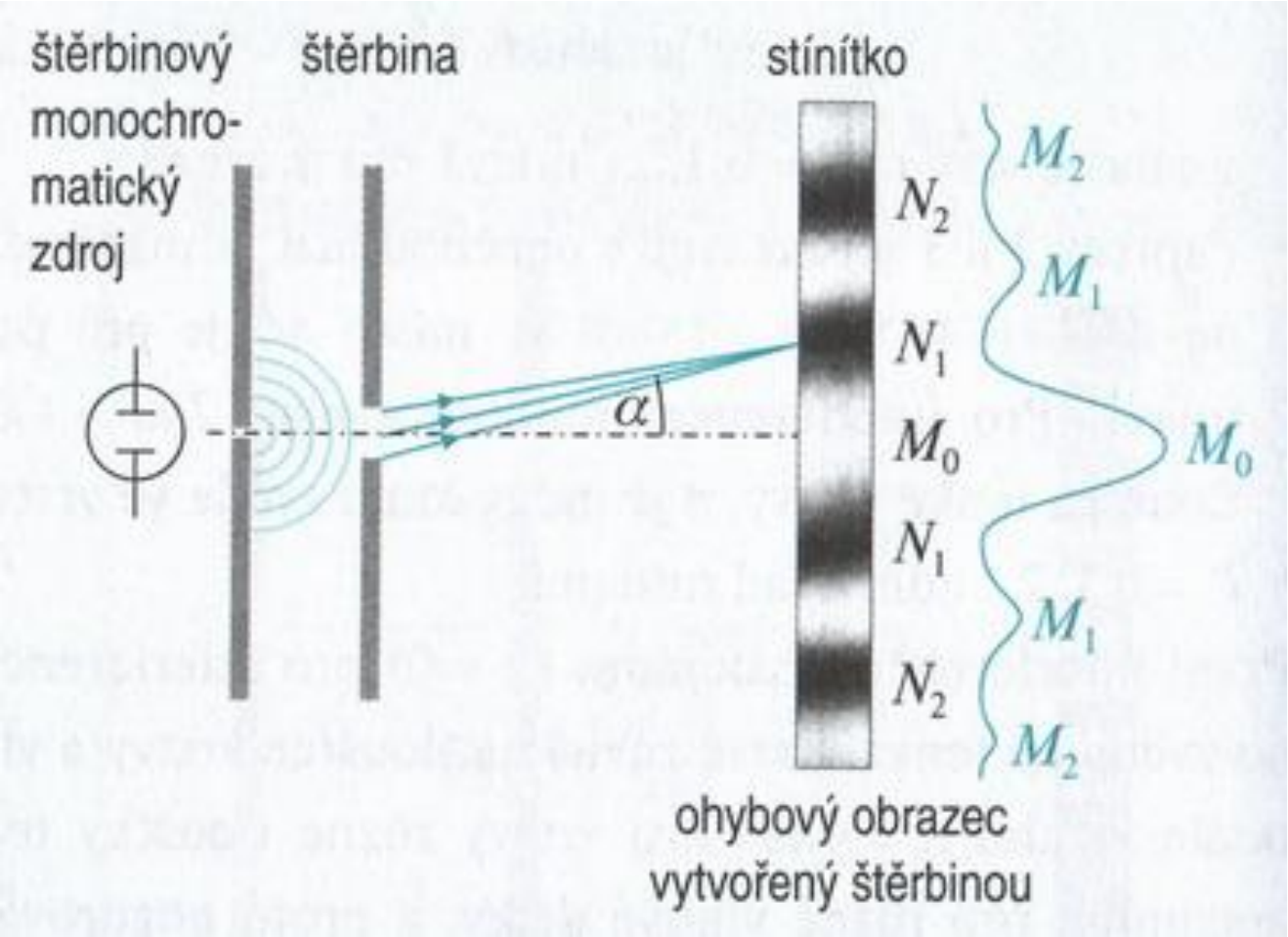
Difrakce (ohyb světla) na štěrbině

- Například při průchodu světla úzkou štěrbinou

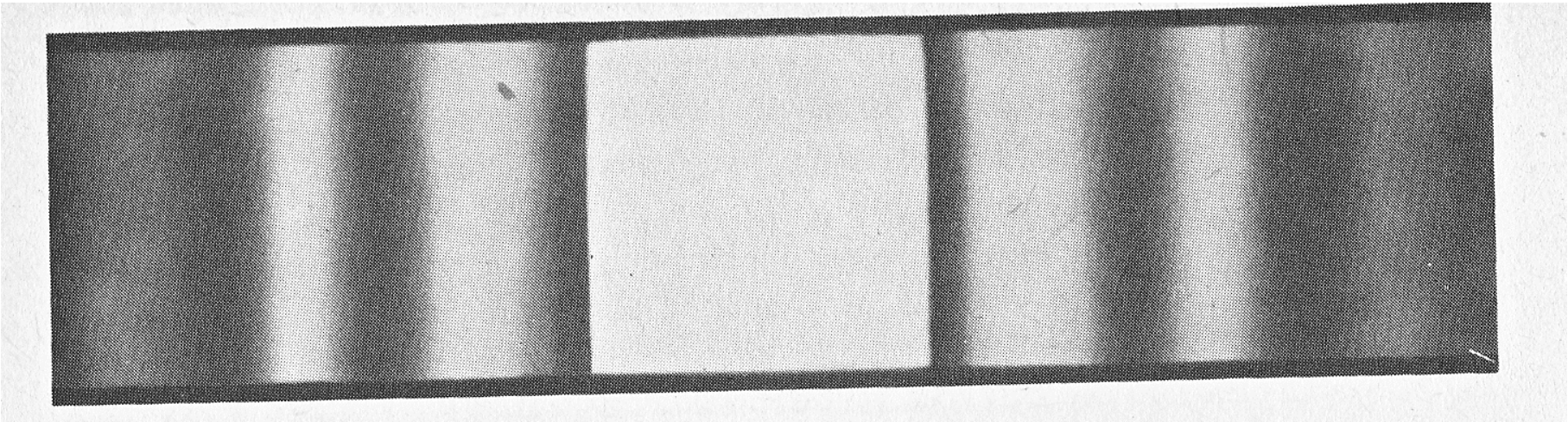


Mimo světlého proužku uprostřed pozorujeme i další světlé a tmavé proužky.
Světelná vlna vniká díky difrakci i do oblasti geometrického stínu.

Difrakční obrazec na štěrbině

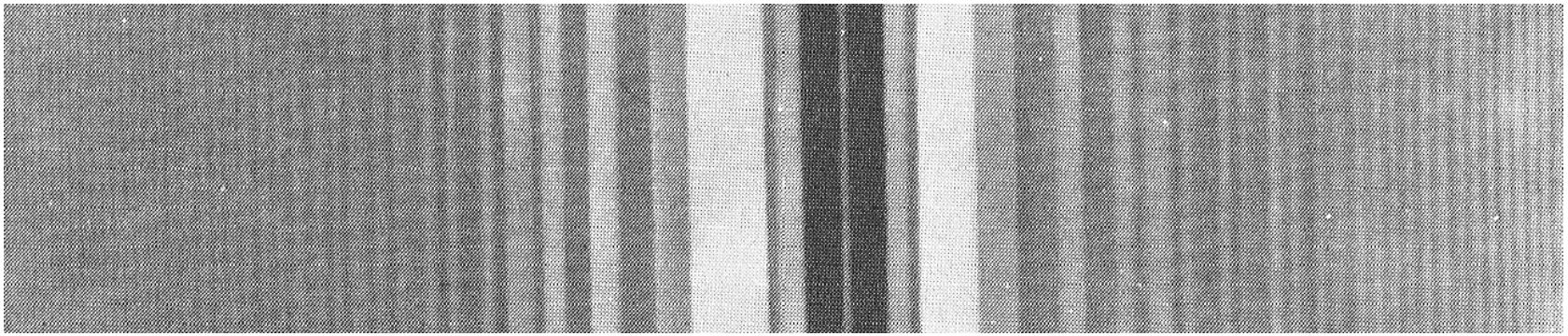


Difrakce na štěrbině

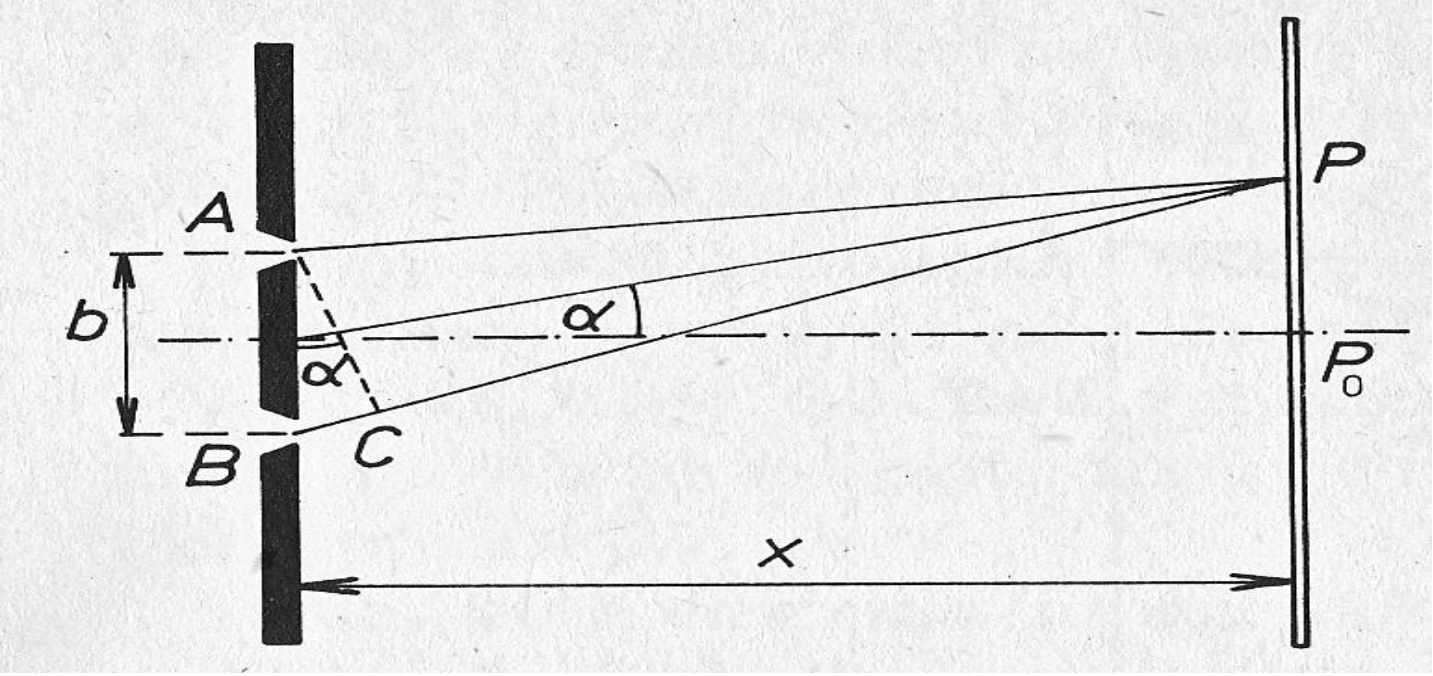


Difrakce na tenkém drátku

- Úzkou štěrbinu nahradíme tenkým drátkem
- Střední proužek je tmavý (geometrický stín), uprostřed má světlý proužek

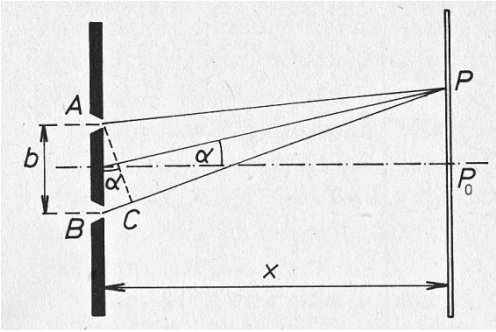


Difrakce na dvojštěrbině – náčrt



Předpoklad: stínítko je od dvojštěrbiny tak daleko, že paprsky procházející středy štěrbin považujeme za rovnoběžné.

Difrakce na dvojštěrbině – vysvětlení



Dráhový rozdíl: $|BC| = |BP| - |AP|$

Z trojúh. ABC: $|BC| = b.\sin\alpha$

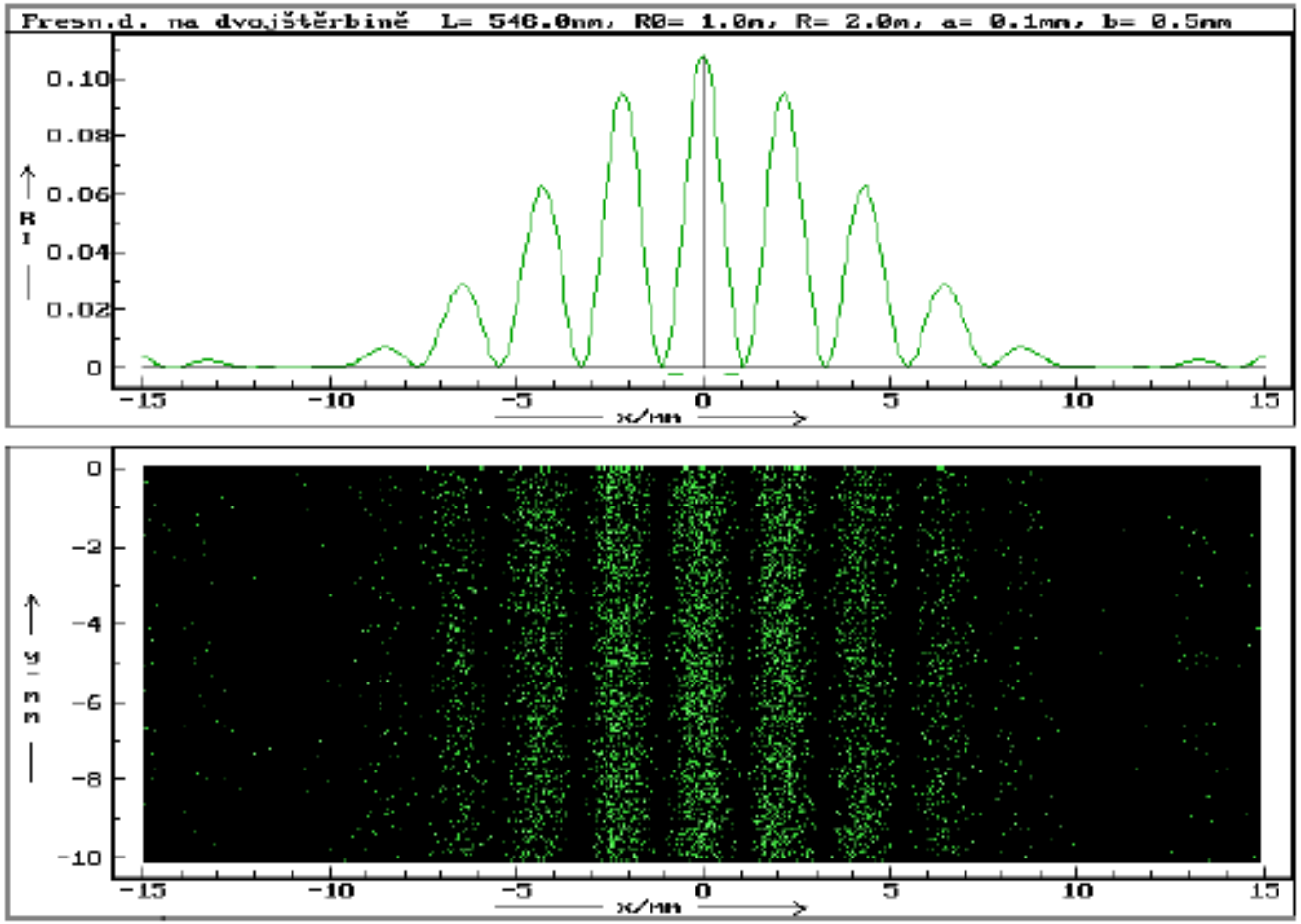
Max.: dráh. rozdíl roven sudému násobku půlvln

$$b.\sin\alpha = 2k.\frac{\lambda}{2} \Rightarrow \boxed{b.\sin\alpha = k.\lambda, k = 0,1,2,\ldots}$$

Minimum: lichému násobku půlvln

$$\boxed{b.\sin\alpha = (2k+1)\frac{\lambda}{2}, k = 0,1,2,\ldots}$$

Difrakce na dvojštěrbině



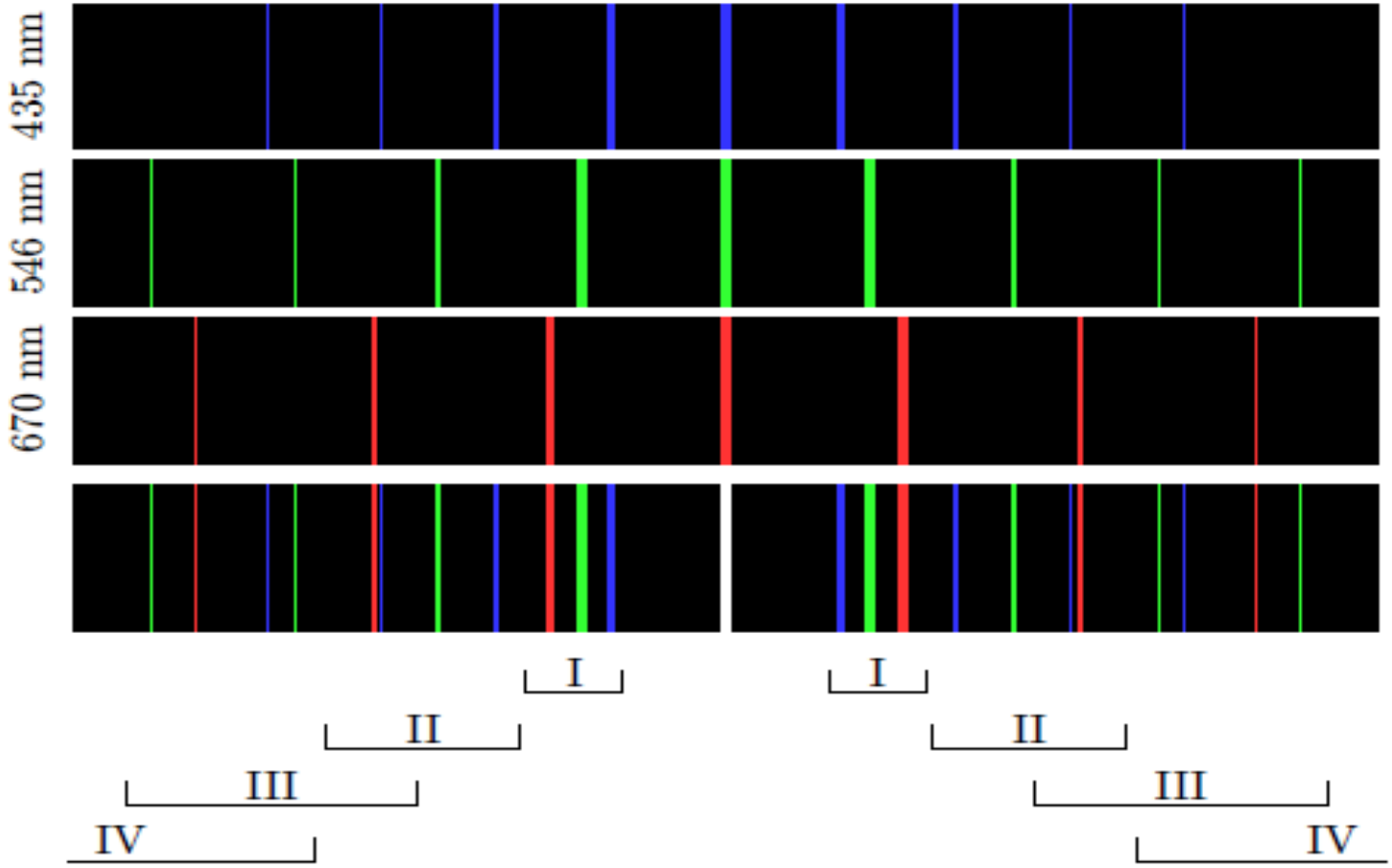
Poznámky

- Pro monochromatické světlo vznikají světlé a tmavé proužky
- Pro složené světlo jsou proužky barevné (protože poloha maxim a minim závisí na vlnové délce)
- Pro $\alpha = 0°$ – nejintenzivnější maximum v bodě P_0 (maximum nultého řádu)
- Maximum prvního řádu, druhého řádu, …

Optická mřížka

- Systém štěrbin – až několik set na 1 mm
- Prakticky: například vyrytím do tenké skleněné destičky
- Vzdálenost štěrbin: **mřížková konstanta**
- Průchodem světla mřížkou dostaneme **mřížkové spektrum** (vzniká interferencí koherentních vlnění získaných na každé štěrbině mřížky)
- Poloha maxim závisí a vlnové délce ⇒ nejvíce se odchyluje červené světlo, nejméně fialové ⇒ interferenční proužky obsahují základní barvy

Difrakce složeného světla na optické mřížce



Proč se CD a DVD jeví barevné?

- Jemné vrypy o vytvářejí optickou mřížku (CD: 1,6 μm, DVD: 0,74 μm). Dopadá-li na CD bílé světlo, tvoří difraktované světlo barevné pruhy, které jsou směsicí difrakčních obrazců od vrypů

Literatura

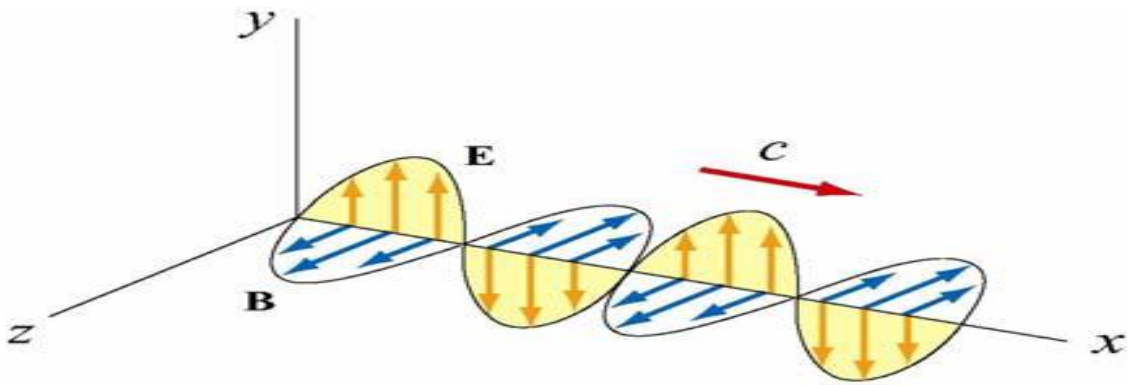
- [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.
- [2] VACULÍK, Radim. *Optika jednoduše* [online]. [cit. 1.10.2013]. Dostupný na WWW: http://optika.kuratkoo.net/difrakce.htm#
- [3] TECHMANIA. *techmania.cz* [online]. [cit. 2.10.2013]. Dostupný na WWW: http://www.techmania.cz/edutorium/art_exponaty.php?xkat=fyzika&xser=456c656b74726f6d61676e657469636be920766c6e79h&key=751
- [4] ŠEDIVÝ, Přemysl. *Ohyb světla* [online]. [cit. 2.10.2013]. Dostupný na WWW: http://www.gvp.cz/~vinkle/mafynet/fyz_5_6lete/vlnova_optika/DIFRAKCE_FO.PDF

Polarizace světla

Ing. Stanislav Jakoubek

Úvodní poznámka

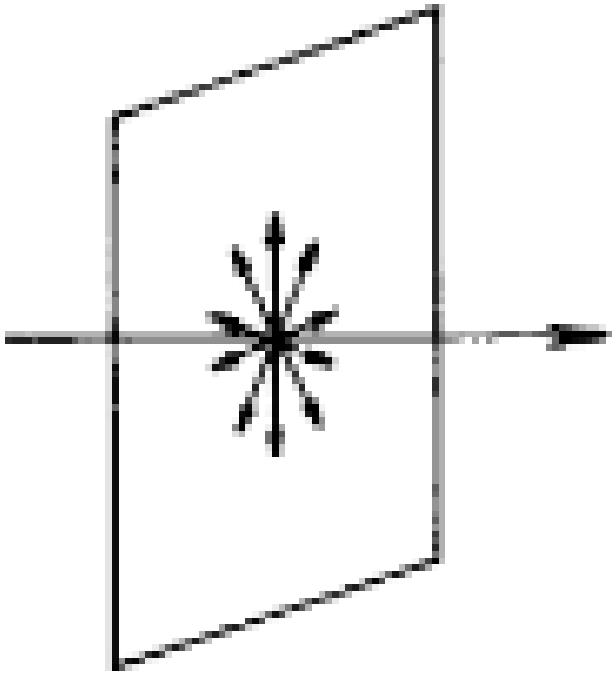
- Víme: světlo je příčné elektromagnetické vlnění



- Světlo ve zdrojích má příčinu v procesech v atomech
- Ty jsou neuspořádané ⇒ elektrická a magnetická složka vlnění nahodile mění směr

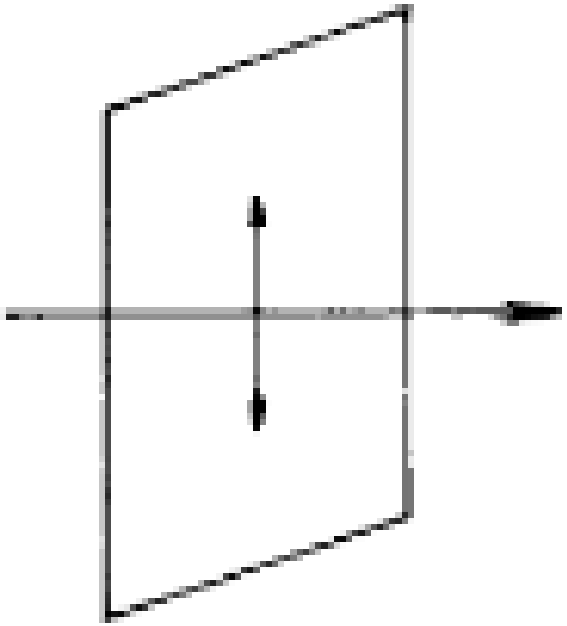
Přirozené (nepolarizované) světlo

- Je nepolarizované ⇒ má stejné vlastnosti ve všech rovinách proložených ve směru šíření



Lineárně polarizované světlo

- Elektrická a magnetická složka leží ve stálých rovinách



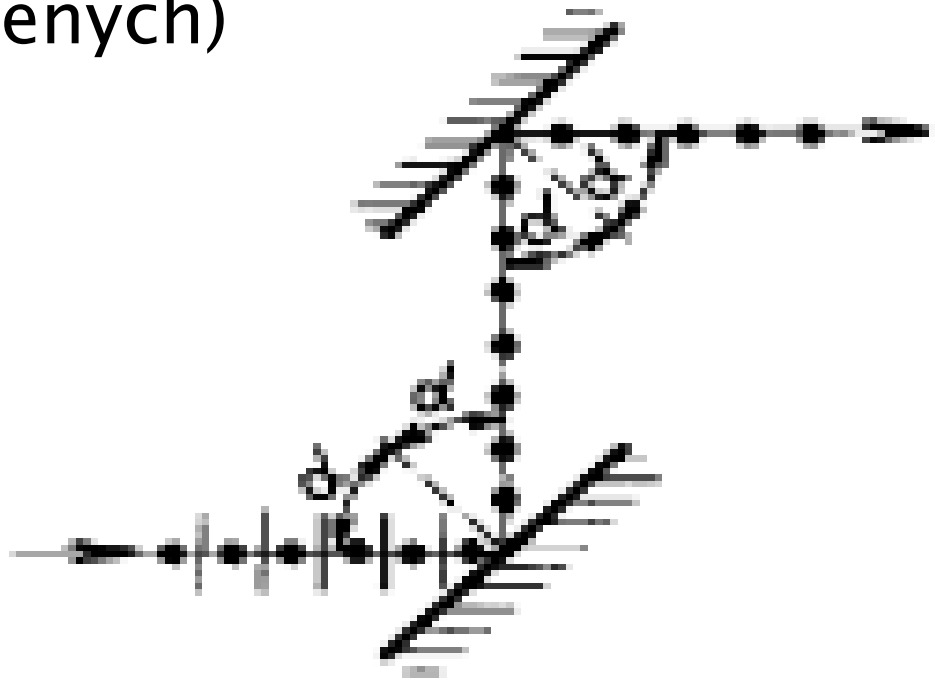
Způsoby polarizace

- Odrazem
- Lomem
- Dvojlomem

- Poznámka: ve všech případech jde o interakci záření s látkou

Polarizace odrazem

- Po dopadu přiroz. světla na odrazovou vrstvu
- Po odrazu se zachovávají převážně kmity v rovině kolmé na nákresnu (nebo v rovinách málo od ní odkloněných)



Polarizace odrazem – poznámky

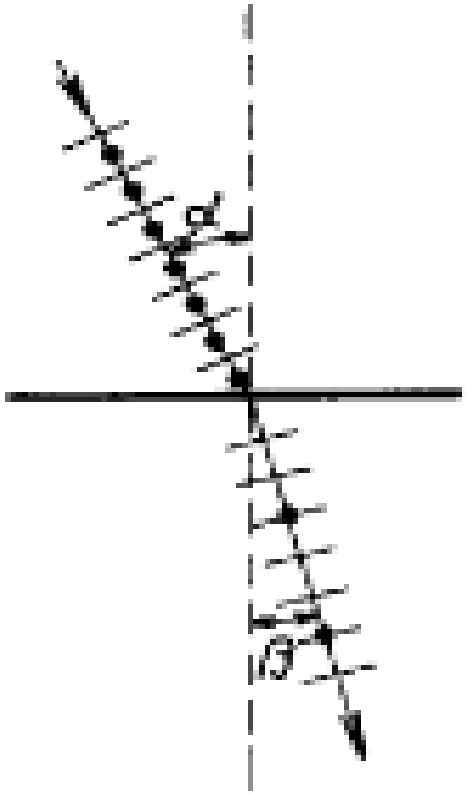
- Odrazem vzniká pouze částečně polarizované světlo
- Úplná polarizace nastává jen při zcela konkrétním úhlu dopadu α_B (Brewsterův úhel)
- Určíme ho Brewsterovým vztahem:

$$\boxed{tg\alpha_B = \frac{n'}{n}}$$

n´ … index lomu odrazného prostředí
n … index lomu prostředí, odkud paprsek vstupuje

Polarizace lomem

- Zachovává kmity převážně v rovině nákresny
- I zde je světlo polarizováno jen částečně



Polarizace dvojlomem

- Některé látky jsou anizotropní (světlo se v různých směrech šíří různou rychlostí)
- Tyto látky štěpí lomem světlo na dva polarizované paprsky s navzájem kolmými kmitovými rovinami
- Dvojlomné krystaly se používají k výrobě polarizačních filtrů

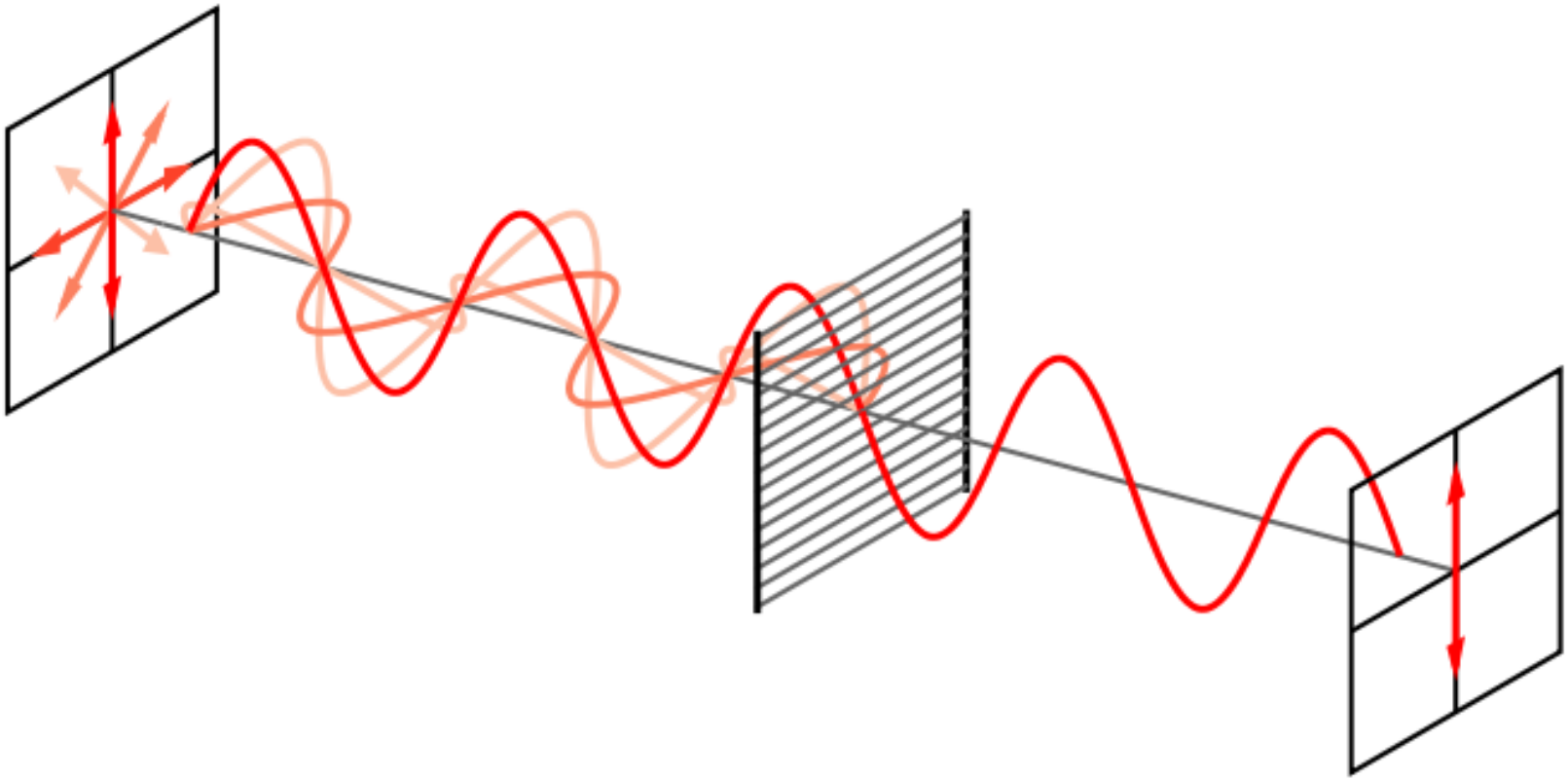
Polarizační filtr

- Věrnější podání barev, lepší vykreslení oblohy, odstraňuje odlesky, ztmavuje oblohu, odstraňuje opar na obzoru, …

Vliv polarizačního filtru

Bez filtru. S filtrem.

Světlo po průchodu polarizačním filtrem



Dvojice polarizačních filtrů

Otáčením jednoho filtru okolo osy dochází ke změně intenzity procházejícího světla. Odpovídá to stejně orientovaným nebo zkříženým filtrům.

Využití

- V některých roztocích nesymetrických molekul se rovina polarizovaného světla stáčí v závislosti na koncentraci ⇒ měření koncent.
- LCD – Každý pixel LCD se skládá z molekul tekutých krystalů uložených mezi dvěma průhlednými elektrodami a mezi dvěma polarizačními filtry, přičemž osy polarizace jsou na sebe kolmé.
- Fotoelasticimetrie – zjišťování deformací a namáhání konstrukcí

Literatura

- [1] BEDNAŘÍK, Milan et al. *Fyzika IV pro studijní obory středních odborných učilišť*. 2. vyd. Praha: SPN, 1989. 212 s. Učebnice pro střední školy.
- [2] KRIPLOZOIK. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 23.10.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Circular-PL-filter.jpg
- [3] MELLISH, Bob. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 23.10.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:Wire-grid-polarizer.svg
- [4] PICOLLONAMEK. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 23.10.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Soubor:CircularPolarizer.jpg
- [5] ROGILBERT. *wikipedia.cz* [online]. [cit. 23.10.2013]. Dostupný na WWW: http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Animation_polariseur.gif
- [6] AUTOR NEUVEDEN. *Displej z tekutých krystalů* [online]. [cit. 23.10.2013]. Dostupný na WWW: http://cs.wikipedia.org/wiki/Displej_z_tekut%C3%BDch_krystal%C5%AF