

Meno a priezvisko:

Škola:

Predmet:

Školský rok/blok:

Skupina:

Trieda:

Dátum:

Bilingválne gymnázium C. S. Lewisa, Beňadická 38, Bratislava

Fyzika

/

Teória

1 KMITANIE A VLNIENIE

4 Optika

1.4.0 Úvod – základné vlastnosti svetla

Optika je náuka o svetle. Svetlo je elektromagnetické vlnenie, ktoré vyvoláva vnem v našom oku.

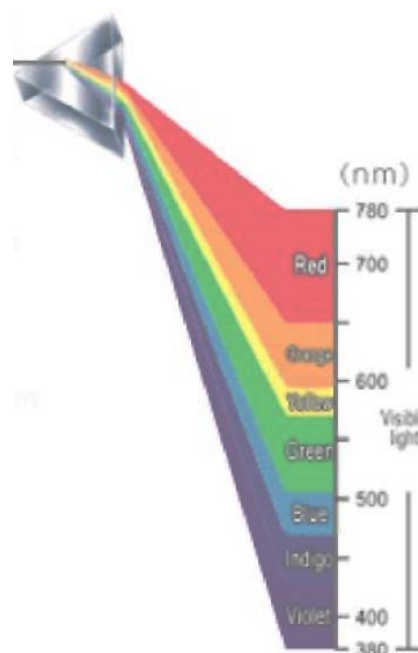
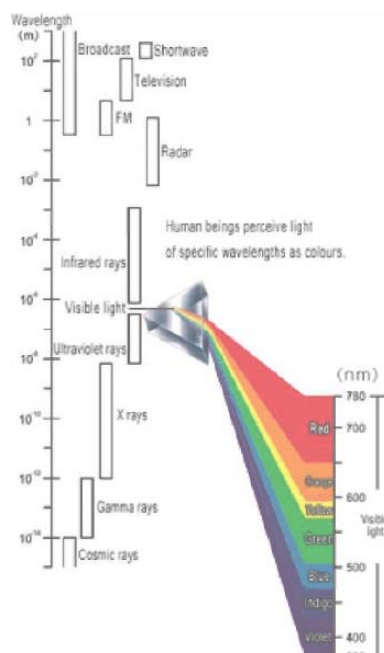
Optika je časť fyziky, ktorá sa zaoberá podstatou a vznikom svetla, otázkami šírenia svetla, interakcie svetla a prostredia, skúma príčiny a podstatu videnia. Optika patrí medzi najstaršie časti fyziky, zaoberali sa ňou už starovekí grécki učitelia.

Vývoj názorov na podstatu svetla:

História rozvoja optiky je charakterizovaná bojom protikladných názorov na podstatu svetla. V 17. storočí vznikli dve teórie o podstate svetla:

- **Huygensova vlnová teória.** Huygens (1678) považoval svetlo za pozdĺžne vlnenie svetelného éteru – veľmi riedkej látky – vlnová teória svetla.
- **Newtonova korpuskulárna teória.** (Korpuskula = častica). Podstatou svetla sú častice (korpuskule), ktoré sa obrovskou rýchlosťou šíria od zdroja – časticová teória svetla.
- **Súčasná teória.** Svetlo je elektromagnetické vlnenie, má vlnový aj časticový charakter.

Oblasť	Kmitočet [Hz]	Vlnová dĺžka [m]
dlhé vlny	10^4	10^4
stredné vlny	10^5	10^3
krátke vlny	10^6	10^2
		10
veľmi krátke vlny	10^7	1
ultrakrátke vlny	10^8	10^{-1}
radarové vlny	10^9	10^{-2}
milimetrové vlny	10^{10}	10^{-3}
	10^{11}	10^{-4}
ďaleká infračervená	10^{12}	10^{-5}
blízka infračervená	10^{13}	10^{-6}
viditeľné svetlo (380nm-790nm)	10^{14}	10^{-6}
ultrafialová	10^{15}	10^{-7}
mäkké žiarenie X	10^{16}	10^{-8}
tvrdé žiarenie X	10^{17}	10^{-9}
žiarenie γ	10^{18}	10^{-10}



V druhej polovici 19. storočia **Maxwell** zistil, že elektromagnetické vlnenie sa šíri rovnakou rýchlosťou ako svetlo. Vznikla elektromagnetická teória svetla, podľa ktorej **svetlo (viditeľné žiarenie)** je elektromagnetické vlnenie s vlnovými dĺžkami od 380nm do 780nm .

Podľa **Einsteina** energia nie je v elektromagnetickom vlnení rozložená spojito, ale elektromagnetické vlnenie je tok fotónov. Teda svetlo má vlnovú aj časticovú povahu. **Pri šírení svetla sa prejavujú vlnové vlastnosti, pri emisii a absorpcii kvantové vlastnosti.**

1.4.1 Základné pojmy optiky

Svetelný zdroj – mení rôzne druhy energie (vnútorná, elektrická, chemickej, jadrová) na svetelnú.

Optické prostredie – prostredie, v ktorom sa šíri svetlo.

Druhy optických prostredí:

- priehľadné – prepúšťa svetlo bez podstatného zoslabenia, v tomto prostredí vidíme predmety,
- nepriehľadné – neprepúšťa svetlo – rozptyľuje ho alebo ho odráža,
- priesvitné – prepúšťa svetlo a súčasne ho rozptyľuje,
- izotropné – má vo všetkých miestach rovnaké optické vlastnosti – svetlo sa v ňom šíri priamočiaro,
- anizotropné – optické vlastnosti prostredia nie sú v rôznych miestach rovnaké.

Telesá, ktoré vysielajú svetlo, sa nazývajú **zdroje svetla**. Zdroj svetla, ktorého rozmery môžeme v danej situácii zanedbať, je **bodový zdroj svetla**. Prostredie, v ktorom sa šíri svetlo, sa nazýva **optické prostredie**. Optické prostredie, ktoré má v každom bode rovnaké vlastnosti, sa nazýva **homogénne**. Ak vlastnosti prostredia nezávisia od smeru, nazýva sa **izotropné**, ináč je **anizotropné**.

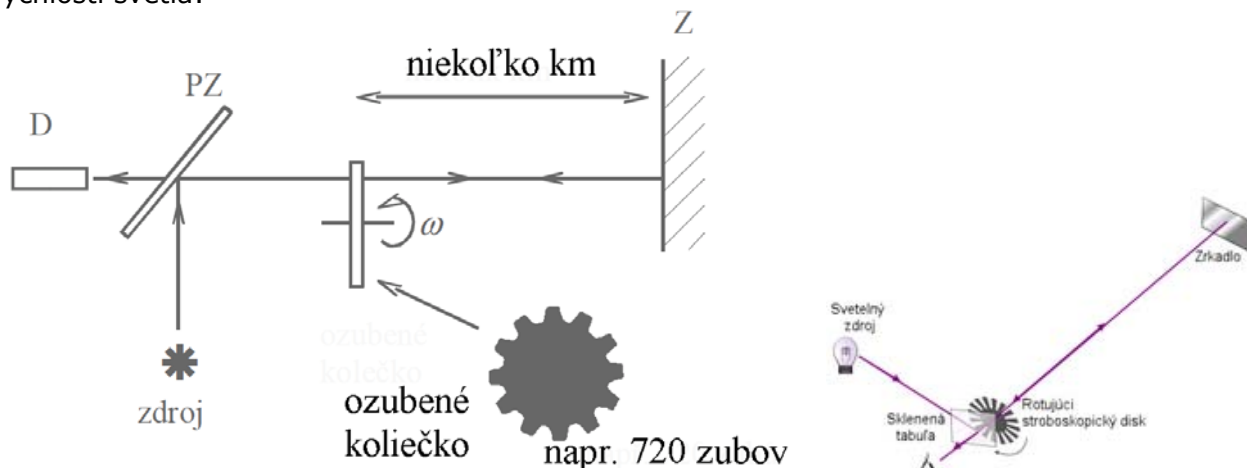
Vlnoplocha, svetelný lúč – svetlo sa šíri v guľových vlnoplochách podľa Huygensovho princípu. Priamka kolmá na vlnoplochu udáva smer, ktorým sa svetlo šíri – nazýva sa svetelný lúč.

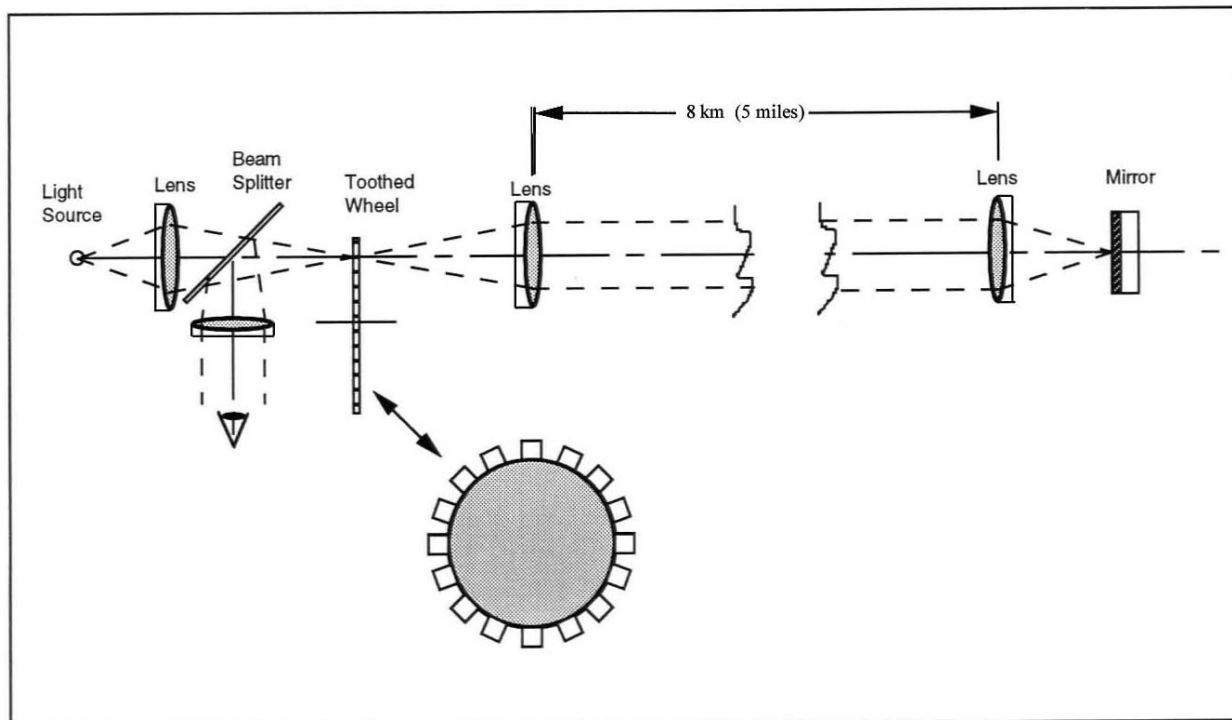
Množina všetkých bodov optického prostredia, do ktorých sa svetlo dostalo v rovnakom čase, je **vlnoplocha**. Myslená čiara, po ktorej sa zo zdroja svetla šíri energia, je **svetelný lúč**. V izotropnom prostredí sú svetelné lúče kolmé na vlnoplochy. V homogénnom prostredí sú svetelné lúče časti priamok (**zákon priamočiareho šírenia svetla**).

Monochromatické svetlo – je svetlo určitej vlnovej dĺžky λ .

Biele svetlo = červené + oranžové + žlté + zelené + modré + fialové (od 380nm do 780nm) = celé frekvenčné spektrum

Rýchlosť svetla – v roku 1849 navrhol Armand Fizeau experimentálny pokus na meranie rýchlosti svetla:

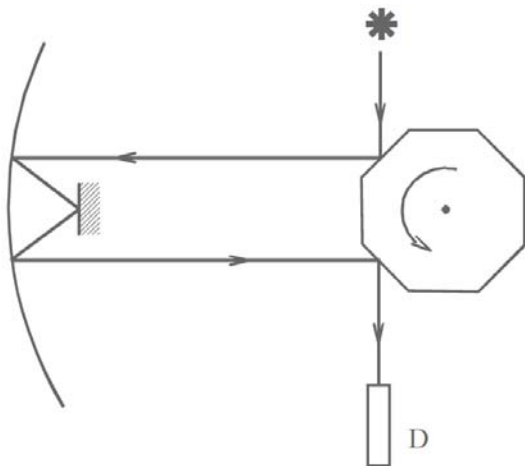




Za polopriepustným zrkadlom *PZ* je „ozubené koliečko“, resp. rotujúci stroboskopický disk, ktorý sa otáča. Akonáhle svetlo prejde otvorom medzi zubami koliečka, postupuje k zrkadlu *Z*, odkiaľ sa po odraze vracia späť. Keď na spiatocnej ceste svetlo prejde rovnakým alebo ďalším otvorom, vidí pozorovateľ v ďalekohľade *D* svetelný zdroj. Ak svetlo dopadne na zub, nevidí nič. Pri určitej uhlovej frekvencii otáčania koliečka je možné určiť veľkosť rýchlosti svetla.

Rok	Autor	Metóda	Výsledok (km/s)	Chyba
1676	Olaus Roemer	Jupiterove mesiace	214,000	
1726	James Bradley	Hviezdna aberácia	301,000	
1849	Armand Fizeau	Polopriepustné zrkadlo	315,000	
1862	Leon Foucault	Zdokonalená metóda od Fizeau - rotujúce zrkadlá	298,000	+ -500
1879	Albert Michelson	Zdokonalená metóda od Fizeau - rotujúce zrkadlá	299,910	+ -50
1907	Rosa, Dorsay	Elektromagnetické konštanty	299,788	+ -30
1926	Albert Michelson	Zdokonalená metóda - rotujúce zrkadlá	299,796	+ -4
1947	Essen, Gorden-Smith	Dutinový rezonátor	299,792	+ -3
1958	K. D. Froome	Rádio-interferometer	299,792.5	+ -0.1
1973	Evanson et al	Laser	299,792.4574	+ -0.001
1983		Definícia metra	299,792.458	

Metóda rotujúcich zrkadiel - Albert Abraham Michelson (americký fyzik)



Metóda rotujúcich zrkadiel pracuje na podobnom princípe ako Fizeauova metóda.

Informácie z Wikipédie: Meranie rýchlosti svetla

Isaac Beeckman, Descartesov priateľ, navrhol experiment (1629) pri ktorom by sa pozoroval záblesk z **kanóna** odrazený zo **zrkadla** vzdialeného asi **míľu**. **Galileo** odporučil experiment (1638), kde by sa rýchlosť svetla merala pozorovaním oneskorenia medzi odkrytím lampáša a jeho vnímaním z určitej vzdialenosti. Descartes tento experiment kritizoval ako zbytočný, keďže experiment počas zatmenia Mesiaca, ktorý mal lepšie predpoklady na zistenie konečnej rýchlosti, bol negatívny. Tento experiment uskutočnila *Accademia del Cimento* z **Florencie** až v roku **1667** s lampášmi vzdialenými asi 1 míľu. Žiadne oneskorenie však nebolo pozorované. **Robert Hooke** nevysvetľoval negatívny výsledok Galileovho experimentu ako potvrdenie nekonečnej rýchlosti svetla, ale iba ako to, že svetlo sa musí pohybovať veľmi rýchlo.

Prvý kvantitatívny odhad rýchlosti svetla bol v roku **1676** spravený **Römerom**, ktorý študoval **teleskopom** pohyb **Jupiterovho** mesiaca **Io**. Pretože Io vchádza/vychádza z tieňa Jupitera v pravidelných intervaloch, je možné zmerať trvanie **orbitálneho prevratu**. Römer si všimol, že ak je Jupiter najbližšie k Zemi, tak mal Io orbitálny prevrat okolo Jupitera každých **42,5 hodín**. Takisto pozoroval, že ako sa Jupiter a Zem od seba vzdalovali, Io vychádzal z tieňa Jupiteru postupne neskôr. Bolo jasné, že výstupným „signálom“ trvalo dlhšie pokiaľ dosiahli Zem, ako sa Zem a Jupiter vzdalovali. To bolo spôsobené dodatočným časom, ktorý bol potrebný pre svetlo na prekonanie dodatočnej vzdialenosti medzi planétami, ktorá sa naakumulovala medzi dvoma po sebe nasledujúcimi signálmi. Podobne, asi o pol roka neskôr, boli vstupy mesiaca Io do tieňa Jupitera o niečo častejšie, keďže sa Zem a Jupiter približovali. Na základe týchto pozorovaní Römer odhadoval, že na prejedenie priemeru obežnej dráhy Zeme by svetlo potrebovalo 22 minút (čo je dvojnásobok **astronomickej jednotky**).

Približne v tom istom čase bola veľkosť **astronomickej jednotky** odhadovaná na 140 miliónov kilometrov. **Christiaan Huygens** vyrátal z tejto astronomickej jednotky a Römerovho odhadu času rýchlosť svetla na 1 000 priemerov obežnej dráhy za minútu, čo je asi 220 000 kilometrov za sekundu. Táto hodnota je oveľa menšia ako je súčasne uznávaná hodnota, ale je stále oveľa vyššia ako akýkoľvek fyzikálny jav známy v tej dobe.

Taktiež **Isaac Newton** akceptoval konečnú rýchlosť svetla. V jeho knihe „**Opticks**“ dokonca publikoval presnejšiu hodnotu rýchlosti svetla – 16 minút za priemer, ktorú sám vyvodil (nie je známe či to bolo z Römerových dát alebo inak). Rovnaký úkaz bol následne pozorovaný Römerom na rotujúcej „škvrne“ na povrchu Jupitera. Aj

neskoršie pozorovania javu s tromi inými Galileovými mesiacmi, kde to bolo ťažšie pozorovať, potvrdili predchádzajúce zistenia.

Dokonce ani tieto pozorovania a dôkazy konečnej rýchlosti svetla neuspokojili každého (predovšetkým **Jean-Dominique Cassina**). Avšak po pozorovaniach **Jamesa Bradleyho** (1728) bola hypotéza nekonečnej rýchlosti svetla definitívne odmietnutá. Bradley vyvodil, že svetlo hviezd dopadajúce na Zem musí dopadať z mierneho uhla, ktorý sa dá vypočítať porovnaním rýchlosti Zeme na jej obežnej dráhe k rýchlosti svetla. Táto pozorovaná „**aberácia**“ bola asi 1/200 stupňa. Bradleym vypočítaná rýchlosť svetla bola 298 000 kilometrov za sekundu. To je iba o málo nižšia hodnota ako je v súčasnosti uznávaná hodnota. Aberácia bola rozsiahlo skúmaná počas nasledujúcich storočí, predovšetkým **Friedrichom von Struve** a **Magnusom Nyrénom**.

Prvé úspešné meranie rýchlosti svetla pozemným prístrojom vykonal **Hippolyte Fizeau** v roku **1849**. Fizeauov experiment bol koncepčne podobný návrhom Beeckmana a Galilea. Lúč svetla bol namierený na zrkadlo umiestnené vo vzdialenosti niekoľkých kilometrov. Na ceste od zdroja svetla ku zrkadlu prešiel lúč rotujúcim diskom so zárezmi. Pri určitej rýchlosti rotácie disku prejde lúč smerom od zdroja jedným zárezom a pri návrate nasledujúcim zárezom. V prípade čo i len malého zrýchlenia resp. spomalenia rotácie disku, zasiahne lúč samotný disk (jeho zub) a nedostane sa naspäť. Rýchlosť svetla sa dá vypočítať zo známej vzdialenosti zdroja a zrkadla, počtu zárezov (resp. zubov) na disku a rýchlosti rotácie. Rýchlosť svetla publikovaná Fizeauom bola 313 000 kilometrov za sekundu. Túto metódu zdokonalil v roku **1872 Marie Alfred Cornu** a v neskôr v roku **1900 Joseph Perrotin**.

Leon Foucault vylepšil Fizeauovu metódu nahradením disku so zárezmi rotujúcim zrkadlom. Foucaultov odhad publikovaný v **1862** bol 298 000 kilometrov za sekundu. Foucaultova metóda bola taktiež použitá **Simonom Newcombom** a **Albertom A. Michelsonom**.

Michelson použil v roku **1926** rotujúce zrkadlá na zmeranie času potrebného pre svetlo na prejedenie vzdialenosti od **Mount Wilson** k **Mount San Antonio** a späť. Výsledkom týchto meraní bola relatívne presne určená rýchlosť svetla na 299 796 kilometrov za sekundu.

Rýchlosť svetla

$$c = 299792458 m.s^{-1}$$

$$c \doteq 300 km.s^{-1}$$

Je to medzná rýchlosť pohybujúcich sa hmotných objektov vo vákuu.

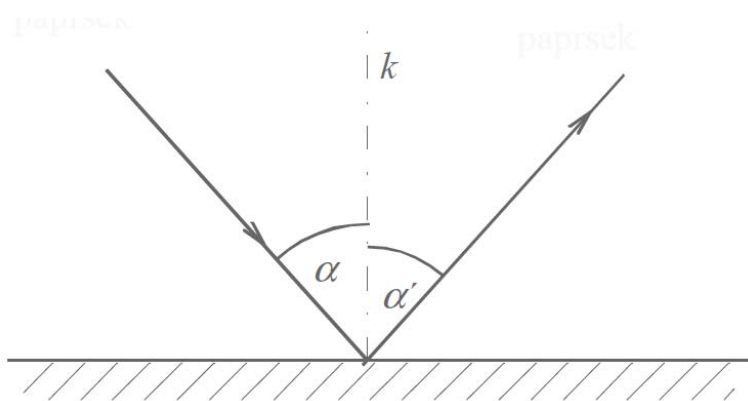
Definícia metra

Meter je dráha, ktorú svetlo prejde vo vákuu za $\frac{1}{299792458} s$. Vo vákuu nezávisí rýchlosť svetla c na jeho frekvencii f . V každom inom prostredí je rýchlosť svetla $v < c$ a zároveň závisí aj na f svetla (teda na vlnovej dĺžke).

1.4.2 Vlnové vlastnosti svetla - odraz a lom svetla

Pri dopade svetla na rovinu dvoch optických prostredí môže nastať odraz a lom a časť svetla sa pohlcuje prostredím.

Odraz: Svetlo sa po odraze od rozhrania vracia do pôvodného prostredia.



k - kolmica dopadu

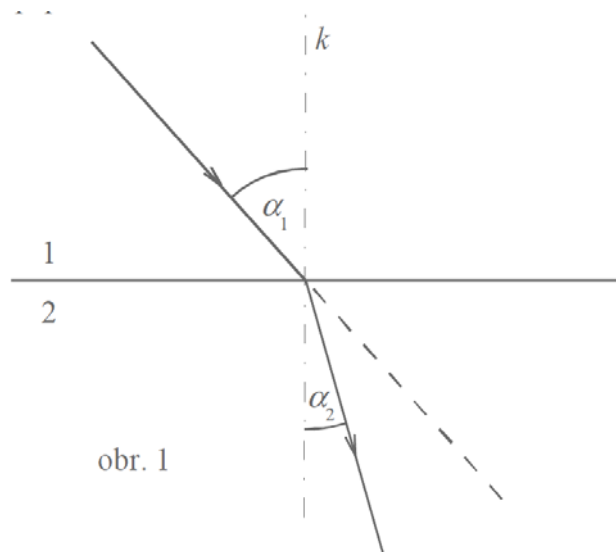
α - uhol dopadu

α' - uhol odrazu

Platí:

1. Uhol odrazu sa rovná uhlu dopadu $\alpha' = \alpha$ (Zákon odrazu)
2. Odrazený lúč zostáva v rovine dopadu (je daná dopadajúcim lúčom a kolmicou dopadu).
3. Uhol odrazu nezávisí na λ dopadajúceho svetla.

Lom: Svetlo po dopade na rozhranie dvoch prostredí preniká do druhého prostredia.



Platí:

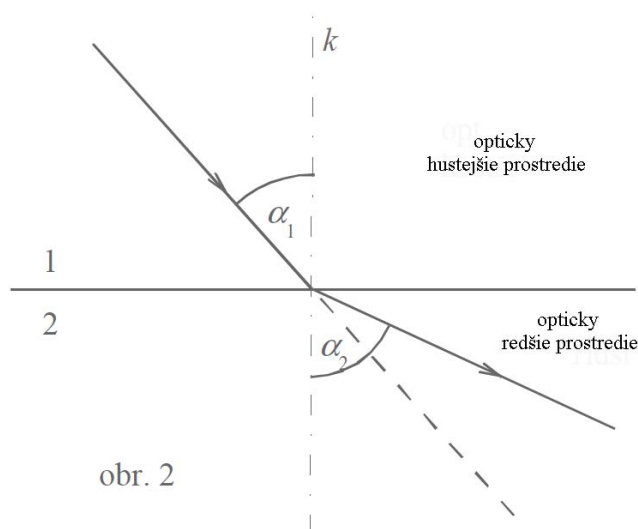
1. Zákon lomu – Snellov zákon - $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} = \text{konšt.}$

Pomer sínusov uhlu dopadu a uhlu lomu je rovný pomeru rýchlostí svetla v prvom a druhom prostredí.

2. Lomený lúč zostáva v rovine dopadu.

3. Uhol lomu závisí na vlnovej dĺžke svetla.

Lom ku kolmici (obr. 1) nastáva vtedy, ak sa svetlo šíri z prostredia opticky redšieho do prostredia opticky hustejšieho. $\alpha_2 < \alpha_1 \Rightarrow \sin \alpha_2 < \sin \alpha_1 \Rightarrow v_2 < v_1$.



Lom svetla ku kolmici (obr. 2) nastáva vtedy, ak sa svetlo šíri z prostredia opticky hustejšieho do prostredia opticky redšieho (napríklad zo skla do vzduchu).

$$\alpha_1 < \alpha_2 \Rightarrow \sin \alpha_1 < \sin \alpha_2 \Rightarrow v_1 < v_2 .$$

1.4.3 Index lomu (Vlnové vlastnosti svetla)

Absolútny index lomu je podiel rýchlosti svetla vo vákuu k rýchlosti svetla v danom prostredí.

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

Je to bezrozmerná veličina, čím je n väčšie, tým je v menšie (opticky hustejšie prostredie).

Charakterizuje optické prostredie, udáva, koľkokrát je väčšia rýchlosť svetla vo vákuu ako v danom prostredí, závisí na λ , to zanemá na f (farbe, energii).

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{v_1}{v_2} \cdot \frac{c}{c} = \frac{c}{v_2} \cdot \frac{v_1}{c} = \frac{v_1}{v_2} = \frac{\frac{c}{n_1}}{\frac{c}{n_2}} = \frac{n_2}{n_1}$$

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1} \text{ resp. } n_1 \sin \alpha_1 = n_2 \sin \alpha_2$$

Vákuum a vzduch ... $n = 1$

Sklo $n = 1,5$

Voda $n = \frac{3}{4}$

Príklady:

1. Vypočítajte rýchlosť svetla vo vode $\left(n = \frac{3}{4} \right)$.

$$n = \frac{c}{v} \Rightarrow v = \frac{c}{n} = \frac{3 \cdot 10^8}{\frac{3}{4}} \text{ m.s}^{-1}$$

$$\underline{\underline{v = 2,25 \cdot 10^8 \text{ m.s}^{-1}}}$$

2. Rýchlosť červeného svetla v skle je 199200 km.s^{-1} , fialového svetla 196700 km.s^{-1} . Určte index lomu skla pre červené a fialové svetlo.

$$n = \frac{c}{v} \Rightarrow n_c = \frac{300000}{199200} = 1,506; n_f = \frac{300000}{196700} = 1,525$$

3. Index lomu ľadu je 1,31; vody 1,33; oleja 1,47; skla 1,51. Aká je rýchlosť svetla v uvedených prostrediach ?

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

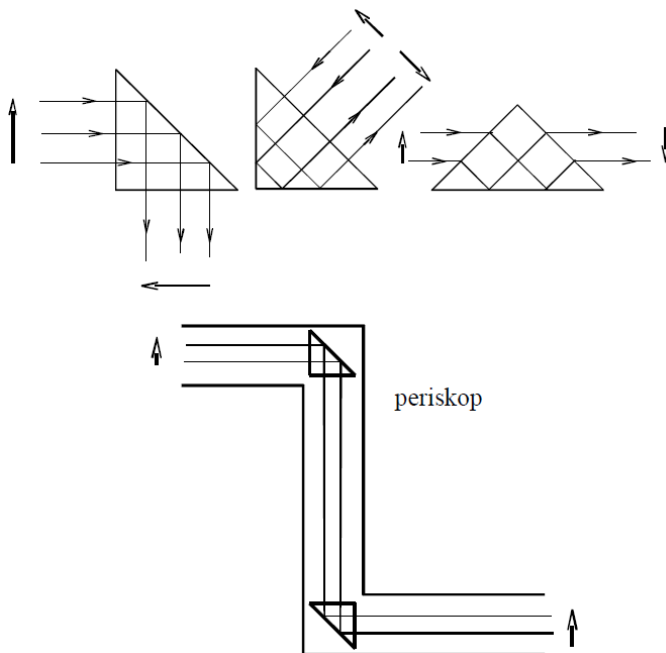
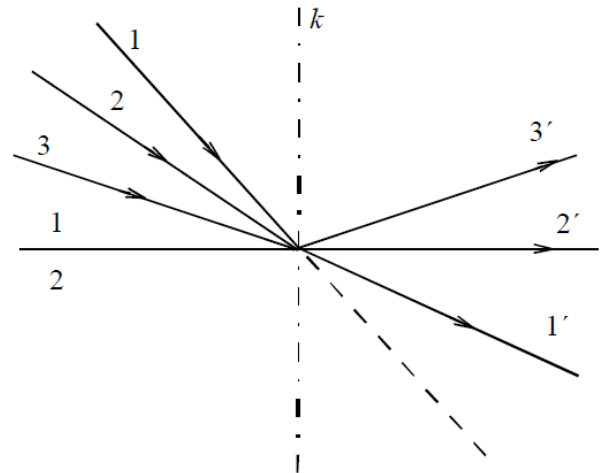
$$v_{\text{ľad}} = 229000 \text{ km.s}^{-1}; v_{\text{voda}} = 226000 \text{ km.s}^{-1}$$

$$v_{\text{olej}} = 204000 \text{ km.s}^{-1}; v_{\text{sklo}} = 199000 \text{ km.s}^{-1}$$

1.4.4 Úplný odraz svetla (Vlnové vlastnosti svetla)

Môže nastať pri lome lúča dopadajúceho z prostredia opticky hustejšieho do prostredia opticky redšieho (napríklad zo skla do vzduchu - $n_1 > n_2$). Pri istom uhle dopadu je uhol lomu rovný $\alpha_2 = 90^\circ$; tento uhol nazývame **medzný uhol** α_m . Pri uhle dopadu väčšom ako medzný

uhol $\alpha > \alpha_m$ svetlo neprechádza do opticky redšieho prostredia, ale sa úplne odráža do pôvodného prostredia – nastane **úplný (totálny) odraz** svetla. Príklady: lesk bublín v kvapaline, v skle, „mokrý“ asfalt v diaľke v letných dňoch.



$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

Z toho vyplýva vzťah pre medzný uhol na rozhraní daného prostredia a vzduchu (vákua):

$$\sin \alpha_m = \frac{1}{n_1}$$

Využitie totálneho odrazu: V odrazných hranoloch namiesto zrkadiel, tiež v rôznych optických prístrojoch – napríklad sklenený trojboký hranol v periskopoch, optických vláknach.

Príklad: Pri akom uhle dopadu nastane úplný odraz, ak svetlo prechádza:

- A. zo skla ($n = 1,5$) do vzduchu;
- B. z vody ($n = 1,3$) do vzduchu;
- C. zo skla do vody ?

$$\sin \alpha_m = \frac{1}{n_1}$$

$$\text{sklo: } \alpha_m = 41^\circ 49'; \text{ voda: } \alpha_m = 50^\circ 17'; \text{ zo skla do vody: } \sin \alpha_m = \frac{n_{\text{voda}}}{n_{\text{sklo}}}; \alpha_m = 60^\circ 04'$$