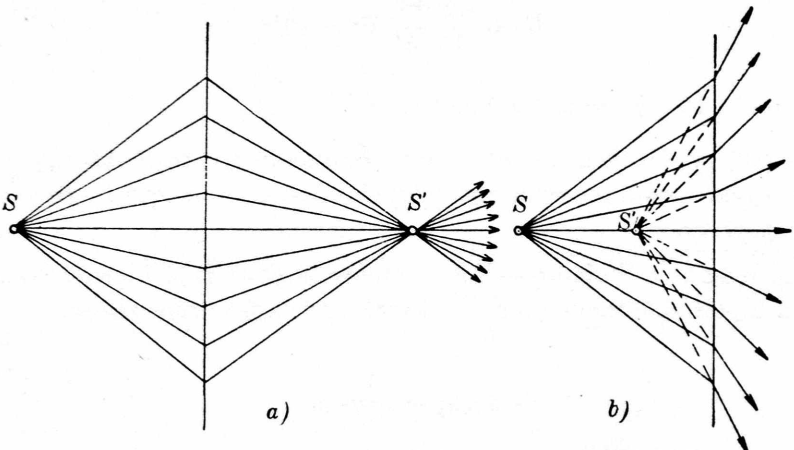
10. ZÁKLADY GEOMETRICKEJ OPTIKY

10.1. Základné zákony geometrickej optiky. Čiara, pozdĺž ktorej sa šíri svetelná energia, volá sa *svetelný lúč*. Z bodového zdroja v rovnorodom prostredí vychádzajú sústredné (homocentrické) lúče rozbiehavé (divergentné). Hovoríme, že sme bod S vlastného alebo nevlastného svetelného zdroja zobrazili, keď sme docielili, že homocentrické lúče vychádzajúce z toho istého bodu zdroja svetla svoj smer zmenili tak, že prechádzajú opäť jedným bodom, obrazom bodu zdroja svetla. Keď lúče so zmeneným smerom prechádzajú



Obr. 10.1.

jedným bodom len svojím spätným predĺžením (*obr. 10.1b*), obraz je *neskutočný* (*virtuálny*), inakšie je *skutočný* (*reálny*), t. j. môžeme ho zachytiť na tienidlo (*obr. 10.1a*).

Geometrická optika je náuka o optickom zobrazovaní. Je vybudovaná na štyroch zákonoch, ktoré možno formulovať aj bez používania akejkoľvek predstavy o fyzikálnej povahe svetla. Sú to:

1. *Zákon priamočiareho šírenia sa svetla*: Vo vákuu a prostredí rovnorodom sú svetelné lúče priamky.

2. *Zákon nezávislosti svetelných lúčov*: Tým istým bodom priestoru môže súčasne prechádzať v rôznych smeroch mnoho svetelných lúčov, ktoré sa vzájomne neovplyvňujú.

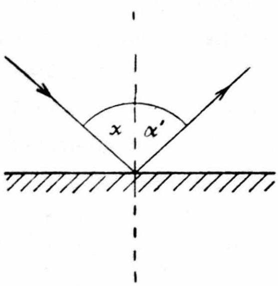
3. *Zákon odrazu svetla*: Kolmica na rozhranie dvoch prostredí v mieste dopadu svetelného lúča určuje s lúčom dopadajúcim rovinu dopadu. Pri odraze ostáva lúč v rovine dopadu a zviera s kolmicou dopadu uhol α' rovnajúci sa uhlu α, zovretému dopadajúcim lúčom a kolmicou dopadu (*obr. 10.2*).

4. *Zákon lomu*: Lúč vnikajúci do iného prostredia ostáva v prostredí izotropnom v rovine dopadu, odchyľuje sa však od svojho pôvodného smeru. Keď uhol dopadu je α_1 a uhol lomu α_2 (*obr. 10.3*), podiel

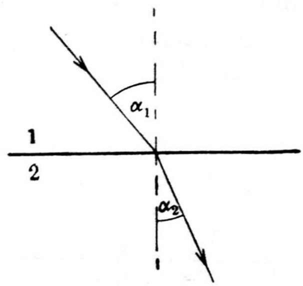
$$n_{12} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} \tag{1}$$

tzv. *relatívny index lomu*, je od uhla dopadu nezávislý, pre každú farbu svetla je však iný (disperzia).

Pre lom aj odraz svetla platí aj veta o zámennosti chodu svetelných lúčov: Keď pri odchádzajúcom lúči zmeníme jeho smer na opačný, takže sa stane lúčom na rozhranie dopadajúcim, bude postupovať od rozhrania pozdĺž priamky pôvodne na rozhranie dopadajúceho svetelného lúča.



Obr. 10.2.



Obr. 10.3.

Všetky štyri základné zákony geometrickej optiky sú však platné len približne. Súvisí to s tým, že svetelný lúč v geometrickom zmysle tohto slova nemožno vlastne uskutočniť. Keď svetelné vlnenie vystupujúce zo zdroja aspoň prakticky bodového omedzíme tienidlom s veľmi malým otvorom, aby sme aspoň približne realizovali svetelný lúč, zistíme, že sa za otvorom šíri svetlo nielen v pôvodnom smere, ale sa „ohýba“ aj na strany (pozri čl. 13.4). Podľa tohto a podobných pokusov zákony geometrickej optiky sú pomerne presne splnené len vtedy, keď prekážky, ktoré stoja svetlu v ceste (alebo otvory, cez ktoré svetlo môže prechádzať), majú podstatne väčšie rozmery, než je vlnová dĺžka skúmaného svetla.

Prostredie, v ktorom pri lome zviera lúč s kolmicou dopadu uhol menší, ako je uhol dopadu, nazýva sa *opticky hustejším*.

Podiel $N = \dfrac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha}$ platný pre lom na rozhraní vákua a nejakého hmotného prostredia, volá sa *absolútny index lomu* tohto prostredia.

Určime chod svetelného lúča planparalelnou vzduchoprázdnou vrstvou. Podľa *obr. 10.4* sú správne rovnice:

$$\frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_1} = N_1, \qquad \frac{\sin \alpha_0}{\sin \alpha_2} = N_2$$

Keď šírku vzduchoprázdnej vrstvy zmenšujeme k nule, smery lúča sa tým nezmenia a dva po sebe nasledujúce lomy sa zmenia na lom jediný.

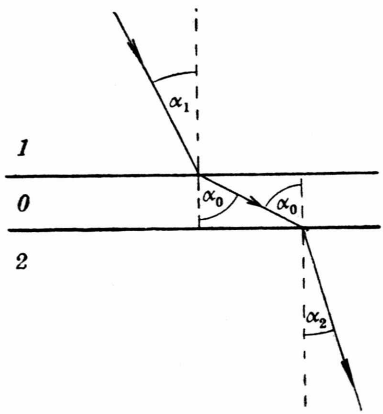
Delením druhej rovnice prvou vyplýva:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \alpha_2} = n_{12} = \frac{N_2}{N_1} \tag{2}$$

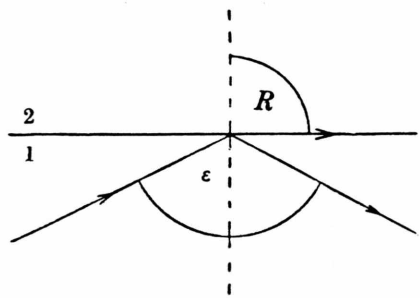
alebo

$$N_1 \sin \alpha_1 = N_2 \sin \alpha_2$$

Z práve odvodeného vzťahu vyplýva, že pri prechode svetelného lúča väčším počtom vzájomne rovnobežných doštičiek súčin $N \,.\, \sin \alpha$ ostáva konštantný. Podľa tohto výsledku *relatívny index lomu na rozhraní dvoch rôznych prostredí sa rovná podielu ich absolútnych indexov lomu v obrátenom poradí.*



Obr. 10.4.



Obr. 10.5.

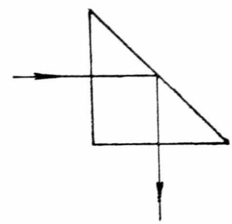
Na rozhraní dvoch prostredí svetelný lúč sa jednak odráža, jednak láme. Keď pri postupe svetla z prostredia opticky hustejšieho do prostredia opticky redšieho uhol dopadu stále zväčšujeme, zväčšuje sa i uhol lomu a je v tom prípade väčší než uhol dopadu. Pri dostatočne veľkom uhle dopadu sa uhol lomu rovná 90° (*obr. 10.5*). Pri uhle dopadu ešte väčšom nastáva už len odraz svetla (*totálny odraz, totálna reflexia*). Príslušný uhol dopadu, tzv. *uhol hraničný* ε, vyplýva z rovnice

$$\frac{\sin \varepsilon}{\sin 90°} = n_{12} = \frac{N_2}{N_1}, \qquad \sin \varepsilon = n_{12} = \frac{N_2}{N_1} \tag{3}$$

Keď redšie prostredie je vákuum, je $N_2 = 1$, $N_1 = N$ a

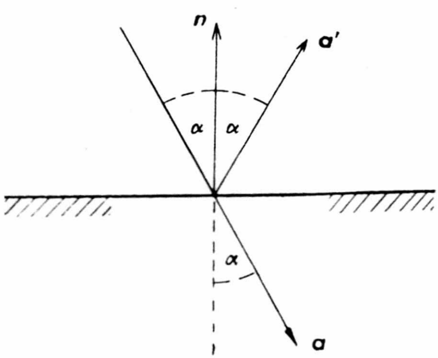
$$\sin \varepsilon = \frac{1}{N} \tag{4}$$

Hraničný uhol sa používa na meranie indexov lomu látok pomocou *refraktometrov* a na zhotovovanie tzv. *totálne reflektujúcich hranolov*. Absolútny index lomu napríklad pre korunové sklo je $N = 1{,}51$, takže hraničný uhol pre prechod svetla z tohto skla do vákua alebo aj do vzduchu, vyplývajúci zo vzťahu $\sin \varepsilon = 1/1{,}51 = 0{,}663$, je $41°30'$. Preto pri dopade svetla na rozhranie medzi sklom a vzduchom pod uhlom $45°$ (*obr. 10.6*) nastáva už úplný odraz.



Obr. 10.6.

10.2. Vektorové vyjadrenie zákona odrazu a lomu svetla. Pri hľadaní výsledného smeru svetelného lúča po jeho viacnásobnom odraze alebo lome na rovinných rozhraniach je výhodné používať vyjadrenie zákona odrazu alebo lomu svetla vo vektorovom tvare. Pri používaní vektorového počtu v geometrickej optike sa smer lúča charakterizuje jednotkovým vektorom s ním súhlasne rovnobežným a poloha rozhrania v priestore jednotkovým vektorom na rozhranie kolmým, orientovaným na stranu svetelného zdroja.



Obr. 10.7.

Majme na mysli najprv odraz svetelného lúča na rovinnom rozhraní (*obr. 10.7*), na ktoré je kolmý jednotkový vektor $\mathbf{n}$. Jednotkové vektory rovnobežné so smerom na rozhranie dopadajúceho lúča a rozhraním odrazeného nech sú $\mathbf{a}$ a $\mathbf{a}'$. Podľa *obr. 10.7* vektorové vyjadrenie *zákona odrazu* svetla môžeme priamo napísať:

$$\mathbf{a}' \times \mathbf{n} = \mathbf{a} \times \mathbf{n} \tag{1}$$

Vektorovým vynásobením tejto rovnice jednotkovým vektorom $\mathbf{n}$ zľava pre vektor $\mathbf{a}'$ dostávame:

$$\mathbf{n} \times (\mathbf{a}' \times \mathbf{n}) = \mathbf{n} \times (\mathbf{a} \times \mathbf{n})$$

teda

$$\mathbf{a}' = (\mathbf{a}' \,.\, \mathbf{n})\, \mathbf{n} + \mathbf{a} - (\mathbf{a} \,.\, \mathbf{n})\, \mathbf{n} = \mathbf{a} - 2(\mathbf{a} \,.\, \mathbf{n})\, \mathbf{n} \tag{2}$$