23. ZÁVISLOST INDEXU LOMU NA VLNOVÉ DÉLCE SVĚTLA

Jestliže se světelný paprsek šíří v homogenním prostředí v daném směru rychlostí v pak veličinu

$$n = c/v \qquad (1)$$

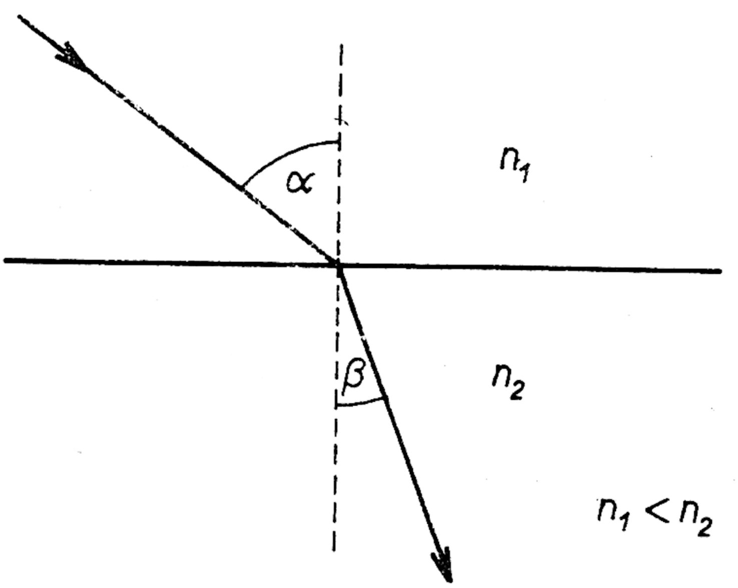
nazýváme absolutním indexem lomu tohoto prostředí v uvažovaném směru; c je rychlost světla ve vakuu. Látky jejichž index lomu je nezávislý na směru šíření světla se nazývají opticky isotropními. V tomto případě je index lomu definovaný vztahem (1) charakteristickou veličinou dané látky.

Poznámka: Za normálních podmínek jsou opticky isotropními látkami plyny, kapaliny, amorfní pevné látky a krystaly s kubickou symetrií.

Při průchodu světelného paprsku rozhraním dvou isotropních prostředí dochází mimo odraz světla také k jeho lomu (obr. 23.1.). Tento jev je popsán Snelliovým zákonem

$$\sin\alpha / \sin\beta = n_2 / n_1 \,, \qquad (2)$$

poměr indexů lomu $n_2/n_1 = n_{12}$ se nazývá relativní index lomu, který charakterizuje lom z jednoho prostředí do druhého. Hodnota absolutního indexu lomu vzduchu pro sodíkovou čáru je $n = 1.0002724$ a proto relativní index lomu, charakterizující lom ze vzduchu do dané látky je přibližně roven absolutnímu indexu lomu dané látky.

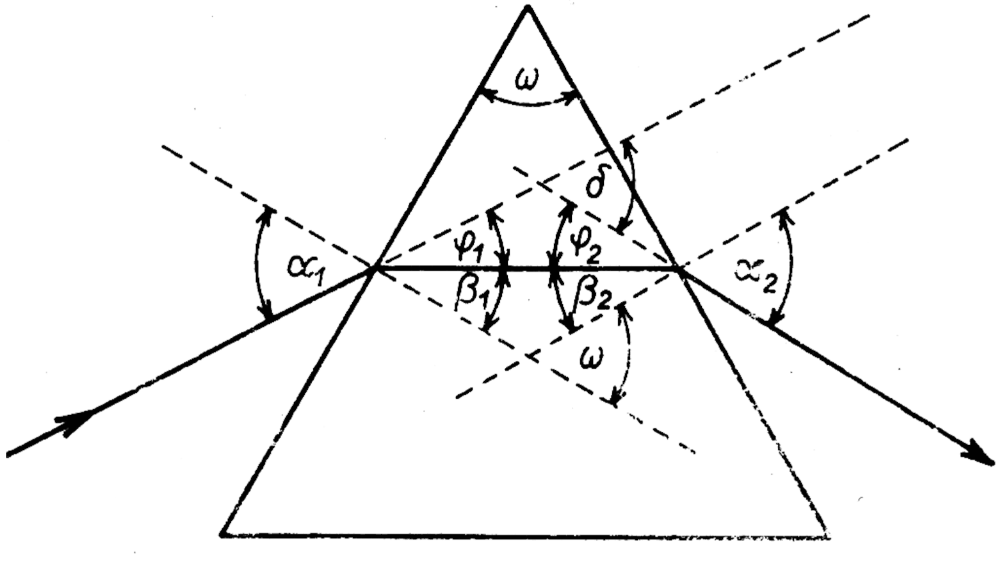


Obr.23.1: Lom světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí charakterizovaných indexy lomu n_1 a n_2.

Všechny látky vykazují disperzi t.j. závislost indexu lomu na vlnové délce světla λ. V oblasti normální disperze /1/ je tato závislost popsána vztahem

$$n = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4} + \dots , \qquad (3)$$

kde A , B , C jsou materiálové konstanty. Ke studiu disperze, t.j. stanovení indexu lomu látky pro různé vlnové délky a stanovení materiálových konstant, využijeme jako disperzní soustavy hranolu. Na trojboký hranol vyrobený ze zkoumané látky nechme dopadat rovnoběžný svazek paprsků. Ten se na lámavých plochách láme, takže směr vystupujícího paprsku se liší od směru paprsku dopadajícího (obr.23.2.). Z principiálních důvodů není možné stanovit pro zvolenou vlnovou délku index lomu ze vztahu (2). Jednou z nejpřesnějších metod stanovení veličiny n je metoda minimální deviace, jejíž princip bude v následujícím vyložen.



Obr.23.2: Lom světelného paprsku hranolem.

Úhel δ mezi směrem paprsku dopadajícím na disperzní soustavu a paprskem vystupujícím z této soustavy se nazývá deviace. Z obr. 23.2. vyplývá, že

$$\delta = \varphi_1 + \varphi_2 \qquad (4)$$

a pro lámavý úhel hranolu ω platí

$$\omega = \beta_1 + \beta_2 \quad . \qquad (5)$$

Dále je zřejmé, že

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \beta_1 + \varphi_1 \\ \alpha_2 &= \beta_2 + \varphi_2 \quad . \end{aligned} \tag{6}$$

Sečtením vztahů (4), (5) a úpravou dostaneme

$$\delta = \alpha_1 + \alpha_2 - \omega \quad , \tag{7}$$

t.zn., že deviace je funkcí úhlu dopadu paprsku na první lámavou plochu. Položme si otázku, za jakých podmínek bude úhel deviace minimální. Extrém závislosti $\delta = f(\alpha_1)$ dostaneme z rovnice

$$\frac{d\delta}{d\alpha_1} = 1 + \frac{d\alpha_2}{d\alpha_1} = 0 \ . \tag{8}$$

Diferencováním Snelliova zákona pro prvé a druhé rozhraní hranolu dostaneme

$$\cos\alpha_1 \ d\alpha_1 = n \cos\beta_1 \ d\beta_1$$

$$\cos\alpha_2 \ d\alpha_2 = n \cos\beta_2 \ d\beta_2$$

a diferencováním vztahu (5) pak

$$d\beta_1 + d\beta_2 = 0 \ .$$

Tedy

$$\frac{d\alpha_2}{d\alpha_1} = - \frac{\cos\beta_2}{\cos\beta_1} \ \frac{\cos\alpha_1}{\cos\alpha_2}$$

a dosazením do (8)

$$\frac{\cos\alpha_1}{\cos\beta_1} = \frac{\cos\alpha_2}{\cos\beta_2} \quad ;$$

jestliže poslední rovnici umocníme a využijeme vztahu (2) pro jednotlivá rozhraní, pak

$$\frac{1 - n^2 \sin^2\beta_1}{1 - \sin^2\beta_1} = \frac{1 - n^2 \sin^2\beta_2}{1 - \sin^2\beta_2}$$

a úpravou dostaneme

$$\sin^2\beta_1 = \sin^2\beta_2 \ .$$

Protože úhly β_1 a β_2 jsou vždy ostré, musí platit, že

$$\beta_1 = \beta_2 \qquad \text{a také}$$

$$\alpha_1 = \alpha_2$$

Dostáváme tak velmi významný výsledek: minimální deviace paprsku světla jisté vlnové délky nastane tehdy, když paprsek prochází hranolem souměrně vzhledem k oběma lámavým stěnám.

Poznámka: Při rozboru je nutné se dále přesvědčit, že nalezený extrém je skutečně minimum t.zn., že $d^2\delta \,/\, d\alpha_1^2 > 0$ /1/.

Když využijeme vztahů (2), (5) a (7) dostaneme pak pro tento zvláštní případ

$$n = \frac{\sin\alpha_1}{\sin\beta_1} = \frac{\sin\frac{1}{2}\,(\omega + \delta_m)}{\sin\frac{1}{2}\,\omega} \,. \qquad (9)$$

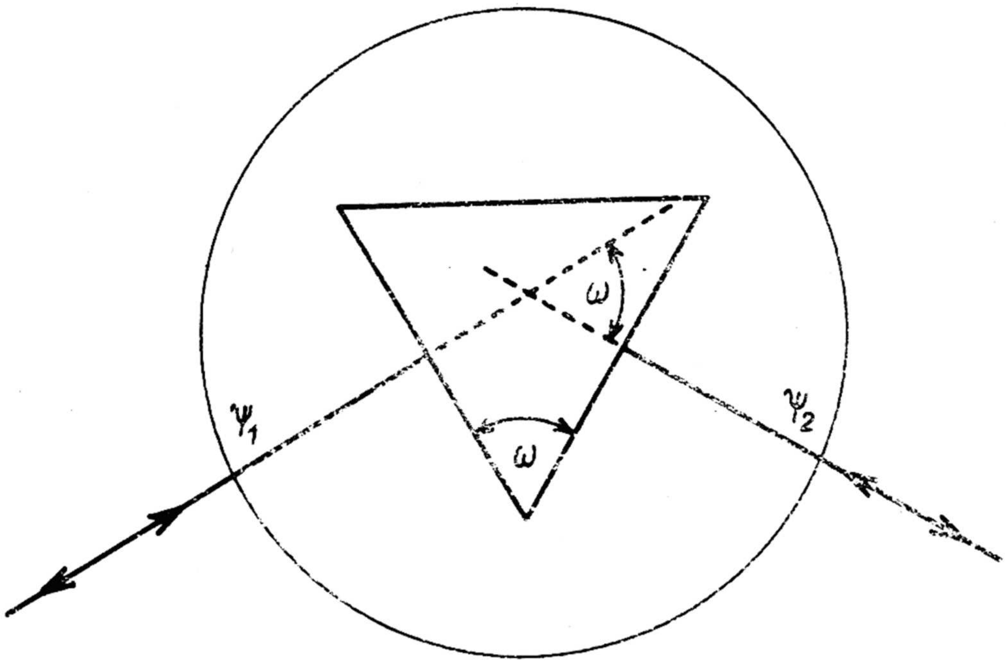
Vidíme, že hledaný index lomu dané látky pro určitou vlnovou délku dostaneme, když stanovíme úhel minimální deviace δ_m a lámavý úhel hranolu ω. Tato úloha je jedním z pěkných příkladů jak je možné se dostat od původně neměřitelných veličin k měřitelným.

Vlastní měření se provádí na goniometru /2/, který se skládá z kolimátoru, dalekohledu s nitkovým křížem, stolečku pro měřenou disperzní soustavu a přesné úhloměrné stupnice. Před měřením je třeba provést justování hranolu na stolečku tak, aby jeho obě lámavé plochy byly kolmé na osu dalekohledu; to se provádí autokolimační metodou zrcadlením nitkového kříže osvětleného pomocným zdrojem /3/. Lámavý úhel hranolu ω lze stanovit:

a) metoda zrcadlení nitkového kříže

Využijeme najustovaného hranolu a ztotožníme na obou plochách nitkový kříž s jeho obrazem (čteme úhly ψ_1 a ψ_2). Pak podle obr.23.3. je zřejmě

$$\omega = 180^\circ - (\psi_1 - \psi_2) \,. \qquad (10)$$



Obr.23.3: Stanovení lámavého úhlu metodou zrcadlení nitkového kříže.

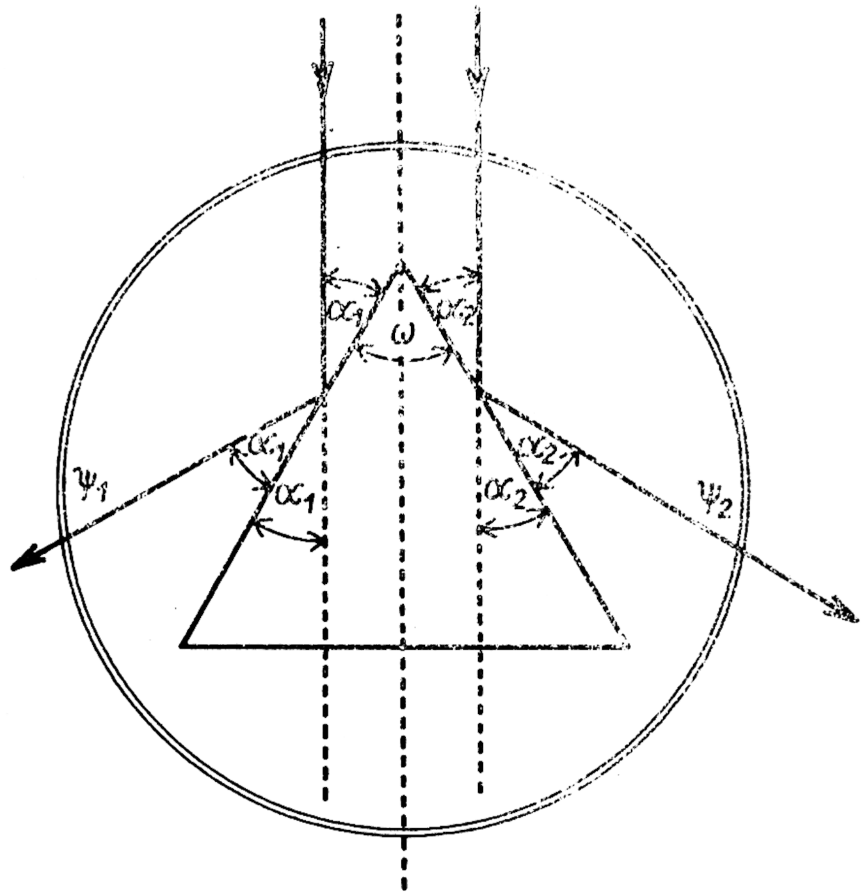
b) <u>metoda zrcadlení štěrbiny kolimátoru</u>

je schematicky znázorněna na obr.23.4. Obě lámavé plochy jsou osvětleny pomocí kolimátoru rovnoběžným svazkem paprsků a dalekohledem pozorujeme obraz štěrbiny po odrazu na lámavých plochách (úhly ψ_1 a ψ_2). Z obrázku je zřejmé, že

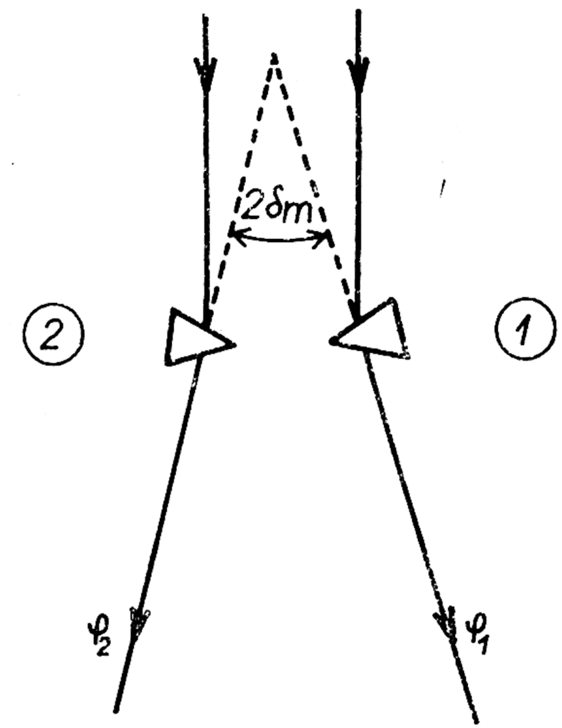
$$\psi_1 - \psi_2 = 2\alpha_1 + 2\alpha_2 = 2\,\omega \quad . \qquad (11)$$

Studium závislosti $n = f(\lambda)$ se provádí pomocí čárového spektra rtuti (Tabulka I). Pro každou ze spektrálních čar je nutné postupně hranol nastavit do polohy minimální deviace. Stolkem goniometru otáčíme a v dalekohledu pozorujeme, že směr otáčení stolku je souhlasný se směrem otáčení čárového spektra. V určitém místě se spektrum zastaví a pak se pohybuje opačným směrem. Bod obratu odpovídá minimální deviaci δ_m pro vybranou spektrální čáru. Měření se zpravidla provádí pro co největší počet čar ve dvou souměrných polohách hranolu 1 a 2 (obr. 23.5.). Pak

$$(\varphi_1)_{\lambda i} - (\varphi_2)_{\lambda i} = 2(\delta_m)_{\lambda i} \qquad (12)$$



Obr.23.4: Stanovení lámavého úhlu metodou zrcadlení štěrbiny.



Obr.23.5: Princip stanovení úhlu minimální deviace.

a jsme tedy schopni stanovit pro jistou vlnovou délku λ_i odpovídající index lomu disperzního prostředí n_i .

Stanovení materiálových konstant A , B , C ve vztahu (3) se ze souboru dvojic λ_i , n_i provádí zpravidla metodou nejmenších čtverců /2/.

Poznámka: Index lomu látek z nichž není možné připravit broušením hranol ale na druhé straně je možné dokonale vyleštit alespoň jednu plochu se zpravidla měří z totálního odrazu (refraktometry) /2/. Tato velmi rychlá a poměrně přesná měření (chyba $\pm$ 0.001) se provádějí buď v bílém nebo v monochromatickém světle.

Tabulka I: Spektrální čáry rtuti ve viditelné oblasti

Barva	Vlnová délka (nm)
fialová	404.6
fialová	407.8
modrá	435.8
modrozelená	491.6
zelená	546.1
žlutá	576.9
žlutá	579.1

Literatura:

/1/ M.Born, E.Wolf, Osnovy optiki, Nauka, Moskva (1973).
/2/ J.Brož a kol., Základy fyzikálních měření I, SPN Praha (1967).
/3/ Z.Horák, Praktická fyzika, SNTL Praha (1958).