



evropský  
sociální  
fond v ČR



EVROPSKÁ UNIE



MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ,  
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY



OP Vzdělávání  
pro konkurenceschopnost

INVESTICE DO ROZVOJE VZDĚLÁVÁNÍ

Ústav fyziky kondenzovaných látek  
Přírodovědecká fakulta, Masarykova univerzita, Brno

## Fyzikální praktikum 2

### 9. Závislost indexu lomu skla na vlnové délce. Refraktometr

#### Úkoly k měření

##### Povinná část

- Měření závislosti indexu lomu skla na vlnové délce metodou minimální deviace.

##### Varianty povinně volitelné části

- Měření indexu lomu polokulovým Abbého refraktometrem.
- Měření indexu lomu dvojhranolovým refraktometrem.

#### Povinná část

##### Úvod

Metodu minimální deviace lze použít ke stanovení indexu lomu vzorků (sklo, plasty, atd.) které mají tvar hranolu. Dvě sousední stěny, kterými vstupuje a vystupuje paprsek spolu svírají lámavý úhel  $\omega$ , který spolu s indexem lomu tvoří parametry hranolu. Paprsek vystupující z hranolu je od vstupujícího paprsku odchýlen o úhel  $\delta$ , nazvaný deviace. Ta závisí na úhlu dopadu  $\alpha$  a na parametrech hranolu – můžeme ji vyjádřit ve tvaru

$$\delta = f(\alpha, \omega, n) = \delta = \alpha - \omega + \arcsin \left[ \sin \omega \sqrt{\left(\frac{n}{n_0}\right)^2 - \sin^2 \alpha} - \cos \omega \sin \alpha \right]. \quad (1)$$

Odvození této závislosti je uvedeno v návodu k úloze 7. Z této závislosti bychom mohli index lomu určit, kdybychom změřili deviaci, lámavý úhel a úhel dopadu. Z průběhu deviace v závislosti na úhlu dopadu vyplývá, že funkce (1) má absolutní minimum pro určitý úhel dopadu. Toto minimum se nazývá minimální deviace  $\delta_m$  a snadno se experimentálně najde jako bod obratu vystupujícího paprsku při monotonní změně úhlu dopadu. Z podmínky pro minimum funkce (1) lze určit vztah pro index lomu, lámavý úhel a minimální deviaci [1]:

$$n = \frac{\sin([\delta_2 + \omega]/2)}{\sin(\omega/2)} \quad (2)$$

V tomto vztahu již nevystupuje úhel dopadu a k určení indexu lomu stačí změřit lámavý úhel hranolu  $\omega$  a minimální deviaci  $\delta_m$  vystupujícího paprsku určité vlnové délky. Tento postup se nazývá metoda minimální deviace.



Obrázek 1: Upravená fotografie spektra rtuťové výbojky. Očíslovány jsou čáry, jejichž vlnové délky jsou uvedeny v tabulce 1.

barva	vlnová délka (nm)	označení v obrázku 1
fialová	404,6	1
fialová	407,8	2
modrá	435,8	3
modrozelená	491,6	4
zelená	546,1	5
žlutá	576,9	6
žlutá	579,1	7
červená	623,4	8

Tabulka 1: Vlnové délky vybraných čar spektra rtuťové výbojky.

Index lomu látek je závislý na vlnové délce světla. Tomuto jevu se říká disperze a je způsobená závislostí rychlosti šíření monochromatické elektromagnetické vlny v látce a na její frekvenci. Disperze je příčinou existence tzv. rozkladu světla hranolem, o kterém se můžeme přesvědčit osvětlíme-li hranol paprskem bílého světla, nebo světlem z výbojky. Pozorujeme, že největší deviace mají paprsky s barvou fialovou a nejmenší s barvou červenou. Tedy s rostoucí vlnovou délkou deviace klesá a protože podle (2) nebo (1) většímu indexu lomu odpovídá větší deviace, klesá index lomu s rostoucí vlnovou délkou. Tato závislost se nazývá normální disperze látky a její znalost je významná z hlediska použití dané látky pro optické účely. Naším úkolem bude zjistit tuto závislost pro sklo, ze kterého je vyroben hranol, tj. určit disperzní křivku hranolu. Teoreticky disperzi můžeme popsat pomocí Cauchyho vztahu:

$$n(\lambda) = A + \frac{B}{\lambda^2} + \frac{C}{\lambda^4}. \quad (3)$$

## Experiment

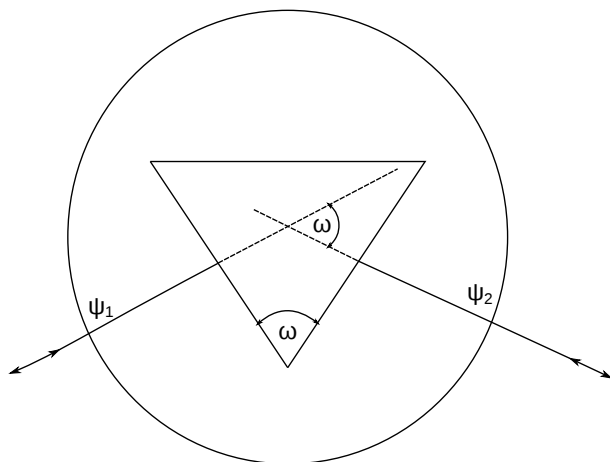
Jako zdroje světla použijeme rtuťovou výbojku, která ve viditelné oblasti spektra obsahuje řadu čar o známých vlnových délkách uvedených v tabulce 1. Potřebné úhly: lámavý úhel  $\omega$  hranolu a úhel  $\delta_m$  minimální deviace paprsků změříme pomocí goniometru. Polohu paprsku budeme určovat vizuálně pomocí nitkového kříže umístěného v ohniskové rovině okuláru dalekohledu, do kterého zobrazíme vstupní šterbinu kolimátoru osvětlenou výbojkou při měření úhlu minimální deviace.

Vlastní měření se provádí na goniometru SG-5, který má pevné rameno s kolimátorem a otočný stolek s měřeným hranolem. Polohu stolku a dalekohledu lze velmi přesně nastavit hrubým a jemným posuvem a číst ji s přesností jednotek úhlových vteřin. Způsob manipulace a odečítání úhlů na stupnici je popsáno v návodu na obsluhu tohoto goniometru. Před měřením je třeba provést justování hranolu, které spočívá v nastavení lámavých ploch kolmo na optickou osu dalekohledu. Provádí se nakláněním stolečku regulačními šrouby. Kolmost se kontroluje autokolimační metodou: nitkový kříž osvětlený žárovkou v okuláru se po odrazu od justované lámavé plochy hranolu zobrazí zpět do ohniskové roviny okuláru dalekohledu. Při ztotožnění nitkového kříže se svým obrazem je lámavá plocha kolmá k optické ose dalekohledu. Postup opakujeme několikrát.

Měření lámavého úhlu  $\omega$  hranolu provádíme tak, že změříme úhel, který spolu svírají paprsky kolmé k lámavým plochám. Je-li úhel mezi kolmicemi  $\psi_1 - \psi_2$ , je lámavý úhel

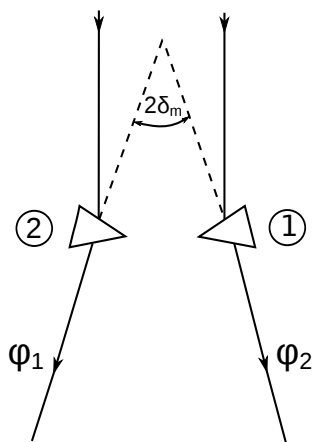
$$\omega = 180 - (\psi_1 - \psi_2), \quad (4)$$

$\psi_1$  a  $\psi_2$  jsou úhlové polohy dalekohledu na stupnici spojené se stolečkem. Při měření otáčíme z polohy  $\psi_1$  do polohy  $\psi_2$  stolečkem spojeným se stupnicí, polohu dalekohledu neměníme.



Obrázek 2: Měření lámavého úhlu hranolu.

Měření úhlu minimální deviace  $\delta_m$  provádíme pro každou spektrální čáru rtuti v bodě obratu paprsku. Najdeme ho změnou úhlu dopadu otáčením stolečku s hranolem. Protože nemůžeme změřit úhlovou polohu paprsku vstupujícího do hranolu (museli bychom sejmut hranol) postupujeme tak, že změříme úhlovou polohu  $\phi_1$  vystupujícího paprsku při jeho vstupu do hranolu první lámavou plochou, pak otočíme stolek s hranolem tak, aby paprsek vstupoval do hranolu druhou lámavou plochou a změříme jeho polohu  $\phi_2$  po výstupu z hranolu. Rozdíl těchto úhlů je



Obrázek 3: Měření úhlu minimální deviace.

dvojnásobek minimální deviace [1]:

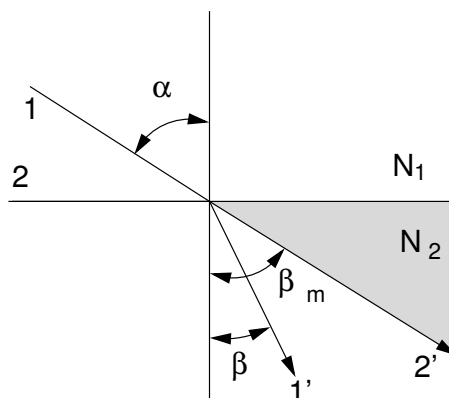
$$\delta_m = (\phi_1 - \phi_2)/2 \quad (5)$$

Při měření postupujeme tak, že nejdříve změříme pro všechny zvolené spektrální čáry polohy  $\phi_1$ , pak hranol otočíme a měříme polohy  $\phi_2$  u stejných spektrálních čar.

Index lomu pro každou spektrální čáru vypočítáme ze vztahu (2). Příslušnou vlnovou délku najdeme v tabulce 1 nebo přímo v tabulkách [2].

## Úkoly

1. Měřený hranol postavte na stoleček goniometru tak, aby jeho lámavé plochy byly zhruba proti stavěcím šroubům.
2. Proveďte justování hranolu metodou zrcadlení nitkového kříže.



Obrázek 4: Lom světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí. Kritický úhel.

3. Změřte lámavý úhel hranolu.
4. Změřte úhly minimální deviace pro čtyři spektrální čáry rtuti v obou polohách hranolu.
5. Vypočítejte index lomu ze vztahu (2) pro každou spektrální čáru a pomocí tabulky 1 nebo [2] jí přiřaďte vlnovou délku  $\lambda$ .
6. Vyneste do grafu závislost indexu lomu na vlnové délce světla a proložte ji Cauchyho vztahem (3).

## Varianta A: Měření indexu lomu polokulovým Abbeho refraktometrem

### Teorie

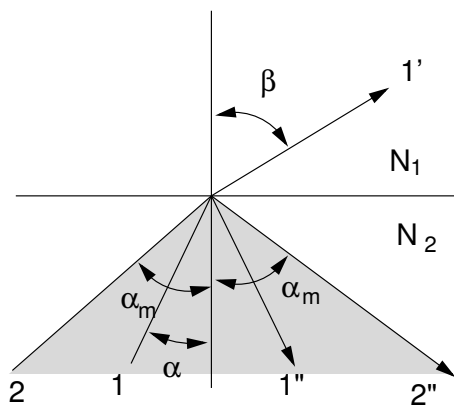
Index lomu pevných látek a kapalin lze snadno a s vysokou přesností zjistit měřením mezního úhlu při lomu resp. odrazu na rozhraní dvou prostředí. Máme-li dvě prostředí (viz obr. 4), charakterizovaná indexy lomu  $N_1$  a  $N_2$  ( $N_1 < N_2$ ) a prochází-li světlo z prostředí o indexu lomu  $N_1$  do prostředí charakterizovaného indexem lomu  $N_2$ , nastává podle Snellova zákona lom paprsků ke kolmici. V mezním případě, kdy je úhel dopadu roven  $90^\circ$  (obráz. 4, paprsek 2), se šíří světlo ve druhém prostředí pod největším úhlem  $\beta_m$ . Tedy do vyšrafované oblasti na obr. 4 nemůže světlo z prvního prostředí lomem vnikat. Potom pro  $\beta_m$  platí

$$\sin \beta_m = \frac{N_1}{N_2}. \quad (6)$$

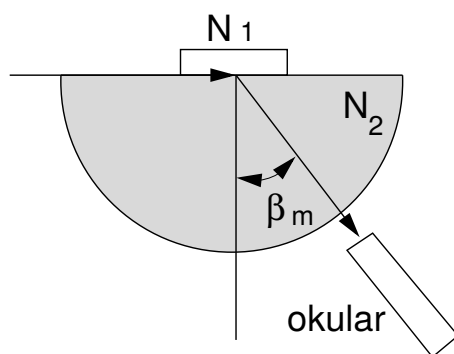
Prochází-li naopak světlo z druhého prostředí do prvního, nastává lom od kolmice (obráz. 5). Je-li úhel dopadu menší než  $\alpha_m$ , pronikne část světla do prvního prostředí a část se odrazí. Je-li úhel dopadu větší než  $\alpha_m$ , nastává totální odraz. Ve vyšrafované části na obr. 5 je tedy intenzita odraženého světla menší ve srovnání s částí nešrafovanou. Pro úhel platí obdobně ze Snellova zákona

$$\sin \alpha_m = \frac{N_1}{N_2} \quad (7)$$

Na principu měření mezního úhlu jsou konstruovány refraktometry, kterými lze měřit rychle a s malým množstvím měřené látky její index lomu.



Obrázek 5: Lom od kolmice světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí.



Obrázek 6: Abbeův polokulový refraktometr při měření v proslém světle.

### Abbeův polokulový refraktometr

Jeho princip pro měření v proslém světle je znázorněn na obr. 6. Měřicí polokoule ze skla s vysokým indexem lomu  $N_2$  je uložena na podstavci, který je otočný kolem svislé osy  $O$ . Proti oblé ploše polokoule je umístěn dalekohled  $D$  otočný kolem osy  $O$ . Jeho poloha se odečítá na úhloměrné stupnici (úhel  $\beta_m$ ). Vzorek zkoumané pevné látky se položí na vyleštěnou rovinnou plochu polokoule, která byla před tím navlhčena imerzní kapalinou (v našem případě 1-bromnaftalen, nebo hřebíčkový olej). Přístroj se ze strany osvětlí monochromatickým světlem a dalekohled se nastaví do takové polohy, aby rozhraní tmavého a světlého pole procházelo středem nitkového kříže. Na stupnici dalekohledu se odečte mezní úhel. Index lomu kapalin se měří tak, že se na rovinnou část polokoule umístí skleněný prstenec, který se naplní troškou testované kapaliny. Není-li znám index lomu skla polokoule, změří se nejprve mezní úhel  $\beta_{m0}$ , který odpovídá situaci, kdy je nad polokoulí vzduch. Platí pak

$$N_2 = \frac{1}{\sin \beta_{m0}}. \quad (8)$$

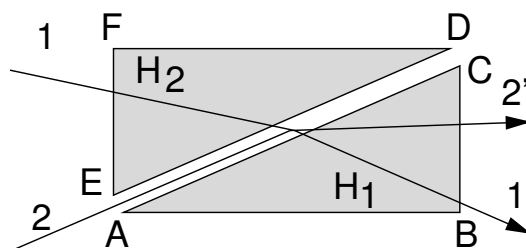
Pak se provede měření mezního úhlu je-li nad polokoulí měřená kapalina s indexem lomu  $N_1$ . Potom pro její index lomu platí

$$N_1 = \frac{\sin \beta_m}{\sin \beta_{m0}}. \quad (9)$$

Skleněnou polokoulí lze otáčet kolem svislé osy. Měření proto opakujeme pro několik poloh polokoule, čímž eliminujeme případnou odchylku horní plochy od směru kolmého ke svislé ose.

### Úkoly

1. Na Abbeově polokulovém refraktometru stanovte mezní úhel měřením v proslém světle.



Obrázek 7: Optický princip dvojhranolového refraktometru.

2. Stanovte dále mezní úhel pro jednu kapalinu měřením v proslém světle.
3. Ze vztahu (9) stanovte pro tuto kapalinu její index lomu a srovnajte s hodnotou uvedenou v tabulkách.

## Varianta B: Měření indexu lomu dvojhranolovým refraktometrem

### Dvojhranolový refraktometr

Základní částí přístroje jsou dva hranoly  $H_1$  a  $H_2$ , zhotovené ze skla s vysokým indexem lomu (obr. 7). Měřicí hranol  $H_1$  má stěny  $AC$  a  $BC$  vyleštěny, strana  $AB$  je zmatovaná. Osvětlovací hranol  $H_2$  má naopak zmatovanou stěnu  $ED$ . Měřený objekt se umísťuje na plochu  $AC$  měřicího hranolu. Je-li měřen index lomu kapaliny, jsou oba hranoly k sobě přiklopeny a mezi ně se vpraví malé množství kapaliny. Chceme-li měřit index lomu pevné látky, musí mít vzorek alespoň jednu plochu rovinnou a dobře vyleštěnou. Vzorek přiložíme touto plochou na stěnu  $AC$ , na kterou je třeba před měřením nanést malé množství kapaliny s indexem lomu vyšším než má měřená látka (obvykle 1-bromnaftalem,  $n = 1,658$ ).

Měření indexu lomu kapaliny lze provádět v procházejícím světle nebo ve světle odraženém. Při měření na průchod vstupuje světlo plochou  $EF$  do osvětlovacího hranolu, na ploše  $ED$  se rozptýlí a vchází do měřené látky. Po lomu vychází stěnou  $BC$ . Tato plocha je pozorována dalekohledem. Při měření v monochromatickém světle je mezi oběma částmi zorného pole ostré rozhraní. Při měření na odraz vstupuje světlo plochou  $AB$  do hranolu  $H_1$  a po odrazu opět vychází plochou  $BC$ .

Měření indexu lomu pevných látek lze provádět také buď v proslém světle (chod paprsku 2) nebo ve světle odraženém (zde platí totéž co pro kapaliny). Je-li měření prováděno v bílém světle, je rozhraní v zorném poli dalekohledu zbarveno. Aby se tato obtíž odstranila, je dvojhranolový refraktometr vybaven kompenzátozem, což jsou dva Amiciovy hranoly. Činnost kompenzátoru spočívá v tom, že se do optické soustavy přístroje zařadí nový hranol, jehož disperze je až na znaménko rovna disperzi měřicí soustavy.

S měřícím hranolem je pevně spojena stupnice kalibrovaná v hodnotách indexu lomu. Odečítá se na ní pomocí lupy umístěné vedle okuláru dalekohledu. Měření na tomto přístroji lze provádět buď v monochromatickém světle sodíkové výbojky (vlnová délka 589.3 nm) nebo ve světle bílém. Z údajů na stupnici kompenzátoru a přiložené tabulky lze stanovit hodnotu střední disperze látky  $n(486,1 \text{ nm}) - n(656,3 \text{ nm})$ .

### Postup měření:

1. Na měřicí hranol nanést malé množství měřené kapaliny a přiklopit osvětlovací hranol.
2. Šroubem na pravé straně přístroje otáčet hranolem tak dlouho, až se v zorném poli dalekohledu objeví rozhraní světlo-tma. Toto rozhraní otáčením šroubu nastavit do průsečíku nitkového kříže v zorném poli dalekohledu.

3. Na stupnici v druhém okuláru odečíst hodnotu indexu lomu měřeného objektu.
4. Pro měření pevné látky nejprve na měřicí hranol nanést malé množství imerzní kapaliny. Na kapku této kapaliny umístit vyleštěnou plochou měřený vzorek.

## Úkoly

1. Na dvojhranolovém refraktometru určete index lomu dvou kapalin a skla z měření v prošlém světle.
2. Měření proveďte v monochromatickém i bílém světle. V případě bílého světla využijte funkce barevného kompenzátoru.

## Literatura:

- [1] A. Kučírková , K. Navrátil, *Fyzikální měření 1*, SPN Praha 1986.
- [2] J. Brož, V. Roskovec, M. Valouch: *Fyzikální a matematické tabulky*, str. 137, SNTL Praha 1980.