

## Fyzikální praktikum 2

### 10. Polarizace světla

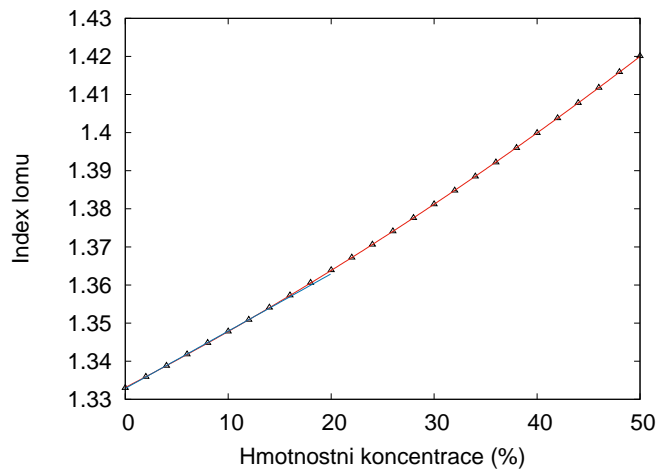
#### Úkoly k měření

- Příprava roztoku sacharózy.
- Určení koncentrace roztoku měřením indexu lomu dvouhranovým refraktometrem.
- Měření optické stáčivosti roztoku sacharózy.
- Malusův zákon, měření polarizační schopnosti reálného polaroidů.

#### Měření indexu lomu a optické stáčivosti roztoku sacharózy

Látky rozpuštěné v roztoku ovlivňují mimo jiné jeho optické vlastnosti. Optická měření bývají rychlá, proto se často používají v analýzách roztoků. V této úloze budeme měřit koncentrační závislost indexu lomu a optické stáčivosti roztoku sacharózy.

#### Závislost indexu lomu roztoku sacharózy na jeho koncentraci



Obrázek 10.1: Závislost indexu lomu roztoku sacharózy. Pro žluté světlo sodíkové výbojky s vlnovou délkou 589 nm. Podle [3, 4]. Červenou čarou je vynesena fit kvadratickou závislostí (10.3) a modrou lineární aproximace (10.4).

Hmotnostní koncentrace roztoků  $c_m$  se definuje

$$c_m = \frac{m_{\text{sach}}}{m_{\text{roz}}}, \quad (10.1)$$

kde  $m_{\text{sach}}$  hmotnost rozpuštěné látky a  $m_{\text{roz}}$  je hmotnost roztoku. Po vynásobení stem dostaneme hodnotu v procentech. Pro malé koncentrace vodných roztoků se předpokládá, že hustota roztoku se příliš neliší od hustoty vody  $1 \text{ g/cm}^3$  a hmotnost roztoku se nahradí jejím objemem

$$c = \frac{m_{\text{sach}} (\text{g})}{V_{\text{roz}} (\text{cm}^3 = \text{ml})} 100 (\%), \quad (10.2)$$

kde hmotnost rozpuštěné látky  $m_{\text{sach}}$  dosazujeme v gramech a objem roztoku  $V_{\text{roz}}$  v kubických centimetrech čili mililitrech. Závislost indexu lomu vodného roztoku sacharózy na jeho koncentraci  $c$  podle [3] je vynesena na obrázku 10.1. Závislost lze popsat kvadratickou formulí

$$n(c) = (1,3330 \pm 0,0003) + (0,00140 \pm 0,00003)c + (6,7 \pm 0,5) \times 10^{-6} c^2, \quad (10.3)$$

kde konstantní člen je roven indexu lomu vody  $n_{\text{voda}}$ . Pro malé koncentrace do 20 % můžeme s dostatečnou přesností použít i lineární vztah

$$n(c) = (1,3330 \pm 0,0003) + (0,00140 \pm 0,00003)c = n_{\text{voda}} + (0,00140 \pm 0,00003)c. \quad (10.4)$$

### Měření indexu lomu pomocí mezního úhlu

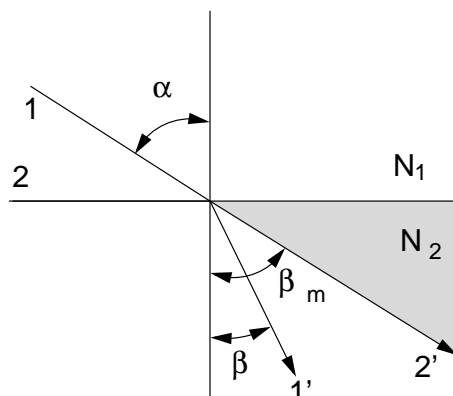
Index lomu pevných látek a kapalin lze snadno a s vysokou přesností zjistit měřením mezního úhlu při lomu resp. odrazu na rozhraní dvou prostředí. Máme-li dvě prostředí (viz obr. 10.2), charakterizovaná indexy lomu  $N_1$  a  $N_2$  ( $N_1 < N_2$ ) a prochází-li světlo z prostředí o indexu lomu  $N_1$  do prostředí charakterizovaného indexem lomu  $N_2$ , nastává podle Snellova zákona lom paprsků ke kolmici. V mezním případě, kdy je úhel dopadu roven  $90$  stupňům (obr. 10.2, paprsek 2), se šíří světlo ve druhém prostředí pod největším možným úhlem  $\beta_m$ . Tedy do vyšrafované oblasti na obr. 10.2 nemůže světlo z prvního prostředí po lomu na rozhraní vnikat. Pro mezní úhel  $\beta_m$  dostáváme podle Snellova zákona

$$\sin \beta_m = \frac{N_1}{N_2}. \quad (10.5)$$

Na principu měření mezního úhlu jsou konstruovány refraktometry, kterými lze určit index lomu rychle a s použitím malého množství měřené látky (kapaliny).

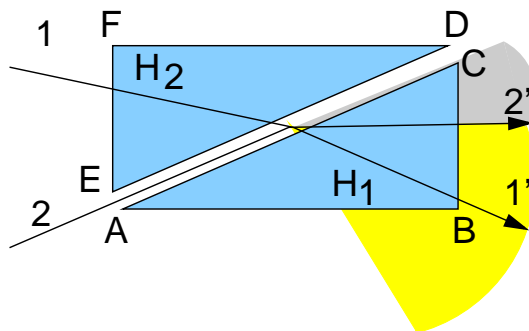
### Dvouhranolový refraktometr

Základní částí přístroje jsou dva hranoly  $H_1$  a  $H_2$ , zhotovené ze skla s vysokým indexem lomu (obr. 10.3). Měřící hranol  $H_1$  má stěny  $AC$  a  $BC$  vyleštěny, strana  $AB$  je zmatovaná. Osvětlovací



Obrázek 10.2: Lom světelného paprsku na rozhraní dvou prostředí pro případ  $N_2 > N_1$ . Dále je vyznačen mezní úhel  $\beta_m$  a žlutě oblast, do níž světlo může procházet. Žádné světlo se neláme do šedě vyznačené oblasti.

hranol  $H_2$  má naopak zmatovanou stěnu  $ED$ . Měřený objekt se umísťuje na plochu  $AC$  měřícího 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,  $n = 1,658$ ).



Obrázek 10.3: Optický princip dvojhranolového refraktometru. Při lomu z měřeného materiálu umístěného mezi hranoly na stěně  $AC$  hranolu  $H_1$  se veškeré světlo láme do žlutě vyznačené výseče, šedá výseč je temná. Směr mezního paprsku  $2'$ , který oděluje světlou a temnou oblast, je dán indexem lomu měřeného materiálu umístěného mezi hranoly podle vztahu (10.5). být menší než index lomu hranolu  $H_1$ , aby se světlo lámalo ke kolmici.

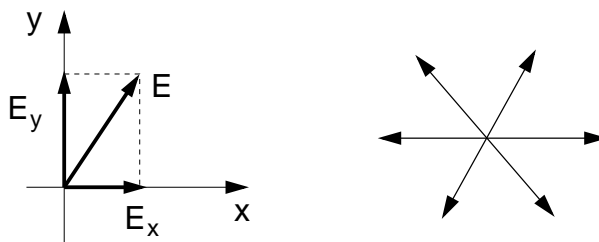
Při měření na průchod vstupuje světlo plochou  $EF$  do osvětlovacího hranolu, na ploše  $ED$  se rozptýlí a vchází do měřené látky. Po lomu vychází stěnou  $BC$ . Tato plocha je pozorována dalekohledem. Při měření v monochromatickém světle je mezi oběma částmi zorného pole ostré rozhraní. Při měření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

Je-li měření prováděno v bílém světle, je rozhraní v zorném poli dalekohledu zbarveno. Aby se tato obtíž odstranila, je dvojhranolový refraktometr vybaven kompenzátorem, 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 měřící 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. Refraktometr má rovněž vedle stupnice indexu lomu dodatečnou stupnici pro měření koncentrace roztoku sacharózy.

Postup měření:

1. Měření provádějte pro všechny roztoky sacharózy a také pro destilovanou nebo deionizovanou vodu. Odečtené hodnoty indexu lomu a koncentrace sacharózy pro čistou vodu se použijí pro kalibraci refraktometru, tj. jako počátek stupnice pro určení koncentrace sacharózy v roztocích.
2. Na měřící hranol nanést malé množství měřené kapaliny a přiklopit osvětlovací hranol.
3. 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.
4. Na stupnici vpravo lupou odečíst hodnotu indexu lomu měřené kapaliny a koncentraci roztoku sacharózy.



Obrázek 10.4: Polarizace denního světla.

## Polarizace světla

Světlo je příčné vlnění elektromagnetického pole. Pro popis světelných jevů plně postačí se zaměřit na chování periodicky proměnného vektoru elektrického pole  $\vec{E}$ . Tento vektor je vždy kolmý ke směru šíření paprsku. Je-li směr vektoru  $\vec{E}$  ve všech bodech paprsku v čase stálý, hovoříme o lineárně polarizovaném světle a rovina, v níž se kmity dějí, se nazývá kmitová rovina nebo rovina polarizace. Lineárně polarizované světlo můžeme dostat lomem nebo odrazem.

Je vhodné rozložit vektor elektrického pole  $\vec{E}$  do dvou navzájem kolmých směrů a vyjádřit ho ve složkách  $E_x$  a  $E_y$  (obr. 10.4, přičemž se světelný paprsek šíří kolmo k rovině obrázku). Je-li fázový posuv  $\delta$  mezi těmito složkami stálý a je-li zároveň roven nule, dostáváme lineárně polarizované světlo. V případě, že  $\delta = \pi/2$  a navíc platí  $E_x = E_y$  opisuje koncový bod vektoru  $\vec{E}$  kružnici a dostáváme kruhově polarizované světlo; v obecném případě, kdy  $0 < \delta < \pi/2$  jde o elipticky polarizované vlnění.

## Optická aktivita látek

Látky jsou opticky aktivní, mají-li schopnost stáčet rovinu lineárně polarizovaného světla. Tuto vlastnost mají jak některé látky pevné tak i některé roztoky obsahující v molekule např. asymetricky umístěný uhlík (vodný roztok sacharózy). Podle směru stočení kmitové roviny se opticky aktivní látky dělí na pravo- a levotočivé vzhledem k pozorovateli hledícímu proti směru šíření světla. Biot stanovil empirický vztah pro úhel stočení kmitové roviny po průchodu aktivní látkou,

$$\alpha = [\alpha]d \quad (10.6)$$

kde  $[\alpha]$  je specifická stáčivost zkoumané látky a  $d$  je tloušťka této látky. Veličina  $[\alpha]$  závisí na teplotě a vlnové délce světla. Jde-li o roztoky, pak

$$\alpha = [\alpha]cd \quad (10.7)$$

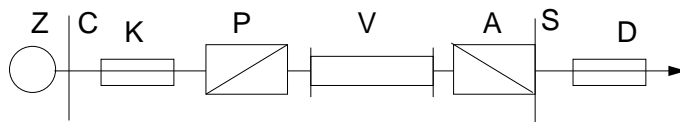
kde  $c$  označuje koncentraci opticky aktivní látky. Specifickou stáčivost roztoku lze stanovit ze vztahu (10.7) polarimetrem:

$$[\alpha] = \frac{100\alpha}{dq}, \quad (10.8)$$

kde  $q$  je počet gramů látky ve  $100 \text{ cm}^3$  roztoku.

Tabulka 10.1: Specifická stáčivost vybraných látek.

látky	specifická stáčivost ( $^{\circ}\text{cm}^3/\text{g}\cdot\text{dm}$ )
Sacharóza	+66,53
Fruktóza	-93,78
Dextróza (D-glukóza)	+52,74



Obrázek 10.5: Polarimetr.

## Polarimetr

Polarimetr slouží k měření úhlu stočení roviny polarizace studovanou látkou (kapalnou, pevnou či plynou). Polarimetr je znázorněn na obr. 10.5. Světlo z monochromatického zdroje (Z) je kolimátorem (K) zpracováno na rovnoběžný svazek paprsků. Průchodem přes polarizátor (P) se vlnění lineárně polarizuje a buď prochází přes měřený vzorek (V) nebo jde přímo na analyzátor (A), kterým lze otáčet kolem optické osy přístroje. Výsledná intenzita prošlého světla se pozoruje dalekohledem (D). Polarizátor a analyzátor jsou zpravidla realizovány pomocí specialních hranolů z opticky anizotropních krystalů. Zkřížíme-li kmitové roviny polarizátoru a analyzátoru, bude intenzita osvětlení zorného pole minimální. Naše oči pozorují minimum osvětlení dosti nepřesně a nespolehlivě, naopak jsou citlivé na kontrast v osvětlení dvou sousedních ploch. Tohoto poznatku se využívá při konstrukci tzv. polostínového zařízení analyzátoru [1, 2], kde se snažíme dosáhnout otáčením analyzátoru takového stavu, při kterém jsou obě poloviny zorného pole osvětleny stejně (málo). Úhel stočení analyzátoru vůči polarizátoru se měří na stupnici (S).

## Měření

Připravíme asi 25 cm<sup>3</sup> 15% roztoku sacharózy a nalijeme do kyvety. Zbytek roztoku zředíme tak, abychom získali 10% roztok sacharózy a znovu odlejeme do druhé kyvety. Postup ještě jednou zopakujeme tak, aby ve třetí kyvetě byl 5% roztok sacharózy.

Zapneme výbojku před polarimetrem. Otáčením analyzátoru nastavíme polostín a odečteme na stupnici nulovou polohu (pozor na správnou stupnici). Kyvetu s roztokem vložíme do přístroje a opět najdeme polostín a na stupnici odečteme úhel stočení. Ze vztahu (10.8) určíme specifickou stáčitost, měření opakujeme alespoň 5×.

## Úkoly

1. Připravte tři roztoky sacharózy o různé koncentraci (15 %, 10 %, 5 %).
2. Na dvouhranolovém refraktometru určete index lomu každého z roztoků sacharózy a také čisté vody.
3. Odečtěte odpovídající koncentraci sacharózy odečtením v refraktometru nebo ji určete podle vztahu (10.4), grafu 10.1 nebo z tabulek [4].
4. Určete polarimetrem úhel stočení kmitové roviny připravených roztoků. Měření všech kyvet opakujte 5×, vždy ve schématu: nulová poloha – první kyveta – druhá kyveta – třetí kyveta.
5. Vypočítejte specifickou stáčitost sacharózy a porovnejte ji s tabelovanou hodnotou, kterou najdete např. v [2], str. 571 nebo v tabulce 10.1.

## Malusův zákon, měření polarizační schopnosti reálných polaroidů

### Úvod

Zdroje světla si lze představit jako soubor velkého množství vzájemně nezávislých zdrojů elektromagnetického záření (atomy, molekuly). Světlo vyzařované např. jedním atomem je lineárně

polarizované tzn. že vektor intenzity elektrického pole  $\vec{E}$  se v čase mění v přesně definované rovině – rovině kmitové. V daném okamžiku se ale ve směru šířícího se paprsku světla šíří energie vyzařovaná mnoha elementárními zdroji. V tomto případě jsou v postupující vlně zastoupeny všechny možné kmitové roviny, hovoříme o přirozeném světle.

Z přirozeného světla můžeme dostat lineárně polarizovanou vlnu pomocí polarizačních přístrojů – polarizátorů. Při odrazu světla na dielektrickém rozhraní závisí odrazivost různě polarizovaných složek na úhlu dopadu podle Fresnelových vztahů. Tento jev je studován v úloze 7. Plně polarizované světlo lze získat při odrazu pod Brewsterovým úhlem. Také světlo po lomu na rozhraní je částečně polarizováno. Klasické polarizátory (Nikolův hranol) využívají dvojlomu v některých krystalech, kdy index lomu závisí na polarizaci. Různě polarizované složky se pak šíří pod různými směry a jednu z nich lze eliminovat při totálním odrazu na jiné stěně hranolu. V současné době se nejvíce používají polarizační fólie (polaroidy) tvořené uspořádanými polymerními vlákny. Propustnost folie je závislá na polarizaci světla. Při vhodné volbě materiálu a tloušťky lze připravit polarizační folie s vysokou účinností.

### Malusův zákon

Na obrázku 10.6 označuje P polarizátor, A analyzátor,  $I_0$  je intenzita přirozeného světla dopadajícího na polarizátor,  $I'_0$  je intenzita světla po průchodu polarizátorem. Dále je  $I$  intenzita svazku, který prošel analyzátozem A a  $\alpha$  je úhel mezi kmitovými rovinami vektoru  $\vec{E}$  před a po průchodu analyzátozem. Označíme-li amplitudu vektoru  $\vec{E}$  před průchodem analyzátozem  $a_0$  a po průchodu  $a$ , pak podle předchozího obrázku platí

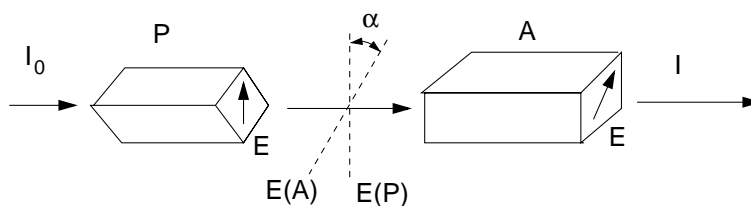
$$a = a_0 \cos \alpha. \quad (10.9)$$

Intenzita světla je úměrná druhé mocnině amplitudy, tedy intenzita prošlého světla analyzátozem je dána vztahem

$$I = I'_0 \cos^2 \alpha, \quad (10.10)$$

což je matematický zápis Malusova zákona. V případě nedokonalých polarizátorů bude část světla pronikat i při zkřížených polarizátorech. Malusův zákon pak můžeme upravit

$$I(\alpha) = I_{\min} + (I_{\max} - I_{\min}) \cos^2 \alpha. \quad (10.11)$$



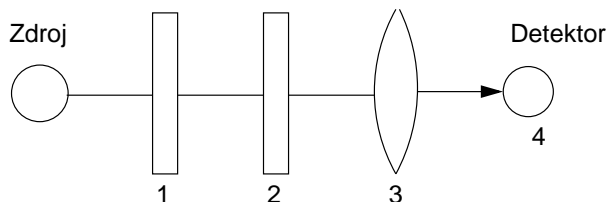
Obrázek 10.6: Schéma Malusova pokusu.

### Ověření platnosti Malusova zákona

Využijeme uspořádání podle obr. 10.7 se dvěma polarizátory (Nikolovým hranolem a polarizační fólií) a světelný zdroj umístíme tak, aby světlo procházelo oběma polarizátory. Platnost Malusova zákona ověříme tak, že jeden z polarizátorů necháme v libovolné, ale stále stejné poloze a druhým budeme otáčet s pevným krokem v rozsahu  $0^\circ$  až  $360^\circ$ . Závislost fotoproudu na úhlu stočení obou polarizátorů by měla odpovídat závislosti dle vztahu (10.11). Tuto závislost můžeme ještě dále využít ke stanovení stupně polarizace světla. Částečně polarizované světlo si lze představit

složeno z části polarizované (intenzita  $I_p$ ) a části nepolarizované ( $I_n$ ). Stupeň polarizace  $V$  částečně polarizovaného světla je dán vztahem

$$V = \frac{I_p}{I_p + I_n}. \quad (10.12)$$



Obrázek 10.7: Uspořádání pro ověření Malusova zákona. 1 – první polarizátor, 2 – druhý polarizátor, 3 – fokusační čočka, 4 – detektor.

Mějme dva polarizátory z nichž první je nedokonalý (s nízkým stupněm polarizace) a druhý téměř dokonalý. Předpokládejme, že propustnost druhého polarizátoru pro světlo polarizované v polarizační rovině polarizátoru je rovna 1 a pro světlo polarizované kolmo k jeho polarizační rovině rovna 0. Testujeme stupeň polarizace prvního polarizátoru. Po průchodu polarizátorem č. 1 jsou intenzity polarizovaného světla  $I_p^{(1)}$  a  $I_n^{(1)}$ . Jsou-li kmitové roviny obou polarizátorů rovnoběžné, dostaneme po průchodu světla oběma polarizátory intenzitu

$$I_{\max} = I_p^{(1)} + \frac{I_n^{(1)}}{2}, \quad (10.13)$$

protože lineárně polarizovaná složka projde i druhým polarizátorem, ale z nepolarizované složky jen jedna polovina. Naopak, jsou-li kmitové roviny navzájem kolmé, pak projde přes druhý polarizátor pouze polovina z nepolarizované složky

$$I_{\min} = \frac{I_n^{(1)}}{2}. \quad (10.14)$$

Dosadíme-li  $I_p^{(1)}$  a  $I_n^{(1)}$  do vztahu (10.12), dostaneme pro stupeň polarizace vztah

$$V = \frac{I_{\max} - I_{\min}}{I_{\max} + I_{\min}}. \quad (10.15)$$

Stupeň polarizace tedy určíme ze závislosti fotoproudu na úhlu stočení polarizátoru.

## Úkoly

1. Měření provádějte v monochromatickém světle s vybraným barevným filtrem.
2. Jeden z polarizátorů nechejte v pevné poloze, druhým otáčejte.
3. Zaznamenávejte hodnoty fotoproudu na měřidle odpovídající nastaveným úhlům.
4. Vyneste závislost fotoproudu na úhlu otočení polarizátoru.
5. Ze vztahu (10.15) určete stupeň polarizace druhého polarizátoru.

---

**Užití v praxi:** Stáčení roviny polarizace je prakticky využitelné právě v relativně velmi přesné metodě měření koncentrace látek v roztoku (pokud jsou opticky aktivní). Aplikace polarizátorů jsou ovšem mnohem širší – od polarizačních brýlí (včetně těch používaných při stereoskopických 3D projekcích) přes zobrazování

pomocí LCD (opticky aktivní krystaly v elektrickém poli mezi dvěma zkříženými polarizátory) až po defektoskopii (opět zkoumání stáčení polarizace tentokrát vlivem pnutí v průhledném materiálu). Přímé užití Malusova zákona lze nalézt ve spojitě ztmavovatelných brýlích, nebo u rychlých elektricky ovládaných optických závěrek (podobně jako u tekutých krystalů se i zde řídí stáčení polarizace pomocí elektrického pole). Laboratorní zkoumání změn polarizace při odrazu na materiálech pak umožňuje určovat dielektrické funkce (i vícevrstevných vzorků) technikou zvanou elipsometrie.

### Literatura:

- [1] A.Kučírková a K. Navrátil: *Fyzikální měření I*, SPN Praha 1986.
- [2] Z. Horák: *Praktická fyzika*, SNTL Praha 1958.
- [3] *CRC, Handbook of Chemistry and Physics*, editor D.R. Lide, str. 8–81, the 84th edition, CRC Press, 2003–2004.
- [4] <http://www.refractometer.pl/refraction-datasheet-sucrose>