

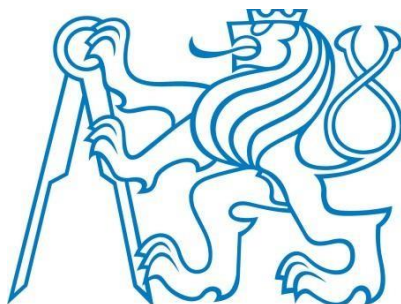
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

2017

Hysen Abdihojha



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta elektrotechnická

Katedra telekomunikační techniky

Bakalářská práce

Vliv optické aktivity chirálních látek na průchozí optické záření

Influence of optical activity of chiral media on transmitted optical radiation

Studijní program: Komunikace, multimédia a elektronika

Studijní obor: Síťové a informační technologie

Vedoucí práce: Ing. Matěj Komanec, Ph.D.

Hysen Abdihoxha

Praha 2017

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem zadanou bakalářskou práci vypracoval samostatně s přispěním vedoucího práce a konzultantů a používal jsem pouze literaturu v práci uvedenou. Dále prohlašuji, že nemám námitek proti půjčování nebo zveřejňování mé bakalářské práce nebo její části se souhlasem katedry.

V Praze dne

.....

Hysen Abdihoxha

Poděkování

Chtěl bych poděkovat panu Ing. Matěji Komancovi Ph.D., vedoucímu mého projektu, za cenné rady, důležité připomínky, poskytnutí dobrých informačních zdrojů, vstřícný přístup a pomoc během zpracování této bakalářské práce. Také bych poděkoval rodině za podporu.

Hysen Abdihoxa

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Abdíhoxha** Jméno: **Hysen** Osobní číslo: **434890**
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**
Zadávající katedra/ústav: **Katedra elektromagnetického pole**
Studijní program: **Komunikace, multimédia a elektronika**
Studijní obor: **Síťové a informační technologie**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Vliv optické aktivity chirálních látek na průchozí optické záření

Název bakalářské práce anglicky:

Influence of optical activity of chiral media on transmitted optical radiation

Pokyny pro vypracování:

Bakalářská práce je zaměřena na opticky aktivní jev (chiralitu). Tento jev se projevuje stáčením roviny polarizace procházejícího optického záření chirálním prostředím. Student naváže na předchozí individuální projekt a bude se zabývat zejména optickou aktivitou roztoků cukrů. Nejprve bude vypracována teoretická studie vlivu vlnové délky, chiralilty a délky interakce na stáčení roviny polarizace. Budou diskutovány Jonesovy matice pro popis polarizačních vlastností a jejich využití pro analýzu optické aktivity. Hlavním výstupem práce pak bude experimentální ověření teoretických předpokladů - sestavení experimentálního pracoviště a měření optické aktivity připravených roztoků cukrů na alespoň dvou vlnových délkách. Výstupy měření budou porovnány s teoretickými předpoklady.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Hu, R.; O'Sullivan, M.: Fiber Optic Measurement Techniques, Academic Press, 2009, ISBN: 978-0-123-73865-3.
- [2] Saleh, B. E. A.; Teich, M. C.: Fundamentals of Photonics, 2nd Edition, Wiley, 2007, ISBN: 978-0-471-35832-9.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Matěj Komanec Ph.D., katedra elektromagnetického pole FEL

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **20.02.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **26.05.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce

Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, a výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Anotace:

Ten projekt se zabývá změnou polarizace v opticky aktivních látkách, které se nazývají chirálními. Stáčení roviny polarizace umožňuje zjistit koncentrace převážně cukrů ve vodném roztoku. V této práci se budeme zabývat teoretickým rozbohem a měřením pomocí polarimetrie. Polarimetr nachází své uplatnění hlavně v oborech zabývajících se studiem látek, např. chemický a farmaceutický průmysl. Pokud známe index lomu daných látek a vztah pro souvislost stáčení roviny polarizace na koncentraci, můžeme ověřit dané teoretické předpoklady. Jakýkoliv stav polarizovaného světla (u laseru, za polarizátorem a po průchodu kyvetou) můžeme reprezentovat pomocí Jonesových matic.

Stáčení roviny polarizace závisí na délce kyvety, koncentraci, vlnové délce a teplotě.

Klíčová slova:

polarizace, chirální látky, polarizátor, Jonesovy matice, enantiomery

Summary:

This project deals with change of polarization in optically active substances, which are called chiral. The rotation of the polarization plane makes possible to determine the concentrations of predominantly sugars in the aqueous solution. In this work we will deal with theoretical analysis and measurement by means of polarimetry. Polarimeters are applied mainly in the field of study of substances, e.g. chemical and pharmaceutical industry. If we know the refractive index of the substances and the relationship for the connection of the polarization plane to the concentration, we can verify the theoretical assumptions. We can describe the state of any polarized light (at laser, behind the polarizer, passage through the cuvette) using Jones calculus.

The rotation of the polarization plane depends on the cuvette length, concentration, wavelength and temperature.

Index Terms:

polarization, chiral substances, polarizer, Jones calculus, enantiomers

Seznam symbolů:

$[\alpha]_T^\lambda$	specifická rotace (již známa)
λ	vlnová délka
T	teplota v Kelvinech
α	úhel otáčení od osy y
c	koncentrace v rozpouštěci
l	délka trubice
n_l	levotočivý index lomu molekul
n_r	pravotočivý index lomu molekul
E	elektrické pole
E_{eff}	efektivní elektrické pole
A, B, δ, C	složky světla v Jonesových maticích
k	vlnové číslo
ω	úhlová rychlost
λ_{vac}	vlnová délka ve vakuu
λ_0	difuzní konstanta
I	intenzita

Seznam tabulek:

Tabulka 1 Struktura a specifická rotace některých látek

Tabulka 2 Specifická rotace glukózy

Tabulka 3 Měření glukózy na jiné vlnové délce

Tabulka 4 Závislost specifických rotací na vlnové délce

Tabulka 5 Měření fruktózy

Obsah

1. Úvod	1
2. Polarizace	2
3. Polarizátor a Malusův zákon	4
4. Optická aktivita	5
5. Chirální látky	6
6. Aplikace polarimetrů (sacharimetrů)	9
7. Komerční polarimetry	10
8. Jonesovy vektory pro reprezentaci polarizace	11
9. Lineární polarizátory a Jonesovy matice	12
10. Výpočty	13
11. Metodika měření	14
11.1. Hustoměr	14
11.2. Pomocí jiných chemických látek	14
11.3. Měření koncentrace pomocí n (index lomu)	14
12. Závislost na teplotě	15
13. Závislost na vlnové délce	15
14. Měřicí systém	16
14.1. Laser	16
14.2. Kyveta	17
14.3. Detektor	17
15. Příprava měření	18
15.1. Uspořádání experimentu	18
15.2. Postup měření	18
16. Výsledky z měření	19
16.1. Měření glukózy	19
16.2. Měření fruktózy	22
17. Závěr	24
18. Seznam použité literatury	25

1. Úvod

Určité látky jsou schopné interagovat s optickým zářením a stáčet rovinu polarizace v případě lineárně polarizované vlny. Tyto látky se nazývají chirálními a k nejznámějším patří sacharidy. Metoda měření úhlu stáčení roviny polarizace najde své uplatnění v oborech zabývajících se chemickou analýzou, především ve farmaceutickém průmyslu. Je známo, že více než čtvrtina léků dostupných na trhu obsahuje tzv. enantiomery.

Polarimetrie nám umožňuje velmi přesná měření těchto látek. Geometrická struktura molekul léků může mít značné důsledky na lidském těle, v nejhorším možném scénáři nepožadovaný enantiomer způsobuje vážnou toxicitu. Proto je taková metoda definována v mezinárodním doporučení (International Pharmacopoeia) jako jedna z nejpřesnějších.

V naší práci se budeme zabývat změnou polarizace průchodem světla optickými prvky jako filtr, nádobka a výsledný filtr pomocí Jonesových matic. Jonesovy matice se používají pro popis polarizace jakékoliv rovinné vlny.

Stáčení roviny polarizace závisí na délce kyvety, koncentraci, vlnové délce a teplotě.

2. Polarizace

Světlo je charakterizováno dualitou, můžeme na něj vidět jako částice nebo jako elektromagnetické vlnění. Pro cíle této práce se budeme zabývat světlem jen jako elektromagnetická vlna.

Nechť máme řešení Maxwellovy rovnice rovinné elektromagnetické vlny (v našem případě světlo), danou vztahem:

$$\vec{E}(\mathbf{r}, t) = \mathbf{E}_0 e^{i(\mathbf{k}\mathbf{r} - \omega t)} \quad (2.1)$$

Vlnový vektor \mathbf{k} určuje směr šíření. Zanedbáváme absorpci tak, aby index lomu byl reálný a $\mathbf{k} = n \frac{\omega}{c} = n \frac{2\pi}{\lambda_{vac}}$. V izotropním prostředí platí, že \mathbf{k} a \mathbf{E}_0 jsou kolmé, ale i když známe směr \mathbf{k} nejsme schopni určit \mathbf{E}_0 jednoznačně (můžeme libovolně zvolit umístění vektoru \mathbf{E}_0 v rovině kolmé na \mathbf{k}). Zorientujeme-li souřadnicový systém tak, aby osa z odpovídala směru \mathbf{k} dostaneme následující vztah:

$$\vec{E}(z, t) = (E_x \hat{x} + E_y \hat{y}) e^{i(kz - \omega t)} \quad (2.2)$$

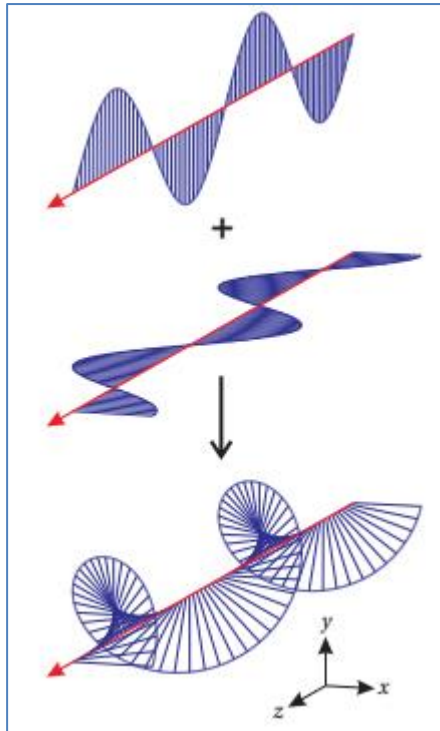
Pouze reálná část předchozí rovnice je fyzicky relevantní, zatímco komplexní amplitudy E_x a E_y sledují fázi oscilujících složek pole. Obecně komplexní fáze E_x a E_y se mohou lišit tak, že vlna v jedné ose ovlivňuje (zpožďuje nebo vede) vlnu ve druhé ose. Vztah mezi E_x a E_y popisuje polarizaci světla. Například, pokud E_y se rovná nule mluvíme o lineárně polarizované vlně ve směru osy x . Lineárně polarizované světlo může mít jakoukoli orientaci v rovině x - y , a to vždy, když E_x a E_y mají stejnou komplexní fázi (nebo fáze se liší o π). Pro naše účely osa x bude vodorovná a osa y bude svislá.

- Kruhově polarizované světlo

Nechť $E_y = iE_x$, kde E_x je reálná. Y -složka pole pak není ve fázi s x -složkou (liší se faktorem $i = e^{\frac{i\pi}{2}}$).

$$\begin{aligned} E(z, t) &= \text{Re}[E_x e^{i(kz - \omega t)}] \hat{x} + \text{Re}\left[e^{\frac{i\pi}{2}} E_x e^{i(kz - \omega t)}\right] \hat{y} \\ &= E_x \cos(kz - \omega t) \hat{x} + E_x \cos(kz - \omega t + \pi/2) \hat{y} \\ &= E_x (\cos(kz - \omega t) \hat{x} - \sin(kz - \omega t) \hat{x}) \hat{y} \end{aligned} \quad (2.3)$$

Chování elektrického pole v ose x se děje v ose y o čtvrtinu cyklu později. Pole se nikdy nevynuluje současně v obou osách. Ve skutečnosti, elektrické pole v tomto případě je konstantní a můžeme hovořit o levotočivé polarizaci díky tomu, že pole tvoří kruhové vzory. To je důvod, proč je to pole nazýváno kruhově polarizované. V následujícím obrázku je znázorňováno sčítání dvou lineárně polarizovaných vln a z těch bude kruhově polarizovaná vlna.



Obrázek 1 Sčítání dvou lineárně polarizovaných vln (převzato z [1])

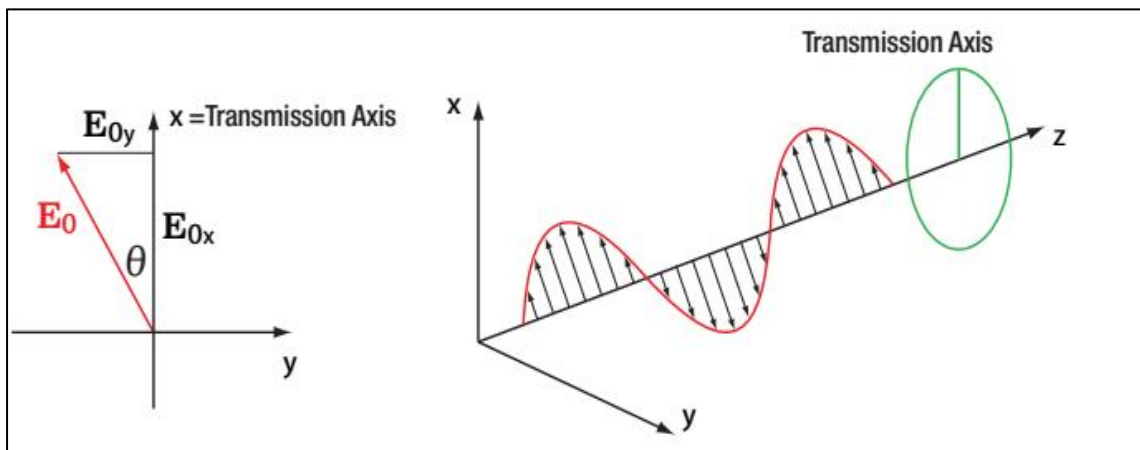
Kdybychom se mohli dívat na kruhově polarizované světlo v určitém okamžiku času, vektor elektrického pole \mathbf{E} se otáčí podél osy z . Je-li směr spirály (v daném okamžiku) shodný s běžným vrtem orientován podél osy z , jedná se o pravotočivou polarizaci. Je-li v opačném smyslu, jedná se o levotočivou polarizaci. Pole ukazováno v obrázku je příklad levotočivého polarizovaného světla.

Z lineárně polarizovaného světla se po odrazu z povrchu kovu může stát kruhově, nebo obecněji elipticky, jestli dopadající světlo má obě rovnoběžné a kolmé polarizované složky. Je důležité vědět, že odrazy od vícevrstevých dielektrických zrcadel mohou vykazovat fázové posuvy. [1]

3. Polarizátor a Malusův zákon

Polaroid (polarizační filtr) je představitelem tzv. absorpčních polarizátorů. V roce 1928 Edwin Land vynalezl levné polarizační zařízení. Udělal to natahováním polymerové desky a infuzí s jódem. Natahování způsobil zarovnání polymerových řetězců podél společného směru, hned poté co na vrstvu lepil substrát. Infuze jódem způsobila to, že se z jednotlivých řetězců staly vodivé, stejně jako mikroskopické vodiče.[2]

Když světlo dopadá do vrstvy polarizátoru, složka elektrického pole, která je rovnoběžná s polymerovými řetězci, způsobuje tlumení proudu v tomto ose. Odpor proti proudu rychle rozptyluje energii (to znamená, že index lomu je komplexní) a světlo je absorbováno. Tloušťka vrstvy polarizátoru je zvolená dostatečně velká, aby žádné světlo s tlumící složkou elektrického pole jinou než směr řetězců neprošlo přístroj. Složka elektrického pole, která je kolmá na polymerních řetězcích narazí na elektrony, které jsou v podstatě vázány na malé šířce jednotlivých polymerních molekul. Pro tuto polarizační složku, vlna prochází materiál podobně, jako to dělá prostřednictvím typických dielektrik, jako je sklo (index lomu je reálné číslo). V současné době existuje široká škála technologií pro výrobu polarizátorů, z nichž mnoho je velmi odlišných od původního.



Obrázek 2 Lineárně polarizovaná vlna v polarizátoru (převzato z [3])

Jak je ukázáno v obrázku 2 rozdělíme pole jako vektorový součet podle osy x a y (z je vždy směr šíření). Elektrické pole vysíláno na druhé straně je započítáno jako:

$$E_{trans} = E_{0x} \hat{e}_x = |E_o| \cos(\theta) \hat{e}_x \quad (3.1)$$

Protože intenzita je měřena jako druhá mocnina elektrického pole, můžeme psát pro intenzitu za polarizátorem:

$$I = |E_{trans}|^2 \cos^2(\theta) = I_o \cos^2(\theta) \quad (3.2)$$

kde I_o je intenzita před polarizátorem a θ je úhel mezi osou polarizátoru a polem.[3]

4. Optická aktivita

V roce 1813 si Jean Baptiste Biot všiml, že rovina polarizace světla se stáčí buď doprava nebo doleva, když prochází jednotlivými krystaly křemene nebo vodných roztoků vinné kyseliny nebo cukru. Vzhledem k tomu, že interagují se světlem, takové látky, které mohou otáčet rovinu polarizace světla se nazývají opticky aktivní. Ty, které stáčí rovinu ve směru hodinových ručiček (doprava), se říká, že jsou pravotočivé. Ty, které stáčí rovinu proti směru hodinových ručiček (doleva), se nazývají levotočivé.

Projde-li světlo takovým materiálem, nasadíme souřadnice aby x byl směr polarizace (pro lineárně polarizované) a z směr šíření:

$$E(z, t) = E_x \hat{e}_x e^{i(kr - \omega t)} \quad (4.1)$$

Takové lineárně polarizované pole se dá rozkládat na dvě části, levotočivé a pravotočivé kruhově polarizované. Napíšeme je v komplexní rovině:

$$E(0, t) = \begin{pmatrix} E_0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix} e^{-i\omega t} = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} E_0 \\ iE_0 \\ 0 \end{pmatrix} e^{-i\omega t} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} E_0 \\ -iE_0 \\ 0 \end{pmatrix} e^{-i\omega t} \quad (4.2)$$

Jak je popsáno nahoře, levotočivá a pravotočivá část pole se setkávají s různými indexy lomu n_r a n_l , protože ony oscilují stejným nebo opačným směrem rotace molekuly. Za dráhou L v prostředí můžeme světlo popisovat takovou rovnicí:

$$\begin{aligned} E(L, t) &= \frac{1}{2} \begin{pmatrix} E_0 \\ iE_0 \\ 0 \end{pmatrix} e^{i(kn_l L - \omega t)} + \frac{1}{2} \begin{pmatrix} E_0 \\ -iE_0 \\ 0 \end{pmatrix} e^{i(kn_r L - \omega t)} \\ &= \frac{1}{2} E_0 \left[\begin{pmatrix} 1 \\ i \\ 0 \end{pmatrix} e^{-\frac{ikL(n_r - n_l)}{2}} + \begin{pmatrix} 1 \\ -i \\ 0 \end{pmatrix} e^{\frac{ikL(n_r - n_l)}{2}} \right] e^{i(knL - \omega t)} \\ &= E_0 \begin{pmatrix} \cos\varphi(L) \\ \sin\varphi(L) \\ 0 \end{pmatrix} e^{i(knL - \omega t)} \end{aligned} \quad (4.3)$$

kde jsme definovali index lomu a úhel otáčení:

$$n = \frac{n_r + n_l}{2} \quad (4.4)$$

$$\varphi(L) = kL \frac{n_r - n_l}{2} \quad (4.5)$$

Z toho plyne, že úhel otáčení je lineárně závislý na délce prostředí L . Navíc je úhel otáčení také úměrný koncentraci c , protože to určuje rozdíl v indexech lomu n_r a n_l :

$$\varphi = \varphi_0 \cdot c \cdot L \quad (4.6)$$

φ_0 je konstanta závislá na teplotě a vlnové délce látky. To je známo jako Biotův zákon.

V mezinárodním doporučení (International Pharmacopoeia) pro farmaceutiky a vědce zabývající se chemickými látkami najdeme vzorec takovým tvarem:

$$\alpha = [\alpha]_T^\lambda \frac{c \cdot l}{100} \quad (4.7)$$

kde: c je koncentrace [$\text{g}/100 \text{ cm}^3$], $[\alpha]_T^\lambda$ je specifická rotace [$\frac{\text{dm}^{-1} \cdot \text{g}}{\text{cm}^3}$], l je optická dráha (délka nádoby). T je teplota [Kelvin nebo Celsius], λ je vlnová délka

Specifická rotace je definovaná jako úhel polarizovaného světla, které prošlo nádobkou s délkou 1 dm a s koncentrací 1 g/dl. Jednotka používaná je stupeň $[\circ]$ nebo [$\frac{\circ}{\text{dm}^{-1} \cdot \text{g}/\text{cm}^3}$].

$$[\alpha]_T^\lambda = \alpha \frac{100}{c \cdot l} \quad (4.8)$$

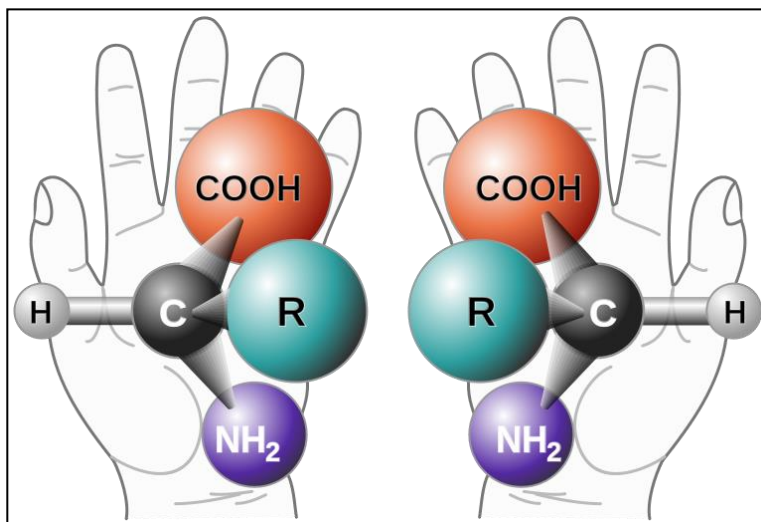
Pokud v roztoku budeme mít směs různých cukrů (vůbec nezáleží, jestli jsou nebo ne se stejným směrem rotace) výsledný úhel otáčivosti bude:

$$\alpha = \frac{c_1^2}{c_1 + c_2} l [\alpha]_1 + \frac{c_2^2}{c_1 + c_2} l [\alpha]_2 \quad (4.9)$$

Tato rovnice vychází z Biotova zákona kde c_1 a c_2 jsou koncentrace určitých cukrů [$\text{g}/100 \text{ cm}^3$], $[\alpha]_1$ a $[\alpha]_2$ jsou specifické rotace [$\frac{\text{dm}^{-1} \cdot \text{g}}{\text{cm}^3}$] a l je optická dráha (délka nádoby).

5. Chirální látky

Chiralita (slovo pocházející z řečtiny „χειρ“ ruka) je geometrická vlastnost některých molekul a ionů. Taková molekula není totožná se svým zrcadlovým obrazem, nemá střed ani rovinu symetrie, avšak může mít rotační osu symetrie. Vztah mezi objektem a jeho obrazem je podobný jako vztah mezi levou a pravou rukou. Chirální objekt a jeho obraz se označují jako enantiomorfy, v případě molekul se hovoří o enantiomerech.



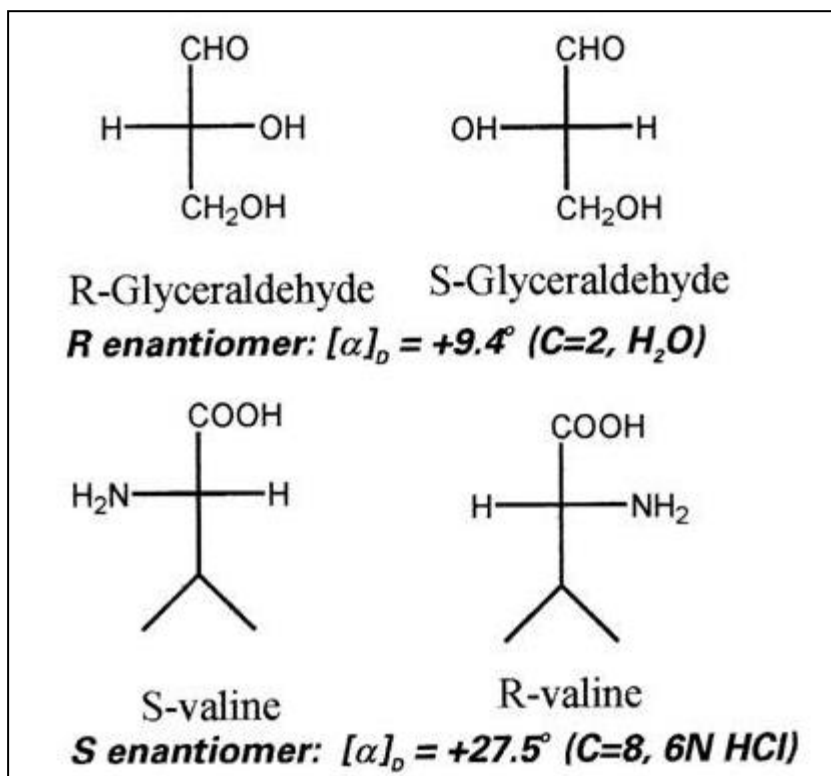
Obrázek 3 Dva enantiomery obecné aminokyseliny, která je chirální (převzato z [12])

Chirální molekuly mají stejné vlastnosti v achirálních prostředích. Je to důvod, proč enantiomery jsou těžce fyzicky dělitelné. V achirálním prostředí tyto molekuly mají totožné fyzikální vlastnosti tj.: stejné body varu, teploty tání a rozpustnost. Další jejich důležitá

vlastnost je stejná molekulová hmotnost, konektivita a dipólové momenty. To znamená, že nemohou být odděleny přímo obvyklými technikami, jako je destilace, plynové chromatografie, extrakce nebo překrystalování.

Koncentrace těchto látek se obvykle provádí měřením optické aktivity, kterou se tato práce zabývá. Aby se světlo stalo lineárně polarizované, musí projít polarizátorem (filtrem). Před filtrem světlo je skládáno z nekonečného počtu oscilujících elektrických a magnetických vektorů. Funkce polarizátoru (paralelní uspořádané molekuly) je odstranění všech složek kromě jedné. Důvod proč enantiomery reagují různě vůči lineárně polarizovanému světlu, je že světlo samo můžeme považovat za „chirální“. I když polarizované světlo je planární jev, ve skutečnosti se sestává ze dvou nad sebou spirálových forem. V nejjednodušší představě můžeme se na elektrické pole dívat jako na 2 vektory oscilující a vzdalující se od zdroje (stejně jako vývrtka od korku) vždycky ve stejném poměru a úhlu. Ježto spirála je chirálního tvaru, vektory tvoří enantiometrickou dvojici. Když to spočítáme zpět dostaneme lineárně polarizované světlo. Základ ideji spočívá v tom, že když světlo narazí enantiometricky čistě, chirální molekuly zpožďují jeden vektor elektrického pole, více než druhý kvůli interakcím. Již vektory nejsou synchronizované, a jestli to spočítáme, všimneme si rozdílu mezi vstupním a výstupním úhlu.

Je důležité zdůraznit, že tato vlastnost platí jen pro asymetrické molekuly. V případě achirálních molekul úhel by se nezměnil.



Obrázek 4 Absolutní konfigurace (R/S) (převzato z [4])

Z obrázku číslo 4 vyplývá, že neexistuje jasný vztah mezi znaménky rotace (kladné pro pravotočivé a záporné pro levotočivé) a absolutní konfigurací (R/S). Také nemáme žádný zřejmý vztah mezi velikostí otáčení a strukturou molekuly. Jakmile je stanovena stereochemie nezávislým způsobem, znaménko a velikost tohoto otáčení jsou konstantní pro danou chirální sloučeninu.

Vzhledem k tomu, experimentálně naměřené optické rotace závisí na povaze sloučeniny, na vlnové délce světla, rozpouštědle, teplotě a počtu molekul v cestě světla. Měření musí být standardizováno tak, aby mohla být univerzální hodnota α popsána. (viz Bioutův zákon). [4]

Je velmi důležité si zdůraznit, že optická rotace nebude stejná v molekulách se stejným počtem atomů, ale závisí na trojdimenzionální konfiguraci jak jsme vysvětlili nahoře.

Tady je uvedeno několik substancí, které budeme měřit a sice jsou monosacharidy mají odlišnou specifickou rotaci $[\alpha]_T^\lambda$:

Název	Struktura	Specifická rotace [°]
D-Fruktóza		-92
D-Glukóza		+52,7
D- Galaktóza		+ 82

Tabulka 4 Struktura a specifická rotace některých látek

6. Aplikace polarimetrů (sacharimetrů)

Farmaceutický průmysl

- Monitorování chemických procesů
- Kontrola čistoty a stanovení koncentrací
- Charakterizace nových syntetických látek
- Analýza léčiv musí vyhovovat Pharmacopoeia , a dalším národním a mezinárodním standardům. (*Pharmacopoea Bohemica*, čs.: Český lékopis)

Chemický průmysl

- Kontrola čistoty a stanovení koncentrací
- Analýza opticky aktivních komponent (kvalitativní a kvantitativní)
- Určení změn v konfiguraci
- Monitorování chemických procesů

Cukrovarnický průmysl

- Kontrola kvality původního a konečného produktu
- Stanovení fruktózy a glukózy
- Koncentrace cukru v rafinované řepě a cukrové třtině, melasy a řepné dužiny

Potravinářský průmysl

- Stanovení koncentrace
- Kontrola kvality
- Kontrola čistoty [5]

7. Komerční polarimetry

Navrhovaný polarimetr v této práci je zjednodušenou formou komerčního polarimetru, a tedy kvalita výsledků (přesnost) je rozdílná. Rozdíly mezi jednoduchými a komerčními polarimetry:

- Extrémní úspora času – 1 měření trvá asi 1 s.
- Obsahují termostat, který reguluje teplotu obvykle na 20°C
- Extrémní přesnost a rozlišení v celém rozsahu měření (bez ohledu na úhel natočení), měří se až 0,001° a přesnost je $\pm 0,003^\circ$. Taková přesnost je požadována u farmaceutického průmyslu
- Rozhraní RS-232 a jiné
- Měření možné pomocí intervalu nebo trvalé
- Velmi tichý provoz
- Zobrazení dat všech důležitých nastavení a měření
- Splňuje příslušné mezinárodní normy, jako jsou Pharmacopoeia, OIML, ASTM
- Vestavěný systém umožňující spoustu funkcí jako: Přímý tisk možný na síťové tiskárně podporující PostScript, • Plná funkce cGMP / GLP: ochrana heslem, zálohování dat, automatický tisk nebo výstup dat ve formátu CSV [5]



Obrázek 5 Komerční polarimetr (převzato z [5])

8. Jonesovy vektory pro reprezentaci polarizace

V roce 1941, R. Clark Jones zavedl dvojrozměrnou maticovou algebru, která je užitečná pro sledování světelné polarizace a účinků optických prvků, které mají vliv na polarizaci. Tato metoda se zabývá pouze světlem mající určitou polarizaci, jako jsou rovinné vlny a neplatí pro nepolarizované nebo částečně polarizované světlo (např. sluneční světlo). U částečně polarizovaného světla se používá čtyřrozměrná algebra známa jako Stokesův kalkulus. Můžeme psát komplexní fázi složek elektrického pole:

$$E(z, t) = (|E_x|e^{i\varphi_x}\hat{\mathbf{x}} + |E_y|e^{i\varphi_y}\hat{\mathbf{y}})e^{i(kz-\omega t)} \quad (8.1)$$

$$E(z, t) = E_{eff}(A\hat{\mathbf{x}} + Be^{i\delta}\hat{\mathbf{y}})e^{i(kz-\omega t)} \quad (8.2)$$

$$E_{eff} = \sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2} e^{i\varphi_x} \quad (8.3)$$

$$A = \frac{|E_x|}{\sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2}} \quad (8.4)$$

$$B = \frac{|E_y|}{\sqrt{|E_x|^2 + |E_y|^2}} \quad (8.5)$$

$$\delta = \varphi_y - \varphi_x \quad (8.6)$$

A a B jsou reálná, nezáporná čísla, o kterých platí: $A^2 + B^2 = 1$. Pokud E_y je nulová, pak $B = 0$ a vše je dobře definováno. Na druhé straně, pokud E_x bude nulová, tak jeho fáze $e^{i\varphi_x}$ není určitá. V tomto případě necháme $E_{eff} = |E_y|e^{i\varphi_y}$, $B = 1$ a $\delta = 0$. Celková intenzita pole E_{eff} je často nepodstatné v diskuzi o polarizaci. Představuje sílu efektivního lineárně polarizovaného pole, které by odpovídalo stejné intenzitě jako (8.1). Konkrétně z rovnice (8.2) a obecné rovnice intenzity máme:

$$I = \frac{1}{2}nce_0\mathbf{E} \cdot \mathbf{E}^* = \frac{1}{2}nce_0|E_{eff}|^2 \quad (8.7)$$

Fáze E_{eff} představuje celkový fázový posun, který lze triviálně upravit pohybem zdroje světla (laser, řekněme) dopředu nebo dozadu o zlomek vlnové délky. Část rovnice (8.2), která je relevantní pro naši diskuzi je vektor $A\hat{\mathbf{x}} + Be^{i\delta}\hat{\mathbf{y}}$, označována jako Jonesův vektor. Tento vektor obsahuje zásadní informace týkající se polarizace. Jonesův vektor je jednotkový vektor, tím, že:

$$(A\hat{\mathbf{x}} + Be^{i\delta}\hat{\mathbf{y}}) \cdot A\hat{\mathbf{x}} + Be^{i\delta}\hat{\mathbf{y}}^* = 1 \quad (8.8)$$

Hvězdička představuje komplexně sdružené číslo.

Píšeme Jonesův vektor do sloupce (pro pozdější využití maticové algebry) následovně:

$$\begin{pmatrix} A \\ Be^{i\delta} \end{pmatrix} \quad (8.9)$$

Tento vektor dokáže popsat stav polarizace jakékoliv rovinné vlny.

9. Lineární polarizátory a Jonesovy matice

Polarizátor může být reprezentován jako 2 x 2 matice, která pracuje na Jonesovy vektory. Funkce polarizátoru je, aby nechal projít pouze složku elektrického pole, která je orientována podél osy přenosu polarizátoru. Pokud je polarizátor orientován s jeho přenosovou osou podél x-u, pouze x-složka polarizace je vysílána dále; y-složka již není. Platí i naopak. Tyto dva případy mohou být reprezentovány následujícími Jonesovými maticemi:

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \text{ (podle osy x).}$$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \text{ (podle osy y).}$$

Tyto matice fungují ve všech Jonesových vektorech představujících polarizaci dopadajícího světla. Výsledek udává Jonesův vektor pro světlo vystupující z polarizátoru. Můžeme reprezentovat tuto situaci takto:

$$\begin{bmatrix} A' \\ B' \end{bmatrix} = J_{system} \begin{bmatrix} A \\ B e^{i\delta} \end{bmatrix} \quad (9.1)$$

, kde na levé straně je světlo vystupující ze systému (polarizátor, prostředí). Matice J_{system} je Jonesova matice tvořená řadou polarizačních zařízení. Pokud jsou N zařízení v systému, výslední matice se vypočte:

$$J_{system} = J_N \cdot J_{N-1} \cdot J_{N-2} \dots J_2 J_1 \quad (9.2)$$

kde J_n je matice pro n-tý člen polarizační soustavy. Matice pracují na Jonesovy vektory v pořadí, v kterém světlo narazí na zařízení. Matice prvního zařízení je psána na pravé straně a poslední je psána na levém, nejdále od Jonesova vektoru. Když je část světla absorbována průchodem jedním nebo více polarizátory v systému, Jonesův vektor vystupujícího světla nemusí nutně zůstat normalizovaný na velikost jedna. Faktor, kterým intenzita světla klesá, je dán:

$$(A' \hat{x} + B' \hat{y}) \cdot (A' \hat{x} + B' \hat{y})^* = |A'|^2 + |B'|^2 \quad (9.3)$$

Intenzita světla, která ze systému vystupuje, je tedy:

$$I' = \frac{1}{2} n c e_0 |E'_{eff}|^2 \quad kde \quad |E'_{eff}|^2 = |E_{eff}| (|A'|^2 + |B'|^2) \quad (9.4)$$

Zde E_{eff} je původní efektivní pole před vstupem do systému (viz (6.10)) a E'_{eff} je konečné efektivní pole. Je možné znovu organizovat finální Jonesův vektor a zapsat ho do standardní podoby následovně:

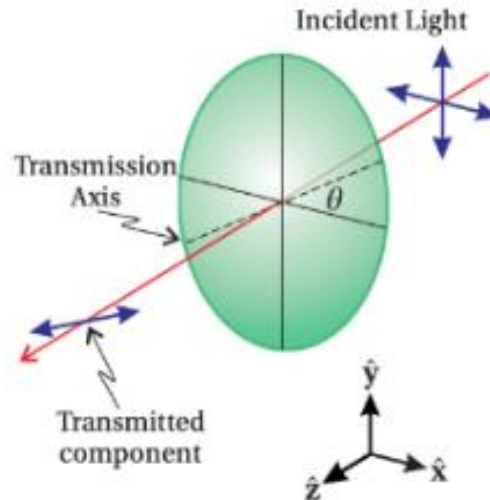
$$\begin{bmatrix} \tilde{A}' \\ \tilde{B}' e^{i\delta'} \end{bmatrix} = \frac{e^{i\Phi_{A'}}}{\sqrt{|A'|^2 + |B'|^2}} \begin{bmatrix} A' \\ B' e^{i\delta} \end{bmatrix} \quad (9.5)$$

Toto je Jonesův vektor, který je v souladu s E'_{eff} . Celkový fázový vektor $e^{i\Phi_{A'}}$ může být začleněn do E'_{eff} pokud \tilde{A}' je kladný a reálný. δ' je fázový rozdíl mezi B' a A' .

Můžeme psát Jonesovu matici pro polarizátor takovou formou:

$$\begin{bmatrix} \cos^2\theta & \sin\theta\cos\theta \\ \sin\theta\cos\theta & \sin^2\theta \end{bmatrix}$$

kde úhel θ je úhel mezi polarizační osou polarizátoru a světla.



Obrázek 6 Úhel θ je úhel mezi polarizační osou polarizátoru a světla (převzato z [1])

10. Výpočty

V bodě před polarizátorem můžeme popsat světlo $\begin{pmatrix} A \\ B e^{i\delta} \end{pmatrix}$. V bodě za polarizátorem a před kyvetou světlo je polarizováno dle osy y (vertikálně):

$$\begin{pmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A \\ B e^{i\delta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0 \\ B e^{i\delta} \end{pmatrix} \quad (10.1)$$

V kyvetě se část světla odrazí zpátky, část se ztratí a zbytek projde kapalinou, kde začíná se otáčet rovina polarizace vlny. Kvůli těm odrazům a těm ztrátám je velmi těžké počítat přesnou hodnotu efektivní intenzity. Za kyvetou a před druhým polarizátorem dostaneme:

$$\begin{pmatrix} \cos\alpha \\ \sin\alpha \end{pmatrix} = M \begin{pmatrix} 0 \\ C e^{i\delta} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \times & \beta \\ \times & \gamma \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ C e^{i\delta} \end{pmatrix} \quad (10.2)$$

Složka a_{11} a a_{21} nás nezajímají, protože se násobí nulou a úhel α je závislý na délce nádoby, koncentraci látky, dané teplotě a vlnové délce.

Koeficienty β a γ souvisí se specifickou rotací ($[\alpha]_T^\lambda$) a lze je dostat měřením.

11. Metodika měření

Jak bylo zmíněno již na úvodu, měření chirálních látek je velmi důležité ve farmaceutickém průmyslu a certifikováno jako velmi přesný způsob. Při výrobě léků je důležité, aby se nepřidaly jiné látky a aby se zkoušela přítomnost chirálních látek. Mezi neznámějšími způsoby patří:

11.1 Hustoměr (nazývaný také areometr) je ponorné těleso většinou ve tvaru baňky s vystupující stopkou, ve které je umístěna stupnice udávající naměřenou hustotu kapaliny na základě Archimédova zákona. Hloubka ponoru baňky a stopky se stupnicí závisí na hustotě kapaliny a jsou použité hlavně v průmyslu pití (např. vína).



Obrázek 7 Starý hustoměr (převzato z Merseyside Maritime Museum)

11.2 Pomocí jiných chemických látek

Existuje spousta látek, které interagují s cukry. Nevýhoda spočívá v tom, že většina z těchto nedokáže zjistit koncentraci a ostatní bývají drahé a chemická reakce zabere hodně času. Měření pomocí polarimetrii může být děláno v reálném čase bez nutnosti odebírání vzorků v jiném místě.

11.3 Měření koncentrace pomocí n (index lomu)

Index lomu (značí se n nebo N) je bezrozměrná fyzikální veličina popisující šíření světla a všeobecně elektromagnetického záření v látkách. V nejjednodušším případě – pro průhledné a čiré látky – lze index lomu n považovat za konstantu, vztahující se k celému rozsahu viditelného světla. V tom případě je index lomu vždy větší než 1 a rychlost šíření světla v dané látce v je určena vztahem:

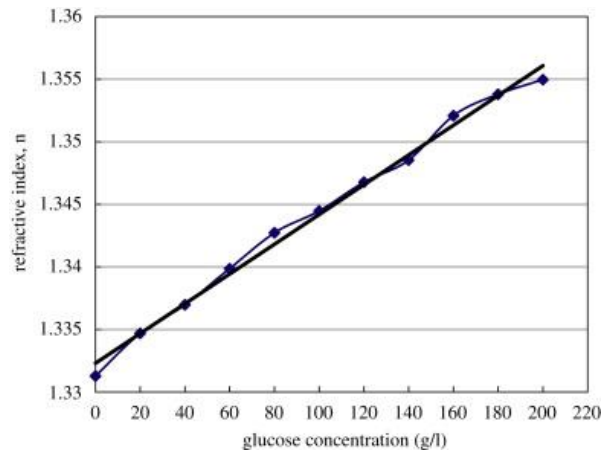
$$n = \frac{c}{v}$$

kde c je rychlost světla ve vakuu. Takto definovaný index lomu se označuje jako absolutní index lomu.

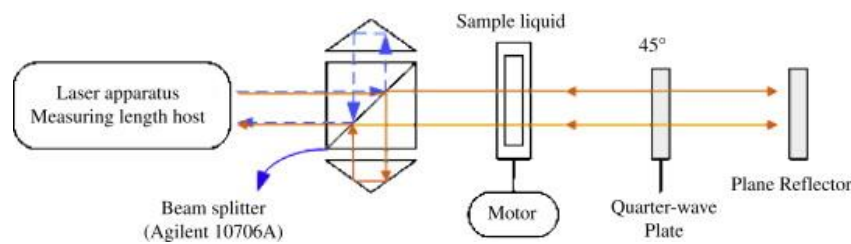
Závislost indexu lomu na koncentraci bylo změřeno pomocí interferometru. Při použití metody regresní analýzy je zjištěna lineární korelace mezi průměrným indexem lomu a koncentrací glukózy:

$$n_{g/L} = 0,00011889C + 1,33230545 \quad (11.3.1)$$

Výsledky obecně naznačují, že průměrný index lomu stoupá s rostoucí koncentrací glukózy.[6]



Obrázek 8 Změna průměrného indexu lomu s koncentrací glukózy (převzato z [6])



Obrázek 9 Systém pro stanovení indexu lomu kapalného roztoku glukózy (převzato z [6])

12. Závislost na teplotě

Protože struktura molekul v prostoru nezažívá dost všimnutých změn při malé změně teploty (látka zůstává stále v kapalném stavu a vazby mezi molekuly se moc nemění), závislost specifické rotace na teplotě bude relativně malá a lze modelovat takto:

$$\alpha(t) = \alpha(20^{\circ}C)[1 - 0,000471(t - 20)] \quad (12.1)$$

Např. Pokud teplota klesá o $1^{\circ}C$ specifická rotace fruktózy se roste o $0,04^{\circ}$.

13. Závislost na vlnové délce

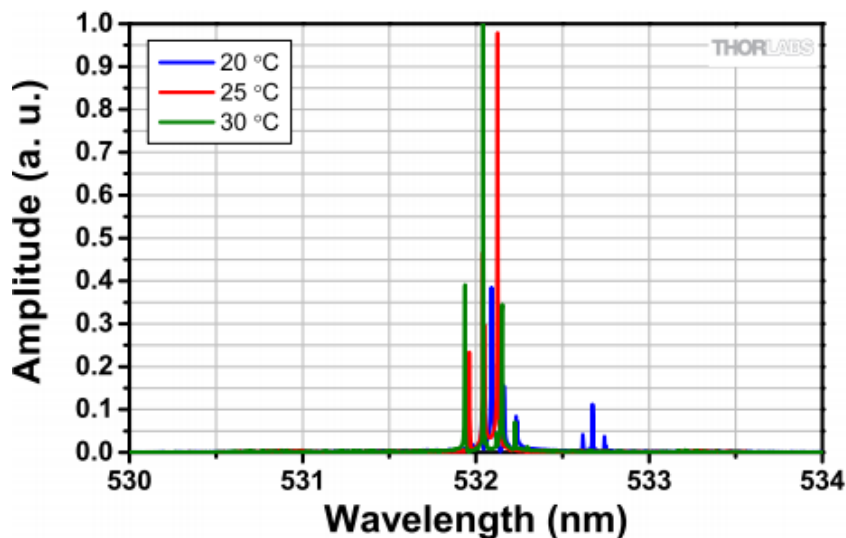
Spektrum optické rotační disperze (ORD) je specifická rotace materiálu jako funkce vlnové délky světla. ORD spektrum se nazývá "prosté", jestli molekulám chybí jeden chromofor (absorpce v měřicí šířce pásma). Specifická rotace je nepřímo závislá na čtverci vlnové délky a může být modelována Drudeovým vzorcem:

$$[\alpha] = \frac{A}{\lambda^2 - \lambda_0^2} \quad (13.1)$$

kde A je rotace a λ_0 je difúzní konstanta. $\alpha = \frac{c_1^2}{c_1+c_2}l[\alpha]_1 + \frac{c_2^2}{c_1+c_2}l[\alpha]_2[7]$

14. Měřicí systém

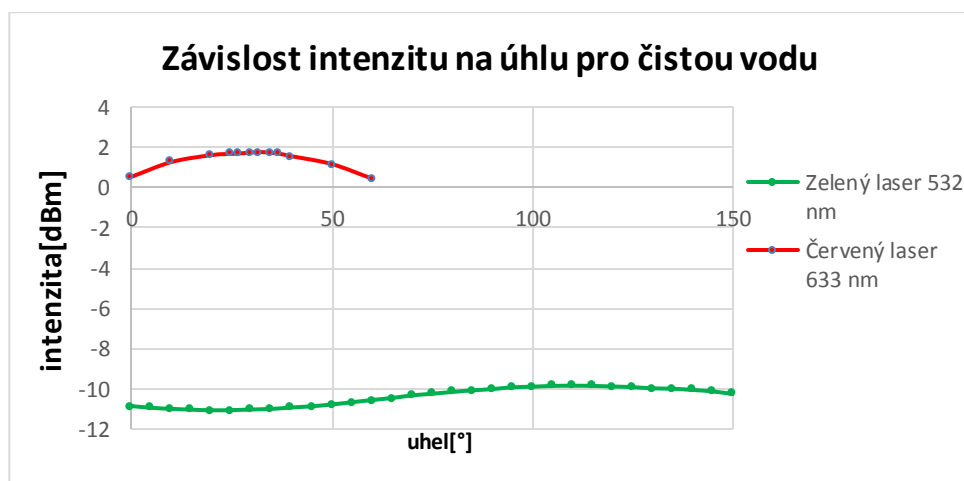
14.1 Laser, který jsme používali, má vlnovou délku 532 nm, což je velmi blízko sodíkové lampičky. CPS532-C2 má užší šířku pásma než běžné modifikované laserové diodové moduly a vytváří výstupní paprsek, který má tvar kulatý. Modul obsahuje pevnolátkový laser (DPSS – diode-pumped solid state) vybavený diodou, s vnitřním útlumovým článkem, který slouží ke snížení výstupního výkonu na bezpečnostní třídu 2. Je vybaven pouzdem o průměru 11 mm s kabelem pro odlehčení napětí 18 "(457 mm).



Obrázek 10 Spektrum laseru v 20°C, 25°C a 30°C (převzato z [8])

Je velice důležité, aby laser nevyzařoval v jiných vlnových délkách, než je určen, protože jinak by se úhel posunutí změnil.

Každý zdroj vyzařování má svoji rovinu polarizace a při každém novém měření musíme znovu kalibrovat. [8]



Obrázek 11 Měření čisté vody

Z grafů je vidět, že maximum intenzity měření čisté vody je dosažen při 110° a 32°, což je velký rozdíl.

Druhý laser je helium-neonový a má výkon větší než ten první.

14.2 Kyveta je nádobka, ve které je přiložen roztok, který měříme. Jako každý materiál i kyveta má své polarizační vlastnosti, které mohou ovlivňovat stav polarizace. Izotropní pevné látky nevykazují dvojlom. Z hlediska optiky, bychom definovali izotropii jako schopnost vyzařovat do všech směrech stejně. Nicméně když jsou pod mechanickým tlakem, je výsledkem dvojlom. Tlak může být aplikován zvenku nebo je "zmrazen v ně" po ochlazení dvojlomového plastu po jeho výrobě za použití vstřikování. Když je takový vzorek umístěn mezi dvěma zkříženými polarizátory, mohou být pozorovány barevné vzory, protože polarizace světelného paprsku se po průchodu dvojlomovým materiálem otáčí a úhel rotace závisí na vlnové délce. Experimentální metoda nazvaná fotoelasticita použitá pro analýzu rozložení napětí v tuhých látkách je založena na stejném principu. [9]

14.3 Detektor

V tomto měření jsme používali křemíkovou fotodiodu od Thorlabs S121C. Ten detektor měří v rozsahu od 400 do 1100 nm a výkon od 500 nW do 500 mW.

Nepřesnost měření je $\pm 3\%$ pro rozsah od 440 – 980 nm. [10]



Obrázek 12 Hlavička detektoru (převzato z [10])

15. Příprava měření

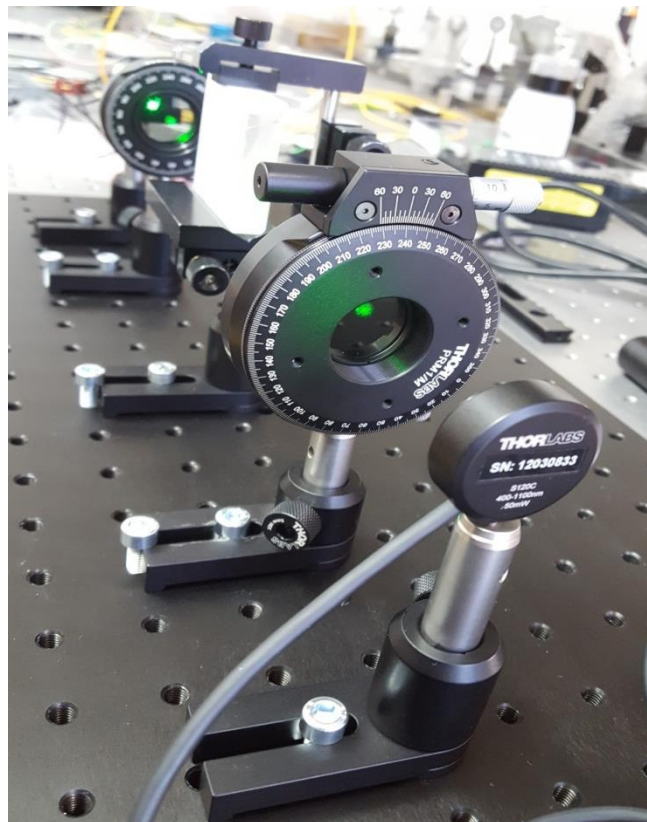
15.1 Uspořádání experimentu

Abychom dostali přesnější výsledky, je důležité, aby byly dodrženy následující podmínky:

- Optické prvky přístroje musí být čisté a přesně umístěné.
- Zdroj světla by měl být dobře nastaven.
- Filtrační systém musí umožnit na druhé straně dostačující intenzitu světla.
- Polarimetrická nádobka by měla být vyplněna takovým způsobem, aby žádné vzduchové bubliny neinterferovaly s paprskem světla.
- Strany nádobky by měly být velmi přesně umístěny, aby odraz světla byl co nejmenší.
- Kalibrace se provádí pomocí velmi čisté vody (demineralizovaná) nebo jiných látek např. etanol. [11]

15.2 Postup měření

Na začátku, umístíme laser v přední části dvou kolmých filtrů (polarizátor a analyzátor). Můžeme si ověřit, že přenosové osy polarizátorů jsou na sebe kolmé buď pomocí fotodetektoru, nebo jednoduše přímým očním pozorováním.



Obrázek 13 Náš měřicí systém

Pokud látka je v pevném skupenství, rozpustíme ji v kapalině, která obvykle bývá voda nebo alkohol a smícháme, aby byla úplně rozpuštěná. Je důležité, aby výsledná kapalina neobsahovala bubliny a měla vysokou čistotu.

Otáčením analyzátoru (jestli látka je pravotočivá otočíme právo apod.) najdeme maximum. Ten úhel je úhel rotace.

16. Výsledky z měření

Měřili jsme v pokojové teplotě od 24°C do 27,6 °C použitím kyvety o délku 14 cm. V měření glukózy jsme znali n (index lomu), délku kyvety a hodnoty intenzit světla v dBm a z těch si počítáme:

$$c = \frac{(n-1.33230545)}{0,00011889} [\text{g/L}]$$

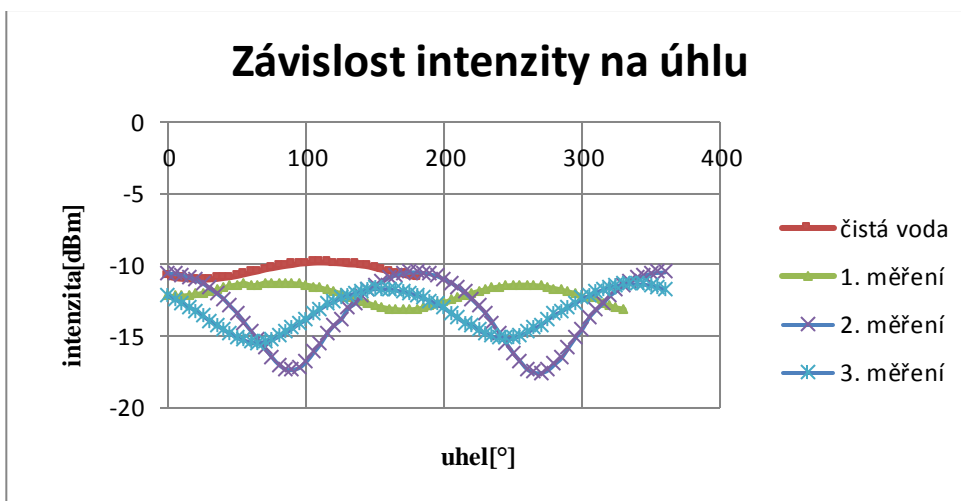
16.1 Měření glukózy

$$[\alpha]_T^\lambda = \alpha \frac{100}{c \cdot l} [^\circ]$$

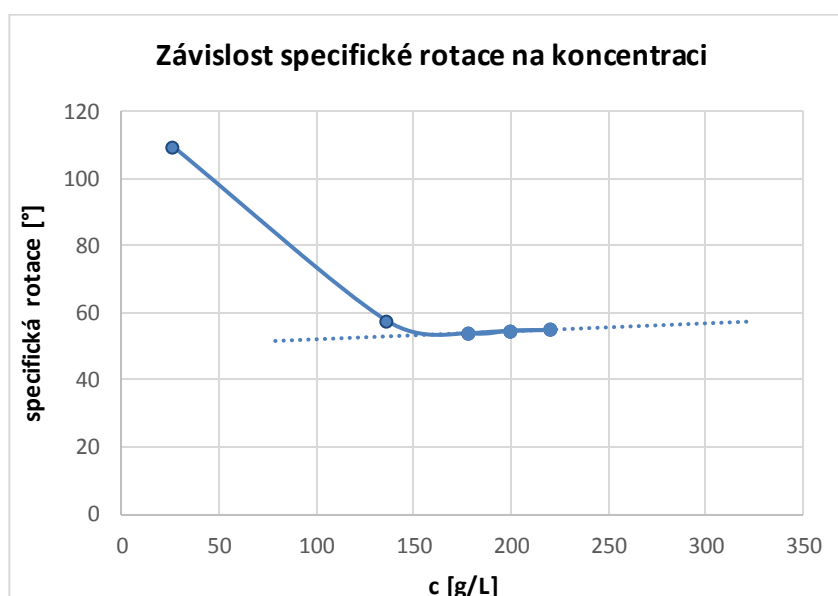
n [-]	T [°C]	c [g/L]	$[\alpha]_T^\lambda$ [°]
1.3354	24.1	26.02868	109.77
1.34849	25	136.1305	57.7
1.35357	25.2	178.859	53.9
1.35606	25.9	199.8028	54.69
1.35858	26.1	220.9988	54.9

Tabulka 5 Specifická rotace glukózy

Řádky s jinou barvou byly měřeny pro jiný maximum intenzity čisté vody (jiné měření): pro tři první maximum byl v 110° a pro 2 poslední maximum byl v 95° ve vlnové délce 532nm (CO₂ laser). V prvním měření glukózy, kde koncentrace byla příliš malá, výsledky byly daleko od těch očekávaných kvůli důvodům vysvětleným nahoře a to je důvod proč jsme to neuvažovali. V jiných měřeních průměr specifické rotace vyšel ~ 55,29°.



Obrázek 14 Posuny maxim intenzit důsledkem stáčení roviny polarizace

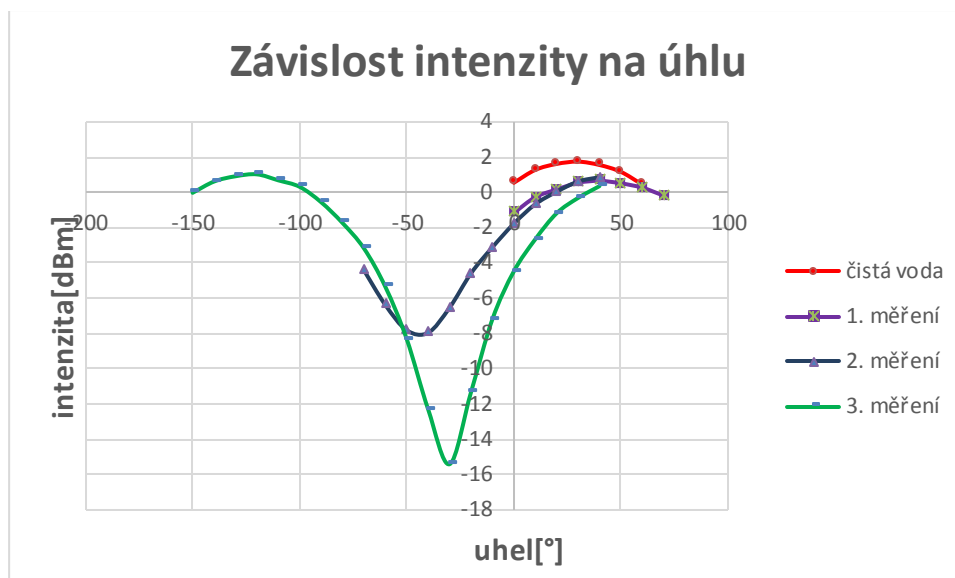


Obrázek 15 Závislost specifické rotace na koncentraci

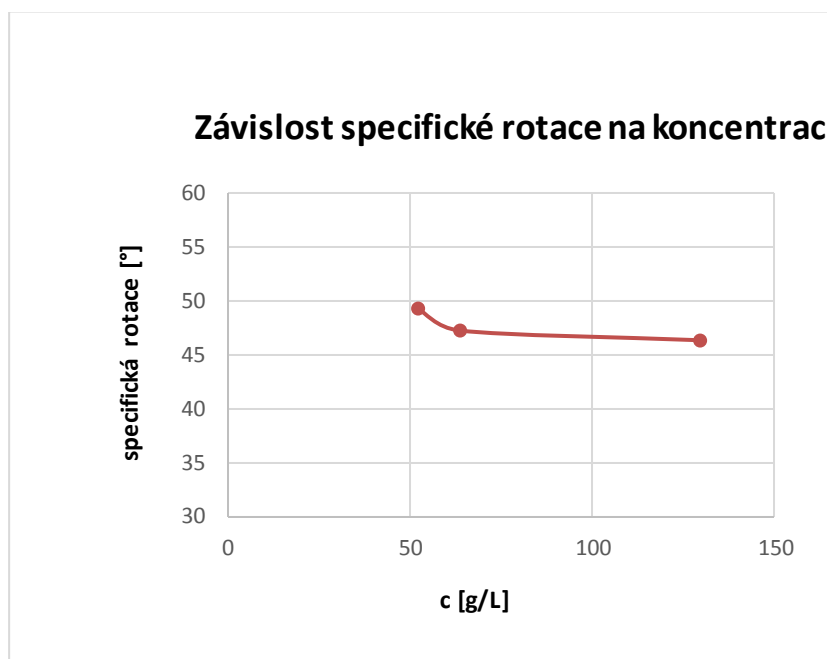
Dále jsme měřili koncentraci glukózy pro jinou vlnovou délku 633 nm (helium-neon laser) a vyšli nám tyto výsledky:

n [-]	T[°C]	c [g/L]	$[\alpha]_T^\lambda$ [°]
1,33851	27,1	52,18732	49,271
1,33986	27,4	63,54235	47,214
1,34771	27,6	129,5698	46,307

Tabulka 6 Měření glukózy na jiné vlnové délce



Obrázek 16 Posuny maxim intenzit důsledkem stáčení roviny polarizace



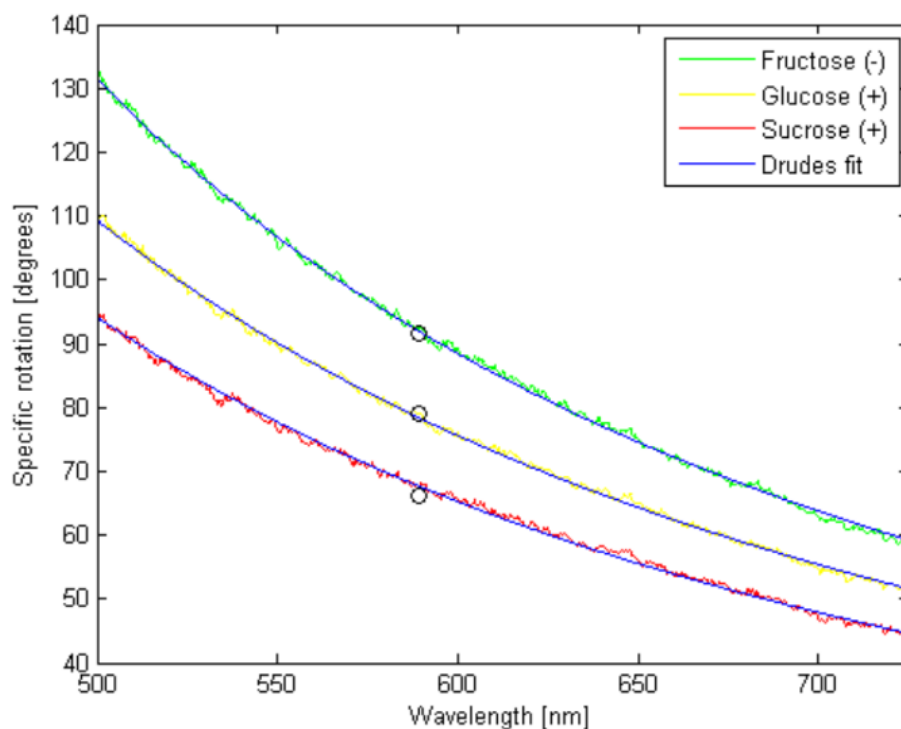
Obrázek 17 Závislost specifické rotace na koncentraci

Z těchto výsledků je vidět, že specifická rotace klesá s růstem vlnové délky podle Drudeova vzorce. Tak máme:

λ [nm]	Specifická rotace [°]
532	+55,29 (průměr naměřených hodnot)
589	+52,7 (dle literatury)
633	+47,59 (průměr naměřených hodnot)

Tabulka 4 Závislost specifických rotací na vlnové délce

Náše výsledky se souhlasí s hyperbolickou funkcí, již zmíněno:



Obrázek 18 Závislost specifické rotace na vlnové délce pro různé látky (převzato z [7])

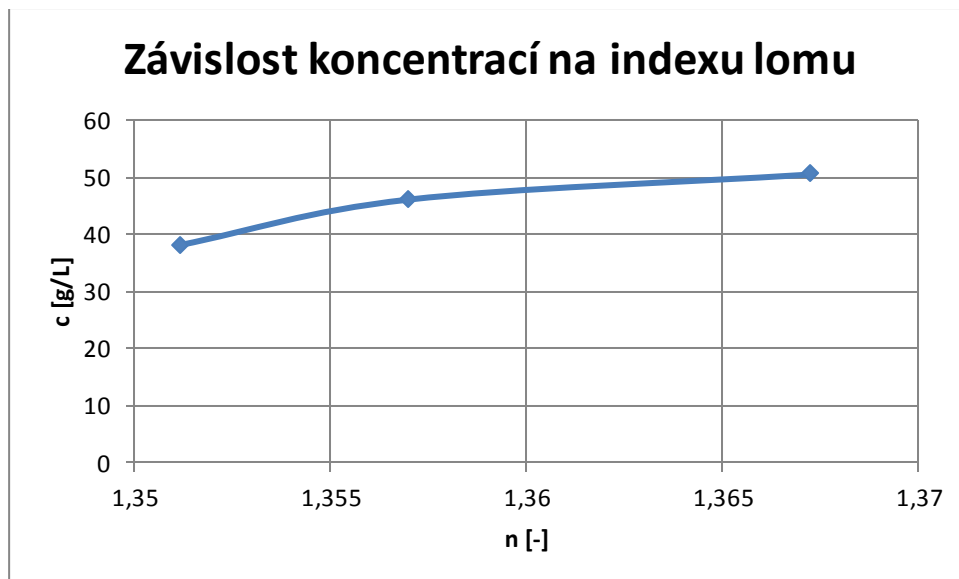
16.2 Měření fruktózy

Další molekulou s touto vlastností (otáčet rovinu polarizace) je fruktóza, která se někdy uvede jiným názvem: levulóza, protože rotuje rovinu polarizovaného světla doleva [proti směru hodinových ručiček nebo (-)]. Fruktóza se říká, že je levotočivá. Předpokládáme-li, že specifická rotace je -116° (podle grafu) pak si najdeme koncentraci podle výše uvedených vzorců:

$$c = \alpha \frac{100}{[\alpha]_T^\lambda \cdot l}$$

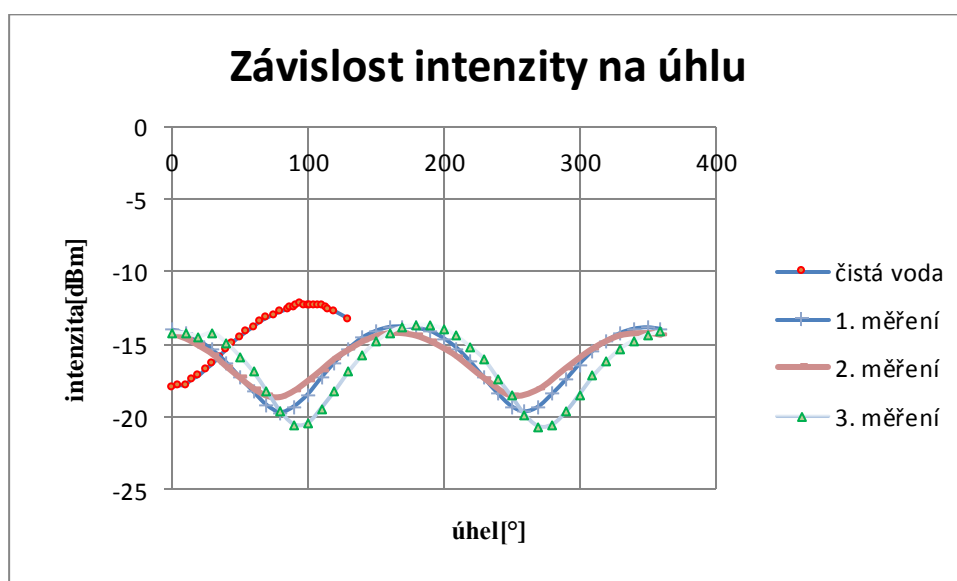
n [-]	T[°C]	$[\alpha]_T^\lambda$	c [g/L]
1,35113	26	-116	38,1
1,35699	25,9	-116	46,1
1,36724	25,9	-116	50,49

Tabulka 5 Měření fruktózy



Obrázek 19 Závislost koncentrací na indexu lomu pro fruktózu

Kvůli tomu, že jsme měřili pouze pro tři různé vzory je těžké posoudit o lineární korelace mezi průměrným indexem lomu a koncentrací fruktózy.



Obrázek 20 Posuny maxim intenzit důsledkem stáčení polarizace

17. Závěr

V této bakalářské práci jsme se zabývali teoretickým rozbohem a praktickým ověřením opticky aktivního jevu (chirality). Je to vlastnost některých látek ve vodním nebo jiném roztoku (konkrétně jsme pracovali pouze s vodními) stáčet rovinu polarizace lineárně polarizovaného světla a podle úhlu se dá najít jejich koncentrace.

Chirální molekuly mají stejné vlastnosti v achirálních prostředích a jsou těžce fyzicky dělitelné a to je důvod proč se používá polarimetrie v měření jejich koncentrací.

Úhel stáčení závisí nejen na materiálu, ale i na délce chirálního prostředí (kyvety), vlnové délce záření a teplotě.

Závislost na teplotě bude lineární, ale nejsme schopní to všimnout naším přístrojem, protože změny za několik stupňů Celsia způsobí změnu o méně než stupeň.

Změřili jsme ve dvou vlnových délkách (532 a 633 nm) glukózu a ověřili jsme platnost Drudeova vzorce. Specifická rotace klesá hyperbolicky s rostoucí vlnovou délkou.

Naměřili jsme dvě různé látky, glukózu a fruktózu a ověřili jsme úhel stáčení pro určité koncentrace. Specifická rotace těchto látek závisí pouze na 3D konstrukci jejich krystalu a ne na počtu atomů.

Sledovali jsme polarizaci světla po průchodu optickými prvky jako polarizátory a kyvetou pomocí Jonesových matic. Poslední matice bude závislá vlnové délce, teplotě, materiálu a délce nádoby.

18. Seznam použité literatury:

- [1] PEATROSS, Justin a Michael WARE. Physics of Light and Optics. 2013 Edition. Brigham Young University. May 2014, 344, s. 145-146. Dostupné z: http://optics.byu.edu/BYUOpticsBook_2013.pdf
- [2] PEATROSS, Justin a Michael WARE. Physics of Light and Optics. 2013 Edition. Brigham Young University. May 2014, 344, s. 147-149. Dostupné z: http://optics.byu.edu/BYUOpticsBook_2013.pdf
- [3] Thorlabs. Polarization and 3D Cinema Technology Kit, February 22, 2014. User Guide. s. 11-13. Dostupné z: https://www.thorlabs.com/drawings/a5a27a19382659d7-56065F26-A8EF-A28B-5E650A758B1DAD03/EDU-3D1_M-EnglishManualandEducationalMaterials.pdf
- [4] NERZ-STORMES Maryellen. Organic Chemistry Study Aids. Bryn Mawr College USA. Dostupné z: <http://www.brynmawr.edu/chemistry/Chem/mnerzsto/Chirality-Enantiomers-Optical-Rotation.htm>
- [5] Application note. Dostupné z: http://www.kruess.com/documents/BR_Polarimeter_EN_2.0.pdf
- [6] Yen-Liang Yeh. Real-time measurement of glucose concentration and average refractive index using a laser interferometer. Far East University, Taiwan. 2008. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0143816608000742>
- [7] TY Teemu Kääriäinen. Optical rotary dispersion of sugars. 2012. Dostupné z: http://metrology.hut.fi/courses/S-108.erikoistyo/reports/web/T%20K%C3%A4ri%C3%A4inen%20sokerien%20polarisaationkierto_erikoisty%C3%B6.pdf
- [8] Thorlabs , Product Specification sheet CPS532-C2 Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/drawings/ec3abd7480d73447-1F156220-C1FD-632F-5121978A5E218CA9/CPS532-C2-SpecSheet.pdf>
- [9] NEVES, N. M., A. S. POUZADA, J. H. D. VOERMAN, P. C. POWELL. The use of birefringence for predicting the stiffness of injection molded polycarbonate discs. October 1998. vol. 38 NO 10 Dostupné z: <http://onlineibrary.wiley.com/doi/10.1002/pen.10347/epdf>
- [10] Thorlabs , Product Specification sheet S121C, Dostupné z: <https://www.thorlabs.com/drawings/ec3abd7480d73447-1F156220-C1FD-632F-5121978A5E218CA9/S121C-SpecSheet.pdf>
- [11] Application Note MCP 300/500, Dostupné z: http://www.mep.net.au/teachingresearch/TRL_06/TRL06_D02IA01-A_Application_Note_General.pdf
- [12] MIKIKO Inaki, LIU Jingyang, MATSUNO Kenji. Cell chirality: its origin and roles in left-right asymmetric development. 2016. Dostupné z: <http://rstb.royalsocietypublishing.org/content/371/1710/20150403>

