

Spektrální analýza světelného svazku. Barevné souřadnice

Projekt do předmětu Fyzikální optika

15. dubna 2015

Autoři: Ján Ivanecký, xivane00@stud.fit.vutbr.cz
Vojtěch Kaisler, xkaisl00@stud.fit.vutbr.cz

Fakulta Informačních Technologí
Vysoké Učení Technické v Brně

1. Abstrakt

Tato práce se zaměřuje na spektrální analýzu pomocí hranových a mřížkových spektrometrů. Jsou zde popsány základní principy na kterých tyto přístroje pracují. Dále jsou zde zmíněny barevné souřadnice a nejčastěji používané barevné modely, které z nich vycházejí. Součástí je i aplikace pro praktické pochopení činnosti optického hranolu.

2. Klíčová slova

Spektrální analýza, barevné souřadnice, optický hranol, difrakční mřížka, RGB model, CIE model

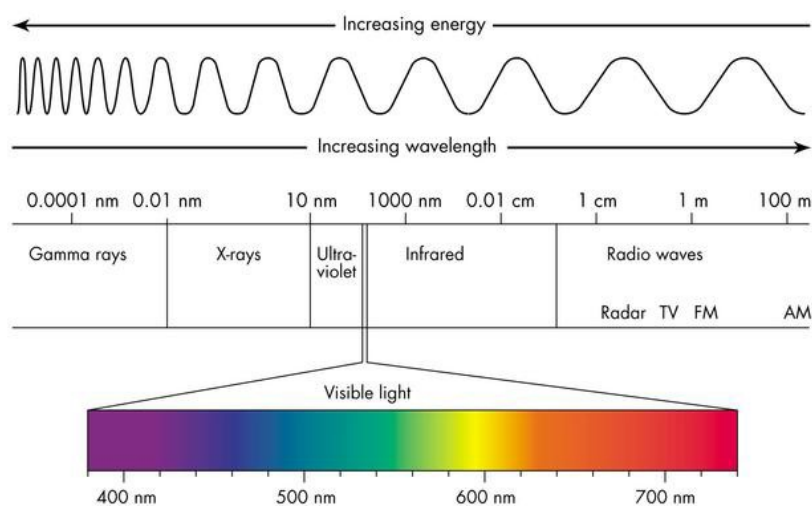
Obsah

1. Abstrakt.....	ii
2. Klíčová slova.....	ii
3. Úvod.....	1
4. Spektrální analýza.....	1
5. Spektrální přístroje.....	2
5.1 Hranolový.....	3
5.2 Mřížkový.....	4
6. Barevné souřadnice.....	5
6.1 CIE model.....	5
6.2 Barevné modely.....	5
6.2.1 RGB model (červená, zelená, modrá).....	5
6.2.2 CMY (azurová, purpurová, žlutá).....	6
6.2.3 HSV a HLS.....	6
7. Praktická část aplikace.....	7
8. Závěr.....	7
9. Literatura.....	8
10. Zdroje.....	8

3. Úvod

Světlo má vliv na všechny aspekty našeho života. Tato práce se zabývá jeho analýzou a rozkládáním. V rámci této práce budeme za světlo považovat elektromagnetické vlnění o vlnových délkách od 390 nm do 700 nm, které je lidské oko schopné vnímat. Tento rozsah vlnových délek označujeme jako viditelnou spektrální oblast [1]. Při pozorování světla si musíme uvědomit, že bílé světlo, tak jak ho vnímáme, je složené z elektromagnetického záření všech vlnových délek viditelného spektra. Tedy bílé světlo v sobě obsahuje složky od červeného po modré světlo. Barvám, barevným souřadnicím a barevným modelům je v této práci věnována samostatná kapitola.

Metoda, která určuje složení vlnových délek v elektromagnetickém záření se nazývá spektrální analýza. Celé spektrum elektromagnetického záření můžeme rozdělit od největších vlnových délek na rádiové vlny, mikrovlny, infračervené záření, viditelné světlo, ultrafialové záření, rentgenové a gamma záření (Ilustrace č. 1). V rámci této práce se ale budeme zabývat spektrální analýzou pouze viditelné části spektra a popisem přístrojů, které se v této fyzikální disciplíně používají. Součástí této práce je i praktická aplikace, která názorně předvádí fyzikální vlastnosti spektrálních přístrojů.



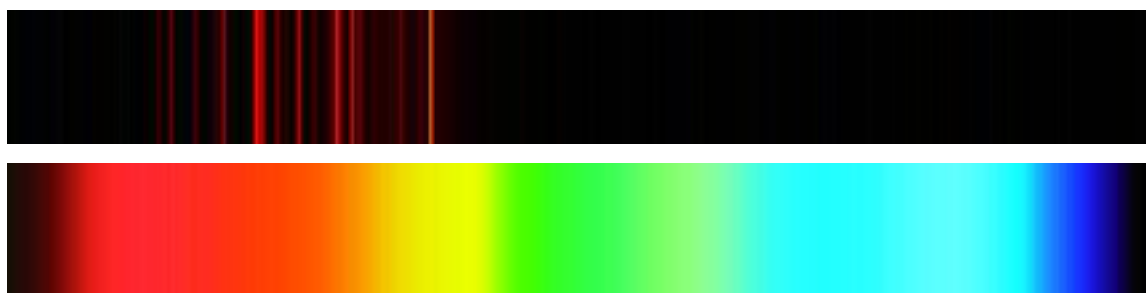
Ilustrace 1: Elektromagnetické spektrum [Z.1]

4. Spektrální analýza

Světlo rozlišujeme na monochromatické a vícesložkové [1]. Monochromatické světlo obsahuje pouze jednu harmonickou složku. Cílem spektrální analýzy je rozložení světla na jednotlivé harmonické složky. Při interakci světla s materiálem (odraz nebo lom) může dojít k pohlcení některých částí spektra. Taktéž je možné, že určité látky vyzařují pouze určité části elektromagnetického spektra. Spektra rozdělujeme podle vzhledu na spojité, pásové a čárové [2].

Spojité spektrum je souvislé, obsahuje plynulé přechody mezi jednotlivými barvami. Získáme ho například rozkladem bílého světla (Ilustrace č. 2, druhá část) [2]. *Pásové spektrum* obsahuje širší pruhy, zpravidla neostře ohraničené nebo složené z velkého počtu jemných čar [2]. Příkladem pásového spektra je spektrum dusíku (Ilustrace č. 3). *Čárové spektrum* je složené z ostře ohraničených úzkých čar, které jsou odděleny tmavými mezerami [2]. Příkladem může být spektrum neonu (Ilustrace č. 2, první část). Dále spektrum dělíme na absorpční a emisní [4]. *Absorpční spektrum* zvýrazňuje ty vlnové délky, které jsou pohlceny při průchodu materiálem [4].

Emisní spektrum obsahuje ty vlnové délky, které jsou daným materiálem vyzařovány [4].



Ilustrace 2: Čárové a spojité spektrum [Z.2]

nitrogen light signature



Ilustrace 3: Absorbční a emisní spektrum dusíku [Z.3]

Spektrální analýza se používá například v astronomii pro určení složení hvězd a vzájemných rychlostí mezi vesmírnými tělesy. Dále v lékařských disciplínách pro určení absorpčního spektra krve. Taktéž je možné touto metodou rozlišit krev lidskou od zvířecí. V průmyslu se spektrální analýza používá například ke sledování přebytku uhlíku při výrobě oceli. Široké uplatnění má také v potravinářském průmyslu, kde se může testovat bezpečnost složení pochutin a nápojů.

5. Spektrální přístroje

Spektrální přístroje nebo spektroskopy jsou přístroje pro rozkládání viditelného světla na jednotlivé složky a jejich vizuální pozorování. Spektroskopy dělíme na spektrometry, které umožňují zkoumat a měřit vlnové délky získaného spektra a spektrografy, které umožňují zaznamenávat získaný spektrální obraz.[1]

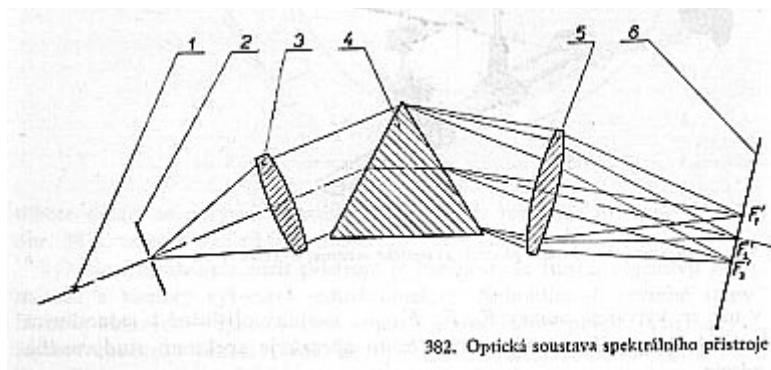
Při konstrukci spektrálních přístrojů se využívá tří jevů [2]:

- Lom světla* – Na tomto jevu jsou založeny *hranolové spektroskopy*, které využívají závislosti indexu lomu na vlnové délce světla.
- Ohyb světla* – Na tomto jevu jsou založeny *mřížkové spektroskopy*, které využívají závislost úhlu odchýlení světla od původního směru šíření při průchodu difrakční mřížkou na vlnové délce.

c) *Interference světla* – Interferenční spektroskopy. Využívají závislosti dráhového rozdílu dvou paprsků na vlnové délce světla.

Dále se v této práci budeme zabývat významnými prvky pouze hranolových a mřížkových spektroskopů.

Spektroskop se skládá ze dvou částí. První je disperzní soustava, která obsahuje jeden nebo více jednoduchých či složených hranolů, nebo difrakčních mřížek. Druhou částí je kolimátor a dalekohled, nebo fotografická komora. Touto částí jsou jednotlivé světelné paprsky usměrňovány na disperzní prvek a následně z disperzního prvku na výstupní rovinu. [2]

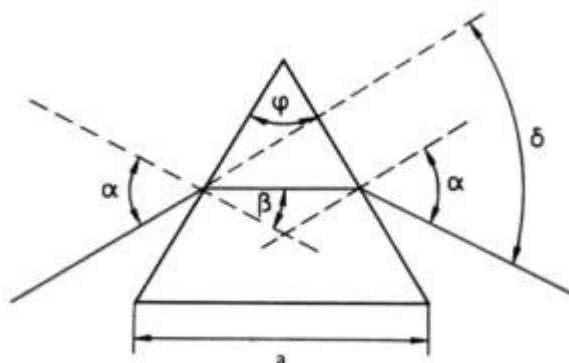


Ilustrace 4: Hranolový spektroskop. [Z.4]

1. Zdroj světla, 2. štěrbina, 3. objektiv kolimátoru, 4. disperzní soustava, 5, objektiv dalekohledu, 6. ohnisková rovina objektivu

5.1 Hranolový

Hranolový spektroskop je založen na principu lomu světla při přechodu mezi vzduchem a materiálem. Jako materiál se nejčastěji používá sklo, nebo tavený křemen [1]. Dvě stěny hranolu svírají úhel φ . Paprsek dopadá na první plochu pod úhlem α a vychází z druhé plochy pod stejným úhlem α za předpokladu, že je hranol izotropního složení. Důležitým parametrem je celková odchylka paprsku δ . V běžných aplikacích se používá hranol takové geometrie, aby odchylka δ paprsku referenční vlnové délky byla co nejmenší [1].



Ilustrace 5: Optický hranol [Z.5]

Vezmeme-li v potaz zákon lomu na vstupní ploše, pak můžeme napsat [1]:

$$\sin\left(\frac{\delta + \varphi}{2}\right) = n \sin\left(\frac{\varphi}{2}\right)$$

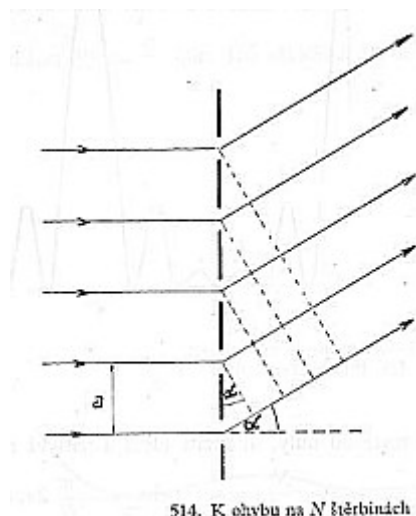
Pokud uvažujeme, že δ a n jsou funkcí vlnové délky, pak derivací dostaneme [1]:

$$\frac{\partial \delta}{\partial \lambda} = 2 \frac{\partial n}{\partial \lambda} \frac{\sin(\varphi/2)}{\cos(\delta + \varphi)}$$

Díky změně odchylky paprsku v závislosti na jeho vlnové délce jsme schopni rozlišit jednotlivé barevné složky obsažené ve zdrojovém světle. Mezi spektroskopy používají hranol patří například Rutherfordův hranol. Ten se skládá ze tří hranolů ztavených dohromady. Tím dosahuje větší úhlové disperze. Jako další případ uvedeme Brocův-Pellinův hranol. U tohoto hranolu je disperzní úhel vždy 90° [2]. Mezi starší přístroje pak patří Kirchhoffův-Bunsenův spektroskop. Podrobnější popis těchto přístrojů není předmětem této práce a jsou zde uvedeny pouze pro příklad.

5.2 Mřížkový

Spektrální přístroje s optickou ohybovou mřížkou využívají závislosti rozložení intenzity v difrakčním obrazci na vlnové délce. Objektív kolimátoru musí zajistit aby na mřížku dopadal rovnoběžný parapsek světla a docházelo tak k Fraunhoferově difrakci [1].



Ilustrace 6: Optická difrakční mřížka [Z.4]

Mřížkovou rovnici pro kolmý dopad světla na mřížku

$$a(\sin \beta) = m \lambda$$

lze zobecnit pro libovolný dopadající úhel [1]. Pro na mřížku dopadající úhel β_i lze mřížkovou rovnici zapsat jako

$$a(\sin \beta_i - \sin \beta_m) = m \lambda$$

kde m je celé číslo určující difrakční řád. Z této rovnice lze vyjádřit úhlovou disperzi mřížky [1] jako

$$\frac{\partial \beta_m}{\partial \lambda} = \frac{m}{a \cos \beta_m}.$$

Abychom byli schopni rozlišit jednotlivé vlnové délky dopadajícího světla, je třeba určit rozlišení spektrálního přístroje. To lze zapsat jako

$$R_s = d \frac{|m|}{a \cos \theta_m} = \frac{l}{a} |m| = N |m|$$

kde N je celkový počet šterbin na mřížce, m je difrační řád, tedy maximum, které pozorujeme [1]. Dalším důležitým parametrem je volný spektrální interval F_s .

Jedná se o interval vlnových délek ve kterém se nepřekrývají vlnové délky jednoho řádu s vlnovými délkami dalších řádů [1]. Pro nejmenší vlnovou délku λ_1 pozorované na difrakčním řádu

m je volný spektrální interval roven [1]:

$$F_{sm} = \frac{\lambda}{m}.$$

Ve skutečných spektrálních přístrojích se používají difrakční mřížky vyráběné *holograficky*, nebo *rytím* do skledené podložky nebo kovového filmu napařeného na skleněnou podložku. Hustota vrypů je několik tisíc na 1 mm. Mřížky lze vyrábět pro průchod (běžné mřížky), kde vrypy jsou matné a rozptylují světlo, nebo pro použití na odraz, kde vrypy jsou hladké a jejich stěna působí jako odrazová plocha. Pokud jsou vrypy v druhém případě nastaveny tak, aby dopadající světlo bylo zrcadlově odražené ve směru difrakce vlnové délky pro kterou je mřížka optimalizovaná, pak se mluví o tzv. *blezované mřížce*. S tímto typem mřížky se můžeme setkat kromě spektrálních přístrojů i u běžných diskových přenosových médií jako je CD, DVD.[1]

6. Barevné souřadnice

Barva je subjektivní vnímání vlnové délky elektromagnetického záření, které daný objekt vyzařuje nebo odráží. Vnímaná barva závisí na třech faktorech. První je spektrální odrazivost plochy vnímaného objektu, dále spektrum světla, které osvětluje daný objekt a poslední je spektrální odezva snímacího zařízení, v případě člověka očí [3]. Reakce fotoreceptoru tedy můžeme zapsat následovně:

$$q_i = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} I(\lambda) R_i(\lambda) S(\lambda) d\lambda$$

kde $I(\lambda)$ je spektrální hustota svítivosti, $R_i(\lambda)$ je spektrální senzitivita fotoreceptoru, $S(\lambda)$ je spektrální odrazivost vnímaného objektu[3].

Lidské oko obsahuje čípky K,S,D, což reprezentuje krátké střední a dlouhé vlny, které je oko schopné vnímat, přičemž vektor (q_k, q_s, q_d) reprezentuje barvu, kterou subjektivně vnímáme[3]. Díky skládání těchto tří složek jsme schopni vnímat všechny barvy viditelného spektra.

6.1 CIE model

Na základě schopnosti skládat všechny barvy světla pomocí tří složek byl mezinárodní komisí CIE v roce 1931 vytvořen barevný prostor XYZ. Standard uvádí pro jednotlivé základní elementy tohoto modelu a to $X = 700.0$ nm, což odpovídá čistě červené barvě, $Y = 546.1$ nm, to odpovídá barvě zelené a $Z = 435.8$ nm, což odpovídá barvě modré [3]. Dále jsou určeny funkce podobnosti $X(\lambda)$, $Y(\lambda)$, $Z(\lambda)$, které odpovídají odezvě lidského oka na jednotlivé vlnové délky. Výslednou barvu získáme pomocí barevných souřadnic x, y, z , které získáme [3]:

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad z = \frac{Z}{X+Y+Z}$$

Přičemž platí, že $x + y + z = 1$. Funkce $Y(\lambda)$ odpovídá vnímané světlosti. Část tohoto modelu je zobrazena na ilustraci č. 7.

6.2 Barevné modely

Ikdyž se barevný prostor CIE v současnosti používá pouze zřídka, položil základy dalším barevným modelům, které našly mnohé využití. V této práci jsou popsány tři nejpoužívanější barevné modely.

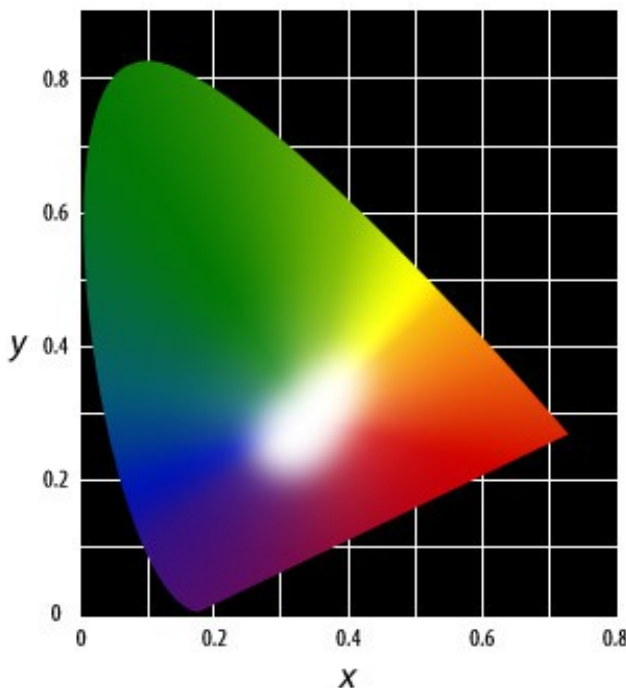
6.2.1 RGB model (červená, zelená, modrá)

Barvu lze v tomto modelu vyjádřit pomocí trojice (barevným vektorem), uváděné v rozsahu od 0 po 1, nebo v rozsahu 0 – 255, což odpovídá kódování každé složky do 1 bytu. Pokud složíme červenou, zelenou a modrou barvu v plné intenzitě, získáme barvu bílou (vektor [1,1,1]).

Postupným sčítáním barevných složek získáme celý barevný prostor. Jedná se o *aditivní* míchání základních barev. Lidské oko vnímá intenzitu barevných složek odlišně, proto se pro výpočet jasu používá empirický vztah [3]:

$$I = 0.299 R + 0.587 G + 0.114 B .$$

V počítačové grafice se používá model RGBA (nebo RGBA) [3]. Toto rozšíření zohledňuje kromě barvy i průhlednost.



Ilustrace 7: Barevný model CIE [Z.6]

6.2.2 CMY (azurová, purpurová, žlutá)

RGB model je technicky orientovaný model vhodný pro zobrazování na displejích. Pro malíře, tisk a další způsoby projekce barev je běžnější *substraktivní* skládání barev. Tento model lze obdobně jako RGB popsat jednotkovou krychlí, přičemž vektor $[1,1,1]$ představuje černou barvu. Převod mezi RGB a CMY lze zapsat jako odčítání matic [3]:

$$\begin{bmatrix} c \\ m \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} r \\ g \\ b \end{bmatrix} .$$

Do prostoru CMY se doplňuje ještě parametr K , který označuje skutečně černou barvu. Velikost černé složky pro danou barvu lze určit jako minimální hodnota ze složek c, m, y snižená o koeficient k . Ten se určí podle použitých barviv a způsobu mísení.[3]

6.2.3 HSV a HLS

Oba modely definují barvu trojicí složek. Pro HSV to je *barevný tón*, *sytnost* a *jasová hodnota*. Barevný tón označuje spektrální barvu, sytnost příměsy jiných barev a jas množství bílého světla. Pro zobrazení prostoru se používá šestiboký jehlan, jehož vrchol leží v počátku souřadného systému HSV. Hodnoty S a V nabývají velikosti od 0 po 1 a hodnota H uvádá úhel $\langle 0^\circ, 360^\circ \rangle$. [3]

Pro HSL jsou jednotlivé složky *barevný tón*, *světelnost* a *sytnost*. Barevný prostor je modelován jako dvojice kuželů (černá v dolním vrcholu, bílá v horním vrcholu). Sytnost je největší na povrchu kuželů a klesá k nule směrem k ose kuželů. Velkou výhodou tohoto modelu je intuitivní míchání barev přidáváním bílých a černých pigmentů k základním spektrálním barvám.[3]

Oba barevné modely umožňují postupně měnit barevné charakteristiky při zachování ostatních vlastností barvy. Toho se využívá, pokud je třeba definovat barvy podle sytosti, světlosti a dominantních barev.[3]

7. Praktická část aplikace

V praktické části tohoto projektu jsme vytvořili aplikaci, která interaktivní formou zobrazuje spektrální rozklad světelného paprsku na jednotlivé monochromatické složky. Cílem této aplikace je umožnit uživateli vyzkoušet si, jak funguje rozklad světla na optickém hranolu. Aplikace je implementovaná v jazyce *Java 8* s použitím vývojového prostředí *NetBeans IDE*.

Samotná aplikace sestává z projekční plochy a ovládacího panelu. Na projekční ploše je zobrazený optický hranol ve tvaru rovnoramenného trojúhelníku a dopadající světelný paprsek.

Uživatel má možnost měnit úhel pod kterým světelný paprsek dopadá na hranol. Dále je možné dynamicky měnit velikost základny optického hranolu a tím jeho vrcholový úhel. Oba parametry mají vliv na výsledné promítané spektrum. Kromě geometrickým parametrů celé soustavy je možné vybrat zdroj záření a tím i výsledné spektrum. Zdroji záření se v tomto případě myslí prvky, které při spalování vytváří elektromagnetické vlnění příslušných vlnových délek, například helium, vodík nebo neon. Výsledné spektrum je diskrétní, každé vlnové délce odpovídá právě jedna čára. To sice neodpovídá spektru získanému přes skutečný optický hranol, nicméně v rámci názornosti aplikace to postačuje. Každému prvku, který může být zdrojem záření, jsou přiřazena data dostupná z [Z.7].

V pravé části projekční plochy jsou paprsky zarovnány pro přehlednější rozlišení jednotlivých vlnových délek.

8. Závěr

V této práci byly popsány přístroje, které se používají ke spektrální analýze. Konkrétně práce popisuje základní principy přístrojů využívajících optický hranol a optickou difrakční mřížku. Dále představuje barevné souřadnice a popisuje některé významné barevné modely. V praktické části projektu je představena aplikace, která umožňuje uživateli simulovat průchod světelného paprsku přes optický hrano při změně geometrických parametrů soustavy.

9. Literatura

- [1] MALÝ, Petr. *Optika*. Vyd. 1. Praha: Karolinum, 2008, 361 s. ISBN 978-80-246-1342-0.
- [2] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy. Díl 4*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961, 845 s.
- [3] JIŘÍ, Žára a Jiří ŽÁRA. *Moderní počítačová grafika*. Vyd 1. Brno: Computer Press, 2004, 609 s. ISBN 80-251-0454-0.
- [4] Wikipedie: Elektromagnetické spektrum. *Wikipedie* [online]. 2014 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Elektromagnetick%C3%A9_spektrum

10. Zdroje

- [Z.1] Cyberphysics - Electromagnetic Spectrum. *Cyberphysics* [online]. 2015 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://www.cyberphysics.co.uk/topics/light/emspect.htm>
- [Z.2] Experimenty s jednoduchým spektroskopem. *Astronom.cz* [online]. 2012 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://www.astronom.cz/procyon/spectroscopy/easyspectra.html>
- [Z.3] Nitrogen Light Spectrum. In: *Imgarcade.com: online image arcade* [online]. 2014 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://imgarcade.com/1/nitrogen-light-spectrum/>
- [Z.4] FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy. Díl 4*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961, 845 s.
- [Z.5] Optické hranoly. *Encyklopedie laboratorní medicíny pro klinickou praxi 2012* [online]. 2004 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://www.enclabmed.cz/encyklopedie/C/JVAEU.htm>
- [Z.6] CIEXYZ - Color Models - Technical Guides. *PPN - University of South Carolina School of Medicine* [online]. 2000 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: http://dba.med.sc.edu/price/irf/Adobe_tg/models/ciexyz.html
- [Z.7] Spectra of Gas Discharges. *Laser Star Astrophysics* [online]. 2006 [cit. 2015-04-21]. Dostupné z: <http://laserstars.org/data/elements/>