

MASARYKOVA UNIVERZITA V BRNĚ

PEDAGOGICKÁ FAKULTA

POZORUJEME SPEKTRA

Diplomová práce

Tomáš Nedvěd

1997

### **Abstrakt**

Příroda je barevná a budoucí učitel fyziky proto potřebuje pastelky - těmi pak zachytí spektra několika nejběžnějších světelných zdrojů: Slunce, zářivky, žárovky, rtutové a vysokotlaké sodíkové výbojky. Spektra vytvoří samotný kompaktní disk (CD) či jeho kousek v krabičce se štěrbinou - spektroskop. Tato diplomová práce poskytuje čtenáři návod, jak si obstarat jednoduché prostředky k pozorování, a jak poté pomocí nich vykonat svá vlastní pozorování.

### **Poděkování**

*RNDr. Janu Hollanovi (vedoucímu diplomové práce) za velké množství cenných rad, Radkovi Meduňovi za ochotu a pomoc při fotografování spekter, Mgr. Pavlovi Slavíčkovi za pomoc při práci s chromatografem*

### **Prohlášení**

*Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci pod vedením J. Hollana zpracoval samostatně a s použitím uvedené literatury.*

# Obsah

<b>1</b>	<b>Úvod</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>Než začneme</b>	<b>3</b>
2.1	Měření mřížkové konstanty CD . . . . .	3
2.2	Rozlišovací schopnost CD . . . . .	6
2.3	Úhlová disperze CD . . . . .	6
2.4	Konstrukce jednoduchého spektroskopu . . . . .	7
<b>3</b>	<b>Pozorujeme</b>	<b>8</b>
3.1	Jak pozorovat spektrum? . . . . .	8
3.1.1	Bodový zdroj světla . . . . .	8
3.1.2	Čarový zdroj světla . . . . .	9
3.1.3	Kolik spektrálních řádů se dá na samotném CD pozorovat? . . . . .	9
3.2	Pozorování slunečního spektra . . . . .	10
3.3	Pozorování spekter žárovek . . . . .	12
3.4	Pozorování spekter výbojek . . . . .	12
3.5	Pozorování spekter zářivek . . . . .	13
3.6	Pokusme se kreslit . . . . .	13
3.7	Malá spektrální analýza . . . . .	14
3.8	Fotografování spekter . . . . .	15
<b>4</b>	<b>Ukázky</b>	<b>16</b>
4.1	Sodíková výbojka Na 24 s tlumivkou . . . . .	17
4.2	Rtutová výbojka HQE 40 . . . . .	19
<b>5</b>	<b>Závěr</b>	<b>20</b>

# Kapitola 1

## Úvod

Tato diplomová práce pojednává o pozorování spekter pomocí kompaktního disku. Jejím cílem je naučit čtenáře (učitele, žáky, zájemce o fyziku, ...) pozorovat a případně i fotografovat spektra jednoduchými prostředky, dále naučit je zaznamenávat co je v běžně pozorovatelných spektrech vidět. Text má účinně vést studenty a učitele fyziky k tomu, aby si sami prohlédli spektra nejbližších světelných zdrojů, povšimli si jejich nápadných rysů a dle možností jim i porozuměli. Učitelům (i budoucím) má text umožnit, aby mohli svět spekter otevřít i svým žákům. Jednoduchými prostředky se rozumí takové, které si může kdokoliv snadno zhotovit či pořídit – především jde tedy dnes o kompaktní disky a pomůcky z nich vyrobené. A proč právě kompaktní disky? Obrovskou výhodou kompaktních disků před jinými difrakčními mřížkami spatřuji hlavně v jejich snadné dostupnosti pro širokou veřejnost, přičemž mají některé srovnatelné parametry s mřížkami běžně užívanými ve školních fyzikálních laboratořích.

Běžně pozorovatelnými spektry se rozumí zejména spektra:

- Slunce
- slunečního světla (přímého či rozptýleného) filtrovaného ovzduším, tj. za podmínek když je Slunce pod obzorem nebo v malých úhlových výškách
- světla rozptýleného plochami různých barev
- lamp veřejného osvětlení
- různých interiérových světelných zdrojů

Mezi spektra, ke kterým se nelze dostat denně kdekoliv, ale která jsou v nějakém ohledu pozoruhodná, patří například spektra stálic.

## Kapitola 2

# Než začneme

Ještě než začneme spektra pozorovat, bude užitečné, zjistit si parametry našeho CD. Jedním z nejdůležitějších parametrů rozhodujících o kvalitě difrakční mřížky je mřížková konstanta (perioda mřížky). Ta je rovna velikosti rozteče mezi rýhami. Periody mřížek kompaktních disků jsou určeny standardy Red Book a Yellow Book. Avšak každý konkrétní disk může mít periodu mřížky trochu jinou (to je dáno specifiky jejich výroby). Např. podle DIN IEC 908 (Deutsche Industrie Norm), jíž se řídí Fa. PolyGram Record Service GmbH, Hannover, by perioda mřížky měla mít hodnotu z intervalu  $(1,6 \pm 0,1)$  mm; viz [22]).

Matematické vyjádření pro velikost mřížkové konstanty je určeno vztahem

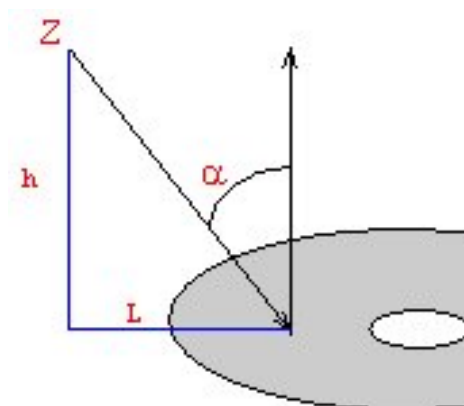
$$m \cdot (\sin \alpha - \sin \beta) = n \cdot \lambda$$

Z něj je také vidět, jakou máme možnost jejího experimentálního zjištění. Při znalosti vlnové délky světla difraktovaného na mřížce a úhlů odrazu a dopadu ji můžeme pohodlně určit. Přesnost výpočtů je však podmíněna přesností měření úhlů dopadu a odrazu. Jejich přesnější měření nám tedy dovolí přesnější určení mřížkové konstanty.

### 2.1 Měření mřížkové konstanty CD

Jednoduchý a velmi výhodný způsob, jak změřit mřížkovou konstantu je například tento: CD nastavíme tak, že spektrální maxima pozorujeme pod úhlem  $\beta = 0^\circ$ , neboli na rovinu kompaktního disku se díváme kolmo. Světlo na disk dopadá pod úhlem  $\alpha$  a pro vyjádření mřížkové konstanty pak platí vztah  $m = (n \cdot \lambda) / (\sin \alpha)$ . Co je tedy velkou výhodou tohoto způsobu měření? Podíváme-li se zblízka na kompaktní disk uvidíme se v něm téměř jako v zrcadle. A právě toho se dá skvěle využít, protože spojnice oka a jeho zrcadlového obrazu je vždy kolmá k rovině CD. Splyne-li tedy pozorované maximum s obrazem panenky oka, máme zaručeno, že úhel  $\beta = 0^\circ$ . Mřížkovou konstantu tak můžeme zjistit určením jediného úhlu. Celá situace je znázorněna na obrázku (viz obrázek 2.1).

Mřížková konstanta je v tomto případě dána výrazem



Obrázek 2.1:

$$m = \frac{n \cdot \lambda}{\sin(90^\circ - \arcsin \frac{h}{\sqrt{L^2 + h^2}})} \quad (2.1)$$

kde  $h$  představuje výšku zdroje světla ( $Z$ ) nad podložkou a  $L$  je vzdálenost kolmého průmětu zdroje světla od průmětu obrazu panenky oka na kompaktní disk. Úhel a tedy určíme ze znalosti vzdáleností  $h$ ,  $L$  a ze znalosti goniometrických funkcí. Při vlastním měření musíme použít zdroj se známou vlnovou délkou, tj. např. sodíkovou výbojku, zářivku, ...

Pro CD-DA "CASSE-NOISETTE", ©Mediaphone, ECD 90 236; jsem naměřil následující údaje. Při měření jsem použil sodíkovou výbojku s vlnovou délkou  $\lambda = 589,3 \cdot 10^{-9}m$ .

	$L$	$h$	$m[\mu m]$
1	6.9cm	6.6cm	1.63
2	6.5cm	6.6cm	1.68
3	6.8cm	6.9cm	1.68

Aritmetický průměr: 1,663 mm;  
 Standardní deviace průměru: 0,02 mm;  
 Nejistota jednoho měření: 0,03 mm.  
 $m = (1,66 \pm 0,02)mm$

Takovýmto jednoduchým způsobem se dá mřížková konstanta kompaktního disku měřit v domácích podmínkách a měl by to každý ze čtenářů zvládnout. Další možností (či spíše variací na dané téma) jak změřit mřížkovou konstantu  $m$  je použít Bunsenův spektrometr, který bývá součástí vybavení školních fyzikálních kabinetů či fyzikálních laboratoří.

Pro srovnání. Měření mřížkové konstanty CD-DA "CASSE-NOISETTE", ©Mediaphone, ECD 90 236 jsem provedl v laboratoři katedry fyziky

PdF MU. Jako zdroj světla jsem použil sodíkovou výbojku Na 24 s tlumivkou. Z naměřených úhlů dopadu a odrazu jsem určil mřížkovou konstantu.

Aritmetický průměr:  $1.667 \cdot 10^{-6}m$   
 Standardní deviace průměru:  $0.01 \cdot 10^{-6}m$  (pravd. obsah interval je 0,68)  
 Relativní nejistota průměru je menší než 1.8%  
 Nejistota jednoho měření je 0.03 mm  
 Při výpočtu jsem použil hodnotu  $\lambda = 589.3 \cdot 10^{-9}m$   
 $m = (1.67 \pm 0.01)mm$

Změřil jsem také mřížkové konstanty jiných CD:

- "CLASSICAL MASTERWORKS" (©1992 Selected Sound Carrier AG; CD 516.2286-2). Provedl jsem 8 měření, přičemž aritmetický průměr byl 1,513 mm, standardní deviace průměru 0,01 mm a nejistota jednoho měření 0,03mm;  $m = (1.51 \pm 0.01)mm$ .
- "METALLICA: LOAD" (PolyGram International Music BV, 532 618-2, ©1996 by Metallica). Provedl jsem 4 měření; aritmetický průměr 1,622 mm; standardní deviace průměru 0,01 mm a nejistota jednoho měření 0,02 mm;  $m = (1.62 \pm 0.01)mm$ .
- "Alanis MORISSETTE: Jagged Little Pill" (Gull Recording Company, 8000 Beverly Blvd., Los Angeles CA 90048-4526; Warner Bros, 1233-39781-2). Učinil jsem 3 měření; aritmetický průměr 1,685 mm; standardní deviace průměru 0,02 mm a nejistota jednoho měření 0,02 mm;  $m = (1.68 \pm 0.02)mm$ .
- "Antonio VIVALDI: CELLO CONCERTOS" (©1994 Supraphon, 11 2121-2 031, Made in Czech Republic). Učinil jsem 3 měření; aritmetický průměr 1,590 mm; standardní deviace průměru 0,01 mm a nejistota jednoho měření 0,01 mm;  $m = (1.59 \pm 0.01)mm$ .
- "Ludwig van BEETHOVEN: Symphony No. 9 "CHORAL"" (©1991 Selcor Ltd., stereo DGL 2106, Made in Germany). Učiněny 3 měření; aritmetický průměr 1,676 mm; standardní deviace průměru 0,01 mm a nejistota jednoho měření 0,01 mm;  $m = (1.68 \pm 0.01)mm$ .
- "Wolfgang Amadeus MOZART: 15 Immortal Masterpieces" (©1991 Selcor Ltd., stereo DGL 2141, Made in Germany). Učiněny 3 měření; aritmetický průměr 1,650 mm; standardní deviace průměru 0,03 mm a nejistota jednoho měření 0,04 mm;  $m = (1.65 \pm 0.03)mm$ .
- "Maurice RAVEL/Claude DEBUSSY: Boléro/Rhapsodie Espagnole/Iberia" : (©1991 Selcor Ltd., stereo DGL 2123, Made in Germany). Provedeny 2 měření; aritmetický průměr 1,690 mm; standardní deviace průměru 0,01 mm a nejistota jednoho měření 0,01 mm;  $m = (1.69 \pm 0.01)mm$ .

Dieter Ohlmann ve svém článku *Eine Compact disc als Versuchsgerät im Physikunterricht* uveřejněném v časopise *Neue Experimentiergeräte und Experimente* 2/43 na str. 16 (1.März 1994) uvádí hodnotu mřížkové konstanty

kompaktního disku 1,58 mm, přičemž relativní nejistota měření byla menší než 0,6%. Jako zdroj světla použil He–Ne–Laser s vlnovou délkou 632,8 nm.

Ivan Baník (Stavební fakulta STU, Bratislava) a Rostislav Baník (Univerzita M. Bela, Banská Bystrica) publikovali v časopise Matematika–fyzika–informatika 5 1995/96 na str. 26 článek Meranie vlnovej dĺžky svetla pomocou CD platne, v němž uvádějí hodnotu mřížkové konstanty kompaktního disku 1,6 mm (bez udání velikosti standardní deviace výsledku a dalších bližších informací).

Ze znalosti mřížkové konstanty kompaktního disku můžeme určit další důležitý parametr mřížky — rozlišovací schopnost.

## 2.2 Rozlišovací schopnost CD

Rozlišovací schopnost nás informuje o nejmenších zaznamenatečných detailech a poskytuje citlivé kritérium kvality mřížky. Principiálně je dána vztahem  $R = l/Dl = n \cdot (l/m)$ . Tedy čím větší šířka ryté plochy  $l$  a vyšší řád spektra  $n$ , tím větší rozlišovací schopnost. Jak velkou šířku ryté plochy (tzn. jak velkou plochu mřížky) musí mít CD s periodou mřížky  $m = 1.6 \cdot 10^{-6}m$ , aby se její pomocí dala rozlišit dvojitá sodíková čára (sodíkový dublet)? Pro sodíkový dublet jsou hodnoty  $Dl = 0.5967nm$ ,  $\lambda = 589.3nm$ . Tedy  $R = 988$ .

Pozorujeme-li v prvním řádu spektra ( $n=1$ ), musí mít mřížka šířku ryté plochy nejméně 1,6 mm; pro  $n=2$  nejméně 0,7 mm apod. Znamená to, že kompaktní disk je k rozlišení sodíkového dubletu dostačující? Pokud jde o difrakci, tak ano. Pro lidské oko s průměrnou rozlišovací schopností kolem  $2'$  je ale nezbytné, aby úhlová vzdálenost obou složek dubletu byla minimálně právě  $2'$ , což teoreticky lze ve druhém řádu spektra (v prvním řádu spektra jsou obě složky dubletu úhlově vzdáleny jen  $1'$ , takže pro jejich pohodlné rozlišení bychom se na disk museli dívat dalekohledem).

## 2.3 Úhlová disperze CD

K tomu, abychom si udělali zcela konkrétní představu o úhlové disperzi kompaktního disku musíme numericky analyzovat rovnici pro vznik interferenčních maxim.

$$m \cdot (\sin \alpha - \sin \beta) = n \cdot \lambda$$

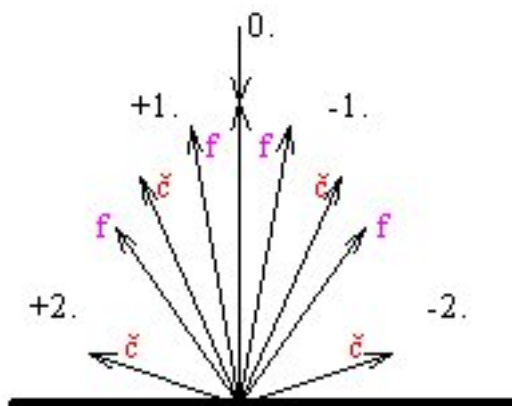
V následující tabulce jsou vypočteny úhly odrazu  $\beta$  pro vlnové délky odpovídající fialové barvě ( $\lambda_f = 0.40mm$ ) a červené barvě ( $\lambda_c = 0.68mm$ ), tj. vlnovým délkám okraje viditelného spektra. Mřížková konstanta je  $m = 1.6\mu m$ . Úhly odrazu  $\beta$  jsou vypočteny pro hodnoty  $n = 0, \pm 1, \pm 2$  a pro hodnoty úhlů dopadu  $\alpha = 0^\circ$  a  $30^\circ$ . Prázdné okénko v tabulce znamená, že pro danou hodnotu  $n$  (pro daný řád spektra) nelze už vypočítat  $\beta$  tak, aby platilo, že  $\beta$  je z intervalu  $(-90^\circ, 90^\circ)$ . Ve sloupci, který je nadešpsán D, je uvedena velikost oboru úhlů, který odpovídá celému spektru od fialové barvy do červené barvy.



n	$\alpha_1 = 0^\circ$			$\alpha_2 = 30^\circ$		
	$\beta_{1c}$	$\beta_{1f}$	$\Delta$	$\beta_{2c}$	$\beta_{2f}$	$\Delta$
-2	$58.2^\circ$	$30.0^\circ$	$28.2^\circ$	—	$90.0^\circ$	$> 20.5^\circ$
-1	$25.2^\circ$	$14.5^\circ$	$10.7^\circ$	$67.7^\circ$	$48.6^\circ$	$19.1^\circ$
0	$0.0^\circ$	$0.0^\circ$	$0.0^\circ$	$30.0^\circ$	$30.0^\circ$	$0.0^\circ$
1	$-25.2^\circ$	$-14.5^\circ$	$10.7^\circ$	$4.3^\circ$	$14.5^\circ$	$10.2^\circ$
2	$-58.2^\circ$	$-30.0^\circ$	$28.2^\circ$	$-20.5^\circ$	$0.0^\circ$	$20.5^\circ$

Z tohoto numerického výpočtu plyne hned několik zajímavostí:

Především si všimněme 0.řádu spektra. Nastává vždy pro úhel  $\beta = \alpha$  a do tohoto směru míří paprsky všech vlnových délek. K tomuto závěru jsme však nepotřebovali numerický výpočet. Když do rovnice interferenčních maxim dosadíme  $\beta = \alpha$ , je splněna při  $n = 0$  pro každé  $\lambda$ . Jedná se vlastně o zrcadlový odraz světla na rovině mřížky podle zákona odrazu a ten nezávisí na vlnové délce. Pro úhel dopadu  $\alpha = 0^\circ$  jsou jednotlivé řády spektra rozloženy symetricky kolem 0.řádu, který nastává pro  $\beta = 0^\circ$ . Při jiných úhlech dopadu tomu tak již není. Z tabulky i ze znázornění na obrázku (viz obrázek 2.2) je vidět, že čím vyšší řád spektra, tím širší obor úhlů spektrum zaujímá (viz veličina  $\Delta$  v tabulce).



Obrázek 2.2: Znázornění úhlového rozložení řádů spektra při kolmém dopadu bílého světla na mřížku.

Na závěr diskuse těchto numerických výpočtů poznamenejme, že tyto výpočty platí jen pro výše uvedenou mřížkovou konstantu a to  $1.6 \pm 0.1 \text{ mm}$ . (viz [14])

## 2.4 Konstrukce jednoduchého spektroskopu

Účelem jednoduchého spektroskopu je získání jediného úhlově tenkého zdroje světla. Hlavními částmi jednoduchého spektroskopu jsou: štěrbina, disperzní element (úlolek kompaktního disku) a záznamové zařízení (nejčastěji oko). Světlo vstupuje do spektroskopu úzkou štěrbinou – 2, dopadá na kompaktní disk a v

závislosti na vlnové délce se odráží směrem nahoru. Zde je otvor, kterým se spektrum sleduje – 1.



Obrázek 2.3: Schematicky zakreslená anatomie jednoduchého spektroskopu, s vyznačenými optickými dráhami paprsků.

Pro vlastní konstrukci jednoduchého spektroskopu je nejlépe použít papírovou krabici tvaru kvádrů. Na vlastních rozměrech krabičky příliš nezáleží. Je vhodné, aby nebyla ani příliš velká, ani příliš malá. Na boční stěně vystříháme otvor, který podélně překryjeme dvěma žiletkami (ostřím k sobě), čímž vznikne štěrbinu. Je dobré nastavit šířku štěrbinu (tj. vzdálenost žiletek) až na konci celé práce, nebo zhotovit štěrbinu s volně nastavitelnou šířkou, aby bylo možné získaný obraz co nejvíce "doladit". Na druhou stranu krabice umístíme úlolek kompaktního disku tak, aby pomyslná tečna ke stopám CD byla rovnoběžná se štěrbinou. Se spodní základnou krabice by úlolek CD měl svírat úhel menší než  $45^\circ$ . V horní části krabice nad úlomkem kompaktního disku vystříháme otvor, kterým se provádí vlastní pozorování.

A protože smyslem našeho jednoduchého spektroskopu je získání úhlově tenkého zdroje světla, bude nás zajímat, jak úhlově tenký zdroj budeme tím svým spektroskopem pozorovat. Označíme-li  $x$  šířku štěrbinu a  $y$  vzdálenost štěrbinu od bodu v rovině disku do nějž paprsek ze štěrbinu dopadá, platí pro úhlovou šířku zdroje  $x/y$  radiánů (přepočítání na stupně získáte vynásobením  $180^\circ/\pi$ ). Spektroskopem, jenž má  $x = 1\text{mm}$  a  $y = 100\text{mm}$  získáme zdroj úhlově tenký zhruba  $34'$ .

## Kapitola 3

# Pozorujeme

K pozorování spekter můžeme použít buď samotný kompaktní disk, jeho úlomek či úlomek disku v krabici se štěrbinou – jednoduchý spektroskop. Vyberme si nyní libovolný zdroj světla a CD nastavme tak, že pomocí něj uvidíme spektrum. Zkusme nyní diskem různě natáčet (naklánět ho do stran, otáčet s ním kolem osy procházející jeho středem, ...) a vyzkoušejme co nejvíce různých poloh, v nichž můžeme spektrum pozorovat.

### 3.1 Jak pozorovat spektrum?

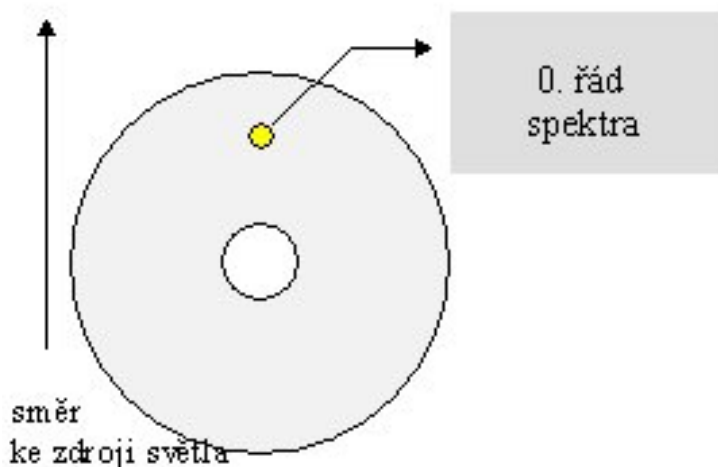
#### 3.1.1 Bodový zdroj světla

Při vlastním pozorování si ze všeho nejdříve vyberme bodový zdroj světla (např. dostatečně vzdálenou žárovku, plamen svíčky, lampu veřejného osvětlení, kompaktní zářivku, ...), který je "osamocený", tzn. žádný jiný zdroj k němu není úhlově blíž než asi  $30^\circ$  (zhruba to odpovídá trojnásobné šířce pěsti při natažené ruce). Toto platí zejména pro začátečníky (ale nejen je!), aby se jim nepletly spektrální obrazy jednotlivých světelných zdrojů do sebe. Postavte se čelem ke zdroji světla a do ruky uchopte kompaktní disk. Zdroj světla a kolmice ke kompaktnímu disku určují rovinu dopadu a podél této roviny budeme pozorovat interferenční jevy (v ní leží úhly  $\alpha$  a  $\beta$ ).

Kompaktní disk nejdříve podržte ve vzdálenosti cca. 30 cm od oka a nakloňte ho tak, že se vám v něm bude zdroj světla zrcadlit (zrcadlový odraz). To je poloha, kdy pozorujeme 0.řád spektra. (viz obrázek 3.1)

Když nyní přiblížíme oko až těsně k disku (na vzdálenost několika málo centimetrů) uvidíme spektrum. Můžeme rozlišit případy, kdy budeme měnit (vůči povrchu Země) buď polohu oka (pozorovatele), nebo polohu zdroje anebo (nejčastěji) polohu kompaktního disku.

Výjděme ze zrcadlové polohy (tj. poloha, při níž se úhel  $\alpha$  rovná úhlu  $\beta$ , neboli vidíme zrcadlový odraz zdroje světla - nultý řád spektra). Když nyní budeme kompaktní disk naklánět směrem k sobě podél jeho horizontální osy (na kompaktní disk se díváme stále kolměji), bude se úhel  $\alpha$  zvětšovat a úhel  $\beta$  zmenšovat. Do našeho oka bude vstupovat nejdříve fialové, pak modré, zelené, žluté a červené světlo příslušné +1.řádu spektra. (viz obrázek 3.2) Podobný jev



Obrázek 3.1: Schematické znázornění 0.tého řádu spektra. Pohled shora na kompaktní disk. Vzdálenost disku a oka je cca. 30cm

budeme pozorovat, když ze zrcadlové polohy budeme kompaktní disk odklánět od sebe opět kolem jeho horizontální osy (budeme se na něj dívat stále tečněji). Do oka nám bude opět vstupovat postupně světlo fialové, pak modré, zelené, žluté a červené. To budeme pozorovat -1.řád spektra.

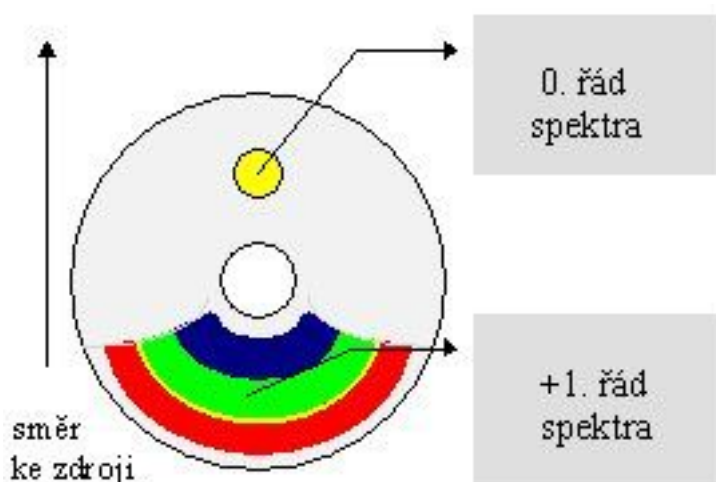
Pokud budeme kompaktní disk naklánět ještě víc (od sebe, či k sobě) a oko přiblížíme k disku na vzdálenost asi 6 cm, spatříme -2. či +2. řád spektra a při dalším naklánění disku a přibližování oka k němu řády vyšší.

### 3.1.2 Čarový zdroj světla

Typickým čarovým zdrojem světla je lineární zářivka. K tomu, abychom si mohli prohlédnout spektrum čarového zdroje světla se všemi spektrálními čarami, musíme zajistit, aby tento zdroj byl úhlově tenký. Toho docílíme např. štěrbinou u jednoduchého spektroskopu či pozorováním z dostatečné vzdálenosti při použití samotného CD. Která ta vzdálenost je ale dostatečná? V blízkosti čarového zdroje světla nastavme disk do polohy, v níž na něm uvidíme kterýkoliv (mimo nultého!) řád spektra. Budeme-li se nyní od tohoto čarového zdroje vzdalovat, uvidíme, že v jisté vzdálenosti od něj se z původně spojitého spektra začnou "vynořovat" nejjasnější emisní čáry. A čím víc se budeme od zdroje světla vzdalovat, tím lepší čarové spektrum uvidíme.

### 3.1.3 Kolik spektrálních řádů se dá na samotném CD pozorovat?

Vyzkoušejme situaci, kdy kompaktní disk položíme na nějakou podložku (parapet okna, lavičku, stůl, ...) a budeme jej sledovat v rovině dopadu pod různými úhly (úhel  $\alpha = konst.$ , úhel  $\beta$  je z intervalu  $(-\pi/2; +\pi/2)$ ). Od polohy, v níž

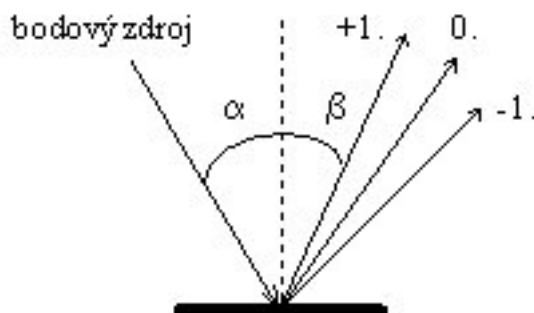


Obrázek 3.2: Schematické znázornění 0. a +1.řádu spektra na kompaktním disku. Pohled shora. Oko se nyní nachází nad +1.řádem spektra ve vzdálenosti asi 11cm od disku.

vidíme zrcadlový odraz zdroje sledujme všechny záporné řády spektra (úhel  $\beta$  se zmenšuje až k nule a pak dále klesá k minus  $\pi/2$ , když se díváme z téže strany, ze které na disk svítí zdroj). Musí platit  $m(\sin \alpha - \sin \beta) = n\lambda$ . Aby byla pro všechny úhly  $\beta$  z intervalu  $(-\pi/2; +\pi/2)$  zachována rovnost, musí platit  $|n\lambda/m| \leq 2$ . Dosadíme-li  $\lambda_c = 0.68mm$  (červená barva),  $\lambda_f = 0.40mm$  (fialová barva),  $m = 1.67\mu m$  zjistíme, že takhle uvidíme maximálně 4 červené a 8 fialových oblastí spektrálních řádů. Tedy teoreticky bychom měli vidět 4 celé spektrální řády a ještě fialové části dalších 4 řádů. Ty celé spektrální řády jsou skutečně snadno pozorovatelné (i když samozřejmě dochází k jejich částečnému vzájemnému překrývání). Horší situace je s těmi řády vyššími, což může být způsobeno např. menším množstvím světla v daných rádech.

### 3.2 Pozorování slunečního spektra

Sluneční spektrum je na první pohled spojité (jen tak jej znal Newton), ale při podrobnějším pohledu v něm lze najít absorpční čáry, které vznikly pohlcením (absorpcí) určitých složek spojitého spektra při průchodu chladnější vrstvou plynů. Většina čar slunečního spektra vzniká ve vnějších vrstvách fotosféry. Fraunhofer označil hlavní čáry velkými a malými písmeny latinské abecedy. Toto označení se dochovalo doposud a vedle něho se též užívá označení čar chemickou značkou příslušného prvku. Ve slunečním spektru tak můžeme najít např. řadu čar vodíku označených postupně  $H_\alpha$ ,  $H_\beta$ ,  $H_\gamma$  atd., které nesou také Fraunhoferovo označení C, F, f atd. Je to známá Balmerova série (řada) vodíku. Dvojitá čára označená Fraunhoferem D patří sodíku, čáry A a B patří kyslíku, dvojice silných čar K a H na hranici viditelného spektra patří vápníku atd. Některé čáry vznikají teprve až v zemské atmosféře. K nim patří kyslíkové A a B, dále řada pářů vodní páry, ozonu a kyslíčnicku uhličitého. (viz [10],s.227–230)



Obrázek 3.3: Základní poloha bodového zdroje světla, CD, 0., +1. a -1.řádu spektra.

Pro pozorování slunečního spektra je dobré použít jednoduchý spektroskop. Důvod je prostý. Je automaticky zajištěna (díky samotnému plášti spektroskopu) nerušenost pozorování okolními světelnými zdroji.

Když namíříme jednoduchý spektroskop štěrbinou směrem k nějakému jasnému místu oblohy (např. ke Slunci), budeme si moci po chvíli experimentování prohlédnout krásné sluneční spektrum s několika nenápadnými absorpčními čarami. Čáry se "zvýrazní", když se při pozorování překryjeme neprůsvitnou látkou. Nevýrazné čáry se také stanou nápadnějšími, když budeme spektroskopem pomalu pohybovat nahoru a dolů (pomalu pohybující se "nic" je často nápadnější než "nic" stojící). Je dobré pokusit se také zvětšovat a zmenšovat šířku štěrbinu.

Za jasného počasí lze pozorovat v 1.řádu spektra Fraunhoferovy čáry A, B, C, D<sub>1,2</sub> (dublet není rozlišen!), E, b, E, g, f, h (podtržením jsou označeny "nejsilnější" Fraunhoferovy čáry). Jas tohoto řádu je ovšem velký a může ještě oslňovat. Ve 2.řádu spektra jsou viditelné čáry A, B, C, D<sub>1,2</sub> (dublet je zde na hranici rozlišení!), E, b, E, g, f, h. Další spektrální čáry se již překrývají a nejsou proto příliš vhodné k pozorování.

Za deště je vhodné pozorovat 1.řád spektra, kvůli jeho jas. Lze pozorovat čáry A, B, C, D<sub>1,2</sub>, E, b, E, dále pás mezi žlutou a zelenou oblastí a pás mezi oranžovou a žlutou oblastí. Pás mezi žlutou a zelenou oblastí je známý pás vodní páry (tzv. dešťový pás). Jeho přítomnost ve spektru ukazuje na skutečnost, že jsou v atmosféře obsaženy molekuly vody.

Při západu (či východu) Slunce lze jednoduchým spektroskopem vidět čáry A, B, C, D, E, b, F a dále velmi nápadné jsou tři molekulové pásy (změna podtržení z A na B může být způsobena změnou množství světla). Pás vodní

páry nacházející se mezi žlutou a zelenou oblastí (pás vodní páry je společně s čarou B nejnápadnějším (nejjasnějším) "objektem"), dále pás mezi oranžovou a žlutou oblastí a pás v oblasti červené. Pás v červené oblasti je pás kysličníku uhlíčitého, kterého je v ovzduší také dost.

Při pozorování slunečního spektra při západu Slunce si můžeme všimnout ještě jedné zajímavosti. Modrá oblast spektra je po západu Slunce výrazně menší než během dne a západ Slunce je červený. To je způsobeno tím, že světlo, které přichází do oka přes velkou vrstvu vzduchu (velkou vrstvu v porovnání s její velikostí (tloušťkou) během dne. Jinými slovy paprsky musí urazit skrz atmosféru delší dráhu než např. v poledne) ztratí rozptylem velké množství modré složky světla takže je žluto—červené (odmodralé).

Čára	Vlnová délka	Prvek	Barva
A	759.4nm	O	tmavěčervená
B	686.7nm	O	červená
C( $H_\alpha$ )	656.3nm	H	červená
$D_{1,2}$	589.3nm	Na	žlutá
E*	526.9nm	Fe, Ca	zelená
b*	517.0nm	Mg	zelená
F( $H_\beta$ )	486.1nm	H	modrozelená
g	435.8nm	Ca	modrá
f( $H_\gamma$ )	434.1nm	H	modrá
G	430.8nm	Ca	fialová
h( $H_\delta$ )	410.2nm	H	fialová
H	396.9nm	Ca	tmavěfialová
K	393.4nm	Ca	tmavěfialová

Tabulka 3.1: Přehled nejvýraznějších Fraunhoferových čar. Hvězdičkou (\*) jsou označeny skupiny čar.

Sluneční spektrum se dá pozorovat také tak, že úlomkem disku (nejlépe CD–R) budeme sluneční světlo promítat na zastíněnou plochu (zed'). Kromě zrcadlového odrazu uvidíme i nejjasnější spektrální čády, přičemž získané spektrum bude spojité. Abychom v něm viděli absorpční čáry a molekulární pásy, musíme úloмок disku vhodně prohnout, tj. vytvořit z něj fokusující mřížku. Prohnutí realizujete stlačením vnitřního a vnějšího okraje disku ve snaze vytvářet jej do paraboly.

Při tomto způsobu pozorování jsem ve slunečním spektru spolehlivě rozpoznal jenom molekulový pás vodní páry a pás kysličníku uhlíčitého

### 3.3 Pozorování spekter žárovek

Žárovky patří k teplotním světelným zdrojům a můžeme je rozdělit na žárovky vakuové a žárovky plněné plynem, a ty pak dále na žárovky klasické a halogenové. Klasické žárovky jsou stále nejrozšířenějším umělým zdrojem světla a k jejich přednostem patří jednoduchá konstrukce, okamžitý start bez blikání, stabilní svícení bez míhání, spojité spektrum vyzařovaného světla,

vynikající podání barev, ... V ostrém protikladu k uvedeným výhodám stojí především malý měrný výkon žárovek a jejich relativně krátký život. Jestliže v klasických žárovkách je dominujícím procesem vypařování wolframového vlákna a usazování wolframu na stěnách baňky, pak v halogenových žárovkách se k tomuto procesu přidává působení termochemické transportní reakce wolframu s halogenem. Celkový efekt wolfram-halogenového cyklu u žárovky představuje při zvýšení světelného toku o asi 30% přibližně dvojnásobný život. (viz [11], s.113–120)

Spektra žárovek se dají dobře pozorovat jak samotným kompaktním diskem, tak i jednoduchým spektroskopem. Jejich spektrum je spojitě.

Samozřejmě, že spektrum žárovek můžeme pozorovat i jiným způsobem. Kromě řekneme tzv. klasických způsobů jako je použití hranolu či difrakční mřížky na průchod, můžeme použít i způsoby jiné.

Zkusme získat spektrum pomocí textilního kávového filtru. U kávového filtru jsou útek a osnova k sobě kolmé, čímž vzniká pravoúhlá síť. Podíváme-li se přes tento kávový filtr na bodový zdroj světla (např. žárovka v dostatečné vzdálenosti), uvidíme spektrum. Textilní kávový filtr se dá s výhodou použít i při pozorování spekter výbojek. Zajímavý je např. pohled na spektra řady pouličních lamp.

### 3.4 Pozorování spekter výbojek

Tato kapitola je věnována pozorování vysokotlakých sodíkových a rtuťových výbojek, jakožto hlavních představitelů výbojových světelných zdrojů používaných pro účely veřejného osvětlení (Česká republika patří k zemím s nejvyšším podílem vysokotlakých sodíkových výbojek ve veřejném osvětlení (viz [11], s.154)). Můžeme se s nimi setkat i ve fyzikálních laboratořích, školních fyzikálních kabinetech, ...

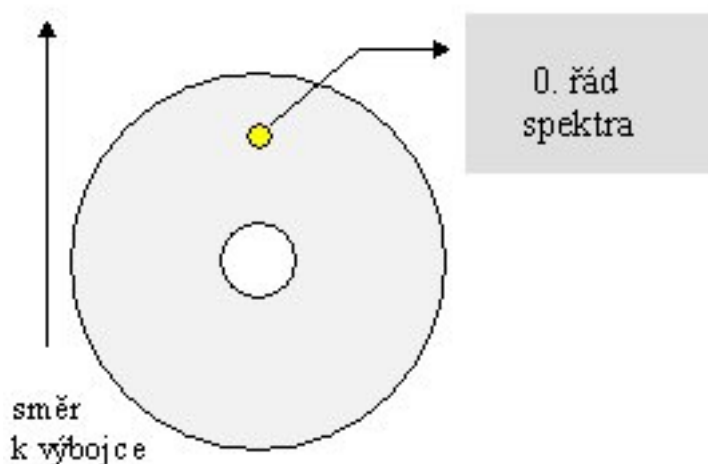
Vyberme si osamocenou lampu s výbojkou a postavme se k ní čelem ve vzdálenosti asi 20 m. V této vzdálenosti můžeme výbojku považovat za bodový zdroj, který je zároveň dostatečně jasný. Výbojka a kolmice k CD určují rovinu dopadu a podél této roviny budeme pozorovat interferenční jevy (v ní leží úhly  $\alpha$  a  $\beta$ ).

Vezmeme si "cédéčko" a v poloze, jako bychom lampu fotili zrcadlovým fotoaparátém ho nastavíme tak, abychom viděli obraz výbojky – nultý řád spektra. (viz obrázek 3.4)

Dále budeme postupovat podle dříve popsaného návodu (viz Bodový zdroj světla).

Při prvním pohledu si každý jistě všimne že spektrum není spojitě, ale je tvořeno výraznými zjasněními v některých barevných odstínech — emisní spektrum.





Obrázek 3.4: Schematické znázornění umístění 0.řádu spektra při pozorování výbojky kompaktním diskem. Pohled shora ze vzdálenosti oka od disku asi 30cm.

### 3.5 Pozorování spekter zářivek

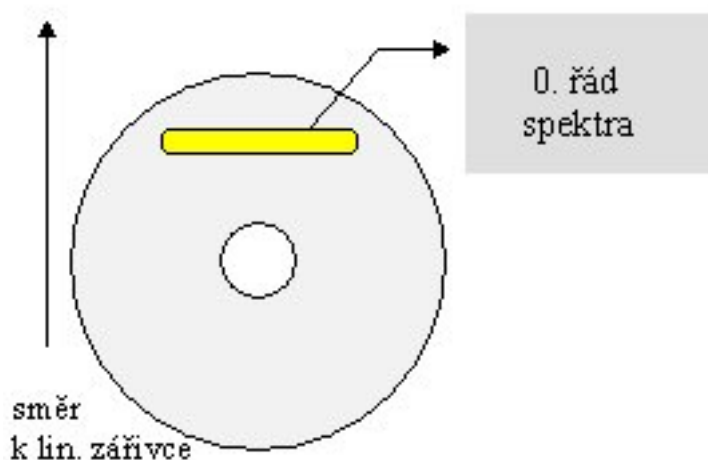
Zářivky jsou nízkotlaké rtuťové výbojky, v nichž se ultrafialové záření výboje transformuje vrstvou luminoforu na viditelné světlo. V závislosti na typu použitého luminoforu lze dosáhnout různého spektrálního složení vyzařovaného světla a různé účinnosti zářivky. Vlastní výboj probíhá v parách rtuti a v inertním plynu (obvykle argon nebo směs argonu s kryptonem). Zářivky lze rozdělit na zářivky lineární a kompaktní. (viz [11], s.121) Kompaktní zářivky se svým světelným tokem, geometrickými parametry a kvalitou podání barev blíží obyčejným žárovkám a v porovnání s nimi mají podstatně větší účinnost. (viz [11], s.129)

Lineární zářivky, coby interiérový zdroj světla, nejsou zdrojem bodovým, ale čárovým. Nejlepší bude proto k pozorování jejich spektra použít buď jednoduchého spektroskopu nebo postupovat dle návodu pro pozorování čarových zdrojů, anebo musíme zmíněnou bodovost světelného zdroje zajistit jinak (nejlépe vhodným cloněním).

### 3.6 Pokusme se kreslit

Vzhled spekter je vždy vhodné nejen popsat, ale též zachytit graficky. Dobře provedená kresba je vždy názornější než sebelepší popis. Zhotovit pěknou a realitě odpovídající kresbu však není lehké.

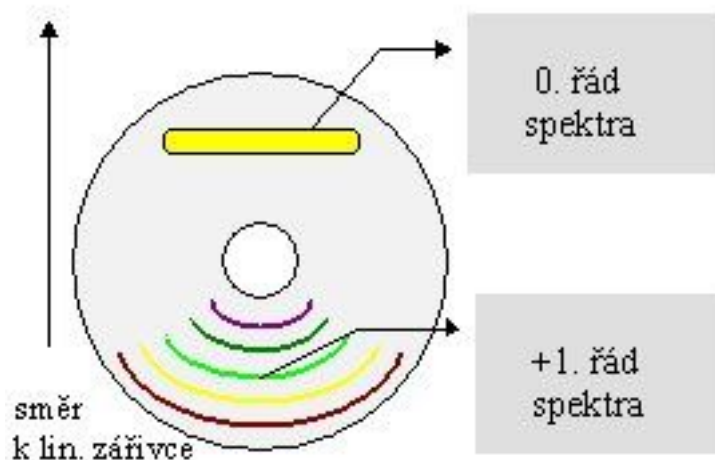
Pokusme se nyní nakreslit spojitě spektrum. Nejedná se o zcela triviální úlohu, jak by se mohlo zpočátku zdát, protože není jednoduché správně zakreslit zvláště "přechody" mezi jednotlivými barevnými oblastmi. Je vhodné spektrum kreslit do předem připraveného obdélníku o stranách  $6 \times 2\text{cm}$ . Kresba



Obrázek 3.5: Schematické znázornění umístění 0.řádu spektra při pozorování lineární zářivky kompaktním diskem. Pohled shora ze vzdálenosti oka od disku asi 30cm.

spektra by se ve výsledku měla co nejvíce podobat skutečnosti – tj. měla by obsahovat všechny barevné plochy bez patrných tahů pastelkami (kreslete proto lehce a doporučuji "dřevěnými" měkkými pastelkami). Emisní a absorpční spektra zakresleme opět do připravených obdélníků. (viz obrázek 3.7) Naší hlavní úlohou v tomto případě bude vystihnout nejen správné odstíny čar (to v případě emisních spekter), ale hlavně jejich vzájemné vzdálenosti. U absorpčních spekter můžeme ohodnotit "tmavost" jednotlivých absorpčních čar stupnicí od 0 (nejtmavší, nejnápadnější) do 5 (nejsvětější, nejhůře pozorovatelná). Nejprve si vyznačte polohu nejjasnějších spektrálních čar a teprve potom zakreslete polohu čar slabších, přičemž stále kontrolujte geometrickou věrnost kresby. Čáry v chybných polohách raději zavčas vymažte. Nejste-li si polohou nějaké slabé čáry jisti, uveďte u její pozice otazník.

Podél jeho delších stran vyznačíme souřadnicové osy. Jeden dílek stupnice necht je velký jeden centimetr. Na jednu z os vynášíme  $\Delta\beta$ , tj.  $(\beta - \beta_0)/1^\circ$  (absolutní hodnotu úhlu  $\beta_0$  explicitně určíme z úhlu dopadu  $\alpha$ ). Jestliže celé spektrum vidíme velké např.  $6^\circ$ , pak každému dílku naší stupnice odpovídá úhel  $1^\circ$ , vidíme-li spektrum  $15^\circ$  velké, pak každému dílku stupnice odpovídá úhel  $2.5^\circ$ , atd. Na druhou osu vynášíme poměrnou vzdálenost spektrálních čar od vybraného bodu  $y_0$ , tj.  $(y - y_0)/1cm$ . Na závěr je samozřejmě vhodné kresbu doplnit údaji o zdroji světla, jeho úhlové velikosti, mřížkové konstantě kompaktního disku, řádu pozorovaného spektra a poznámkou o tom, zda bylo spektrum pozorované pomocí jednoduchého spektroskopu či na samotném CD.



Obrázek 3.6: Schematické znázornění 0. a +1řádu emisního spektra na kompaktním disku. Pohled shora. Oko se nachází nad +1.řádem spektra ve vzdálenosti asi 5cm od disku.

### 3.7 Malá spektrální analýza

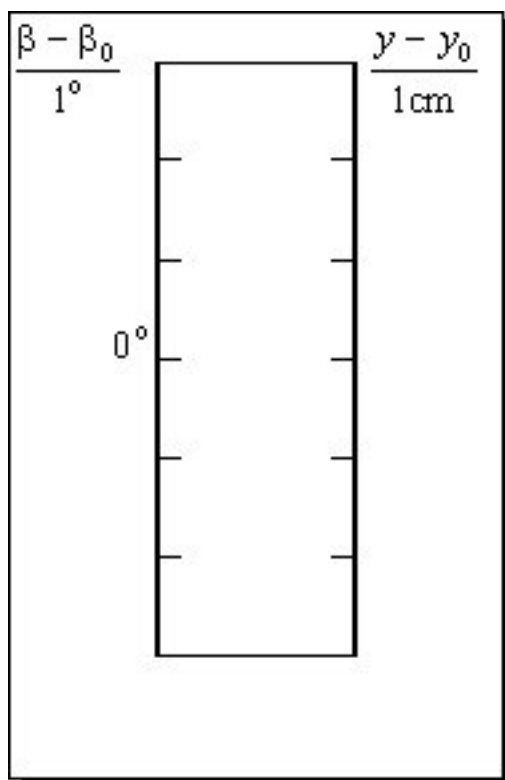
Máme-li spektrum nakreslené, můžeme se pokusit o jakousi jednoduchou spektrální analýzu, tj. pokusíme se určit vlnové délky světla, vydávaného pozorovaným zdrojem. U spojitého spektra můžeme určit např. vlnové délky obou pozorovaných konců viditelného spektra, ...; u spekter čarových vlnové délky jednotlivých spektrálních čar. A máme hned několik způsobů, jak to učinit.

Jeden z nich je vlastně velmi podobný úloze, při níž jsme určovali mřížkovou konstantu CD, s tím, že nyní známe mřížkovou konstantu a určujeme vlnovou délku světla.

Další spočívá v tom, že víme-li o jaké spektrální čáře jde, můžeme si jejich vlnové délky zjistit z literatury (v příslušných tabulkách).

Možností, jak zjistit vlnové délky jednotlivých spektrálních čar je více a jedna z velmi přesných je použitím monochromátoru.

Po zjištění vlnových délek spektrálních čar vynesme tyto do grafu. Na vodorovné ose bude vlnová délka a na svislé poměrná vzdálenost spektrálních čar (neboli jejich poloha). Pro malé hodnoty úhlu  $\beta$  můžeme získanými body proložit přímkou. Jinými slovy vzdálenost dvou spektrálních čar je pro malé hodnoty úhlu  $\beta$  přibližně úměrná rozdílu jejich vlnových délek. Pro ostatní hodnoty úhlu  $\beta$  musíme body proložit funkcí  $\sin \beta$ . Pomocí proložené křivky pak z grafu můžeme odečíst vlnové délky neznámých čar.



Obrázek 3.7: Pomocný formulář pro kreslení spekter.

### 3.8 Fotografování spekter

Je zřejmé, že naše kresby budou vždy méně přesné než fotografie. Spektra se dají pohodlně fotografovat tak, že kompaktní disk nebudeme držet v ruce, ale nějakým způsobem zajistíme jeho pevné uchycení. Můžeme jej položit na podložku, okno, lavičku, stůl, ... a případně jej vhodně podložit, nebo jej můžeme postavit hranou na podložku (zem, okno, lavička, stůl, ...) a o něco opřít.

Chceme-li opět jako v případě našich kreseb určit vlnové délky jednotlivých spektrálních čar, budeme postupovat obdobně. Nejprve si u všech zachycených spektrálních čar pomocí pravítka změříme jejich poměrné vzdálenosti (s co největší přesností, tj. asi 0,25 mm). Ty pak vyneseme do grafu na svislou osu. Vyhledejme si vlnové délky některých známých čar v tabulkách (nebo je změříme přímo na kompaktním disku či pomocí monochromátoru, ...) a ty pak vyneseme do grafu na vodorovnou osu. Myšlenka je opět stejná: znázornit graficky závislost vlnové délky spektrálních čar na jejich vzdálenosti od zvoleného bodu (vlnovou délku jako funkci polohy čar).

## Kapitola 4

### Ukázky



Spektra vysokotlakých výbojek jsem fotil v laboratoři katedry fyziky na PdF MU. Jako zdroje světla jsem použil sodíkové (Na 24 s tlumivkou) a rtutové výbojky (HQE 40 a MERCURY). Obě výbojky (Na 24 s tlumivkou a HQE 40) jsem proměřil v plazmochemické laboratoři PřF MU monochromátorem Jobin-Yvone HR 640 řízeným počítačem. Světlo přitom bylo z výbojky vedeno optickým kabelem přes fotonásobič na optickou mřížku (1200 vrypů/mm). Získal jsem závislosti vlnové délky na poměrném množství záření. Na oblasti 350–700 nm bylo provedeno 10 000 měření.

### 4.1 Sodíková výbojka Na 24 s tlumivkou



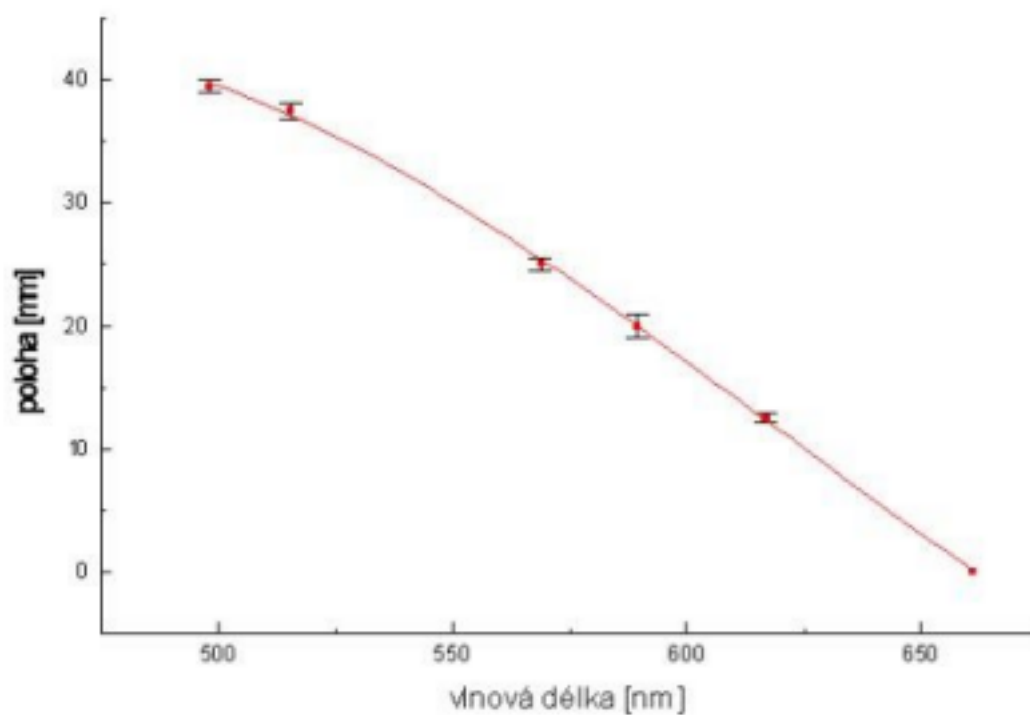
Obrázek 4.1: film FUJI 200, F=5,6; čas 6s

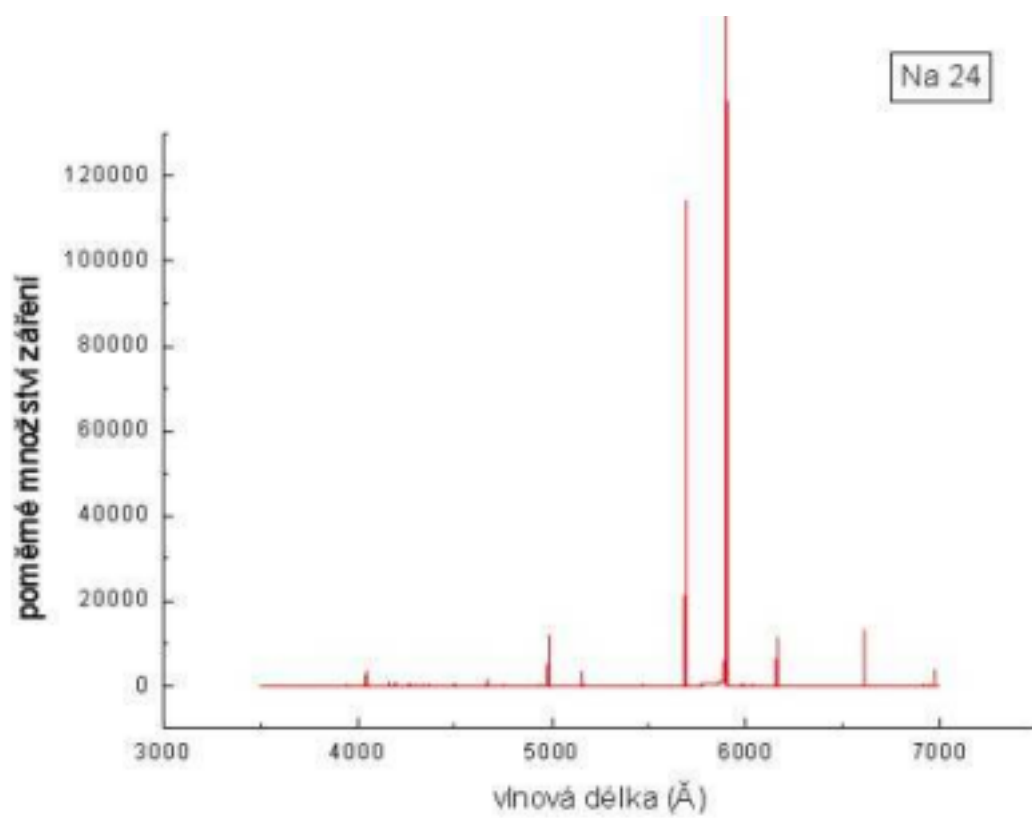
Foceno ve fyzikální laboratoři na PdF MU v Brně dne 1.11.1996. Úhlová velikost zdroje byla asi  $10'$ . Úhel dopadu  $\alpha = 50^\circ$ . Na snímku je spektrální maximum druhého řádu.

Vlnové délky jednotlivých spektrálních čar jsem odečetl z grafu získaného zpracováním hodnot naměřených pomocí monochromátoru Jobin-Yvone HR 640.

	x[nm]	y[mm]
1	661.0nm	0.0
2	616.9nm	12.5
3	589.6nm	20.0
4	568.9nm	25.0
5	515.7nm	37.5
6	498.2nm	39.5

Na 24







## 4.2 Rtutová výbojka HQE 40



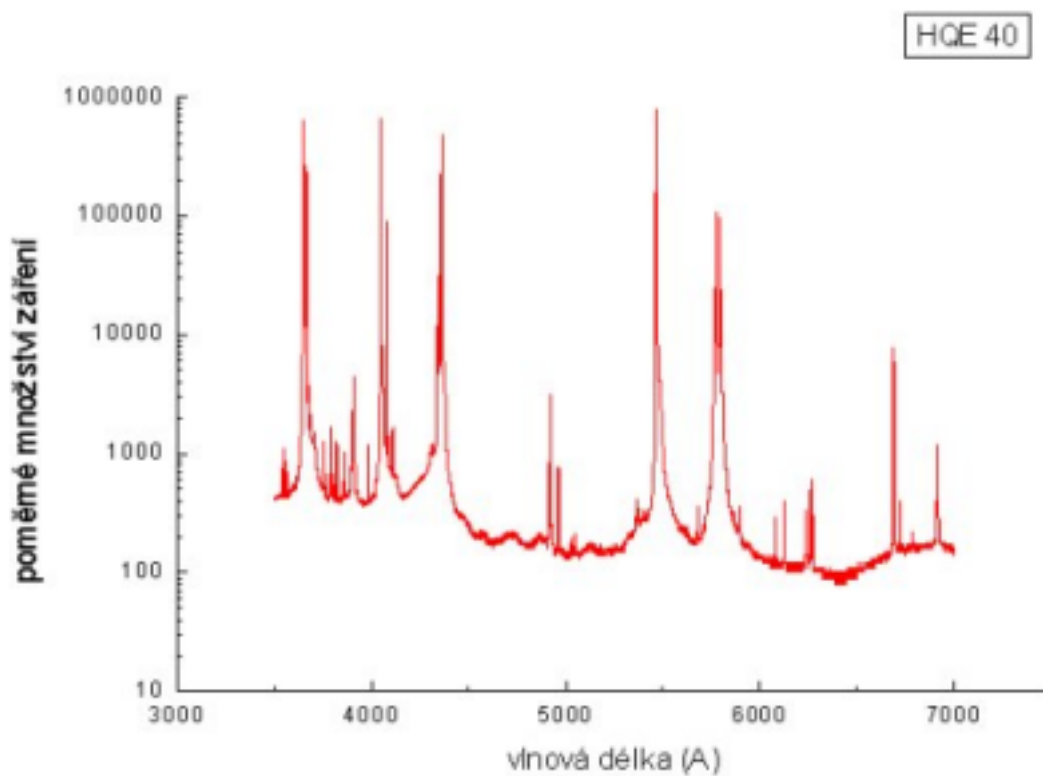
Obrázek 4.2: film FUJI 200, čas 4s; F 5,6

Foceno ve fyzikální laboratoři na PdF MU v Brně dne 1.11.1996. Úhlová velikost zdroje byla asi  $10'$ . Úhel dopadu  $\alpha = 50^\circ$ . Na snímku je spektrální maximum druhého řádu. Jsou na něm emisní čáry, jejichž vlnové délky jsou:

- 404.7nm ... fialová,
- 407.8nm ... fialová,
- 434.7nm ... modrá,
- (435.8nm ... modrá),
- 491.6nm ... modrozelená,
- (496.0nm ... modrozelená),
- 535.4nm ... zelená,
- 546.0nm ... zelená,
- 577.0nm ... žlutá,
- 579.1nm ... žlutá

... závorka znamená, že uvedená spektrální čára je na pokraji rozlišení.

Vlnové délky spektrálních čar jsem určil z údajů naměřených monochromátorem Jobin-Yvone HR 640, jež jsem vynesl do grafu.



## Kapitola 5

### Závěr

Tato diplomová práce je určena hlavně těm čtenářům (učitelům na všech stupních škol, žákům, studentům, zájemcům o fyziku, ...), kteří by rádi udělali první krok do "světa spekter".

Text jsem se snažil sestavit čtivě a věřím, že bude pro všechny čtenáře přínosem. Není však určen k pouhému jednorázovému přečtení. Čtenář – pokusník může postupovat tak, že se seznámí s teorií a poté začne sám spektra pozorovat dle návodů, které uvádím v následujících kapitolách. Tento způsob doporučuji těm, kteří již optiku studovali. Ostatní by mohli raději zvolit způsob opačný, a to zkusit nejdříve pozorovat spektra a pak své poznatky konfrontovat s teorií. To bych zvláště doporučil dětem na ZŠ, které by se tak (pod vedením svých učitelů fyziky) mohly nechat nadchnout barvami kolem nás.

Myslím, že kompaktní disk coby difrakční mřížku mohou používat učitelé na všech stupních škol a obohatit tak svou výuku.

# Literatura

- [1] BANÍK, I., BANÍK, R. : Meranie vlnovej dĺžky svetla pomocou CD platne. In.: Matematika–fyzika–informatika. 5 1995/96, str. 26
- [2] BELL, Alan : Next–Generation Compact Discs. In.: Scientific American, 7/1996, str. 28–31
- [3] CSERE, Elemír : Z dejín spektrálnej analýzy – 1. In.: Kozmos. XXI, (5/1990), str. 176
- [4] DUŠEK, Jiří; GABZDYL, Pavel; HOLLAN, Jan : Báječný svět hvězd. HaP M.K., Brno 1996. ISBN 80–85882–03–5
- [5] DUŠEK, Jiří : Jednoduchý spektroskop. In.: Kozmos. XXVI, (5/1995), str. 32
- [6] DUŠEK, Jiří : Pozorujeme hvězdné nebe bez dalekohledu. Knihovnička APO, únor 1993
- [7] FEYNMAN, LEIGHTON, SANDS : Feynmanove prednášky z fyziky/2. Alfa, Bratislava 1985
- [8] FUKA, Josef; HAVELKA, Bedřich : Optika a atomová fyzika, část I. optika. SPN, Praha 1961
- [9] GAVIN, Maurice : Simple solar spectroscopy. In.: Astronomy Now. 6/1995, str. 12
- [10] GUTH, V. a kol. : Astronomie I,II. ČSAV, Praha 1954
- [11] HABEL, Jiří a kol. : Světelná technika a osvětlování. FCC Public, Praha 1995
- [12] HORÁK, Zdeněk; KRUPKA, František : Fyzika. SNTL, Praha 1976
- [13] KLIMES, KRACÍK, ZENÍSEK : Základy fyziky II. Academia, Praha 1972
- [14] KUBĚNA, Josef : Fyzikální princip vidění barevných hologramů. In.: Matematika–fyzika–informatika. 6, (1996/97), č.1, str. 22 a č. 2, str. 85
- [15] KUBĚNA, Josef : Úvod do optiky. Pdf MU v Brně, sekce fyziky, 1994
- [16] MACHÁČEK, Martin : Encyklopedie fyziky. MF a Fond AV ČR pro vydávání vědecké literatury, Praha 1995, ISBN 80–204–0237–3

- [17] MEISSNER, Hansgeorg : Barevné knihy CD. In.: Elektronika 5/96, str. 4–6
- [18] MEISSNER, Hansgeorg : Pestré stránky dnešních CD. In.: Elektronika 4/96, str. 6–9
- [19] MILLER, M.: Poznámky vědeckého pracovníka ke středoškolské optice. In.: MFVS, 10 (1982/83), 690–693
- [20] MINNAERT, Marcel Gilles : Light and Color in the Outdoors. Springer-Verlag, New York, Inc., 1993. ISBN 0-387-94413-3
- [21] NAEDAU, Michael : Průvodce k CD-ROM. CCB s.r.o., Brno 1996
- [22] OHLMANN, Dieter : Eine Compact Disc als Versuchsgerät im Physikunterricht. In.: Neue Experimentiergeräte und Experimente. 43. Jahrgang, (Heft 2/43), 1.März 1994, str. 16
- [23] POKORNÝ, Zdeněk : Začínajícím hvězdářům. In.: Říše hvězd, 7-8/1993, ročník 74, 10–12
- [24] SINDELÁŘ, V., SMRZ, L. : Nová soustava jednotek. SPN, Praha 1968, 4., upravené vydání 1989
- [25] STRBA, Anton : Všeobecná fyzika 3 – optika. ALFA, Bratislava, SNTL Praha, 1979
- [26] VALOUCH, Miloslav : Logaritmické tabulky, tabulky konstant. ČSAV, Praha 1958