

Turnaj mladých fyziků, 36. ročník(2022/2023)

Barevná čára/Coloured Line

Gymnázium Christiana Dopplera, Gymnázium Cheb
Tým GCh(D+1)

22.12.2022

Obsah

1 Zadání	2
1.1 Originální znění v angličtině	2
1.2 Překlad zadání do češtiny	2
2 Úvod	2
3 Ustanovení terminologie	4
4 Teorie	4
4.1 Fenomenologický popis	4
4.2 Difrakce a stavba optických disků	5
4.3 Lom	6
4.3.1 Lom horní plochou	7
4.3.2 Hypotéza 1	7
4.3.3 Lom obvodovou stranou	8
4.3.4 Hypotéza 2	8
5 Praxe	9
5.1 Experiment 1 - konstruktivní interference při vstupu světla horní plochou	9
5.1.1 Aparatura a pomůcky	9
5.1.2 Provedení	10
5.1.3 Výsledky	11
5.2 Experiment 2 - vnitřní odraz při vstupu světla obvodovou stranou	12
5.2.1 Aparatura a pomůcky	12
5.2.2 Provedení	13
5.2.3 Výsledky	14
6 Další pozorované fenomény	14
7 Závěr	18
Reference	19

1 Zadání

1.1 Originální znění v angličtině

When a compact disc or DVD is illuminated with light coming from a filament lamp in such a way that only rays with large angles of incidence are selected, a clear green line can be observed. The colour varies upon slightly changing the angle of the disc. Explain and investigate this phenomenon.

1.2 Překlad zadání do češtiny

Když osvítíme kompaktní disk nebo DVD světlem z žárovky s wolframovým vláknem tak, že jsou vybrány pouze paprsky s velkým úhlem dopadu, můžeme pozorovat jasnou zelenou čáru. Její barva se mění s nepatrnými změnami úhlu náklonu disku. Vysvětlete a prozkoumejte tento jev.

2 Úvod



Obrázek 1: Ilustrační obrázek ukazující barevné jevy při posvícení na kompaktní disk. [3]



Obrázek 2: Ilustrační obrázek ukazující obdobné barevné jevy při posvícení na DVD. [4]

Duhové jevy objevující se na DVD a kompaktních discích jsou charakteristickou a jednoduše pozorovatelnou vlastností těchto často používaných datových médií.

V našem řešení identifikujeme hlavní fenomény vedoucí k těmto jevům a jejich zbarvení. Vytvoříme a experimentálně potvrďme modely pro nejdůležitější fenomény a zmíníme další druhotné fenomény.

3 Ustanovení terminologie

V níže uvedené tabulce 1 definujeme značení parametrů používaných v celém dokumentu.

Tabulka 1: Stanovené značení používaných parametrů s vysvětlením.

Typ parametru	Značka	Význam
bod	S	Střed disku
bod	L	Bodový zdroj světla
bod	O	Pozorovatel
bod	P	Pozorovaný bod
bod	A	Bod na obvodu disku umístěný kolmo pod úsečkou LS
bod	B	Bod na obvodu disku umístěný kolmo pod polopřímkou \overleftrightarrow{LS} ($A \neq B$)
vzdálenost	p	Tzv. <i>pitch</i> * disku
vzdálenost	h	Tloušťka polykarbonátové (PC) vrstvy disku
úhel	α	$\angle LPA$
úhel	β	$\angle OPB$

Poznámky:

* *pitch* = standardizovaná vzdálenost datových drah na optických discích

4 Teorie

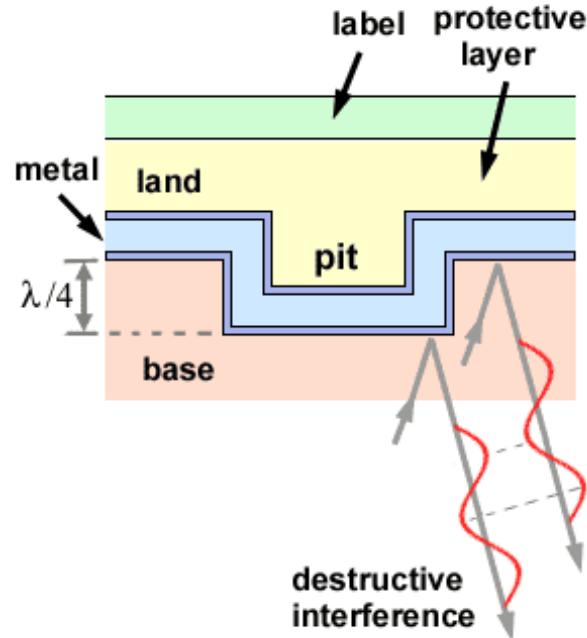
4.1 Fenomenologický popis

Předtím, než začneme, je nutné zmínit následující předpoklady pro následující modely:

1. Zdroj světla approximujeme jako bodový zdroj světla chovající se jako absolutně černé těleso.
2. Pro makroskopické účely zdroj světla vyzařuje radiálně do všech směrů z bodu L .
3. Pro makroskopické účely zanedbáme tloušťku h disku samotného, protože $|LP| \gg h$.
4. Pro mikroskopické účely approximujeme směr blízkých paprsků světla na paprsky rovnoběžné (quasiparalelní), protože $|LP| \gg p$.

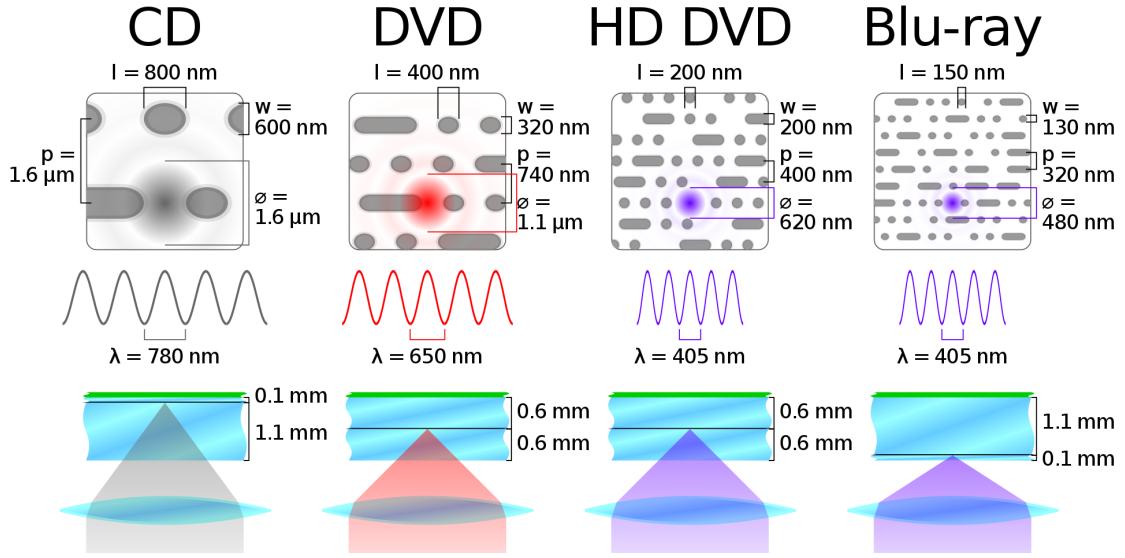
Světlo vycházející ze zdroje s diskem interaguje na dvou místech - při vstupu do PC vrstvy a při odrazu od hliníkové vrstvy s datovou stopou. Toto povede ke dvěma hlavním fenoménům, jmenovitě lomu a difrakci.

4.2 Difrakce a stavba optických disků



Obrázek 3: Diagram znázorňující průřez (ne v měřítku) optickým médiem společně s využitím destruktivní interference pro čtení datové dráhy. [5]

K difrakci na hliníkové vrstvě optických disků může docházet díky měnící se topologií vrstvy. Datová stopa je totiž složena z *pitů* a *landů*. Pit je oblast se vzdáleností od čtecího povrchu disku o $\lambda/4$ větší nežli land, kde λ reprezentuje vlnovou délku čtecího laseru v polykarbonátovém prostředí. Při přechodu z pitu na land tedy dochází k rozdílu uražené dráhy dvou blízkých rovnoběžných paprsků o $\lambda/2$, což způsobuje destruktivní interferenci (viz obrázek 3). Tato destruktivní interference je poté zaznamenána jako binární hodnota 1 [2].



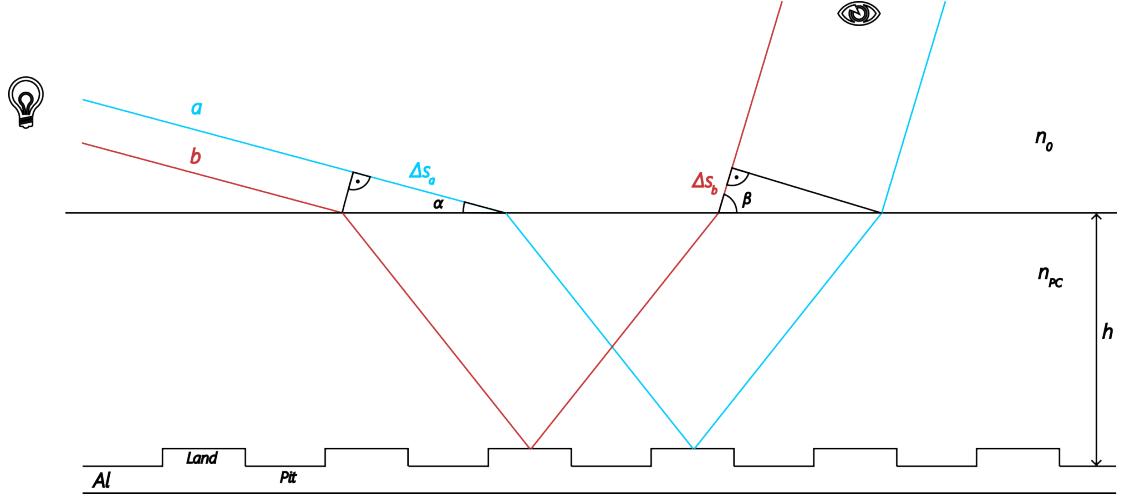
Obrázek 4: Diagram znázorňující rozdílnou stavbu jednotlivých datových médií.[6]

Podobnost vlnové délky viditelného světla (cca 380nm - 750nm) a pitche CD (cca 1600 nm) nebo DVD (cca 740 nm) společně s již zmíněnou topologií hliníkové vrstvy způsobuje další difrakční jevy podle Huygens-Fresnelova principu. Díky častému opakování těchto difrakčních ploch se celek hliníkové vrstvy chová také jako difrakční mřížka.

4.3 Lom

Světlo přicházející do PC vrstvy disku může vcházet čtecí stranou disku, kdy prochází celou tloušťkou této PC vrstvy, nebo může také vstoupit obvodovou stranou disku, která je 1.2mm vysoká (viz obrázek 4). Ty se na přechodu prostředí budou lámat podle Snellova zákona, kde index lomu polykarbonátu $n_{PC} \approx 1.585$ [1].

4.3.1 Lom horní plochou



Obrázek 5: Nákres mikroskopického náhledu na lom světla na rozhraní optických prostředí polykarbonátu a okolí. (ne v měřítku)

Uvážíme-li dva blízké paprsky a a b dopadající na horní (čtecí) plochu splňující předpoklad 4, které po průchodu PC vrstvou dopadají na landy (viz obrázek 5) a přicházejí z bodového zdroje světla ve fázi, bude u nich docházet k předbíhání jednoho paprsku před druhým, protože netráví ve stejných prostředích stejný čas. Bez újmy na obecnosti můžeme říci, že paprsek a dopadá na disk dále od zdroje světla. V tomto případě je dráhu, o kterou se paprsek opozdí při vstupu do prostředí, označíme Δs_a a analogický jev při výstupu paprsku b označíme Δs_b . Celkový rozdíl uražených drah je tedy:

$$\Delta s = \Delta s_a - \Delta s_b = p \cdot (\cos \alpha - \cos \beta) \quad (1)$$

Všimněme si, že úhel β může nabývat i hodnot $> 90^\circ$ a i tyto hodnoty nás zajímají (na rozdíl od úhlu α , kde nás zajímají hlavně malé velikosti tohoto úhlu). V případě, že by úhel β nabyl hodnot $> 90^\circ$, bude Δs_b nabývat hodnot záporných, což je ekvivalentní tomu, kdyby Δs_a bylo o $|\Delta s_b|$ zvětšeno, k čemuž podle našeho modelu má dojít. Díky tomuto je tento model stále logický.

4.3.2 Hypotéza 1

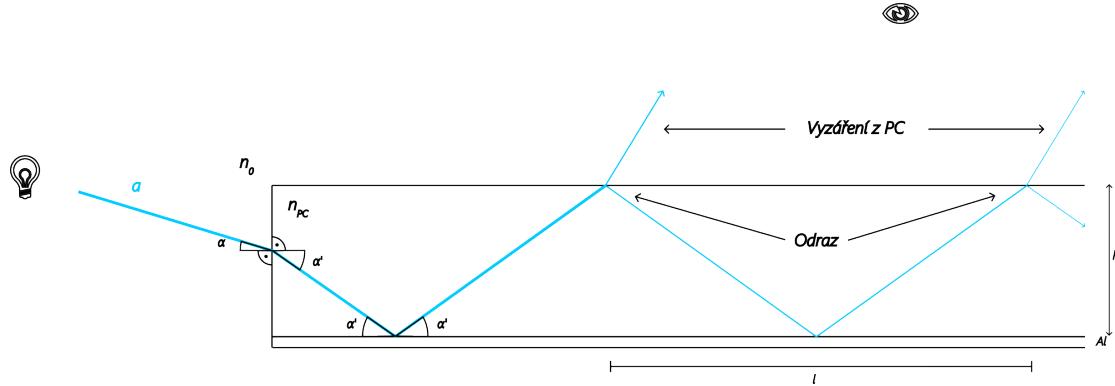
Naše hypotéza využívá konstruktivní interference a vychází z rovnice 1. Dle naší hypotézy dochází ke konstruktivní interferenci specifické vlnové délky světla λ , pokud se opoždění paprsků bude rovnat k -násobku λ . Jsme tedy schopni postavit rovnici, ze které v závislosti na konfiguraci parametrů můžeme určit konstruktivně interferovanou vlnovou délku světla. Rovnice zní:

$$k\lambda = p \cdot (\cos \alpha - \cos \beta) \quad k \in \mathbb{N} \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{p \cdot (\cos \alpha - \cos \beta)}{k} \quad (3)$$

Pokud empirické měření bude splňovat tuto podmínu, potvrďme tím tuto hypotézu (viz sekce 5.1). Zároveň také tento jev bude způsobovat destruktivní interferenci pro hodnoty $k = n + \frac{1}{2}$, kde $n \in \mathbb{N}$.

4.3.3 Lom obvodovou stranou



Obrázek 6: Nákres lomu světla vstupujícího na obvodové straně.

Uvážíme-li jiný případ, kdy máme paprsek dopadající na obvodovou stranu pod malým úhlem α , bude uvnitř polykarbonátové vrstvy docházet k opakovánímu odrazu, kde při každém odrazu dojde podle Fresnelových vztahů k vyzáření části energie z PC vrstvy ven.

4.3.4 Hypotéza 2

Druhá hypotéza zní následovně - Protože uvnitř polykarbonátové vrstvy dochází k opakovánímu odrazu, kde při každém odrazu dojde podle Fresnelových vztahů k vyzáření části energie ven, po použití Snellova zákona jsme tedy schopni vypočítat vzdálenost jednotlivých míst vyzáření l v závislosti na úhlu α takto:

$$\begin{aligned} \frac{\sin(\alpha')}{\sin(\alpha)} &= \frac{n_0}{n_{PC}} \\ \alpha' &= \arcsin \left(\sin(\alpha) \cdot \frac{n_0}{n_{PC}} \right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\alpha' = \frac{2h}{l} \quad (5)$$

$$l = \frac{2h}{\tan \left(\arcsin \left(\sin(\alpha) \cdot \frac{n_0}{n_{PC}} \right) \right)} \quad (6)$$

Rovnice 4 využívá Snellova zákona. Rovnice 5 vychází z geometrického nákresu na obrázku 6. Pokud empirické měření bude splňovat tuto podmíinku, potvrdíme tím tuto hypotézu (viz sekce 5.2).

5 Praxe

5.1 Experiment 1 - konstruktivní interference při vstupu světla horní plochou

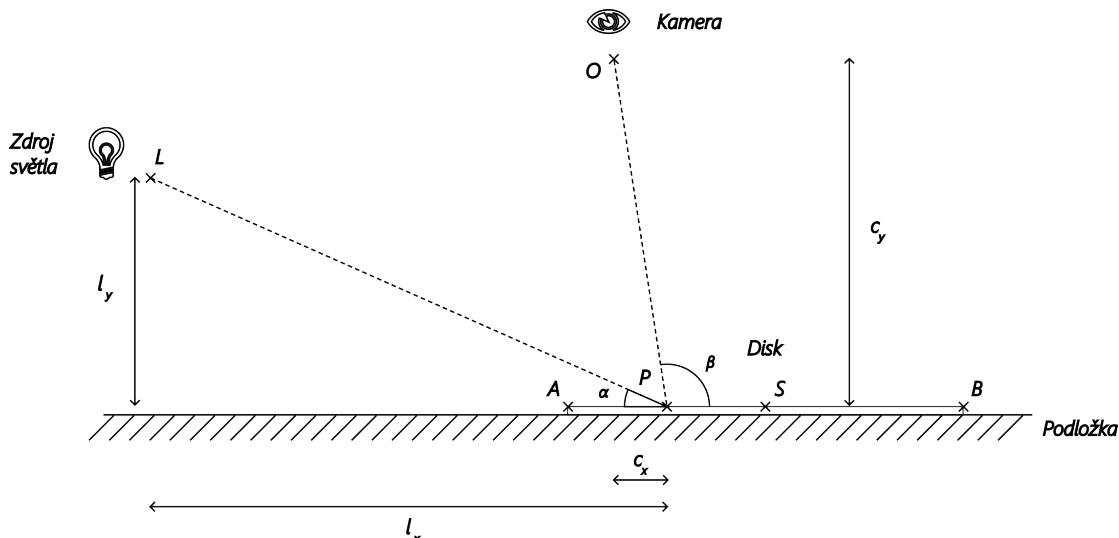
V prvním experimentu se budeme snažit sledovat a dokázat konstruktivní interferenci zmiňovanou v hypotéze 1 pomocí fotografického záznamu.

5.1.1 Aparatura a pomůcky

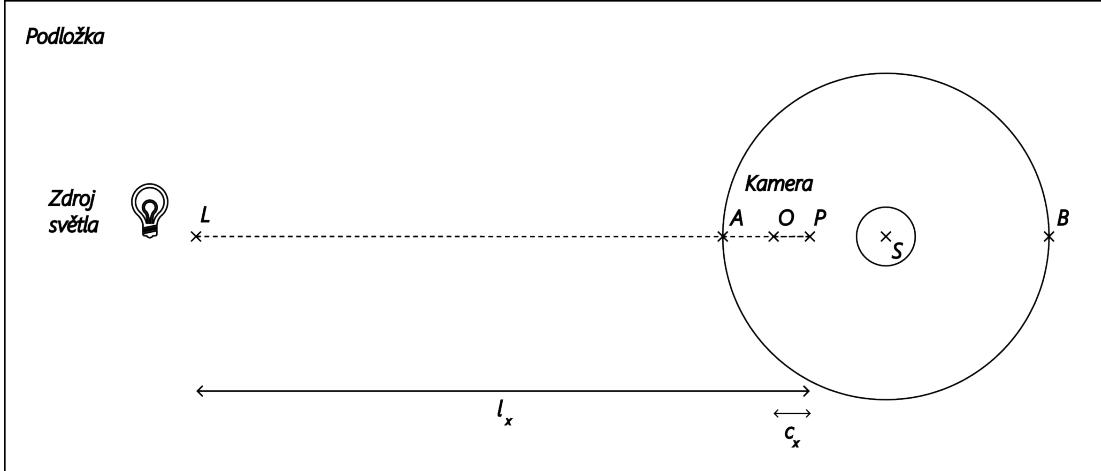
Mezi použité pomůcky patří:

1. DVD-R a CD-R disky
2. Digitální fotoaparát s dlouhou expozicí pro zachycení barev na disku
3. Zdroj světla ve formě lampy s wolframovým vlákнем
4. Posuvné měřítko pro určení rozměrů disků a relativních pozic objektů (rozlišení 0.1mm)

Nákresy aparatury dle stanoveného značení:



Obrázek 7: Nákres aparatury pro experiment 1 z profilu.



Obrázek 8: Nákres aparatury pro experiment 1 shora.

5.1.2 Provedení

Nejprve byly objekty rozmístěny a byl vybrán bod $P = A$ (pro jednoduchost). Byl použit DVD disk. Vzdálenosti jednotlivých objektů v měřící rovině byly následující:

$$\begin{aligned}
 l_x &= P_x - L_x = 70\text{cm} \\
 l_y &= P_y - L_y = 3\text{cm} \\
 c_x &= P_x - O_x = 77.5\text{cm} \\
 c_y &= P_y - O_y = -35\text{cm}
 \end{aligned} \tag{7}$$

V místnosti byla zhasnuta všechna světla kromě nášeho zdroje světla s wolframovým vláknem a fotoaparát byl nastaven na dlouhou expozici, aby byl schopen vytvořit kvalitní fotografii, i přestože je v místnosti značné šero.

Ze vzdáleností l_x, l_y, c_x a c_y dopočítáme úhly α a β .

$$\begin{aligned}
 \alpha &= \text{atan} \left(\frac{l_y}{l_x} \right) \\
 \alpha &= 2.45^\circ \\
 \beta &= \text{atan} \left(\frac{c_y}{c_x} \right) \\
 \beta &= 114.305^\circ
 \end{aligned} \tag{8}$$

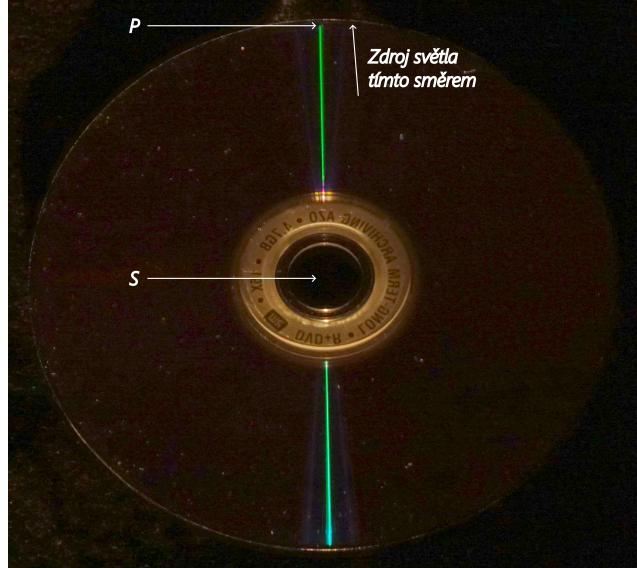
Finálně aplikujeme náš model z hypotézy 1 podle konstrukce DVD z obrázku 4.

$$\begin{aligned}
 k\lambda &= p \cdot (\cos \alpha - \cos \beta) \\
 k\lambda &= 740\text{nm} \cdot (\cos 2.45^\circ - \cos 114.305^\circ) \\
 k\lambda &= 1043.9\text{nm} \\
 \text{pro } k = 2 \\
 \lambda &= 521.95\text{nm}
 \end{aligned} \tag{9}$$

Dle modelu očekáváme tedy světlo s vlnovou délkou kolem 521.95 nm.

5.1.3 Výsledky

Barva našeho bodu P by tedy měla být zelená, jelikož vlnová délka zelené barvy se pohybuje v rozhraní cca 495–570 nm. Toto se potvrzuje i z fotografie pořízené při měření níže (viz obrázek 8):



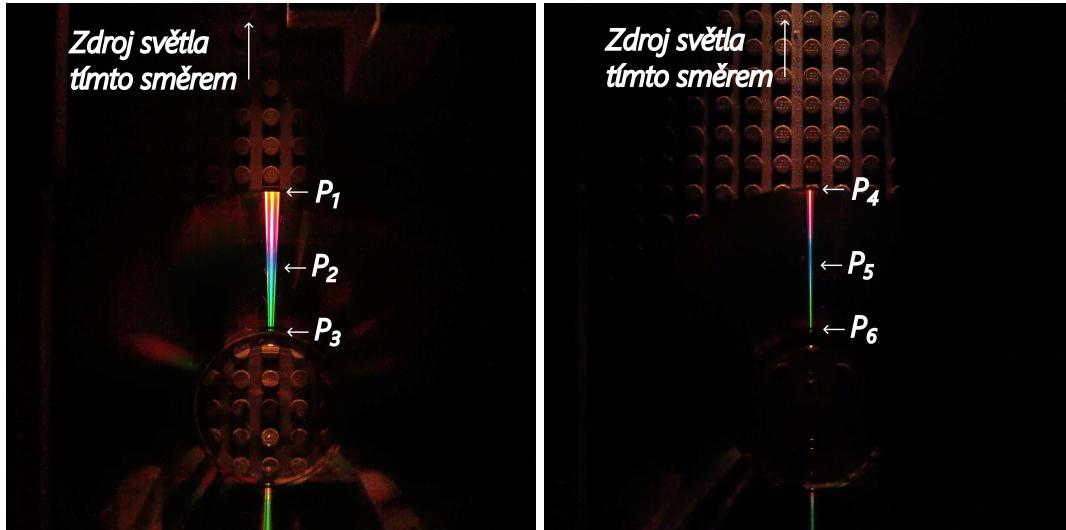
Obrázek 8: Fotografie z experimentu 1 s DVD s popiskami.

Další obdobné experimenty s kompaktním diskem byly provedeny a jejich výsledky jsou uvedeny níže (viz tabulka 2, obrázky 9 a 10) (pro každý platí, že $l_y = 23.2\text{mm}$ a $c_y = 143.2\text{mm}$):

Tabulka 2: Tabulka měření experimentu 1 pro CD.

Bod	l_x [mm]	c_x [mm]	k	α	β	λ [nm]	Teoretická barva	Sledovaná barva
P_1	127.63	30	2	10.3°	78.2°	623	Oranžová	Světle oranžová
P_2	147.63	10	3	8.93°	86.0°	490	Tyrkysová	Tyrkysová
P_3	167.63	-10	3	7.88°	94.0°	565	Zelená	Zelená
P_4	247.25	30	2	5.36°	78.2°	632	Oranžová	Oranžová
P_5	167.25	10	3	4.96°	86.0°	494	Tyrkysová	Tyrkysová
P_6	187.25	-10	3	4.62°	94.0°	569	Žluto-zelená	Zelená

Fotografie z experimentu 1 pro CD:



Obrázky 9 a 10: Fotografie z experimentu 1 s CD s popisky.

Jak je z měření zřejmé, tyto barevné artefakty opravdu odpovídají teoretickému modelu z hypotézy 1. Kvalitnějších výsledků jsme dosáhli při větší vzdálenosti zdroje světla od disku, ale měření z větší blízkosti dosahuje poměrně uspokojivých výsledků.

Pro situace, kdy máme malý úhel α a velkou vzdálenost pozorovatele od disku se může tedy podle našeho modelu celá čára jevit zelená, jelikož rozdílná pozice bodu P nebo bodu O má pouze malý efekt na úhel β . Přiblžením bodu O k disku se začnou objevovat i další barvy.

5.2 Experiment 2 - vnitřní odraz při vstupu světla obvodovou stranou

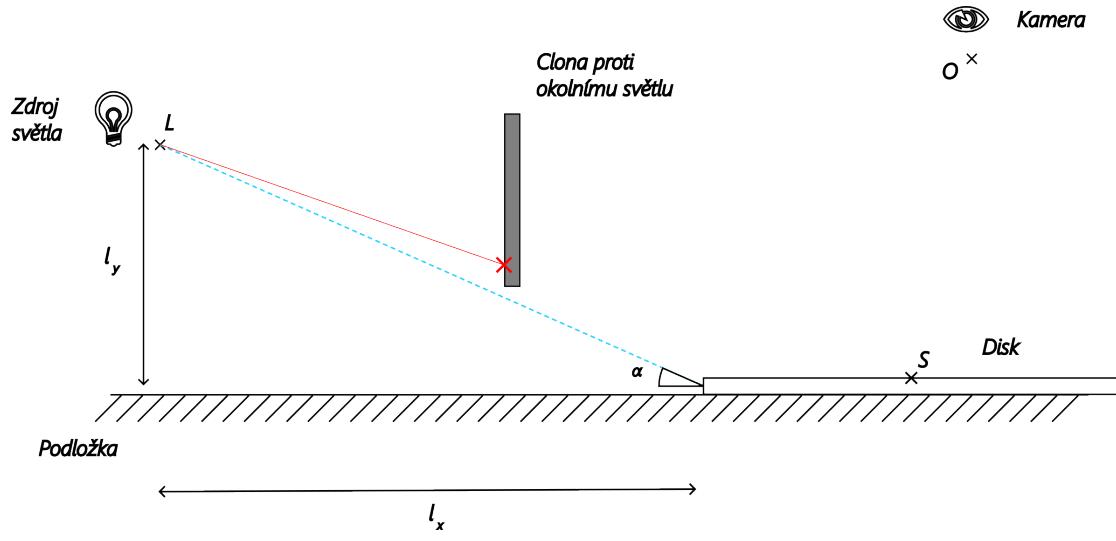
V druhém experimentu se budeme snažit sledovat opakující se odrazy v PC vrstvě DVD disku podle modelu z hypotézy 2. Jelikož se nejedná o interferenční jev, použijeme libovolný zdroj světla.

5.2.1 Aparatura a pomůcky

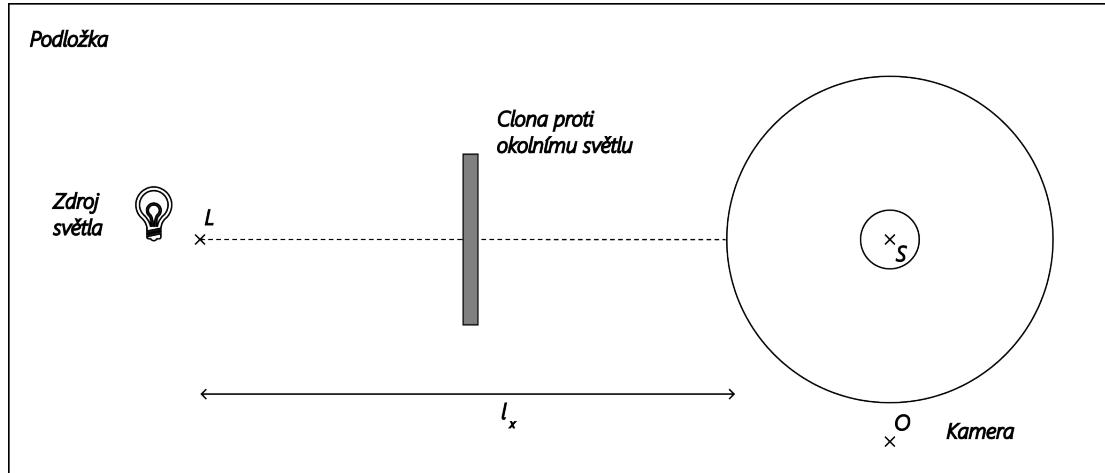
Mezi použité pomůcky patří:

1. DVD-R disk
2. Fotoaparát mobilního telefonu
3. Zdroj světla ve formě svítílny mobilního fotoaparátu
4. Posuvné měřítko pro určení rozměrů disků a relativních pozic objektů (rozlišení 0.1mm)
5. Clonu ve formě plastové kostky pro odstínění okolního světla
6. Tmavá látka pro podložení disku

Nákresy aparatury dle stanoveného značení:



Obrázek 11: Nákres aparatury pro experiment 2 z profilu.



Obrázek 12: Nákres aparatury pro experiment 2 shora.

5.2.2 Provedení

Disk byl položen na tmavou látku a byla připravena clona, která bude co nejlépe bránit radiálním paprskům svítily mobilního telefonu v zasahování horní plochy DVD disku, aby byla zlepšena viditelnost jevu. Do vyměřené pozice byla umístněna svítilna a pomocí posuvného měřítka byla vyměřena průměrná vzdálenost míst vyzáření z PC. Jev může být pozorován z libovolné pozice bodu *O*. Jev byl sledován ve dvou různých konfiguracích.

5.2.3 Výsledky

V níže uvedené tabulce jsou určeny parametry systému a porovnání teoretické a měřené hodnoty l použitím vzorce z rovnice 6 pro $n_{PC} = 1.585$ [1] a $n_0 = 1$ (přibližná hodnota pro vzduch):

Tabulka 3: Tabulka měření experimentu 2 společně s odchylkou.

	l_x [cm]	l_y [cm]	α	Teoretické l [mm]	Měřené l [mm]	δ
1	18	6.5	19.86°	5.47	5.3	4.58%
2	14.2	12.5	41.36°	2.62	2.67	1.87%

A fotografie z experimentu 2:



Obrázky 13 a 14: Fotografie z experimentu 2. Měření 1 vlevo, měření 2 vpravo.

Jasné opakující se bílé čáry potvrzují hypotézu 2. Dále se dá také sledovat, že oddálením zdroje světla dojde k zostření bílých čar, což dle našeho modelu vychází z toho, že paprsky světla budou quasiparalelnější, pokud budou přicházet z větší vzdálenosti.

Jednou z příčin odchylek mohla být například nerovnost boční strany DVD disku, která mohla zapříčinovat rozdílnost úhlu α , protože při měření se předpokládalo, že boční strana bude kolmá na rovinu podložky, což nemusí být pravda.

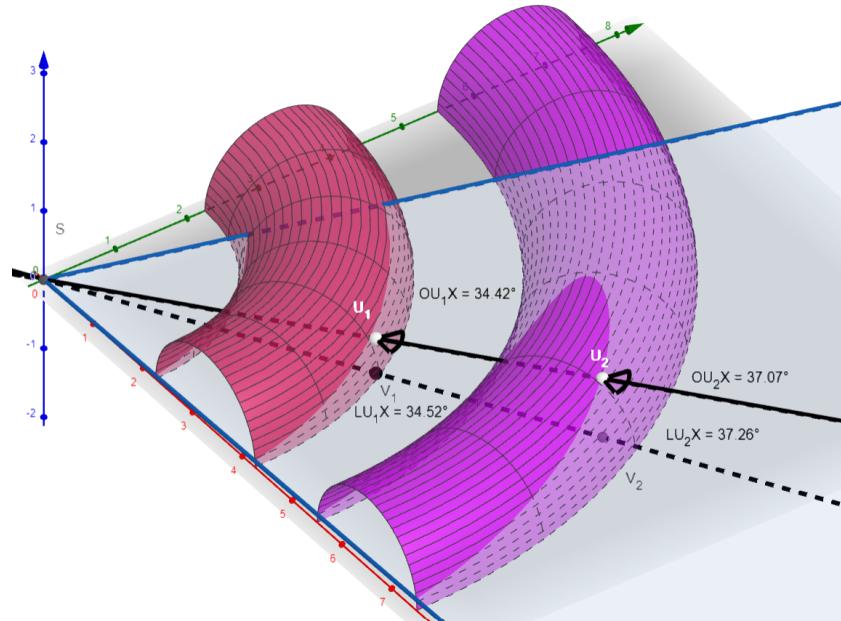
6 Další pozorované fenomény

Jedním z dalších pozorovaných fenoménů je změna úhlu mezi barvenou čárou, která se objevuje díky hypotéze 1, a úsečkou AB . V experimentu 1 je celá měřící aparatura vložena do jedné roviny, čímž byl problém redukován do 2D. Pokud ale bod O vyjmeme z této roviny, dojde ke změně úhlu $\angle ASP$.

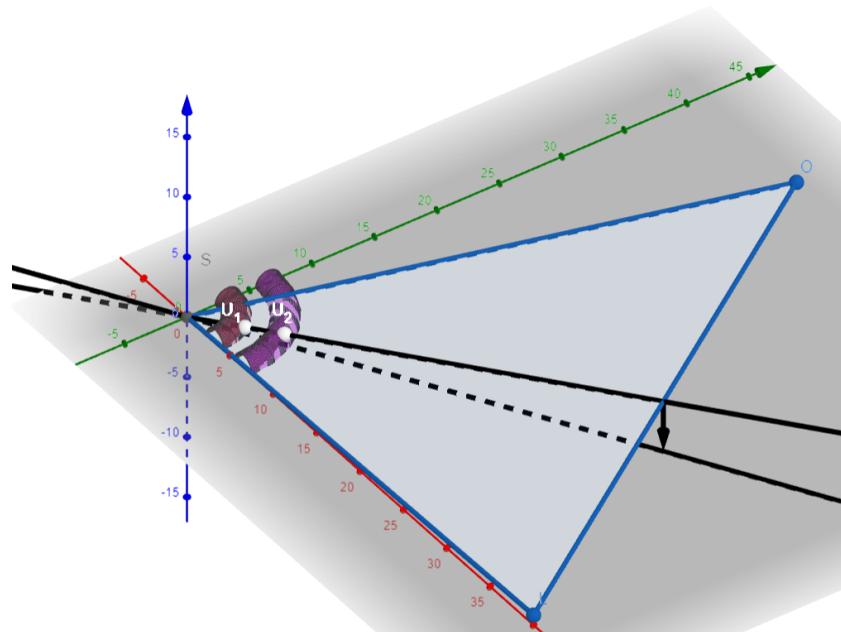
Dle naší hypotézy bude k tomuto jevu docházet díky tomu, že jednotlivé datové trasy budou mít přibližný tvar koncentrických polotorů. Doopravdy se bude jednat o jednu dlouhou zaoblenou spirálu, ale v malé oblasti toto dělá zanedbatelný rozdíl.

Na povrchu těchto drah dochází k odrazu světla a následně také ke konstruktivní interferenci, jak bylo popsáno v sekci 4.3.1. Světlo putující v rovině LSO se může odražet od jednotlivých torů. Označíme-li si bod odrazu viděného paprsku jako U a střed úsečky LO jako X (který leží na ose úhlu $\angle LSO$, což je zřejmé), musí platit, že úhel dopadu a úhel odrazu bude stejný. Budeme-li počítat všechny paprsky jako quasiparalelní, protože $|LS| \gg p$, můžeme říci, že bod U bude ležet na průniku osy úhlu $\angle LSO$ a daného toru. Pokud tuto proceduru zopakujeme

pro každý torus, budou všechny body odrazu ležet na jedné přímce, která odpovídá průnětu osy úhlu $\angle LSO$ do podložky. Přibližný 3D nákres na následujících obrázcích 15 a 16:



Obrázek 15: Detailní náhled na 3D aproksimaci interakcí paprsků v tory.



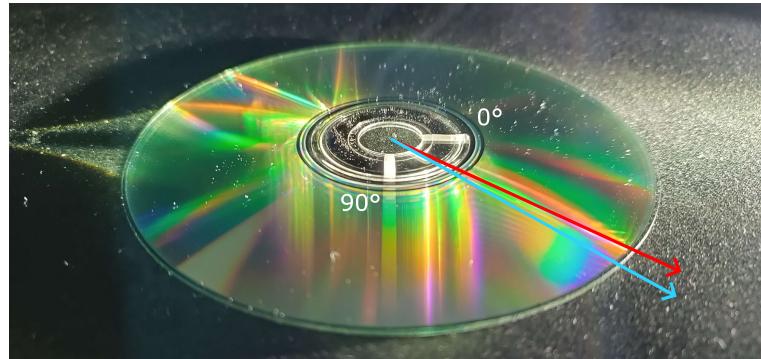
Obrázek 16: Vzdálený náhled na 3D aproksimaci interakcí paprsků s tory.

Body U_1 a U_2 jsou body, ve kterých se paprsky putující touto rovinou odrážejí. Je vidět, že $\angle OU_1X \approx \angle LU_1X$ a $\angle OU_2X \approx \angle LU_2X$. To, že nejsou přesně rovny vychází z toho, že v přibližném 3D modelu se body O a L nachází značně blíže, než v realitě. Toto je provedeno čistě za účelem zpraktičnění a zjednodušení tvorby 3D modelu.

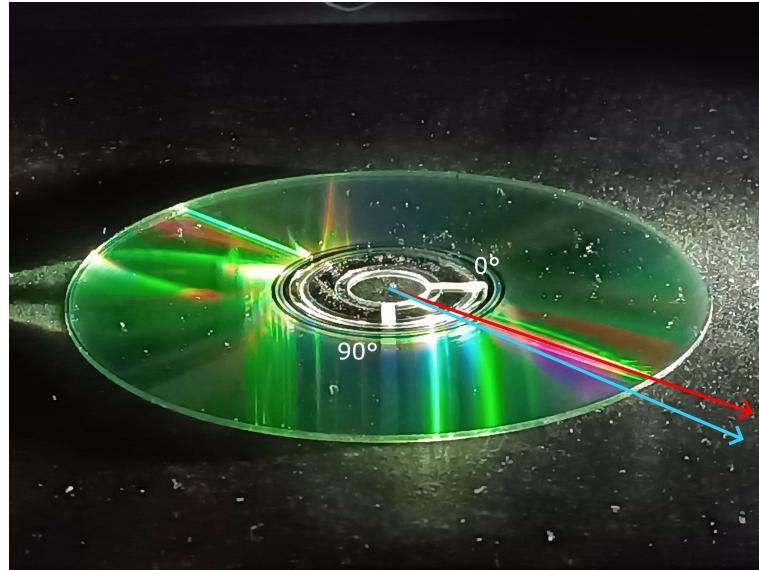
V modelu je menší poloměr r torů roven jedné arbitrární jednotce a body O a L jsou ve vzdálenosti cca 40 arbitrárních jednotek od středu S . Pokud bychom chtěli v modelu reprezentovat pozice podle reálného měřítka, museli bychom bod L , který by byl ve vzdálenosti např. 70cm od středu S , umístit do vzdálenosti $\frac{70\text{cm}}{160\text{nm}} = 4375000$ arbitrárních jednotek pro DVD a $\frac{70\text{cm}}{300\text{nm}} = 2333333$ arbitrárních jednotek pro CD v modelu, což jsme se rozhodli čistě z nepraktičnosti věci nedělat. Pokud bychom toto uděli, vedlo by to na ještě lepší výsledky, protože bychom zvýšili quasiparalelnost paprsků. Body U_1 a U_2 jsou poté zobrazeny na body V_1 a V_2 kolmo do roviny podložky.



Obrázek 17: Fotografie disku kolmo shora se zdrojem světla ve velké vzdálenosti (po pravé straně). Body S, L a O tvoří rovinu kolmou k podložce jako v experimentu 1. Bílé značky označují velikosti úhlů 0° , 45° a 90° vůči AB .



Obrázek 18: Fotografie disku z boku se zdrojem světla ve velké vzdálenosti a s bodem O pod malým úhlem ve střední vzdálenosti. Body S, L a O tvoří rovinu nekolmou k podložce. Čára vyznačena červeně. Úhel 45° stupňů vyznačen modře.



Obrázek 19: Fotografie disku z boku se zdrojem světla ve velké vzdálenosti a s bodem O pod velmi malým úhlem ve velké vzdálenosti (fotografie přiblížena). Čára vyznačena červeně. Úhel 45° stupňů vyznačen modře.

Jak vidíme na obrázku 17, čára je viditelná jak bychom předpokládali, když jsou body S, L, O v rovině kolmé na podložku, stejně jako v experimentu 1. Při naklonění do strany, tedy změnění úhlu mezi rovinou podložky a přímkou $\overset{\longleftrightarrow}{OS}$, dochází k odklonění čáry (viz obrázek 18), jak bychom předpokládali a při ještě menším úhlu se čára limitně blíží úhlu 45° (viz obrázek 19), protože úhel $\angle LSO$ je v tomto případě 90° . Toto odpovídá našemu geometrickému modelu. (Poznámka: ostatní barevné artefakty vychází z okolního světla, které nebylo odstíněno a nejsou pro nás zajímavé.)

Čára se zároveň steným principem ukazuje i na opačné straně, bodově symetricky podle bodu S.

Z těchto poznatků a díky potvrzení naší hypotézy jsme tedy schopni utvořit geometrickou závislost úhlu $\angle LSP$ (dále γ) na úhlu $\angle LSO$ (dále θ) a úhlu mezi podložkou a přímkou $\overset{\longleftrightarrow}{OS}$ (dále ϕ):

$$\gamma = \frac{1}{2} \theta \cdot \cos \phi \quad (10)$$

Zároveň, pokud přiblížíme zdroj světla velmi blízko k disku, můžeme sledovat, že se čára začne zakrývat (viz obrázek 20 níže), protože začneme znatelně porušovat quasiparalelnost jednotlivých paprsků světla, což náš model vyžaduje.



Obrázek 20: Fotografie disku ze strany se zdrojem světla velmi blízko. Čára vyznačena červeně.

7 Závěr

V průběhu této práce se nám povedlo vysvětlit původ barevných jevů, které vznikají na povrchu optických disků, jmenovitě CD a DVD disků. Zjistili jsme, že se jedná o více různorodých jevů založených hlavně na konstruktivní interferenci a opakovaném odrazu, kde každý z nich produkuje jinak vypadající světelný jev.

Podařilo se nám teoreticky modelovat 3 různé jevy, které jsme úspěšně experimentálně potvrdili za některých základních předpokladů. Podařilo se nám také sledovat jiné chování v případech, kdy tyto předpoklady nebyly dodrženy.

Možným budoucím rozšířením této práce by dle nás mělo být obecnější vysvětlení již zmíněných jevů, což by v důsledku dovolilo popsat větší množství jevů. Dále by také stály za zkoumání další, ještě námi nepopsané, jevy.

Reference

- [1] N. Sultanova, S. Kasarova and I. Nikolov. Dispersion properties of optical polymers, Acta Physica Polonica A 116, 585-587 (2009) (fit of the experimental data with the Sellmeier dispersion formula: Mikhail Polyanskiy), zobrazeno 20.12.2022, <https://refractiveindex.info/?shelf=organic&book=polycarbonate&page=Sultanova>
- [2] Giesbert Nijhuis, zobrazeno 20.12.2022, http://www.laeseworks.com/digicom/Storage_CD.html
- [3] Jon Abe, 10.9.2014, photo1.png, zobrazeno 20.12.2022, <https://joabe808.wordpress.com/2014/09/10/optics-cd-rainbow-reflection/>
- [4] Trisha, 25.4.2012, DVD-Rainbow.jpg, zobrazeno 20.12.2022, <https://inspirationlaboratories.com/how-to-make-a-rainbow/dvd-rainbow/>
- [5] Chris Mueller, 26.6.2015, wOhON.gif, zobrazeno 20.12.2022, <https://engineering.stackexchange.com/questions/3324/why-is-it-more-reliable-to-use-the-land-pit-transition-in-a-cd-rom>
- [6] Cmglee, 6.6.2021, File:Comparison_CD_DVD_HDDVD_BD.svg, zobrazeno 20.12.2022, https://en.wikipedia.org/wiki/Comparison_of_high-definition_optical_disc_formats