

Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích

Přírodovědecká fakulta

**Historický vývoj názoru na povahu světla a současné
využití laserů při pokusech na SŠ**

Bakalářská práce

Ondřej Diviš

Školitel: Mgr. Václav Šebelík Ph.D.

Konzultantka: Mgr. Ivana Šímová

České Budějovice 2023

Diviš, O., 2023: Historický vývoj názoru na povahu světla a současné využití laserů při pokusech na SŠ. [Historical development of the view of the nature of light and current use of lasers in high schools. Bc. Thesis, in Czech] – 53 p., Faculty of Science, University of South Bohemia, České Budějovice, Czech Republic

Anotace

Teoretická část této bakalářské práce poskytuje stručný náhled do historie o tom, jak se od starověku v průběhu let vyvíjely pohledy a názory na povahu světla až dodnes. Dále je v praktické části vysvětleno a provedeno pět pokusů s laserovým ukazovátkem, proveditelných na středních školách napříč různými tématy fyziky. Jedná se o pokusy: Měření tloušťky lidského vlasu, ohyb paprsku v solném roztoku, tekoucí proud vody jako optické vlákno, mikroskop z laseru (droposcope) a zobrazení vibrací pomocí laseru. Kromě uceleného popisu samotných experimentů je diskutován i jejich pedagogický přínos.

Annotation

The theoretical part of the bachelor thesis provides a brief insight into the historical development of opinions related to the nature of the light since ancient times until nowadays. In the practical part of the thesis, five high school experiments with laser pointer are described and realized, demonstrating several phenomena across physics. The experiments are: Measuring the width of human hair, beam diffraction in salt solution, stream of water as an optical fiber, laser microscope (droposcope) and displaying vibrations with laser. The comprehensive description as well as the pedagogical benefit of each experiment is discussed.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem autorem této kvalifikační práce a že jsem ji vypracoval pouze s použitím pramenů a literatury uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Českých Budějovicích dne

.....

Ondřej Diviš

Poděkování:

Na tomto místě bych chtěl poděkovat svému školiteli Václavu Šebelíkovi za pomoc při výběru pokusů a za rady při zpracovávání práce. Dále bych chtěl poděkovat Ivaně Šimové za její dozor a pomoc při přípravování a měření jednotlivých pokusů a Milanu Durchanovi za propůjčení laserového ukazovátka.

Obsah

1 Úvod.....	1
2 Historický přehled.....	3
2.1 Starověk a středověk.....	3
2.2 Novověk.....	4
2.2.1 Vynález teleskopu	4
2.2.2 Je rychlost světla konečná?.....	5
2.2.3 Částice nebo vlna?.....	7
2.2.4 Youngův experiment.....	9
2.2.5 Poissonův bod	10
2.2.6 Magnetismus.....	11
2.2.7 Elektromagnetické spektrum	12
2.3 Optika 20. století	13
2.3.1 Éter a ultrafialová katastrofa.....	14
2.3.2 První kvantová teorie	15
2.3.3 Einsteinova kvantová teorie.....	16
2.3.4 Světlo z pohledu kvantové fyziky	17
2.3.5 Co je tedy světlo?	19
2.4 Laser	19
2.4.1 Princip laseru	20
2.4.2 Vlastnosti laserového světla	21
3 Experimenty s laserem	22
3.1 Práce s laserem	22
3.1.1 Klasifikace laserů.....	22
3.1.2 Bezpečnost práce.....	23
3.2 Měření tloušťky lidského vlasu.....	24
3.3 Ohyb paprsku v solném roztoku.....	28
3.4 Tekoucí proud vody jako optické vlákno.....	32
3.5 Mikroskop z laseru (<i>droposcope</i>).....	36
3.6 Zobrazení vibrací pomocí laseru	41
4 Závěr	46
5 Literatura	47
6 Internetové zdroje	49
Seznam obrázků.....	50
Seznam tabulek.....	53

1 Úvod

Co je to světlo? Od filozofů starověku, přes významné fyziky historie, až po vědce dnešní doby se nikomu nepodařilo najít jednoduchou odpověď. Pro existenci života na Zemi je světlo naprosto esenciální. Jeho důležitost si lidé uvědomovali už od nepaměti. V některých civilizacích bylo světlo dokonce uctíváno jako posvátné. Křesťané berou světlo jako něco, co stvořil sám Bůh. Aristotelovo významné dílo *Metafyzika* podle (LEAR, 2016, s. 13) začíná slovy: *„Všichni lidé od přirozenosti touží po poznání. Známkou toho je slast, kterou nám poskytují naše smysly. Neboť kromě jejich užitečnosti je milujeme pro ně samy; a ze všeho nejvíc milujeme zrak.“* (ŠTOLL, 2009)

Každý tedy věděl, jak moc je pro nás světlo důležité. Nikdo ale pořád nevěděl, co to vlastně je. První definice světla vznikaly kolem roku 500 př. n. l. Od té doby se názor na jeho povahu vyvíjel. Díky stále novějším poznatkům se v průběhu let teorie o světle zdokonalovala, až se dostala do stavu, ve kterém ji známe dnes. Ani dnes ale na otázku co je světlo neumíme odpovědět jednoduše a jednoznačně (HAGLUND, 2007).

Věda nahlíží na původ světla dvěma způsoby. První pohled je částicová (korpuskulární) teorie. Tento pohled je v souladu s Newtonovou klasickou mechanikou a interpretuje světlo jako proud drobných částic, které tělesa vyzařují a které se na objektech odrážejí jako dokonale pružné kuličky. Druhý pohled je vlnová teorie, která světlo popisuje jako vlnu, což koresponduje s některými experimenty, které jsou popsány v druhé části této práce, např. difrakce nebo interference. Právě rozepře mezi těmito dvěma fundamentálními teoriemi vedla k zavedení pojmu vlnově-částicový dualismus. Tento termín byl vytvořen speciálně kvůli unikátní vlastnosti světla, kdy se při některých experimentech chová jako vlna a při jiných jako částice (ŠTOLL, 2009).

Vývoj v oblasti optiky vedl nejen k přesnějšímu popisu světla, ale také ke vzniku moderních zařízení jako je např. laser. Lasery jsou v moderním světě nenahraditelnou technologií a jejich jedinečné vlastnosti jsou využívány napříč mnoha obory. V lékařství je laser nedílnou součástí velkého množství chirurgických zákroků a své využití má i v komunikaci, elektronice, průmyslu, vědě nebo energetice (HECHT, 2010).

Cíle této práce jsou:

- (i) Poskytnout stručný přehled o tom, jak se v průběhu historie vyvíjel názor na povahu světla a objasnit, co vedlo fyziky zabývající se touto otázkou k jejich závěrům.
- (ii) Zaměřit se na pokusy s laserem, které jsou proveditelné s běžnými pomůckami na středních školách. Následně tyto pokusy popsat a zhodnotit jejich parametry jako např. náročnost nebo přínos pro studenty.

2 Historický přehled

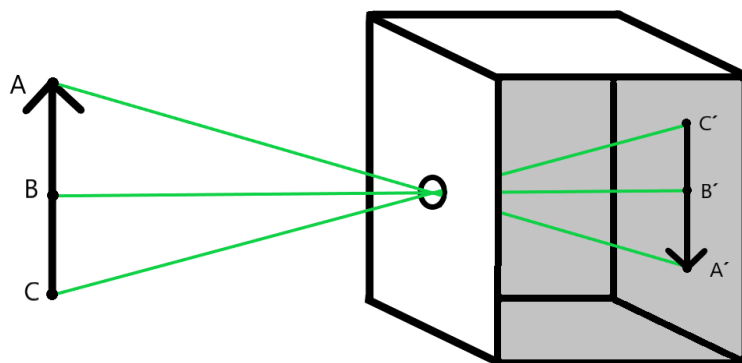
2.1 Starověk a středověk

První dochované teorie o světle vznikaly v období starověku. Hérakleitos (535–465 př. n. l.) vyslovil domněnku, že celý svět (i světlo) je tvořen tzv. nikdy neuhasínajícím ohněm, který se pravidelně vzněcuje a zhasíná. Tak podle něho vznikalo světlo a tma. Blíže skutečnosti byl svou teorií Pythagoras ze Samu (582–500 př. n. l.). Jeho teorie by se dala považovat za první částicovou teorii. Předpokládal, že objekty, které vidíme, vyzařují proud malých částíček, které neustále dopadají na naše oči (WILLIAMS, 1999).

Platón s Euklidem předpokládali, že světlo se skládá z paprsků, které se chovají jako jakási tykadla, šířící se prostředím z očí k objektům, které vidíme. Schopnost vidět tedy podle nich umožňoval hmat těchto tykadel, když přišla do kontaktu s předmětem. Platónův student Aristoteles později přišel s teorií, že světlo se šíří způsobem, který připomíná vlny (ZUBAIRY, 2016).

Koncept toho, že se světlo šíří směrem od oka k objektu, zůstal až do období středověku nenapadnut. Byl to až Ḥasan Ibn al-Haytham (také známý jako Alhazen), kdo tuto teorii vyvrátil. Alhazen (945–1040) byl arabský vědec, který se věnoval studiu optiky, lidského oka a také odrazu a lomu světla. V roce 1038 publikoval knihu – *Velká optika*. Jeho experimenty vedly k sestrojení prvního prototypu zařízení tzv. *camera obscura* (WILLIAMS, 1999).

Camera obscura (z lat. temná komora) je optické zařízení, které bylo používáno jako pomocný nástroj při malování a kresbě. Jeho konstrukce je jednoduchá, jedná se o dutý kvádrový objekt s malou dírou ve stěně. Rozměry kvádrů mohou být v jednotkách centimetrů až po velikost celé místnosti. Aby však zařízení fungovalo správně, otvor ve stěně musí být vždy mnohonásobně menší než rozměry daného kvádrů. Skrz tento otvor prochází světelné paprsky, které se uvnitř tmavých prostor promítají na stěnu (Obr. 1). Celé zařízení tedy pracuje na podobném principu jako lidské oko. Otvor ve stěně funguje jako zornice a obraz se promítá na stěnu, která funguje jako sítnice (LEFÈVRE, 2007).



Obr. 1: Schéma zařízení *camera obscura* (zdroj: vlastní zpracování).

Obraz uvnitř zařízení byl důkazem, že světlo nevnímáme pomocí paprsků vycházejících z očí, ale naopak vede k závěru, že světlo se šíří od objektů k pozorovateli.

Další osobností, která v tomto období přispěla optickými vynálezy byl Roger Bacon (1214–1294). Ten díky své práci v oblasti čoček a jejich zobrazovacích schopností vynalezl brýle. Ačkoliv existují dochované důkazy, že se čočky k zobrazování psaného textu používaly již dříve, kredit za vynález brýlí, jak je známe dnes, patří právě Baconovi (LEFÈVRE, 2007).

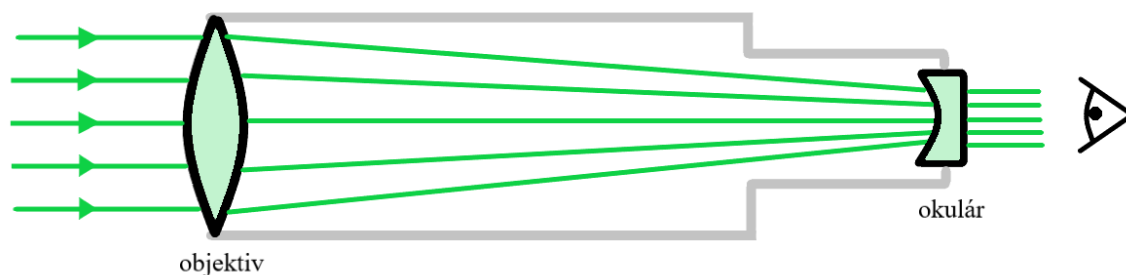
2.2 Novověk

Na přelomu 15. a 16. století začalo v Evropě období novověku. Do evropských zemí přišel nový životní styl zvaný renesance a společnost vstupuje do tzv. vědecké revoluce. Během tohoto období došlo ke změně pohledu člověka na společnost, na přírodu, a hlavně došlo k obrození vědy. K obrození přispěli zejména tzv. renesanční umělci, kteří společně znovuobjevili dlouho zanedbávané obory vědy a utvořili tak silný základ pro jejich budoucí rozvoj. Za renesančního umělce byl považován člověk, který měl znalosti z mnoha oborů, mluvil několika jazyky a měl obecně široký rozhled. Díky vynálezu knihtisku v polovině 15. století se všechny vědecké objevy a poznatky té doby mohly snadněji šířit a uchovávat (KRAUS, 2007).

2.2.1 Vynález teleskopu

V roce 1608 učinil nizozemský brusič skla Hans Lippershey stěžejní objev na poli optiky a astronomie – teleskop. První sestavený teleskop byl jednoduchým zařízením. Tvořila ho soustava čoček, která dokázala zvětšit pozorovaný objekt až třikrát. Jednalo se o konkávní okulár s konvexní čočkou objektivu (KING & JONES, 1979).

V roce 1609 se Galileo Galilei dozvěděl o práci Hanse Lippersheye a na jejím základě se rozhodl sestavit svůj vlastní teleskop (Obr. 2). Několika vylepšeními původního zařízení byl schopen pozorovat objekty až s dvacetinásobným zvětšením. Toto zvětšení bylo již dostatečné na pozorování kráterů a pohoří na Měsíci. Pomocí svého teleskopu také objevil Saturnovy prstence, sluneční skvrny a čtyři Jupiterovy měsíce: (podle něj nazvané Galileovy měsíce) Europu, Ganymed, Callisto a Io (KING & JONES, 1979).



Obr. 2: Schéma Galileova dalekohledu (zdroj: vlastní zpracování).

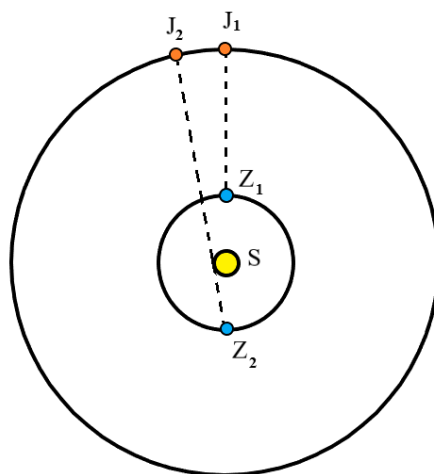
2.2.2 Je rychlost světla konečná?

Světlo se šíří velmi rychle. Tak rychle, že si někteří fyzikové v novověku mysleli, že je jeho rychlost nekonečná. V 17. století bylo provedeno několik experimentů, jejichž cílem bylo zjistit rychlost šíření světla (LAUGINIE, 2004).

První měření proběhlo tzv. metodou dvou lamp, kterou navrhl a zprostředkoval Galileo Galilei v roce 1638. Dvě lampy byly postaveny na dva kopce daleko od sebe, tak aby světlo každé z nich bylo možné stále vidět i na druhém kopci. Cílem experimentu bylo změřit čas, za který světlo urazí vzdálenost od jednoho kopce k druhému, za pomoci zakrývání a odkrývání těchto lamp. Z času a vzdálenosti pak plánoval Galileo spočítat rychlost. Nevěděl ale, že skutečná rychlost světla je tak velká, že čas, za jaký světlo tuto vzdálenost urazí, je v porovnání s reakční dobou člověka na druhém kopci zanedbatelný. Z tohoto důvodu byl tento experiment zatížen obrovskou chybou a jeho výsledky nebyly relevantní (LAUGINIE, 2004).

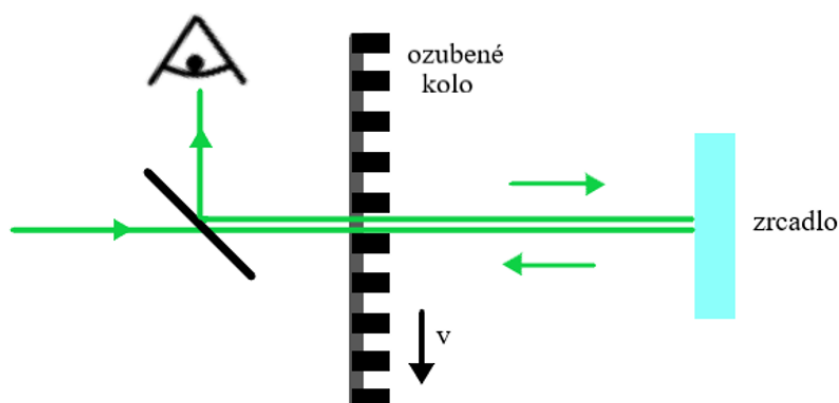
Při dalším pokusu o stanovení rychlosti světla bylo využito teleskopu. Při sledování Jupiterových měsíců si dánský astronom Ole Roemer v roce 1676 všiml, že k zatmění měsíce Io dochází v jiný čas, než předpokládal. Zjistil, že když se Země nacházela v pozici Z_1 (Obr. 3), došlo k zatmění o 10 minut dříve. Za přibližně půl roku, kdy se Země nacházela v pozici Z_2 , provedl měření znovu. K zatmění měsíce Io v tomto případě došlo o 10 minut

později. Uvědomil si, že pokud se nezměnily oběžné doby žádného z těles, muselo být zpoždění zapříčiněno konečnou rychlostí světla. Po několika výpočtech došel k závěru, že rychlost světla je $210\,824 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Fakt, že hodnota rychlosti vyšla nepřesně, nebyl tak důležitý jako zjištění, že světlo má konečnou rychlost (SPENCE, 2020).



Obr. 3: Rozdíl vzdáleností Země – Jupiter z pokusu Oleho Roemera (zdroj: vlastní zpracování).

Přesnější měření provedl Hippolyte Fizeau v roce 1849 (skoro o dvě stě let později) a to pomocí metody ozubeného kola. Jednalo se o vertikálně postavené kolo (Obr. 4), které mezerou mezi zuby propouštělo světlo. Toto světlo se odrazilo od vzdáleného zrcadla zpět. Cílem bylo nastavit rotační rychlost kola v tak, aby se odražený paprsek nedostal zpět přes zub, který díky rotaci kola zaujme pozici mezery. Z rozměrů zubů a vzdálenosti kola od zrcadla vypočítal Fizeau rychlost $315\,000 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, tedy jen o 5 % vyšší hodnotu, než je ta skutečná (SPENCE, 2020). Přesná hodnota rychlosti světla byla stanovena J. C. Maxwellem (kapitola 2.2.6) (FOWLER, 1995).



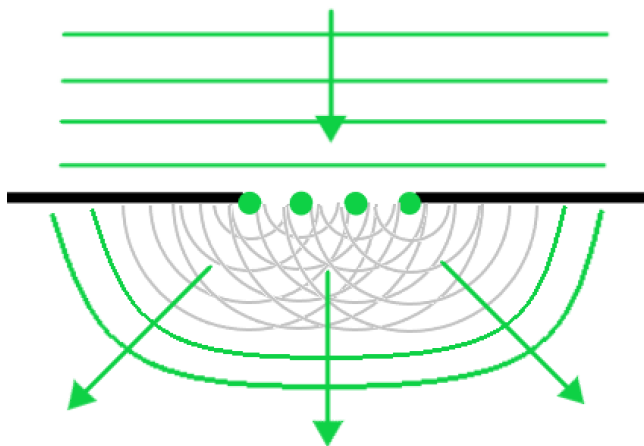
Obr. 4: Schéma metody ozubeného kola (zdroj: vlastní zpracování).

2.2.3 Částice nebo vlna?

V průběhu druhé poloviny 17. století byly formovány dvě nové teorie popisující povahu světla. Částicová teorie světla Isaaca Newtona (1643–1727) a vlnová teorie, jejímž zastáncem byl Christiaan Huygens (1629–1695) (HAGLUND, 2007).

Tehdejší vlnová teorie předpokládala, že světlo je mechanická vlna, která se šíří průsvitným médiem (éterem), které toto kmitání přenáší do našeho oka. Éter byl vědci představován jako hypotetická substance, která vyplňuje celý vesmír. Společně s Huygensem teorii podporovali např. Robert Hooke nebo Thomas Hobbes. Prvním důkazem validity této teorie se stalo pozorování difrakce (ohybu). Tento jev poprvé pozoroval italský profesor Francesco Grimaldi v roce 1658. Grimaldi nechal procházet sluneční světlo malým otvorem ve stěně a za otvorem pozoroval místo rovného paprsku světelný kužel. Došlo mu tak, že se paprsek u otvoru musí ohýbat (HAGLUND, 2007).

Huygens tvrdil, že se světlo šíří podélným vlněním. Konečnou rychlost světla odůvodňoval elastickými srážkami vln světla se sférami, které tvoří éter. Zformuloval také po něm pojmenovaný Huygensův – Fresnelův princip (Obr. 5), který říká, že v jakémkoliv okamžiku lze na každý bod v čele vlny pohlížet jako na nový zdroj vlnění (ZUBAIRY, 2016).



Obr. 5: Huygensův – Fresnelův princip. Šedé vlny ukazují, jak by se vlnění šířilo ze čtyř znázorněných bodů. Zelené vlny ukazují, jak se skutečně šíří. Na obrázku lze vidět, že si tyto případy navzájem odpovídají (zdroj: vlastní zpracování).

Proti vlnové teorii stála teorie částicová. V této době také vznikaly první teorie o existenci atomů a myšlenka, že se hmota skládá z malých dále nedělitelných částic, se Newtonovi, nejznámějšímu zastánci částicové teorie, jevila jako zajímavá. Tak zajímavá, že

se světlem to dle jeho názoru mělo být stejné. Podle Newtona bylo světlo proud atomárních částic, které nazýval korpuskule (BROOKS, 2011).

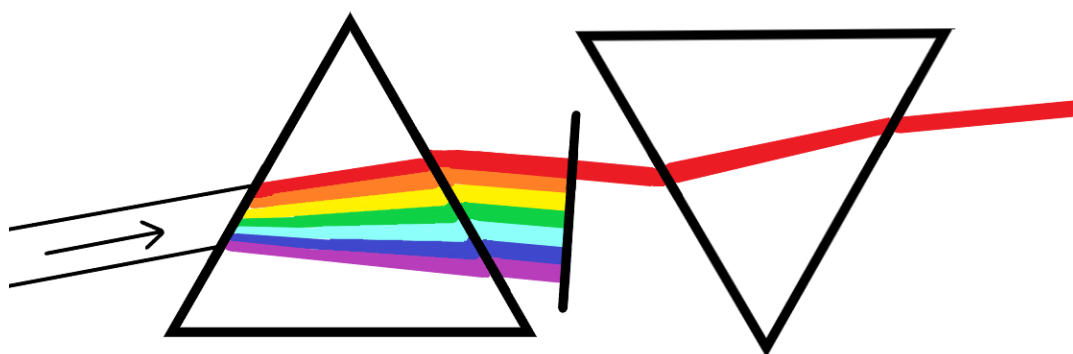
Každá teorie vysvětlovala známé jevy (např. odraz a lom světla) různými způsoby. Odraz vysvětloval Newton jednoduchou analogií ze života: míč se odrazí pod stejným úhlem pod kterým dopadl, a stejně tak se dokonale elasticky odráží korpuskule světla. U lomu paprsků světla ovšem Newton nesprávně uvažoval, že po vstupu světla do hustší látky světelné paprsky zrychlovaly v důsledku větší gravitační síly v médiu (ZUBAIRY, 2016).

Huygensova teorie lomu tvrdila, že rychlost světla v jakékoliv látce je nepřímo úměrná indexu lomu této látky. Jinými slovy tvrdil, že čím více se světlo na rozhraní dvou látek vychýlí od původního směru působení, tím pomaleji se v druhé látce bude pohybovat. Z faktu, že se světlo šíří v opticky hustších látkách pomaleji a z přímocarosti šíření světla vyšel v roce 1662 francouzský matematik Pierre de Fermat. Ten vyslovil tvrzení (dnes nazývané Fermatův princip), že světelné paprsky se šíří mezi dvěma body po takové dráze, aby ji urazily za co nejkratší dobu (HAGLUND, 2007).

Newton přispěl do vývoje optiky také teorií toho, odkud pochází barvy. Doposud si lidé mysleli, že barva je daná vlastnost objektů. Newton ve své publikaci *Optika* v roce 1702 ukázal, že tomu tak není. Pomocí refrakce na skleněném hranolu rozložil bílé světlo na jeho barevné složky a vzápětí je druhým hranolem opět složil zpět na světlo bílé (Obr. 6). Když hranolem vedl pouze jedné barvy, z hranolu vystoupilo světlo té samé barvy (Obr. 7). To byl důkaz toho, že světlo přímo neodkrývá barvy našeho světa, ale že předměty kolem nás odráží světlo určitých parametrů ve větším množství než jiné. Ačkoliv se jedná o správný závěr, Newton si mylně myslel, že barva světla závisí na velikosti jednotlivých korpuskulí (KRAUS, 2007).



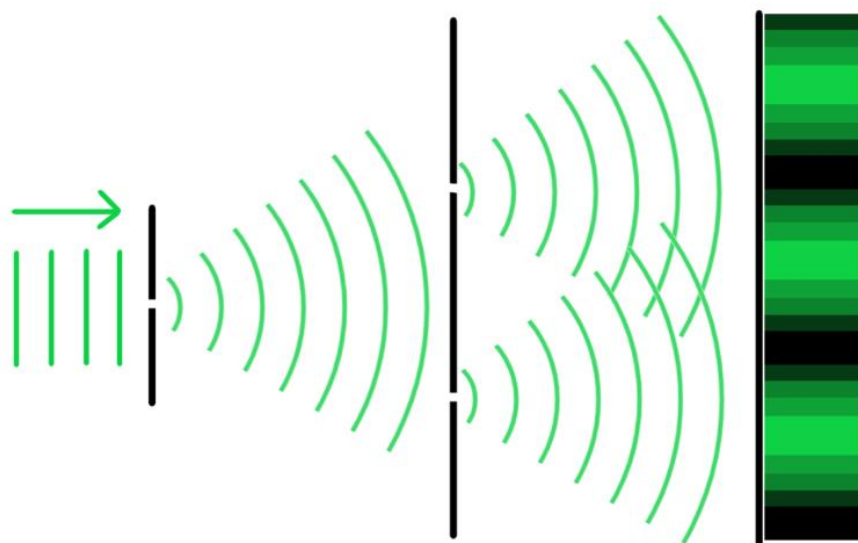
Obr. 6: Disperze bílého světla na hranolu a následné složení barevných složek (zdroj: vlastní zpracování).



Obr. 7: Disperze bílého světla na hranolu a následný lom červené složky světla (zdroj: vlastní zpracování).

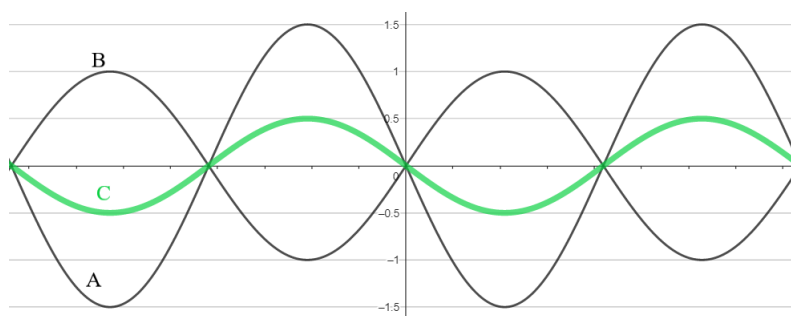
2.2.4 Youngův experiment

Korpuskulární a vlnová teorie proti sobě stály už celé století. Newton, především díky své autoritě, dokázal přesvědčit většinu tehdejších vědců a jeho teorie byla celou dobu obecně přijímána jako ta správná. V roce 1801 přišel na scénu Thomas Young (1773–1829) a se svým experimentem Newtonovu korpuskulární teorii výrazně zpochybnil. Při pokusu dnes známém jako *Youngův experiment* (nebo také *dvojštěrbinový experiment*) demonstroval chování světelného paprsku dopadajícího na dva blízké malé otvory. Na stínítku za otvory pozoroval neobvyklý vzor tmavých a světlých pruhů. Při zakrytí jednoho ze dvou otvorů došlo k přeorganizování vzoru. Zakrytím jednoho otvoru bylo tedy ovlivněno chování světla, které procházelo prvním otvorem. Toto chování nelze vysvětlit pomocí korpuskulární teorie, neboť takto se chová vlna (ŠTOLL, 2009).

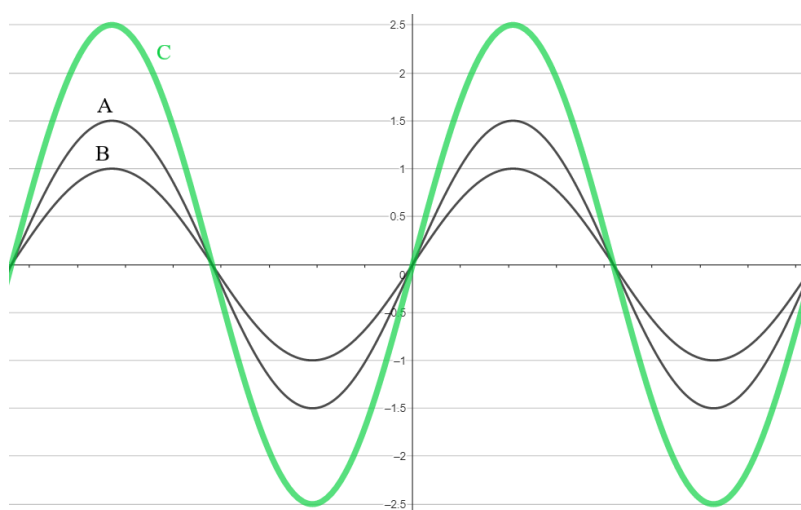


Obr. 8: Schéma Youngova experimentu se dvěma štěrbinami (zdroj: vlastní zpracování).

Obrazce na stínítku (Obr. 8) byly důsledkem tzv. interference vln. Interference vln je jev, který nastává, střetnou-li se dvě (nebo více) vln v jenom bodě, kde se následně spolu skládají. Pokud se střetnou vlny o stejné frekvenci a jedna s druhou je ve fázi, nastává tzv. konstruktivní interference (Obr. 10). Pokud se tyto vlny liší o půl fáze, dochází k destruktivní interferenci (Obr. 9) (HECHT, 2017).



Obr. 9: Destruktivní interference vln A, B a výsledná vlna C (zdroj: vlastní zpracování).

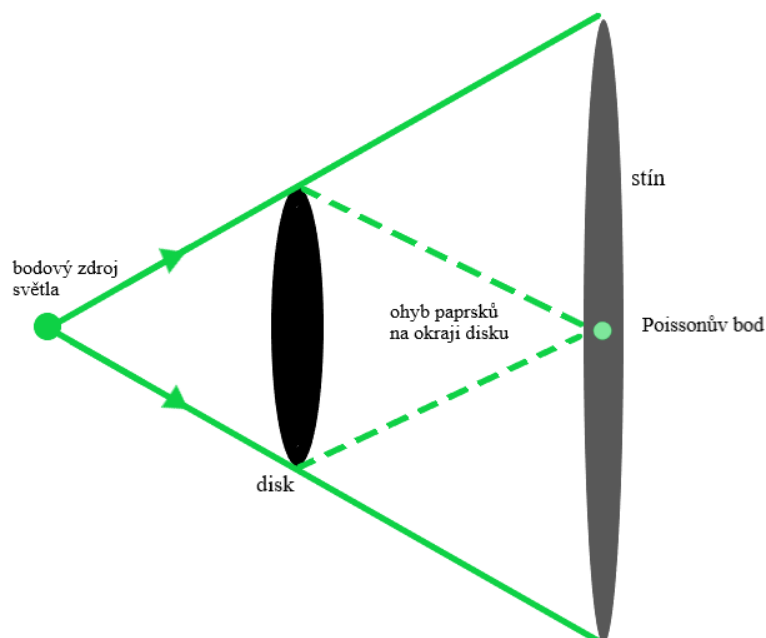


Obr. 10: Konstruktivní interference vln A, B a výsledná vlna C (zdroj: vlastní zpracování).

2.2.5 Poissonův bod

Augustin-Jean Fresnel (1788–1827) v roce 1819 prezentoval svoji práci o vlnové teorii a difrakci světla francouzské akademii věd. Ačkoliv existovalo mnoho důkazů, které rozporovaly Newtonovou teorií korpuskulí, díky Newtonově autoritě měla jeho teorie mezi členy výboru stále své podporovatele. Jedním z nich byl i Simeon-Denis Poisson. Ten se po nastudování Fresnelových vlnových teorií snažil přijít na to, jak je vyvrátit. Nakonec došel k závěru, že podle vlnové teorie by se při posvícení na neprůhledný kruhový disk měl uprostřed jeho stínu nacházet světlý bod. Tato představa světlého bodu uprostřed stínu se zdála

být směšná. Komise dala Fresnelovi za úkol Poissonovy výpočty ověřit. Pokus (Obr. 11) provedl francouzský vědec François Arago, který světlý bod uprostřed stínu disku našel. Ten později dostal jméno Poissonův bod (někdy také Fresnelův nebo Aragův). Vlnová teorie začala být ve světě vědy konečně akceptována jako ta správná i díky výsledku tohoto experimentu (HAGLUND, 2007).



Obr. 11: Schéma pokusu hledání Poissonova bodu (zdroj: vlastní zpracování).

2.2.6 Magnetismus

V polovině 19. století objevil anglický vědec Michael Faraday (1791–1867) spojitost mezi elektrickým a magnetickým polem. Objevil zákon elektromagnetické indukce a ukázal, že v uzavřeném obvodu vzniká elektrické napětí je-li vložen do nestacionárního magnetického pole, tj. pole, jehož intenzita se mění v čase (ZUBAIRY, 2016).

V roce 1865 učinil skotský fyzik James Clerk Maxwell (1831–1879) jeden z největších objevů na poli elektřiny a magnetismu. Vytvořil sjednocenou teorii elektromagnetismu a popsal ji čtyřmi vztahy, dnes známými jako Maxwellovy rovnice. Jedna z těchto rovnic vyjadřuje Ampérův zákon, který říká, že elektrický proud a změna elektrického toku vytvářejí magnetické pole, což je matematicky zapsáno v integrálním tvaru jako rovnice 2.1.

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{s} = \mu_0 I + \mu_0 \epsilon_0 \frac{d\phi_E}{dt} \quad (2.1)$$

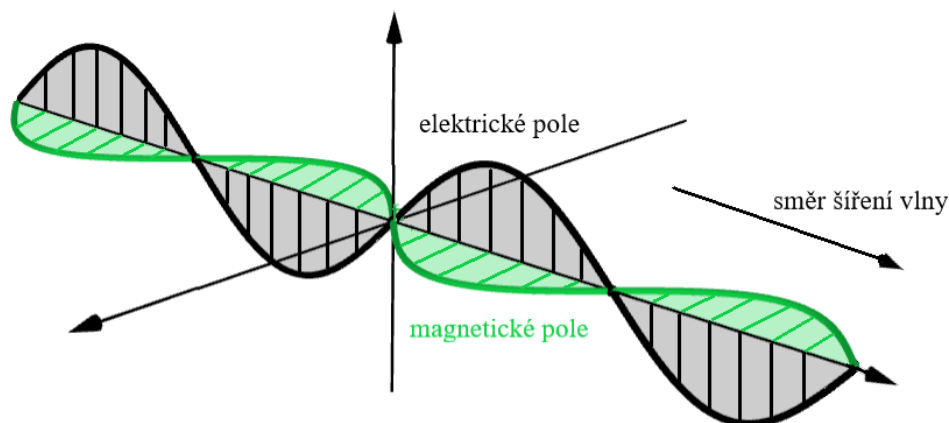
kde s je plocha, ϕ_E je elektrický indukční tok, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N} \cdot \text{A}^{-2}$ je permeabilita vakua, $\epsilon_0 = 8,854 \cdot 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$ je permitivita vakua, B je magnetická indukce a I je elektrický proud.

Ze vztahu (2.1) Maxwell odvodil rychlost šířící se elektromagnetické vlny, kterou zjednodušil na vztah

$$v = \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \epsilon_0}} \quad (2.2)$$

Po dosazení do vztahu (2.2) vyšla hodnota šíření této vlny $3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$. Tak vypočítal Maxwell rychlost světla na základě stanovení sil mezi elektrickými proudy v drátech a sil mezi elektrostatickými náboji. Tento objev vedl tedy k uvědomění, že světlo je elektromagnetická vlna (FOWLER, 1995).

Maxwell tudíž popsal světlo jako elektromagnetické záření složené z oscilujících složek elektrického a magnetického pole. Tyto složky oscilují kolmo na sebe a zároveň kolmo ke směru šíření (Obr. 12) (HALLIDAY ET AL., 2013).



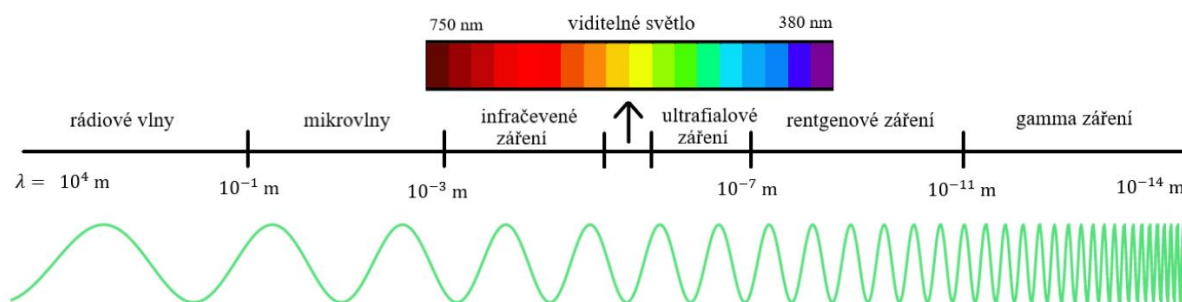
Obr. 12: Kmitání složek elektrického a magnetického pole světla (zdroj: vlastní zpracování).

2.2.7 Elektromagnetické spektrum

Jakmile Maxwell představil svůj koncept světla jako elektromagnetické vlny, byli vědci schopni vytvořit kompletní funkční model světla pomocí vlnové délky, frekvence vlnění a na základě struktury a chování vln (HALLIDAY ET AL., 2013).

Maxwell předpověděl, že kromě světla, které vidíme, existují i elektromagnetická záření o jiných vlnových délkách. Kromě viditelného světla byla doposud známá pouze existence ultrafialového záření, které objevil roku 1801 Johann Wilhelm Ritter, a existence infračerveného záření, které objevil v roce 1800 William Herschel, když naměřil v rozloženém barevném spektru v oblasti za červenou barvou vyšší teplotu (NASA, 2013).

V roce 1887 německý fyzik Heinrich Hertz laboratorně dokázal existenci radiových vln. Rentgenové vlny byly pozorovány v roce 1895 německým fyzikem Wilhelmem Röntgenem a gama záření pozoroval poprvé Paul Villard v roce 1900. Že se jedná o další formy elektromagnetického záření, bylo dokázáno v roce 1914, kdy Ernest Rutherford pozoroval jejich odraz od povrchu krystalu. Určil, že se jedná o vysoce energetické elektromagnetické záření s mnohem kratšími vlnovými délkami. V průběhu let bylo postupně sestaveno kompletní elektromagnetické spektrum (Obr. 13) (NASA, 2013).



Obr. 13: Elektromagnetické spektrum s rozsahy vlnových délek pro jednotlivé typy záření (zdroj: vlastní zpracování).

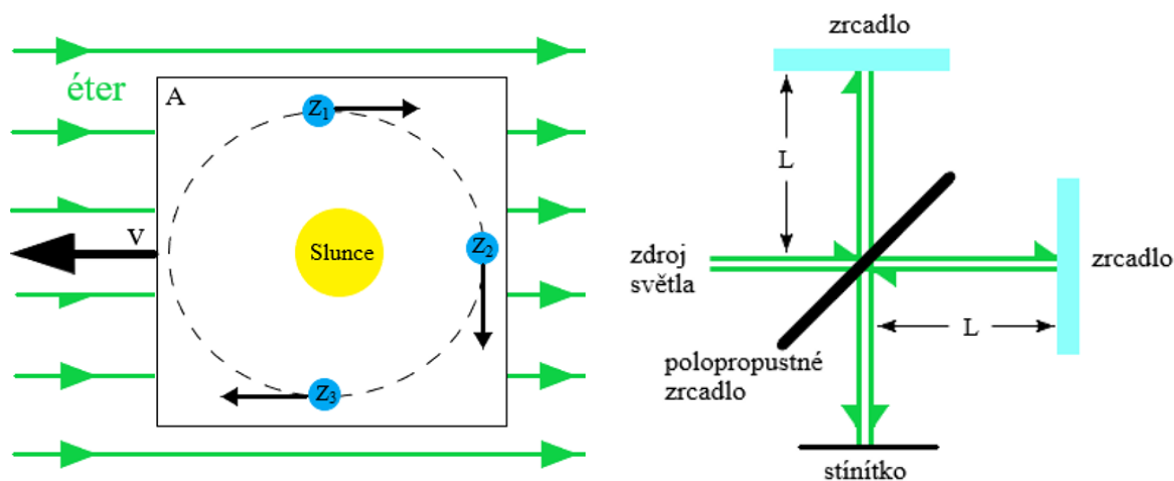
2.3 Optika 20. století

Koncem 19. století už o vlnové povaze světla nikdo nepochyboval. Výsledky pokusů T. Younga a A. J. Fresnela, společně s objevy na poli elektromagnetismu, vedly k jedinému logickému závěru: světlo je vlna. Tisíciletá cesta za odkrytím pravé podstaty světla se zdála být u konce. Vypadalo to, jako kdyby se věda nacházela v jakémsi zlatém období. William Thomson (Lord Kelvin) podle (ZUBAIRY, 2016, s. 14) o této době prohlásil: „*Ted' už není co nového ve fyzice objevovat. Jediné co zbývá je měřit s větší a větší přesností.*“ Klasické teorie mechaniky, elektromagnetismu, termodynamiky a samozřejmě světla byly ve fázi, kdy nebylo mylné se domnívat, že základní principy přírody byly pochopeny. Jak to tak u podobných výroků bývá, ani v tomto případě na sebe nenechaly komplikace dlouho čekat. Hlavně ve spojitosti se světlem. (ZUBAIRY, 2016).

2.3.1 Éter a ultrafialová katastrofa

Těmito komplikacemi se rozumí dvě události, které zapříčinily návrat pochybností ohledně světla a jeho povahy. Byly to Michelsonův–Morleyův experiment a tzv. ultrafialová katastrofa (ZUBAIRY, 2016).

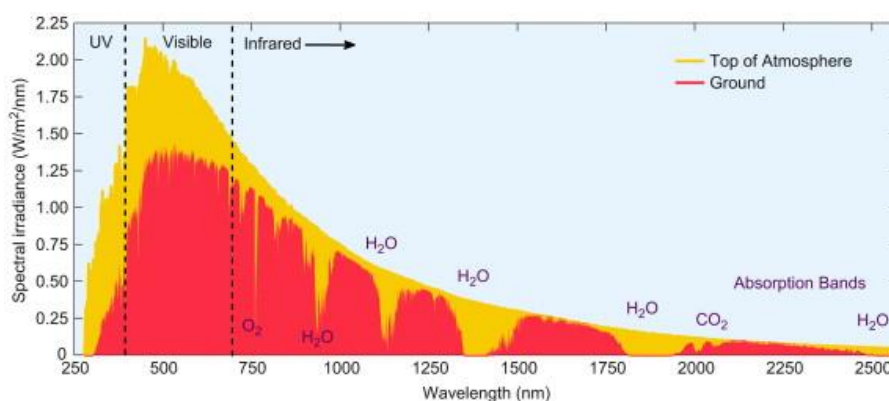
S možností velice přesných měření rychlosti světla přišla i možnost testovat předpokládané účinky éteru na rychlost světla. Přesně to byl původní cíl Michelsonova–Morleyova experimentu. Za předpokladu, že se světlo šíří éterem a Země se pohybuje vesmírem a rovněž prochází éterem, by se rychlost světla naměřená v momentě, kdy se Země pohybuje proti éteru, měla lišit od té, kdy se pohybuje např. kolmo k němu (Obr. 14). Cílem experimentu bylo změřit, jak éter ovlivňuje rychlost světla v těchto dvou rozdílných případech (ZUBAIRY, 2016).



Obr. 14: Nalevo princip Michelsonova–Morleyova experimentu: Soustava A se pohybuje éterem a Země se v pozici Z_1 pohybuje vůči směru pohybu éteru jinak než Země v pozici Z_2 . To by mělo způsobit rozdíl v naměřených rychlostech světla v obou pozicích. Napravo schéma Michelsonova–Morleyova experimentu (zdroj: vlastní zpracování).

Rozdílné rychlosti světla měly být poznat z rozdílných interferenčních obrazců na stínítku po spojení paprsků z obou zrcadel (Obr. 14). Michelson a Morley však žádný rozdíl nepozorovali. Jejich výsledky byly nekonzistentní s existencí éteru. Ačkoliv byl výsledek experimentu negativní, mnozí jej považují za jeden z nejdůležitějších experimentů vůbec. Jeho výsledek také později dopomohl Albertu Einsteinovi formulovat speciální teorii relativity (ZUBAIRY, 2016).

Ultrafialová katastrofa je název, který vznikl ve spojitosti s nejasnostmi ohledně vyzařování absolutně černého tělesa. Absolutně černé těleso je teoretický koncept pro zářič, který pohlcuje veškeré dopadající záření a zároveň sám působí jako tzv. ideální zářič. Slunce a jiné hvězdy považujeme za absolutně černá tělesa. Intenzita slunečního světla dopadajícího na Zemi v závislosti na vlnové délce byla v té době změřena a dobře známa. Můžeme ji vidět na Obr. 15. V grafu si také můžeme všimnout poklesu intenzity záření na hranici viditelného světla a UV záření. Problém je, že matematický aparát elektromagnetického modelu světla říká, že čím kratší vlnová délka, tím vyšší intenzita, a to v rozsahu všech vlnových délek. Tento pokles intenzity v UV oblasti (od toho název ultrafialová katastrofa) tedy nedával smysl a nebylo možné ho nijak vysvětlit. Z toho vyplynul závěr, že interpretace klasického elektromagnetismu měla svá omezení při popisu světla a jeho energie (ZUBAIRY, 2016).



Obr. 15: Spektrum slunečního záření – množství dopadajícího záření v závislosti na vlnové délce (CLEVELAND & MORRIS, 2019).

2.3.2 První kvantová teorie

S řešením problému ultrafialové katastrofy přišel v roce 1900 německý teoretický fyzik Max Planck (1858–1947), který prezentoval teorii konzistentní s experimentálně změřeným spektrem slunečního záření. V této teorii navrhoval, že energie elektromagnetického záření je vyzařována nespojitě, v tzv. “kvantech energie“. Energii těchto kvant popsal vztahem:

$$E = h \cdot \nu \quad (2.3)$$

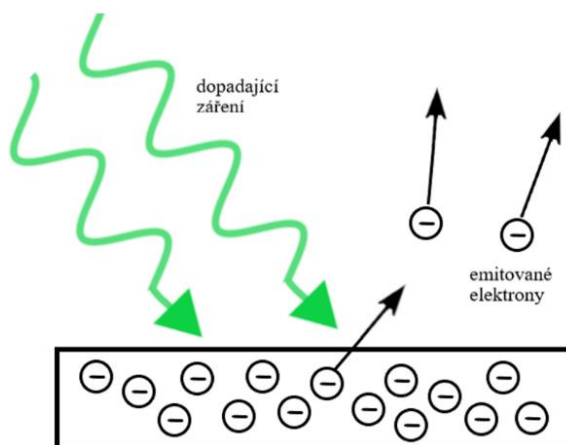
kde ν je frekvence elektromagnetického záření a h je tzv. Planckova konstanta. Její hodnota byla stanovena na $h = 6,626 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$. Ze vztahu (2.3) vyplývá, že energie záření je přímo

úměrná jeho frekvenci, nikoliv amplitudě, jak vycházelo z mechaniky. Také z toho vyplývá, že pro každou určitou frekvenci záření je energie kvantována a existuje pouze v násobcích jednotky $h\nu$ (ZUBAIRY, 2016).

Hypotézy kvantované energie a existence Planckovy konstanty byly vysloveny tzv. *ad-hoc*. To v praxi znamenalo, že Planck navrhl funkční model pomocí těchto dvou myšlenek, u kterých bez důkazu uvažoval jejich pravdivost. Ve skutečnosti nazval Planck své závěry jako “akt zoufalství” ve snaze vysvětlit graf spektra slunečního záření a ohledně existence kvantované energie byl sám skeptický (ZUBAIRY, 2016).

2.3.3 Einsteinova kvantová teorie

Albert Einstein (1879–1955) byl německý teoretický fyzik, který se mimo jiné také zabýval problematikou elektromagnetického záření. Einstein v návaznosti na práci Maxe Plancka formuloval novou teorii. Koncept kvantované energie Einstein rozšířil a uvedl, že světlo samotné je proud jakýchsi částic neboli kvant energie. Tato kvanta byla později pojmenována jako fotony. Stejně jako Planck, i Einstein tvrdil, že energie těchto kvant se dá určit vztahem (2.3). Tento koncept světla se nakonec stal nástrojem pro vysvětlení tzv. fotoelektrického jevu (PASSON, 2022).



Obr. 16: Schéma fotoelektrického jevu (zdroj: vlastní zpracování).

Fotoelektrický jev (také fotoefekt) je jev, při kterém dochází k emisi elektronů z látky (většinou kovů) v důsledku dopadajícího elektromagnetického záření (Obr. 16). Právě díky zavedení konceptu světelných kvant dokázal v roce 1905 Einstein tento jev úspěšně popsat a v roce 1922 za to obdržel Nobelovu cenu za fyziku. Idea kvantovaného světla se začala

vědeckým světem rychle šířit. Přichází tak zrod nové disciplíny a 20. století vstupuje do nové doby – éry kvantové fyziky. V roce 1905 publikuje Einstein také svojí speciální teorii relativity a mimo jiné vysvětluje i Brownův pohyb. Někteří historikové z důvodu těchto revolučních objevů tak popisují rok 1905 ve fyzice jako “zázračný rok” (PASSON, 2022).

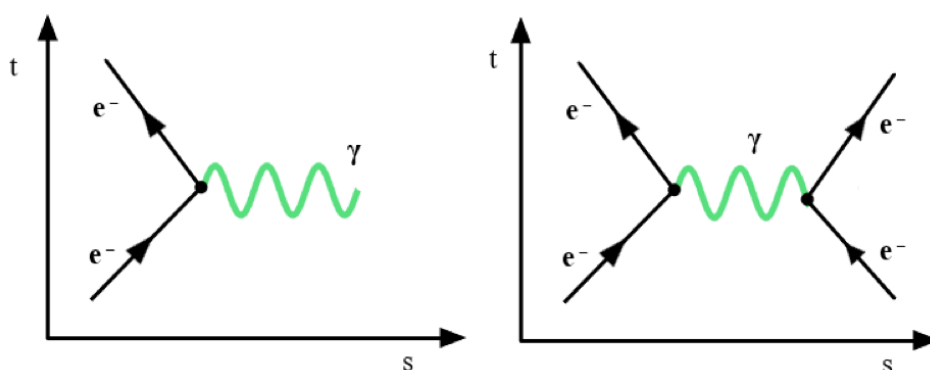
Objevy provedené Albertem Einsteinem vedly k závěru, že světlo se může chovat jako částice. Na jedné straně tedy stála solidní teorie elektromagnetických vln a na straně druhé stála teorie světla jako proudu fotonů. Jevy jako difrakce nebo interference, bylo možné vysvětlit na základě vlnové povahy světla. Nicméně další popsání jevy, jako např. fotoefekt a existence čárových atomových spekter, pro vysvětlení vyžadovaly částicovou povahu světla. Světlo se někdy chová jako vlna a někdy jako částice. Z této vlastnosti vznikl název vlnově-částicový dualismus (PASSON, 2022).

2.3.4 Světlo z pohledu kvantové fyziky

Na poli kvantové fyziky bylo v průběhu 20. století učiněno velké množství vědeckých objevů. V roce 1913 navrhl dánský fyzik Niels Bohr (1885–1962) Bohrov model atomu, kde elektrony mohly obsazovat pouze určité disktrétní energetické hladiny. To vedlo k uvědomění, že elektron při přestupování mezi těmito hladinami může vyzařovat nebo přijímat fotony. Francouzský fyzik Louis de Broglie (1892–1987) v roce 1924 ukázal, že i částice látky se chovají jako vlny. To znamenalo, že vlnově částicový dualismus přestal být považován exkluzivně za vlastnost světla, ale začal sloužit i pro popis veškerých částic hmoty. Na základě této úvahy formuloval v roce 1926 Erwin Schrödinger (1887–1961) svojí známou Schrödingerovu rovnici a v roce 1927 Werner Heisenberg (1901–1976) představil Heisenbergův princip neurčitosti. Fyzikální svět tak opouští koncept determinismu a vstupuje do světa náhod a pravděpodobností (MONTWILL & BRESLIN, 2012).

Velký pokrok na poli kvantové mechaniky učinil anglický fyzik Paul Dirac (1902–1984), když v roce 1927 formuloval první teorii kvantového pole. Jednalo se o revoluční funkční sjednocení klasické teorie pole, kvantové mechaniky a Einsteinovy teorie relativity. Kvantová teorie pole zjednodušeně říká, že každá elementární částice je součástí svého odpovídajícího kvantového pole. To v praxi znamená, že elektrony jsou součástí elektronového pole, fotony fotonového pole atd. Všechna tato pole spolu navzájem interagují (MONTWILL & BRESLIN, 2012).

V následujících letech tuto teorii rozvinul tým vědců, jehož součástí byl americký teoretický fyzik Richard Feynman (1918–1988). Se svým týmem vytvořili teorii kvantové elektrodynamiky (QED). Tato teorie se stala jednou z nejvýznamnějších teorií moderní vědy, jelikož dokázala sjednotit a popsat interakce tří známých sil, tzv. silné, slabé a elektromagnetické interakce. Podle této teorie je silové působení mezi nabitými elementárními částicemi (např. elektrony) zprostředkováno výměnou fotonů. Interakce dvou elektronů je popsána na Obr. 17 pomocí tzv. Feynmanových diagramů (MONTWILL & BRESLIN, 2012).



Obr. 17: Feynmanův diagram – interakce dvou elektronů. Nalevo je znázorněno jednoduché vyzáření fotonu z elektronu a následná změna dráhy částice v čase. Napravo je vidět jak vyzáření, tak přijetí energie fotonu jiným elektronem, přičemž oba elektrony (ten, který odevzdal, i ten, který přijal energii fotonu) změnila směr (MONTWILL & BRESLIN, 2012).

Jedná se o zjednodušený popis ve skutečnosti velice komplikované interakce. Při experimentálním ověřování se ukázalo, že teorie dokáže popsat různé fyzikální jevy s výjimečně vysokou přesností. Např. při měření magnetického momentu elektronu došli vědci k následujícím výsledkům.

Teoretická hodnota: 1,001159652**46** μ_B

Naměřená hodnota: 1,001159652**18** μ_B

Hodnoty se liší až na desátém místě za desetinnou čárkou. Rozdíl mezi těmito hodnotami tedy odpovídá tloušťce lidského vlasu na vzdálenosti mezi Londýnem a New Yorkem. Žádná jiná teorie v historii fyziky nebyla ověřena s větší přesností. Nová teorie světla tedy byla na světě. R. Feynman a jeho dva kolegové, Sin-Itiro Tomonaga a Julian Schwinger, za svou práci obdrželi Nobelovu cenu za rok 1965. V roce 1985 vydává Feynman knihu *QED: Neobyčejná teorie světla a látky*, která obsahuje 4 přednášky o kvantové elektrodynamice, adaptované pro běžného čtenáře (MONTWILL & BRESLIN, 2012).

2.3.5 Co je tedy světlo?

Vrátíme-li se zpět k otázce z první kapitoly, co je to tedy světlo? Po krátkém úvodu do světa kvantové fyziky si můžeme dovolit být lehce nejednoznační. Je to tedy vlna nebo částice? Jednoduše řečeno – oboje a ani jedno zároveň. Je to kvantový objekt a podléhá pravidlům kvantového světa. Můžeme tedy otázku přeformulovat a zeptat se: Jaký je účel světla? Odpověď na tuto otázku se nese spíše ve filozofickém než fyzikálním duchu. Každého jako první napadne, že světlo nám dává možnost vidět, že bez světla bychom byli slepí. To je samozřejmě pravda. Význam světla ale sahá ještě dál, až za hranice našeho chápání, za hranice naší představivosti (ASH, 2023).

Mezi nabitými částicemi, jako jsou např. elektrony v obalech atomů našeho těla, a elektrony v obalech atomů, které tvoří zemi, vznikají elektromagnetické síly. Tyto síly jsou odpuzivé a jsou důvodem toho, proč se nepropadneme skrz podlahu, na které stojíme. Podle teorie kvantové elektrodynamiky jsou to ale fotony, které zprostředkovávají interakce mezi těmito částicemi. Dalo by se tedy říct, že ten pravý důvod, proč se nepropadneme skrz podlahu, je světlo samotné. Že je to právě světlo, co nám dovoluje přicházet do kontaktu s věcmi z každodenního života a je tudíž prostředkem pro výměnu energie a informací mezi všemi objekty našeho vesmíru (ASH, 2023).

2.4 Laser

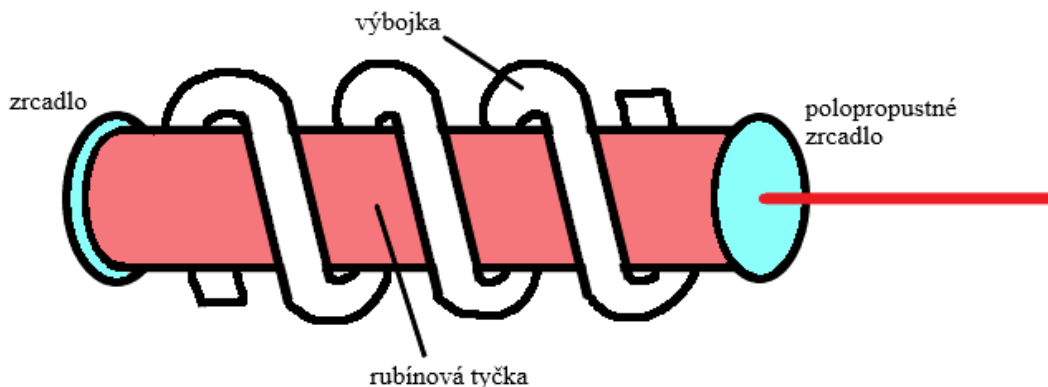
Laser patří, jak je zmíněno již v úvodu, bezpochyby k jednomu z nejvýznamnějších vynálezů v historii lidstva. Jedná se o revoluční technologii, kterou můžeme najít v mnoha zařízeních moderního světa. Jako několik příkladů můžeme jmenovat DVD přehrávače, tiskárny, čtečky, ale také nejrůznější chirurgické nástroje v medicíně, nebo svářečky a různá měřicí zařízení v mnoha odvětvích průmyslu. Široce rozšířená aplikace laseru pramení z jeho schopnosti generovat intenzivní světelné paprsky s jedinečnými vlastnostmi (GROSS & HERMAN, 2007).

Název “laser“ je akronym z anglického *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*. Byl to Albert Einstein, který jako první v roce 1917 objevil vlastnost stimulované emise. Einstein uvedl, že za určitých podmínek může být atom přinucen k vyzáření fotonu. Tento proces nazval “indukovaná emise“ (indukovaná = stimulovaná). Vytvořil tak základ pro vznik laseru o 40 let později (GROSS & HERMAN, 2007).

2.4.1 Princip laseru

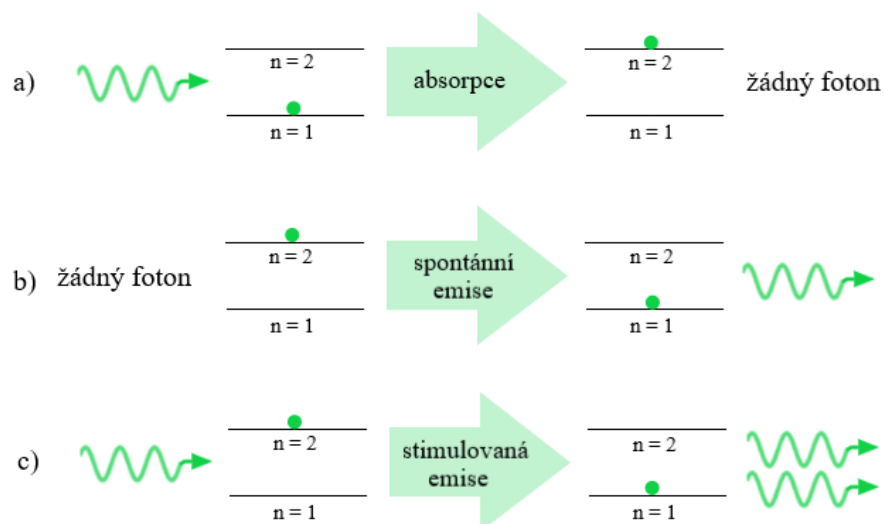
První laser sestavil v roce 1960 americký fyzik Theodore Maiman (1927–2007) (Obr. 18). Jednalo se o pulzní laser. Ten se skládal ze dvou zrcadel, mezi které bylo vloženo laserové médium v podobě rubínového krystalu. Kolem krystalu byla umístěna výbojka. Výbojka se díky toku elektrického proudu rozzáří a dodá dost energie na to, aby se elektrony v atomech krystalu dostaly ze základního do vyššího energetického stavu. Při návratu elektronů zpět do základního stavu samovolně emitují fotony (HECHT, 2010).

Pokud do excitovaného atomu před spontánní emisí narazí jiný foton o energii odpovídající rozdílu energií odpovídajících energetických hladin, dojde ke stimulované emisi (rozdíly mezi těmito druhy interakcí v Obr. 19). Uvolněný foton má stejnou frekvenci a fázi jako ten původní. Emitované fotony se díky zrcadlům na krajích krystalu zpětně odrážejí, což dále generuje stimulovanou emisi navyšuje počet emitovaných fotonů uvnitř trubice. Některé fotony posléze unikají ven polopropustným zrcadlem v podobě laserového paprsku. Dnes existuje mnoho druhů laserů, ale všechny vycházejí z principu stimulované emise (HECHT, 2010).



Obr. 18: Schéma prvního funkčního rubínového laseru (zdroj: vlastní zpracování).

K tomu, aby v laserovém médiu došlo k zesílení pomocí stimulované emise, musí v médiu dojít k tzv. převrácení (inverzi) populace. Inverze populace znamená, že v daný moment musí existovat více atomů ve stavu s vyšší energií, než těch ve stavu základním (HALLIDAY ET AL., 2013).



Obr. 19: Schématické znázornění rozdílů mezi absorpcí, spontánní emisí a stimulovanou emisí (a, b, c). Na levé straně od šipky je výchozí stav, na pravé straně stav po interakci. Šipka nese název interakce (HALLIDAY ET AL., 2013).

2.4.2 Vlastnosti laserového světla

Laserové světlo má spoustu unikátních vlastností. Je vysoce monochromatické. To znamená, že narozdíl od klasických světelných zdrojů, jako je žárovka, nepokrývá širokou škálu vlnových délek. Jedná se tedy o světlo s úzkým spektrálním profilem. Je také vysoce koherentní. Koherence světla znamená, že se jeho světelný paprsek skládá z vln se stejnou fází a amplitudou. Laserové světlo má velice malou divergenci paprsku (je vysoce směrové). Jinými slovy, paprsek laseru má malou rozbíhavost a odchyluje se od rovnoběžné osy pouze v důsledku difrakce na výstupním polopropustném zrcadle (HALLIDAY ET AL., 2013). Při měření vzdálenosti Země – Měsíc pomocí laseru byl průměr dopadajícího světla na povrchu Měsíce pouze něco přes dva kilometry (NASA, 2020).

3 Experimenty s laserem

V této části je popsáno a vysvětleno pět experimentů s laserovým ukazovátkem. Jde o následující pokusy: měření tloušťky lidského vlasu, ohyb paprsku v solném roztoku, tekoucí proud vody jako optické vlákno, mikroskop z laseru (*droposcope*) a zobrazení vibrací pomocí laseru.

3.1 Práce s laserem

Před tím, než se pustíme do popisu experimentů, je nutné zmínit několik pravidel chování při práci s laserovými zařízeními. Práce s lasery s sebou totiž nese možnost ohrožení zdraví, a to hlavně dojde-li ke kontaktu laserového paprsku s očima. Stanovíme si tedy několik pravidel, která je nutné během provádění pokusů dodržovat.

3.1.1 Klasifikace laserů

Podle organizace International Electrotechnical Commission (IEC 60825-1) se lasery na základě výkonu rozdělují do několika bezpečnostních tříd. Některé vysokovýkonné lasery se v mohou řadit ve třídách níže v momentě, kdy jsou nepřístupné a zabezpečené uvnitř zařízení. Abychom se vyvarovali složitostem, budeme při řazení do tříd brát v potaz pouze čistý výkon laseru. Lasery dělíme na třídy (SCHULMEISTER, 2015):

Třída 1

Při kontaktu s okem nedochází k žádnému poškození. Jedná se o lasery s výkonem menším než 0,4 mW.

Třída 1M

Platí stejné výkonnostní restrikce jako u třídy 1 takže při přímém kontaktu s okem nedochází k žádnému poškození. Je třeba si ale dávat pozor dojde-li k interakci skrz čočky, lupy nebo jiné optické pomůcky.

Třída 2

Do této třídy spadají lasery o výkonu v rozsahu 0,4–1 mW. Jedná se o lasery o nízkém výkonu. Ačkoliv jsou zcela bezpečné k používání, přímý kontakt s očima se nedoporučuje.

Třída 2M

Platí stejné výkonnostní restrikce jako u třídy 2. Opět může způsobit poškození při použití optických přístrojů.

Třída 3R

Do této třídy spadají lasery s výkonem v rozsahu 1–5 mW. Stále se jedná o lasery o relativně nízkém výkonu, nicméně některé bezpečnostní požadavky by při práci s nimi měly být splněny. Ačkoliv je zdravotní riziko malé, je doporučeno vyvarovat se kontaktu jak s přímým paprskem, tak s paprskem odraženým.

Třída 3B

Do této třídy spadají lasery s výkonem v rozsahu 5–500 mW. Jedná se o lasery o středním výkonu. Při kontaktu s přímým i odraženým paprskem může dojít k vážnějšímu poškození očí. Hrozí i slabé popálení pokožky nebo vzplanutí při dopadu na hořlavé materiály. Je tedy doporučeno se vyvarovat jakémukoliv kontaktu s paprskem.

Třída 4

Do této třídy spadají lasery s výkonem vyšším než 500mW. Tyto lasery představují vysoké riziko nejen pro oči, ale i pro kůži. Může tedy dojít k vážnému poškození očí až oslepnutí, nebo k vážnému popálení kůže. Nebezpečný je přímý, odražený i difuzní odraz. Je silně doporučeno se kompletně vyvarovat jakémukoliv kontaktu s paprskem.

3.1.2 Bezpečnost práce

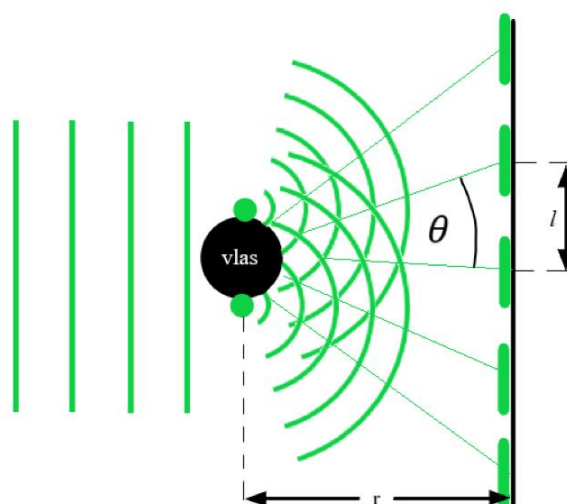
V pokusech v této práci bylo využito laserového ukazovátka s uvedeným výkonem 1000 mW a vlnovou délkou 532 nm (zelená barva). Jedná se o zařízení, které spadá do 4. bezpečnostní třídy. S laserem těchto parametrů se doporučuje zacházet s ochrannými brýlemi nebo za profesionálního dozoru. V momentě kontaktu přímého nebo odraženého paprsku s okem může dojít k trvalému poškození nebo až oslepnutí. Takto silný laser byl zvolen pouze pro to, aby ve fotodokumentaci pokusů bylo lépe vidět chování laserového paprsku. Pro učitele, kteří by zvažovali použití takto silného laseru při demonstraci pokusů před studenty, doporučuji zavést přísná opatření a snížit tak riziko jakéhokoli úrazu:

- Je vhodné vyvarovat se používání pomůcek s lesklými nebo kulovými povrchy.

- Laser by měl obsluhovat pouze učitel.
- Při pokusech, kdy paprsek dopadá na stínítko v celku, doporučuji volit povrch stínítka s malou odrazivostí.
- Kalibraci aparatury provést před hodinou nebo když není nikdo přítomen (při kalibraci může dojít k odrazu do očí přihlížejících studentů).
- Minimalizovat čas provozu laseru (krátká ukázka pokusu).

3.2 Měření tloušťky lidského vlasu

V tomto pokusu budeme měřit tloušťku lidského vlasu za pomoci difrakce. Difrakce světla je jev, který nastává, když světlo narazí na překážku, jejíž rozměry jsou srovnatelné s vlnovou délkou přicházejícího paprsku. Při tomto jevu dochází k ohybu paprsku kolem překážky, kdy se paprsek vychýlí od svého původního směru a dostává se do oblasti geometrického stínu překážky (JENKINS ET AL., 1976).



Obr. 20: Geometrické schéma pokusu: r je vzdálenost vlasu od stínítka, l vzdálenost interferenčního maxima od centrálního paprsku a θ je úhel mezi přímkou procházející centrálním paprskem laseru a přímkou spojující vlas s interferenčním maximem (zdroj: vlastní zpracování).

Při popisu pokusu dojde také k využití Huygensova – Fresnelova principu. Ten říká, že na každý bod vlnění, může být nahlíženo jako na nový zdroj toho samého vlnění. Tyto body jsou znázorněny na Obr. 20. Ohnuté paprsky spolu poté konstruktivně nebo destruktivně interferují a na stínítku tak pozorujeme interferenční maxima a minima (SALEH & TEICH, 1991).

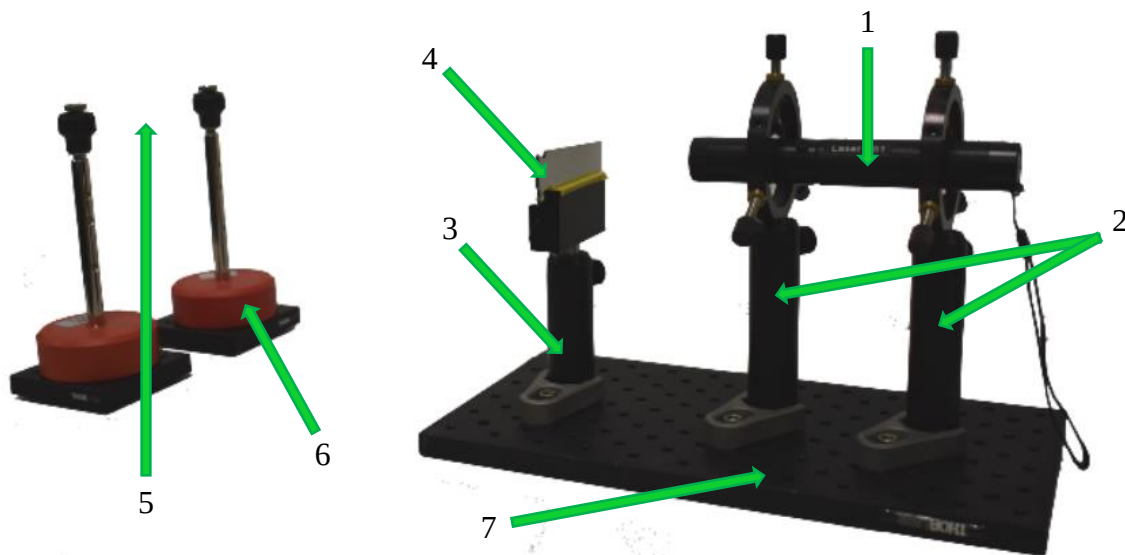
Pro konstruktivní interferenci, tedy světlá místa na stínítku, platí rovnice

$$d \cdot \sin \theta = n \cdot \lambda \quad (3.1)$$

kde d je tloušťka vlasu, n je přirozené číslo udávající pořadí jednotlivých interferenčních maxim, λ je vlnová délka použitého záření (JENKINS ET AL., 1976).

Pomůcky

1 – laserové ukazovátko, 2 – stojany na laser 3 – stojan na optický filtr, 4 – optický filtr, 5 – lidský vlas, 6 – držák na vlas, 7 – optická deska, stupnice pro měření vzdáleností interferenčních maxim, metr (Obr. 21)



Obr. 21: Fotografie soupravy pro experiment: Měření tloušťky lidského vlasu.

Postup

1. Upevněte vlas do držáku.
2. Na optickou desku upevněte stojan na laser a stojan na optický filtr.
3. Laser a filtr vložte do stojanů a upevněte je ve stejné výšce (tak, aby laserový paprsek procházel vlasem).
4. Umístěte stupnici pro měření vzdáleností interferenčních maxim na stínítko.
5. Změřte vzdálenost vlasu od stínítka.
6. Zhasněte světla v místnosti a zapněte laser.
7. Změřte a запиšte hodnoty vzdáleností interferenčních maxim od původního paprsku.

Naměřené hodnoty a výpočet

Tab. 1: Naměřené hodnoty vzdáleností l interferenčních maxim od centrálního paprsku a vypočtené hodnoty úhlu θ .

maximum č.	l [cm]	θ [°]	maximum č.	l [cm]	θ [°]
1.	0,55	0,32	5.	3,1	1,83
2.	1,1	0,65	6.	3,8	2,24
3.	1,7	1	7.	4,5	2,66
4.	2,4	1,41	8.	5,2	3,06

Hodnoty úhlu θ spočteme podle vzorce:

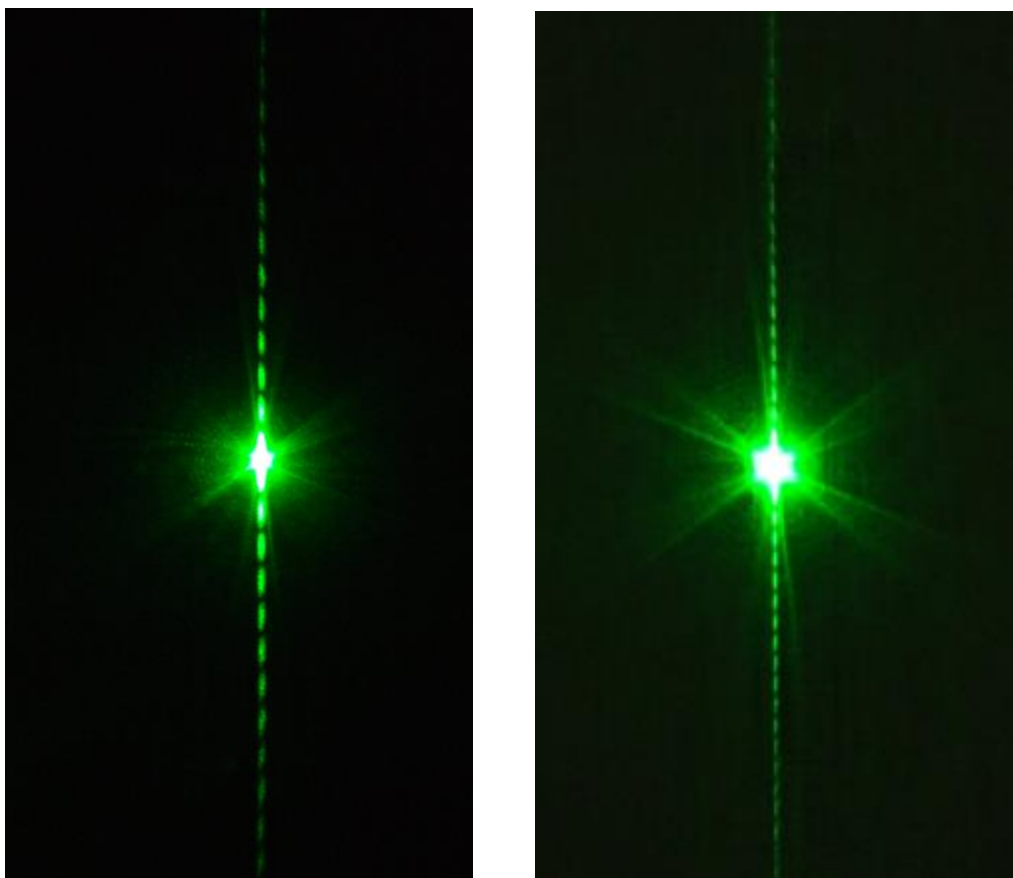
$$\sin \theta_1 = \frac{l}{r} \quad (3.2)$$

který vyplývá z Obr. 20. Vypočítané hodnoty θ jsou uvedeny v Tab. 1. Z těchto hodnot a za pomoci vzorce (3.1) je lze vypočítat tloušťku vlasu d . Výsledky tloušťky vlasu jsou uvedeny v Tab. 2.

Tab. 2: Výsledné hodnoty tloušťky vlasu.

měření č.	d [μm]	měření č.	d [μm]
1.	95,25	5.	83,29
2.	93,79	6.	81,66
3.	91,44	7.	80,24
4.	86,48	8.	79,72

Obrázky



Obr. 22: Výsledné interferenční obrazce na stínítku.

Diskuse

Pokus byl elegantní demonstrací vlnového chování světla. Jedná se o experiment na podobném principu, jaký provedl v roce 1801 Thomas Young. Difrakce při jeho pokusu probíhala na dvou štěrbinách, výsledkem experimentu bylo to samé, tedy interferenční obrazec (Obr. 22) a důkaz o vlnové podstatě světla.

Co se týká obtížnosti, pokus patří k těm jednodušším a dá se snadno zprostředkovat přímo ve třídě při hodině fyziky. Interferenční obraz je díky silnému laseru a řádně nastavené aparatuře čistě a zřetelně vidět.

Velice zajímavé bylo pozorovat, co se dělo při roztahování stojanů na vlas směrem od sebe, když v nich byl vlas umístěn a laser byl spuštěn. Interferenční maxima na stínítku se k sobě začala přibližovat, protože vlas je do určité míry elastický a při natahování se mu

zmenšoval průměr. Bylo tak možné ověřit, jak vzdálenost maxim opravdu záleží na tloušťce vlasu.

Jedna z mála věcí, na které je třeba si dát při pokusu pozor, je nastavení výšky laseru. Je třeba ho umístit do takové polohy, aby jeho paprsek spolehlivě přicházel do kontaktu s umístěným vlasem.

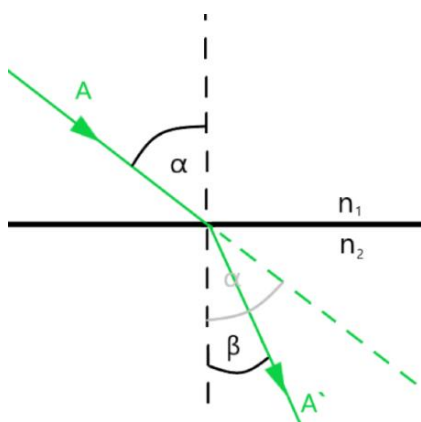
Výhody tohoto experimentu spočívají v tom, že je nízkonákladový a zároveň velice názorný. Student, který není obeznámen s vlnovými vlastnostmi světla, bude z interferenčního obrazce překvapen. Před pokusem je také dobré se zeptat studentů, co očekávají na stínítku za obrazec.

3.3 Ohyb paprsku v solném roztoku

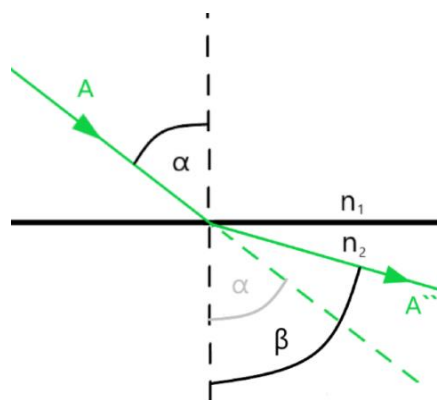
V tomto pokusu půjde o pozorování ohybu paprsku v akváriu se solným roztokem. Ke klasickému lomu dochází na rozhraní optických prostředí s rozdílnými hodnotami indexu lomu. Index lomu světla n v jakékoliv látce je definovaný jako poměr mezi rychlostí světla ve vakuu a rychlostí světla v dané látce (JENKINS ET AL., 1976). Platí tedy vzorec:

$$n = \frac{\text{rychlost světla ve vakuu}}{\text{rychlost světla v látce}} = \frac{c}{v} \quad (3.3)$$

Paprsek světla dopadající na hranici jiného optického prostředí se může odrazit, absorbovat nebo projít. Část světla, která se neodrazí, případně nepohltní, projde skrz a dojde právě k její refrakci (lomu) (HAGLUND, 2007).

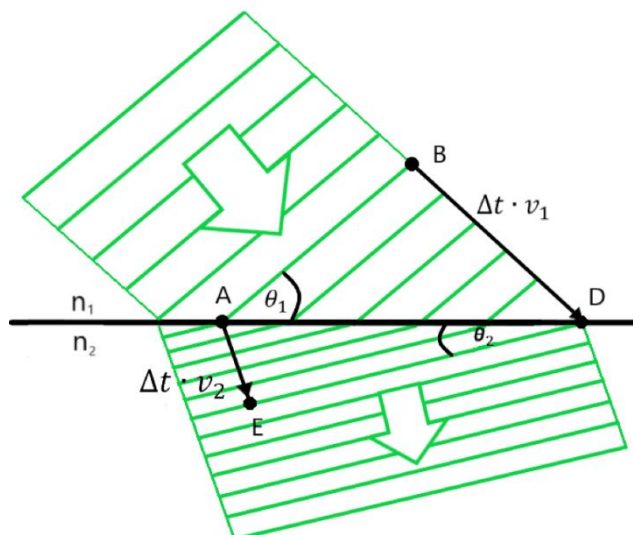


Obr. 23: Lom světla ke kolmici ($n_1 < n_2$) (zdroj: vlastní zpracování).



Obr. 24: Lom světla od kolmice ($n_1 > n_2$) (zdroj: vlastní zpracování).

Podle zákona lomu nastává při přechodu světla z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího ($n_1 < n_2$) lom světla ke kolmici (Obr. 23) a při přechodu světla z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího ($n_1 > n_2$) nastává lom světla od kolmice (Obr. 24) (JENKINS ET AL., 1976).



Obr. 25: Lom světla zobrazený pomocí vlnoploch (HECHT, 2017).

Na Obr. 25 je vyobrazen lom světelných vln. Vlnoplochy se ohýbají při prostupu hranice mezi prostředím kvůli změně rychlosti. Čas Δt je čas, za který se bod B na vlnoploše (rychlostí v_1) dostane do bodu D. Za stejný čas se bod na vlnoploše A dostane za čas Δt do bodu E (rychlostí v_2). Pokud platí $n_2 > n_1$ tak platí $v_2 < v_1$ a $\overline{AE} < \overline{BD}$. Původní vlnoplocha AB svírá s hranicí obou prostředí úhel θ_1 a lomená vlnoplocha ED úhel θ_2 (HECHT, 2017). Platí tedy

$$\frac{\sin \theta_1}{\overline{BD}} = \frac{\sin \theta_2}{\overline{AE}} \quad (3.4)$$

Vzdálenost $\overline{AE}$ se dá vyjádřit jako rychlost za čas, tedy $\Delta t \cdot v_2$. Stejně tak se dá vyjádřit $\overline{BD}$ jako $\Delta t \cdot v_1$. Po úpravě dosazení do vzorce (3.4) tedy platí:

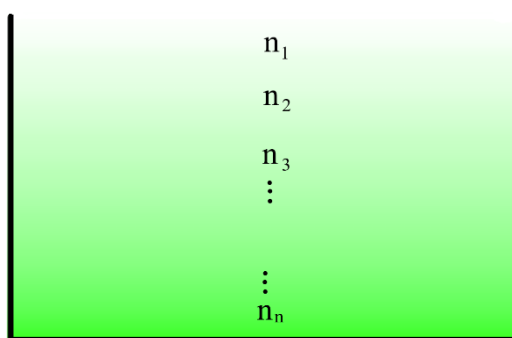
$$\frac{\sin \theta_1}{v_1} = \frac{\sin \theta_2}{v_2} \quad (3.5)$$

Po vynásobení obou stran rovnice (3.5) rychlostí světla c a upravením pomocí rovnice (3.3), dostaneme:

$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2 \quad (3.6)$$

Tento vztah se jmenuje Snellův zákon, pojmenovaný na počest nizozemského matematika W. Snella, který tyto myšlenky formuloval v roce 1621 (HECHT, 2017).

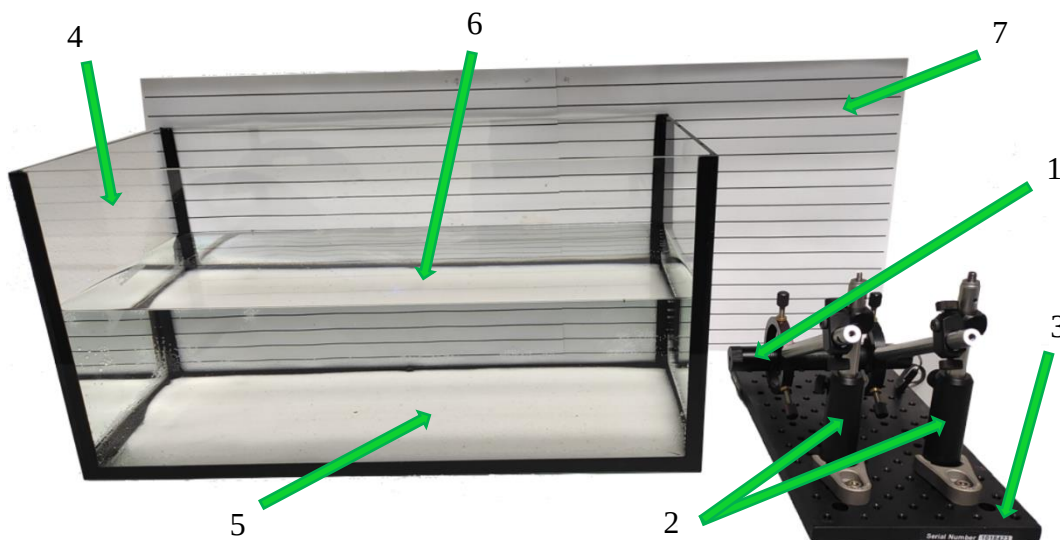
Situace z obrázků výše platí za předpokladu, že prostředí s indexy lomu n_1 a n_2 jsou homogenní. Existuje však i tzv. gradientní index lomu (Obr. 26). V gradientním indexu lomu dochází, na rozdíl od „klasického“ (Obr. 17, 18), k plynulému lomu paprsku světla v závislosti na distribuci hodnot indexu lomu v daném prostředí $n(x, y, z)$, jelikož index lomu je proměnlivý v různých polohách média (BRUNNER ET AL., 2007).



Obr. 26: Schéma prostředí solného roztoku v akváriu. Na obrázku jsou zobrazeny hodnoty jednotlivých úrovní akvária $n_1, n_2, n_3 \dots n_n$, pro která platí $n_1 < n_2 < n_3 < \dots < n_n$ (zdroj: vlastní zpracování).

Pomůcky

1 – laserové ukazovátko, 2 – stojany na laser, 3 – optická deska, 4 – akvárium, 5 – sůl, 6 – voda, 7 – papírové pozadí s vodorovnými pruhy (Obr. 27)

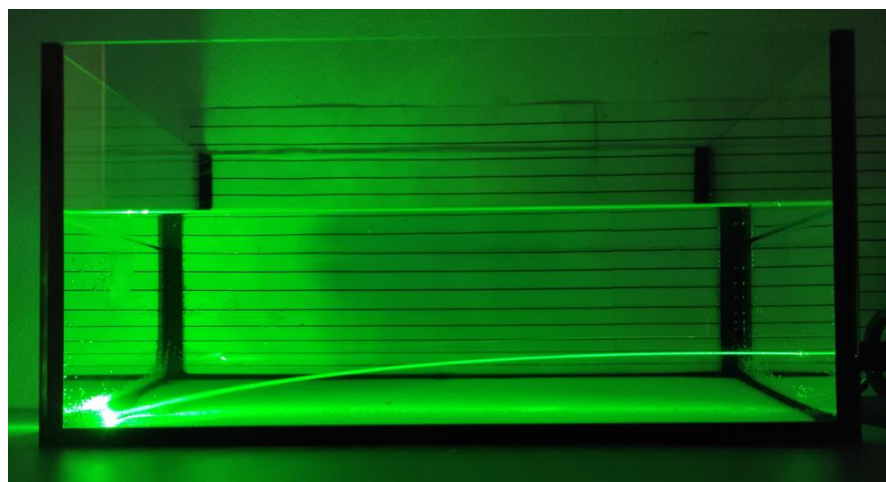


Obr. 27: Fotografie soupravy pro experiment: Ohyb paprsku v solném roztoku.

Postup

1. Nalepte papírové pozadí s vodorovnými pruhy na zeď za akvárium.
2. Akvárium umístěte tak, aby jeho delší stěna přiléhala k papírovému pozadí.
3. Po dně akvária rozprostřete 2 kg soli.
4. Do akvária pomalu nalívejte vodu tak, abyste co nejméně rozvříteli vysypanou sůl. Akvárium naplňte do 3/4 výšky.
5. V tomto stavu nechte akvárium se solí 1 až 2 dny v klidu.
6. Ke kratší stěně akvária umístěte laser v aparatuře s nastavitelnou výškou.
7. Zhasněte světla v místnosti a laserem posviťte z boku dovnitř akvária.
8. Laserový svazek nastavte tak, aby byl vidět lom paprsku na gradientním indexu lomu.

Obrázky



Obr. 28: Ohyb paprsku v solném gradientu roztoku.

Diskuse

V pokusu šlo o demonstraci toho, jak se světlo chová po vstupu do látky s rozdílným indexem lomu. V tomto případě šlo o prostředí s gradientně měnícím se indexem lomu. Na fotografii (Obr. 28) z výsledků pokusu je dobře vidět postupný lom paprsku. Gradient v tomto případě roste s hloubkou, takže ve vyšších polohách akvária dochází k menší refrakci. To je možné vidět na horním obrázku (Obr. 28), kde se paprsek laseru ohnul jen slabě, v porovnání se spodním obrázkem, kde paprsek vstoupil do akvária o něco níž a je jasně vidět, že se ohnul více.

Na horním obrázku je také vidět, jak paprsek narazil na skleněnou stěnu akvária, kde se jeho odražená část vrátila zpět do prostředí akvária. Viditelně slabší paprsek se opět vrátil do prostředí s gradientním indexem lomu a znovu došlo k jeho refrakci. Nakonec dopadl zhruba doprostřed akvária na dno. V jednom obrázku tedy můžeme pozorovat nejen refrakci v roztoku, ale také odraz od skla.

Provedení experimentu nebylo obtížné, ale vyžadovalo určitou přípravu předem. Solný gradient se ve vodě vytvářel v řádu hodin, takže pokus vyžadoval přípravu minimálně den před jeho demonstrací. K jeho realizaci bylo potřeba více pomůcek než k předešlému pokusu, i tak se ale jedná o velice dostupný experiment.

Během tohoto pokusu bylo třeba si dávat pozor na to, pod jakým úhlem dopadá paprsek do akvária, jelikož hrozí nebezpečí odrazu. Zároveň, pokud na druhou stranu akvária není neumístěno stínítko, může dojít k ohrožení jak experimentátora, tak přihlížejících. V případě, že budete provádět experiment na stole ve třídě, je důležité, aby studenti nestáli ve směru procházejícího nebo odraženého svazku.

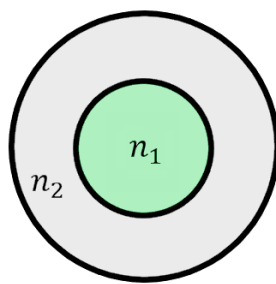
3.4 Tekoucí proud vody jako optické vlákno

Podobně jako u předchozího pokusu se jedná o aplikaci Snellova zákona (3.6). Tentokrát budeme zkoumat případ, kdy paprsek světla přichází z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího. Půjde nám totiž o simulaci prostředí uvnitř optického vlákna. Optické vlákno je válcový dielektrický vlnovod vyrobený z opticky nízko-ztrátových materiálů, jako je křemičité sklo. Má centrální jádro, ve kterém je světlo vedeno. Toto jádro je obaleno pláštěm s menším indexem lomu (SALEH & TEICH, 1991).

Optická vlákna jsou součástí optických kabelů. Ty jsou dnes široce využívaným prostředkem hlavně v telekomunikaci při přenosu informací. Na dně oceánů je položeno přes 1 milion kilometrů optických kabelů, kterými je možno posílat informace napříč kontinenty rychlostí světla (JOHNSON-GROH, 2021).

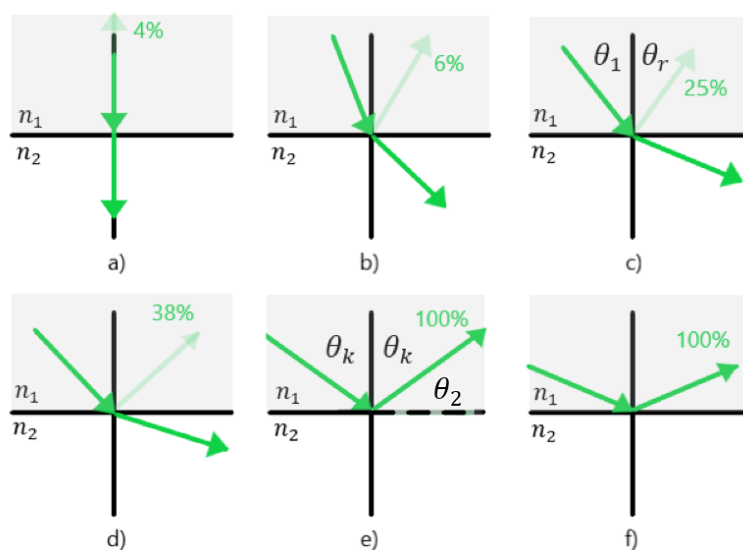
Prostředí optického vlákna se dá jednoduše simulovat proudem vody. Chování světla v tekoucím proudu vody je skoro perfektní analogií pro šíření světla v optickém vlákne. V optických vláknech dochází sice k mnohem menším ztrátám, princip je ale stejný (Obr. 31).

Označíme-li prostředí přichozího paprsku n_1 a prostředí lomeného paprsku n_2 bude platit nerovnost $n_1 > n_2$ a průřez kabelu bude vypadat jako na Obr. 29. Prostředím s větším indexem lomu bude v našem případě voda ($n_1 = 1,33$) a prostředím s nižším indexem lomu vzduch ($n_2 = 1,0003$) (HECHT, 2017).



Obr. 29: Průřez optickým kabelem (vlnovodem) (zdroj: vlastní zpracování).

Při vedení světla optickým vláknem je využito jevu totálního vnitřního odrazu. Totální vnitřní odraz nastává tehdy, když světlo dopadá pod úhlem, kterému se říká kritický úhel, příp. vyšším (HECHT, 2017).



Obr. 30: Totální vnitřní odraz a kritický úhel (e) (zdroj: vlastní zpracování).

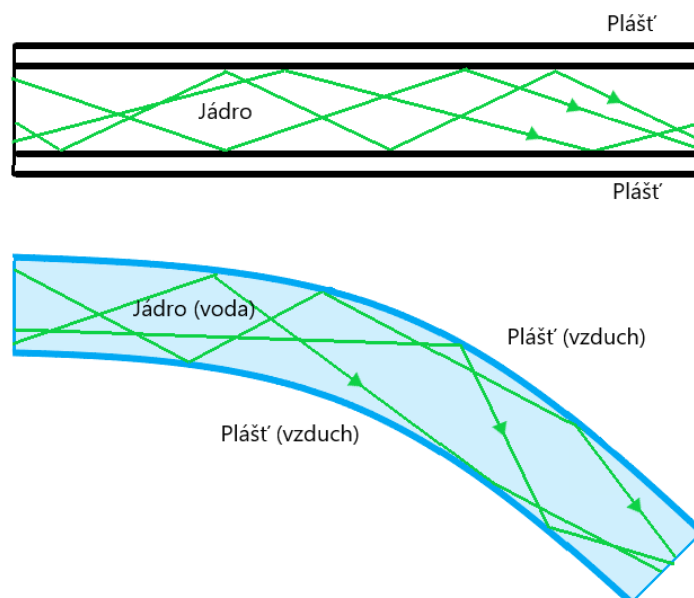
Zdroj se nachází v opticky hustším prostředí s indexem lomu n_1 . Při postupném zvětšování hodnoty úhlu dopadu θ_2 (Obr. 30). Z upravené rovnice (3.6) platí:

$$\sin \theta_1 = \frac{n_2}{n_1} \cdot \sin \theta_2 \quad (3.7)$$

Platí také $n_1 > n_2$. Z toho vyplývá, že $\frac{n_2}{n_1} < 1$. Také platí že $\theta_2 > \theta_1$ (protože se světlo láme od kolmice). Se zvětšujícím se θ_1 je stále více energie obsaženo v odražené části paprsku. V momentě kdy $\theta_2 = 90^\circ$ a tedy $\sin \theta_2 = 1$ platí vztah:

$$\sin \theta_1 = \sin \theta_k = \frac{n_2}{n_1} \quad (3.8)$$

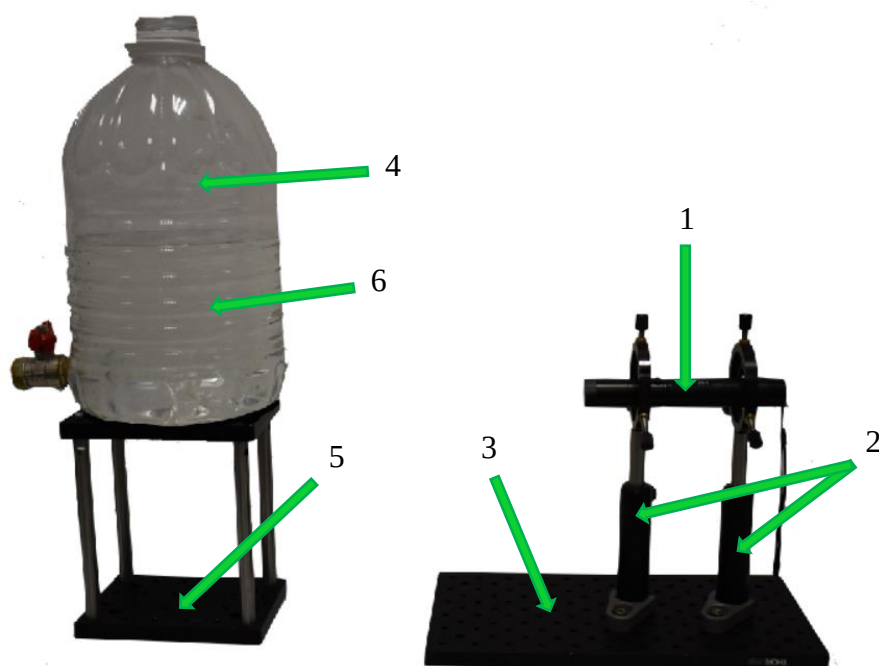
kde θ_k je kritický úhel. Kritický uhel je tedy speciální hodnota úhlu dopadu $\theta_1 = \theta_k$, kdy $\theta_2 = 90^\circ$. Pro všechny paprsky, které dopadnou pod úhlem $\theta_1 \geq \theta_k$ platí, že jejich energie bude až na malé ztráty obsažena v odraženém paprsku (totálně se odrazí) (HECHT, 2017).



Obr. 31: Schéma distribuce paprsků světla v optickém kabelu (nahore) a distribuce paprsků světla v proudu vody (dole) (zdroj: vlastní zpracování).

Pomůcky

1 – laserové ukazovátko, 2 – stojany na laser, 3 – optická deska, 4 – průhledná nádoba s ventilem, 5 – stojan na nádobu, 6 – voda (Obr. 32)

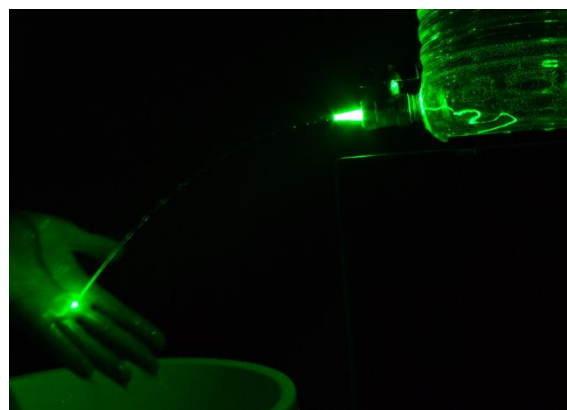
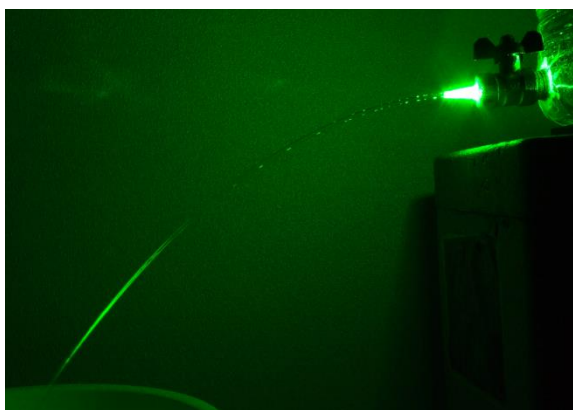


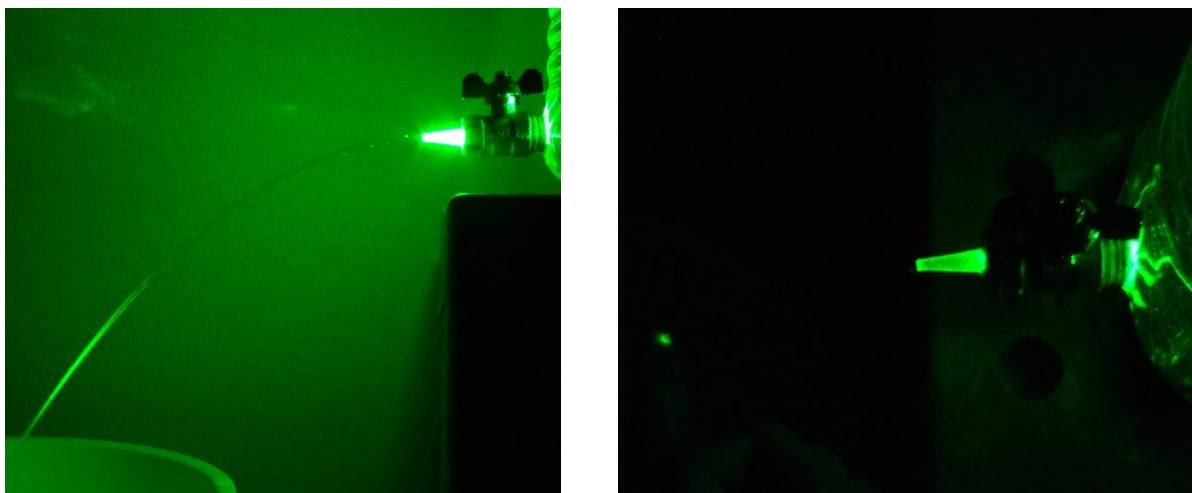
Obr. 32: Fotografie soupravy pro experiment: Tekoucí proud vody jako optické vlákno.

Postup

1. Průhlednou nádobu s ventilem umístěte na stojan a naplňte vodou.
2. Připevněte laser do aparatury několik centimetrů za nádobu.
3. Nastavte laser tak, aby byl ve stejné výšce jako ventil a zároveň skrz ventil a stěnu nádoby mohl svítit.
4. Zhasněte světla v místnosti a posviťte laserem skrz nádobu.
5. Otevřete ventil nádoby.

Obrázky





Obr. 33: Snímky jednotlivých proudů vody.

Diskuse

V pokusu šlo o demonstraci aplikace Snellova zákona využívaného např. v optických kabelech. Jako simulace prostředí optického kabelu nám posloužila tekoucí voda. Pokus ukázal, jak vynálezy dnešní doby (optické kabely z křemíkového skla) mohou mít analogii v něčem tak jednoduchém, jako je proud vody. Doslova jen pomocí vody a laseru jsem dokázal principiálně napodobit jeden z nejvýznamnějších prostředků přenosu informací, které lidstvo využívá.

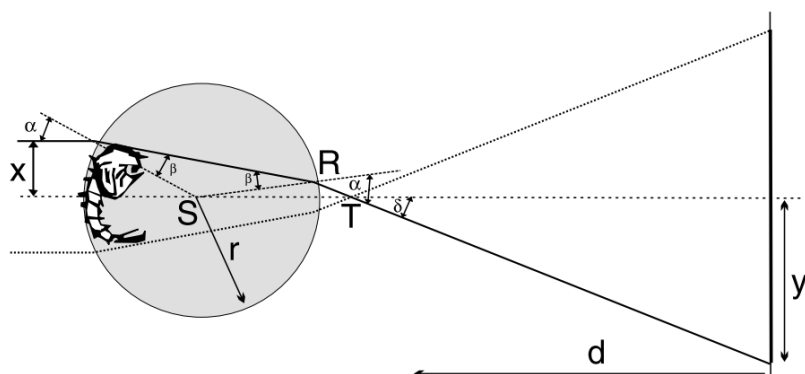
Vytvoření vyhovující nádoby s ventilem bylo poměrně náročné. Názornost experimentu však tuto práci vykompenzovala. Na fotkách (Obr. 33) je dobře vidět, jak se na začátku těsně za ventilem světlo odráželo uvnitř proudu vody. Na fotkách v pravé části je poté vidět, jak se část světla dopravila i na povrch ruky, vložené do proudu vody.

V tomto pokusu bylo třeba dbát obzvláště zvýšené opatrnosti. Plastová nádoba nebo případný kovový ventil mohly při zasažení laserovým paprskem světlo odrazit a mohlo tak opět dojít k poškození očí. Z tohoto důvodu bych pokus v této podobě nedoporučoval provádět před studenty (maximálně za použití slabšího laseru, nebo s kompletním zakrytím nádoby). Popřípadě je možné experiment natočit na video a studentům pustit ze záznamu.

3.5 Mikroskop z laseru (*droposcope*)

Droposcope je zařízení podobné primitivnímu mikroskopu. Zařízení funguje tak, že je paprskem laseru posvíceno na kapku vody a její obsah je zobrazen na stínítko (Obr. 34). Kapka

vody funguje jako malá sférická optická čočka. Při průchodu světla kapkou dochází k lomu na rozhraní voda/vzduch, což způsobuje tvorbu zvětšeného obrazu na stínítku za kapkou (PLANINSIC, 2001).



Obr. 34: Geometrický popis pokusu, kde r je poloměr kapky, d je vzdálenost kapky od stínítka, x je velikost předmětu v kapce, y je velikost obrazu na stínítku (PLANINSIC, 2001).

Paprsek přicházející do kapky těsně nad objektem, který chceme pozorovat, se na rozhraní obou prostředí při vstupu do kapky a výstupu z ní láme. Dopadá poté na stínítko ve vzdálenosti y od hlavní geometrické osy. Hodnota y se dá snadno spočítat ze vzdálenosti kapky d od stínítka a úhlu δ (PLANINSIC, 2001).

Z obrázku lze vypočítat, že hodnotu úhlu δ lze vypočítat podle vztahu

$$\delta = 2(\alpha - \beta) \quad (3.9)$$

hodnoty α , β lze vypočítat ze vztahu (3.6) přičemž pro vzduch platí $n_1 = 1,0003$ a pro vodu platí $n_2 = 1,33$, $\theta_1 = \alpha$ a $\theta_2 = \beta$. Pro malé úhly α platí, že $\alpha = x/r$, pro úhel δ tedy platí

$$\delta = 2\left(\arcsin \frac{x}{r} - \arcsin \frac{x}{n_2 r}\right) \quad (3.10)$$

Nachází-li se měřené těleso poblíž geometrické osy, dá se při malých hodnotách uhlů α a β , za pomoci aproximace $\arcsin(z) \approx z$ (pro $z \approx 0$), popsat velikost úhlu δ následující rovnicí (PLANINSIC, 2001).

$$\delta = 2 \frac{x}{r} \left(1 - \frac{1}{n_2}\right) \quad (3.11)$$

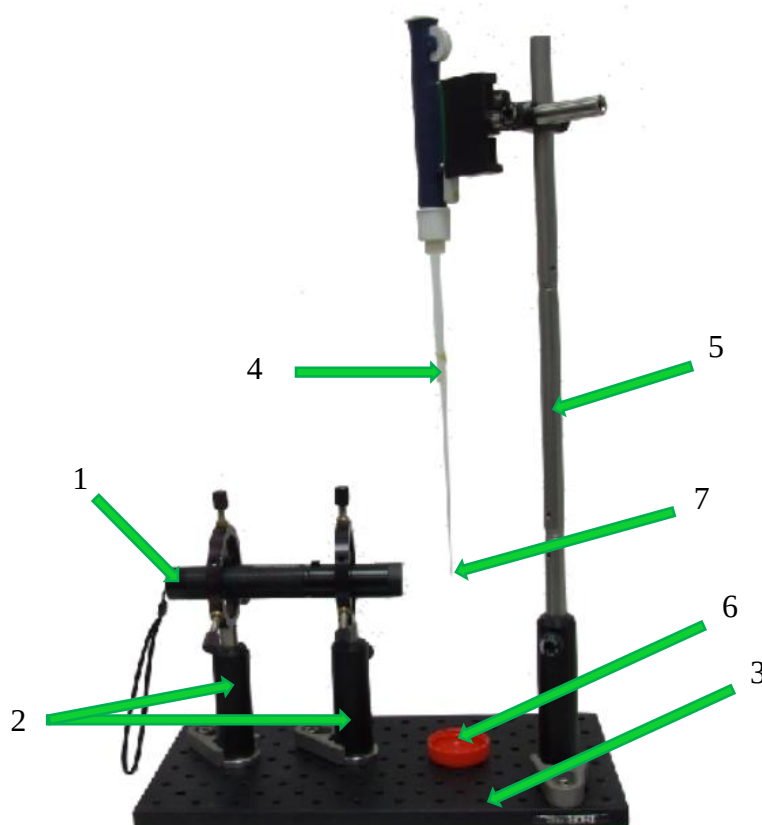
Celkové zvětšení výsledného obrazu oproti objektu lze vypočítat jako poměr jejich velikostí pomocí aproximace $\tan(\delta) \approx \delta$. Platí tedy

$$M = \frac{y}{x} = \frac{d \tan(\delta)}{x} \approx 2 \frac{d}{r} \left(1 - \frac{1}{n_2}\right) \quad (3.12)$$

kde M je celkové zvětšení (PLANINSIC, 2001).

Pomůcky

1 – laserové ukazovátko, 2 – stojany na laser, 3 – optická deska, 4 – pipeta, 5 – stojan na pipetu, 6 – odkapávač, 7 – kapka vody s preparátem (Obr. 35)



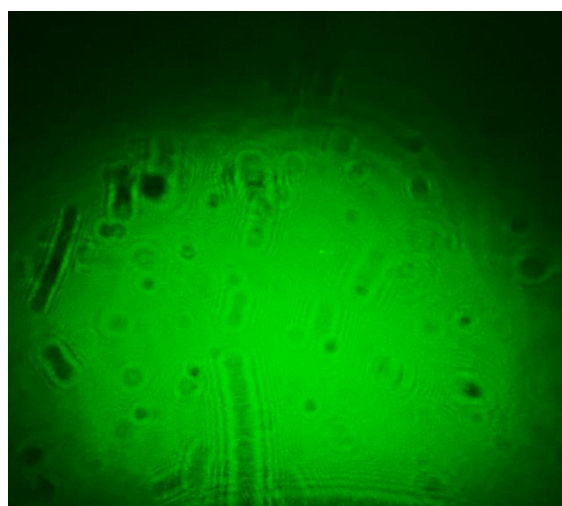
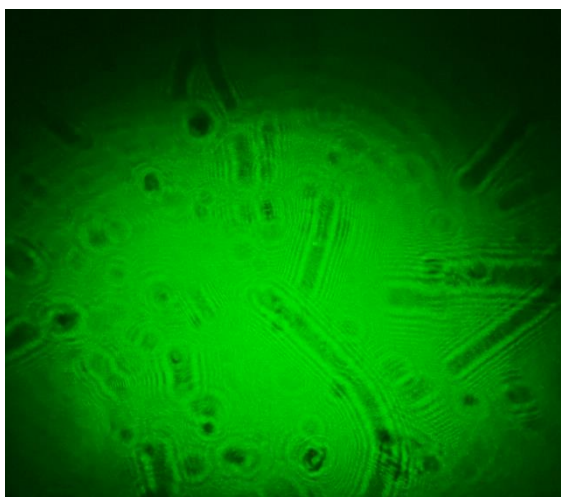
Obr. 35: Fotografie soupravy pro mikroskop z laseru (*droposcope*).

Postup

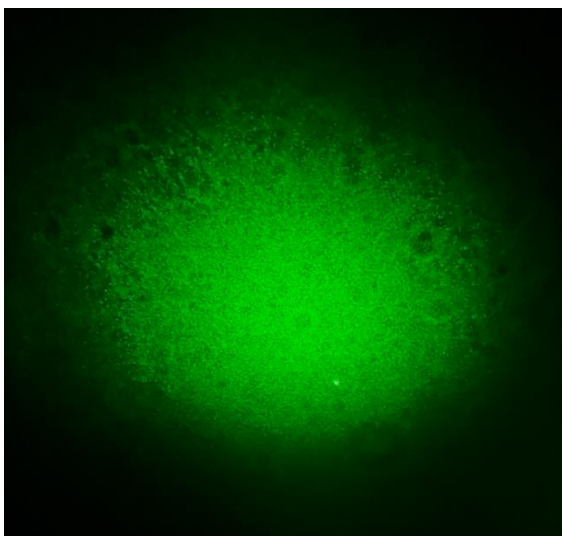
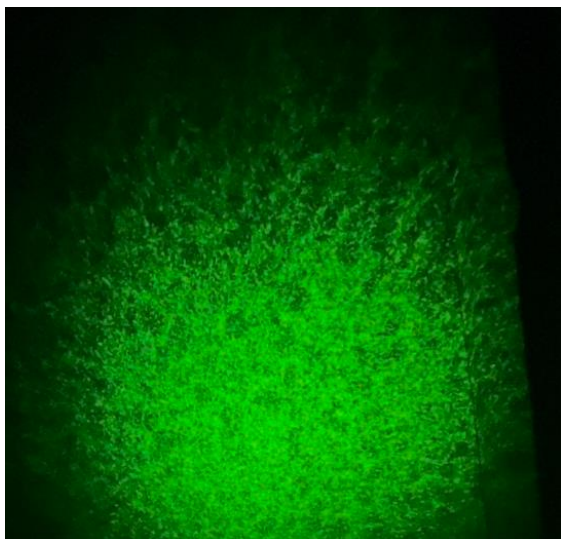
1. Upevněte laser do aparatury s nastavitelnou výškou.
2. Umístěte aparaturu do známé vzdálenosti od stínítka (v mém případě 4 metry).
3. Do pipety naberte vodu s preparátem a umístěte jí do držáku.

4. Pomocí kolečka na pipetě vytvořte na jejím konci kapku vody.
5. Laser nastavte tak, aby při posvícení paprsek procházel kapkou.
6. Zhasněte světla v místnosti a laserem posviťte skrz kapku.

Obrázky

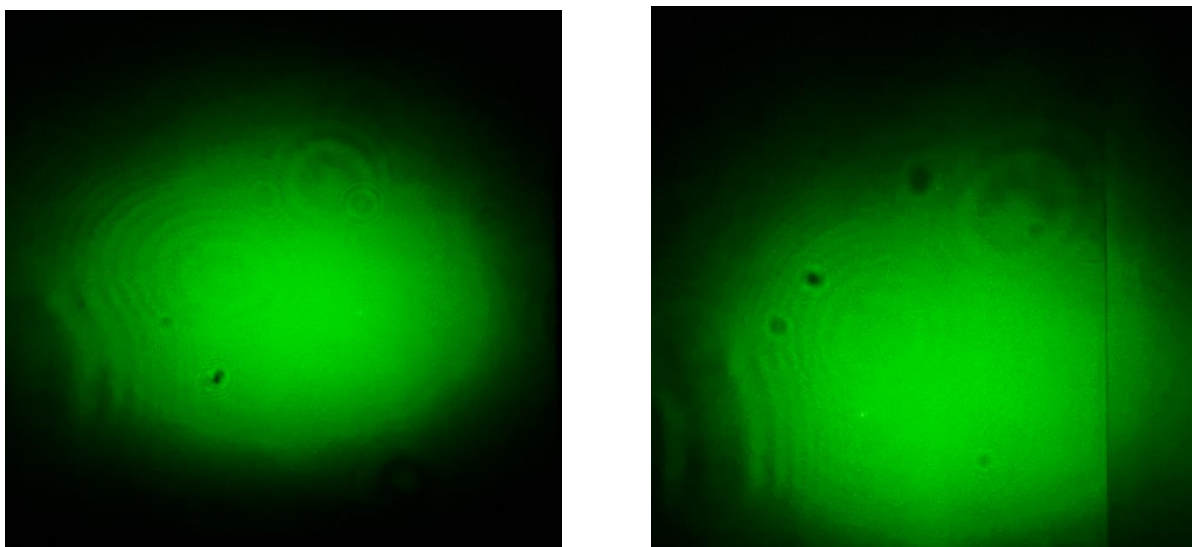


Obr. 36: Projekce obsahu kapky vody z jezírka.



Obr. 37: Projekce obsahu kapky vody s kulturou z biologické laboratoře – Speckle obrazec (viz. níže).

“*Speckle*“ obrazec je výsledkem náhodného rozložení intenzity při odrazu koherentního světla (laseru) od hrubého povrchu, nebo při prostupu médiem s kolísavým a nehomogenním indexem lomu (Obr. 37) (DAINTY, 1975).



Obr. 38: Projekce obsahu kapky vody z kohoutku.

Diskuse

Cílem pokusu bylo vést paprsek kapkou vody na pipetě a zobrazit tak její obsah. V pokusu jsem zkoumal 3 kapky s různými obsahy.

V první kapce byla použita voda z jezírka. Podle Obr. 36 se mohlo jednat o sinice, řasy nebo jiné vláknité útvary. Jejich projekce na stínítku byla čistá a obraz byl kvalitní.

V druhé kapce se nacházela čistě pěstovaná a kontrolovaná kultura z biologické laboratoře (Obr. 37). V použité kultuře se nachází velký počet malých organismů. Kvalita snímku je zatížená *speckle* šumem.

Třetí kapka byla voda z kohoutku (Obr. 38). Na obrázku lze vidět, že voda je, až na pár částíček, relativně čistá. Jedná se o nečistoty přítomné v každé nefiltrované vodě, kterou pijeme. Podobně jako u první projekce je vidět kolem objektů v kapce interferenční obraz. Dochází totiž k difrakci na hranách objektů v kapce.

Experiment není těžké zrealizovat a výsledek v podobě projekce obsahu kapky vody jen s pomocí laserového ukazovátka je pro studenty názorný. Demonstruje vlnové vlastnosti světla, protože dochází k lomu a difrakci přesně podle toho, jak jej vlnová teorie světla popisuje. Dá se také říci, že se jedná o použití jednoduché čočky.

Během experimentu je opět třeba dbát zvýšené opatrnosti. Od kulového povrchu kapky se může bližším pozorovatelům paprsek odrazit do oka. Pokus není těžký na zrealizování, ale

existuje limit počtu objektů, které jsou tímto experimentem pozorovatelné. Do kapky je možné umístit kromě biologických kultur i menší hmyz.

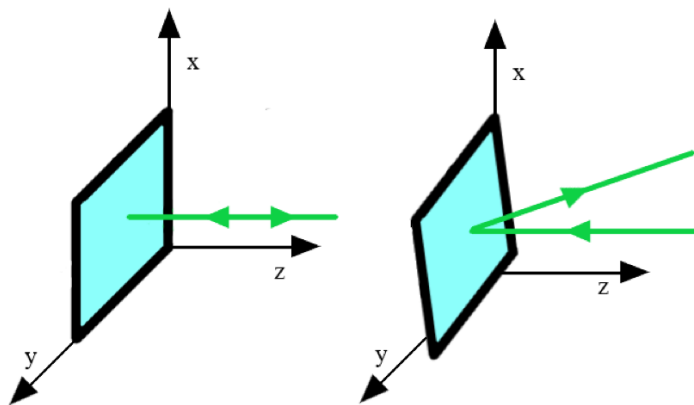
Podle vzorce (3.12) lze vypočítat zvětšení dané aparatury. Výsledek byl $M \approx 1985$. To znamená, že můžeme změřit rozměry zobrazovaných objektů a z nich vypočítat skutečné rozměry předmětů v kapce a např. je dále porovnat s rozměry nalezenými na internetu.

3.6 Zobrazení vibrací pomocí laseru

V tomto pokusu budeme zobrazovat oscilační pohyb pomocí laseru. Oscilační pohyb je popsán frekvencí a amplitudou daného kmitání a vykonává ho tzv. oscilátor. Nejjednodušším příkladem oscilátoru je kyvadlo (např. na kyvadlových hodinách). Oscilátor může kmitat ve více směrech. Počet směrů, kterými může oscilátor vykonávat kmitavý pohyb, se nazývá počet stupňů volnosti (HALLIDAY ET AL., 2013).

Složené kmitání je kmitání, které nastává, když bod koná více kmitavých pohybů najednou. Jeho okamžitá výchylka se rovná součtu výchylek kmitání, ze kterých je složeno. Platí tzv. princip superpozice. Mají-li kmitání v navzájem kolmých přímkách určité frekvence, vznikají charakteristické křivky, tzv. *Lissajousovy obrazce* (PAUK & KRČMÁŘ, 2009).

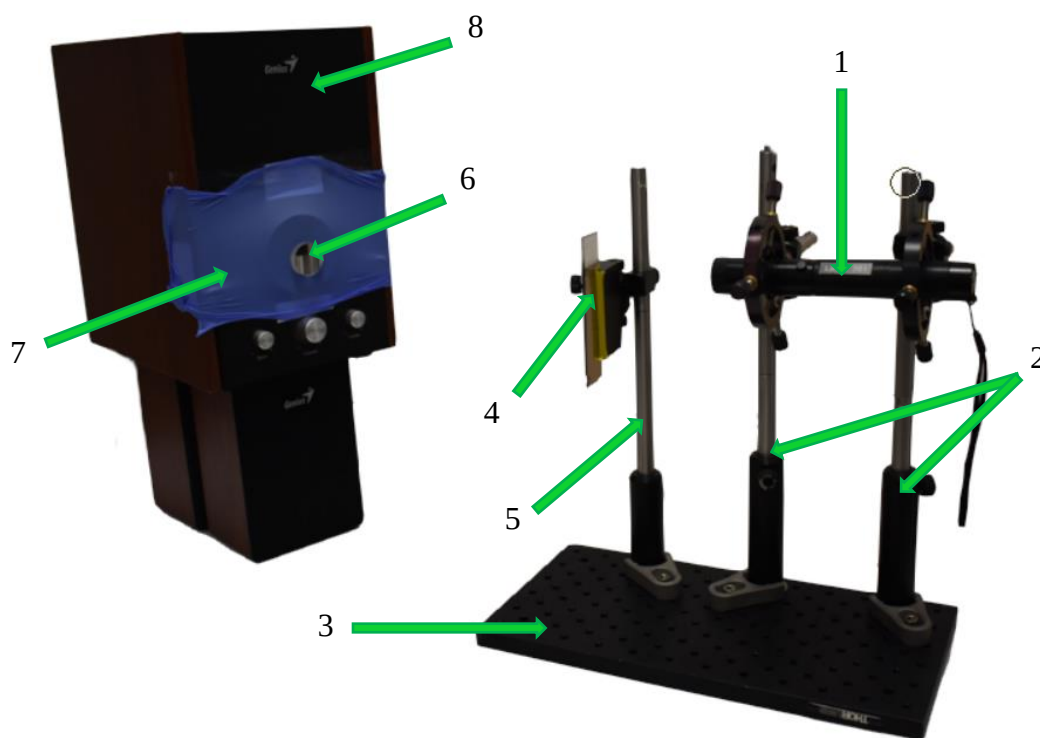
V tomto pokusu bude jako oscilátor sloužit zrcátko nalepené na buben subwooferu (basového reproduktor). Když souprava hraje, buben se vychyluje ve směru všech tří souřadnic. Jelikož se ale jedná o odraz na zrcadle, samotná změna polohy posunutím zrcadla by v žádné ze souřadnic (x , y , z) zrcadla s výsledným obrazem nic neudělala. Půjde o naklánění a vyklánění roviny zrcadla z výchozí polohy, což zapříčiní zobrazení těchto oscilací (Obr. 39). Ačkoliv by toto kmitání šlo těžce popsat, výsledek projekce bude podobný jako složení dvou na sebe kolmých oscilačních pohybů (PAUK & KRČMÁŘ, 2009).



Obr. 39: Kmitání zrcátka ve směru (x, y, z) (zdroj: vlastní zpracování).

Pomůcky

1 – laserové ukazovátko, 2 – stojany na laser, 3 – optická deska, 4 – optický filtr, 5 – stojan na optický filtr, 6 – zrcátko, 7 – latexová rukavice, 8 – subwoofer, nůžky, lepicí páska, notebook nebo jiné zařízení pro zapojení audiokabelu soupravy (Obr. 40)



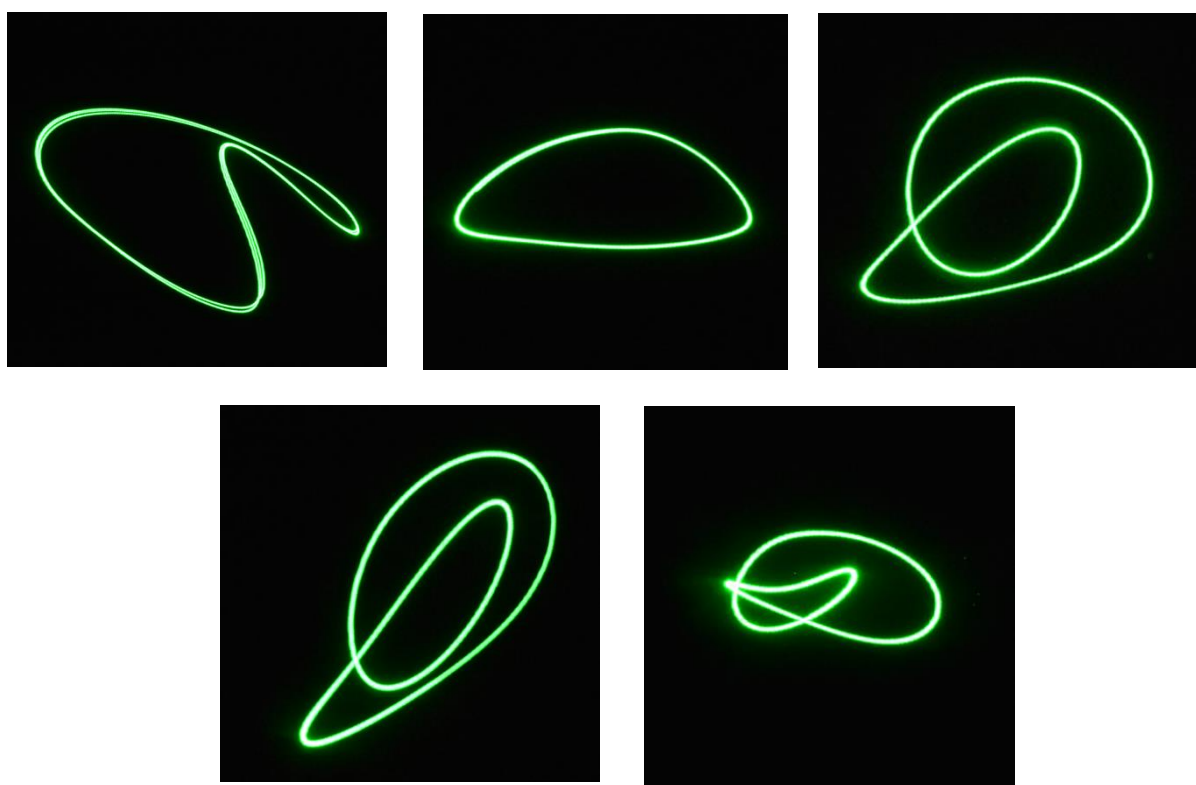
Obr. 40: Fotografie soupravy pro experiment: Zobrazení vibrací pomocí laseru.

Postup

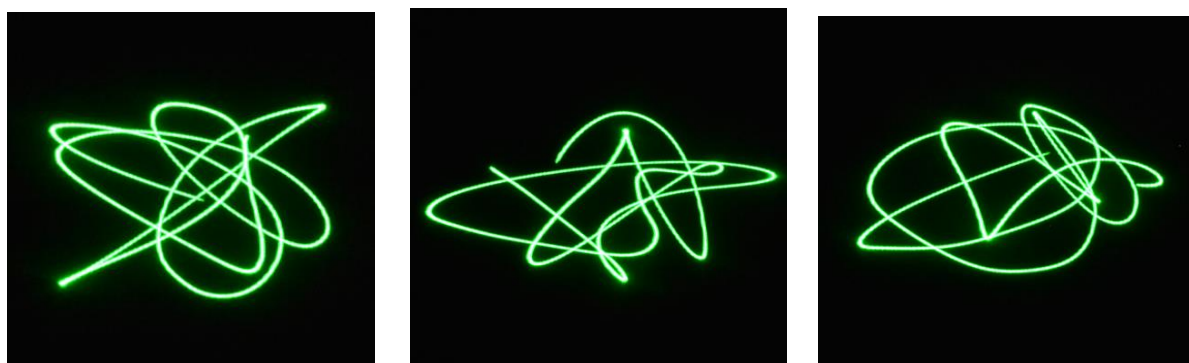
1. Rozstříhejte latexovou rukavici (popř. nafukovací balonek) tak, aby vznikla co největší rovná plocha.
2. Napněte latex a lepicí páskou ho přilepte k subwooferu tak, aby zakrýval hlavní otvor bedny subwooferu.
3. Na rukavici přibližně doprostřed hlavního otvoru umístěte zrcátko (oboustranná lepenka je vyhovující).
4. Subwoofer s rukavicí a zrcátkem umístěte do vzdálenosti 1–2 m od stínítka tak, aby strana se zrcátkem byla otočena směrem ke stínítku.
5. Laser upevněte do aparatury a nastavte ho před subwoofer se zrcátkem tak, aby se paprsek odrážel od nalepeného zrcadla a dopadal na stínítko.

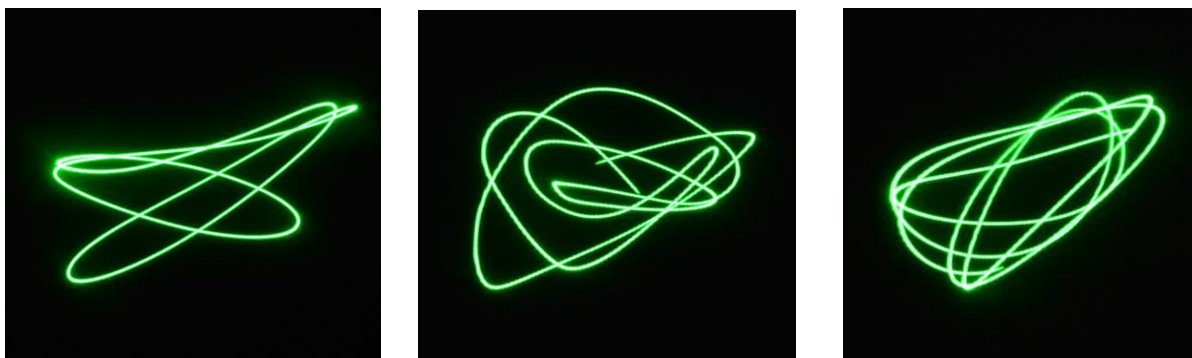
6. Před laser umístěte optický filtr.
7. Subwoofer zapojte ke zdroji (v tomto případě mobilní telefon).
8. Zhasněte světla v místnosti a laserem posviťte na zrcátko.
9. Na mobilním telefonu pomocí webové stránky <https://www.szynalski.com/tone-generator/> (nebo jiné stránky pro generování tónů) generujte tóny o různých frekvencích.
10. Poté pomocí hudební aplikace v telefonu pusťte hudbu a pozorujte rozdíly mezi oběma případy.

Obrázky



Obr. 41: Zobrazení vibrací stálých frekvencí.





Obr. 42: Zobrazení vibrací hudby.

Diskuse

V pokusu se díky odrazu na oscilujícím zrcátku podařilo vytvořit vzory připomínající Lissajousovy obrazce. Právě Lissajousovy obrazce vznikají skládáním kolmých kmitů a jejich tvar je dán známým poměrem úhlových frekvencí (PAUK & KRČMÁŘ, 2009). Vzory v tomto experimentu vznikly složením chaotických kmitání membrány latexové rukavice v různých směrech (ne nutně kolmých). Výsledkem byly tedy více neuspořádané obrazce, jen podobné těm Lissajousovým.

Bylo zajímavé pozorovat vzory vytvořené jednotlivými frekvencemi a vzory vytvořené hudbou. Na první pohled je vidět že hudební vzory jsou více chaotické. Vibrace, které připojený subwoofer generoval, byly totiž v případě hrající hudby, proměnlivé a všeobecně více chaotické než u vibrace generované jednotlivými tóny. Oscilace membrány, která tyto vibrace vstřebávala, byla tedy v obou případech rozdílná. Rozdíl je vidět na výsledných fotografiích.

Zajímavý byl také způsob, kterým jsem fotografie pořizoval. Zatímco u hudebních oscilací jsem musel nastavit dobu expozice, která zachytila obrazce v rozumném rozsahu, u oscilací se stálou frekvencí to bylo jedno. Při stálé frekvenci se zformuloval obraz, který se v čase neměnil. Laser totiž opisoval tu samou dráhu dokola. To je vidět na fotografiích (Obr. 41) a na faktu, že všechny vzory jsou uzavřené obrazce. Naproti tomu je vidět na Obr. 42, že obrazce vznikající při oscilacích způsobených hudbou mají začátek a konec. Nejsou to uzavřené křivky.

Experiment byl obtížný na přípravu i na provedení. Pomůcky potřebné k provedení pokusu musely být speciálně zakoupeny. Pokud je sklíčko nalepené na latexu moc těžké, po

relativně krátké době může dojít k jeho odpadnutí. Když jsem prováděl experiment delší dobu, musel jsem upadlé sklíčko pravidelně připevňovat zpět. S tím souvisí neustálé opotřebovávání latexové rukavice, která tak lehce praskne. Tento pokus byl ale zdaleka vizuálně nejefektivnější ze všech pěti pokusů v této práci.

Riziko pokusu je také zvýšené, jedná se o manipulaci s oscilujícím kouskem skla, které se může nepředvídatelně uvolnit ze své pozice. Je proto třeba dbát zvýšené opatrnosti.

4 Závěr

Cílem teoretické části této práce bylo poskytnout historický přehled vývoje názoru na povahu světla a objasnit důvody, které vedly k jednotlivým závěrům fyziků, kteří se touto otázkou zabývali. V práci jsem vytvořil stručný přehled se zaměřením na nejdůležitější milníky, objevy a vynálezy v historii optiky, které definovaly její vývoj.

Kromě fakticky podloženého náhledu do historie vývoje světla, obsahuje teoretická část i úvahu o tom, co pro nás světlo znamená a jak je pro nás důležité.

Na konci teoretické části jsem popsal historii a princip prvního laseru, metodu stimulované emise a vlastnosti laserového světla.

Hlavním cílem praktické části bylo realizovat pět pokusů s využitím laseru, proveditelných s běžnými pomůckami. Všech pět pokusů se mi podařilo provést bez větších problémů a jejich výsledky jsem úspěšně zachytil na obrázcích. Na konci každého z pokusů diskutuji obtížnost provedení pokusu, upozorňuji na možné problémy s přípravou i provedením a poukazuji na zajímavé momenty průběhu pokusů.

Praktická část také slouží jako návod pro učitele na středních i vysokých školách, kteří by chtěli podobné pokusy před studenty demonstrovat. Učitelé se zde mohou inspirovat při provádění základních fyzikálních pokusů s laserem.

5 Literatura

- Brooks, M., 2011: Velké otázky, Praha: Knižní klub, Universum (Knižní klub), ISBN 978-80-242-3065-8.
- Brunner, R., Geißler, E., Messerschmidt, B., Dietrich, M., Soergel, E., Inoue, K., Ohtaka, K., Ghatak, A., Thyagarajan, K., 2007: Advanced Optical Components, Springer handbook of lasers and optics, Dordrecht: Springer, ISBN 978-3-642-19408-5.
- Dainty, J. C., 1975: Laser Speckle and Related Phenomena, Berlin: Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, Topics in Applied Physics, ISBN 978-3-662-43207-5.
- Gross, A. J., Herman, T. R. W., 2007: History of lasers, World journal of urology.
- Haglund, R., 2007: The Properties of Light, Springer handbook of lasers and optics, Dordrecht: Springer, ISBN 978-3-642-19408-5.
- Halliday, D., Resnick, R., Walker, J., 2013: Fundamentals of physics, 8th edition, John Wiley & Sons.
- Hecht, E., 2017: Optics, 5th edition, global edition, Boston: Pearson Education Limited, ISBN 1-292-09693-4.
- Hecht, J., 2010: The First Half-Century of Laser Development: How a solution that once was looking for a problem has become part of everyday life, Laser Technik Journal.
- Jenkins, F. A., White H. E., Bruckhard, D. G., 1976: Fundamentals of Optics, American Journal of Physics.
- King, H. C., 1955: The History of the Telescope, Griffin, New York.
- Kraus, I., 2007: Fyzika od Thaléta k Newtonovi – kapitoly z dějin fyziky, Praha: Academia, Galileo, ISBN 978-80-200-1540-2.
- Lauginie, P., 2004: Measuring speed of light: why? speed of what? International Conference for History of Science in Science Education.
- Lear, J., 2016: Aristotelés: Touha rozumět, Přeložil Jinek, J., Praha: Oikúmené (OIKOYMENH) 2016, ISBN 978-80-7298-222-6.
- Lefèvre, W., 2007: Inside the Camera Obscura – Optics and Art under the Spell of the Projected Image.

- Montwill, A., Breslin, A., 2012: The quantum adventure: does God play dice? World Scientific, ISBN 978-1-84816-647-9.
- Passon, O., 2022: The Quasi-History of Early Quantum Theory, ISSN 2624-8174.
- Pauk, J., Krčmář, M., 2009: Lissajousovy obrazce.
- Planinsic, G., 2001: Water-drop projector, The Physics Teacher journal.
- Saleh, B. E. A., Teich, M. C., 1991: Fundamentals of photonics, New York: John Wiley, Series in pure applied optics (Wiley), ISBN 0-471-83965-5.
- Schulmeister, K., 2015: Classification of extended source products according to IEC 60825-1, DOI: 10.2351/1.5056849.
- Spence, J. C. H., 2020: Lightspeed: The Ghostly Aether and the Race to Measure the Speed of Light, ISBN 978-0-19-884196-8.
- Štoll, I., 2009: Dějiny fyziky, Praha: Prometheus.
- Williams, B., 1999: A History of Light and Lighting, Edition: 2.2, Professional Lighting Resources.
- Zubairy, M., 2016: A Very Brief History of Light, Optics in Our Time, ISBN 978-3-319-31902-5.

6 Internetové zdroje

Ash, A., 2023: Why Does Light Exist? What is Its Purpose? Youtube video. Dostupné z: <https://youtu.be/uT-6YVrecro> (citováno duben 2023).

Cleveland, C., Morris, C., 2019: Spectral irradiance, Science Direct 2019. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/spectral-irradiance> (citováno duben 2023)

Fowler, M., 1995: Maxwell's Equations and Electromagnetic Waves. Dostupné z: http://galileo.phys.virginia.edu/classes/109N/more_stuff/Maxwell_Eq.html (citováno březem 2023).

Johnson-Groh, M., 2021: Beyond telecommunications. Dostupné z: <https://spie.org/news/photonics-focus/septoct-2021/fiber-optic-cables-enable-deep-ocean-science> (citováno březem 2023).

NASA 2013: Discovering the Electromagnetic Spectrum. Dostupné z: https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/history_multiwavelength1.html (citováno březem 2023).

NASA 2020: Laser Beams Reflected Between Earth and Moon Boost Science. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/goddard/2020/laser-beams-reflected-between-earth-and-moon-boost-science> (citováno březem 2023).

Online Tone Generator. Dostupné z: <https://www.szynalski.com/tone-generator/>

Seznam obrázků

Obr. 1: Schéma zařízení camera obscura (zdroj: vlastní zpracování).....	4
Obr. 2: Schéma Galileova dalekohledu (zdroj: vlastní zpracování).	5
Obr. 3: Rozdíl vzdáleností Země – Jupiter z pokusu Oleho Roemera (zdroj: vlastní zpracování).	6
Obr. 4: Schéma metody ozubeného kola (zdroj: vlastní zpracování).	6
Obr. 5: Huygensův – Fresnelův princip. Šedé vlny ukazují, jak by se vlnění šířilo ze čtyř znázorněných bodů. Zelené vlny ukazují, jak se skutečně šíří. Na obrázku lze vidět, že si tyto případy navzájem odpovídají (zdroj: vlastní zpracování).	7
Obr. 6: Disperze bílého světla na hranolu a následné složení barevných složek (zdroj: vlastní zpracování).	8
Obr. 7: Disperze bílého světla na hranolu a následný lom červené složky světla (zdroj: vlastní zpracování).	9
Obr. 8: Schéma Youngova experimentu se dvěma štěrbinami (zdroj: vlastní zpracování). ...	9
Obr. 9: Destruktivní interference vln A, B a výsledná vlna C (zdroj: vlastní zpracování). ...	10
Obr. 10: Konstruktivní interference vln A, B a výsledná vlna C (zdroj: vlastní zpracování).	10
Obr. 11: Schéma pokusu hledání Poissonova bodu (zdroj: vlastní zpracování).....	11
Obr. 12: Kmitání složek elektrického a magnetického pole světla (zdroj: vlastní zpracování).	12
Obr. 13: Elektromagnetické spektrum s rozsahy vlnových délek pro jednotlivé typy záření (zdroj: vlastní zpracování).....	13
Obr. 14: Nalevo princip Michelsonova–Morleyova experimentu: Soustava A se pohybuje éterem a Země se v pozici Z1 pohybuje vůči směru pohybu éteru jinak než Země v pozici Z2. To by mělo způsobit rozdíl v naměřených rychlostech světla v obou pozicích. Napravo schéma Michelsonova–Morleyova experimentu (zdroj: vlastní zpracování).....	14
Obr. 15: Spektrum slunečního záření – množství dopadajícího záření v závislosti na vlnové délce (US DEPARTMENT OF ENERGY, 2013).	15
Obr. 16: Schéma fotoelektrického jevu (zdroj: vlastní zpracování).	16
Obr. 17: Feynmanův diagram – interakce dvou elektronů. Nalevo je znázorněno jednoduché vyzaření fotonu z elektronu a následná změna dráhy částice v čase. Napravo je vidět jak	

vyzáření, tak přijetí energie fotonu jiným elektronem, přičemž oba elektrony (ten, který odevzdal, i ten, který přijal energii fotonu) změnily směr (MONTWILL & BRESLIN, 2012). ..	18
Obr. 18: Schéma prvního funkčního rubínového laseru (zdroj: vlastní zpracování).	20
Obr. 19: Schématické znázornění rozdílů mezi absorpcí, spontánní emisí a stimulovanou emisí (a, b, c). Na levé straně od šipky je výchozí stav, na pravé straně stav po interakci. Šipka nese název interakce (HALLIDAY ET AL., 2013).	21
Obr. 20: Geometrické schéma pokusu: r je vzdálenost vlasu od stínítka, l vzdálenost interferenčního maxima od centrálního paprsku a θ je úhel mezi přímkou procházející centrálním paprskem laseru a přímkou spojující vlas s interferenčním maximem (zdroj: vlastní zpracování).	24
Obr. 21: Fotografie soupravy pro experiment: Měření tloušťky lidského vlasu.	25
Obr. 22: Výsledné interferenční obrazce na stínítku.....	27
Obr. 23: Lom světla ke kolmici $n_1 < n_2$ (zdroj: vlastní zpracování).	28
Obr. 24: Lom světla od kolmice $n_1 > n_2$ (zdroj: vlastní zpracování).	28
Obr. 25: Lom světla zobrazený pomocí vlnoploch (HECHT, 2017).	29
Obr. 26: Schéma prostřední solného roztoku v akváriu. Na obrázku jsou zobrazeny hodnoty jednotlivých úrovní akvária $n_1, n_2, n_3 \dots n_n$, pro která platí $n_1 < n_2 < n_3 < \dots < n_n$ (zdroj: vlastní zpracování).	30
Obr. 27: Fotografie soupravy pro experiment: Ohyb paprsku v solném roztoku.	30
Obr. 28: Ohyb paprsku v solném gradientu roztoku.	31
Obr. 29: Průřez optickým kabelem (vlnovodem) (zdroj: vlastní zpracování).	33
Obr. 30: Totální vnitřní odraz a kritický úhel (e) (zdroj: vlastní zpracování).	33
Obr. 31: Schéma distribuce paprsků světla v optickém kabelu (nahore) a distribuce paprsků světla v proudu vody (dole) (zdroj: vlastní zpracování).	34
Obr. 32: Fotografie soupravy pro experiment: Tekoucí proud vody jako optické vlákno....	35
Obr. 33: Snímky jednotlivých proudů vody.	36
Obr. 34: Geometrický popis pokusu, kde r je poloměr kapky, d je vzdálenost kapky od stínítka, x je velikost předmětu v kapce, y je velikost obrazu na stínítku (PLANINSIC, 2001).	37
Obr. 35: Fotografie soupravy pro mikroskop z laseru (droposcope).	38
Obr. 36: Projekce obsahu kapky vody z jezírka.	39

Obr. 37: Projekce obsahu kapky vody s kulturou z biologické laboratoře – Speckle obrazec (viz. níže).....	39
Obr. 38: Projekce obsahu kapky vody z kohoutku.	40
Obr. 39: Kmitání zrcátka ve směru (x,y,z) (zdroj: vlastní zpracování).....	41
Obr. 40: Fotografie soupravy pro experiment: Zobrazení vibrací pomocí laseru.	42
Obr. 41: Zobrazení vibrací stálých frekvencí.	43
Obr. 42: Zobrazení vibrací hudby.	44

Seznam tabulek

Tab. 1: Naměřené hodnoty vzdáleností interferenčních maxim od centrálního paprsku a vypočtené hodnoty úhlu θ	26
Tab. 2: Výsledné hodnoty tloušky vlasu	26