



**MATEMATICKO-FYZIKÁLNÍ  
FAKULTA**  
Univerzita Karlova

## **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Bc. Markéta Matějková

# **Difrakce a jiné optické jevy ve výuce fyziky na střední škole**

Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Zdeněk Drozd, Ph.D.

Studijní program: Učitelství fyziky pro střední školy

Studijní obor: FMUPN

Praha 2024

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval(a) samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů. Tato práce nebyla využita k získání jiného nebo stejného titulu.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V ..... dne .....

Podpis autora

Děkuji vedoucímu své diplomové práce doc. RNDr. Zdeňku Drozdovi, Ph.D. za cenné připomínky. Na konzultace byla radost chodit.

Děkuji svým přátelům RNDr. Tereze Košutové, Ph.D. za rozhovor a Mgr. Tomáši Kellovi, Ph.D. za humor a nekonečnou podporu.

Název práce: Difrakce a jiné optické jevy ve výuce fyziky na střední škole

Autor: Bc. Markéta Matějková

Katedra: Katedra didaktiky fyziky

Vedoucí diplomové práce: doc. RNDr. Zdeněk Drozd, Ph.D., Katedra didaktiky fyziky

Abstrakt: Práce se věnuje difrakci a dalším optickým jevům, se kterými je možné se setkat. Součástí diplomové práce je teoretický úvod k výuce difrakčních jevů na střední škole. Uvedeny jsou pomůcky, které výuku, tematicky zaměřenou na difrakci, vhodně doplní. První aktivita uvedená v práci využívá alba doc. Komrsky s difrakčními jevy a blíže je analyzuje. Druhá aktivita obsahuje rozhovor s mladou vědkyní Terezou Košutovou, která v rámci svého výzkumu využívá difrakce. Následující aktivity pokrývají širší škálu optických jevů. Součástí třetí aktivity je sada 34 fotografií optických jevů z let 2016–2023. Čtvrtá aktivita je matematickým cvičením prohlubujícím středoškolské početní dovednosti a argumentaci. Poslední aktivitou je projekt, který je navržen s důrazem na individuální přístup.

Klíčová slova: difrakce optický jev experiment aktivita projekt

Title: Diffraction and Other Optical Phenomena in High School Physics Education

Author: Bc. Markéta Matějková

Department: Department of Physics Education

Supervisor: doc. RNDr. Zdeněk Drozd, Ph.D., Department of Physics Education

Abstract: The thesis deals with diffraction and other optical phenomena that can be encountered. The diploma thesis includes a theoretical introduction to the teaching of diffraction phenomena in high schools. There are mentioned aids that will suitably complement the classes thematically focused on diffraction. The first activity mentioned in the thesis uses the album of doc. Komrska with diffraction patterns. The second activity includes an interview with a young scientist Tereza Košutová, who uses diffraction in her research. The following activities cover a wider range of optical phenomena. The third activity includes a set of 34 photographs of optical phenomena from years 2016–2023. The fourth activity is a mathematical exercise deepening high school mathematical skills and argumentation. The last activity is a project that is designed with an emphasis on an individual approach.

Keywords: diffraction optical phenomenon experiment activity project

# Obsah

Úvod	2
<b>1 Difrakční jevy</b>	<b>3</b>
1.1 Zdroje informací	3
1.1.1 Tištěné zdroje	3
1.1.2 Webové stránky	12
1.2 Difrakce (ohyb) světla	15
1.2.1 Huygensův princip	15
1.2.2 Vlnová podstata světla	16
1.2.3 Difrakce z hlediska aplikace	22
1.2.4 Difrakce z hlediska estetiky	25
1.3 Pomůcky – difrakce	29
1.3.1 Experimenty finančně dostupné pro školy	29
1.3.2 Pomůcky na KDF MFF UK	32
<b>2 Difrakční jevy – aktivity</b>	<b>38</b>
2.1 Aktivita č. 1: Cvičení: Příklady Fresnelových a Fraunhoferových ohybových jevů	39
2.2 Aktivita č. 2: Cvičení: Rozhovor s Terezou Košutovou	50
<b>3 Optické jevy okolo nás</b>	<b>54</b>
3.1 Teoretický úvod	54
3.1.1 Pomocná matematická a fyzikální tvrzení	55
3.1.2 Použití rozkladného hranolu	61
3.1.3 Atmosférická optika	64
3.1.4 Optické vlastnosti objektů	64
<b>4 Optické jevy okolo nás – aktivity</b>	<b>65</b>
4.1 Aktivita č. 3: Cvičení: Seznámení se s optickými jevy okolo nás	65
4.1.1 Způsoby využití aktivity	65
4.1.2 Komentáře k jednotlivým fotografiím	68
4.1.3 Didaktické poznámky	92
4.2 Aktivita č. 4: Cvičení: Užité tvrzení z odst. Pomocná matematická a fyzikální tvrzení	94
4.3 Aktivita č. 5: Projekt: Optické jevy v našich domácnostech	101
4.3.1 Náměty na optické jevy – interiér	111
<b>Závěr</b>	<b>118</b>
<b>Seznam použité literatury</b>	<b>119</b>

# Úvod

Tato diplomová práce se věnuje difrakci a dalším optickým jevům, se kterými se středoškolští studenti mohou setkat v rámci optiky a které jim mohou poskytnout odpovědi na vybrané otázky týkající se světla. Cílem práce je jednak doplnit materiály dohledatelné na webových stránkách a texty v učebnicích, především se však práce snaží ukázat, že fyzika je všude kolem nás, v běžných každodenních věcech (aktivita č. 3).

Optické jevy jsou v práci řazeny následujícím způsobem: nejprve se práce zabývá samotnou difrakcí (1. a 2. kapitola), která patří ke složitějším fyzikálním tématům probíraným na středních školách a mnohdy je z výuky vynechávána. Je však vhodným tématem pro semináře. Nejprve uvádíme text, který může posloužit jako podklad učitelům k semináři anebo jako studijní text nadaným studentům. Dále jmenujeme pomůcky, které se k výuce difrakce používají, oddělujeme nákladné od levnějších, uvádíme dvě aktivity k tématu difrakce, které lze zařadit do výuky. Následují další optické jevy (3. a 4. kapitola), které s difrakcí přímo souvisí (interference), anebo lze na ně pohlížet odděleně (odraz a lom, rozklad, rozptyl atd.). Aktivity k dalším optickým jevům předchází teoretický úvod.

Práce se snaží prohloubit individuální znalosti a schopnosti studentů: navržený projekt (aktivita č. 5) je ideálním materiálem pro učitele, kteří hledají aktivity, skrze které by se mohli dále rozvíjet nadaní studenti, navržen je však tak, aby ho bylo možné realizovat v celé třídě a studentům individuálně přizpůsobit. Talentovaní studenti mohou vybrané optické jevy podrobněji analyzovat (inspirovat se aktivitou č. 4). Podobně rozhovor s doktorandkou, mladou vědkyní, zabývající se fyzikou materiálů (aktivita č. 2), může být pro tyto studenty užitečným a velmi motivujícím zdrojem informací. První cvičení k difrakci (aktivita č. 1) je navrženo tak, aby si studenti všeobecně prohloubili smysl pro detail, je zdůrazněna důležitost odhadu a měření ve fyzice, těm, kteří obecně nerozumí grafům, je nabídnuta pomocná ruka, nadanějším má být rozšířen obzor.

Chronologické uspořádání vytvořeného materiálu může být následující: nejprve lze do výuky zařadit téma difrakce a další optické jevy ponechat jako opakující cvičení na konec tematického celku optika, nebo alternativně lze druhé části práce využít jakožto materiálu, který pokryje část výuky (předcházející difrakci). Součástí práce jsou také drobné vsuvky: triky či poznámky určené těm, kteří by se fyzice chtěli věnovat na vysoké škole.

# 1. Difrakční jevy

## 1.1 Zdroje informací

V této kapitole se budeme zabývat dostupnými texty a jinými materiály týkající se tématu difrakce, případně příbuznými tématy, na úrovni, která je vhodná pro středoškolské studenty. Vzhledem ke značnému množství internetových zdrojů rozdělíme tuto kapitolu na dvě podkapitoly: první se bude věnovat tematicce tištěných zdrojů, ta druhá vybraným webovým stránkám. (Text je psaný v plurálu, jde však o názory autorky této práce.)

### 1.1.1 Tištěné zdroje

Zabývejme se nejprve literaturou, konkrétně učebnicemi fyziky. Jako první jmenujme už řadu let používanou učebnici s názvem **Fyzika pro gymnázia – Optika** od doc. Lepila [1]. S touto učebnicí lze soustavně využívat také sbírku příkladů od stejnojmenného autora [2], alternativně [3]. Provedeme nezávislý rozbor zmíněné učebnice doc. Lepila a také dalších textů. Zhodnocení učebnic může být *a priori* velmi užitečné. Učitel si prohlédne literaturu a zváží, s jakými knihami se mu bude hezky pracovat. Promyslí, co je důležité. Učitel může využívat dostupné zdroje anebo, pokud má jiné představy či nápady, které chce sdílet, může sepsat vlastní texty. Takto v rukách pedagogů vznikla již řada tištěných publikací, například [4] a [5]. Pedagogové sdílejí své myšlenky prostřednictvím internetu – viz podkapitola 1.1.2. Učitelem používaná literatura by měla obsahovat nejméně to, čemu se vyučovat má.

Z důvodu, že jde stále o běžně používanou učebnici středoškolské fyziky, nyní věnujme více pozornosti Optice doc. Lepila. Zamysleme se nad tím, jakým způsobem na nás text působí. Čtenář by mohl označit text za „suchý výklad“. Důvod je následující: v knize chybí „uváděcí“ věty typu „Podívejme se na jevy světelné.“, které dodají textu filosofický ráz, a se kterým se člověk může setkat u jiných autorů, kteří jsou často teoretičtějšího založení, například [6]. „Podívejme se, co se se světlem může dít, když... a kde je možné tohoto chování využít,“ je podobná, rovněž účelná formulace, kterou text postrádá.

Podívejme se nyní na určité formulace, které se naopak v textu nachází. Na straně 107 (pracujeme s verzí učebnice z roku 2002) u obrázku 3-17 stojí: „snadno si představíme, že bodové zdroje světla na vlnoploše mají např. od bodu A různou vzdálenost a tedy světelné vlnění z jednotlivých zdrojů má v bodě A různou fázi“. Toto tvrzení však pro běžného studenta, který se chce o fyzice něco dovědět, vůbec není triviální. Předchozí odstavec má formu výkladu či povídání. Věty by mohly být formulovány lépe, se zdůrazněním předpokladů – podobně, jak je tomu v učebnici Optiky prof. Malého [7] a ve fyzikálních přednáškách Richarda Feynmana [8]. Další možností, jak by bylo možné text vylepšit, je jeho „matematizace“. Této problematice se v náznaku věnujeme dále v textu – viz podkapitola 3.1. Přeformulováním fyzikálních zákonitostí do přesnějšího matematického vyjadřování typu „věta - důkaz“ lze narazit na zajímavá „zákoutí“.

Nyní otočme list a podívejme se v Lepilově učebnici pod nadpis „Rozdělení ohybových jevů“. Zde stojí: „...teorii těchto jevů vypracoval francouzský fyzik Augustin Jean Fresnel“. Z kontextu není zřejmé, jestli se jednalo o hypotézu anebo popis učiněný na základě měření. Středoškolský student nemusí dojít ani k této úvaze, a co se skrývá pod „teorií jevů“, mu může být tiše skryto. Naopak podrobný komentář k tomu, jakým způsobem získali vědci své výsledky, nalezneme v učebnici doc. Daniše [9]. Ta vyhovuje názoru učitelů, kteří „by byli rádi, aby bylo studentům zprostředkováno, jak se věda dobrala k přelomovým myšlenkám“ [10]. Každý učitel si může zvolit, zda chce svým studentům říct něco o „principech fyziky“, tj. matematických a dalších úvahách či principech, které se v pokročilejší fyzice běžně užívají, postupech, na kterých fyzika stojí, anebo zůstane na úrovni „vzorečků, výpočtů, pokusů, obrázků a videí“. Další podstatnou informací může být to, zda popis Fresnela byl přesný, přibližný (aproximace) a pokud přibližný, tak do jaké míry byly jeho výpočty úspěšné. Jde o další „princip fyziky“.

Dalším předmětem diskuze by mohlo být samotné rozdělení Fraunhoferových a Fresnelových jevů. Není zde diskutována či nastíněna představa nekonečna („daleká zóna“) v případě Fraunhoferovy difrakce, jak je tomu v [7], namísto toho je nám rovnou předkládána soustava tvořená spojnou čočkou. V případě Fresnelovy difrakce není dostatečně zdůrazněno, že stínítko leží blízko překážky (zajímá nás průběh světelné intenzity v malé vzdálenosti za překážkou). Na následující straně je obrázek „K výkladu ohybu světla na štěrbině“. Graf „intenzity záření“ může být pro studenta velmi matoucí. Zaprvé: nachází se přímo v obrázku. Zadruhé: je otočený o devadesát stupňů. Zatřetí: zobrazuje osvětlení  $E$ , které je v učebnici prvně poněkud vágně zmíněno v souvislosti s interferencí a je zaměňováno za „intenzitu světla“. Amplituda vlnění je v souvislosti s „intenzitou světla“ rozebírána příliš stručně.

Autor nazve veličinu  $E$  „osvětlením“. Intuitivně chápeme, že autor chtěl ukázat, kde světlo „svítí nejvíce“, to lze vidět i na obrázku číslo 3-18: „Grafu osvětlení v ohybovém obrazci“. Pokud ale lpíme na tom, že chceme po studentech, aby dbali na popisování os, pak by to mělo být i v knihách, aby mohli mít před sebou vzor. Kdo ze studentů si všimne, že grafem není křivka, nýbrž plocha? Jak takový graf lze získat? To by také studenty mohlo zajímat. Učebnice doc. Lepila bohužel předkládá informace a my často netušíme souvislosti a především – a to je žalostné – si je neumíme vytvořit.

Autor dále tvrdí, že užší štěrbiná způsobuje výraznější ohyb. Jde o tvrzení, kterému můžeme věřit, ale bylo by hezké ho mít experimentálně ověřené či matematicky doložené (vzorec) anebo alespoň mít informaci o tom – opět jde o „princip fyziky“ – že ono „lze ukázat“, „lze změřit“ či „bylo dokázáno“ apod. My máme jako důkaz k dispozici obrázek, který je však poměrně „skrytý“ mezi dalšími. V textu doc. Lepila věnovanému difrakci se dále vyskytuje: „Ohybové obrazce, které vznikají při ohybu světla na různých překážkách, lze poměrně snadno modelovat pomocí počítače. Princip těchto modelů je jednoduchý. Rovinnou vlnoplochu nahradíme dostatečným počtem bodů ve stejné vzájemné vzdálenosti a vypočítáme příspěvek vlnění z jednotlivých bodů k celkovému osvětlení v uvažovaném bodě



stínítka.“ Student však možná netuší, co si má představit pod pojmem „modelování“ (a nemusel ani nikdy vidět počítačový kód).

Čtème dále text. Na čem všem se světlo může „ohýbat“, je řečeno mezi řádky, není to rozděleno či podrobněji analyzováno a už vůbec čtenář nezíská povědomí o tom, že autor píše o něčem, co se děje i „před zdmi“ laboratoře, ve které je vše „snadné“, leč nedostatečně pochopitelné. V kapitole 4 uvádíme aktivity, které mají připomenout studentovi, že fyzika se od nepaměti věnuje studiu přírody.

Shrneme-li témata v dosud námi reflektovaném textu, jde o: ohyb světla na hraně, rozdělení ohybových jevů a ohyb světla na štěrbině. Autor se dále zabývá souvislostí mezi difrakcí a rozlišovací schopností optických přístrojů. Novou podkapitolu poté tvoří „Ohyb světla na optické mřížce“. V ní se nejprve čtenář seznamuje s ohybem světla na dvou štěrbinách a řadě rovnoběžných štěrbin, poté následuje ohyb světla na optické mřížce. Obrázek 3-24 na straně 114 tvoří série tří grafů popisující intenzitu světla při ohybu na jedné, resp. dvou, resp. pěti štěrbinách. Zde najednou nemáme „osvětlení“, ale „intenzitu světla“. O jakou veličinu tedy jde? Jak kdy? Student bude zmatený. Studenta může rovněž „překvapit obálka“ tvořená přerušovanou čarou. Opět je třeba diskuze ohledně grafů a nenechat ji věci „zřejmosti“. Je škoda každého studenta, který by si seč svou snahu „učivo“ pochopit vypěstoval v sobě zbytečný pocit, že je hloupý. Vycházíme stále z předpokladu, že student se chce učit a má dostatečný talent.

Co by mohlo padnout jako dotaz z řad všímavých studentů, jsou krajní body závislosti 3-24 (c). Někdo by mohl očekávat funkci popisující „obálku“ konvergující k nule pro vzdálenost od středu stínítka jdoucí do záporného či kladného nekonečna. Problematice krajních bodů se věnuje práce [11]. V tomto případě ohybu na štěrbině jde však o to, že výslednou intenzitu záření dobře popisuje funkce  $(\sin\phi/\phi)^2$ , jak je uvedeno v [12], a my kromě centrálního maxima dostáváme také „vedlejší píky“. To na obrázku 3-24 (c) pro případ jedné štěrbiny nelze vidět. Daná problematika byla správně, byť šlo o devadesát stupňů otočený graf, ilustrovaná na obrázku 3-16 a plošném grafu 3-18. Mohlo by být zajímavé v tomto kontextu otestovat pozornost studentů nebo vytvořit podobně laděnou úlohu. V životě jde mnohdy o detaily.

Co se týče ohybu na optické mřížce, může být dále věcí diskuze, jestli je nutné, aby student věděl, jakým způsobem byla a je v současnosti zhotovována optická mřížka. Pakliže by měl být veden či motivován k tomu, aby si experimentoval doma sám, pak je otázka, jakým způsobem by mělo být toto v učebnicích prezentováno. Dále může být zajímavé se pokusit o výrobu na základě popisu a to už se blížíme vynálezu. Výroba optických mřížek je v námi studované učebnici optiky popisována poněkud stručně a nevede přímo k výše zmíněným úvahám, k zamyšlení, proč by o výrobě optické mřížky měli studenti něco vědět. Není zde uvedena formulace „vědci při experimentech používají optické mřížky“ či „vyrabí se optické mřížky a my si spočítáme. . .“. Avšak zamysleme se ještě nad tím, kam by vedla právě zmíněná formulace. Směřuje k seznámení se s tím, čemu se věnují druzí, ale přímo neupozorňuje na to, že se nás tato činnost může týkat, a to nejvíce, jak je možné. Knížka nevybízí k tomu, aby si student mřížku doma

sám sestavil či zjistil, jestli je to náročné atd. Není psaná jazykem, který touží či prahne po tom studentovi něco dát.

Podívejme se na další téma v knize. Je jím holografie. Poslední odstavec spěje ke zmínce o difrakční holografické optice. Zde je rozveden proces výroby optických mřížek a čtenář je nucen vypořádat se s „koherentním“ světlem, definovaným v první z předchozích kapitol o interferenci. Na základě předchozích úvah ohledně textu by mělo být jasné, proč se děti ptávají, na co jim něco z učiva optiky, potažmo fyzika bude k životu. V knize chybí oslovení čtenáře, kterého se naopak dopouští Richard Feynman ve svých přednáškách [8]. V knize není napřímo řečeno, že díky tomu, co studujeme, máme k dispozici techniku, která slouží v nemocnicích a zachraňuje lidem životy. Nejsme pobízeni k tomu, abychom se seznámili s prací druhých lidí, jejichž konání je společnosti přínosné a už vůbec nejsme vedeni k tomu, abychom si takových lidí vážili. Zde by se mohl někdo ozvat, že přece etika není věcí fyziky. Pak je ovšem otázka, kde se jí „dobrat“, pakliže chceme, aby byla v naší společnosti pěstována slušnost a nikoliv pouhá znalost faktů či schopnost si je vyhledat.

Nyní se vraťme k učebnicové reflexi. Skutečně je třeba si uvědomit, že jazyk, jakým je učebnice psaná, je zásadní. Někomu může forma textu zastiňovat obsah, možnosti jsou různé. Z důležitých faktů v rámečku se mohou stát poučky, z tematických nadpisů, jež slouží pořádku, prázdná slova na zvýraznění apod. Čím je text propracovanější, tím větší je šance, že se jeho poselství dostane k většímu množství čtenářů. Další zajímavou či důležitou informací pro studenty může být vědomí toho, kdo je autorem textu. Z obsahu textu lze odhadnout, o koho se jedná, ale člověk si stále může ověřit, zda jeho domněnka byla správná a udělat si lepší představu o pozadí. Z knížky Fyzika pro gymnázia – Optika lze kupříkladu hrubým pozorováním vyčíst, že se autor věnoval spíše experimentální či přístrojové fyzice a lze očekávat, že učebnice zpravidla více osloví budoucí fyziky – experimentátory než-li fyziky – teoretiky. Učebnice tedy může posloužit jakožto „slušný“ základ pro první skupinu studentů. Co si má ale počít fyzik – teoretik, ten, kterého zajímá poznání samo? Pro toho bude tato knížka (filosoficky) nedostatečná. Rovněž bude muset být více matematicky erudovaný. Další úhel pohledu může obsahovat otázku, jestli text už není v něčem zastaralý. Na některé odstavce je možné pohlížet také jako na „fyzikální dějepis“.

Difrakce se v učebnici optiky podrobněji vyskytuje ještě jednou, a to v již zmíněné kapitole 4: Elektromagnetické záření a jeho energie. V této kapitole se setkáváme s Laueovou difrakcí na krystalech, rtg strukturní analýzou a Braggovou rovnicí, včetně jejího odvození. Součástí této kapitoly i dříve rozebírené kapitoly zabývající se ohybem světla je sada příkladů. V zadní části učebnice je dále laboratorní cvičení Měření délky světla optickou mřížkou a Měření vlnové délky světla pomocí kompaktního disku.

Že by učebnice mohla být ohleduplnější vůči čtenáři dokládají i názory uživatelů internetové Databáze knih [13]:

„Řekl bych, že je trochu horší v porovnání s ostatními učebnicemi této řady. Ačkoli nabízí poměrně zajímavé výklady o funkci různých optických přístrojů,

pokulhává ve vysvětlení obecných teoretických poznatků (vím, v téhle oblasti to už nemusí být úplně snadno uchopitelné, ale na určité základní úrovni může usnadnit pochopení některých jevů).“

„Upřímně, tato učebnice mi moc k pochopení optiky nepříspěla.. Jak už přede mnou bylo zmíněno, patří mezi ty slabší s "edice" .pro gymnázia...:“

„Tato kniha mi nepřišla napsaná tak srozumitelně, jako ostatní díly.“

Její celkové hodnocení, byť máme k dispozici pouze nízký počet respondentů, čítá 16 lidí ke dni 12. 3. 2023, činí pouhých 56%.

Na konec k hodnocení knihy. Čtenář této práce může nabýt dojmu, že vzhledem k poněkud ostré kritice je lepší tuto knihu nepoužívat, protože platí pravidlo „co stránka, to problém“. Kniha je však zároveň luxusem pro učitele, materiálem, od kterého je možné se odrazit. Z hlediska obsahového je stále tím nejlepším, co v našich končinách máme. Toť závěrem k reflexi učebnice doc. Lepila.

My jsme rozebírali třetí vydání publikace z roku 2002; nejnovější vydání učebnice [14] z roku 2018 je upravený a znatelně zkrácený výtisk v porovnání s předchozí zmíněnou verzí. Její součástí je však CD, které obsahuje vybrané informace, na které je v učebnici odkazováno. V učebnici se nachází aktualizované fotografie experimentů. Problém této verze učebnice může být to, že mnohé počítače v dnešní době již nemají CD-ROM mechaniku. Také z tohoto důvodu si autorka této práce vybrala pro rozbor verzi učebnice z roku 2002.

Další knihou, která de facto shrnuje učivo prezentované v [1], je **Přehled středoškolské fyziky** [15]. Jedná se o knihu, která může posloužit k opakování před maturitní zkouškou z fyziky. Je však třeba, aby si student prvně ověřil, že kniha obsahuje vše, resp. zjistil, co vše obsahuje, z hlediska požadavků k maturitě. Je psána živějším a věcnějším jazykem v porovnání s učebnicí optiky doc. Lepila. Co se týče difrakce, čtenáři je stručně vysvětleno, co si má představit pod ohybem světla. I zde máme difrakční jevy rozdělené na Fraunhoferovy a Fresnelovy. Členění kopíruje text doc. Lepila. Stejně jako v případě učebnice doc. Lepila, i zde se v obrázku, který popisuje dvoušterbinový experiment, vyskytuje graf „světelné intenzity“  $E$ . Přitom veličina  $E$  není pojmenována. Je zavedena (opět) později v kapitole „Základní radiometrické a fotometrické veličiny“. Kapitola „Elektromagnetické záření“ se věnuje rentgenovému záření. Text je v porovnání s [1] však výrazně stručnější, o Braggově rovnici se čtenář nedoví.

Další knihou, ve které najdeme kapitolu věnující se difrakci, je první svazek ze série tří **Feynmanových přednášek z fyziky** [8]. Tato kniha je určená studentům, kteří se chtějí o fyzice dovědět něco nad rámec toho, s čím se mohou setkat na střední škole. Autor nejen, že hovoří o něčem, čemu rozumí, ale také se to snaží druhým předat takovým způsobem, aby tomu bylo rozuměno. Nevýhodou této knihy je, že je poněkud „individualistická“ vzhledem k tomu, že není běžně používaná na českých středních školách (v seminářích), protože byla myšlena jako základní vysokoškolský kurz – ten však může posloužit budoucím studentům fyziky. Možnost diskuze ohledně fyziky obsažené v této knize může tedy být do jisté míry omezená. Kniha obsahuje množství rovnic a odvozování, a pokud bychom rozvedli „matematizaci fyziky“, jednalo by se o zdroj, kterým

by bylo možné nechat se zčásti inspirovat. V rámci kapitoly 30: Difrakce se můžeme dočíst o difrakční mřížce, její rozlišovací schopnosti, krátce o krystalech a difrakci na nepropustné cloně. Kapitulu zahajuje analýza kmitajících  $n$  oscilátorů a završuje pole kmitajících nábojů v rovině. Autor s hravostí zkoumá přírodu a propojuje témata. Následuje několik příkladů před další kapitolou. V rámci kapitoly 38: Souvislost mezi vlnovým a korpuskulárním hlediskem se poté můžeme stručně dočíst o difrakci na krystalech a v souvislosti s tím také o difundování neutronů v grafitu. Vidíme, že i zde lze „narazit“ na terminologii. „Difundování“ neutronů může mít podobný důsledek jako „koherentní“ světlo.

Ve Feynmanových přednáškách se čtenář snadno ztotožní s tím, že se aktivně podílí na řešení fyzikálního problému. Navozují to formulace typu: „nakreslíme graf křivky“ či „zjistili jsme, že“ (s. 393). Autor si na rozdíl od „zřejmosti“ uvědomuje, že čtenář může spouště věcem nerozumět. Na straně 393 se dále setkáváme s běžnou, leč vstřícnou formulací: „znamená to, že...“. Autor rozdává praktické rady: „nejlépe je zapamatovat si tento vztah...“ (s. 399). Na straně 401 máme dále formulaci: „používá se“ a my získáváme fyzikální zkušenosti podobně jako je tomu u malířství, v rámci něhož se od učitele dovídáme, jak správně napnout malířské plátno na rám. Na straně 402 je dále formulace: „použijeme-li větu, kterou jsme nedokázali“, která ukazuje, že Feynman v rámci svých přednášek nepřehlídí ani matematiku.

Dalším zdrojem informací pro středoškolské studenty, co se týče difrakce a učiva fyziky obecně, jsou **studijní texty Fyzikální olympiády**. V popředí našeho zájmu bude text týkající se difrakčních jevů [12]. Úvod textu tvoří velmi stručná historická poznámka. Zavádí se elektrická  $E$  a magnetická  $H$  složka elektromagnetického pole. Kdo si čte tento text bez toho, aniž by se předtím setkal s těmito veličinami, bude lehce ztracen, neboť informace je vytržená z kontextu. Je nutné uvažovat prvně elektromagnetické vlnění a poté (viditelné) světlo jakožto jeho část (rozmezí vlnových délek). Studijní text má podobný problém jako učebnice doc. Lepila. Vše je až příliš „zřejmé“ a jako by vyžaduje po studentovi pouhé přijetí informace ve smyslu „naučte se to“. Řešené příklady jsou rozebírány, ale matematika není věnována zvláštní pozornost. Co se týče fyzikální olympiády, můžeme si dohledat výsledky v různých věkových kategoriích za předešlé roky [16]. Může být věcí zamyšlení, proč se studenti dle různých národností umisťují na předních, prostředních či posledních příčkách. Statistiky, co se týče počtu obyvatel a jiných společenských faktorů jsou také dohledatelné [17]. Věrohodnost zmíněných zdrojů [16] a [17] si člověk může pokusit ověřit.

Studijní text fyzikální olympiády má zpravidla strukturu: „název konkrétního typu úlohy – slovní popis experimentu – fotografie výsledků měření – matematický popis s vysvětlením – „geometrický“ náčrtek – grafy - úlohy“. Po sobě v pořadí jsou studované zvláště Fraunhoferova a Fresnelova difrakce. V učebním textu se nachází konkrétně tato témata: základní popis, „sin“ nebo „cos“ funkce pro popis světelných vln, fáze a amplituda; komentář k experimentování; kapitola Fresnelův ohyb na dvouštěrbině (Youngův pokus). Zde uveďme poznámku: nešťastný je pokus, který nebyl proveden nebo alespoň pozorován. Čtenář by si během čtení textu mohl také položit otázku, proč se zabývat onou úlohou ve

smyslu, kde by podobné experimentování bylo možné učinit a z jakého důvodu. Pokud by studijní text fyzikální olympiády této představě šel naproti, měl by větší motivační charakter. Může jít o zkoumání krystalů a informace o tom, k čemu je jejich výzkum užitečný.

Nyní se vraťme k seznamu témat fyzikální olympiády. Dalšími tématy jsou: Fresnelův ohyb na kruhovém otvoru; Fresnelovy zóny; Fresnelův ohyb na kruhovém terčíku; Fresnelův ohyb na štěrbině, drátu a na polorovině; Výpočet dráhového rozdílu u Fraunhoferových ohybových jevů; Fraunhoferův ohyb na štěrbině; Fraunhoferův ohyb na řadě rovnoběžných štěrbin; Optická mřížka. Mřížkové spektrum; Fraunhoferův ohyb na kruhovém otvoru; Fraunhoferův ohyb na soustavě kruhových otvorů a dalších překážkách; Vlnové omezení rozlišovací schopnosti optických přístrojů – dalekohledu a mikroskopu. Čtenář si dále může položit otázku, v jakém programu byly vykresleny grafy závislosti intenzity záření na vzdálenosti od středu stínítka. Věcí diskuze může být otázka krajních bodů. V závěru textu je odkaz na adresu [18] – matematické modely, které byly při tvorbě textu použity. Zde lze opět diskutovat o tom, do jaké míry bude odkaz pro studenty „vstřícný“.

Podrobnějšímu popisu světla se věnuje a může mnohé osvětlit kniha prof. Malého **Optika**, která pokrývá základní kurz optiky na bakalářském stupni Obecné fyziky na MFF UK. Jak už jsme zmínili, kniha prof. Malého jasně formuluje předpoklady, v tomto ohledu je tedy čtenáři velmi užitečná. Co se týče fyzikálních veličin popisující světelné vlnění, jsou jim věnované strany 18–31. Kapitola je srozumitelná i pro středoškolské studenty za předpokladu nastudování významu symbolů *div*, *grad*, „laplace“ a parciálních derivací s tím, že je výhodou znalost Maxwellových rovnic.

Dále by student měl rozumět pojmům skalár, vektor (vektorový součin), tenzor, funkce vektorové veličiny či funkce více proměnných, komplexní exponenciála a komplexní sdružení (tedy mít nastudovaná komplexní čísla). Měl by znát „diskrétní“ sumaci  $\Sigma$  a být schopen orientovat se v přeznačování či zavádění pomocných veličin, které nemusí mít fyzikální význam, ale je výhodné je mít k dispozici, aby se nám lépe pracovalo s výrazy. Označení vektoru intenzity elektrického pole vlnkou může být pro studenty nové a zavádějící. Vlnkou se však nemyslí nový matematický objekt ve smyslu skaláru či vektoru, jde o symbol, pomocí kterého si definujeme komplexní amplitudu a následně komplexní tvar vektoru elektrické intenzity [7]. Je vhodné znát typy souřadnic (také jiné než kartézskou soustavu).

Pokud si student předem osvojí alespoň intuitivní pochopení uvedených matematických nástrojů, nic mu nebrání v tom, aby se pustil do „vyšší“ fyziky. Pokud podobným způsobem nastudujeme kapitoly této či jiné vysokoškolské učebnice bakalářského stupně, můžeme zájemcům o studium fyziky na vysoké škole doporučit vhodnou (tematickou) literaturu k samostudiu. Lze tímto alespoň částečně předejít tomu, aby byli studenti příliš překvapeni náročností vysokoškolského studia (v prvním ročníku). Intenzita světla, ona „sporná“ veličina popisující „množství světla“ dopadající na stínítka, pro kterou měli autoři různá pojmenování, je vzápětí zavedena na stranách 31–32. Můžeme vidět, že zavedení oné veličiny není triviální.

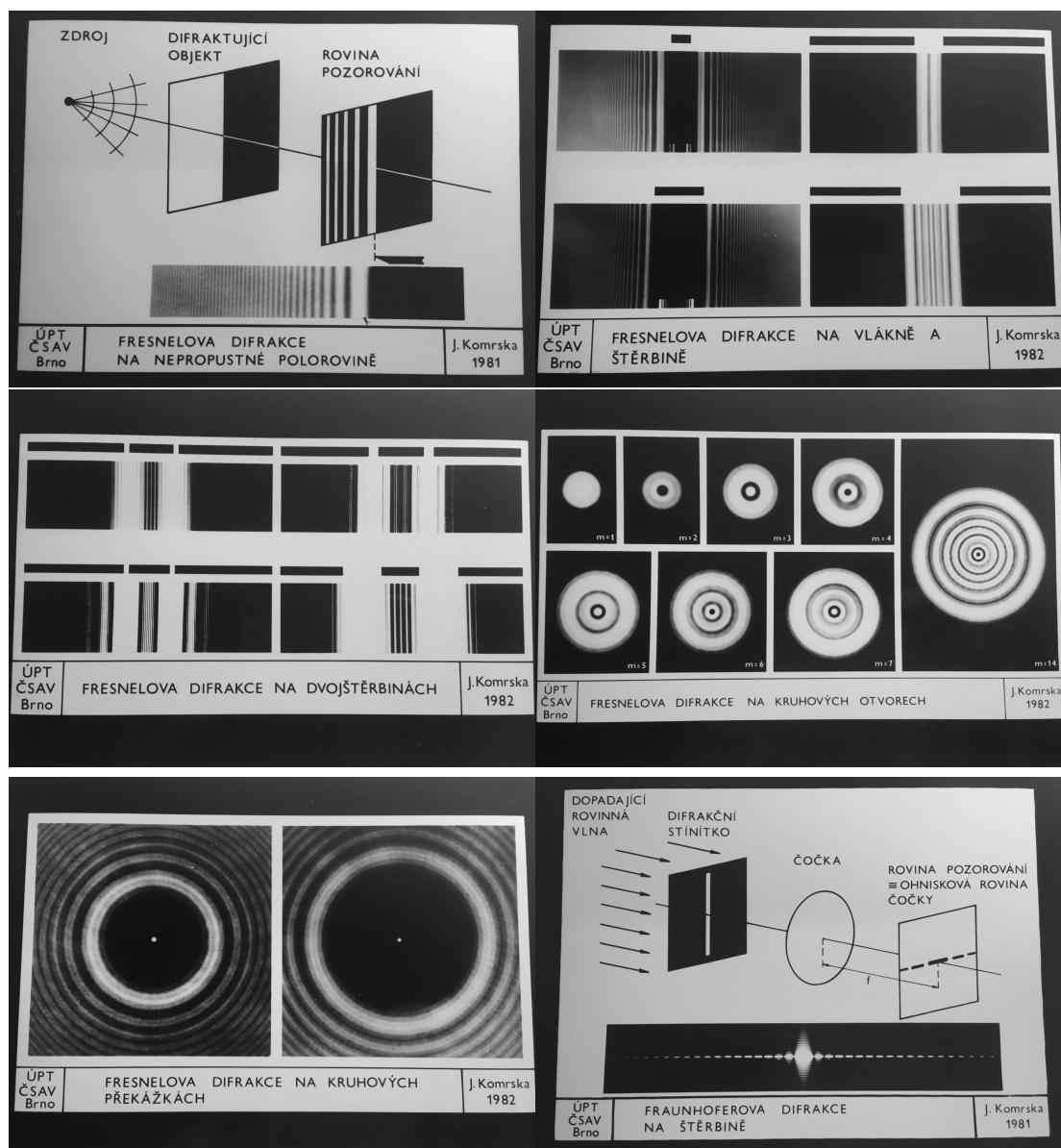
Další učebnicí ze základního kurzu fyziky na MFF UK, ve které se setkáváme s difrakcí, je kniha **Atomová fyzika a elektronová struktura látek** doc. Daniše [9]. Jak už jsme zmínili, tato kniha vysvětluje, jakým způsobem došli fyzici k vybraným zásadním objevům. Je psaná velmi čtivým jazykem a fyzikální témata jsou zde pečlivě, krok po kroku rozebírána. Kapitola 3.6: Metody studia pevných látek může navázat na základní středoškolské znalosti bez komplikací vyvěrajících z nedostatku matematických znalostí. První podkapitola kapitoly 3.6 se věnuje difrakci rentgenového záření, druhá se zabývá Laueho difrakčními podmínkami. V další kapitole zkoumáme souvislost mezi strukturou mřížky krystalu a vzniklým obrazem díky difrakci.

Následující kapitola už bude pro budoucího studenta fyziky na vysoké škole v rámci jeho samostudia náročnější. Podstatné je seznámit se s pojmem reciproký prostor a uvědomit si, že mezi ním a přímým prostorem, ve kterém nám vektory elementární mřížky definují polohy mřížových bodů, existuje jakási transformace či transformační vztah. Podstatná pro středoškolského studenta je dále podkapitola pojednávající o Braggově difrakční podmínce, ke které dospějeme, bude-li nás zajímat nikoliv směr difraktovaného záření, nýbrž jeho intenzita. V podkapitole Laueova metoda se studenti mohou dočíst o prvním difrakčním experimentu. V protikladu k této metodě je v učebnici uvedena Braggova metoda. Následující kapitola pojednávající o strukturním faktoru je náročnější na pochopení a ocení ji spíše vysokoškolská studenti. To podstatné shrnuje odstavec 3.7: „rentgenový difrakční záznam poskytuje úplnou informaci o struktuře zkoumané látky; z rgt záznamu je možné zkoumat defekty na atomární úrovni“. O difrakci se doc. Daniš dále zmiňuje v kontextu vlnově-částicového dualismu elektronů a neutronů, které se stejně jako rentgenové záření využívají ke studiu látek. Alternativně lze zájemcům doporučit méně náročnou publikaci [19], kterou však již v dnešní době není snadné sehnat.

Jmenujme další tištěný zdroj, který může učitelům posloužit jakožto kvalitní podklad pro semináře z fyziky. Je jím **Difraktografické album** [20], jehož součástí je sada čtyřiceti obrázků a doprovodný text. Tento text se důkladně věnuje čistě problematice difrakce, a je tedy „plný principů fyziky“. Čtenář se může nenásilným způsobem seznámit s matematikou používající se pro popis ohybu světla. Diskutovány jsou typické difrakční jevy. V úvodu textu autor zmiňuje možnost deduktivního i induktivního přístupu k výuce pokrývající difrakční jevy. Nejprve se autor věnuje Fresnelovým ohybovým jevům, poté Fraunhoferovým ohybovým jevům. Čtenář se dovídá, že některé typy úloh (s otvorem či překážkou daného tvaru) lze převést na jiné, ke kterým už je známo řešení. Například Fresnelovu difrakci na vlákně lze převést na úlohu se dvěma polorovinami. Takovýto „převod na známý případ“ patří k „principům fyziky“ a je podobný matematickým operacím s křivkovými integrály.

Nyní uvedeme několik obrázků, které přiblíží obsah alba. Můžeme vidět, že v případě využití tohoto materiálu ve výuce je možné se studenty diskutovat rozdíly mezi jednotlivými difrakčními obrazy a hledat charakteristiky, které mají společné. Symetrie a obecně vzhled difrakčních obrazců jsou v doprovodném textu

alba rozebírány. Dovídáme se zajímavý výsledek, že má-li otvor stínítka ostré ve smyslu nezaoblené okraje, má difrakční obrazec cípatý hvězdicovitý vzhled, přičemž ramena hvězdice vycházejí z primární stopy a jsou kolmá na rovné části okraje otvoru (Abbeova věta). Speciálně pro Fraunhoferovy difrakční obrazce platí, že vždy vykazují středovou symetrii. Pokud se jedná o otvory ve stínítku se sudočetnou symetrií, bude mít difrakční obrazec stejnou sudočetnou symetrii. Pokud mají otvory ve stínítku naopak lichočetnou symetrii  $n$ , bude mít difrakční obrazec sudočetnou symetrii  $2n$ . Zaměříme-li se na Fresnelovu difrakci, můžeme například vidět, že při ohybu světla na užším vlákne vzniká výraznější maximum. Obrazce lze dále podrobněji analyzovat.



Obrázek 1.1: Difraktografické album – ukázka 1 [20]

Dosud jsme diskutovali česky psané učebnice; mezi středoškolskými učiteli je oblíbená [10] **zahraniční učebnice** Fundamentals of Physics [21], v českém překladu Fyzika. Učebnice je koncipovaná jako základní vysokoškolský kurz obecné fyziky a jak autor na zadní straně říká, je ideální pro nasátí „ducha fyziky“, který člověku poslouží také v lékařství a dalších vědních či technických oborech příbuzných fyzice. Učebnici je možné sehnat v prvním [22] a druhém vydání [23]. Výhoda prvního vydání je rozčlenění kapitol do vícera svazků, pakliže si chce student učebnici nosit s sebou a číst ji mimo domov, v případě druhého přepracovaného vydání, jehož obsahem jsou dva objemné svazky, je toto takřka nemyslitelné. Difrakci se v případě obou vydání věnuje kapitola 36. Co se týče prvního vydání, musíme sáhnout po čtvrtém svazku, v případě druhého po druhém. Vzhledem k tomu, že nejde o středoškolskou učebnici, najdeme zde informace, které budou učivo střední školy přesahovat. Spíše však, že by překypovaly náročností, to, co bylo v učebnici doc. Lepila [1] nejasné, nepopsané, je zde rozvedené a podrobně okomentované – velkým plusem jsou obrázky schémat a grafů. K tomu jsou přidány zajímavosti a informace nad rámec učiva střední školy (Poissonova – zde Fresnelova skvrna; Rayleighovo kritérium).

Další u nás využívanou zahraniční učebnicí je učebnice IB kurzu Physics [24]. V té je rozebírána difrakce na jedné štěrbině v rámci kapitoly 9. V učebnici prof. Malého můžeme najít referenci na „bibli“ optiky [25].

### 1.1.2 Webové stránky

Abychom zachovali stručnost této rešerše, uvádíme v následujících odstavcích pouze odkazy na konkrétní zdroje informací doplněné o krátké komentáře. Hlubší analýzu neprovádíme. Lze očekávat, že mnohé z odkazů postupně přestanou být dostupné ve smyslu, že vymizí. Pro vyhledání jednotlivých webových stránek využijeme „google“. Co najdeme, když zadáme slovo „difrakce“? Je-li třeba vědět, jaké rostliny jsou nám známy, je třeba prolistovat celý atlas. Pořadí internetových stránek vládne „wikipedie“, která odkazuje na odbornou literaturu [26] ([27]). Další webové stránky lze rozdělit do různých kategorií. My jsme zvolili tři: webové stránky se SŠ (středoškolskou) tematikou, webové stránky příslušející univerzitám a webové stránky „pro život“, které se vážou k potenciální kariéře a zájmům studentů. V předposledním odstavci této podkapitoly se poté věnujeme speciálně webovým stránkám psaným v anglickém jazyce.

#### Webové stránky se SŠ tematikou

Do této kategorie patří osobní stránky učitelů, obsáhlými zdroji jsou webové stránky Martina Krynického [28] a Jaroslava Reichla [29]. Jednou z možností, jak učinit výuku ohledně tématu difrakce „interaktivní“, je využít „appletu“, například [30]. Středoškolští studenti mohou najít srozumitelné články a řešené úlohy na téma difrakce [31], [32]. Dále se můžeme setkat s materiály dostupnými na webových stránkách středních škol, které vznikly skrze projekt Evropské Unie – jde o pracovní listy, úlohy (a jejich řešení) či elektronické učebnice pro studenty: [33], [34], [35], [36], [37]. V případě [35] šlo o spolupráci několika moravských učitelů. Kvalita těchto materiálů však může být diskutabilní. Rovněž jsou k dispozici



materiály středních škol vzniklé bez finanční podpory Evropské Unie [38]. Mimo tyto existují samozřejmě materiály, které si učitelé pro své studenty připravují sami, nesdílejí je veřejně a nejsou za ně zvláště placeni. O difrakci se zmiňuje také plzeňské „centrum vědy“ [39].

### **Webové stránky příslušející univerzitám**

Je možné nalézt prezentace či výukové texty k přednáškám a laboratorním cvičením, jež mohou být zdrojem informací pro středoškolské studenty, kteří si chtějí rozšířit či prohloubit své fyzikální znalosti. Příklady: [40], [41], [42], [43], [44], [45], [46], [47], [48], [49]. Univerzity se snaží své působení přiblížit veřejnosti [50].

### **Webové stránky „pro život“**

Difrakce je často diskutována v oblasti fotografování a fototechniky [51], [52], [53], [54], [55], [56]. V kontextu zájmů či potenciálních „hobby“ to může být pro studenty zajímavá informace.

Pro studenty může být dále velmi užitečné podívat se na webové stránky laboratoří, firem či institucí využívajících difrakci, to znamená navštívit minimálně zvenčí místa, kde je možné se difrakcí zabývat. Jde například o tyto webové stránky: [57], [58], [59], [60], [61], [62]. U vědeckých týmů je zpravidla uveden kontakt na vedoucího skupiny. Dále můžeme zmínit internetové slovníky [63], [64], ve kterých je pojem „difrakce“ vyložen.

Co najdeme, když zadáme do „google“ slovo „diffraction“? V popředí je znovu „wikipedie“, tentokrát její anglická verze. Opět nalezneme stránky univerzit, stránky sloužící ke komerčním účelům a stránky pro „středoškoláky“. Speciálně zmiňme Khan Academy [65], kteří zveřejňují svá videa také prostřednictvím serveru Youtube [66]. Server Youtube je kapitolou samou o sobě, kde se hromadí čím dál tím více videí nejen o difrakci, protože je tam lidé mohou snadno vkládat, a tak nás nepřekvapí, že nás o difrakci může poučit nadšenec z druhého konce světa. Dostupné jsou přednášky vysokoškolských studentů a dalších lidí, kteří z různých důvodů sdílejí svá videa. Vraťme se k vyhledávání webových stránek. Mezi další webové stránky týkající se difrakce opět patří stránky s fotografickou tematikou a výkladovými slovníky definující pojem difrakce. Co může být pro středoškolské studenty obohacující, jsou odkazy na vědecké články. Mohou se seznámit s podobou vědeckého článku, lidově řečeno, mohou zjistit, jak takový článek vypadá. Další účelnou informací může být dostupnost Feynmanových přednášek z Fyziky online [67]. Přednášky jsou prezentované na internetových stránkách kalifornského technologického institutu California Institute of Technology (Caltech), kde byly autorem v letech 1961-1963 původně odpředneseny [68].

Předchozí odstavce shrnují, co je dostupné dospělému člověku, a tedy také středoškolským studentům. Nemusíme se omezovat pouze na anglický jazyk, studenti se dnes věnují také dalším jazykům, i mimoevropským. Lze předpokládat úmrtnost webových stránek – i tímto se elektronické zdroje liší od knih. Kniha se může stát zastaralou, těžce dostupnou, ale jen tak snadno nepozbyde existence.

Na následujících stranách uvádíme text, který je možné využít k výuce difrakčních jevů na středních školách. Součástí textu jsou odkazy na vhodné experimenty, které uvádíme v následující kapitole. Text obsahuje také obrázky, cvičení a odkazy na další materiály.

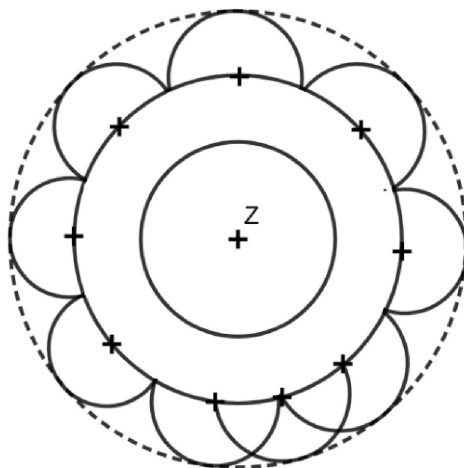
## 1.2 Difrakce (ohyb) světla

Již víme, že světlo je svou podstatou také vlnění. Pro tuto skutečnost však byla třeba řada důkazů. Ohyb světla přispěl k uznání vlnové povahy světla.

### 1.2.1 Huygensův princip

Co si představit pod pojmem „ohyb“? Jak už slovo „ohyb“ napovídá, mělo by docházet k něčemu, co by se dalo přirovnat k ohybu ocelové tyče, jejíž zakončení by skrze ohyb změnilo také směr natočení. To by jistě mohlo platit pro představu světla tvořeného rovnoběžnými paprsky; jak se efekt ohybu však projevuje v případě vlnění a jakým způsobem toto souvisí s důkazem, že světlo je také vlnění?

Připomeňme si nejprve **Huygensův princip**, se kterým se čtenář může seznámit již v kontextu mechanického vlnění: představme si, že se vlnění (na vodní hladině) šíří symetricky směrem od středu (svého zdroje). Huygensův princip říká následující: každý bod vlnoplochy (kružnice), do něhož vlnění dospěje v určitém čase  $t$ , můžeme chápat jako zdroj elementárního vlnění. Z těchto bodových zdrojů se vlnění dále (nárůstem času o  $\Delta t$ ) šíří v elementárních vlnoplochách. Obálku všech elementárních vlnoploch lze ztotožnit s vlnoplochou v čase  $t + \Delta t$ . Popsané je ilustrováno na obr. 1.2, přičemž zdroje elementárního vlnění jsme si pro fixní poloměr kružnice vlnoplochy v souladu s Huygensových principem libovolně zvolili. „Z“ značí zdroj vlnění.

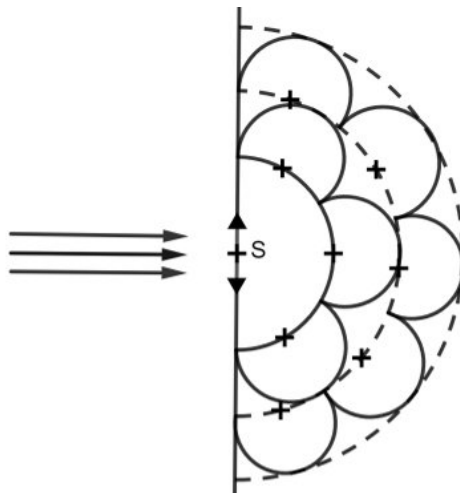


Obrázek 1.2: Huygensův princip

Snadno si na obrázku 1.2 představíme, že rozložení bodových zdrojů vlnění naruší překážka.

*Cvičení.* Zakreslete elementární vlnoplochy a vzniklé obálky pro vlnění dopadající na překážku s malým otvorem (jinak řečeno štěrbinou či aperturou).

*Řešení.* Viz obr. 1.3. Šipky znázorňují směr postupu vlnění. Další řešení jsou možná. Princip musí být zachován (o ten se jedná).

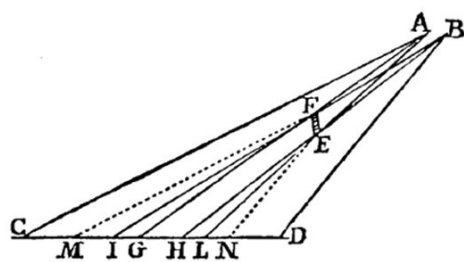


Obrázek 1.3: Huygensův princip pro světlo procházející štěrbinou „S“

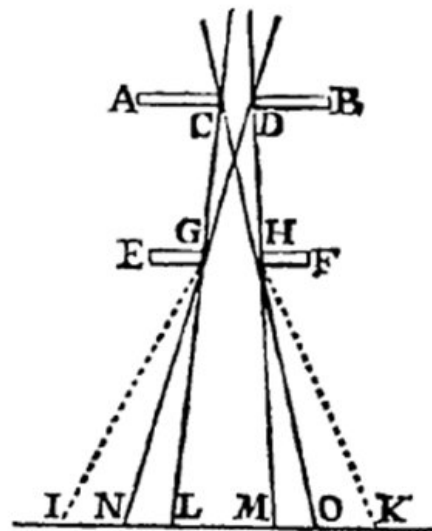
## 1.2.2 Vlnová podstata světla

První dosud známá zmínka o difrakci se nachází v práci F. M. **Grimaldiho** (1665) [69], který provedl několik experimentů (viz obr. 1.4) a zjistil, že světlo pronikne také do oblastí geometrického stínu (jak je vidět na stínítku: (a) v oblasti CM a ND pozoroval Grimaldi světlé a tmavé proužky; (b) světlo se dostalo do oblasti IK – namísto ON predikované geometrickou optikou), a tedy jeho chod neodpovídá popisu paprskové optiky. Vzhledem k tomu, že fenomenologicky nešlo o *odraz* ani *lom* světla (v jejichž případě by nedošlo ke sporu s paprskovou optikou), nazval Grimaldi odlišný či nový typ šíření světla *difrakcí*. Aby bylo dokázáno, že světlo je vlnění, což vědecká komunita uznala, bylo však třeba podrobnějšího matematického popisu a také dalších experimentů [70].

Nyní si připomeňme pojem *interference* a muže velkého jména. O 137 let později od zmíněné Grimaldiho práce všestranný T. **Young** provedl jednoduchý experiment s jednou štěrbinou – dírkou po propíchnutí jehlou [69]. Sluneční záření nechal dopadat skrze štěrbinu na hranu papírové karty (viz obr. 1.5a). Na hraně („začátku“ karty) se světelný svazek rozdělil, aby část světla postupovala směrem od štěrbinu napravo od karty a část nalevo od karty. Za vzdálenější hranou („koncem“ karty) na stínítku S vznikl interferenční obrazec – světlé a tmavé proužky (není zaznačeno v obrázku). Jakmile Young zastínil jednu z oblastí (pravou, nebo levou) za „koncem“ karty (viz obr. 1.5b), interferenční obrazec na stínítku zanikl. Podstatné je, že vzhledem k pozorovaným tmavým a světlým proužkům Young postuloval interferenci a také navrhl, že světlo je *příčné vlnění*. Na obr. 1.6 vidíme příklad výsledku (jiného) jednoštěrbinového experimentu [1], který odpovídá obr. 1.3. Podobně jako v případě Youngova pokusu, i zde můžeme pozorovat interferenční proužky.

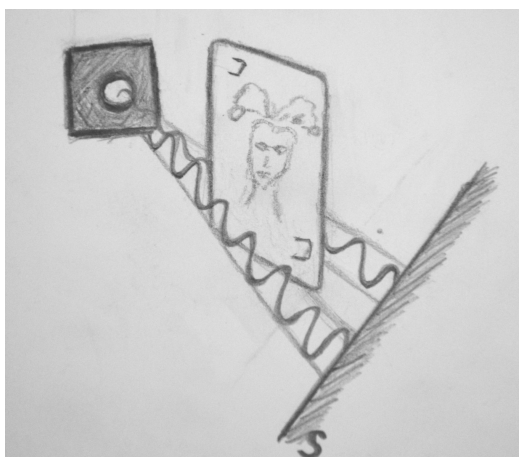


(a)

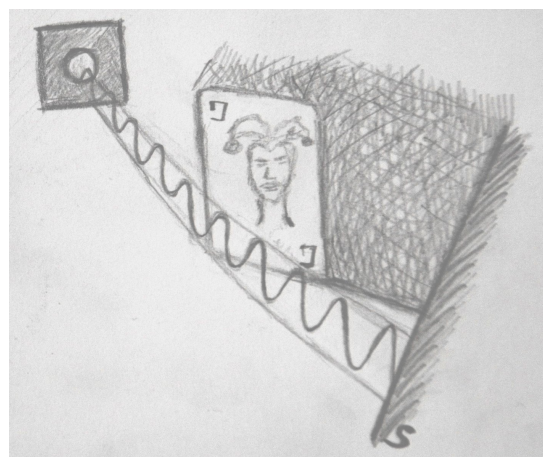


(b)

Obrázek 1.4: Grimaldiho difrakční experimenty [70]



(a)

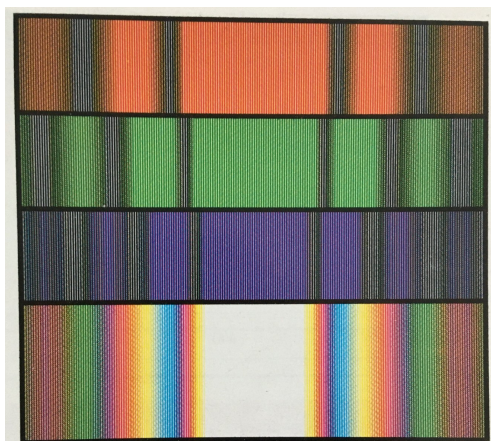


(b)

Obrázek 1.5: Youngův jednoštěrbinový experiment

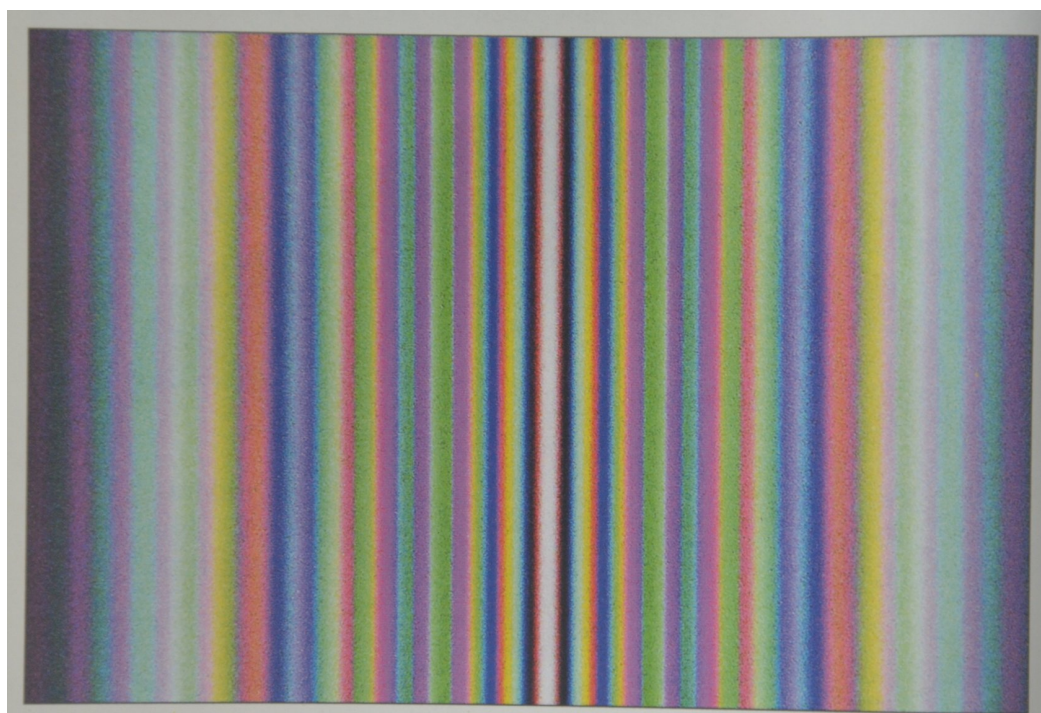
Použijeme-li sluneční světlo nebo například světlo ze žárovky – spojité spektrum záření, kde každé barvě odpovídá určitá vlnová délka, zpozorujeme na stínítku barevné proužky (v případě laseru by to byly světlé a tmavé proužky odpovídající dané vlnové délce laseru – laser je tzv. *monochromatický* zdroj záření). Ze symetrie uspořádání experimentu plyne symetrické uspořádání proužků na stínítku okolo středu mezi štěrbinami. Ve středu stínítka bývá bílý proužek (všechny vlnové délky), tj. vlny se potkají ve fázi.

V roce 1807 Young učinil **dvouštěrbinový pokus** (viz obr. 1.9), který je po něm dodnes obecně pojmenovaný. Připomeňme si jej: Young nechal sluneční záření dopadat na jednu štěrbinu, čímž získal koherentnější světlo (*koherentní světlo* je takové světlo, které se skládá z vln o stejné frekvenci, fázi a kmitů stejného směru). Světlo postupovalo dál, aby prošlo dvěma štěrbinami a na stínítku vy-



Obrázek 1.6: Experiment s jednou štěrbinou určité šířky – byl proveden pro světla různých vlnových délek: červené, zelené, fialové a bílé [1]

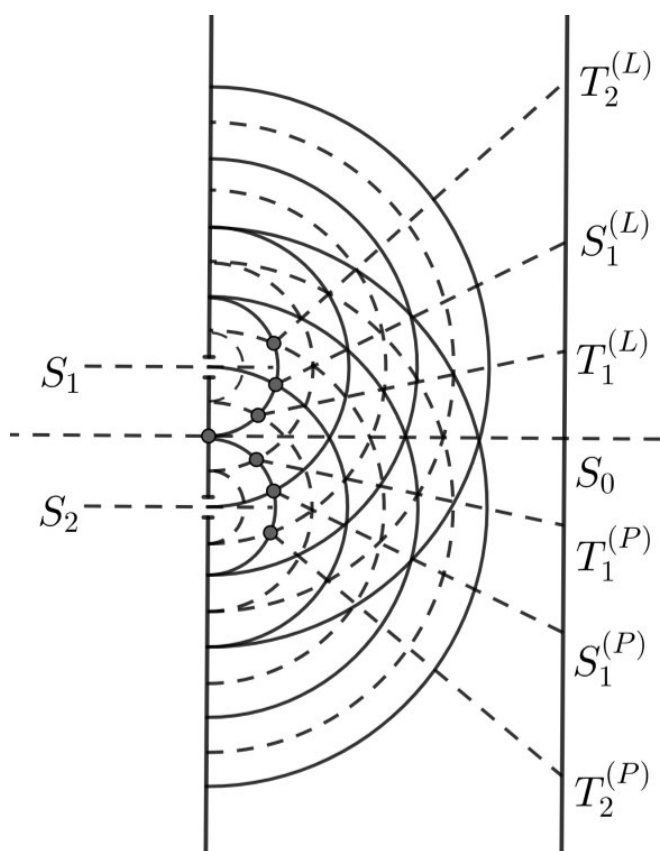
tvořilo sérii interferenčních maxim a minim. O pozoruhodném životě Thomase Younga se můžeme dočíst v [71]. Na obr. 1.7 je uveden výsledek dvouštěrbínového experimentu s bílým světlem.



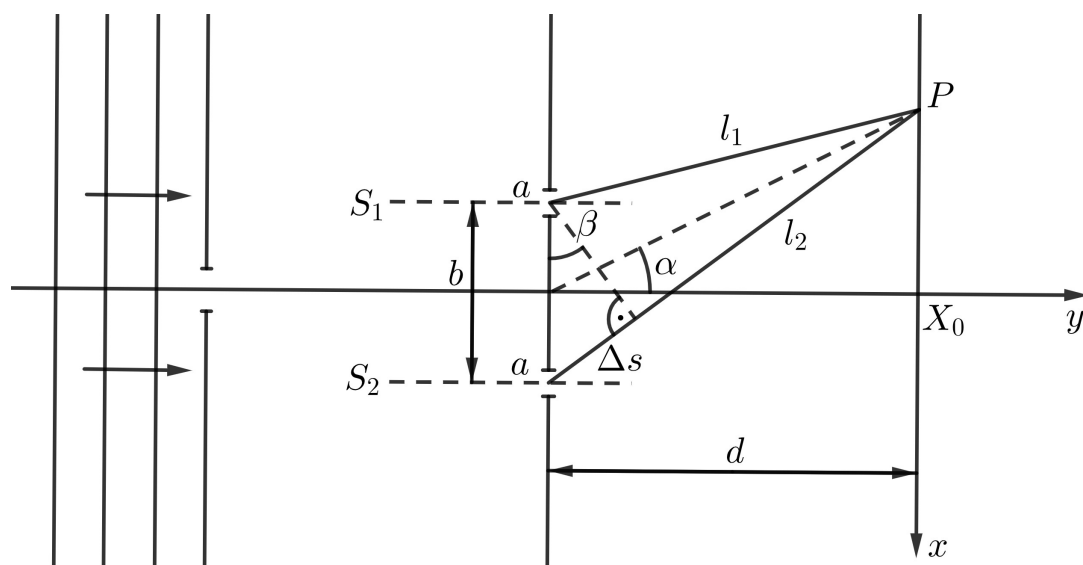
Obrázek 1.7: Ohybový obrazec bílého světla při dvouštěrbínovém experimentu [1]

Souvislost s Huygensovým principem můžeme vidět na obrázku 1.8 (bod  $X_0$  odpovídá bodu  $S_0$ ): maxima (světlé proužky) na stínítku (místa označená písmenem  $S$ ) odpovídají konstruktivní interferenci, minima (tmavé proužky) na stínítku (místa označená písmenem  $T$ ) odpovídají destruktivní interferenci vln, které přísluší zdrojům s označením  $S_1$  a  $S_2$ . Dolní indexy popisují řád interference; (P) značí pravou stranu, (L) levou stranu. Vidíme, že ke konstruktivní interferenci dochází tam, kde se kružnice reprezentující dané vlnoplochy setkávají (vlny se

potkávají ve fázi); opačný případ, kdy se vlnoplocha pocházející z jedné ze štěrbin nachází v místě mezi dvěma vlnoplochy druhé štěrbin (půlvlna), znamená destruktivní interferenci (vlny se potkávají v protifázi).



Obrázek 1.8: Dvoušterbinový experiment se světlem: střídají se světlé proužky (S) – maxima a tmavé proužky (T) – minima [7]



Obrázek 1.9: Dvoušterbinový experiment: schematický popis [1], [69]

Popišme situaci matematicky (vyjděme ze schématu 1.9). Pro vznik interferenčního maxima mezi dvěma světelnými vlnami již víme, že musí platit, že dráhový rozdíl těchto vln je roven celistvému násobku vlnové délky (analogie k interferenci na tenké vrstvě). Dle schématu na obr. 1.9 tedy musí platit:  $\Delta s = |l_2 - l_1| = |S_2P - S_1P| = m\lambda$ ,  $m \in \mathbb{Z}_0^+$ . Ekvivalentně

$$b \sin \alpha = m\lambda. \quad (1.1)$$

Pro minima dostaneme na pravé straně výraz  $[(m + 1)/2]\lambda$ .

*Důkaz.* Uvažujme, že naše schéma je pouze ilustrační a že ve skutečnosti platí, že  $d \gg b$ . Potom můžeme vynést kolmici k úsečce  $l_2$  a dostaneme, že  $l_2 - \Delta s = l_1$ . Vzhledem ke kolmosti dále platí, že  $\beta = \alpha$ , čímž jsme dospěli za užití Pythagorovy věty ke vztahu (1.1).

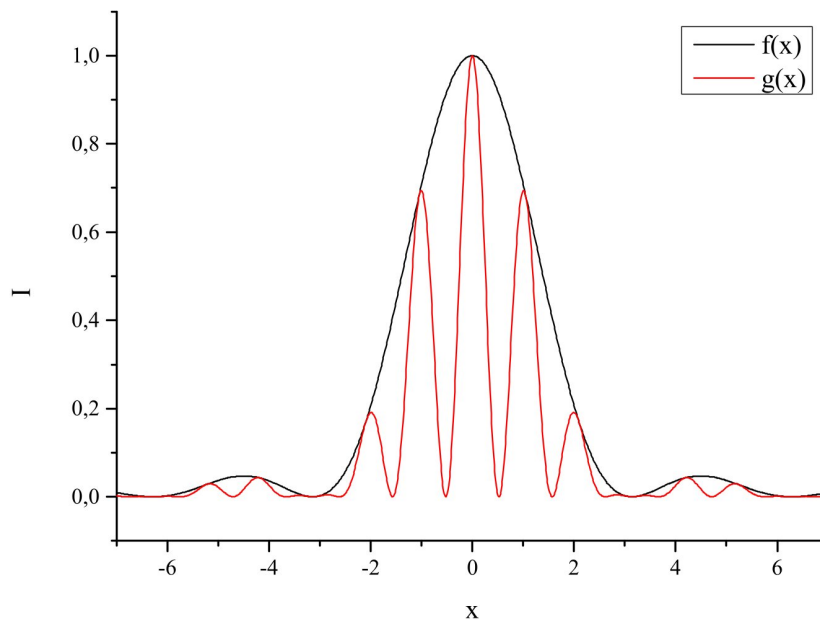
*Cvičení.* Prohlédněte si výsledek dvoušterbinového experimentu pro spojité spektrum bílého světla na obr. 1.7. Pomocí vztahu (1.1) odůvodněte, proč v ohybovém obrazci, zejména ve větší vzdálenosti od středu stínítka, dominuje fialová část spektra.

*Odpověď.* Srovnáme pravou a levou stranu rovnice. Násobíme-li menší hodnoty vlnové délky  $\lambda$  (fialová část spektra)  $m$  větším, bude levá strana rovnice dávat i nadále dobrý smysl (pro danou konstantu  $b$  a dané  $\lambda$  vzniknou ohybové stopy). Oproti tomu pro vyšší hodnoty pravé strany (součin většího  $\lambda$  a většího  $m$ ) ne-nalezneme takové  $\alpha$ , aby levá strana rovnice dávala dobrý smysl: funkce „arcsin“ nebude definovaná. Lze ověřit pro konkrétní hodnoty.

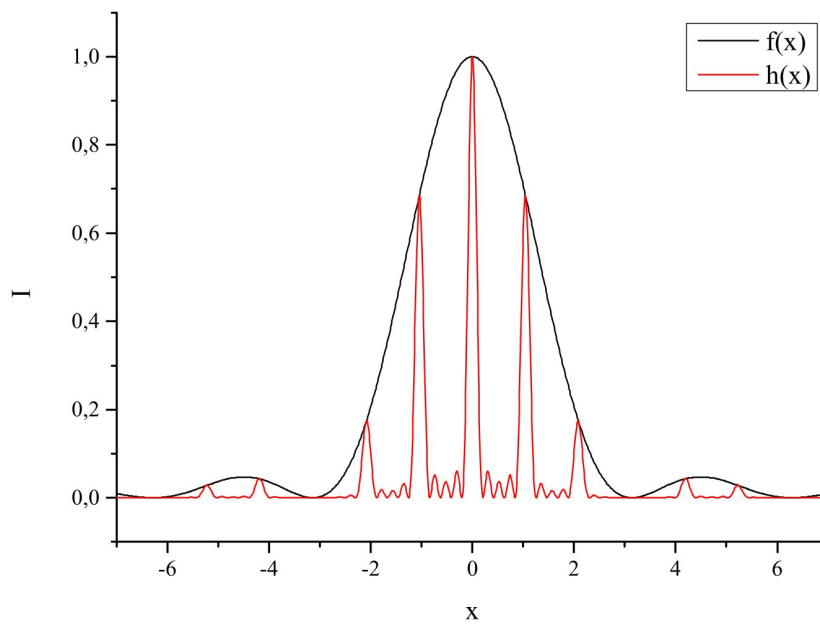
Výsledný obrazec na stínítku experimentálního uspořádání na obr. (1.9) odpovídá grafu na obr. 1.10, který zobrazuje změřenou světelnou intenzitu  $I$  v závislosti na vzdálenosti  $x$  od středu stínítka. Měřítka  $x$ -ové souřadnice je orientační. Intenzita světla  $I$  je uvedena v bezrozměrných jednotkách: je naškálovaná vzhledem k intenzitě světla vstupního záření, tj. jedná se o změřenou intenzitu světla dělenou hodnotou intenzity nezastíněného záření:  $I = I/I_0$ . Této světelné intenzitě říkáme také relativní světelná intenzita  $I_R$ , tzn. můžeme psát, že  $I_R = I/I_0$ . Pro  $I$  (v našem měřítku) platí, že její hodnota je rovna 1, je-li hodnota změřené výsledné intenzity stejná jako hodnota vstupního záření.

Připomeňme si také, že intenzitu světelného záření chápeme jakožto světelný tok ku ploše, na kterou světlo dopadá:  $I = \phi/S$ . Funkce  $g(x)$  odpovídá závislosti  $I = I(x)$  pro ohyb světla na dvou šterbinách a je úmyslně odlišena od druhé, pojmenované jako  $f(x)$ . Funkce  $f(x)$  odpovídá  $I(x)$  pro ohyb světla na jedné šterbině téže šířky, jako mají dané dvě šterbiny v případě  $g(x)$ . Předpis pro  $f(x)$  a  $g(x)$ , tj. přímé vztahy mezi  $I$  a  $x$ , neuvádíme – více viz [12].





Obrázek 1.10: Intenzita světla v závislosti na vzdálenosti od středu stínítka pro ohyb světla na dvou štěrbinách



Obrázek 1.11: Intenzita světla v závislosti na vzdálenosti od středu stínítka pro ohyb světla na řadě pěti štěrbin

Na dvouštěrbinovém experimentu vidíme jasné opodstatnění pro **vlnovou povahu světla**. Kdyby světlo vlněním nebylo, nedocházelo by k interferenci (vzniku maxim a minim), ani k ohybu světla (světlo by nemohlo být modulováno v oblasti geometrického stínu). Vlnová povaha světla tedy rozšiřuje možnosti jeho šíření oproti čistě přímočarému šíření, které odpovídalo částicovému pohledu na světlo či paprskové optice.

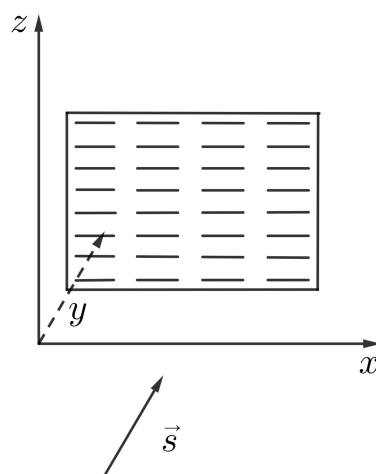
Dalším ze zásadních poznatků, které vedly k uznání vlnové povahy světla, bylo experimentální potvrzení vzniku světlé, tzv. **Poissonovy skvrny** při ohybu světla na kruhové překážce (viz kap. 2.1, obr. 2.5). Světlá skvrna odpovídá interferenčnímu maximu a relativní intenzitě 1, tj. stejné světelné intenzitě, jako má dopadající světlo.

### 1.2.3 Difrakce z hlediska aplikace

Nabízí se otázka, jaký bude výsledek experimentu, bude-li difrakční prvek tvořit řada  $N$  stejně vzdálených štěrbin (či  $N$  překážek). Zde si všimněme, že se pohybujeme v podstatě na ose  $x$ , kde jsou štěrbin y od sebe vzdálené o konstantu  $b$  (držíme se značení jako u obr. 1.9).

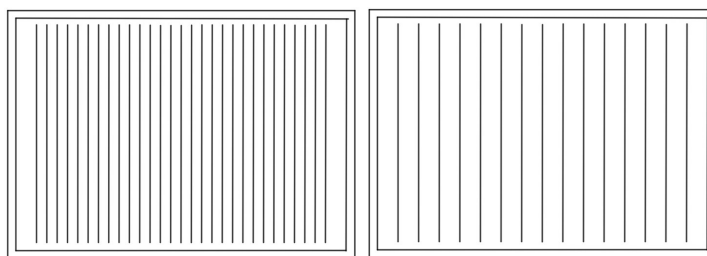
*Co kdyby takových řad bylo několik?*

Představme si souřadnou osu  $y$ , která odpovídá směru chodu dopadajícího záření  $\vec{s}$  a dále osu  $z$ , která je kolmá na tuto osu a osu  $x$ . Štěrbiny nenulové šířky, které se nachází v rovině  $xz$  (uvažujeme fixní hodnotu  $y$ ) a jsou od sebe vzdáleny o konstantu ve směru osy  $x$  a také  $z$ , takto budou tvořit 2D mřížku – viz obr. 1.12. Mluvíme-li o optické **mřížce**, bývá jí zpravidla myšlen difrakční prvek sestávající



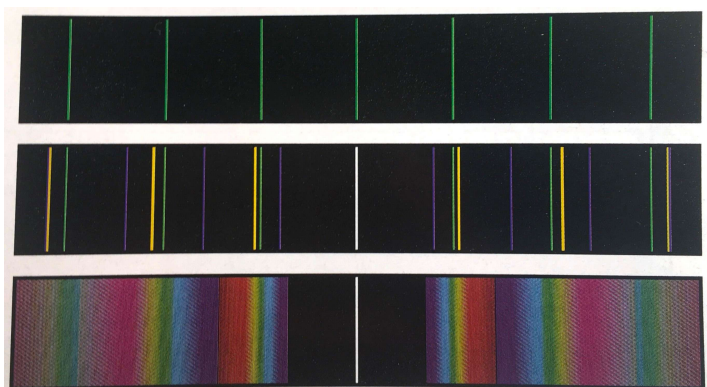
Obrázek 1.12: Schematický popis 2D mřížky

z natěsno uspořádaných vrypů či linií (viz obr. 1.13). To odpovídá zmíněnému obecnému případu  $N$  štěrbin, a my tedy mluvíme o 1D mříži. Příklad ohybu na mřížce (řadě štěrbin) ilustruje obr. 1.14. Můžeme vidět různé ohybové obrazce pro různé vlnové délky světla. Zatímco v prvním (horním) případě jde o určitou vlnovou délku laseru, ve druhém případě mohou dané vlnové délky reprezentovat



Obrázek 1.13: Optická 1D mřížka

čáry spektra vybraného plynu; ve třetím případě jde o spojité spektrum vlnových délek (bílé světlo). Na obr. 1.11 je zobrazen graf závislosti světelné intenzity  $I$  na vzdálenosti  $x$  od středu stínítka pro ohyb světla na řadě pěti štěrbin ( $N = 5$ ): funkce  $f(x)$  opět odpovídá ohybu na jedné štěrbině; funkce  $h(x)$  zobrazuje změřenou (a naškálovanou) intenzitu záření  $I$  pro zmíněný případ řady pěti štěrbin.



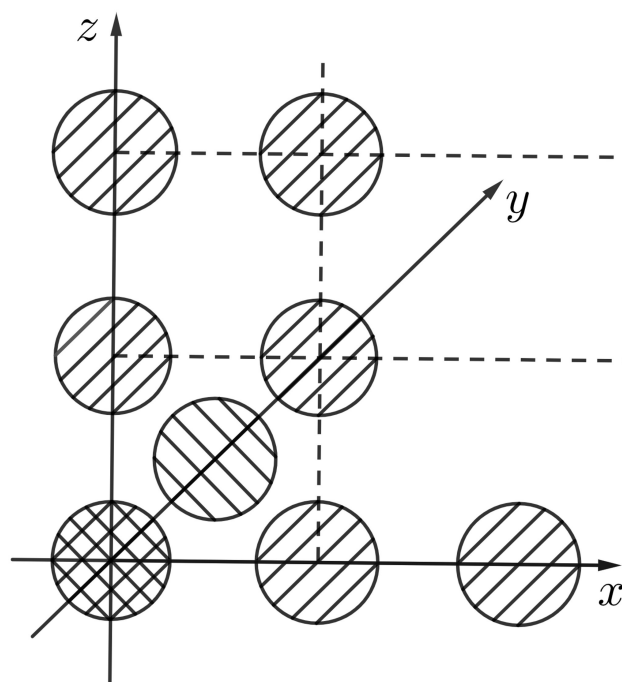
Obrázek 1.14: Ohyb na vybrané mřížce pro tři různé světelné zdroje [1]

2D mřížkou se myslí takové uspořádání vrypů, při kterém bývají vrypy konečné délky a jsou uspořádané (dle našeho značení) nad sebou (ve směru osy  $z$ ) – viz obr. 1.15. Příkladem mřížky tohoto druhu může být záclona či jiná tkanina (viz obr. 1.26, kap. 1.3). Kdybychom uvažovali (ekvidistantní) rozložení překážek do



Obrázek 1.15: Optická 2D mřížka

směru osy  $x$  a  $z$ , ale také  $y$ , dostali bychom **3D mříž** (viz obr. 1.16). Šrafovaní tvořené diagonálami začínajícími vlevo dole a končícími vpravo nahoře naznačuje rovinu  $(x, 0, z)$ , naproti tomu šrafovaní tvořené diagonálami začínajícími vlevo nahoře a končícími vpravo dole naznačuje rozložení překážek do směru osy  $y$  (třetí rozměr).



Obrázek 1.16: Model 3D mřížky

*Můžeme se s takovýmto rozložením „kuliček“ v prostoru někde setkat? Mohla by se nám znalost difrakce v této souvislosti k něčemu hodit? Kde by tento poznatek bylo možné aplikovat?*

*Cvičení.* Pokuste se odpovědět na otázky výše.

### Krystalická struktura látek

*Cvičení.* Difrakci lze využít dvojím způsobem. Uhodněte, co se skrývá pod písmenem A ve dvojici vět níže.

Pomocí A zjistím vlnovou délku daného monochromatického zdroje záření (laseru).

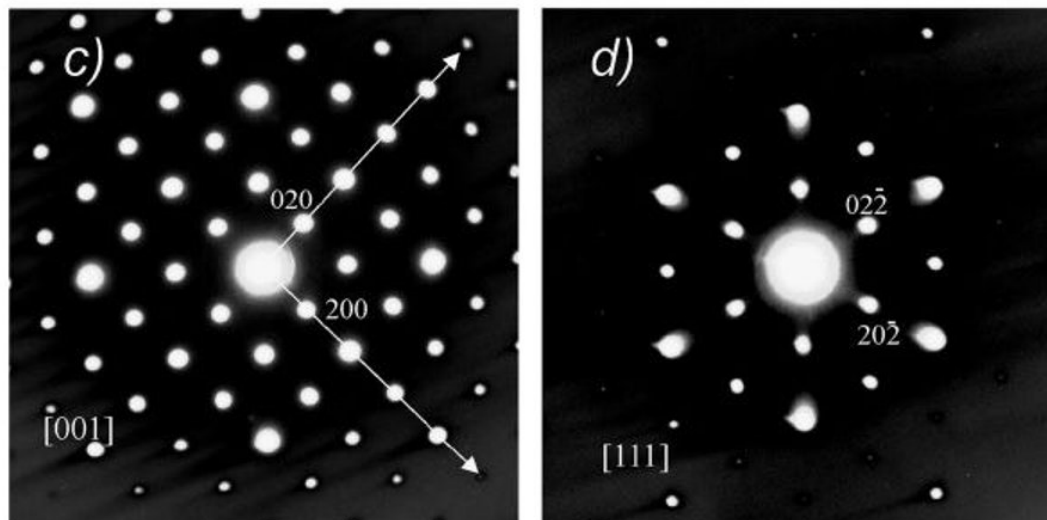
Pomocí vlnové délky zdroje záření zjistím A.

*Řešení:*

A reprezentuje vzdálenost mezi jednotlivými vrypy mříže. Tato obecná tvrzení potvrzuje experiment s He-Ne laserem (viz odst. 1.3.2). Opíráme se o vztah (1.1).

Zvolíme-li si za A vzdálenost mezi body mříže (atomy v krystalu), první tvrzení *de facto* říká, že v materiálovém výzkumu se difrakce využívá pro studium krystalických látek (viz např. ohyb elektronových vln na sloučenině Ti-Co-Al 1.17 [72] (2003) – namísto světla byly použity elektrony, které se chovají také jako vlny, což bylo dokázáno později než-li v případě světla). Difrakci se věnuje současný výzkum. Předmětem aktivity č. 2 v této práci (viz kap. 2.2) je rozhovor s mladou vědkyní, která v rámci svého výzkumu využívá difrakce ke studiu nanočas-

tic. Difrakce se dále využívá například ve **spektrometrech**, kde je zabudovaná mřížka – viz odst. 1.3.2.

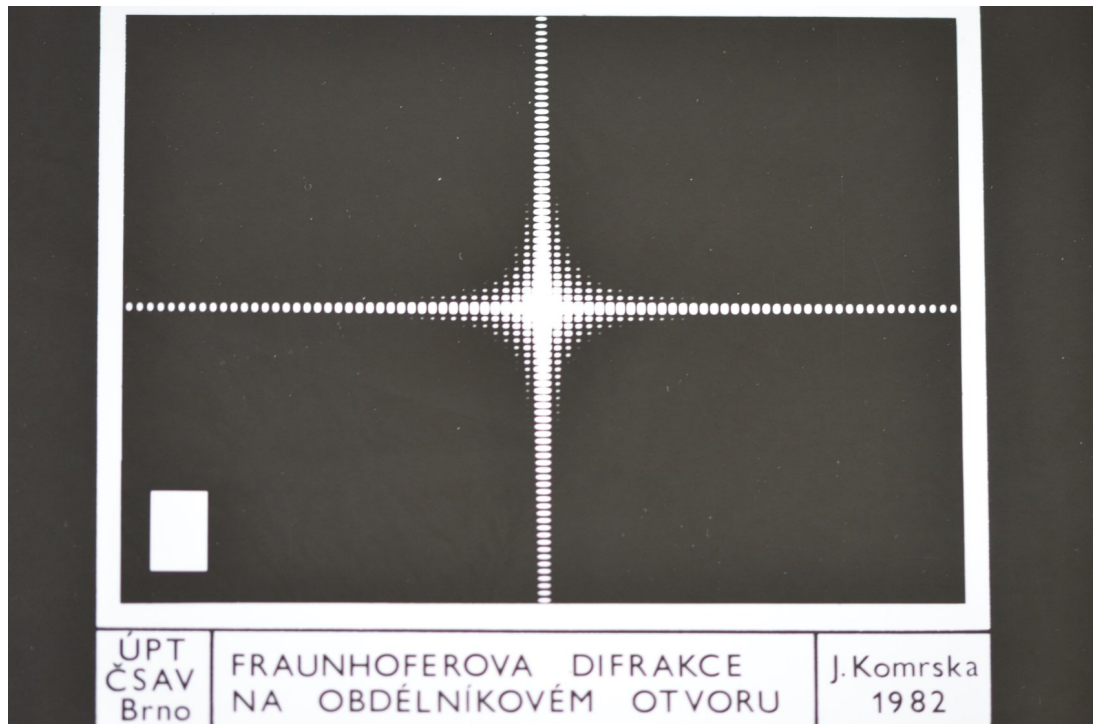


Obrázek 1.17: Difrakce elektronů na sloučenině Ti-Co-Al [72]

#### 1.2.4 Difrakce z hlediska estetiky

Jmenovali jsme si difrakci na štěrbině a dvou štěrbinách, řadě štěrbin, mříži a krystalu (3D mříž). *Na jakých dalších otvorech či překážkách se světlo může ohýbat?* V aktivitě č. 1 této práce (skutečně – viz kap. 2.1) se můžeme setkat s difrakcí na hraně (polorovině) a tenkém vlákně. Můžeme dojít k představě, že otvory či překážky mohou mít různé tvary (a také velikost) a zkoumat v této závislosti podobu difrakčních obrazců. J. Komrska přitom ve svém Difraktografickém albu [20] píše, že obecně neplatí (jak bývá uváděno ve středoškolských učebnicích fyziky), že difrakce nastává, jen když jsou překážky či otvory velikostí srovnatelné s vlnovou délkou dopadajícího záření ( $a \approx \lambda$ ). Ukázal, že difrakce nastává také pro větší otvory. V případě obdélníkové štěrbiny (viz obr. 1.18) je delší strana téměř centimetrová, což je o čtyři řády více než-li vlnová délka laserového ukazovátko ( $\sim \text{nm}$ ).

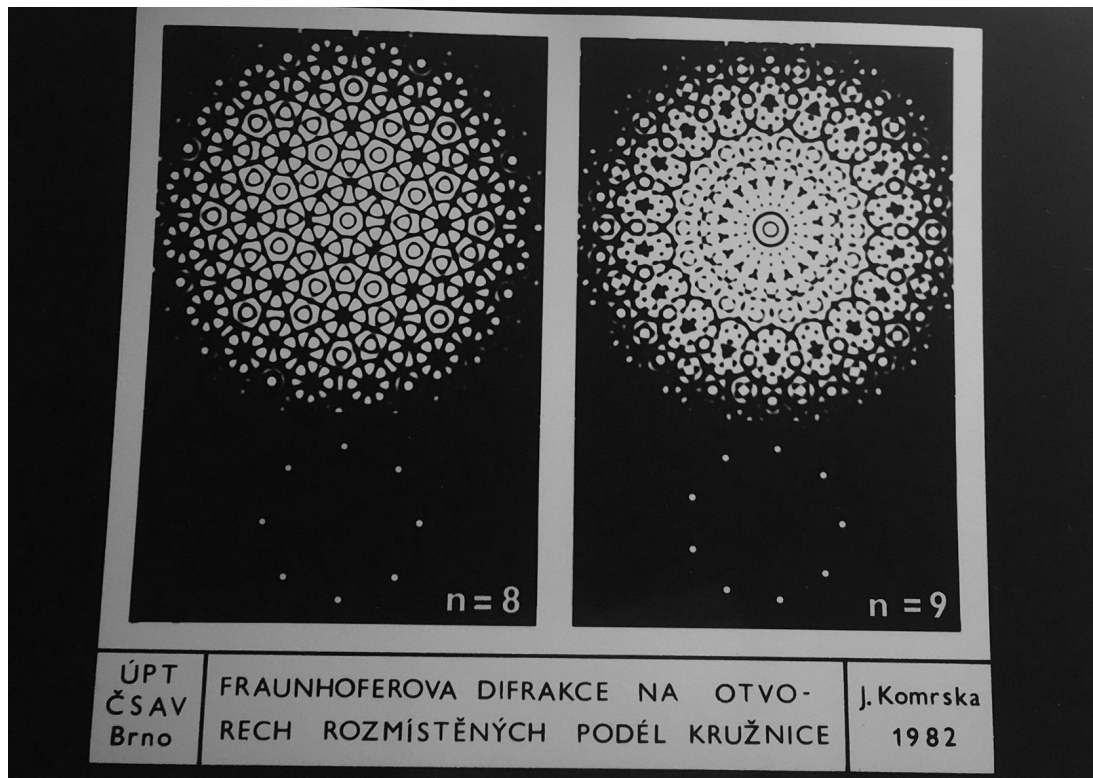
Na následujících obrázcích vidíme difrakci na obdélníkovém (obr. 1.18) a kosodélníkovém otvoru (obr. 1.19). Štěrbiny s těmito tvary mají v obou případech dvoučetnou rotační osu symetrie (při otočení o  $360^\circ$  se do původní polohy vrátí obdélník, resp. kosodélník dvakrát). Ve dvou dimenzích můžeme dále uvažovat otvory uspořádané do kruhu (vzdálené od sebe o stejný úhel), dále různý počet těchto otvorů (velikost i tvar). Zmíněné příklady apertur jsou všechny (rotačně) symetrické. Rotační symetrie, v některých případech i její řád, se při difrakci zachovává, tj. vzniklý obrazec na stínítku pravidelností kopíruje tvar difrakčního prvku (apertury). Jelikož bývá mnohdy platné, že co je symetrické, to je krásné (nejen sněhové vločky), můžou určité počty  $n$  těchto otvorů díky své struktuře vytvořit esteticky zajímavé obrazce – viz obr. 1.20 a 1.21. Další příklady jsou uvedeny v aktivitě č. 1.



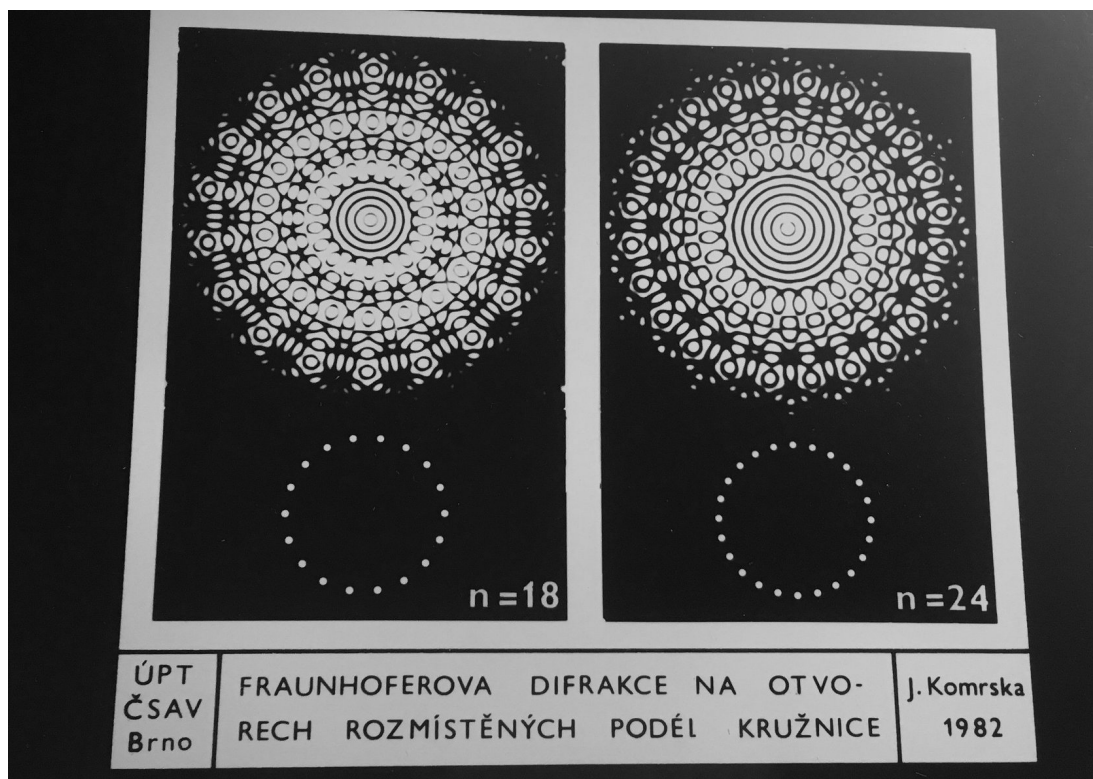
Obrázek 1.18: O12 [20]



Obrázek 1.19: O14 [20]

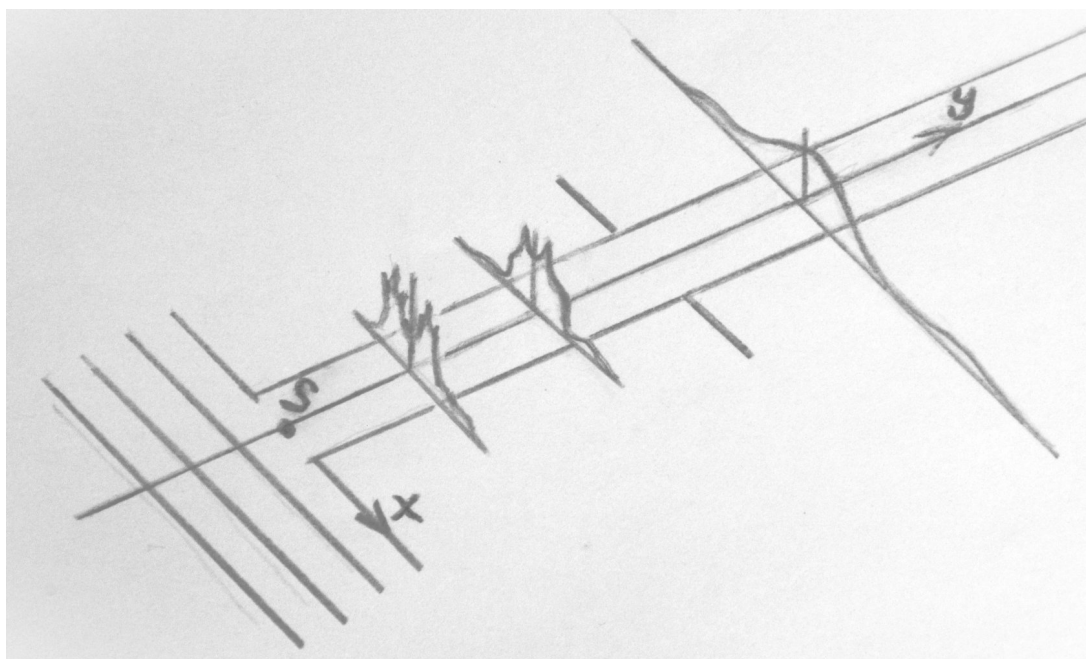


Obrázek 1.20: O20 [20]



Obrázek 1.21: O22 [20]

*Závěrem.* Obecně lze difrakční jevy rozdělit na **Fresnelovy** (konečná vzdálenost) a **Fraunhoferovy** (vzdálená pole). Klíčovým parametrem je vzdálenost stínítka od překážky – viz obr. 1.22. Střed štěrbiny  $S$  leží na ose  $y$ . V kladném a záporném směru osy  $x$  se s dopadajícím světlem vytváří symetrické difrakční obrazce. Na obrázku je vyznačena myšlená mez oddělující Fresnelovy a Fraunhoferovy difrakční obrazce pro případ dané štěrbiny (za křivkou světelné intenzity druhého ohybového obrazce). Vidíme, že s rostoucí vzdáleností je křivka světelné intenzity hladší. V případě Fraunhoferovy difrakce dále platí, že difrakční obrazec získáme tím, že někde za překážku vložíme čočku – difrakční obrazec vznikne v ohniskové rovině čočky. Podmínkou pro vznik takového obrazce je přitom rovnoběžný svazek světla dopadající na překážku (při uspořádání zdroj – překážka – čočka – stínítko).



Obrázek 1.22: Fresnelova a Fraunhoferova difrakce na jedné štěrbině [69]



## 1.3 Pomůcky – difrakce

Tato podkapitola diplomové práce se věnuje experimentům, které se vážou k tématu difrakce světla. Experimenty rozdělíme na dva druhy: odlišíme experimenty, které nejsou finančně nákladné a postavíme je do protikladu k těm, které naopak vyžadují jistou investici. Pomůcky k difrakci jsou v textu zvýrazněny. Fotografie uvedené v této kapitole pochází z osobní sbírky autorky této práce [87].

### 1.3.1 Experimenty finančně dostupné pro školy

Nejprve se poohlédněme po experimentech, jejichž součástí není rozměrnější aparatura a které stojí zpravidla maximálně několik stovek korun. Význačným prvkem, co se týče fenoménu difrakce, je optická mřížka. Obecně s ní můžeme experimentovat dvojím způsobem: samostatně jakožto s ohybovým prvkem anebo ji využívat jako důležitou součástku složitější aparatury.

#### Experimenty, v rámci nichž s mřížkou přímo operujeme

Efekt difrakce zobrazuje **fólie** firmy Edmund Optics (viz obr. 1.23). Nastavíme-li fólii proti osvětlení v místnosti, zobrazí se spektrum difraktovaného záření. Fólie obsahuje mřížku s 1000 vrypů na 1 mm. V současné době je možné zakoupit tuto pomůcku na této webové stránce: [73]. Podobná pomůcka, fólie se sadou



Obrázek 1.23: Ohyb světla na fólii s ohybovými vrypů

oddělených mřížek se štěrbinami různého uspořádání, je taktéž praktickou ilustrační pomůckou. Různé uspořádání vrypů má za důsledek odlišné obrazce na zdi, které vzniknou, svítíme-li proti zdi na dané mřížky kapesním laserem (viz obr. 1.24). Sérii mřížek vyrobila firma Tessera. Další variantou optické mřížky je **mřížka** ohraničená rámečkem, kterou lze upevnit do stojanu (obr. 1.25). Mřížku je možné pořídit zde: [74]. Lze si vybrat mezi různými počty vrypů na milimetr, z čehož plyne možnost experimentálně porovnat více mřížek. Pokud to finance umožní, je možné vytvořit experiment, jak je popsáno v následujícím odst. 1.3.2.



Obrázek 1.24: Difrakce na fólii s různými vrypky

Jakožto mřížka může posloužit také **záclona** (jak je uvedeno v [20]). Na foto-

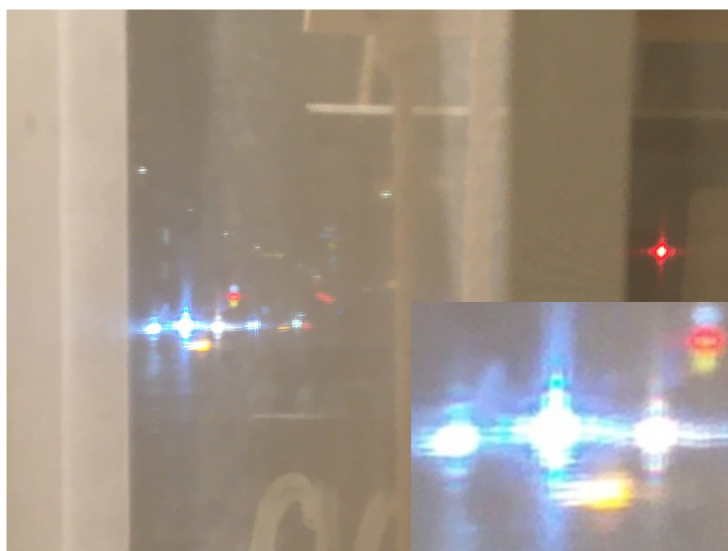


Obrázek 1.25: Difrakční mřížka: 300 vrypů / mm

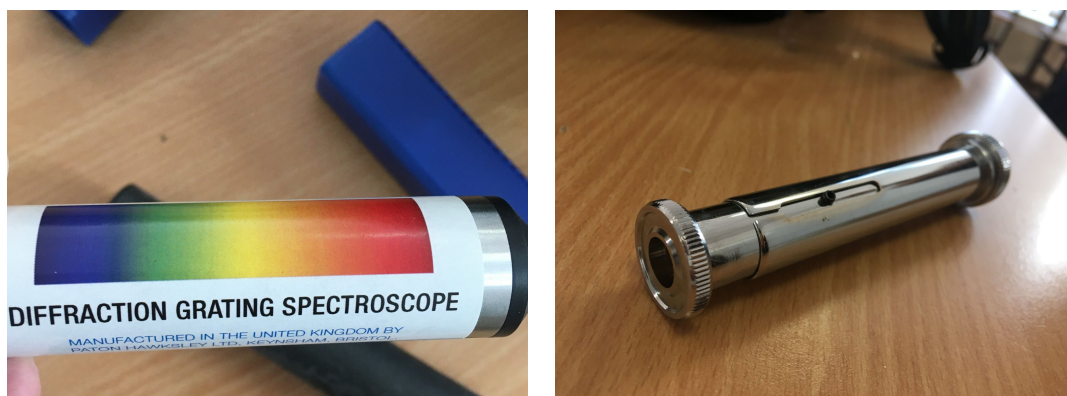
grafii níže (obr. 1.26) můžeme pozorovat ohyb světla z čelních světel automobilů. Fotografie byla pořízena v listopadu roku 2023 v kavárně na rohu ulice v blízkosti Nádraží Libeň. Ohybu světla můžeme rovněž docílit pomocí **difrakčních brýlí** [75]. Další pomůckou k tématu difrakce může být **CD**, případně **DVD** (viz fotografii I v kap. 4.1).

### **Pomůcky, u kterých není mřížka viditelná (je pevně zabudovaná uvnitř)**

První pomůckou, která patří do této kategorie, jsou **spektroskopy**. Některé lze pořídit za stovky korun [76], jiné jsou o řád dražší [77], [78]. Poslední dva typy jsou dostupné na Katedře didaktiky fyziky Matematicko-fyzikální fakulty Univerzity Karlovy v Praze (KDF MFF UK) – viz obr. 1.27. Pomocí spektroskopů zkoumáme spektrum daného záření. Zatímco pro zářivky je charakteristické diskrétní spektrum, sluneční světlo uvidíme jako spojitě barevné spektrum. Nevýhodou spektroskopů je absence stupnice; odečítat hodnoty lze pomocí spektrometrů (viz odst. 1.3.2).



Obrázek 1.26: Difrakce na zácloně (a detail interferenčních kroužků)



Obrázek 1.27: Příruční spektroskopy s difrakční mřížkou uvnitř

Možnou alternativou k pomůckám jmenovaným v tomto odstavci jsou námi navržené **aktivity** uvedené v kapitole 2.

### 1.3.2 Pomůcky na KDF MFF UK

Následující řádky věnujeme těm pomůckám, které zpravidla nejsou pro školy finančně dostupné (jejich cena se pohybuje v řádu desítek tisíc korun), je ale možné kontaktovat KDF MFF UK a rezervovat si termín exkurze.

S úvodním odstavcem textu k výuce difrakce na středních školách (kap. 1.2) souvisí následující experiment, dostupný v místnosti fyzikálního praktika, demonstrující **Huygensův princip**: vibrující jehlička vytváří na hladině vody příčné vlnění. Můžeme mu do cesty položit překážku a pozorovat výsledný efekt. Prodejci nabízí školám tzv. vlnové nádoby, jejich cena však dosahuje desítek tisíc korun [79].

#### Helium-neonový laser

V tomto experimentu (viz obr. 1.28) dopadá svazek He-Ne laseru na **difrakční mřížku** (300 vrypů / mm). Mřížku umístíme na stůl s laserem tak, aby byla vzdálena od protější zdi (stínítka) o 1 m. Laserový svazek přitom namíříme kolmo ke zdi. Změříme vzdálenost stop na zdi: tangens úhlu mezi nultým a prvním maximum na zdi je díky zvolené geometrii přímo roven vzdálenosti mezi dvěma stopami. Z podmínky pro interferenční maximum (odst. 3.1.1, tvrzení TF10 pro mřížku) lze pro známou vlnovou délku  $\lambda$  He-Ne laseru (udána výrobcem) a námi vypočtený úhel  $\alpha$  odpovídající  $k = 1$  určit vzdálenost vrypů mřížky  $b$ . Zná-li student  $b$  mřížky, může následně měřením určit neznámou vlnovou délku světelného zdroje, například laserového ukazovátka (student provede opětovné měření s jiným světelným zdrojem).



Obrázek 1.28: Experimentální uspořádání s helium-neonovým laserem

## Interferometry

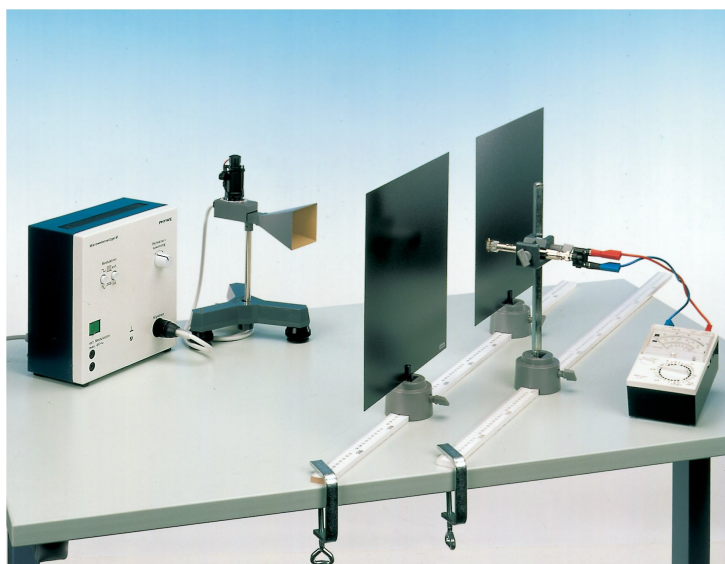
Na KDF je dále k dispozici několik interferometrů, které v učebnicích optiky bývají zmiňovány již v souvislosti s interferencí. Vzhledem k tomu, že je interference provázána s ohybem světla (jak už jsme zmínili v kap. 1.2), lze interferometry považovat za vhodnou pomůcku tematicky předcházející ohybu světla. Na druhou stranu interferometry odlišujeme od těch zařízení, na kterých je zkoumána speciálně difrakce, a ta jsme uvedli se stručným popisem zvlášť. Co se týče interference (odrazu a lomu) jsou na KDF dostupné následující pomůcky: Michelsonův interferometr (na obr. 1.29), Michelsonův interferometr pro ultrazvukové vlny, Michelsonův interferometr pro mikrovlny a Fresnelova zrcadla. Kromě zmíněných interferometrů bývá v učebnicích často uváděn Fabry-Perotův interferometr. Princip chodu paprsku skrze aparaturu interferometru je lehce uchopitelný, pokud student pochopí odraz, lom a užití kolmice (v závislosti na tvaru objektu) – viz kap. 3.1.



Obrázek 1.29: Michelsonův interferometr

## Difrakce světelných mikrovln

Jedna z úloh, které je možné na KDF v rámci Interaktivní fyzikální laboratoře (IFL) aktivně využívat, je difrakce. Uspořádání pomůcky popisuje obr. 1.30. Mikrovlnné vlnění postupuje k překážce, kterou tvoří dva plechy vzdálené od sebe o štěrbinu určité šířky. Dochází k difrakci. Student může jednat proměřit závislost intenzity záření na vzdálenosti od středu štěrbině (difrakce na štěrbině, obr. 1.31a), a pak také tuto závislost u boční hrany jedné z plechových desek (difrakce na hraně, obr. 1.31b), přičemž jde o vzdálenost měřenou ve směru kolmém ke směru paprsku dopadajícího na štěrbinu. Měření se provádí pomocí voltmetru, detekované napětí je přímo úměrné intenzitě modulovaného světla (škálování napětí je analogické ke škálování intenzity světla, tj. srovnává se detekované napětí s napětím, které odpovídá nezastíněnému záření); světelnou energii mikrovln na elektrickou energii převádí dioda snímače (detektoru). Dále lze zafixovat detektor uprostřed štěrbině a o stejný díl napravo i nalevo měnit vzdálenost plechových desek. Takto lze v daném místě změřit závislost intenzity záření na šířce štěrbině (obr. 1.31c). Celkem tedy student může proměřit tři závislosti.



Obrázek 1.30: Difrakce mikrovln: experimentální uspořádání [80]

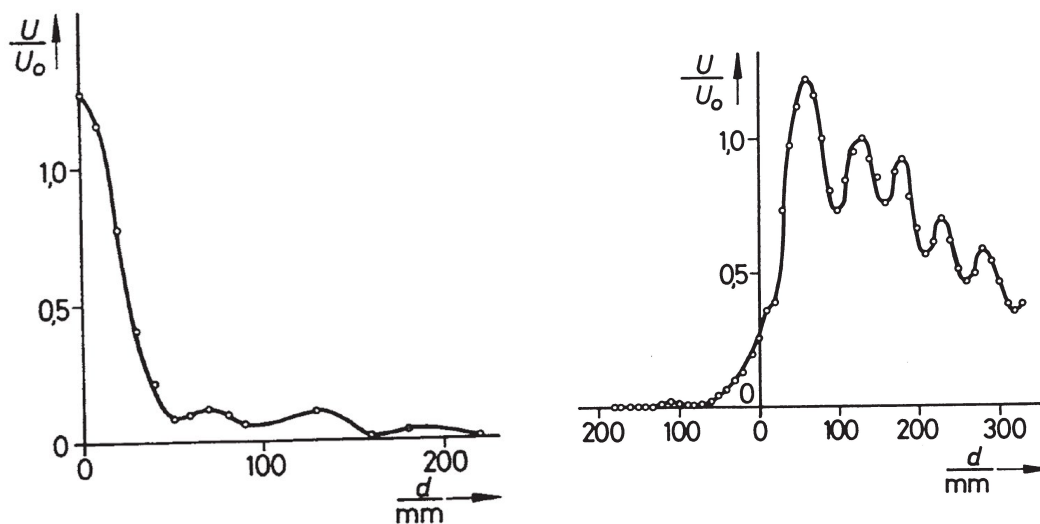
### Difrakce ultrazvuku

Podobně je na KDF možné využít úlohy Difrakce ultrazvuku na hraně. Toto experimentální uspořádání dokazuje, že ohyb je platný i pro podélné vlnění. Zde se, podobně jako v předchozím experimentu, ultrazvukovým mikrofonom proměřuje závislost intenzity světla na vzdálenosti od boční hrany překážky, přičemž detektorem je pohybováno v paralelní rovině vzhledem k ploše překážky (viz obr. 1.32 a 1.33). Osa  $x$  v grafu 1.33 opět odpovídá vzdálenosti měřené ve směru kolmém ke směru paprsku dopadajícího záření. 0 značí hranu, kladné hodnoty  $x$  posun směrem od (hrany) plechu, záporné hodnoty  $x$  posun za plech (viz obr. 1.32).

### Spektrometry

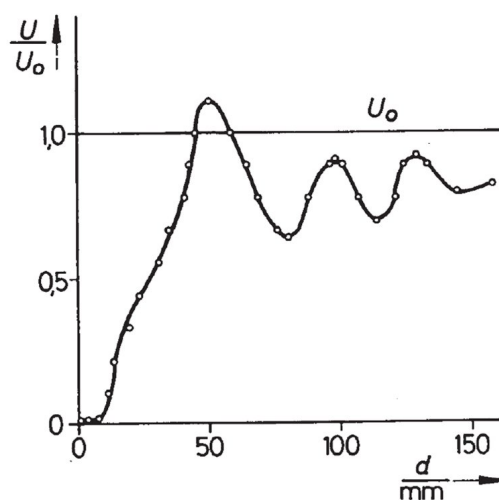
Další experiment, který je možné v souvislosti s difrakcí provést, je měření spektra výbojových trubic daných plynů. Na spektrální trubice daných prvků (helium, vodík, neon,...) v plynném stavu (při nízkém tlaku) pohlédneme skrze **mřížkový spektrometr** a odečteme diskétní hodnoty vlnových délek, které energeticky odpovídají přeskokům elektronů v atomech látky. Pro každou látku (prvek) jsou charakteristické jisté přeskoky, a ty ji tedy určují. Klíčovým elementem spektrometru je difrakční mřížka, výrobce udává počet vrypů cca 200 na milimetr. Na obr. 1.34 můžeme vidět detail hledáčku mřížkového spektrometru (stupnici) při proměřování diskretních čar nezmáhaného prvku. Porovnáním změřených čar s tabelovanými hodnotami můžeme určit daný plyn. Obecně složení látek se věnuje spektrální analýza (složení hvězd, včetně Slunce).

Alternativou mřížkového spektrometru je hranolový spektrometr, jehož stěžejním prvkem není mřížka ale rozkladný hranol. Tuto aparaturu lze na KDF také využívat. Modernější variantou je spektrometr firmy Vernier: Vernier Emissions



(a)

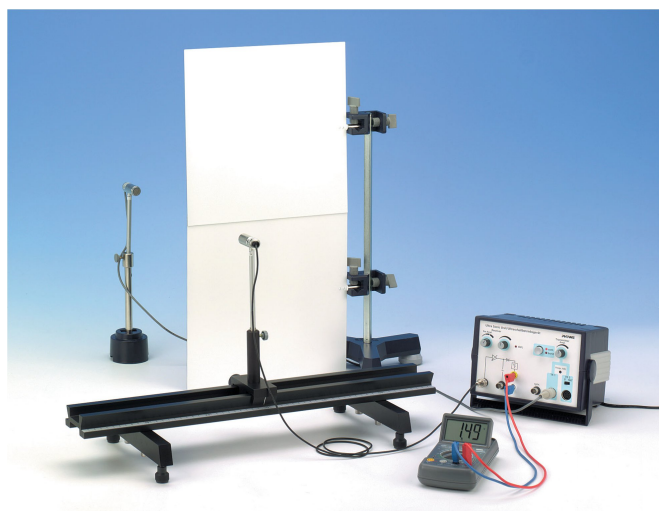
(b)



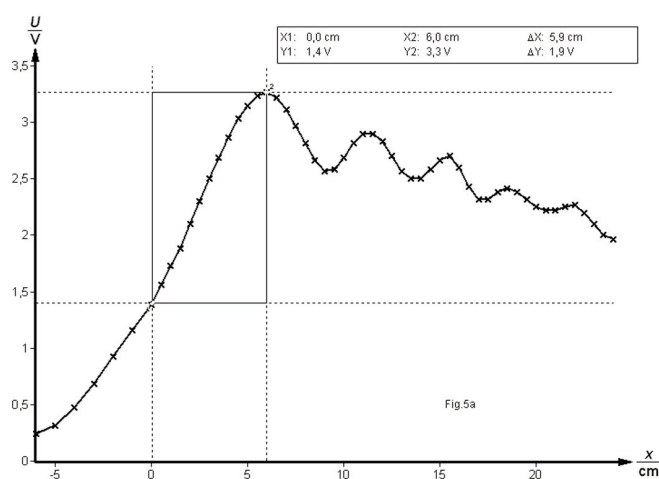
(c)

Obrázek 1.31: Difrakce mikrovln: závislost naměřeného napětí (intenzity světla) na vzdálenosti detektoru: (a) od středu štěrbin, (b) od boční hrany překážky a (c) na šířce štěrbin [80]

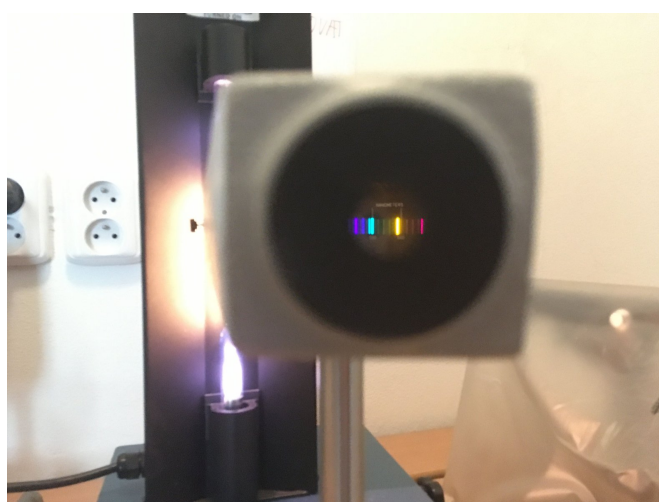
Spectrometer (obr. 1.35, [81]). Naměřené spektrum se zobrazuje v programu, který je třeba mít nainstalovaný v počítači, anebo pomocí „LabQuestu“, obojí skrze připojení ke spektrometru.



Obrázek 1.32: Difrakce ultrazvuku: experimentální uspořádání [82]



Obrázek 1.33: Difrakce ultrazvuku: závislost naměřeného napětí (intenzity světla) na poloze detektoru od boční hrany překážky [82]



Obrázek 1.34: Měření spektra výbojové trubice





Obrázek 1.35: Spektrometr firmy Vernier

## 2. Difrakční jevy – aktivity

V rámci této kapitoly uvádíme dvě aktivity, které se věnují tématu ohybu světla. První aktivita (aktivita č. 1) je praktickým cvičením, které obsahuje množství příkladů difrakčních jevů. Vybrané fotografie jsme zvolili na základě doporučení v [20]. Úlohy 1–7 se vztahují k fotografiím pod pojmenováním O1–O5. Úlohy 8–11 k fotografiím O6–O8, O10–O11 a O15–O16. V rámci tohoto cvičení si učitel může sám zvolit, jaké úlohy bude chtít se studenty splnit (z časových důvodů). Cvičení je koncipováno tak, aby mohlo navázat na teoretický úvod k difrakčním jevům (viz podkapitulu 1.2). Do odpovědí na vybrané otázky jsme zařadili také praktické poznámky. **Instrukce k aktivitě č. 1:** Otázky a fotografie difrakčních jevů (O1–O8, O10–O11, O15–O16) je třeba rozdat studentům, odpovědi na otázky jsou určeny učitelům.

Následující aktivita (aktivita č. 2) se rovněž týká difrakce (zmíněna je Braggova koherentní difrakce), je ale možné ji zařadit do jakékoliv části vyučování. Jedná se o rozhovor se studentkou doktorského programu na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze. Skrze tuto aktivitu mají studenti možnost získat informace o současném výzkumu. Text vznikl v průběhu jara roku 2023. Díky přímé zkušenosti mladé vědkyně se mohou studenti blíže dovědět o činnostech či práci, které by se mohli v budoucnu věnovat také oni. Rozhovoru následuje sada otázek, odpovědi jsou uvedeny na další straně. Nevýhodou aktivity může být časová náročnost (čtení), proto aktivitu navrhujeme tak, aby fakta byla diskutována ve škole a postřehy mladé vědkyně mohly posloužit těm, kteří o vědecké kariéře uvažují anebo se obecně o fyziku zajímají nad rámec běžné výuky (domácí čtení).

**Instrukce k aktivitě č. 2:** nechme studenty přečíst si rozhovor v rozsahu položených otázek pod značením 1)–5) a promyslet si odpovědi na otázky pod textem. K textu lze přistoupit „fyzikálně“, poté „eticky“ (v souladu s pořadím otázek) – zde se i v rámci fyziky může učitel přiblížit humanitním disciplínám – a na závěr „profesně“ – studenti si mohou díky rozhovoru alespoň rámcově představit, co může obnášet práce experimentálního fyzika, a lze se s nimi pobavit, jestli by je taková životní cesta lákala.

## 2.1 Aktivita č. 1: Cvičení: Příklady Fresnelových a Fraunhoferových ohybových jevů

### *Opakování*

0. Připomeňme si obecnou charakteristiku Fresnelových a Fraunhoferových difrakčních jevů.

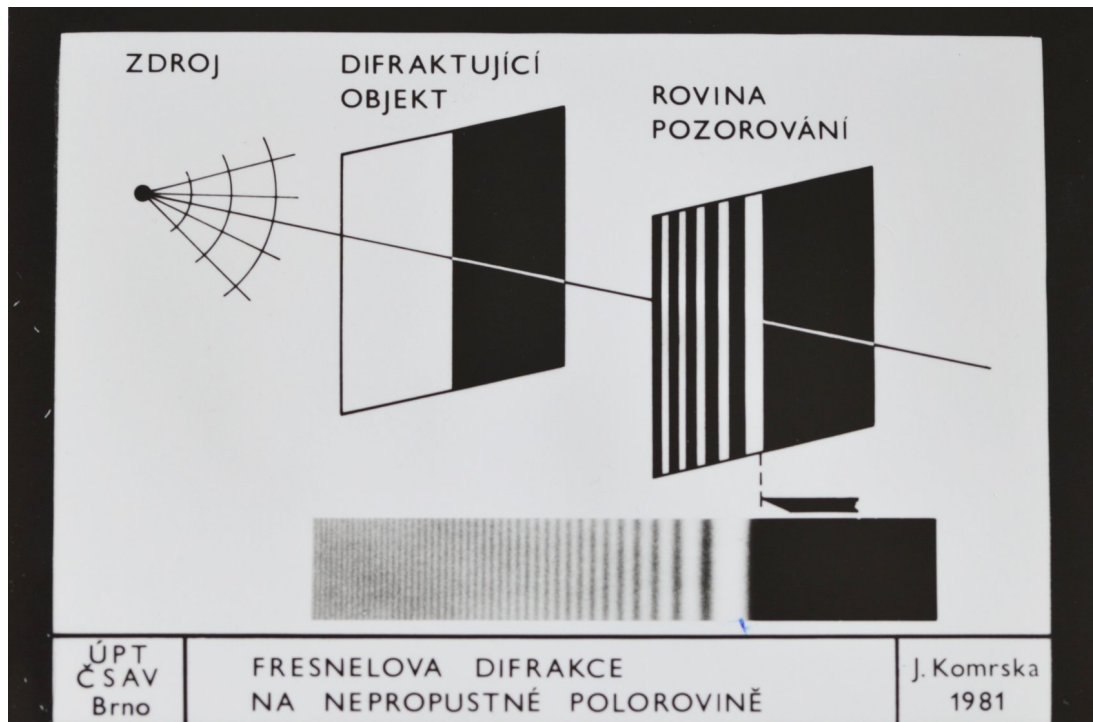
Poznámka: budeme pracovat s relativní světelnou intenzitou  $I$ . Tu definujeme jakožto poměr naměřené světelné intenzity vzhledem k intenzitě záření, které není omezené překážkou. V případě, že relativní světelná intenzita nabývá hodnoty 1, shoduje se naměřená světelná intenzita s intenzitou nezastíněného světla. Hodnoty  $> 1$  odpovídají intenzivnějšímu záření (světlejším místům), hodnoty  $< 1$  méně intenzivnějšímu záření (tmavším místům).

### *Fresnelovy difrakční jevy*

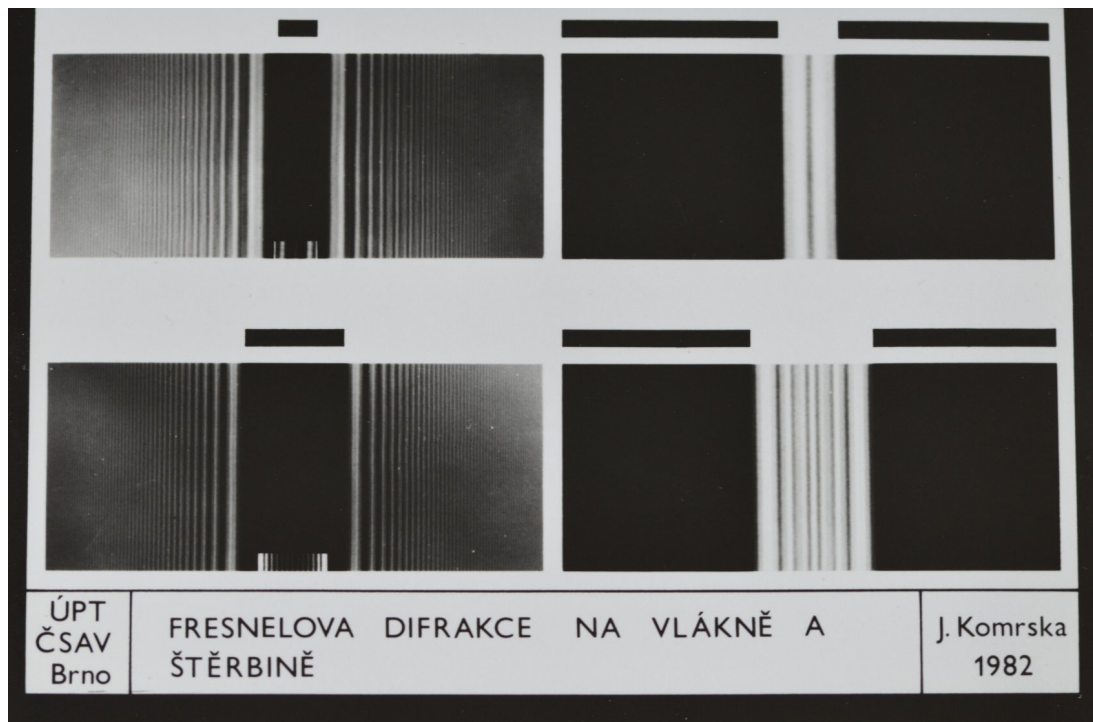
1. Nalezněte mezi obrázky O1–O5 proslulý Youngův experiment.
2. Proč byl tento experiment významný?
3. Popište, co můžete pozorovat na čtvrtém snímku na obrázku O3.
4. Porovnejte třetí a čtvrtý experiment na obrázku O3.
5. Srovnajte Fresnelovu difrakci na nepropustné polorovině (obrázek O1) a Fresnelovu difrakci na vlákně (obrázek O2) – co mají společného?
6. Na základě tvaru difrakční stopy na obrázku O1 nakreslete přibližný tvar křivky světelné intenzity  $I = I(x)$  v rovině pozorování.
7. Nakreslete přibližný tvar křivky světelné intenzity  $I = I(x)$  pro horní šterbinu na obrázku O2.

### *Fraunhoferovy difrakční jevy*

8. Proveďte totéž co v bodě 6. pro obrázek O6. Omezte se na horní polorovinu.
9. Prohlédněte si difrakční obrazce na fotografiích na obrázku O15. Čím se daná experimentální uspořádání liší? Jak se to projevuje na výsledku experimentu?
10. Prohlédněte si difrakční obrazce na fotografiích na obrázku O16. Zodpovězte otázku z bodu 9.
11. Prohlédněte si tvar obrazců na stínítku v případě obrázků O11, O8, O7 a O10. Co mají společného? Jaký tvar difrakčního obrazce je charakteristický pro šterbiny s ostrými hranami?



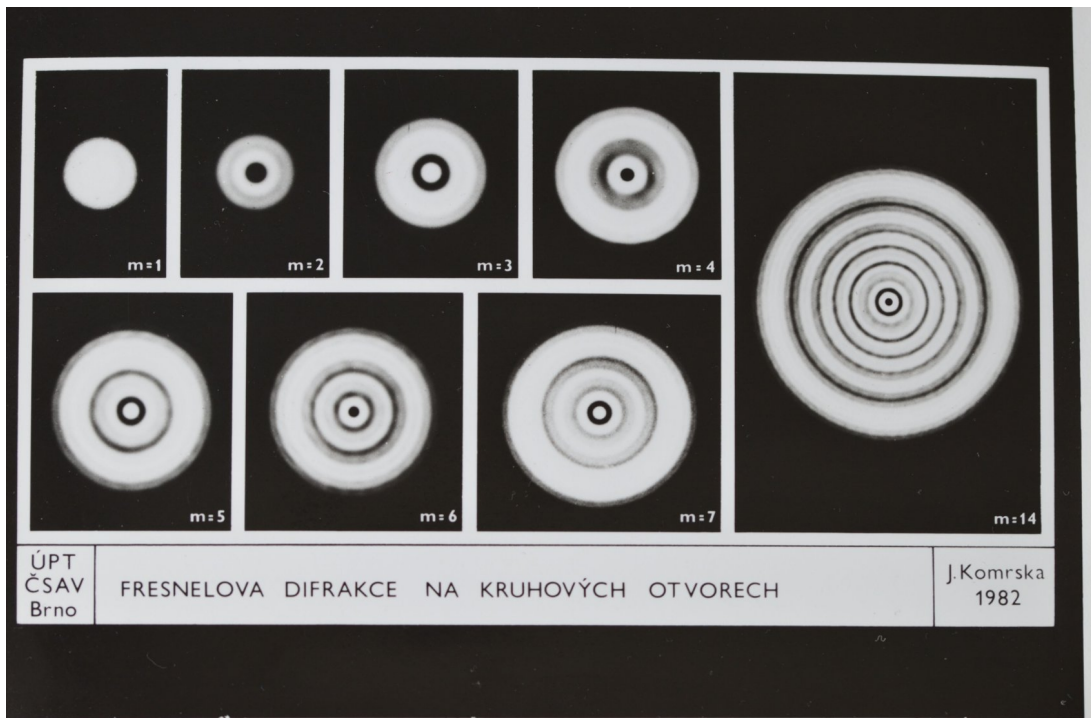
Obrázek 2.1: O1 [20]



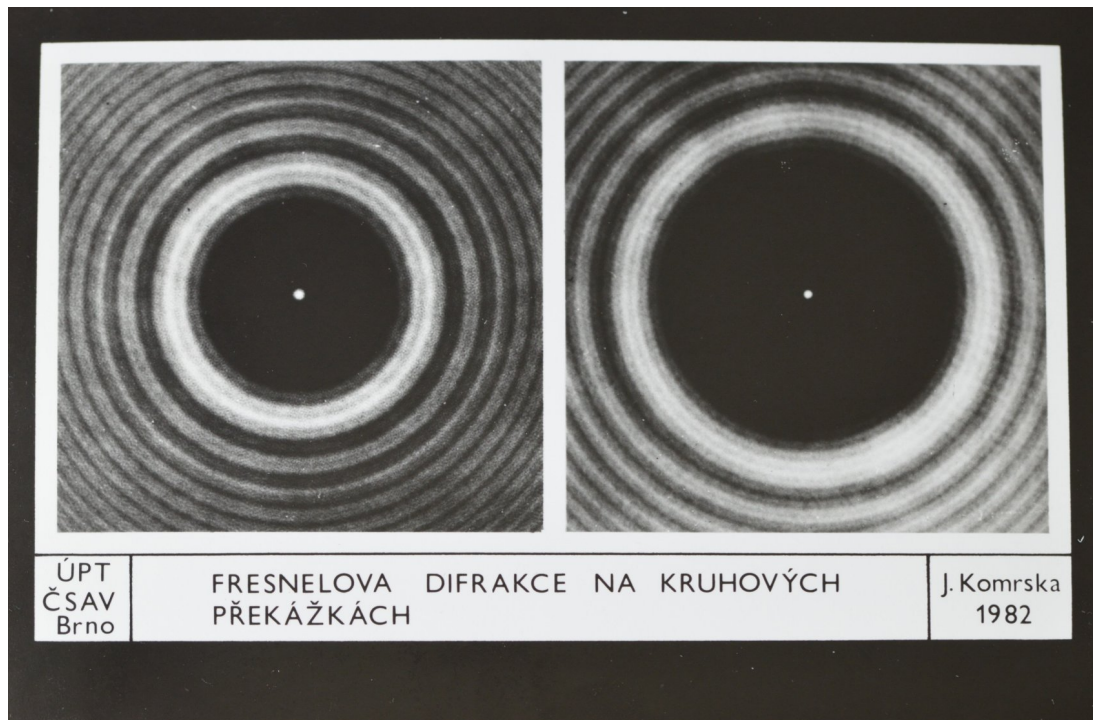
Obrázek 2.2: O2 [20]



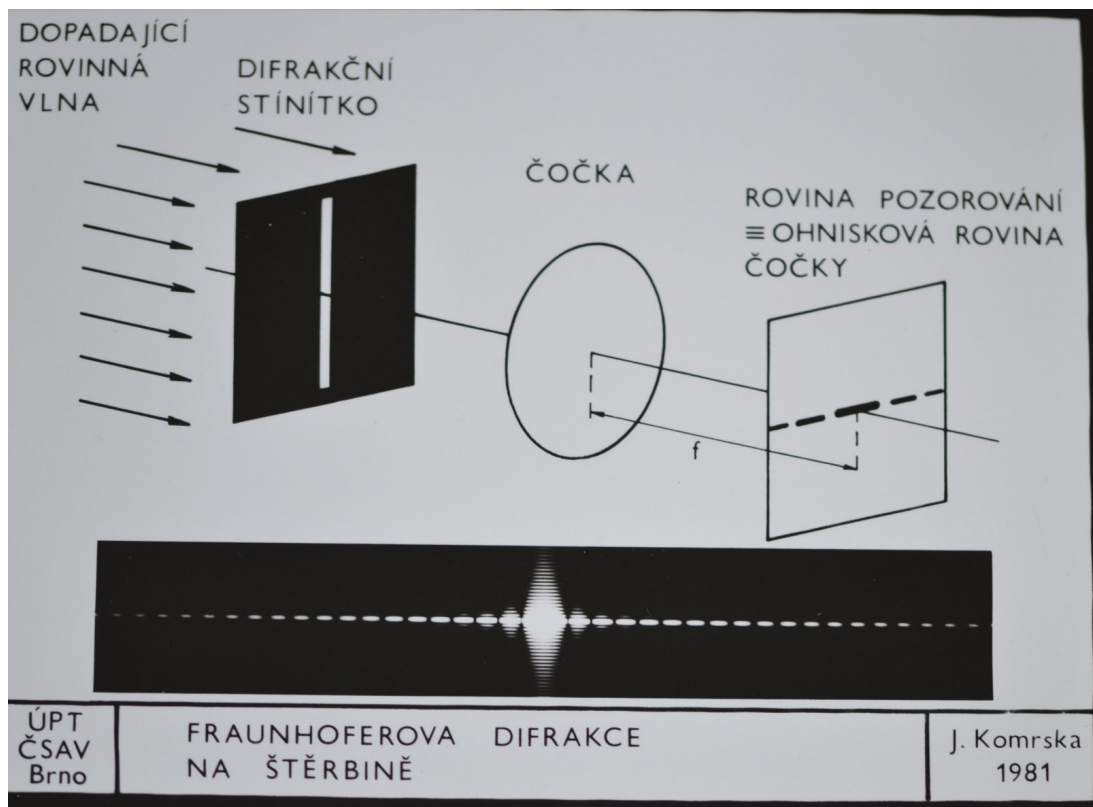
Obrázek 2.3: O3 [20]



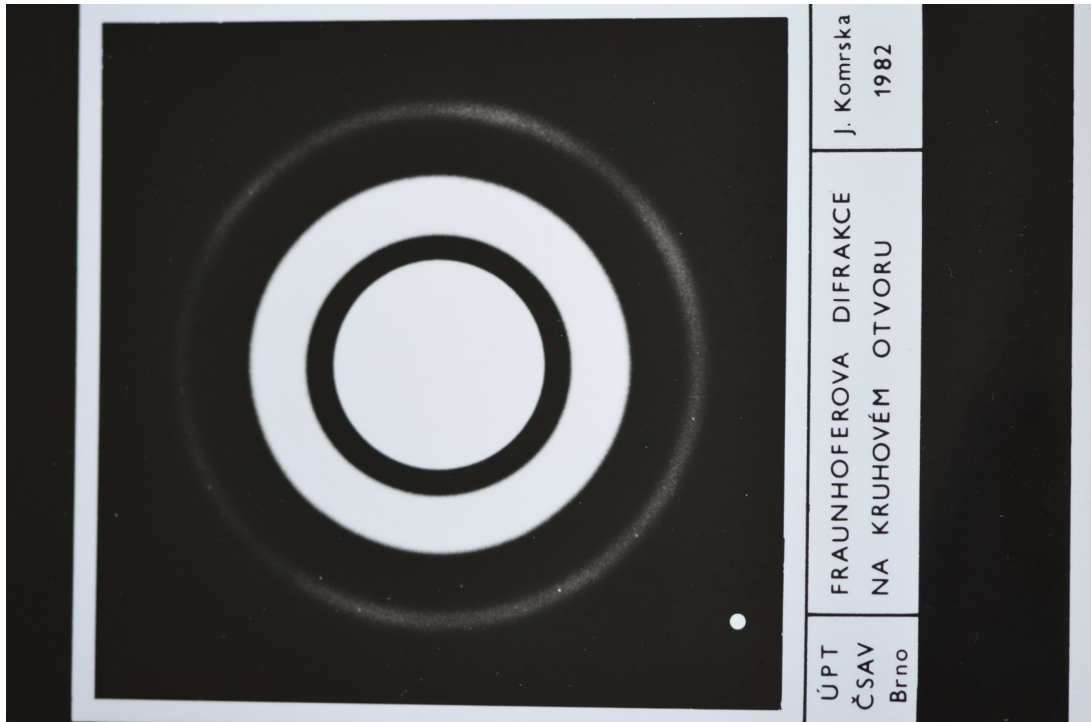
Obrázek 2.4: O4 [20]



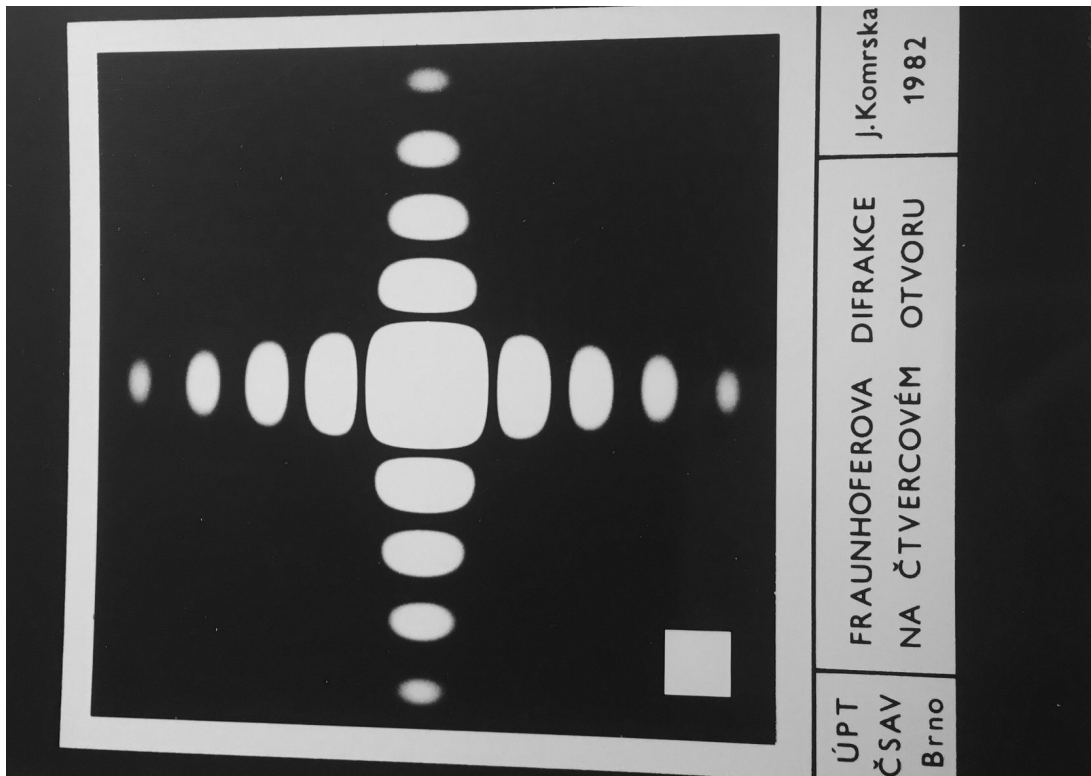
Obrázek 2.5: O5 [20]



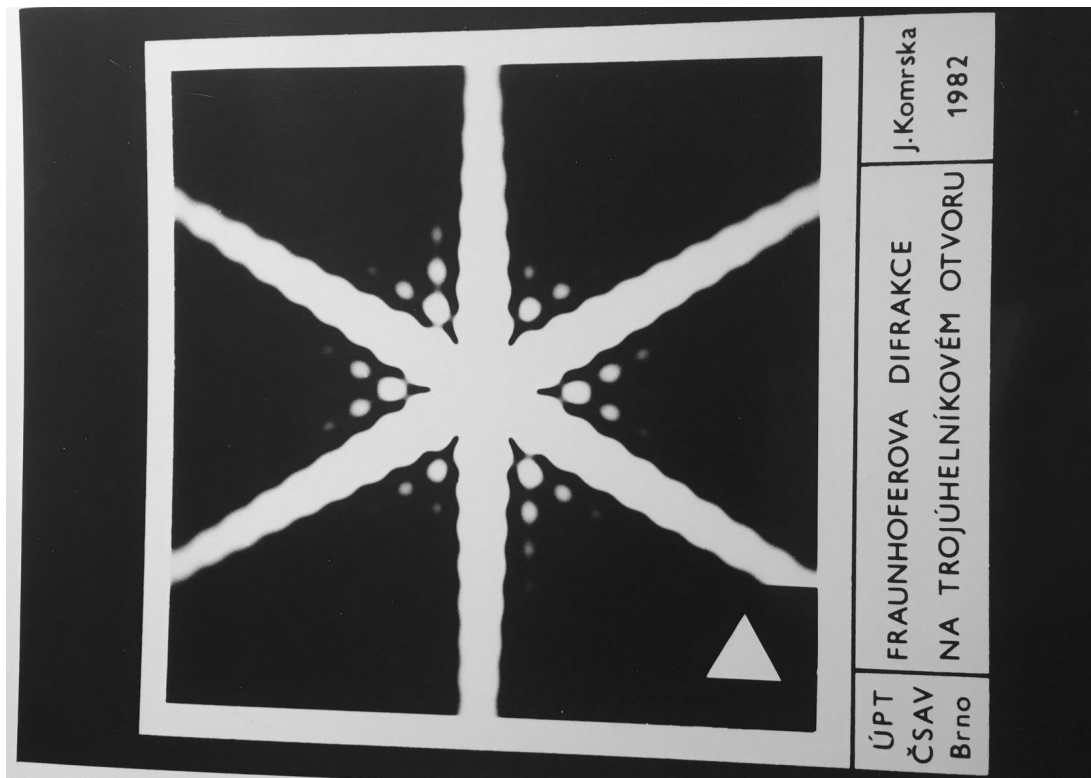
Obrázek 2.6: O6 [20]



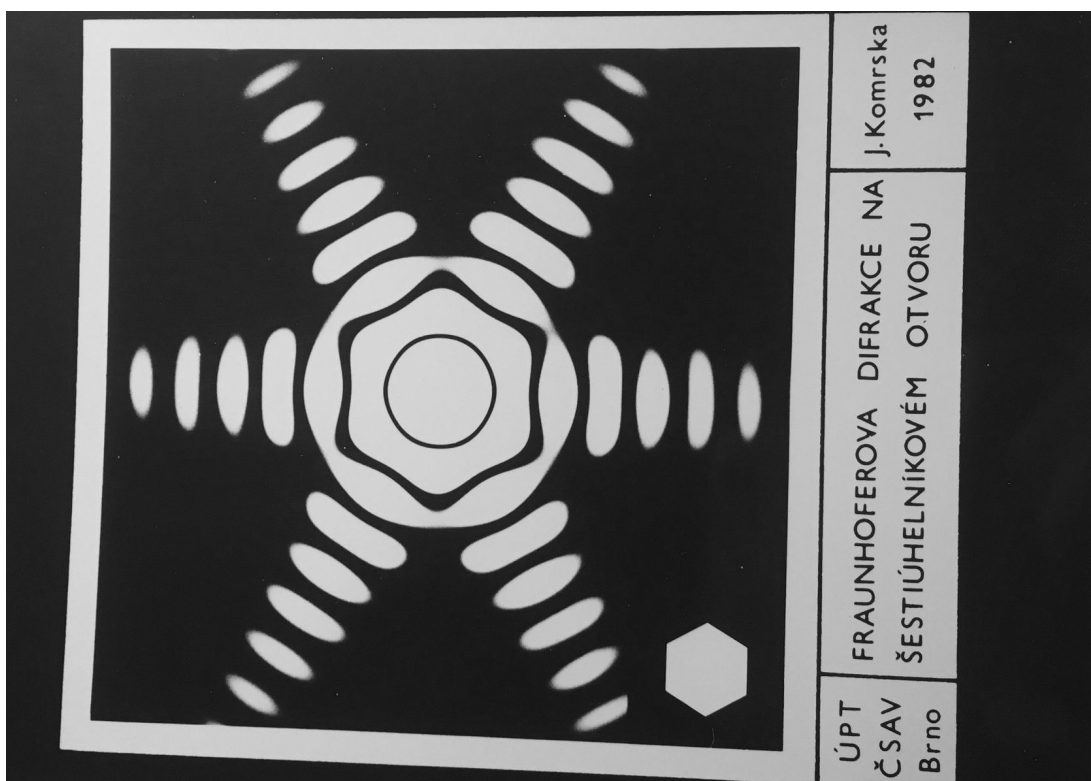
Obrázek 2.7: O11 [20]



Obrázek 2.8: O8 [20]

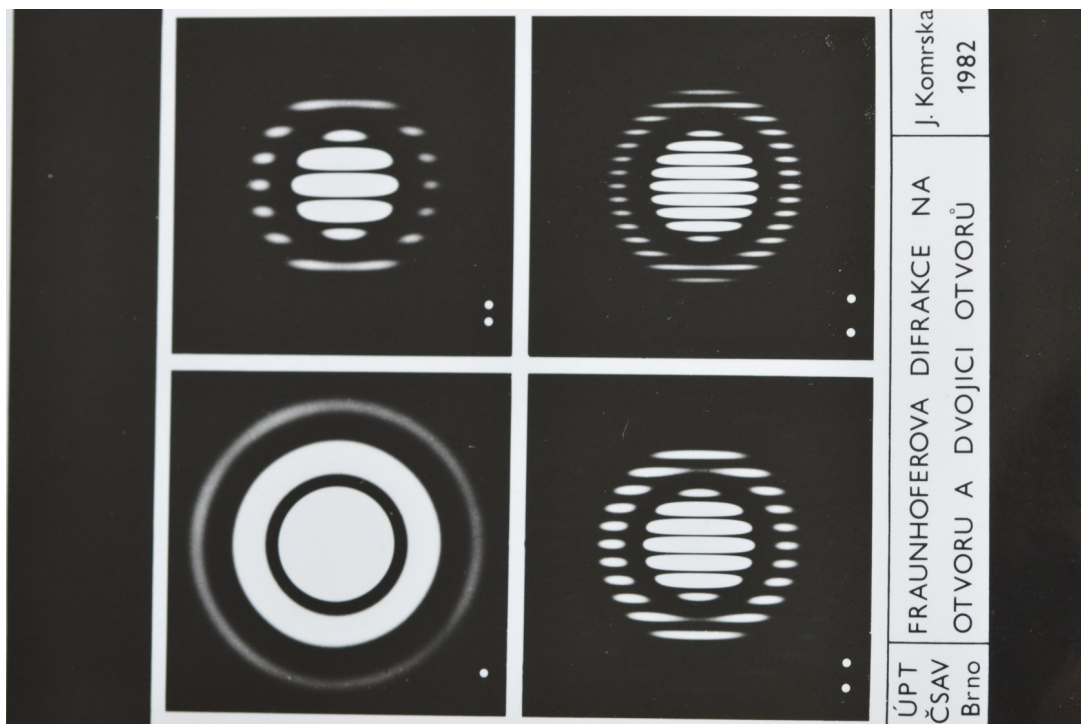


Obrázek 2.9: O7 [20]

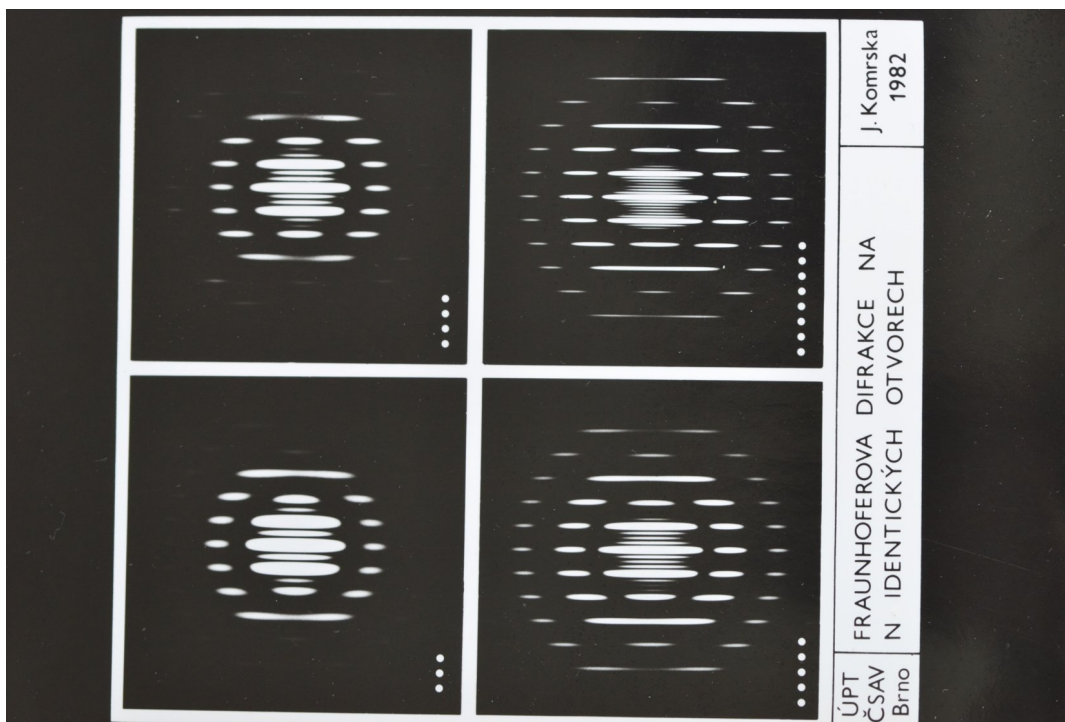


Obrázek 2.10: O10 [20]





Obrázek 2.11: O15 [20]



Obrázek 2.12: O16 [20]

*Odpovědi:*

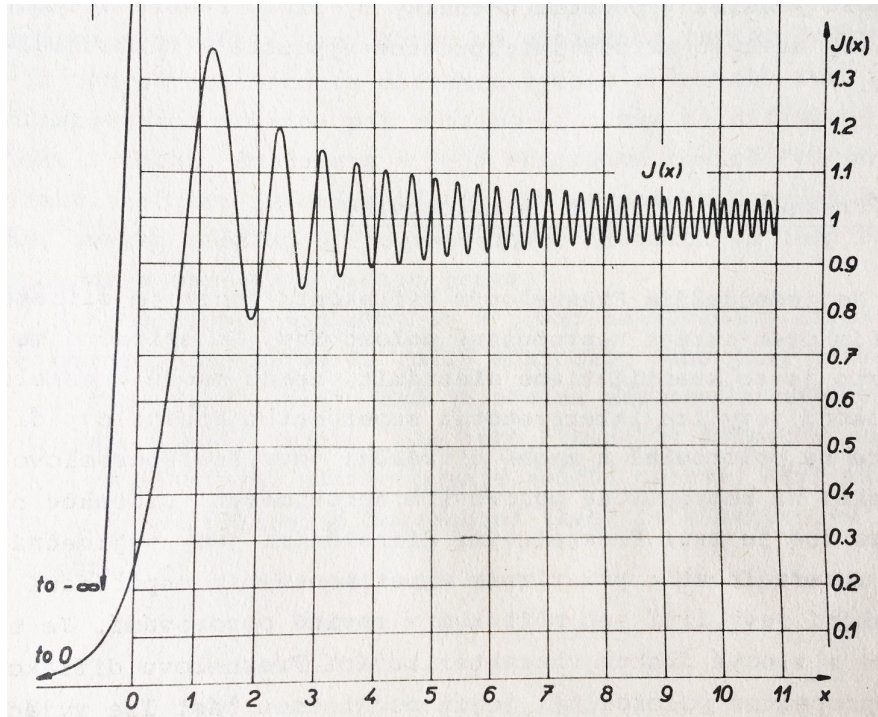
1. Obrázek O3.
2. Youngův pokus sehrál zásadní úlohu při odůvodnění vlnové podstaty světla (interferenční maxima a minima).
3. Ohybová maxima, minima (světelné intenzity). V horní části jsou znázorněny štěrbinové dané šířky a silné černé čáry reprezentují oblast geometrického stínu.
4. Experimenty se liší šířkou štěrbin a také nepatrně vzdáleností mezi štěrbinami. To má za důsledek odlišné difrakční obrazce. Na levém obraze vidíme podstatně větší počet ohybových maxim a minim. Naproti tomu pravý obrazec má širší ohybová maxima. Oba obrazce jsou osově symetrické.
5. Na vlákno lze pohlížet jako na dvě opačně orientované poloroviny, které se překrývají o tloušťku vlákna. Tedy difrakci na vláknech lze chápat jako superpozici dvou ohybových jevů.
6. Tvar křivky odpovídá grafu 2.13, přičemž ale šířka maxim a minim odpovídá proužkům na fotografii na obr. O1. Zprava od hrany nabývá relativní světelná intenzita nejprve nejnižších hodnot (okraj černé plochy), poté je maximální, s největší šířkou píku. Následuje užší minimum, které již odpovídá „menší tmě“. Následuje opět maximum, které je rovněž užší a méně intenzivní. Takto sekvence horních a dolních píků pokračuje, dokud se nedostane do relativně stabilní minimální hodnoty oscilace okolo jedné, s nejkratší vzdáleností sousedních píků. Pro splnění této úlohy je vhodné studentům udat minimální a maximální hodnotu relativní světelné intenzity (přibližně 0,3 a 1,4). V grafu 2.13 je světelná intenzita označena písmenem  $J$  namísto námi užívaného  $I$ .

Při kreslení mohou studenti skrze prostou logiku dojít k obdobnému grafu světelné intenzity, jako je na obr. 2.14. Dokonce je rozumné tento graf považovat za výchozí. *A priori* z fotografie není zřejmé, jakým způsobem se intenzita mění mezi jednotlivými proužky. Lze však upozorovat odlišnou tloušťku a tmavost, resp. světlost proužků a porovnat ji s nezastíněným světlem (viz levá část fotografie) referenční intenzity  $I_0$ . Ke správné křivce můžeme intuitivně dospět skrze analogii ke křivce světelné intenzity v případě ohybu na jedné štěrbině (viz kap. 1.2).

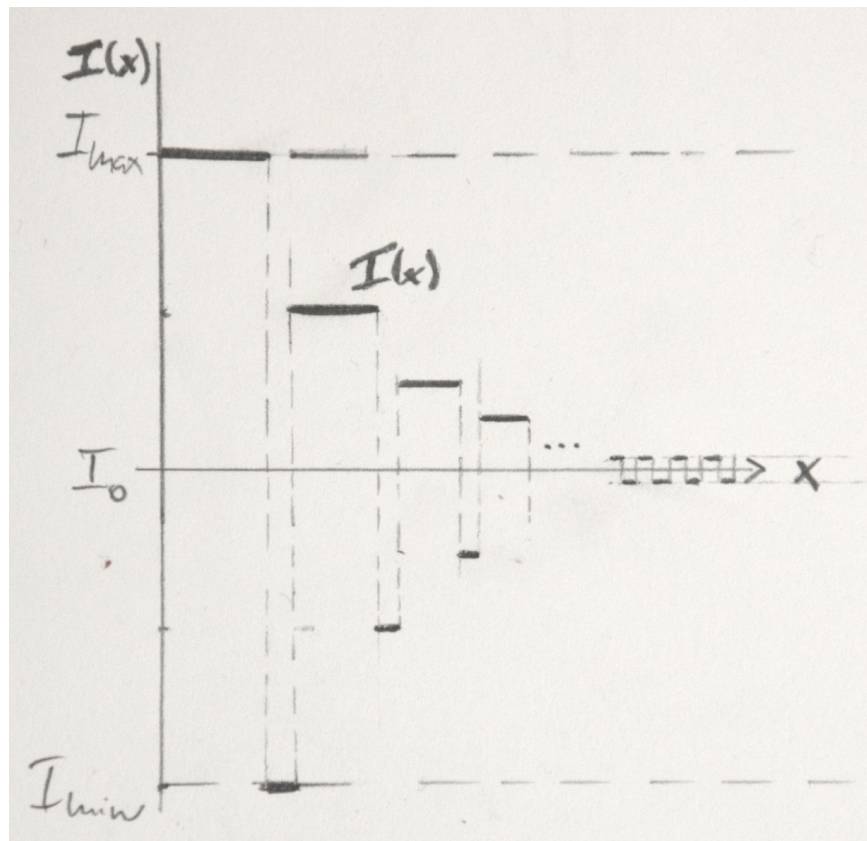
Ke zcela správnému řešení jsme však schopni dospět jedině skrze experiment (viz kap. 1.3.2).

7. Celkový průběh odpovídá křivce na obr. 2.15, vpravo s označením 1.75. Vyjdeme z minima relativní světelné intenzity, tj. uvažujme, že pro  $x \rightarrow \pm\infty$  půjde  $I$  k nule. Maximální relativní intenzitu označme písmenem  $I_{max}$ . Světelnou intenzitu uprostřed štěrbin obklopují (symetricky) širší maximální píky intenzity  $I_{max}$ , následuje konvergence k nule, jejíž přesná podoba je zřejmá z obr. 2.15. Při kreslení můžeme upustit od „zubů“.

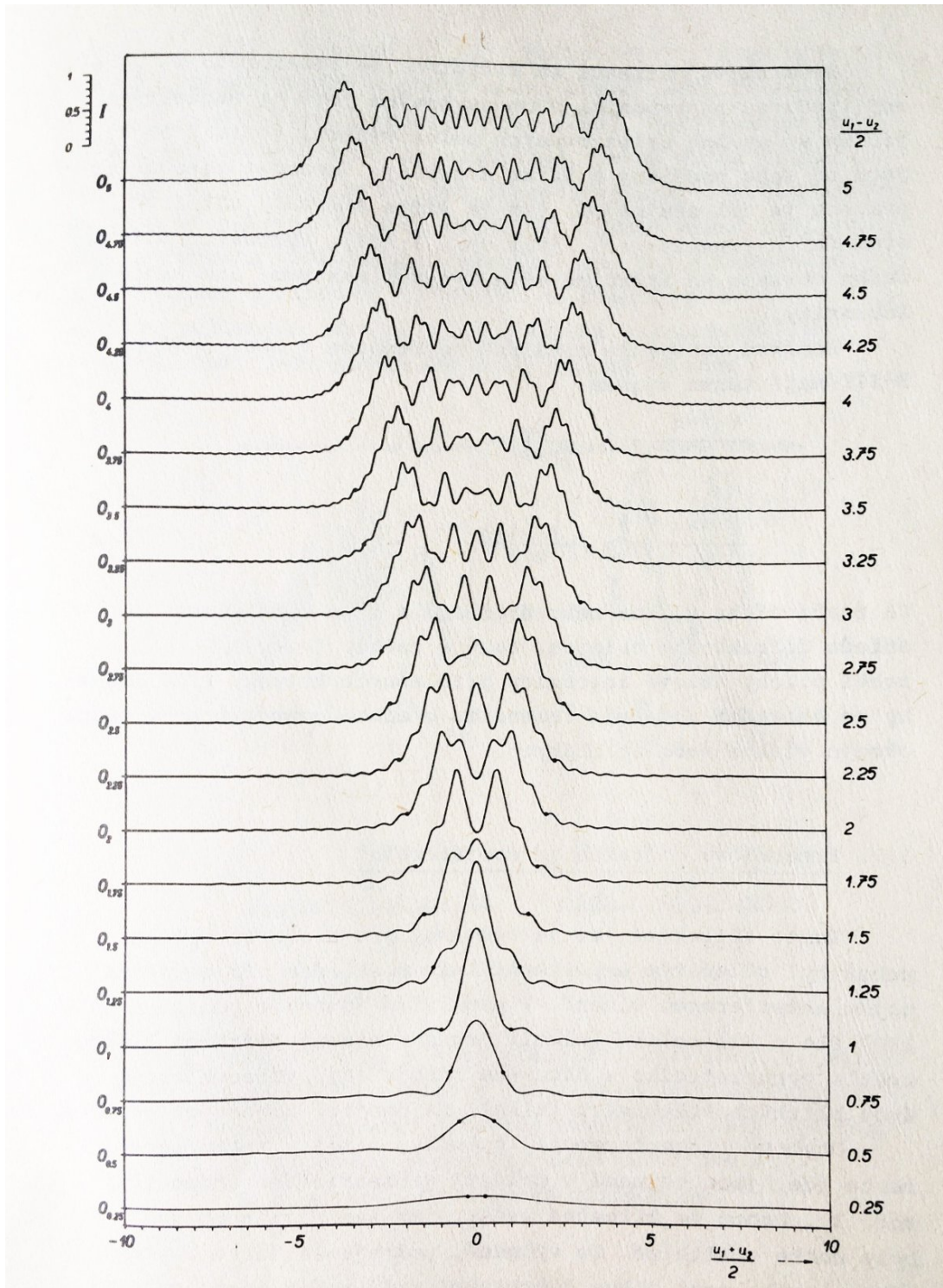
8. Tvar křivky závislosti  $I(x)$  je zřejmý z podélného snímku. Viz také teoretický text k ohybu světla na štěrbině (viz kap. 1.2,  $f(x)$  v grafu 1.10, resp. 1.11).
9. Na prvním obrázku vidíme ohyb světla na kruhovém otvoru. Tvar difrakční stopy kopíruje kruhový tvar štěrbin. Na dalších snímcích pozorujeme ohybové jevy v důsledku ohybu světla na dvou kruhových štěrbinách stejné velikosti, pokaždé jinak vzdálených. S rostoucí vzdáleností štěrbin narůstá počet ohybových maxim.
10. V porovnání s předchozí úlohou se zde nemění vzdálenosti mezi štěrbinami ale pouze jejich počet. Vidíme, že s rostoucím počtem štěrbin roste počet ohybových maxim a maxima se zužují. Pro 3–5 štěrbin jsme získali středovou část a jeden kroužek, pro 5 a 8 štěrbin dále jeden kroužek navíc. Lze předpokládat, že s vyšším počtem štěrbin bude počet kroužků dále narůstat.
11. Obraz štěrbin (kružnice, pravidelný  $n$ -úhelník) s rotační symetrií je opět rotačně symetrický, tj. rotační symetrie se zachovává; v případech O8, O10, a O11 se zachovává také řád symetrie, tj. 4, 6 a „ $\infty$ “. Hvězdovitý tvar.



Obrázek 2.13: Relativní světelná intenzita  $J(x)$  Fresnelovy difrakce na nepropustné polorovině [20]



Obrázek 2.14: Přibližný graf relativní světelné intenzity  $I(x)$  pro difrakci na hraně



Obrázek 2.15: Rozložení relativní světelné intenzity  $J(x)$  ve Fresnelových difrakčních jevech pro štěrby různých šířek [20] ([83])

## 2.2 Aktivita č. 2: Cvičení: Rozhovor s Terezou Košutovou

*Tereza Košutová pochází z Plzně, kde chodila na Masarykovo gymnázium. Po maturitě se rozhodla studovat fyziku na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy v Praze (MFF UK). Bakalářskému studiu následoval magisterský obor Fyzika kondenzovaných soustav a materiálů. Nyní dokončuje doktorské studium v oboru Fyzika nanostruktur a nanomateriálů na též fakultě.*

**1) V rámci svého studia se zabýváš reálnou strukturou nanočástic. Mohla bys nám oblast svého výzkumu přiblížit?**

Třebaže pojem nanočástice může znít exoticky, dnes už jsou tyto malé částice o charakteristických velikostech tisícinou průměru lidského vlasu běžně používány všude kolem nás. Najdeme je na povrchu aut, v pneumatikách, opalovacích krémech, elektronice a dokonce v jídle – například jako barviva. Důvodem jejich využití jsou vlastnosti, kterými se obvykle liší od materiálů stejného složení ale většího objemu. Zároveň je složité tyto malinké částice zkoumat – právě kvůli velikosti. Optický mikroskop je nevidí, neboť jsou menší než vlnová délka viditelného záření. Při svém výzkumu používám takzvané rentgenové záření, jehož vlnová délka je menší a umožňuje jejich analýzu. Cílem mého studia je charakterizace struktury nanočástic, zkoumání možností strukturu ovlivnit při jejich přípravě a vliv struktury na výsledné vlastnosti.

**2) Jak vypadá tvůj typický pracovní den?**

Moje doktorské studium již byla plnohodnotná výzkumná práce, protože jsem měla to štěstí a byla zaměstnaná na projektu, který se prolínal s mojí dizertační prací. Takže popíšu klasický den „juniorního“ vědeckého pracovníka. Musím zmínit, že ten se výrazně liší obor od oboru. Já obvykle měřím vzorky, takže je umístím do přístroje, provedu jeho seřízení a nastavím měřicí sekvenci podle typu vzorku a informace, kterou chci získat. Po měření zpracovávám data, *fituji* získané křivky a připravuji *modely*, což je obecně práce s počítačem. Další nedílnou součástí je *kompletace* výsledků, jejich sepisování, příprava prezentací či žádostí o granty. Protože vzorky, které měřím, připravují různé vědecké skupiny, nějaký čas zabírá i společná domluva a také semináře a setkání v rámci naší skupiny strukturální analýzy. Platí, že každý pracovní den je jiný a zároveň se musím stále učit a načítat literaturu, abych byla v obraze ohledně nejnovějších poznatků v oboru.

**3) Je známo, že vědecká komunita se setkává na konferencích. Mohla bys nám je ve stručnosti přiblížit?**

Pro mě jsou konference velmi důležitá součástí vědeckého života. Zaprvé je to možnost a nutnost naučit se prezentovat svou vědeckou práci a výsledky – ať už při přednášce před publikem nebo jen při diskuzi s ostatními vědci. Dále to také znamená navázat spolupráce a učit se od ostatních – jejich výzkumné postupy, přístupy i způsoby prezentace. V neposlední řadě je to ohromná motivace: potkáte špičkové vědce oboru, máte možnost mluvit s profesory a získat přehled o

vývoji celého odvětví.

**4) Nyní pobýváš v rámci Fulbrightova stipendijního programu v USA na Long Islandu ve státě New York. V rámci půlročního pobytu se učíš novou difrakční metodu a analyzuješ své vzorky nanočástic. Čím tě návštěva USA obohacuje?**

Pobyt v USA je pro mě ohromná zkušenost. Je nesmírně přínosné vidět jiný přístup k vědeckým otázkám a problémům. Navíc pracuji ve špičkové laboratoři u profesora, který na metodu zobrazování pomocí *Braggovy koherentní difrakce* přišel. Tato metoda umožňuje zobrazovat jednotlivé nanočástice, jejich tvar a napětí uvnitř. [článek 10.1038/nature04867, [84]]

To jsem ale zatím popsala jen přínos pro kariéru výzkumníka. Navíc je tu spousta získaných kontaktů a samotný pobyt v cizí zemi – úplně jiné kultuře, poznávání místní přírody, ochutnávání jídla a způsobu života. Vzhledem k rozmanitosti New Yorku jsem měla možnost potkat lidi z různých koutů světa a se spoustou z nich i alespoň krátce mluvit, protože je zde běžné dát se do hovoru s cizím člověkem na ulici.

**5) Čím by ses ráda zabývala v budoucnu?**

Za poslední roky jsem si uvědomila, že studium struktury materiálů mě opravdu baví. Od měření vzorků, přes analýzu dat po zpracování výsledků, přípravu prezentací a spolupráci s různými výzkumnými skupinami. Proto bych chtěla zůstat v oboru. Zároveň bych se ráda v následujících letech posunula blíže k aplikacím daných materiálů. To by mohla přinést spolupráce s průmyslem, nebo osvojení si nových metod. A tak zůstávám otevřená možnostem, které se naskytnou.

**6) Proč by si měl někdo zvolit raději fyziku než medicínu?**

Na tohle není jednoduchá odpověď, protože každý člověk je jiný a s odlišnými preferencemi. Takže já bych raději obory jen porovnávala z mého úhlu pohledu. To, co mám ráda na fyzice, je konzistence, fyzikální zákony zkrátka platí. Ve chvíli, kdy uděláte stejný experiment dva dny po sobě a uděláte ho správně, dostanete stejný výsledek. To v biologii a medicíně vůbec platit nemusí a velmi často to tak u experimentů není. Do experimentu totiž vstupuje spousta vlivů, které – hlavně v medicíně – nemůžeme ovlivnit a někdy je ani neumíme popsat.

**7) Čím ses chtěla stát v dětství? Měla jsi nějaký vzor?**

Nemyslím si, že jsem odmalička věděla, čím chci být. Moje zaměření se objevilo až časem, na začátku jsem jen měla ráda matematiku a fyziku.

**8) Během života se člověk seznámí s různými lidmi, kteří ovlivňují jeho zájmy a pohled na svět. Mezi ně nesporně patří učitelé. Měla jsi dobré učitele fyziky? Nebo se spíše přikloníš k názoru, že by si student měl za tím, po čem touží, jít sám?**

Naprosto souhlasím, a k zásadní změně směřování může dojít, když člověk zjistí, co jeho vysněná práce ve skutečnosti obnáší. S učiteli to není jednoduché, každému studentovi vyhovuje jiný přístup, měla jsem skvělé učitele a učitelky fyziky, přestože jeden učitel byl postrachem všech, protože byl přísný. Podle mě není nutné potkat právě toho správného učitele, který studenta pro svůj obor nadchne. Myslím, že hlavní je, aby student nebyl od svého předmětu odrazen a bylo mu umožněno, aby se pro předmět nadchl sám. Ve výsledku je to pak opravdu na každém studentovi, aby si našel, co ho baví.

**9) Je něco, co bys poradila svému mladšímu já?**

Jdi do toho!

## **ÚLOHY K TEXTU.**

1/ Odpovězte na následující otázky. Odpovězte vlastními slovy anebo citujte – nalezněte relevantní odpovědi v textu.

1. Čím se Tereza tematicky zabývá v rámci svého doktorského studia?
2. Proč je složité nanočástice zkoumat a proč jsou zkoumány?
3. Na co se nanočástice používají?
4. V odpovědi na Tereze položenou druhou otázku nalezneme kurzívou zvýrazněné pojmy „fitují“, „modely“ a „kompletace“. Ujistěte se, že jim rozumíte.
5. Co výzkumná práce Terezy obnáší?
6. Jakým způsobem analyzuje Tereza své vzorky v USA?

2/ Dočetli jsme se, že se nanočástice se využívají také v potravinářském průmyslu. Diskutujte jejich možnou toxicitu. Nalezněte relevantní zdroje informací.



## Odpovědi:

1/

1. Studuje strukturu nanočástic. („Cílem mého studia je charakterizace struktury nanočástic, zkoumání možností strukturu ovlivnit při jejich přípravě a vliv struktury na výsledné vlastnosti.“) (odst. 1)
2. Nanočástice jsou malé. Je třeba je zkoumat pomocí kratších vlnových délek záření (rtg záření namísto viditelného světla). Kvůli svým speciálním vlastnostem, které mají využití v průmyslu. (odst. 1)
3. „Najdeme je na povrchu aut, v pneumatikách, opalovacích krémech, elektronice a dokonce v jídle – například jako barviva.“ (odst. 1)
4. Příklady modelů a fitování nalezneme na internetu nespočet. Lze je studentům promítnout, případně vytisknout.
5. Měření, zpracování dat, kompletaci výsledků. Spolupráci s kolegy, aktivní účast na konferencích. Průběžné studium, učení se od druhých. Prezentování výsledků své práce (konference). Vyřizování žádostí o granty, zahraniční výzkumný pobyt. (odst. 2–5)
6. Pomocí metody Braggovy koherentní difrakce. (odst. 4)

2/

Je nutné odkázat se na relevantní vědecké články. Výsledky výzkumu bývají shrnuté v závěru. Je třeba, aby do „google“ studenti zadali heslo typu „food nanoparticles“ a ovládali anglický jazyk na dostatečné úrovni. Lze kupříkladu vyhledat následující článek, který je volně dostupný ke stažení: [článek 10.1038/s41538-017-0005-1, [85]].

## 3. Optické jevy okolo nás

Světlo. Nositel obrazu. Každý den se setkáváme s tím, co nám světlo zprostředkovává. S obrazy našeho světa. Fotografujeme si západy slunce, vstáváme dříve, abychom obdivovali jeho východ. Radujeme se, když vidíme duhu a tážeme se, jak vzniká. Pozorujeme v kapkách vody odrazy krajiny a těšíme se dětmi, které si ve hře na betonové ploše ťapkají po vlastním stínu. Při setkání světla s objekty makroskopického měřítka jako například hladinou jezera či vitrínou obchodního domu, prostředím odlišnými od vzduchu, dochází k interakci mezi světlem a daným prostředím. My můžeme díky tomu často s chutí svým zrakem vnímat projevy takovéto interakce. Ve skleněné vitríně se bude odrážet protější dům. Jezero nabídne obraz okolní krajiny.

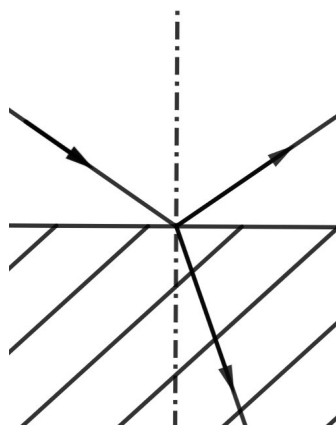
### 3.1 Teoretický úvod

Než se čtenáři dostanou před zrak navržené aktivity k tematice optických jevů, dovolujeme si upozornit na poznatky, které v této souvislosti blíže rozebíráme, nebo pouze zmiňujeme, a které by v obou případech nejeden student mohl docenit. Jde o zopakování či doplnění znalostí ze středoškolské optiky, které jsme shrnuli do tvrzení, dále praktickou aplikaci modelu rozkladného hranolu. Rovněž v souvislosti s indexem lomu upozorníme na úlohu *tvaru* v optice, zmiňujeme, které jevy by bylo před aktivitami studentům vhodné osvětlit (třpyt apod.) a ve stručnosti zabředneme do atmosférické optiky.

### 3.1.1 Pomocná matematická a fyzikální tvrzení

V tomto odstavci uvádíme seznam důležitých fyzikálních  $TFx$  a matematických  $TM_y$  tvrzení ( $x, y \in \mathbb{N}$ ), která jsou stěžejní pro následující aktivity. K vybraným uvádíme také důkaz.

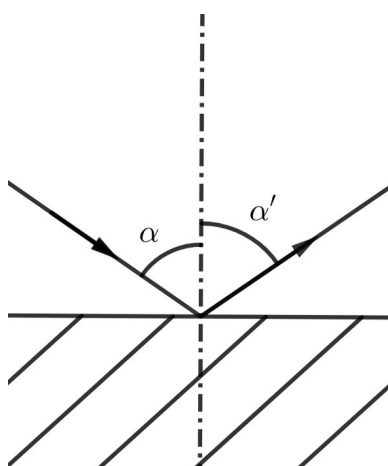
**TF1** (*o rozhraní dvou prostředí*). Na rozhraní dvou prostředí se část světla láme a část odráží, pokud nedochází k totálnímu odrazu, anebo se nejedná o černé těleso.



Obrázek 3.1: Odraz a lom na rozhraní dvou prostředí

**TF2** (*zákon odrazu*). Necht dopadá světelný paprsek na rozhraní dvou prostředí pod úhlem (označme jej)  $\alpha$ . Pak se od tohoto rozhraní odráží pod úhlem (označme jej)  $\alpha'$  v opačném směru vzhledem ke kolmici a platí:

- (i) velikosti těchto úhlů jsou si rovny, pišme  $\alpha = \alpha'$ ,
- (ii) odražený paprsek leží v rovině dopadu (zůstává ve 2D prostoru).

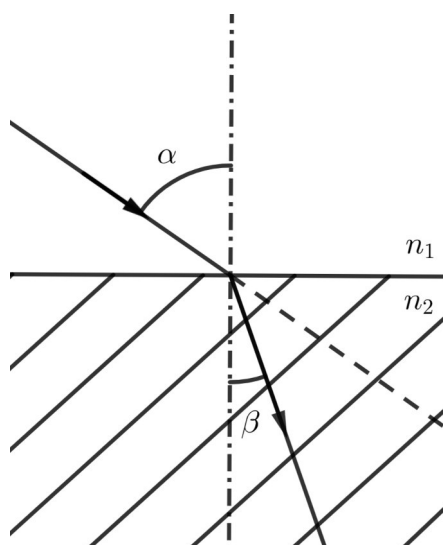


Obrázek 3.2: Zákon odrazu

**TF3** (*zákon lomu*). Necht dopadá světelný paprsek na rozhraní dvou prostředí z hlediska optiky charakterizované indexem lomu  $n_1$ , resp.  $n_2$  pod úhlem  $\alpha$ . Pak se paprsek na tomto rozhraní lomí pod úhlem (označme jej)  $\beta$  v opačné polorovině vůči kolmici a platí:

- (i)  $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$ ,

(ii) lomený paprsek leží v rovině dopadu (zůstává ve 2D prostoru).



Obrázek 3.3: Zákon lomu

**TF4** (*o lomu ke kolmici / od kolmice*). Předpokládejme, že platí TF3. Pokud  $n_1 < n_2$ , nastává lom ke kolmici; pokud  $n_1 > n_2$ , nastává lom od kolmice.

*Důkaz.* Tvrzení plyne z TF3 (i), tvaru funkce sinus na intervalu  $\langle 0, 90^\circ \rangle$ , na kterém je funkce sinus rostoucí.

**TF5** (*o totálním odrazu*). Necht' dochází k odrazu a lomu paprsku na rozhraní dvou prostředí, který popisuje rovnice  $n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$ , kde  $n_1 > n_2$ ,  $\beta = 90^\circ$  a  $\alpha = \alpha_m$ . Pokud  $\beta > 90^\circ$  ( $\alpha > \alpha_m$ ), nedochází k lomu světla, nastává pouze odraz světla – budeme říkat, že dochází k úplnému (totálnímu) odrazu světla. Úhlu dopadu  $\alpha_m$  budeme říkat mezní úhel.

**TF6** (*o závislosti směru chodu paprsku*).

(i) Úhel odrazu nezávisí na vlnové délce světla.

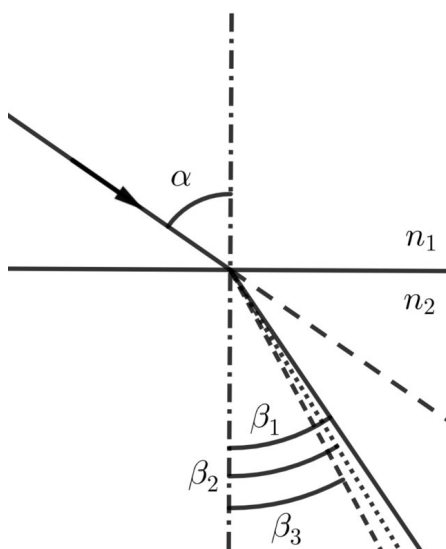
(ii) Necht'  $n_2 = n_2(\lambda)$  v TF3 (i), pak úhel lomu závisí na vlnové délce světla, tj.  $\beta = \beta(\lambda)$ . Závislosti indexu lomu prostředí na vlnové délce dopadajícího světla budeme říkat *disperze*.

*Důkaz.*

(i)  $\alpha = \alpha'$ , nic dalšího v rovnici nevystupuje.

(ii) vyplývá z rovnice v TF3 (i).

*Poznámka.* Projevem disperze je pozorovatelné barevné spektrum (odtud optický disperzní hranol).

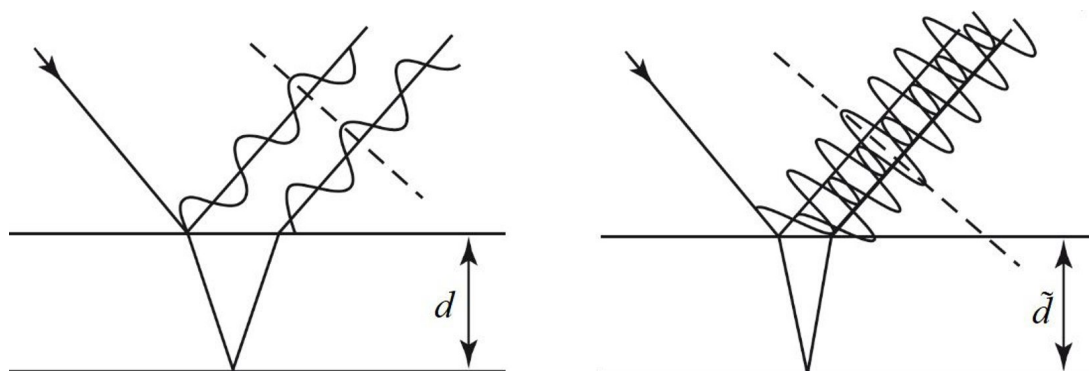


Obrázek 3.4: Průchod paprsku disperzním prostředím

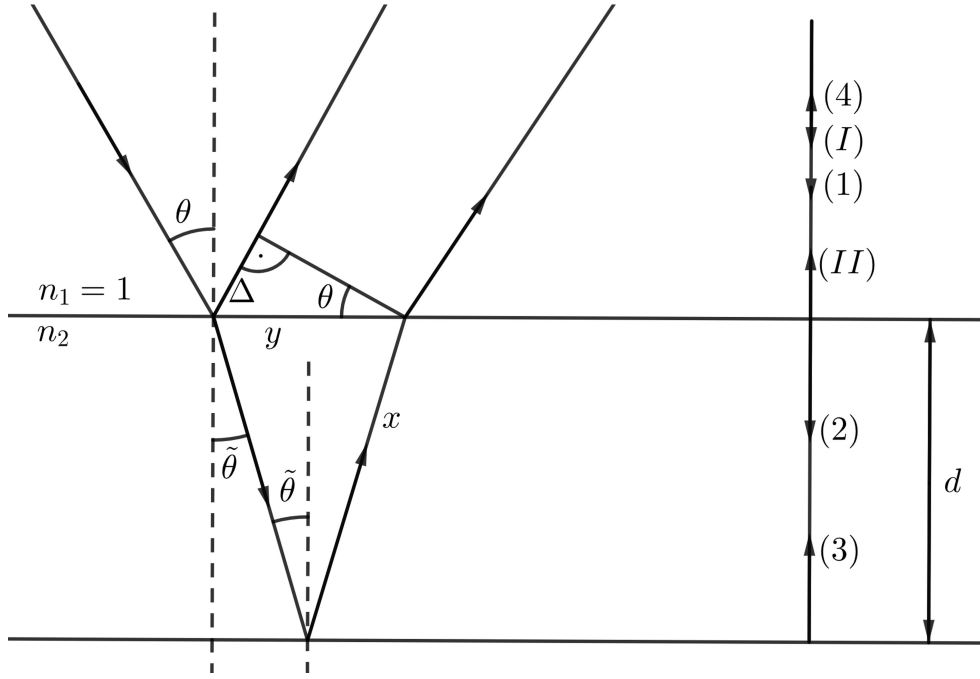
**TF7** (*podmínka pro interferenční maximum*). Necht dopadá světlo vlnové délky  $\lambda$  z prostředí s indexem lomu  $n_1 = 1$  (vzduch) na tenkou (planparalelní) vrstvu tloušťky  $d$  s indexem lomu  $n_2$  pod úhlem  $\theta$  a dochází k interferenci světelného vlnění. Pak podmínka pro interferenční maximum je ekvivalentní vztahu

$$2n_2d\sqrt{1 - \frac{1}{n_2^2}\sin^2\theta} = (m + \frac{1}{2})\lambda, \quad (3.1)$$

kde  $m = 0, 1, 2, \dots$ . Speciálně, je-li  $\theta = 90^\circ$ , podmínka pro interferenční maximum má tvar  $2n_2d = (m + \frac{1}{2})\lambda$ , kde  $m = 0, 1, 2, \dots$



Obrázek 3.5: Konstruktivní interference (nalevo) a destruktivní interference (napravo)



Obrázek 3.6: Interference na planparalelní vrstvě

*Důkaz.* Využijeme obr. (3.6). Rozdíl optických drah paralelních paprsků (interferujících vln)

$$2xn_2 - \Delta = \frac{2n_2d}{\cos \tilde{\theta} - dtg\tilde{\theta} \sin \theta}, \quad (3.2)$$

protože dráhový rozdíl daných dvou paprsků je roven  $(2x - \Delta)$ , a tedy rozdíl jejich optických drah  $(2xn_2 - \Delta n_1)$  pro  $n_1 = 1$  dává levou stranu rovnice výše. Dále máme  $\cos \tilde{\theta} = \frac{d}{x}$ . Čitatel i jmenovatel pravé strany vynásobíme dvěma. Úpravou rovnice nalezneme výraz pro dráhový rozdíl, který vznikne ve vrstvě o tloušťce  $d$ :  $2x = \frac{2d}{\cos \tilde{\theta}}$ . Z geometrie dále máme:  $tg\tilde{\theta} = \frac{y}{2d}$ , a tedy  $y = 2dtg\tilde{\theta}$ . Jelikož  $\Delta = y \sin \theta$ , můžeme psát  $\Delta = 2dtg\tilde{\theta} \sin \theta$ . Nyní upravíme vztah (3.2) tak, aby v něm nevystupovaly úhly lomu  $\tilde{\theta}$ . Využijeme zákona lomu (TF3), tj.  $\sin \theta = n_2 \sin \tilde{\theta}$ , a následně trigonometrické identity  $\sin^2 x + \cos^2 x = 1$ :

$$\begin{aligned} 2xn_2 - \Delta &= \frac{2d}{\cos \tilde{\theta}}(n_2 - \sin \tilde{\theta} \sin \theta) = \\ &= \frac{2d}{\sqrt{1 - \frac{1}{n_2^2} \sin^2 \theta}} \left( n_2 - \frac{\sin^2 \theta}{n_2} \right) = \\ &= \frac{2dn_2}{\sqrt{1 - \frac{1}{n_2^2} \sin^2 \theta}} \left( 1 - \frac{\sin^2 \theta}{n_2^2} \right) = \\ &= 2dn_2 \sqrt{1 - \frac{1}{n_2^2} \sin^2 \theta}. \end{aligned}$$

Přímým dosazením do tohoto vzorce lze ověřit, že pro  $\theta = 90^\circ$  platí vztah  $2xn_2 - \Delta = 2n_2d$ . Příklad kolného dopadu je znázorněn v pravé části obr. (3.6). Římské číslice v závorkách odkazují k části světla, která se odrazila od vrchního rozhraní, zatímco arabské číslice v závorkách popisují chod části světla, která prošla skrze horní rozhraní vrstvy, následně se odrazila od spodního rozhraní vrstvy

a prošla zpět horním rozhraním. Pravou stranu hledané rovnice pro obecné  $\theta$  získáme ze znalosti o skládání fází světelných vln (viz také obr. (3.5)).

**TF8** (*podmínka pro interferenční minimum*). Necht jsou splněny předpoklady tvrzení TF7. Pak podmínka pro interferenční minimum je dána vztahem

$$2n_2d\sqrt{1 - \frac{1}{n_2^2}\sin^2\theta} = m\lambda, \quad (3.3)$$

kde  $m = 0, 1, 2, \dots$ . Speciálně, je-li  $\theta = 90^\circ$ , podmínka pro interferenční minimum má tvar  $2n_2d = m\lambda$ , kde  $m = 1, 2, \dots$

*Důkaz.* Analogický k důkazu tvrzení TF7.

**TF9** (*o změně fáze vlnění*). Při odrazu světla na rozhraní dvou prostředí, kde  $n_1 < n_2$ , se fáze světelného vlnění mění na opačnou. Při odrazu světla na rozhraní dvou prostředí, kde  $n_1 > n_2$ , se fáze světelného vlnění nemění.

**TF10** (*o ohybu světla na dvou štěrbinách / difrakční mřížce*). Necht koherentní světlo vlnové délky  $\lambda$  dopadá na dvě úzké štěrbin (mřížku), jejichž středy jsou vzdáleny o  $b$  (perioda mřížky). Necht paprsky změni směr svého chodu o úhel  $\alpha$  (viz obr. 1.9). Pak podmínka pro interferenční maximum je

$$b \sin \alpha = m\lambda, \quad (3.4)$$

kde  $m = 1, 2, \dots$

*Důkaz.* Viz odst. 1.2.2.

Necht  $I, J$  jsou neprázdné množiny, speciálně uzavřené intervaly.

**DM1** (*prosté zobrazení*). Zobrazení  $f : I \rightarrow J$  se nazývá prosté, pokud  $(\forall x, y \in I) (f(x) = f(y) \Rightarrow x = y)$ .

**DM2** (*inverzní zobrazení*). Necht  $f : I \rightarrow J$  je prosté zobrazení s předpisem  $f(x) = y$ . Definujeme inverzní zobrazení  $f^{-1} : J \rightarrow I$  předpisem  $f^{-1}(y) = x$ .

**DM3** (*další charakteristiky zobrazení*). Zobrazení  $f$  je na intervalu  $I$

rostoucí, pokud  $(\forall x, y \in I) (x < y \Rightarrow f(x) < f(y))$ ;  
 klesající, pokud  $(\forall x, y \in I) (x < y \Rightarrow f(x) > f(y))$ ;  
 neklesající, pokud  $(\forall x, y \in I) (x < y \Rightarrow f(x) \leq f(y))$ ;  
 nerostoucí, pokud  $(\forall x, y \in I) (x < y \Rightarrow f(x) \geq f(y))$ ;  
 ryze monotónní, pokud je  $f$  na  $I$  rostoucí, nebo klesající;  
 monotónní, pokud je  $f$  na  $I$  neklesající, nebo nerostoucí.

**TM1** (*o prostotě a monotonii*). Pokud je zobrazení  $f$  ryze monotónní na  $I$ , pak má  $f$  na  $I$  inverzní funkci.

*Důkaz.* Ryzí monotonie zobrazení  $f$  na  $I$  znamená, že  $f$  je buď rostoucí, nebo klesající na  $I$  (DM3). Z DM1 dále plyne, že pokud je  $f$  ryze rostoucí (ryze klesající),  $f$  je také prosté, a pro takové zobrazení je dle DM2 dobře definovaná inverzní funkce.



### 3.1.2 Použití rozkladného hranolu

V rámci optiky narazíme na ne jeden příklad, kdy je možné a praktické k popisu chodu paprsku využít modelu rozkladného hranolu. Známe-li princip průchodu paprsku rozkladným hranolem (víme, jak určit dané úhly), můžeme toho přímo využít k popisu chodu paprsku daným objektem. Tento objekt rozkladným hranolem proložíme. Přitom nebudeme uvažovat materiál (sklo) či rozklad světla, který se týká daného hranolu – půjde nám o určení úhlů lomu či dopadu, které bychom museli bez použití hranolu pro každý nový případ znovu zvlášť počítat.

Nakresleme si chod paprsku hranolem dle schématu níže (obr. (3.7)). Bude nás zajímat, čemu je roven úhel  $\beta_2$ , známe-li úhel dopadu  $\alpha_1$ , úhel lomu  $\beta_1$  (ze zákona lomu) a úhel  $\varphi$  (rozměr hranolu), který bude udán výrobcem. Všimněme si čtyřúhelníku  $AOBC$ . Součet úhlů v tomto čtyřúhelníku je  $360^\circ$ , úhly vymezeny bočními hranami a kolmicemi mají oba  $90^\circ$ .

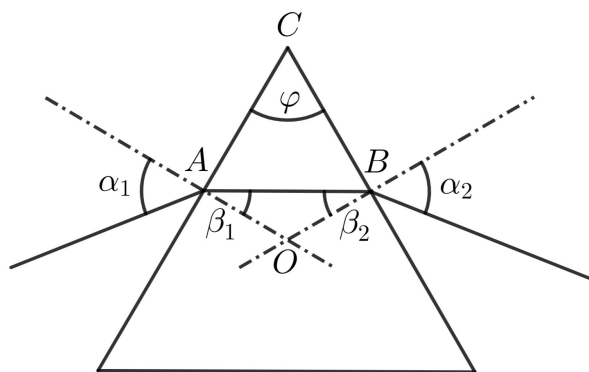
Potom  $90^\circ + 90^\circ + \varphi + (180^\circ - \beta_1 - \beta_2) = 360^\circ$ . Porovnáním obou stran se odečtou číselné hodnoty úhlů a dostaneme:  $\varphi = \beta_1 + \beta_2$ . Z toho plyne, že

$$\beta_2 = \varphi - \beta_1. \quad (3.5)$$

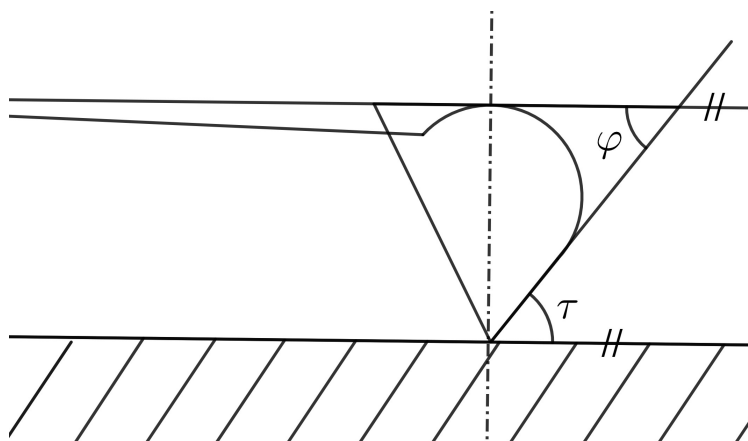
*Poznámka.* Sbírký úloh a další zdroje pracují s tzv. deviačním úhlem, který se definuje jakožto odchylka vystupujícího lomeného paprsku od směru dopadajícího paprsku.

Podívejme se na použití rozkladného hranolu. V případě, že bude světlo dopadat na zakulacený skleněný objekt na obr. (3.8) v místě popsaném kolmicí, které lze aproximovat rovinou rovnoběžnou se zemí, použijeme k fyzikálnímu (zčásti geometrickému) popisu rozkladný hranol, pro jehož úhel  $\varphi$  bude ze střídavosti úhlů platit, že  $\varphi = \tau$ . Zde úhel  $\tau$  charakterizuje boční zbroušení objektu. Řez si lze představit jako rovnoramenný trojúhelník. Může se však stát, že rovina aproximující část zakřiveného povrchu objektu, na který dopadá záření, nebude rovnoběžná se zemí. Tomuto případu odpovídá nákres (3.9). Vidíme, že v tomto případě  $\varphi = \tau - \tilde{\tau}$ . Abychom určili úhel  $\varphi$ , museli bychom si jednak změřit zkosení popsané úhlem  $\tau$  a pak také zkosení popsané úhlem  $\tilde{\tau}$ .

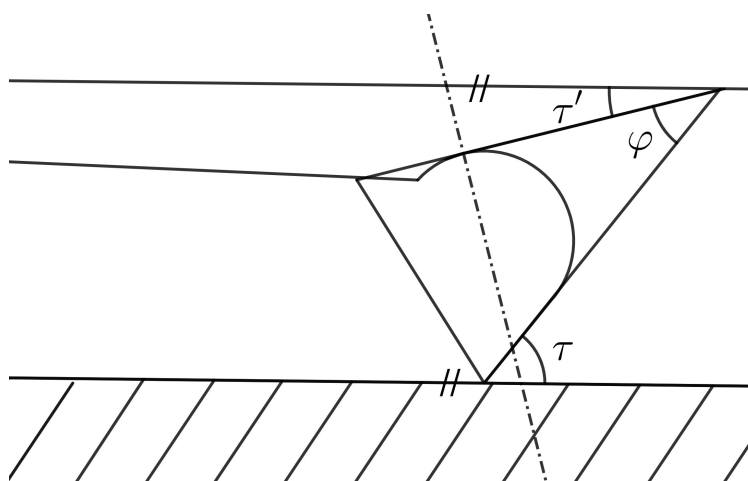
Dalším příkladem využití rozkladného hranolu je průchod paprsku ledovým krystalkem ve tvaru pravidelného šestibokého hranolu. Pokud se jedná o dopad na jednu z bočních hran, kdy paprsek vystupuje protější hranou dle obrázku (3.10) [86] – můžeme uvažovat rovinu rovnoběžnou s horní a dolní podstavou ve tvaru šestiúhelníku – jde o případ vzniku *malého hala*, jeden z jevů atmosférické optiky. Pokud paprsek vstupuje do hranolu naopak horní anebo spodní podstavou, pokračuje dál napříč hranolem a vystupuje boční stěnou (viz obr. (3.11)), je možné pozorovat *velké halo* [86]. Další halové jevy jsou uvedeny v knize Porozuhodné jevy v atmosféře prof. Bednáře [86].



Obrázek 3.7: Rozkladný hranol

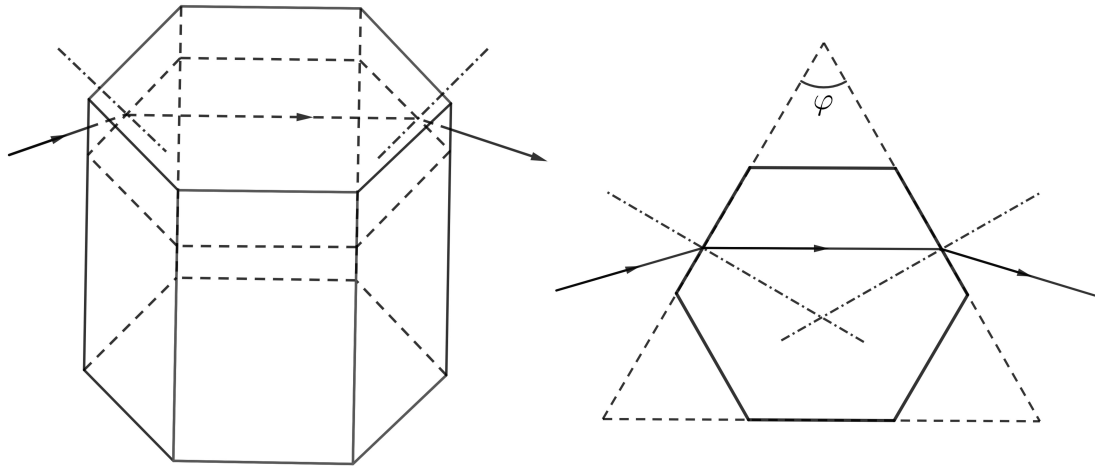


Obrázek 3.8: Užití rozkladného hranolu – příklad 1

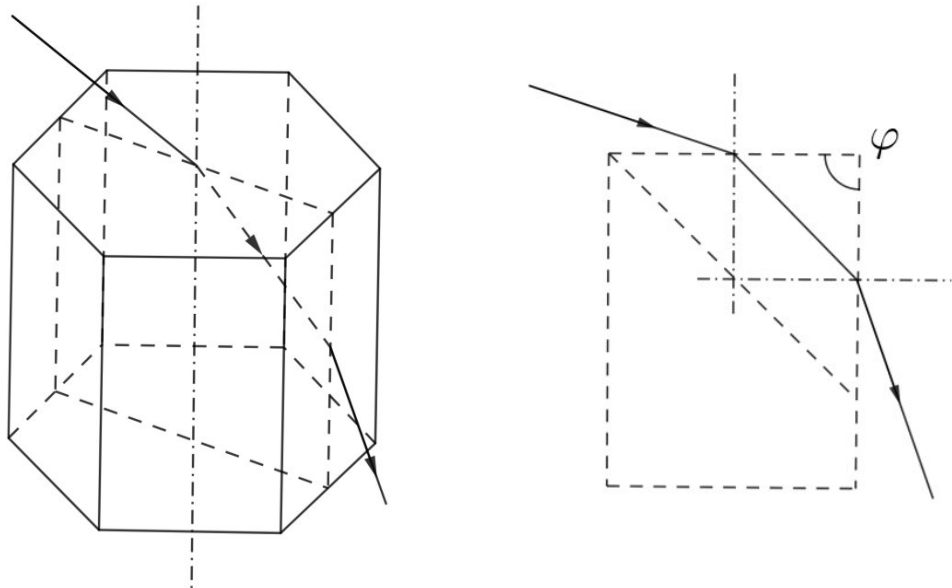


Obrázek 3.9: Užití rozkladného hranolu – příklad 2

Vzhledem k výše zmíněnému lze vést obecnou úvahu ohledně interakce světla s objekty v závislosti na jejich tvaru. Pochopí-li student užití kolmice v souvislosti se zákonem lomu (sestrojí tečnu (naznačí rovinu) a nakreslí kolmici k povrchu objektu), bude mu jasný chod paprsku. Takto lze pochopit chod paprsku spojnou čočkou, příp. rozptylkou. Vzhledem k tomu, že jsou tyto objekty součástí větších, např. dalekohledů, lze si poté snadněji představit, na jakých principech tyto přístroje fungují.



Obrázek 3.10: Užití rozkladného hranolu – příklad 3



Obrázek 3.11: Užití rozkladného hranolu – příklad 4

Co se týče pak samotného vzniku barevného spektra, nutnou podmínkou ke vzniku je správné zakřivení objektu, na které světlo dopadá. Správně zakřivená musí být nejen hrana, na kterou světlo dopadá, ale také ta, ze které světlo objekt opouští. Kdyby tomu tak nebylo, rozložené světlo uvnitř objektu by se mohlo znovu složit. Samozřejmě klíčovým faktorem není jen geometrie, ale také látka, ze které se objekt skládá. Můžeme si všimnout, že hrany rozkladného hranolu jsou obě zkosené, totéž se v podstatě týká vodních kapek (vezmeme-li v úvahu opět tečny k zakřivenému povrchu), které při vhodných světlených podmínkách zapříčínují vznik duhy (viz [7]) – v případě jednoho vnitřního odrazu jde o primární duhu, v případě dvou vnitřních odrazů mluvíme o sekundární duze.

### 3.1.3 Atmosférická optika

Optika, která se zabývá speciálně světlenými jevy v atmosféře (blesk mezi ně nepatří, ten řadíme do elektřiny a magnetismu) je poměrně široká. Proto si autorka této práce vytyčila cíl, že po jejím dopsání sepíše text, který se bude věnovat speciálně této oblasti. Vzhledem k tomu, že však s navrženými, níže uvedenými aktivitami atmosférická optika souvisí, připomeňme si jevy, které by bylo vhodné studentům ve stručnosti vysvětlit či je navést tím směrem, aby si k nim vyhledali potřebné informace v případě, že budeme chtít, aby si své znalosti nejen ověřili, ale také rozšířili. V předchozím odstavci padla zmínka o velkém a malém halu. Pozorovatelná bývá také jak jednoduchá, tak dvojitá duha (*rozklad světla*) rovněž uvedená v předchozím odstavci v souvislosti s tvarem objektů.

Mezi dotazy z řad studentů patří „proč je nebe modré?“. Pak dává smysl položit si otázku „proč jsou oblaka bílá?“. Oboje souvisí s *rozptylem*, vychýlením směru dopadajícího záření od původního směru, přičemž v prvním případě k tomuto dochází na molekulách vzduchu (Rayleighův rozptyl), v druhém případě na větších aerosolích. Rayleigh pochopil, že ono vychýlení je pro každou vlnovou délku odlišné a že ve vzduchu jsou ideální podmínky na to, aby se modrá část spektra (kratší vlnové délky) rozptýlovala více. Zároveň ve vrstvách atmosféry dochází k lomu paprsků. Oba jevy poté vysvětlují barvu červánků či barvy východu slunce (dochází k lomu rozptýlených paprsků). Největší tzv. astronomická refrakce (lom) je charakteristická pro krátkovlnnou část spektra (kdy červené vlnové délky už nejsou pozorovatelné, nastává tzv. modrá hodinka).

Student si položil otázku ohledně barvy oblohy, mraků, následovat může tázání se ohledně barvy trávy, dřeva a zvířecí srsti či kůže. Poslední zmíněné může mít svůj účel v maskování vůči predátorovi anebo přivábení samičky, v takovém případě můžeme studenta odkázat na biologii. Nezodpovězené však zůstává, proč sestává ono maskování, jistá pestrost zrovna z onoho výběru barev. Podobně, jestliže červená barva má působit křiklavě, zelená uklidňovat, proč tomu není naopak. Na tomto místě čtenáře opustíme a přesuneme se k výčtu dalších pojmů, které by bylo záhadno studentům připomenout či dovysvětlit.

### 3.1.4 Optické vlastnosti objektů

Při interakci světla s látkou dochází ke světelné *absorpci* (zeslabení intenzity záření). Barva objektu je taková, jaké vlnové délky jsou jím naopak vyzařovány. Některé materiály mohou být průhledné, jiné průsvitné, některé matné, jiné lesklé či třpytivé. Lesk a třpyt souvisí s vysokou odrazivostí, přičemž u třpytu je toto regulováno časovou závislostí: objekt se v čase pohybuje anebo se pohybuje pozorovatel se zdrojem záření, čímž se mění úhel dopadajícího záření. Průhledný materiál propustí dopadající světlo, u průsvitného je tato vlastnost zaručena jen částečně. Zajímavou optickou vlastností je dvojlom (islandký vápenec), při kterém dochází k *polarizaci* světla.

# 4. Optické jevy okolo nás – aktivity

## 4.1 Aktivita č. 3: Cvičení: Seznámení se s optickými jevy okolo nás

Vytvořili jsme aktivitu, která si klade za cíl, aby se studenti podrobněji obeznámili s optickými jevy, které můžeme běžně pozorovat. V tomto smyslu by měla aktivita být příkladným cvičením vůči kritériu „běžný život“, přestože si den co den svítíme na činnosti žárovkami a na našich životních cestách nás provází zrak a světlo, které nás zahřívá. Dalším účelem může být „zopakování probrané látky“. Studenti by si pomocí této aktivity měli osvěžit či osvojit správné pojmenování v rámci optiky.

Studenti se v hodinách fyziky seznámí kupříkladu s pojmem interference, jejich pozornost se může soustředit na mechanickou znalost rovnic a jejich aplikací, ale obecná (vizuální) či celistvá představa, o co se jedná, jim může uniknout. Optiku na gymnáziích lze řadit k náročnějším tematickým okruhům. Přitom studentům by mohlo například „naskočít“ jednoduché spojení: interference – skládání vln – tenké vrstvy, bubliny, olejové skvrny, křídla hmyzu. *A posteriori* může dojít k podrobnější analýze, co se se světlem děje, k čemuž poslouží matematický aparát. Aplikace dále rozvíjí nabytou zkušenost.

Souhrnně dojde k osvěžení pojmů v souvislosti s popisem světla, které jsou uvedeny v pracovním listě, a to je *odraz* (reflexe), speciálně vícenásobný (zde dvojnásobný) a úplný, dále *lom* (refrakce), *rozklad* (disperze), *skládání* (interference) a *ohyb* (difrakce). V kap. 3.1.3 jsme dále zmínili *rozptyl*. Co se týče termínu *disperze* světla, některé zdroje hovoří o závislosti rychlosti světla na frekvenci v daném prostředí  $v(f)$  ([15], [1]). Prof. Malý [7] uvádí, že disperze světla je závislost indexu lomu na vlnové délce  $n = n(\lambda)$ , což je závislost, kterou lze měřením ověřit.

### 4.1.1 Způsoby využití aktivity

Všechny zachycené úkazy anebo jejich obdoby můžeme pozorovat v našich domácnostech či v blízkosti našeho bydliště. Snímky mohou být rozšiřujícím vizuálním materiálem k obrázkům v učebnicích. Jednotlivé jevy se vyskytují v aktivitě vícekrát. Celou sbírku je možné samozřejmě doplnit dle individuálních potřeb učitele.

První úloha si klade za cíl přiřadit optické jevy na fotografiích označených písmeny (a)–(b) ke správnému pojmenování. Jelikož na nejedné fotografii je možné shledat optických jevů více, doporučujeme takové snímky přiřadit do kategorie s optickým jevem, který je na fotografii nejvýraznější, ale i pod vedlejší optické jevy, a tam jejich označení napsat do závorky. Studenti mohou plnit úlohu ve skupinkách, ve dvojicích anebo individuálně.

Druhá úloha, ke které jsou přiřazeny snímky s římskými číslicemi I–X, vyžaduje rozpoznání jiného optického jevu, než jakým je odraz. Pakliže studenti pracují ve skupince (uvažujme skupinky po čtyřech lidech), redukuje se počet barevných výtisků. Výtisk je také možné dát studentům do dvojic, v ideálním případě dostane výtisk každý. Na práci ve dvojicích a skupinkách je výhodou spolupráce; pakliže budeme chtít, aby si každý student popřemýšlel sám, je ideální variantou samostatná práce. Následovat má diskuze.

Také lze využít formy hry. Pro tu je vhodná spolupráce ve dvojicích. Učitel vytiskne všech 34 fotografií a pomocí laminovací folie z nich vyrobí kartičky. Fotografie si rozdělí k prvnímu a ke druhému cvičení. Následně připraví takové kartičky i z rámečků s pojmy „difrakce“ atd. Učitel nejprve rozdá do dvojic zvlášť balíček kartiček s vytištěnými fotografiemi, které patří k první úloze, a ten, v němž na každé kartičce je pojmenování daného světelného jevu. Studenti si na lavici rozloží kartičky s pojmy a postupně k nim přiřazují fotografie, které si prohlížejí. Když si fotografie skládají pod sebe (varianta A), má to tu výhodu, že snáz shledají to, v čem jsou si jednotlivé příklady podobné.

Kdybychom chtěli tisknout přesný počet kartiček s názvy patřícími ke svým obrazovým „partnerům“, pak by vznikla hra: ke každému názvu přiřadte právě jeden obrázek (varianta B). V průběhu takovéto hry by směřovala pozornost nejednoho studenta k tomu, „aby mu to vyšlo“; v předchozí variantě A (která je více podobná práci s pracovním listem), kdy nevíme, kolik „difrakcí“ chceme najít, jde rovnou o rozčlenění jevů do kategorií, v rámci nichž je možné diskutovat *podobnost* a mezi sebou *odlišnost*. Z fotografií, které jsou určené ke druhému cvičení, studenti vyberou ty, které odpovídají řešení úlohy. Zadání úloh je jim řečeno ústně a jsou upozorněni na smysl cvičení, který rozebíráme v části 4.1.

## Dělení do skupin

Alternativně lze využít úlohy k rozdělení studentů pro práci ve skupinách na vybraných úkolech: každý student dostane jednu fotografii z níže uvedených – za předpokladu 28 studentů ve třídě stačí použít fotografie (a)–(b) a vybrat další čtyři ze sady I–X. Postačí zvolit čtyři fotografie čistě s odrazy, zařadit je do kategorie „odraz a lom“. Každý student dostane do rukou kartu s fotografií. Buďto jeho úkolem bude rozpoznat, do jaké skupiny patří, a zůstane sedět na svém místě (varianta M), anebo se studenti rozdělí do skupin, ve kterých budou spolupracovat (varianta S). V prvním případě učitel obejde každého studenta, jestli ví, kam patří. V druhém případě učitel obejde skupinky či „tápající jedince v meziprostoru“. Obojí lze omezit tím, že se každý „nejistý“ student (přizná a) přihlásí. Při rozdávání fotografií přitom může mít učitel plnou kontrolu nad tím, kdo má skončit s kým ve skupině.

Méně početné skupiny je třeba sloučit a souhrnně je (na tabuli) označit. Početnější skupiny (rozklad, interference a difrakce) je třeba naopak rozdělit. V tento moment naše cvičení sehrálo svoji roli a studenti mohou na základě toho, do jaké skupiny patří, řešit vybrané fyzikální úlohy. Toto je obzvláště výhodné ve chvíli, kdy je potřeba vyřešit početné množství úloh (ze sbírky příkladů). Každé

skupině je přidělena jejich určitá část. V prvním případě (var. M) si musí každý student poradit sám, v druhém případě (var. S), řeší studenti úlohy společně.

Pokud se jedná o talentovanou třídu jako celek, lze využít prvního případu, v opačném případě může být výhodné, když si studenti pomůžou. Učitel si vždy poté vybere někoho ze skupiny, kdo předvede řešení některé z úloh na tabuli. Zadání úloh by měli mít všichni studenti před sebou. Část úloh studenti vyřeší, další část je jim předvedena na tabuli. Alternativně můžou mít všechny skupiny stejné zadání a v takovém případě nám jde čistě o řešení úloh ve skupině, které lze pojmut soutěžní formou (varianta „zůstat v lavici“ by v tomto případě spíše ztratila význam).

Podívejme se na rozdělení studentů, při kterém má každá skupina jiné úlohy. Studenti předvádí řešení úloh na tabuli a každá skupina je zodpovědná za to, aby dokázala studentům v ostatních skupinách pomoci a vysvětlit jim řešení svých úloh. Pokud někdo řešení předvedené na tabuli nepochopí, je dobré, aby věděl, že se může s prosbou o pomoc obrátit na konkrétní skupinu.

Závěrem k tomu, jak lze využít naší aktivity: pokud chceme, aby si studenti odnesli z této aktivity co nejvíce fyziky, zdůrazněme, že je nutné, aby měl každý student k dispozici svůj výtisk. V závislosti na tom, jakou z variant zadání si učitel zvolí, je možné aktivitou začít hodinu anebo ji použít v průběhu vyučovací hodiny. Aktivita může významně podpořit *spolupráci* mezi studenty. Pakliže má být jedním z cílů výuky pestrost, je rozumné si zvolit takovou podobu naší aktivity, která doplní jiné, které jí předcházely nebo které jí budou následovat. Na závěr doporučujeme ve všech případech provést diskuzi. Alternativní využití aktivity dle možností učitele.

### **Modifikace aktivity**

Cvičení je možné rozšířit či upravit bez jeho původního cíle (jaké optické jevy můžeme dennodenně nalézat) – lze připravit souhrnné opakovací cvičení pokrývající všechny kapitoly středoškolské optiky. Rovněž, jak už jsme zmínili možnost rozšíření sbírky fotografií, mezi snímky lze přidat fotografie filtrů, obrázky popisující polarizaci, holografii a část přístrojové optiky, což jsou obecně témata, která jsou spojená s aplikací (technikou). Pro zachování jednotnosti rozměrů uvádíme velikost fotografií a rámečků s optickými pojmy: fotografie: ~ 13 x 9,8 cm (poměr 4:3); rámečky: 4,3 x 5,6 cm. Rámečky stačí vytvořit v MS Word pomocí funkce „Textové pole“. Použili jsme tiskací verzi písma Times New Roman velikosti 12, využili podtržení a zarovnání na střed. Takto vytvořený rámeček lze snadno zkopírovat a umístit na vybrané místo. Tímto způsobem můžeme upravit současný pracovní list anebo vytvořit obdobný. Uvádíme verzi pro tisk, pro okamžité použití s uvedenými fotografiemi (fotografie IX a X jsou otočené o devadesát stupňů). Pod pracovním listem jsou uvedeny správné odpovědi.

## 4.1.2 Komentáře k jednotlivým fotografiím

Fotografie (a)–(x) a I–X pochází z osobní sbírky autorky této práce [87].

Fotografie (a). Snímek byl pořízen na rodinné oslavě narozenin. Vidíme převrácený obraz výzdoby a okna ve sklenici naplněné alkoholickým nápojem. Dochází k odrazu a lomu paprsků světla. Můžeme porovnat plnou sklenici s prázdnými.

Fotografie (b). Tato fotografie byla pořízena v jedné z budov pražského historického centra. Při bližším pohledu lze na ni pozorovat rozklad světla. Část slunečního záření dopadajícího na skla dveří v levém horním rohu fotografie se láme. Ozdobné broušení dveří lze aproximovat dispersním hranolem a díky závislosti  $n = n(\lambda)$  můžeme na dlažbě a na koberci pozorovat barvy spektra. Analogické broušení, které principiálně odpovídá dispersnímu hranolu, diskutujeme u fotografii s označením (q).

Fotografie (c). Na povrchu kovu plotové spojky dochází k chemickým reakcím s okolním prostředím. Vzniká tenká vrstva, na které se část paprsků odráží a skrze kterou zbylé paprsky prochází a dále se odráží a lomí. Dochází k interferenci. Blíže interferenci diskutujeme v ukázkovém řešení projektu (viz kap. 4.3). Viz také tvrzení TF7 a TF8 v odst. 3.1.1.

Fotografie (d). Pozorujeme interferenci na zadlabacím zámku, která je analogií k případu na předchozí fotografii. Takových příkladů lze nalézt v našem okolí mnoho. Proto zařazujeme do seznamu i tento snímek.

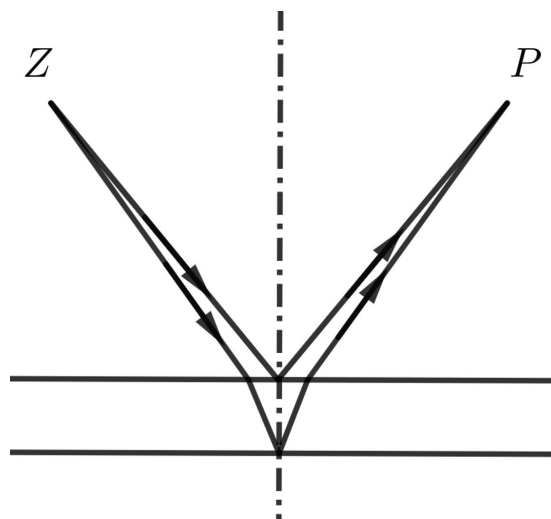
Fotografie (e). Na této fotografii můžeme vidět barevné proužky na vlasech. Na vlasové vlákno dopadá sluneční záření a díky tomu, že je tenké, můžeme být svědky difrakce. Pozorujeme interferenční proužky.

Fotografie (f). Snímek byl pořízen na pražské trojské koleji na jaře roku 2019. Skleněná nádoba s rozkvetlými pupeny ve vodní lázni opět funguje na principu rozkladného hranolu. Na stole můžeme pozorovat barevné spektrum zakřivené dle tvaru nádoby.

Fotografie (g). Barevnou bublinu z bublifuku zná každý z nás. Můžeme si však zaexperimentovat a pozorovat bubliny menších rozměrů. Stačí si v umyvadle přeparat oblečení, které nepatří do pračky. Na tomto snímku lze vidět interferenci na tenkých vrstvách bublinek, které vznikly na hladině vodní lázně s tekutým pracím prostředkem Jelen na ruční praní.

Fotografie (h). Zvětšení podloubí města Krnov za existence dvojitého odrazu – viz obr. 4.20. „Z“ značí zdroj (místo, odkud dopadá světlo na okno obchodního domu) a „P“ značí pozorovatele (fotografa okna). Okno je tvořeno dvěma skly umístěnými blízko sebe, přičemž světlo se odráží jednak pouze od vnějšího skla, ale také prochází k druhému sklu, od kterého se odráží, prochází prvním sklem a opět se láme.





Obrázek 4.1: Skleněná výloha obchodního domu [88]

Fotografie (i). Prasklý tenký kelímek z umělé hmoty na odkapávači. Podobně jako u známého příkladu olejových skvrn z aut i zde pozorujeme interferenci na tenké vrstvě.

Fotografie (j). Duha (primární a sekundární). Jeden z příkladů atmosférických optických jevů. Rozměrné barevné spektrum, které vzniklo složením dílčích rozkladů světla na kapkách deště. Pod obloukem primární duhy můžeme pozorovat vyšší světelnou intenzitu.

Fotografie (k). Primárním cílem této fotografie je demonstrovat lom světla. Jde o jednoduchý pokus, který si každý snadno vyzkouší doma. Na stěnách sklenice je možné pozorovat odrazy. Na pravé stěně se odráží paprsky, které dopadají na sklenici z okna z levé strany.

Fotografie (l). Nádherný rozklad světla. Barevné spektrum na stěně kolejniho pokoje. Vzniklo v důsledku rozkladu světla na skleněných dveřích balkónu. Z pohybu obrazce šlo zřejmě opět o speciální druh rozkladného hranolu.

Fotografie (m). Zasněžená krajina. Třpyt je projevem odrazu paprsků na krystalcích sněhu. Tyto krystalky odráží paprsky pod určitým úhlem. Pokud bychom vyfotografovali sněž pod lehce odlišným úhlem, mohli bychom vidět třpyt jiných krystalků [89]. Fotografie byla pořízena v blízkosti Nádraží Libeň, v Praze na sklonku roku 2022.

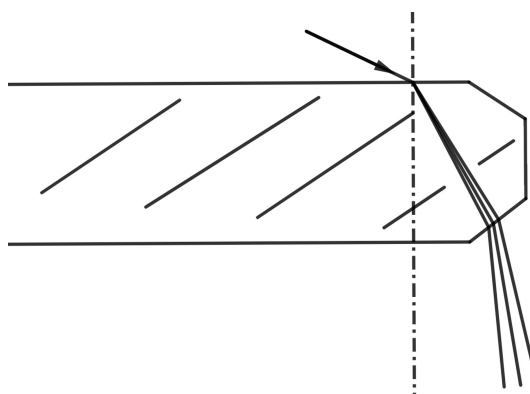
Fotografie (n). Tuto fotografii zařazujeme mezi ostatní z estetických důvodů. Na světlo můžeme pohlížet také z uměleckého hlediska. Fotografie ukazuje stín, se kterým se studenti fyziky setkávají v rámci hodin fyziky už na základní škole. Na střední škole se navíc objevuje pojem polostín. Připomínáme starý pojem a přidáváme příbuzný. Fotografie byla pořízena v Krnově v roce 2018.

Fotografie (o). Okřídlený hmyz mívá tenká křídla. Zde můžeme pozorovat převládající modrou a růžovou barvu interferujícího světla. Interference je ovlivněna

lokální tloušťkou a strukturou křídla.

Fotografie (p). Na fotografii vidíme část sklenice na víno. Vzhledem ke geometrickému tvaru (zakulacení) stopky pozorujeme různé poměrové zmenšení okolních objektů. Dochází k odrazu a lomu světelných paprsků.

Fotografie (q). Fotografie byla pořízena v roce 2022 v nové knihovně Matematicko-fyzikální fakulty v Praze-Troji. Součástí skleněné stěny oddělující místnost od zbylé části objektu je úprava tvořená zkosením, které zapříčiňuje (podobně jako dveřní skla na obrázku (b)) rozklad světla. Toto lze pro lepší představu studentům ilustrovat – viz obr. 4.2. Kdyby namísto dolního zkosení pokračovalo tvarování skla tak, že by bylo rovnoběžné s horní rovinou, na kterou dopadá paprsek světla, světlo by se u spodní hrany (na rozhraní sklo-vzduch) lomilo vzhledem ke stejné skloněné kolmici (jako u rozhraní vzduch-sklo) naopak ke kolmici dle zákona lomu a světlo by se, jak se rozložilo, opět zpět složilo. Se stejným zkosením skla se můžeme setkat u skleněné stěny autobusové zastávky, přičemž při dopadu slunečních paprsků na zadní část nejdelší stěny budeme pozorovat před touto stěnou na chodníku barevné spektrum.



Obrázek 4.2: Skleněné zkosení části skla

Fotografie (r). Fotografie byla pořízena v Praze v únoru 2021. Světlo projíždějících protějšících aut se rozkládá na kapkách vody. Takový druh rozkladu světla je za deštěného počasí snadno viditelný podobně jako v případě pouličních lamp. Můžeme pozorovat také odraz na mokré vozovce.

Fotografie (s). Fotografie byla pořízena v Praze poblíž stanice metra Nádraží Holešovice. Vidíme rozměrnou olejovou skvrnu od auta. Jde o klasický příklad interference na tenkých vrstvách.

Fotografie (t). Na tomto snímku můžeme vidět detail křídla mouchy. Jde o další případ interference z hmyzí říše. Diskutováno by mohlo být také kovové zelené zbarvení těla mouchy.

Fotografie (u). Další příklad přírodní kresby. Na této fotografii pozorujeme stíny stromů. Zde kromě země zdobí také stěnu.

Fotografie (v). Analogie k fotografii (c) a (d). Na pojezdu malířského stojanu můžeme pozorovat interferenci na tenkých vrstvách. Dalším takovým příkladem je kovový pojezd jídelního stolu.

Fotografie (w). Další příklad rozkladu světla. Nejzřetelnější je u okraje tácku. Světlo se rozkládá podobně jako v případě (f). Specifičnost světelné kresby je dána tvarem či geometrií sklenice. Fotografie byla pořízena ve venkovních prostorech.

Fotografie (x). Rozklad, který si každý může vyzkoušet ve svém pokoji. Za slunečného počasí napustíme PET-lahev vodou, budeme ji natáčet, měnit vzdálenost od okna a pozorovat vzniklý obrazec. Rozklad může zprostředkovat tedy nejen sklo naplněné vodou, ale také plast. Lze vidět, že rozklad světla zprostředkován naplněnou PET-lahví je výrazný.

Fotografie I. Na fotografii můžeme vidět kompaktní disk – „cédéčko“, které bylo v rámci fyzikálního praktika na Matematicko-fyzikální fakultě doslova vypáleno (v mikrovlnné troubě). Díky neviditelné struktuře CD (pity) můžeme pozorovat difrakci, která se projevuje výrazným světelným zbarvením povrchu CD. Vlivem poškození byl narušen celistvý povrch CD a my pozorujeme také detailnější interferenci. Jedná se o duhově zbarvené plošky. Dále můžeme vidět odraz protějšího okna. V souvislosti s kompaktním diskem lze hovořit také o polarizaci. Rozměry a délka pitů určují záznam, který bývá snímán polarizovaným světlem laserové diody [1].

Fotografie II. Tato fotografie byla pořízena v blízkosti železniční stanice Ostrava-Svinov. Na mramorové podlaze se odráží přiléhající budova. Pohlédneme-li na bronzovou sochu Levitace, můžeme rovněž pozorovat odraz světla (zářící části).

Fotografie III. Snímek byl pořízen v obchodním domě na pražském Chodově. Skleněné budovy odráží pouliční scénu. Nápoj v plastovém kelímku naproti tomu nebeskou oblohu. V souvislosti s modrou oblohou lze studentům zmínit rozptyl.

Fotografie IV. Jedno z nejkrásnějších přírodních (vodních) zrcadel. Řeka. Fotografie byla pořízena v Praze-Troji, v lednu roku 2019.

Fotografie V. Tato fotografie je specifickým způsobem zajímavá. Ukazuje totiž nejen odraz oblohy a protější scenerie v oknech, ale také „prasátka“, která dobře známe z dětství. Kdo z nás nezkoušel malým zrcátkem nebo hodinkami nazlobit někoho ze svých spolužáků? V tomto případě se o světelnou výzdobu domu postarala okna protější budovy. Takovýchto odrazů při procházce městem snadno nalezneme více. Fotografie byla pořízena na ulici Na Bojišti, v Praze-Karlově, v listopadu roku 2020.

Fotografie VI. Mezi další přírodní zrcadla patří kaluž. V této kaluži se odráží olistěné větve stromů a oblaka. Fotografie byla pořízena v září roku 2017.

Fotografie VII. Tato fotografie může být kvízovou záležitostí (a je součástí třetí úlohy pracovního listu této aktivity). Je zde zachycen pohled, který nabízí skleněné dveře či zástěna od kupé. Část světla, které se od zástěny odráží, nám zprostředkovává výhled skrze okno uličky vlaku. Část světla, která skleněnou zástěnou naopak prochází, nabízí pohled do kupé, ve kterém je nad sedačkami umístěno zrcadlo a my v něm díky světlu, které prochází skrze sklo zástěny, a světlu, které dopadá zvenku skrze sklo okna do kupé, vidíme odraz onoho okna s nálepkou a výhledem na krajinu a část stěny vlaku. Záběr byl pořízen v říjnových ranních hodinách.

Fotografie VIII. Západ slunce na pražském trojském mostě. Pohled na holešovické zástavby zkrášlen rozptylem světla.

Fotografie IX. Na této fotografii je zvěčněna část domu, který se nachází naproti Městské knihovny města Krnov. Jeho stěny zdobí zrcadla obdélníkového tvaru. Zobrazují (odráží) lampu, značku a porost na přiléhající ulici.

Fotografie X. Poslední fotografie vztahující se k druhé úloze cvičení ukazuje častý, uměle vytvořený rozměrný odrazný prvek, a tím je skleněná výloha. Tato fotografie byla pořízena v jižní (horní) části Václavského náměstí v Praze. Student, který pochopí chod paprsků u fotografie VII, pochopí rovněž skleněnou výlohu a okno autobusu veřejné dopravy (za dne a také v noci).

# OPTICKÉ JEVY OKOLO NÁS



(a)



(b)



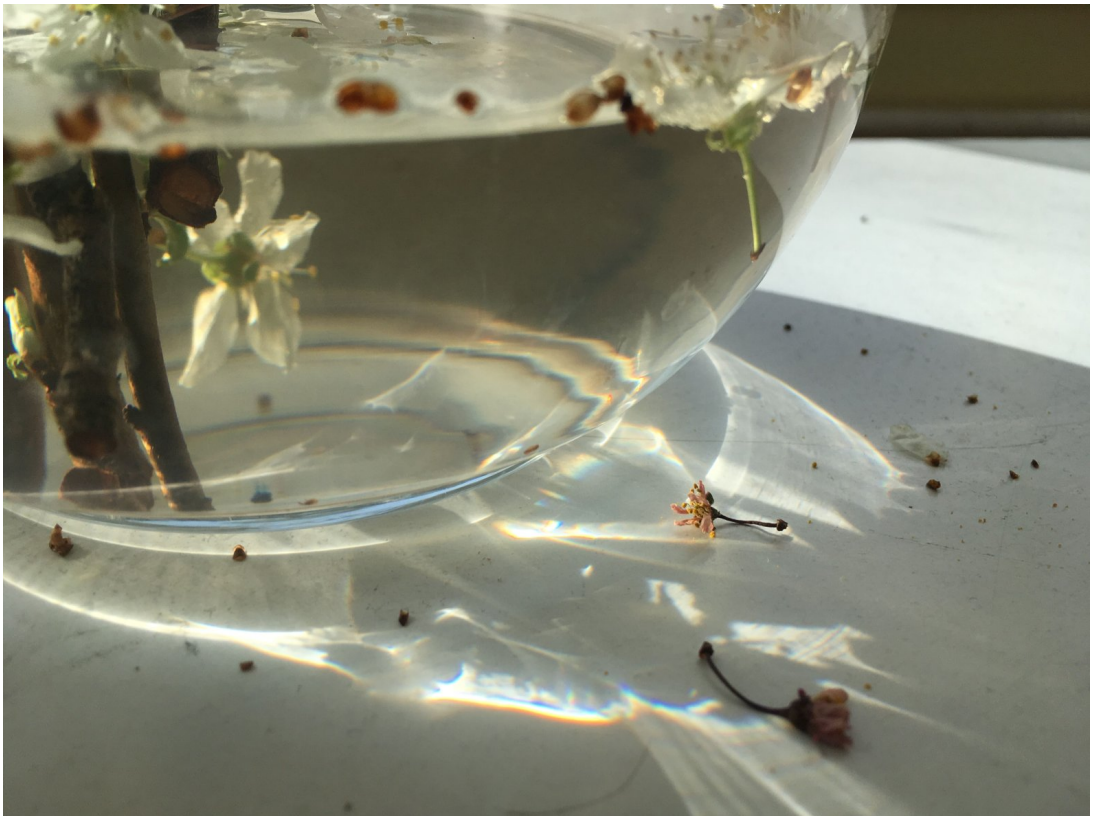
(c)



(d)



(e)



(f)

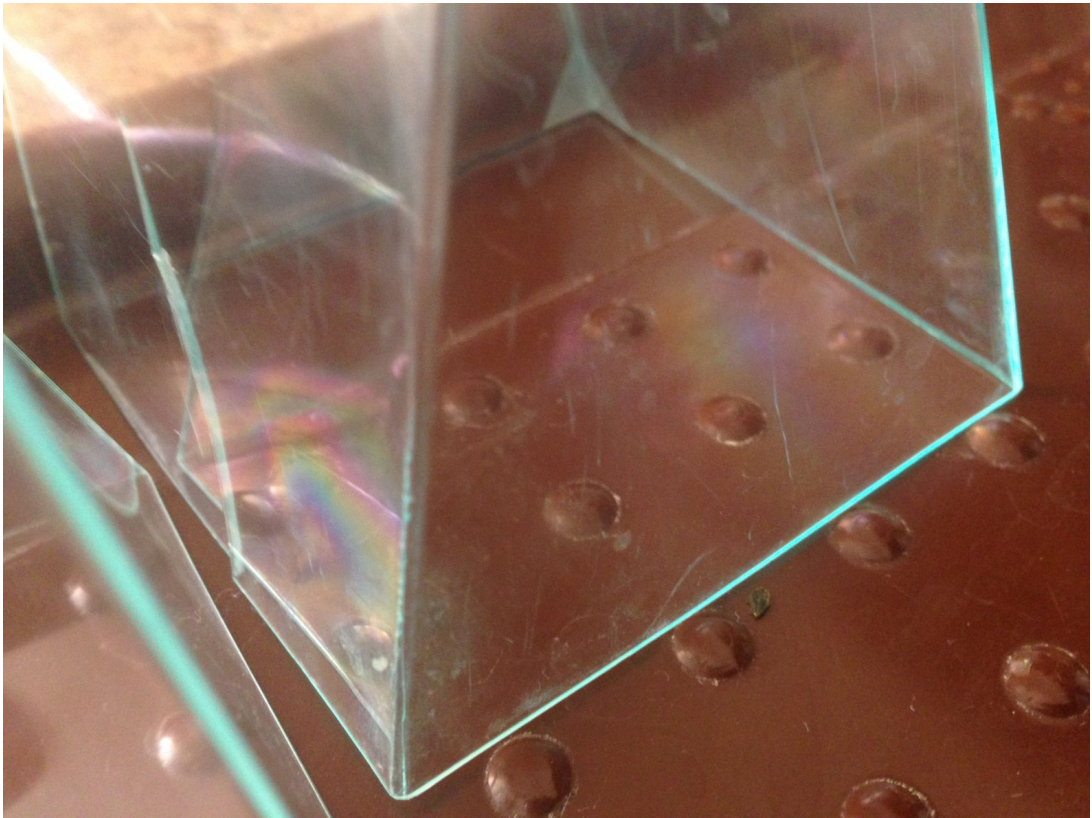


(g)



(h)





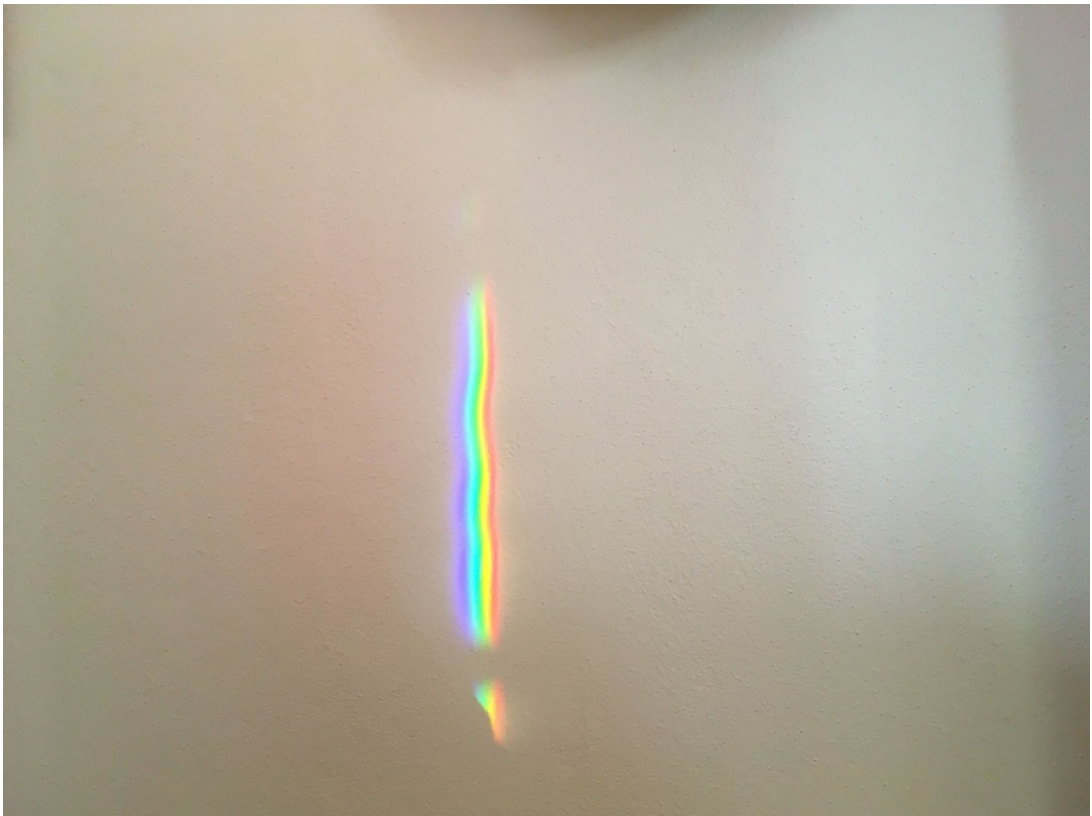
(i)



(j)



(k)



(l)



(m)



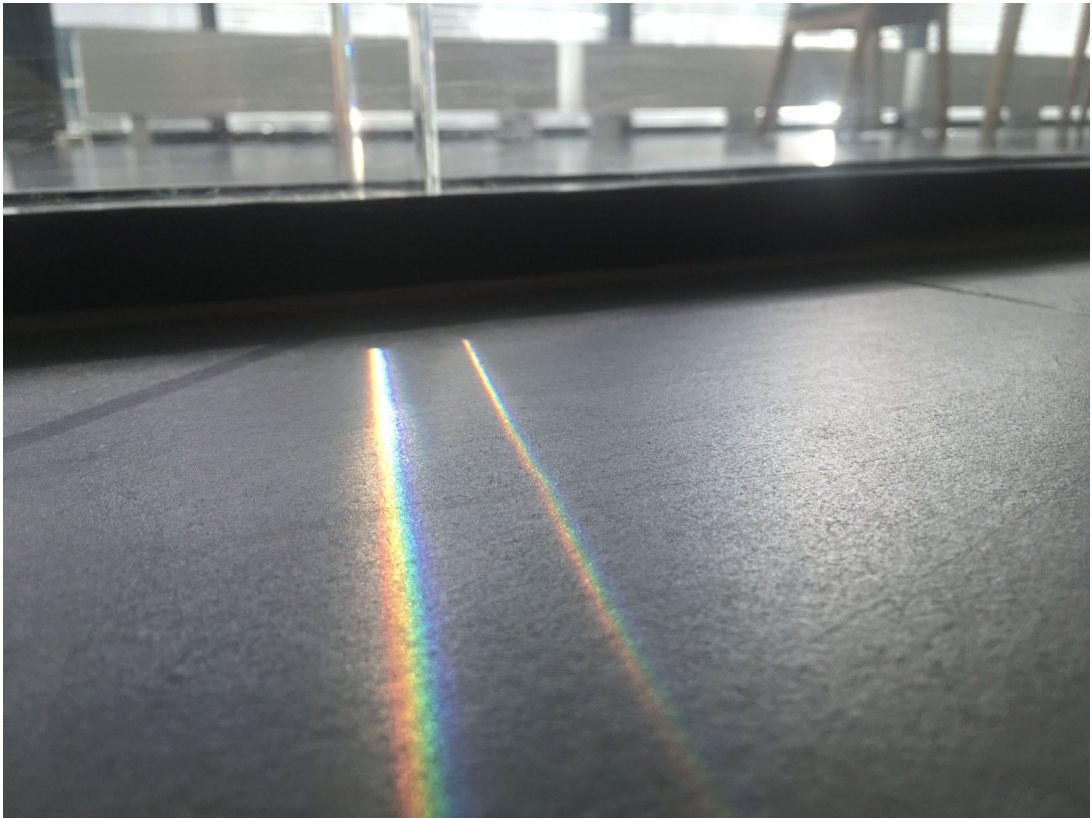
(n)



(o)



(p)



(q)



(r)



(s)



(t)



(u)



(v)



(w)



(x)





I



II



III



IV



V



VI



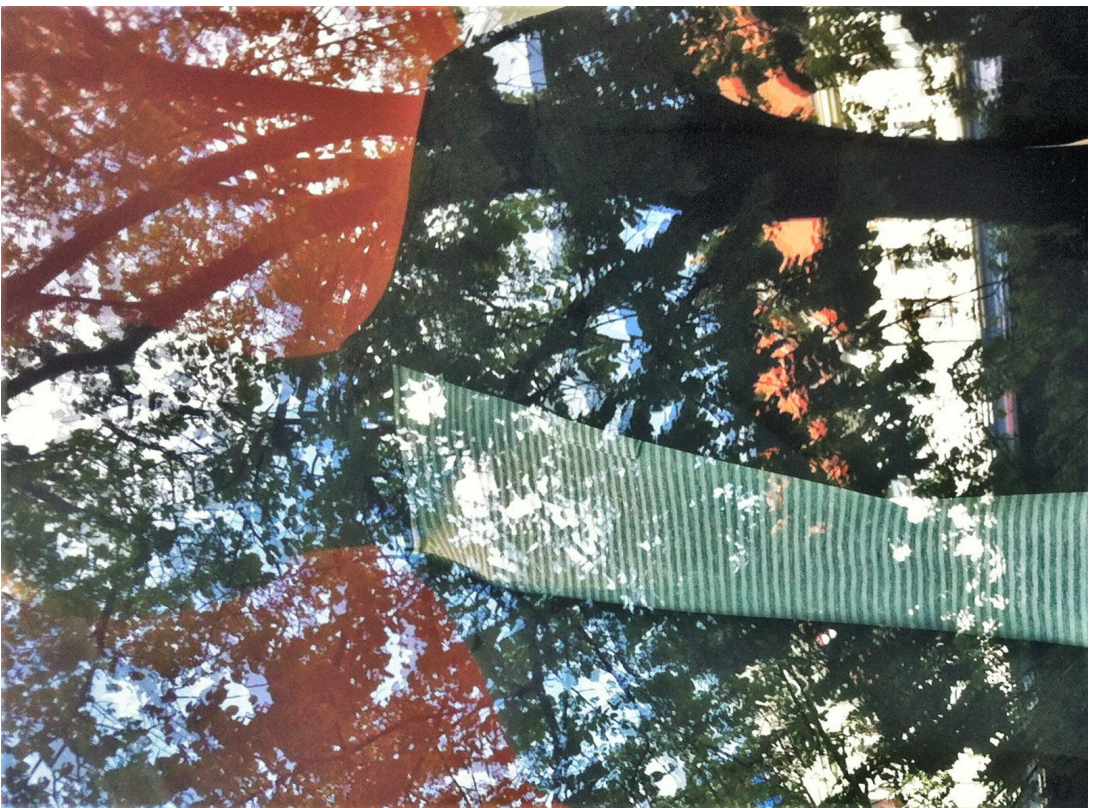
VII



VIII



IX



X

1. Přiřaďte fotografie (a)–(x) k pojmům níže.		
<u>ODRAZ A LOM SVĚTLA</u>	<u>ROZKLAD SVĚTLA</u>	<u>ROZPTYL</u>
<u>VÍCENÁSOBNÝ ODRAZ SVĚTLA</u>	<u>INTERFERENCE; DIFRAKCE</u>	<u>STÍN</u>
2. Na každé z fotografií I–X můžeme pozorovat odraz světla. Které z těchto fotografií jsou záznamem dalších optických jevů? Pojmenujte je. Lom světla neuvažujte.		3. Nakreslete přibližný chod (různých) paprsků z fotografie VII (pohled do kupé).

## Správné odpovědi:

### 1. cvičení:

ODRAZ A LOM SVĚTLA: (a), ((b)), ((c)), ((d)), ((f)), ((g)), (k), (m), (p), ((t)), ((w)), ((x))

ROZKLAD SVĚTLA: (b), (f), (j), (l), (q), (r), (w), (x)

ROZPTYL: ((j)), ((r))

VÍCENÁSOBNÝ ODRAZ SVĚTLA: (h)

INTERFERENCE; DIFRAKCE: (c), (d), (e), (g), (i), (o), (s), (t), (v)

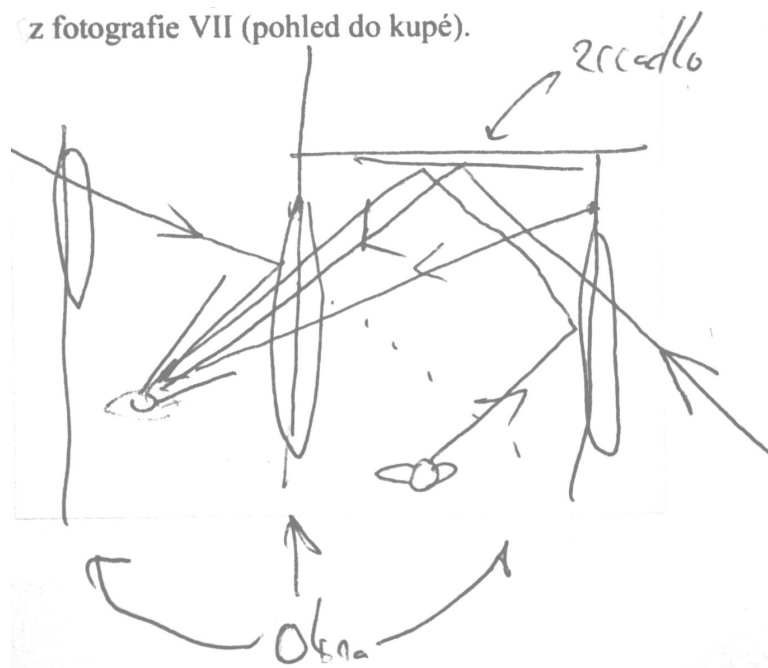
STÍN: ((b)), ((f)), ((k)), ((l)), ((m)), (n), (u), ((w)), ((x))

### 2. cvičení:

I: interference (difrakce);

III, IV, VII, VIII, IX: rozptyl

**3. cvičení:** Uvedené řešení je zároveň ukázkou řešení z řad studentů. Ilustrovány jsou paprsky, které reprezentují tu část světla, díky které pozorovatel (vyznačený symbolem oka) spatřuje odraz krajiny vně jedné i druhé strany vlaku. Dvakrát odražený paprsek pozorovateli odhaluje část kupé (spící cestující). Dále je možné uvažovat paprsky, které bezprostředně osvětlují chodbu (z levého okna) a kupé (z pravého okna) a dopadají přímo do oka pozorovatele (první popsany paprsek není na obrázku vyznačen).



Obrázek 4.20: Pohled do kupé: řešení

### 4.1.3 Didaktické poznámky

#### Dovětky k zadání úlohy a správným odpovědím

Než začnou studenti vyplňovat první část pracovního listu, je nutné se ujistit, že rozumí termínům ve sloupcích. Je vhodné připomenout dispersi (případně princip rozkladného hranolu, který je zde klíčový). Mezi optické jevy jsme zahrnuli také rozptyl (odchýlení paprsků od přímého směru), který běžně nebývá součástí středoškolského učiva, ale učitel se nevyhne zmínce o něm, pakliže chce studentům přiblížit, proč je nebe modré.

Poté, co studenti přiřadí k optickým pojmům dané fotografie, učitel pokládá otázky: „Na kterém z následujících snímků můžeme pozorovat difrakci? Co můžeme vidět na fotografii „XY“? Čemu je to podobné?“ apod. v souladu s individuálními potřebami studentů. Ti, kteří podobnosti neshledávají, by měli být k tomu navedeni (studenty v průběhu práce obcházíme, necháváme přemýšlet a podáme jim pomocnou ruku, pokud tápou). Dále můžeme pokládat doplňkové otázky jako „na čem ještě v přírodě – podobně jako na pampelišce – může docházet k difrakci?“ Student se má zamyslet a vzpomenout si, že oním ohybovým prvkem může být náš vlas anebo řasa, protože to jsou rovněž úzké překážky (stejně jako linie optické mřížky).

Pokud se učitel rozhodne nevyužít druhé úlohy či všech fotografií, je možné některý ze snímků použít do (opakovacího) testu. Alternativně lze zvolit fotografii mimo uvedený seznam. Pokud by byl na ní zobrazen například detail vlákna bource morušového (hedvábí) anebo pavoučí vlákno s barevnými proužky, student by měl být s to rozpoznat interferenční proužky anebo využít analogie podobné této: „toto přírodní vlákno je podobné vlasu, na němž už jsem viděl interferenční proužky, tudíž jde o interferenci“.

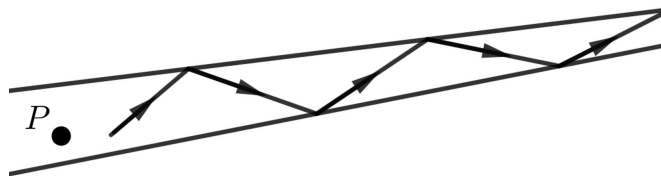
#### Domácí experimentování

V návaznosti na naši aktivitu mohou být studenti motivováni vyzkoušet si některý z experimentů či pozorování sami doma. Může vzniknout třídní sbírka fotografií optických jevů. Kolik různých sklenic či nádob můžeme v našich domácnostech naplnit vodou, tolik různých rozkladů světla budeme moci pozorovat. Stačí počkat, až bude ostře svítit slunce, na stůl si nachystáme skleněné nádoby a různé plastové lahve. Naplníme vše vodou a budeme postupně předměty stavět proti světlu. U stěny nádoby vzdálenější od okna bychom měli pozorovat rozklad světla. Odlišná kresba rozloženého světla vzniká v souvislosti s různým tvarem předmětů může být pro studenty matoucí a zavádějící, zde je podstatné uvědomění, skrze jaké médium či prostředí světlo prochází, že jde ve všech případech o analogii rozkladného hranolu.

Vícenásobný odraz může být zdrojem nejedné hříčky a snadno ho vytvoříme pomocí dvou zrcadel svírajících úhel  $\alpha$ . V dětství autorka této práce navštěvovala mámin taneční soubor Flash. Členky souboru mívaly k dispozici rozměrná zrcadla na kolečkách. V průběhu nebo na začátku „tréninku“ je vytahovaly. Autorka této práce mezi nimi jako malá ráda mávala desítkou ruk a přivírala se mezi ně co



nejvíce, aby byl efekt co nejvýraznější. V tomto případě se jedná o konečný počet odrazů (viz obr. 4.21, „P“ značí pozorovatele). K nekonečnému odrazu dochází, pokud se budeme dívat do jednoho ze dvou zrcadel paralelně umístěných proti sobě.



Obrázek 4.21: Vícenásobný odraz světla

Zajímavou výzvou by pro studenty mohlo být venkovní fotografování. Můžou se například zaměřit na to, kde všude ještě lze pozorovat interferenci. Mezi tenké vrstvy patří dále například sliz hlemýždě a povrch lastury. Další předměty mohou studenti s radostí objevovat sami. V aktivitě č. 5 jsme upravili ideu domácího fotografování do konkrétní podoby projektu.

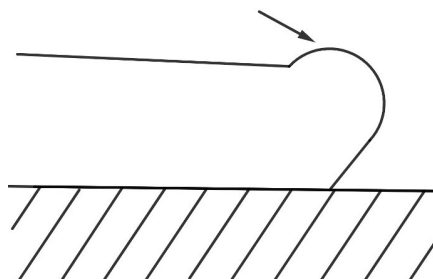
## 4.2 Aktivita č. 4: Cvičení: Užítí tvrzení z odst. Pomocná matematická a fyzikální tvrzení

Smyslem tohoto cvičení je připravit studenty na námi navrženou aktivitu č. 5, v rámci které se studenti mohou potýkat se složitějším popisem fyzikálních jevů – čistě užitím známých vztahů lze dospět ke komplexnějšímu popisu. Doporučujeme upozornit studenty na jednak využití fyzikálních zákonů, ale také geometrie. Projekt je přitom zamýšlen tak, aby nebylo nutné vyhledávat na internetových stránkách speciální zákonitosti. Přitom rozšíření si obzoru, samozřejmě, je rovněž možné. Seznam užitečných tvrzení jsme uvedli v rámci předchozí kapitoly. Toto cvičení rovněž nemusí sloužit k matematické přípravě, lze z něj čerpat – použít pouze ty řádky, ve kterých dochází ke zdůvodňování (užití tvrzení TF<sub>x</sub>, TM<sub>y</sub>), tedy chápat v tomto ohledu text jako ukázkou k aktivitě č. 5.

Na aktivitu lze nahlížet jakožto na možnou přípravu před budoucím laboratorním nebo domácím experimentováním. Jinými slovy: byť se studenti ve svých domácnostech prakticky neseťkají s přístroji fyzikálních laboratoří, může je aktivita podnítit k úvaze o vlastních experimentech, zájmu o vyhledání dostupné techniky apod. Jednak mohou zjistit, zda by daná položka byla pro ně finančně dostupná, jestli se potřebná aparatura nenachází na některé z univerzit, se kterou by bylo možné spolupracovat, anebo jakým způsobem by bylo možné si již existující anebo právě navrženou součástku vyrobit.

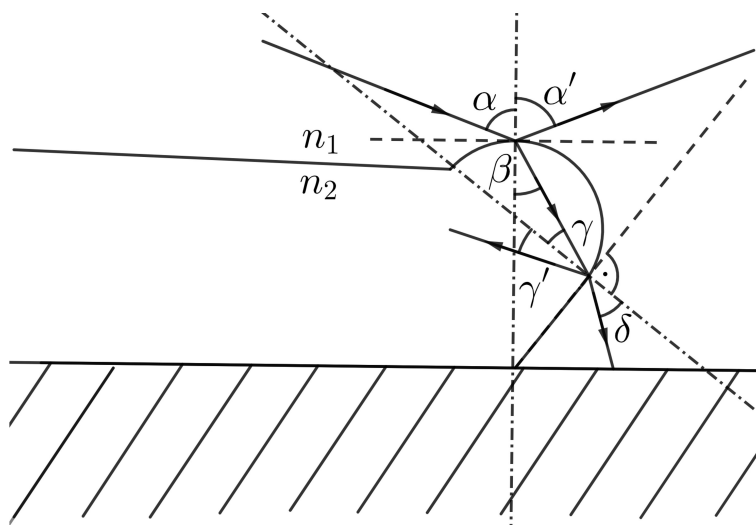
V konečném důsledku by tedy mohlo dojít nejen k tomu, že by se student nadchl do fyziky, ale také navrhl například nový či speciální druh přístroje. Co se týče optiky, na kterou se tato práce zaměřuje, může tomu mimo jiné napomoci pochopení zákona lomu a odrazu (paprskové optiky) na různých tvarech a materiálech a následné „hrátky“ s dalekohledy, mikroskopy a dalšími optickými přístroji, jak v teoretické rovině (schémata), tak fyzickém světě. Učitel by měl být schopen nadané studenty v návaznosti na vypracovávaném projektu vést k dalšímu rozvoji.

**Cvičení.** Uvažujme následující úlohu: na horní část skleněného objektu daného tvaru necháme pod obecným úhlem svítit laserový svazek. Předpokládáme, že část světla se při dopadu na druhé prostředí láme a část odrazí – tvrzení TF1. Využijeme této přírodní zákonitosti a použijeme daný skleněný objekt jakožto prvek, který nám svazek nasměruje do dané vzdálenosti od paty objektu – místa, kde bude umístěna například fotodioda.



Obrázek 4.22: Kolmý průřez skleněného objektu: paprsková optika (1)

Na základě tvrzení TF1–TF4 (lom ke kolmici) jsme si nakreslili obrázek 4.23, přičemž jsme zvolili (postupně) označení úhlů:  $\alpha$  – úhel dopadu na horní část objektu,  $\alpha'$  – úhel odrazu od horní části objektu,  $\beta$  – úhel lomu od kolmice v bodě horní části objektu,  $\gamma$  – úhel dopadu na zkosenou boční stěnu objektu,  $\gamma'$  – úhel odrazu od zkosené boční stěny objektu,  $\delta$  – úhel lomu od boční stěny objektu.



Obrázek 4.23: Kolmý průřez skleněného objektu: paprsková optika (2)

Tvrzením TF2 a TF3 v případě této úlohy odpovídají následující rovnice:

zákon odrazu:

$$\alpha = \alpha', \quad \gamma = \gamma'$$

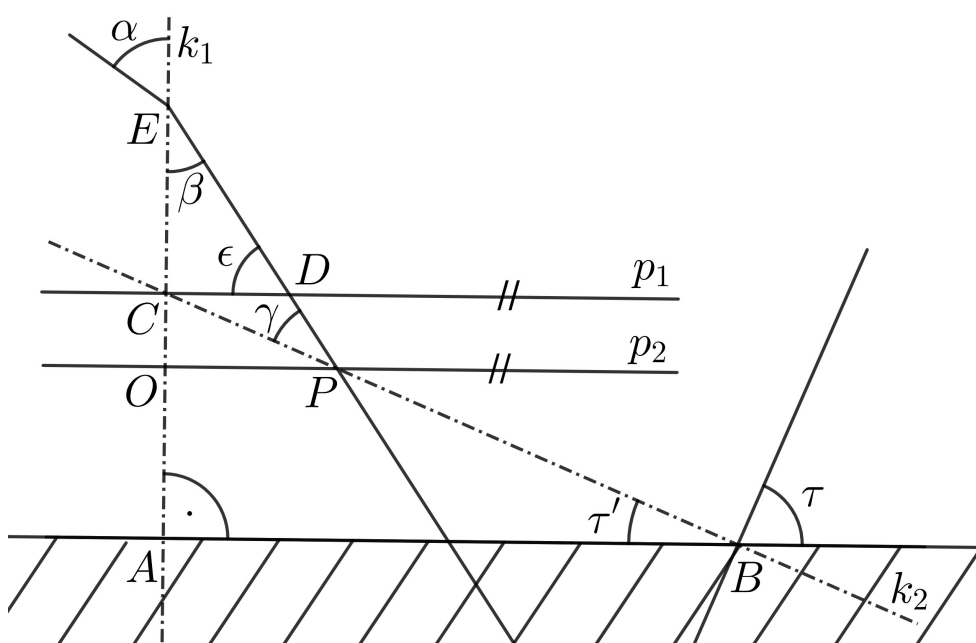
zákon lomu:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

$$n_2 \sin \gamma = n_1 \sin \delta.$$

Nás bude zajímat dvakrát lomený paprsek, tj. budeme hledat vztah mezi úhlem  $\delta$  a  $\alpha$ . Z obrázku 4.23 a zákona lomu je zřejmé, že pro určení  $\delta$  musíme nalézt nejprve úhel  $\gamma$ . Na tomto místě je praktické využít „proložení“ rozkladným hranolem, jak je popsáno v odst. 3.1.2. My provedeme odvození nezávisle na tomto triku. V úlohách podobného typu je zrovna třeba, aby si studenti promysleli, jak získat dané úhly.

Položme si otázku, v čem je tato úloha *odlišná od jiných úloh podobného typu*. To znamená: kdy by bylo úhel  $\gamma$  snadné dopočítat. (Je úhel  $\gamma$  snadné vypočítat?) Potíž je v naklonění kolmice  $k_2$  (viz obr. 4.24). Kdyby splývala s přímkou  $p_2$ , platilo by  $\epsilon = \gamma$ . Jenomže my v takové situaci nejsme, a to kvůli boční hrany  $x$  (viz obr. 4.25). Míru sklopení charakterizuje úhel. Je třeba změřit úhel  $\tau$  – sklon zbroušení spodní části skleněného objektu (viz obr. 4.24, 4.25).



Obrázek 4.24: Konstrukce k určení úhlu  $\gamma$

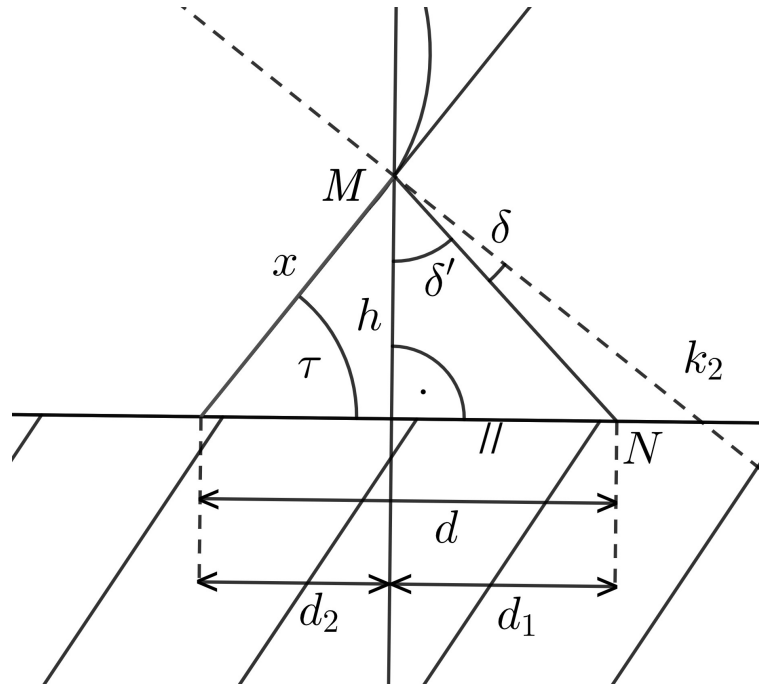
Z podobnosti trojúhelníků (OPE, CDE) a (ABC, OPC) dostáváme  $\gamma + \tau' = \epsilon$ , a tedy  $\gamma = \epsilon - \tau'$ . Z kolmosti  $k_2$  a  $k_3$  máme (uvažujeme trojúhelník CDE):  $\gamma = (180^\circ - 90^\circ - \beta) - (90^\circ - \tau) = \tau - \beta$ .

Nyní najdeme vztah pro úhel  $\delta$  (uvažujme problém, kdy známe  $\alpha$  a hledáme  $\delta$ , označme ho písmenem (A)): vyjádříme jej ze zákona lomu  $n_1 \sin \delta = n_2 \sin \gamma$  a dosadíme za  $\gamma$ :

$$\delta = \sin^{-1} \left( \frac{n_2}{n_1} \sin \gamma \right) = \sin^{-1} \left[ \frac{n_2}{n_1} \sin (\tau - \beta) \right].$$

Analogicky k vyjádření  $\delta$  dosadíme za  $\beta$  a dostáváme:

$$\delta = \sin^{-1} \left\{ \frac{n_2}{n_1} \sin \left[ \tau - \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \alpha \right) \right] \right\}. \quad (4.1)$$



Obrázek 4.25: Rozměry skleněného objektu (kolmý průřez) a vzdálenost  $d$  pro danou vlnovou délku

Vidíme, že úhel  $\delta$  je určen indexem lomu prostředí  $n_1$  a  $n_2$ , úhlem sklonu bočního broušení skla  $\tau$  a úhlem dopadu světelného paprsku  $\alpha$ . Z toho plyne, že pro jiný druh skla s odlišným indexem lomu by mohl být výsledek experimentu nezanedbatelně odlišný (\*).

*Existuje nějaká podmínka pro řešení rovnice (4.1)?*

V následujícím odstavci si ukážeme, že je tato otázka obsažena v následující fyzikální: „pod jakým úhlem můžeme nechat dopadat světelné záření, aby vznikl lomený paprsek dopadající na fotodiodu?“ Vzhledem ke dvěma rozhraním je třeba, abychom se *de facto* ptali na podmínku pro dvojí lom světla.

Řešme nyní opačnou úlohu (B): známe úhel  $\delta$  a chceme najít úhel  $\alpha$ , pod jakým má záření dopadat. Toto zadání odpovídá fixní vzdálenosti skleněného objektu od cíleného místa (fotodiody) dopadu světelného svazku. Nalezneme vztah mezi onou vzdáleností a úhlem  $\delta$ . Pokusíme se vyvarovat provádění nového odvození tím, že se zkusíme dostat co nejhluběji do argumentu pravé strany rovnice (4.1) pomocí inverzí. Pro inverze je třeba postupně ověřit, zda je splněna podmínka prostoty funkce. Nejprve si můžeme prohlédnout „nejvnitřnější funkci“ pravé strany (byť budeme invertovat zvnějšku). Pro úhel dopadu  $\alpha \in \langle 0, 90^\circ \rangle$  je funkce  $\sin \alpha$  rostoucí, tzn. ryze monotónní, a tedy na tomto intervalu je k této funkci dobře definovaná inverzní funkce (TM1), píšeme  $\sin^{-1} \alpha$  (DM2; ekvivalentně  $\arcsin \alpha$ ) s definičním oborem  $\langle -1, 1 \rangle$ , na kterém je  $\arcsin \alpha$  rostoucí, tudíž pro tuto funkci je obdobně, byť na celém jejím definičním oboru, dobře definovaná inverzní funkce (TM1). Víme, že  $\frac{n_1}{n_2} < 1 \wedge \sin \alpha \in \langle 0, 1 \rangle$ . Z toho plyne, že  $\frac{n_1}{n_2} \sin \alpha \in \langle 0, 1 \rangle \subset \langle -1, 1 \rangle$ . Můžeme tedy opět využít TM1 (DM2).

Nyní se podívejme, čemu je roven rozdíl úhlů  $\tau$  a  $\beta$ . Uvažujme krajní body intervalu, pro který je definován úhel  $\alpha$ . Předpokládejme, že  $\tau = 66^\circ$  (máme změřeno). Uvažujme  $\sin(\tau - 0^\circ)$  a  $\sin(\tau - 41,81^\circ)$ , kde  $\tau = 66^\circ$  (pro jednoduchost ponechme desetiny v desítkové soustavě). Na intervalu  $\alpha \in \langle 0, 90^\circ \rangle$  funkce  $\sin(\tau - \beta)$  spojitě klesá a je prostá, lze užít TM1. V poslední „vrstvě“ rovnice (4.1) však vyvstává problém: podíl  $n_2/n_1$  pro sklo (uvažujme pro jednoduchost index lomu  $n_2 = 1,5$ ) a vzduch dosahuje hodnoty větší než 1, a tedy se bude v součinu hodnota funkce  $\sin(\tau - \beta)$  s tímto členem zvětšovat. Zatímco hodnoty funkce  $\arcsin x$  s argumentem tvořeným v krajích hodnotami funkce  $\sin(\tau - 0^\circ)$  a  $\sin(\tau - 41,81^\circ)$  (včetně) spojitě vyplní část oboru hodnot funkce  $\arcsin x$  z intervalu  $x \in \langle -1, 1 \rangle$ , v součinu s  $n_2/n_1$  „dojdeme do míst“, kde funkce  $\arcsin x$  není definovaná: pro  $\sin^{-1}(\frac{n_2}{n_1} \sin \tau)$ ,  $n_1 = 1$ ,  $n_2 = 1,5$  a  $\tau = 66^\circ$  dostaneme  $\sin^{-1}(1,37)$ , což nelze vyčíslit. Odtud plyne omezení pro úhel  $\beta$ , a tedy i omezení pro úhel  $\alpha$ . Musí platit, že  $\left| \frac{n_2}{n_1} \sin(\tau - \beta) \right| \leq 1$ . Uvážíme-li krajní body této funkce, je zřejmé, že  $\sin(\tau - \beta) > 0$ . Potom můžeme psát, že  $\sin(\tau - \beta) \leq \frac{n_1}{n_2}$ . Funkce na levé straně je prostá. Aplikujme na obě strany rovnice  $\sin^{-1}$  (obě strany rovnice jsou pro daný interval vždy kladné). Pak  $\tau - \beta \leq \sin^{-1}(\frac{n_1}{n_2})$ , a tedy  $\beta \geq \tau - \sin^{-1}(\frac{n_1}{n_2})$ .

Pro náš případ  $\tau = 66^\circ$  je podmínka splněna pro  $\beta \in \langle 24,19^\circ, 41,81^\circ \rangle$ . Položme  $\beta_{MIN} = 24,19^\circ$  a  $\beta_{MAX} = 41,81^\circ$ . Druhá hodnota odpovídá  $\alpha_{MAX} \approx 90^\circ$ , první  $\alpha_{MIN} \approx 37,93^\circ$ . Nyní si tento výsledek blíže interpretujme. Pro  $\beta$  menší než jsou hodnoty v tomto intervalu, například  $\beta = 20^\circ$  ( $\alpha \approx 31^\circ$ ), máme argument vnější funkce  $\sin^{-1}$  větší než 1, a tedy funkce není pro takové  $\beta$  definovaná. Přitom dopadající paprsek se pod úhlem  $\alpha \approx 31^\circ$  na rozhraní (v tomto pořadí) vzduch – sklo láme (lze ověřit). Při dopadu na rozhraní sklo – vzduch však z rovnice plyne, že už se nemůže paprsek dále zlomit. Dochází k totálnímu odrazu (tvrzení TF5). Úhel  $\beta = 24,19^\circ$  je s ohledem na velikost úhlu  $\tau$  tzv. mezní úhel. Pro  $\beta = 31^\circ$ , které náleží intervalu  $\langle \beta_{MIN}, \beta_{MAX} \rangle$ , dostáváme  $\delta = 61,85^\circ$ . V případě, že velikost úhlu  $\beta$  interval  $\langle \beta_{MIN}, \beta_{MAX} \rangle$  naopak převyšuje (uvažujme  $\beta = 50^\circ$ ), můžeme početně sice získat úhel  $\delta \approx 24^\circ$ , ale neexistuje úhel  $\alpha$ , pro který by platil vztah (4.1) (vztah nelze zpětně invertovat s ohledem na definici vnitřní funkce  $\arcsin x$ ). Našli jsme tedy podmínku (možný interval úhlu  $\alpha$ ) pro vznik lomeného paprsku procházejícího skleněným objektem daného tvaru:  $\langle 37,93^\circ, 90^\circ \rangle$  a pro konkrétní hodnotu úhlu  $\alpha$  z tohoto intervalu jsme našli vzorec pro výpočet úhlu  $\delta$  (rovnice (4.1)).

Nyní pro  $\langle \beta_{MIN}, \beta_{MAX} \rangle$  a jim příslušná  $\alpha$  můžeme postupně invertovat pravou stranu rovnice (4.1) v souladu s DM2. Čistě pro účel našeho výpočtu vynechme argumenty v příslušných závorkách a funkci „sin“ píšme jako „s“. Tj. položme  $s := \sin$ ,  $n_{12} := \frac{n_1}{n_2}$  a  $n_{21} := (\frac{n_1}{n_2})^{-1}$ . Za znak „lomeno“ zapisujme funkce, které

aplikujeme – zde funkci (arkus)sinus a námi definovanou substitucí:

$$\begin{aligned}
 \delta &= s^{-1} \left\{ \begin{array}{l} \end{array} \right\} && /s \\
 s\delta &= n_{21}s \left[ \begin{array}{l} \end{array} \right] \\
 n_{12}s\delta &= s \left[ \begin{array}{l} \end{array} \right] && /s^{-1} \\
 s^{-1}(n_{12}s\delta) &= \tau - s^{-1} \left( \begin{array}{l} \end{array} \right) \\
 \tau - s^{-1}(n_{12}s\delta) &= s^{-1} \left( \begin{array}{l} \end{array} \right) && /s; \tilde{\tau} := \tau - s^{-1}(n_{12}s\delta) \\
 s\tilde{\tau} &= n_{12}s\alpha \\
 n_{21}s\tilde{\tau} &= s\alpha && /s^{-1} \\
 s^{-1}(n_{21}s\tilde{\tau}) &= \alpha
 \end{aligned}$$

neboli

$$\alpha = \sin^{-1} \left\{ \frac{n_2}{n_1} \sin \left[ \tau - \sin^{-1} \left( \frac{n_1}{n_2} \sin \delta \right) \right] \right\}. \quad (4.2)$$

Získali jsme vztah pro výpočet úhlu dopadajícího záření  $\alpha$ . Vidíme, že tvarem odpovídá vztahu pro úhel lomeného paprsku  $\delta$ , což je vzhledem ke tvaru zákona lomu a představě opačného chodu paprsku zcela logické. Abychom však mohli určit úhel  $\delta$ , je třeba využít geometrie (mít změřeny či udány výrobcem vybrané rozměry našeho skleněného objektu – viz obr. 4.25). Mějme změřeno: vzdálenost  $d$  (vzdálenost od paty boku skla ke chtěnému místu dopadu světla), délku boční hrany od země k místu lomu paprsku  $x$  a úhel  $\tau$ . Ukážeme si nyní, zda pomocí těchto rozměrů a rovnice (4.2) můžeme zjistit úhel, pod jakým máme svítit laserem na dané (vyznačené) místo skleněného objektu.

Nejprve nalezneme vztah pro úhel  $\delta$ . Z obrázku 4.25 dostáváme:  $d_1 = d - d_2$ . Z trojúhelníku v nejtěsnější blízkosti skleněného objektu dále máme:  $\cos \tau = \frac{d_2}{x} \implies d_2 = x \cos \tau$ . Dále máme:  $tg \delta' = \frac{d_1}{h} \implies \delta' = tg^{-1} \left( \frac{d_1}{h} \right)$ . Strana či výška  $h = \sqrt{x^2 - d_2^2}$ . Příмка či kolmice  $k_2$  je kolmá na boční hranu  $x$ . Z geometrie plyne, že pravý úhel sevřený kolmicí a hranou  $x$  získáme jako sumu tří úhlů:  $\delta$ ,  $\delta'$  a doplňkového úhlu k úhlu  $\tau$  a pravému úhlu (tento úhel jsme na obrázku neoznačili). Odtud  $\delta = 90^\circ - \delta' - (180^\circ - \tau - 90^\circ) = \tau - \delta'$ . Ve zkratce: budeme-li mít změřeno  $\tau$ ,  $x$ ,  $d$ , snadno určíme postupně  $d_2$ ,  $h$ ,  $d_1$ ,  $\delta'$  a  $\delta$ . Známe-li již úhel  $\delta$ , můžeme pomocí rovnice (4.2) vypočítat úhel dopadu  $\alpha$ , což je přesně to, co jsme chtěli, a naše úloha je tedy vyřešena.

Vraťme se k případu (A), kdy si zvolíme úhel  $\alpha$  (v rámci intervalu  $\langle 37,93^\circ, 90^\circ \rangle$ ) a chceme určit vzdálenost  $d$ . Uvažujme  $\tau = 66^\circ$  a  $\alpha = 80^\circ$ . Dále předpokládejme, že známe délku hrany  $x = 0,7$  cm. Použijeme červený laser vlnové délky  $\lambda = 650$  nm.

Prozkoumejme, jak se bude lišit výsledné  $d$ , pokud zaokrouhlíme hodnotu indexu lomu skla až na druhém desetinném místě a dále pokud užitíme jiného skla. Prvně spočítejme pro tento a ostatní případy to, co vyplývá čistě z rozměrů skleněného objektu:  $d_2 = 0,28$  cm,  $h = 0,64$  cm (uvádíme výsledky zaokrouhlené na dvě desetinná místa, v rámci výpočtů nezaokrouhlujeme). Nejprve uvažujme, že  $n_2 = 1,51$  (sodno-vápenaté sklo, [90]). Pak  $\delta = 40,17^\circ$ ,  $\delta' = 25,83^\circ$ ,  $d_1 = 0,28$  cm a  $d = 0,59$  cm. Pro případ zaokrouhlené hodnoty indexu lomu  $n_2 = 1,5$  máme

$\delta = 39,58^\circ$ ,  $\delta' = 26,42^\circ$ ,  $d_1 = 0,32$  cm a  $d = 0,60$  cm. Pokud  $n_2 = 1,62$  (flintové sklo, [91]), získáme  $\delta = 50,76^\circ$ ,  $\delta' = 15,24^\circ$ ,  $d_1 = 0,17$  cm a  $d = 0,46$  cm. V případě flintového skla by už byl oproti sodno-vápenatému (běžnému lahvovému) sklu pro danou vlnovou délku světla v experimentu patrný rozdíl, čímž jsme potvrdili hypotézu (\*).

Uvažme nyní případ, kdy  $\alpha = 60^\circ$ , zbylé parametry ponechme stejné jako v prvním případě. Pak  $\delta = 51,05^\circ$ ,  $\delta' = 14,95^\circ$ ,  $d_1 = 0,17$  cm a  $d = 0,45$  cm. Vidíme, že pro menší  $\alpha$  je  $\delta$  větší. Připomeňme si, že funkce  $\sin x$  na intervalu  $\langle 0, 90^\circ \rangle$  roste a její inverze  $\sin^{-1} x$  na intervalu  $\langle 0, 1 \rangle$  také roste. Obecně na základě vztahu (4.1) lze psát (uvažujme interval  $\langle 37,93^\circ, 90^\circ \rangle$ ):  $\alpha \uparrow \implies ( ) \uparrow \implies \sin^{-1}( ) \uparrow \implies [\tau - \sin^{-1}] \downarrow \implies \sin[ ] \downarrow \implies \sin^{-1}\{ \} \downarrow$ , zkráceně: když  $\alpha \uparrow \implies \delta \downarrow$ . To znamená, budeme-li  $\alpha$  postupně zvětšovat, bude se  $\delta$  zmenšovat. Taková informace se může obecně hodit pro snadné nastavení aparatury (správným směrem). Zde jde o natočení laseru správným směrem (nastavení  $\alpha$ ) pro dané  $d$ .

Závěrem. Na této úloze jsme si připomněli část geometrie, jejíž znalost je důležitá pro pochopení paprskové optiky. Využili jsme matematická a fyzikální tvrzení TMx a TFy, užívali jsme je, abychom podložili naše argumenty. Nalezli jsme vztah pro výsledný úhel lomu  $\delta$  a pomocí inverzí jsme obdrželi vztah pro úhel dopadu  $\alpha$ . Pro  $\tau = 66^\circ$  skleněného objektu jsme našli interval přípustných hodnot  $\alpha = \langle 37,93^\circ, 90^\circ \rangle$  pro vznik lomeného paprsku procházejícího objektem. Dále jsme diskutovali typy skel v souvislosti s indexem lomu objektu a pro fixní  $\alpha$  jsme vypočítali vzdálenost  $d$ . Praktickým zjednodušením řešení úlohy je užití rozkladného hranolu, jak je popsáno v odst. 3.1.2.



## 4.3 Aktivita č. 5: Projekt: Optické jevy v našich domácnostech

Tato aktivita má pomoci rozvinout fyzikální myšlení. Zadání projektu viz níže. Studenti si vyberou optický jev či jevy, se kterými se můžeme setkat v našich domácnostech, a fyzikálně je popíší. Využije-li učitel také předchozích aktivit a naváže-li na ně s tímto částečně školním a částečně domácím cvičením, bude student lépe připraven úkol splnit. Při nevyužití aktivity č. 3 lze před plněním aktivity č. 5 jmenovat některé z níže zmíněných příkladů optických jevů (viz odst. 4.3.1), se kterými se můžeme setkat v našich domácnostech (fotografie lze promítnout pomocí dataprojektoru). Zároveň může být ale také účelné nechat studenty, aby si na své „příklady“ přišli sami (včetně některých z odst. 4.3.1).

V následujících větách se vyjádříme k vhodnosti výběru optických jevů. Při zadávání je rozumné projekt formulovat tak, aby se studenti pokusili popsat složitější optický jev a nevěnovali se kupříkladu pouze odrazu světla (pokud tak učiní, viz komentář dále). Složitějším optickým jevem se myslí například případ, kdy světlo dopadá na objekt a dochází k jeho rozkladu (disperzi). Jde tedy o sérii změn směru chodu paprsku světla (odraz a lom) a využití znalosti závislosti indexu lomu na vlnové délce světla (či frekvenci). Pokud si jako „primární“ jev studenti vyberou pouze odraz světla, měli by se zamyslet nad možnými doprovodnými jevy (např. absorpcí) a okomentovat je. Stěžejní částí projektu je umět použít vztahy z odst. 3.1.1, kterým by studenti již měli rozumět (studenti pochopili tvrzení v odst. 3.1.1 a chápou účel kolmice – viz odst. 3.1.2) a pokusit se provést vlastní analýzu problému – nikoliv „v zoufalství“ hledat na internetu řešení úlohy.

„Rozumí-li“ student teorii, může mít projekt hotový rychle. Důležité je však nejen umět použít to, co mi bylo „dáno“, ale zamyslet se také nad tím, jestli „realita nemůže být jinak“ – tj. již zmíněná vlastní analýza. Jinak řečeno: je důležité, aby se studenti zamysleli, v čem je či může být jejich popis nedostatečný. Skrze jmenované předpoklady v odst. 3.1.1 a jejich zdůraznění může student snadno shledat, „v čem by mohl být zádrhel“, tj. v čem by mohla být realita ve sporu s „tvrzením X“. Pakliže student využije nějaké aproximace, měl by to uvést v projektu do „Komentáře“ (viz šablona v zadání projektu).

Projekt má **dvě etapy**: v první má být studentům vysvětlené zadání projektu. Po odevzdání učitel každému studentovi okomentuje projekt a zadá mu početní úlohu, otázky na zamyšlení či jinou aktivitu vztahující se k rozebíranému optickému jevu. V druhé etapě studenti vyřeší danou úlohu, kterou taktéž odevzdají. Studenti opět získají zpětnou vazbu od učitele. Projekt je přínosný pro učitele v tom smyslu, že učitel získá lepší vhled do toho, v čem studenti chybují, jak uvažují, „co jim jde“. Pro studenty je přínosná mimo jiné dvojí zpětná vazba a s ní spojený individuálnější přístup (komentář k úloze a příklad „šitý na míru“). V souvislosti s tímto může učitel dohlédnout na to, aby slabší studenti pochopili to, s čím mají potíže, a nadanější studenti prohloubili své dovednosti.

Na následující straně uvádíme zadání projektu, které má **dvě části**. Nejprve uvádíme rozměry, co se týče „pdf-dokumentu“, který mají studenti v první části projektu vytvořit. Dále uvádíme příklad vypracování druhé části projektu. Ponecháváme na zvážení učitelů, zda mu postačí danou fyzikální situaci studenty načrtnout, nebo se přikloní k požadavku nákresu kombinovanému s rýsováním. Skrze rýsování si mohou studenti ověřit své znalosti z optiky precizněji.

## PROJEKT: OPTICKÉ JEVY

1. Vyfotografujte 5 různých objektů s optickými jevy ve vašich domácnostech. Fotografie vložte do „word-dokumentu“: umístěte 2, 2 a 1 fotografii na stránky formátu A4 (na třetí stránce bude fotografie umístěna stejným způsobem jako na předchozích stránkách horní fotografie). Poměr stran (šířka : délka): 4 : 3. Fotografie jiného poměru ořízněte (nedeformujte). Okraje stránky je třeba nastavit – cesta: Rozložení stránky – Okraje – Vlastní okraje; zvolte horní a dolní okraj široký 2 cm, boční okraje ponechte „defaultní“, tj. široké 2,5 cm. Vložte fotografie. Upravte jejich velikost: výška: 10,5 cm (tomu odpovídá šířka cca 14 cm). Upravte jejich umístění: nastavte pravým kliknutím na obrázek Obtékání textu – Nahore a dole, dále Obtékání textu – Další možnosti rozložení a vyplňte pro horní fotografii tabulku tímto způsobem:

Upřesnit rozložení ? X

Umístění obrázku Obtékání textu

Vodorovně

Zarovná ní Na střed vzhledem k Okraj

Rozložení knihy Uvnitř z Okraj

Absolutní pozice 0 cm napravo od Okraj

Relativní pozice vzhledem k Okraj

Svisle

Zarovná ní Nahoře vzhledem k Horní okraj

Absolutní pozice 4 cm pod Horní okraj

Relativní pozice vzhledem k Horní okraj

Možnosti

Přesunovat objekt s textem  Povolit překrytí

Uzamknout ukotvení  Rozložení v buňce tabulky

OK Storno

Pro spodní fotografii zadejte do dolní Absolutní pozice 15 cm. Zbylé nastavení bude totožné. Hotový soubor uložte a převedte ho do formátu „pdf“. Podepište se do názvu souboru dle vzoru: „3B\_VeselaK“. Odevzdejte elektronicky.

2. Vyberte si jednu z vašich pěti fotografií s optickým jevem / jevy a popište jej / je fyzikálně dle šablony níže. Odevzdejte v elektronické / papírové podobě.

---

Název projektu

Název pozorovaného světelného jevu / jevů

Ilustrační fotografie

Slovní popis

Popis – náskres (rýsování)

Popis – rovnice

Popis – nalezení vztahu pro výslednou veličinu (odchylka, vzdálenost...)

Komentář (použitá tvrzení, aproximace, ...)

Závěr

---

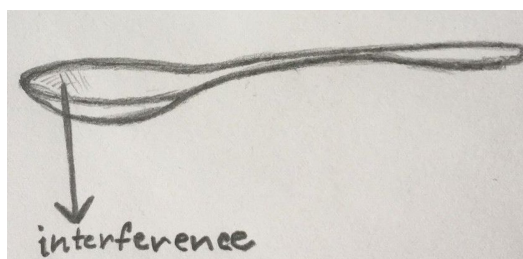
# PROJEKT: OPTICKÉ JEVY

## INTERFERENCE NA LŽÍCI

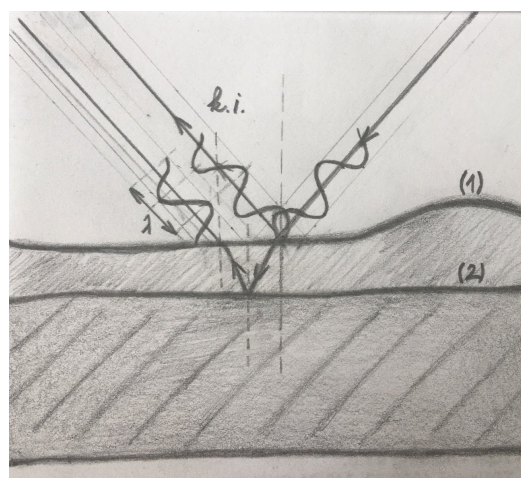


Obrázek 4.26: Barevné obrazce na části svrchní vrstvy lžice

Na této fotografii můžeme pozorovat interferenci na tenké vrstvě. Jde o barevné útvary na lžici. Světlo z okna místnosti dopadá na lžici. Část světla se na svrchní vrstvě (nečistotě) lžice odráží; část se láme, odráží od ocelového povrchu lžice, znovu láme na horní hranici nečistoty a dochází ke skládání světelných vln (obou částí). Druh barvy odpovídá konstruktivní interferenci světla dané vlnové délkou  $\lambda$  (viz obrázek 4.27 (b)). Na fotografii můžeme zároveň vidět odraz okna – na lžici je zřetelně rozpoznatelné jeho ohraničení.

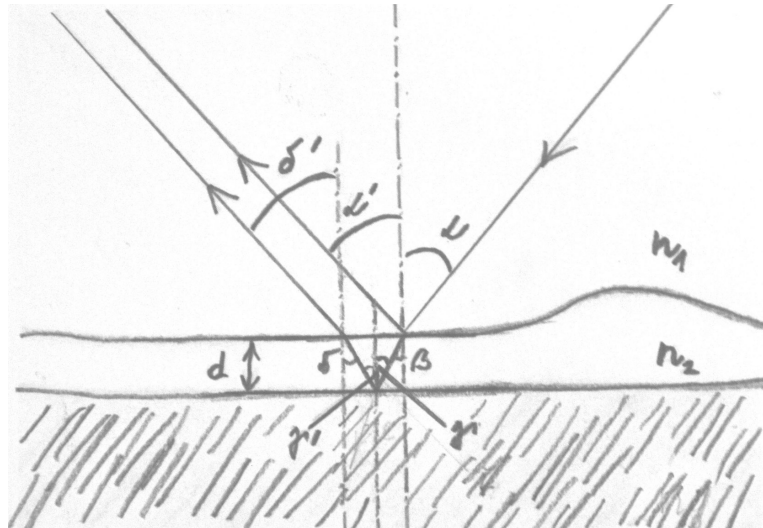


(a) Kresba pozorovaného objektu



(b) Konstruktivní interference světla vlnové délky  $\lambda$

Obrázek 4.27: Interference na lžici - vlnový popis



Obrázek 4.28: Interference na lžíci - paprskový popis

$n_1$ ... index lomu vzduchu	$\gamma$ ... úhel dopadu na spodní část vrstvy
$n_2$ ... index lomu svrchní vrstvy	$\gamma'$ ... úhel odrazu od spodní části vrstvy
$\alpha$ ... úhel dopadu na horní část vstvy	$\delta$ ... úhel dopadu na první rozhraní
$\alpha'$ ... úhel odrazu od horní části vrstvy	$\delta'$ ... úhel lomu od prvního rozhraní
$\beta$ ... úhel lomu od horní části vrstvy	$d$ ... tloušťka svrchní vrstvy

zákon odrazu:

$$\alpha = \alpha', \gamma = \gamma'$$

zákon lomu:

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta$$

$$n_2 \sin \delta = n_1 \sin \delta'$$

podmínka pro vznik interferenčního maxima:

$$2n_2d\sqrt{1 - \frac{1}{n_2^2} \sin^2 \theta} = (k + \frac{1}{2})\lambda$$

podmínka pro vznik interferenčního minima:

$$2n_2d\sqrt{1 - \frac{1}{n_2^2} \sin^2 \theta} = k\lambda, k = 0, 1, 2, \dots$$

Nalezení vztahu pro úhel  $\delta'$ :

Předpokládejme, že námi popisovaný úsek svrchní části lžíce, tj. vrstvy se dvěma rozhraními, tvoří dvě paralelní části přímk. Uvažujme lomený paprsek. Dostáváme úhlopříčkou rozdělený obdélník, a tedy  $\gamma = \beta$ .

Ze symetrie plyne, že  $\delta = \beta$ . Pak  $n_2 \sin \delta = n_2 \sin \beta = n_1 \sin \delta'$ . Protože  $n_2 \sin \beta = n_1 \sin \alpha$ , máme  $n_1 \sin \alpha = n_1 \sin \delta'$  pro  $\alpha, \delta' \in \langle 0, 90^\circ \rangle$ . Funkce sinus je na tomto intervalu prostá, nutně  $\delta' = \alpha$ . Ze zákona odrazu dostáváme, že  $\delta' = \alpha'$ . V důsledku rovnoběžnosti kolmic zkoumaného povrchu jsou paprsky odraženého i

prošlého záření rovnoběžné.

#### Komentář:

Nejprve okomentujeme fyzikální popis námi vybraného optického jevu z hlediska paprskové optiky. Poslední rovností jsme dokázali, že paprsek odraženého světla a paprsek, který prošel, odrazil se a opět prošel, jsou rovnoběžné (tomu odpovídá obrázek 4.28). Z fyzikálního hlediska jsme použili tvrzení TF1, TF2 (zákon odrazu) a TF3 (zákon lomu).

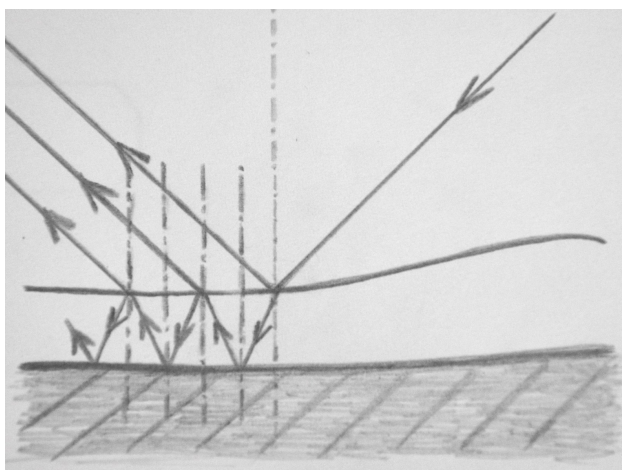
Nyní se podívejme na fyzikální popis námi vybraného optického jevu z hlediska vlnové optiky. Na obrázku 4.27(b) je ilustrována změna fáze o  $\pi$  dopadající a odražené vlny: dochází k ní na prvním rozhraní (tvrzení TF9). Předpokládali jsme, že  $n_1 < n_2$ , čímž byly splněny předpoklady tvrzení TF9. Vlnovou délku světla vybrané frekvence jsme označili jako  $\lambda$ . Z podmínky pro interferenční maximum (tvrzení TF7) vyplývá, že pro jiné  $d$ , označme ho jako  $\tilde{d}$ , může být nečistota jinak zbarvená – konstruktivně bude interferovat („vysčítá se do svého maxima“) jiná vlnová délka světla. K takové situaci, můžeme předpokládat, dojde v místě na obrázku 4.28, kde má nečistota tvar kopečku. Pro obdobný popis jako v případě vrstvy tloušťky  $d$  můžeme úzkou oblast svrchní části kopečku aproximovat přímkou rovnoběžnou s druhým rozhraním.

Pokud bychom v našem případě neuvažovali planparalelní vrstvu, ale například část „kopečku“ v pravé části nákresu, mohlo by se stát, že by optický dráhový rozdíl neodpovídal přesně vzdálenosti  $2nd$ . Potom by se z hlediska geometrie muselo zvážit naklonění kolmice vzhledem k povrchu. Obecně opačná fáze prošlé a následně odražené a opět prošlé vlny oproti odražené vlně znamená destruktivní interferenci (tvrzení TF8). V porovnání s obrázkem 4.27 (b) jde o menší nebo naopak větší hodnotu vlnové délky v porovnání s  $\lambda$  („hustší“ či „řidší“ vlnění). Na čem dále závisí výsledná podoba interferujícího světla, je úhel dopadu záření, který může být různý vzhledem k zakřivenému povrchu lžice, a tudíž různé orientaci kolmic, vůči kterým úhel dopadu měříme.

Kombinací s výše zmíněnou variací tloušťky nečistoty pozorujeme vyfotografované barevné obrazce na lžici. Zbarvením skvrny připomínají olejové skvrny od aut. Jde o stejný princip skládání světelných vln.

#### Závěr:

Pomocí paprskové a vlnové optiky jsme popsali chování světla na části tenké vrstvy lžice. Konstruktivní interference dané vlnové délky závisí na úhlu dopadu světla a tloušťce vrstvy nečistoty, a protože ta není ve všech místech stejně široká, můžeme pozorovat interferenční obrazec v podobě složitě tvarovaných barevných skvrn.



Obrázek 4.29: K mnohosvazkové interferenci

### Komentář k příkladu možného zpracování projektu

Podrobnější materiálový výzkum je nad rámec středoškolské fyziky. V rámci této úlohy tedy postačí, dokážou-li studenti zvážit závislost pozorovaných barevných skvrn na tloušťce vrstvy a úhlu dopadajícího záření. Další věcí je tzv. *mnohosvazková interference* (viz obrázek 4.29) – víme, že platí, že po odrazu od spodní hranice vrstvy projde paprsek skrze horní hranici vrstvy nečistoty do vzduchu (přesněji řečeno dojde k lomu světla). Navíc se však (v souladu s tvrzením TF1) část světla od horní části vrstvy opět odrazí zpět ke spodní části vrstvy, odkud se znovu odrazí zpět k horní části vrstvy (a dojde k lomu světla) atd.

Mohli bychom se ptát, jak dlouhé bude takovéto „pokračování“ v našem případě a jaká je světelná intenzita odražených paprsků  $I$  oproti původní intenzitě, tj. oproti intenzitě dopadajícího světla  $I_0$  (pracujeme se stejnou logikou jako v případě difrakce). Tento poměr  $I/I_0$  určí útlum. Myslet si tedy, že tento příklad interakce světla s látkou je jednoduchý, může být klam (nemluvě o matematickém popisu).

Co se nákresu dále týče, zanedbali jsme nerovnosti povrchu a zaměřili se na planoparalelní (rovnoběžnou) část vrstvy. Koneckonců vzhledem k tloušťce tenké vrstvy a vlnové délce světelných vln, snaží se obrázek popsat dvě velmi blízká místa. Rozměrově (vzhledem k délce světelných vln, poměru tloušťky vrstvy nečistoty ku ocelové části lžice) je obrázek velmi nepřesný, snaží se ilustrovat fyzikální princip, odpovídat rovnici z tvrzení TF7. Přesněji bychom měli také uvažovat namísto jednoho dopadajícího paprsku sérii takovýchto paprsků (světelné vlny poté interferují v určitém bodě – analogicky k případu, jak je tomu u difrakčního obrazce na stínítku, kterým se zabýváme v odst. 1.2.2).

### Komentář ke značení

S čím se u optických jevů studenti budou potýkat, je značení úhlů. Na střední škole se zpravidla používají výhradně první čtyři písmena řecké abecedy:  $\alpha$ ,  $\beta$ ,



$\gamma$  a  $\delta$ . Úhly se (zpravidla či přesněji řečeno tradičně) označují řeckými písmeny, podobně jako se pro sčítací indexy u sum volí latinská písmena  $i, j, k, l, m, n$  a pro kartézské souřadnice písmena  $x, y$  a  $z$ . Pro označení úhlu odrazu se užívá čárky oproti úhlu dopadu. Čtenář se může v důsledku nejčastěji setkat s úhlem dopadu  $\alpha$  a úhlem odrazu  $\alpha'$  – viz např. [1] (viz také tvrzení TF2). Učebnice doc. Lepila [1] pak, co se týče úhlu lomu, následuje logiku volby písmena, které je v řecké abecedě na následující pozici. Bude-li tedy úhel dopadu  $\alpha$ , úhel lomu bude  $\beta$ .

Studenti si pro označení úhlů (a dalších parametrů) mohou volit také například „sluníčko“, bude-li jejich značení jednotné, budou-li s vybraným symbolem pracovat správně a nebude-li symbol přiřazen více objektům současně (nejednoznačnost). Ohledně označování lze vytyčit za klíčové čtyři myšlenky: 1. správné chápání toho, co se myslí označením (lze provést i jiné), 2. obvyklá značení jsou daná historicky a jsou široce užívaná, 3. je rozumné volit takové značení, které bude elegantní (a snadno upochopitelné pro druhé lidi, což částečně souvisí s 2. bodem, a podobné jazyku běžné mluvy – kdybychom si každý zvolili své pojmenování pro židli, nedomluvili bychom se), 4. (konkrétní způsob) značení není věc daná, nýbrž věc volby.

V čem může být běžné označování úhlu odrazu čárkou problematické, je možný vznik matematického dvojsmyslu v pokročilejších úlohách. Důvod je následující: čárka často značí derivaci. Z matematického hlediska je tedy rozumnější užívat číslování, a tedy namísto  $\alpha$  a  $\alpha'$  psát  $\alpha_1$  a  $\alpha_2$ . Číslování rovněž řeší problém neznalosti více než prvních čtyř písmen řecké abecedy. Namísto čárky pro odlišení úhlů lze užít alternativně vlnky – viz označení tloušťky nečistoty v úloze se lžící (viz Komentář).

Zde uvedme ještě praktickou poznámku k převodu mezi stupni a radiány. Mezi stupni a radiány je převodní vztah obsahující násobení, nebo dělení, a to číselným zlomkem  $\pi \text{ rad}/180^\circ$ , nebo naopak  $180^\circ/\pi \text{ rad}$ . Jednoduše řečeno, zásadní je vědět, kdy se používá co. Namísto této znalosti anebo odvození si studenti mohou napsat původní a cílové jednotky a původní jednotka se jim má vykrátit, zatímco nová „objevit“, anebo si stačí uvědomit, že úhly v radiánech bývají (v porovnání se stupni) malé číslo a  $\pi$  je podstatně méně než 180. Čili budeme-li chtít převést stupně na radiány, budeme je muset dělit 180 a násobit číslem  $\pi$ , zatímco při převodu radiánů na stupně budeme násobit radiány číslem 180 a dělit  $\pi$ .

### Alternativní varianty projektu

Vrátíme-li se k aktivitě č. 3, shledáme, že vůči ní nabízí projekt rozšíření svého „pole působnosti“. Nemusíme fotografie optických jevů pořizovat pouze doma, ale můžeme si udělat procházku v přírodě anebo po městě. V takovém případě vstupuje do hry atmosférická optika. Také proto jsme v odst. 3.1.3 zmínili některé z pozoruhodných jevů v atmosféře. Aktivitu lze rovněž omezit na exteriér. Můžeme tak učinit v případě, že máme tu možnost věnovat se fyzice ve venkovním prostředí. Na projektu by bylo možné pracovat na onom místě (popsat přímo pozorované jevy a další příklady podobných jevů vymyslet) s tím, že zbylá část projektu (vypracování) by získala formu domácího cvičení.

## **Sbírka fotografií**

Součástí projektu je také vytvoření sbírky fotografií dané třídy. Může vzniknout tenká brožurka („pdf-dokument“) s fotografiemi, na kterých by se podílel každý člen třídy a která by zůstala studentům na památku. Vzhledem k dnešní dostupné technice je možné „pdf-dokumenty“ od jednotlivých studentů sloučit, lze dotvořit obálku (přední a zadní stranu dokumentu), obsah (seznam) a jednotlivé stránky (vhodné – bez obálky) nechat očíslovat. Také proto jsou v zadání projektu pevně stanovené parametry „pdf-dokumentu“. Fotografie (od každého studenta jedna) se mohou taktéž promítnout na konci vyučovací hodiny.

### 4.3.1 Náměty na optické jevy – interiér

Zde uvádíme optické jevy, se kterými se můžeme setkat v našich domech, bytech (na balkónech) a dalších příbytcích. Jevy lze rozčlenit do kategorií. Volíme následujících pět: Kovy I – odrazy; Kovy II – tenké vrstvy; Sklo a plast – rozklad světla; Bubliny různých tvarů a velikostí; Ostatní. Fotografie pochází z osobní sbírky autorky této práce [87].

#### 1. Kovy I – odrazy

O kovech jsme, co se týče odrazu (odrazivosti), hovořili v odstavci, který se věnoval prvnímu vzorovému příkladu zpracování projektu (kap. 4.3). V domácnosti se s příslušnými objekty setkáme v koupelně, kuchyni a také na toaletě. Stačí se rozhlédnout okolo sebe anebo navštívit souseda.



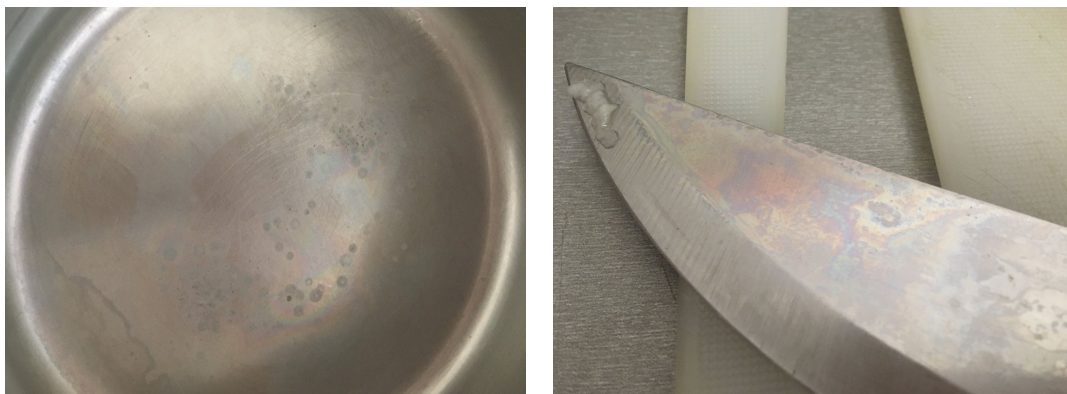
Obrázek 4.30: Baterie od sprchy a umyvadla

#### 2. Kovy II – tenké vrstvy

Podobně jako u příkladu lžice (viz vzorové zpracování projektu) se i u jiných předmětů můžeme setkat s interferencí (tenké vrstvy). Na fotografiích 4.31 vidíme příklady takového kuchyňského náčiní, které běžně míváme doma: nůž se širokou čepelí a hrnec z nerezové oceli. V aktivitě č. 3 jsme dále uvedli plotovou spojku, zadlabací zámek a pojezd malířského stojanu (fotografie s označením (c), (d) a (v)). Dalšími příklady mohou být: klika ode dvěří, pojezd jídelního stolu a hřebík v dřevěném prahu před vchodovými dvěřmi.

#### 3. Sklo a plast – rozklad světla

V aktivitě č. 3 jsme na fotografiích (f), (w) a (x) pozorovali rozklad světla díky tomu, že sluneční paprsky dopadaly na skleněnou anebo plastovou nádobu naplněnou vodou. Dle tvaru nádoby lze získat rozklad specifického tvaru. Uvádíme další příklady podobného rozkladu (viz obr. 4.32). Vyjma ucha sklenice u poslední fotografie níže uvedené čtveřice a sklenice na víno u dalšího příkladu (viz obr. 4.33), jsou všechny objekty naplněné vodou. Jak vidíme, dle množství příkladů není složité takového rozkladu světla docílit (a tedy, abychom mohli být přímými svědky rozkladu světla, není nutné čekat na společný příchod deště a slunečních paprsků anebo namísto deště mít k dispozici stříkající zahradní ha-



Obrázek 4.31: Dno hrnce a čepel nože

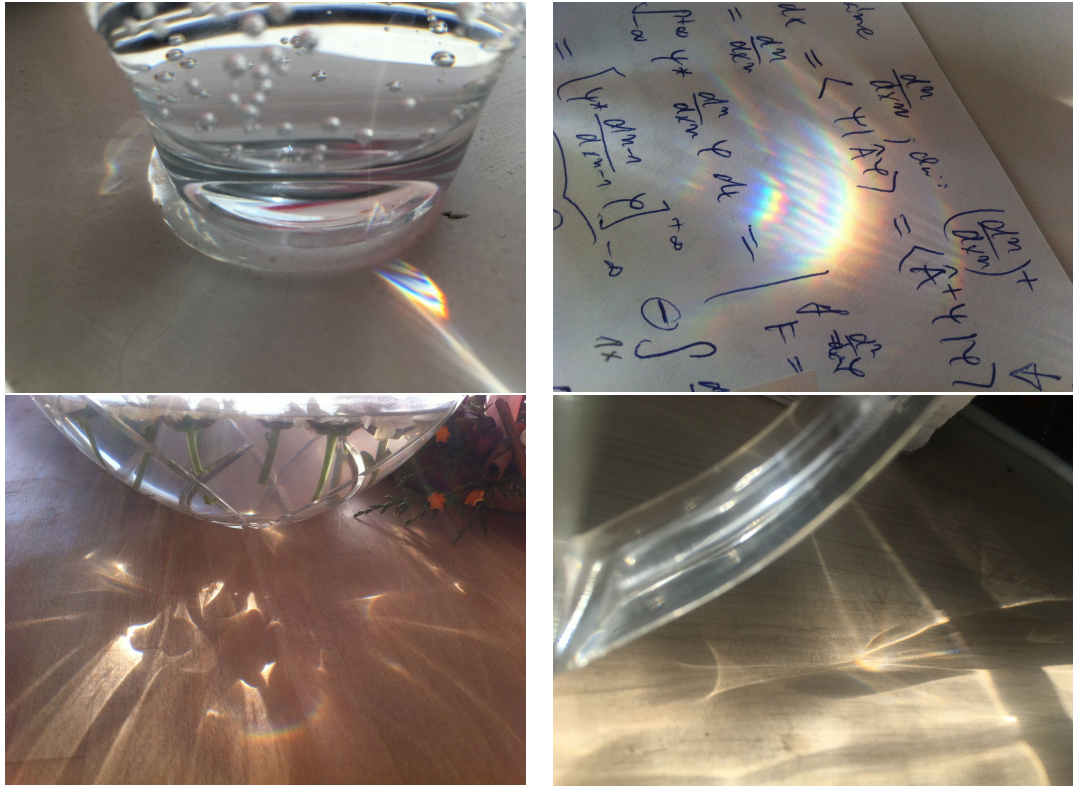
dici). Pro náš experiment je ideální ostré sluneční záření (viz obr. 4.34). Posloužit však může také večerní osvětlení místnosti – viz obr. 4.33, kde využíváme světla z LED žárovky stolní lampy a lustru.

V případě, že by si student pro svůj rozbor vybral sklenici naplněnou vínem, je třeba, aby také zvažil, jestli při popisu chodu paprsku zanedbá tloušťku sklenice, anebo zvaží lom paprsku také tímto optickým prostředím. Vodítkem může být pozorovaný odraz okolních objektů na prázdné sklenici (viz obr. 4.35). Můžeme také vidět, že podobně jako v případě kořalky na fotografii (a) aktivity č. 3, se i zde v bílém vínu odráží převrácený obraz okolních předmětů – konkrétně podstavné části lampy.

Co se týče doplňkové aktivity, kterou učitel v druhé části projektu navrhne pro každého studenta, pozorovaného spektra lze využít jakožto námětu na měření. Lze proměřit závislost vzdálenosti barevných stop lomeného záření na vlnové délce světla  $d = d(\lambda)$  a pro sklo daného typu a tvaru tuto závislost ověřit početně – analogicky k příkladu v aktivitě č. 4, s přihlédnutím k rozkladu světla (pro první prostředí, tj. vzduch lze závislost  $n = n(\lambda)$  zanedbat – viz [92]).

#### 4. Bubliny různých tvarů a velikostí

Nejen při ručním praní prádla (viz fotografie (g) v předchozí aktivitě), mytí nádobí či během sprchování se můžeme setkat s krásnými lesklými bublinami. Někdy si stačí uvařit kávu, práškovou horkou čokoládu či speciální čaj (matcha) a příklad interference na tenké vrstvě je doslova na stole. Následující fotografie jsou toho důkazem (viz obr. (4.36)). Máme-li k dispozici navíc drátěnou krychličku, můžeme provést jednoduchý experiment a kromě interference se poučit také o povrchovém napětí. O tomto experimentu, který snadno propojí více partií fyziky, se můžeme dočíst v knize Arthura Gooda: *Magical Experiments Or Science in Play* (1892) [93]. Krychličku si lze také vyrobit. Dalším (triviálním) příkladem interference jsou bubliny z (koupeného) dětského bublifiku.



Obrázek 4.32: Rozklad světla (z levého horního rohu): na sklenici, dvoulitrové plastové lahvi, dekorační skleněné misce a uchu skleněného hrnku (viz tenký proužek)



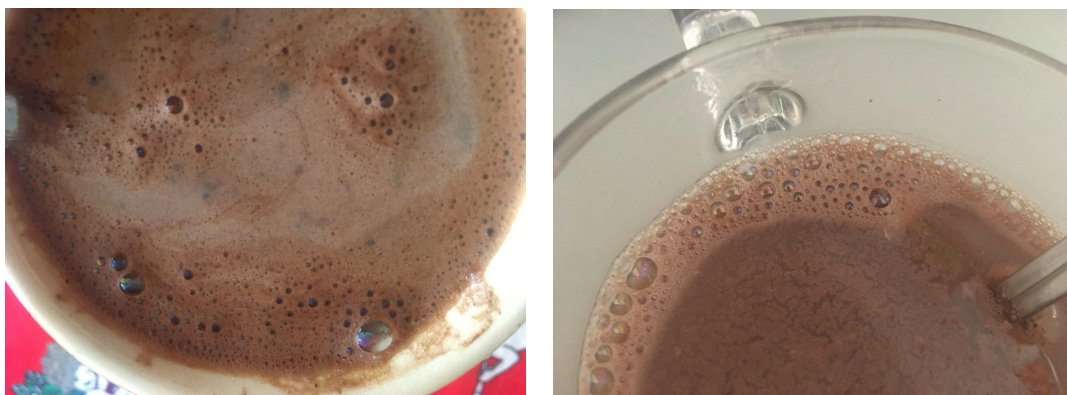
Obrázek 4.33: Rozklad světla na sklenici naplněné vínem (pro případ světla z lampy a lustru)



Obrázek 4.34: Rozklad světla na sklenici naplněné vínem (pro případ slunečního záření)



Obrázek 4.35: Odraz světla na hranicích skla



Obrázek 4.36: Bublinky (zleva): na hladině kávy a horké čokolády



Obrázek 4.37: Spodní mýdlová bublina modelovaná sklenicí od marmelády a bublinka přichycená k horní (průhledné) bublině

## 5. Ostatní

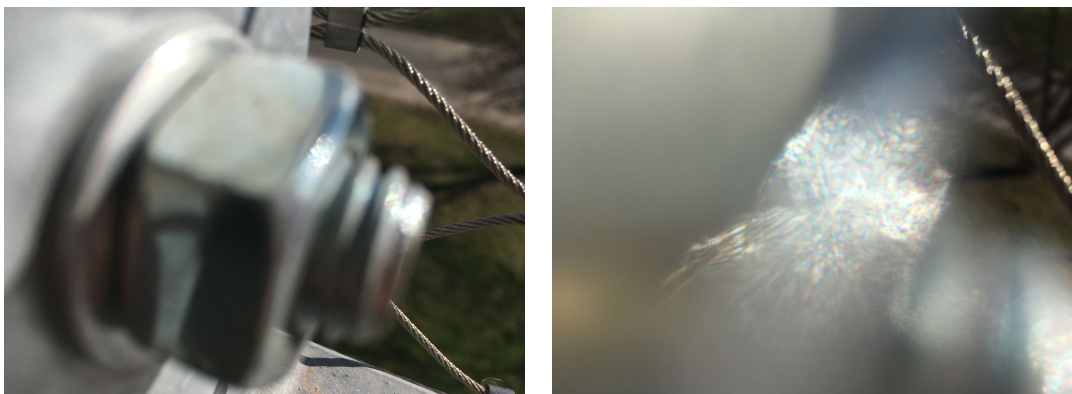
Na následující sérii snímků jsou zaznamenané třpytící se objekty, které byly vyfotografovány během slunečního odpoledne 3. 3. 2023. Nechali jsme se fascinovat třpytem šroubu, drátěným oplocením balkónu, místy okolo otvorů kovového kuchyňského sítka. Světlo jsme si „blíže prohlédli“ také skrze záclonu.



Obrázek 4.38: Odrážející se světlo na balkónovém oplocení

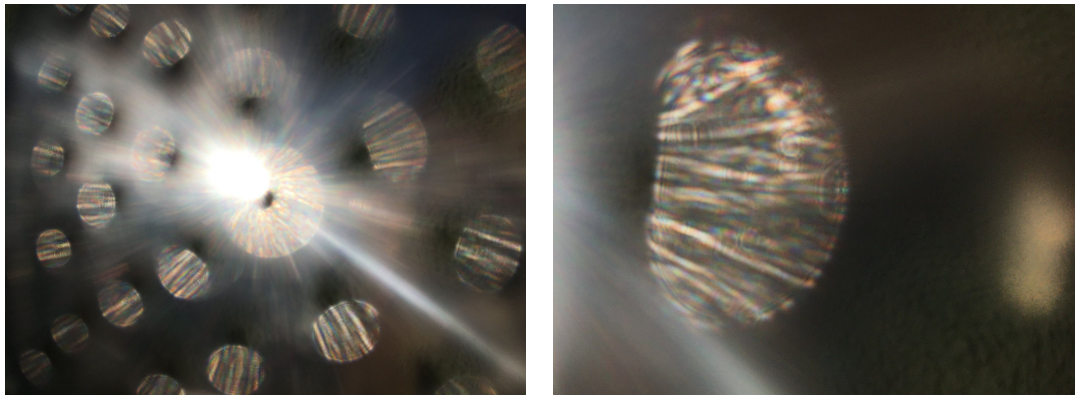


Obrázek 4.39: Sluneční „koróna“ (nalevo) a pohled na světlo skrze záclonu



Obrázek 4.40: Třpytící se šroub a detail třpytu





Obrázek 4.41: Pohled na světlo skrze kuchyňské sítko

# Závěr

Autorka této práce vytvořila teoretický text věnující se difrakci (ohybu světla), který může posloužit učitelům jakožto podklad k seminářům z fyziky anebo jako studijní text studentům, kteří o fyziku mají zájem. V tomto textu zmínila historii spjatou s jevem ohybu světla, který sehrál klíčovou roli při odůvodňování vlnové podstaty světla, a tím přiblížila pozadí vědy. Do textu dále zařadila několik obrázků, grafů a cvičení, které mají lépe objasnit danou problematiku. V další podkapitole této diplomové práce autorka uvedla pomůcky, které učitelé mohou snadno zařadit do výuky k tématu difrakce, například fólii, a zmínila ty experimenty, které jsou nákladnější a je možné si je prohlédnout v rámci exkurze na KDF MFF UK.

Vznikla sada pěti aktivit vhodných pro výuku středoškolské fyziky, primárně určených nadaným studentům. V první aktivitě týkající se difrakce autorka této práce využila alba doc. Komrsky a navrhla, jak jej využít ve výuce. V druhé aktivitě autorka skrze rozhovor poskytla nejen zájemcům o fyziku vzhled do života mladé vědkyně. Třetí aktivitou, obsahující originální sbírku fotografií, umožnila studentům rozšířit si představu o optických jevech, se kterými je možné se běžně setkat – vytvořila vizuální materiál k výuce optiky. Čtvrtou aktivitu, matematické cvičení, obtížností nad rámec běžné výuky, úmyslně zařadila před pátou aktivitu, projekt, který lze pojmout jako aplikaci dosud získaných poznatků, ale také jako aktivitu, při které je možné se věnovat vybraným optickým jevům či problémům podrobněji.

Z této diplomové práce jasně vyplývá, že kromě toho znát fyzikální zákony, je v rámci optiky nutné ovládat také část euklidovské geometrie. Přestože zpravidla je o optických jevech možné mluvit zároveň – nejen z hlediska kupříkladu sekvence „odraz-lom“ světla, ale rovněž zvážit obojí paprskový a vlnový popis světla – jisté jevy se v literatuře nazývají primárně rozkladem, jiné odrazem světla, interferencí apod. Tyto pojmy mají být pojmenováním pro obecné principy popisující, co se v dané situaci se světlem při interakci s daným objektem děje. Dokáže-li student správně tyto situace odlišit, shledá vzájemnou podobnost mezi vybranými. Skrze pochopení několika principů student může získat solidní „základ“, aby principy dokázal aplikovat, a zabýval se problémy složitějšími.

# Seznam použité literatury

- [1] O. LEPIL. *Fyzika pro gymnázia - Optika*. Třetí přepracované vydání. Praha: Prometheus, 2002. ISBN 80-7196-237-6.
- [2] O. LEPIL. *Fyzika*. Sbíрка úloh pro střední školy. Čtvrté vydání. Praha: Prometheus, 2016. ISBN 978-80-7196-463-6.
- [3] K. BARTUŠKA. *Sbíрка řešených úloh z fyziky pro střední školy IV*. První vydání. Praha: Prometheus, 2000. ISBN 80-7196-037-3.
- [4] J. PETÁKOVÁ. *Matematika - příprava k maturitě a k přijímacím zkouškám na vysoké školy*. Dotisk prvního vydání. Praha: Prometheus, 2008. ISBN 978-80-7196-099-7.
- [5] D. SITNÁ. *Metody aktivního vyučování*. První vydání. Praha: Portál, 2009. ISBN 978-80-7367-246-1.
- [6] J. KVASNICA. *Mechanika*. Druhé vydání. A. Havránek, P. Lukáč, B. Sprušil. Praha: Academia, 1988. ISBN 80-200-1268-0.
- [7] P. MALÝ. *Optika*. První vydání. Praha: Nakladatelství Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0.
- [8] R. P. FEYNMAN, R. B. LEIGHTON, M. SANDS. *Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady 1/3*. První vydání. I. Štoll. Praha: FRAGMENT, 2000. ISBN 80-7200-405-0.
- [9] S. DANIŠ. *Atomová fyzika a elektronová struktura látek*. První vydání. Praha: MatfyzPress, 2019. ISBN 978-80-7378-376-1.
- [10] V. ŽÁK, P. KOLÁŘ. *Reflexe názorů fyziků na podobu středoškolského kurikula fyziky provedená didaktiky fyziky z KDF MFF UK*. Praha: [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <http://kdf.mff.cuni.cz/zak/vyuka.php>
- [11] M. MATĚJKOVÁ. *Milne Method and Phase-Amplitude Method*. Praha, 2021. Bakalářská práce. Matematicko-fyzikální fakulta Univerzity Karlovy. Vedoucí práce P. Soldán.
- [12] P. ŠEDIVÝ. *Ohyb světla*. Studijní text pro řešitele FO a ostatní zájemce o fyziku. ÚVFO Hradec Králové. Dostupné na: <https://docplayer.cz/11886476-Ohyb-svetla-studijni-text-pro-resitele-fo-a-ostatni-zajemce-o-fyziku-premysl-sedivy-uvfo-hradec-kralove.html>
- [13] DATABASE KNIH s.r.o. *Fyzika pro gymnázia - Optika*. *Databazeknih.cz* [online]. ©2008-2023 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.databazeknih.cz/dalsi-vydani/fyzika-pro-gymnazia-fyzika-pro-gymnazia-optika-120189>
- [14] O. LEPIL. *Fyzika pro gymnázia - Optika*. Dotisk pátého vydání. Praha: Prometheus, 2018. ISBN 978-80-7196-444-5.

- [15] E. SVOBODA, K. BARTUŠKA, M. BEDNAŘÍK, and M. LEPIL, O. a ŠIROKÁ. *Přehled středoškolské fyziky*. Čtvrté opravené vydání. Praha: Prometheus, 2012. ISBN 978-80-7196-307-3.
- [16] Top 20 Country by International Physics Olympiad Gold Medal (1967-2019). In: *Youtube* [online]. 13. 12. 2019 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=qw\\_M7kV3GLY&ab\\_channel=WawamuStats](https://www.youtube.com/watch?v=qw_M7kV3GLY&ab_channel=WawamuStats). Kanál uživatele WawamuStats.
- [17] World Population - History & Projection (1820-2100). In: *Youtube* [online]. 16. 1. 2021 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=Ia5-h\\_TZsfM&ab\\_channel=GlobalStats](https://www.youtube.com/watch?v=Ia5-h_TZsfM&ab_channel=GlobalStats). Kanál uživatele GlobalStats.
- [18] P. ŠEDIVÝ, M. BROŽ. FamDifr. In: *Sirrah.troja.mff.cuni.cz* [online]. 1996. 29. 7. 2003 [cit. 2023-03-25]. Dostupné z: <https://sirrah.troja.mff.cuni.cz/mira/famdifr/famdifr.html>
- [19] V. VALVODA. *Krystalografie. Atomová struktura látek a její určování*. Praha: MatfyzPress, 2006.
- [20] J. KOMRSKA. *Difraktografické album*. Brno: Ústav přístrojové techniky, 1983.
- [21] D. HALLIDAY, R. RESNICK, J. WALKER. *Fundamentals of Physics, Extended*. Deváté vydání. Wiley, 2010. ISBN 978-0-47-046908-8.
- [22] D. HALLIDAY, R. RESNICK, J. WALKER. *Fyzika. Část 4. Elektromagnetické vlny - Optika - Relativita*. První vydání. Praha: VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-213-9.
- [23] D. HALLIDAY, R. RESNICK, J. WALKER. *Fyzika. Svazek 2. Druhé přepracované vydání*. Praha: VUTIUM, 2008. ISBN 978-80-214-4123-1.
- [24] D. HOMER, M. BOWEN-JONES. *Physics*. První vydání. Oxford: Oxford University Press, 2014. ISBN 978-0-19-839213-2.
- [25] M. BOM, E. WOLF. *Principles of Optics: 60th Anniversary Edition*. Sedmé vydání. Cambridge: Cambridge University Press, 2019. ISBN 978-1-10-847743-7.
- [26] NADACE WIKIMEDIA. Difrakce. *Cs.wikipedia.org* [online]. 22. 1. 2023 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://cs.wikipedia.org/wiki/Difrakce>
- [27] E. MECHLOVÁ, K. KOŠTÁL, A KOLEKTIV. *Výkladový slovník pro základní vysokoškolský kurz*. První vydání. Praha: Prometheus, 1999. ISBN 80-7196-151-5.
- [28] M. KRYNICKÝ. Vlnové vlastnosti světla. *Realisticky.cz* [online]. 7. 11. 2019 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <http://www.realisticky.cz/kapitola.php?id=54>
- [29] J. REICHL. Ohyb (difrakce) světla. *Encyklopedie fyziky* [online]. ©2006-2023 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/458-ohyb-difrakce-svetla>

- [30] W. FENDT. Ohyb (difrakce) světla na dvojštěrbíně. *Walter-fendt.de* [online]. 7. 10. 2003, 28. 1. 2018 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: [https://www.walter-fendt.de/html5/phcz/doubleslit\\_cz.htm](https://www.walter-fendt.de/html5/phcz/doubleslit_cz.htm)
- [31] NPI ČR. Difrakce na štěrbině a na mřížce. *Metodický portál RVP.cz* [online]. 7. 3. 2008 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://clanky.rvp.cz/clanek/c/G/2069/difrakce-na-sterbine-a-na-mrizce.html>
- [32] KDF MFF UK. Difrakce na mřížce. *Reseneulohy.cz* [online]. Praha: 5. 10. 2016 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://reseneulohy.cz/1503/difrakce-na-mrizce>
- [33] GTNV. Difrakce úvod. *Gtnv.cz* [online]. J. Brom. Týn nad Vltavou: 1. 2. 2013 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: [https://www.gtnv.cz/wp-content/uploads/2015/01/8\\_OPVK\\_DUM\\_oktava-fyzika\\_15\\_Difrakce\\_uvod.pdf](https://www.gtnv.cz/wp-content/uploads/2015/01/8_OPVK_DUM_oktava-fyzika_15_Difrakce_uvod.pdf)
- [34] GJS ZLÍN. Ohyb světla. *Gjszlin.cz* [online]. D. Stesková. Zlín: 3. 12. 2012 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: [http://www.gjszlin.cz/dumy/32/sada27/VY\\_32\\_INOVACE\\_27\\_FSTE15.pdf](http://www.gjszlin.cz/dumy/32/sada27/VY_32_INOVACE_27_FSTE15.pdf)
- [35] OLOMOUCKÝ KRAJ. Ohyb světla. *Eluc.ikap.cz* [online]. Kolektiv autorů. [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://eluc.ikap.cz/verejne/lekce/1699>
- [36] GYTOOL. Vlnová optika. *Smd.gytool.cz* [online]. Olomouc: [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: [https://smd.gytool.cz/downloads/6-1-VLNOVA\\_OPTIKA\\_BAR\\_komprese.pdf](https://smd.gytool.cz/downloads/6-1-VLNOVA_OPTIKA_BAR_komprese.pdf)
- [37] GML. Ohyb světelných vln. *E-manuel.cz* [online]. Praha: ©2023 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://e-manuel.cz/kapitoly/vlnova-optika/vyklad/ohyb-svetelnych-vln/>
- [38] GYMKT. Studium difrakčních jevů. *Remote-lab.fyzika.net* [online]. Klatovy: ©2023 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <http://remote-lab.fyzika.net/experiment/09/experiment-9-teorie.php?lng=cs>
- [39] TECHMANIA SCIENCE CENTER o.p.s. Ohyb světla. *Edu.techmania.cz* [online]. M. Králová. Plzeň: [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/svetlo/ohyb-svetla>
- [40] FU MFF UK. Difrakce (ohyb) světla. *Fu.mff.cuni.cz* [online]. Praha: [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <http://fu.mff.cuni.cz/biomolecules/media/files/courses/Difrakce.pdf>
- [41] FU MFF UK. Difrakce (skalární popis). *Fu.mff.cuni.cz* [online]. Praha: [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <http://fu.mff.cuni.cz/semicond/media/files/courses/text-difrakce-uplhy-07-11-19.pdf>

- [42] FU MFF UK. Interference, difrakce. *Fu.mff.cuni.cz* [online]. Praha: 5. 12. 2019 [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <http://fu.mff.cuni.cz/semicond/media/files/courses/prezentace-interference-difrakce-cast-1.pdf>
- [43] VŠCHT. Chemie a fyzika pevných látek - p2. *Uchpel.vscht.cz* [online]. M. Hušák. Praha: [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://uchpel.vscht.cz/files/uzel/0022888/c6usysxOjEMT85Izc1MjS9ILcurTM6Iz0ksSc2OLzAwMAIA.pdf?redirected>
- [44] VŠCHT. Difrakce elektronů. *Uchpel.vscht.cz* [online]. P. Matějka. Praha: [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: <https://old.vscht.cz/anl/matejka/06-difrakce&n-10.pdf>
- [45] FT UTB. Difrakce na mřížce. *Ufmi.ft.utb.cz* [online]. Zlín: [cit. 2023-03-23]. Dostupné z: [https://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika\\_2/F2\\_lab\\_07.pdf](https://ufmi.ft.utb.cz/texty/fyzika_2/F2_lab_07.pdf)
- [46] FZU AV ČR. Difrakce záření. *Fzu.cz* [online]. K. Knížek. Praha: [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/knizek/prednaska/Diffraction.pdf>
- [47] VETUNI. Stanovení velikostí objektu s využitím laserové difrakce. *Vfu.cz* [online]. Brno: [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: [https://www.vfu.cz/files/3130\\_75\\_laserova-difrakce.pdf](https://www.vfu.cz/files/3130_75_laserova-difrakce.pdf)
- [48] KMT TUL. Rtg difrakce v materiálovém výzkumu. *Kmt.tul.cz* [online]. P. Čapková. 2011 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: [http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady\\_kmt\\_magistri/MSS/Vyukove\\_texty\\_XRD.pdf](http://www.kmt.tul.cz/edu/podklady_kmt_magistri/MSS/Vyukove_texty_XRD.pdf)
- [49] UJEP. Neutronová difrakce a rozptyl neutronů. *Physics.ujep.cz* [online]. M. Kormund. Ústí nad Labem: [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <http://physics.ujep.cz/mkormund/P224/ChMat-prednaska12.pdf>
- [50] MUNI. Badatelna – 7. díl: Jak funguje ohyb světla. *Em.muni.cz* [online]. Brno: 6. 4. 2014 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.em.muni.cz/vite/4301-badatelna-7-dil-jak-funguje-ohyb-svetla>
- [51] M. RYBÁK. Vliv difrakce a doby expozice na ostrost fotografií. *Mrybak.tripod.com* [online]. 1. 11. 1998 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://mrybak.tripod.com/difrakce.htm>
- [52] NIKON HOLDINGS EUROPE B.V. Oživujeme: Otestujte si svůj objektiv – difrakce aneb ohybová vada. *Nikonblog.cz* [online]. P. Lindner. 20. 5. 2022 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://nikonblog.cz/otestujte-si-svuj-objektiv-difrakce-aneb-ohybova-vada/>
- [53] A.T. SHOP s.r.o. Difrakce. *PhotoTools.cz* [online]. ©2023 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: [https://www.phototools.cz/slovník/difrakce/?gclid=CjwKCAiAjPyfBhBM EiwAB2CCIqIeTu-fR4x95ASPc8OXzZdbblVdJqeU\\_ttXwHyWSsiRQ4qLD Rfn7RoCMFYQAvD\\_BwE](https://www.phototools.cz/slovník/difrakce/?gclid=CjwKCAiAjPyfBhBM EiwAB2CCIqIeTu-fR4x95ASPc8OXzZdbblVdJqeU_ttXwHyWSsiRQ4qLD Rfn7RoCMFYQAvD_BwE)

- [54] TIPYJAKFOTIT.CZ. Difrakce. *Tipyjakfotit.cz* [online]. ©2012-2017 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://tipyjakfotit.cz/foto-slovník/difrakce/>
- [55] ZONER SOFTWARE. Co je difrakce a jak se jí vyhnout. *Milujemefotografii.cz* [online]. [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.milujemefotografii.cz/co-je-difrakce>
- [56] FOTOŠKODA. Fotoškola - difrakce. *Fotoskoda.cz* [online]. 11. 3. 2022 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.fotoskoda.cz/3759-fotoskola-difrakce/>
- [57] FZU AV ČR. Skupina monokrystalové difrakce. *Fzu.cz* [online]. Praha: ©1998-2023 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.fzu.cz/vyzkum/vyzkumne-sekce-a-oddeleni/sekce-3/oddeleni-19/skupina-1905>
- [58] ÚJF AV ČR. MEREDIT - Neutronový práškový difraktometr. *Ujf.cas.cz* [online]. Husinec-Řež: [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <http://www.ujf.cas.cz/cs/oddeleni/oddeleni-neutronove-fyziky/instruments/lvr15/meredit/>
- [59] CVŘ s.r.o. Materiálové analýzy. *Cvrez.cz* [online]. Husinec-Řež: ©2023 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.cvrez.cz/cs/vyzkum-a-sluzby/materialy-a-diagnostika/rizene-starnuti-12104>
- [60] CEITEC. Centrální laboratoř RTG difrakce a Bio-SAXS. *Ceitec.cz* [online]. Brno: ©2020 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.ceitec.cz/centralni-laborator-rtg-difrakce-a-bio-saxs/cf392>
- [61] KFKL MFF UK. Oddělení strukturní analýzy. *Kfkl.mff.cuni.cz* [online]. Praha: ©2022 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://kfkl.mff.cuni.cz/cs/xray>
- [62] ČGS. Věda a výzkum. *Geology.cz* [online]. ©2022 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/extranet/vav>
- [63] MAXDORF s.r.o. Difrakce světla. *Lekarske.slovníky.cz* [online]. ©1998-2023 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://lekarske.slovníky.cz/pojem/difrakce-svetla>
- [64] AGA. Difrakce. *Aldebaran.cz* [online]. Praha: [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.aldebaran.cz/glossary/print.php?id=541>
- [65] KHAN ACADEMY, Inc. Diffraction and constructive and destructive interference. *Khanacademy.org* [online]. ©2023 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: <https://www.khanacademy.org/test-prep/mcat/physical-processes/light-and-electromagnetic-radiation-questions/a/diffraction-and-constructive-and-destructive-interference>
- [66] Maxima in Single slit diffraction | Wave optics | Physics | Khan Academy. In: *Youtube* [online]. 13. 11. 2022 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: [https://www.youtube.com/watch?v=u6aGVO2smyw&t=148s&ab\\_channel=KhanAcademyIndia-English](https://www.youtube.com/watch?v=u6aGVO2smyw&t=148s&ab_channel=KhanAcademyIndia-English). Kanál uživatele Khan Academy India - English.

- [67] CALTECH. Diffraction. *Feynmanlectures.caltech.edu* [online]. ©1963, 2013 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: [https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I\\_30.html](https://www.feynmanlectures.caltech.edu/I_30.html)
- [68] WIKIMEDIA FOUNDATION, Inc. The Feynman Lectures on Physics. *En.wikipedia.org* [online]. M. A. Gottlieb, R. Pfeiffer. 26. 2. 2023 [cit. 2023-03-24]. Dostupné z: [https://en.wikipedia.org/wiki/The\\_Feynman\\_Lectures](https://en.wikipedia.org/wiki/The_Feynman_Lectures)
- [69] FU MFF UK. Optické experimenty historického významu pro fyziku. *Fu.mff.cuni.cz* [online]. J. Franc. 16. 12. 2021 [cit. 2023-12-09]. Dostupné z: [http://fu.mff.cuni.cz/semicond/media/files/courses/11\\_dejinyoptiky.pdf](http://fu.mff.cuni.cz/semicond/media/files/courses/11_dejinyoptiky.pdf)
- [70] R. CECCHINI, W. C. CROSWELL, G. PELOSI. Diffraction: The First Recorded Observation. *IEEE Antennas and Propagation Society Magazine*. 1990 [cit. 2023-12-03]. DOI: 10.1109/74.80496. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/80496>
- [71] JÁCHIM, František. Thomas Young (1773-1829) – muž, který prý věděl všechno. *Rozhledy matematicko-fyzikální* [online]. 2022, roč. 97., č. 4. ISSN 0035-9343. Dostupné z: <https://rozhledy.jcmf.cz/wp-content/uploads/RMF-97-4.pdf> [cit. 2023-12-09]
- [72] R. CECCHINI, W. C. CROSWELL, G. PELOSI. Crystal chemistry of the G-phases in the systems Ti-Fe, Co, Ni-Al with a novel filled variant of the Th 6Mn 23-type. *Intermetallics*. 11(4):351-359. 2003 [cit. 2024-04-01]. DOI: 10.1016/S0966-9795(02)00267-4. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Electron-diffraction-patterns-of-G-phases-in-the-ternary-systems-Ti-Fe-Al-a-b-Ti-Co-Al\\_fig1\\_240414675](https://www.researchgate.net/figure/Electron-diffraction-patterns-of-G-phases-in-the-ternary-systems-Ti-Fe-Al-a-b-Ti-Co-Al_fig1_240414675)
- [73] EDMUND OPTICS. 25,400 Lines/Inch, 6"x 12" Sheets, 2/Pack, Holographic Diffraction Grating Film. *Edmundoptics.co.uk* [online]. York: ©2023 [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://www.edmundoptics.co.uk/p/25400-linesinch-6quot-x-12quot-sheets-2pack/4621/#>
- [74] CONATEX-DIDACTIC učební pomůcky, s.r.o. Mřížky. *Conatex.cz* [online]. [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: [https://www.conatex.cz/catalog/fyzika/optika/cocky\\_hranoly\\_zrcadla\\_mrizky\\_filtry/product-mrizky/sku-M2676](https://www.conatex.cz/catalog/fyzika/optika/cocky_hranoly_zrcadla_mrizky_filtry/product-mrizky/sku-M2676)
- [75] GADGETESHOP.CZ. Ohňostrokové brýle. *GadgetEshop.cz* [online]. Praha: © 2020-2021 [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://gadgeteshop.cz/vedecke-hracky/1271-ohnostrojove-bryle.html>
- [76] CONATEX-DIDACTIC učební pomůcky, s.r.o. Příruční spektroskop. *Conatex.cz* [online]. [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: [https://www.conatex.cz/catalog/fyzika/optika/spektroskopie/rucni\\_spektroskop/product-prirucni\\_spektroskop/sku-2004460](https://www.conatex.cz/catalog/fyzika/optika/spektroskopie/rucni_spektroskop/product-prirucni_spektroskop/sku-2004460)
- [77] CONATEX-DIDACTIC učební pomůcky, s.r.o. Příruční spektroskop. *Conatex.cz* [online]. [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: [https://www.conatex.cz/catalog/fyzika/optika/spektroskopie/rucni\\_spektroskop/product-prirucni\\_spektroskop/sku-1077048](https://www.conatex.cz/catalog/fyzika/optika/spektroskopie/rucni_spektroskop/product-prirucni_spektroskop/sku-1077048)



- [78] CONATEX-DIDACTIC učební pomůcky, s.r.o. Příruční spektroskop, jednoduchý. *Conatex.cz* [online]. [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: [https://www.conatex.cz/catalog/fyzika/optika/spektroskopie/rucni\\_spektroskopovy/product-prirucni\\_spektroskop\\_jednoduchy/sku-2004411?gclid=Cj0KCQiA3uGqBhDdARIsAFeJ5r1E38-sxsdaa68qCtAKzkIYsq-\\_taCrX0z6pnc1fleN6qjtqQvto8aAqzJEALw\\_wcB](https://www.conatex.cz/catalog/fyzika/optika/spektroskopie/rucni_spektroskopovy/product-prirucni_spektroskop_jednoduchy/sku-2004411?gclid=Cj0KCQiA3uGqBhDdARIsAFeJ5r1E38-sxsdaa68qCtAKzkIYsq-_taCrX0z6pnc1fleN6qjtqQvto8aAqzJEALw_wcB)
- [79] HELAGO-CZ. 3032 - Vlnící nádoba. *Helago-cz* [online]. [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://www.helago-cz.cz/eshop-3032-vlnici-nadoba-147918.html>
- [80] PHYWE Systeme GmbH & Co. Diffraction of microwaves. *Laboratory experiments in physics*. PHYWE series of publications. P2450500. [cit. 2023-11-25].
- [81] EDUFOR s.r.o. Vernier Emissions Spectrometer. *Vernier.cz* [online]. ©2023 [cit. 2023-11-25]. Dostupné z: <https://www.vernier.cz/video/podle-produktu/kod/VSP-EM>
- [82] PHYWE Systeme GmbH & Co. Ultrasonic diffraction by a straight edge. *Laboratory experiments in physics*. PHYWE series of publications. P2152300. [cit. 2023-11-25].
- [83] J. KOMRSKA. Symetrie Fraunhoferových ohybových jevů. *Čs. čas. fyz.*, A24, 568-574, 1974.
- [84] M. A. PFEIFER, G. J. WILLIAMS, I. A. VARTANYANTS, R. HARDER, I. K. ROBINSON. Three-dimensional mapping of a deformation field inside a nanocrystal. *Nature* [online]. 2006, 442(7098): 63-6 [cit. 2023-05-29]. DOI: 10.1038/nature04867. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/6962490\\_Pfeifer\\_M\\_A\\_Williams\\_G\\_J\\_Vartanyants\\_I\\_A\\_Harder\\_R\\_Robinson\\_I\\_K\\_Three-dimensional\\_mapping\\_of\\_a\\_deformation\\_field\\_inside\\_a\\_nanocrystal\\_Nature\\_442\\_63-66](https://www.researchgate.net/publication/6962490_Pfeifer_M_A_Williams_G_J_Vartanyants_I_A_Harder_R_Robinson_I_K_Three-dimensional_mapping_of_a_deformation_field_inside_a_nanocrystal_Nature_442_63-66)
- [85] D. J. MCCLEMENTS, H. XIAO. Is nano safe in foods? Establishing the factors impacting the gastrointestinal fate and toxicity of organic and inorganic food-grade nanoparticles. *npj Science of Food* [online]. 2017, 1:6 [cit. 2023-05-29]. DOI: 10.1038/s41538-017-0005-1. Dostupné z: <https://www.nature.com/articles/s41538-017-0005-1>
- [86] J. BEDNÁŘ. *Pozoruhodné jevy v atmosféře*. První vydání. Praha: Academia, 1989. ISBN 80-200-0054-2.
- [87] M. MATĚJKOVÁ. Osobní sbírka fotografií. 2016-2023.
- [88] M. MINNEART. *The Nature of Light and Colour in the Open Air*. Dover Publications, Inc., 1954. ISBN 486-20196-1.
- [89] J. REICHL. Třpyt sněhu. *MEF - Encyklopedie fyziky*, 2006 - 2023. Dostupné z: [http://fyzika.jreichl.com/main.article/gallery/440-uplny-odraz-svetla/folder/trpyt\\_snehu](http://fyzika.jreichl.com/main.article/gallery/440-uplny-odraz-svetla/folder/trpyt_snehu), cit. [2023-3-17].

- [90] B. ALLSOPP. Effects of d0 and s2 cations on optical properties of silicate glasses. *ResearchGate* [online]. 2018 [cit. 2024-06-22]. DOI: 10.13140/RG.2.2.26806.45122. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/337364631\\_Effects\\_of\\_d0\\_and\\_s2\\_cations\\_on\\_optical\\_properties\\_of\\_silicate\\_glasses](https://www.researchgate.net/publication/337364631_Effects_of_d0_and_s2_cations_on_optical_properties_of_silicate_glasses)
- [91] Scientific Laboratory Supplies Ltd. Prism Dense Glass Flint Refractive Index 1.62. *Science2education.co.uk* [online]. [cit. 2024-06-22]. Dostupné z: <https://www.science2education.co.uk/product/PH0583B>
- [92] KMT ZCU. Index lomu, základní zákony odrazu a lomu světelných paprsků. *Kof.zcu.cz* [online]. [cit. 2023-06-16]. Dostupné z: <https://kof.zcu.cz/st/dp/hosnedl/html/index.html>
- [93] A. GOOD. *Magical Experiments Or Science in Play*. C. Curwen, R. Waters. New York: Worthington Co., 1892.