

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA PEDAGOGICKÁ
KATEDRA MATEMATIKY, FYZIKY A TECHNICKÉ VÝCHOVY

INTERAKTIVNÍ TESTY Z GEOMETRICKÉ OPTIKY
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Dominik Šilhánek
Fyzika se zaměřením na vzdělávání

Vedoucí práce: RNDr. Jitka Hošková Prokšová, Ph.D.

Plzeň 2023

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně
s použitím uvedené literatury a zdrojů informací.

V Plzni, 28. dubna 2023

.....
vlastnoruční podpis

PODĚKOVÁNÍ

Velice rád bych poděkoval své vedoucí mé bakalářské práce RNDr. Jitce Hoškové Prokšové, PhD. za podnětné rady a veškerou odbornou pomoc, kterou mi poskytovala, a za všechny drahocenný čas, který mi ochotně věnovala. Rád bych také poděkoval své přítelkyni za vypůjčení iPadu. Děkuji své rodině a všem přátelům, kteří mě při vytváření této práce podporovali a bez jejichž pomoci by nebylo možné ji dokončit.

OBSAH

Úvod	3
1 REALIZACE	4
1.1 KAPITOLY	4
1.2 VÝUKOVÉ MATERIÁLY	4
1.3 PRÁCE V ONLINE PROSTŘEDÍ	5
2 TEORIE	6
2.1 GEOMETRICKÁ OPTIKA A ŠÍŘENÍ SVĚTLA	6
2.1.1 Monofrekvenční světlo	6
2.1.2 Světelné zdroje	6
2.1.3 Optická prostředí	7
2.1.4 Zákon přímočarého šíření světla	7
2.1.5 Fermatův princip	7
2.2 ODRAZ SVĚTLA NA ROVINNÉM ZRCADLE	8
2.2.1 Rovina, kolmice, úhel dopadu a úhel odrazu	8
2.2.2 Zákon odrazu	8
2.3 LOM SVĚTLA	9
2.3.1 Index lomu, úhel dopadu a lomu	9
2.3.2 Snellův zákon	9
2.4 OPTICKÝ HRANOL	10
2.4.1 Optický hranol, jev disperze	10
2.4.2 Lámací plochy a lámavý úhel, deviace	10
2.4.3 Optický klín, planparalelní destička	10
2.5 KULOVÁ ZRCADLA (V PARAXIÁLNÍM PROSTORU)	10
2.5.1 Rovinné a kulové zrcadlo	11
2.5.2 Zobrazování kulovým zrcadlem	11
2.6 ČOČKY (V PARAXIÁLNÍM PROSTORU)	11
2.6.1 Optické čočky, spojky a rozptylky	11
2.6.2 Zobrazování optickou čočkou	11
2.6.3 Optická mohutnost čočky	12
2.7 SEZNAM DEFINIC A ZÁKONŮ VYUŽITÝCH PŘI TVORBĚ VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ:	13
3 ŘEŠENÉ PŘÍKLADY	18
3.1 ŠÍŘENÍ SVĚTLA	18
3.2 ODRAZ SVĚTLA	22
3.3 LOM SVĚTLA	26
3.4 PLANPARALELNÍ DESTIČKA	38
3.5 PRŮCHOD SVĚTLA OPTICKÝM HRANOLEM	45
3.6 ZRCADLA	59
3.7 ČOČKY	64
4 OVĚŘENÍ V PRAXI	72
4.1 VÝUKA A PŘÍPRAVA NA TEST	72
4.2 SESTAVOVÁNÍ A PRŮBĚH TESTU	72
4.2.1 Zadání	73
4.3 VÝSLEDKY TESTU	79
4.3.1 Výsledky SPA	79
4.3.2 Grafy výsledků SPA	79
4.3.3 Výsledky SPB	82

4.3.4 Grafy výsledků SPB	82
4.3.5 Výsledky výzkumu a srovnání	85
ZÁVĚR.....	I
RESUMÉ.....	III
SEZNAM LITERATURY	V
ELEKTRONICKÉ ZDROJE.....	VI
SEZNAM OBRÁZKŮ	VII

Úvod

Geometrická optika je oborem fyziky, který studuje chování světla při jeho interakci s různými optickými prvky a prostředími, kterými se šíří. Studium geometrické optiky je zásadní pro pochopení chování a vlastností světla v mnoha oblastech vědy a techniky, včetně optiky, astronomie a mikroskopie.

Cílem této bakalářské práce je poskytnout ucelený přehled základních principů geometrické optiky v aplikaci na názorných příkladech s využitím ve školském prostředí. Práce se bude zabývat základními principy odrazu a lomu, včetně Snellova zákona a Fermatova principu a jejich aplikací v kulových zrcadlech a tenkých čočkách.

Dalším cílem této bakalářské práce je vytvořit přehledný a stručný výukový materiál dostupný online, který bude sloužit jako stručné shrnutí učiva pro žáky a vyučující se zaměřením na úroveň středních odborných škol a víceletých gymnázií.

Posledním cílem je výzkumné ověření výukových materiálů v praxi, kdy dojde ke srovnání výuky podle běžných postupů vyučujících na Masarykové gymnáziu za použití příprav z minulých let s výukou za pomoci výukových materiálů připravených jako součást této práce. Následně dojde k ověření, které bude provedeno prezenčně pomocí online testu jako komplexní opakování všech kapitol geometrické optiky zahrnutých v této práci. Výsledky a srovnání dat z obou skupin budou obsaženy v poslední části této práce.

1 REALIZACE

V této části bakalářské práce si rozebereme konkrétní výběr a řazení tematických celků užitých pro výukové materiály a jejich následné dělení do kapitol. Součástí bude i volba nástrojů a práce v internetovém a v počítačovém prostředí.

1.1 KAPITOLY

Pro realizaci kapitol a výběr jednotlivých okruhů bylo nahlédnuto do rámcového vzdělávacího programu společně se školním vzdělávacím programem Masarykova gymnázia v Plzni. Po srovnání a konzultaci s vyučujícími fyziky na gymnáziu jsem se původně rozhodl pro rozdělení a vytvoření šesti kapitol, kterými byly: šíření světla, odraz a lom světla, průchod světla hranolem, zrcadla a čočky. Optické přístroje byly po konzultaci s vedoucí práce následně odstraněny z časového a obsahově náročného hlediska během realizace práce. Jednotlivé okruhy geometrické optiky obsažené v této práci jsou rozřazené do kapitol, podle již zmíněného školního vzdělávacího plánu na Masarykově gymnáziu v Plzni. Při řazení kapitol je přihlédnuto ke vzájemné návaznosti tematických i dílčích celků vzhledem k obsahu učiva a fyzikálních i mezipředmětových konceptů a prekonceptů. Po rozdělení odrazu a lomu světla, a následujícímu přidání planparalelní destičky jako nadstavbového rozšíření oproti tematickému plánu zahrnutém ve školním vzdělávacím programu se počet kapitol navýšil na sedm. Výběr teorie a příkladů se zaměřuje převážně na středoškolskou úroveň optiky, která je nedílnou součástí fyziky na středních odborných školách a víceletých gymnáziích.

1.2 VÝUKOVÉ MATERIÁLY

Teorie a příklady, které se zabývají problematikou geometrické optiky jsou součástí výukových materiálů, které jsou dostupné online na internetových stránkách s odkazem zde: <https://www.joemat.net>. Výukové materiály jsou rozděleny na dvě části, a to teoretickou (dostupnou online zde: <https://www.joemat.net/studijni-materialy>) a praktickou (dostupnou online zde: <https://www.joemat.net/seznam-prikladu>). Žák má tedy možnost si vybrat v hlavní nabídce na domovské stránce a přejít rovnou ke konkrétním kapitolám, jak pro teorii, tak příklady. Každá teoretická kapitola má i vlastní praktickou část s příklady, včetně dostupného řešení, které je k nahlédnutí pod jejich zadáním na konkrétní internetové stránce. Tvorba výukových materiálů je zaměřena na praktičnost a využitelnost

při vyučování, nejedná se tedy o souvislé vzdělávací texty principiálně srovnatelné s učebnicemi, nýbrž shrnutí vždy těch nejdůležitějších definic, zákonů a principů, se kterými se student v dané problematice ve škole v hodinách fyziky setká. Výukový materiál je zaměřen na pomoc žákovi nejen při orientaci v probírané látce z geometrické optiky, ale také slouží jako podpůrný studijní materiál pro žáka i vyučujícího, podobný výpiskům (shrnutím) z prostředí školy. Nezbytnou součástí výukových materiálů je praktická část s příklady k procvičování, které jsou rozdělené jako kapitoly s teorií a jejich dostupné řešení je obsaženo v této práci. Dalším důležitým doplňkem příkladů jsou vlastní obrázky, které společně s komentáři napomáhají k lepší orientaci v postupech a porozumění jednotlivým krokům řešení. Součástí komentářů jsou i úpravy rovnic a jejich doprovodný text pro co největší jednoduchost po matematické stránce.

1.3 PRÁCE V ONLINE PROSTŘEDÍ

Jako internetovou doménu jsem pro bakalářskou práci zvolil joemat.net, zkratka JOEMAT zastupuje vybrané fyzikální obory: Jaderná fyzika, Optika, Elektřina a magnetismus, Mechanika, Atomová fyzika a Termika. Internetové stránky jsou realizované pod hostingem společnosti wix.com, která nabízí placené rozhraní pro editaci obsahu na jimi spravovaných internetových stránkách. Součástí placeného balíčku, který jsem zvolil při realizaci a tvoření stránek byla i fotobanka a editor pro nové vkládání a editaci zvoleného obsahu bez znalosti kódování v HTML. Všechny kapitoly mají své stránky, které jsou řazené do seznamu pro lepší orientaci a práci během tvoření. Každá dílčí stránka má vlastní nadpis, který se automaticky propisuje z názvu stránky a její vlastní URL odkazové adresy. Dále obsahuje textová pole, ve kterých jsou obsaženy teoretické poznatky u dané kapitoly, nebo zadání příkladů v praktické části. Součástí každé teoretické stránky jsou i doprovodné obrázky (formátu .jpeg a .jpg) a pohyblivé obrázky (formátu .gif). Všechny obrázky použité v této práci, včetně pohyblivých jsou tvořeny pomocí placeného grafického prostředí Notability a jsou zde vlastní tvorbou za použití tabletu. Prostředí je zvoleno z hlediska efektivity práce a grafických možností, včetně jednoduché zpětné editace konkrétních obsahů pro tvorbu přesných konstrukcí a popisků k vytvořeným příkladům pro praktickou část výukových materiálů. Pohyblivé obrázky jsou složeny jako animace v prostředí Gimp verze 2.10.32.

2 TEORIE

2.1 GEOMETRICKÁ OPTIKA A ŠÍŘENÍ SVĚTLA

„Ve třetím století před naším letopočtem žil v Alexandrii v Egyptě řecký matematik Euklides. K jeho nejdůležitějším dílům patří „Základy“, věnované geometrii. Zajímavé jsou také jeho úvahy o světelných jevech. Euklides se domníval, že světlo se šíří z očí, protože při jejich zavření je tma. Dnes víme, že se mýlil. Kdyby paprsky světla vycházely z našich očí, dokázali bychom si jimi „posvítit“ i v noci.“¹

Geometrická optika je nauka o optickém zobrazování a je teoretickým základem všech optických přístrojů, které pracují s idealizovaným pojmem světelného paprsku. Světelný paprsek si můžeme představit jako nekonečně úzký svazek světla, který by vycházel z velice malého otvoru. Příčný rozměr tohoto svazku by konvergoval (blížil se) k nule.

2.1.1 MONOFREKVENČNÍ SVĚTLO

V řešených příkladech pro nás bude důležitý pojem monofrekvenční světlo, jedná se o světelný paprsek jedné spektrální barvy s určitou konstantní frekvencí, nesmí tedy chybět ani ve výukových materiálech, proto jej zavedeme jako samostatnou definici, kterou využijeme.

2.1.2 SVĚTELNÉ ZDROJE

Světelné zdroje můžeme rozdělit na primární a sekundární, bodové a prostorové. Primární a sekundární zdroje se rozlišují z hlediska původu paprsku, zda byl paprsek tělesem vytvořen, nebo pouze odražen, rozptýlen. Mezi primární zdroje světla bychom mohli řadit Slunce, hvězdy, žárovky, oheň, blesk, polární záře a luminiscenci. Měsíc bychom řadili mezi sekundární zdroje.

Světelné zdroje bodové a plošné rozlišujeme dle jejich rozměrů. Říkáme, že zdroje s rozměry zanedbatelnými vzhledem ke vzdálenosti, ze kterého je pozorujeme, jsou světelné bodové zdroje (hvězdy, vzdálené světlo pouličních lamp), opačně zdroje s rozměry nezanedbatelnými vzhledem ke vzdálenosti, ze které je pozorujeme, nazýváme světelné plošné zdroje (zářivka, Slunce, Měsíc).

¹ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, s. 98. 2005. ISBN 80-7238-431-7.

2.1.3 OPTICKÁ PROSTŘEDÍ

Optická prostředí jsou látky různých vlastností, ve kterým dochází k šíření světla. Rozlišujeme prostředí opticky průhledné, kde se světlo šíří přímo ze zdroje bez rozptylu světelných paprsků (např. vzduch, voda, čisté sklo). Prostředí opticky průsvitné, kde dochází k částečnému rozptylu světelných paprsků (např. mlha, kouř, matné sklo) a prostředí opticky neprůhledné, kde světlo prostředím neprochází (kovy, dřevo, keramika, rtuť). Dále můžeme rozlišovat optická prostředí homogenní a nehomogenní, zde nám záleží na optických vlastnostech celého objemu daného prostředí. V případě, že se jedná o optické prostředí, které má v celém svém objemu stejné vlastnosti, kdy šíření světla nezávisí na poloze zdroje, jedná se o optické prostředí homogenní (bezbarvé sklo, voda). V opačném případě se jedná o nehomogenní optické prostředí. Z hlediska rychlosti šíření světla rozlišujeme optická prostředí izotropní a anizotropní. Izotropní je prostředí, kdy nezáleží na směru šíření světelného paprsku, protože jeho rychlost bude ve všech směrech totožná (např. sklo, voda). U anizotropního prostředí se rychlost mění se směrem šíření v optickém prostředí (např. křemen, vápenec).

2.1.4 ZÁKON PŘÍMOČARÉHO ŠÍŘENÍ SVĚTLA

Mezi významné zákony geometrické optiky patří zákon přímočarého šíření světla, který říká, že ve stejnorodém optickém prostředí se světlo šíří přímočaře a směr šíření světla ve stejnorodém optickém prostředí udávají přímký kolmé na vlnoplochu, které se nazývají světelné paprsky. Zákon vzájemné nezávislosti šíření paprsků říká, že světelné paprsky se neovlivňují a postupují prostředím nezávisle jeden na druhém.

2.1.5 FERMATŮV PRINCIP

Fermatův princip obecně formuluje podmínku, jakou musí splňovat světelný paprsek při průchodu libovolnými prostředími a rozhraními mezi nimi. Fermatův princip říká, že světlo se šíří tak, aby doba, za kterou paprsek dorazí z jednoho bodu do druhého, byla extrémální (minimální, maximální, nebo stacionární).

2.2 ODRAZ SVĚTLA NA ROVINNÉM ZRCADLE

„Kdysi sloužila našim předkům k pozorování jejich tváře pouze klidná vodní hladina. Později vyleštěné měděné nebo stříbrné plechy. Dnes jsou zrcadla běžnou součástí nejen každé domácnosti ale svou důležitou funkci plní i v mnoha oblastech vědy a průmyslu.“²

2.2.1 ROVINA, KOLMICE, ÚHEL DOPADU A ÚHEL ODRAZU

Rovně, ve které se nachází dopadající paprsek i kolmice dopadu, říkáme rovina dopadu. Rovina dopadu je určena dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu. Kolmicí dopadu rozumíme kolmici na rozhraní optických prostředí, kterou sestojíme v bodě dopadu světelného paprsku na zrcadlo. Bude pro nás důležité si definovat úhel dopadu, jako úhel, který svírá dopadající paprsek s kolmicí dopadu. Dále úhel, který svírá odražený paprsek s kolmicí dopadu nazýváme úhel odrazu.

2.2.2 ZÁKON ODRAZU

Velice důležitý zákon pro tuto kapitolu bude zákon odrazu světla, který říká, že velikost úhlu odrazu α' se rovná velikosti úhlu dopadu α . Přičemž odražený paprsek zůstává v rovině dopadu.

² RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 107. ISBN 80-7238-431-7.

2.3 LOM SVĚTLA

„Za horkých letních dnů hledáme obvykle osvěžení v koupalištích nebo v bazénech. Všimli jste si při tom, že se vám bazén nezdá tak hluboký, jaký je ve skutečnosti? Zkusili jste vytáhnout z průzračné vody nějaký drobný předmět? Zjistili jste, že byl hlouběji, než jste ho viděli.“³

2.3.1 INDEX LOMU, ÚHEL DOPADU A LOMU

Nejprve bychom si měli definovat základní pojmy, mezi které patří úhel dopadu a úhel lomu. Úhel dopadu je úhel, který svírá dopadající paprsek s kolmicí dopadu, kterou známe z předešlé podkapitoly 2.2. Úhel lomu je úhel, který svírá lomený paprsek s kolmicí dopadu. Dále budeme rozeznávat z hlediska teorie absolutní a relativní index lomu, přičemž budeme využívat v rámci řešení příkladů index lomu absolutní. Relativní index lomu je podíl rychlosti světla ve dvou různých prostředích. Veličina charakterizující optická prostředí, která je vyjádřená jako podíl rychlosti světla ve vakuu a daném prostředí se nazývá absolutní index lomu.

2.3.2 SNELLŮV ZÁKON

Jeden z nejdůležitějších zákonů a zároveň nejvyužívanějších je Snellův zákon, který říká, že při šíření záření z prostředí opticky řidšího (o indexu lomu n_1) do prostředí opticky hustšího (o indexu lomu n_2) se paprsky lámou směrem ke kolmici. Při šíření záření z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího se paprsky lámou směrem od kolmice. Častěji se využívá matematické formulace, která zní takto:

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

V případě, že je úhel lomu β menší než úhel dopadu α , jedná se o lom ke kolmici. Lom od kolmice nastává v opačném případě, tedy úhel lomu musí být větší než úhel dopadu. V případě, že by nastala situace při lomu od kolmice, kdy úhel lomu dosáhne 90° , dopadající paprsek nazýváme mezní. Při následném zvětšování úhlu dopadu by nedocházelo k lomu vstupního paprsku na rozhraní, ale nastal by úplný odraz.

³ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 112. ISBN 80-7238-431-7.

2.4 OPTICKÝ HRANOL

2.4.1 OPTICKÝ HRANOL, JEV DISPERZE

Po jednom samotném lomu není rozklad světla příliš patrný, protože paprsky fialového a červeného světla svírají velmi malý úhel. Proto se pro rozklad bílého světla používá vícenásobný lom na několika optických rozhraních, nejčastěji pomocí optického hranolu. Optický hranol je trojboké průhledné těleso, které rozkládá bílé světlo na jednotlivé barvy viditelného spektra, užívá se tedy k demonstraci disperze. Bílé denní světlo se hranolem rozloží na spektrum, v němž jsou zastoupeny všechny barvy odpovídající paprskům monofrekvenčního světla v posloupnosti: červená, oranžová, žlutá, zelená, modrá, indigová, fialová. Od červené barvy k fialové roste frekvence světla a tím i index lomu pro každý monochromatický paprsek.

2.4.2 LÁMAVÉ PLOCHY A LÁMAVÝ ÚHEL, DEVIACE

Hladké rovinné plochy hranolu, které nazýváme lámavé plochy, na nichž dochází k lomu světla, svírají navzájem lámavý úhel. Paprsky dopadajícího a dvakrát lomeného světla jsou odchýleny o úhel, který se nazývá deviace. Minimální deviací rozumíme nejmenší hodnotu deviace, při které nastává symetrický průchod světla hranolem.

2.4.3 OPTICKÝ KLÍN, PLANPARALELNÍ DESTIČKA

Optický hranol s velmi malým lámavým úhlem nazýváme optický klín. Úplným extrémem je planparalelní destička, kdy lámavý úhel optického hranolu je roven nule, a tedy nedochází již k odchýlení paprsku, nýbrž jen k rovnoběžnému posunu. Jedná se zde o dva průchody mezi třemi prostředími, kdy se předpokládá, že prostředí, ze kterého se paprsek šíří do planparalelní destičky je totožné s prostředím, do kterého se paprsek šíří po průchodu destičkou.

2.5 KULOVÁ ZRCADLA (V PARAXIÁLNÍM PROSTORU)

„Pokud jste již navštívili bludiště v Praze na Petříně, určitě vás při průchodu zrcadlovou síní pobavily různě deformované (zvětšené nebo zmenšené) obrazy části vaší postavy či tváře. Byly vytvořeny zrcadly s nerovnou plochou.“⁴

⁴ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 109. ISBN 80-7238-431-7.

2.5.1 ROVINNÉ A KULOVÉ ZRCADLO

Rovinné zrcadlo je dokonale vyleštěná kovová rovinná plocha, obvykle chráněná slabou vrstvou skla. Dokonale vyleštěnou kovovou plochu s tvarem kulové plochy nazýváme kulovým (sférickým) zrcadlem. Rozeznáváme zrcadlo duté a vypuklé, podle toho, zda je vyleštěná vnitřní (duté) či vnější (vypuklé) plocha.

2.5.2 ZOBRAZOVÁNÍ KULOVÝM ZRCADLEM

Mezi základní pojmy při zobrazování patří střed křivosti, vrchol zrcadla, optická osa a ohnisko zrcadla. Střed křivosti S je bod, který je středem kulové plochy. Optická osa je přímka procházející středem křivosti a vrcholem zrcadla, což je průsečíku kulové plochy s optickou osou. Ohnisko zrcadla je bod, ve kterém se sbíhají paprsky rovnoběžné s optickou osou. Ohnisková vzdálenost je určena jako velikost úsečky mezi ohniskem a vrcholem zrcadla.

2.6 ČOČKY (V PARAXIÁLNÍM PROSTORU)

„Pokud si někdy vypůjčíš brýle od spolužáka nebo od rodičů, budeš muset oči hodně namáhat, a přesto můžeš vidět hůře. Zakřivené sklo brýlí totiž změnilo původní směr paprsků a tvé oko se musí s novou situací vypořádat. Jsou-li brýle příliš silné, nedokáže se ani zdravé oko přizpůsobit značné změně směru paprsků.“⁵

2.6.1 OPTICKÉ ČOČKY, SPOJKY A ROZPTYLKY

Optické čočky, vyráběné z různých druhů skla a průhledných plastů, jsou průhledná optická prostředí omezená dvěma kulovými plochami, případně jednou kulovou a jednou rovinnou plochou. Čočky, které mění rovnoběžný svazek paprsků na svazek sbíhavý, nazýváme spojky. Rozptylky jsou čočky, které mění svazek rovnoběžný na svazek rozbíhavý.

2.6.2 ZOBRAZOVÁNÍ OPTICKOU ČOČKOU

Při zobrazování pro jednoduchost výpočtů a obrázků zanedbáme tloušťku čoček. Zabývat se v našich příkladech a obrázcích budeme tedy tenkou spojkou a tenkou rozptylkou. Optický střed čočky je v ideálním případě bod, ve kterém u tenké čočky splývají oba vrcholy lomných ploch. Bod, do kterého se po průchodu spojkou lámou všechny paprsky dopadající

⁵ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 114. ISBN 80-7238-431-7.

rovnoběžně s optickou osou nazýváme obrazovým ohniskem. Vzdálenost mezi optickým středem a obrazovým ohniskem je ohnisková vzdálenost se značením f' .

2.6.3 OPTICKÁ MOHUTNOST ČOČKY

Optická mohutnost čočky je charakteristická veličina nepřímo úměrná obrazové ohniskové vzdálenosti udávané v metrech (fyzikální veličina vyjadřující lámavou schopnost čočky).

2.7 SEZNAM DEFINIC A ZÁKONŮ VYUŽITÝCH PŘI TVORBĚ VÝUKOVÝCH MATERIÁLŮ:

Definice 1.1 – světelný paprsek = úzký svazek světla⁶

Definice 1.2 – primární (vlastní) světelný zdroj = těleso nebo látka, v němž světlo vzniká⁷

Definice 1.3 – sekundární světelný zdroj = těleso nebo látka, které světlo pouze odráží a rozptyluje, nedochází v něm ke vzniku světla⁸

Definice 1.4 – bodový světelný zdroj = zdroj světla, jehož rozměry jsou zanedbatelné vzhledem ke vzdálenosti, ze které je pozorujeme⁹

Definice 1.5 – plošný světelný zdroj = zdroj světla, jehož rozměry nelze zanedbat¹⁰

Definice 1.6 – optické prostředí – látka různých vlastností, ve které dochází k šíření světla¹¹

Definice 1.7 průhledné optické prostředí = prostředí, kterým se ze zdroje světlo šíří přímo bez rozptylu¹²

Definice 1.8 – průsvitné optické prostředí = prostředí, ve kterém se část světla rozptýlí¹³

Definice 1.9 – neprůhledné optické prostředí = prostředí, kterým světlo neprochází¹⁴

Definice 1.10 – prostředí opticky stejnorodé (homogenní) = optické prostředí, které má v celém objemu stejné optické vlastnosti, šíření světla nezávisí na poloze zdroje¹⁵

Definice 1.11 – prostředí opticky izotropní = optické prostředí, ve kterém je rychlost světla ve všech směrech stejná¹⁶

Definice 1.12 – prostředí opticky anizotropní = rychlost šíření světla závisí na směru šíření¹⁷

⁶ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 99. ISBN 80-7238-431-7.

⁷ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 16. ISBN 978-80-7196-384-4.

⁸ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 16. ISBN 978-80-7196-384-4.

⁹ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 16. ISBN 978-80-7196-384-4.

¹⁰ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 16. ISBN 978-80-7196-384-4.

¹¹ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 98. ISBN 80-7238-431-7.

¹² LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 15. ISBN 978-80-7196-384-4.

¹³ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 15. ISBN 978-80-7196-384-4.

¹⁴ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 15. ISBN 978-80-7196-384-4.

¹⁵ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 15. ISBN 978-80-7196-384-4.

¹⁶ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 16. ISBN 978-80-7196-384-4.

¹⁷ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 16. ISBN 978-80-7196-384-4.

Definice 1.13 – monofrekvenční světlo (monochromatické) = světelný paprsek jedné spektrální barvy s určitou konstantní frekvencí¹⁸

Zákon 1.1 – Zákon přímočarého šíření světla = Ve stejnorodém optickém prostředí se světlo šíří přímočaře. Směr šíření světla ve stejnorodém optickém prostředí udávají přímky kolmé na vlnoplochu, které se nazývají světelné paprsky.¹⁹

Zákon 1.2 – Zákon vzájemné nezávislosti šíření paprsků = Světelné paprsky se neovlivňují a postupují prostředím nezávisle jeden na druhém.²⁰

Definice 2.1 – úhel dopadu = úhel, který svírá dopadající paprsek s kolmicí dopadu²¹

Definice 2.2 – úhel odrazu = úhel, který svírá odražený paprsek s kolmicí dopadu²²

Definice 2.3 – kolmice dopadu k = kolmice na rozhraní optických prostředí, kterou sestojíme v bodě dopadu světelného paprsku na zrcadlo²³

Definice 2.4 – rovina dopadu = rovina, ve které se nachází dopadající paprsek i kolmice dopadu²⁴

Zákon 2.1 – Zákon odrazu světla = velikost úhlu odrazu α' se rovná velikosti úhlu dopadu α . Přičemž odražený paprsek zůstává v rovině dopadu. Rovina dopadu je určena dopadajícím paprskem a kolmicí dopadu.²⁵

Definice 3.1 – úhel lomu = úhel, který svírá lomený paprsek s kolmicí dopadu²⁶

Definice 3.2 – absolutní index lomu = veličina charakterizující optické prostředí, jedná se o podíl rychlosti světla ve vakuu a daném prostředí²⁷

¹⁸ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 14. ISBN 978-80-7196-384-4.

¹⁹ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 16. ISBN 978-80-7196-384-4.

²⁰ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 16. ISBN 978-80-7196-384-4.

²¹ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 107. ISBN 80-7238-431-7.

²² RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 107. ISBN 80-7238-431-7.

²³ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 107. ISBN 80-7238-431-7.

²⁴ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 107. ISBN 80-7238-431-7.

²⁵ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 108. ISBN 80-7238-431-7.

²⁶ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 19. ISBN 978-80-7196-384-4.

²⁷ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 20. ISBN 978-80-7196-384-4.

Definice 3.3 – relativní index lomu = podíl rychlosti světla ve dvou různých prostředích²⁸

Definice 3.4 – prostředí opticky řidší = prostředí o menším absolutním indexu lomu při srovnávání dvou optických prostředí o různém indexu lomu²⁹

Definice 3.5 – prostředí opticky hustší = prostředí o větším absolutním indexu lomu při srovnávání dvou optických prostředí o různém indexu lomu³⁰

Definice 3.6 – mezní úhel dopadu = úhel lomu dosahuje největší možné hodnoty 90° , mezní úhel dopadu je největší úhel, při kterém ještě nastává lom světla a lomený paprsek splývá s rozhraním³¹

Definice 3.7 – úplný odraz = nastává na rozhraní prostředí opticky hustšího a prostředí opticky řidšího, je-li úhel dopadu větší než úhel mezní³²

Definice 3.8 – lom ke kolmici = nastává při přechodu světla z prostředí opticky řidšího do prostředí opticky hustšího³³

Definice 3.9 – lom od kolmice = nastává při přechodu světla z prostředí opticky hustšího do prostředí opticky řidšího³⁴

Definice 4.1 – planoparalelní destička = průhledné optické prostředí (deska) omezené dvěma rovnoběžnými rovinami – např. tabule skla v oknech³⁵

Definice 5.1 – optický hranol = trojboké průhledné těleso, které rozkládá bílé světlo na jednotlivé barvy (užívá se k demonstraci jevu disperze)³⁶

Definice 5.2 – disperze světla = bílé světlo se při lomu rozloží na barevné složky³⁷

Definice 5.3 – lámavá plocha = hladká rovinná plocha optického hranolu, na které dochází k lomu světla³⁸

²⁸ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 20. ISBN 978-80-7196-384-4.

²⁹ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 21. ISBN 978-80-7196-384-4.

³⁰ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 21. ISBN 978-80-7196-384-4.

³¹ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 23. ISBN 978-80-7196-384-4.

³² LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 23. ISBN 978-80-7196-384-4.

³³ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 21. ISBN 978-80-7196-384-4.

³⁴ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 21. ISBN 978-80-7196-384-4.

³⁵ FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy díl IV*. Praha: STÁTNÍ PEDAGOGICKÉ NAKLADATELSTVÍ, 1961. s.72

³⁶ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 29. ISBN 978-80-7196-384-4.

³⁷ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 20. ISBN 978-80-7196-384-4.

³⁸ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 29. ISBN 978-80-7196-384-4.

Definice 5.4 – lámavý úhel = úhel, který svírající lámavé plochy hranolu³⁹

Definice 5.5 – deviace = úhel o který se odchýlí paprsek světla po průchodu hranolem⁴⁰

Definice 5.6 – minimální deviace = nejmenší hodnota deviace, nastává při symetrickém průchodu světla hranolem⁴¹

Definice 5.7 – optický klín = optický hranol s velmi malým lámavým úhlem.⁴²

Definice 6.1 – rovinné zrcadlo = dokonale vyleštěná kovová rovinná plocha, obvykle chráněná slabou vrstvou skla⁴³

Definice 6.2 – kulová (sférická) zrcadla = dokonale vyleštěná kovová plocha s tvarem části kulové plochy, podle toho, zda je vyleštěná vnitřní či vnější plocha, rozeznáváme dutá zrcadla a vypuklá zrcadla.⁴⁴

Definice 6.3 – střed křivosti = střed kulové plochy S ⁴⁵

Definice 6.4 – vrchol zrcadla = průsečík kulové plochy s optickou osou⁴⁶

Definice 6.5 – optická osa = přímka spojující středy křivosti lomných ploch⁴⁷

Definice 6.6 – ohnisko zrcadla = obrazový bod, ve kterém se sbíhají paprsky rovnoběžné s optickou osou po odrazu od zrcadla⁴⁸

Definice 6.7 – ohnisková vzdálenost = vzdálenost ohniska od vrcholu zrcadla⁴⁹

³⁹ LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. s. 29. ISBN 978-80-7196-384-4.

⁴⁰ FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy díl IV*. Praha: STÁTNÍ PEDAGOGICKÉ NAKLADATELSTVÍ, 1961. s. 69

⁴¹ FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy díl IV*. Praha: STÁTNÍ PEDAGOGICKÉ NAKLADATELSTVÍ, 1961. s. 70

⁴² FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy díl IV*. Praha: STÁTNÍ PEDAGOGICKÉ NAKLADATELSTVÍ, 1961. s. 71

⁴³ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 107. ISBN 80-7238-431-7.

⁴⁴ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 109. ISBN 80-7238-431-7.

⁴⁵ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 109. ISBN 80-7238-431-7.

⁴⁶ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 109. ISBN 80-7238-431-7.

⁴⁷ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 109. ISBN 80-7238-431-7.

⁴⁸ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 109. ISBN 80-7238-431-7.

⁴⁹ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 109. ISBN 80-7238-431-7.

Definice 7.1 – čočka = průhledné optické prostředí omezené dvěma kulovými plochami (popř. jednou kulovou a jednou rovinnou plochou)⁵⁰

Definice 7.2 – spojka = čočka, která mění rovnoběžný svazek paprsků na sbíhavý svazek⁵¹

Definice 7.3 – rozptylka = čočka, která mění rovnoběžný svazek paprsků na svazek rozbíhavý.⁵²

Definice 7.4 – optický střed čočky (idealizace) = bod, ve kterém u tenké čočky splývají oba vrcholy lomných ploch⁵³

Definice 7.5 – obrazové ohnisko = bod, do kterého se po průchodu spojkou lámou všechny paprsky dopadající rovnoběžně s optickou osou⁵⁴

Definice 7.6 – obrazová ohnisková vzdálenost = vzdálenost obrazového ohniska od optického středu čočky⁵⁵

Definice 7.7 – optická mohutnost čočky = charakteristická veličina nepřímo úměrná obrazové ohniskové vzdálenosti v metrech (fyzikální veličina vyjadřující lámavou schopnost čočky)⁵⁶

⁵⁰ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 114. ISBN 80-7238-431-7.

⁵¹ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 114. ISBN 80-7238-431-7.

⁵² RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 114. ISBN 80-7238-431-7.

⁵³ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 115. ISBN 80-7238-431-7.

⁵⁴ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 115. ISBN 80-7238-431-7.

⁵⁵ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 115. ISBN 80-7238-431-7.

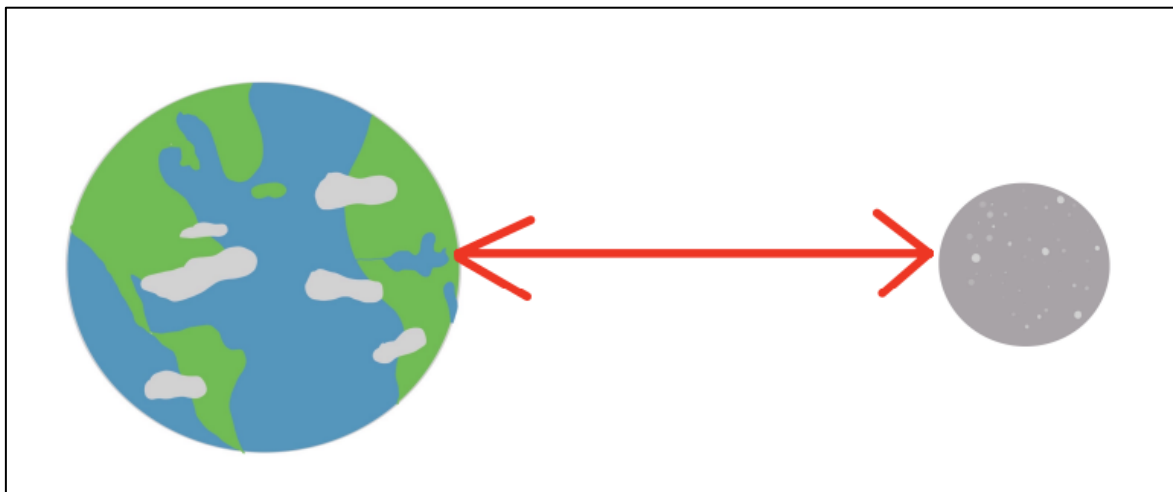
⁵⁶ RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. s. 115. ISBN 80-7238-431-7.

3 ŘEŠENÉ PŘÍKLADY

3.1 ŠÍŘENÍ SVĚTLA

Příklad 1.1

Určete vzdálenost Země a Měsíce, když světlo vycházející z výkonného laseru odražené od speciálního zrcadla se vrátilo za dobu $t = 2,56$ s. Porovnejte s tabulkovou hodnotou.



Obrázek 1: Určování vzdálenosti Země a Měsíce

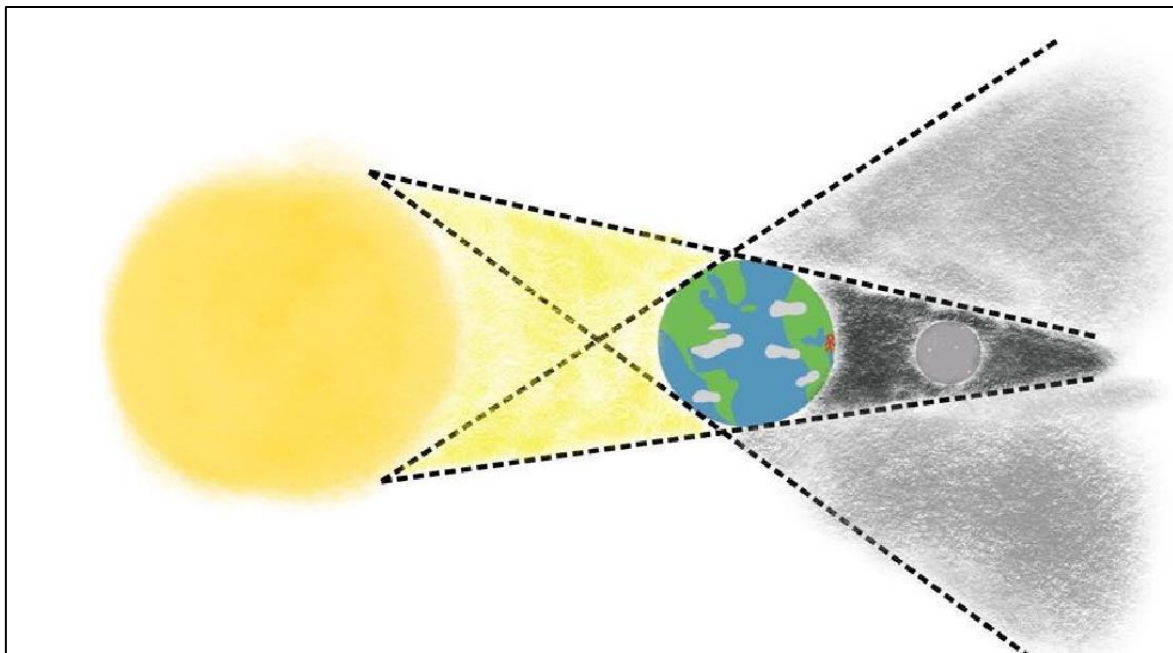
ŘEŠENÍ: Budeme-li předpokládat, že se rychlost světla nezmění a světlo se bude šířit přímočaře, mohli bychom využít základního vztahu $s = v \cdot t$, kde čas t máme zadaný 2,56 s a rychlost v bude rychlost světla ve vakuu $c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

$$s = v \cdot t \rightarrow s = c \cdot t = 299\,792\,458 \cdot 2,56 = 767\,468\,692 \text{ m}$$

Musíme si ale uvědomit, že světlo se šířilo ze Země na Měsíc a zpátky, tudíž vzdálenost Země a Měsíce je pouze polovina našeho výpočtu, a to: $s = 383\,734\,346 \text{ m}$, což se liší od tabulkové hodnoty o 665 kilometrů.

Příklad 1.2

Kdyby na Měsíci Neil Armstrong pozoroval zatmění Slunce, jaký jev by bylo možné vidět na povrchu Země?



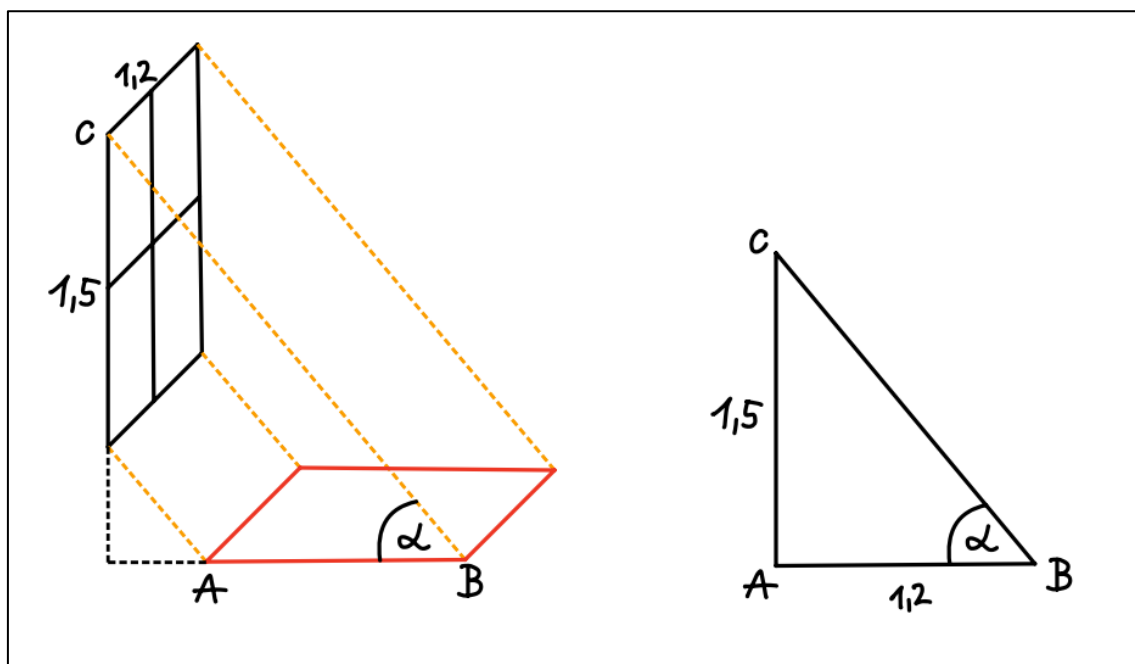
Obrázek 2: Vzájemná poloha Slunce, Země a Měsíce

ŘEŠENÍ: Když se podíváme na obrázek a vzájemnou polohu Slunce, Země a Měsíce, tak bychom na určitém místě naší planety mohli pozorovat úplné zatmění Měsíce.

Příklad 1.3

Sluneční paprsky dopadají do obývacího pokoje. Okno má výšku 1,5 m a šířku 1,2 m. V jaké úhlové výšce nad obzorem by muselo svítit Slunce, aby z paprsků na podlaze vznikl čtverec? (paprsky ze Slunce považujeme za rovnoběžné)

ŘEŠENÍ: Nejprve bychom si situaci měli představit a udělat si náčrtek.



Obrázek 3: Stín na podlaze

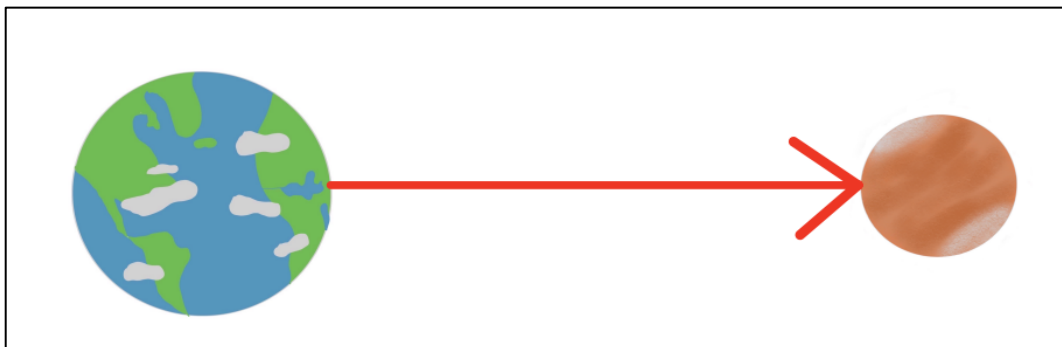
Dále budeme postupovat z námi načrtnutého trojúhelníku, kde využijeme goniometrickou funkci tangens pro výpočet úhlu α , kde dostaneme následně rovnici:

$$\tan \alpha = \frac{1,5}{1,2} \rightarrow \alpha = 51^\circ 20'$$

Slunce se musí nacházet v rovině rovnoběžné s plochou okna a v úhlové výšce nad obzorem $51^\circ 20'$.

Příklad 1.4

Z vysoce výkonného laseru jsme vyslali paprsek monochromatického světla ze Země směrem k Marsu. Stanovte dobu šíření paprsku. (Vzdálenost Země a Marsu počítejme s hodnotou v opozici 56,9 mil. km)



Obrázek 4: Země a Mars

ŘEŠENÍ: Obdobně jako v příkladě 1.1 budeme počítat s rychlostí světla ve vakuu. Dráhu, kterou světlo urazí, bude celkově Země-Mars. Vzdálenost v opozici naposledy 12. září v roce 1956 byla vyzorována a vypočítána na $56,9 \cdot 10^6$ km.

!Nesmíme ale zapomenout na převod vzdáleností z kilometrů na metry!

$$c = 299\,792\,458 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$s_{ZeMa} = 56,9 \cdot 10^9 \text{ m}$$

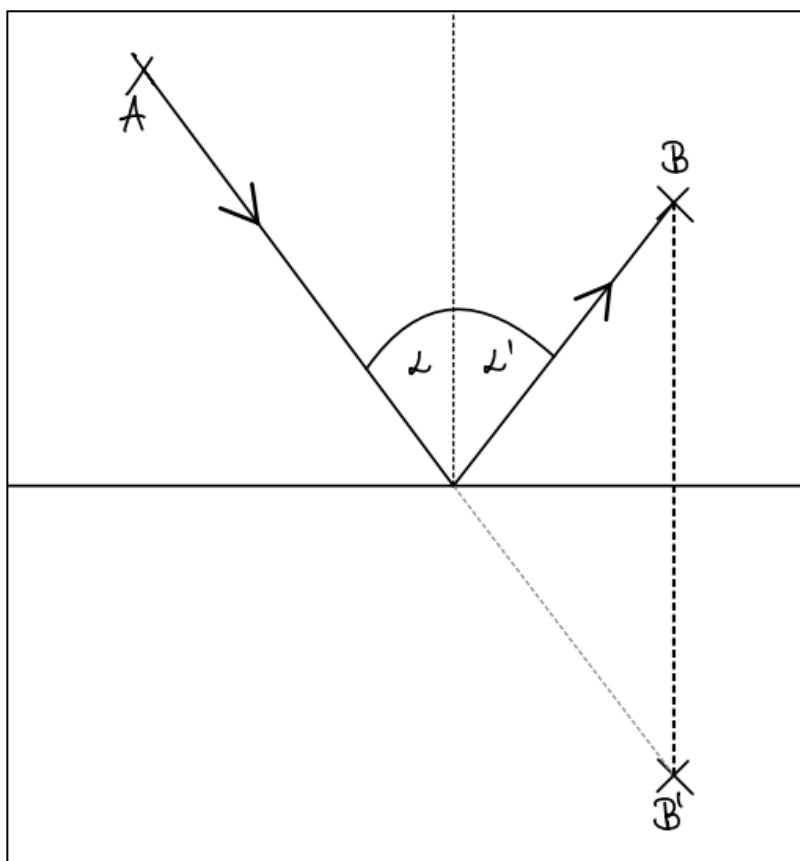
$$s = c \cdot t \rightarrow t = \frac{s}{c} \rightarrow t = \frac{s_{ZeMa}}{c} = \frac{56,9 \cdot 10^9}{299\,792\,458} = 189,8 \text{ s}$$

Světlo by tedy cestovalo ze Země k Marsu po dobu 189,8 sekund neboli 3 minuty a 10 sekund.

3.2 ODRAZ SVĚTLA

Příklad 2.1

Světelný paprsek se šíří z bodu A, následně se odrazí od vodorovné plochy a prochází bodem B. Nalezněte pomocí geometrické konstrukce bod na vodorovné ploše, kde se paprsek odrazí.

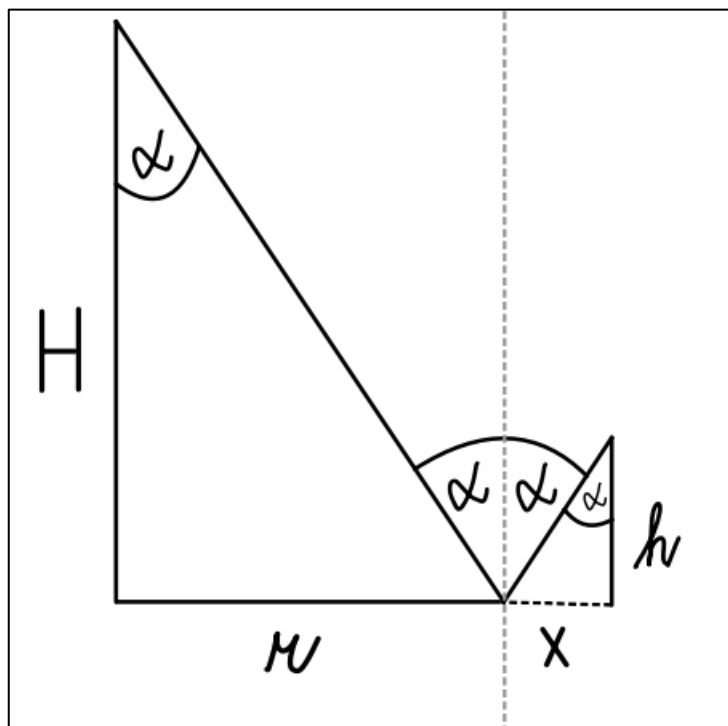


Obrázek 5: Odraz na vodorovné ploše

ŘEŠENÍ: Nejprve začneme konstrukcí bodu B' , který se bude nacházet jako obraz bodu B v osové souměrnosti s přímkou rozhraní. Bod odrazu je průnik naší vytvořené přímky AB' a přímky rozhraní.

Příklad 2.2

V nákupním centru visí nad vypnutou fontánou o poloměru 4 metry světelný zdroj ve výšce 6 metrů. Jaká je maximální vzdálenost člověka od fontány, aby při jeho výšce 175 cm byl světelný odraz ještě vidět.



Obrázek 6: Viditelnost světelného odrazu

ŘEŠENÍ: Začneme náčrtem situace ze zadání pro lepší orientaci v zadání.

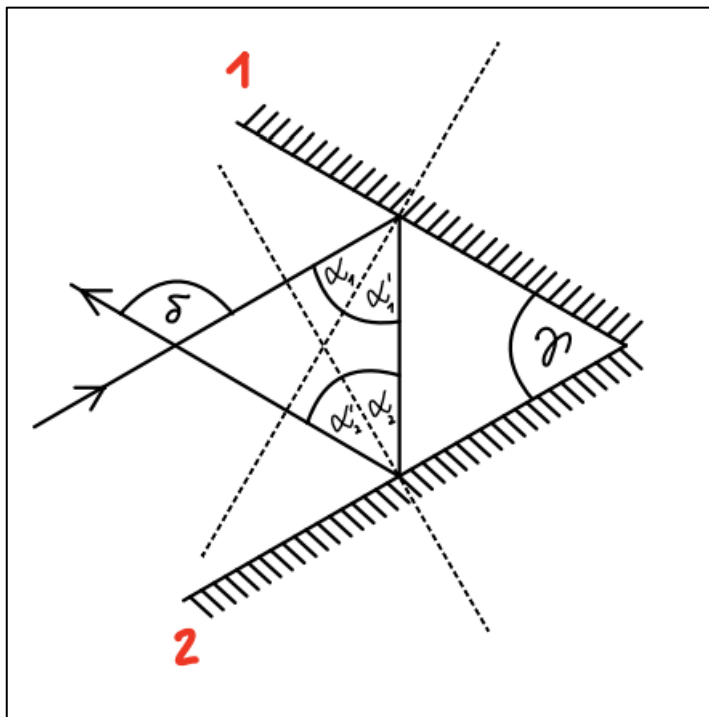
Opět se jedná pouze o odraz světla, proto se úhly α a α' rovnají, následně z podobnosti trojúhelníků dokážeme získat následující rovnost (nebo přes funkci tangens) a vyjádříme si neznámou x z rovnice:

$$\tan \alpha = \frac{r}{H} = \frac{x}{h} \rightarrow x = \frac{r \cdot h}{H} = 1,2 \text{ m}$$

Maximální vzdálenost člověka od fontány, aby byl světelný odraz vidět je 1,2 m.

Příklad 2.3

Nechť máme soustavu dvou rovinných zrcadel svírajících úhel 60° , úhel dopadu na první zrcadlo bude polovinou úhlu, který svírají zrcadla. Vypočítejte odchylku vstupního a výstupního paprsku.



Obrázek 7: Odchylka, soustava zrcadel

ŘEŠENÍ: Opět začneme pro lepší představu náčrtkem situace, kde podle zákona odrazu platí následující rovnosti:

$$\alpha_1 = \alpha_1' \quad \alpha_2 = \alpha_2'$$

Z trojúhelníku ABC je zřejmé, že $\gamma = \alpha_1 + \alpha_2$. Podobně z trojúhelníku ABD najdeme odchylku:

$$\delta = 2 \cdot \alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2 = 2 \cdot \gamma.$$

Odchylka paprsků po odrazu od zrcadel po číselném dosazení:

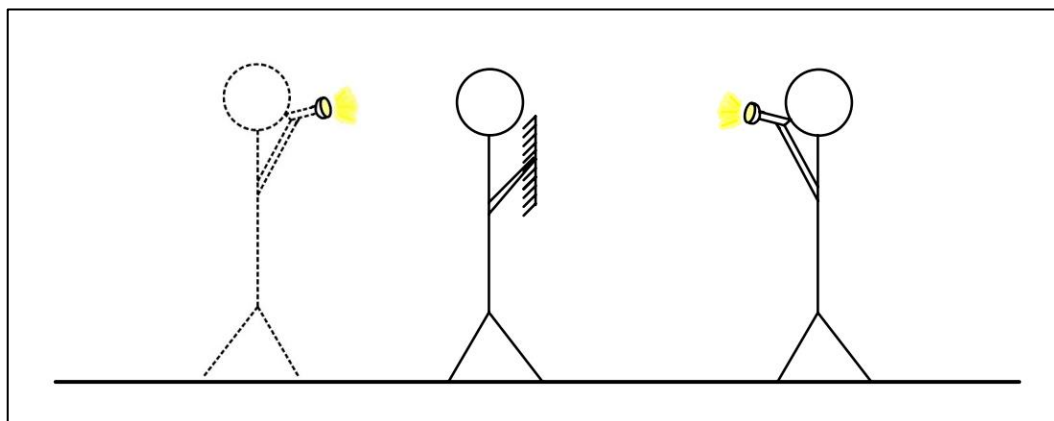
$$60^\circ = \alpha_1 + \alpha_2$$

$$\delta = 2 \cdot \alpha_1 + 2 \cdot \alpha_2 = 2 \cdot \gamma = 2 \cdot 60 = 120^\circ$$

Číselná odchylka paprsků po odrazu od zrcadel je 120° .

Příklad 2.4

Nechť osoba držící rovinné zrcadlo se začne pohybovat rychlostí $0,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ směrem k osobě držící svítilnu. Jakou rychlostí a směrem se musí bezprostředně začít pohybovat osoba se svítilnou (zdrojem světla), aby se poloha obrazu zdroje světla v průběhu nezměnila.



Obrázek 8: Vztah mezi předmětem a obrazem

ŘEŠENÍ: Osoba se svítilnou (zdrojem světla) se musí pohybovat dvojnásobnou rychlostí než osoba držící rovinné zrcadlo, tudíž $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a ve stejném směru pohybu.

3.3 LOM SVĚTLA

Příklad 3.1

Proč se malé bublinky vzduchu ve vodě stříbřitě lesknou, kdežto na povrchu větších bublin tak výrazný lesk nepozorujeme?

ŘEŠENÍ: Povrch malých bublinek je více zakřiven než u větších bublin, takže převážná část paprsků dopadá na povrch bublinky pod větším úhlem, než je mezní úhel pro dané rozhraní, proto v malých bublinkách dochází k totálnímu odrazu světla.

Příklad 3.2

Z tabulek víme, že index lomu ledu je menší než index lomu vody. Ve kterém prostředí se bude světlo šířit větší rychlostí?

ŘEŠENÍ: Ze zadání víme, že index lomu ledu n_l je větší než index lomu vody n_v . Závislost rychlosti šíření světla závisí na indexu lomu daného prostředí nepřímo úměrně, proto:

$$v_l = \frac{c}{n_l} \quad v_v = \frac{c}{n_v} \rightarrow n_l < n_v \rightarrow v_l > v_v$$

Rychlost světla v ledu je větší než ve vodě.

Příklad 3.3

Index lomu vody pro paprsek červeného světla je 1,331 a pro paprsek fialového světla 1,343, určete rychlost světla pro oba paprsky procházející ve vodě.

ŘEŠENÍ: Začneme nejprve základním rozbořem úlohy, rychlost světla šířícího se závisí přímo úměrně na rychlosti světla ve vakuu a nepřímo úměrně indexu lomu zadaného prostředí, proto:

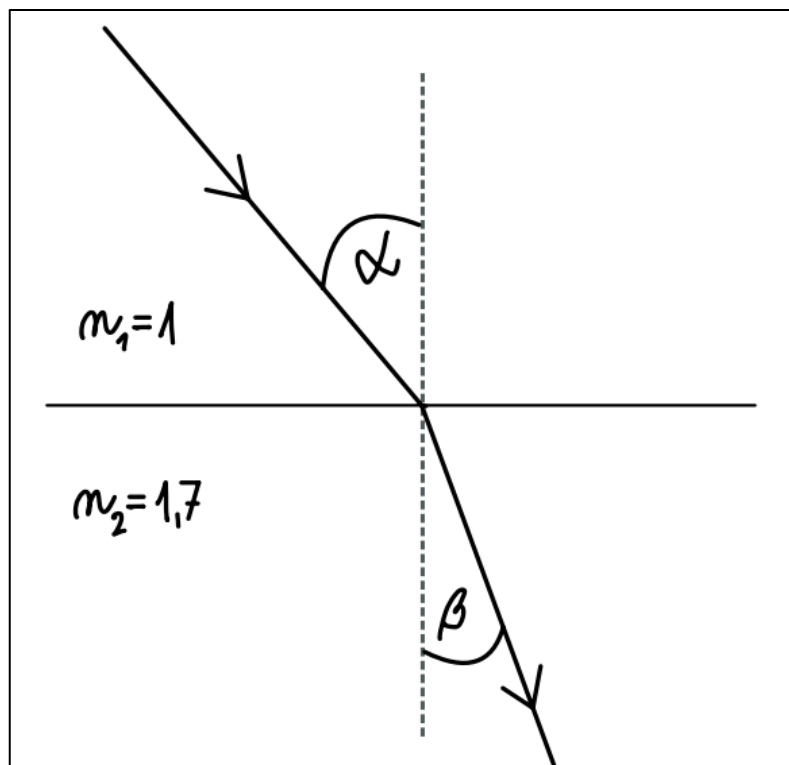
$$v_{\xi} = \frac{c}{n_{\xi}} = \frac{299\,792\,458}{1,331} = 225\,238\,510 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

$$v_f = \frac{c}{n_f} = \frac{299\,792\,458}{1,343} = 223\,225\,955 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

Rychlost červeného světla je $225\,238\,510 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a pro fialové světlo je $223\,225\,955 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Příklad 3.4

Pod jakým úhlem musí dopadnout monofrekvenční paprsek na rozhraní se sklem o indexu lomu 1,7, aby úhel lomu byl polovinou úhlu dopadu?



Obrázek 9: Lom monofrekvenčního paprsku

ŘEŠENÍ: K řešení příkladu využijeme Snellova zákona:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \quad \beta = \frac{\alpha}{2}$$

Budeme vycházet, že prostředí, ze kterého vstupujeme na rozhraní se sklem ($n_2 = 1,7$) je vzduch o indexu lomu $n_1 = 1$, proto:

$$1 \cdot \sin \alpha = 1,7 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}$$

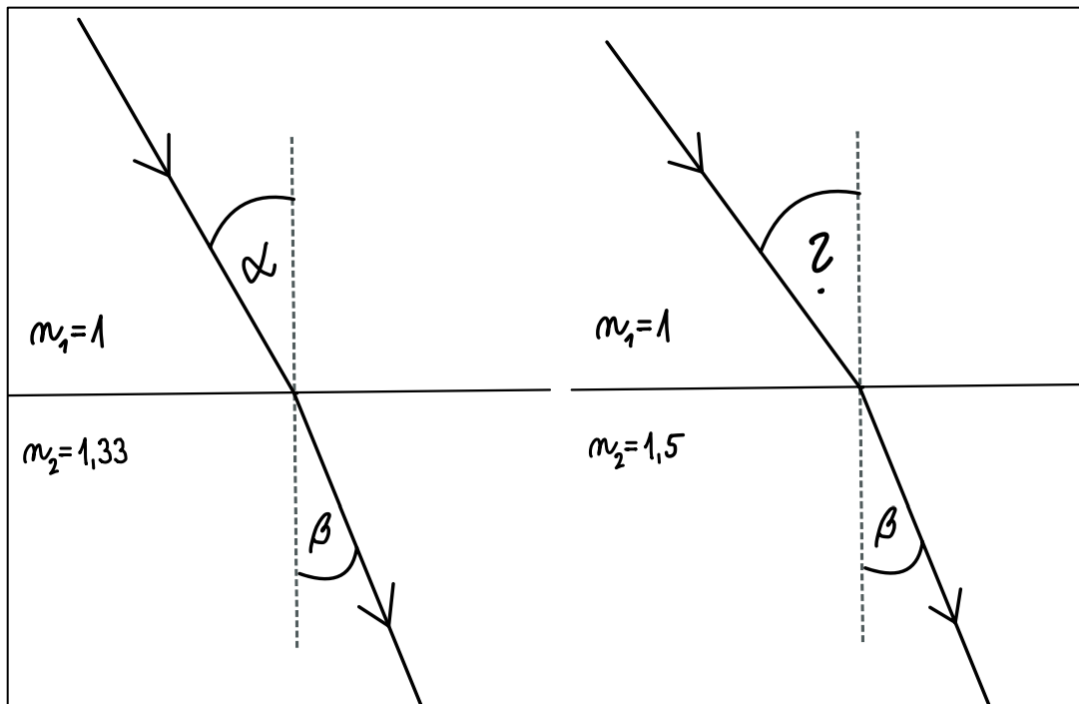
Využijeme vzorce $\sin(\alpha) = 2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2}$ - ekvivalent pro $\sin(2\alpha)$

$$2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = 1,7 \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \rightarrow 2 \cdot \cos \frac{\alpha}{2} = 1,7 \rightarrow \alpha = 63^\circ 34'$$

Monofrekvenční paprsek musí dopadnout pod úhlem $63^\circ 34'$.

Příklad 3.5

Úhel dopadu světelného paprsku na povrch vody je 30° , index lomu vody 1,33. Pod jakým úhlem musí dopadnout paprsek světla na sklo o indexu lomu 1,55, aby se úhly lomu rovnaly?



Obrázek 10: Vztah úhlu dopadu a prostředí

ŘEŠENÍ: Opět budeme využívat Snellova zákona, nejprve úhel dopadu $\alpha = 30^\circ$. Prostředí, ze kterého budeme v první části vstupovat do vody bude vzduch. Index lomu vzduchu $n_1 = 1$, index lomu vody zde bude $n_2 = 1,33$, zde si můžeme dopočítat úhlem zadaný úhel lomu, který by měl být stejný i v případě rozhraní vzduch-sklo, proto:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \rightarrow \sin \beta = \frac{n_1 \cdot \sin \alpha}{n_2} = \frac{1 \cdot \sin 30^\circ}{1,33} \rightarrow \beta = 22^\circ 4'$$

Získali jsme úhel lomu, dále potřebujeme znovu sestavit rovnici Snellova zákona, kde si dosadíme nové proměnné, kde:

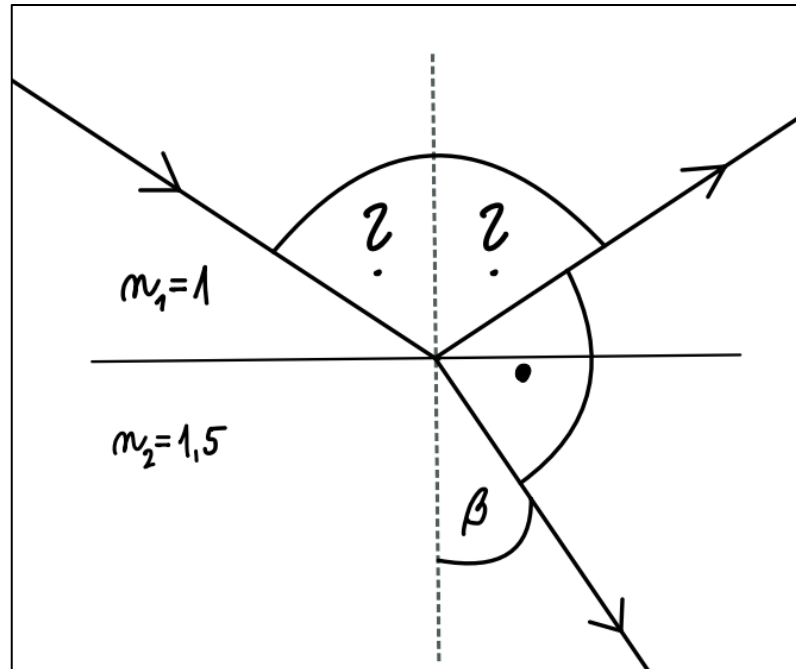
$$\beta = 22^\circ 4', n_1 = 1, n_2 = 1,55$$

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \rightarrow \sin \alpha = \frac{n_2 \cdot \sin \beta}{n_1} = \frac{1,55 \cdot \sin 22^\circ 4'}{1} \rightarrow \alpha = 35^\circ 36'$$

Paprsek světla musí dopadnout na sklo pod úhlem $\alpha = 35^\circ 36'$, aby se úhly lomu rovnaly.

Příklad 3.6

Na skleněnou destičku o indexu lomu 1,5 dopadá monochromatický paprsek světla. Určete úhel dopadu, víte-li, že lomený paprsek svírá s odraženým paprskem úhel 90° ?



Obrázek 11: Lom monochromatického paprsku 1

ŘEŠENÍ: Začneme nejprve rozbořem situace. Jedná se o jeden přechod na rozhraní destičky ze vzduchu do skla destičky, řešíme úlohu tedy pomocí Snellova zákona, kde známe: $n_1 = 1$ (vzduch), $n_2 = 1,5$ (sklo), dále:

$$\alpha' + \beta + 90^\circ = 180^\circ \rightarrow \alpha' + \beta = 90^\circ \rightarrow \alpha' = \alpha \rightarrow \beta = 90^\circ - \alpha$$

Následně dosadíme do Snellova zákona:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \rightarrow 1 \cdot \sin \alpha = 1,5 \cdot \sin (90^\circ - \alpha)$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin(90^\circ - \alpha)} = \frac{1,5}{1}$$

Zde budeme pokračovat rozepsáním jmenovatele prvního zlomku podle goniometrického vzorce $\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta$, tedy:

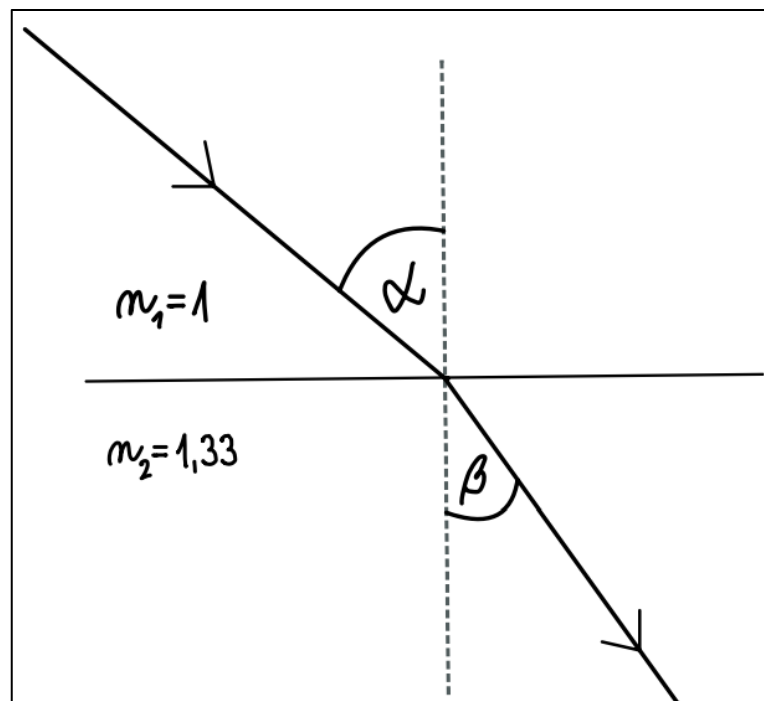
$$\frac{\sin \alpha}{\sin 90^\circ \cdot \cos \alpha - \cos 90^\circ \cdot \sin \alpha} = \frac{1,5}{1} \rightarrow \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \frac{1,5}{1} \rightarrow \tan \alpha = \frac{1,5}{1}$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{1,5}{1} \right) = 56^\circ 18'$$

Úhel dopadu α je roven $56^\circ 18'$.

Příklad 3.7

Spočítejte úhel dopadu a lomu, jestliže světelný paprsek přechází ze vzduchu do vody ($n=1,33$), je-li úhel lomu o 15° menší než úhel dopadu.



Obrázek 12: Lom monochromatického paprsku 2

ŘEŠENÍ: Začneme tedy rozborem našeho zadání, kde známe prostředí, ze kterého vstupujeme do vody (vzduch $n_1 = 1$), index lomu vody ze zadání $n_2 = 1,33$, dále známe vztah úhlu lomu k úhlu dopadu $\beta = \alpha - 15^\circ$. Můžeme tedy dosadit do Snellova zákona, vyjádřit si úhel dopadu:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \rightarrow \sin \alpha = \frac{1,33 \cdot \sin(\alpha - 15^\circ)}{1} \rightarrow \frac{\sin \alpha}{\sin(\alpha - 15^\circ)} = 1,33$$

$\sin(\alpha - 15^\circ)$ lze rozepsat goniometrickým vzorcem:

$$\sin(\alpha - 15^\circ) \rightarrow \sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \alpha \cdot \cos 15^\circ - \cos \alpha \cdot \sin 15^\circ} = 1,33$$

$$\frac{1}{\cos 15^\circ - \cotg \alpha \cdot \sin 15^\circ} = 1,33$$

$$\frac{1}{1,33} = \cos 15^\circ - \cotg \alpha \cdot \sin 15^\circ$$

$$\frac{1}{1,33} - \cos 15^\circ = -\cotg \alpha \cdot \sin 15^\circ$$

$$\frac{\frac{1}{1,33} - \cos 15^\circ}{\sin 15^\circ} = -\cotg \alpha$$

$$\frac{-\frac{1}{1,33} + \cos 15^\circ}{\sin 15^\circ} = \cotg \alpha$$

$$\frac{\sin 15^\circ}{-\frac{1}{1,33} + \cos 15^\circ} = \tan \alpha$$

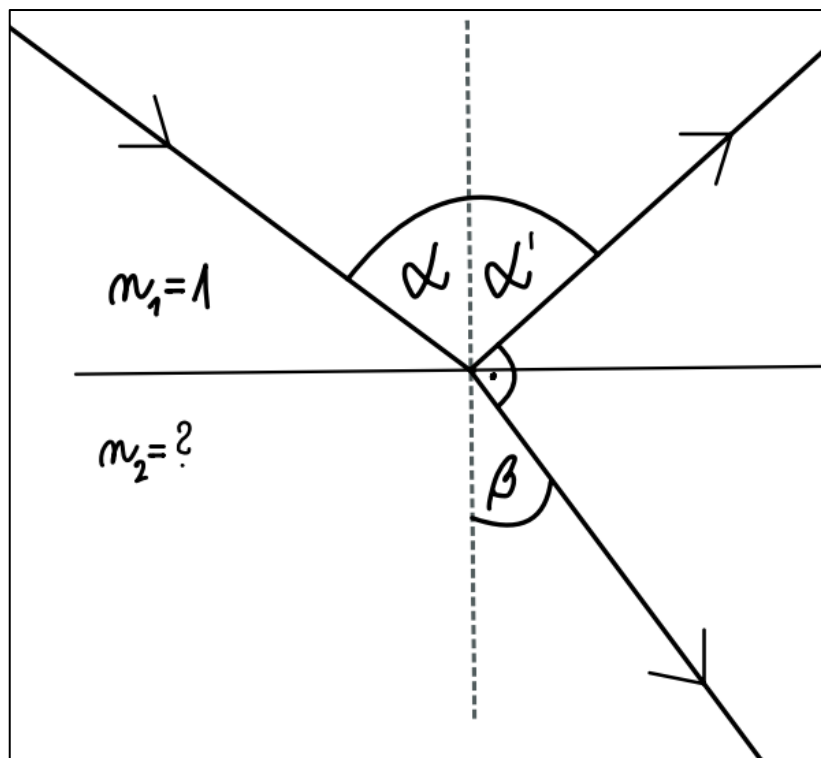
$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin 15^\circ}{-\frac{1}{1,33} + \cos 15^\circ} \right) = 50^\circ 24'$$

Zde už pouze dosazení pro úhel lomu $\beta = \alpha - 15^\circ = 35^\circ 24'$

Úhel dopadu α je $50^\circ 24'$ a úhel lomu β je $35^\circ 24'$.

Příklad 3.8

Paprsek lomený svírá s paprsek odraženým 90° , úhel dopadu je 53° . Určete index lomu prostředí, do kterého paprsek vstupuje ze vzduchu.



Obrázek 13: Výpočet indexu lomu prostředí

ŘEŠENÍ: Pojdme si situaci rozebrat s pomocí náčrtku.

Zde vidíme, že známe úhel dopadu $\alpha = 53^\circ$. Prostředí, ze kterého vstupujeme (vzduch) do neznámého, má index lomu $n_1 = 1$, dále platí z doplnění úhlů na úhel přímý rovnost:

$$\alpha' + \beta + 90^\circ = 180^\circ \rightarrow \alpha' + \beta = 90^\circ \rightarrow \beta = 90^\circ - 53^\circ = 37^\circ$$

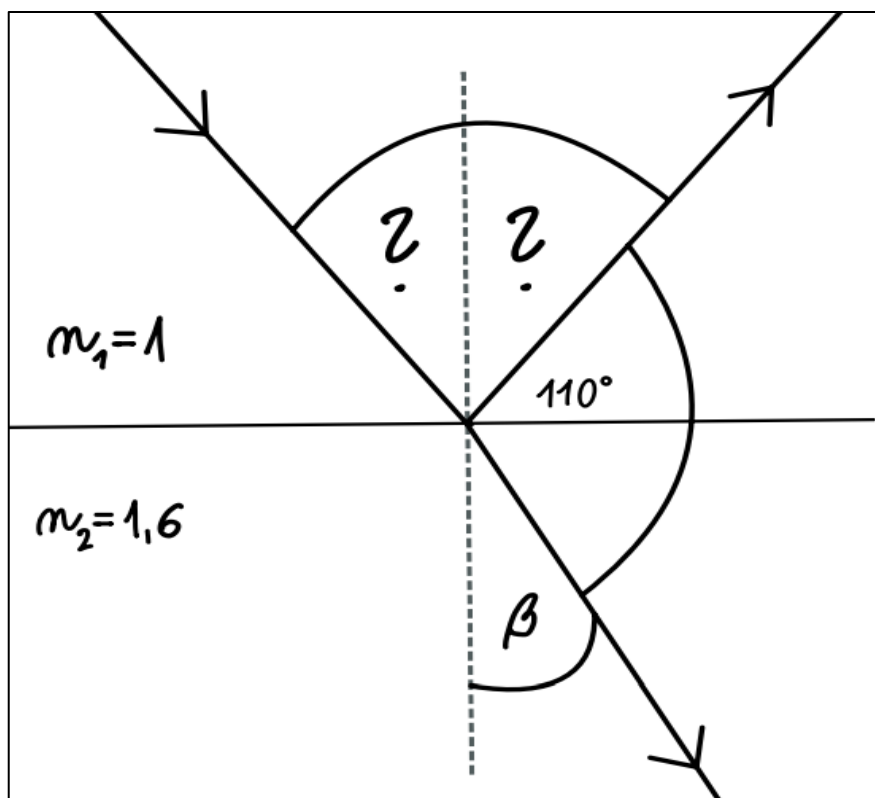
Nyní jsme dostali úhel lomu a můžeme sestavit rovnici s využitím Snellova zákona, kde známe $\alpha = 53^\circ$, $n_1 = 1$, $\beta = 37^\circ$ a dosadíme:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta = 1 \cdot \sin 53^\circ = n_2 \cdot \sin 37^\circ \rightarrow n_2 = \frac{\sin 53^\circ}{\sin 37^\circ} = 1,33$$

Index lomu prostředí, do kterého paprsek vstupuje ze vzduchu je 1,33 (voda).

Příklad 3.9

Na rozhraní skla a vody dopadá paprsek světla. Odražený paprsek svírá s lomeným úhel 110° , určete úhel dopadu monochromatického paprsku.



Obrázek 14: Výpočet úhlu dopadu monochromatického paprsku

ŘEŠENÍ: Zde bude situace velice podobná příkladu 3.8, budeme tedy vycházet z podmínky součtu úhlů a následného dosazení do Snellova zákona:

$$\alpha' + \beta + 110^\circ = 180^\circ \rightarrow \alpha' + \beta = 70^\circ \rightarrow \alpha' = \alpha \rightarrow \beta = 70^\circ - \alpha$$

Pro dosazení potřebujeme index skla, který se může lišit v závislosti na druhu, budeme počítat s hodnotou $n_1 = 1,6$, index prostředí, do kterého paprsek vstupuje je $n_2 = 1,33$, bude se tedy jednat o lom od kolmice. Dosazení:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \rightarrow 1,33 \cdot \sin \alpha = 1,6 \cdot \sin(70^\circ - \alpha)$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin(70^\circ - \alpha)} = \frac{1,6}{1,33}$$

Zde budeme pokračovat rozepsáním jmenovatele prvního zlomku podle goniometrického vzorce $\sin(\alpha - \beta) = \sin \alpha \cdot \cos \beta - \cos \alpha \cdot \sin \beta$, tedy:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin 70^\circ \cdot \cos \alpha - \cos 70^\circ \cdot \sin \alpha} = \frac{1,6}{1,33}$$

$$\frac{1}{\sin 70^\circ \cdot \cotg \alpha - \cos 70^\circ} = \frac{1,6}{1,33}$$

$$\frac{1,33}{1,6} = \sin 70^\circ \cdot \cotg \alpha - \cos 70^\circ$$

$$\frac{1,33}{1,6} + \cos 70^\circ = \sin 70^\circ \cdot \cotg \alpha$$

$$\frac{\frac{1,33}{1,6} + \cos 70^\circ}{\sin 70^\circ} = \cotg \alpha$$

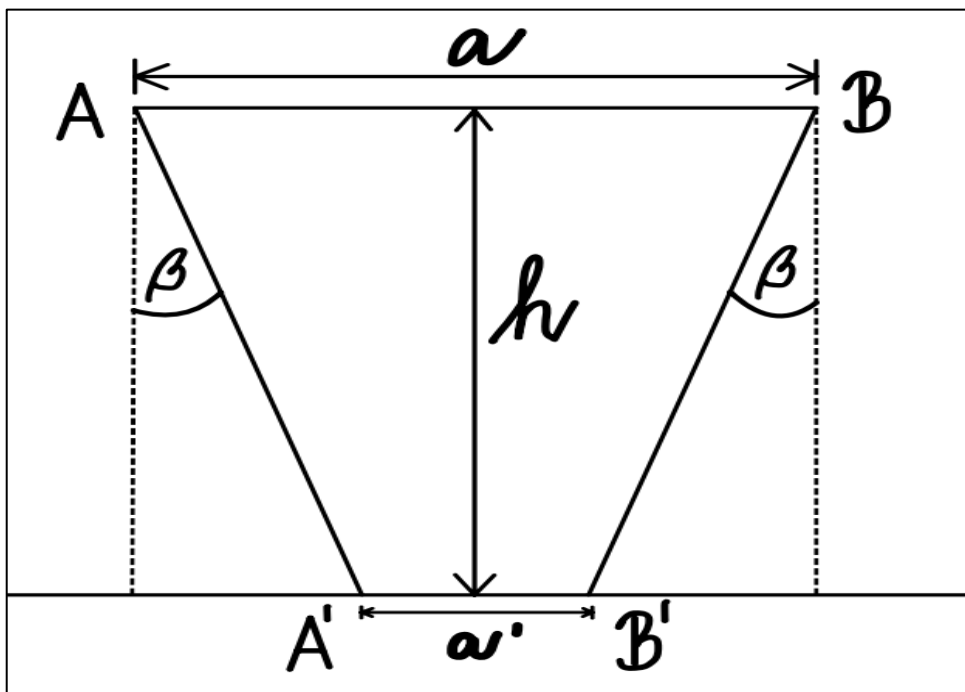
$$\frac{\sin 70^\circ}{\frac{1,33}{1,6} + \cos 70^\circ} = \tan \alpha$$

$$\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\sin 70^\circ}{\frac{1,33}{1,6} + \cos 70^\circ} \right) = 38^\circ 41'$$

Úhel dopadu α je roven $38^\circ 41'$.

Příklad 3.10

Titanic o délce 269,1 m a šířce 28,25 m byl v přístavu spuštěn na vodu. Hloubka vody v přístavu je 12 m. Jaké byly rozměry stínu na dně, jde-li o rozměry stínu vzniklého rozptýleným světlem.



Obrázek 15: Rozměry stínu lodi

ŘEŠENÍ: Paprsky rozptýleného světla dopadají na hladinu pod různými úhly. My budeme řešit pouze důležité paprsky pro tvorbu stínu, tedy paprsky světla dopadající těsně na rozhraní vzduchu a vody v těsné blízkosti lodi. Pro lepší představu začneme náčrtem pro šíři lodi.

Z obrázku platí následující rovnosti:

$$a' = a - 2 \cdot h \cdot \tan \beta$$

Pro úhel dopadu $\alpha = 90^\circ$, platí:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1}{\sin \beta} = n$$

Zde si vyjádříme tangens β :

$$\tan \beta = \frac{\sin \beta}{\cos \beta} = \frac{\sin \beta}{\sqrt{1 - \sin^2 \beta}} = \frac{1}{\sqrt{n^2 - 1}}$$

Následně dosadíme do počátečního vztahu:

$$a' = a - \frac{2 \cdot h}{\sqrt{n^2 - 1}} = 28,25 - \frac{2 \cdot 12}{\sqrt{1,33^2 - 1}} = 0,9 \text{ m}$$

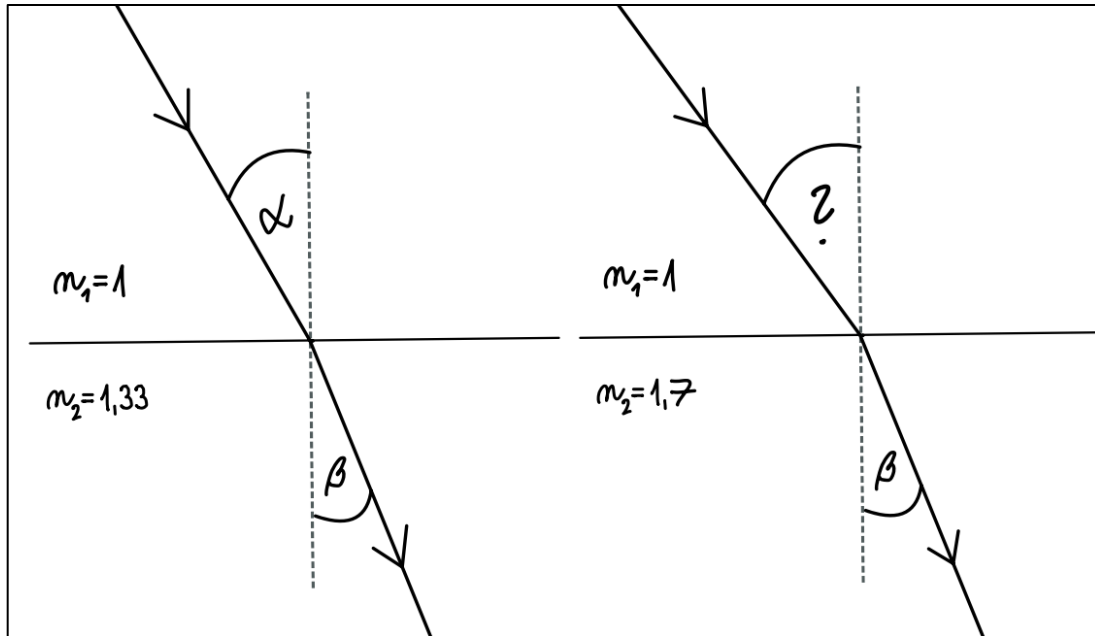
Pro délku lodi platí stejná vztah, tedy:

$$b' = b - \frac{2 \cdot h}{\sqrt{n^2 - 1}} = 269,1 - \frac{2 \cdot 12}{\sqrt{1,33^2 - 1}} = 241,7 \text{ m}$$

Stín by měl v hloubce 12 metrů rozměry 241,7 m na 0,9 m.

Příklad 3.11

Paprsek světla dopadá na povrch vody pod úhlem 35° . Pod jakým úhlem musí dopadat na povrch skla o indexu lomu 1,7, aby úhel lomu byl totožný.



Obrázek 16: Zachování úhlu lomu při změně prostředí

ŘEŠENÍ: Začneme první částí úlohy pro zjištění úhlu lomu ze Snellova zákona, kde známe následující členy rovnice: $n_1 = 1$ (vzduch), $n_2 = 1,33$ (voda), $\alpha = 35^\circ$

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \rightarrow 1 \cdot \sin 35^\circ = 1,33 \cdot \sin \beta \rightarrow$$

$$\rightarrow \sin \beta = \frac{n_1 \cdot \sin \alpha}{n_2} = \frac{1 \cdot \sin 35^\circ}{1,33} \rightarrow \beta = 25^\circ 32'$$

Vypočítali jsme si úhel lomu $\beta = 25^\circ 32'$, který budeme potřebovat pro výpočet s druhým užitím Snellova zákona, kde dosadíme $n_2 = 1,7$ (sklo) a $n_1 = 1$ (vzduch):

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_2 \cdot \sin \beta \rightarrow 1 \cdot \sin \alpha = 1,7 \cdot \sin 25^\circ 32' \rightarrow$$

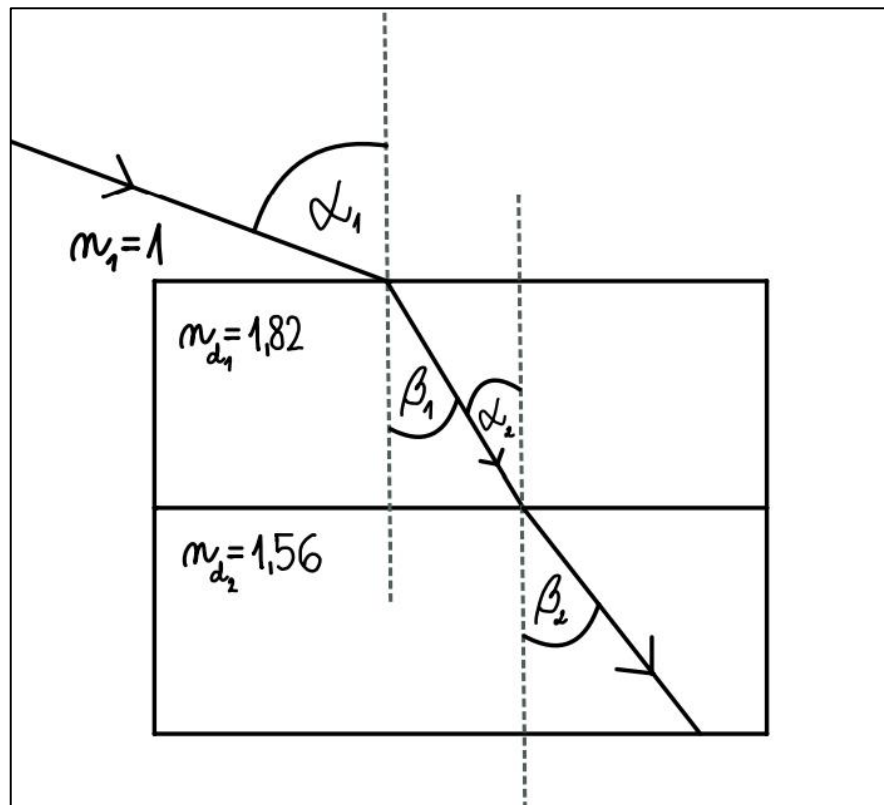
$$\rightarrow \sin \alpha = \frac{1,7 \cdot \sin 25^\circ 32'}{1} \rightarrow \alpha = 47^\circ 7'$$

Aby se úhly lomu rovnaly, musí paprsek světla dopadat pod úhlem $\alpha = 47^\circ 7'$.

3.4 PLANPARALELNÍ DESTIČKA

Příklad 4.1

Těsně na sebe jsou položeny dvě planparalelní skleněné desky o indexech lomu 1,82 a 1,56. Na první desku dopadá ze vzduchu paprsek pod úhlem 70° . Určete, pod jakým úhlem se paprsek zlomí na rozhraní obou desek.



Obrázek 17: Dvě vrstvy planparalelních destiček

ŘEŠENÍ: Když se podíváme na zadaný příklad trošku podrobněji, tak bychom si mohli uvědomit, že se jedná pouze o využití dvou po sobě jdoucích Snellových zákonů. Mohli bychom si příklad rozdělit na dvě části.

1. část: $n_1 = 1$ (vzduch), $n_2 = 1,82$ (sklo), $\alpha = 70^\circ$, dále:

$$n_1 \cdot \sin \alpha_1 = n_2 \cdot \sin \beta_1 \rightarrow \sin \beta_1 = \frac{n_1 \cdot \sin \alpha_1}{n_2} = \frac{1 \cdot \sin 70^\circ}{1,82} \rightarrow \beta_1 = 31^\circ 5'$$

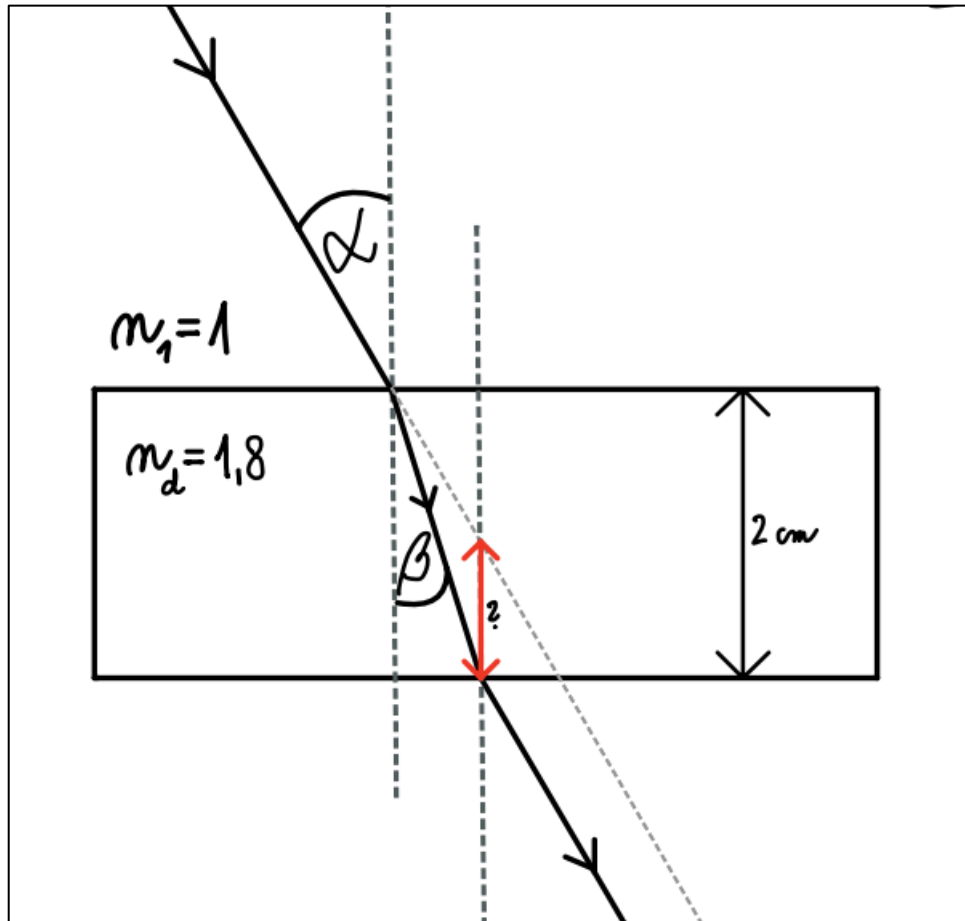
V 2. části využijeme jako vstupní úhel dopadu námi vypočítaný úhel lomu $\beta_1 = 31^\circ 5' = \alpha_2$, $n_2 = 1,82$ (vzduch), $n_3 = 1,56$ (sklo), dále:

$$n_2 \cdot \sin \alpha_2 = n_3 \cdot \sin \beta_2 \rightarrow \sin \beta_2 = \frac{n_2 \cdot \sin \alpha_2}{n_3} = \frac{1,82 \cdot \sin 31^\circ 5'}{1,56} \rightarrow \beta_2 = 37^\circ 2'$$

Na rozhraní obou desek se paprsek zlomí pod úhlem $\beta_2 = 37^\circ 2'$.

Příklad 4.2

Světelný paprsek dopadá na planoparalelní destičku o tloušťce 2 cm a indexu lomu 1,8. Vypočtete posunutí vystupujícího paprsku měřené kolmo ke stěnám desky pro úhly dopadu 30° , 89° a 1° .



Obrázek 18: Posun paprsku po průchodu destičkou

ŘEŠENÍ: Ve společné části zadání budeme mít neměnicí se tloušťku destičky $d = 2 \text{ cm}$ o indexu lomu $n_d = 1,8$

a) Úhel dopadu $\alpha = 30^\circ$, začneme úpravou a následně číselném dosazení do vztahu, můžeme tloušťku destičky dosadit rovnou v milimetrech, výsledek poté dostaneme v totožných jednotkách:

$$p = d \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n_d^2 - \sin^2 \alpha}} \right) = 20 \cdot \left(1 - \frac{\cos 30^\circ}{\sqrt{1,8^2 - \sin^2 30^\circ}} \right) = 10 \text{ mm}$$

b) Úhel dopadu $\alpha = 89^\circ$

$$p = d \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n_d^2 - \sin^2 \alpha}} \right) = 20 \cdot \left(1 - \frac{\cos 89^\circ}{\sqrt{1,8^2 - \sin^2 89^\circ}} \right) = 19,8 \text{ mm}$$

c) Úhel dopadu $\alpha = 1^\circ$ (pro malé úhly platí aproximovaný, zjednodušený vztah):

$$p = d \cdot \left(1 - \frac{1}{n_d} \right) = 20 \cdot \left(1 - \frac{1}{1,8} \right) = 8,9 \text{ mm}$$

Posunutí vystupujícího paprsku měřeného kolmo ke stěnám desky se s rostoucím úhlem zvětšuje.

Příklad 4.3

Zjistěte index lomu skleněné desky o tloušťce 4 mm, vyvolává-li při velmi malém úhlu dopadu posuv paprsku měřený kolmo k rovině desky 1,4 mm?

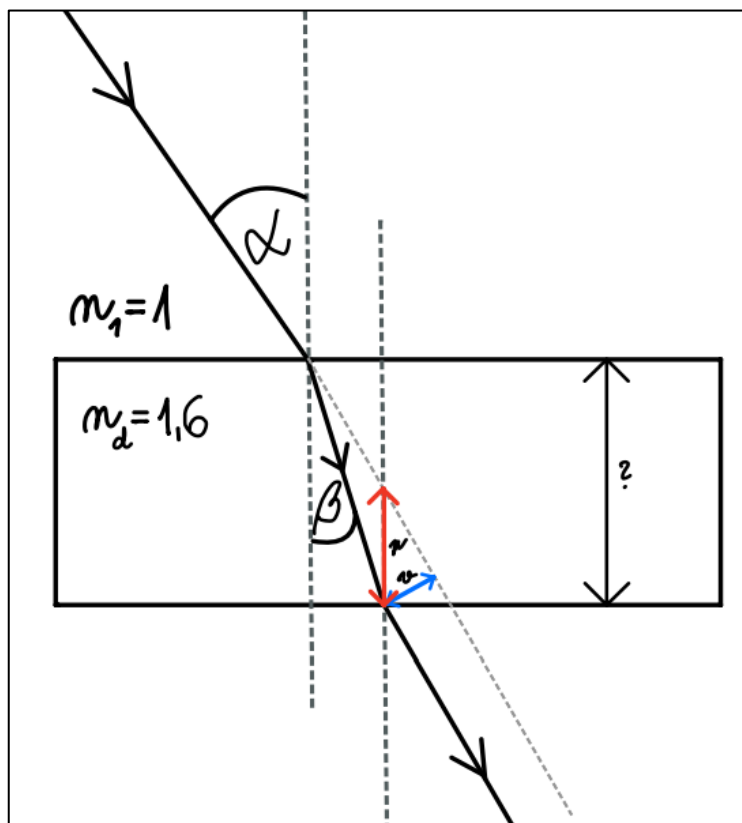
ŘEŠENÍ: Ze zadání známe tloušťku destičky $d = 4$ mm, posun paprsku kolmo k rovině značíme $p = 1,4$ mm, příklad vyřešíme pomocí následujícího vztahu pro velmi malé úhly:

$$p = d \cdot \left(1 - \frac{1}{n_d}\right) \rightarrow \frac{p}{d} = 1 - \frac{1}{n_d} \rightarrow \frac{1}{n_d} = \frac{d-p}{d} \rightarrow n_d = \frac{d}{d-p} = 1,54$$

Index lomu skleněné destičky je 1,54.

Příklad 4.4

Paprsek fialového světla dopadá na skleněnou destičku s indexem lomu 1,6 pod úhlem 35° . Jaká musí být tloušťka destičky, aby paprsek vycházel z destičky posunutý o 0,5 cm a) kolmo ke směru paprsku? b) kolmo k destičce?



Obrázek 19: Posuv paprsku po průchodu destičkou 2

ŘEŠENÍ: Ze zadání příkladu neznáme tloušťku destičky, využijeme vztah pro velké úhly, když víme úhel dopadu $\alpha = 35^\circ$, index lomu destičky $n_d = 1,6$

a) kolmo ke směru paprsku

$$v = d \cdot \sin \alpha \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n_d^2 - \sin^2 \alpha}}\right) \rightarrow d = \frac{v}{\sin \alpha \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n_d^2 - \sin^2 \alpha}}\right)} =$$

$$= \frac{0,5}{\sin 35^\circ \cdot \left(1 - \frac{\cos 35^\circ}{\sqrt{1,6^2 - \sin^2 35^\circ}}\right)} = 1,9 \text{ cm}$$

Pro posun o 0,5 cm kolmo ke směru paprsku vyšla tloušťka destičky 1,9 cm.

b) kolmo k destičce ($p = 0,5$ cm) je případ, který jsme počítali v příkladu 4.3, kde jsme využili následující vztah:

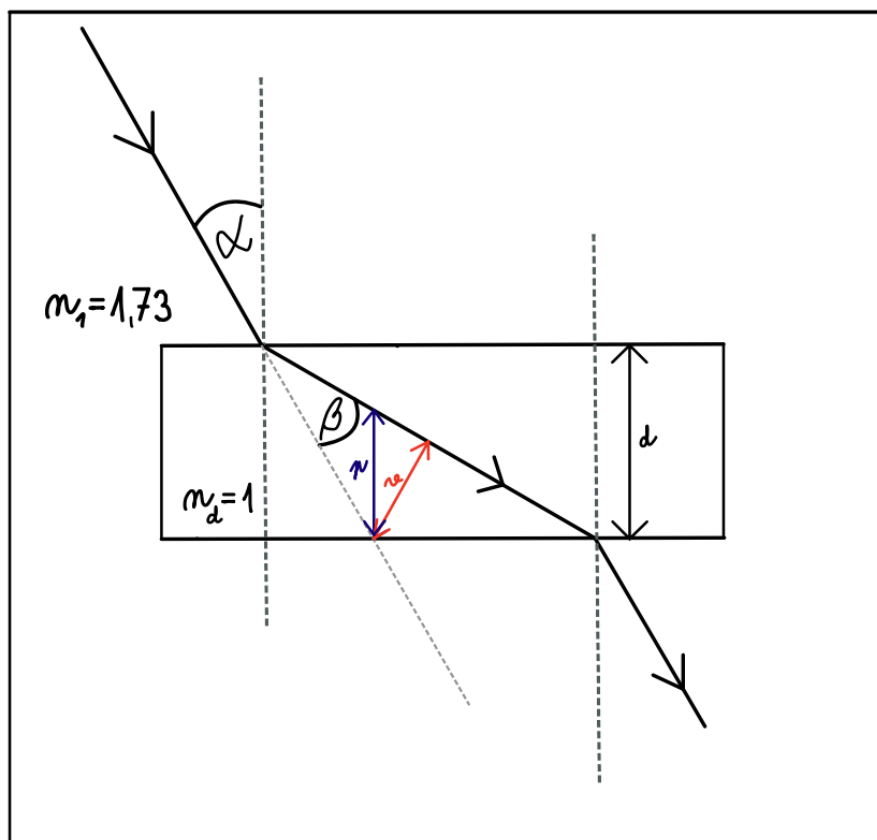
$$p = d \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n_d^2 - \sin^2 \alpha}}\right) \rightarrow d = \frac{p}{\left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n_d^2 - \sin^2 \alpha}}\right)} =$$

$$= \frac{0,5}{\left(1 - \frac{\cos 35^\circ}{\sqrt{1,6^2 - \sin^2 35^\circ}}\right)} = 1,1 \text{ cm}$$

Pro posun o 0,5 cm kolmo k destičce vyšla tloušťka destičky 1,1 cm.

Příklad 4.5

V bloku flintového skla o indexu lomu 1,73 je dutina tvaru planparalelní destičky o tloušťce 0,2 cm vyplněná vzduchem. Paprsek monochromatického světla dopadá na rozhraní sklo-vzduch pod úhlem 30° . Určete posuv paprsku po průchodu vzduchovou vrstvou.



Obrázek 20: Posuv paprsku po průchodu destičkou 3

ŘEŠENÍ: Zde je naším úkolem určit posuv paprsku po průchodu vzduchovou vrstvou, ale není zde specificky zadáno, zda je to kolmo k destičce nebo kolmo ke směru paprsku, budeme tedy řešit oba případy. Ze zadání známe index lomu prostředí, ze kterého se světlo šíří (flintové sklo) $n_1 = 1,73$, index lomu vrstvy (vzduchovou kapsu) $n_d = 1$, úhel dopadu $\alpha = 30^\circ$ a tloušťku vzduchové kapsy $d = 0,2$ cm:

a) řešení nejprve pro případ kolmo k destičce, zjistíme si úhel lomu na rozhraní sklo-vzduch:

$$n_1 \cdot \sin \alpha = n_d \cdot \sin \beta \rightarrow \sin \beta = \frac{n_1 \cdot \sin \alpha}{n_d} = \frac{1,73 \cdot \sin 30^\circ}{1} \rightarrow \beta = 59^\circ 52'$$

$$p = \frac{d}{\cos \beta} \cdot \sin(\alpha - \beta) = \frac{2}{\cos 59^\circ 52'} \cdot \sin(30^\circ - 59^\circ 52') = -2 \text{ mm}$$

$$p = d \cdot \left(1 - \frac{\cos \alpha}{\sqrt{n_d^2 - \sin^2 \alpha}} \right) = 0,2 \cdot \left(1 - \frac{\cos 30^\circ}{\sqrt{1^2 - \sin^2 30^\circ}} \right) = 1,1 \text{ cm}$$

b) řešení pro případ kolmo ke směru paprsku:

$$v = \sin \alpha \cdot \frac{d}{\cos \beta} \cdot \sin(\alpha - \beta) = \sin 30^\circ \cdot \frac{2}{\cos 59^\circ 52'} \cdot \sin(30^\circ - 59^\circ 52') = -1 \text{ mm}$$

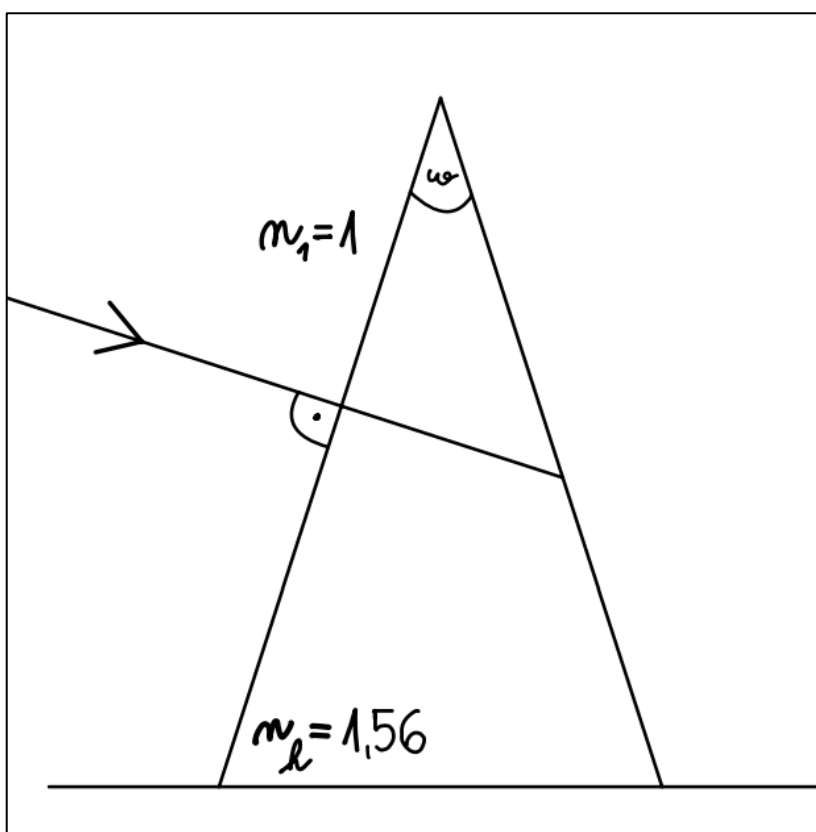
Dostali jsme výsledky v záporných hodnotách, což by nám samo o sobě nedávalo smysl, ale znaménko mínus nám zde u výsledku dává informaci o směru posunu od původního paprsku viz obrázek. V našem případě došlo k posunu s přechodem z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího, to znamená, že paprsek se po průchodu bude lámat směrem od kolmice a dojde tak k posunu v záporném smyslu směru.

Pro případ kolmo k destičce dojde k posunu o $p = 2 \text{ mm}$, pro případ kolmo ke směru paprsku o $v = 1 \text{ mm}$.

3.5 PRŮCHOD SVĚTLA OPTICKÝM HRANOLEM

Příklad 5.1

Světelný paprsek dopadá pod úhlem 0° na optický hranol vyrobený ze skla o indexu lomu 1,65. Určete, jakou nejmenší hodnotu musí mít úhel ω , aby nastal na druhém rozhraní úplný odraz, je-li hranol a) ve vzduchu b) ve vodě.



Obrázek 21: Úplný odraz

ŘEŠENÍ: V obou případech budeme postupovat totožně, pouze s rozdílným dosazením za indexy lomu vstupního a výstupního prostředí. Podmínkou je, že úhel dopadu na druhé lomné rozhraní musí být větší než mezní úhel. Následně ze vztahu pro deviaci víme, že úhel dopadu paprsku na vnitřní lámavou hranu je roven lámavému úhlu ω , proto platí rovnice:

$$\sin \omega = \frac{n_2}{n_h}$$

Kde n_2 je index lomu prostředí ze kterého vstupujeme do optického hranolu a n_h je index lomu optického hranolu. Po dosazení:

$$\sin \omega = \frac{n_2}{n_h} = \frac{1}{1,65} \rightarrow \omega = 37^\circ 18'$$

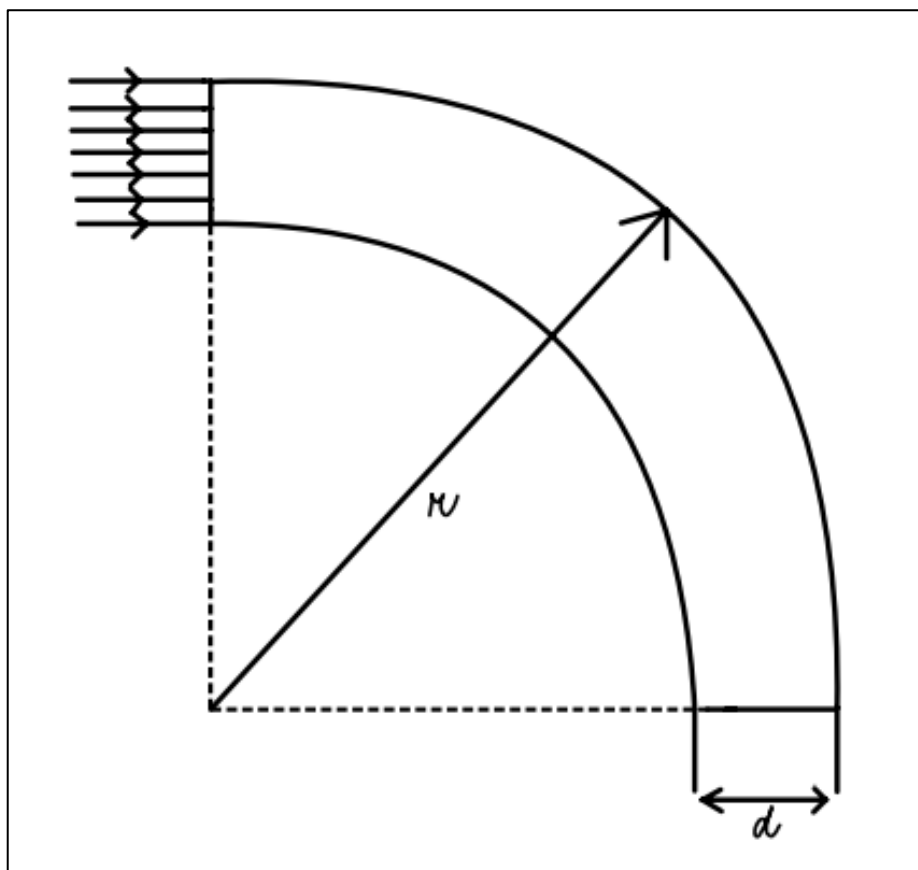
Pro druhý případ dosadíme místo indexu lomu vzduchu za n_2 index lomu vody.

$$\sin \omega = \frac{n_2}{n_h} = \frac{1,33}{1,65} \rightarrow \omega = 53^\circ 42'$$

Z výsledků vidíme, že pro přechod mezi prostředními o blízkých indexech lomu lámavý úhel hranolu se zvětšuje. Pro úplný odraz je zapotřebí překonat úhel mezní, tedy pro vodu a sklo $\omega = 53^\circ 42'$, pro vzduch a sklo $\omega = 37^\circ 18'$.

Příklad 5.2

Tenká skleněná tyčinka s indexem lomu 1,5 je ohnuta do oblouku tak, že její vnější povrch má poloměr r . V jakém poměru musí být nejmenší poloměr r zakřivení tyčinky k jejímu průměru d , aby světelné paprsky dopadající kolmo na plochu jejího příčného řezu nevystupovaly bočními stěnami z tyčinky?



Obrázek 22: Skleněná tyčinka

ŘEŠENÍ: Největší zakřivení může mít skleněná tyčinka v případě, že světelný paprsek nejbližší středu křivosti dopadá na rozhraní skla a vzduchu pod mezním úhlem, tedy úhel lomu $\beta = 90^\circ$. Můžeme tedy dosadit do Snellova zákona, kde známe $n_1 = 1,5$ (sklo), $n_2 = 1$ (vzduch):

$$\sin \alpha \cdot n_1 = \sin 90^\circ \cdot 1 \rightarrow \sin \alpha = \frac{1}{n_1}$$

Dále v závislosti na minimálním průměru a poloměru platí pro úhel dopadu:

$$\sin \alpha = \frac{r - d}{r}$$

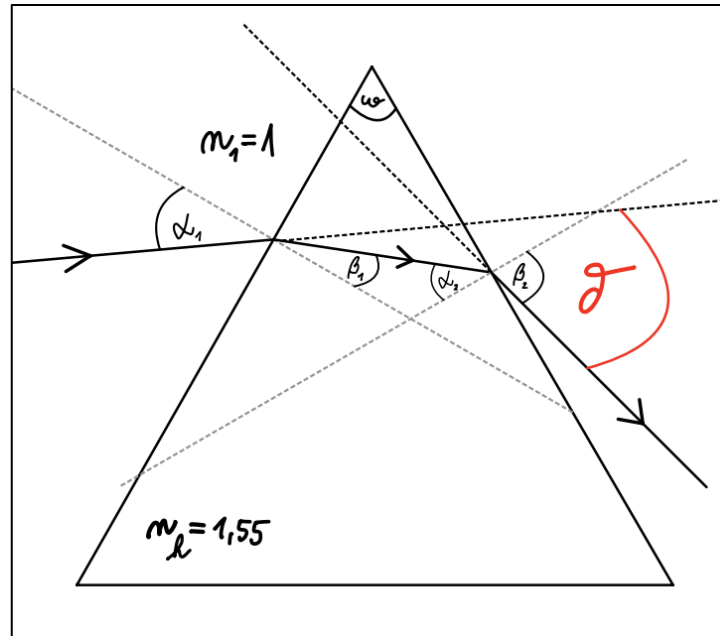
Po úpravě získáme námi hledaný poloměr zakřivení r a průměru d :

$$\frac{1}{n_2} = \frac{r-d}{r} \rightarrow r = n_2 \cdot (r-d) \rightarrow r = n_2 \cdot r - n_2 \cdot d \rightarrow n_2 \cdot d = n_2 \cdot r - r \rightarrow$$
$$\rightarrow n_2 \cdot d = r \cdot (n_2 - 1) \rightarrow \frac{r}{d} = \frac{n_2}{n_2 - 1} = \frac{1,5}{1,5 - 1} = \frac{3}{1}$$

Poloměr zakřivení tyčinky musí být v poměru 3:1 k jejímu průměru, aby docházelo k úplnému odrazu na rozhraní sklo-vzduch a paprsek tak nevystupoval bočními stěnami z tyčinky.

Příklad 5.3

Jak se odchýlí monochromatický paprsek světla dopadající pod úhlem 35° na skleněný hranol s indexem lomu 1,55 o lámavém úhlu 60° po svém průchodu hranolem?



Obrázek 23: Průchod monochromatického paprsku hranolem 1

ŘEŠENÍ: Zde budeme řešit postupem pro výpočet průchodu paprsku optickým hranolem, nejprve začneme průchodem na rozhraní vzduch-sklo.

(do hranolu) pomocí Snellova zákona následovně:

$$\sin \alpha_1 \cdot n_1 = \sin \beta_1 \cdot n_2 \rightarrow \sin \beta_1 = \frac{\sin \alpha_1 \cdot n_1}{n_2} = \frac{\sin 35^\circ \cdot 1}{1,55} \rightarrow \beta_1 = 21^\circ 43'$$

Nyní jsme získali úhel lomu po průchodu do optického hranolu, nyní si musíme pomocí součtu úhlů v trojúhelníku dopočítat úhel dopadu na druhé rozhraní a získat tak vstupní úhel pro přechod z hranolu zpět do vzduchu.

$$\omega = \beta_1 + \alpha_2 \rightarrow \alpha_2 = \omega - \beta_1 = 60^\circ - 21^\circ 43' = 38^\circ 17'$$

Nyní využijeme opět Snellova zákona pro přechod sklo-vzduch.

$$\sin \alpha_2 \cdot n_2 = \sin \beta_2 \cdot n_1 \rightarrow \sin \beta_2 = \frac{\sin \alpha_2 \cdot n_2}{n_1} = \frac{\sin 38^\circ 17' \cdot 1,55}{1} \rightarrow \beta_2 = 73^\circ 48'$$

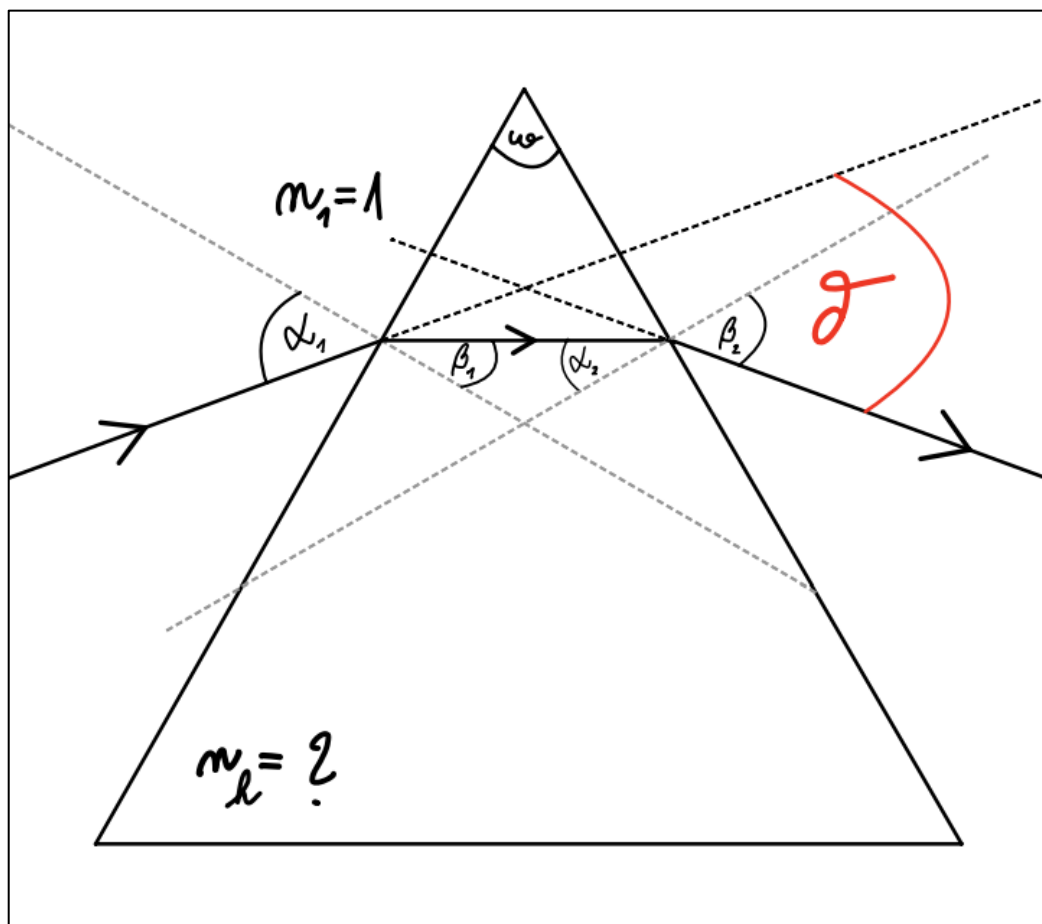
Pro deviaci (odchylku) paprsků α_1 a β_2 platí:

$$\delta = \alpha_1 + \beta_2 - \omega = 35^\circ + 73^\circ 48' - 60^\circ = 48^\circ 48'$$

Monochromatický paprsek světla se odchýlí o $48^{\circ}48'$.

Příklad 5.4

Skleněný hranol o lámavém úhlu 50° má na vzduchu minimální deviaci 35° . Určete jeho minimální deviaci ve vodě s indexem lomu 1,33.



Obrázek 24: Minimální deviace

ŘEŠENÍ: Ze zadání známe lámavý úhel optického hranolu $\omega = 50^{\circ}$, minimální deviaci na vzduchu $\delta_{min} = 35^{\circ}$, dále známe index lomu vzduchu $n_1 = 1$. Potřebujeme tedy nejprve zjistit index lomu optického hranolu vyrobeného ze skla, využijeme následujících vztahů:

$$\sin \alpha_1 \cdot n_1 = \sin \beta_1 \cdot n_h$$

$$\delta_{min} = \alpha_1 + \beta_2 - \omega$$

Pro minimální deviaci musí být úhly α_1 a β_2 stejně velké, budeme tedy počítat pouze s α_1 , proto platí:

$$\delta_{min} = 2 \cdot \alpha_1 - \omega$$

Zde si vyjádříme úhel α_1 pro využití do Snellova zákona.

$$\alpha_1 = \frac{\delta_{min} + \omega}{2}$$

Dále ale neznáme úhel lomu β_1 , který získáme ze součtu úhlů v trojúhelníku ze vztahu:

$$\omega = \beta_1 + \alpha_2$$

Ovšem stejně jako se rovnaly úhly α_1 a β_2 , tak se musí i zde rovnat úhly α_2 a β_1 , proto můžeme si vyjádřit úhel β_1 jako:

$$\omega = \beta_1 + \beta_1 \rightarrow \beta_1 = \frac{\omega}{2}$$

Dosadíme a vypočteme index lomu optického hranolu:

$$\sin \frac{\delta_{min} + \omega}{2} \cdot n_1 = \sin \frac{\omega}{2} \cdot n_h \rightarrow n_h = \frac{\sin \frac{\delta_{min} + \omega}{2} \cdot n_1}{\sin \frac{\omega}{2}} = 1,6$$

Index lomu optického skleněného hranolu je 1,6. Nyní si můžeme ze vztahu pro minimální deviace a Snellova zákona dát dohromady případ ponoření hranolu do vody, kde se změní vstupní hodnota proměnné $n_1 = 1,33$, tedy:

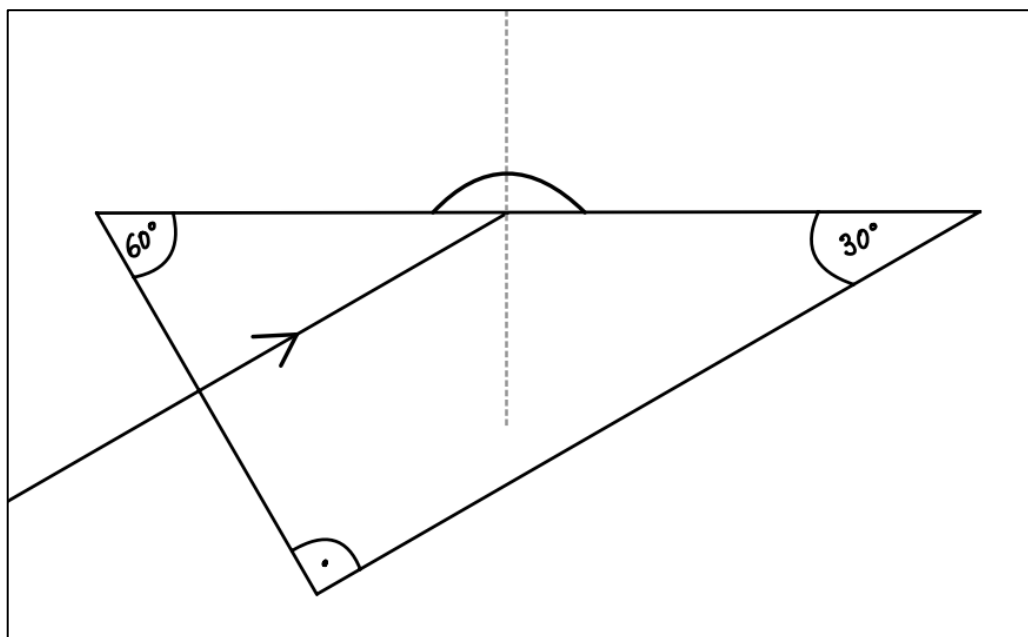
$$\sin \alpha_1 \cdot n_1 = \sin \beta_1 \cdot n_h \rightarrow \sin \alpha_1 = \frac{\sin \beta_1 \cdot n_h}{n_1} = \frac{\sin \frac{\omega}{2} \cdot n_h}{n_1}$$

$$\delta_{min} = 2 \cdot \alpha_1 - \omega = 2 \cdot \sin^{-1} \left(\frac{\sin \frac{\omega}{2} \cdot n_h}{n_1} \right) - \omega = 11^\circ 6'$$

Minimální deviace optického hranolu ve vodě je pro zadané parametry na vzduchu $11^\circ 6'$.

Příklad 5.5

Monochromatický paprsek světla dopadá kolmo na menší odvěsnou stěnu hranolu s indexem lomu 1,57, jehož úhly jsou 30° , 60° a 90° . Na přeponové stěně hranolu je v místě dopadu paprsku kapka neznámé kapaliny. Určete index lomu kapaliny, jestliže úhel dopadu paprsku na přeponovou stěnu byl úhlem mezním.



Obrázek 25: Index lomu neznámé kapaliny

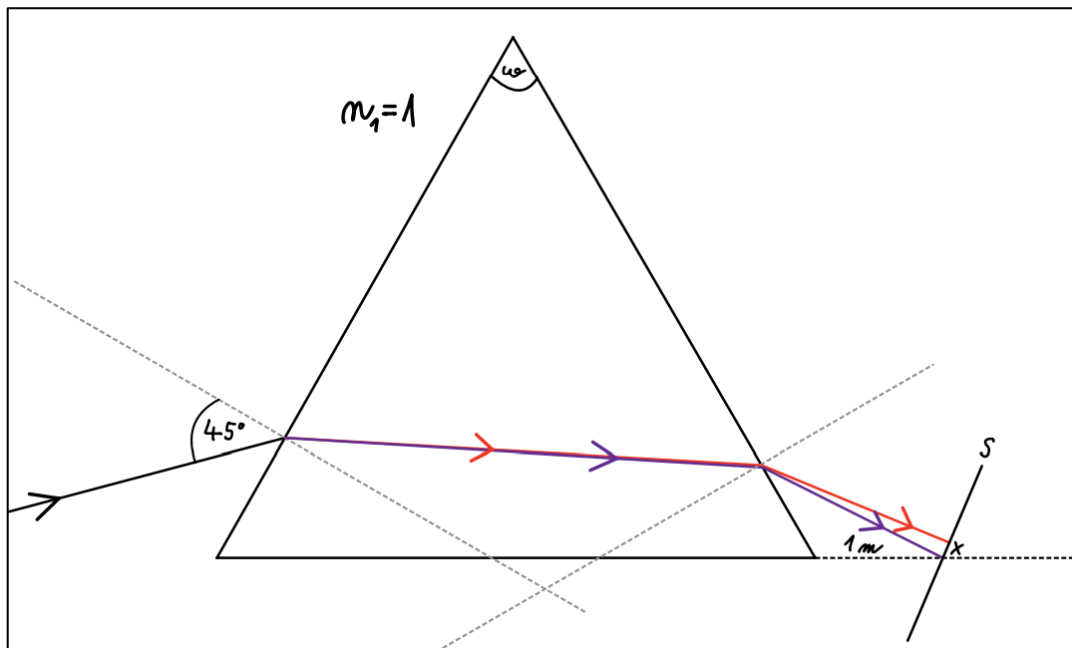
ŘEŠENÍ: Nejprve si pojďme rozebrat situaci s pomocí náčrtku, kde známe index lomu optického hranolu $n_h = 1,57$, úhel lomu je mezní úhel, tedy $\beta = 90^\circ$. Významný ze zadaných úhlů pro nás bude 60° , protože pod tímto úhlem bude dopadat monochromatický paprsek světla na rozhraní hranolu a kapky neznámé kapaliny, můžeme tedy sestavit rovnice s využitím Snellova zákona takto:

$$n_h \cdot \sin \alpha = n_k \cdot \sin \beta \rightarrow n_k = \frac{n_h \cdot \sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1,57 \cdot \sin 60^\circ}{\sin 90^\circ} = 1,36$$

Výsledný indexu lomu kapaliny porovnáme s číselnými hodnotami z tabulek, pokusíme se určit kapalinu, o kterou se jedná (etylalkohol).

Příklad 5.6

Jak široké spektrum vytvoří skleněný hranol, jehož index lomu pro červené světlo je 1,51 a pro fialové světlo je 1,53. Určete pro případy, kdy světlo dopadá pod úhly 45° a 60° , přičemž lámavý úhel hranolu je 60° a stínítko je postavené kolmo na červené paprsky ve vzdálenosti 1 m od hranolu.



Obrázek 26: Šířka barevného spektra

ŘEŠENÍ: Příklad budeme řešit stejně pro červené a fialové světlo, pouze se nám bude lišit dosazení do vztahů, začneme tedy první rovnicí, kde si vypočítáme první úhel lomu na rozhraní vzduchu a hranolu, tedy:

a) Pro úhel dopadu 45° :

$$\sin \alpha_1 \cdot n_1 = \sin \beta_{\check{c}1} \cdot n_2 \rightarrow \sin \beta_{\check{c}1} = \frac{\sin \alpha_1 \cdot n_1}{n_2} = \frac{\sin 45^\circ \cdot 1}{1,51} \rightarrow \beta_{\check{c}1} = 27^\circ 55'$$

$$\sin \alpha_1 \cdot n_1 = \sin \beta_{f1} \cdot n_2 \rightarrow \sin \beta_{f1} = \frac{\sin \alpha_1 \cdot n_1}{n_2} = \frac{\sin 45^\circ \cdot 1}{1,53} \rightarrow \beta_{f1} = 27^\circ 31'$$

Nyní jsme získali úhel lomu po průchodu do optického hranolu, nyní si musíme pomocí součtu úhlů v trojúhelníku dopočítat úhel dopadu na druhé rozhraní a získat tak vstupní úhel pro přechod z hranolu zpět do vzduchu.

$$\omega = \beta_{\check{c}1} + \alpha_{\check{c}2} \rightarrow \alpha_{\check{c}2} = \omega - \beta_{\check{c}1} = 60^\circ - 27^\circ 55' = 32^\circ 5'$$

$$\omega = \beta_{f1} + \alpha_{f2} \rightarrow \alpha_{f2} = \omega - \beta_{f1} = 60^\circ - 27^\circ 31' = 32^\circ 29'$$

Nyní využijeme opět Snellova zákona pro přechod sklo-vzduch.

$$\sin \alpha_{\check{c}2} \cdot n_2 = \sin \beta_{\check{c}2} \cdot n_1 \rightarrow \sin \beta_{\check{c}2} = \frac{\sin \alpha_{\check{c}2} \cdot n_2}{n_1} = \frac{\sin 32^\circ 5' \cdot 1,51}{1} \rightarrow$$

$$\rightarrow \beta_{\check{c}2} = 53^\circ 19'$$

$$\sin \alpha_{f2} \cdot n_2 = \sin \beta_{f2} \cdot n_1 \rightarrow \sin \beta_{f2} = \frac{\sin \alpha_{f2} \cdot n_2}{n_1} = \frac{\sin 32^\circ 29' \cdot 1,53}{1} \rightarrow$$

$$\rightarrow \beta_{f2} = 55^\circ 15'$$

Pro vzdálenost 1 metr od hranolu vypočítáme rozdíl pomocí goniometrické funkce tangens, kde:

$$x = \tan(\beta_{f2} - \beta_{\check{c}2}) = 3,4 \text{ cm}$$

Optický hranol pod úhlem 45° vytvoří barevné spektrum široké 3,4 cm.

b) Zrychleně jen výpočty pro úhel dopadu 60° :

$$\sin \alpha_1 \cdot n_1 = \sin \beta_{\check{c}1} \cdot n_2 \rightarrow \sin \beta_{\check{c}1} = \frac{\sin \alpha_1 \cdot n_1}{n_2} = \frac{\sin 60^\circ \cdot 1}{1,51} \rightarrow \beta_{\check{c}1} = 34^\circ 59'$$

$$\sin \alpha_1 \cdot n_1 = \sin \beta_{f1} \cdot n_2 \rightarrow \sin \beta_{f1} = \frac{\sin \alpha_1 \cdot n_1}{n_2} = \frac{\sin 60^\circ \cdot 1}{1,53} \rightarrow \beta_{f1} = 34^\circ 28'$$

$$\omega = \beta_{\check{c}1} + \alpha_{\check{c}2} \rightarrow \alpha_{\check{c}2} = \omega - \beta_{\check{c}1} = 60^\circ - 34^\circ 59' = 25^\circ 1'$$

$$\omega = \beta_{f1} + \alpha_{f2} \rightarrow \alpha_{f2} = \omega - \beta_{f1} = 60^\circ - 34^\circ 28' = 25^\circ 32'$$

$$\sin \alpha_{\check{c}2} \cdot n_2 = \sin \beta_{\check{c}2} \cdot n_1 \rightarrow \sin \beta_{\check{c}2} = \frac{\sin \alpha_{\check{c}2} \cdot n_2}{n_1} = \frac{\sin 25^\circ 1' \cdot 1,51}{1} \rightarrow$$

$$\rightarrow \beta_{\check{c}2} = 39^\circ 41'$$

$$\sin \alpha_{f2} \cdot n_2 = \sin \beta_{f2} \cdot n_1 \rightarrow \sin \beta_{f2} = \frac{\sin \alpha_{f2} \cdot n_2}{n_1} = \frac{\sin 25^\circ 32' \cdot 1,53}{1} \rightarrow$$

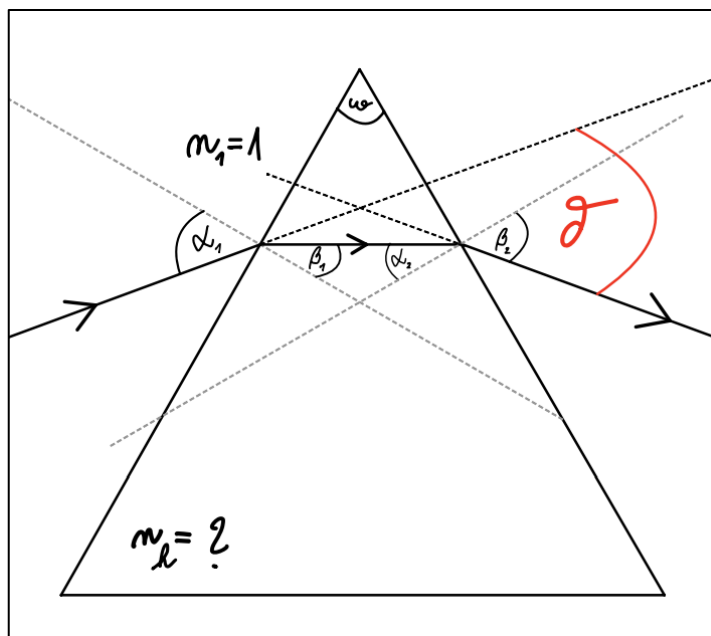
$$\rightarrow \beta_{f2} = 41^\circ 15'$$

$$x = \tan(\beta_{f2} - \beta_{\check{c}2}) = 2,7 \text{ cm}$$

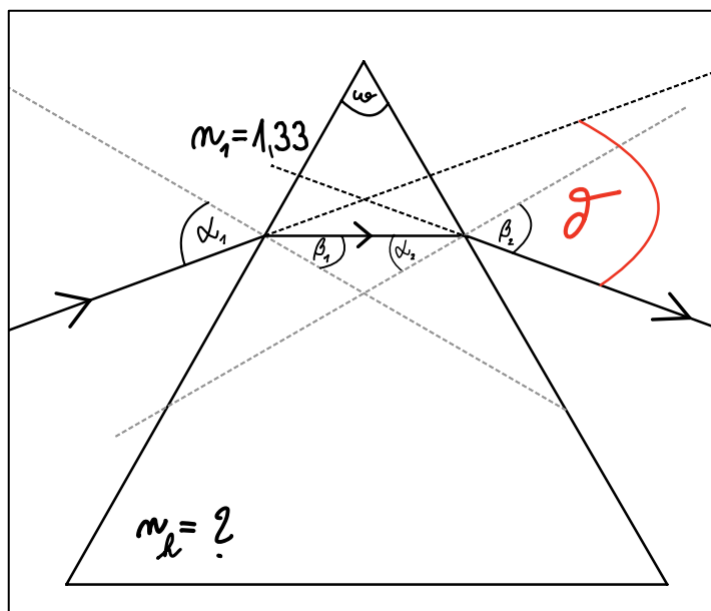
Optický hranol pod úhlem 60° vytvoří barevné spektrum široké 2,7 cm.

Příklad 5.7

Při žlutém sodíkovém světle byla v hranolu s lámavým úhlem 60° změřena minimální deviace 39° . Určete index lomu hranolu, je-li obklopen a) vzduchem b) vodou.



Obrázek 27: Výpočet indexu lomu hranolu 1a



Obrázek 28: Výpočet indexu lomu hranolu 1b

ŘEŠENÍ: Ze zadání známe lámavý úhel optického hranolu $\omega = 60^\circ$, minimální deviaci $\delta_{min} = 39^\circ$, dále známe index lomu vzduchu $n_1 = 1$ / ve vodě index lomu $n_v = 1,33$.

Potřebujeme tedy nejprve zjistit index lomu optického hranolu, využijeme následujících vztahů:

$$\sin \alpha_1 \cdot n_1 = \sin \beta_1 \cdot n_h$$

$$\delta_{min} = \alpha_1 + \beta_2 - \omega$$

Pro minimální deviaci musí být úhly α_1 a β_2 stejně velké, budeme tedy počítat pouze s α_1 , proto platí:

$$\delta_{min} = 2 \cdot \alpha_1 - \omega$$

Zde si vyjádříme úhel α_1 pro využití do Snellova zákona.

$$\alpha_1 = \frac{\delta_{min} + \omega}{2}$$

Dále ale neznáme úhel lomu β_1 , který získáme ze součtu úhlů v trojúhelníku ze vztahu:

$$\omega = \beta_1 + \alpha_2$$

Ovšem stejně jako se rovnaly úhly α_1 a β_2 , tak se musí i zde rovnat úhly α_2 a β_1 , proto můžeme si vyjádřit úhel β_1 jako:

$$\omega = \beta_1 + \beta_1 \rightarrow \beta_1 = \frac{\omega}{2}$$

a) Dosadíme a vypočteme index lomu optického hranolu na vzduchu:

$$\sin \frac{\delta_{min} + \omega}{2} \cdot n_1 = \sin \frac{\omega}{2} \cdot n_h \rightarrow n_h = \frac{\sin \frac{\delta_{min} + \omega}{2} \cdot 1}{\sin \frac{\omega}{2}} = 1,52$$

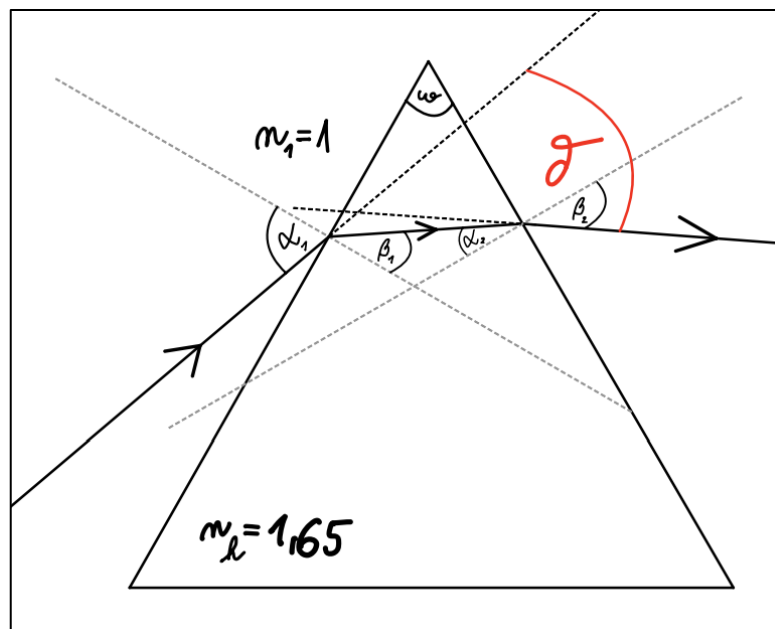
b) Dosadíme a vypočteme index lomu optického hranolu ve vodě:

$$\sin \frac{\delta_{min} + \omega}{2} \cdot n_1 = \sin \frac{\omega}{2} \cdot n_h \rightarrow n_h = \frac{\sin \frac{\delta_{min} + \omega}{2} \cdot 1,33}{\sin \frac{\omega}{2}} = 2,02$$

Indexy lomu optického hranolu jsou pro vzduch 1,52 a pro vodu 2,02.

Příklad 5.8

Určete deviaci monochromatického paprsku prošlého optickým hranolem o lámavém úhlu 55° a indexu lomu 1,65, dopadá-li paprsek na první lámavou plochu pod úhlem 70° .



Obrázek 29: Výpočet deviace

ŘEŠENÍ: Zde budeme řešit opět postupem obdobně jako v příkladě 5.4, pro výpočet průchodu paprsku optickým hranolem, nejprve začneme průchodem na rozhraní vzduch-sklo (do hranolu) pomocí Snellova zákona následovně:

$$\sin \alpha_1 \cdot n_1 = \sin \beta_1 \cdot n_2 \rightarrow \sin \beta_1 = \frac{\sin \alpha_1 \cdot n_1}{n_2} = \frac{\sin 70^\circ \cdot 1}{1,65} \rightarrow \beta_1 = 34^\circ 42'$$

Nyní jsme získali úhel lomu po průchodu do optického hranolu, nyní si musíme pomocí součtu úhlů v trojúhelníku dopočítat úhel dopadu na druhé rozhraní a získat tak vstupní úhel pro přechod z hranolu zpět do vzduchu.

$$\omega = \beta_1 + \alpha_2 \rightarrow \alpha_2 = \omega - \beta_1 = 55^\circ - 34^\circ 42' = 20^\circ 18'$$

Nyní využijeme opět Snellova zákona pro přechod sklo-vzduch.

$$\sin \alpha_2 \cdot n_2 = \sin \beta_2 \cdot n_1 \rightarrow \sin \beta_2 = \frac{\sin \alpha_2 \cdot n_2}{n_1} = \frac{\sin 20^\circ 18' \cdot 1,65}{1} \rightarrow \beta_2 = 34^\circ 55'$$

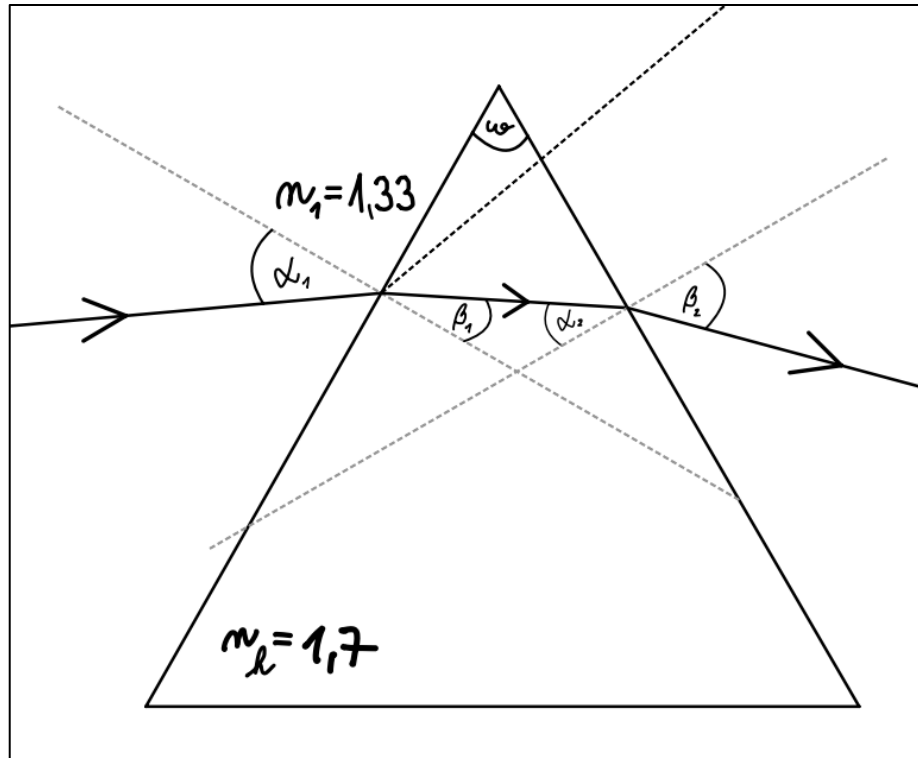
Pro deviaci (odchylku) paprsků α_1 a β_2 platí:

$$\delta = \alpha_1 + \beta_2 - \omega = 70^\circ + 34^\circ 55' - 60^\circ = 44^\circ 55'$$

Monochromatický paprsek světla se odchýlí o $44^\circ 55'$.

Příklad 5.9

Pod jakým úhlem dopadá monochromatický paprsek světla na optický hranol ($n=1,7$) s lámavým úhlem 60° ponořený do vody, je-li výstupní úhel z hranolu 45° .



Obrázek 30: Průchod monochromatického paprsku hranolem 2

ŘEŠENÍ: Tento příklad budeme počítat podobným způsobem jako jsme zvyklí, pouze z druhé strany. Začneme tedy vztahem s využitím Snellova zákona, kde známe $\beta_2 = 32^\circ$, $n_v = 1,33$ (voda) a $n_h = 1,7$, tedy:

$$\sin \alpha_2 \cdot n_h = \sin \beta_2 \cdot n_v \rightarrow \sin \alpha_2 = \frac{\sin \beta_2 \cdot n_v}{n_h} = \frac{\sin 32^\circ \cdot 1,33}{1,7} \rightarrow \alpha_2 = 33^\circ 35'$$

Nyní si můžeme dopočítat výstupní úhel β_1 , protože známe $\alpha_2 = 33^\circ 35'$ a $\omega = 60^\circ$

$$\omega = \beta_1 + \alpha_2 \rightarrow \beta_1 = \omega - \alpha_2 = 60^\circ - 33^\circ 35' = 26^\circ 25'$$

Známe úhel lomu $\beta_1 = 26^\circ 25'$, index lomu obou prostředí $n_v = 1,33$ (voda) a $n_h = 1,7$ a můžeme dosadit znova do Snellova zákona, tedy:

$$\sin \alpha_1 \cdot n_v = \sin \beta_1 \cdot n_h \rightarrow \sin \alpha_1 = \frac{\sin \beta_1 \cdot n_h}{n_v} = \frac{\sin 26^\circ 25' \cdot 1,7}{1,33} \rightarrow \alpha_1 = 34^\circ 39'$$

Monochromatický paprsek dopadá na optický hranol pod úhlem $\alpha_1 = 34^\circ 39'$.

3.6 ZRCADLA

Příklad 6.1

Duté zrcadlo má ohniskovou vzdálenost 30 cm. Je-li zvětšení $Z = -3$, určete poloměr křivosti zrcadla, vzdálenost předmětu od vrcholu zrcadla a vzdálenost obrazu od vrcholu zrcadla.

ŘEŠENÍ: Nejprve můžeme začít vztahem pro poloměr křivosti zrcadla, pro který platí:

$$r = 2 \cdot f = 2 \cdot 30 = 60 \text{ cm}$$

Pro výpočet vzdálenosti předmětu (vzoru) a obrazu využijeme vztahy pro zvětšení a zobrazovací rovnici pro duté zrcadlo:

$$Z = -\frac{a'}{a} \qquad \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}$$

Po dosazení do zvětšovací rovnice a následném vyjádření závislosti a' na a , dostáváme:

$$-3 = -\frac{a'}{a} \rightarrow a' = 3 \cdot a \rightarrow \frac{1}{a} + \frac{1}{3 \cdot a} = \frac{1}{30} \rightarrow 30 + 10 = a \rightarrow a = 40 \text{ cm}$$

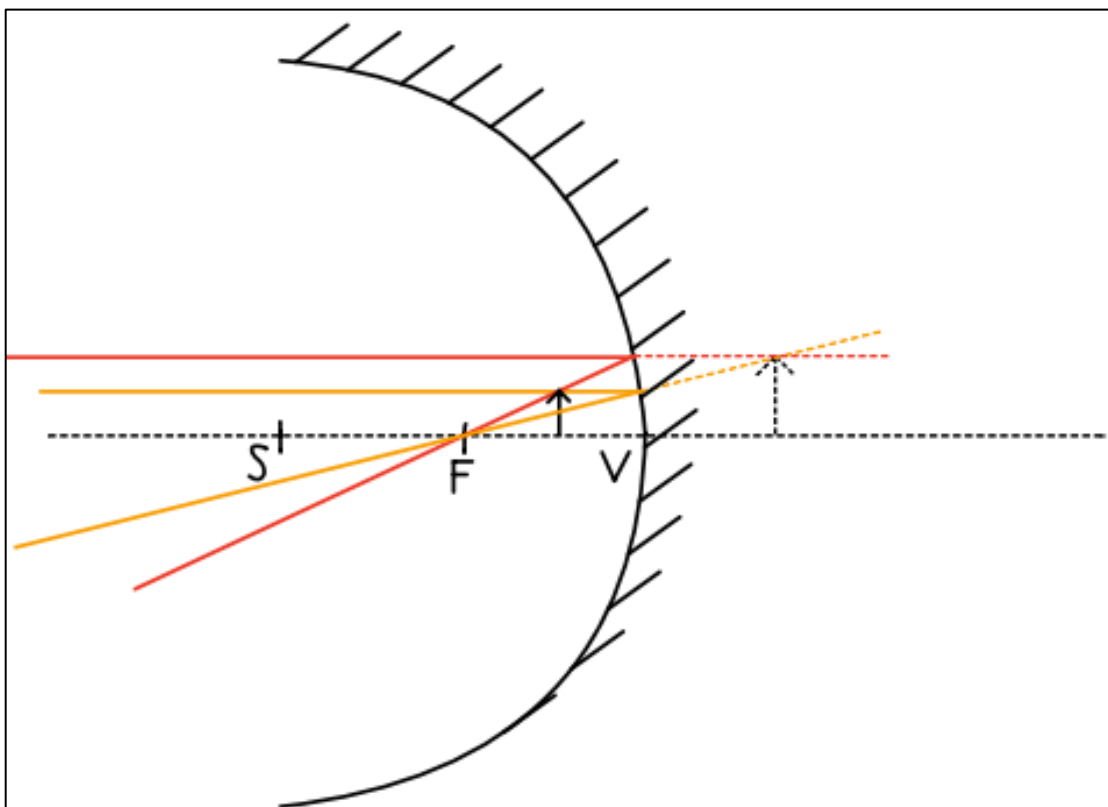
Po dosazení získáme a' :

$$a' = 3 \cdot a = 3 \cdot 40 = 120 \text{ cm}$$

Poloměr křivosti dutého zrcadla je $r = 60$ cm, vzdálenost předmětu od zrcadla $a = 40$ cm a vzdálenost obrazu od zrcadla $a' = 120$ cm.

Příklad 6.2

Určete polohu obrazu předmětu výšky 5 cm a jeho zvětšení, je-li předmět ve vzdálenosti 10 cm od a) dutého zrcadla b) vypuklého zrcadla (obě mají stejnou ohniskovou vzdálenost 20 cm). Dále určete vlastnosti obrazu a ověřte konstrukci.



Obrázek 31: Duté zrcadlo 1

ŘEŠENÍ: Ze zobrazovací rovnice si nejprve vyjádříme a následně vypočteme vzdálenost obrazu od vrcholu zrcadla, tedy:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \rightarrow f \cdot a' + f \cdot a = a \cdot a' \rightarrow f \cdot a' - a \cdot a' = -f \cdot a \rightarrow$$

$$\rightarrow a' = -\frac{f \cdot a}{f - a} = -\frac{20 \cdot 10}{20 - 10} = -20 \text{ cm}$$

Následně bude pokračovat výpočtem zvětšení a velikostí obrazu ze vztahů:

$$Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = -\frac{-20}{10} = +2$$

$$y' = 2 \cdot y = 10 \text{ cm}$$

Vzdálenost obrazu od vrcholu zrcadla je $a' = 20$ cm, jeho velikost je dvojnásobná do stejné poloroviny, jako předmět (vzor) a je vysoký $y' = 10$ cm.

Příklad 6.3

Dentista používá při prohlídce zubů pacientů duté zrcadlo. Navrhněte ohniskovou vzdálenost takového zrcadla tak, aby obraz byl třikrát větší než předmět a předpokládejte nejmenší vzdálenost zubu od zrcadla 12,5 mm.

ŘEŠENÍ: Začneme opět vyjádřením zvětšení ve vztahu s dosazením do zobrazovací rovnice, tedy:

$$Z = -\frac{a'}{a} \rightarrow 3 = -\frac{a'}{a} \rightarrow a' = -3 \cdot a = -3 \cdot 12,5 = -3,75 \text{ cm}$$

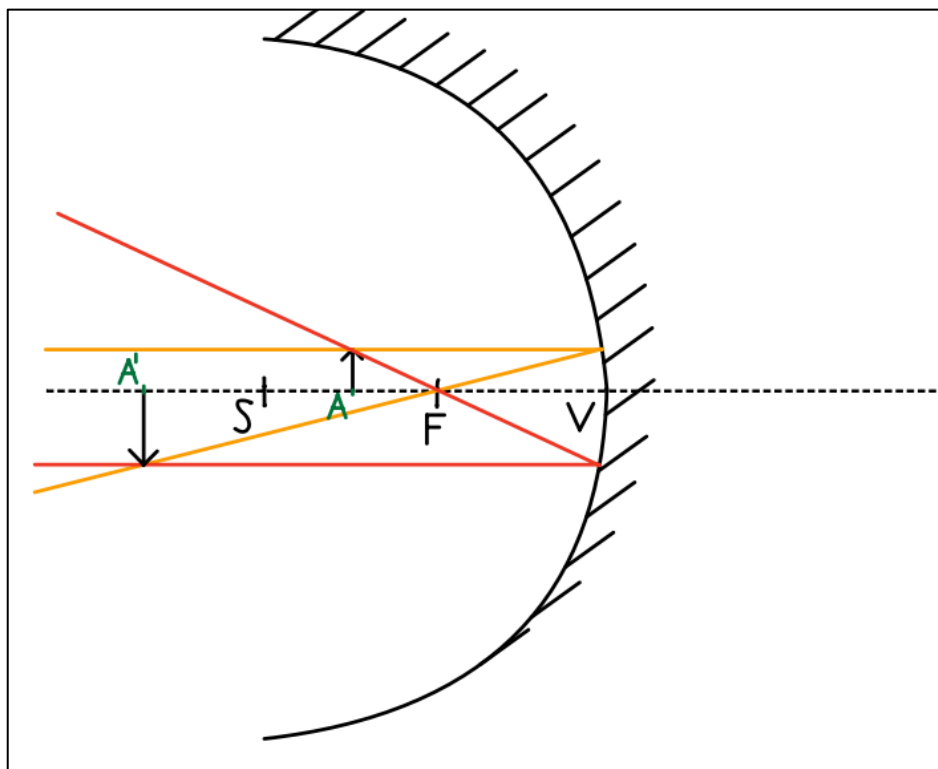
Po dosazení do zobrazovací rovnice:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{1}{1,25} + \frac{1}{-3,75} = \frac{1}{f} \rightarrow f = 1,9 \text{ cm}$$

Obrazová ohnisková vzdálenost pro duté zrcadlo je 1,9 cm.

Příklad 6.4

Jaká je vzdálenost předmětu od vrcholu dutého zrcadla a jaká je jeho velikost, je-li poloměr křivosti zrcadla 16 cm a vytváří-li se obraz o velikosti 6 cm ve vzdálenosti 16 cm od F. Ověřte konstrukcí.



Obrázek 32: Duté zrcadlo 2

ŘEŠENÍ: Zde si ukážeme řešení pro porovnání s využitím Newtonovy metody, kde využijeme následujících vztahů:

$$x \cdot x' = f^2 \rightarrow x = \frac{f^2}{x'} \rightarrow f = \frac{r}{2} \rightarrow x = \frac{16^2}{16} = 4 \text{ cm}$$

$$a = x + f = 4 + 8 = 12 \text{ cm}$$

$$Z = -\frac{f}{x} = -\frac{8}{4} = -2$$

$$Z = \frac{y'}{y} \rightarrow y = \frac{y'}{Z} = \frac{6}{-2} = -3 \text{ cm}$$

Poznámka: V Newtonovo metodě platí pro vzdálenosti:

$$x' = |A'F|, \quad x = |AF|, \quad f = |FV|, \quad r = |SV|, \quad a = |AF| + |FV|$$

Vzdálenost předmětu od vrcholu zrcadla je 12 cm a jeho velikost je 3 cm.

Příklad 6.5

Bodový zdroj světla je umístěn na optické ose 10 cm před V dutého zrcadla. Jeho obraz je vzdálen 15 cm od V. Určete polohu obrazu, přiblíží-li se zdroj k zrcadlu o 2 cm.

ŘEŠENÍ: Ze zadání známe údaje pro výpočet obrazové ohniskové vzdáleností zrcadla, proto:

$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a'_1} = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{1}{10} + \frac{1}{15} = \frac{1}{f} \rightarrow 15 \cdot f + 10 \cdot f = 15 \cdot 10 \rightarrow f = 6 \text{ cm}$$

Následně dosadíme do rovnice pro přiblížený zdroj, tedy:

$$\frac{1}{a_2} + \frac{1}{a'_2} = \frac{1}{f} \rightarrow \frac{1}{8} + \frac{1}{a'_2} = \frac{1}{6} \rightarrow a'_2 \cdot 6 + 8 \cdot 6 = a'_2 \cdot 8 \rightarrow a'_2 = 24 \text{ cm}$$

Alternativní řešení pomocí soustavy rovnic, protože se jedná o stejné zrcadlo, kde:

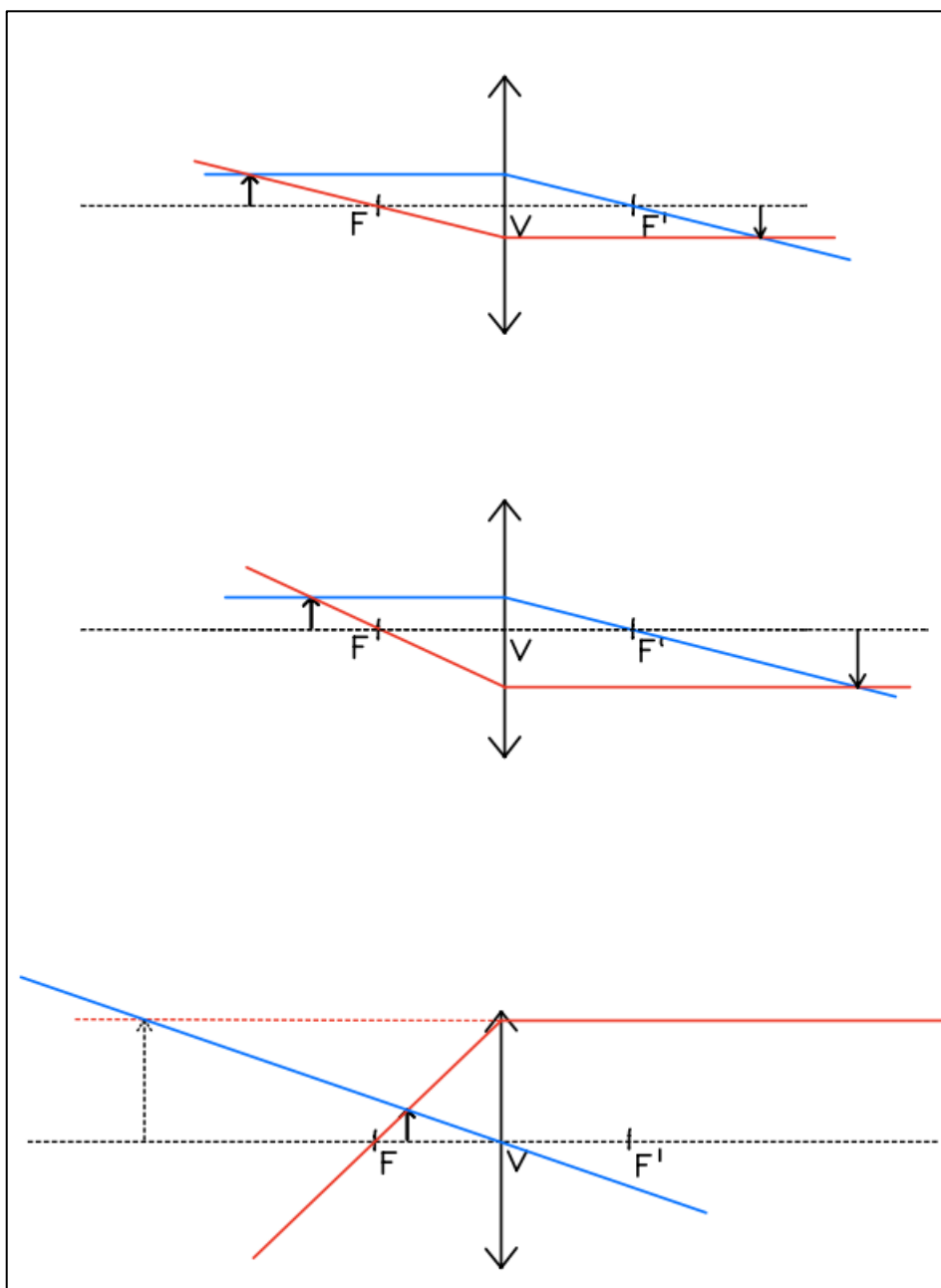
$$\frac{1}{a_1} + \frac{1}{a'_1} = \frac{1}{a_2} + \frac{1}{a'_2} \rightarrow \frac{1}{10} + \frac{1}{15} = \frac{1}{8} + \frac{1}{a'_2} \rightarrow a'_2 = 24 \text{ cm}$$

Obraz vznikne ve vzdálenosti 24 cm od zrcadla.

3.7 ČOČKY

Příklad 7.1

Předmět vysoký 1 cm je umístěn před tenkou spojnou čočkou s obrazovou ohniskovou vzdáleností 20 cm ve vzdálenosti a) 40 cm, b) 30 cm, c) 15 cm. Určete polohy obrazů a jejich vlastnosti.



Obrázek 33: Spojky 1

ŘEŠENÍ: pro všechny případy známe výšku předmětu $y = 1$ cm a ohniskovou vzdálenost $f' = 20$ cm, pro každý případ se nám bude pouze měnit vzdálenost předmětu od spojky, tedy:

a) $a = 40$ cm

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \rightarrow f' \cdot a' + f' \cdot a = a \cdot a' \rightarrow f' \cdot a' - a \cdot a' = -f' \cdot a \rightarrow$$

$$\rightarrow a' = -\frac{f' \cdot a}{f' - a} = -\frac{40 \cdot 20}{20 - 40} = 40 \text{ cm}$$

Následně bude pokračovat výpočtem zvětšení:

$$Z = -\frac{a'}{a} = -\frac{40}{40} = -1$$

b) $a = 30$ cm

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \rightarrow a' = -\frac{f' \cdot a}{f' - a} = -\frac{30 \cdot 20}{20 - 30} = 60 \text{ cm}$$

$$Z = -\frac{a'}{a} = -\frac{60}{30} = -2$$

c) $a = 15$ cm

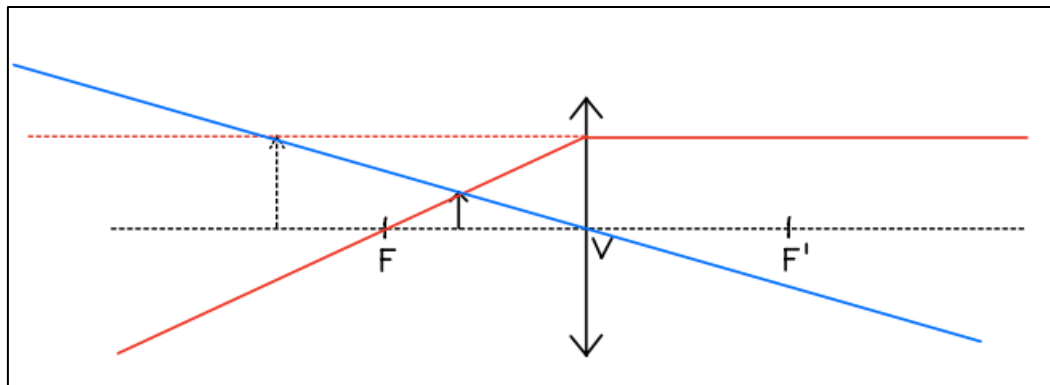
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f'} \rightarrow a' = -\frac{f' \cdot a}{f' - a} = -\frac{15 \cdot 20}{20 - 15} = -60 \text{ cm}$$

$$Z = -\frac{a'}{a} = -\frac{60}{15} = 4$$

Tyto výsledky nám prozrazují dané vlastnosti obrazu po zobrazení spojkou. V prvním případě je obraz skutečný, převrácený, stejně velký jako předmět. V druhém případě je též skutečný, převrácený, ale dvakrát zvětšený než předmět. V třetím případě se jedná o obraz zdánlivý, vzpřímený a čtyřikrát zvětšený než předmět.

Příklad 7.2

Obraz předmětu umístěného před spojkou je vzpřímený a třikrát zvětšený. Vzdálenost mezi předmětem a obrazem je 40 cm. Určete obrazovou ohniskovou vzdálenost čočky.



Obrázek 34: Spojka 2

ŘEŠENÍ: Budeme vycházet ze zobrazovací rovnice a rovnice pro zvětšení. Víme, že obraz je třikrát větší než předmět, tedy:

$$y' = 3 \cdot y \rightarrow Z = -\frac{a'}{a} = \frac{y'}{y}$$

$$-a' - a = 40 \rightarrow 3a - a = 40 \rightarrow a = 20 \text{ cm}$$

$$a' = -3 \cdot a = -3 \cdot 20 = -60 \text{ cm}$$

Známe vzdálenosti obrazu a předmětu od vrcholu spojky, nyní si vypočteme ohniskovou vzdálenost čočky:

$$\frac{1}{a'} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f'} \rightarrow \frac{1}{-60} + \frac{1}{20} = \frac{1}{f'} \rightarrow -60 \cdot f' + 20 \cdot f' = -20 \cdot 60 \rightarrow f' = 30 \text{ cm}$$

Obrazová ohnisková vzdálenost čočky je 30 cm.

Příklad 7.3

Určete optickou mohutnost a typ čočky, jestliže předmět vzdálený od vrcholu V čočky 80 cm se čočkou zobrazí ve vzdálenosti 40 cm od V a) na opačné straně, než je předmět b) na téže straně jako je předmět.

ŘEŠENÍ: V obou případech budeme nejprve muset získat obrazovou ohniskovou vzdálenost čočky, v prvním případě známe vzdálenost předmětu od zrcadla, která je $a = 80$ cm, dále vzdálenost předmětu na opačné straně čočky, tedy $a' = 40$ cm, tedy:

$$\frac{1}{f'} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} \rightarrow f' = \frac{a \cdot a'}{a' + a} = \frac{80 \cdot 40}{80 + 40} = 26,67 \text{ cm}$$

Pro výpočet optické mohutnosti platí vztah:

!Nesmíme ale zapomenout na převod rozměrů z centimetrů na metry!

$$\varphi = \frac{1}{f'} = \frac{1}{0,2667} = 3,75 \text{ D}$$

Mohli bychom tedy rovnou počítat jako:

$$\varphi = \frac{1}{f'} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{0,8} + \frac{1}{0,4} = 3,75 \text{ D}$$

Pro druhý případ, kdy se obraz bude nacházet na téže straně jako předmět $a' = -40$ cm:

$$\varphi = \frac{1}{f'} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{0,8} + \frac{1}{-0,4} = -1,25 \text{ D}$$

Optická mohutnost v prvním případě je 3,75 D, tedy jedná se o spojku, v druhém případě se jedná o rozptylku s optickou mohutností $-1,25$ D.

Příklad 7.4

Určete ohniskovou vzdálenost tenké ploskovypuklé čočky s poloměrem kulové plochy 30 cm pro červené ($n_c = 1,60$) a fialové ($n_f = 1,61$) světlo.

ŘEŠENÍ: Zde budeme vycházet ze znalostí indexů lomu zadaných spektrálních světél a poloměrů křivosti kulové plochy, která je 30 cm. Pro poloměr křivosti ploskovypuklé čočky diverguje k nekonečnu, pro vztah s kulovou plochou proto musí platit:

$$\frac{1}{f'} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1\right) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$$

Index lomu $n_1 = 1$, protože se předpokládá přechod vzduch-čočka, dále $r_2 = \infty$ a $r_1 = 30$ cm.

$$\frac{1}{f'} = \left(\frac{n_2}{1} - 1\right) \cdot \left(\frac{1}{30} + \frac{1}{\infty}\right)$$

Pro člen $\frac{1}{\infty}$ platí z definice limity: $\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n} = 0$, proto:

$$\frac{1}{f'} = \left(\frac{n_2}{1} - 1\right) \cdot \left(\frac{1}{30} + 0\right)$$

$$\frac{1}{f} = (n_2 - 1) \cdot \frac{1}{30}$$

$$f'_c = \frac{30}{n_c - 1} = \frac{30}{1,6 - 1} = 50 \text{ cm}$$

$$f'_f = \frac{30}{n_f - 1} = \frac{30}{1,61 - 1} = 49,2 \text{ cm}$$

Obrazová ohnisková vzdálenost čočky je pro fialové světlo 49,2 cm a pro červené světlo 50 cm.

Příklad 7.5

Optická mohutnost tenké čočky (index lomu 1,5) je na vzduchu 5,5 dioptrie. Jak se změní optická mohutnost, ponoříme-li ji do vody?

ŘEŠENÍ: Zde budeme vycházet ze vztahu pro lámavou plochu a vztahu pro optickou mohutnost čočky, kde můžeme vztahy spojit do následujícího vztahu, proto:

$$\varphi = \frac{1}{f'} = \left(\frac{n_2}{n_1} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

Rozměrové parametry čočky se měnit nebudou, můžeme tedy napsat příslušné rovnice pro oba případy:

$$\varphi_{vzduch} = \left(\frac{n_2}{n_{vzduch}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$$\varphi_{voda} = \left(\frac{n_2}{n_{voda}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$$\sigma = \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$$\varphi_{vzduch} = \left(\frac{n_2}{n_{vzduch}} - 1 \right) \cdot \sigma, \quad 1.$$

$$\varphi_{voda} = \left(\frac{n_2}{n_{voda}} - 1 \right) \cdot \sigma, \quad 2.$$

Naším úkolem je zjistit optickou mohutnost tenké čočky ponořené do vody, vyjádříme tedy člen σ , který následně dosadíme do druhé rovnice, tedy:

$$\varphi_{voda} = \left(\frac{n_2}{n_{voda}} - 1 \right) \cdot \frac{\varphi_{vzduch}}{\left(\frac{n_2}{n_{vzduch}} - 1 \right)} = \left(\frac{1,5}{1,33} - 1 \right) \cdot \frac{5,5}{\left(\frac{1,5}{1} - 1 \right)} = 1,375 \text{ D}$$

Optická mohutnost tenké čočky ve vodě je 1,375 D, tedy jejich rozdíl činí:
 $\Delta\varphi = 5,5 - 1,375 = 4,125 \text{ D}$.

Příklad 7.6

Tenká skleněná čočka o indexu lomu 1,5 má na vzduchu optickou mohutnost 5 dioptrií. Když ji ponoříme do neznámé kapaliny, působí jako čočka s optickou mohutností 1 dioptrie. Určete index lomu kapaliny.

ŘEŠENÍ: Zde budeme opět postupovat obdobně jako u příkladu 7.5., pouze budeme usilovat o vyjádření indexu lomu kapaliny, do které budeme čočku ponořovat.

$$\varphi_{vzduch} = \left(\frac{n_2}{n_{vzduch}} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

$$\frac{\varphi_{vzduch}}{\left(\frac{n_2}{n_{vzduch}} - 1 \right)} = \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right), \quad \frac{\varphi_{kapalina}}{\left(\frac{n_2}{n_{kapalina}} - 1 \right)} = \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$$

Rovnice sobě položíme rovny a vyjádříme neznámou $n_{kapalina}$, tedy:

$$\frac{\varphi_{vzduch}}{\left(\frac{n_2}{n_{vzduch}} - 1 \right)} = \frac{\varphi_{kapalina}}{\left(\frac{n_2}{n_{kapalina}} - 1 \right)}$$

$$\frac{n_2}{n_{kapalina}} - 1 = \frac{\varphi_{kapalina}}{\varphi_{vzduch}} \cdot \left(\frac{n_2}{n_{vzduch}} - 1 \right)$$

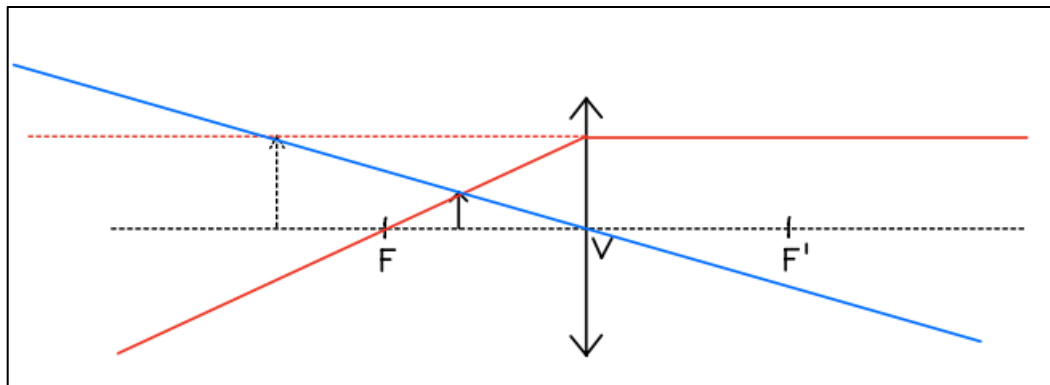
$$\frac{n_2}{n_{kapalina}} = \frac{\varphi_{kapalina}}{\varphi_{vzduch}} \cdot \left(\frac{n_2}{n_{vzduch}} - 1 \right) + 1$$

$$n_{kapalina} = \frac{n_2}{\frac{\varphi_{kapalina}}{\varphi_{vzduch}} \cdot \left(\frac{n_2}{n_{vzduch}} - 1 \right) + 1} = \frac{1,5}{\frac{-1}{5} \cdot \left(\frac{1,5}{1} - 1 \right) + 1} = \frac{5}{3}$$

Index lomu kapaliny, do které jsme čočku ponořili má index lomu 1,67, mohli bychom tedy z tabulek nebo internetu určit o jakou kapalinu by se mohlo jednat.

Příklad 7.7

Jak daleko je reálný předmět od spojky o obrazové ohniskové vzdálenosti 30 cm, když má od svého zdánlivého obrazu vzdálenost 40 cm?



Obrázek 35: Spojka 3

ŘEŠENÍ: Zde budeme řešit ze zobrazovací rovnice, kde známe obrazovou ohniskovou vzdálenost $f' = 30$ cm, vzdálenost reálného předmětu a obrazu je 40 cm, tato skutečnost bude:

$$\begin{aligned}
 a + a' &= -40 \rightarrow a' = -40 - a \\
 \frac{1}{f'} &= \frac{1}{a} + \frac{1}{a'} \rightarrow \frac{1}{30} = \frac{1}{a} + \frac{1}{-40 - a} \rightarrow \\
 \rightarrow a \cdot (-40 - a) &= -40 \cdot 30 - a \cdot 30 + a \cdot 30 \\
 -40a - a^2 &= -1200 \\
 a^2 + 40a + 1200 &= 0
 \end{aligned}$$

Zde vyřešíme kvadratickou rovnici, platí tedy vztah pro kořeny kvadratické rovnice:

$$\begin{aligned}
 a_{1,2} &= \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4 \cdot a \cdot c}}{2 \cdot a} = \frac{-40 \pm \sqrt{40^2 - 4 \cdot 1 \cdot 1200}}{2 \cdot 1} = \\
 a_1 &= -60 \text{ cm}, \quad a_2 = 20 \text{ cm}
 \end{aligned}$$

Dostali jsme z řešení kvadratické rovnice dva výsledky, ale pouze jeden je v našem případě ten hledaný, protože v zadání příkladu se nachází informace, že předmětová vzdálenost je menší než ohnisková, a proto je správným výsledkem $a_2 = 20$ cm.

4 OVĚŘENÍ V PRAXI

4.1 VÝUKA A PŘÍPRAVA NA TEST

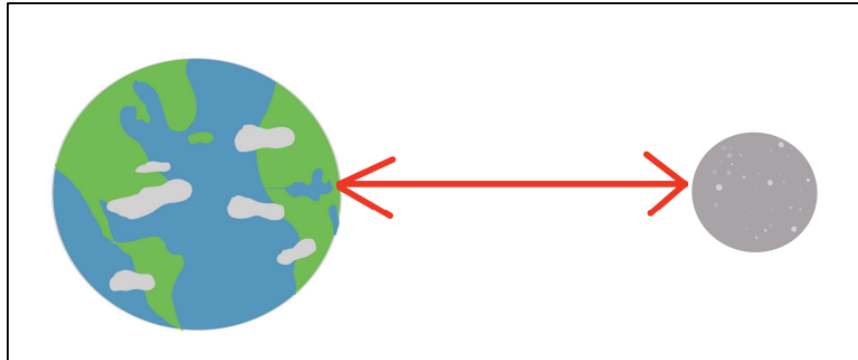
Pro ověření v praxi byly vybrány dvě srovnatelné třídy z Masarykova gymnázia v Plzni. Žáci septimy A a septimy B měli upravenou výuku fyziky v rámci přípravy pro srovnávací test. Obě třídy podstoupily tři hodiny fyziky zaměřené na geometrickou optiku. První pondělní hodina byla zaměřena v obou třídách na teorii. Zde se lišil způsob vedení výuky. Ve třídě SPA byl do výuky oproti SPB zapojen dataprojektor za účelem využití dostupných výukových materiálů pro lepší vizualizaci teorie na promítaných obrázcích. Jednotlivé okruhy a kompletní teorie se stihla zopakovat během prvního setkání. Ve třídě SPB byla využita příprava a forma frontální výuky nezměněná z minulých let. Většina žáků se již v látce velice obstojně orientovala. Druhá hodina ve středu sloužila jako cvičení pro obě třídy. Třídy byly v tento vyučovací den rozvrhově rozděleny na poloviny. Byla zde tedy možnost individuálnějšího přístupu při řešení příkladů v hodině. Kvantitativně se stihl stejný počet příkladů ke každé z kapitol, aby nedocházelo ke zvýhodnění jedné ze tříd. Všichni žáci měli během testovacího týdne k dispozici všechny příklady s řešením obsažené v této práci. Třída SPA měla k dispozici navíc oproti SPB výukové materiály dostupné online. Třetí páteční hodina sloužila k řešení samotného testu paralelně v obou třídách.

4.2 SESTAVOVÁNÍ A PRŮBĚH TESTU

Zadání testu pro ověření získaných znalostí z geometrické optiky jako celku byl vybrán příslušný příklad reprezentující obsaženou kapitolu v této bakalářské práci. Obě třídy dostaly ve stejný čas totožná zadání dostupná online. Žáci měli k dispozici kalkulačky, čisté papíry na potřebné výpočty, psací a rýsovací potřeby. Celkový čas pro řešení testu byl 40 minut. Každý žák měl zadání k zobrazení ve formě online formuláře v Google Forms. Po dobu řešení byly v každé třídě přítomny dva pedagogické dozory.

4.2.1 ZADÁNÍ**Příklad 1**

Určete vzdálenost Země a Měsíce, když světlo vycházející z výkonného laseru odražené od speciálního zrcadla se vrátilo za dobu $t = 2,56$ s.

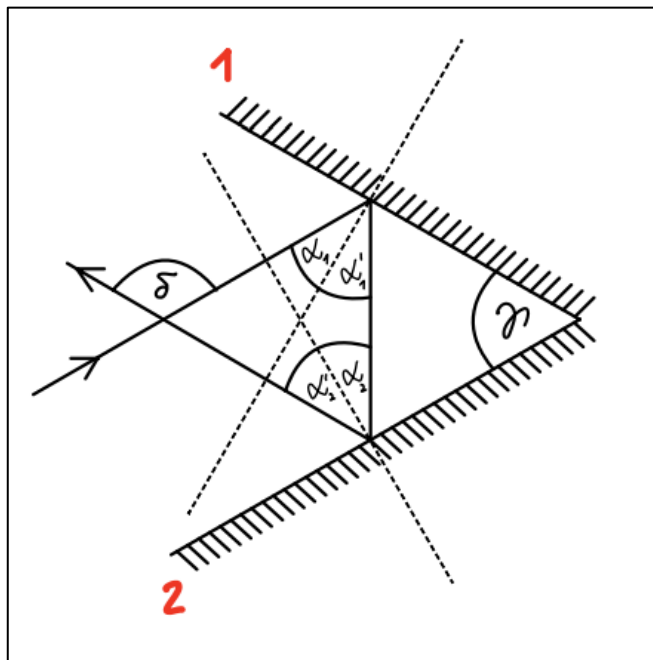


Obrázek 36: Příklad 1

- A) 56 879 521 m
- B) 779 460 390 m
- C) 383 734 346 m
- D) 821 196 378 m

Příklad 2

Nechť máme soustavu dvou rovinných zrcadel svírajících úhel 60° , úhel dopadu na první zrcadlo bude polovinou úhlu, který svírají zrcadla. Vypočítejte odchylku vstupního a výstupního paprsku.

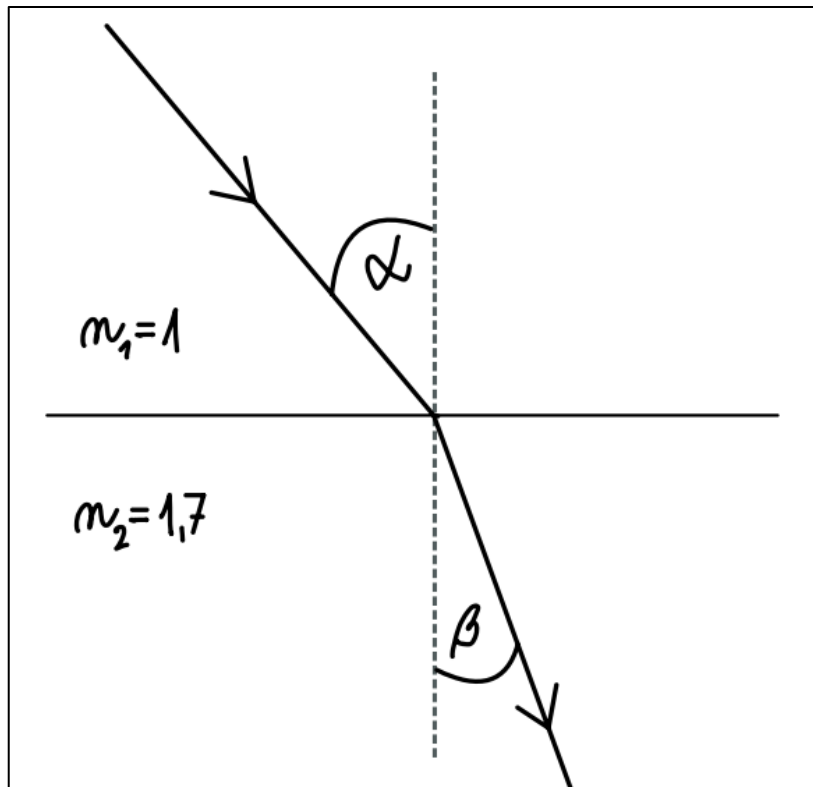


Obrázek 37: Příklad 2

- A) 90°
- B) 45°
- C) 180°
- D) 120°

Příklad 3

Pod jakým úhlem musí dopadnout monofrekvenční paprsek na rozhraní se sklem o indexu lomu 1,7, aby úhel lomu byl poloviční než úhel dopadu?

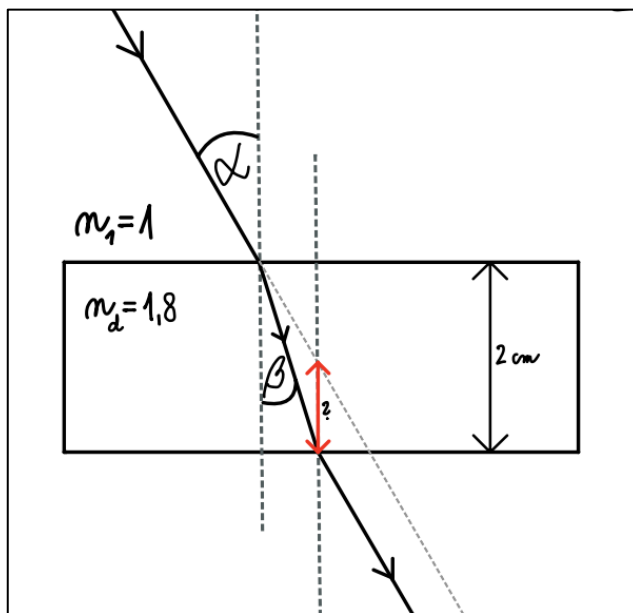


Obrázek 38: Příklad 3

- A) $63^{\circ}34'$
- B) $52^{\circ}26'$
- C) $75^{\circ}21'$
- D) $170^{\circ}12'$

Příklad 4

Světelný paprsek dopadá na planoparalelní destičku o tloušťce 2 cm a indexu lomu 1,8. Vypočtete posunutí vystupujícího paprsku měřené kolmo ke stěnám desky pro úhly dopadu 30° a 1° .

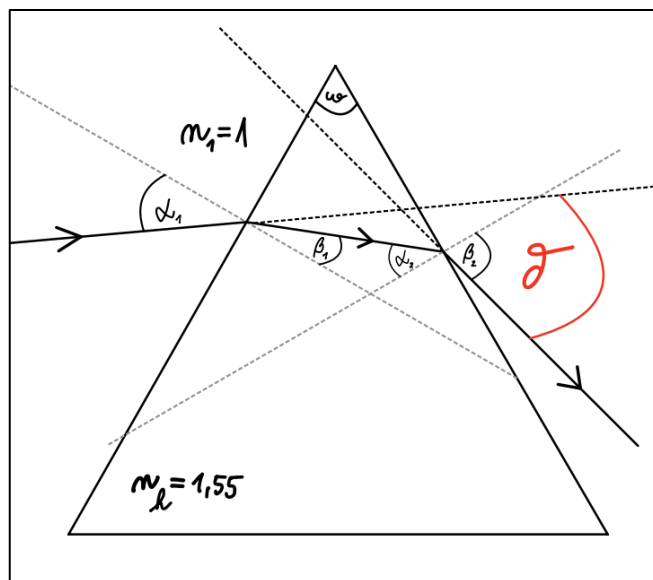


Obrázek 39: Příklad 4

- A) 13,89 mm, 8,89 mm
- B) 9,98 mm, 17,89 mm
- C) 9,98 mm, 8,89 mm
- D) 13,98 mm, 17,89 mm

Příklad 5

Jak se odchýlí monochromatický paprsek světla dopadající pod úhlem 35° na skleněný hranol ($n = 1,55$) o lámavém úhlu 60° po svém průchodu hranolem?



Obrázek 40: Příklad 5

- A) $120^\circ 19'$
- B) $52^\circ 16'$
- C) $25^\circ 23'$
- D) $48^\circ 48'$

Příklad 6

Bodový zdroj světla je umístěn na optické ose 10 cm před vrcholem dutého zrcadla. Jeho obraz je vzdálen 15 cm od vrcholu dutého zrcadla. Určete polohu obrazu, přiblíží-li se zdroj k zrcadlu o 2 cm.

- A) 12 cm
- B) 14 cm
- C) 24 cm
- D) 32 cm

Příklad 7

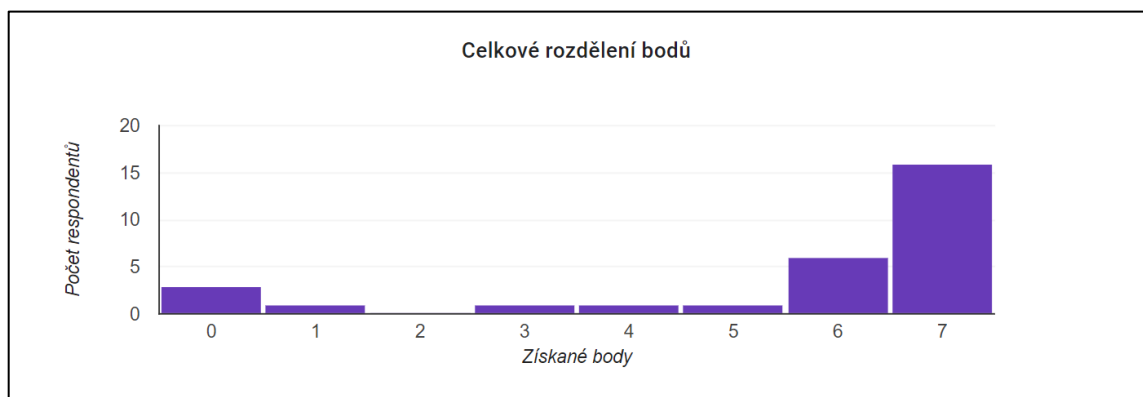
Určete optickou mohutnost a typ čočky, jestliže předmět vzdálený od vrcholu V čočky 80 cm se čočkou zobrazí ve vzdálenosti 40 cm od V. a) na opačné straně, než je předmět
b) na téže straně jako je předmět

- A) 1,25 D, -3,75 D
- B) 3,75 D, -1,25 D
- C) 2,75 D, -2,75 D
- D) -4,75 D, 0,25 D

4.3 VÝSLEDKY TESTU

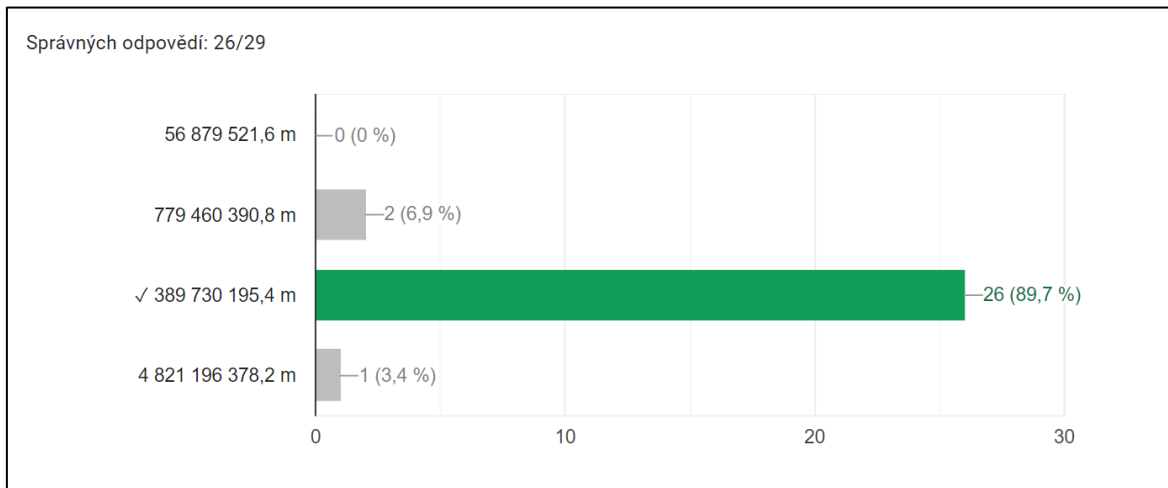
4.3.1 VÝSLEDKY SPA

Třída septima A se dostavila v pátek 31. března 2023 k ověřovacímu testu v počtu 29 žáků z celkového počtu 30 žáků. Aritmetický průměr získaných bodů z testu je 5,55 z celkového počtu 7 bodů. Modus a medián třídy se dostaly na hodnotu 7, tedy maximálního skóre. Celkové rozdělení bodů je naneseno ve sloupcovém grafu zde:

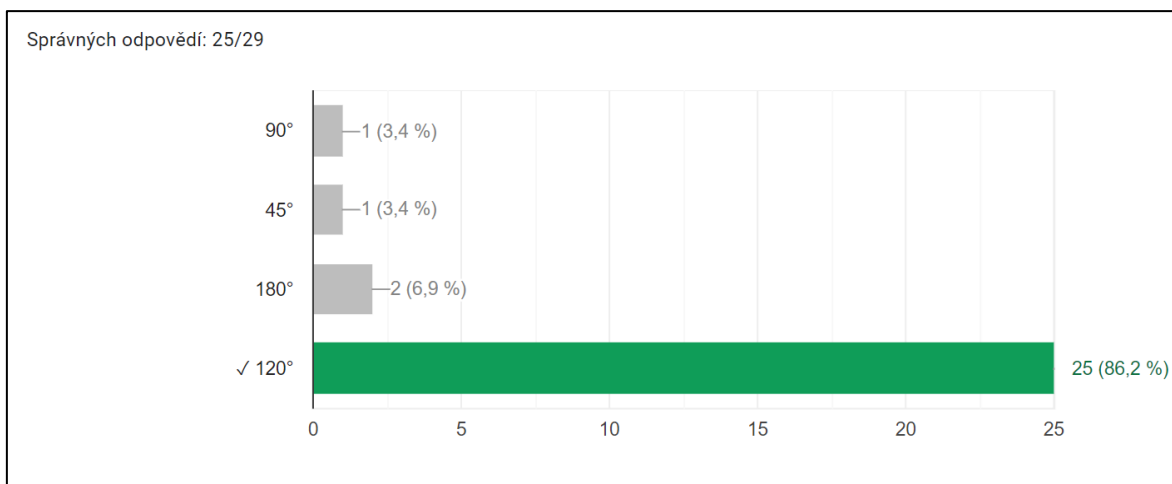


Graf 1: Rozdělení bodů SPA

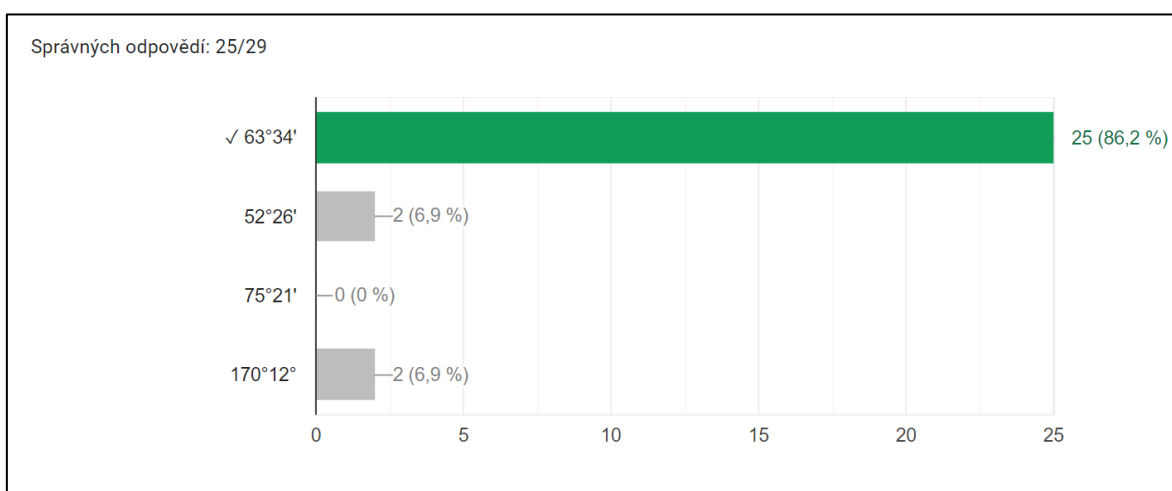
4.3.2 GRAFY VÝSLEDKŮ SPA



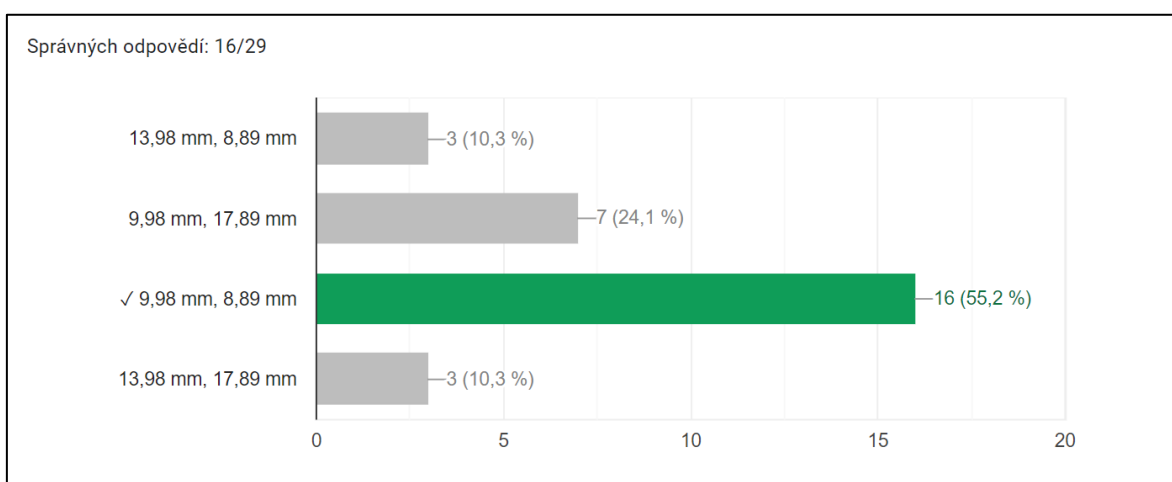
Graf 2: Výsledky SPA - 1. příklad



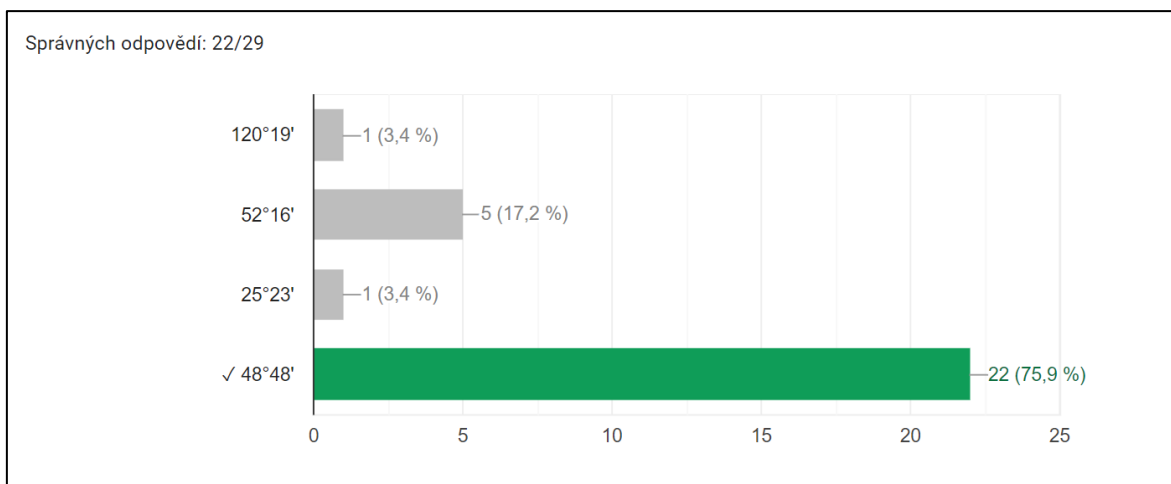
Graf 3: Výsledky SPA - 2. příklad



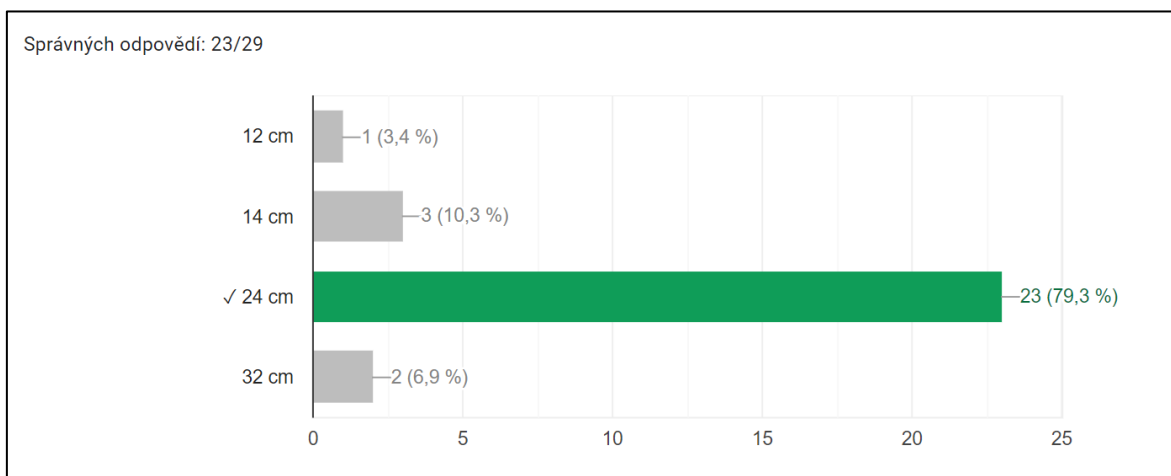
Graf 4: Výsledky SPA - 3. příklad



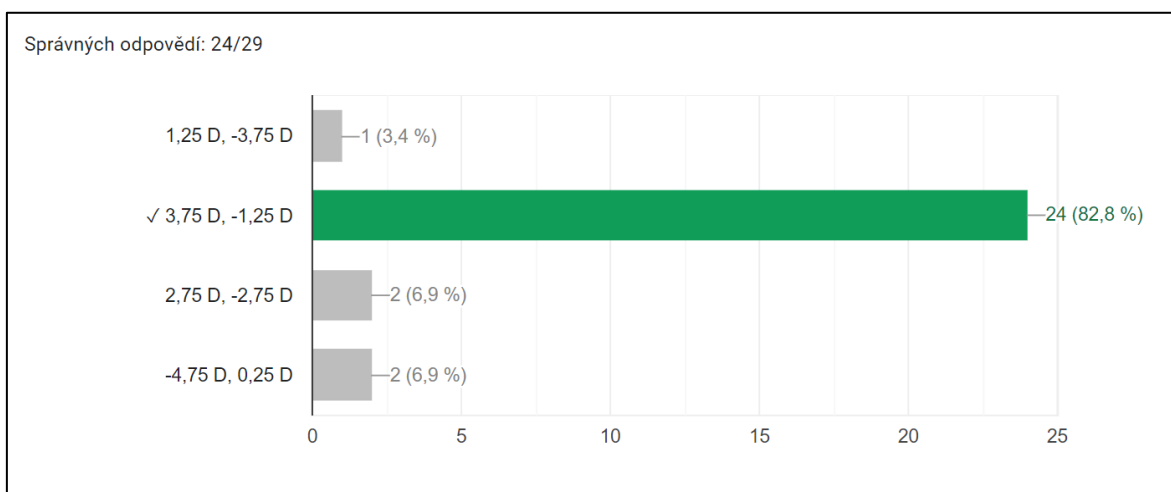
Graf 5: Výsledky SPA - 4. příklad



Graf 6: Výsledky SPA - 5. příklad



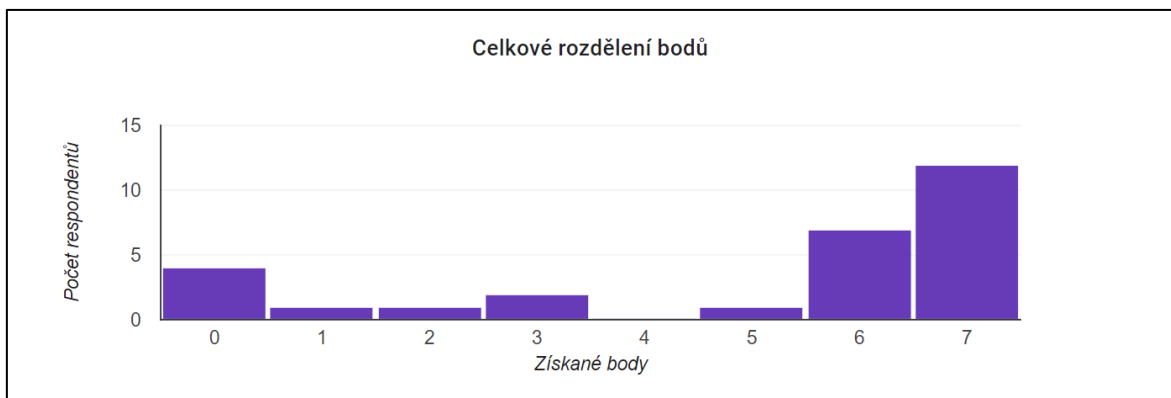
Graf 7: Výsledky SPA - 6. příklad



Graf 8: Výsledky SPA - 7. příklad

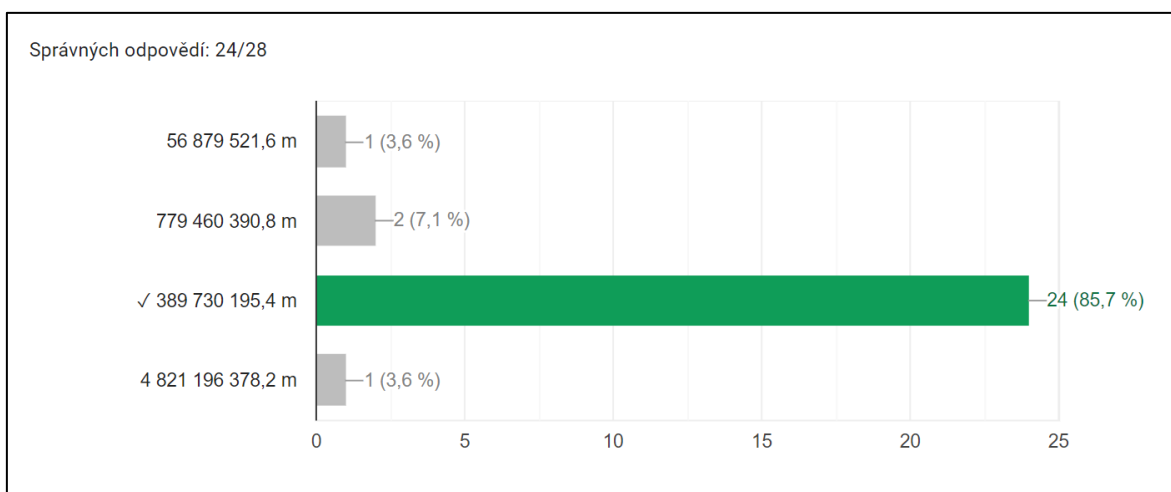
4.3.3 VÝSLEDKY SPB

K řešení ze třídy septimy B se dostavilo 28 žáků z celkového počtu 30 žáků, počet respondentů je tedy menší než ze třídy SPA. Aritmetický průměr třídy je 5,00. Modus se dostal na hodnotu 7. Medián SPB o stupeň níže, tedy 6. Celkové rozdělení bodů je naneseno ve sloupcovém grafu zde:

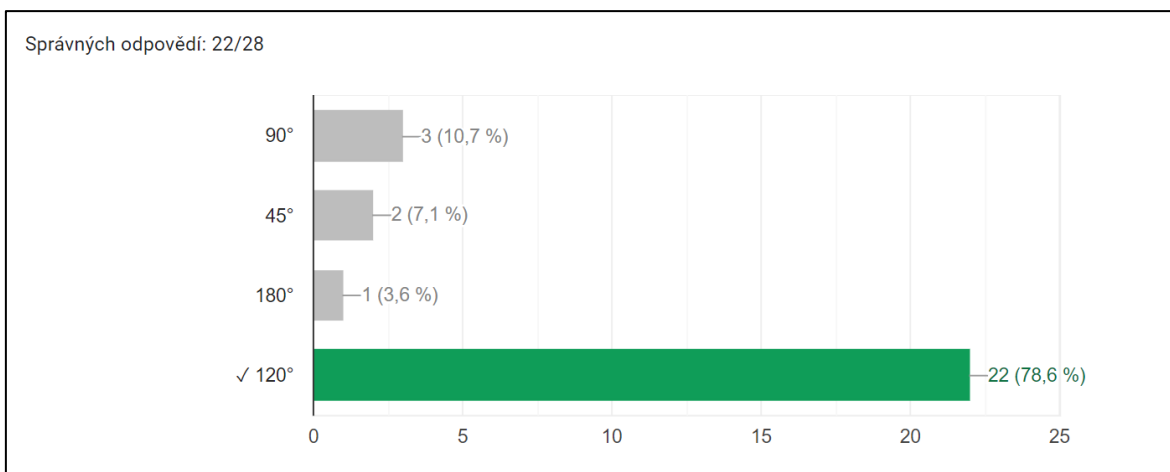


Graf 9: Rozdělení bodů SPB

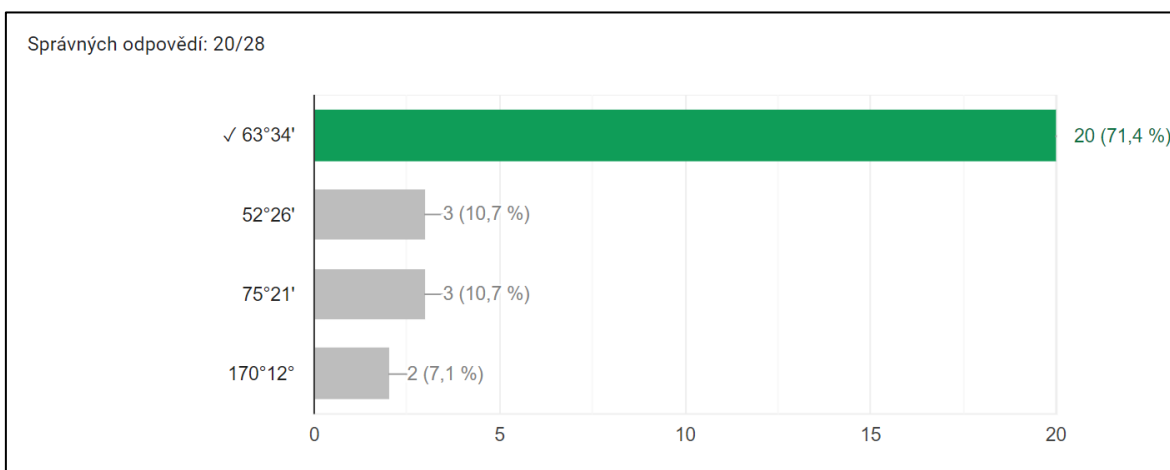
4.3.4 GRAFY VÝSLEDKŮ SPB



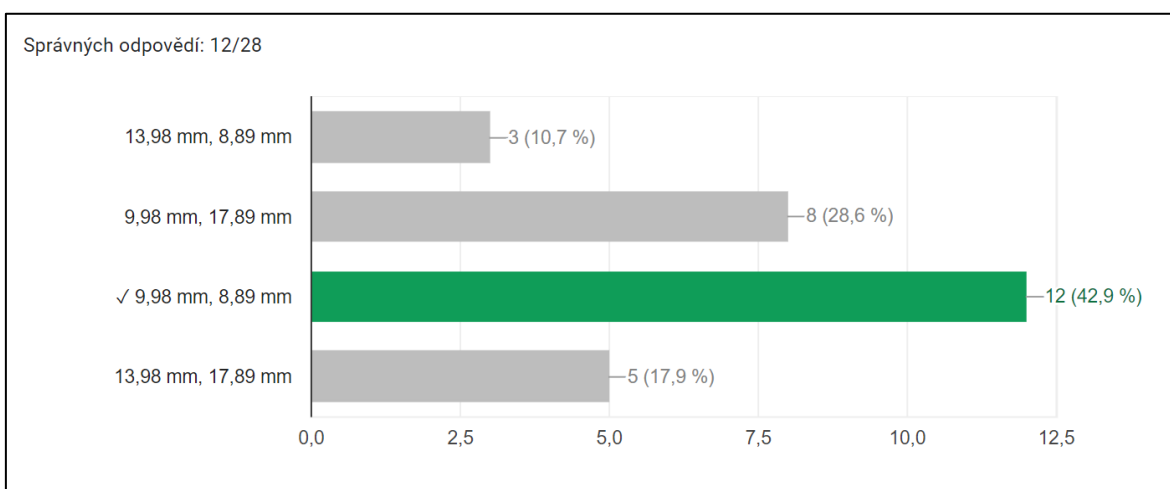
Graf 10: Výsledky SPB - 1. příklad



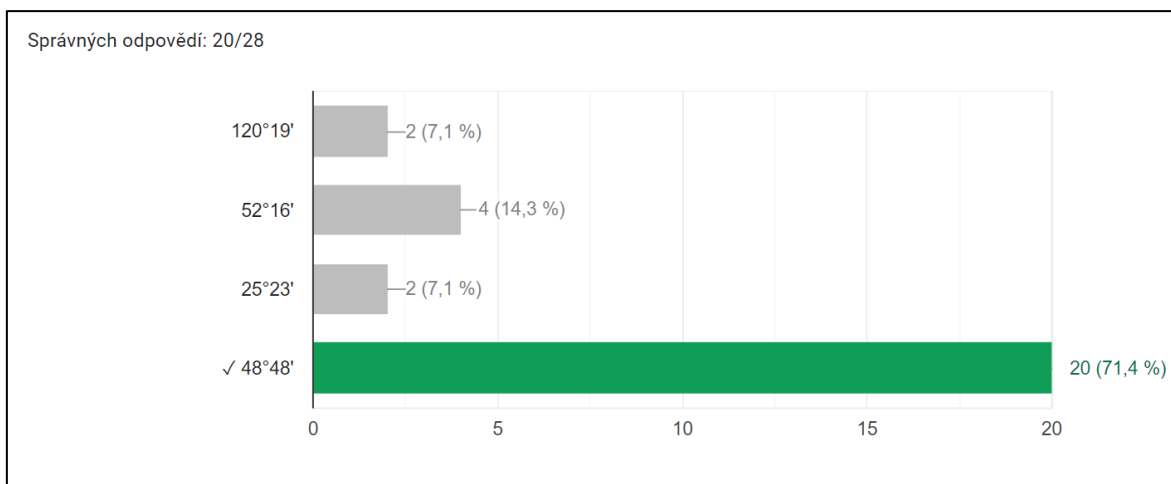
Graf 11: Výsledky SPB - 2. příklad



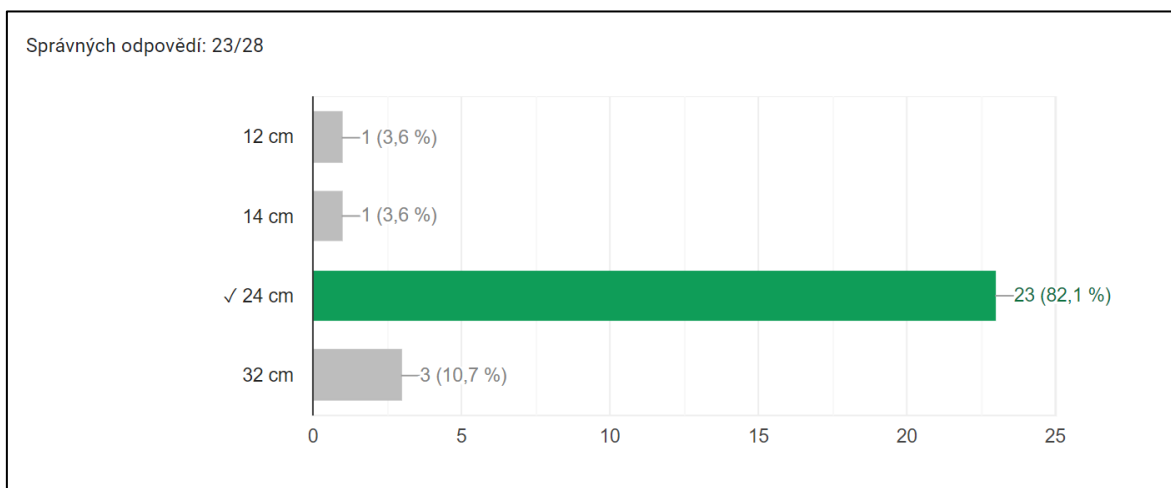
Graf 12: Výsledky SPB - 3. příklad



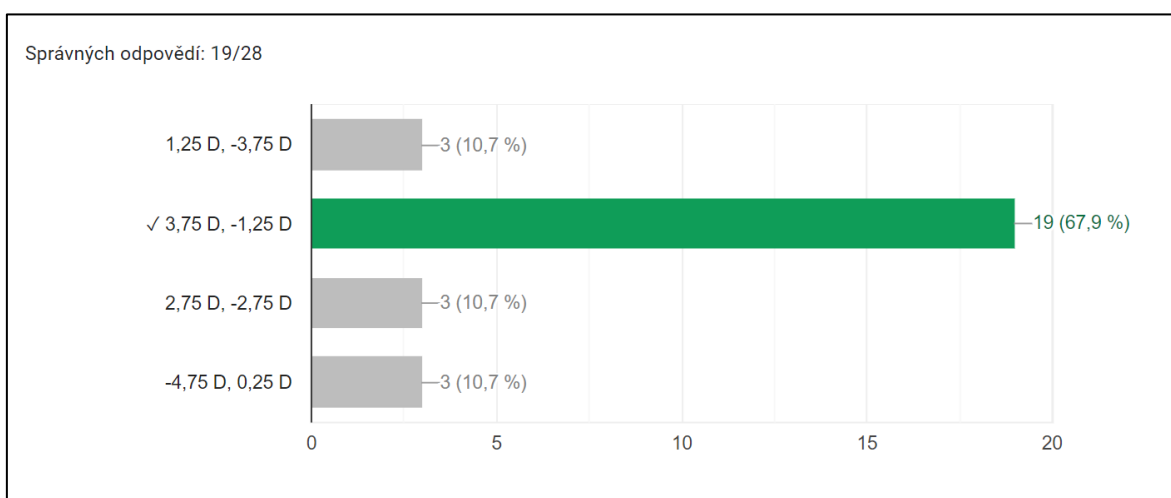
Graf 13: Výsledky SPB - 4. příklad



Graf 14: Výsledky SPB - 5. příklad



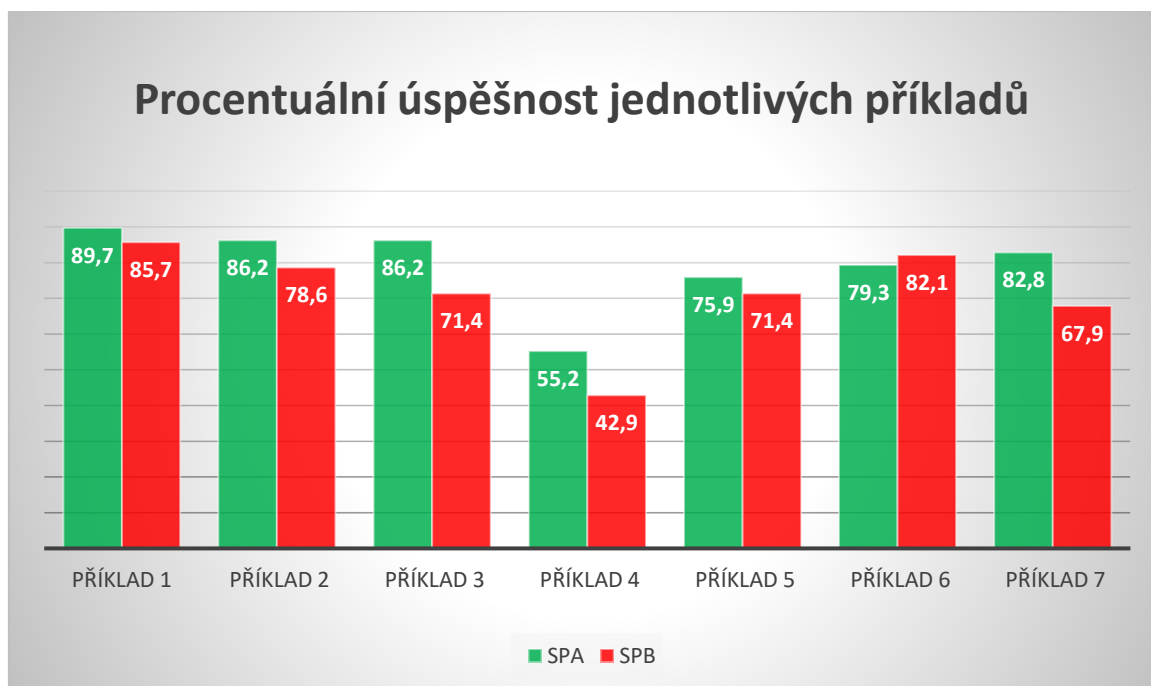
Graf 15: Výsledky SPB - 6. příklad



Graf 16: Výsledky SPB - 7. příklad

4.3.5 VÝSLEDKY VÝZKUMU A SROVNÁNÍ

Pro celkové srovnání poslouží tabulka přehledu výsledků tříd SPA a SPB.



Graf 17: Přehled výsledků

Třída SPA, která se vzdělávala s využitím vytvořených výukových materiálů, dosáhla ve valné většině příkladů lepších výsledků než třída SPB. Jedinou výjimkou byl příklad číslo 6, který se věnuje tématu kulových (sférických) zrcadel a jejich zobrazování. Zde byla úspěšnost v procentuálním zobrazení nižší ve třídě SPA než ve třídě SPB, přestože počet správných odpovědí v obou třídách dosáhl 23. Největší propad zaznamenal příklad číslo 4, přestože se planparalelní destička v těchto třídách vyučovala, navzdory absenci v tematickém plánu. Zde bylo dosaženo 55,2% úspěšnosti ve třídě SPA a 42,9% úspěšnosti v SPB, jde tedy o jediný případ, kdy nesprávné odpovědi převážily správné. Zjištěné znalosti z geometrické optiky předčily očekávání. Mezi žáky je fyzika velmi oblíbená, což mohlo vést k lepším výsledkům. V obou třídách jsou zastoupeni studenti plánující maturovat z fyziky a následně pokračovat ve studiu fyziky na vysoké škole. Žáci po vzájemné konzultaci test hodnotili neutrálně, nepřipadal jim těžký, ani lehký.

ZÁVĚR

Prvním cílem práce bylo poskytnout ucelený přehled základních principů geometrické optiky v aplikaci na názorných příkladech. Vytvoření kompletního přehledu bylo splněno ve druhé kapitole, slouží pro přehled teorie, kterou se bakalářská práce následně zabývá. Pro tvorbu teoretické části bylo čerpáno z učebnice fyziky pro gymnázia z nakladatelství Prometheus a učebnice fyziky pro základní školy a víceletá gymnázia z nakladatelství Fraus. Teorie je doplněna a rozšířena online dostupnými zdroji, které jsou uvedené v seznamu literatury. Ve třetí kapitole je teorie aplikována na konkrétních příkladech sloužících pro hlubší porozumění. Celkově bylo v této práci převzato třináct příkladů ze sbírky úloh pro střední školy z fyziky z nakladatelství Prometheus. Dalších dvaadvacet příkladů bylo upraveno pro jejich výsledky a tvorbu názorných obrázků. Z vlastní tvorby se zde nachází deset příkladů a kompletní grafické zpracování obrázků.

Další důležitou částí této práce byla tvorba přehledného a stručného výukového materiálu dostupného online, který sloužil jako stručné shrnutí učiva pro žáky a vyučující se zaměřením na úroveň středních odborných škol a víceletých gymnázií. Výukový materiál byl vytvořen a využit při výuce během výzkumu. Materiál je dostupný online zde: <https://www.joemat.net>.

Třetím cílem bylo výzkumné ověření výukových materiálů v praxi, kdy došlo ke srovnání výuky podle běžných postupů vyučujících na Masarykově gymnáziu za použití příprav z minulých let s výukou za pomoci výukových materiálů dostupných online. Následně došlo k ověření, které bylo provedeno prezenčně pomocí online testu jako komplexní opakování všech vytvořených kapitol zahrnutých v této práci z geometrické optiky. Třetí cíl byl splněn ve výuce 27. března 2023, kdy došlo ke změně vyučujících na hodinách fyziky a výuka proběhla podle předem stanoveného plánu, který byl naplněn. V obou třídách se stihla kompletně zopakovat teorie, která se procvičovala následně na vytvořených, převzatých a upravených příkladech v této práci. Následné ověření proběhlo paralelně poslední hodinu fyziky v pátek.

Posledním cílem bylo výsledky a získaná data z testů porovnat. Třída SPA, která se učila s využitím výukových materiálů si vedla o něco lépe než třída SPB. Prospěch žáků v obou třídách je srovnatelný a jejich aritmetický průměr se lišil pouze v jedné desetíně ve

prospěch třídy SPA. Mediánem a modusem ze statistického hlediska obou tříd je známka 2. Ve třídách mělo být k testování k dispozici po třiceti žácích, ovšem k ověřovacímu testu se kvůli absenci dostavil počet nižší a celkově bylo získáno výsledků od sedmapadesáti žáků. Obě třídy měly velice srovnatelné výsledky a pro přesnější ověření by bylo zapotřebí získat větší vzorek srovnatelných žáků stejné úrovně vzdělání.

Všechny cíle této práce byly splněny. Výukový materiál by v budoucnu mohl být rozšířen vlnovou optikou a doplněn optickými přístroji pro kompletizaci optiky až po vysokoškolskou úroveň. Dále by se výukový materiál mohl rozdělit podle náročnosti na části: vysokoškolskou, středoškolskou a pro základní školy.

RESUMÉ

V této práci se autor zaměřuje na tvorbu výukových materiálů a jejich následné využití v pedagogické praxi během výuky ve školním prostředí.

Úvodní část je zaměřena na představení fyzikálního oboru geometrické optiky. Dále je oddíl věnován přehledné teorii, která je vyučována na základních a středních školách. Konkrétní definice a zákony jsou obsaženy ve výukových materiálech dostupných online. Navazujícím oddílem je aplikace teorie na příkladech s komentovaným řešením pro hlubší porozumění.

Výzkumu a následnému ověření v praxi se věnuje zbytek práce, kde je stručně popsán postup výuky s využitím vytvořeného materiálu a následného ověření formou testu sestaveného z příkladů obsažených v této bakalářské práci. Závěr tvoří zhodnocení jednotlivých cílů, obsahuje návrhy pro přesnější ověření a navrhuje budoucí možnost rozšíření této práce.

RESUMÉ

In this work, the author focuses on the creation of teaching materials and their subsequent use in pedagogical practice during learning in a school environment.

The introductory part is focused on the presentation of the physical field of geometric optics. Furthermore, the section is devoted to a clear theory, which is taught in primary and secondary schools. Specific definitions and laws are contained in the learning materials available online. The following section is an application of the theory on examples with an annotated solution for a deeper understanding.

The rest of the work is devoted to research and subsequent verification in practice, where the teaching procedure is briefly described using the created material and subsequent verification in the form of a test compiled from the examples contained in this bachelor's thesis. The conclusion consists of an evaluation of the individual objectives, contains suggestions for more accurate verification and suggests the future possibility of expanding this work.

SEZNAM LITERATURY

Beiser, Arthur. *Physics*, 3rd Edition, Menlo Park, California: The Benjamin/Cummings Publishing Company, 1987.

FUKA, Josef a Bedřich HAVELKA. *Optika a atomová fyzika: fyzikální kompendium pro vysoké školy díl IV*. Praha: STÁTNÍ PEDAGOGICKÉ NAKLADATELSTVÍ, 1961.

Hecht, E., and A. Zajac. *Optics*, 2nd Edition. Reading, Massachusetts: Addison Wesley Jersey: Prentice Hall, Inc., 1993.

KRAVTSOV, Yury A. a Yury I. ORLOV. *Geometrical Optics of Inhomogeneous Media*. 1. Berlin: Springer Berlin, Heidelberg, 2011. ISBN 978-3-642-84033-3.

LEPIL, Oldřich a kol. *Fyzika: sbírka úloh pro střední školy*. 3. vydání. Praha: Prometheus, 2004. ISBN 80-7196-266-X.

LEPIL, Oldřich. *Fyzika pro gymnázia*. 4. vyd. Praha: Prometheus, 2010. ISBN 978-80-7196-384-4.

MALÝ, Petr, *Optika*. Praha: Karolinum, 2008. ISBN 978-80-246-1342-0.

MILTON, Katz. *Introduction to Geometrical Optics*. New York, USA: World Scientific Publishing, 1994. ISBN 981-238-202-X.

Pedrotti, F., and L. Pedrotti. *Introduction to Optics*, 2nd Edition. Englewood Cliffs, New Publishing Company, 1982.

RAUNER, Karel a kol. *Fyzika 7: pro základní školy a víceletá gymnázia*. Plzeň: Fraus, 2005. ISBN 80-7238-431-7.

SVOBODA, Emanuel. *Přehled středoškolské fyziky*. 6., upravené a doplněné vydání. Praha: Prometheus, 2019. ISBN 978-80-7196-475-9.

ELEKTRONICKÉ ZDROJE

HOPPE, J. Pokroky matematiky, fyziky a astronomie: Oposice Marsu a marsovské klima [online]. 1957, 105--108 [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <http://dml.cz/dmlcz/137159>

Encyklopedie fyziky: Optické hranoly [online]. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/442-opticke-hranoly>

Fyzika007: optika [online]. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.fyzika007.cz/optika>

Fyzikální kabinet FyzKAB: Optika, STR, Atomová fyzika, Astronomie [online]. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <http://kabinet.fyzika.net/prezentace/4rocnik-oktava.php>

E-fyzika: geometrická optika [online]. [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://www.e-fyzika.cz/kapitoly/08-geometricka-optika.pdf>

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBRÁZEK 1: URČOVÁNÍ VZDÁLENOSTI ZEMĚ A MĚSÍCE	18
OBRÁZEK 2: VZÁJEMNÁ POLOHA SLUNCE, ZEMĚ A MĚSÍCE	19
OBRÁZEK 3: STÍN NA PODLAZE	20
OBRÁZEK 4: ZEMĚ A MARS	21
OBRÁZEK 5: ODRAZ NA VODOROVNÉ PLOŠE	22
OBRÁZEK 6: VIDITELNOST SVĚTELNÉHO ODRAZU	23
OBRÁZEK 7: ODCHYLKA, SOUSTAVA ZRCADEL	24
OBRÁZEK 8: VZTAH MEZI PŘEDMĚTEM A OBRAZEM	25
OBRÁZEK 9: LOM MONOFREKVENČNÍHO PAPRSKU	27
OBRÁZEK 10: VZTAH ÚHLU DOPADU A PROSTŘEDÍ	28
OBRÁZEK 11: LOM MONOCHROMATICKÉHO PAPRSKU 1.....	29
OBRÁZEK 12: LOM MONOCHROMATICKÉHO PAPRSKU 2.....	30
OBRÁZEK 13: VÝPOČET INDEXU LOMU PROSTŘEDÍ	32
OBRÁZEK 14: VÝPOČET ÚHLU DOPADU MONOCHROMATICKÉHO PAPRSKU	33
OBRÁZEK 15: ROZMĚRY STÍNU LODI	35
OBRÁZEK 16: ZACHOVÁNÍ ÚHLU LOMU PŘI ZMĚNĚ PROSTŘEDÍ.....	37
OBRÁZEK 17: DVĚ VRSTVY PLANPARALELNÍCH DESTIČEK	38
OBRÁZEK 18: POSUN PAPRSKU PO PRŮCHODU DESTIČKOU	39
OBRÁZEK 19: POSUN PAPRSKU PO PRŮCHODU DESTIČKOU 2.....	41
OBRÁZEK 20: POSUN PAPRSKU PO PRŮCHODU DESTIČKOU 3.....	43
OBRÁZEK 21: ÚPLNÝ ODRAZ.....	45
OBRÁZEK 22: SKLENĚNÁ TYČINKA	47
OBRÁZEK 23: PRŮCHOD MONOCHROMATICKÉHO PAPRSKU HRANOLEM 1.....	49
OBRÁZEK 24: MINIMÁLNÍ DEVIACE	50
OBRÁZEK 25: INDEX LOMU NEZNÁMÉ KAPALINY	52
OBRÁZEK 26: ŠÍŘKA BAREVNÉHO SPEKTRA.....	53
OBRÁZEK 27: VÝPOČET INDEXU LOMU HRANOLU 1A	55
OBRÁZEK 28: VÝPOČET INDEXU LOMU HRANOLU 1B	55
OBRÁZEK 29: VÝPOČET DEVIACE	57
OBRÁZEK 30: PRŮCHOD MONOCHROMATICKÉHO PAPRSKU HRANOLEM 2.....	58
OBRÁZEK 31: DUTÉ ZRCADLO 1	60
OBRÁZEK 32: DUTÉ ZRCADLO 2	62
OBRÁZEK 33: SPOJKY 1	64
OBRÁZEK 34: SPOJKA 2	66
OBRÁZEK 35: SPOJKA 3	71
OBRÁZEK 36: PŘÍKLAD 1.....	73
OBRÁZEK 37: PŘÍKLAD 2.....	74
OBRÁZEK 38: PŘÍKLAD 3.....	75
OBRÁZEK 39: PŘÍKLAD 4.....	76
OBRÁZEK 40: PŘÍKLAD 5.....	77

GRAF 1: ROZDĚLENÍ BODŮ SPA	79
GRAF 2: VÝSLEDKY SPA - 1. PŘÍKLAD	79
GRAF 3: VÝSLEDKY SPA - 2. PŘÍKLAD	80
GRAF 4: VÝSLEDKY SPA - 3. PŘÍKLAD	80
GRAF 5: VÝSLEDKY SPA - 4. PŘÍKLAD	80
GRAF 6: VÝSLEDKY SPA - 5. PŘÍKLAD	81
GRAF 7: VÝSLEDKY SPA - 6. PŘÍKLAD	81
GRAF 8: VÝSLEDKY SPA - 7. PŘÍKLAD	81
GRAF 9: ROZDĚLENÍ BODŮ SPB	82
GRAF 10: VÝSLEDKY SPB - 1. PŘÍKLAD	82
GRAF 11: VÝSLEDKY SPB - 2. PŘÍKLAD	83
GRAF 12: VÝSLEDKY SPB - 3. PŘÍKLAD	83
GRAF 13: VÝSLEDKY SPB - 4. PŘÍKLAD	83
GRAF 14: VÝSLEDKY SPB - 5. PŘÍKLAD	84
GRAF 15: VÝSLEDKY SPB - 6. PŘÍKLAD	84
GRAF 16: VÝSLEDKY SPB - 7. PŘÍKLAD	84
GRAF 17: PŘEHLED VÝSLEDKŮ.....	85