

UNIVERZITA PALACKÉHO V OLOMOUCI
PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA
KATEDRA EXPERIMENTÁLNÍ FYZIKY

Sbírka fyzikálních úloh pro řešitele soutěží a olympiád

Bakalářská práce

Vypracoval: Jiří Lach

Vedoucí bakalářské práce:

Studijní obor: Fyzika – Matematika

RNDr. Renata Holubová, CSc.

Rok odevzdání: duben 2009

Olomouc 2009

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Sběrka fyzikálních úloh pro řešitele soutěží a olympiád vypracoval samostatně za pomoci RNDr. Renaty Holubové, CSc. Veškerou literaturu, se kterou jsem při zpracování této bakalářské práce pracoval, řádně cituji a uvádím v seznamu literatury.

V Olomouci dne

Poděkování:

Na tomto místě bych rád bych poděkoval vedoucí bakalářské práce RNDr. Renatě Holubové, CSc. za cenné rady a připomínky, které mi poskytla během zpracování této bakalářské práce.

BIBLIOGRAFICKÁ IDENTIFIKACE

Autor: Jiří Lach

Název práce: Sbíрка fyzikálních úloh pro řešitele soutěží a olympiád

Typ práce: bakalářská

Pracoviště: Katedra experimentální fyziky

Vedoucí práce: RNDr. Renata Holubová, CSc.

Rok obhajoby práce: 2009

Abstrakt:

Cílem této bakalářské práce je vytvoření sbírky fyzikálních úloh pro řešitele fyzikálních soutěží a olympiád. Práce je rozdělena do sedmi kapitol, přičemž jádro práce tvoří pátá a šestá kapitola. Pátá kapitola obsahuje základní pojmy a zákony, které jsou nezbytné pro řešení úloh, a šestá kapitola obsahuje šestnáct řešených úloh z oblasti paprskové optiky. Práce by měla sloužit žákům středních škol při jejich přípravě na fyzikální soutěže a také studentům vysokých škol, kteří by ji využili ve cvičeních z optiky.

Klíčová slova: sbírka úloh, optika, odraz a lom světla, optický hranol, čočka, paprsek

Počet stran: 51

Počet příloh: 0

Jazyk: český

BIBLIOGRAPHICAL IDENTIFICATION

Author: Jiří Lach

Title: Physical Examples for Competitors in Physics Competitions

Type of thesis: bachelor

Department: Department of Experimental Physics

Supervisor: RNDr. Renata Holubová, CSc.

The year of presentation: 2009

Abstract:

The aim of the thesis is the creation of the physical examples for the competitors of physical competitions. The thesis is divided into seven chapters. The root of the thesis is chapter number five and chapter number six. Chapter five includes basic definitions and laws that are necessary for solving the problems and chapter six includes sixteen solved examples from the area of geometrical optics. The collection should help to the students of secondary schools to prepare for the physical contests and the students of universities that could use it in Optics practise.

Keywords: physical examples, optics, reflex, refraction, optical prism, lens, ray

Number of pages: 51

Number of appendices: 0

Language: Czech

OBSAH

1	ÚVOD	8
2	HISTORIE A SOUČASNOST FYZIKÁLNÍ OLYMPIÁDY	10
3	PŘÍPRAVA STUDENTŮ NA FYZIKÁLNÍ OLYMPIÁDU	11
4	PŘÍKLADY VYSKYTUJÍCÍ SE NA FYZIKÁLNÍ OLYMPIÁDĚ	14
5	ZÁKLADNÍ POJMY A ZÁKONY	17
5.1	SVĚTLO JAKO ELEKTROMAGNETICKÉ VLNĚNÍ	17
5.2	ODRAZ A LOM SVĚTLA	18
5.3	OPTICKÝ HRANOL	20
5.4	OPTICKÝ KLÍN	22
5.5	OPTICKÉ ZOBRAZOVÁNÍ.....	22
6	ŘEŠENÉ ÚLOHY	28
	ÚLOHA Č. 1 – BLUDIŠTĚ.....	28
	ÚLOHA Č. 2 – OPTICKÝ KLÍN	28
	ÚLOHA Č. 3 – DVA OPTICKÉ HRANOLY A ZRCADLO.....	29
	ÚLOHA Č. 4 – POTÁPĚČ	31
	ÚLOHA Č. 5 – RYBA V AKVÁRIU.....	32
	ÚLOHA Č. 6 – CHEMICKÁ LABORATOŘ.....	35
	ÚLOHA Č. 7 – ČOČKA VE VODĚ	37
	ÚLOHA Č. 8 – TENKÁ SPOJKA	37
	ÚLOHA Č. 9 – PLOSKODUTÁ ČOČKA	39
	ÚLOHA Č. 10 – SKLENĚNÁ KOULE.....	40
	ÚLOHA Č. 11 – TLUSTÁ ČOČKA A JEJÍ TLOUŠŤKA	41
	ÚLOHA Č. 12 – TLUSTÁ SPOJKA	42
	ÚLOHA Č. 13 – DVĚ TENKÉ SPOJKY	43
	ÚLOHA Č. 14 – KEPLERŮV DALEKOHLED	46
	ÚLOHA Č. 15 – TENKÁ SPOJKA A TENKÁ ROZPTYLKA.....	46
	ÚLOHA Č. 16 – DVĚ STEJNÉ ČOČKY.....	48

7	ZÁVĚR	50
8	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	51

1 ÚVOD

Středoškolská fyzika je všeobecně vzdělávací předmět, který není mezi studenty příliš oblíbený. Přesto se však najdou studenti, které fyzika baví, a také studenti, kteří mají na fyziku talent, který se projevuje tím, že látka probíraná ve škole je pro ně nedostačující a tito studenti pak sami čtou například různé odborné učebnice nebo si sami provádějí pokusy a podobně. Pro tyto studenty se pak pořádají různé fyzikální soutěže. Jednou z nejpopulárnějších fyzikálních soutěží v České republice je fyzikální olympiáda. Tato soutěž je založena na řešení fyzikálních úloh, které jsou však složitější než příklady, se kterými se student setkává v hodině fyziky na střední škole nebo ve středoškolských učebnicích a sbírkách úloh. Úkolem studenta je vyřešit co nejvíce takových příkladů. Pokud by se student chtěl na fyzikální olympiádu či jinou fyzikální soutěž připravit, tak má k dispozici oficiální internetové stránky fyzikální olympiády, které obsahují, mimo jiné, zadání a řešení úloh v různých kategoriích za posledních deset let. Dále mají studenti k dispozici poměrně velké množství vysokoškolských učebnic, kde se příklady sice vyskytují, ale nejsou určeny k přípravě na fyzikální olympiádu.

Rozhodl jsem se tedy, že se v rámci své bakalářské práce pokusím sestavit sbírku takových příkladů, jejichž cílem bude prohloubit studentovy poznatky ze střední školy a pomoci mu tak při řešení různých fyzikálních úloh jak ve fyzikální olympiádě či jiných soutěžích, nebo také na střední škole ve fyzikálních seminářích a na vysoké škole v rámci základního kurzu optiky, popř. semináře Řešení fyzikálních úloh. A protože si myslím, že jednou z nejdůležitějších částí fyziky, se kterou se setkáváme v každodenním životě, je optika, tak se ve své práci zaměřím na úlohy zabývající se světlem, viděním, optickým zobrazováním apod.

Ještě před samotnou sbírkou úloh uvádím kapitoly, které se týkají historie fyzikální olympiády, dále pak učebnic, které jsou českým studentům dostupné a také uvádím typy příkladů, které se ve fyzikální olympiádě objevují. Poslední kapitolu před úlohami tvoří základní pojmy a zákony, které by měl student znát nebo které budou nezbytné pro řešení úloh.

Samotné příklady jsou koncipovány tak, aby student využil své základní znalosti z optiky a dovedl je aplikovat na složitější problém. Některé příklady jsou možná podobné těm, se kterými se student setkal již v hodinách fyziky, v jiných bude muset víc uvažovat a použít kromě fyzikálních znalostí a dovedností také dovednosti matematické.

2 HISTORIE A SOUČASNOST FYZIKÁLNÍ OLYMPIÁDY

Fyzikální olympiáda je jedna z tradičních soutěží, které se v českých školách pořádají. Její historie začíná v roce 1954, kdy se v hlavě prof. RNDr. Rostislava Košťála z VUT v Brně zrodila myšlenka o soutěži, jejíž cílem by bylo nalézat zájemce o fyziku a podílet se na jejich rozvoji. První soutěž byla uskutečněna v roce 1958 v Olomouckém a Brněnském kraji. Za vznik fyzikální olympiády je považován školní rok 1959/1960, kdy byla uskutečněna první celostátní soutěž ve třech středoškolských kategoriích (A, B, C). Později byly tyto tři kategorie doplněny dalšími dvěma, které byly určeny pro základní školy. Mezi další významná data v historii fyzikální olympiády patří rok 1966, kdy prof. Košťál, spolu se svými kolegy prof. Ścisłowským z Polska a prof. Kunfálím z Maďarska, založili mezinárodní fyzikální olympiádu (MFO). První kolo MFO se konalo v roce 1967 v Polsku a účastnili se jí pouze východoevropské země. Brzy se však k MFO začaly připojovat i státy západoevropské jako například Francie, která se MFO účastní od roku 1972, nebo také tehdejší Spolková republika Německo, jejíž účast je datována od roku 1974. Dnes se MFO účastní řešitelé z celého světa.

V současnosti pořádá fyzikální olympiádu v České republice Ministerstvo školství, mládeže a tělovýchovy České republiky spolu s Jednotou českých matematiků a fyziků. Soutěž probíhá v kategoriích A, B, C, D, které jsou určeny pro studenty postupně 4. – 1. ročníku středních škol a mají školní a krajská kola. Kategorie A má kromě těchto dvou kol i kolo celostátní. Mezi další kategorie fyzikální olympiády patří kategorie E, F a kategorie G, nazvaná Archimediáda. Tyto tři kategorie jsou určeny žákům 9. – 7. tříd základních škol a probíhají v kolech školních a okresních. Nejvyšší z těchto kategorií, kategorie E, vrcholí kolem krajským. Na podporu soutěží i soutěže jsou každoročně pořádána soustředění pro nejlepší studenty a žáky, dále jsou organizovány korespondenční semináře a také jsou vydávány studijní texty, jejichž cílem je prohloubit studentovy znalosti v určitém oboru fyziky a tímto mu pomoci při řešení úloh.

Ve školním roce 2008/2009 je pořádán již 50. ročník fyzikální olympiády, který si klade za cíl vyhledat budoucí odborníky ve fyzice a jiných technických vědách, neboť těchto odborníků je stále potřeba, ale počet studentů technických oborů, fyziky či matematiky bohužel klesá. *Upraveno podle [8].*

3 PŘÍPRAVA STUDENTŮ NA FYZIKÁLNÍ OLYMPIÁDU

„Fyzikální olympiáda má za úkol, mimo jiné, ukázat, čemu se studenti ve školách naučili a jak jsou schopni aplikovat tyto poznatky v praxi [8].“ Studentům středních škol je k dispozici velké množství učebnic fyziky. Mezi nejčastěji používané učebnice na gymnáziích a podobných typech středních škol patří řada učebnic fyziky nakladatelství Prometheus. Jednotlivé díly této řady učebnic jsou tematicky zaměřeny a poskytují studentům podrobný výklad dané problematiky. Jedním z dílů této řady učebnic je také učebnice optiky [4], která je rozdělena do čtyř kapitol. První z nich se zabývá základními pojmy optiky, jakými jsou například světlo a jeho šíření, zákony odrazu a lomu nebo barva světla. Jako druhá následuje kapitola zaměřená na paprskovou optiku, tedy zobrazování zrcadly, čočkami a jednoduchými optickými přístroji. Třetí kapitola seznamuje čtenáře se základy vlnové optiky a jevy, jako jsou interference, difrakce nebo polarizace světla. Poslední, čtvrtá kapitola, je zaměřena na elektromagnetické záření a jeho energii. Za každou kapitolou následuje shrnutí se základními pojmy a vztahy. Příklady k procvičení dané látky se nacházejí na konci každé podkapitoly. Učebnice je zakončena dvěma částmi zahrnující teoretická a praktická cvičení. Podobně jsou sestaveny i další díly této řady učebnic, z čehož vyplývá, že student získá o dané problematice přehled, avšak pro řešitele fyzikální olympiády či nadané studenty, kteří se o fyziku hlouběji zajímají, je to nedostačující. Tito studenti jsou pak odkázáni na vysokoškolské učebnice nebo na studijní texty určené řešitelům fyzikální olympiády, ale tyto publikace jsou především teoretické a příkladů k procvičení je zde minimum.

Mezi knihy, které se zabývají optikou na vysokoškolské úrovni patří například první svazek díla prof. J. Fuky a prof. B. Havelky, Optika a Atomová fyzika ([1]). Kniha je velmi rozsáhlá (845 stran) a je rozdělena na tři velké oddíly. Oddíl A se nazývá Paprsková optika a jak již název napovídá, zabývá se zákony geometrické optiky, šířením a povahou světla, optickým zobrazováním a optickými přístroji nebo například fotometrií. Oddíl B, Vlnová optika, se zabývá jevy jako jsou interference světla, disperze a absorpce světla nebo také polarizace a difrakce světla. Poslední kapitola tohoto oddílu je zaměřena na optické jevy v atmosféře. Poslední oddíl, C, je nazván Optické metody ve vědě a výrobě a je zaměřen hlavně na praktickou činnost. Seznamuje čtenáře s přístroji, se kterými se může setkat v optické laboratoři, dále pak

ukazuje jak měřit základní optické veličiny a poslední část je zaměřena na využití optických vlastností světla v metrologii. V knize je rovněž k dispozici velké množství příkladů k procvičení dané látky a jejímu prohloubení.

Další odbornou publikací je kniha prof. P. Malého, Optika ([5]). Její výhodou oproti předcházející učebnici je to, že je vydaná v roce 2008, čili je daleko novější a jsou do ní zahrnuty i novější poznatky. Dalším rozdílem oproti knize [1] je struktura kapitol. Zatímco v knize [1] je čtenář seznámen nejdříve s paprskovou optikou, v knize [5] je tomu naopak. Prvních osm kapitol se zabývá elektromagnetickými vlnami, vlnovou optikou a nechybí zde ani podrobný matematický popis daných jevů a jejich odvození. Devátá kapitola vysvětluje princip fourierovské optiky, což je oblast optiky, v níž se užívá Fourierova transformace [5]. Další kapitoly jsou zaměřeny postupně na geometrickou optiku, spektrální přístroje, základy fotometrie a radiometrie, šíření světla v anizotropních látkách a interakce světla s látkou. Do patnácté kapitoly jsou zařazeny, pro čtenáře možná méně obvyklé, základy laserové fyziky nebo také základy vláknové optiky v kapitole sedmnácté. V knize nechybí ani kapitola o nelineární optice. Předposlední kapitola učebnice je spíše teoretická bez jakéhokoliv matematického popisu a pojednává o zdrojích a detektorech světla. Do poslední, devatenácté kapitoly jsou zařazeny vlastnosti tepelného záření, fotonů a vlnových vlastností částic. Tato učebnice pro vysokoškolské studenty se mi jeví jako velmi přínosná, ale chybí mi zde úlohy, které by danou problematiku nastínily v praxi. Z pohledu středoškolského studenta je kniha využitelná hlavně proto, že jsou zde velmi podrobně vysvětleny základní jevy a principy, ale matematické odvození některých vztahů středoškolský student, bez předchozí matematické přípravy, nepochopí.

Jako nejvhodnější pro středoškolské studenty, kteří mají hlubší zájem o fyziku, se mi jeví překlad americké učebnice Physics for Students of Science and Engineering autorů D. Hallidaye, R. Resnicka a J. Walkera, v češtině nazvaný Fyzika, konkrétně jeho čtvrtý díl Elektromagnetické vlny - Optika - Relativita ([2]). V této učebnici jsou ve čtyřech kapitolách shrnuty základní pojmy a zákony optiky na vyšší úrovni tak, aniž by byl čtenář zatěžován složitou matematikou. Jevy jsou podrobně vysvětleny na příkladech z běžného života a celá kniha je doplněna názornými obrázky, které se týkají dané problematiky, což čtenáře nejen zaujme, ale jistě i potěší. Navíc, za každou

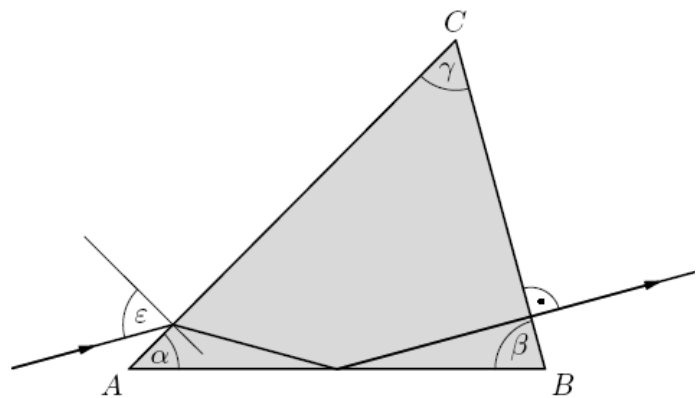
kapitolou následuje shrnutí nejdůležitějších pojmů a dále cvičení a úlohy k procvičení dané látky.

4 PŘÍKLADY VYSKYTUJÍCÍ SE NA FYZIKÁLNÍ OLYMPIÁDĚ

Nyní se podívejme na příklady, které se objevují v zadání fyzikální olympiády. Většina jich je z oblasti mechaniky, elektřiny a magnetismu nebo molekulové fyziky a termodynamiky. Příklady z optiky se ve fyzikální olympiádě za posledních deset let objevovaly průměrně jednou až dvakrát během jednoho ročníku, a to pouze v kategorii A. Tyto úlohy se zaměřují především na zobrazení čočkami a na zákony odrazu a lomu. Pro lepší představu uvádím úlohu ze zadání kategorie A, 48. ročníku fyzikální olympiády.

„Optický hranol

Trojúhelník ABC je kolmým řezem optického hranolu z těžkého flintového skla. Na tento optický hranol dopadá v rovině ABC paprsek žlutého světla pod úhlem dopadu $\varepsilon = 60^\circ$ (obr. 1). Paprsek se láme na rozhraní AC , dopadne na rozhraní AB , kde se úplně



Obr. 1 – Optický hranol

odrazí a vystupuje z hranolu v původním směru kolmo na rozhraní BC . Index lomu flintového skla pro žluté světlo je $n_z = 1,752$.

- Na základě těchto informací určete úhly α , β a γ .
- Hranol doplníme ještě jedním stejným hranolem s kolmým řezem $A'BC$ tak, že bod A' je souměrně sdružený s bodem A podle osy BC . Vznikne tak tzv. přímohledný hranol pro žluté světlo. Nyní místo žlutého světla necháme na hranol dopadat bílé světlo, opět pod úhlem $\varepsilon = 60^\circ$. Dojde k rozkladu světla na barevné spektrum. Určete úhlovou šířku spektra viditelného světla při výstupu z hranolu $ABA'C$. Index lomu těžkého flintového skla pro fialový konec spektra je $n_f = 1,811$ a pro červený konec spektra $n_c = 1,735$.

Výpočty úhlů proveďte s přesností na minuty.

Řešení:

a) Vycházíme z obr. 2. Platí:

$$\gamma = \varepsilon, \quad (1)$$

$$\frac{\sin \varepsilon}{\sin \omega} = n_z \Rightarrow \sin \omega = \frac{\sin \varepsilon}{n_z}, \quad (2)$$

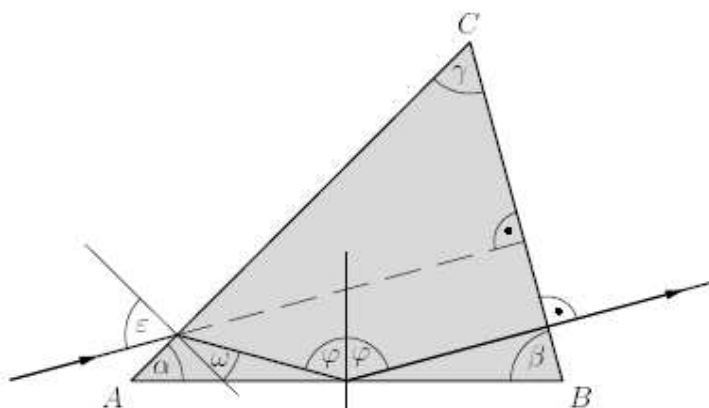
$$\gamma + (90^\circ - \omega) + 2\varphi + 90^\circ = 360^\circ \Rightarrow \gamma + 2\varphi - \omega = 180^\circ, \quad (3)$$

$$\alpha + (90^\circ + \omega) + (90^\circ - \varphi) = 180^\circ \Rightarrow \varphi = \alpha + \omega, \quad (4)$$

Dosazením z (4) do (3) dostaneme

$$\gamma + 2(\alpha + \omega) - \omega = 180^\circ \Rightarrow \alpha = 90^\circ - \frac{1}{2}(\omega + \gamma). \quad (5)$$

Číselně vychází $\gamma = 60^\circ$, $\omega = 29^\circ 37'$, $\alpha = 45^\circ 11'$, $\beta = 180^\circ - \alpha - \gamma = 74^\circ 49'$.



Obr. 2 – K řešení úlohy a)

b) Paprsek žlutého světla prochází dvojhranolem symetricky (obr. 3). Pro paprsek jiné vlnové délky platí obecně vztahy (1) až (5). Z obr. 4 dále odvodíme:

$$(90^\circ - \varphi) + (90^\circ - \varphi') + 2\beta = 180^\circ \Rightarrow \varphi' = 2\beta - \varphi, \quad (6)$$

$$\omega' = \varphi' - \alpha, \quad (7)$$

$$\frac{\sin \varepsilon'}{\sin \omega'} = n \Rightarrow \sin \varepsilon' = n \sin \omega', \quad (8)$$

Postupným numerickým výpočtem dostaneme:

Červený konec spektra: $n_{\xi} = 1,735$,

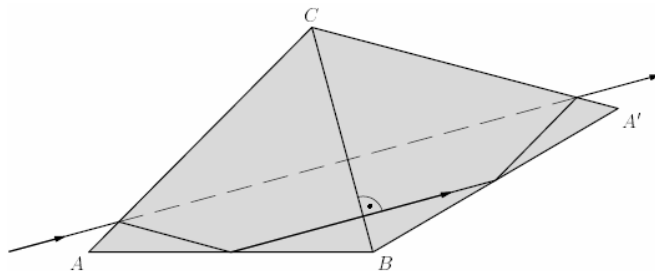
$$\omega_{\xi} = 29^\circ 57', \quad \varphi_{\xi} = 75^\circ 8', \quad \varphi'_{\xi} = 74^\circ 30', \quad \omega'_{\xi} = 29^\circ 18', \quad \varepsilon'_{\xi} = 58^\circ 7'.$$

Fialový konec spektra: $n_f = 1,811$,

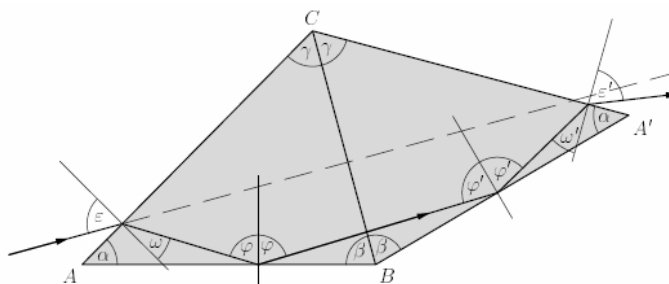
$$\omega_f = 28^\circ 34', \varphi_f = 73^\circ 45', \varphi'_f = 75^\circ 52', \omega'_f = 30^\circ 42', \varepsilon'_f = 67^\circ 32'.$$

Úhlová šířka spektra na výstupu z dvojhnanolu je

$$\delta = \varepsilon'_f - \varepsilon'_\xi = 9^\circ 24' [8]."$$



Obr. 3 – Průchod paprsku dvojhnanolem



Obr. 4 – K řešení úlohy b)

Obr. 1 – 4 převzaty z [8].

5 ZÁKLADNÍ POJMY A ZÁKONY

5.1 Světlo jako elektromagnetické vlnění

Světlo je elektromagnetické vlnění, které je možno pozorovat pouhým okem. Jeho frekvence se pohybuje v rozmezí $7,7 \cdot 10^{14} - 3,95 \cdot 10^{14}$ Hz. „Optika se však zabývá také vlnami z ultrafialové a infračervené oblasti [5].“ Šíření světla popisuje vlnová rovnice (9), která plyne z Maxwellových rovnic. Jejich postupným řešením dostáváme

$$\Delta \vec{E} - \mu\sigma \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} - \mu\epsilon_0 \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} - \mu \frac{\partial^2 \vec{P}}{\partial t^2} = 0. \quad (9)$$

Pro homogenní izotropní dielektrikum, kde $\vec{P} = 0$ a $\sigma = 0$ pak dostáváme speciální případ vlnové rovnice

$$\Delta \vec{E} - \mu\epsilon \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = 0, \quad (10)$$

kde

$$c = \frac{1}{\sqrt{\mu\epsilon}} \quad (11)$$

je fázová rychlost šíření.

Nyní můžeme zavést dobře známou veličinu, index lomu prostředí, který je definován jako podíl rychlosti světla ve vakuu a rychlosti světla v daném prostředí, tedy

$$n = \frac{c_0}{c}, \quad (12)$$

kde $c_0 = 3 \cdot 10^8$ m/s je rychlost světla ve vakuu a c je rychlost světla v daném prostředí.

„Každé řešení vlnové rovnice se nazývá vlnou [5].“ Nejjednodušším řešením vlnové rovnice je rovinná harmonická vlna, která je charakterizována rovnicí

$$\vec{E} = \vec{E}_0 \cos(\omega t - \vec{k} \cdot \vec{r} + \varphi), \quad (13)$$

kde \vec{E}_0 je amplituda vlny, ω kruhová frekvence a \vec{k} je vlnový vektor, pro který platí

$$\vec{k} = k\vec{s} = \frac{2\pi}{\lambda}\vec{s} = \frac{\omega}{c}\vec{s}. \quad (14)$$

V předchozí rovnici je \vec{s} jednotkový vektor ve směru šíření, λ je vlnová délka vlny v prostředí.

Pokud uvažujeme jednodimenzionální skalární harmonickou vlnu postupující ve směru osy z , tak dostáváme vztah známý ze střední školy

$$E = E_0 \cos(\omega t - kz). \quad (15)$$

Připomeňme si nyní, co platí pro jednotlivé členy rovnice (15). Pro kruhovou frekvenci ω platí

$$\omega = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f, \quad (16)$$

kde T je perioda vlny a f je frekvence vlnění. Pro vztah mezi periodou a frekvencí platí

$$f = \frac{1}{T}. \quad (17)$$

Veličinu k nazýváme vlnovým číslem a platí pro něj

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}, \quad (18)$$

kde λ je již zmiňovaná vlnová délka v určitém prostředí a platí pro ni

$$\lambda = cT, \quad (19)$$

tedy

$$\lambda = \frac{c}{f}. \quad (20)$$

Pokud rovnici (20) vhodně upravíme a obě strany vynásobíme výrazem 2π , tak dostáváme

$$\omega = ck. \quad (21)$$

Pozn.: Vztahy (9) – (14) jsou uvedeny pouze orientačně. Jejich podrobné odvození nelze provést prostředky středoškolské matematiky.

Vztahy (9) – (21) převzaty z [5].

5.2 Odraz a lom světla

V předchozí kapitole jsme se zabývali světlem jako elektromagnetickým vlněním. Nyní budeme studovat vlastnosti světla tak, že dráhu vlny nahradíme přímkou, která je kolmá k vlnoplochám. Tuto přímku nazýváme paprskem. Šířením světla pomocí paprsků se zabývá geometrická optika, kterou také můžeme nazývat paprsková optika.

Podívejme se na to, co se stane, dopadne – li paprsek světla na rozhraní, které odděluje dvě optická prostředí o indexech lomu n_1 a n_2 . Paprsek dopadajícího světla se

na rozhraní těchto dvou prostředí chová tak, že část světla se odrazí zpět a část světla projde rozhraním, avšak změní se směr jeho šíření. Předpokládejme, že paprsek dopadá na rozhraní pod úhlem α (vzhledem k normále). Část paprsku se od rozhraní odrazí pod úhlem α' a část paprsku prochází do druhého prostředí pod úhlem β (opět vzhledem k normále). Vztahy mezi těmito úhly jsou dány zákonem odrazu, pro který platí

$$\alpha = \alpha', \quad (22)$$

a zákonem lomu, nazývaného také Snellovým zákonem, který je dán vztahem

$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta. \quad (23)$$

Hodnoty úhlů α, α' a β nabývají hodnot od 0° do 90° .

Směr šíření lomeného paprsku závisí na indexech lomů daných prostředí. Uvažujme nyní, že $n_1 < n_2$. Rovnici (23) můžeme upravit na tvar

$$\sin \alpha = \frac{n_2}{n_1} \sin \beta. \quad (24)$$

Protože výraz $\left| \frac{n_2}{n_1} \right| > 1$, tak z toho vyplývá, že

$$\sin \alpha > \sin \beta, \quad (25)$$

tedy na intervalu $\left\langle 0, \frac{\pi}{2} \right\rangle$, pro který naše řešení uvažujeme, je

$$\alpha > \beta. \quad (26)$$

To znamená, že paprsek se láme směrem ke kolmici.

Nyní se podívejme na opačnou situaci, kdy $n_1 > n_2$. V rovnici (24) bude $0 < \left| \frac{n_2}{n_1} \right| < 1$, což vede k závěru, že na intervalu $\left\langle 0, \frac{\pi}{2} \right\rangle$ platí

$$\alpha < \beta. \quad (27)$$

Nerovnice (27) nám tedy říká, že paprsek se při přechodu z opticky hustšího do opticky řidšího prostředí láme směrem od kolmice, avšak tato vlastnost není splněna pro všechny hodnoty úhlu α . Vzhledem k tomu, že se hodnoty $\sin \alpha$ a $\sin \beta$ pohybují v intervalu $\langle 0, 1 \rangle$, tak by při určitých hodnotách úhlu α nastala situace, že výraz $\sin \beta$ by v rovnici (24) byl větší než jedna, což není možné.

Největší možná hodnota pro výraz $\sin \beta$ je

$$\sin \beta = 1, \quad (28)$$

z čehož plyne tvar rovnice (24), který v tomto případě bude

$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1} \sin 90^\circ, \quad (29)$$

tedy

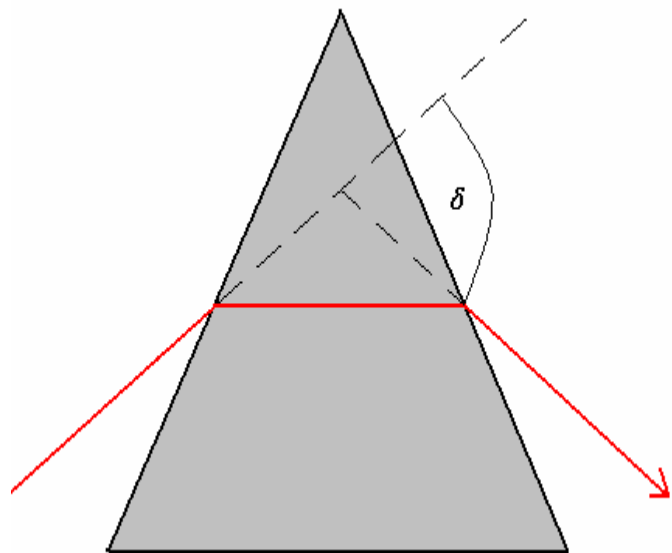
$$\sin \alpha_m = \frac{n_2}{n_1}. \quad (30)$$

Úhel α_m nazýváme mezním úhlem, při kterém nastává úplný odraz. To znamená, že při úhlu dopadu α_m , prochází lomený paprsek těsně podél rozhraní. Pokud je úhel dopadu větší než α_m , tak se paprsek již neláme a dochází pouze k jeho odrazu. Na tomto principu jsou založeny například optické kabely, které se v dnešní době velmi často používají k přenosu informací.

5.3 Optický hranol

„Hranolem nazýváme průhledné prostředí, které je omezeno dvěma rovinami, jež nejsou rovnoběžné [1].“

Průnikem těchto dvou rovin je hrana, kterou nazýváme také lámavá hrana, a odchylkou těchto dvou rovin je úhel φ , nazývaný jako lámavý úhel. Pro studium průchodu světla hranolem je důležitý jeho kolmý řez, který je znázorněn na obr. 5. Na tomto obrázku je znázorněn i průchod paprsku hranolem.



Obr. 5 – Průchod paprsku hranolem

Jedním z nejdůležitějších parametrů optického hranolu je deviace paprsku. Tento pojem určuje odchylku dopadajícího a vycházejícího paprsku. Na obr. 5 je deviace znázorněna jako úhel δ . Zkusme si nyní vztah pro deviaci paprsku odvodit.

Mějme dán úhel dopadu paprsku ε a lámavý úhel φ . Ze součtu úhlů v trojúhelníku DEC na obr. 6 platí

$$180^\circ = \varphi + 90^\circ - \varepsilon' + 90^\circ - \tau, \quad (31)$$

tedy

$$\varphi = \varepsilon' + \tau. \quad (32)$$

Nyní se zaměříme na trojúhelník DEF , pro jehož úhly platí

$$\alpha = \varepsilon - \varepsilon' \quad (33)$$

a

$$\beta = \tau' - \tau. \quad (34)$$

Nyní můžeme zapsat vztah pro součet úhlů v tomto trojúhelníku. Platí

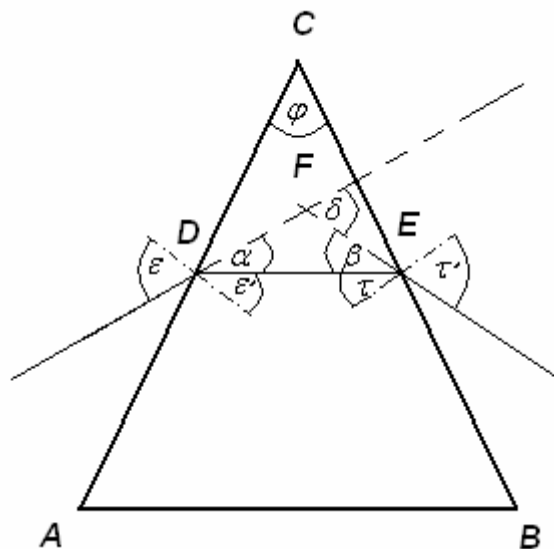
$$180^\circ = \alpha + \beta + 180^\circ - \delta. \quad (35)$$

Z rovnice (35) můžeme vyjádřit neznámou δ , čímž dostaneme hledaný vztah pro deviaci paprsku, pro který tedy platí

$$\delta = \alpha + \beta \quad (36)$$

a po dalších úpravách dostaneme

$$\delta = \varepsilon + \tau' - \varphi. \quad (37)$$



Obr. 6 – K odvození vztahu pro deviaci paprsku

Optické hranoly se nejčastěji používají v různých optických přístrojích, kde je zapotřebí lomu světla popř. úplného odrazu světla.

5.4 Optický klín

Optický klín je hranol, kde lámavý úhel φ je malý. Předpokládejme, že se optický klín nachází ve vakuu (nebo ve vzduchu). Při odvození deviace paprsku využijeme faktu, že pro malé úhly platí $\sin \alpha \approx \alpha$. Na základě tohoto můžeme zapsat zákon lomu postupně pro úhly ε a τ ve tvaru

$$\varepsilon = n\varepsilon' \text{ a } \tau' = n\tau, \quad (38)$$

kde n je index lomu materiálu, ze kterého je optický klín vyroben. Dále postupujeme stejným způsobem jako v případě optického hranolu. Dosazením (38) do (37) dostaneme

$$\delta = n(\varepsilon' + \tau) - \varphi \quad (39)$$

a využitím (32) získáme

$$\delta = \varphi(n - 1). \quad (40)$$

5.5 Optické zobrazování

Optické zobrazování je jev, se kterým se denně setkáváme, aniž si to uvědomujeme. Jako příklad uvedu samotné vidění. Předmět, na který se díváme, se zobrazí na sítnici oka a na základě toho ho můžeme vnímat. „Úkolem optického zobrazování je tedy učinit předměty viditelnými na jiném místě [1].“ V našem případě se tedy jednalo o zobrazení na sítnici oka. K zobrazování se nejčastěji používají zrcadla nebo čočky.

Co se týče čoček, tak ze střední školy jsou nám známy dva druhy tzv. tenkých čoček, mezi které patří spojná a rozptylná čočka. Tyto čočky se nazývají tenké z důvodu, že vzdálenost mezi jejími lámavými plochami je daleko menší než jejich poloměry křivosti a můžeme ji tudíž zanedbat. Pro tenkou čočku platí zobrazovací rovnice ve tvaru

$$f = \frac{n_1 R_1 R_2}{(n_2 - n_1)(R_2 - R_1)}, \quad (41)$$

kde f je předmětová ohnisková vzdálenost, R_1, R_2 jsou poloměry křivosti jednotlivých lámavých ploch, n_1 je index lomu prostředí, ve kterém se čočka nachází (většinou $n_1 = 1$) a n_2 je index lomu materiálu, ze kterého je čočka vyrobena. Ze střední školy je znám také vztah pro příčné zvětšení obrazu

$$Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = -\frac{a' - f}{f} = -\frac{f}{a - f}, \quad (42)$$

kde y je velikost předmětu, y' je velikost obrazu, a je poloha předmětu (vzdálenost od vrcholu čočky) a a' je poloha obrazu. Předpokládejme nyní, že se čočka nachází ve vzduchu s indexem lomu $n_1 = 1$. Úpravou části vztahu (42) na tvar

$$f = \frac{aa'}{a + a'} \quad (43)$$

a dalšími drobnými úpravami dostaneme „středoškolský“ tvar zobrazovací rovnice tenké čočky

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'}. \quad (44)$$

Nyní definujme optickou mohutnost φ , která je definována jako převrácená hodnota předmětové ohniskové vzdálenosti, tedy

$$\varphi = \frac{1}{f}, \quad (45)$$

popř.

$$\varphi = \frac{n_1}{f}, \quad (46)$$

pokud se čočka nachází v jiném prostředí, než je vzduch. Jednotkou optické mohutnosti je dioptrie [$D = m^{-1}$]. Vhodnou úpravou rovnice (41) můžeme získat vztah pro optickou mohutnost ve tvaru

$$\varphi = \frac{n_1}{f} = (n_2 - n_1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (47)$$

Abychom dovedli předcházející rovnice správně použít, je třeba zavést tzv. znaménkovou konvenci, která přiřadí daným veličinám příslušné znaménko.

- a) Předpokládáme, že světlo jde optickou soustavou zleva doprava.

- b) Předmětová vzdálenost a je kladná, pokud předmět leží vlevo od rozhraní, v opačném případě je záporná.
- c) Obrazová vzdálenost a' je kladná, pokud obraz leží vpravo od rozhraní, v opačném případě je záporná.
- d) Výška předmětu y i výška obrazu y' mají kladná znaménka, pokud leží nad optickou osou, v opačném případě mají znaménka záporná [11].
- e) Leží – li předmět před vypuklou lámavou plochou čočky, pak je poloměr křivosti $R > 0$.
- f) Leží – li předmět před vydutou lámavou plochou čočky, pak je poloměr křivosti $R < 0$ [2].

Z předcházejících dvou bodů tedy plyne:

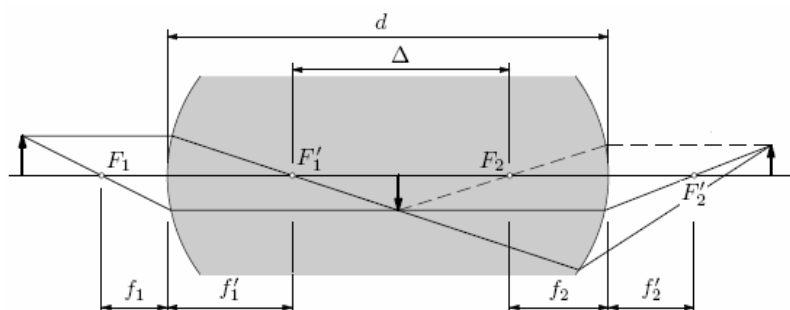
- g) Spojky mají kladnou ohniskovou vzdálenost.
- h) Rozptylky mají zápornou ohniskovou vzdálenost.

Mezi další druhy čoček, které nám nejsou známy tak dobře jako tenké čočky, patří tzv. tlusté čočky. U takovýchto čoček již nemůžeme zanedbat vzdálenost jejich lámavých ploch d . Pro vzdálenost ohnisek F_1' a F_2 jednotlivých lámavých ploch tlusté čočky (obr. 7) platí

$$\Delta = d - f_1' - f_2 = \frac{d(n_2 - n_1) + n_2(R_2 - R_1)}{n_2 - n_1} . \quad (48)$$

Pro tlustou čočku dále platí, že její předmětová a obrazová ohnisková vzdálenost jsou stejné. Platí tedy vztah

$$f = f' = -\frac{f_1 f_2}{\Delta} = \frac{n_1 n_2 R_1 R_2}{(n_2 - n_1) \cdot [(n_2 - n_1)d + (R_2 - R_1)n_2]} . \quad (49)$$



Obr. 7 – Tlustá spojka

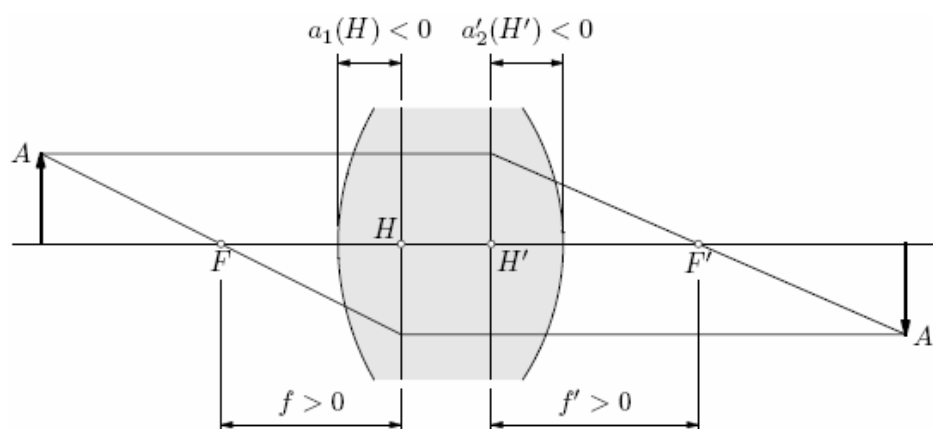
U tlustých čoček má význam definovat rovněž hlavní roviny, popř. hlavní body. Hlavní rovina je rovina kolmá na optickou osu, v níž je příčné zvětšení obrazu $Z = 1$. Znamená to tedy, že předmět i obraz jsou stejně orientovány a mají stejnou velikost. Hlavními body pak nazýváme průnik těchto rovin s optickou osou. Polohu hlavních bodů určují vztahy

$$a_1(H) = \frac{f_1 d}{\Delta} = \frac{n_1 R_1 d}{d(n_2 - n_1) + n_2(R_2 - R_1)}, \quad (50)$$

a

$$a'_2(H') = \frac{f'_2 d}{\Delta} = -\frac{n_1 R_2 d}{d(n_2 - n_1) + n_2(R_2 - R_1)}. \quad (51)$$

V případě tlusté čočky neurčujeme předmětovou, obrazovou a ohniskovou vzdálenost od lámavých ploch čočky, ale od předmětové a obrazové hlavní roviny (obr. 8). Další rozdíl mezi tlustými a tenkými čočkami se týká grafického znázorňování chodu paprsků. U tlustých čoček se paprsky lámou na hlavních rovinách tak, že paprsek rovnoběžný s optickou osou se láme v obrazové hlavní rovině a pak směřuje do obrazového ohniska čočky a paprsek procházející předmětovým ohniskem se láme v předmětové hlavní rovině a dále pokračuje rovnoběžně s optickou osou (obr. 8).



Obr. 8 – Hlavní roviny a hlavní body čočky

Nyní se podívejme na to, co se stane, budeme – li mít dvě tenké čočky, jejichž optické osy jsou shodné, vedle sebe. Tuto soustavu nazýváme centrovanou. Pokud bychom neznali níže uvedené vztahy, tak bychom výslednou polohu a zvětšení obrazu počítali tak, že nejdříve bychom určili vlastnosti obrazu vytvořeného pomocí první

čočky a tento obraz bychom považovali jako předmět pro zobrazení druhou čočkou. Pro ohniskovou vzdálenost soustavy dvou tenkých čoček platí vztah

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2}, \quad (52)$$

kde d je vzdálenost středů obou čoček, f_1 je ohnisková vzdálenost první čočky a f_2 je ohnisková vzdálenost druhé čočky.

Stejně jako u tlustých čoček, tak i u centrované soustavy dvou tenkých čoček je potřeba určit hlavní roviny. Pro jejich polohu platí

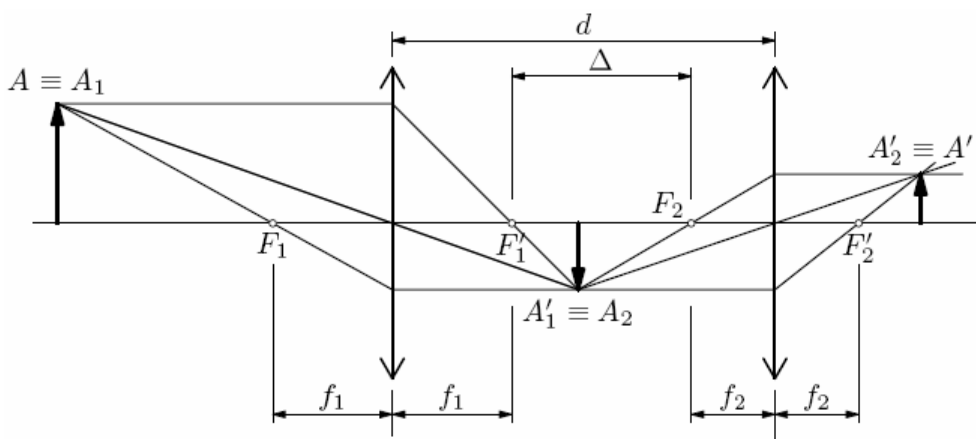
$$a_1(H) = \frac{f_1 d}{\Delta} = \frac{f_1 d}{d - f_1 - f_2} \quad (53)$$

a

$$a'_2(H') = \frac{f_2 d}{\Delta} = \frac{f_2 d}{d - f_1 - f_2}, \quad (54)$$

kde Δ je vzdálenost obrazového ohniska první čočky a předmětového ohniska druhé čočky (obr. 9).

Dále také platí, že předmětovou, obrazovou a ohniskovou vzdálenost neurčujeme od lámavých ploch čočky, ale od předmětové a obrazové hlavní roviny, stejně jako u čoček tlustých.



Obr. 9 – Dvě tenké čočky

Pro podrobnější studium problematiky čoček a optického zobrazování doporučuji čtenáři, aby si prostudoval studijní text pro řešitele fyzikální olympiády

s názvem Zobrazení čočkami ([11]), jehož autorem je J. Trnka a který je dostupný na webových stránkách fyzikální olympiády.

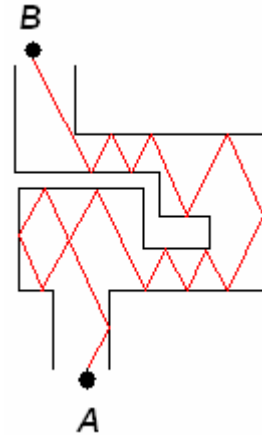
Vztahy (41), (47) – (54) a obr. 7, 8 a 9 převzaty z [11].

6 ŘEŠENÉ ÚLOHY

Úloha č. 1 – Bludiště

Na začátku zrcadlového bludiště, jehož stěny svírají úhel 90° , stojí člověk (bod A , obr. 10), který posvítí na vedlejší stěnu laserem, jehož paprsek svírá se stěnou úhel 20° a postupně se odráží od stěn bludiště, jak je zakresleno na obrázku 10. Na druhém konci stojí pozorovatel (bod B), který se dívá dovnitř bludiště. Pod jakým úhlem k němu laserový paprsek dopadá?

Upraveno podle [2].



Obr. 10 – Zrcadlové bludiště

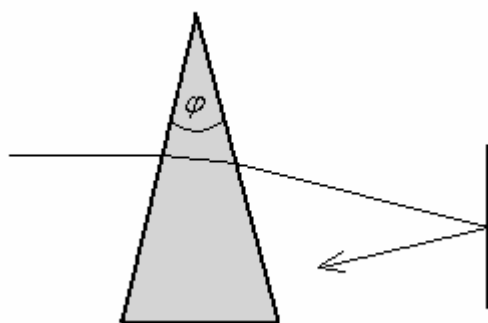
Řešení:

Jestliže paprsek svírá se stěnou, na kterou dopadá, úhel 20° , znamená to, že úhel dopadu je roven 70° . Ze zákona odrazu plyne, že úhel odrazu je rovněž 70° . Poté paprsek dopadá na stěnu kolmou ke stěně první. Z geometrie obdélníka (resp. trojúhelníka) platí, že úhel dopadu na tuto stěnu bude roven 20° . Takto bychom mohli probrat všechny další odrazy od stěn. Došli bychom k závěru, že úhly dopadu a odrazu od stěn rovnoběžných se stěnou prvního odrazu jsou rovny 70° a úhly dopadu a odrazu od stěn kolmých ke stěně prvního odrazu jsou rovny 20° . Protože pozorovatel stojí v bodě B , který můžeme považovat za část stěny kolmé ke stěně prvního odrazu, je tedy úhel, pod kterým dopadá laserový paprsek k pozorovateli, roven 20° .

Úloha č. 2 – Optický klín

Vodorovný paprsek světla prochází optickým klínem o indexu lomu $n = 1,5$, jehož lámaný úhel φ je 4° , a dopadá na rovinné zrcadlo, které je postaveno pod úhlem 90° vzhledem k původnímu směru paprsku (obr. 11). O jaký úhel musíme zrcadlo pootočit, aby byl odražený paprsek opět vodorovný?

Upraveno podle [6].



Obr. 11 – Průchod paprsku optickým klínem

Řešení:

Abychom mohli určit pod jakým úhlem dopadá paprsek na zrcadlo, je potřeba vypočítat odchylku paprsku po průchodu klínem, kterou získáme dosazením známých veličin do vztahu

$$\delta = (n - 1)\varphi.$$

Odchylka paprsku je tedy $\delta = 2^\circ$. Z geometrie trojúhelníka snadno zjistíme, že úhel dopadu je rovněž 2° , což ovšem znamená, že dopadající a odražený paprsek svírají úhel roven 4° a tedy odražený paprsek je od vodorovného směru odchýlen o 2° . Aby byl odražený paprsek opět vodorovný, musí dopadající a odražený paprsek svírat úhel roven 2° (úhel dopadu se tedy musí rovnat 1°), což docílíme tím, že zrcadlo pootočíme o jeden stupeň ve směru hodinových ručiček.

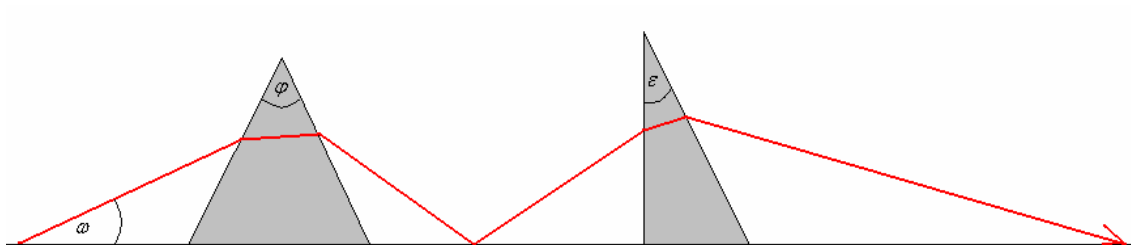
Úloha č. 3 – Dva optické hranoly a zrcadlo

Mějme dány dva optické hranoly nacházející se na podložce, kterou je rovinné zrcadlo. Paprsek monochromatického světla svírající s podložkou úhel ω dopadá na první hranol s lámavým úhlem φ pod úhlem dopadu α a poté z tohoto hranolu vychází pod úhlem α' (vzhledem k normále plochy). Po odrazu od podložky (zrcadla) dopadá na druhý hranol, který je pravouhlý, s lámavým úhlem ε . Tuto situaci znázorňuje obr. 12.

a) Pod jakým úhlem dopadu dopadne paprsek na rovinné zrcadlo (podložku) po průchodu prvním hranolem?

b) Jaký úhel budou svírat paprsek a podložka po průchodu druhým hranolem, víme – li, že druhý hranol vychýlí paprsek o úhel μ .

Řešte pro hodnoty $\omega = 40^\circ$, $\varphi = 20^\circ$, $\alpha = 35^\circ$, $\alpha' = 55^\circ$, $\varepsilon = 10^\circ$, $\mu = 55^\circ$.



Obr. 12 – Průchod paprsku dvěma hranoly

Řešení:

a) Abychom mohli vypočítat úhel ζ (obr. 13), který svírá paprsek s podložkou po průchodu prvním hranolem, použijeme vztah (37), ze kterého dostaneme

$$\delta = \alpha + \alpha' - \varphi,$$

$$\delta = 70^\circ.$$

Nyní využijeme fakt, že součet vnitřních úhlů v trojúhelníku je roven 180° . Všimněme si trojúhelníka ABC na obr. 13. Součet jeho úhlů můžeme zapsat takto:

$$\omega + 90^\circ - \zeta + 180^\circ - \delta = 180^\circ,$$

$$\zeta = 90^\circ + \omega - \delta,$$

$$\zeta = 60^\circ.$$

b) Pro výpočet hledaného úhlu γ potřebujeme znát úhly ε a β' . Úhel β' vypočteme opět ze vztahu (37), ale nejdříve musíme vypočítat hodnotu úhlu β . Podívejme se na trojúhelník BDE . Úhel u vrcholu D je pravý a pro součet vnitřních úhlů v tomto trojúhelníku platí

$$90^\circ - \zeta + 90^\circ + 90^\circ - \beta = 180^\circ,$$

$$\beta = 90^\circ - \zeta,$$

$$\beta = 30^\circ.$$

Použitím vztahu (37) dále dostáváme

$$\mu = \beta + \beta' - \varepsilon,$$

tedy

$$\beta' = \mu + \varepsilon - \beta,$$

$$\beta' = 35^\circ.$$

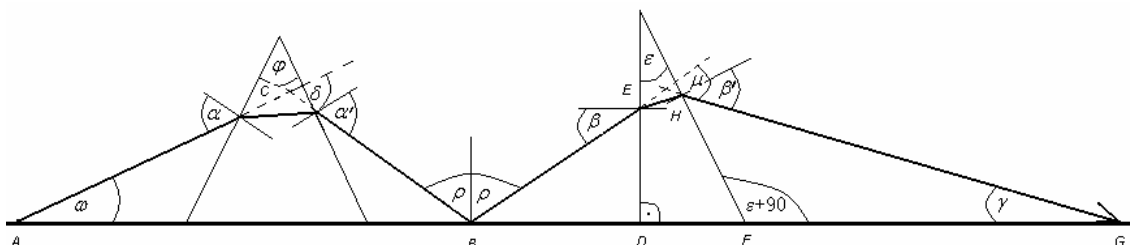
Nyní můžeme přejít k trojúhelníku FGH , pro jehož úhly platí

$$\varepsilon + 90^\circ + \gamma + 90^\circ - \beta' = 180^\circ$$

a tedy hledaný úhel je roven

$$\gamma = \beta' - \varepsilon,$$

$$\gamma = 25^\circ$$



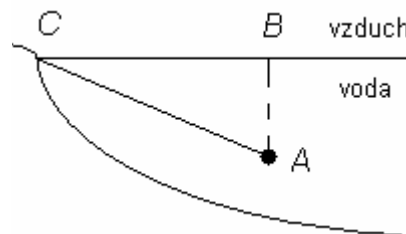
Obr. 13 – K řešení úlohy č. 3

Úloha č. 4 – Potápěč

Potápěč nacházející se v hloubce 100 m pod hladinou jezera chce svému kolegovi, který stojí na břehu ve vzdálenosti 200 m od místa, kde došlo k potopení, vyslat světelný signál. Je možné, aby jej potápěčův kolega spatřil? Index lomu vody $n = 1,33$.

Řešení:

Vyjdeme z obr. 14. Bod A představuje místo, ze kterého potápěč vysílá světelný signál, který je znázorněn úsečkou AC . Bod C představuje kolegu potápěče a bod B je místo, kde došlo k potopení potápěče. Ze zadání je zřejmé, že $|AB| = 100$ m a



Obr. 14 – K řešení úlohy č. 4

$|BC| = 200$ m. Z těchto parametrů můžeme vypočítat úhel dopadu paprsku na hladinu.

Platí pro něj

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{|BC|}{|AB|},$$

$$\alpha \doteq 63^{\circ}27'.$$

Nyní si určíme mezní úhel α_m pro rozhraní voda – vzduch.

$$\sin \alpha_m = \frac{1}{n},$$

$$\alpha_m \doteq 48^{\circ}45'.$$

Z obou výsledků je patrné, že $\alpha > \alpha_m$, tedy potápěčův kolega nemůže světelný signál spatřit, neboť paprsek se od vodní hladiny odráží a neprochází směrem nad hladinu.

Úloha č. 5 – Ryba v akváriu

Ve skleněném akváriu s nezakrytým otvorem plave ryba v hloubce 5 cm pod hladinou.

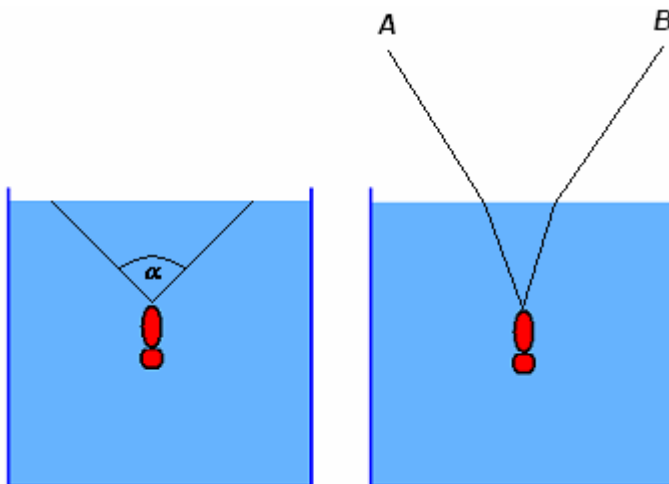
- Pod jakým zorným úhlem uvidí oblohu? (obr. 15)
- Jak se tento úhel změní, jestliže bude akvárium zakryto sklem tak, že se hladina vody tohoto skla dotýká?

Index lomu vody $n_v = 1,33$, index lomu skla $n_s = 1,5$.

- Předpokládejme, že 10 cm nad akváriem stojí pozorovatel, jehož oči jsou od sebe vzdáleny 4 cm. V jaké hloubce pod hladinou uvidí rybu? (obr. 16)

Při řešení části c), využijte faktu, že pro malé úhly platí: $\sin \alpha \approx \alpha$ a $\operatorname{tg} \alpha \approx \alpha$.

Část a) upravena podle [6], část c) upravena podle [2].



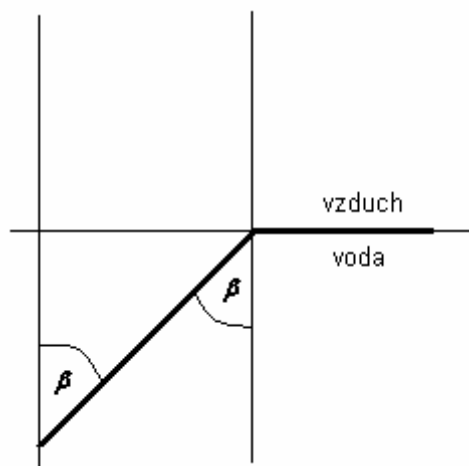
Obr. 15 – Zorný úhel ryby

Obr. 16 – Paprsky jdoucí od pozorovatele k rybě

Řešení:

a) Při řešení tohoto příkladu vycházíme z toho, že zorné pole ryby je omezeno mezním úhlem β . Při úhlu větším než je β nedochází k průchodu paprsku přes vodní hladinu a paprsek je odražen zpět (obr. 17). Pro mezní úhel na rozhraní voda – vzduch platí

$$\sin \beta = \frac{1}{n_v},$$



Obr. 17 – K řešení úlohy 5a)

tedy

$$\sin \beta = \frac{1}{1,33}.$$

Z toho plyne

$$\beta = 48^\circ 45',$$

tedy pro zorný úhel α platí

$$\alpha = 2\beta = 97^\circ 30'.$$

b) V tomto případě nás bude zajímat mezní úhel na rozhraní sklo – vzduch. Pro tento úhel δ platí

$$\sin \delta = \frac{1}{n_s}.$$

Tedy

$$\sin \delta = \frac{1}{1,5},$$

což znamená, že

$$\delta = 41^\circ 48'.$$

Tedy pro zorný úhel ryby τ platí

$$\tau = 2\delta = 83^\circ 36'.$$

Zorný úhel ryby se tedy zmenší o $13^\circ 52'$.

c) Pozorovatel uvidí rybu v hloubce odpovídající vzdálenosti průsečíku prodloužení paprsků, které vycházejí z jeho očí (bod D , obr. 18), a vodní hladiny. Tuto vzdálenost (hloubku) si nyní odvodíme. Vycházíme ze zákona lomu. Platí

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

Jelikož se pozorovatel nachází ve vzduchu, takže $n_1 = 1$, tedy

$$n_2 = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}.$$

Jelikož úhly α a β jsou velmi malé, můžeme proto psát

$$n_2 = \frac{\alpha}{\beta}.$$

Nyní si všimněme trojúhelníka ABC na obr. 15. Pro tangens úhlu β platí

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{x}{h},$$

kde h je skutečná hloubka, ve které se ryba nachází, tedy 8 cm. Nyní se podívejme na trojúhelník BDE .

Platí

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{x}{y},$$

kde y je hledaná zdánlivá hloubka. Nyní z obou rovnic vyjádříme neznámou x a oba výrazy porovnáme. Dostaneme rovnici

$$y \cdot \operatorname{tg} \alpha = h \cdot \operatorname{tg} \beta,$$

kteřou můžeme napsat ve tvaru

$$y \cdot \alpha = h \cdot \beta.$$

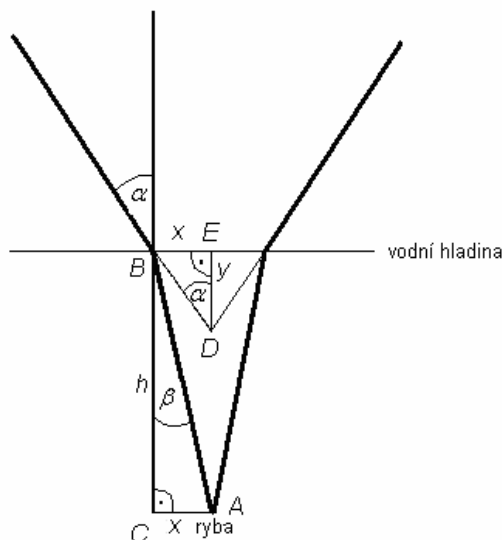
Z této rovnice vyjádříme neznámou y a dostáváme tak formuli pro výpočet hledané hloubky

$$y = \frac{h \cdot \beta}{\alpha},$$

tedy

$$y = \frac{h}{n_2}.$$

Po dosazení známých hodnot do toho vztahu vypočítáme, že zdánlivá hloubka, ve které rybu vidí pozorovatel, je asi 6 cm.



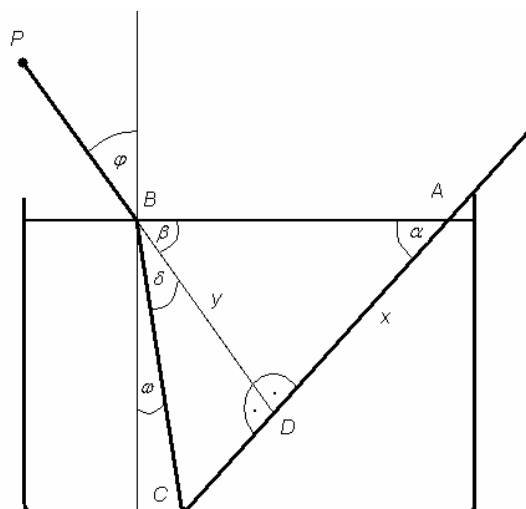
Obr. 18 – K řešení úlohy 5c)

Úloha č. 6 – Chemická laboratoř

V chemické laboratoři je umístěna kádinka s 60% roztokem kyseliny sírové. Do kádinky je ponořena 16 cm dlouhá skleněná tyčinka tak, že pod hladinou kyseliny se nachází $\frac{3}{4}$ její délky. Úhel mezi hladinou kyseliny a tyčinkou je roven 60° . Vedle kádinky stojí pozorovatel a dívá se na ni shora tak, že konec tyčinky ponořený v kyselině vidí pod úhlem 90° . Jak dlouhá se bude tyčinka jevit? Index lomu 60% roztoku kyseliny sírové je 1,4 [7].

Řešení:

Paprsek jdoucí od pozorovatele k dolnímu konci skleněné tyčinky se na optickém rozhraní vzduch - kyselina samozřejmě láme, ale pozorovatel vnímá tyčinku tak, jako kdyby se paprsek nelámал. Tuto skutečnost naznačuje obr. 19. Pozorovatel (bod P) tedy vidí místo vzdálenosti $|AC|$ pouze vzdálenost $|AD|$. Vzdálenost $|AC|$ je nám známa. Je to



Obr. 19 – K řešení úlohy č. 6

$$\frac{3}{4} \cdot 16 = 12 \text{ cm.}$$

Vzdálenost $|AD|$ si označme písmenem x . Dále víme, že úhly u vrcholu D jsou pravé a úhel $\alpha = 60^\circ$, což nám umožňuje dopočítat úhel β a úhel dopadu φ . Ze součtu vnitřních úhlů v trojúhelníku ABD vyplývá, že $\beta = 30^\circ$. Pro úhel dopadu tedy platí $\varphi = 60^\circ$. Nyní, pomocí zákona lomu, vypočítáme úhel ω .

Platí

$$\begin{aligned} n_1 \sin \varphi &= n_2 \sin \omega, \\ \sin \omega &= \frac{1 \cdot \sin 60^\circ}{1,4}, \\ \omega &= 38,21^\circ. \end{aligned}$$

Pomocí tohoto úhlu vypočítáme úhel δ , pro který platí

$$\delta = \varphi - \omega = 21,79^\circ.$$

Nyní označme vzdálenost $|BD|$ písmenem y .

Jelikož jsou trojúhelníky ABD a BCD pravoúhlé, tak platí

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{|AC| - x}{y}$$

a

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{x}{y}.$$

Z druhé rovnice si vyjádříme neznámou y a upravenou rovnicí dosadíme do rovnice první. Dostáváme rovnici

$$\operatorname{tg} \delta = \frac{(|AC| - x) \cdot \operatorname{tg} \beta}{x}.$$

Rovnici upravíme, vyjádříme z ní neznámou x a dostaneme rovnici

$$x = \frac{|AC| \cdot \operatorname{tg} \beta}{\operatorname{tg} \beta + \operatorname{tg} \delta}.$$

Po číselném dosazení dostaneme výsledek $x = 7,09 \text{ cm}$, což je délka ponořené části skleněné tyčinky tak, jak ji vnímá pozorovatel. K této délce přičteme 4 cm délky tyčinky, které jsou ve vzduchu a je tedy jasné, že tyčinka se pozorovateli jeví asi 11 cm dlouhá.

Úloha č. 7 – Čočka ve vodě

Tenkou čočku, která je vyrobena ze skla o indexu lomu $n = 1,5$, ponoříme do vody o indexu lomu $n_v = \frac{4}{3}$. Jak se změní její ohnisková vzdálenost?

Upraveno podle [3].

Řešení:

Pro ohniskovou vzdálenost čočky ve vzduchu platí

$$\frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right)$$

a pro ohniskovou vzdálenost téže čočky ve vodě platí

$$\frac{n_v}{f_v} = (n-n_v) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

Vydělením těchto rovností dostáváme vztah pro poměr ohniskových vzdáleností čočky ve vodě a ve vzduchu

$$\frac{f_v}{f} = n_v \frac{(n-1)}{(n-n_v)}.$$

Po číselném dosazení dostaneme

$$\frac{f_v}{f} = 4,$$

tedy

$$f_v = 4f.$$

Ohnisková vzdálenost čočky, kterou ponoříme do vody, se tedy zvětší čtyřikrát.

Úloha č. 8 – Tenká spojka

Mějme dánu tenkou spojnou čočku o ohniskové vzdálenosti $f = 5$ cm, indexu lomu $n = 1,5$ a předmět ležící 45 cm před čočkou. Do jakého prostředí musíme tuto soustavu umístit, víme – li, že zvětšení obrazu vytvořeného čočkou v tomto prostředí bude pětkrát větší než zvětšení obrazu vytvořeného tou jistou čočkou ve vzduchu?

Řešení:

Nejdříve určíme zvětšení obrazu ve vzduchu a v neznámém prostředí. Podle vztahu (42) určíme

$$Z = -\frac{f}{a-f} \text{ (vzduch)}$$

a

$$Z' = 5Z = -\frac{f'}{a-f'} \text{ (neznámé prostředí).}$$

Vyloučením neznámé Z z této soustavy rovnic dostaneme rovnici

$$\frac{f}{a-f} = \frac{f'}{5(a-f')}.$$

Dosazením známých hodnot můžeme vypočítat ohniskovou vzdálenost čočky v neznámém prostředí. Tedy

$$\frac{1}{8} = \frac{f'}{225-5f'},$$

$$13f' = 225,$$

$$f' = \frac{225}{13} \text{ cm.}$$

Dále pomocí vztahu (41) popř. (47) určíme poměr mezi ohniskovou vzdáleností v neznámém prostředí a ohniskovou vzdáleností ve vzduchu. Platí

$$\frac{f'}{f} = \frac{n'(n-1)}{(n-n')},$$

$$\frac{45}{13} = \frac{\frac{1}{2}n'}{\frac{3-2n'}{2}},$$

$$135 - 90n' = 13n',$$

$$n' = \frac{135}{103} \doteq 1,31,$$

což odpovídá indexu lomu ledu. Optickou soustavu tedy musíme umístit do ledu.

Úloha č. 9 – Ploskodutá čočka

Najděte ohniskovou vzdálenost a polohy hlavních rovin ploskoduté čočky o indexu lomu $n = 1,5$, tloušťky $d = 6$ cm a poloměru křivosti $R_1 = -20$ cm. Čočka se nachází ve vzduchu.

Upraveno podle [11], obr. 20 převzat z [10].



Obr. 20 – Ploskodutá čočka

Řešení:

Ploskodutá čočka má tvar podle obr. 20. Protože pravé rozhraní čočky je rovinné, je její poloměr křivosti $R_2 = \infty$. Pro výpočet ohniskové vzdálenosti a polohu hlavních rovin použijeme vztahy (49), (50) a (51), avšak nejprve je musíme upravit, aby výsledné hodnoty výrazů měly smysl. Úpravou dostaneme

$$f = \frac{nR_1}{(n-1) \cdot \left[\frac{(n-1)}{R_2} d + \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right) n \right]},$$

$$a_1(H) = \frac{\frac{R_1}{R_2} d}{\frac{d}{R_2} (n-1) + n \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)}$$

a

$$a_2'(H') = -\frac{d}{\frac{d}{R_2} (n-1) + n \left(1 - \frac{R_1}{R_2} \right)}.$$

Z matematiky víme, že zlomky, kde ve jmenovateli je nekonečno a v čitateli libovolné reálné číslo, konvergují k nule. Tedy po dosazení se výše uvedené výrazy značně zjednoduší a pro hledané hodnoty dostaneme

$$f = \frac{1,5 \cdot (-20)}{0,5 \cdot 1,5},$$

$$f = -40 \text{ cm},$$

$$a_1(H) = 0,$$

$$a_2'(H') = -\frac{6}{1,5},$$

$$a_2'(H') = -4 \text{ cm}.$$

Úloha č. 10 – Skleněná koule

Skleněná koule o poloměru r a indexu lomu $n = 1,5$ slouží jako tlustá čočka. Vypočtete její ohniskové vzdálenosti (včetně polohy ohnisek). Koule se nachází ve vzduchu.

Upraveno podle [6].

Řešení:

Vyjdeme ze vztahu (49) pro ohniskovou vzdálenost tlusté čočky a dosazením $d = 2r$,

$R_1 = r$, $R_2 = -r$, $n_2 = 1,5$ a $n_1 = 1$ dostaneme

$$f = \frac{-1,5r^2}{0,5 \cdot (0,5 \cdot 2r + (-2r) \cdot 1,5)},$$

$$f = \frac{-1,5r^2}{-r},$$

$$f = 1,5r.$$

Abychom mohli určit polohu ohnisek koule, musíme nejprve určit polohu hlavních rovin. K tomu využijeme vztahy (50) a (51), jejichž úpravou a dosazením získáme hledané hodnoty. Pro předměťovou hlavní rovinu platí

$$a_1(H) = \frac{2r^2}{-2r},$$

$$a_1(H) = -r$$

a pro obrazovou hlavní rovinu platí

$$a_2'(H') = -\frac{-2r^2}{-2r},$$

$$a_2'(H') = -r.$$

Na základě předcházejících výsledků můžeme říci, že obě hlavní roviny čočky splývají se středem skleněné koule a pro polohu ohnisek tedy platí, že předmětové ohnisko se nachází ve vzdálenosti $0,5r$ před čočkou a obrazové ohnisko ve vzdálenosti $0,5r$ za čočkou.

Úloha č. 11 – Tlustá čočka a její tloušťka

Určete tloušťku tlusté čočky o indexu lomu $n = 1,5$ a poloměrech křivosti $R_1 = 5 \text{ cm}$ a $R_2 = -7 \text{ cm}$, jestliže její ohnisková vzdálenost $f = \infty$.

Upraveno podle [9].

Řešení:

Úpravou vztahu (49) dostaneme

$$\frac{1}{f} = \frac{(n-1) \cdot [(n-1)d + (R_2 - R_1)n]}{nR_1R_2},$$

$$(n-1) \cdot [(n-1)d + (R_2 - R_1)n] = 0,$$

$$d = -n \frac{(R_2 - R_1)}{n-1},$$

$$d = 36 \text{ cm}.$$

Na základě vztahu (49) lze také vyvodit, že když $f \rightarrow \infty$, pak $\Delta \rightarrow 0$, což znamená, že obrazové ohnisko první plochy čočky a předmětové ohnisko druhé plochy čočky splývají. Tato čočka tedy pracuje na stejném principu jako Keplerův dalekohled

(rovnoběžné paprsky, které dopadají na čočku, budou i po průchodu čočkou rovnoběžné).

Úloha č. 12 – Tlustá spojka

Při zobrazení tlustou spojkou o indexu lomu $n = 1,5$, tloušťky $d = 4$ cm a poloměrech křivosti $R_1 = 10$ cm a $R_2 = -15$ cm se předmět o velikosti 1 cm zobrazí na skutečný, převrácený a dvakrát zvětšený obraz. Zjistěte polohu předmětu a obrazu.

Řešení:

Nejprve si určíme ohniskovou vzdálenost čočky na základě vztahu (49). Platí tedy

$$f = \frac{nR_1R_2}{(n-1) \cdot [(n-1)d + (R_2 - R_1)n]}.$$

Po číselném dosazení dostáváme výsledek

$$f = \frac{-225}{-17,75},$$

$$f \doteq 12,68 \text{ cm.}$$

Nyní využijeme našich středoškolských znalostí a budeme vycházet ze vztahu (42), jehož úpravou dostaneme

$$a = f \frac{Z-1}{Z}.$$

Dosazením číselných hodnot ($f = 12,68$ a $Z = -2$) dostaneme předmětovou vzdálenost

$$a \doteq 19 \text{ cm.}$$

Obrazovou vzdálenost vypočteme rovněž užitím vztahu (42) nebo pomocí zobrazovací rovnice (44). Číselně vychází

$$a' \doteq 38 \text{ cm.}$$

Výše uvedené vzdálenosti jsou však uvedeny jako vzdálenost předmětu (resp. obrazu) od předmětové (resp. obrazové) hlavní roviny. Pokud chceme určit polohu předmětu či obrazu vůči plochám čočky, musíme k předmětové (resp. obrazové) vzdálenosti přičíst

polohu předmětové (resp. obrazové) hlavní roviny. Polohy hlavních rovin určíme ze vztahů (50) a (51). Po úpravě tak dostáváme

$$a_1(H) = \frac{R_1 d}{d(n-1) + n(R_2 - R_1)}$$

pro předmětovou hlavní rovinu a

$$a_2'(H') = -\frac{R_2 d}{d(n-1) + n(R_2 - R_1)}$$

pro obrazovou hlavní rovinu. Číselně vychází

$$a_1(H) \doteq -1,13 \text{ cm}$$

a

$$a_2'(H') \doteq -1,7 \text{ cm.}$$

Pro polohu předmětu vůči ploše čočky tedy platí

$$d = a + a_1(H),$$

$$d \doteq 17,87 \text{ cm}$$

a pro polohu obrazu platí

$$d' = a' + a_2'(H'),$$

$$d' = 36,3 \text{ cm.}$$

Úloha č. 13 – Dvě tenké spojky

Centrovaná optická soustava je tvořena dvěma tenkými spojnými čočkami o ohniskových vzdálenostech $f_1 = 10 \text{ cm}$ a $f_2 = 15 \text{ cm}$, jejichž vzájemná vzdálenost je 35 cm . Do vzdálenosti $a = 20 \text{ cm}$ před první čočku umístíme předmět. Jaká bude poloha obrazu vytvořeného touto soustavou?

Řešení:

Tuto úlohu lze řešit dvěma způsoby. První způsob spočívá v tom, že předmět nejprve zobrazíme první čočkou a získaný obraz se stává předmětem pro druhou čočku. Pro zobrazení první čočkou tedy platí

$$\frac{1}{f_1} = \frac{1}{a} + \frac{1}{a'}.$$

Po úpravě dostaneme vztah pro polohu obrazu

$$a' = \frac{af_1}{a - f_1}$$

a po číselném dosazení zjistíme, že poloha obrazu vytvořeného první čočkou leží 20 cm vpravo od středu první čočky. Nyní je potřeba určit, v jaké vzdálenosti od druhé čočky se tento obraz nachází. Tento úkol poměrně snadno vyřešíme, neboť víme, že čočky jsou od sebe vzdáleny 35 cm, takže stačí vypočítat rozdíl těchto vzdáleností. Tedy obraz vytvořený první čočkou leží 15 cm před druhou čočkou. Nyní si všimněme toho, že tento obraz leží v předmětovém ohnisku druhé čočky, tedy výsledný obraz by měl vzniknout v nekonečnu. Tuto skutečnost si nyní matematicky ověříme. Pro zobrazení druhou čočkou platí

$$\frac{1}{f_2} = \frac{1}{b} + \frac{1}{b'}$$

a pro polohu výsledného obrazu tedy

$$b' = \frac{bf_2}{b - f_2}.$$

Po číselném dosazení dostáváme zlomek ve tvaru

$$b' = \frac{225}{0}.$$

Již ze základní školy víme, že výše uvedený zlomek nemá smysl, a proto zavedeme limitu pro $x \rightarrow 0^+$ (zprava). Zlomek tedy přepíšeme do tvaru

$$b' = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{225}{x},$$

a určíme hodnoty b' pro některá x blízká nule.

Naše výsledky si zapíšeme do tabulky.

x	0,5	0,2	0,1	0,01
b'	450	1 125	2 250	22 500

Z předchozí tabulky vidíme, že čím více se blížíme nule, tím více hodnoty b' stoupají směrem do nekonečna. Tedy můžeme říct, že

$$b' = \lim_{x \rightarrow 0^+} \frac{225}{x} = \infty.$$

Na základě předcházející matematické úvahy jsme tedy dokázali, že výsledný obraz vzniká v nekonečnu.

Druhý způsob, kterým můžeme tuto úlohu řešit, spočívá v dosazení zadaných veličin do vzorců uvedených v páté kapitole tohoto textu. Pro výslednou ohniskovou vzdálenost soustavy čoček platí

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 f_2},$$

po úpravě

$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d},$$

tedy po číselném dosazení dostáváme výslednou ohniskovou vzdálenost

$$f = -15 \text{ cm.}$$

Nyní si musíme uvědomit, že ohniskovou vzdálenost, předměťové a obrazové vzdálenosti neurčujeme od lámavé plochy čočky, ale od předměťové či obrazové hlavní roviny, jejichž polohy určíme ze vztahů

$$a_1(H) = \frac{f_1 d}{d - f_1 - f_2}$$

a

$$a'_2(H') = \frac{f_2 d}{d - f_1 - f_2}.$$

Tedy obrazová hlavní rovina leží 35 cm vlevo od první čočky a předměťová hlavní rovina leží 52,5 cm vpravo od druhé čočky. Dále, jestliže předmět leží 20 cm vlevo před první čočkou, pak předměťová vzdálenost je tedy

$$h = a - a_1(H),$$

$$h = 20 - 35,$$

$$h = -15 \text{ cm.}$$

Pro polohu předmětu platí vztah

$$h' = \frac{hf}{h - f}.$$

Po číselném dosazení veličin do tohoto vztahu dostaneme stejný zlomek jako v předchozím případě, takže obraz předmětu vytvořený soustavou dvou čoček vzniká opět v nekonečnu.

Úloha č. 14 – Keplerův dalekohled

Jakou podmínku musí splňovat ohniskové vzdálenosti jednotlivých čoček Keplerova dalekohledu, je – li vzdálenost mezi těmito čočkami $d = 5 \text{ cm}$? (Keplerův dalekohled je tvořen centrovanou soustavou dvou tenkých čoček).

Řešení:

Ze středoškolské fyziky víme, že ohnisková vzdálenost Keplerova dalekohledu je $f = \infty$. Úpravou vztahu (52) tedy dostaneme

$$\frac{f_1 + f_2 - d}{f_1 f_2} = 0.$$

Dosazením a vynásobením rovnice členem $f_1 f_2$ dostaneme hledanou podmínku. Musí tedy platit, že

$$f_1 + f_2 = 5 \text{ cm}.$$

Z této podmínky je patrné například to, že Keplerův dalekohled nemůže být tvořen dvěma rozptylkami, jelikož jejich ohniskové vzdálenosti jsou záporné. Dále víme, že Keplerův dalekohled je tvořen pouze spojnými čočkami a že ohnisková vzdálenost objektivu musí být větší než ohnisková vzdálenost okuláru (aby výsledný obraz byl zvětšený). Shrnutím těchto faktů můžeme upřesnit předchozí podmínku takto. Označme f_1 ohniskovou vzdálenost objektivu a f_2 ohniskovou vzdálenost okuláru. Platí tedy, že

$$f_1 + f_2 = 5 \text{ cm},$$

kde

$$f_1 > f_2$$

a zároveň

$$f_1, f_2 > 0.$$

Úloha č. 15 – Tenká spojka a tenká rozptylka

Do jaké vzdálenosti před centrovanou optickou soustavou dvou tenkých čoček musíme umístit předmět o jednotkové velikosti tak, aby byl výsledný obraz skutečný,

převrácený a třikrát zvětšený? Ohniskové vzdálenosti jednotlivých čoček jsou $f_1 = 5$ cm, $f_2 = -3$ cm a vzdálenost jejich středů je $d = 7$ cm.

Řešení:

Nejdříve určíme ohniskovou vzdálenost celé soustavy pomocí vztahu (52). Platí

$$f = \frac{f_1 f_2}{f_1 + f_2 - d},$$

$$f = \frac{-15}{-5},$$

$$f = 3 \text{ cm.}$$

Nyní, pomocí vztahu (42), vypočítáme předmětovou vzdálenost, pro kterou platí

$$Z = -\frac{f}{a - f},$$

$$-3 = -\frac{3}{a - 3},$$

$$3a = 12,$$

$$a = 4 \text{ cm.}$$

Tímto však naše práce nekončí, protože předmětová vzdálenost udává vzdálenost předmětu od předmětové hlavní roviny, nikoliv od soustavy čoček. Proto musíme vypočítat polohu předmětové hlavní roviny, pro kterou platí

$$a_1(H) = \frac{f_1 d}{d - f_1 - f_2},$$

$$a_1(H) = \frac{35}{5},$$

$$a_1(H) = 7 \text{ cm.}$$

Předmětová hlavní rovina tedy leží 7 cm před soustavou čoček. Pokud předmět leží 4 cm před touto rovinou, znamená to tedy, že předmět leží ve vzdálenosti

$$x = a_1(H) + a,$$

$$x = 11 \text{ cm}$$

před soustavou čoček.

Úloha č. 16 – Dvě stejné čočky

Objektiv je tvořen centrovanou soustavou dvou stejných tenkých čoček. Celková ohnisková vzdálenost této soustavy je $f = 20$ cm. Určete ohniskové vzdálenosti jednotlivých čoček a vzdálenost středů těchto čoček, víte – li, že předmětové ohnisko celé soustavy leží 10 cm vlevo od první čočky.

Řešení:

Na základě předchozích informací můžeme říct, že ohniskové vzdálenosti jednotlivých čoček f_1 a f_2 se rovnají, protože čočky jsou stejné. Dále můžeme zjistit polohu předmětové hlavní roviny, kterou určíme na základě ohniskové vzdálenosti. Je zřejmé, že pro ohniskovou vzdálenost platí

$$f = F - a_1(H),$$

kde F je poloha předmětového ohniska vzhledem k lámavé ploše čočky. Pro předmětovou hlavní rovinu tedy platí, že leží 10 cm vpravo od lámavé plochy čočky. Nyní uvažujme vztahy (52) a (53), jejichž úpravou a dosazením známých veličin dostaneme dvě rovnice o dvou neznámých

$$\frac{2}{f_1} - \frac{d}{f_1^2} = \frac{1}{20}$$
$$\frac{f_1 d}{d - 2f_1} = -10$$

Z první rovnice vyjádříme neznámou d a dostáváme výraz

$$d = 2f_1 - \frac{f_1^2}{20}.$$

Tento výraz dosadíme do druhé rovnice a postupnými úpravami dospějeme ke tvaru

$$f_1^3 - 30f_1^2 = 0,$$

který můžeme upravit na tvar

$$f_1^2(f_1 - 30) = 0,$$

ze kterého dostáváme výsledek $f_1 = f_2 = 30$ cm, tedy ohniskové vzdálenosti jednotlivých čoček jsou rovny 30 cm. Nyní vypočítáme vzdálenost středů čoček dosazením do výrazu, který jsme vyjádřili z první rovnice. Tedy

$$d = 2f_1 - \frac{f_1^2}{20},$$

$$d = 15 \text{ cm.}$$

Vzdálenost středů čoček je tedy 15 cm.

7 ZÁVĚR

Během přípravy mé bakalářské práce jsem se nejdříve seznámil s minulými ročníky fyzikální olympiády a zjistil jsem, že úlohy z optiky se v nich vyskytují průměrně jednou až dvakrát během jednoho ročníku. Co se týče typu úloh, které se v minulých ročnících fyzikální olympiády vyskytovaly, tak většina jich byla z oblasti paprskové optiky. Jelikož má tato bakalářská práce pomoci studentům během přípravy na fyzikální olympiádu a jiné fyzikální soutěže, zařadil jsem do ní příklady podobného typu. Dále jsem se seznámil s literaturou, která je středoškolským studentům dostupná, a jednotlivé učebnice jsem porovnal z hlediska uplatnění při přípravě studenta na fyzikální soutěže.

Bakalářská práce je rozdělena do sedmi kapitol, přičemž jádro práce tvoří pátá a šestá kapitola. Kapitola pátá shrnuje základní pojmy a zákony, které jsou nezbytné pro řešení úloh. Hlavní kapitolou této bakalářské práce je kapitola šestá, která obsahuje 16 řešených úloh z oblasti paprskové optiky. Řešení prvních šesti úloh je založeno na znalosti zákona odrazu a zákona lomu a také na vlastnostech paprsku procházejícího optickým hranolem. Dalších deset úloh se zabývá zobrazováním čočkami a jejich soustavami. Obtížnost jednotlivých úloh je různá. Některé úlohy by měli bez problémů vyřešit studenti na střední škole, jiné úlohy bych zařadil jen do fyzikálních seminářů na středních školách nebo do semináře Řešení fyzikálních úloh. Příklady jsem vybíral tak, aby co nejvíce pomohly studentovi při jeho přípravě na různé fyzikální soutěže, hlavně na fyzikální olympiádu. Námět některých úloh jsem převzal z literatury uvedené v závěru bakalářské práce, jiné jsem vymyslel sám.

Co se týče využitelnosti této bakalářské práce, tak bych jí doporučil hlavně středoškolským učitelům fyziky, kteří by z této práce mohli čerpat příklady pro své studenty, kteří navštěvují fyzikální seminář nebo se připravují na různé fyzikální soutěže. Dále bych mou práci doporučil i vyučujícím základního kurzu optiky na vysokých školách, protože si myslím, že mnohé příklady by bylo vhodné vyřešit ve cvičeních. Kromě základního kurzu optiky by mohla být tato bakalářská práce využita i v semináři Řešení fyzikálních úloh, který absolvují studenti učitelství fyziky na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci.

8 SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] FUKA, J., HAVELKA, B.: *Optika a atomová fyzika, část I. – Optika*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1961.
- [2] HALLIDAY, D., RESNICK, R., WALKER, J.: *Fyzika, část 4. – Elektromagnetické vlny – Optika – Relativita*. Brno: VUTIUM, 2006.
- [3] KOLOVRAT, J.: *Příklady z optiky*. Praha: Státní pedagogické nakladatelství, 1979.
- [4] LEPIL, O.: *Fyzika pro gymnázia – Optika*. Praha: Prometheus, 2002.
- [5] MALÝ, P.: *Optika*. Praha: Karolinum, 2008.
- [6] ŠVEC, M.: *Příklady z aplikované optiky*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 1996.
- [7] VOHLÍDAL, J. a kol.: *Chemické tabulky pro střední průmyslové školy chemické a s chemickým zaměřením*. Praha: SNTL, 1982.

Internetové zdroje:

- [8] *Fyzikální olympiáda* [online]. 2004 [cit. 2008 - 05 - 10]. Dostupný z WWW: <<http://fo.cuni.cz>>.
- [9] *Katedra experimentální fyziky – oddělení didaktiky* [online]. 2007, 12. 6. 2008 [cit. 2009 - 02 - 05]. Dostupný z WWW: <<http://exfyz.upol.cz/didaktika/docs/bakal-test-5-07.pdf>> .
- [10] *Matematicko-fyzikální web* [online]. 11. 8. 2008 [cit. 2009 – 02 – 02]. Dostupný z WWW: <<http://mfweb.wz.cz/fyzika/images/542.gif>>.
- [11] TRNKA, J.: *Zobrazení čočkami* [online]. 2004 [cit. 2008 - 11 - 25]. Dostupný z WWW: <<http://fo.cuni.cz/texty/cocky.pdf>>.