

Izrada i primjena teleskopa u nastavi fizike

Veselinović, Svetlana

Master's thesis / Diplomski rad

2017

Degree Grantor / Ustanova koja je dodijelila akademski / stručni stupanj: **Josip Juraj Strossmayer University of Osijek, Department of Physics / Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku, Odjel za fiziku**

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:160:836770>

Rights / Prava: [In copyright](#) / [Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2024-04-26**



Repository / Repozitorij:

[Repository of Department of Physics in Osijek](#)



SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



SVETLANA VESELINOVIĆ

IZRADA I PRIMJENA TELESKOPA U NASTAVI FIZIKE

Diplomski rad

Osijek, 2017.

SVEUČILIŠTE JOSIPA JURJA STROSSMAYERA U OSIJEKU

ODJEL ZA FIZIKU



SVETLANA VESELINOVIĆ

IZRADA I PRIMJENA TELESKOPA U NASTAVI FIZIKE

Diplomski rad

Predložen Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku
radi stjecanja akademskog naziva MAGISTRA EDUKACIJE FIZIKE I INFORMATIKE

Osijek, 2017.

"Ovaj diplomski rad je izrađen u Osijeku pod vodstvom doc.dr.sc. Marine Poje Sovilj u sklopu Sveučilišnog diplomskog studija fizike i informatike na Odjelu za fiziku Sveučilišta Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku".

Sadržaj

1. Uvod	1
2. Povijest teleskopa	3
2.1. Prvi poznati teleskop	3
2.2. Razvoj refraktora	4
2.2.1. Nedostaci refraktora	7
2.3. Razvoj reflektora	10
2.3.1. Nedostaci reflektora	15
3. Fizika teleskopa	18
A. Zakoni geometrijske optike	18
3.1. Zakon pravocrtnog širenja svjetlosti	19
3.2. Zakon neovisnosti svjetlosnih snopova	21
3.3. Zakon refleksije svjetlosti	22
3.3.1. Zakon refleksije svjetlosti na ravnoj površini	22
3.3.2. Zakon refleksije svjetlosti na sfernoj površini	24
3.3.3. Ravno zrcalo	24
3.3.4. Sferno zrcalo	27
3.4. Zakon loma svjetlosti	34
3.4.1. Zakon loma svjetlosti na ravnoj površini	34
3.4.2. Totalna refleksija	38
3.4.3. Zakon loma na sfernoj površini	40
3.4.4. Optičke leće	43
3.5. Fermatov princip najmanjeg vremena	52
3.5.1. Fermatov princip i zakon refleksije svjetlosti	53
3.5.2. Fermatov princip i zakon loma svjetlosti	54
B. Optički teleskopi	56
3.6. Refraktori	57
3.7. Reflektori	59
3.8. Katadioptrici	60
3.9. Osnovni pojmovi	61

3.9.1. Kutno povećanje	61
3.9.2. Otvor objektiva.....	62
3.9.3. Vidno polje i izlazna pupila.....	62
4. Izrada teleskopa.....	65
4.1. Pribor i troškovnik	65
4.2. Koraci i upute	66
4.3. Karakteristike teleskopa	75
5. Primjena teleskopa u nastavi fizike	77
5.1. Nastava fizike u osnovnim školama	77
5.1.1. Obrada nastavne jedinice <i>Primjena optičkih leća – Teleskop</i> u osnovnim školama.....	77
5.2. Nastava fizike u gimnazijama	90
5.2.1. Obrada nastavne jedinice <i>Primjena optičkih leća – Teleskop</i> u prirodoslovno- matematičkim gimnazijama	90
6. Zaključak.....	100
7. Literatura	102
Životopis	104

IZRADA I PRIMJENA TELESKOPA U NASTAVI FIZIKE

SVETLANA VESELINOVIĆ

Sažetak

U prvom dijelu diplomskog rada dan je povijesni pregled razvoja teleskopa. Opisani su pojedini nedostaci prvih teleskopa refraktora, kao i tadašnje teorije zbog kojih su kromatske aberacije dugo vremena bile misterija, što je odgađalo izum i razvoj reflektora. Središnji dio rada posvećen je zakonima geometrijske optike na kojima se temelji princip rada ne samo teleskopa, već i drugih optičkih instrumenata. Također, navedene su i opisane bitne karakteristike teleskopa. Upute kako samostalno izraditi jednostavan teleskop dane su u završnom dijelu rada u kojemu su dani i primjeri kako primijeniti teleskop u nastavi fizike u osnovnim školama i prirodoslovno-matematičkim gimnazijama.

(104 stranice, 54 slike, 21 literaturni navod)

Rad je pohranjen u knjižnici Odjela za fiziku

Ključne riječi: refraktor / reflektor / aberacije / geometrijska optika / otvor objektiva / kutno povećanje / vidno polje / izlazna pupila / nastava fizike

Mentor: doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj

Ocjenjivači: izv. prof. dr. sc. Vanja Radolić, predsjednik

doc. dr. sc. Marina Poje Sovilj, mentor

mr. sc. Slavko Petrinšak, član

Rad prihvaćen: 02. svibnja 2017.

CONSTRUCTION AND APPLICATION OF THE TELESCOPE IN TEACHING PHYSICS

SVETLANA VESELINOVIĆ

Abstract

The first part of this thesis includes the historical overview of the development of the telescopes. Certain disadvantages of first refractors are described, as well as theories for the cause and misunderstanding of chromatic aberration remained a mystery for a long time that delayed the invention and development of reflectors. The central part of the thesis deals with the underlying principle of the telescope and other optical instruments – laws of geometrical optics. Furthermore, the most important characteristics of telescope are listed and described in more detail later in the thesis. The final part of the thesis contains instructions that one can use in order to independently construct a simple telescope. Moreover, examples that are listed show how to apply the telescope in teaching physics in the primary and secondary schools.

(104 pages, 54 figures, 3 tables, 21 references)

Thesis deposited in Department of Physics library

Keywords: refractors / reflectors / aberrations / geometrical optics / aperture / magnification / field of view / exit pupil / teaching of physics

Supervisor: Marina Poje Sovilj, PhD

Reviewers: Vanja Radolić, PhD, Associate Professor

Marina Poje Sovilj, PhD

Slavko Petrinšak, mr.sc.

Thesis accepted: May 02., 2017.

1. Uvod

Kako danas učenike zainteresirati za znanost? Kako im približiti znanost na zanimljiv način? Kako im približiti fiziku? Tijekom školovanja, a kasnije tijekom metodičke prakse u osnovnoj i srednjoj školi bila sam svjedok kako je fizika, pored matematike, učenicima jedan od najomraženijih predmeta u školi. Malo tko od učenika pokazuje volju i interes za ovaj predmet. Leži li razlog u nama profesorima, u našem pristupu i načinu na koji poučavamo fiziku ili je to zbog predrasuda koji prate fiziku, isto kao i matematiku, kao nešto teško, nešto što nema veze sa svakodnevnicom, nešto što nikomu neće kasnije trebati u životu, itd. Ima i jednog i drugog, dalo bi se raspravljati, ali sad nije ni vrijeme ni mjesto. Smatram kako je astronomija onaj dio fizike koji je najzanimljiviji učenicima jer koga je još noćno zvjezdano nebo ostavilo ravnodušnim. Znam da mene sigurno nije. Još kao osnovnoškolac bila sam zaintrigirana zvijezdama i uvijek sam se pitala što ima tamo gore, koje je naše mjesto i uloga u svemiru i naravno, ono vječno pitanje, jesmo li sami. Vjerujem kako bi kroz astronomiju mogli pridobiti pažnju većine učenika te ih navesti da zavole i pokušaju bolje razumjeti fiziku.

Šteta je što u nastavnom planu i programu za fiziku u osnovnoj školi, ali i u gimnazijama, nema mjesta za astronomiju. Jedan dio astronomije predviđen je nastavnim programom za 5. razred osnovne škole u sklopu nastavnog predmeta geografija kao izborna tema. Stoga je na nastavniku da odluči hoće li ili ne obrađivati tu temu. Međutim, nastavnik fizike ima tu slobodu odlučiti želi li poučavati astronomiju, u kontekstu fizike, u obliku izvannastavnih aktivnosti koje se najčešće provode u obliku radionica ili projekata. Dok postoje škole u kojima se astronomija poučava u kontekstu fizike u sklopu izvannastavnih aktivnosti, postoje one u kojima se astronomija uopće ne spominje u kontekstu fizike.

Postoje razni načini na koje možemo astronomiju približiti učenicima te ih na taj način zaintrigirati samom fizikom, barem većinu njih. Ne možemo očekivati da baš svaki učenik u razredu zavoli fiziku i poželi se njome baviti. Nastavna cjelina unutar koje se obrađuju teme iz geometrijske optike pogodna je za upoznavanje učenika s astronomijom iznošenjem zanimljivih činjenica iz povijesti, gledanjem kratkih filmova, pisanjem referata ili izradom plakata, odlaskom u zvjezdarnicu ili još bolje nekim praktičnim zadatkom kao što je to na primjer izrada teleskopa.

Danas je vrlo lako, uz dostupna i jeftina sredstva, izraditi kvalitetan amaterski teleskop, sličan kakav su početkom XVII. stoljeća konstruirali Galileo Galilei ili Johannes Kepler. Sve što je potrebno

su dvije leće, jedna veće i jedna manje žarišne duljine, te cijev u koje će se leće moći montirati. No, prije nego počnemo s izradom teleskopa valjalo bi se upoznati kako je tekao razvoj teleskopa kroz povijest te s osnovnim principima na kojima se temelji rad teleskopa. Nakon toga možemo isplanirati kako na zanimljiv i interaktivan način primijeniti teleskop u nastavi fizike.

2. Povijest teleskopa

Teleskop spada u jedan od najvažnijih izuma čovječanstva. Taj relativno jednostavan instrument, koji nam omogućava da udaljene predmete promatramo kao da su nam blizu, zauvijek je promijenio naš pogled na Zemlju i naše mjesto u svemiru kada je radoznao čovjek prvi put uperio teleskop prema nebeskom svodu. Danas je još uvijek nepoznato tko je izumio teleskop. Vrlo je vjerojatno da je netko, kada je proizvodnja stakla i tehnika brušenja leća napredovala kasnih 1500. godina, držao dvije leće jednu iza druge i otkrio što one zapravo mogu. ^[1]

Početak XVII. stoljeća predstavlja početak teleskopske ere. U Europi je tada već dugo bila razvijena tehnika proizvodnje leća, a prvi teleskop postao je neizostavni instrument astronomije. Stoga ne čudi što su prvi teleskopi bili refraktori. Prije nego li se upoznamo s principima rada teleskopa, ukratko ćemo proći kroz njegovu povijest i vidjeti kako je tekao njegov razvoj. Zapravo, povijest teleskopa je povijest pokušaja da ga se oslobodi od njegovih nedostataka. ^[2]

2.1. Prvi poznati teleskop

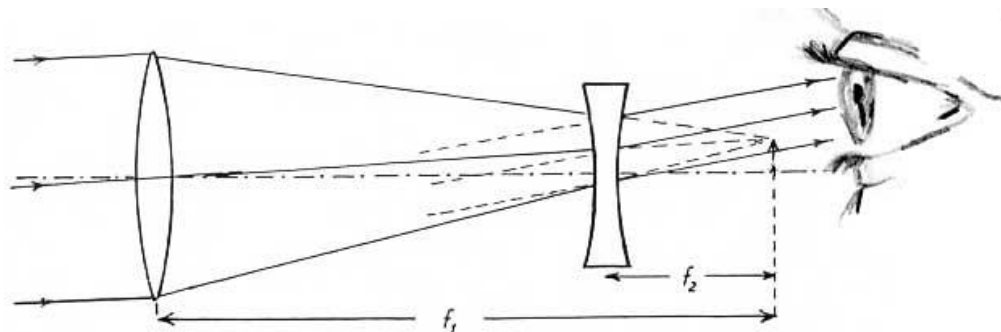
Kada govorimo o teleskopu uglavnom svi prvo pomislimo na Galilea Galileia. Razlog je što nas u školama uče kako je Galileo Galilei prvi izumio teleskop. Međutim, to nije u potpunosti točno. Galileo možda nije prvi koji je izumio teleskop, ali je svakako prvi koji je uperio teleskop prema nebeskom svodu. Prva osoba koja je podnijela zahtjev za patent teleskopa bio je nizozemski optičar Hans Lippershey. Godine 1608. Lippershey je pokušao patentirati teleskop s povećanjem od tri puta, koji je za objektiv imao konvergentnu, tj. pozitivnu, a za okular divergentnu, tj. negativnu leću. ^[1]

Navodno je Lippershey ideju za svoj izum dobio vidjevši svoju djecu koja su se igrala s lećama u njegovoj radnji. Kada su pozitivnu leću postavili ispred negativne, u negativnoj leći vidjeli su povećanu sliku obližnje crkve. Lippershey je odmah uočio važnost ovog sasvim slučajnog otkrića te je počeo izrađivati prve teleskope. Prema drugoj priči, Lippershey je ideju ukrao od drugog optičara, Zachariasa Jansena. Međutim, za to nema dovoljno dokaza. Nekoliko tjedana nakon što je Lippershey podnio zahtjev za patent teleskopa, drugi Nizozemac, Jacob Metius, također je podnio zahtjev za isti patent. Međutim, nizozemska vlada je odbila oba zahtjeva iz razloga što se patent mogao vrlo lako

kopirati te je bilo teško procijeniti tko ga je zaista prvi patentirao. Na kraju je Matius dobio malu nagradu za svoj patent, dok je Lippersheyu vlada dala sredstva za konstruiranje i umnožavanje njegova izuma. ^{[1][3]}

2.2. Razvoj refraktora

U ožujku 1609. godine Galileo Galilei je boravio u Veneciji kada je čuo glasine da je neki Nizozemac izumio instrument pomoću kojeg se objekti na velikoj udaljenosti od oka promatrača vide kao da su blizu. U to vrijeme Galilei je radio kao profesor matematike na sveučilištu u Padovi. Ove glasine je Galileiu, u pismu koje primio iz Pariza, potvrdio francuski plemić Jacques Badovere. To je Galileia navelo da istraži principe rada i razmotri sredstva potrebna za konstruiranje sličnog instrumenta. Nakon detaljnog izučavanja teorije refrakcije, odnosno loma, samo 24 sata nakon povratku u Padovu, Galilei je uspio konstruirati svoj prvi teleskop (sl. 2.1.). ^[4]



Slika 2.1. Galilejev teleskop.
Žarišna duljina objektivna označena je sa f_1 , a okulara sa f_2 .

Prvi Galilejev teleskop bio je načinjen od olovne cijevi, a na krajevima cijevi nalazile su se međusobno poravnate dvije leće, jedna konvergentna i jedna divergentna. Pri tome je konvergentna leća služila kao objektiv, a divergentna kao okular. Kada je Galilei uperio teleskop prema udaljenom objektu vidio ga je devet puta većim i tri puta bližim nego kada ga je promatrao golim okom. Galilei je odmah uvidio vojni značaj svog izuma te ga je, nakon što je montirao leće u kvalitetniju cijev,

prezentirao pred mletačkim senatom (sl. 2.2.). Za uzvrat senat ga je postavio za doživotnog profesora na sveučilištu u Padovi, dok mu je plaća bila povećana na 1 000 fiorina godišnje. ^{[1][4]}



Slika 2.2. Galileo Galilei prezentira svoj teleskop pred mletačkim senatom.

Povratkom u Padovu Galilei je radio na usavršavanju svog teleskopa. Tako je konstruirao teleskop koji je imao povećanje 20 puta. Pomoću ovog teleskopa Galilei je opazio kružni disk oko Jupitera te mu se činilo da površina Mjeseca nije savršeno glatka kako su to vjerovali stari Grci. S četvrtim konstruiranim teleskopom, koji je imao povećanje 30 puta, Galilei je otkrio Jupiterove satelite u siječnju 1610. godine te je potvrdio svoje sumnje da je površina Mjeseca prekrivena kraterima i planinama. Galilei je pomoću svojih teleskopa došao do mnogih drugih značajnih otkrića poput otkrića Venerinih mijena i Sunčevih pjega. ^{[1][4]}

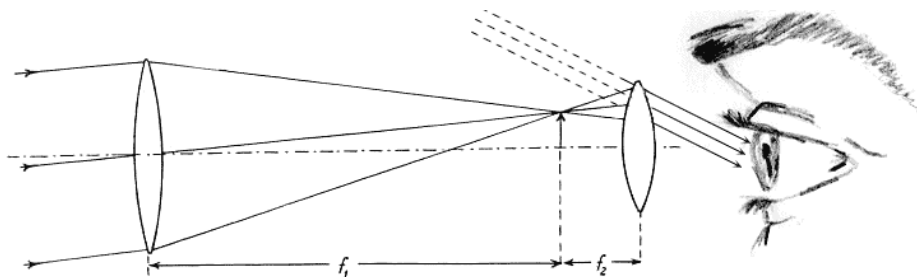
Što je više promatrao i istraživao nebeski svod, Galilei je sve više bio uvjeren u ispravnost Kopernikovog heliocentričnog modela. Upravo ga je to zalaganje za Kopernikov model dovelo u sukob sa crkvom i njenim učenjem 1616. godine. Pod pritiskom inkvizicije u Rimu Galilei je bio prisiljen obećati kako neće braniti niti poučavati Kopernikov model u kojem je Sunce središte svijeta. Međutim Galilei nije mogao tako lako odustati od znanstvene istine. Godine 1632. Galilei je objavio djelo pod naslovom *Dijalog o dvama glavnim svjetskim sustavima (Dialogo sopra i due massimi sistemi del mondo)*, ptolomejskom i kopernikanskom. Djelo zapravo predstavlja imaginarnu raspravu između Salvatia, odnosno Galileia koji se zalaže za Kopernikov model, Sagredoa, običnog čovjeka, i Simpliciusa, aristotelovca. Naravno, djelo je odmah proglašeno heretičkim i godine 1633. Galilei se

ponovo našao pred inkvizicijom u Rimu. Ovaj put bio je osuđen na kućni pritvor u svojoj vili u blizini Firence gdje je nastavio raditi i pisati sve do svoje smrti 1642. godine. ^{[1][4]}

Iako se za Galileia često govorilo kako je on zaslužan za izum teleskopa, on nikad nije poricao da te zasluge zapravo pripadaju Lippersheyu. Galilei je dobro znao razliku između slučajnog izuma i izuma koji je rezultat rada i promišljanja inteligentnog uma. Glasine o Lippersheyevom izumu samo su usmjerile Galilejeve misli pravim putem. Međutim, Galilejev teleskop iako vrlo jednostavan imao je nekoliko ozbiljnih nedostataka. Prvi je malo vidno polje, a drugi kromatska aberacija o kojoj će biti više rečeno u poglavlju o nedostacima refraktora. ^{[3][4]}

U to vrijeme Galilei se dopisivao sa Johannesom Keplerom, njemačkim matematičarem i astronomom, koji je tada pod pokroviteljstvom svetog rimskog cara Rudolfa II. imao poziciju carskog matematičara. U Pragu 1600. godine Kepler se upoznao s Tycho Braheom koji ga je tada zaposlio kao svog asistenta. Već tada Brahe je bio cijenjeni astronom poznat po svojim opširnim i preciznim astronomskim promatranjima. Bio je posljednji veliki astronom koji je opažanja nebeskog svoda vršio bez optičkih pomagala, odnosno teleskopa. Nakon njegove smrti 1601. godine, Kepler je na temelju proučavanja detaljnih Braheovih bilješki i nekih svojih o gibanju Marsa uspio otkriti i otkloniti slabosti Kopernikovog heliocentričnog modela. Proučavanje Braheovih bilježaka navelo je Keplera da počne proučavati optiku, osobito lom svjetlosti, kako bi eliminirao pogreške u Braheovim bilješkama nastale uslijed loma svjetlosti u atmosferi. U periodu od 1609. do 1619. godine Kepler je uspio formulirati svoja tri zakona o gibanju planeta, danas poznata kao Keplereovi zakoni. ^[3]

Godine 1610. Kepler je na dar dobio teleskop čiju je teoriju razradio u dijelu *Dioptrija* (*Dioptrice*) objavljenom 1611. godine, a u kojem je također izložio i neke svoje ideje o lomu svjetlosti te opisao anatomiju oka. U ovom dijelu Kepler je zapravo riješio problem malog vidnog polja Galilejevog teleskopa. On je umjesto negativne leće za okular predlagao uporabu pozitivne, tj. konvergentne leće (sl. 2.3.). Međutim, Kepler nikad nije konstruirao takav teleskop. On je samo dao teorijsku pozadinu takve konstrukcije jer je prema njegovim riječima bio glup za promatranje i nespretn za mehanički rad. Takvu konstrukciju teleskopa u njegovu čast danas nazivamo Keplerovim teleskopom. ^{[3][4]}



Slika 2.3. Keplerov teleskop.
Žarišna duljina objektiva označena je sa f_1 , a okulara sa f_2 .

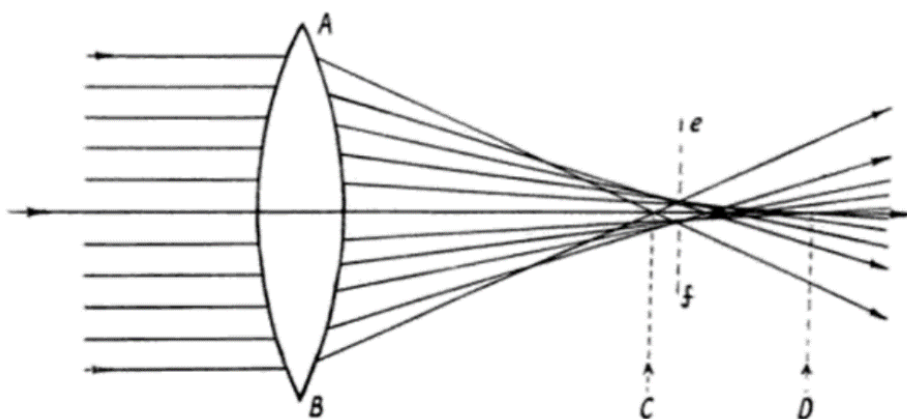
Keplerov okular nije se više spominjao sve do 1630. godine kada je Christopher Scheiner napomenuo kako je 1617. godine vršio opažanja teleskopom koji je imao dvije konvergentne, odnosno pozitivne leće. Napolitanski isusovac Francesco Fontana tvrdio je 1646. godine kako je on prije Keplera prvi osmislio uporabu pozitivne leće za okular. No, osim njegovih tvrdnji te svjedočenja još dvojice kolega isusovaca ne postoje drugi dokazi da je to uistinu točno. Međutim, Fontana možda jeste prvi koji je koristio teleskop u Keplerovoj konstrukciji za planetarna promatranja. ^[4]

Prvi moćan Keplerov teleskop konstruirala su braća Christian i Constantine Huygens. Teleskop je imao objektiv promjera 57 mm i žarišne duljine 3,7 m. Godine 1655. braća su ovim teleskop otkrila Titan, najsjajniji član Saturnovih satelita. Promatrajući Saturn 1656. godine, Christian Huygens je uočio tamnu liniju na površini planeta koja je zapravo bila sjena prstenja koji kruže oko planeta. U dijelu *Saturnov sustav* (*Systema Saturnium*) objavljenom 1659. godine, Huygens je dao prvo pravo objašnjenje Saturnovih prstenja. ^[4]

2.2.1. Nedostaci refraktora

Početkom XVII. stoljeća refraktori su se uspješno primjenjivali u astronomiji unatoč njihovim dvjema ozbiljnim optičkim manama, sfernim i kromatskim aberacijama. Sferne aberacije nastaju ukoliko je objektiv teleskopa plankonveksna ili bikonveksna leća. Kada zraka svjetlosti padne na leću blizu njezina ruba lomi se kroz leću, prema Snellovom zakonu loma, u točki koja je bliža leći od one točke u kojoj se lomi zraka svjetlosti koja na leću padne blizu njezinog središta (sl. 2.4.). Odnosno, marginalne ili rubne zrake, nakon loma kroz leću, sijeku se u žarištu koje je bliže leći od žarišta u

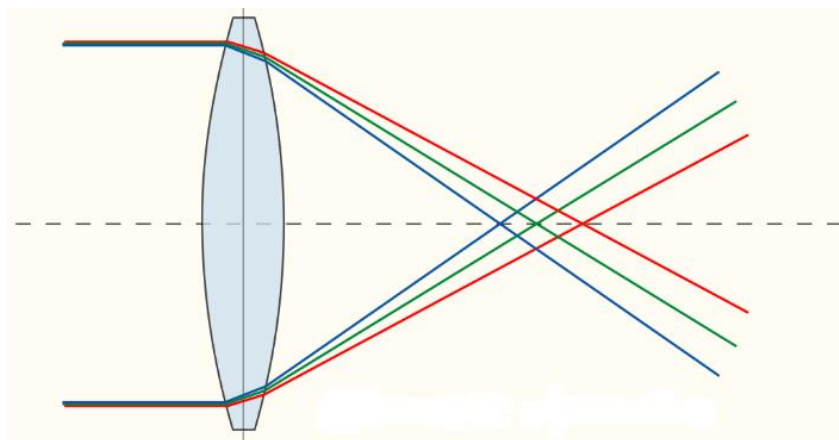
kojem se sijeku paraksijalne zrake koje prolaze blizu optičkoj osi leće. Kao rezultat toga dobije se loše definirana slika predmeta koju je teško izoštriti. Leće podložne sfernima aberacijama nemaju točno definirano žarište, već više njih. Međutim, postoji točka koja predstavlja geometrijski najbolje žarište, a odgovara mjestu na kojem se nalazi krug najmanje konfuzije, na slici 2.4. označen sa ef . Na tom mjestu slika predmeta je najoštrija. Sferne aberacije ne ovise samo o dizajnu leće, već i o kvaliteti materijala od kojeg je leća načinjena. ^{[4][5][6]}



Slika 2.4. Sferna aberacija.

Točka C predstavlja žarište marginalnih zraka, a točka D žarište paraksijalnih zraka. Sa ef je označen položaj kruga najmanje konfuzije.

Optičku manu koja nastaje zbog disperzije svjetlosti, odnosno zbog razlaganja složene svjetlosti na boje prolaskom kroz prozirna tijela kao što je leća, nazivamo kromatska aberacija. Obična leća svjetlost raznih boja lomi različito. Stoga se svjetlo raznih boja ne sastaje u istom žarištu. Crvena svjetlost, odnosno svjetlost veće valne duljine, ima veću žarišnu duljinu od ljubičaste svjetlosti koja ima manju valnu duljinu (sl. 2.5.). Uslijed kromatske aberacije slika predmeta ima obojene rubove. ^[4]



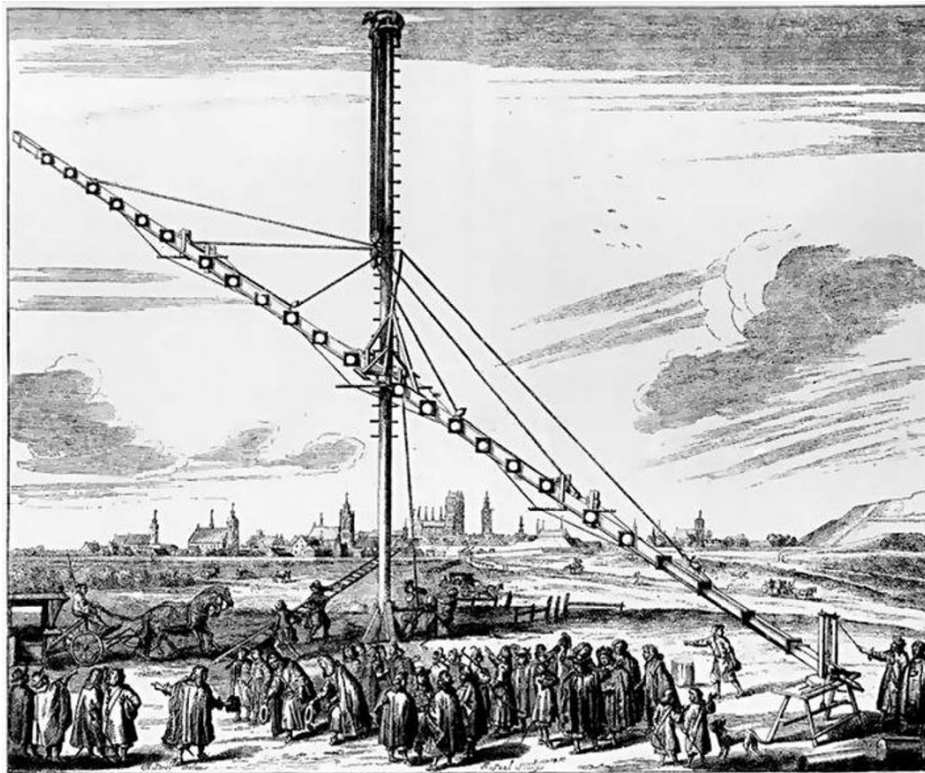
Slika 2.5. *Kromatska aberacija.*

Kromatske aberacije su dugo vremena bile misterija. Čudnovato je kako razdvojenost crvene i ljubičaste slike nije navela na zaključak da staklo ima različit učinak na lom složene svjetlosti. Problem je bio u tadašnjoj teoriji boja koja je bila kombinacija Aristotelove i Descartesove teorije boja. Bijela svjetlost smatrala se fundamentalnom, dok su se prema Aristotelovoj teoriji boje smatrale mješavinom svjetla i tame. Descartes je svjetlost promatrao kao statički tlak koji se širi zrnastim kontinuumom, a boje su nastajale uslijed rotacije korpuskula različitim brzinama. Pri tome, korpuskule koje bi rotirale najvećom brzinom davale bi crvenu boju, sporije žutu, a najsporije zelenu i plavu boju. ^[4]

Newton je bio prvi koji je razmotrio alternativnu ideju da su boje osnovna svojstva stvari, a bijela svjetlost naša percepcija njihove kombinacije. On je boje vidio kao osnovne konstituente bijele svjetlosti. Vođen ovom idejom, Newton je bio u mogućnosti razlikovati sferne i kromatske aberacije. Zaključio je kako su sferne aberacije posljedica sfernih ploha leće, a da su kromatske aberacije posljedica disperzije svjetlosti. Newtonovi eksperimenti sa prizmom nedvojbeno su pokazali da je lom svjetlosti uvijek popraćen disperzijom. On je proučavao oba ova efekta, lom i disperziju, sa različitim medijima odvojeno i u kombinaciji. ^[4]

2.3. Razvoj reflektora

Još u prvim danima teleskopa kromatske aberacije predstavljale su veliki nedostatak. Astronomi su opazili kako se uz pomoć objektiva vrlo velikih žarišnih duljina povećava kvaliteta slike, a utjecaj kromatskih aberacija smanjuje. Stoga su se počeli konstruirati vrlo dugački teleskopi duljine po nekoliko desetaka metara. Takvi teleskopi bili su vrlo nezgodni te su ih morali držati visoki stupovi, niti i kolature. Jedan od prvih takvih teleskopa konstruirao je astronom Johannes Hevelius iz Danziga, današnji Gdanjsk. Njegov najveći teleskop (sl. 2.6.) imao je otvor 10 cm i žarišnu duljinu od 30 m te je njime upravljalo više osoba. Najveća prednost ovih teleskopa, pored smanjenja kromatskih, ali i sfernih aberacija, jeste veliko povećanje. No unatoč tome, dugačke i slabe cijevi teleskopa često su se znale urušiti i na najmanjem povjetarcu, stoga je bilo potrebno drugo rješenje kako bi se ove aberacije suzbile. ^{[3][4]}

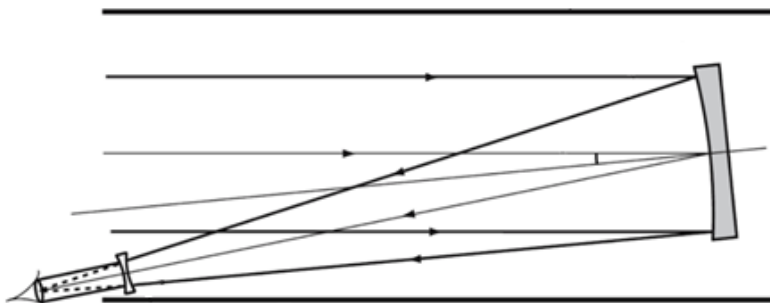


Slika 2.6. Hevelius i njegov najveći teleskop.

Ideja teleskopa reflektora sastoji se u tome da se objektiv teleskopa refraktora zamijeni sa zrcalom. Dok leća lomi svjetlo svih boja različito, zrcalo odbija sve boje podjednako tako da svjetlo

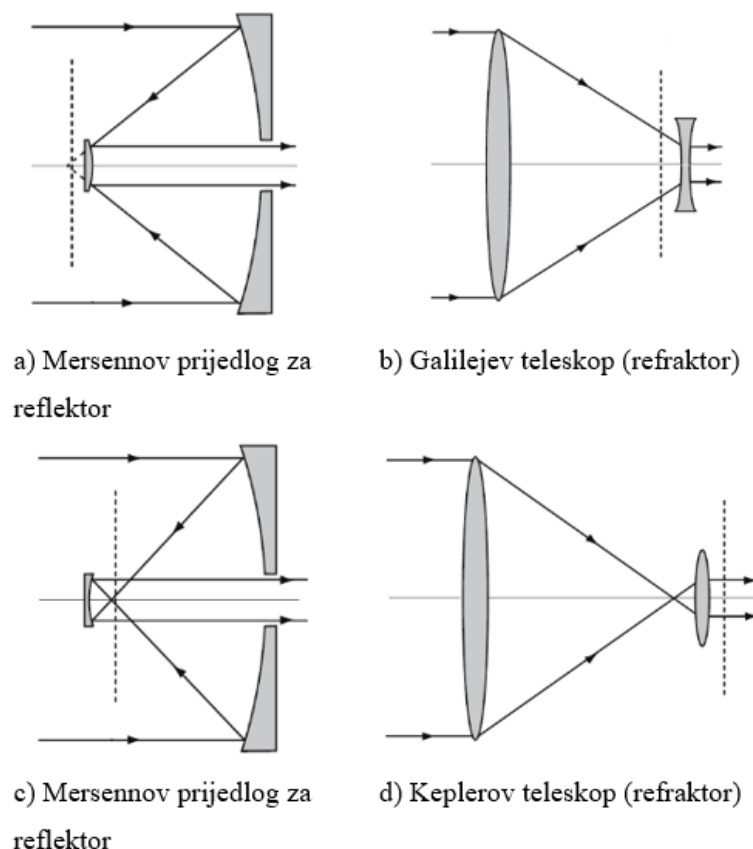
svih boja iz istog izvora dolazi u isto žarište, dakle bez pojave kromatske aberacije. Ukoliko je još zrcalo izbrušeno u obliku paraboloida, svjetlo na zrcalo dolazi u smjeru osi paraboloida i dolazi u isto žarište bez pojave sferne aberacije. Prve ideje o teleskopu reflektoru nastale su još u vrijeme izuma refraktora. Galilei je razumio osnove svog prvog teleskopa refraktora daleko bolje od svojih suvremenika. On je gotovo odmah uočio kako bi se konvergentna leća objektiva u principu mogla zamijeniti konkavnim zrcalom. ^{[2][7]}

Prvi ozbiljan pokušaj konstrukcije reflektora napravio je 1616. godine talijanski astronom i fizičar Niccolo Zucchi. On je koristio brončano konkavno zrcalo u kombinaciji sa Galilejevom negativnom lećom, tj. okularom (sl. 2.7.). Takva konstrukcija teleskopa bila je nezgodna jer je slika udaljenog predmeta bila zaklonjena glavom promatrača. Stoga je kod ovakve konstrukcije bilo nužno montirati zrcalo tako da os zrcala bude pod nekim kutom u odnosu na upadne zrake. Međutim, ovakva konstrukcija teleskopa nije davala zadovoljavajuću sliku udaljenog predmeta na osi zrcala. Lošoj kvaliteti slike također je doprinijela i loša kvaliteta proizvodnje zrcala. ^[7]



Slika 2.7. Zucchijev teleskop reflektor.

Godine 1636., dvadeset i pet godina poslije Galilejevog prvog teleskopa refraktora, franjevački redovnik Marin Mersenne predložio je konstrukciju teleskopa reflektora u kojoj su dva parabolična zrcala, jedno manje i drugo veće probušeno u sredini, okrenuta jedno prema drugom (sl. 2.8.). Ovim prijedlogom Mersenne je zapravo riješio problem centralne opstrukcije slike kod teleskopa reflektora. On je zapravo predložio 'afokalni' teleskop reflektor u kojem bi paralelni snop svjetlosti ušao i izašao van. Drugim riječima, predložio je optički sustav bez fokusa. ^[7]

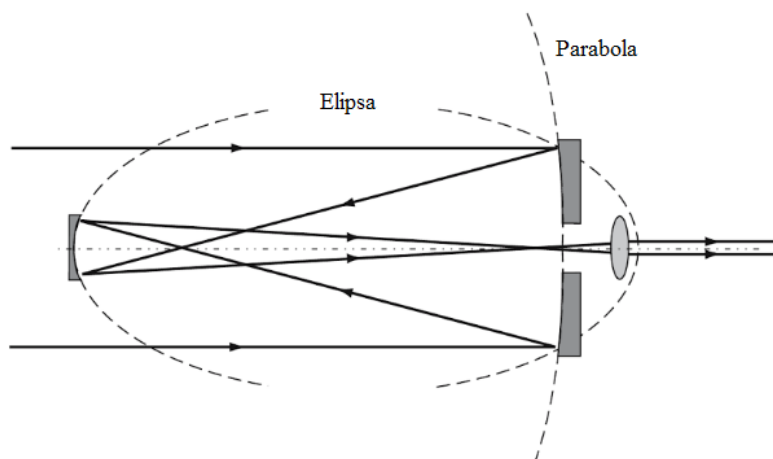


Slika 2.8. Dva Mersennova prijedloga za teleskop reflektor i njihova usporedba s Galilejevim i Keplerovim teleskopom refraktorom. Iscrtana linija označava položaj izlazne pupile.

Obeshrabren negativnim kritikama Mersenne nikad nije svoj prijedlog realizirao u praksi. Naime, Descartes je iznio niz primjedbi koje su obeshrabrile Mersennea, a od kojih je samo jedna bila točna. Izlazna pupila teleskopa nalazila se unutar teleskopa nedostupna zjenici oka promatrača. Galilejev teleskop refraktor također je imao isti problem, ali u manjoj mjeri. Descartes je također bio u pravu kada je rekao da Mersenneov reflektor nije nudio nikakva značajna poboljšanja u usporedbi s tadašnjim Galilejevim i Keplerovim refraktorom. Usprkos tome, Mersenne je zapravo zaslužan za postav osnovne geometrijske forme modernog teleskopa, barem na papiru. ^[7]

Dok su refraktori napredovali u pogledu smanjenja kromatskih, ali i sfernih aberacija, povećanjem njihove duljine, reflektori još nisu bili realizirani u praksi sve do 1663. godine kada je James Gregory načinio veliki napredak u razvoju teorije reflektora. On je predložio teleskop reflektor koji je kombinacija dva zrcala i pozitivne leće (sl. 2.9.). Veće parabolično konkavno zrcalo s otvorom u sredini bi prikupljenu svjetlost reflektiralo na manje elipsoidno konkavno zrcalo koje bi formiralo konačnu sliku u centru glavnog zrcala. Otvor u centru glavnog zrcala služi kako bi se konačna slika

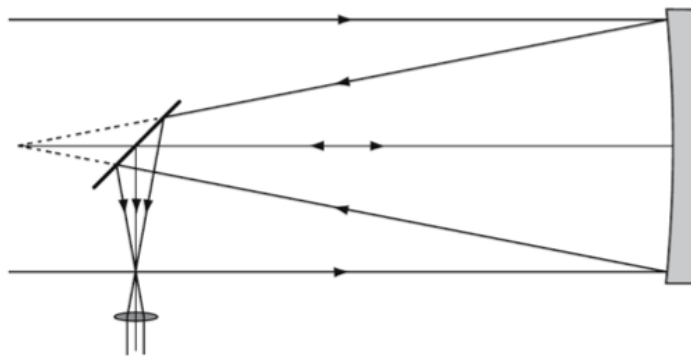
mogla promatrati normalnim okularom, a u ovom slučaju to je pozitivna leća. U ovakvom sustavu nema sfernih aberacija, dok su kromatske aberacije unutar prihvatljivih granica, a vidno polje je daleko veće nego kod Galilejevog teleskopa refraktora budući da se izlazna pupila nalazi izvan teleskopa. Gregoryjev prijedlog je bio prvi teleskop reflektor koji je u principu imao sve prednosti. Prvo, nije bilo pojave centralne opstrukcije slike. Drugo, teleskop je imao dovoljno veliko vidno polje i treće, slika udaljenog predmeta je bila uspravna. ^{[4][7]}



Slika 2.9. Gregoryjev teleskop reflektor.

Godine 1664. ili 1665. Gregory je pokušao svoj prijedlog realizirati u praksi uz pomoć optičara Reevesa i Coxa iz Londona od kojih je zatražio da mu izrade zrcalo žarišne duljine 1,83 m. Međutim, Reeves i Cox nisu uspjeli izraditi takvo zrcalo s potrebnom preciznošću. Gregory je bio razočaran ovim neuspjehom te je ubrzo odustao od namjere da realizira svoj teleskop. ^[4]

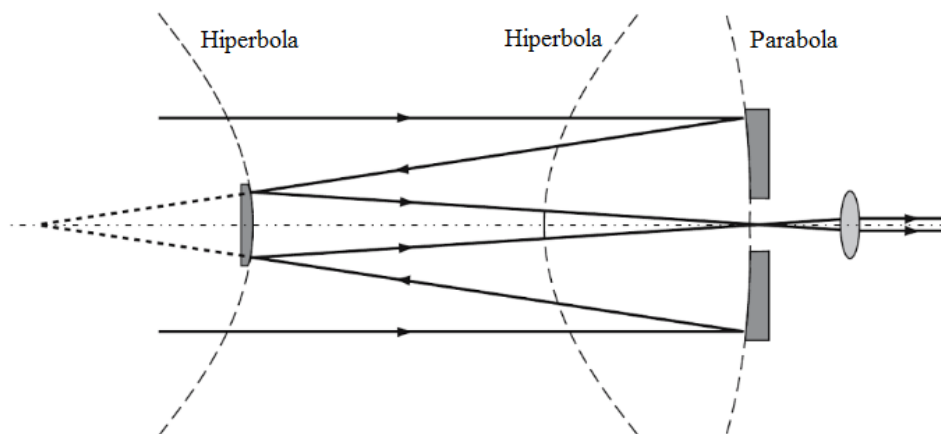
Newton je bio vrlo dobro upoznat sa Gregoryjevim prijedlogom teleskopa reflektora i njegovim pokušajem da ga ostvari u praksi. Njegova odluka da se i sam okuša u konstruiranju reflektora bila je rezultat njegovih eksperimenata sa prizmom iz 1666. godine koji su uspjeli objasnili kromatske aberacije. Newton je za sekundarno zrcalo, umjesto elipsoidnog konkavnog zrcala kakvo je predlagao Gregory u svom teleskopu, koristio malo ravno zrcalo nagnuto za 45° u odnosu na os teleskopske cijevi (sl. 2.10.). Sve zrake koje dođu na ravno zrcalo reflektiraju se sa njega kroz otvor sa strane u cijevi na okular koji je plankonveksna leća. ^{[4][7]}



Slika 2.10. *Newtonov teleskop reflektor iz 1668. godine.*

Prvi teleskop reflektor Newton je konstruirao 1668. godine. Za razliku od Gregoryjevog preambicioznog plana da načini primarno zrcalo žarišne duljine 1,83 m, Newton je koristio primarno zrcalo žarišne duljine 16 cm. Teleskop je imao povećanje od 35 puta. Prednost Newtonovog teleskopa jeste činjenica da se ravno zrcalo može vrlo lako izraditi, dok je mnogo teže izraditi s potrebnom preciznošću sekundarna zrcala koja su predlagali Gregory, a kasnije i Cassegrain. Newton je prvi konstruirao upotrebljivi model teleskopa reflektora. ^{[2][7]}

Cassegrain je 1672. godine u svom modelu teleskopa reflektora predložio da se za sekundarno zrcalo, umjesto konkavnog zrcala kakvo je predlagao Gregory, upotrijebi konveksno zrcalo. Pri tome sekundarno zrcalo je postavljeno tako da presretne zrake koje dolaze sa primarnog zrcala s otvorom u sredini prije nego stignu u žarište primarnog zrcala (sl. 2.11.). Cassegrainov prijedlog reflektora imao je prednosti nad Gregoryjevim i Newtonovim reflektorom, ali su one bile zanemarene od strane njegovih suvremenika. Godine 1779. Jesse Ramsden pokazao je kako kombinacija konkavnog i konveksnog zrcala ispravlja aberacije obje površine, dok su kod Gregoryjevog reflektora one dodatak. Također, Cassegrainov teleskop istog povećanja kao i Gregoryjev kraći je za dvije žarišne duljine sekundarnog zrcala Gregoryjevog reflektora. ^[4]



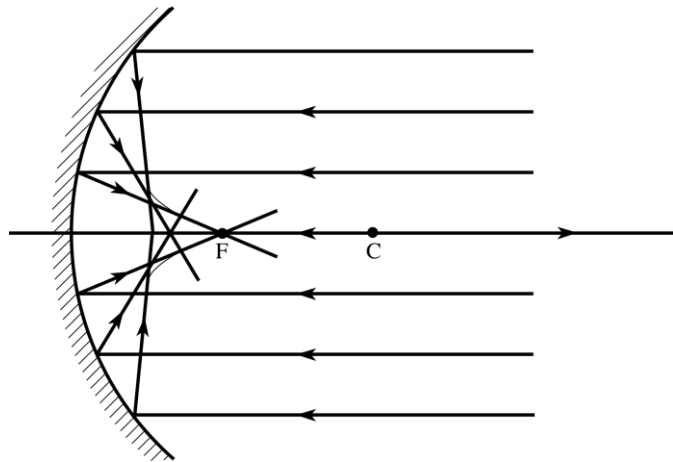
Slika 2.11. Cassegrainov teleskop reflektor.

Kada se Newton susreo s Cassegrainovim rješenjem rekao je: “*Ne vidim prednost ove naprave, jer su gubici tako veliki i neotklonjivi i ja vjerujem da ona u praksi neće nikad dati dobre rezultate...*” Međutim, napredak reflektora je pokazao kako se ova okrutna kritika nije ostvarila, jer se u 5,08-metarskom teleskopu reflektoru na Mount Palomaru zapravo ostvarila Cassegrainova zamisao, a ne Newtonova. Zrcalo palomarskog teleskopa ima tako veliki promjer da čovjek može sjesti unutar njega, a da ne zaklanja puno svjetlosti. Za ovakvu uporabu teleskopa kaže se da se radi u primarnom žarištu. Promatrač pri tome ne gleda sliku direktno okom, već se nalazi unutar teleskopa u primarnom žarištu kako bi pomoću kamere ili nekog drugog instrumenta snimio sliku. Pri tome promatrač se nalazi u kabini koja se pomiče zajedno sa teleskopom. ^[2]

2.3.1. Nedostaci reflektora

U reflektorima kromatska aberacija ne postoji. Stoga su reflektori uspješni u ispravljanju ozbiljne mane koja je svojstvena refraktorima. Međutim, usavršavanje optičkih instrumenata u jednom smjeru obično vodi do pojave nekih drugih ozbiljnih nedostataka. Niti jedan optički element, osim ravnog zrcala, u principu ne stvara idealnu sliku predmeta pođalje od optičke osi. Sferna zrcala uzrokuju sfernu aberaciju. Zbog toga se u reflektorima za objektiv koristi parabolično zrcalo. Međutim, i parabolična zrcala uzrokuju pogrešku koja se naziva koma. ^{[2][8]}

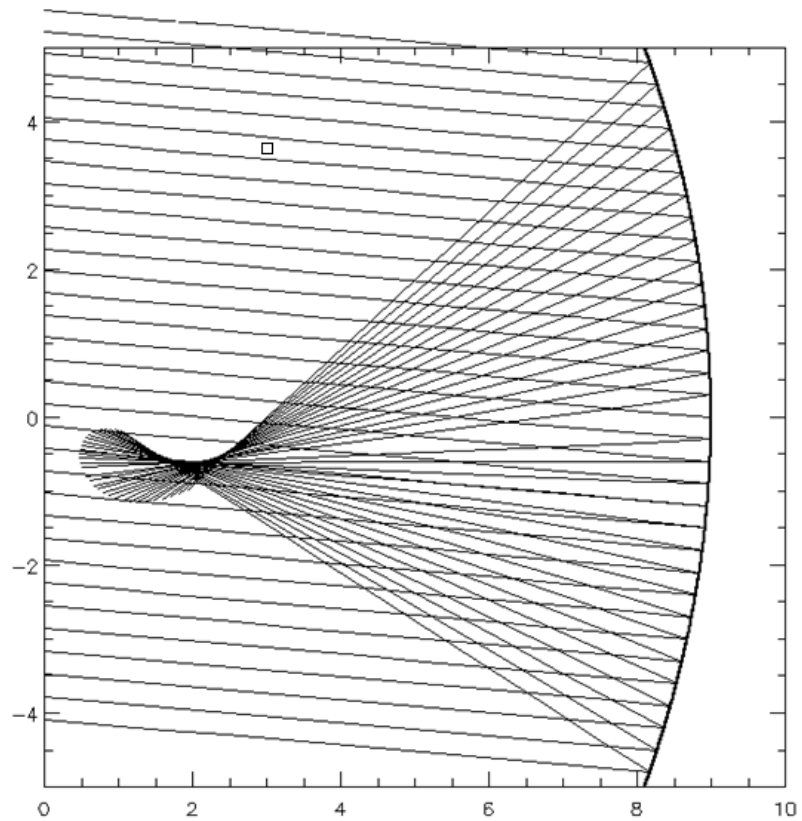
Sferna zrcala širokog otvora imaju manu koja onemogućava da se upadni snop zraka svjetlosti fokusira u istoj točki. Zrake svjetlosti koje upadaju na rubni dio sfernog zrcala, paralelno s optičkom osi zrcala, ne uspijevaju se fokusirati u istoj točki u kojoj se sijeku paraksijalne zrake. Umjesto jednog žarišta zrcala, kao kod uskog snopa paraksijalnih zraka, ovdje postoji niz žarišta poredanih po optičkoj osi zrcala (sl. 2.12.). Uslijed sferne aberacije kod sfernog zrcala slika predmeta često je mutna. Sferna



Slika 2.12. Sferna aberacija sfernog konkavnog zrcala.

aberracija se najčešće korigira pomoću paraboličnog zrcala. Razlog tomu je što su krajnji rubovi paraboličnog zrcala značajno drugačijeg oblika nego kod sfernog. Za razliku od sfernog zrcala, kod paraboličnog zrcala upadni snop zraka svjetlosti paralelan s optičkom osi savršeno će se fokusirati u jednoj točki. Stoga parabolično zrcalo daje oštru i jasnu sliku predmeta. Međutim, ovo vrijedi samo ako je upadni snop zraka svjetlosti paralelan s osi parabole. ^{[5][9]}

Kada snop zraka svjetlosti upada na zrcalo pod nekim kutom pojedinačne zrake se neće reflektirati u istu točku. To se dešava kada neki točkasti predmet leži izvan optičke osi pa neke od upadnih zraka svjetlosti padaju na zrcalo pod kutom (sl. 2.14.). Kao posljedica ove aberacije paraboličnog zrcala, zvijezde koje su udaljenije od optičke osi mogu se pojaviti kao male komete, s oštrom jezgrom i maglovitim repom usmjerenim od optičke osi. Otuda i naziv koma za ovu aberaciju. Zvijezde koje se nalaze blizu optičke osi vidimo oštro i jasno. Danas se koma ispravlja korekcijskim uređajima smještenim u okularu pa se umjesto jedne leće za okular koristi složeni optički sustav u kojem su leće različito raspoređene. ^{[2][10]}



Slika 2.13. *Pojava kome kod paraboličnog zrcala.*

3. Fizika teleskopa

Princip rada teleskopa, kao i drugih optičkih instrumenata, temelji se na zakonima geometrijske optike. Optika je dio fizike koji se bavi proučavanjem svojstava svjetlosti te zakonitostima širenja i fizikalnog djelovanja svjetlosti i njihovom primjenom u različitim optičkim sustavima. Svjetlost se za sada u fizici razmatra dvojako: kao val i kao čestica. Prema valnoj teoriji svjetlost se tumači kao elektromagnetski val, a prema čestičnoj ili korpuskularnoj teoriji svjetlost se sastoji od roja sitnih tjelašaca, tj. korpuskula koje svijetle i emitirane su iz tvari. ^[5]

Geometrijska optika je dio optike koja razmatra pravocrtno širenje svjetlosti i u njezinoj osnovi leži geometrija. Ona zanemaruje valni karakter svjetlosti, ne pitajući se uopće za prirodu svjetlosti. Dakle, u okviru geometrijske optike svjetlost se širi u pravcima. Pri tome, sredstvo kojim se svjetlost širi naziva se optičkim sredstvom, a to mogu biti vakuum, zrak, voda, staklo, itd. Osnovni zakoni geometrijske optike su:

- Zakon pravocrtnog širenja svjetlosti
- Zakon neovisnosti svjetlosnih snopova
- Zakon refleksije svjetlosti
- Zakon loma svjetlosti.

Navedeni zakoni geometrijske optike mogu se izvesti iz Fermatovog principa prema kojemu se svjetlost između dviju zadanih točaka u prostoru širi onom stazom za koju joj treba najmanje vremena.

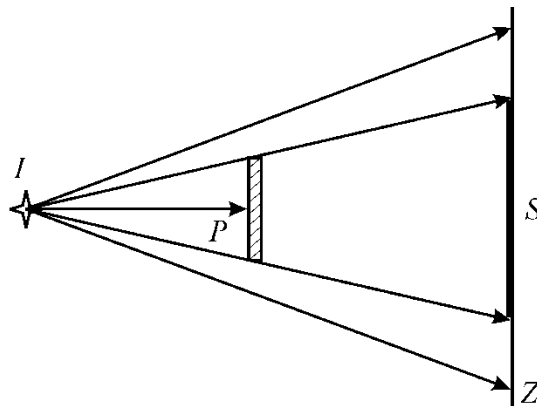
[5][11]

A. Zakoni geometrijske optike

Zakoni geometrijske optike odnose se na optičke sustave i na pojave širenja svjetlosti kroz prozirna sredstva, refleksiju i lom svjetlosti na graničnoj plohi između dvaju sredstava te nastanak slike za neki izvor svjetlosti. Izvori svjetlosti su Sunce, zvijezde, užareni predmeti, plamen i dr. ^[5]

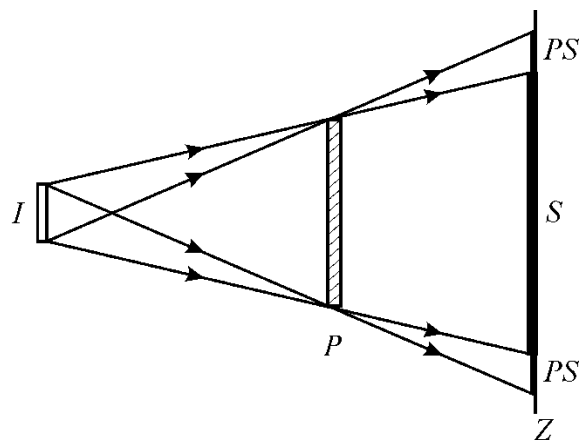
3.1. Zakon pravocrtnog širenja svjetlosti

Zakon pravocrtnog širenja svjetlosti kaže da se u prozirnem homogenom sredstvu svjetlost širi pravocrtno. Prezentacija svjetlosti pomoću zrake, tj. pravca predstavlja osnovu za iskazivanje zakona refleksije i loma svjetlosti. Izravna posljedica pravocrtnog širenja svjetlosti jeste pojava sjene i polusjene. Vrlo je moguće da je jedna od prvih zapaženih optičkih pojava bila da je sjena predmeta, osvijetljenog izvorom malih dimenzija, istog oblika kao i predmet te da su krajevi sjene produžeci pravih crta koje dolaze sa izvora i dodiruju krajeve predmeta. Na slici 3.2. točka I predstavlja točkasti izvor svjetlosti, što znači da je veličina izvora zanemariva s obzirom na promatranu udaljenost od izvora do zastora. Nadalje, Z je zastor, a P kružni neprozirni predmet smješten između izvora i zastora.



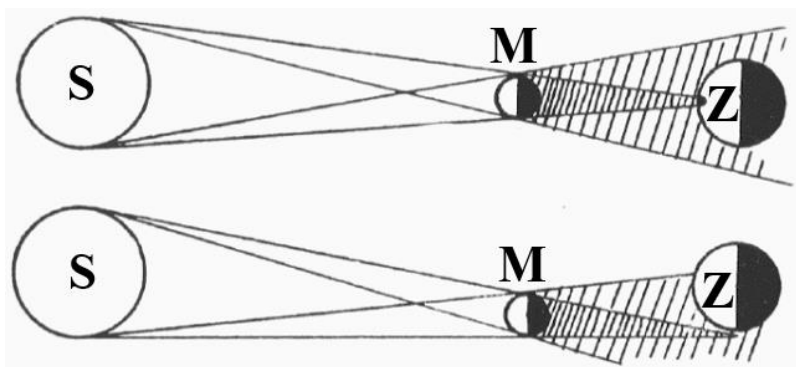
Slika 3.2. Sjena (S) neprozirnog predmeta (P) na zastoru (Z).

Površinu na zastoru, označenu slovom S , koja je ograničena zrakama od izvora svjetlosti tangentnim na krajevima predmeta nazivamo sjenom predmeta. Međutim, kada izvor svjetlosti nije dovoljno malen kako bismo mogli zanemariti njegove dimenzije, osim sjene predmeta opažamo i polusjenu koja je na slici 3.3. označena sa PS . Polusjena je dio prostora iza neprozirnog predmeta osvijetljenog izvorom svjetlosti u čiji prostor od izvora svjetlosti dolazi po neka zraka svjetlosti. ^{[5][11]}



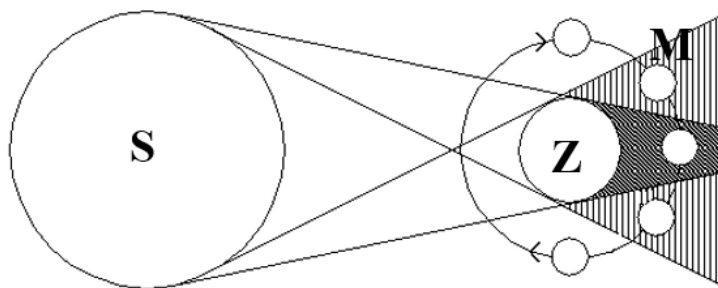
Slika 3.3. Sjena (*S*) i polusjena (*PS*) neprozirnog predmeta (*P*) na zastoru (*Z*).

Pomračenje Sunca i Mjeseca posljedica su pravocrtnog širenja svjetlosti. Djelomično ili potpuno pomračenje Sunca nastaje zbog prolaska Zemlje kroz polusjenu ili sjenu Mjeseca koju daje Sunce. Drugim riječima, pomrčina Sunca nastaje kada se Mjesec nađe između Sunca i Zemlje pa djelomično ili potpuno zakloni Sunce (sl. 3.4.). Kada je raspored nebeskih tijela malo drugačiji dolazi



Slika 3.4. Potpuna i djelomična pomrčina Sunca.

do djelomične ili potpune pomrčine Mjeseca. Djelomična pomrčina Mjeseca nastaje kada se Mjesec pri kretanju oko Zemlje nađe u Zemljinoj polusjeni, a potpuna pomrčina nastaje kada se Mjesec nađe u Zemljinoj sjeni (sl. 3.5.). ^[11]



Slika 3.5. *Djelomična i potpuna pomrčina Mjeseca.*

Zakon pravocrtnog širenja svjetlosti je samo približan jer postoje mala odstupanja pri nailaženju svjetlosti na ivice neprozirnih tijela. Iako je izvor svjetlosti dovoljno malen, rub sjene i svjetla nije oštar jer dio svjetlosti prodire i iza ruba u područje sjene. Posljedica toga je uočavanje svjetlijih i tamnijih pruga u području svjetlosti. Ta pojava se naziva difrakcija ili ogib, a tumači se valnom teorijom svjetlosti. Međutim, geometrijska optika zanemaruje pojavu difrakcije svjetlosti, jer ne uzima u obzir valnu prirodu svjetlosti. ^{[11][5]}

3.2. Zakon neovisnosti svjetlosnih snopova

Zakon neovisnosti svjetlosnih snopova kaže da ako dva svjetlosna snopa prolaze jedan kroz drugi ili se sijeku, tada ne djeluju jedan na drugi. Dakle, svaki svjetlosni snop širi se neovisno od ostalih prema drugom zakonu geometrijske optike. Međutim, kako je svjetlost i val i čestica, u praksi dolazi do pojave interferencije, pa superpozicijom dvije svjetlosne zrake na nekim mjestima svjetlost slabi, dok se na drugima pojačava. No, kako smo već napomenuli, geometrijska optika u obzir ne uzima valni karakter svjetlosti. ^{[11][12]}

Dobar primjer neovisnosti snopova vidi se na koncertima i predstavama kada se ukrštavaju svjetlosni snopovi dvaju ili više reflektora. ^[12]

3.3. Zakon refleksije svjetlosti

Zakon refleksije svjetlosti govori o promjeni pravca širenja svjetlosti nakon što svjetlost padne na graničnu plohu između dva optička sredstva. Do refleksije dolazi uvijek kada snop paralelne svjetlosti padne na granicu između dva optička sredstva od kojih je barem jedno sredstvo prozirno. Međutim, ako upadni snop dolazi na granicu između dva prozirna optička sredstva, kao što su zrak i staklo ili voda i staklo, jedan dio zraka od upadnog snopa će se reflektirati, a preostali dio će prijeći u drugo sredstvo. ^{[5][13]}

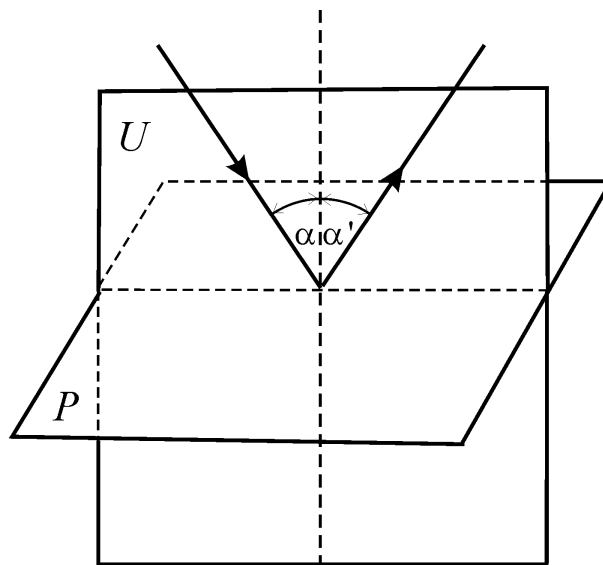
Zakon refleksije primjenu nalazi kod zrcala. Svaka uglačana ploha koja reflektira najveći dio upadnih zraka svjetlosti naziva se zrcalo. Kako površine zrcala mogu biti ravne i zakrivljene razlikujemo ravna i zakrivljena zrcala koja su najčešće sfernog oblika. Ravna zrcala kao i sferna zrcala imaju široku primjenu kako u svakodnevnom životu tako i u znanosti i tehnici. U astronomiji ravna i sferna zrcala primjenu nalaze u teleskopima reflektorima. U velikim reflektorima se najčešće koristi paraboloidno zrcalo koje je sličnog oblika kao i sferno, a dobije se kao dio plohe rotacionog paraboloidea. ^[5]

3.3.1. Zakon refleksije svjetlosti na ravnoj površini

Kada snop paralelnih zraka svjetlosti padne na ravnu uglađenu plohu, upadni snop zraka svjetlosti se reflektira od plohu u ravnini okomitoj na tu plohu tako da je kut refleksije α' jednak upadnom kutu α , pa zakon refleksije zapisujemo u obliku:

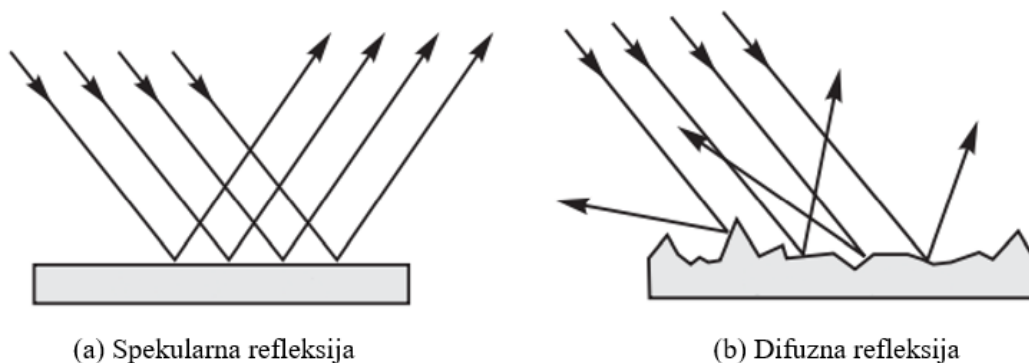
$$\alpha' = \alpha. \quad (3.1)$$

Pri tome se reflektirani i upadni kut gledaju između zrake i okomice na površinu. Dakle, upadna i reflektirana zraka leže u istoj upadnoj ravnini određenoj upadnom zrakom i okomicom na površinu (sl. 3.6.). ^{[5][14]}



Slika 3.6. Zakon refleksije na ravnoj površini. U je upadna ravnina, a P granična ploha između dva optička sredstva.

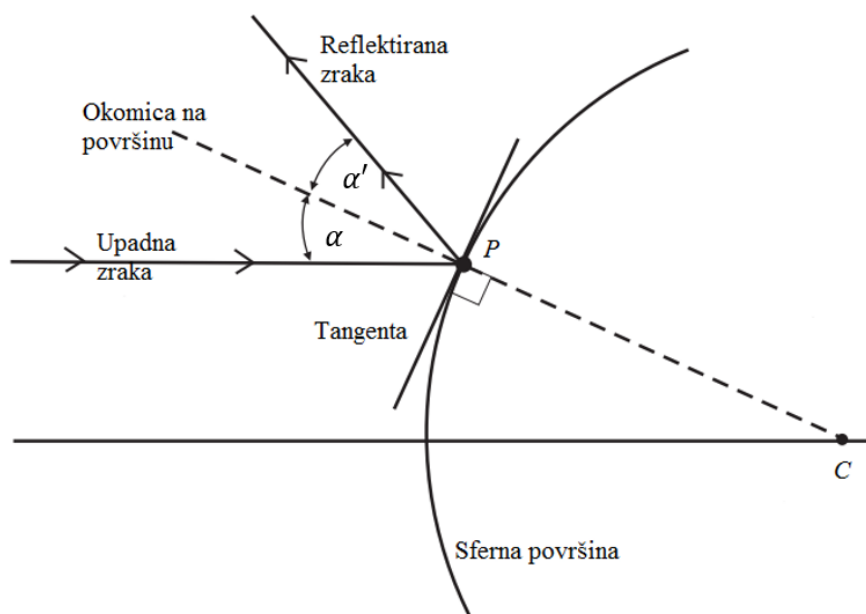
Kada snop paralelnih zraka svjetlosti padne na glatku površinu neprozirnog tijela, kao što je zrcalo, dolazi do spekularne refleksije (sl. 3.7.a). To je pravilna ili geometrijska refleksija. Ukoliko je površina neravna, snop paralelnih zraka svjetlosti će se reflektirati u različitim pravcima. Tada je riječ o difuznoj ili nepravilnoj refleksiji (sl. 3.7.b). Uzimajući u obzir zakon refleksije, kod spekularne refleksije uočavamo kako će se svaka od upadnih paralelnih zraka svjetlosti reflektirati od ravnu uglačanu površinu pod istim kutom. Pri tome će reflektirani snop zraka svjetlosti biti paralelan baš kao i upadni snop. Na površini koja se sastoji od mnogo malih, nasumično orijentiranih ravni površina, svaka zraka će se reflektirati u smjeru različitom od susjedne zrake, iako svaka zraka poštuje zakon refleksije na svom segmentu ravne površine. ^{[12][13]}



Slika 3.7. Spekularna i difuzna refleksija.

3.3.2. Zakon refleksije svjetlosti na sfernoj površini

Zakon refleksije ne vrijedi samo za ravne površine, već i za sferne. Kada zraka svjetlosti naiđe na neku površinu ona ne pogađa znatan dio te površine. Stoga se uzima da svjetlost pada na dio sferne površine koji se može smatrati ravnom površinom. Pri tome se kut refleksije i upadni kut također gledaju između reflektirane i upadne zrake te okomice na tu površinu u promatranoj točki P (sl. 3.8.). Okomica na točku P je pravac povučen iz centra zakrivljenosti C do točke P . Tada za promatranu točku P vrijedi zakon refleksije prema kojemu je kut refleksije jednak upadnom kutu. ^{[13][14]}



Slika 3.8. Zakon refleksije na sfernoj površini.

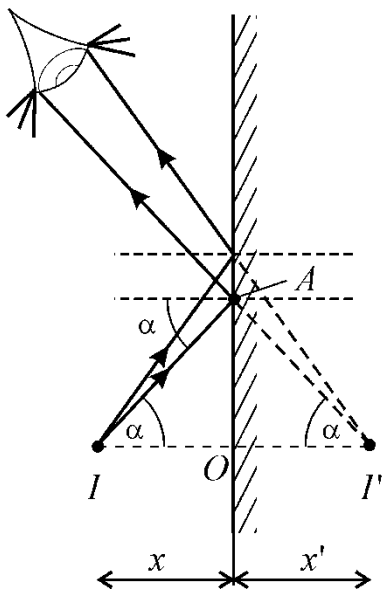
3.3.3. Ravno zrcalo

Svaku uglađenu plohu koja pravilno reflektira svjetlost nazivamo zrcalom. Ravno zrcalo je katoptrijski optički sustav kod kojeg je dioptrijska ploha ravnina. Katoptrijskim optičkim sustavom nazivamo sustav kod kojeg sliku izvora svjetlosti daju reflektirane zrake, dok sustav kod kojeg sliku daju lomljene zrake nazivamo dioptrijskim sustavom. Pri tome, optičkim sustavom nazivamo skup

homogenih prozirnih ili reflektivnih sredstava poredanih jedan iza drugog odijeljenih dioptrijskim plohami. ^[5]

3.3.3.1. Konstrukcija slike kod ravnog zrcala

Promotrimo točkasti izvor svjetlosti i njegovu sliku nakon refleksije na ravnom zrcalu. Neka je, na slici 3.9., I izvor svjetlosti, a I' slika tog izvora. Izravnom primjenom zakona refleksije dobije se položaj slike I' kao sjecište dvaju pravaca na kojima leže neke dvije reflektirane zrake. Vidimo da je ravno zrcalo stigmatično jer za točkasti izvor svjetlosti daje točkastu sliku. Nadalje, neka je na istoj



Slika 3.9. Konstrukcija slike točkastog izvora svjetlosti kod ravnog zrcala.

slici, udaljenost izvora od zrcala označena sa x , a udaljenost slike sa x' . Promotrimo li trokute $\triangle IOA$ i $\triangle I'OA$, koji se međusobno preklapaju, uočavamo da iz njihove sličnosti proizlazi da je udaljenost slike od zrcala jednaka udaljenosti izvora od zrcala. To matematički možemo zapisati kao:

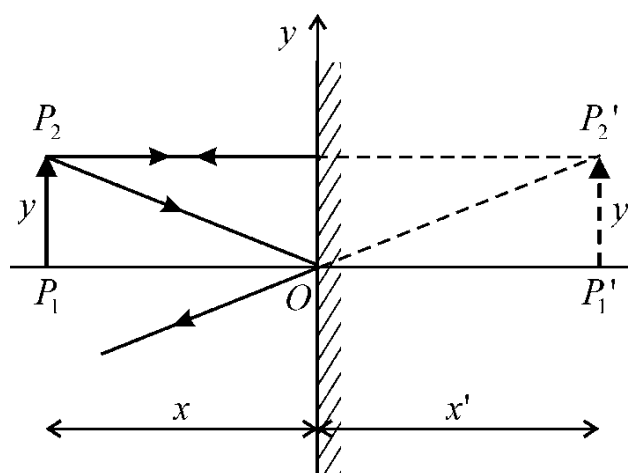
$$x = -x'. \quad (3.2)$$

Negativni predznak dolazi budući da se slika i predmet nalaze na suprotnim stranama reflektivne površine. Uvijek kada se predmet nalazi na istoj strani reflektivne površine kao i upadna zraka, za udaljenost predmeta od zrcala uzima se pozitivna vrijednost ($x > 0$), u suprotnom negativna ($x < 0$). U slučaju kada se slika predmeta nalazi na istoj strani reflektivne površine kao i reflektirana zraka svjetlosti udaljenost slike od zrcala ima pozitivnu vrijednost ($x' > 0$), u suprotnom ima negativnu vrijednost ($x' < 0$). Ova pravila o predznacima vrijede ne samo kod ravnog, već i kod sfernog zrcala. [5][15]

Primjenom zakona refleksije moguće je naći sliku ne samo točkastog predmeta, već bilo kojeg predmeta konačne veličine. Često radi jednostavnosti razmatramo predmete koji imaju samo jednu dimenziju. Za karakteristične točke predmeta potrebno je primijeniti zakon refleksije kao kod konstrukcije slike točkastog predmeta (sl. 3.10.) te spojiti dobivene točke kako bi se u konačnici formirala slika predmeta. Pritom je transversalna veličina predmeta, na slici označena sa y' , jednaka veličini predmeta y , što slijedi iz sličnosti trokuta ΔP_1P_2O i $\Delta P_1'OP_2'$. Kako je transversalno povećanje slike jednako omjeru veličine slike y' i veličine predmeta y , odnosno:

$$\gamma = \frac{y'}{y}, \quad (3.3)$$

stoga je pripadno transversalno povećanje slike kod ravnog zrcala $\gamma = 1$. Budući da je povećanje slike uvijek pozitivno, odnosno $\gamma > 0$, slika je uvijek uspravna i jednake veličine kao i predmet. [5][14][15]

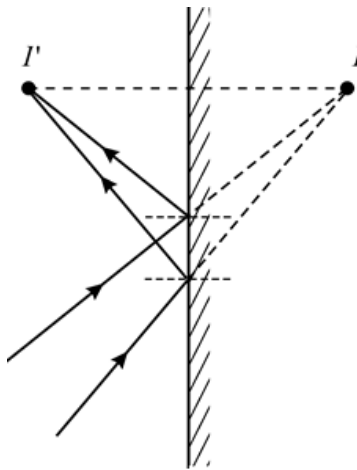


Slika 3.10. Konstrukcija slike predmeta kod ravnog zrcala.

3.3.3.2. Realna i virtualna slika

Na slici 3.9. uočavamo kako se položaj slike izvora svjetlosti, I' , nalazi u točki u kojoj se sijeku geometrijski produžeci reflektiranih zraka. Takvu sliku nazivamo virtualnom ili prividnom slikom. Dakle, kod ravnog zrcala realnom predmetu odgovara virtualna slika do koje se dolazi u protivnom smjeru od smjera reflektirane svjetlosti. ^{[5][14]}

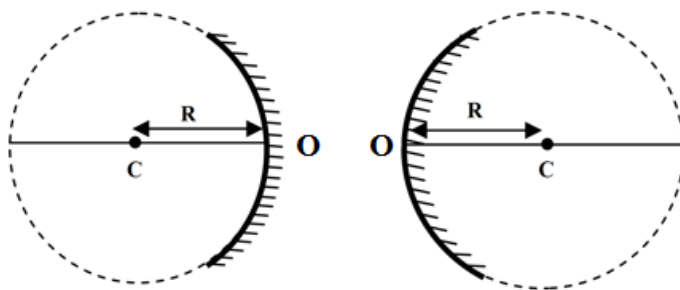
Virtualnom izvoru odgovara realna slika do koje se dolazi u smjeru širenja svjetlosti (sl. 3.11). Dok je u točkama realne slike gustoća svjetlosne energije najveća, na mjestu virtualne slike osvijetljenost se ne razlikuje od okoline, a može biti i ništica. ^[5]



Slika 3.11. Nastanak realne slike. I je virtualni izvor, a I' realna slika izvora.

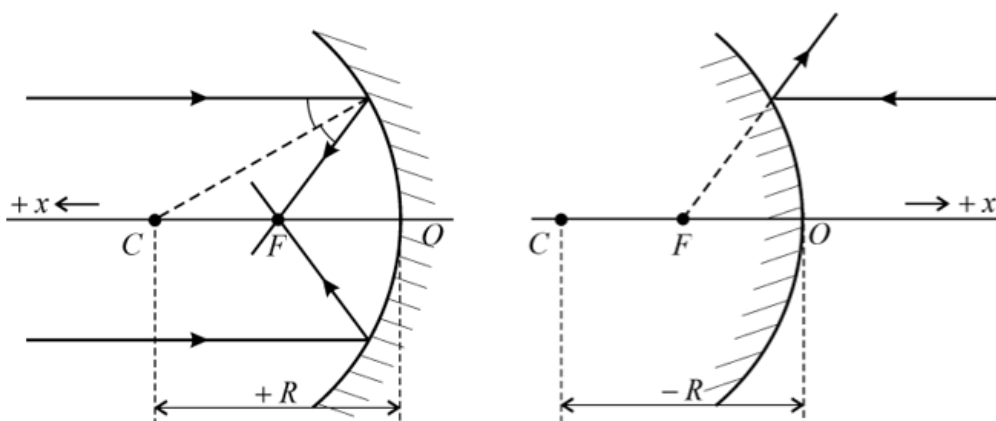
3.3.4. Sferno zrcalo

Sferno zrcalo dobije se kao dio kugline plohe kojoj je jedna strana glatka, tako da reflektira svjetlost. U ovisnosti koja ploha reflektira svjetlost, razlikujemo udubljena ili konkavna te ispupčena ili konveksna sferna zrcala (sl. 3.12.). Kada vanjska ploha sfere ili kalote reflektira svjetlost tada promatramo konveksno sferno zrcalo, u suprotnom je riječ o konkavnom sfernom zrcalu. ^{[5][14]}



Slika 3.12. Konkavno ili udubljeno (lijevo) i konveksno ili ispupčeno (desno) sferno zrcalo.

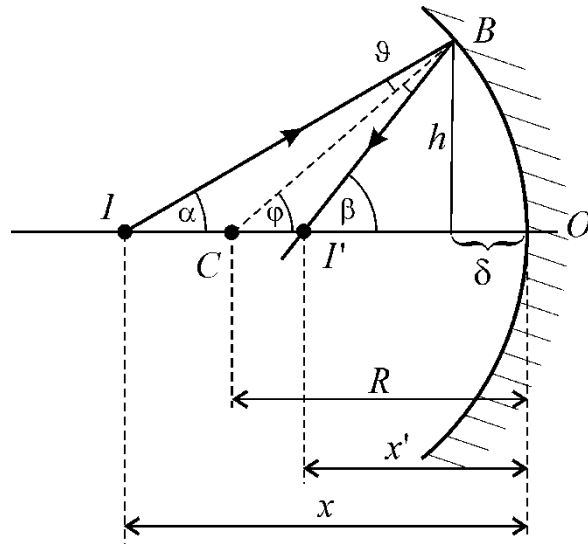
Os koja prolazi kroz središte zakrivljenosti zrcala C i probada okomito sfernu kalotu u tjemenu O sfernog zrcala naziva se glavna optička os zrcala. Na glavnoj osi sfernog zrcala smještene su dvije tzv. kardinalne točke (sl. 3.13.). Jedna od njih se nalazi u središtu zakrivljenosti sfernog zrcala C i predstavlja centar zrcala. Ova točka je sama sebi slika. Druga kardinalna točka je smještena u žarištu ili fokusu zrcala F . U ovoj točki se nalazi slika točkastog predmeta smještenog beskonačno daleko od zrcala na glavnoj osi. Njezina se udaljenost od tjemena zrcala do žarišta naziva žarišna duljina f . Za konkavno sferno zrcalo žarišna duljina je pozitivna ($f > 0$), a za konveksno negativna ($f < 0$). Pri tome je žarišna duljina jednaka polovini polumjera zakrivljenosti zrcala R , odnosno vrijedi $f = R/2$. Budući da se pozitivna apscisa, koordinatnog sustava s ishodištem u tjemenu zrcala O , uvijek uzima u smjer reflektirane zrake, polumjer zakrivljenosti je pozitivan ($R > 0$) za konkavno zrcalo, a negativan ($R < 0$) za konveksno zrcalo. ^{[5][14]}



Slika 3.13. Kardinalne točke sfernog zrcala.

3.3.4.1. Jednadžba konjugacije sfernog zrcala

Položaj slike I' za neki točkasti predmet I određuje se pomoću jednadžbe sfernog zrcala. Kako bismo došli do jednadžbe sfernog zrcala služit ćemo se slikom 3.14. i uvest ćemo koordinatni sustav s ishodištem u tjemenu zrcala O . Pri tome pozitivni smjer osi koordinatnog sustava, koja prolazi kroz točke O i C , uvijek je u smjeru reflektirane zrake. Prvo ćemo promotriti trokute $\triangle ICB$ i $\triangle CI'B$. Na vanjske kutove ova dva trokuta primijenit ćemo pravilo iz geometrije ravnine prema kojemu je vanjski



Slika 3.14. Izvod jednadžbe konjugacije sfernog zrcala.

kut trokuta jednak zbroju nasuprotnih unutrašnjih kutova. Dakle, za vanjski kut φ trokuta $\triangle ICB$ vrijedi $\varphi = \alpha + \vartheta$ te za vanjski kut β trokuta $\triangle CI'B$ vrijedi $\beta = \varphi + \vartheta$. Eliminacijom kuta ϑ iz prethodne dvije jednadžbe slijedi jednadžba: ^{[5][15]}

$$\alpha + \beta = 2\varphi. \quad (3.4.)$$

Promotrimo li sada pravokutne trokute s vrhom u točki B, za tangense kutova α , β i φ , prema gornjoj slici, vrijedi:

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{h}{x - \delta}, \quad \operatorname{tg}\beta = \frac{h}{x' - \delta}, \quad \operatorname{tg}\varphi = \frac{h}{R - \delta}. \quad (3.5.)$$

Ove trigonometrijske jednađbe ne mogu se lako riješiti kao što je to slučaj s pripadnim algebarskim jednađbama kod ravnog zrcala. Međutim, za vrlo mali kut α ($\ll 1$ rad), kutovi β i φ su također vrlo mali pa za vrlo male kutove možemo aproksimirati tangense s pripadnim kutovima:

$$\operatorname{tg}\alpha \cong \alpha, \quad \operatorname{tg}\beta \cong \beta, \quad \operatorname{tg}\varphi \cong \varphi.$$

Također, ako je kut α vrlo mali tada možemo zanemariti udaljenost δ u odnosu na udaljenosti x , x' i R . Odnosno uzimamo da je $\delta \cong 0$. Uvrštavanjem ovih aproksimacija u jednađbe (3.5.) približno slijedi: ^[5]

$$\alpha = \frac{h}{x}, \quad \beta = \frac{h}{x'}, \quad \varphi = \frac{h}{R}. \quad (3.6.)$$

Uvrštavanjem jednađbi (3.6.) u (3.4.) te dijeljenjem sa h dobivamo tzv. jednađbu konjugacije sfernog zrcala:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{2}{R}. \quad (3.7.)$$

Kako za žarišnu duljinu vrijedi da je $f = R/2$, odakle slijedi da je polumjer zakrivljenosti zrcala $R = 2f$, jednađbu (3.7.) možemo zapisati i u sljedećem obliku: ^{[5][15]}

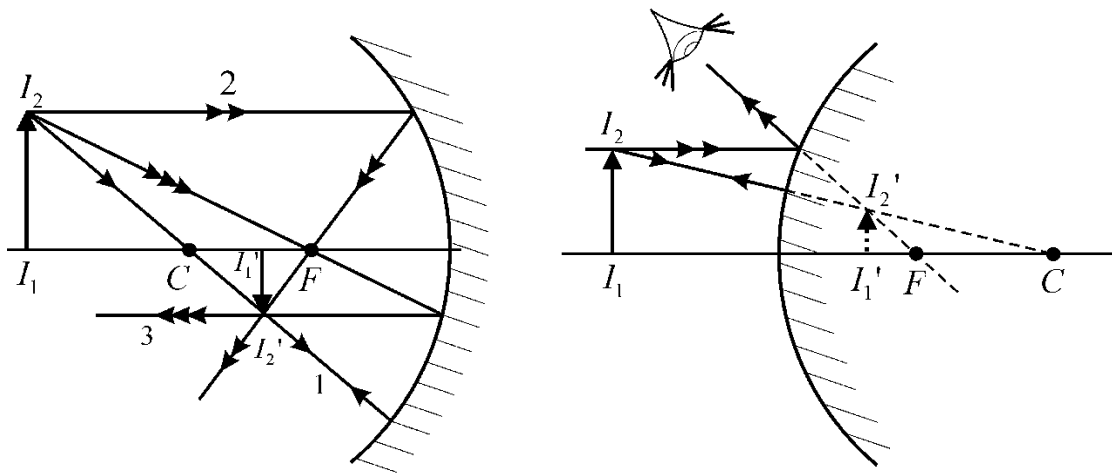
$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f}. \quad (3.8.)$$

Jednađba konjugacije sfernog zrcala, budući da ne sadrži kut α , vrijedi samo za paraksijalne zrake, dakle za one zrake koje su paralelne i prolaze blizu glavnoj optičkoj osi sfernog zrcala. Poznavanjem položaja x točkastog predmeta na glavnoj osi i radijusa zakrivljenosti sfernog zrcala R ili žarišne duljinu zrcala f , jednađba konjugacije daje položaj slike x' . ^{[5][15]}

Gore navedene aproksimacije, na temelju kojih smo izveli jednađbu konjugacije, nazivaju se Gaussove aproksimacije. ^[5]

3.3.4.2. Konstrukcija slike pomoću kardinalnih točaka sfernog zrcala

Kod sfernog zrcala, kao i kod ravnog, moguće je pronaći sliku kako i za točkasti predmet tako i za ravni predmet konačne veličine. Kako za svaku točku predmeta postoji slika koja je također točka, odaberemo li samo dvije od beskonačno mnogo točaka na predmetu, jednu na glavnoj osi i drugu izvan osi, tada geometrijskom konstrukcijom možemo naći sliku predmeta. Neka je na slici 3.15. I_1 točka predmeta koja leži na glavnoj osi zrcala, a I_2 točka koja leži izvan osi. Kako se točka I_1 nalazi na osi zrcala i njezina slika I_1' će se također nalaziti na glavnoj osi. Međutim, položaj točke I_2' nalazi



Slika 3.15. Konstrukcija slike ravnog predmeta kod konkavnog (lijevo) i konveksnog (desno) zrcala.

u sjecištu svih zraka koje dolaze iz točke I_2 . Za određivanje položaja slike točke I_2 , a time i položaja slike koja odgovara linearnom predmetu I_1I_2 , koristimo zrake kojima znamo smjerove refleksije. To su tzv. karakteristične zrake i ima ih ukupno tri:

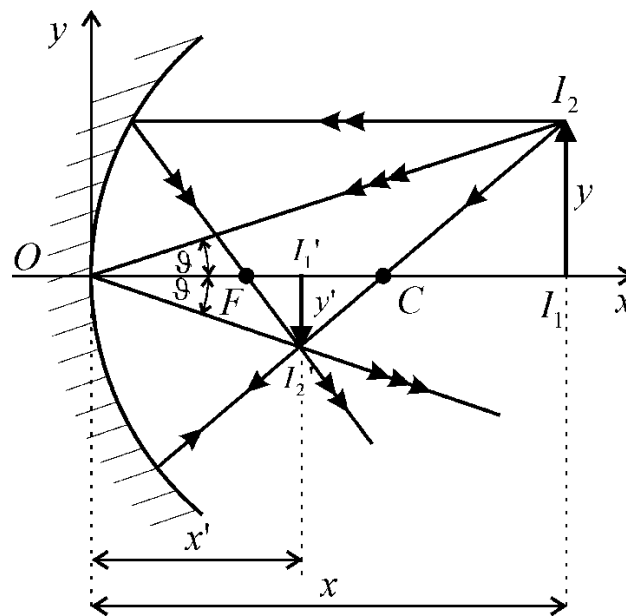
1. Zraka koja prolazi kroz centar zrcala C reflektira se po istom pravcu,
2. Zraka koja dolazi paralelno s glavnom osi zrcala, nakon refleksije na zrcalu prolazi kroz žarište zrcala F ,
3. Zraka koja dolazi na zrcalo kroz žarište zrcala F reflektira se paralelno s glavnom optičkom osi zrcala.

Nakon refleksije, sve tri karakteristične zrake sijeku se u točki I_2' . Za konstrukciju slike predmeta dovoljno je konstruirati samo dvije od tri karakteristične zrake. Za drugu točku slike, I_1' , za koju

znamo da leži na glavnoj osi, točan položaj određujemo spuštanjem transverzale iz točke I_2' na glavnu optičku os. [5][14]

3.3.4.3. Linearno povećanje slike

Na slici 3.15. moguće je uočiti kako kod sfernih zrcala veličina slike $y'=I_1'I_2'$ i predmeta $y=I_1I_2$ nije uvijek jednaka, kao što je to slučaj kod ravnih zrcala. Ranije smo definirali transverzalno povećanje slike γ , kao omjer veličine slike y' i veličine predmeta y , u jednadžbi (3.3.). Budući da kod sfernog zrcala (sl. 3.16.) udaljenost slike x' nije jednaka udaljenosti predmeta x , kako bismo odredili položaj slike u odnosu na položaj predmeta s obzirom na zrcalo potrebno je uvesti i linearno povećanje



Slika 3.16. Linearno povećanje slike.

slike. Tu relaciju daje jednadžba (3.3.). Uvedemo li koordinatni sustav s ishodištem u točki O kao na slici, iz sličnosti trokuta ΔI_2I_1O i $\Delta I_2'I_1'O$ slijedi veza između linearnog i transverzalnog povećanja slike. Ova dva trokuta imaju jednu zajedničku katetu i jednak vršni kut ϑ . Pri tome, vrijedi:

$$\tan\theta = -\frac{y'}{x'} = \frac{y}{x}. \quad (3.9.)$$

Budući da je koordinata y pozitivna iznad x osi, a ispod x osi negativna, otuda negativan predznak u gornjoj jednadžbi. Iz jednadžbe (3.9.) dalje slijedi:

$$\gamma = \frac{y'}{y} = -\frac{x'}{x}. \quad (3.10.)$$

Odnosno, linearno povećanje slike određeno je relacijom:

$$\gamma = -\frac{x'}{x}. \quad (3.11.)$$

Dakle, ako je γ pozitivan ($\gamma > 0$) slika je upravna u odnosu na predmet, a ako je negativan ($\gamma < 0$) slika je obrnuta. Vidjeli smo da kod ravnog zrcala vrijedi da je $x = x'$, $y' = y$ i $\gamma = 1$, kod sfernog zrcala slika će biti umanjena za $|\gamma| < 1$, uvećana za $|\gamma| > 1$ i iste veličine kao i predmet za $|\gamma| = 1$. ^{[5][15]}

Kod konkavnog zrcala, kada se realan i uspravan predmet nalazi na položaju $x > f$ od zrcala slika predmeta je realna i obrnuta, a veličina slike ovisi o položaju predmeta na glavnoj osi zrcala:

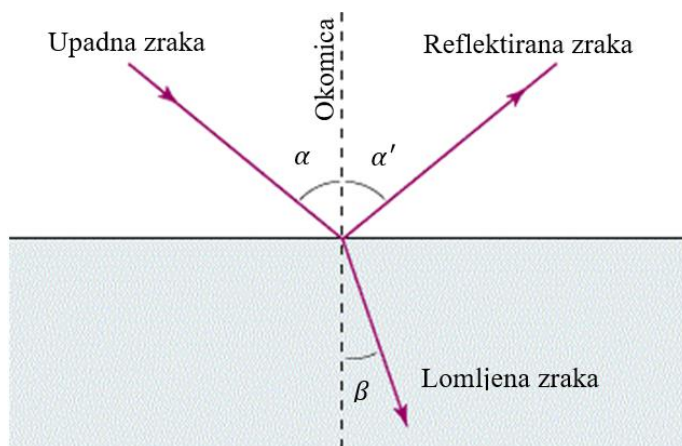
- Za $x > R$ predmet se nalazi iza centru zrcala C , a slika će biti umanjena,
- Za $x = R$ predmet se nalazi u centru zrcala C , a slika je jednake veličine kao i predmet,
- Za $f < x < R$ predmet se nalazi između centra zrcala C i žarišta F , a slika je uvećana,
- Za $x = f$ predmet se nalazi u žarištu zrcala F , a slike nema, tj. kažemo da se slika nalazi u beskonačnosti.

Kada se predmet nalazi na udaljenosti $x < f$ od zrcala, dakle između žarišta F i tjemena zrcala O , slika je virtualna, uspravna i uvećana. Gore navedeno moguće je provjeriti geometrijski te matematički pomoću jednadžbe konjugacije. ^{[5][14][15]}

Konveksno zrcalo uvijek za realan i uspravan predmet daje virtualnu, uspravnu i umanjenu sliku predmeta. ^[5]

3.4. Zakon loma svjetlosti

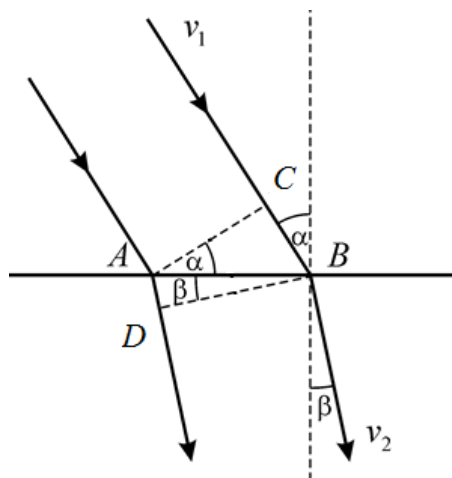
Kada paralelni snop zraka svjetlosti prolazi kroz graničnu plohu između dva prozirna optička sredstva jedan dio upadnih zraka se reflektira, a preostali dio se lomi i prolazi drugim optičkim sredstvom mijenjajući svoj smjer širenja (sl. 3.17.). Pri tome, upadna, reflektirana i lomljena zraka te okomica na graničnu plohu leže u istoj ravnini. Budući da smo već razmatrali refleksiju, ovdje ćemo se baviti samo lomljenom zrakom. Upadni kut, kojeg upadna zraka zatvara s okomicom na graničnu plohu, označava se grčkim slovom α , a kut loma, kojeg lomljena zraka zatvara s okomicom, označava se grčkim slovom β .^{[5][13]}



Slika 3.17. Refleksija i lom svjetlosti na graničnoj plohi.

3.4.1. Zakon loma svjetlosti na ravnoj površini

Zakon loma svjetlosti otkriven je eksperimentalnim putem i pri tome je pokazano da lomljena zraka leži u upadnoj ravnini, a omjer sinusa upadnog i lomljenog kuta je stalan. Međutim, ovaj zakon može se izvesti i dokazati na sljedeći način. Neka paralelni snop zraka svjetlosti upada na ravnu graničnu plohu pod kutom α s obzirom na okomicu. Nakon prolaska kroz graničnu plohu, neka promatrani snop upadne svjetlosti zatvara kut β s okomicom na granicu (sl. 3.18.). U prvom sredstvu neka se svjetlost širi brzinom v_1 , a u drugom brzinom v_2 .^{[5][14]}



Slika 3.18. Izvod zakona loma svjetlosti.

Promotrimo na slici 3.18. dvije paralelne zrake koje dolaze na graničnu plohu u točkama A i B. U trenutku kada druga zraka dopiye u točku A, prva zraka će doći do točke C. Pri tome je dužina $\overline{AC}$ okomita na upadne zrake.¹ Prolaskom upadnog snopa kroz graničnu plohu, ravnina $\overline{AC}$ zakreće se u novi položaj $\overline{DB}$. Kako bi nova ravnina ostala okomita na zrake i u drugom sredstvu, zrake prijeđu putove $\overline{AD}$ i $\overline{CB}$ za isti vremenski interval Δt . Stoga se, prema danom primjeru na gornjoj slici, može zaključiti kako je $v_1 > v_2$ jer je put $\overline{CB} > \overline{AD}$. Nadalje, promotrimo pravokutni trokut $\triangle ABC$ i upadni kut α koji se u trokutu $\triangle ABC$ nalazi u vrhu A. Naime, u vrhovima A i B nalaze se jednaki kutovi α s okomitim kracima. Iz promatranog trokuta, za sinus upadnog kuta α slijedi:

$$\sin \alpha = \frac{\overline{CB}}{\overline{AB}}. \quad (3.12.)$$

Promatrajući pravokutni trokut $\triangle DBA$ na sličan način za sinus kuta loma β dobije se:

$$\sin \beta = \frac{\overline{AD}}{\overline{AB}}. \quad (3.13.)$$

¹ $\overline{AC}$ je zapravo valna ravnina. U okviru valne teorije, zakon loma svjetlosti može se opravdati prema Huygensovom principu prema kojemu su zakoni geometrijske optike posljedica valnih svojstava svjetlosti. Prema Huygensovom principu pretpostavlja se kako svaka točka prostora u koju stigne npr. svjetlosni val postaje izvorom novog kuglastog vala sa središtem u promatranoj točki prostora. Pri tome, svaka točka vala napreduje tako da ostaje na istom pravcu koji prolazi kroz točkaste izvore svjetlosti, pa se prema tome svjetlost širi zrakasto (Planinić, 2005.).

Iz jednadžbi (3.12.) i (3.13.) za omjer sinusa upadnog i lomljenog kuta slijedi: ^{[5][14]}

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{\overline{CB}}{\overline{AD}} = \frac{v_1\Delta t}{v_2\Delta t} = \frac{v_1}{v_2} = \text{const.} \quad (3.14.)$$

Jednadžba (3.14.) samo ukratko opisuje ranije navedeni zakon loma svjetlosti. Ona uzima brzinu svjetlosti u pojedinom sredstvu kao jedan od značajnih parametara. Uvedemo li apsolutni indeks loma svjetlosti n , kao parametar optičkog sredstva, koji je jednak omjeru brzine svjetlosti u vakuumu i promatranom sredstvu, odnosno:

$$n = \frac{c}{v}, \quad (3.15.)$$

zakon loma svjetlosti zapisujemo u obliku:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}, \quad (3.16.)$$

gdje je n_1 indeks loma sredstva kojim prolazi upadna zraka, a n_2 indeks loma sredstva kojim prolazi lomljena zraka. Jednadžbu (3.16.) možemo zapisati i preko relativnog indeksa loma koji pokazuje odnos indeksa loma dviju sredina:

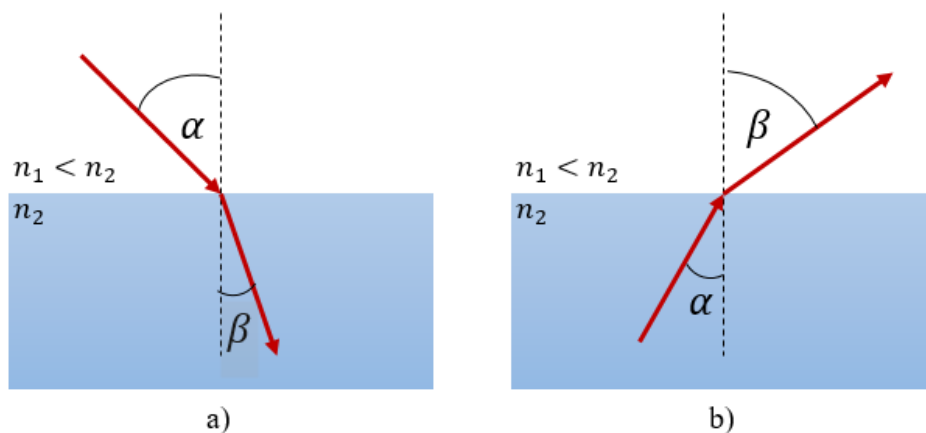
$$n_{2,1} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Međutim, jednostavnije je koristiti relaciju sa apsolutnim indeksima prelamanja. ^{[5][12][14]}

Navedeni zakon loma svjetlosti eksperimentalno je pokazao Snell za prelamanje zrake svjetlosti na granici zrak – voda, dok je Descartes dao prvu znanstvenu formulaciju toga zakona. Stoga se zakon loma svjetlosti još naziva i Snell – Descartesov zakon. ^[14]

U optički gušćem sredstvu upadna zraka se lomi prema okomici, i obratno u optički rjeđem sredstvu zraka se lomi od okomice. Pri tome, optički gušće sredstvo je sredstvo većeg indeksa loma. Primjerice, zraka svjetlosti će se na granici između zraka i vode lomiti prema okomici jer voda ima

veći indeks loma od zraka (sl. 3.19.a). Dakle, na granici između optički rjeđeg i gušćeg sredstva kut loma je uvijek manji od upadnog kuta. U obrnutom slučaju, zraka svjetlosti koja ide iz optički gušćeg sredstva u optički rjeđe sredstvo lomi se od okomice (sl. 3.19.b). U tome je slučaju kut loma uvijek veći od upadnog kuta. ^{[5][12][14]}



Slika 3.19. Prijelaz svjetlosti iz sredstva manjeg u sredstvo većeg indeksa loma (a) i obratno (b).

Vratimo li se na jednadžbu (3.15.) zaključujemo kako je indeks loma uvijek veći od jedan ($n > 1$) jer je brzina svjetlosti, c , najveća moguća brzina u prirodi. Za vakuum indeks loma iznosi 1, dok za zrak iznosi 1,000293, što je približno vrijednosti za vakuum pa se obično uzima da je indeks loma zraka $n = 1$. U tablici 3.1. navedene su vrijednosti indeksa loma za različita sredstva. ^[5]

Tablica 3.1. Vrijednosti indeksa loma (n) za različita sredstva.

Sredstvo	n
Zrak	1,000293
Voda	1,333
Etilni alkohol	1,361
Glicerin	1,455
Benzol	1,501
Kvarc	1,544
Staklo	1,46 – 1,96
Dijamant	2,417

Poseban slučaj zakona loma je kada zraka svjetlosti upada okomito na graničnu plohu. Uvrstimo li tada u jednadžbu (3.16.), koja se još može zapisao u obliku:

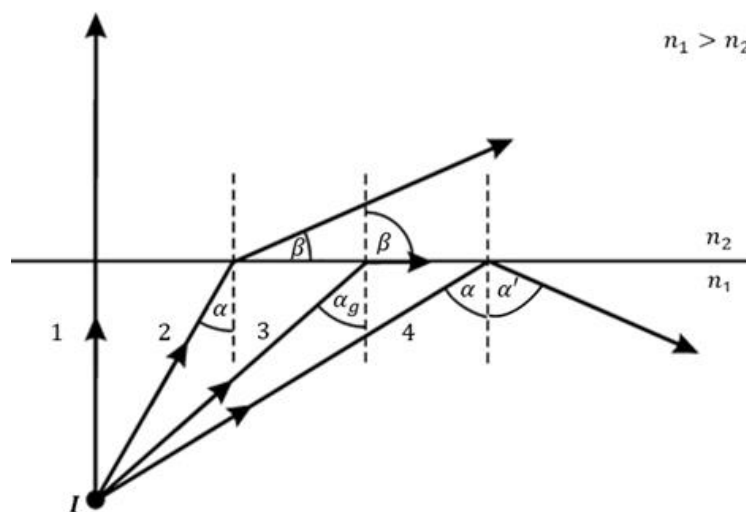
$$n_1 \sin \alpha = n_2 \sin \beta, \quad (3.17.)$$

za upadni kut $\alpha = 0^\circ$, slijedi da je desna strana jednaka nuli budući da je $\sin 0^\circ = 0$, što je ispunjeno kada je $\beta = 0^\circ$. Dakle, za okomitu upadnu zraku nema otklona od upadnog smjera. ^[5]

3.4.2. Totalna refleksija

Zakon loma svjetlosti vrijedi za zrake dolazile li one iz optički rjeđeg u optičko gušće sredstvo ili obratno iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo. U drugom slučaju, kada zraka svjetlosti nailazi iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo, dakle $n_1 > n_2$, zraka će se lomiti od okomice na graničnu plohu. Pri tome je lomljeni kut uvijek veći od upadnog kuta. ^{[5][14]}

Promotrimo sada četiri zrake (sl. 3.20.) koje sa izvora svjetlosti I dolaze iz optički gušćeg sredstva na granicu sa optički rjeđim sredstvom pod različitim upadnim kutovima. Kada zraka svjetlosti dolazi okomito na graničnu plohu (zraka 1), dakle pod upadnim kutom $\alpha = 0^\circ$, zraka prolazi



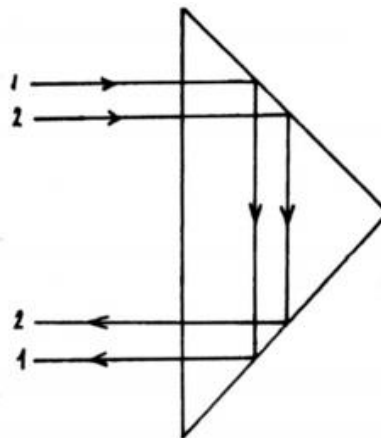
Slika 3.20. Granični kut i totalna refleksija.

drugim sredstvom bez promjene smjera. U drugom slučaju, kada zraka svjetlosti dolazi na graničnu plohu pod nekim kutom α (zraka 2), lomiti će se pod kutom β tako da za lomljeni kut vrijedi $\beta > \alpha$. Dakle, povećavanjem upadnog kuta povećava se i kut loma, ali tako da kut loma uvijek bude veći od upadnog. Pritom, povećavanjem upadnog kuta α kut loma može poprimiti vrijednost $\beta = 90^\circ$ pri čemu se zraka lomi tangencijalno (zraka 3). Upadni kut za koji će kut loma dosegnuti vrijednost 90° nazivamo granični kut i označavamo ga sa α_g . Uvrštavanjem u izraz za zakon loma (3.16.) za upadni kut $\alpha = \alpha_g$ i kut loma $\beta = 90^\circ$, pri čemu je $n_1 > n_2$, za sinus graničnog kuta dobije se:

$$\sin \alpha_g = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.18.)$$

Dakle, sinus graničnog kuta odgovara omjeru vrijednosti manjeg i većeg indeksa loma. ^{[5][12][14]}

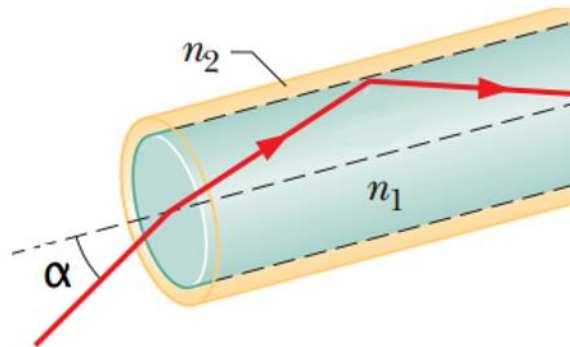
Sada se nameće pitanje što se događa sa zrakom koja na graničnu plohu upada pod kutom većim od graničnog kuta. U tom slučaju, upadna zraka svjetlosti (zraka 4) se ne lomi, već se reflektira od graničnu plohu u prvo sredstvo. Ovu pojavu nazivamo totalna refleksija. Pri tome, kao i kod obične refleksije, kut refleksije je jednak upadnom kutu, a granična ploha na upadnu zraku djeluje poput zrcala. Do totalne refleksije može doći samo pri prijelazu zrake svjetlosti iz optički gušćeg u optički rjeđe sredstvo, ali ne i obratno. ^{[5][12]}



Slika 3.21. Primjena totalne refleksije kod pravokutne prizme.

Totalna refleksija primjenu nalazi u različitim optičkim uređajima za skretanje svjetlosti u željenom pravcu. Takva refleksija je učinkovitija od refleksije na običnom zrcalu. Naime, pri refleksiji

na običnom zrcalu postoje gubici jer jedan dio upadne svjetlosti apsorbira površina zrcala. Stoga postoje posebna zrcala za totalnu refleksiju. Obično se u optičkim uređajima koristi pravokutna staklena prizma (sl.3.21) za promjenu smjera svjetlosnih zraka. Optičke niti ili svjetlovodi (sl. 3.22) također rade na principu totalne refleksije. To su duge, tanke, staklene ili plastične niti velikog indeksa loma obično obložene tankim omotačem nekog prozirnog materijala koji ima manji indeks loma nego

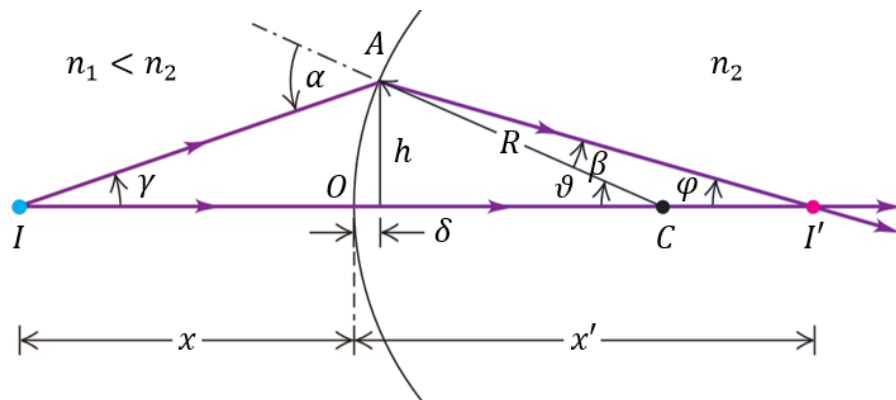


Slika 3.22. Totalna refleksija kod optičkih niti ili svjetlovoda.

sama nit. Na taj način dolazi do totalne refleksije na granici između niti i omotača pa svjetlosni snop koji uđe na jednom kraju giba se uzduž niti višestruko se reflektirajući na unutarnjoj strani površine niti, pa čak i onda kada je nit savijena. ^[12]

3.4.3. Zakon loma na sfernoj površini

Zakon loma svjetlosti vrijedi i za sferne površine. Kada zrake svjetlosti iz izvora I naiđu na sfernu površinu koja dijeli neka dva optička sredstva indeksa loma n_1 i n_2 , one se prelamaju prema već poznatom zakonu loma. Zraka svjetlosti koja iz izvora I naiđe u točku A pod kutom α prema okomici na sfernu površinu (sl.3.23.), lomi se pod uglom β i pri tome vrijedi relacija (3.17.). Zraka koja dolazi okomito na sfernu površinu, dakle pod kutom $\alpha = 0^\circ$ prema okomici, ne lomi se, već prolazi bez promjene smjera tako da prolazi središtem zakrivljenosti sferne površine. Dakle, u ovom slučaju, kao i kod refleksije svjetlosti na sfernoj površini, kako upadna zraka ne pogađa znatan dio sferne površine, može se uzeti da je taj dio površine zapravo ravna površina. ^{[14][15]}



Slika 3.23. Lom svjetlosti na sfernoj površini između dva optička sredstva različitih indeksa loma.

Točka I' u kojoj se sijeku lomljene zrake predstavlja sliku točkastog izvora svjetlosti I . Dakle, sliku predmeta možemo dobiti bilo lomom ili refleksijom zraka svjetlosti na ravnim ili sfernim površinama. Zakon loma svjetlosti na sfernim površinama primjenu nalazi kod leća koje obično imaju dvije ili barem jednu sfernu površinu, a također objašnjava konstrukciju slike u optičkim sustavima kao što su oko, teleskopi refraktori te drugi optički uređaji koji kao optički element sadrže jednu ili više leća. ^[15]

Prije nego krenemo na analizu leća, u ovom poglavlju ćemo naći vezu između položaja predmeta i slike u odnosu na sfernu površinu koja dijeli dvije optičke sredine različitih indeksa loma. Pri tome ćemo se poslužiti gornjom slikom koja je nacrtana za slučaj kada zraka svjetlosti ide iz sredstva manjeg indeksa loma, dakle $n_1 < n_2$. Primjenjujući na trokute $\triangle IAC$ i $\triangle I'AC$ teorem prema kojemu je vanjski kut trokuta jednak zbroju nasuprotnih kutova u trokutu, slijedi:

$$\alpha = \gamma + \vartheta, \quad \vartheta = \beta + \varphi. \quad (3.19.)$$

Za tangense kutova γ , ϑ i φ dobije se sljedeće:

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{h}{x + \delta}, \quad \operatorname{tg} \vartheta = \frac{h}{R - \delta}, \quad \operatorname{tg} \varphi = \frac{h}{x' - \delta}. \quad (3.20.)$$

Kako su za paraksijalne zrake upadni i lomljeni kut vrlo mali ($\alpha, \beta \ll 1$ rad), možemo aproksimirati tangense kutova γ , ϑ i φ tako da je $\operatorname{tg} \gamma \cong \gamma$, $\operatorname{tg} \vartheta \cong \vartheta$ i $\operatorname{tg} \varphi \cong \varphi$. Također, zanemarujući malu udaljenost δ , za kutove γ , ϑ i φ u konačnici dobijemo:

$$\gamma = \frac{h}{\delta}, \quad \vartheta = \frac{h}{R}, \quad \varphi = \frac{h}{x'}. \quad (3.21.)$$

Isto možemo napraviti i za sinuse kutova α i β u relaciji (3.16.) za zakon loma svjetlosti pa prema tome zakon loma svjetlosti možemo zapisati u obliku:

$$\frac{\alpha}{\beta} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (3.22.)$$

Izrazimo li kut α iz gornje jednadžbe te uvrstimo li tada za kutove α i β jednadžbe (3.19.), dobivamo sljedeću jednadžbu:

$$(\gamma + \vartheta) = \frac{n_2}{n_1} (\vartheta - \varphi). \quad (3.23.)$$

Uvrštavanjem (3.21.) u (3.23.) te sređivanjem dobivamo jednadžbu:

$$\frac{n_1}{x} + \frac{n_2}{x'} = \frac{n_2 - n_1}{R}. \quad (3.24.)$$

Ova jednadžba je jedna od najvažnijih jednadžbi geometrijske optike sa primjenom kod optičkih uređaja. Primjenjuje se jednako za konveksne i konkavne refrakcijske površine. Pritom, treba se držati dogovorenih pravila o predznacima. ^{[14][15]}

Ovdje ćemo se još jednom sažeto prisjetiti dogovorenih pravila o predznacima za udaljenost predmeta i slike te polumjer zakrivljenosti sferne površine. Uvijek kada se predmet nalazi na istoj strani reflektivne/prijelomne površine kao i upadna zraka, za udaljenost predmeta od površine uzima se pozitivna vrijednost ($x > 0$), u suprotnom negativna ($x < 0$). U slučaju kada se slika predmeta nalazi na istoj strani reflektivne/prijelomne površine kao i reflektirana/lomljena zraka, udaljenost slike od površine ima pozitivnu vrijednost ($x' > 0$), u suprotnom negativnu vrijednost ($x' < 0$). Ova pravila o predznacima vrijede jednako kod ravnih i sfernih reflektivnih/prijelomnih površina. Za polumjer zakrivljenosti R vrijedi pravilo da kada je centar zakrivljenosti C na istoj strani reflektivne površine kao i upadna zraka tada polumjer zakrivljenosti ima pozitivnu vrijednost. Prema tome, polumjer zakrivljenosti je:

- $R > 0$ za konkavne reflektivne površine,
- $R < 0$ za konveksne reflektivne površine.

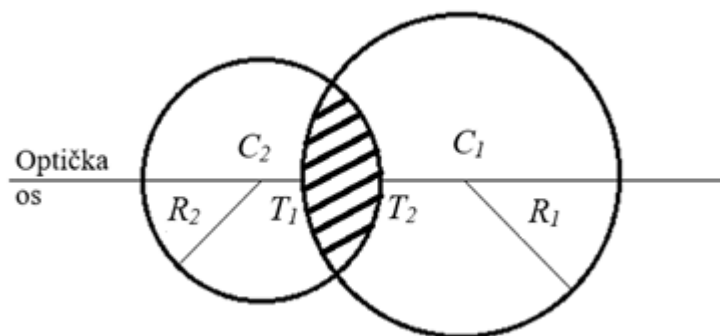
Kod prijelomnih površina vrijedi slično pravilo, a prema kojem polumjer zakrivljenosti ima pozitivnu vrijednost onda kada je centar zakrivljenosti C s iste strane prijelomne površine kao i lomljena zraka.

Prema tome, polumjer zakrivljenosti je:

- $R < 0$ za konkavne prijelomne površine.
- $R > 0$ za konveksne prijelomne površine. ^{[5][15]}

3.4.4. Optičke leće

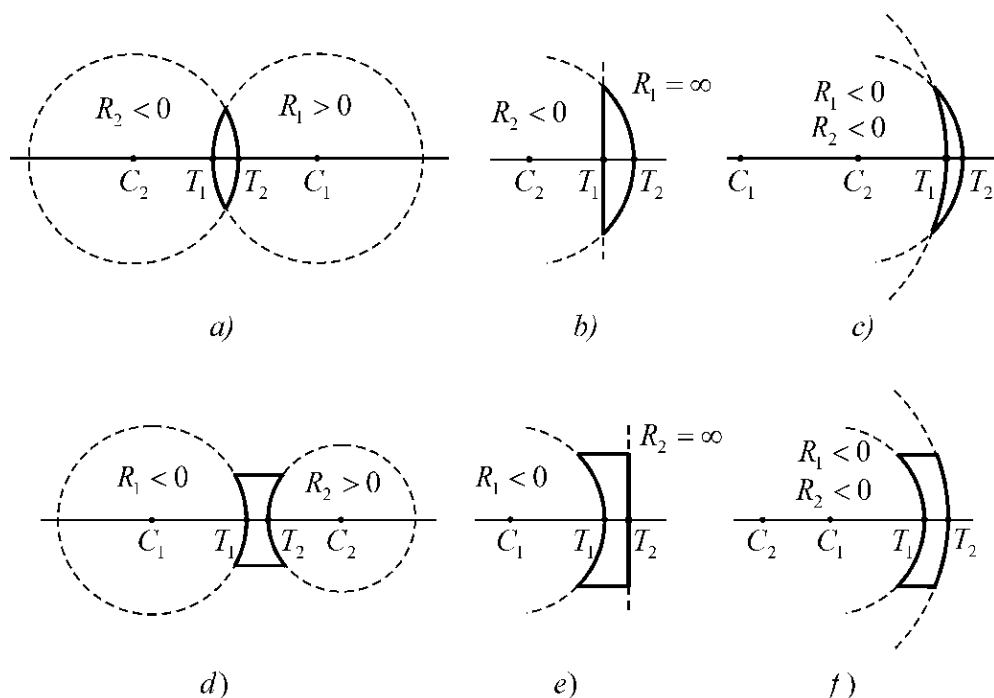
Optičko sredstvo omeđeno s dvije ili više centriranih sfernih prijelomnih površina naziva se optička leća. Dvije ili barem jedna sferna i jedna ravna površina sačinjavaju jednostavnu leću, dok više sfernih površina sačinjava složenu leću. Površine leća su uglavnom sferne i pri tome mogu biti različitih polumjera (sl. 3.24.). Os koja prolazi centrom zakrivljenosti obje površine, kao i njihovim tjemenima T_1 i T_2 , naziva se optička os leće. ^{[5][14]}



Slika 3.24. Leća.

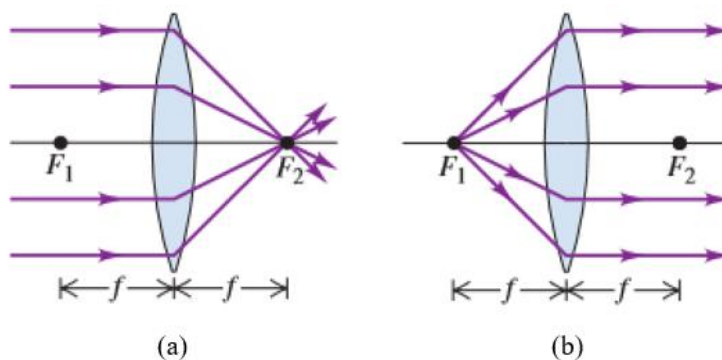
Kada je međusobna udaljenost sfernih površina zanemariva s obzirom na njihove polumjere zakrivljenosti, kao i položaj predmeta i slike u odnosu na debljinu leće, tada govorimo o tankoj leći. Kod tanke leće pretpostavlja se da tjemeni sfernih ploha, T_1 i T_2 , padaju u jednu zajedničku točku koja se naziva optički centar leće, O . Tada se sve udaljenosti od leće uzimaju od centra leće O , a ne od tjemeni sfernih ploha. ^{[5][14]}

S obzirom na oblik površina leća, razlikujemo leće tankog i debelog ruba (sl. 3.25.). Pritom, leće tankog ruba mogu biti bikonveksne, plankonveksne i konkavkonveksne ili meniskus, a leće debelog ruba mogu biti bikonkavne, plankonkavne i konkavkonveksne. Leće tankog ruba još nazivamo sabirne ili konvergentne leće, a debelog ruba rasipne ili divergentne. [5][14][15]



Slika 3.25. Leće tankog ruba: a) bikonveksna, b) plankonveksna i c) konkavkonveksna (ili meniskus). Leće debelog ruba: d) bikonkavna, e) plankonkavna i c) konkavkonveksna.

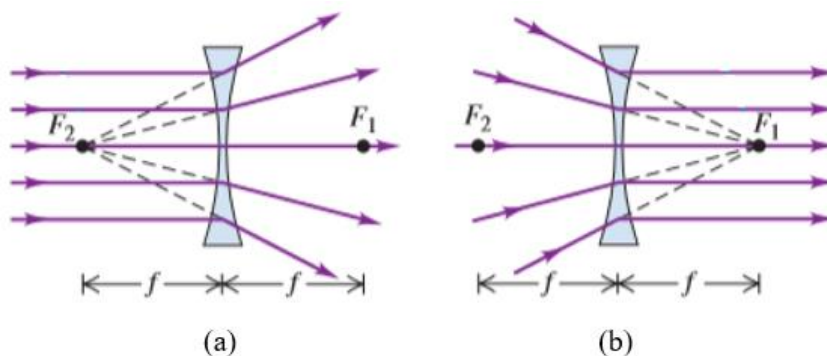
Kada na konvergentnu leću upada snop zraka svjetlosti paralelna s optičkom osi leće, kao na slici 3.26.a, zrake svjetlosti nakon loma kroz leću sijeku optičku os u točki F_2 i u njoj daju realnu sliku



Slika 3.26. Žarište predmeta F_1 i žarište slike F_2 tanke konvergentne (sabirne) leće.

predmeta. Slično tome, kada zrake svjetlosti dolaze iz točke F_1 kao na slici 3.26.b, nakon loma kroz leću zrake svjetlosti prolaze paralelno s optičkom osi leće. Točke F_1 i F_2 nazivaju se žarište predmeta i žarište slike, a udaljenost f mjerena od centra leće naziva se žarišna duljina. Kod tankih leća obje žarišne duljine uvijek su jednake, čak i onda kada su polumjeri zakrivljenosti sfernih površina različiti. Sada bi valjalo uočiti sličnost između oba žarišta konvergentne leće i jednog jedinog žarišta konkavnog zrcala (sl.3.15.). Kao i kod konkavnog zrcala, za žarišnu duljinu konvergentne leće dogovoreno se uzima pozitivna vrijednost ($f > 0$). Stoga se konvergentne leće još nazivaju pozitivne leće. ^[15]

Kod divergentnih leća, u odnosu na konvergentne leće, žarišta predmeta i slike su obrnuta, a za žarišnu duljinu dogovorom se uzima negativna vrijednost. Stoga se divergentne leće još nazivaju i negativne leće. Na slici 3.27.a. upadni snop zraka svjetlosti paralelan s optičkom osi rasipa se nakon loma kroz leću, dok zrake svjetlosti koje na leću dolaze u smjeru prema žarištu predmeta kao na slici 3.27.b, nakon loma prolaze paralelno s optičkom osi. ^[15]

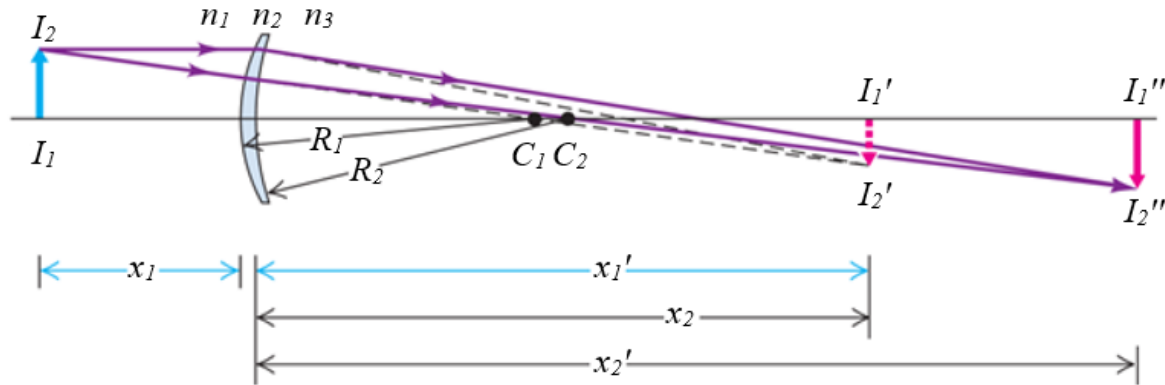


Slika 3.27. Žarište slike F_2 i žarište predmeta F_1 tanke divergentne (rasipne) leće.

3.4.4.1. Jednadžba konjugacije leće

Promotrimo česti slučaj u kojem dvije sferne površine razdvajaju tri optička sredstva različitih indeksa loma n_1 , n_2 i n_3 kao na slici 3.28. Udaljenosti predmeta i slike od prve površine označeni su sa x_1 i x_1' , a od druge površine sa x_2 i x_2' . Pretpostavimo da je udaljenost između dviju sfernih površina zanemarivo mala s obzirom na udaljenosti predmeta i slike tako da zapravo razmatramo tanku leću.

Dalje, neka su x_2 i x_1' jednakog iznosa, ali suprotnog predznaka. Ako nakon loma zrake kroz prvu površinu slika nastaje u smjeru lomljene zrake tada x_1' ima pozitivnu vrijednost. Nastala slika tada služi kao predmet za drugu površinu i budući da se nalazi na istoj strani od površine kao i lomljena zraka, za x_2 se uzima negativna vrijednost. Odnosno, vrijedi da je $x_2 = -x_1'$.^[15]



Slika 3.28. Izvod jednađbe konjugacije za tanku leću.

Prolaskom kroz leću upadni snop zraka svjetlosti lomi se dva puta. Stoga jednađbu (3.24.) trebamo primijeniti dva puta, po jednom za svaku površinu. Pritom, dobit ćemo sljedeće dvije jednađbe:

$$\frac{n_1}{x_1} + \frac{n_2}{x_1'} = \frac{n_2 - n_1}{R_1}, \quad (3.25.)$$

$$\frac{n_2}{x_2} + \frac{n_3}{x_2'} = \frac{n_3 - n_2}{R_2}. \quad (3.26.)$$

Kako su prvo i treće sredstvo zrak ili vakuum stoga možemo pisati $n_1 = n_3 = 1$. Indeks loma leće označen je sa n_2 , ali radi jednostavnosti pisanja možemo pisati samo n . Uvrštavanjem ovih izmjena u jednađbe (3.25.) i (3.26.), kao i relacije $x_2 = -x_1'$, dobivamo:

$$\frac{1}{x_1} + \frac{n}{x_1'} = \frac{n - 1}{R_1},$$

$$\frac{n}{-x_1'} + \frac{1}{x_2'} = \frac{1 - n}{R_2}.$$

Zbrajanjem gornjih jednažbi, nakon sređivanja dobivamo jednažbu:

$$\frac{1}{x_1} + \frac{1}{x_2'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right).$$

Gledamo li leću kao jednu cjelinu tada udaljenost predmeta od leće jednostavno označavamo sa x , a udaljenost slike sa x' . Stoga gornju jednažbu u konačnici zapisujemo na sljedeći način:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (3.27.)$$

Za neki predmet u beskonačnosti, $x = \infty$, slika predmeta će nastati u žarištu leće, dakle $x' = f$, pa iz gornje jednažbe slijedi:

$$\frac{1}{f} = (n - 1) \left(\frac{1}{R_1} - \frac{1}{R_2} \right). \quad (3.28.)$$

Jednažba (3.28.) naziva se optičarska jednažba i vrijedi općenito za leće. Pomoću ove jednažbe može se odrediti žarišna duljina ako se pozna indeks loma leće n te polumjeri zakrivljenosti sfernih ploha leće, R_1 i R_2 . ^{[5][14][15]}

Usporedimo li jednažbe (3.27.) i (3.28.) vidimo da jednažbu konjugacije tanke leće možemo zapisati u obliku koji se naziva Gaussov oblik jednažbe leće:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{1}{f}. \quad (3.29.)$$

Ovo je jedna od osnovnih jednažbi za tanku leću. Ako je usporedimo s jednažbom konjugacije (3.8.) sfernog zrcala vidimo da su one u potpunosti jednake. Ovu jednažbu jednako primjenjujemo za konvergentne i divergentne leće, poštujući pri tome pravila o predznacima. ^{[5][15]}

Kod leća vrijede ista pravila o predznacima koja smo koristili kod sfernog zrcala. Za polumjer zakrivljenosti sferne površine leće vrijedi pravilo da je $R > 0$ kada je centar zakrivljenosti C na istoj strani od sferne površine kao i lomljena zraka. Prema tome, za konveksne prijelomne površine

polumjer zakrivljenosti ima pozitivnu vrijednost ($R > 0$), a za konkavne negativnu vrijednost ($R < 0$). Nadalje, ako se predmet nalazi na istoj strani od leće kao i upadna zraka, tada udaljenost predmeta od leće ima pozitivnu vrijednost ($x > 0$), inače ima negativnu vrijednost ($x < 0$). Kada je slika predmeta na istoj strani od leće kao i lomljena zraka, tada se za udaljenost slike uzima pozitivna vrijednost ($x' > 0$), inače se uzima negativna vrijednost ($x' < 0$). Ranije smo vidjeli da se kod konvergentnih leća za žarišnu duljinu uzima pozitivna vrijednost ($f > 0$), a kod divergentnih negativna vrijednost ($f < 0$). To vrijedi samo pod uvjetom da leća ima veći indeks loma od okolne sredine i može se lako pokazati pomoću optičarske jednadžbe. ^[15]

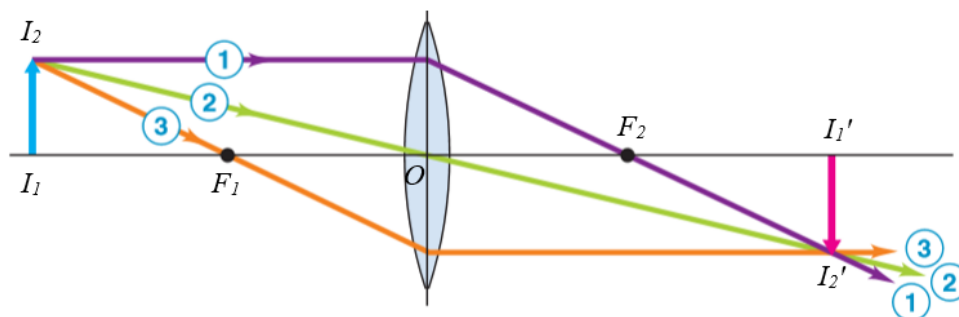
3.4.4.2. Konstrukcija slike kod tanke leće

Slično kao i kod sfernog zrcala, položaj i veličinu slike kod tanke leće možemo odrediti grafičkom metodom konstruiranjem karakterističnih zraka. Sjecište karakterističnih zraka, nakon njihova prolaska kroz leću, određuje položaj i veličinu slike predmeta. U skladu sa pretpostavkom o tankoj leći da je udaljenost između njezinih sfernih površina zanemariva, pri konstrukciji slike grafičkom metodom leću možemo aproksimirati ravnom prijelomnom površinom. Pritom, sve udaljenosti od leće uzimamo s obzirom na centar leće. ^[15]

Slika 3.29. prikazuje tri karakteristične zrake pomoću kojih možemo konstruirati sliku kod konvergentne leće. Iz vrha predmeta, tj. iz točke I_2 :

1. Zraka koja dolazi paralelno s glavnom osi, nakon loma prolazi kroz žarište slike F_2 ,
2. Zraka koja prolazi kroz centar leće O prolazi bez promjene smjera, odnosno ne lomi se,
3. Zraka koja prolazi kroz žarište predmeta F_1 , nakon loma prolazi paralelno s glavnom osi.

Kod konvergentne leće sjecište ove tri karakteristične zrake određuje položaj i veličinu slike predmeta. Isto kao i kod sfernog zrcala, za određivanje položaja i veličine slike dovoljno je povući samo dvije od tri karakteristične zrake. ^[15]

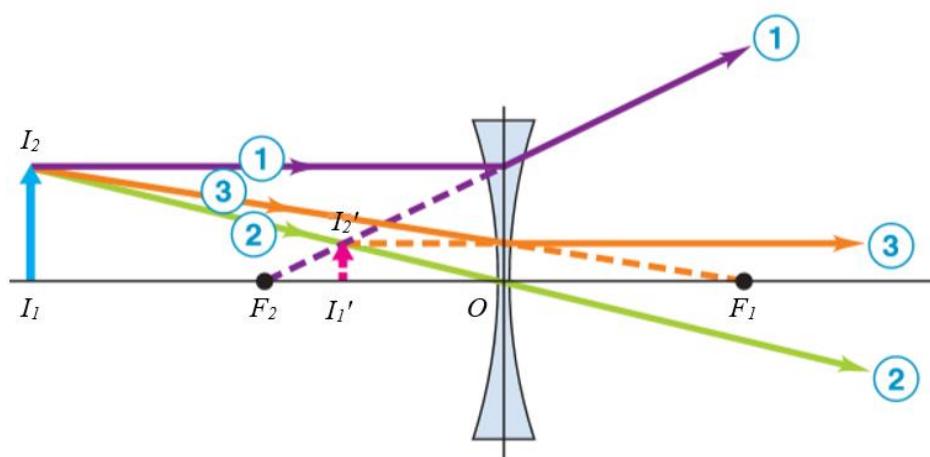


Slika 3.29. Grafička metoda konstruiranja slike kod konvergentne leće.

Na sličan način se određuju položaj i veličina slika kod divergentnih leća. Slika 3.30. prikazuje karakteristične zrake pomoću kojih se konstruira slika kod divergentnih leća. Iz vrha predmeta, tj. iz točke I_2 :

1. Zraka koja dolazi paralelno s glavnom osi lomi se tako kao da dolazi iz žarišta predmeta F_2 ,
2. Zraka koja prolazi kroz centar leće O prolazi bez promjene smjera, odnosno ne lomi se,
3. Zraka koja prolazi kroz žarište predmeta F_1 , nakon loma prolazi paralelno s glavnom osi.

Za razliku od konvergentnih leća gdje se slika nalazi u sjecištu karakterističnih zraka nakon njihova prolaska kroz leću, kod divergentnih leća slika predmeta nastaje u sjecištu geometrijskih produžetaka lomljenih zraka. ^[15]

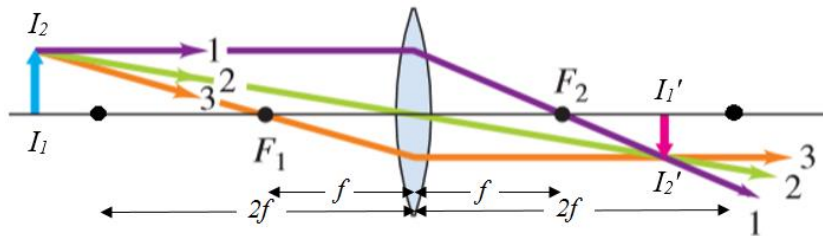


Slika 3.30. Grafička metoda konstruiranja slike kod divergentne leće.

Kao i kod sfernog zrcala tako i kod leće slika predmeta može biti uspravna, obrnuta, realna, virtualna, uvećana ili umanjena. Kakvu ćemo sliku predmeta dobiti ovisi o vrsti leće kao i o udaljenosti

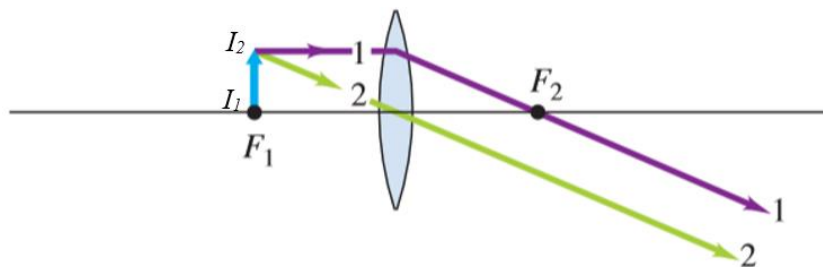
predmeta od leće. Kod divergentnih leća slika predmeta je uvijek virtualna, uspravna i umanjena. Kod konvergentnih leća situacija je malo drugačija te ćemo za konvergentne leće razmotriti konstrukciju slike za nekoliko različitih udaljenosti predmeta od leće:

1. Kada se predmet nalazi na udaljenosti $x > 2f$ slika predmeta je realna, obrnuta, umanjena i nalazi se na udaljenosti $f < x' < 2f$ s druge strane leće (sl. 3.31.).



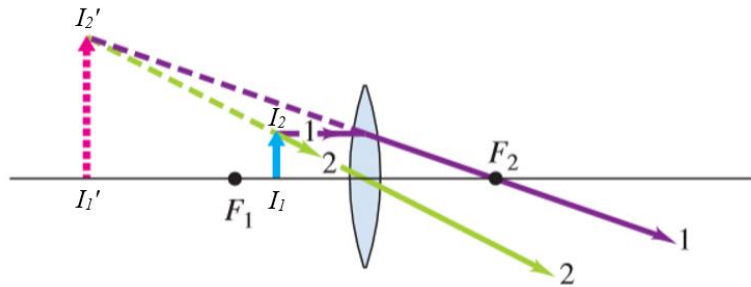
Slika 3.31. Slika predmeta kod konvergentne leće kada se predmet nalazi na udaljenosti većoj od dvostruke žarišne duljine.

2. Kada se predmet nalazi na udaljenosti $x = 2f$, slika predmeta je realna, obrnuta i jednake veličine kao i predmet te se nalazi na udaljenosti $x' = 2f$.
3. Kada se predmet nalazi na udaljenosti $2f < x < f$, slika predmeta je realna, obrnuta, uvećana i nalazi se na udaljenosti $x' > 2f$.
4. Kada se predmet nalazi na udaljenosti $x = f$, slika predmeta se nalazi u beskonačnosti, a povećanje slike je teorijski beskonačno (sl. 3.32.).



Slika 3.32. Slika predmeta kod konvergentne leće kada se predmet nalazi u žarištu F_1 .

5. Kada se predmet nalazi na udaljenosti $x < f$, slika predmeta je virtualna, uspravna i uvećana (sl. 3.33.). ^{[14][15]}

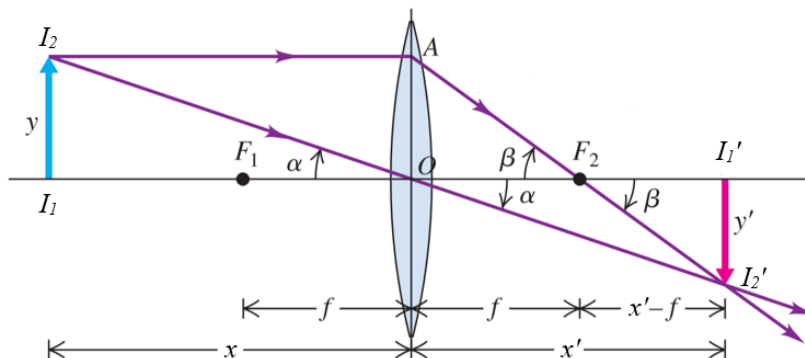


Slika 3.33. Slika predmeta kod konvergentne leće kada se predmet nalazi na udaljenosti manjoj od žarišne duljine.

3.4.4.3. Linearno povećanje slike

Pomoću slike 3.32. izvest ćemo izraz za linearno povećanje slike kod tanke leće. Neka su transverzalne veličine predmeta i slike redom označene sa y i y' , pri čemu je $y = I_1I_2$, a $y' = I_1'I_2'$. Transverzalno povećanje slike kod leće dano je omjerom veličine predmeta i slike, isto kao kod ravnog i sfernog zrcala:

$$\gamma = \frac{y'}{y}.$$



Slika 3.32. Linearno povećanje slike.

Promotrimo li dva pravokutna trokuta ΔI_1I_2O i $\Delta I_1'I_2'O$ vidimo da su slična jer imaju jednak kut α s vrhom u točki O . Iz njihove sličnosti slijedi da su omjeri odgovarajućih stranica ta dva trokuta jednaki, pri čemu se dobije:

$$\frac{y}{x} = -\frac{y'}{x'}.$$

Kako se slika predmeta nalazi ispod optičke osi leće, odnosno budući da je slika obrnuta, y' je negativan i stoga u gornjoj jednažbi stoji negativan predznak. Nakon sređivanja gornje jednažbe dobivamo:

$$\frac{y'}{y} = -\frac{x'}{x}. \quad (3.29.)$$

Usporedimo li jednažbu (3.29.) s jednažbom transversalnog povećanja slike (3.3.) vidimo da je desna strana jednažbe (3.29.) jednaka transversalnom povećanju γ te slijedi:

$$\gamma = -\frac{x'}{x}. \quad (3.30.)$$

Vidimo da smo za linearno povećanje slike kod tanke leće dobili isti izraz kao i kod sfernog zrcala, jednažba (3.11.). Negativan predznak u gornjoj jednažbi nam kaže da kada su x i x' pozitivni slika je obrnuta, dakle y i y' su suprotnog predznaka. ^[15]

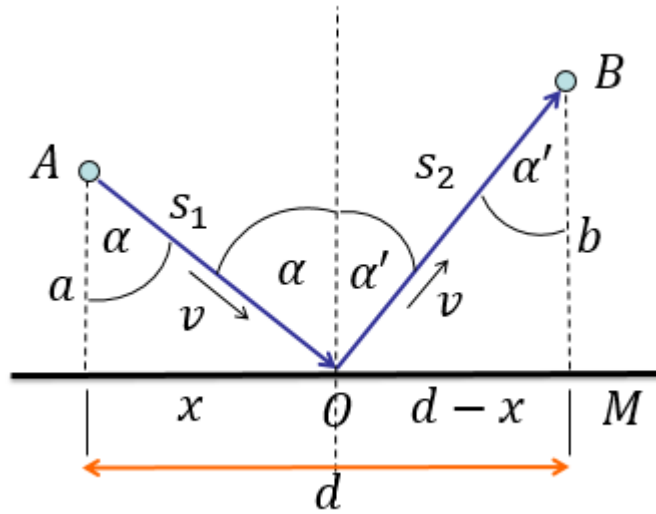
3.5. Fermatov princip najmanjeg vremena

Princip prema kojemu se svjetlost između dviju zadanih točaka širi onom stazom za koju joj treba najmanje vremena naziva se Fermatov princip ili princip najmanjeg vremena. Na osnovu ovog principa mogu se izvesti zakoni refleksije i loma svjetlosti, odnosno treći i četvrti zakon geometrijske optike. ^[11]

Ukoliko je optičko sredstvo kroz koje se svjetlost širi homogeno, tada je put najmanjeg vremena put najmanje udaljenosti. Stoga su u takvoj sredini zrake svjetlosti pravci. Prilikom prolaska svjetlosti kroz nekoliko uzastopnih optičkih sredstava, put u svakom optičkom sredstvu mora biti pravac inače vrijeme neće biti najmanje moguće. ^[11]

3.5.1. Fermatov princip i zakon refleksije svjetlosti

Kako bismo izveli zakon refleksije na osnovu Fermatovog principa najmanjeg vremena, pretpostavimo da se svjetlosna zraka, koja dolazi iz točke A , reflektirala u točki O na ravnini M i nakon refleksije prolazi točkom B (sl. 3.33.). Pretpostavimo da točka O može da leži bilo gdje na ravnini M . Iz točaka A i B povucimo okomice na ravninu M i povucimo okomicu kroz točki O . Nadalje, neka su α i α' upadni kut i kut refleksije, a v neka je brzina gibanja svjetlosne zrake.



Slika 3.33. Izvod zakona refleksije na temelju Fermatovog principa najmanjeg vremena.

Budući da je duljina puta, kojeg zraka svjetlosti mora preći od točke A kroz točku O do točke B , $s_1 + s_2$, najmanje moguće vrijeme duž tog puta dano je izrazom:

$$t = \frac{s_1 + s_2}{v}. \quad (3.31.)$$

Iz slike 3.33. lako se uočava da je:

$$s_1 = \sqrt{a^2 + x^2}, \quad s_2 = \sqrt{b^2 + (d - x)^2}.$$

Uvrštavanjem gornjih jednadžbi u (3.31.) slijedi:

$$t = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v} + \frac{\sqrt{b^2 + (d - x)^2}}{v}. \quad (3.32.)$$

Ako točku O pomjerimo za mali iznos lijevo ili desno promijenit će se i vrijednosti x i $(d - x)$ pa odgovarajuća promjena u vremenu iznosi:

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{d - x}{\sqrt{b^2 + (d - x)^2}}. \quad (3.33.)$$

Budući da tražimo najmanje moguće vrijeme, lijeva strana u jednadžbi (3.33.) mora biti jednaka nuli. Slijedi:

$$0 = \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{d - x}{\sqrt{b^2 + (d - x)^2}}. \quad (3.34.)$$

U jednadžbi (3.34.) prvi član odgovara sinusu upadnog kuta α , a drugi član odgovara sinusu reflektiranog kuta α' , što se lako uočava iz slike 3.33. Uvrstimo li to u jednadžbu (3.34.) dobit ćemo zakon refleksije (3.1.): ^{[5][11]}

$$0 = \sin\alpha - \sin\alpha',$$

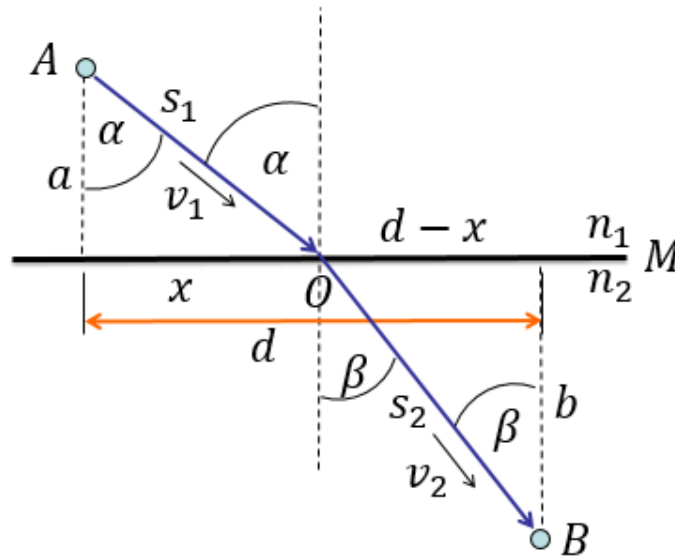
$$\sin\alpha' = \sin\alpha,$$

$$\alpha' = \alpha.$$

3.5.2. Fermatov princip i zakon loma svjetlosti

Na sličan način na koji smo izveli zakon refleksije iz Fermatovog principa možemo izvesti i zakon loma. Na slici 3.34. ravnina M predstavlja graničnu plohu između dva optička sredstva kojima odgovaraju indeksi loma n_1 i n_2 . Budući da se pri prijelazu zrake svjetlosti iz jednog optičkog sredstva

u drugu mijenja brzina gibanja svjetlosti, označimo s v_1 brzinu svjetlosne zrake koja prolazi kroz optičko sredstvo indeksa loma n_1 . Pritom, s v_2 ćemo označiti brzinu iste svjetlosne zrake, ali nakon loma, odnosno kada prolazi kroz optičko sredstvo indeksa loma n_2 .



Slika 3.34. Izvod zakona loma na temelju Fermatovog principa najmanjeg vremena.

Na slici 3.34. upadni kut označen je s α , a kut loma s β , dok je s AOB označen put svjetlosne zrake od točke A do točke B . Najkraće moguće vrijeme između točaka A i B iznosi:

$$t = \frac{s_1}{v_1} + \frac{s_2}{v_2} = \frac{\sqrt{a^2 + x^2}}{v_1} + \frac{\sqrt{b^2 + (d-x)^2}}{v_2}. \quad (3.35.)$$

Ako se točka O malo pomjeri,

$$\frac{dt}{dx} = \frac{x}{v_1 \sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{d-x}{v_2 \sqrt{b^2 + (d-x)^2}}. \quad (3.36.)$$

Budući da tražimo najmanje moguće vrijeme, lijeva strana jednadžbe (3.36.) mora biti jednaka nuli. Slijedi:

$$0 = \frac{x}{v_1 \sqrt{a^2 + x^2}} - \frac{d - x}{v_2 \sqrt{b^2 + (d - x)^2}} \quad (3.37.)$$

Pogledamo li sliku 3.34. lako se vidi kako je:

$$\sin \alpha = \frac{x}{\sqrt{a^2 + x^2}}, \quad \sin \beta = \frac{d - x}{\sqrt{b^2 + (d - x)^2}} \quad (3.38.)$$

Uvrstimo li (3.38.) u (3.37.) dobit ćemo zakon loma svjetlosti (3.16.): ^{[5][11]}

$$0 = \frac{\sin \alpha}{v_1} - \frac{\sin \beta}{v_2},$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2},$$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{n_2}{n_1}.$$

B. Optički teleskopi

Prije izuma teleskopa sva opažanja svemira vršila su se golim okom bez pomoći optičkih instrumenata. U XVII. stoljeću došlo je do razvoja prvih teleskopa koji su bili namijenjeni opažanju vidljivog dijela elektromagnetskog zračenja koji odgovara valnim duljinama od 400 do 700 nm. Takve teleskope koji su namijenjeni promatranju udaljenih objekata pomoću vidljive svjetlosti nazivamo optički teleskopi. ^{[3][8]}

Danas postoje teleskopi koji su namijenjeni izučavanju svakog pojedinog područja elektromagnetskog zračenja budući da svako pojedino područje zahtjeva posebna tehnička rješenja. Međutim, svim uređajima za detekciju i analizu pojedinih područja elektromagnetskog zračenja

zajedničko je da imaju prijamnu površinu. Kod optičkih teleskopa prijamna površina je objektiv pomoću kojeg se dobiva slika udaljenog predmeta, a koja se promatra okom uz pomoć okulara. Pritom, kao objektiv može poslužiti leća ili zrcalo. Stoga se teleskopi, s obzirom na uporabu leća i zrcala za objektivne, dijele na:

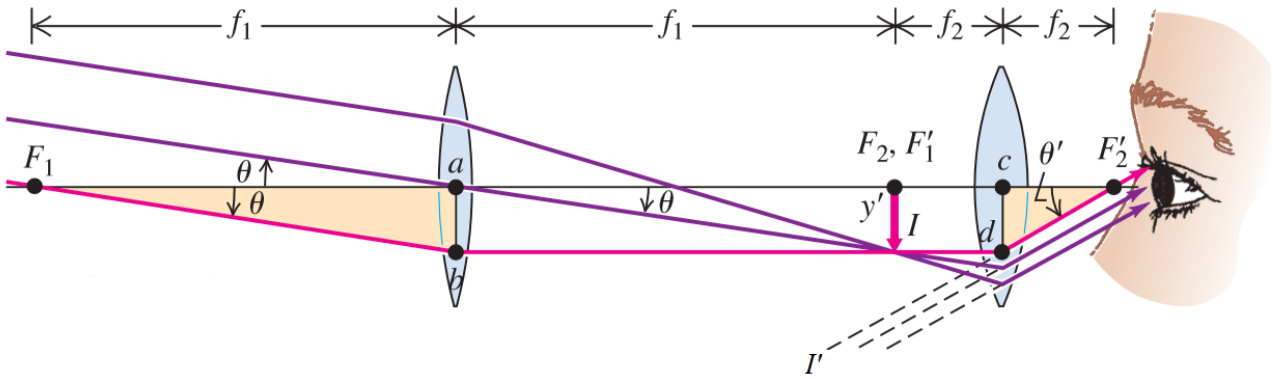
- Refraktore,
- Reflektore,
- Katadioptrike. ^[8]

3.6. Refraktori

Teleskop koji za objektiv ima leću naziva se refraktor. Od refraktora danas se koriste Galilejev ili nizozemski ili terestrički (1609.) i Keplerov ili astronomski (1611.) teleskop. Kod Galilejevog teleskopa objektiv je negativna leća, a kod Keplerovog pozitivna. Rezultat toga je da se vrh izlazne pupile kod Galilejevog teleskopa nalazi unutar teleskopa pa stoga vidno polje nije u potpunosti iskorišteno kao kod Keplerovog teleskopa. Također, slika predmeta je uspravna kod Galilejevog teleskopa, a obrnuta kod Keplerovog. ^[8]

Nastanak slike kod Keplerovog ili astronomskog teleskopa prikazan je na slici 3.35. Objektiv i okular astronomskog teleskopa su pozitivne leće. Na objektiv upada paralelni snop zraka svjetlosti koje dolaze od udaljenog predmeta. Obično se predmeti koje promatramo teleskopom zapravo nalaze u beskonačnosti tako da objektiv daje sliku I koja nastaje u žarištu slike objektiva. Nastala slika zatim služi kao predmet za okular. Zrake svjetlosti koje sada sa predmeta I dolaze na okular približavanjem okularu se razilaze i izlaze kroz okular kao paralelni snop zraka svjetlosti, ali pod većim kutom u odnosu na optičku os. Okular daje konačnu sliku I' koja je virtualna, uvećana i obrnuta te se nalazi u beskonačnosti. Budući da se konačna slika I' nalazi u beskonačnosti, to znači da prva slika I mora biti u žarištu predmeta okulara. Budući da se žarišta objektiva i okulara moraju podudarati, udaljenost objektiva i okulara, koja odgovara duljini teleskopa L , određena je njihovim žarišnim duljinama tako da za astronomski teleskop vrijedi:

$$L = f_1 + f_2 , \quad (3.39.)$$

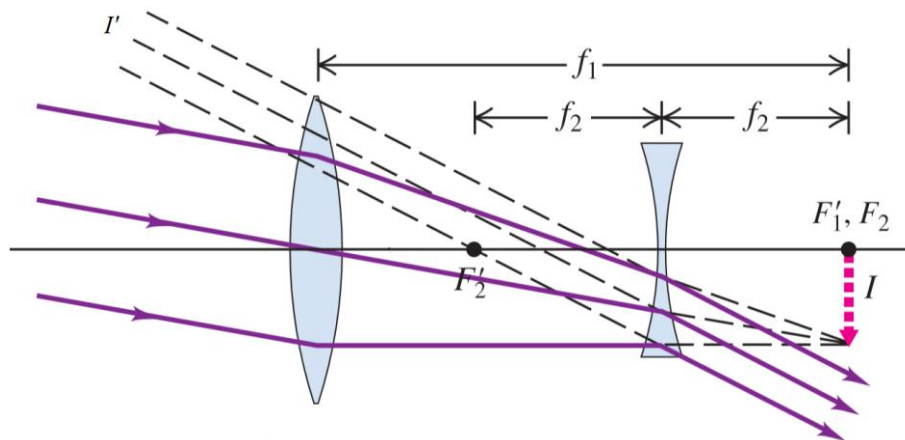


Slika 3.35. Nastanak slike u Keplerovom ili astronomskom teleskopu.

a za terestrički teleskop u kojemu je okular negativna leća vrijedi: ^{[8][15]}

$$L = f_1 + f_2 = f_1 - |f_2|. \quad (3.40.)$$

Nastanak slike u terestričkom teleskopu prikazan je na slici 3.36. U terestričkom teleskopu okular je negativna leća pa je konačna slika udaljenog predmeta uspravna. Paralelni snop zraka svjetlosti upada na objektiv koji stvara sliku I u žarištu predmeta objektiva. Međutim, negativni okular presreće te zrake i lomi ih tako da iz okulara izlazi paralelni snop zraka svjetlosti koji ulazi u oko. Konačna slika I' je virtualna, uspravna i uvećana te se nalazi u beskonačnosti. ^{[8][15]}



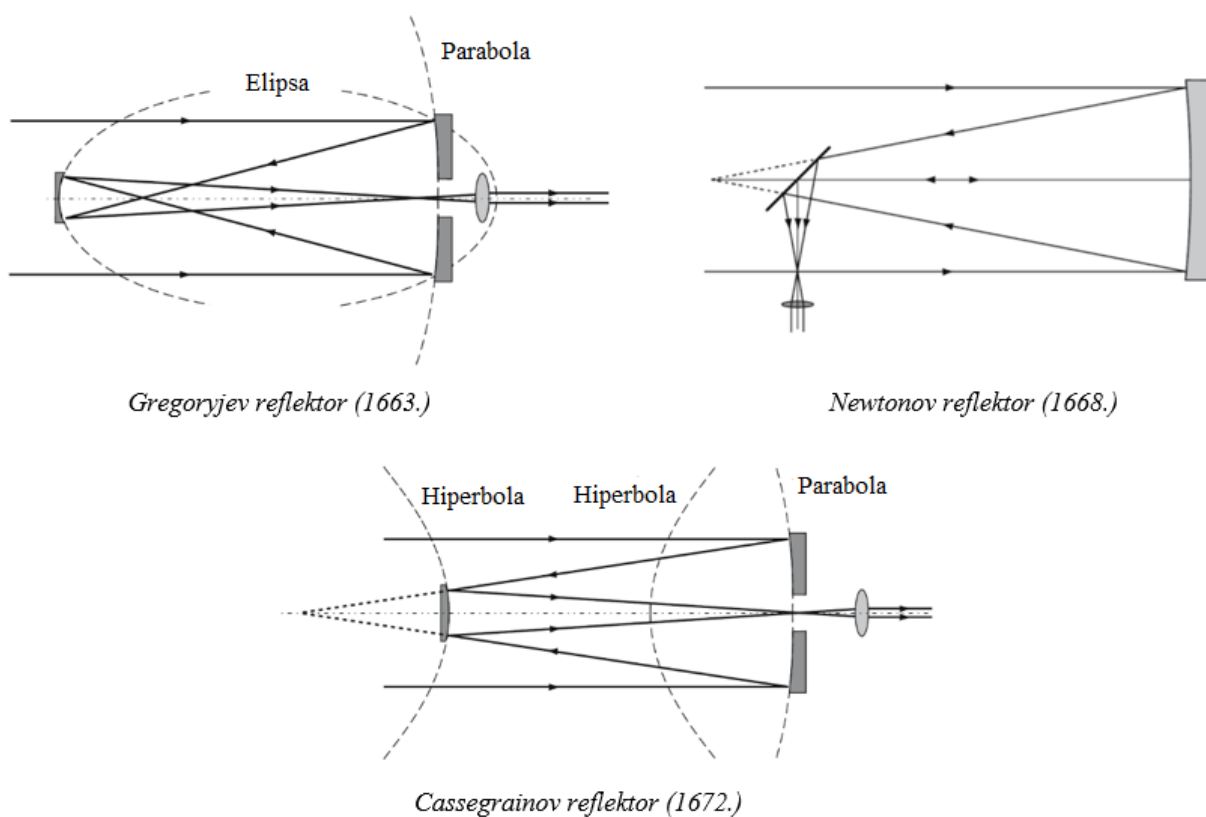
Slika 3.36. Nastanak slike u Galilejevom ili terestričkom teleskopu.

Za predmet u beskonačnosti, kod astronomskog i terestričkog teleskopa na objektiv upada paralelni snop zraka svjetlosti. Budući da se žarišta objektiva i okulara podudaraju u oba slučaja,

paralelni snop zraka svjetlosti koji ulazi u objektiv također izlazi kao paralelan snop iz okulara, samo pod većim kutom, i ulazi u oko. Od izlaznog paralelnog snopa oko formira sliku predmeta koja se nalazi u beskonačnosti. ^[8]

3.7. Reflektori

Teleskope koji svjetlost skupljaju pomoću zrcala, odnosno imaju zrcalo za objektiv, nazivamo reflektori. Danas se od reflektora najviše upotrebljavaju Gregorijjev (1663.), Newtonov (1668.) i Cassegrainov (1672.). Slika 3.39. prikazuje tri navedene izvedbe reflektora. ^{[3][8]}



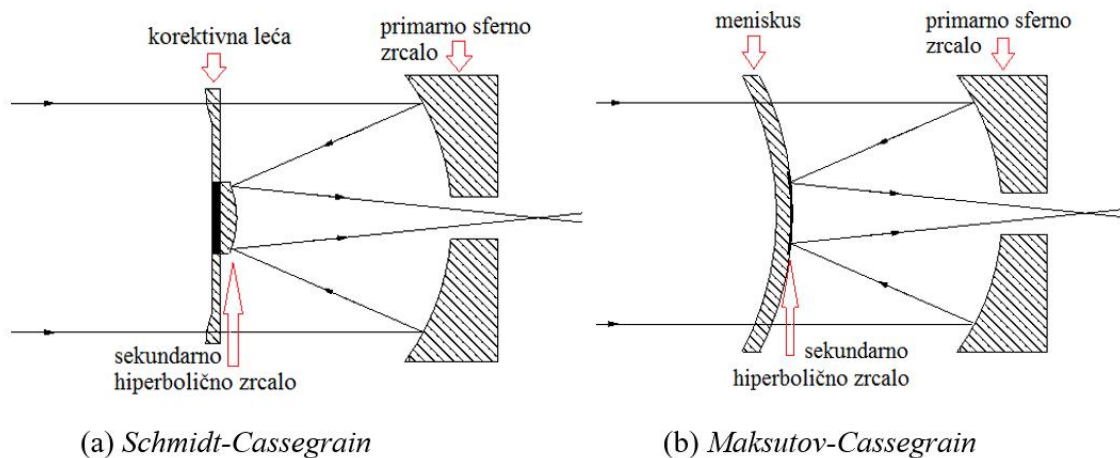
Slika 3.39. Različite izvedbe teleskopa reflektora.

Gregoryjev reflektor ima vrlo malo vidno polje. Prednost Cassegrainova reflektora nad Newtonovim je ugodnije promatranje u smjeru zvijezda, a mane su usko vidno polje i zakrivljenost slike. Među amaterima najviše je u uporabi Newtonov reflektor i mnogo rjeđe Cassegrainov. ^{[3][8]}

Prednost reflektora nad refraktorima je ta što je kod reflektora nužna precizna obrada samo jedne površine, a ne dviju površina kao kod refraktora. Također, kod reflektora ne postoje kromatske aberacije, dok kod refraktora optičke aberacije rastu s povećanjem promjera objektiva. Nedostatak reflektora je što se kod zrcala reflektivni sloj troši. Kao reflektivni sloj kod zrcala najčešće se koristi aluminij naparen na staklenu površinu. ^{[3][8]}

3.8. Katadioptrici

Teleskope koji koriste kombinaciju leća i zrcala za stvaranje slike udaljenog predmeta nazivamo katadioptrici. Među njima najpoznatiji su Schmidt-Cassegrain (1930.) (sl. 3.40.a) i Maksutov-Cassegrain teleskop (sl. 3.40.b). Schmidt-Cassegrainov sustav ima dva zrcala, primarno sferno i sekundarno hiperbolično te tanku leću složenog oblika koja korigira sfernu aberaciju primarnog zrcala. Maksutov-Cassegrainov sustav također ima sferno primarno zrcalo i hiperbolično sekundarno zrcalo, a od Schmidt-Cassegrainovog sustava razlikuje se samo po vrsti korektora pomoću kojeg se poništava sferna aberacija primarnog zrcala. Naime, u Maksutov-Cassegrainovom sustavu umjesto Schmidtova korektora koristi se meniskus. ^{[3][8]}



Slika 3.40. Katadioptrici.

3.9. Osnovni pojmovi

3.9.1. Kutno povećanje

Pomoću teleskopa predmet konačnih dimenzija promatramo pod kutom θ' , koji je veći nego kada ga promatramo bez teleskopa, kada se predmet promatra pod kutom θ . Omjer tih dvaju kutova daje kutno povećanje teleskopa M :

$$M = \frac{\theta'}{\theta}. \quad (3.41.)$$

Međutim, kutno povećanje možemo izraziti preko žarišnih duljina objektiva i okulara. Promotrimo na slici 3.34. crvenu zraku koja prolazi kroz žarište predmeta objektiva F_1 i s optičkom osi zatvara kut θ te izlazi kroz žarište slike okulara F_2' pod kutom θ' . Kako ta zraka prolazi paralelno s optičkom osi na svom putu od objektiva do okulara, udaljenosti ab i cd su međusobno jednake te odgovaraju veličini y' realne slike I . Promotrimo li dva pravokutna trokuta ΔF_1ab i $\Delta F_2'cd$, budući da su kutovi θ i θ' vrlo mali možemo ih aproksimirati preko njihovih tangensa:

$$\theta = \frac{y'}{f_1}, \quad (3.42.)$$

$$\theta' = \frac{y'}{f_2}. \quad (3.43.)$$

Uvrstimo li gornje dvije jednadžbe u jednadžbu (3.41.) dobit ćemo izraz za kutno povećanje izraženo preko žarišnih duljina objektiva i okulara;

$$M = \frac{\theta'}{\theta} = \frac{y'/f_2}{y'/f_1} = \frac{f_1}{f_2}, \quad (3.44.)$$

gdje je f_1 žarišna duljina objektiva, a f_2 žarišna duljina okulara. ^{[8][15]}

Jednadžba (3.44.) pokazuje kako teleskop treba imati objektiv dovoljno velike žarišne duljine kako bi se postiglo dobro kutno povećanje. No, s kutnim povećanjem ne treba pretjerivati jer primarna

svrha teleskopa nije povećanje slike, već prikupljanje svjetla. Postoji pravilo prema kojemu kutno povećanje teleskopa ne bi trebalo biti veće od dvostrukog promjera objektiva u milimetrima. ^{[3][8][15]}

3.9.2. Otvor objektiva

Kako primarna svrha teleskopa nije povećanje slike, već prikupljanje svjetlosti, stoga je druga bitna karakteristika teleskopa otvor ili promjer objektiva. Otvor ili promjer objektiva nam govori koliko svjetlosti može sakupiti teleskop u odnosu na ljudsko oko. Objektiv skuplja više svjetlosti što je promjer objektiva veći i tako omogućava vidljivost tamnijih objekata. Koliko svjetlosti objektiv skuplja određujemo prema jednadžbi:

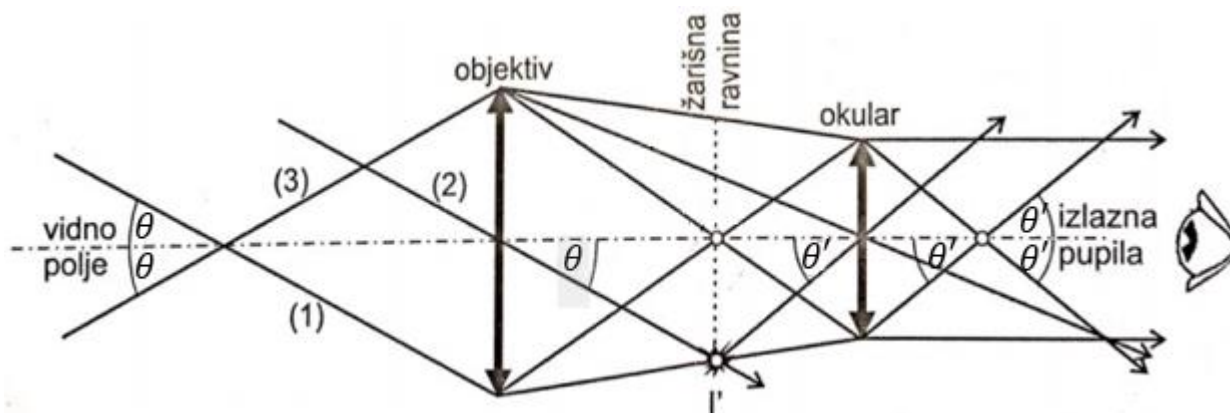
$$L = \left(\frac{D_o}{7 \text{ mm}} \right)^2, \quad (3.44.)$$

gdje je D_o promjer objektiva, L svjetlosna snaga, a 7 mm promjer zjenice ljudskog oka. ^[3]

3.9.3. Vidno polje i izlazna pupila

Koliki dio nebeskog svoda možemo promatrati uz pomoć teleskopa određeno je njegovim vidnim poljem. Ono ovisi o razmještanju i optičkim svojstvima objektiva i okulara, kao i o povećanju teleskopa. Što je povećanje teleskopa veće to će vidno polje biti manje. Također, vidno polje je to manje što su objektiv i okular manjih dimenzija i više razmaknuti. ^{[8][16]}

Objektiv teleskopa obuhvaća skoro sve zrake svjetlosti koje dolaze iz prednjeg prostora. No, od svih zraka svjetlosti koje se ušle kroz objektiv mi vidimo samo one zrake koje prođu i kroz okular. Zbog razmještanja objektiva i okulara, krajnja zraka (1) (sl. 3.37.) prolazi i kroz okular i pritom je morala proći kroz realnu sliku koja se nalazi u žarišnoj ravnini. Njezin smjer određen je zrakom (2) koja bez loma prolazi središtem objektiva i time zadaje smjer svim zrakama upadnog paralelnog snopa



Slika 3.37. Geometrija vidnog polja.

svjetlosti. Kroz teleskop prolazi i zraka (3) koja predstavlja krajnji dio snopa svjetlosti koji pod istim kutom, ali s druge strane optičke osi upada na objektiv. Vidno polje teleskopa određeno je kutom između ta dva smjera - 2θ .^[8]

Stožac izlaznih zraka svjetlosti, koje je okular primio od teleskopa, naziva se izlazna pupila. U astronomskim teleskopima vrh izlazne pupile nalazi se izvan teleskopa, dok je recimo kod terestričkog teleskopa izlazna pupila unutar teleskopa. U tom slučaju zjenicu oka promatrača ne ispunjava izlazna pupila pa je stoga vidno polje samo djelomično iskorišteno. Veličina izlazne pupile je važna jer mora stati u zjenicu oka promatrača kako bi vidno polje teleskopa bilo u potpunosti iskorišteno, a jednaka je kvocijentu promjera objektiva D_O i povećanja teleskopa M :

$$D_{IP} = \frac{D_O}{M}, \quad (3.46.)$$

gdje je sa D_{IP} označen promjer izlazne pupile.^{[8][17]}

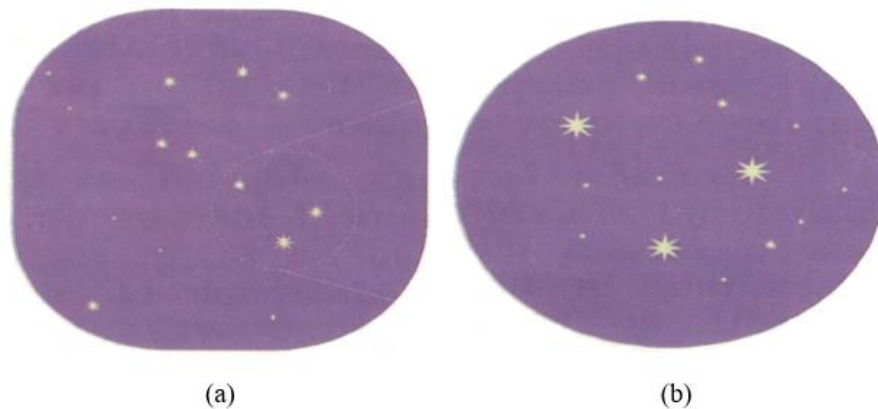
Zjenica oka se širi ili skuplja ovisno o količini svjetla. Maksimalna širina zjenice u mraku je 7 mm pa idealna veličina izlazne pupile iznosi 7 mm. Međutim, veličina zjenice oka u mraku varira od osobe do osobe i ovisi o starosnoj dobi. U tablici 3.2. navedene su vrijednosti veličine zjenice u ovisnosti o starosnoj dobi. Vidimo da se s povećanjem godina veličina zjenice oka smanjuje. Kako bi

Tablica 3.2. Vrijednosti veličine zjenice oka u mraku u ovisnosti o starosnoj dobi.

Starosna dob (god)	Veličina zjenice (mm)
20 ili manje	7,5
30	7,0
35	6,5
45	6,0
60	5,5
80	5,0

sva svjetlost koju je okular prikupio od teleskopa bila iskorištena, također i vidno polje, veličina izlazne pupile treba biti manja ili jednaka veličini zjenice oka promatrača u mraku. ^{[8][16][17]}

Postoje stvarno i prividno vidno polje i nešto što se zove najbogatije polje. Kada nebeski svod promatrano golim okom, dakle bez pomoći teleskopa, tada govorimo o stvarnom vidnom polju koje je prikazano na slici 3.38.a. Najbogatije vidno polje znači da je veliki broj zvijezda smješten u vidnom



Slika 3.38. Stvarno (a) i prividno vidno polje (b).

polju. Promatramo li nebeski svod golim okom dobivamo najbogatije moguće vidno polje nego kada ga promatramo uz pomoć teleskopa. Kada promatranje nebeskog svoda vršimo uz pomoć teleskopa tada govorimo o prividnom vidnom polju koje je prikazano na slici 3.38.b. ^[17]

4. Izrada teleskopa

Danas je moguće lako izraditi vrlo jednostavan teleskop pomoću kupljenih gotovih optičkih dijelova i to uz veliku uštedu novca i s vrlo velikim šansama za dobar rezultat u konačnici. Samo se iskusni pojedinci upuštaju u izgradnju teleskopa pri čemu sami izrađuju zrcala i leće za objektivne i okulare.

Za kućnu izradu jednostavnog teleskopa potrebno je poznavati zakone geometrijske optike na kojima se zasniva princip rada teleskopa. Prije same izrade teleskopa potrebno je odlučiti se za konstrukciju teleskopa. Za svrhu svog diplomskog rada odlučila sam se za izradu teleskop refraktor u Keplerovoj konstrukciji. U ovom poglavlju biti će opisani koraci pri izradi jednog takvog teleskopa, kao i njegove osnovne karakteristike.

4.1. Pribor i troškovnik

Za izradu Keplerovog teleskopa potrebne su dvije pozitivne leće. U izradi ovog teleskopa korištene su dvije bikonveksne leće, jedna žarišne duljine 500 mm i druga 50 mm, a obje promjera 50 mm. Za objektiv je korištena leća veće žarišne duljine, dakle od 500 mm, a za okular leća žarišne duljine 50 mm. Leće su u konačnici montirane na teleskopsku cijev duljine 550 mm. Duljina teleskopske cijevi određena je prema jednadžbi (3.39.) pomoću koje se određuje duljina cijevi Keplerovog ili astronomskog teleskopa.



Slika 4.1. Pribor za izradu Keplerovog teleskopa.

Ostali potreban pribor (sl. 4.1.) za izradu Keplerovog teleskopa je: crni hamer papir, kutija od čipsa *Pringles*, crna izolir traka, super ljepilo, karton, poklopac od kutije od čipsa, skalpel, škare, šestar, ravnalo, metarska traka, olovka, podloga za rezanje i novinski papir za zaštitu radne površine. U tablici 4.1. dani su popis i cijena korištenog pribora pri izradi Keplerovog teleskopa. Leće su kupljene preko www.ebay.co.uk.

Tablica 4.1. *Troškovnik za izradu Keplerovog teleskopa.*

Redni broj	Pribor	Cijena (HRK)
1.	Bikonveksna leća žarišne duljine 500 mm	43,43
2.	Bikonveksna leća žarišne duljine 50 mm	43,43
3.	Hamer papir crni	9,00
4.	Izolir traka crna	3,99
5.	Super ljepilo	11,99
6.	Kutija od čipsa <i>Pringles</i>	0,00
7.	Karton	0,00
8.	Skalpel	0,00
9.	Škare	0,00
10.	Šestar	0,00
11.	Ravnalo	0,00
12.	Metarska traka	0,00
13.	Olovka	0,00
14.	Podloga za rezanje (linoleum)	0,00
15.	Novinski papir	0,00
Ukupno (HRK)		111,84

4.2. Koraci i upute

U ovom dijelu poglavlja detaljno će biti opisani koraci pri izradi Keplerovog teleskopa, a koji će biti popraćeni i odgovarajućim slikama.

Kada smo pripremili radni prostor (sl. 4.2.) možemo započeti sa izradom teleskopa. Prvo je potrebno napraviti teleskopsku cijev na koju ćemo kasnije montirati leće. Kako bi mogli montirati

leće na teleskopsku cijev potrebno je napraviti i držače za leće, a za što možemo iskoristiti poklopac od kutije za čips i običnu kartonsku kutiju.



Slika 4.2. Priprema radnog prostora.

Teleskopsku cijev napraviti ćemo pomoću kutije od čipsa i crnog hamer papira. To možemo napraviti slijedeći ove korake:

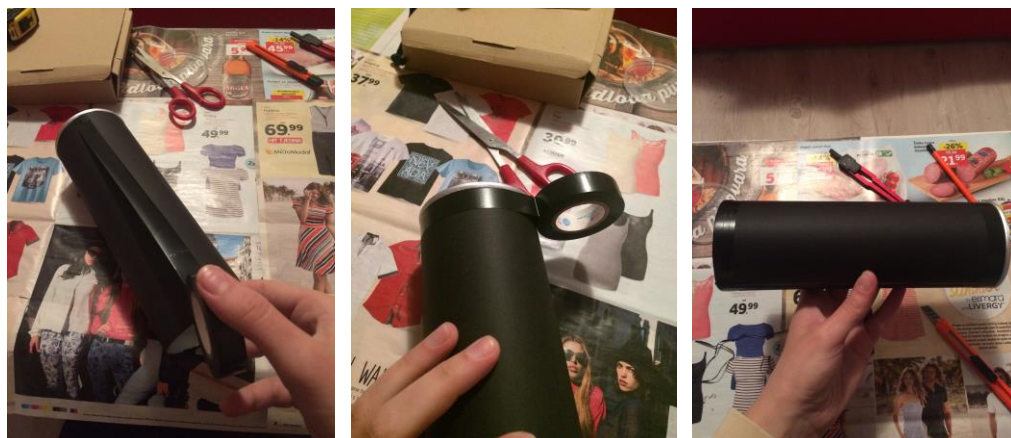
1. Pomoću skalpela odsijecite dno od kutije za čips.



2. Zatim po mjeri kutije škarama izrežite dva komada crnog hamer papira te njime oblijepite pomoću super ljepila vanjsku i unutrašnju stranu kutije.



3. Rubove dodatno učvrstite i zaštitite crnom izolir trakom.



4. Ostatak hamer papira smotajte u rolnu i do kraja ugurajte u kutiju od čipsa.



5. Pomoću metarske trake, mjereći od jednog kraja cijevi do drugog, izmjerite i označite prethodno izračunatu duljinu teleskopske cijevi. U ovom slučaju duljina teleskopske cijevi iznosi 550 mm.



6. Višak hamer papira odsijecite pomoću skalpela.

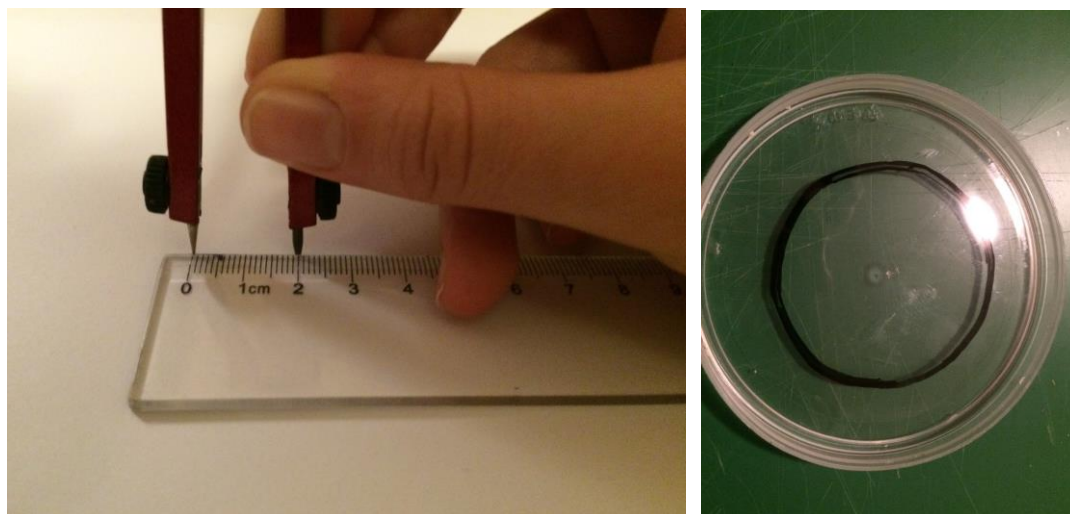


7. Rubove rolne od hamer papira oblijepite i zaštitite crnom izolir trakom te ju vratite nazad u kutiju za čips.



Nakon što smo napravili teleskopsku cijev preostaje nam još da napravimo držače za leće kako bismo ih mogli montirati na krajevima cijevi. Kod izrade držača na umu treba imati promjer leća. U našem slučaju obje leće su promjera 50 mm. Držače za leće možemo napraviti slijedeći iduće korake:

8. Šestarom na ravnu izmjerite 2 cm te na plastični poklopac od kutije od čipsa ucrtajte kružnicu promjera 4 cm. Podebljajte ucrtanu kružnicu crnim ili nekim drugim markerom kako biste ju bolje mogli vidjeti.



9. Skalpelom izrežite ucrtanu kružnicu iz poklopca.



10. Od viška hamer papira škarama izrežite dva šuplja kruga po mjerama poklopca te pomoću super ljepila oblijepite vanjsku i unutrašnju stranu poklopca. Vanjski rub poklopca oblijepite izolir trakom.



11. Pomoću super ljepila sa unutrašnje strane poklopca pričvrstite leću žarišne duljine 50 mm. Leću dodatno pričvrstiti tako da na pojedinim mjestima rub leće zalijepite izolir trakom za poklopac.



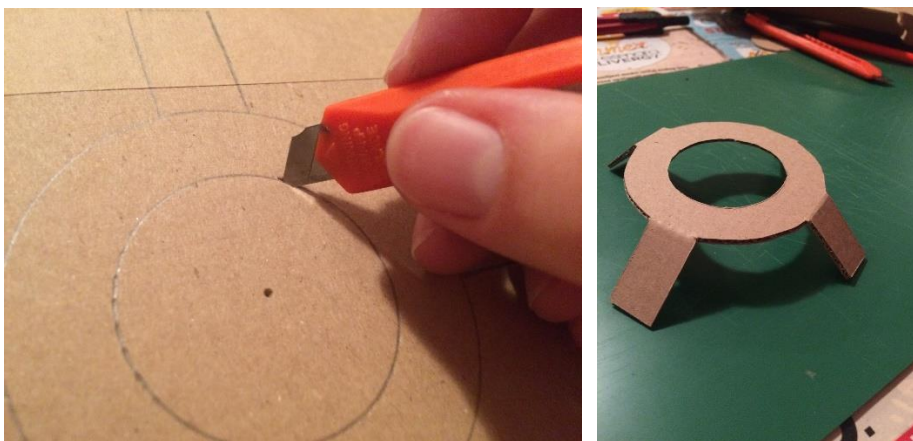
12. Montirajte leću na teleskopsku cijev tako da poklopac stavite na kutiju od čipsa te ga pričvrstite pomoću izolir trake.



13. Od kartonske kutije napravite držač za leću objektiva tako da na karton ucrtate dvije koncentrične kružnice, jednu polumjera 3,3 cm i drugu 2,0 cm, zajedno sa hvataljkama pomoću kojih ćete leću pričvrstiti na teleskopsku cijev.



14. Zatim pomoću skalpela izrežite iz kartona ucrtani oblik držača za leću.



15. Pomoću super ljepila na držač za leću pričvrstite leću žarišne duljine 500 mm.



16. Leću objektiva montirajte na drugi kraj teleskopske cijevi tako da hvataljke držača za leću pričvrstite super ljepilom. Sve to još pričvrstite pomoću izolir trake.



Nakon što ste napravili teleskopsku cijev i na nju montirali okular i objektiv, teleskop je spreman za uporabu.



4.3. Karakteristike teleskopa

Pri konstrukciji našeg teleskopa koristili smo dvije pozitivne leće, obje promjera 5 cm. Međutim, kako smo leće montirali na teleskopsku cijev pomoću držača za leće kojima je promjer otvora 4 cm, zapravo ispada da su obje leće promjera 4 cm. Za objektiv je korištena leća žarišne duljine 500 mm, a za okular žarišne duljine 50 mm. Teleskop je duljine 550 mm. Budući da je naš teleskop po konstrukciji Keplerov, duljinu teleskopske cijevi određujem prema jednadžbi (3.39.).

Slika 4.2. prikazuje nastanak slike udaljenog predmeta u našem teleskopu. Pritom, slika je nacrtana u mjerilu 1:5. Dakle, 1 cm na slici je 5 cm u prirodi. Odnosno, slika je umanjena 5 puta. Konačna slika koju oko vidi je obrnuta i virtualna. Slika 4.3. prikazuje sliku udaljenog predmeta promatranog kroz naš teleskop slikanu telefonom. Vidimo da je slika kod Keplerovog teleskopa zaista



Slika 4.2. Konstrukcija slike u Keplerovom teleskopu nacrtana u mjerilu 1:5.

obrnuta. Također, uočava se i prisutnost kromatske aberacije, no ona je unutar prihvatljivih granica. Naime, kod refraktora je nemoguće u potpunosti izbjeći pojavu kromatske aberacije jer ona nastaje zbog pojave razlaganja upadnih zraka svjetlosti na boje pri njihovom lomu kroz leće. Međutim, bez obzira na prisutnost kromatske aberacije, slika dobivena ovim teleskopom je oštra i čista. Ovaj teleskop također nudi mogućnost izoštravanja slike jednostavnim produljivanjem ili skraćivanjem teleskopske cijevi što je postignuto time što je cijev teleskopa napravljena iz dva dijela.



Slika 4.3. *Slika kroz teleskop.*

Jednadžba (3.44.) omogućava nam da odredimo kutno povećanje teleskopa ukoliko su nam poznate žarišne duljine objektiva i okulara. Prema toj jednadžbi kutno povećanje našeg teleskopa je 10 puta. Dakle, našim teleskopom udaljeni predmet vidimo 10 puta većim nego što zaista jeste. Prema jednadžbi (3.45) budući da je promjer objektiva našeg teleskopa 40 mm, svjetlosna moć teleskopa iznosi 33 puta. To znači da naš teleskop skuplja 33 puta više svjetlosti nego ljudsko oko.

Ukoliko znamo kutno povećanje teleskopa kao i promjer objektiva možemo odrediti i promjer izlazne pupile. Promjer izlazne pupile određuje se prema jednadžbi (3.46.). U našem slučaju, kutno povećanje teleskopa iznosi 10 puta, a promjer objektiva 40 mm. Prema tome, promjer izlazne pupile našeg teleskopa iznosi 4 mm. Budući da je maksimalna širina zjenice oka u mraku 7 mm, veličina izlazne pupile našeg teleskopa ispunjava zjenicu oka promatrača, a vidno polje teleskopa je stoga u potpunosti iskorišteno.

5. Primjena teleskopa u nastavi fizike

U ovom poglavlju ukratko će biti rečeno o izvođenju nastave fizike u osnovnim školama i gimnazijama prirodoslovno-matematičkog usmjerenja. Nakon ukratko opisane nastave fizike u osnovnim školama i gimnazijama biti će dan po jedan primjer nastavne pripreme kako primijeniti teleskop u nastavi fizike.

5.1. Nastava fizike u osnovnim školama

Nastava fizike u osnovnim školama realizira se kroz Nastavni plan i program za osnovnu školu, kojeg je 2006. godine odobrilo Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa, a izvodi se za učenike 7. i 8. razreda. Pritom, i u 7. i 8. razredima nastava fizike se izvodi 2 sata tjedno, odnosno 70 sati godišnje. ^[18]

Prema nastavnom planu i programu geometrijska optika se sluša u 8. razredima u drugom polugodištu. Cilj geometrijske optike jeste učenike upoznati s osnovnim zakonima geometrijske optike i njihovom primjenom pri konstrukciji slike kod različitih optičkih elemenata: ravno zrcalo, sferno zrcalo i leće. ^[18]

Nakon obrade nastavnih jedinica iz cjeline geometrijska optika, izrada teleskopa sa učenicima bila bi savršena vježba u kojoj bi učenici mogli primijeniti stečena znanja iz područja geometrijske optike. Kroz jednu ovakvu vježbu kod učenika ne samo da bi provjeravali razinu usvojenosti znanja iz geometrijske optike, već bi kod njih razvijali preciznost i urednost u radu te ih poticali na aktivnost i zalaganje u nastavi.

5.1.1. Obrada nastavne jedinice *Primjena optičkih leća – Teleskop u osnovnim školama*

U ovom dijelu poglavlja dan je primjer jedne nastavne pripreme kako primijeniti teleskop u nastavi fizike za učenike 8. razreda.

PRIPREMA ZA IZVOĐENJE NASTAVE

Škola: **Razred:**

Mjesto: **Datum:**

Učitelj/Učiteljica:

Nastavni predmet:

Nastavna cjelina:

Nastavna tema:

Nastavna jedinica:

SADŽAJNI PLAN

Red. broj.	Podjela nastavne cjeline na teme	Broj sati	
		predavanja	vježbe
55.	Rasprostiranje svjetlosti	1	0
56.	Refleksija svjetlosti i ravna zrcala	1	0
57./58./59./60.	Sferna zrcala	2	2
61.	Lom svjetlosti	1	0
62./63./64.	Leće	2	1
65.	<u>Primjena optičkih leća – Teleskop</u>	1	0
66.	Razlaganje svjetlosti na boje	1	0
67.	Priprema za pisanu provjeru znanja	0	1
68.	Pisana provjera znanja	0	1
69.	Analiza pisane provjere znanja	0	1
70.	Sistematizacija gradiva i zaključivanje ocjena	0	1

PLAN VOĐENJA NASTAVNOG PROCESA

Cilj (svrha) obrade metodičke jedinice:

Definirati i objasniti princip rada teleskopa te na primjeru izrade teleskopa utvrditi razinu usvojenosti znanja prethodno obrađenog sadržaja.

Zadaci koje treba ostvariti da bi se cilj postigao:

- Materijalni (kognitivni) zadaci:

- Definirati što je teleskop.
- Nabrojati osnovne dijelove teleskopa.
- Objasniti što su objektiv i okular i koja ima je uloga.
- Opisati konstrukciju Galilejevog teleskopa.
- Navesti karakteristike slike kod Galilejevog teleskopa.
- Opisati konstrukciju Keplerovog teleskopa.
- Navesti karakteristike slike kod Keplerovog teleskopa.

- Funkcionalni (psihomotorički) zadaci:

- Razvijati sposobnost logičkog zaključivanja.
- Razvijati samostalnost kod donošenja zaključaka.
- Izraditi jednostavan teleskop.
- Konstruirati nastanak slike u Keplerovom teleskopu.

- Odgojni (afektivni) zadaci:

- Razvijati kritički način razmišljanja.
- Poticati učenike na aktivnost i zalaganje u nastavi.
- Razvijati postupnost i sistematičnost u radu.
- Razvijati preciznost i urednost u radu.

Ključni pojmovi:

Objektiv, okular, Galileo Galilei, Johannes Kepler

Organizacija nastavnog rada – artikulacija metodičke jedinice:

Koraci nastavnog procesa	Sadržaj	Oblici nastave	Metode i postupci	Vrijeme
1. Uvod	Ponavljjanje prethodno obrađenog gradiva	Frontalni	Razgovor	3 min
	Motivacijski dio – primjena leća	Frontalni	Razgovor	1 min
2. Glavni dio	Definiranje teleskopa i njegovih osnovnih dijelova	Frontalni	Razgovor, pisanje	3 min
	Povijest teleskopa	Frontalni	Usmeno izlaganje, pisanje, crtanje	3 min
	Vježba: Izrada teleskopa	Individualni	Praktični rad	30 min
3. Završni dio	Ponavljjanje sadržaja održanog sata i provjeravanje odgovora na pitanja s radnog listića	Frontalni	Razgovor	5 min

Nastavna sredstva, pomagala i ostali materijalni uvjeti rada:

Školska ploča, kreda, radni listići, 2 sabirne leće ($f = 5 \text{ cm}$ i $f = 30 \text{ cm}$), hamer papir, novinski papir, 2 komada debljeg kartona, skalpel, samoljepljiva traka, tekuće ljepilo, metarska vrpca, ravnalo, šestar

Korelacija:

Matematika, Tehnička kultura

Metodički oblici koji će se primjenjivati u toku rada:

Metoda razgovora, metoda usmenog izlaganja, metoda pisanih i grafičkih radova, metoda praktičnog rada

Izvori za pripremanje nastavnika:

- Šupak, M., Teleskopi, Rijeka, 2012.
- King, H.C., The History of the Telescope, DOVER PUBLICATIONS, INC., Mineola, New York, 1995.
- Ivanović, D., Vučić, V., Fizika II: elektromagnetika i optika, Naučna knjiga, Beograd, 1976.
- Paar, V., Martinko, S., Fizika 8; udžbenik za 8. razred osnovne škole; Školska knjiga, Zagreb, 2008.
- Klaić, B., Veliki rječnik stranih riječi, izraza i kratica, Zora, Zagreb, 1974.

Izvori za pripremanje učenika:

- Nastavni materijali (bilješke sa nastave i radni listići)

TIJEK IZVOĐENJA NASTAVE – NASTAVNI RAD:

1. Uvodni dio

Ponavljamo prethodno obrađeno gradivo kroz pitanja:

- Što su optičke leće i koje vrste leća razlikujemo?
 - Optička leća je prozirno tijelo omeđeno s dvije sferne površine. Razlikujemo sabirne ili konvergentne i rasipne ili divergentne leće.
- Kako na upadni snop zraka svjetlosti paralelnih s optičkom osi djeluje sabirna, a kako rasipna leća?
 - Sabirna leća paralelni snop zraka svjetlosti fokusira u jednu točku – žarište, a rasipna leća paralelni snop zraka svjetlosti širi pa se zraci rasipaju.
- Navedite karakteristične zrake pri konstrukciji slike kod leća?
 - Zraka koja dolazi paralelno s optičkom osi lomi se kroz žarište, zraka koja prolazi žarištem lomi se paralelno s optičkom osi i zraka koja prolazi kroz središte leće se ne lomi.
- Kakvu sliku može dati sabirna, a kakvu rasipna leća?
 - Sabirna leća može dati uspravnu, obrnutu, realnu, virtualnu, umanjenu ili uvećanu sliku, a rasipna leća uvijek daje uspravnu, virtualnu i umanjenu sliku.

Motivacijski dio:

- Gdje se sve u svakodnevnom životu upotrebljavaju leće?
 - Povećalo, kontaktne leće, oko, naočale, mikroskop, dalekozor, teleskop, fotoapararat, kamera, itd. ^[19]

Najava današnje teme sata i zapisivanje naslova na ploču **PRIMJENA OPTIČKIH LEĆA - TELESKOP**. Učenici zapisuju naslov u svoje bilježnice.

2. Glavni dio

Učenici daju svoje definicije teleskopa. Zajedno dolazimo do definicije teleskopa koju učenici zapisuju u svoje bilježnice.

Teleskop (grč. *tele* – *daleko* i *skopeo* – *gledati*) – optički instrument pomoću kojeg udaljene astronomske objekte (planeti, zvijezde, ...) vidimo uvećane. ^{[14][20]}

Nabrajamo i definiramo osnovne dijelove teleskopa. Učenici zapisuju u svoje bilježnice.

Osnovni dijelovi teleskopa:

Objektiv – sabirna leća uperena prema promatranom predmetu i daje obrnutu, realnu i umanjenu sliku promatranog predmeta.

Okular – leća pomoću koje se povećava i promatra slika predmeta dobivena pomoću objektiva teleskopa – služi kao povećalo. ^[14]

Ukratko prolazimo kroz povijest teleskopa.

Godine 1608. nizozemski optičar Hans Lippershey konstruirao je prvi teleskop. Vijest o njegovom otkriću došla je do Galilea Galileia koji je 1609. godine konstruirao svoj prvi teleskop i ubrzo ga okrenuo prema noćnom nebu i tako uveo teleskop u astronomiju. Galilejev teleskop za objektiv ima sabirnu, a za okular rasipnu leću. U rasipnoj leći promatrač vidi uspravnu, virtualnu i uvećanu sliku udaljenog objekta.

Godine 1611. Johannes Kepler predložio je za okular uporabu sabirne leće. Kod Keplerovog teleskopa objektiv i okular su sabirne leće. Zanimljivo je da Kepler nikad nije konstruirao svoj teleskop već je samo razradio njegovu teoriju. Međutim, u njegovu čast danas se takva konstrukcija teleskopa naziva Keplerov teleskop. ^{[3][4]}

Učenici zapisuju u svoje bilježnice najbitnije iz povijesti teleskopa te skiciraju konstrukciju Galilejevog i Keplerovog teleskopa (3. i 4. slajd).

- Kakva je slika kod Keplerovog teleskopa?

Dijelimo radne listiće sa uputama prema kojima će učenici samostalno izvesti vježbu *Izrada teleskopa* na temelju koje će doći do odgovora na postavljeno pitanje.

Prije početka vježbe provjeravamo jesu li učenici donijeli i pripremili potreban pribor (hamer papir, novinski papir, 2 komada debljeg kartona, skalpel, škare, samoljepljiva traka, tekuće lijepilo, metarska vrpca, ravnalo, šestar) za izvođenje vježbe, a za koji su učenici unaprijed bili obaviješteni da moraju pripremiti za ovaj sat.

Tijekom vježbe obilazimo učenike i pomažemo ako je to potrebno. Nakon predviđenog vremena za izvođenje vježbe provjeravamo jesu li učenici završili sa vježbom.

Zajedno skiciramo nastanak slike u Keplerovom teleskopu. Učenici crtaju skicu u svoje bilježnice.

3. Završni dio

U završnom dijelu sata ukratko ponavljamo sadržaj održanog sata:

- Što je teleskop?
 - Teleskop je optički instrument pomoću kojeg udaljene astronomske objekte (planeti, zvijezde, ...) vidimo uvećane.
- Koji su osnovni dijelovi teleskopa?
 - Osnovni dijelovi teleskopa su objektiv i okular.
- Kakvu leću za okular koristi Galilejev, a kakvu Keplerov teleskop?
 - Kod Galilejevog teleskopa okular je rasipna leća, a kod Keplerovog teleskopa okular je sabirna leća.
- Kako ćete znati je li dana leća sabirna ili ne?
 - Sabirne leće daju uvećanu i obrnutu sliku za predmet na udaljenosti većoj od žarišne duljine leće.

- Kakvu sliku daje Keplerov teleskop?
 - Kod Keplerovog teleskopa slika je obrnuta, uvećana i virtualna.
- Zašto je slika kod Keplerovog teleskopa obrnuta?
 - Kod Keplerovog teleskopa slika je obrnuta jer teleskop za okular ima sabirnu leću koja za uspravan predmet daje obrnutu sliku.

Plan ploče:

PRIMJENA OPTIČKIH LEĆA – TELESKOP

TELESKOP –

Osnovni dijelovi teleskopa:

- Objektiv –
- Okular –

POVIJEST TELESKOPA

VJEŽBA – IZRADA TELESKOPA

DODACI:

PowerPoint prezentacija:



Primjena leća - Teleskop

Nastavni predmet: Fizika
Razred: 8.

Teleskop

- (grč. *tele* – daleko i *skopeo* – gledati) – optički instrument pomoću kojeg udaljenje astronomske objekte (planeti, zvijezde, ...) vidimo uvećane
- Osnovni dijelovi teleskopa:
 - **Objektiv** – sabirna leća uperena u promatrani predmet → daje **obrnutu, realnu i umanjenju sliku**
 - **Okular** – leća pomoću koje se povećava i promatra slika predmeta dobivena pomoću objektiv → služi kao povećalo

Povijest teleskopa 1/2

- 1608. godine nizozemski optičar Hans Lippershey konstruirao prvi poznati teleskop
- 1609. godine **Galileo Galilei** konstruirao svoj prvi teleskop:
 - objektiv – sabirna leća
 - okular – rasipna leća



- slika: uspravna, virtualna i uvećana

Povijest teleskopa 2/2

- 1611. godine **Johannes Kepler** predložio konstrukciju teleskopa koji za okular ima sabirnu leću – Keplerov teleskop:
 - objektiv i okular – sabirne leće



- slika: ???

Radni listić:

Vježba: Izrada teleskopa

Zadaci:

1. Prema zadanim uputama napravite Keplerov teleskop.
2. Odgovorite na postavljena pitanja.

Pribor:

2 sabirne leće ($f = 30\text{ cm}$, $f = 5\text{ cm}$), novinski papir, hamer papir, 2 komada debljeg kartona, skalpel, škare, samoljepljiva traka, tekuće ljepilo, metarska vrpca, ravnalo, šestar

Upute:

1. Zaštitite radno mjesto novinskim papirom.
2. Provjerite da su dane leće zaista sabirne. Kako ste to provjerili?
3. Postavite leće jednu iza druge tako da udaljeni objekt vidite jasno i uvećano.
4. Metarskom vrpcom izmjerite i zapišite udaljenost između leća za koju udaljeni objekt vidite jasno i uvećano. Izmjerena udaljenost među lećama odgovara duljini teleskopske cijevi.

Napomena: U ovom koraku zatražite pomoć od vašeg para u klupi.

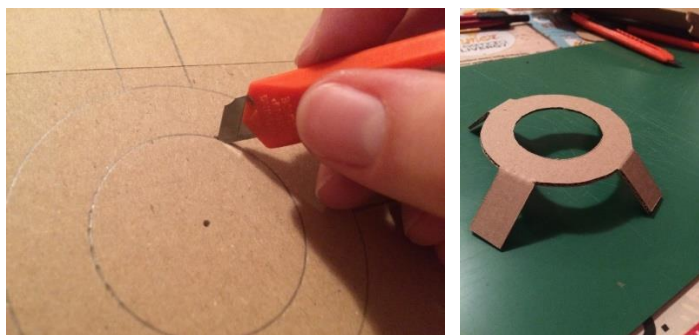
5. Po kraćoj strani hamer papira označite izmjerenu duljinu teleskopske cijevi iz prethodnog koraka te škarama duž cijelog hamer papira izrežite višak.
6. Od hamer papira načinite teleskopsku cijev tako da ju umotate u rolnu i zalijepite pomoću tekućeg lijepila i samoljepljive trake.

Napomena: Pazite da vam promjer teleskopske cijevi bude malo veći od promjera leća kako biste leće mogli lakše montirati na cijev.

7. Na komad debljeg kartona šestarom ucrtajte dvije koncentrične kružnice, jednu promjera teleskopske cijevi, a drugu promjera manjeg od promjera leće (npr. ako je leća promjera 5 cm nacrtajte kružnicu promjera 4 cm), zajedno sa hvataljkama pomoću kojih ćete leće montirati na teleskopsku cijev. Vidi priloženu sliku.



8. Skalpelom izrežite ucrtani oblik iz kartona. Vidi priloženu sliku.



9. Pomoću tekućeg lijepila pričvrstite leću objektiva na napravljeni okvir. Vidi priloženu sliku.



- 10.** Montirajte objektiv na jedan kraj teleskopske cijevi tako da okvir za leću pomoću hvataljki i tekućeg lijepila pričvrstite za vanjsku stranu cijevi. Sve to dodatno učvrstite samoljepljivom trakom. Vidi priloženu sliku.



- 11.** Ponovite korake od **7.** do **10.** za leću okulara.
- 12.** Vaš teleskop je spreman za uporabu. Kakvu sliku vidite kroz teleskop?

5.2. Nastava fizike u gimnazijama

Nastava fizike u gimnazijama realizira se kroz Nastavni plan i program za gimnazije, kojeg je 1994. odobrilo Ministarstvo kulture i prosvjete. Za gimnazije postoji dvogodišnji i četverogodišnji program nastave fizike. U gimnazijama sa četverogodišnjim programom nastave fizike postoje dva potpuno ravnopravna programa fizike – A i B inačica. Oba programa se nadovezuju na program fizike iz osnovne škole i nastoje učenike pripremiti za nastavak školovanja u područjima prirodnih znanosti i tehnike. Bitna razlika između ova dva programa nije u sadržaju koji se obrađuje, već u dubini u koju se ide pri obradi pojedinih sadržaja. ^[21]

U pravilu, inačica B je namijenjena gimnazijama općeg smjera, kao i svim drugim gimnazijama u kojima se nastava fizike tijekom četiri godine izvodi 2 sata tjedno, odnosno 70 sati godišnje. Inačica A je namijenjena gimnazijama prirodoslovno-matematičkog smjera. Nastava fizike se u prirodoslovno-matematičkim gimnazijama tijekom četiri godine izvodi po 3 sata tjedno, što je 105 sati godišnje. ^[21]

Prema četverogodišnjem programu za gimnazije prirodoslovno-matematičkog smjera, geometrijska optika se obrađuje u 3. razredu u drugom polugodištu. Cilj geometrijske optike jeste učenike upoznati s osnovnim zakonima geometrijske optike i njihovom primjenom kod ravnih i sfernih zrcala, kao i kod leća, te ih upoznati s načelima rada optičkih uređaja poput mikroskopa i teleskopa. ^[21]

5.2.1. Obrada nastavne jedinice *Primjena optičkih leća – Teleskop u prirodoslovno-matematičkim gimnazijama*

U ovom dijelu poglavlja dan je primjer jedne nastavne pripreme kako primijeniti teleskop u nastavi fizike u gimnazijama prirodoslovno-matematičkog smjera. Naravno, pripremu je moguće oblikovati i prilagoditi tako da bude primjenjiva i u svim drugim gimnazijama. Na nastavniku je da povede računa da zahtjevnost sadržaj koji se obrađuje ne bude preniska ili previsoka učenicima odgovarajućeg gimnazijskog smjera.

Obrada nastavne jedinice *Primjena optičkih leća – Teleskop* zamišljena je u obliku izlaganja učeničkih prezentacija i dijela u kojem će učenici praviti teleskop. Sat prije obrade spomenute

nastavne jedinice učenicima zadamo samostalni istraživački rad u kojemu u Word dokumentu na 2 – 3 stranice moraju ukratko napisati rad na temu *Teleskop*. Bilo bi poželjno učenicima dati napismeno upute kojima će točno biti definirano o čemu i kojim stilom pisati (naslov rada, font, veličina, prored, broj stranica, itd.). Na samom satu obrade nastavne jedinice *Primjena optičkih leća - Teleskop* učenici predaju svoje radove, a jedan od učenika izlaže svoj rad u obliku PowerPoint prezentacije. Učenika koji će svoj rad predstaviti pomoću PowerPoint prezentacije potrebno je na prethodnom satu odabrati ili slučajnim odabirom ili u dogovoru sa učenicima, dakle samostalnim javljanjem učenika.

Za drugi dio sata u kojem učenici samostalno prave jednostavan teleskop, učenicima je dan samo popis pribora pomoću kojeg će napraviti jednostavan teleskop. U tu svrhu, učenici bi pored Word dokumenta o teleskopima trebali samostalno istražiti kako napraviti jednostavan teleskop pomoću ponuđenog pribora. Za obradu nastave jedinice *Primjena optičkih leća – Teleskop* pored Word dokumenata svi učenici moraju nabaviti i donijeti potreban pribor koji će koristiti pri izradi svog teleskopa, sve osim leća.

Obrada ove nastavne jedinice osmišljena je na ovakav način jer učenici gimnazija prirodoslovno-matematičkog usmjerenja ipak su na višoj razini od učenika osnovnih škola, pa pred njih treba staviti i zahtjevniji zadatak. Naravno, moguća je i drugačija obrada ove nastavne jedinice, a to sve ovisi o ideji, kreativnosti i zamisli nastavnika koji je priprema. Ovo je samo primjer kako se u gimnazijama prirodoslovno-matematičkog smjera može primijeniti teleskop u nastavi fizike.

PRIPREMA ZA IZVOĐENJE NASTAVE

Škola: Prirodoslovno-matematička gimnazija **Razred:** 3.

Mjesto: **Datum:**

Učitelj/Učiteljica:

Nastavni predmet: Fizika

Nastavna cjelina: Geometrijska optika

Nastavna tema: Primjena optičkih leća – Teleskop

Nastavna jedinica: Primjena optičkih leća – Teleskop

SADŽAJNI PLAN

Red. broj.	Podjela nastavne cjeline na teme	Broj sati	
		predavanja	vježbe
56.	Rasprostiranje svjetlosti	1	0
57./58.	Zakon refleksije i loma svjetlosti	1	1
59./60.	Indeks loma i disperzija svjetlosti	1	1
61.	Pojava duge	1	0
62./63.	Totalna refleksija	1	1
63.	Ravno zrcalo	1	0
64.	Sferna zrcala	1	0
65.	Jednadžba sfernog zrcala	1	0
66.	Optičke leće	1	0
67.	Jednadžba leće	1	0
68.	Oko i pogreške oka	1	0
69.	<u>Primjena optičkih leća – Teleskop</u>	<u>1</u>	<u>0</u>
70./71.	Numeričke vježbe	0	2
72./73.	Priprema za pisanu provjeru znanja	0	2
74.	Pisana provjera znanja	0	1
75.	Analiza pisane provjere znanja	0	1

PLAN VOĐENJA NASTAVNOG PROCESA

Cilj (svrha) obrade metodičke jedinice:

Definirati i objasniti princip rada teleskopa te na primjeru izrade teleskopa utvrditi razinu usvojenosti znanja prethodno obrađenog sadržaja.

Zadaci koje treba ostvariti da bi se cilj postigao:

- Materijalni (kognitivni) zadaci:

- Definirati što je teleskop.
- Nabrojati osnovne dijelove teleskopa.
- Objasniti što su objektiv i okular i koja ima je uloga.
- Opisati konstrukciju Galilejevog teleskopa.
- Naveći karakteristike slike kod Galilejevog teleskopa.
- Opisati konstrukciju Keplerovog teleskopa.
- Naveći karakteristike slike kod Keplerovog teleskopa.
- Objasniti postupak određivanja žarišne duljine leća.

- Funkcionalni (psihomotorički) zadaci:

- Razvijati sposobnost logičkog zaključivanja.
- Razvijati samostalnost kod donošenja zaključaka.
- Izraditi jednostavan teleskop.
- Skicirati nastanak slike u Keplerovom teleskopu.

- Odgojni (afektivni) zadaci:

- Razvijati kritički način razmišljanja.
- Poticati učenike na aktivnost i zalaganje u nastavi.
- Razvijati postupnost i sistematičnost u radu.
- Razvijati preciznost i urednost u radu.

Ključni pojmovi:

Objektiv, okular, Galileo Galilei, Johannes Kepler, povećanje teleskopa

Organizacija nastavnog rada – artikulacija metodičke jedinice:

Koraci nastavnog procesa	Sadržaj	Oblici nastave	Metode i postupci	Vrijeme
1. Uvod	Ponavljjanje prethodno obrađenog gradiva	Frontalni	Razgovor	3 min
	Motivacijski dio – primjena leća	Frontalni	Razgovor	1 min
2. Glavni dio	Prikupljanje učeničkih radova na temu <i>Teleskop</i>	Frontalni	Razgovor	1 min
	Izlaganje učeničke PowerPoint prezentacije na temu <i>Teleskop</i>	Frontalni	Usmeno izlaganje	5 min
	Vježba: Izrada teleskopa	Individualni	Praktični i grafički rad	30 min
3. Završni dio	Ponavljjanje sadržaja održanog sata	Frontalni	Razgovor	5 min

Nastavna sredstva, pomagala i ostali materijalni uvjeti rada:

Školska ploča, kreda, radni listići, 2 sabirne leće nepoznatih žarišnih duljina, hamer papir, novinski papir, debeli karton, kartonske tube, skalpel, izolir traka, tekuće ljepilo, metarska vrpca, ravnalo, šestar,
--

Korelacija:

Matematika

Metodički oblici koji će se primjenjivati u toku rada:

Metoda razgovora, metoda usmenog izlaganja, metoda praktičnog rada, metoda grafičkih radova

Izvori za pripremanje nastavnika:

- | |
|---|
| <ul style="list-style-type: none">• Paar, V., Fizika 3, udžbenik za treći razred gimnazije, Školska knjiga, Zagreb, 2009. |
|---|

Izvori za pripremanje učenika:

- | |
|--|
| <ul style="list-style-type: none">• Nastavni materijali – radni listići• Učenički rad na temu <i>Teleskop</i> |
|--|

TIJEK IZVOĐENJA NASTAVE – NASTAVNI RAD:

1. Uvodni dio

Ponavljamo prethodno obrađeno gradivo kroz pitanja:

- Što su optičke leće i koje vrste leća razlikujemo?
 - Optička leća je prozirno tijelo omeđeno s dvije sferne površine. Razlikujemo sabirne ili konvergentne i rasipne ili divergentne leće.
- Kako na upadni snop zraka svjetlosti paralelnih s optičkom osi djeluje sabirna, a kako rasipna leća?
 - Sabirna leća paralelni snop zraka svjetlosti fokusira u jednu točku – žarište, a rasipna leća paralelni snop zraka svjetlosti širi pa se zraci rasipaju, tj. divergiraju.
- Navedite karakteristične zrake pri konstrukciji slike kod leća?
 - Zraka koja dolazi paralelno s optičkom osi lomi se kroz žarište, zraka koja prolazi žarištem lomi se paralelno s optičkom osi i zraka koja prolazi kroz središte leće se ne lomi.
- Kakvu sliku može dati sabirna, a kakvu rasipna leća?
 - Sabirna leća može dati uspravnu, obrnutu, realnu, virtualnu, umanjenu ili uvećanu sliku, a rasipna leća uvijek daje uspravnu, virtualnu i umanjenu sliku.

Motivacijski dio:

- Gdje se sve u svakodnevnom životu upotrebljavaju leće?
 - Povećalo, kontaktne leće, oko, naočale, mikroskop, dalekozor, teleskop, fotoaparati, kamera, itd. ^[12]

Najava današnje teme sata i zapisivanje naslova na ploču **PRIMJENA OPTIČKIH LEĆA - TELESKOP**. Učenici zapisuju naslov u svoje bilježnice.

2. Glavni dio

Provjeravamo jesu li svi učenici napisali i isprintali rad na temu *Teleskop*. Uzimamo učeničke radove na pregled.

Učenik izlaže PowerPoint prezentaciju ne temu *Teleskop*.

Nakon 5-minutnog izlaganja PowerPoint prezentacije provjeravamo jesu li učenici pripremili potreban pribor za današnju vježbu. Dijelimo radne listiće. Učenici izvode vježbu prema zadanim uputama.

Za vrijeme izvođenja vježbe obilazimo učenike i pregledavamo učeničke radove predane na početku sata. Pregledavamo jesu li učenici u radu obuhvatili sve točke koje smo im prethodno jasno definirali:

- ***Teleskop:*** definicija, podjela, osnovni dijelovi
- ***Nastanak i karakteristike slike u teleskopu:*** Galilejev i Keplerov teleskop
- ***Povećanje teleskopa:*** matematički izvod formule

Pred kraj vježbe provjeravamo što su učenici napravili te im vraćamo pregledane radove.

3. Završni dio

Ukratko ponavljamo sadržaj održanog sata:

- Što je teleskop?
 - Teleskop je optički instrument pomoću kojeg udaljene astronomske objekte (planeti, zvijezde, ...) vidimo uvećane.
- Koji su osnovni dijelovi teleskopa?
 - Osnovni dijelovi teleskopa su objektiv, okular i teleskopska cijev
- Kako ste odredili žarišne duljine leća nepoznatih žarišnih duljina?

- Mjereći udaljenost jasne i oštre slike svjetlosnog izvora od zida do leće.
- Koliko iznosi povećanje vašeg teleskopa?
 - Povećanje teleskopa iznosi ...
- Kakva je slika u vašem teleskopu?
 - Slika je obrnuta, uvećana i virtualna.
- Zašto je slika u Keplerovom teleskopu obrnuta?
 - Kod Keplerovog teleskopa slika je obrnuta jer teleskop za okular ima sabirnu leću koja za uspravan predmet daje obrnutu sliku.

Plan ploče:

PRIMJENA OPTIČKIH LEĆA – TELESKOP

DODACI:

Radni listić:

Vježba: Izrada teleskopa

Zadaci:

1. Istražite kako napraviti jednostavan teleskop pomoću dvije sabirne leće.
2. Odredite žarišne duljine dobivenih sabirnih leća.
3. Napravite jednostavan Keplerov teleskop.
4. Izračunajte povećanje teleskopa.
5. Skicirajte nastanak slike u vašem teleskopu.

Pribor:

2 sabirne leće nepoznatih žarišnih duljina, novinski papir, hamer papir, debeli karton, kartonske tube, skalpel, škare, izolir traka, tekuće ljepilo, metarska vrpca, ravnalo, šestar

6. Zaključak

Povijest teleskopa, kako je to u svom dijelu rekao Hoyle (2005), zaista je povijest pokušaja da ga se oslobodi njegovih nedostataka, osobito kromatskih aberacija. Nakon Galilejevog refraktora i Keplerovog prijedloga pozitivne leće za okular, teorija refraktora nije bitno napredovala sve do Newtonovog vremena, upravo zbog nerazumijevanja fizikalnog porijekla kromatskih aberacija. Kromatske aberacije su sve do Newtona ostale misterija, a glavni uzrok je bio tadašnja teorija svjetlosti i boja. Newton je prvi objasnio kromatske aberacije zahvaljujući svojim pokusima sa optičkim prizmama i tako postavio nove temelje teorije svjetlosti i boja. Kada je objektiv refraktora zamijenjen zrcalom i tako riješen problem kromatskih aberacija, teorija reflektora je brzo napredovala i to kroz rad Descartesa, Mersennea, Gregorya, Newtona i Cassegraina.

Za izradu jednostavnog teleskopa, Galilejevog ili Keplerovog tipa, nije potrebno puno. Najveći problem pri izradi teleskopa mogle bi predstavljati leće. U Galilejevo i Keplerovo vrijeme kada bi htjeli izraditi teleskop morali bi sami brusiti i polirati leće ili poznavati izvrsnog optičara koji bi nam izradio željene leće. Međutim, danas je mnogo lakše doći do optičkih elemenata potrebnih za izradu teleskopa, npr. preko interneta na stranicama www.ebay.com, www.amazon.com, i drugih. Moguće je i od lokalnog optičara, ukoliko je voljan, zatražiti izradu željenih leća, no to bi moglo biti skupo. Jeftinije bi bilo iskoristiti leće povećala koja se lako mogu kupiti u knjižarama po pristupačnijoj cijeni.

Pri odabiru leća treba voditi računa o povećanju i svjetlosnoj moći teleskopa koju želimo postići. Također, trebalo bi pripaziti i da izlazna pupila teleskopa ne bude veća od promjera zjenice oka u mraku (7 mm) kako bi vidno polje teleskopa bilo u potpunosti iskorišteno. Obično je leća okulara manjeg promjera od leće objektiva. Razlog tomu je da je lakše “naći” sliku udaljenog predmeta ukoliko je promjer okulara približan promjeru ljudskog oka. Uglavnom su leće takvog promjera skuplje. U našem slučaju, i objektiv i okular su istog promjera. Međutim, taj smo “problem” mogli lako riješiti izradom otvorom držača za okular promjera ljudskog oka. To bi bilo isto kao da smo kupili i na teleskopsku cijev montirali leću istog promjera. Ovako bi postigli isti rezultat, ali za manje novaca. Dakle, za izradu jednostavnog teleskopa potrebno je osnovno poznavanje i razumijevanje zakona geometrijske optike i dvije leće različitih žarišnih duljina ovisno o željenom povećanju teleskopa.

Većina učenika fiziku doživljava teškom, strašnom i nepotrebnom, čak i puno prije samog učenja i upoznavanja sa fizikom. Zato treba kad kod je to moguće na kreativan i zanimljiv način

učenicima približiti fiziku i dokazati im da je fizika zaista svuda oko nas i da je primjenjiva u svakodnevnom životu. Izrada teleskopa s učenicima osnovnih škola i gimnazija, nakon odslušanih sati iz geometrijske optike, savršena je tema za popularizaciju znanosti i nastave fizike. Osim toga, učenicima možemo pružiti osjećaj sreće i zadovoljstva promatranja nebeskih tijela i pojava vlastitim okom kroz teleskop kojeg su sami izradili. Lijepo je gledati slike na internetu, ali je još ljepši osjećaj kada to mogu sami učiniti pomoću vlastitog teleskopa.

U radu su dani primjeri nastavnih priprema kako uvesti i primijeniti teleskop u nastavu fizike s učenicima osnovnih škola i gimnazija prirodoslovno-matematičkog smjera. Primjena teleskopa u nastavi fizike ne razlikuje se puno u osnovnim školama i gimnazijama. No, ipak pred gimnazijalce treba staviti zahtjevniji zadatak jer ipak su oni na višem stupnju obrazovanja i normalno je od njih očekivati da znaju više. Primjerice, od gimnazijalaca možemo tražiti da na osnovu popisa potrebnog pribora konstruiraju teleskop bez detaljnih uputa, a osnovnoškolcima dati detaljne upute kako konstruirati jednostavan teleskop. Naravno, uvijek treba voditi računa da pred učenike ne stavimo zadatak koji nije primjeren njihovom uzrastu, mogućnostima i razumijevanju.

7. Literatura

- [1] Cox, L., (2013), Who Invented the Telescope?
<<http://www.space.com/21950-who-invented-the-telescope.html>> (pristupljeno 25.11.2016.)
- [2] Hoyle, F., (2005), *Astronomija*, Split: Marjan tisak d.o.o.
- [3] Šupak, M., (2012), *Teleskopi*, Rijeka.
- [4] King, H.C., (1955), *The History of the Telescope*, Mineola, New York: Dover Publications, INC, pp. 34 – 48.
<https://books.google.hr/books?id=KAWwzHlDVksC&printsec=frontcover&hl=hr&source=gbp_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false> (pristupljeno 25.11.2016.)
- [5] Planinić, J., (2005), *Osnove fizike III.*, Osijek: Sveučilište Josipa Jurja Strossmayera u Osijeku (Filozofski fakultet)
- [6] Mansurov, N., (2016), What is Spherical Aberration?
<<https://photographylife.com/what-is-spherical-aberration>> (pristupljeno 12.12.2016.)
- [7] Wilson, R.N., (2004), *Reflecting Telescope Optics I: Basic Design Theory and its Historical Development*, 2nd ed., Berlin, Heidelberg, New York: Springer, Ch. 1.
<https://books.google.no/books?id=PuN7l2A2uzQC&lpg=PA14&pg=PA14&redir_esc=y#v=onepage&q&f=false> (pristupljeno 12.12.2016.)
- [8] Vujnović, V., (2010), *Astronomija 2*, 3. izmijenjeno izdanje, Zagreb: Školska knjiga.
- [9] Anonymous (n.d.) Spherical Aberration
<<http://www.physicsclassroom.com/class/refln/Lesson-3/Spherical-Aberration>> (pristupljeno 20.12.2016.)
- [10] Gebelein, R.J. & Shafer, D., (1986), *Reflecting Telescope With Correcting Lens*, United States Patent.
<https://worldwide.espacenet.com/publicationDetails/originalDocument?CC=US&NR=4571036A&KC=A&FT=D&ND=1&date=19860218&DB=&locale=en_EP> (pristupljeno 20.12.2016.)
- [11] Sears, F.W., (1963), *Optika*, Beograd: Naučna knjiga.
- [12] Paar, V., (2009), *Fizika 3: udžbenik za treći razred gimnazije*, 4. izdanje, Zagreb: Školska knjiga.

- [13] Pedrotti, L.S., (2008), »Basic Geometrical Optics«, in: C. Roychoudhuri (ed.) *Fundamentals of Photonics*, SPIE Press Book, pp. 73 – 116.
<<http://www.spie.org/publications/fundamentals-of-photonics-modules/>> (pristupljeno 03.01.2017.)
- [14] Ivanović, D. i Vučić, V., (1976), *Fizika II: elektromagnetika i optika*, Beograd: Naučna knjiga.
- [15] Young, H.D., Freedman, R.A. & Ford, A.L., (2011), *University Physics With Modern Physics*, 13th ed., US: Pearson Education, Ch. 34.
- [16] Culp, R., (2012), Telescope Equations.
< http://www.rocketmime.com/astronomy/Telescope/telescope_eqn.html#Equations> (pristupljeno 12.02.2017.)
- [17] MacRobert, A., (2006), A Pupil Primer.
< <http://www.skyandtelescope.com/astronomy-equipment/a-pupil-primer/>> (pristupljeno 12.02.2017.)
- [18] Nastavni plan i program za osnovnu školu (2006) Republika Hrvatska, Ministarstvo znanosti, obrazovanja i športa, Zagreb: GIPA.
- [19] Paar, V., Martinko, S., (2008), *Fizika 8: udžbenik za 8. razred osnovne škole*, Zagreb: Školska knjiga.
- [20] Klaić, B., (1974), *Veliki rječnik stranih riječi, izraza i kratica*, Zagreb: ZORA.
- [21] Nastavni programi za gimnazije (1994) Republika Hrvatska, Ministarstvo kulture i prosvjete, Zagreb: Glasnik ministarstva kulture i prosvjete Republike Hrvatske.
< <https://www.ncvvo.hr/nastavni-planovi-i-programi-za-gimnazije-i-strukovne-skole/>> (pristupljeno 07.03.2017.)

Životopis

Svetlana Veselinović rođena je 03. rujna 1992. u Vukovaru. Osnovnu školu završila je u Borovu, gdje je i odrasla. Po završetku osnovne škole upisala je Opću gimnaziju u Vukovaru. Nakon srednje škole 2011. godine upisala se kao redoviti student na Preddiplomski studij fizike na Odjelu za fiziku u Osijeku koji je završila 2014. godine. Iste godine upisala se na Sveučilišni diplomski studij fizike i informatike.