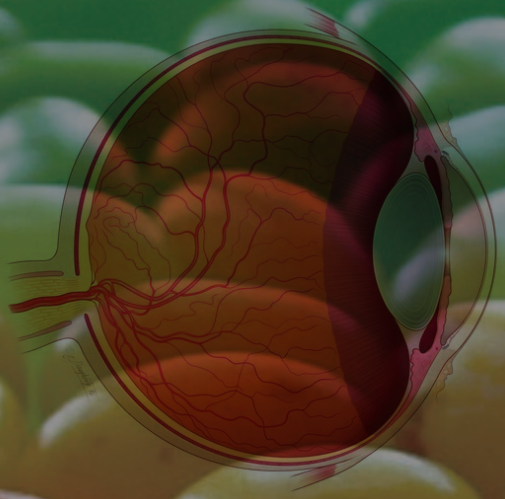
Poglavlje

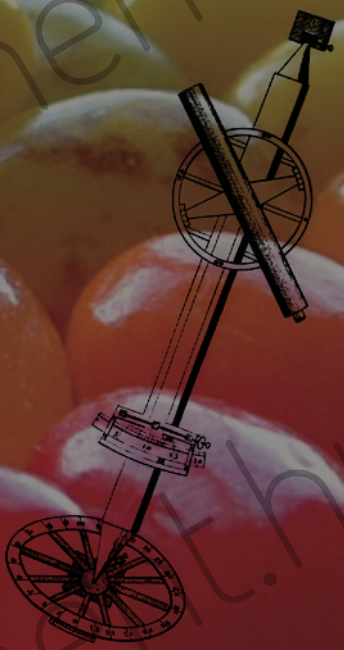
1 Svjetlost

1.1. Priroda svjetlosti
1.2. Zakoni geometrijske optike
1.3. Fermatov princip
1.4. Refleksija svjetlosti
1.4.1. Ravno zrcalo
1.4.2. Sferno zrcalo
1.5. Lom svjetlosti
1.5.1. Planparalelna ploča
1.5.2. Totalna refleksija
1.5.3. Optička prizma
1.6. Leće
1.6.1. Tanke leće
1.6.2. Jednadžba tanke leće
1.6.3. Oko i optički sustavi
1.7. Mjerenje brzine svjetlosti
1.8. Fotometrija

www.element.hr



Da bismo *vidjeli* krijesnicu, zvijezdu Sirius ili plamen svijeće, dio svjetlosti iz tog *izvora* mora "upasti" u mrežnicu našeg oka. No da bismo vidjeli objekt koji nije izvor svjetlosti, primjerice psa, Mjesec ili udžbenik iz fizike, mora postojati neki izvor svjetlosti koji obasjava objekt. Dio reflektirane svjetlosti s objekta zatim mora doći do mrežnice oka. U svakom slučaju, svjetlost od objekta putuje do oka, gdje se u leći lomi i projicira na mrežnicu. Živčane stanice mrežnice šalju živčane impulse do mozga koji u svijest dovodi *sliku*. Slika je tek *kopija* predmeta koja ovisi o svojstvima svjetlosti i o međudjelovanju svjetlosti s okom.



Područje fizike koje opisuje ponašanje i svojstva svjetlosti te međudjelovanje svjetlosti s tvari nazivamo optikom. *Svjetlost* je tek mali dio spektra elektromagnetskih valova na koje je oko osjetljivo. U *geometrijskoj optici* svjetlost opisujemo *zrakama* koje se šire pravocrtno te se mogu odbijati (*reflektirati*) i lomiti (*refraktirati*). Iako je geometrijska optika tek približan opis svjetlosti, ona je vrlo korisna i učinkovita. Zahvaljujući geometrijskoj optici moguće je precizno konstruirati optičke sustave, od jednostavnih leća i zrcala do složenih mikroskopa i teleskopa. *Optički instrumenti* poput mikroskopa i teleskopa otvorili su prozore u nove svjetove te omogućili čudesan razvoj znanosti.

Optika objašnjava *optičke pojave* koje su rezultat međudjelovanja svjetlosti i tvari. Neke od zanimljivih optičkih pojava su *duga*, spektar boja na nebu i *fatamorgana*, optička varka. Postoje optičke pojave koje nije moguće opisati samo geometrijskom optikom. U *fizikalnoj optici* u obzir se uzima i valna priroda svjetlosti. Tipično valne pojave, primjerice *interferencija* i ogib (*difrakcija*), prepoznatljive su po karakterističnim svjetlosnim uzorcima. Spektar boja koji opažamo kad bijela svjetlost pada na CD ili DVD rezultat su difrakcije. Moderni optički sustavi, optička vlakna u kombinaciji s laserima, u zadnjih su deset godina donijeli revoluciju u komunikacijskoj tehnologiji. Optički kablovi omogućili su nastanak svjetskog telekomunikacijskog sustava i eksponencijalni rast interneta.

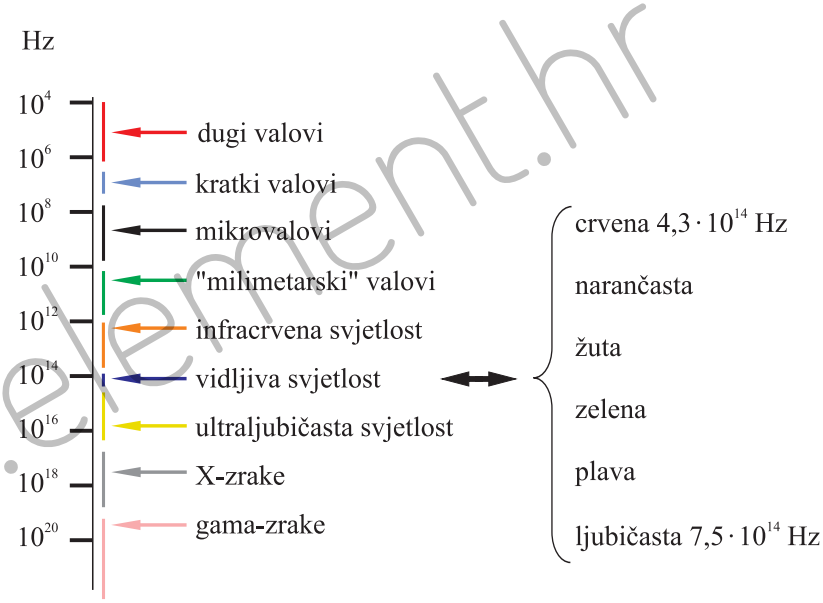
www.element.hr

Ključni pojmovi

- optika
- dvojna priroda svjetlosti
- zraka svjetlosti
- snop svjetlosti
- zakon pravocrtnog širenja
- zakon neovisnosti snopova
- zakon refleksije
- Snellov zakon loma
- indeks loma
- Fermatov princip
- sferno zrcalo
- planparalelna ploča
- totalna refleksija
- optička prizma
- disperzija svjetlosti
- duga
- leća
- sferna aberacija
- kromatska aberacija

1.1. Priroda svjetlosti

Optika kvantitativno proučava fizikalne pojave povezane sa svjetlošću, s njenim širenjem i međudjelovanjem s različitim sredstvima. Svjetlost se širi prozirnim sredstvima. Optika se bavi vidljivom svjetlošću, odnosno uskim dijelom vrlo širokog spektra elektromagnetskih valova koji se proteže sve od dugih radiovalova do visokoenergijskih gama zraka, valnih duljina raspona preko 28 redova veličina (slika 1.1-1).



1.1-1

Dio spektra elektromagnetskih valova. Spektar nema oštre granice, nego se proteže dalje na obje strane.

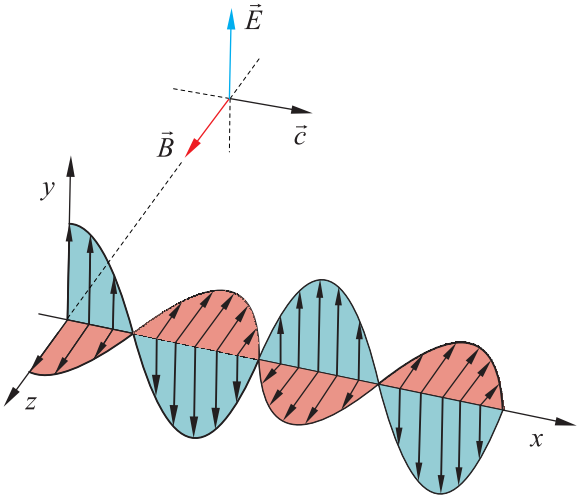
S jedne strane svjetlost možemo opisati zrakama, dakle zamišljenim pravcima koji se po određenim zakonitostima šire od izvora svjetlosti te se lome i reflektiraju.

Međutim, pojam zrake svjetlosti ne otkriva pravu prirodu svjetlosti, ne objašnjava što je svjetlost. Odgovor na to pitanje vodi nas u prošlost, gdje se predodžba prirode svjetlosti često mijenjala. Isaac Newton smatrao je svjetlost rojem čestica – korpuskula. Zahvaljujući velikom Newtonovom utjecaju, u njegovo je doba prevladavalo to je mišljenje. Međutim, nije bilo jedino. Newtonov suvremenik Christiaan Huygens pokazao je valnu (undulatornu) prirodu svjetlosti. Mnogi su fizičari od 17. do 19. stoljeća isticali valnu prirodu svjetlosti, primjerice Young i Fresnel. Najvažnije razdoblje valne teorije svjetlosti je doba Maxwella i Hertza. Maxwell je oko 1873. godine izučavao elektromagnetske valove i naslutio da bi svjetlost mogla biti elektromagnetski val. Hertz je pokazao kako je moguće stvoriti i detektirati radiovalove te je indirektno pokazao da svjetlost ima istu prirodu kao i radiovalovi.

Optika je grana fizike koja proučava fizikalne pojave povezane sa svjetlošću.

Međutim, fizika 20. stoljeća pokazala je da valna teorija svjetlosti ne objašnjava na zadovoljavajući način sve pojave koje uključuju međudjelovanje svjetlosti s materijom. Pokazano je da "klasična" Maxwellova teorija ne može objasniti rezultate nekih pokusa, primjerice fotoelektrični

www.element.hr



1.1-2

Ravni elektromagnetski val u vakuumu: električno polje okomito je na magnetsko, a oba su polja okomita na smjer širenja vala

učinak, o kojem će biti riječi u četvrtom poglavlju. Na temelju Planckove teorije zračenja apsolutno crnog tijela, Einstein je iz prašine povijesti izvukao korpuskularnu teoriju i oplemenio je Planckovom kvantnom teorijom. Nadopunio je predodžbu svjetlosti kao vala u dualnu teoriju svjetlosti, po kojoj je svjetlost i val i čestica. Dakle, postoji **dvojna priroda svjetlosti**. Pitanje o pravoj prirodi svjetlosti ima smisla tek u kontekstu procesa u kojem svjetlost sudjeluje. Ako se radi o difrakciji ili interferenciji svjetlosti, predodžba vala omogućuje objašnjenje eksperimentalnih rezultata, a odgovor o tome kako svjetlost izbacuje elektrone iz metala ili kako se raspršuje na elektronima valja tražiti s pomoću čestične prirode svjetlosti.

Dvojna priroda svjetlosti: svjetlost ima svojstva vala i čestice.

1.2. Zakoni geometrijske optike

U prvom dijelu izučavanja širenja svjetlosti promatrat ćemo optičke elemente i optičke instrumente čije su dimenzije mnogo redova veličina veće od valne duljine svjetlosti. Za opis širenja svjetlosti kroz prozirno sredstvo dovoljan je opis širenja svjetlosti prikazan s pomoću **zrake svjetlosti**, koja je okomita na valne fronte, a čije se širenje opisuje preko četiri zakona geometrijske optike. Skup zraka svjetlosti nazivamo **snopom svjetlosti**. Zrake svjetlosti prikazane su na slici 1.2-1, zajedno s valnim frontama koje pokazuju način na koji izvor širi svjetlost u prostor. Po obliku valne fronte, valove svjetlosti možemo podijeliti na ravne i kuglaste valove.

Zraka svjetlosti je zamišljeni usmjereni pravac okomit na valnu frontu, s pomoću kojeg konstruiramo slike u geometrijskoj optici.

Snop svjetlosti je skup svjetlosnih zraka.

Napomena

Optički homogeno sredstvo je sredstvo kod kojeg je indeks loma svuda isti.

Optički izotropno sredstvo je sredstvo kod kojeg su svi smjerovi ravnopravni.

Napomena

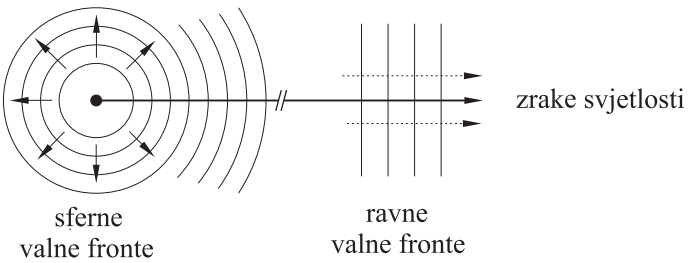
Valna fronta je površina koja povezuje sve točke iste faze.

Faza vala je kut, $kx - \omega t$, koji ostaje stalan za harmonijski val.

Valni broj je $k = \frac{2\pi}{\lambda}$, a kružna frekvencija $\omega = \frac{2\pi}{T}$.

Kada dimenzije dijelova instrumenata kroz koje svjetlost prolazi postaju otprilike usporedive s valnom duljinom svjetlosti, svjetlost moramo opisati valnom predodžbom pa primjenjujemo sve ono što smo naučili o valovima. Pritom ćemo uzeti u obzir razlike između mehaničkih i elektromagnetskih valova.

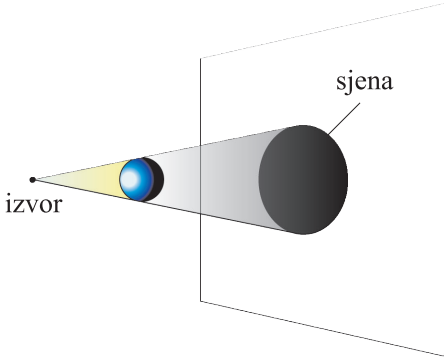
Geometrijska optika proučava kako se svjetlosne zrake odbijaju (reflektiraju) i lome (refraktiraju) ili savijaju prelazeći iz jednog sredstva u drugo. U geometrijskoj optici konstruiramo zrake koje se šire, odbijaju i lome prema četiri zakona geometrijske optike.



1.2-1

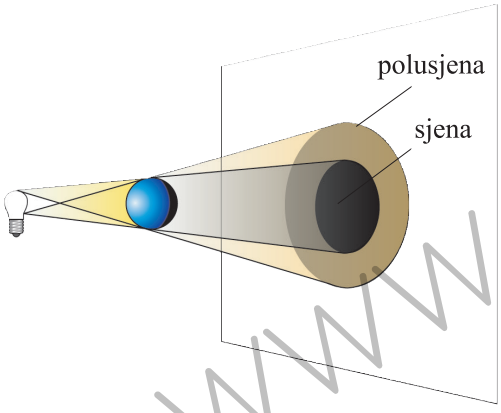
Na velikoj udaljenosti od točkastog izvora svjetlosti sferne valne fronte postaju ravne valne fronte. Zrake svjetlosti uvijek su okomite na valne fronte.

www.element.hr



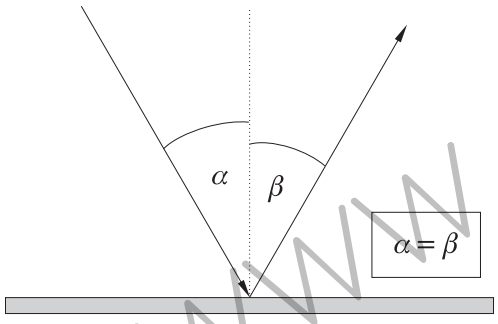
1.2-2

Sjena nastala točkastim izvorom svjetlosti



1.2-3

Sjena i polusjena nastale izvorom svjetlosti koji nije točkast



1.2-4

Zakon odbijanja ili refleksije: kut upada jednak je kutu odbijanja

Najčešće rabimo točkaste izvore svjetlosti, a primjer takvog izvora prikazan je na slici 1.2-2. Točkasti izvor daje oštru sjenu na zastoru, dok plošni izvor sa slike 1.2-3 daje oštru sjenu, ali i polusjenu.

Formulirat ćemo i opisati četiri zakona geometrijske optike, a zatim ćemo ih redom primijeniti na konkretne i zanimljive situacije koje se vrlo često javljaju u svakodnevnom životu i na taj način čine optiku bliskom i zanimljivom.

Zakoni geometrijske optike:

1. zakon pravocrtnog širenja svjetlosti
2. zakon neovisnosti snopova svjetlosti
3. zakon odbijanja ili refleksije svjetlosti
4. Snellov zakon loma ili refrakcije svjetlosti

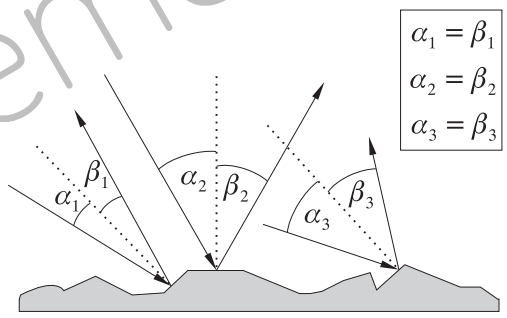
1. **Zakon pravocrtnog širenja** govori da se svjetlost u homogenom, izotropnom, prozirnom sredstvu širi pravocrtno. Stvaranje sjene neprozirnog predmeta koji se nalazi na putu svjetlosnih zraka može poslužiti za jednostavan prikaz tog zakona (slika 1.2-1).

Zakon pravocrtnog širenja svjetlosti: svjetlost se u homogenom, izotropnom, prozirnom sredstvu širi pravocrtno.

2. **Zakon neovisnosti snopova** govori da se dva snopa svjetlosti u prostoru prostiru potpuno neovisno, bez međudjelovanja (ako ne dolaze iz jednakih izvora), poput reflektorskih snopova koji jedan kroz drugog prolaze bez utjecaja. Snop svjetlosti je skup svjetlosnih zraka.

Zakon nezavisnosti svjetlosnih snopova: snopovi svjetlosti iz različitih izvora ne međudjeluju.

3. **Zakon refleksije**: kada svjetlost, zraka svjetlosti, svjetlosni val, dolazi do granice dvaju prozirnih sredstava, ona se djelomično reflektira, a djelomično prolazi u drugo sredstvo. Za dio svjetlosti koji se reflektira vrijedi zakon refleksije svjetlosti: kada se svjetlost reflektira na granici



1.2-5

Raspršeno odbijanje svjetlosti na neravnoj površini

dvaju sredstava, upadna zraka, reflektirana zraka i okomica na granicu dvaju sredstava leže u istoj ravnini, a upadni kut zrake, kut između upadne zrake i okomice na granicu sredstava, jednak je kutu reflektirane zrake. Zakon je prikazan na slikama 1.2-4 i 1.2-5.

Zakon refleksije svjetlosti: kut upada jednak je kutu refleksije.

www.element.hr

Zanimljivosti

Čestica svjetlosti, foton, ipak se može sudariti s drugim fotonom. Međutim, takvi su događaji iznimno rijetki i potpuno su nevažni u kontekstu geometrijske optike. S druge strane, u astrofizičkom kontekstu mogu biti vrlo važni za razumijevanje opažanja dalekih galaksija.

tvar	indeks loma
dijamant	2,419
cirkonij	1,923
staklo – kremeno	1,660
staklo – krunsko	1,520
benzen	1,501
glicerin	1,473
fluorit	1,434
etanol	1,361
voda	1,333
led	1,309
zrak	1,000 293

Tablica 1
Indeksi loma nekih tvari

Napomena

Onima koji žele saznati više o svjetlosti preporučujemo knjige:

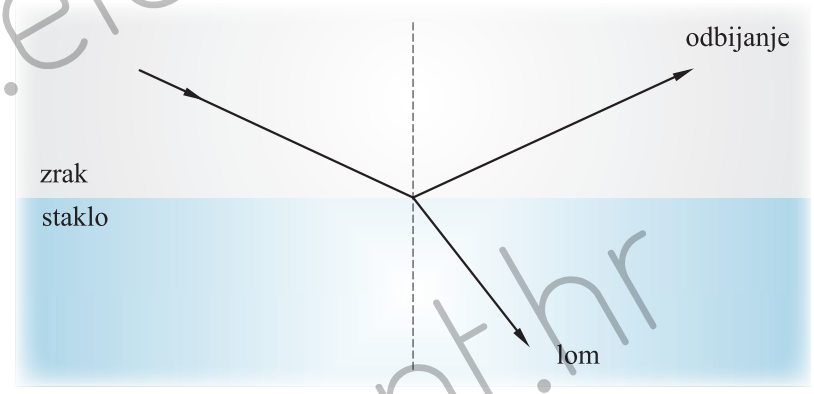
- Anđelka Ricov: **Geometrija optike**
- Ivan Supek: **Povijest fizike**

4. **Snellov zakon loma**: kada svjetlost, zraka svjetlosti, svjetlosni val, prelazi iz jednog sredstva u drugo, ona se lomi, odnosno skreće s prvobitnog smjera. Do loma svjetlosti na granici dvaju sredstava dolazi zbog toga što je brzina svjetlosti u tim sredstvima različita. Općenito je brzina svjetlosti u nekom sredstvu manja od brzine svjetlosti u vakuumu. Za opis različitih brzina svjetlosti uvodimo veličinu koju nazivamo **indeksom loma** n, a definirana je ovako:

$$n = \frac{\text{brzina svjetlosti u vakuumu}}{\text{brzina svjetlosti u sredstvu}}$$

$$n = \frac{c}{v}.$$

To je broj bez dimenzije koji je veći od jedan. Ako imamo dva sredstva različitih indeksa loma, za sredstvo čiji je indeks loma veći kažemo da je *optički gušće*. Indeksi loma nekih tvari prikazani su u tablici 1. Slika 1.2-6 prikazuje zraku na granici dvaju prozirnih sredstava koja se djelomično odbija, a djelomično prolazi u drugo sredstvo i pritom se lomi.



1.2-6
Svjetlost upada na granicu dvaju sredstava

Kada svjetlost prelazi iz sredstva u sredstvo, frekvencija se ne mijenja, odnosno vrijedi za dva sredstva.

$$v_1 = \lambda_1 f \text{ i } v_2 = \lambda_2 f$$

Dijeljenjem tih dviju relacija dobit ćemo:

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{\lambda_1}{\lambda_2}, \text{ odnosno } \frac{\lambda_1}{\lambda_2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Na temelju gornjih definicija i izraza možemo formulirati zakon loma svjetlosti. Kada zraka svjetlosti prelazi iz optički rjeđeg u optički gušće sredstvo, ona se lomi prema okomici. Pritom se upadna zraka, lomljena zraka i okomica na dva sredstva nalaze u istoj ravnini, a omjer sinusa upadnog kuta α_1 i kuta loma α_2 jednak je omjeru indeksa loma sredstva kroz koje prolazi lomna zraka n_2 i sredstva kroz koje prolazi upadna zraka n_1.

$$\frac{\sin\alpha_1}{\sin\alpha_2} = \frac{n_2}{n_1}$$

www.element.hr

Willebrord Snellius (1580.–1626.), nizozemski matematičar i fizičar, 1621. godine razvio je zakon loma svjetlosti na granici dvaju sredstava, koji danas nosi njegovo ime.

To je Snellov zakon loma svjetlosti. Omjer indeksa loma zove se relativni indeks loma $n_{1,2}$. Ako je sredstvo iz kojeg svjetlost ide vakuum, onda je $n_1 = 1$ pa je $n_2 = n$ tzv. apsolutni indeks loma.

Snellov zakon loma: omjer sinusa upadnog kuta α_1 i kuta loma α_2 jednak je omjeru indeksa loma sredstva kroz koje prolazi lomna zraka n_2 i sredstva kroz koje prolazi upadna zraka n_1.

Indeks loma nekog sredstva je broj koji pokazuje koliko se sporije svjetlost širi u tom sredstvu u odnosu na brzinu svjetlosti u vakuumu.

1.3. Fermatov princip

Nakon što smo formulirali četiri zakona geometrijske optike, postavlja se pitanje zašto zraka svjetlosti doista slijedi stazu propisanu tim zakonima. Postoji li neki fundamentalni princip koji zahtijeva takvo ponašanje zrake svjetlosti? Odgovor na to pitanje je potvrdan. **Fermatov princip** kaže da je vrijeme potrebno zraci svjetlosti da u sredstvu u kojem se giba brzinom $v = \frac{c}{n}$ prijeđe neku udaljenost minimalno. Iz tog principa možemo izvesti zakone geometrijske optike.

Pierre de Fermat (1601.–1665.), francuski odvjetnik i matematičar – amater, u optici je postavio temeljni princip iz kojeg je moguće izvesti zakon odbijanja i zakon loma. U matematici je razradio ideje koje su prethodile diferencijalnom i integralnom računu. Najpoznatiji je po posljednjem Fermatovom teoremu, koji su matematičari pokušavali riješiti 300 godina. Na kraju ga je 1993. godine dokazao britanski matematičar Andrew Wiles. Pročitajte knjigu "Fermatov posljednji teorem" Amira D. Aczela.

Iz Fermatovog principa odmah slijedi da se u homogenom sredstvu, gdje je indeks loma n svuda konstantan, svjetlost širi po pravcima, jer je najmanja udaljenost između dvije točke pravac položen tim točkama. Time iz Fermatovog principa proizlazi prvi zakon geometrijske optike.

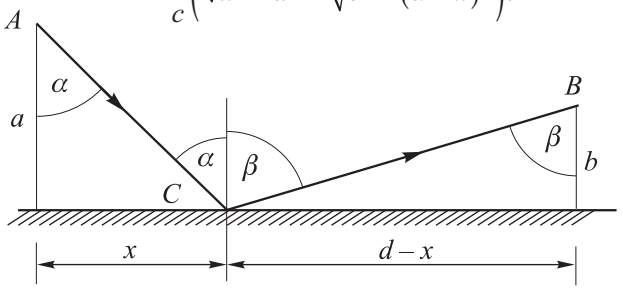
Pogledajmo sada kako možemo primijeniti Fermatov princip najmanjeg vremena na refleksiju svjetlosti.

Iznad uglačane površine, poput ravnog zrcala, nalazi se izvor svjetlosti A na udaljenosti a (slika 1.3-1). Iz izvora želimo poslati zraku svjetlosti u točku B koja se nalazi na udaljenosti b od zrcala, tako da se ona prvo reflektira na zrcalu u točki C. Projekcije A i B na zrcalu razmaknute su d. Ne znamo položaj točke C, odnosno želimo ga odrediti ne znajući zakon loma svjetlosti iz drugog odjeljka. Odredit ćemo ga na temelju Fermatovog principa najmanjeg vremena. Brzina svjetlosti u sredstvu je $v = \frac{c}{n}$. Prema slici 1.3-1, vrijeme potrebno zraci da dođe od točke A, preko točke C do točke B dobit ćemo:

$$\overline{AC} + \overline{CB} = vt_{AB} = \frac{c}{n} \cdot t_{AB}$$

$$t_{AB} = \frac{n}{c}\left(\overline{AC} + \overline{CB}\right)$$

$$= \frac{n}{c}\left(\sqrt{x^2 + a^2} + \sqrt{b^2 + (d-x)^2}\right).$$



1.3-1
Ilustracija Fermatovog principa

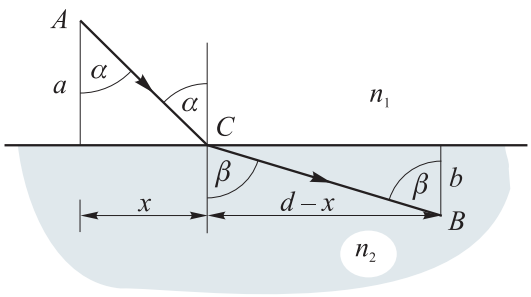
www.element.hr

Iz Fermatovog principa slijedi da vrijeme t_{AB} mora biti minimalno. Različiti položaji točke C pokazuju da će vrijeme t_{AB} biti najmanje kada je točka C smještena tako da je $\alpha = \beta$, odnosno kada je ispunjen treći zakon geometrijske optike.

Fermatov princip: svjetlost se između dviju zadanih točaka širi onim putem za koji joj treba najmanje vremena.

Fermatov princip i lom svjetlosti

Ako svjetlost prelazi iz sredstva indeksa loma n_1 u sredstvo indeksa loma n_2, odnosno ide iz točke A u točku B (slika 1.3-2), onda ona prema Fermatovom principu izabire takvu točku C na granici dva sredstva, da joj za put $A \rightarrow C \rightarrow B$ treba najmanje vremena. Potrebno je iz ranijih slika loma svjetlosti uočiti da put nije najkraći. Ovdje vidimo da vrijeme mora biti najkraće. S obzirom na to da su brzine u sredstvu 1 odnosno 2 jednake v_1 i v_2, vrijeme t_{AB} jednako je zbroju vremena t_{AC} uz brzinu v_1 i t_{CB} uz brzinu v_2.



1.3-2

Lom svjetlosti na granici dvaju sredstava različitih indeksa loma

$$t_{AB} = t_{AC} + t_{CB} = \frac{\overline{AC}}{v_1} + \frac{\overline{CB}}{v_2}$$
$$= \frac{1}{v_1}\sqrt{a^2 + x^2} + \frac{1}{v_2}\sqrt{b^2 + (d-x)^2}$$

Iz uvjeta minimalnosti vremena t_{AB} dobije se:

$$2xv_2\sqrt{b^2 + (d-x)^2} = 2(d-x)v_1\sqrt{a^2 + x^2}.$$

Prema slici 1.3-2, sinusi kutova α i β su

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

Možemo ustanoviti da vrijedi

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{v_1}{v_2}, \text{ što zbog } v_{1,2} = \frac{c}{n_{1,2}} \text{ daje:}$$
$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1}.$$

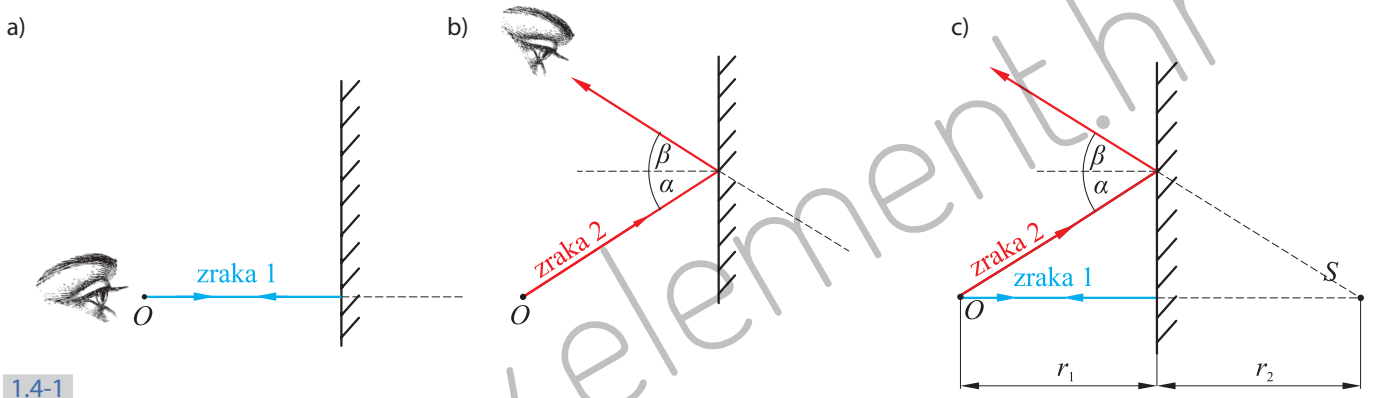
Dobili smo Snellov zakon loma iz zahtjeva da je vrijeme između dvije točke A i B minimalno.

www.element.hr

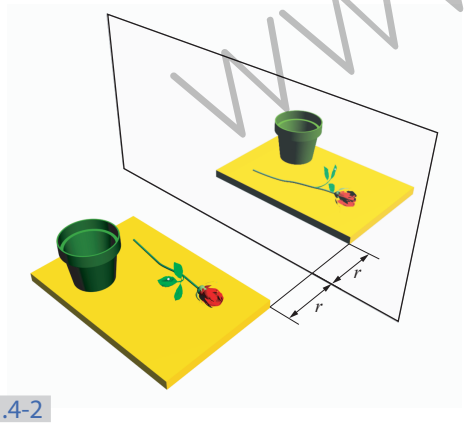
1.4. Refleksija svjetlosti

1.4.1. Ravno zrcalo

Primijenit ćemo zakon refleksije svjetlosti na nekoliko situacija koje se javljaju i u svakodnevnom životu. Osnovni problem u geometrijskoj optici je pronaći položaj slike ako su poznati parametri uglačane površine i položaj predmeta.



1.4-1
Konstrukcija slike u ravnom zrcalu

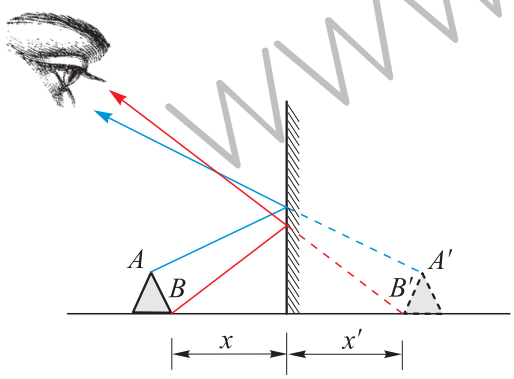


1.4-2
Slika predmeta u ravnom zrcalu

Prema slikama 1.4-1 i 1.4-2, vidimo da reflektirane zrake, koje slijede zakon refleksije svjetlosti, stvaraju prividnu ili virtualnu sliku u zrcalu. Zrake koje crtamo unutar zrcala zovemo prividne ili virtualne zrake. Pogledajmo pažljivije sliku 1.4-3.

Zrake svjetlosti izlazeći iz izvora padaju na uglačanu ravnu površinu, ravno zrcalo i reflektiraju se po zakonu refleksije svjetlosti te dolaze do oka. Pritom zrcalo od točkastog izvora svjetlosti stvara virtualnu točkastu sliku. Svojstvo optičkog sustava da daje vjernu, oštru sliku zove se stigmatičnost. Iz geometrije slike 1.4-3 vidimo da je udaljenost x predmeta od zrcala Z jednaka udaljenosti x' prividne slike od zrcala. Formalno je jednakost $x = x'$ jednadžba ravnog zrcala. Međutim, kasnije ćemo uvesti dogovor o predznacima gdje će predznak položaja virtualne slike biti negativan, što ustvari znači da je ispravna jednadžba ravnog zrcala $x = -x'$ ili napisano malo drukčije:

$$\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = 0 .$$

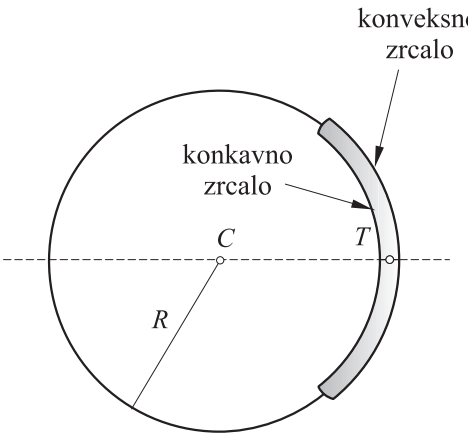


1.4-3
Konstrukcija slike predmeta u ravnom zrcalu

To je jednadžba ravnog zrcala, gdje je x udaljenost predmeta od ravnog zrcala, a x' udaljenost slike. Ako je $x' < 0$, dogovorno je uzeto da je slika virtualna ili prividna. Tako možemo iskazati princip stvaranja slike ravnog zrcala. Ravno zrcalo stvara prividnu ili virtualnu sliku predmeta. Virtualna slika je jednako udaljena od zrcala kao i sam predmet. Pri tome je virtualna ili prividna slika dobivena s pomoću virtualnih zraka, na njihovim sjecištima.

Nakon što izvedemo jednadžbu sfernog zrcala, postat će jasno zašto je taj neobičan zapis dobar. Sferno zrcalo prelazi u ravno ako uzmemo da je polumjer zakrivljenosti ravnog zrcala beskonačan. Tada prirodno dobivamo gornju neobičnu jednadžbu.

www.element.hr



1.4-4

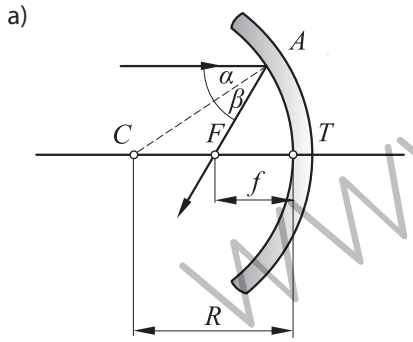
Sferna zrcala: konkavno ili udubljeno i konveksno ili izbočeno

1.4.2. Sferno zrcalo

Razmotrimo dio uglačane površine ljuske kugle. Ako je uglačana površina udubljena, govorimo o udubljenom ili konkavnom **sfernom zrcalu**, a ako je uglačana površina ispupčena govorimo o ispupčenom ili konveksnom sfernom zrcalu, prema slici 1.4-4.

Sferno zrcalo je dio plohe kugle koji reflektira svjetlost.

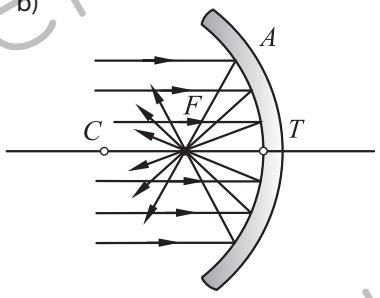
Ovdje želimo istražiti stvaranje slike na sfernom zrcalu. Nalazimo se pred istim problemom kao i kod ravnog zrcala. Znamo gdje se nalazi predmet A u odnosu na zrcalo, znamo parametre sfernog zrcala, njegov polumjer zakrivljenosti R. Moramo odrediti položaj slike B koju sferno zrcalo stvara od predmeta. Problem ćemo najprije riješiti za udubljeno, konkavno sferno zrcalo (slika 1.4-5).



$$CF = AF = FT$$

$$FT = \frac{1}{2}CT$$

$$f = \frac{R}{2}$$



Nalazi li se predmet u beskonačnosti, slika nastaje u žarištu

1.4-5

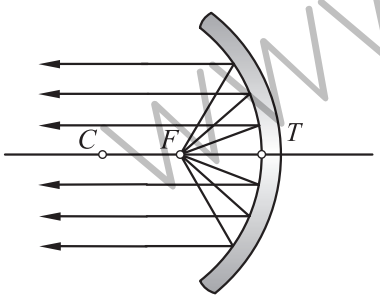
Refleksija na konkavnom zrcalu

Prvi korak je istražiti gdje i kako se reflektiraju zrake svjetlosti koje na različite načine padaju na udubljeno, konkavno sferno zrcalo. Pogledajmo sliku 1.4-5.

Na njoj je nacrtano udubljeno, konkavno sferno zrcalo polumjera zakrivljenosti R. Točka C je središte zakrivljenosti zrcala. Točka T je tjeme zrcala, a pravac na kojem leže točke C i T zove se optička os. Zrake koje dolaze na zrcalo odbijaju se po zakonima geometrijske optike, odnosno po zakonu refleksije svjetlosti.

Prema slikama 1.4-5 a i b, vidimo da se zrake koje dolaze paralelno s optičkom osi sijeku u jednoj točki F, koja raspolavlja udaljenost $\overline{CT}$. Točku F zovemo žarište ili fokus, a udaljenost od tjemena T do fokusa F zovemo žarišnom udaljenošću.

Žarište ili fokus je točka koja se kod sfernog zrcala nalazi na polovištu udaljenosti između centra zakrivljenosti C i tjemena T. Žarišna udaljenost jednaka je udaljenosti od žarišta F do tjemena T i jednaka je polovini polumjera zakrivljenosti R: $f = \frac{R}{2}$.



1.4-6

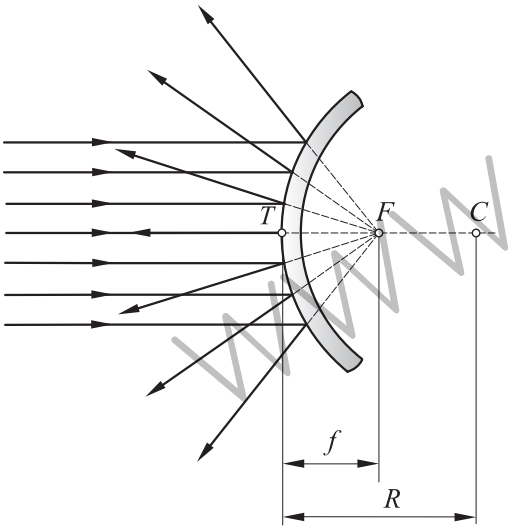
Točkasti izvor u žarištu konkavnog zrcala

Često se za zrake koje dolaze paralelno s optičkom osi kaže da dolaze iz beskonačnosti. Za žarište vrijedi i obrnuto. Ako je točkast izvor u žarištu, tada će zrake nakon refleksije na zrcalu biti paralelne optičkoj osi.

www.element.hr

Napomena

Svaku zakrivljenu površinu možemo zamisliti kao malu lokalno ravnu površinu, jednako kao što nam Zemlja izgleda lokalno ravna. Tu malu ravno plohu na sfernom zrcalu nalazimo tako da u točki u kojoj zraka svjetlosti pogodi zrcalo povučemo polumjer od središta zakrivljenosti *C* do te točke i zatim u toj točki povučemo okomicu na polumjer. Dobili smo lokalno ravnu plohu od koje se svjetlost odbija po zakonima refleksije.



1.4-7

Refleksija paralelnih zraka svjetlosti na konveksnom zrcalu

Zrake koje prolaze kroz centar zakrivljenosti *C* i padaju na zrcalo, reflektiraju se same u sebe, jer imaju smjer polumjera *R* koji je uvijek okomit na površinu zrcala. Slično ponašanje zraka svjetlosti možemo dobiti i na ispupčenom ili konveksnom zrcalu, koje je prikazano na slici 1.4-7.

S obzirom na to da znamo kako se reflektiraju karakteristične zrake, možemo ih opisati.

Zraka 1: zraka koja na zrcalo upada usporedno s njegovom osi te pri refleksiji prolazi kroz žarište konkavnog zrcala

Zraka 2: zraka koja na zrcalo dolazi kroz žarište i reflektira se usporedno s osi konkavnog zrcala

Zraka 3: zraka koja na zrcalo dolazi kroz središte zakrivljenosti i reflektira se po istome putu.

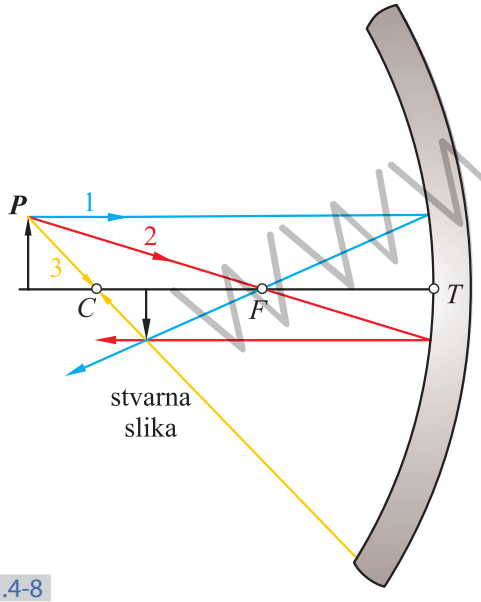
Kod konveksnih zrcala zrake konstruiramo na sličan način, kao što prikazuje slika 1.4-9.

Zraka 1: zraka koja dolazi na zrcalo usporedno s njegovom osi i odbija se tako da njezin zamišljeni produžetak prolazi kroz žarište konveksnog zrcala

Zraka 2: zraka koja na konveksno zrcalo dolazi tako da njezin zamišljeni produžetak ide kroz žarište i reflektira se usporedno s osi zrcala

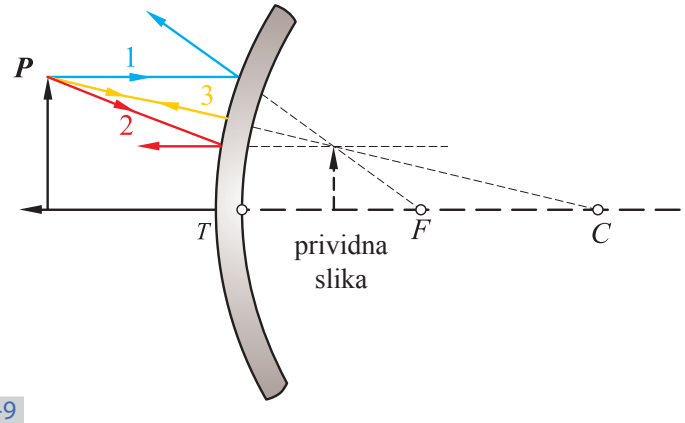
Zraka 3: zraka koja na zrcalo upada okomito i reflektira se natrag po istome putu, a ima zamišljen produžetak koji prolazi kroz središte zrcala.

Na slici 1.4-8 nacrtan je svijetli predmet *P* koji se nalazi na nekoj udaljenosti od zrcala. Iz njega izlaze zrake svjetlosti i reflektiraju se na zrcalu. Mi smo, povlačeći karakteristične zrake, prema danim uputama, konstruirali sliku predmeta. Bilo je dovoljno uzeti dvije karakteristične zrake i dobiti položaj vrha strelice. Treća zraka nam je služila samo kao kontrola. Na isti je način prema odgovarajućim uputama konstruirana i slika predmeta kod konveksnog zrcala (slika 1.4-9). Te se dvije slike razlikuju. Prva je realna, nalazi se ispred zrcala i nju možemo gledati tako da je projiciramo na neku ravnu plohu, primjerice zastor. Slika dobivena konveksnim, ispupčenim zrcalom je virtualna, prividna i nju ne možemo dobiti na zastoru. Okom ne možemo izravno vidjeti realnu sliku, nego je vidimo kada je uhvatimo na zastor. Vidimo virtualnu sliku sa slike 1.4-9, jednako kao što smo vidjeli i virtualnu sliku dobivenu ravnim zrcalom.



1.4-8

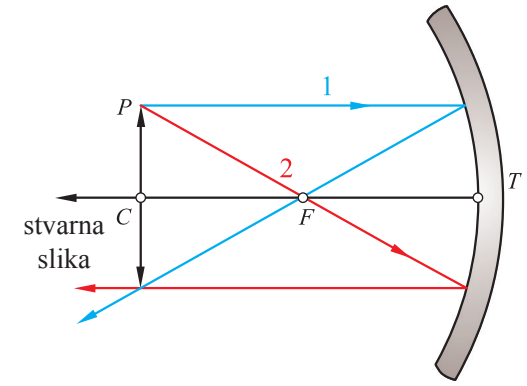
Konstrukcija slike dobivene konkavnim zrcalom



1.4-9

Konstrukcija slike dobivene konveksnim zrcalom

www.element.hr



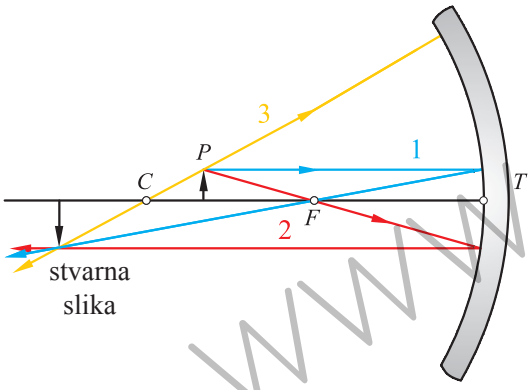
1.4-10

Predmet u središtu zakrivljenosti konkavnog zrcala

Pomicanjem predmeta po optičkoj osi, dolazimo do nekoliko karakterističnih položaja predmeta. Primjerice, kad je premet u središtu zakrivljenosti C, prema slici 1.4-10, tada konkavno sferno zrcalo stvara njegovu realnu sliku na istoj udaljenosti, a slika je obrnuta i iste veličine kao predmet. Tu sliku je moguće uhvatiti na zastor. To je definicija realne slike.

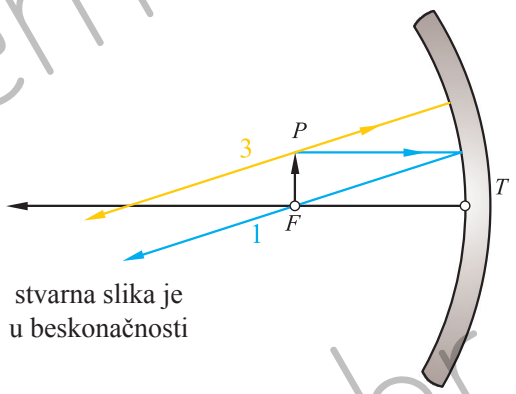
Realnu sliku dobivenu optičkim sustavom možemo projicirati na zastor. Virtualnu sliku ne možemo uhvatiti, projicirati na zastor.

Približavanjem predmeta prema zrcalu, od središta C prema žarištu F, dobivat ćemo, prema slici 1.4-11, i dalje realnu sliku, koja je sada uvećana. Kada se predmet nalazi u žarištu F, reflektirane zrake su međusobno paralelne. Kada bismo uspjeli nekako doći u beskonačnost, tamo bismo vidjeli sliku tog premeta (slika 1.4-12). Dalje približavanje predmeta udubljenom zrcalu (slika 1.4-13) rezultira prividnom slikom, koja je uspravna i povećana. To je i situacija opisana u pokusu na sljedećoj stranici.



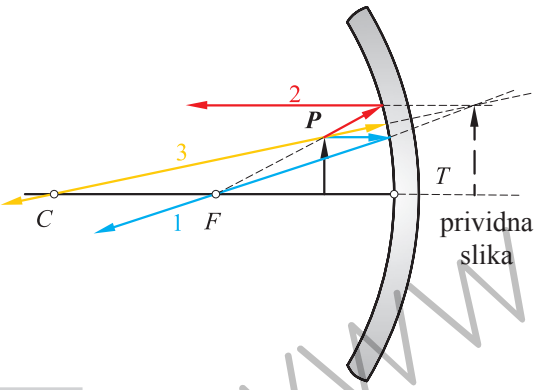
1.4-11

Predmet između središta i žarišta konkavnog zrcala



1.4-12

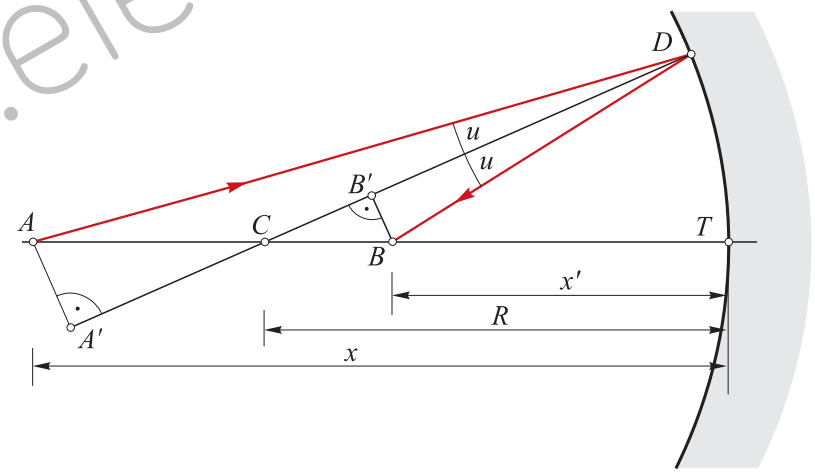
Predmet u žarištu konkavnog zrcala



1.4-13

Predmet između žarišta i tjemena konkavnog zrcala

Znamo konstruktivno riješiti problem nalaženja slike kod sfernog zrcala za različite situacije. Sada nas zanima kako možemo, uz poznavanje karakteristike zrcala, izračunati polumjer zakrivljenosti R, položaj, karakter i veličinu slike, ako znamo gdje se nalazi predmet i kako je velik.



1.4-14

Spojnicu središta zakrivljenosti zrcala (C) i točke upada zrake svjetlosti (D) nazivamo normalom. U odnosu na normalu, kut upada jednak je kutu refleksije.

www.element.hr

Zanimljivosti

Zakrivljena zrcala ne rade se isključivo od sferne, kuglaste površine. Česta su parabolična zrcala, koja imaju niz odlika zbog kojih se rabe u astronomskim uređajima. Također postoje eliptična, toroidalna, hiperbolična i druga zrcala, odnosno zrcala općenite površine čiji je matematički oblik dobiven računalnim izračunom prema specifičnim potrebama uređaja u koje se zrcalo ugrađuje.

Prema slici 1.4-14, svijetli predmet iz kojeg izlaze zrake svjetlosti nalazi se na optičkoj osi, dakle na pravcu na kojem se nalazi i centar zakrivljenosti zrcala C. Predmet je za x udaljen od zrcala ($\overline{AT} = x$), a ono nakon refleksije zrake u točki D na optičkoj osi stvara sliku B udaljenu x' od zrcala ($\overline{BT} = x'$).

Da bismo odredili udaljenost x', poznavajući x i R, prema slici 1.4-14, prvo ćemo produljiti spojnicu CD i na nju pod pravim kutom "projiciramo" točke A i B pa ćemo dobiti točke A' i B'. Uočimo da imamo dva para sličnih trokuta, odnosno:

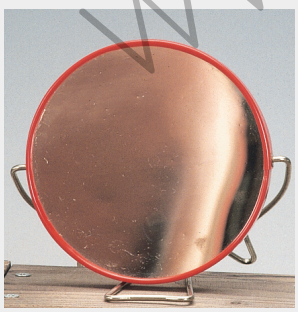
$$\Delta(AA'C) \cong \Delta(BB'C)$$

$$\Delta(AA'D) \cong \Delta(BB'D).$$

Prva dva trokuta su slična zato što imaju po jedan pravi kut, a jednaki su im i kutovi kod vrha C. Druga dva trokuta su također pravokutna jer su im jednaki kutovi kod D, prema zakonu refleksije svjetlosti. Iz sličnosti trokuta slijedi jednakost omjera odgovarajućih stranica:

$$\frac{\overline{AA'}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{BB'}}{\overline{BC}} \text{ i } \frac{\overline{AA'}}{\overline{AD}} = \frac{\overline{BB'}}{\overline{BD}}.$$

Pokus



Kozmetička zrcala obično su dvostrana. Jedno zrcalo je ravno, a drugo udubljeno. Kada udubljenom zrcalu dođemo sasvim blizu, ugledamo svoj golemi nos, oči, obrve i trepavice. Zrcalo je stvorilo virtualnu, uspravnu, povećanu sliku koju možemo vidjeti. Ako se udaljimo od zrcala, slika nestaje. Kada se još udaljimo, u zrcalu ćemo ugledati svoju obrnutu sliku, iako sve skupa izgleda prilično loše. Takva su zrcala optički neupotrebljiva, no ipak dovoljno dobra za kratki pokus, vađenje trepavice iz oka ili provjeru šminke.

Dijeljenjem lijevih i desnih strana dobit ćemo omjer:

$$\frac{\overline{AD}}{\overline{AC}} = \frac{\overline{BD}}{\overline{BC}}.$$

Ako točka D nije daleko od tjemena T, tada je zraka koja ide od A do D, koja je blizu optičkoj osi, tzv. paraksijalna zraka. Gotovo ćemo uvijek raditi s paraksijalnim zrakama. U tom je slučaju:

$$\overline{AD} \simeq \overline{AT} = x \text{ i } \overline{BD} \simeq \overline{BT} = x'$$

i kako je egzaktno:

$$\overline{AC} = x - R \text{ i } \overline{BC} = R - x',$$

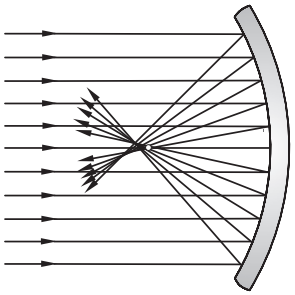
uvrstivši te izraze u početnu jednakost dobit ćemo

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

Time je postignut cilj: Dobili smo odredbenu jednadžbu za x', uz poznat R i x. Međutim, uobičajeno je gornju jednadžbu izraziti u malo drukčijoj formi. Naime, nakon množenja s nazivnicima $x - R$ i $R - x'$ i dijeljenjem s $xx'R$, dobit ćemo:

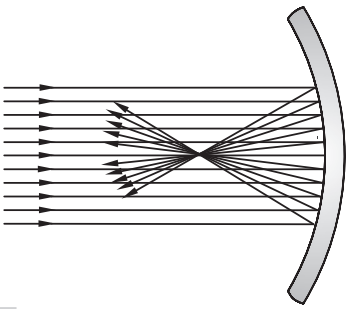
$$\boxed{\frac{1}{x} + \frac{1}{x'} = \frac{2}{R}.}$$

www.element.hr



1.4-15

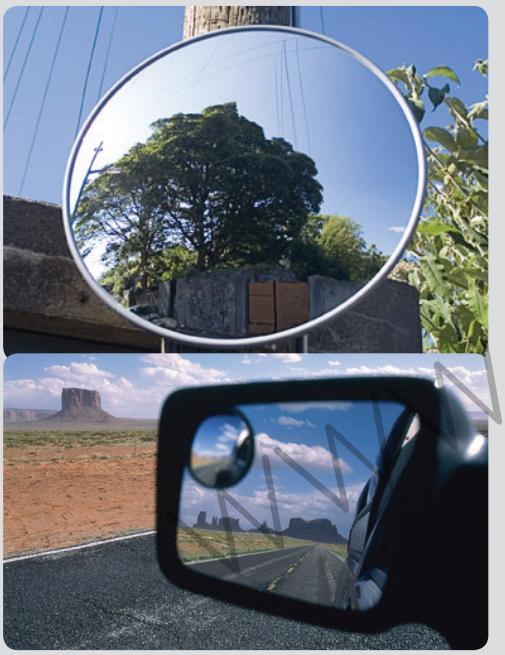
Sferno zrcalo: sferna aberacija. Usporedne zrake koje su daleko od optičke osi ne prolaze točno kroz žarište.



1.4-16

Parabolično zrcalo. Sve usporedne zrake nakon refleksije prolaze kroz žarište.

Zanimljivosti



Zrcala u automobilima (retrovizori) su ispupčena. Ona vozačima proširuju vidno polje. Također, divergentna zrcala omogućuju sigurnije odvijanje prometa na nepreglednim raskrižjima.

To je jednadžba sfernog zrcala, gdje je x udaljenost predmeta od zrcala, tjemena T, x' je udaljenost slike od zrcala, a R je polumjer zakrivljenosti zrcala. Potrebno se podsjetiti da smo tu jednadžbu izveli uz aproksimaciju da zrake svjetlosti idu blizu optičke osi. Dakle, ta jednadžba vrijedi za paraksijalne zrake. Ponekad umjesto desne strane oblika $\frac{2}{R}$ pišemo i $\frac{1}{f}$, gdje je f žarišna udaljenost sfernog zrcala, odnosno:

$$\frac{1}{x}+\frac{1}{x'}=\frac{1}{f} \quad \text{ili} \quad \frac{f}{x}+\frac{f}{x'}=1.$$

Ako se ne ograničimo na zrake bliske optičkoj osi, nastaje situacija prikazana na slici 1.3-15. Dolazi do sferne aberacije, koja kvari kvalitetu slike, stigmatičnost. Sve se zrake ne reflektiraju u istu točku i umjesto točkaste slike točkastog izvora dobivamo razmazanu sliku. Tome se može doskočiti ako se umjesto sfernog zrcala rabi parabolično zrcalo sa slike 1.4-16. Parabolična zrcala je, istina, puno teže proizvesti, ali kod njih se paralelne zrake doista sijeku u jednoj točki.

Većina reflektirajućih teleskopa ima parabolična zrcala, jer je kod njih vrlo važno od točkastog izvora dobiti točkastu sliku.

Jednadžbi sfernog zrcala potrebno je dodati pravilo za određivanje predznaka odgovarajućih veličina (x, x' i R) pa će ona postati univerzalna jednadžba koja će vrijediti za bilo koje, udubljeno ili ispupčeno, sferno zrcalo i za svaku situaciju, odnosno za svaki položaj predmeta i slike. Prema oznakama na slici 1.4-14 vrijedi:

- kad su točke A, B ili C s lijeve strane tjemena T, njihove su pripadajuće udaljenosti pozitivne:
  $x > 0$, $x' > 0$, i $R > 0$
- kad su točke A, B ili C s desne strane od tjemena T, njihove su pripadajuće udaljenosti negativne:
  $x < 0$, $x' < 0$ ili $R < 0$.

Općenitije:

- udubljeno (konkvano) zrcalo ima $R > 0$ i $f > 0$, a izbočeno (konveksno) $R < 0$ i $f < 0$
- ako je predmet ispred zrcala, tada je $x > 0$, a ako je iza zrcala, tada je $x < 0$
- ako je slika ispred zrcala, tada je $x' > 0$, a ako je iza zrcala, tada je $x' < 0$.

Ako je polumjer zakrivljenosti negativan, odnosno ako je centar zakrivljenosti C zdesna od T, govorimo o konveksnom sfernom zrcalu.

Veličina slike ovisi o veličini predmeta, ali i o položaju predmeta, odnosno udaljenosti x prema zrcalu. Za opis odnosa veličine predmeta i veličine slike uvodimo veličinu m koju zovemo transverzalno povećanje, koja se ponekad zove i lateralno povećanje, a definirana je ovako:

$$m \equiv \frac{y'}{y}, \quad \text{a za sferno zrcalo to je} \quad m = -\frac{x'}{x}.$$

Ako je $m < 0$, slika je obrnuta, a za $|m| > 1$ je uvećana. U tablici 2 popisan je niz mogućih slučajeva položaja predmeta i slike kod udubljenog i ispupčenog zrcala.

www.element.hr

Zanimljivosti

Iz jednadžbe sfernog zrcala lako je dobiti "jednadžbu ravnog zrcala" $x = -x'$, vodeći računa o dogovoru o predznacima, tako da jednostavno stavimo da je polumjer zakrivljenosti ravnog zrcala beskonačan: $R = \infty$.

zrcalo	udubljeno	udubljeno	udubljeno	udubljeno	udubljeno	ispupčeno
	$R > 0$	$R > 0$	$R > 0$	$R > 0$	$R > 0$	$R < 0$
predmet	$x > R$	$x = R$	$f < x < R$	$x = f$	$x < f$	bilo gdje
slika	$x' > 0$	$x' = a$	$x' > 0$	$x' = +\infty$	$x' < 0$	$x' < 0$
povećanje	$m < 0$	$m < 0$	$m < 0$	–	$m > 0$	$m > 0$
karakter slike	realna, obrnuta, smanjena	realna, obrnuta	realna obrnuta povećana	–	virtualna, uspravna, povećana	virtualna, uspravna, smanjena

Tablica 2

Stvaranje slike kod sfernog zrcala

Primjer 1

Koliki mora biti polumjer zakrivljenosti zrcala ako želimo dobiti tri puta povećanu realnu sliku predmeta koji je postavljen na 10 cm od sfernog zrcala?

Rješenje:

Povećanu sliku moguće je dobiti samo udubljenim sfernim zrcalom (tablica 2) ako je predmet smješten unutar žarišne udaljenosti. Transverzalno povećanje je $m = 3$ pa je $x' = -3x$ i $x = 10$ cm. Dakle, iz jednadžbe sfernog zrcala je $R = 30$ cm.

Primjer 2

Udubljena ili konkavna zrcala često se koriste pri šminkanju ili brijanju. Koliko je puta lice veće u takvom zrcalu polumjera zakrivljenosti 24 cm ako je osoba od njega udaljena 6 cm?

Rješenje:

Jednadžba zrcala je:

$$\frac{1}{x}+\frac{1}{x'}=\frac{2}{R},$$

gdje je x udaljenost predmeta od tjemena zrcala, u ovom slučaju od lica osobe, a x' udaljenost slike od tjemena zrcala. Uvrštavanjem u gornji izraz slijedi:

$$\frac{1}{6\text{ cm}}+\frac{1}{x'}=\frac{2}{24\text{ cm}}$$

$$\frac{1}{x'}=\frac{1}{12\text{ cm}}-\frac{1}{6\text{ cm}}$$

$$\frac{1}{x'}=-\frac{1}{12\text{ cm}}$$

$$x'=-12\text{ cm}.$$

Povećanje m je:

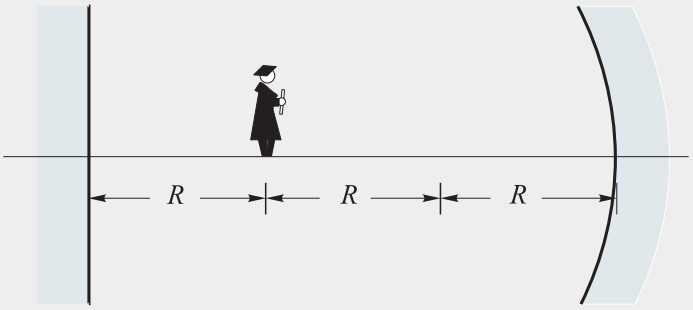
$$m=-\frac{x'}{x}$$

$$m=-\frac{-12\text{ cm}}{6\text{ cm}}=2.$$

www.element.hr

Primjer 3

Svijetao predmet visok $y = 3$ cm nalazi se na optičkoj osi udaljen $2R$ od udubljenog sfernog zrcala polumjera zakrivljenosti R. S druge strane predmeta, na udaljenosti R nalazi se ravno zrcalo. Odredite razmak između dvije slike dobivene sfernim zrcalom, a nastale od predmeta i njegove slike u ravnom zrcalu. Koliki je omjer veličina dviju slika?



Rješenje:

S obzirom na to da je $x_1 = 2R$, iz jednadžbe sfernog zrcala dobit ćemo:

$$x_1' = \frac{aR}{2a - R} = \frac{2}{3} \cdot R .$$

To je slika nastala od stvarnog predmeta. Zbog ravnog se zrcala na optičkoj osi stvara imaginarni predmet, odnosno imaginarna slika stvorena u ravnom zrcalu postaje imaginarni predmet za sferno zrcalo. Njegova udaljenost od sfernog zrcala je $x_2 = 4R$ pa je položaj druge slike jednak

$$x_2' = \frac{4}{7} \cdot R .$$

Razmak između dviju slika je d, odnosno:

$$d = |x_1' - x_2'| = \frac{2}{21} \cdot R .$$

Povećanje prve slike je

$$m_1 = -\frac{x_1'}{x_1} = -\frac{1}{3},$$

odnosno prva slika je obrnuta (predznak minus) i smanjena ($|m| < 1$). Za drugu sliku je

$$m_2 = -\frac{x_2'}{x_2} = -\frac{1}{7} .$$

I ta je slika obrnuta i umanjena. Omjer povećanja je $\mu = \frac{m_1}{m_2} = \frac{7}{3}$.

www.element.hr