

# Geometrijska optika

---

Svjetlost ima dualnu prirodu. Po nekim svojim svojstvima ona se ponaša kao svjetlost, a po drugim kao talas. Fenomeni koji su vezani za prostiranje svjetlosti objašnjavaju se njenom talasnom prirodom. Svjetlost se ponaša kao elektromagneti talas, a njena brzina zavisi od električnih i magnetnih svojstava sredine kroz koju se prostire. Talasna dužina vidljive svjetlosti nalazi se u opsegu koji ljudsko oko može da opazi i to od 380 do 760 nm.

**Geometrijska optika** se bavi proučavanjem svjetlosti aproksimirajući svjetlosni talas zrakom i pretpostavljajući da se svjetlost kao talas kreće pravolinijski.

**Svjetlost se kroz homogenu sredinu prostire pravolinijski kada su dimenzije prepreka, objekata ili elemenata optičkog sistema mnogo veće od talasne dužine svjetlosti.**

Pravac svjetlosti se može promijeniti pri nailasku svjetlosti na graničnu površinu dvije sredine: Kada svjetlost dođe do granične površine dvije različite supstancijalne sredine djelimično se reflektuje (odbije), a djelimično refraktuje (prelomi) što zavisi od upadnog ugla (ugao pod kojim svjetlost pada na graničnu površinu u odnosu na normalu na tu površinu) kao i od orijentacije vektora električnog polja, odnosno njegove polarizacije.

Geometrijska optika ima veliki značaj pri proučavanju ogledala i sočiva, konstruisanju optičkih elemenata i instrumenata (mikroskopi, teleskopi, fotoaparati itd.).

## Fermatov princip

Pravilo pravolinijskog prostiranja svjetlosti važi za homogenu sredinu. Takođe, **svjetlost se prostire po putu za koji joj je potrebno najmanje vremena – Fermatov princip**. Pretpostavimo da se svjetlosni zrak kreće od tačke 1 do tačke 2 i neka na elementarnom dijelu putu ima brzinu  $v=c/n$ , gdje je  $c$  brzina svjetlosti u vakumu, a  $n$  indeks prelamanja sredine. Put  $ds$  svjetlosni zrak prelazi za vrijeme  $dt$ :

$$dt = \frac{ds}{v} = \frac{1}{c} n ds$$

dok cio put svjetlost pređe za vrijeme:

$$\tau = \frac{1}{c} \int_1^2 n ds$$

gdje veličina  $nds$  predstavlja optičku dužinu puta.

**Da bi vrijeme bilo minimalno i optička dužina puta mora biti minimalna.**

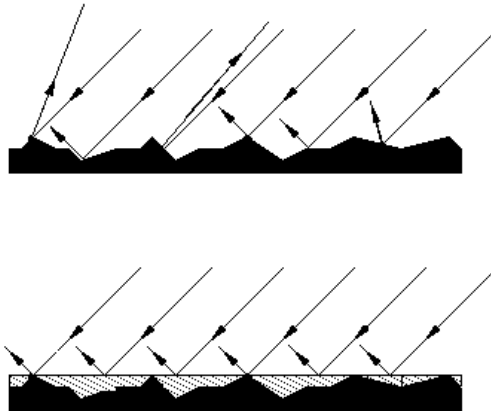
Kada se svjetlost prostire kroz nehomogenu sredinu dolazi do zakrivljenja svjetlosnih zraka čime se objašnjava prividan položaj nebeskih tijela koje vidi posmatrač na Zemlji. Razlog tome je što svjetlosni zrak koji se kreće kroz atmosferu trpi niz sukcesivnih promjena (prelamanja) dok ne stigne na Zemlju jer kako se približava Zemlji gustina atmosfere raste, indeks prelamanja sredine raste, a brzina svjetlosti opada. Na primjer, kada se vidi cijela sunčeva lopta (pri izlasku i zalasku Sunca) to je samo prividni položaj jer je Sunce podignuto iznad horizonta za oko 0.5 °.

## Zakoni odbijanja i prelamanja svjetlosti

Odbijanje (refleksija) svjetlosti na nekoj površini može biti ogledalska i difuzna što zavisi od stanja reflektirajuće površine. Ogledalska refleksija se javlja na ravnim i glatkim površinama. Tada snop reflektovanih zraka poslije odbijanja ostaje paralelan. Međutim, kako svjetlost nailazi i na neravne

# Geometrijska optika

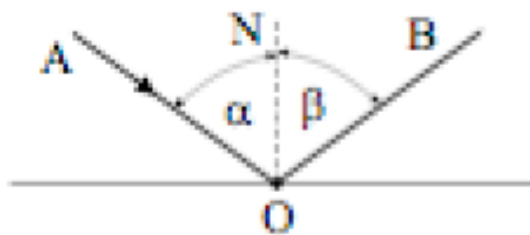
površine u praksi se susrećemo i sa difuznom refleksijom kod koje se reflektovani zraci odbijaju u svim pravcima u prostoru.



Slika 1. Difuzna i ogledalska refleksija. Izvor: <https://svefefizika.wordpress.com/video-8/difuzna-svetlost/>

Neka na glatku ravnu površinu pada svjetlosni zrak AO (upadni zrak) pod upadnim uglom  $\alpha$  u odnosu na normalu na graničnu površinu (Slika 1). U tački O upadani zrak se odbija od površine u pravcu OB (reflektovani zrak) pod uglom refleksije  $\beta$ .

**Zakon odbijanja svjetlosti glasi:** Ugao refleksije svjetlosnog zraka jednak je njegovom upadnom uglu ( $\alpha = \beta$ ). Upadni zrak, normala i odbijeni zrak leže u istoj ravni.

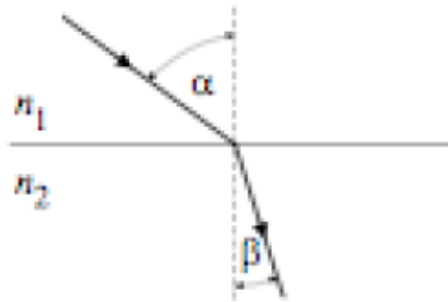


Slika 2. Zrak AO pada na graničnu površinu dvije sredine od uglom  $\alpha$ , a odbija se kao zrak OB pod uglom  $\beta$ .

Pretpostavimo sada da svjetlosni zrak u sredini 1 pada pod uglom  $\alpha$  (koji nije  $90^\circ$ ) na razdvojnu površinu dvije supstancijalne sredine indeksa prelamanja  $n_1$  i  $n_2$  i prelama se pod uglom  $\beta$  u sredini 2 (Slika 2). Odnos upadnog ugla i ugla prelamanja može se definisati preko Dekart-Snelijusovog zakona prelamanja svjetlosti:

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

Dakle, **odnos sinusa upadnog ugla i sinusa prelomnog ugla za dvije date sredine je stalna veličina koja je jednaka odnosu apsolutnog indeksa prelamanja druge i prve sredine.** Upadni, prelomljeni zrak i normala leže u istoj ravni.



Slika 3. Svjetlosni zrak pod uglom  $\alpha$  upada na graničnu površinu supstancijalnih sredina indeksa prelamanja  $n_1$  i  $n_2$  i prelama se pod uglom  $\beta$ .

## Formiranje slike odbijanjem svjetlosti

Uglačane površine čija je jedna strana reflektivna nazivaju se ogledala. U zavisnosti od oblika uglačane površine mogu biti ravna i sferna (konkavna i konveksna).

### Ravna ogledala

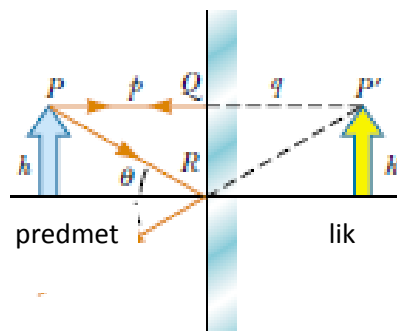
Posmatrajmo najjednostavniji slučaj odbijanja svjetlosti na ravnom ogledalu prikazanom na Slici 3.

Predmet  $P$  nalazi se ispred ravnog ogledala na odstojanju  $p$ . Sa predmeta polazi beskonačno veliki broj zraka koji se odbijaju od ogledala pri čemu je za svaki od njih upadni ugao jednak uglu refleksije u skladu sa zakonom odbijanja svjetlosti. Međutim, za dobijanje lika ovog predmeta dovoljno je posmatrati dva zraka koji polaze sa vrha predmeta  $P$ . Prvi zrak se kreće paralelno sa glavnom optičkom osom, odbija se od ogledala i vraća nazad. Drugi zrak dolazi do tjemena ogledala, pod uglom  $\theta$  u odnosu na glavnu optičku osu i odbija se nazad pod istim uglom. Pošto se reflektovani zraci nigdje ne sijeku potrebno ih je produžiti kako bi se dobio lik. To znači da je lik imaginaran, a produžavanjem zraka dobija se sa druge strane ogledala lik veličine  $h'=h$  na odstojanju  $q$  od ogledala, pri čemu je  $q=p$ .

Slike predmeta nastale odbijanjem od ogledala se dijele na:

- **Realne** - slika koja nastaje kada svjetlosni zraci prolaze kroz ogledalo i divergiraju u tački u kojoj se nalazi slika.
- **Virtuelne** (imaginarne) - slika nastaje kada svjetlosni zraci ne prolaze kroz tačku u kojoj se nalazi slika, ali se u njoj pojavljuje divergencija.

Realne slike se mogu prikazati na ekranu (kao kod filma) za razliku od imaginarnih.



Slika 4. Odbijanjem zraka koji se kreću od predmeta  $P$  ka ogledalu nastaje imaginaran lik  $P'$  a druge strane ogledala. Lik je na istom odstoajnju od ogledala kao i predmet, iste je veličine i uspravan.

# Geometrijska optika

Slika formirana pomoću ravnog ogledala ima sljedeće karakteristike:

- Slika se nalazi na istoj udaljenosti iza ogledala kao i predmet ispred ogledala.

$$U = h' / h = 1 - \text{uvecanje ravnog ogledala}$$

$$h' = h$$

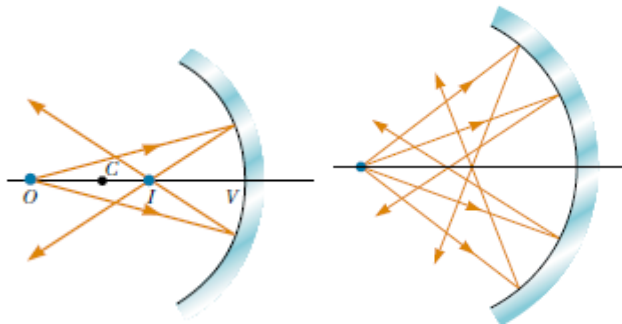
Slika nije uvećana, imaginarna je i uspravna i ima inverziju naprijed-nazad.

## Slike formirane pomoću sfernih ogledala

Kod sfernih ogledala reflektivna površina ima oblik dijela sfere, a u zavisnosti od toga da li se zraci odbijaju od unutrašnje ili od spoljašnje površine ogledala mogu biti konkavna (izdubljena) i konveksna (ispupčena).

### Izdubljena (konkavna) ogledala

Posmatrajmo zrake koji se reflektuju od konkavnog sfernog ogledala (izdubljeno) odnosno od unutrašnje strane sferne površine (Slika 4). Neka je u tački O postavljen predmet. Nakon odbijanja zraka od ogledala dobija se lik predmeta označen sa I u tački u kojoj se sijeku reflektovani zraci. Takođe se može desiti da se reflektovani zraci ne sijeku u jednoj već u više tačaka i tada se javlja sferna aberacija što za posljedicu ima razmazanu sliku kao što je prikazano na Slici 4 (b).



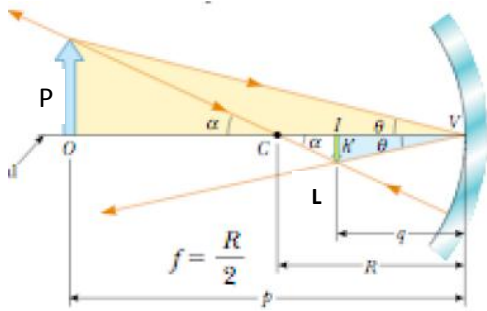
Slika 5. Predmet O se nalazi ispred izdubljenog ogledala. Nakon refleksije od ogledala svi reflektovani zraci se sijeku u nekoj tački I gdje je smješten lik ovo predmeta. Ako zraci koji padaju sa objekta na površinu ogledala zaklapaju veliki ugao sa glavnom osom, neće se sijeci u jednoj tački – efekat sferne aberacije (nejasna slika).

Posmatrajmo sada predmet visine  $h$  postavljen ispred sfernog ogledala na udaljenosti  $p$  koja je veća od  $R$  (Slika 5). Na slici je sa  $C$  označen centar krivine ogledala, a to je centar sfere koja odgovara krivini refleksione površine, a poluprečnik radijusa krivine sfernog ogledala označen je sa  $r$ . Sa  $F$  je označena žiža (fokus), a to je tačka u kojoj se sijeku svjetlosni zraci bliski i paralelni optičkoj osi nakon odbijanja. Rastojanje niže od tjemena ogledala naziva se žižna daljina i označava sa  $f$ . Žižna daljina i poluprečnik radijusa krivine sfernog ogledala povezani su izrazom:

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

Za formiranje lika predmeta dovoljna su dva karakteristična zraka. Prvi zrak se kreće od vrha predmeta ka tjemenu ogledala i zaklapa ugao  $\theta$  sa glavnom optičkom osom, odbija se pod istim uglom  $u$  odnosu na glavnu optičku osu. Drugi zrak se kreće sa vrha predmeta kroz centar krivine  $C$ , pada na ogledalo i odbija se u istom pravcu. Reflektovani zraci se sijeku u jednoj tački koja predstavlja vrh lika  $L$ , a njegovo podnožje nalazi se na glavnoj optičkoj osi.

## Geometrijska optika



Slika 6. Formiranje lika kod sfernog izdubljenog ogledala kada se predmet nalazi na rastojanju većem od centra krivine ogledala gdje je R - radijus krivine, C - centar krivine ogledala, O – predmet, I - slika predmeta u ogledalu i CV - glavna optička osa, V –tjemena ogledala.

Iz trouglova označenih na slici važi da je:

$$\tan \alpha = \frac{P}{p-R} \quad \text{i} \quad \tan \alpha = \frac{L}{R-q}$$

Odakle dobijamo da je:

$$\frac{P}{p-R} = \frac{L}{R-q}$$

odnosno:

$$\frac{q}{p} = \frac{R-q}{p-R}$$

Odakle se sređivanjem dobija **jednačina sfernog ogledala**:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R}$$

Ili koristeći vezu između žižne daljine i poluprečnika krivine ogledala jednačina sfernog ogledala ima oblik:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Ako se sa p označi udaljenost predmeta od tjemena (vrha) ogledala, a sa q udaljenost lika od tjemena ogledala, sa P visina predmeta, a sa L visina lika, uvećanje sfernog konkavnog ogledala može se izračunati prema formuli:

$$U = \frac{L}{P} = -\frac{q}{p}$$

Iz vrijednosti uvećanja vidimo da li je lik:

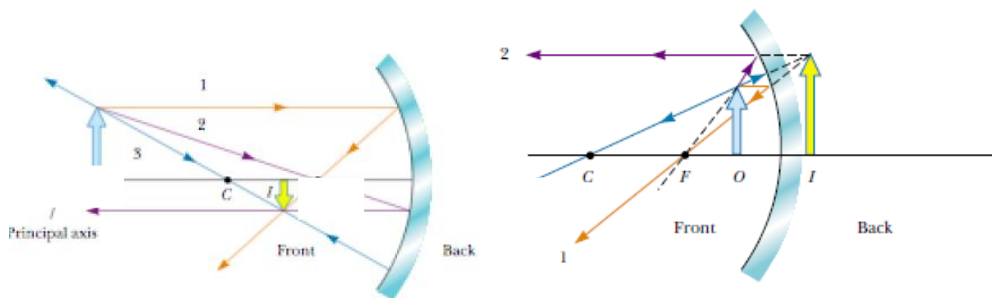
- uvećan kada je ispunjen uslov:  $|U| > 1$
- umanjen kada je ispunjen uslov:  $|U| < 1$ .

# Geometrijska optika

i važi samo za paraksijalne zrake<sup>1</sup>.

Na Slici 7 prikazano je formiranje lika odbijanjem svjetlosti od konkavnog ogledala koristeći tri karakteristična zraka u slučaju:

- Kada se predmet nalazi na rastojanju većem od žižne daljine i radijusa krivine ogledala. U ovom slučaju lik koji se formira je realan jer se nalazi u presjeku zraka reflektovanih od ogledala. Takođe, lik je umanjen i okrenut.
- Kada se predmet nalazi na rastojanju manjem od žižne daljine tj. između žiže i ogledala. U ovom slučaju svjetlosni zraci se nakon odbijanja od ogledala ne sijeku tj. divergiraju. Lik se dobija iza ogledala produžavanjem odbijenih zraka i zato je imaginaran. Lik je uspravan i uvećan.

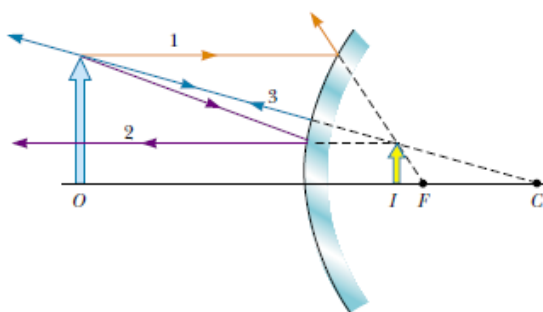


**Slika 7.** Formiranje lika kod sfernog izdubljenog ogledala kada se predmet nalazi na rastojanju većem od centra krivine ogledala gdje je R - radijus krivine, C - centar krivine ogledala, O – predmet, I - slika predmeta u ogledalu i CV - glavna optička osa, V –tjeme ogledala.

Izdubljena ogledala se koriste za fokusiranje.

## Ispupčena (konveksna) ogledala

Kod konveksnog (ispupčenog) ogledala svjetlost se reflektuje od spoljašnje (ispupčene), konveksne površine – Slika 8.



**Slika 8.** Formiranje lika kod sfernog ispupčenog ogledala, gdje je R - radijus krivine, C - centar krivine ogledala, O – predmet, I - slika predmeta u ogledalu i CV - glavna optička osa, V –tjeme ogledala.

Konveksna ogledala su divergentna jer se zraci reflektovani od ogledala ne sijeku već divergiraju kao da su krenuli iz tačke iza ogledala. Jednačine koje važe za konkavna važe i za konveksna ogledala

<sup>1</sup> Zraci koji zaklapaju mali ugao sa glavnom optičkom osom.

# Geometrijska optika

---

vodeći računa o predznaku fizičkih veličina (žižna daljina i udaljenost lčika od ogledala) i definišući prednju stranu (ispred ogledala) i zadnju stranu (iza ogledala). Lik konveksnog ogledala se dobija produžavanjem reflektovanih zraka koji se sijeku u jednoj tački (vrh lika). Takođe, lik je uvijek uspravan, umanjena i imaginaran. Primjera radi, ovakva ogledala se koriste u prodavnicama.

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{2}{R} \quad \frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f}$$

Za formiranje lika u ogledalu koriste se karakteristični zraci:

- Zrak 1 se crta od vrha objekta paralelno glavnoj (optičkoj) osi i nakon odbijanja od ogledala prolazi kroz žižu.
- Zrak 2 prolazi kroz žižu i reflektuje se paralelno glavnoj optičkoj osi.
- Zrak 3 prolazi kroz centar krivine i reflektuje se nazad u istom pravcu kroz centar krivine ogledala.

Konvencija znakova pri formiranju lika u ogledalu je sljedeća:

$p > 0$  ako je predmet ispred ogledala (**realan predmet**),

$p < 0$  ako je predmet iza ogledala (**imaginaran predmet**),

$q > 0$  ako je slika ispred ogledala (realna slika),

$q < 0$  ako je slika iza ogledala (imaginarna slika),

**$f > 0$  i  $R > 0$  ako je centar krivine ispred ogledala (konkavna ogledala),**

**$f < 0$  i  $R < 0$  ako je centar krivine iza ogledala (konveksna ogledala),**

ako je  $M > 0$  slika je uspravna, ako je  $M < 0$  slika je okrenuta.

Ispupčena sferna ogledala se koriste za rasipanje svjetlosti u optičkim uređajima kao što su npr. teleskopi.

## Prelamanje svjetlosti

### Sočiva

Prozirna tijela ograničena sa dvije sferne ili jednom sfernom i jednom ravnom površinom predstavljaju sočiva. Sočiva se koriste za formiranje slika prelamanjem svjetlosti u optičkim instrumentima kao što su kamere, teleskopi i mikroskopi.

U zavisnosti od oblika graničnih površina sočiva mogu biti:

a) **Sabirna (konvergentna) sočiva (Slika 9a)** imaju dvije realne žiže, pozitivnu, žižnu daljinu i najdeblja su na sredini (bikonveksno, konveksno-konkavno i plankonveksno sočivo). Kod ovih sočiva lik se formira u tački u kojoj prelomljeni zraci konvergiraju.

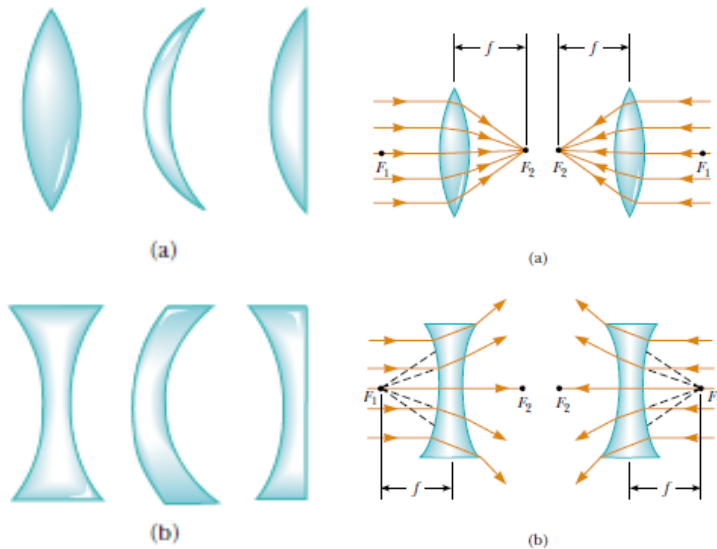
b) **Rasipna (divergentna) sočiva (Slika 9b)** imaju imaginarnu, negativnu, žižnu daljinu koja se dobija u produžetku realnih prelomljenih zraka, najdeblja su na ivicama (bikonkavno, konveksno-konkavno i plankonkavno sočivo). Prelomljeni zraci divergiraju, a lik se formira u presjeku njihovih produžetaka pa je lik imaginaran.

Jačina sočiva se mjeri veličinom koja je jednaka recipročnoj vrijednosti žižne daljine:

$$j = \frac{1}{f}$$

# Geometrijska optika

Jedinica za optičku jačinu sočiva je dioptrija. Optičku jačinu od jedne dioptrije ima sočivo čija je žižna daljina jednaka 1 m. Kod sabirnih sočiva je pozitivna žižna daljina, pa samim tim i dioptrija, dok je kod rasipnih sočiva negativna žižna daljina pa samim tim i dioptrija.



Slika 9. (a) Sabirna (konvergetna) sočiva (bikonveksno, konveksno-konkavno i plankonveksno sočivo). (b) Rasipna (divergentna) sočiva (bikonkavno, konveksno-konkavno i plankonkavno sočivo).

## Optička jednačina sočiva

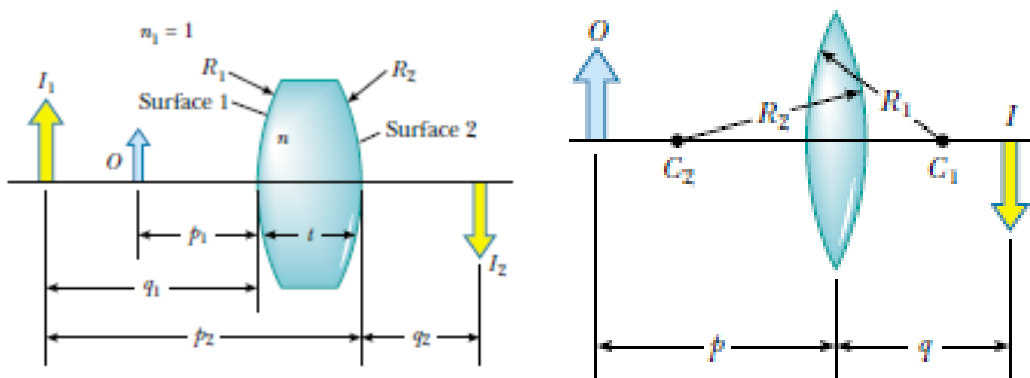
Optička jednačina **sfernog sočiva** ima oblik:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = (n_r - 1) \left( \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)$$

gdje je:  $n_r = n/n_1$  – relativni indeks prelamanja sočiva u odnosu na sredinu u kojoj se nalazi (za vazduh  $n_r = n$ ),  $R_1$  i  $R_2$  poluprečnici krivina pozitivni za ispupčene, a negativni za izdubljene površine.

Ukoliko je jedna strana sočiva ravna (plankonveksno ili plankonkavno) radijus krivine te strane tada je

$$R_2 \rightarrow \infty, \frac{1}{R_2} \rightarrow 0.$$



Slika 10. Tanko sabirno sočivo radijusa krivina  $R_1$  i  $R_2$ .



# Geometrijska optika

Ova jednačina važi za tanko sočivo samo u slučaju kada je debljina sočiva mnogo manja od poluprečnika krivina i zraci su paraksijalni.

Radijusi krivina se mogu odrediti za željenu žižnu daljinu ako je poznat indeks prelamanja sredine i obrnuto. **Ako se sočivo nalazi u nekoj sredini koja nije vazduh važi ista jednačina pri čemu se umjesto  $n$  uzima odnos indeksa prelamanja sočiva prema indeksu prelamanja sredine u kojoj se nalazi sočivo!!!**

Pošto svjetlost može da se kreće u jednom ili drugom smjeru kroz sočivo, sočivo ima dvije žiže.

Uvećanje sočiva se definiše kao i kod ogledala:

$$U = \frac{L}{P} = -\frac{q}{p}$$

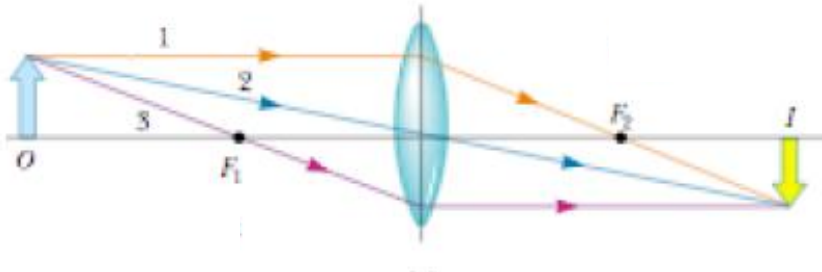
$L$  predstavlja odnos veličine lika prema veličini predmeta ili negativnu vrijednost rastojanja lika od sočiva prema rastojanju predmeta od sočiva.

## Formiranje lika pomoću sočiva

Za određivanje položaja lika kod sočiva koriste se karakteristični zraci (kao i kod ogledala).

**U slučaju sabirnog sočiva** sljedeća 3 karakteristična zraka se crtaju od vrha objekta (Slika 12):

- Zrak 1 crta se paralelno glavnoj optičkoj osi do sočiva, a nakon prelamanja na sočivu ovaj zrak prolazi kroz žižnu daljinu sa zadnje strane sočiva.
- Zrak 2 ide kroz centar sočiva i nastavlja kao prava linija (u istom pravcu) nakon prolaska kroz sočivo.
- Zrak 3 prolazi kroz žižnu daljinu s prednje strane sočiva, a poslije prelamanja u sočivu nastavlja kretanje paralelno glavnoj optičkoj osi.

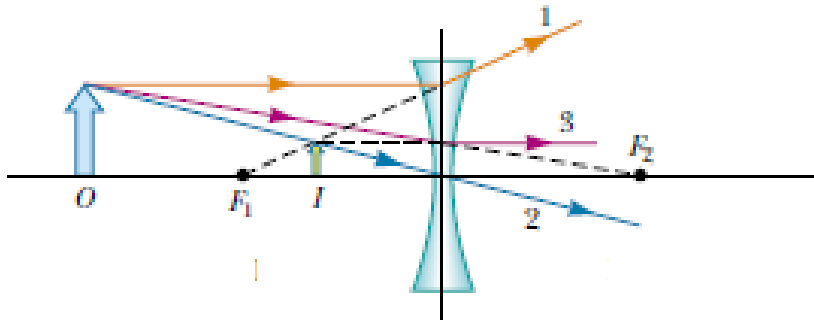


Slika 11. Primjer formiranja lika nastalog prelamanjem zraka pri nailasku na sabirno sočivo. Predstavljeni su karakteristični zraci 1, 2 i 3.

Za određivanje položaja lika kod **rasipnih sočiva** sljedeća 3 karakteristična zraka se crtaju od vrha predmeta (Slika 13):

- Zrak 1 crta se paralelno glavnoj optičkoj osi, a nakon prelamanja u sočivu ovaj zrak se pojavljuje kao da je prošao kroz žižu prednjeg dijela sočiva.
- Zrak 2 se crta kroz centar sočiva i nastavlja kao prava linija (duž istog pravca) nakon prolaska kroz sočivo. *Upadni ugao je jednak uglu refrakcije.*
- Zrak 3 se crta polazi sa vrha predmeta ka žiži zadnjeg dijela sočiva i pojavljuje se iza sočiva paralelno glavnoj optičkoj osi.

# Geometrijska optika



Slika 13. Primjer formiranja lika nastalog prelamanjem zraka pri nailasku na rasipno sočivo. Predstavljene su karakteristični zraci 1, 2 i 3.

Pri formiranju lika kod sočiva važi sljedeća konvencija znakova:

- $p > 0$  ako je predmet ispred sočiva (realan predmet),
- $p < 0$  ako je predmet iza sočiva (imaginarnan predmet),
- $q > 0$  ako je lik iza sočiva (realan lik),
- $q < 0$  ako je lik ispred sočiva (imaginarna lik),
- $R_1 > 0$  i  $R_2 > 0$  ako je centar krivine iza sočiva,
- $R_1 < 0$  i  $R_2 < 0$  ako je centar krivine ispred sočiva,
- $f > 0$  ako je sočivo sabirno (konvergentno),
- $f < 0$  ako je sočivo rasipno (divergentno).

## Kombinacija tankih sočiva

Ako se dva sočiva koriste za formiranje konačnog lika sistem se može tretirati na sljedeći način:

- 1) lik koji formira prvo sočivo formira se kao da drugo sočivo ne postoji;
- 2) kada se crta dijagram svjetlosnih zraka za drugo sočivo lik prvog sočiva predstavlja predmet za drugo sočivo;
- 3) lik formiran pomoću drugog sočiva predstavlja konačnu sliku sistema sočiva.

Ovo se može primjeniti i na veći broj sočiva pri čemu je **uvećanje ovakvog sistema jednako proizvodu uvećanja pojedinačnih sočiva**.

Posmatrajmo specijalan slučaj dva spojena (priljubljena sočiva) čije su zizne daljine  $f_1$  i  $f_2$

Mozemo napisati jednacine sočiva za svako sočivo:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q_1} = \frac{1}{f_1} \quad \frac{1}{-q_1} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f_2}$$

gdje je:

$p$  - udaljenost predmeta od prvog sočiva

$q_1$  - udaljenost lika koje formira prvo sočivo

$p_2 = -q_1$  - lik prvog sočiva je predmet za drugo sočivo, a "-" znaci da je lik virtuelan (imaginarnan)

$q$  - konacan položaj lika, lik drugog sočiva

Iz poslednjih jednacina dobija se:

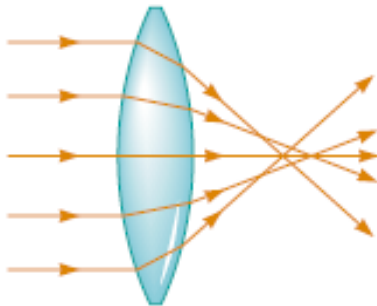
$$\frac{1}{p} + \frac{1}{q} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

Dva sočiva koja su spojena imaju ziznu daljinu kakvu bi imalo jedno sočivo zizne daljine  $f$  date jednacinom

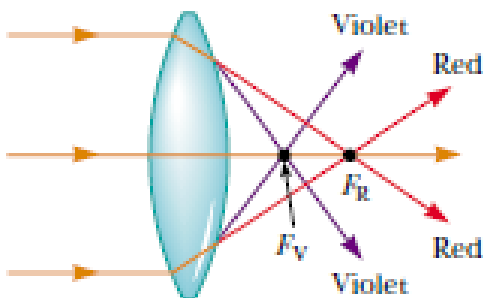
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}$$

## Aberacija sočiva

Kada se zraci koji dolaze od objekta ne sijeku u jednoj tački nastaje **aberacija sočiva** (odstupanje od perfektno očekivane slike). Sferna aberacija se pojavljuje jer se fokalne tačke zraka udaljenih od ose ne sijeku sa fokalnim tačkama zraka koji prolaze blizu ose. Kod kamera aberacija se izbjegava koristeći manji otvor objektiva i duže vrijeme ekspozicije, a kod ogledala aberacija se može izbjeći korištenjem paraboličnih reflektujućih površina.



Slika 12. Primjeri aberacije sočiva.



## Optički uređaji

Optički uređaji su instrumenti koji oko (najsloženiji); lupa, sočivo, mikroskop, dvogled, fotoaparati.

### Lupa

Lupa ili povećalo predstavlja najjednostavniji optički uređaj (Slika 14). Lupa se sastoji od sabirnog sočiva optičke moći od 10 do 100, a od realnog predmeta daje uvećan imaginarni lik; od te slike oko stvara realnu i uvećanu sliku na mrežnjači. Veličina lika koji se formira u mrežnjači oka zavisi od ugla  $\theta$  koji svjetlosni zrak koji polazi sa vrha predmeta zaklapa sa glavnom optičkom osom ispred oka. Prosječno oko se ne može fokusirati na predmet na odstojanju manjem od 25 cm od oka. Kako bi se povećala prividna ugaona veličina oka ispred oka se postavlja sabirno sočivo pri čemu je najbolje da se predmet nalazi u žiži sočiva jer se tada oko ne napreže. Od svake tačke predmeta sočivo daje imaginarni lik u beskonačnosti, a od realnih paralelnih zraka oko stvara realnu sliku na mrežnjači.

# Geometrijska optika

Ugaono uvećanje lupe predstavlja odnos ugla pod kojim vidimo predmet kroz lupu i ugla pod kojim vidimo predmet bez lupe:

$$m = \frac{\theta}{\theta_0}$$

Ugaono uvećanje je maksimalno kada se lik nalazi na rastojanju  $q=25$  cm, pa se odgovarajuća udaljenost predmeta može pronaći iz jednačine tankog sočiva:

$$\frac{1}{p} + \frac{1}{-25 \text{ cm}} = \frac{1}{f}$$

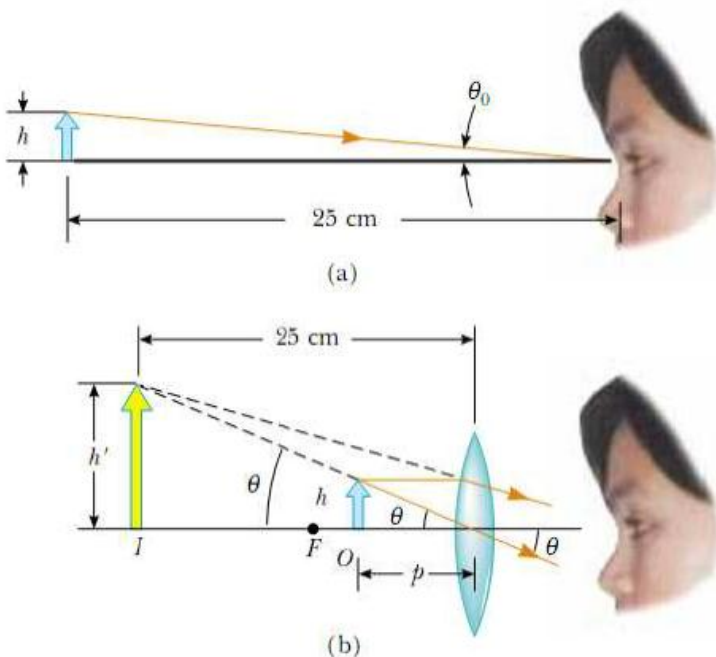
Sa slike 14, za uglove  $\theta_0$  i  $\theta$  važi:

$$\tan \theta_0 \approx \theta_0 \approx \frac{h}{25} \quad \text{and} \quad \tan \theta \approx \theta \approx \frac{h}{p}$$

Odakle je **maksimalno uvećanje**:

$$m_{\max} = \frac{\theta}{\theta_0} = \frac{h/p}{h/25} = \frac{25}{p} = \frac{25}{25f/(25+f)}$$

$$m_{\max} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f}$$



Slika 14. Formiranje lika pomoću lupe.

### Primjer:

Žižna daljina lupe iznosi  $12.5$  cm. Koliko je maksimalno uvećanje lupe?

### Rješenje:

Koristeći jednačinu:

$$m_{\max} = 1 + \frac{25 \text{ cm}}{f}$$

Zamjenom se dobija  $m_{\max}=3$ .

## Mikroskop

Lupa ima ograničeno uvećanje, te se u svrhu većeg uvećanja koristi sistem sočiva kao što je to slučaj kod mikroskopa (Slika 15). Uređaj služi za posmatranje predmeta reda veličine  $1\mu\text{m}$ . Povećanja slike postižu se upotrebom objektivnog mikroskopa, koji od realnog predmeta daje povećanu realnu sliku; ta slika služi kao predmet za okular, koji onda daje povećanu virtuelnu sliku, a od te virtuelne slike oko stvara na mrežnjači realnu sliku. **Ukupno uvećanje mikroskopa** se može odrediti u skladu sa izrazom:

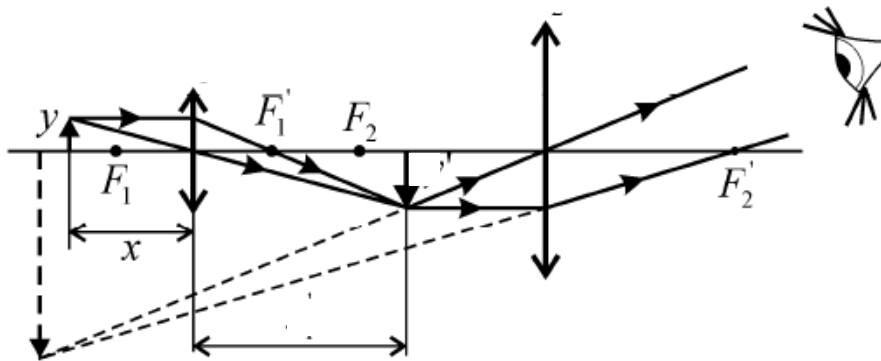
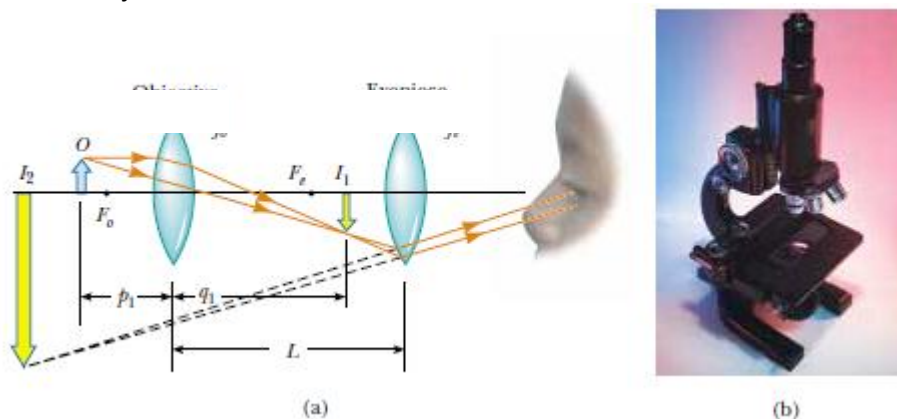
$$M = M_1 m_e = -\frac{L}{f_o} \left( \frac{25 \text{ cm}}{f_e} \right)$$

gdje je:

L – rastojanje između sočiva,

$f_o$  – žižna daljina objektivnog,

$f_e$  – žižna daljina okulara.



Slika 15. Formiranje lika pomoću mikroskopa.

**Uvećanje mikroskopa** može biti i do 3000 puta (Toliko puta je veća prividna veličina slike od veličine predmeta kako ga obično oko vidi na 25 cm.)

Važna karakteristika mikroskopa je i **rezolucija** (najmanja udaljenost između dva tačkasta izvora ili dvije linije koje oko pomoću mikroskopa vidi odvojeno). Rezolucija se može povećati korištenjem kraćih talasnih dužina što ima primjenu kod elektronskog mikroskopa kod kojeg se koriste snopovi elektrona umjesto svjetlosti.

## Pitanja za provjeru znanja

1. Kako glasi zakon prelamanja, a kako zakon odbijanja svjetlosti?
2. Prema Fermatovom principu u kakvom odnosu stoje vrijeme i optička dužina puta svjetlosti?
3. Kada se pomoću sfernog ogledala dobija:
  - a) Realan lik? Objasniti i nacrtati.
  - b) Imaginarnan lik? Objasniti i nacrtati.
4. Kako se izračunava uvećanje ispupčenog sfernog ogledala?
5. Za data ogledala konstruisati lik predmeta, ako tačka C predstavlja centar sferne površine, a strelica predmet.



6. Nacrtati lik koji nastaje odbijanjem zraka od izdubljenog sfernog ogledala kada je  $p > f$ !
7. Formirati lik predmeta nastalog prelamanjem svjetlosti kroz rasipno sočivo ako se predmet nalazi između žiže i sočiva. Kakav je lik?
8. Pomoću karakterističnih zraka nacrtati položaj lika nastalog prelamanjem svjetlosti kroz:
  - a) sabirno sočivo, b) rasipno sočivo ako se predmet nalazi ispred žiže tj.  $p > f$ .
9. Konvergentno sočivo ima talasnu dužinu  $f$ . Kakva slika nastane kada je udaljenost predmeta od sočiva veća od  $f$ , a manja od  $2f$ ?
10. Pomoću karakterističnih zraka nacrtati položaj lika nastalog prelamanjem svjetlosti kroz:
  - a) sabirno sočivo, b) rasipno sočivoako se predmet nalazi na odstojanju  $p < f$ . Kakav je lik?

## Literatura

1. David Halliday, Robert Resnik, Jearl Walker, **Fundamentals of Physics**
2. Young and Freedman, **University physics with modern physics**
3. Ljuba Budinski-Petković, **Fizika**
4. Stjepan Marić, **Fizika**

## SADRŽAJ

Fermatov princip .....	1
Zakoni odbijanja i prelamanja svjetlosti.....	1
Formiranje slike odbijanjem svjetlosti.....	3
Ravna ogledala .....	3
Slike formirane pomoću sfernih ogledala .....	4
Izdubljena (konkavna) ogledala.....	4
Ispupčena (konveksna) ogledala .....	6
Prelamanje svjetlosti .....	7
Sočiva.....	7

# Geometrijska optika

---

Optička jednačina sočiva .....	8
Formiranje lika pomoću sočiva.....	9
Kombinacija tankih sočiva .....	10
Aberacija sočiva .....	11
Optički uređaji .....	11
Lupa .....	11
Mikroskop.....	13
Pitanja za provjeru znanja .....	14
Literatura .....	14