

**Veleučilište Velika Gorica**

# **Geometrijska optika**

*Laboratorijske vježbe*

**Mjesto izvođenja:  
Institut „Ruđer Bošković“  
Zavod LAIR**

*Voditelj:*  
*Dr. sc. Martin Lončarić*  
[mloncaric@irb.hr](mailto:mloncaric@irb.hr)



# Vježba 1

## Refleksija svjetlosti, ravna i zakrivljena zrcala

### 1. Uvod

Geometrijska optika može dobro opisivati svjetlosne pojave kod kojih su utjecaji difrakcije i interferencije zanemarivi. Dakle, sve dok ne proučavamo rubove sjene ili prolazak svjetlosti kroz male rupice ili pukotine, možemo koristiti geometrijsku optiku. Osnovna je pretpostavka geometrijske optike da su zrake svjetlosti ravne linije sve dok se ne reflektiraju, lome ili apsorbiraju.<sup>1</sup>

Izvor svjetlosti emitira zrake u svim mogućim smjerovima. Svaka zraka kreće se po pravcu dok se ne dogodi jedan od sljedećih događaja:

1. Apsorpcija – ako zrake svjetlosti naiđu na neprozirni, nereflektirajući materijal
2. Refleksija – ako zrake svjetlosti naiđu na reflektirajući materijal
3. Lom ili refrakcija – ako zrake svjetlosti naiđu na prozirni materijal

Kod većine stvarnih materijala događa se kombinacija ovih pojava.

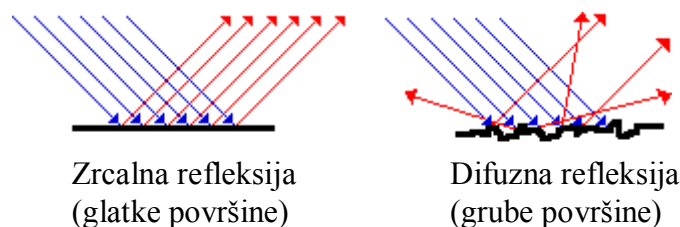
#### 1. Apsorpcija

Boje koje percipiramo povezane su s valnom duljinom svjetlosti. Materijali koji apsorbiraju svjetlost mogu smanjiti intenzitet reflektirane svjetlosti za sve boje jednako ili mogu selektivno smanjiti intenzitet nekih boja. Na primjer, trava apsorbira sve boje sunčeve svjetlosti osim zelene (koju reflektira). Zato nam se trava čini zelena. Ako objekt apsorbira sve boje, izgleda crno. Svi materijali apsorbiraju do neke mjere. Najbolja komercijalna zrcala reflektiraju 99 % ulazne svjetlosti.

#### 2. Refleksija

Postoje dva tipa refleksije: difuzna i zrcalna.

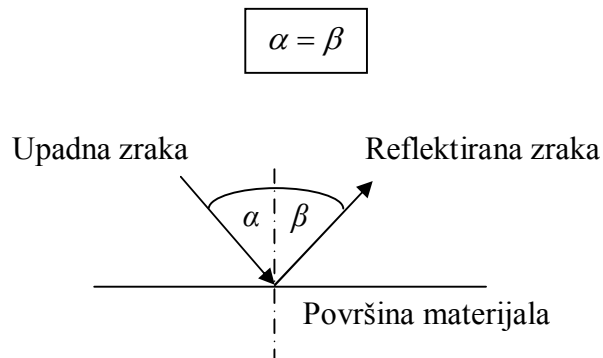
Difuzna refleksija je, na primjer, refleksija s površine papira. Na mikroskopskoj skali, površina papira je prilično gruba pa se upadne paralelne zrake reflektiraju u različitim smjerovima. Ako osvijetlimo baterijom komad papira, vidimo svijetlu točku na papiru bez obzira gdje stojimo u odnosu na papir (mali broj zraka reflektira se i prema očima promatrača). U tom slučaju nije moguće odrediti odnos kutova između upadne i reflektirane zrake.



Slika 1

<sup>1</sup> Jedna od primjena geometrijske optike jest rendgen. Rendgenske zrake idu pravocrtno od izvora do detektora, osim u području gdje se apsorbiraju u tkivu (npr. kost), stvarajući tako sjenu na detektoru.

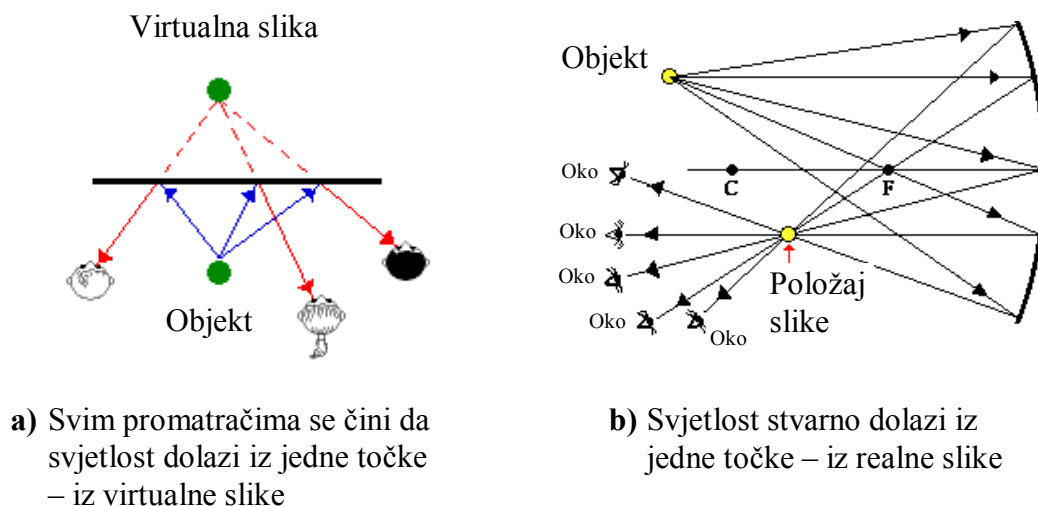
Ako se paralelne zrake reflektiraju s površine koja je vrlo glatka, postoji jedinstveni kut upada i jedinstveni kut refleksije. To je zrcalna refleksija. Refleksija snopa svjetlosti baterijske svjetiljke sa zrcala može se primijetiti samo ako se gleda duž smjera refleksije. Zakon refleksije kaže da se zraka svjetlosti reflektira pod istim kutom pod kojim pada na glatku površinu (Slika 2).



Slika 2

### Realne i virtualne slike

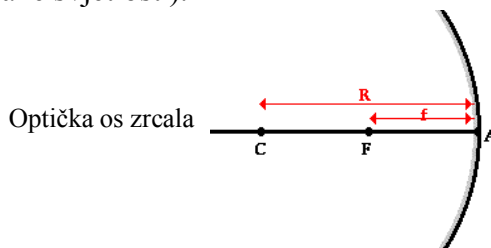
U ravnom zrcalu vidimo svoju sliku koja izgleda kao da je kopija iza zrcala, ali ako se na mjesto slike postavi fotografska ploča, ne može se dobiti fotografija niti se ta slika može vidjeti na zaslonu. Slika u ravnom zrcalu, kao i bilo koja slika koja se ne može vidjeti na zaslonu ili snimiti na fotografsku ploču, zove se virtualna slika. Slika koja se može snimiti ili vidjeti na zaslonu, zove se realna slika.



Slika 3

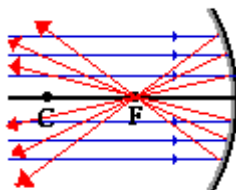
## 2. Konkavno sferno zrcalo

Zrcalo se zove sferno ako je njegova površina dio sferne plohe. Sferno zrcalo je udubljeno ili konkavno ako njegova udubljena strana reflektira zrake svjetlosti (kod konveksnog zrcala izbočena strana reflektira zrake svjetlosti).



Slika 4

Geometrijsko središte kugline plohe je središte zakrivljenosti zrcala C, a polumjer te kugle je polumjer zakrivljenosti zrcala R. Točka u sredini zrcala je tjeme zrcala A, a pravac koji spaja tjeme i središte je optička os zrcala. Sve zrake koje upadaju paralelno s optičkom osi u konkavno zrcalo, poslije refleksije sijeku se u točki – fokusu sfernog zrcala F (Slika 5).



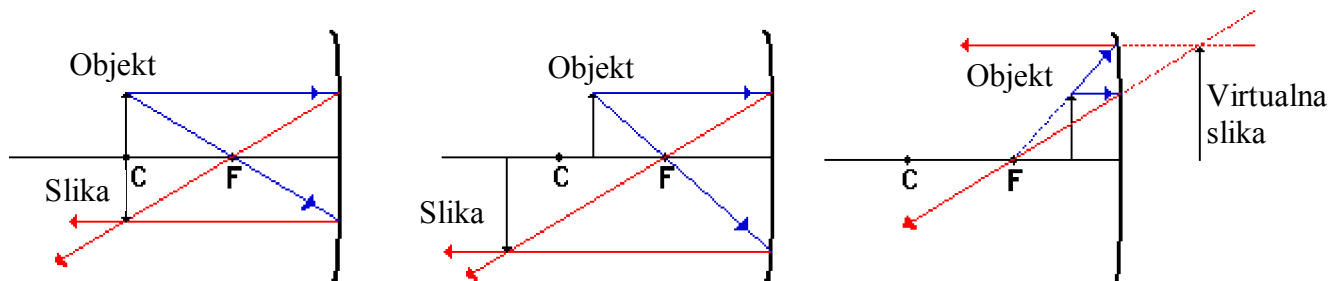
Slika 5

Udaljenost između fokusa i tjemena je žarišna duljina  $f$ . Žarišna duljina jednaka je polovici polumjera zakrivljenosti zrcala.

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

Za zrake koje se reflektiraju s konkavnog zrcala vrijedi

1. Upadna zraka paralelna optičkoj osi zrcala nakon refleksije prolazi kroz fokus.
2. Upadna zraka koja prolazi kroz fokus, nakon refleksije postaje paralelna glavnoj optičkoj osi.
3. Zraka koja prolazi kroz centar zakrivljenosti zrcala nakon refleksije također prolazi kroz centar refleksije.



a) kada je objekt smješten u C slika je velika kao predmet, obrnuta i realna

b) kada je objekt između F i C slika je obrnuta, realna i uvećana

c) kada je objekt između F i zrcala slika je uvećana, uspravna i virtualna

Slika 6

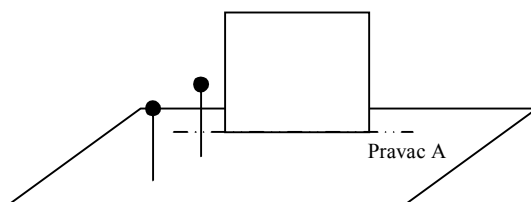
### 3. Refleksija na ravnom zrcalu

- Da bi provjerili razliku između difuzne i zrcalne refleksije, uzmite bateriju i osvijetlite bijeli list papira. Uočava li se svjetlost ako se gleda pod različitim kutovima?
- Sada osvijetlite ravno zrcalo. Vidite li snop svjetlosti na zrcalu? Pod kojim kutom se vidi? Što se događa ako na površini zrcala ima prašine?

U drugom dijelu vježbe provjerava se zakon refleksije na ravnom zrcalu. Dvije pribadače postavljene ispred zrcala čine pravac. Kada se promatrač postavi iza pribadača tako da vidi samo jednu, određen je smjer upadne zrake. Kada se glava pomakne na drugu stranu od okomice na zrcalo, poklapanje pribadača se vidi samo u smjeru reflektirane zrake. S dvije nove pribadače označi se smjer reflektirane zrake, tako da se poklapaju slike prve dvije s druge dvije pribadače. Mjerenjem kutova između upadne i reflektirane zrake s okomicom provjerava se zakon refleksije.

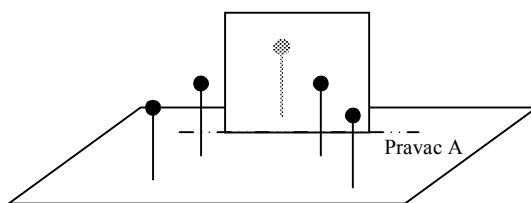
Nacrtajte pravac na komadu papira i stavite zrcalo na papir tako da se ravnina zrcala poklapa s pravcem (pravac A na Slici 7).

- Odredite upadnu zraku stavivši dvije pribadače ispred zrcala (Slika 7).



Slika 7

- Nađite reflektiranu zraku gledajući u zrcalo i pomičući glavu sve dok se pribadače ne poklope.
- Stavite još dvije pribadače između oka i zrcala tako da se poklapaju sa slikom prve dvije pribadače u zrcalu (Slika 8). One određuju reflektiranu zraku.



Slika 8

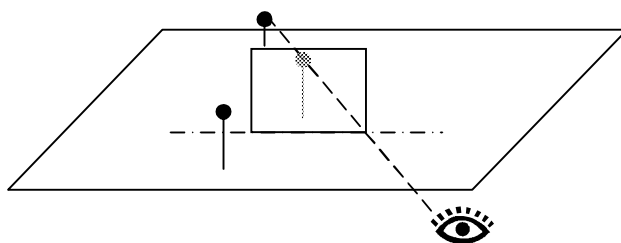
- Uklonite zrcalo i pribadače s papira. Nacrtajte upadnu i reflektiranu zraku uz pomoć rupica na papiru.
- Sijeku li se zrake na površini zrcala (koja je označena pravcem)?
- Nacrtajte okomicu na pravac A koja prolazi kroz presjek dviju zraka.
- Izmjerite kutomjerom upadni kut (kut između upadne zrake i normale) i kut refleksije (kut između reflektirane zrake i okomice).
- Procijenite preciznost mjerenja.
- Jesu li kutovi jednaki unutar granica preciznosti?
- Koji su glavni izvori pogrešaka u ovom eksperimentu?

#### 4. Slika u ravnom zrcalu

U ovom dijelu vježbe traži se virtualna slika pomoću dvije različite metode.

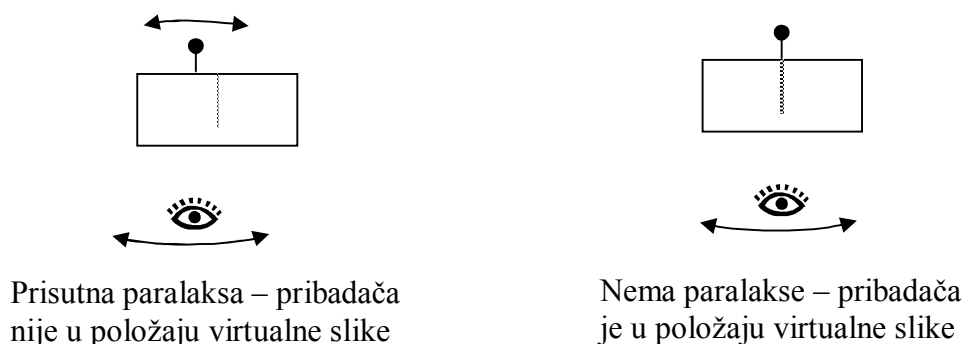
Prva metoda koristi paralaksu između virtualne slike i pribadače postavljene u blizini virtualne slike. Prvo se postavi jedna pribadača ispred zrcala, a zatim se druga postavi iza zrcala na položaj virtualne slike. Druga pribadača promatra se preko ruba zrcala. Kada je postavljena u položaj virtualne slike, nema paralakse između nje i virtualne slike, tj. poklapaju se bez obzira na položaj promatrača.

U drugoj metodi određuju se dvije reflektirane zrake (svaka s po dvije pribadače). Sjecište njihovih produžetaka iza zrcala određuje položaj virtualne slike.



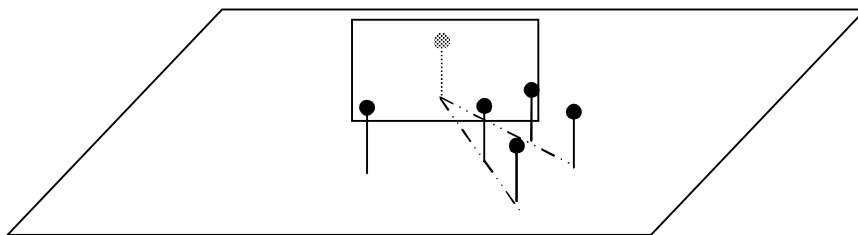
Slika 9

- Uzmite novi list papira i opet nacrtajte pravac na sredini papira. Stavite reflektirajuću plohu zrcala duž tog pravca.
- Stavite pribadaču ispred zrcala.
- Uzmite još jednu pribadaču koja će doći iza zrcala. Nađite položaj gdje druga pribadača nema paralaksu u odnosu na sliku prve pribadače u zrcalu (treba gledati preko ruba zrcala – Slika 9). Druga pribadača poklapa se sa slikom prve, čak i kad se glava pomiče lijevo desno (Slika 10). Kada je taj uvjet ispunjen, druga pribadača se nalazi na mjestu virtualne slike.



Slika 10

- Je li lakše naći taj položaj ako je glava blizu ili daleko od zrcala?
- Uklonite drugu pribadaču i označite njen položaj.
- Sada uzmite dvije nove pribadače i s njima označite reflektiranu zraku s prve pribadače, tako da se poklapaju sa slikom one prve (kao u prvom zadatku).
- Odredite još jednu reflektiranu zraku pod nekim drugim kutom (Slika 11).
- Maknite sve s papira i nacrtajte reflektirane zrake. Produžite ih iza zrcala sve dok se ne sijeku.



Slika 11

- Sjecište je predviđeni položaj virtualne slike. Poklapa li se s položajem virtualne slike koji je nađen pomoću paralakse?
- Sada nacrtajte pravce koji povezuju sjecište reflektiranih zraka i pravca koji označava ravninu zrcala s prvom pribadačom. Te linije prikazuju pravi put svjetlosti koja se reflektira u zrcalu. Pokušajte dati jednostavno geometrijsko objašnjenje zašto je udaljenost između objekta i zrcala jednaka udaljenosti između virtualne slike i zrcala.
- Koji su glavni izvori greške u ovom dijelu vježbe?

## 5. Višestruke refleksije

- Postavite dva zrcala pod pravim kutom.
- Napišite svoje ime na mali komadić papira i postavite pred zrcala.
- Koliko slika vidite?
- Koje su naopako, a koje ispravne?
- Objasnite zašto je srednja slika ispravna.
- Postavite zrcala pod ostrim kutom. Koliko se sad slika vidi? Kakve su?
- Sada postavite zrcala paralelno, jedno prema drugome, s dovoljnim razmakom među njima.
- Postavite pribadaču među zrcala.
- Ako gledate u jedno od zrcala preko ruba drugog, vidi se niz slika koje se protežu u daljinu. Objasnite zašto se vidi čitav niz slika pribadače.
- Zašto su udaljenije slike mutnije?

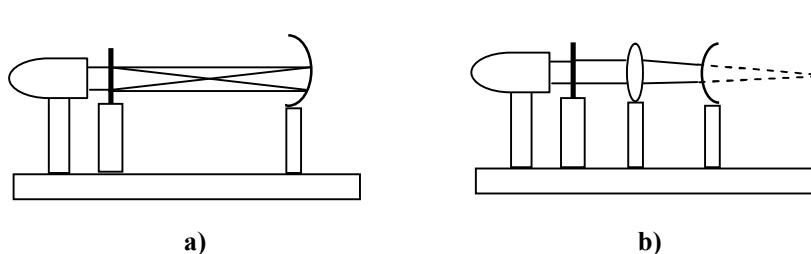
## 6. Konkavno sferno zrcalo

Radijus zakrivljenosti konkavnog zrcala mjerit će se metodom autokolimacije. Kada je predmet na udaljenosti  $2f = CA$  od tjemena zrcala, njegova slika je realna, obrnuta i jednake veličine kao i sam predmet – povećanje je 1 (pogledajte Sliku 6a).

- Da bi odredili radijus zakrivljenosti konkavnog zrcala postavite ga na optičku klupu na kojoj se nalazi izvor svjetlosti i maska s otvorom u obliku strelice. Ta maska će istovremeno služiti i kao zaslon na kojemu se gleda slika.
- Upalite svjetiljku koja osvjetljava masku i pomičite nosač s konkavnom lećom dok na zaslonu ne dobijete ostru, realnu i obrnutu sliku koja je jednake veličine kao i sam predmet.



- Izmjerite udaljenost od predmeta/zaslona do zrcala. To je iznos radijusa zakrivljenosti konkavnog zrcala.
- Kakva je slika ako pogledate sebe na maloj udaljenosti (manjoj od  $f$ ) od konkavnog zrcala?



Slika 12

## 7. Konveksno sferno zrcalo

Metoda kojom smo se služili za konkavno zrcalo mora biti promijenjena, jer konveksno sferno zrcalo ne može od realnog predmeta napraviti realnu sliku. No ako je predmet virtualan, slika će biti realna.

- Na optičkoj klupi, iza maske postavite konvergentnu, pomoćnu leću (Slika 12b).
- Pomičite je duž optičke klupe dok na zaslonu (zidu) ne dobijete realnu, obrnutu sliku. Ta slika će biti virtualni predmet za konveksno zrcalo koju treba postaviti na optičku klupu.
- Pomičite konveksno zrcalo duž optičke osi dok ne dobijete oštru sliku na maski/zaslonu. Udaljenost između tjemena zrcala i zaslona (zida) jednaka je radijusu zakrivljenosti zrcala.

## 8. Simulacija optičke klupe (za Vježbe 1, 3 i 4)

## Vježba 2

### Lom svjetlosti, određivanje indeksa loma stakla, totalna refleksija, prizme

#### Uvod

Valovi svjetlosti (zrake) gibaju se kroz vakuum (ili zrak) konstantnom brzinom  $c$  koja je približno jednaka 300 000 km/s ili  $3 \cdot 10^8$  m/s.

Kada se val giba kroz prozirni materijal, interakcija svjetlosti s atomima rezultira brzinom svjetlosti  $v$  koja je manja od  $c$ . Omjer tih brzina zove se indeks loma  $n$ , i specifičan je za dani materijal

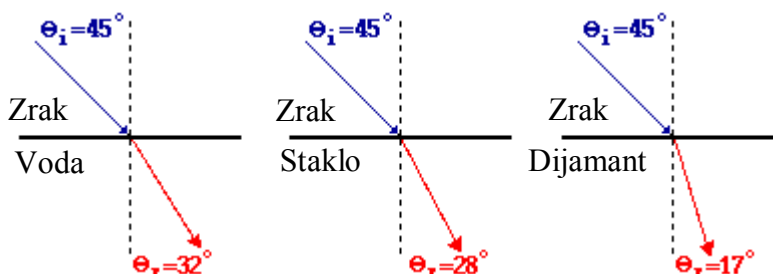
$$n = \frac{c}{v}$$

Indeks loma prozirnih materijala (za vidljivu svjetlost) varira između 1 i 2,5 ovisno o materijalu. Staklo, na primjer, ima indeks loma oko 1,5.

Kada zraka svjetlosti naiđe na materijal, promjena brzine vala zahtijeva promjenu valne fronte, tj. smjer zrake se mijenja. Novi kut, u odnosu na okomicu na površinu materijala, zove se kut loma i dan je Snellovim zakonom:

$$\sin \theta_r = \frac{\sin \theta_i}{n}$$

Budući da je  $n$  uvijek veći od jedan, lomljena (refraktirana) zraka je bliža okomici nego upadna zraka. Na primjer, ako upadna zraka pod kutom  $\theta_i = 45^\circ$  nailazi na vodu (indeksa loma  $n = 1,33$ ), tada lomljena zraka prolazi vodom pod kutom od  $32^\circ$  u odnosu na okomicu (Slika 1).



Slika 1

Snellov zakon opisuje put zraka bez obzira na to ulaze li zrake iz zraka u staklo ili obrnuto. To znači, ako na slici obrnemo smjer strelica, ta slika i dalje opisuje put zraka (sa zamijenjenim upadnim kutom  $\theta_i$  i kutom loma  $\theta_r$ ). Ako zraka svjetlosti ide iz stakla u zrak, izlazna zraka ima veći kut u odnosu na okomicu nego upadna zraka.

Za određeni kut dogodit će se da zraka nakon loma putuje po površini materijala. Za kutove veće od tog graničnog, nema lomljenih zraka, sve se totalno reflektiraju natrag u staklo.

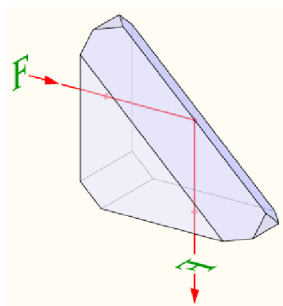
Taj granični kut iznosi

$$\sin \theta_c = \frac{1}{n}$$

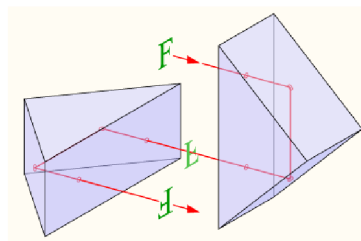
Do totalne refleksije dolazi samo kad zraka svjetlosti ide iz optički gušćeg sredstva (veći indeks loma) u optički rjeđe sredstvo (manji indeks loma).

Vizualni optički sustavi često proizvode obrnutu sliku (više o tome je u Vježbi 4) koja se mora naknadno uspraviti. Obrnuta slika znači da je došlo do zamjene gore-dolje i lijevo-desno. Ispravljanje se može postići dodatnom lećom (što komplicira sustav) ili refleksijom na ploham prizme. Jedna refleksija u zrcalu ispravi zamjenu lijevo-desno, a druga gore-dolje, dakle za potpuno ispravljanje slike potreban je parni broj refleksija. Na stranice prizmi mogu se naporiti refleksijski slojevi koji imaju zrcalna svojstva ili se prizma može dizajnirati tako da na njenim ploham dolazi do totalne refleksije. Kod totalne refleksije nema apsorpcije svjetlosti u materijalu.

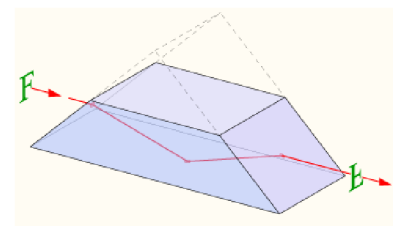
Krov na jednoj od strana prizme vrši dodatni okret.



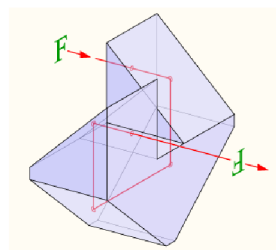
Krovná prizma



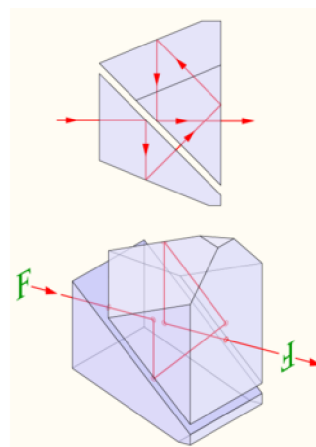
Porro prizma I reda



Dove prizma



Porro Abbe prizma



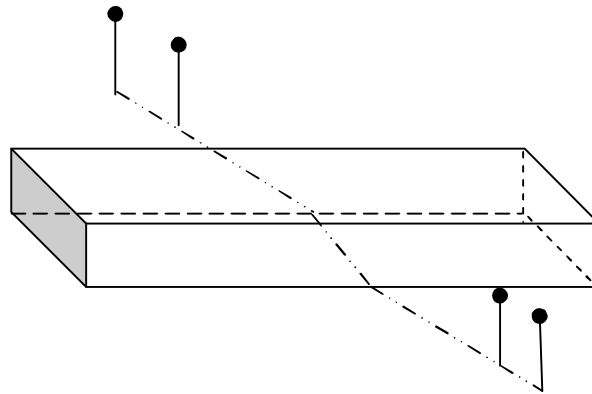
Schmidt Pechan-ova prizma

Slika 2

## Određivanje indeksa loma staklene planparalelne ploče grafičkom metodom

### Prva metoda

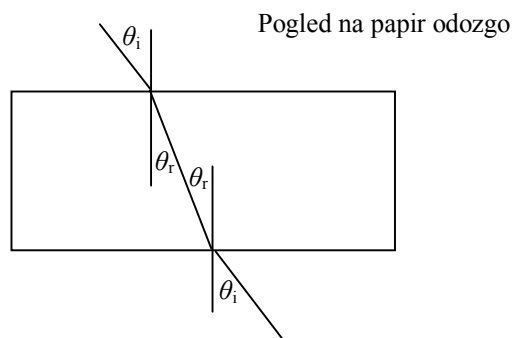
- Na plutenu ploču čavlicima pričvrstite komad bijelog papira.
- Na papir stavite planparalelnu ploču i označite olovkom njene bridove na papiru.
- Upadnu zraku odredite pomoću dvije pribadače zabodene u papir.
- Pribadače treba gledati kroz planparalelnu ploču tako da se poklapaju.
- Izlazna zraka odredi se opet pomoću dviju pribadača. Gledajući kroz staklo sve četiri pribadače moraju se poklapati.



Slika 3

- Nacrtajte olovkom upadnu, lomljenu i izlaznu zraku. Kakav je međusobni položaj tih zraka?
- Izmjerite pomoću kutomjera kut upadanja i kut loma te odredite indeks loma stakla pomoću izraza

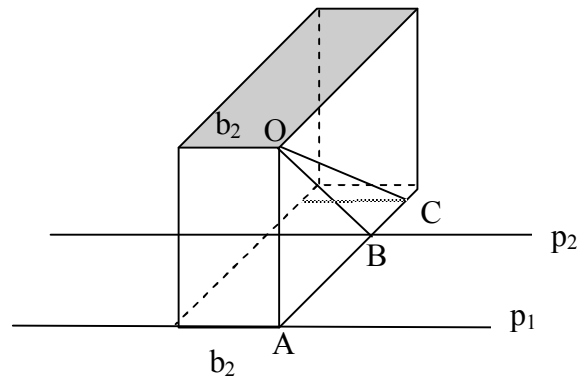
$$n = \frac{\sin \theta_i}{\sin \theta_r}$$



Slika 4

### Druga metoda

- Na komad bijelog papira nacrtajte dva paralelna pravaca  $p_1$  i  $p_2$  čija je udaljenost između 2 cm i 3 cm.
- Planparalelnu ploču stavite svojim najkraćim bridom  $b_2$  na pravac  $p_1$ .

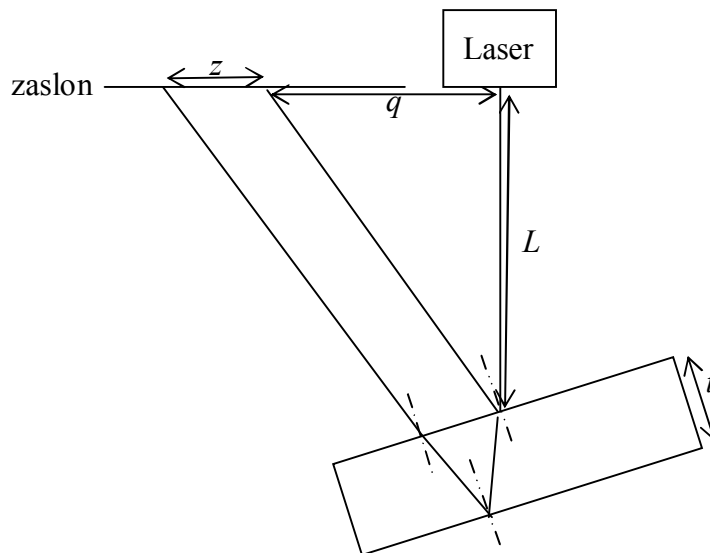


Slika 5

- Kroz brid  $b_2$  gledajte, u staklu, pravac  $p_2$ . Zbog loma on se prividno pomaknuo paralelno sa samim sobom, te se njegova virtualna slika vidi u  $p_3$ .
- Označite položaj  $p_3$  na papiru olovkom.
- $BO$  je zraka u staklu, koja se kod izlaza lomi u pravac  $CO$ . Dakle, kut  $AOB$  je jednak kutu loma  $\theta_r$ , a kut  $AOC$  je jednak kutu upadanja  $\theta_i$ . Mjerenjem dužina  $AB$ ,  $AC$  i  $AO$  odredite tangense tih kutova, zatim njihove sinuse i konačno indeks loma stakla.
- Načinite crtež koji u prirodnoj veličini prikazuje put zraka.

## Određivanje indeksa loma staklene planparalelne ploče pomoću reflektirajućeg laserskog snopa

Ova metoda mjerenja indeksa loma koristi refleksije laserskog snopa s prednje i stražnje plohe bloka stakla. Te dvije refleksije će proizvesti dvije točke na zaslonu koji je okomit na ulazni laserski snop. Iz razmaka tih točaka  $z$ , udaljenosti od bliže točke do lasera  $q$  te udaljenosti lasera i staklenog bloka  $L$  može se izračunati indeks loma stakla  $n$ .



Slika 6

Približna formula (u aproksimaciji malih kutova, tj.  $q \ll L$ ) jest

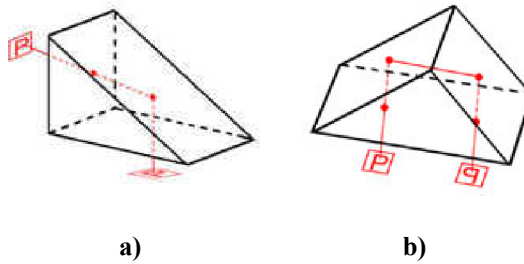
$$n = \frac{t \cdot q}{z \cdot L}$$

- Postavite zaslon u ravnini lasera, postavite blok stakla na drugi kraj stola i lagano ga zakrenite. Uključite laser.
- Izmjerite veličine  $z$ ,  $q$ ,  $L$  i  $t$ .
- Promijenite kut stakla i ponovite mjerenja. Napravite 4 mjerenja za različite kutove.
- Izračunajte srednju vrijednost i odstupanje.

## Primjena totalne refleksije kod prizmi

Pogledajte značku s INA logom kroz:

- Porro prizmu I reda koju složenu od dvije pravokutne prizme (Slika 2)
- Pravokutnu prizmu kroz jednu manju plohu (Slika 7a)



Slika 7

- Pravokutnu prizmu kroz veću plohu (Slika 7b)
- Dove prizmu
- Krovnu prizmu

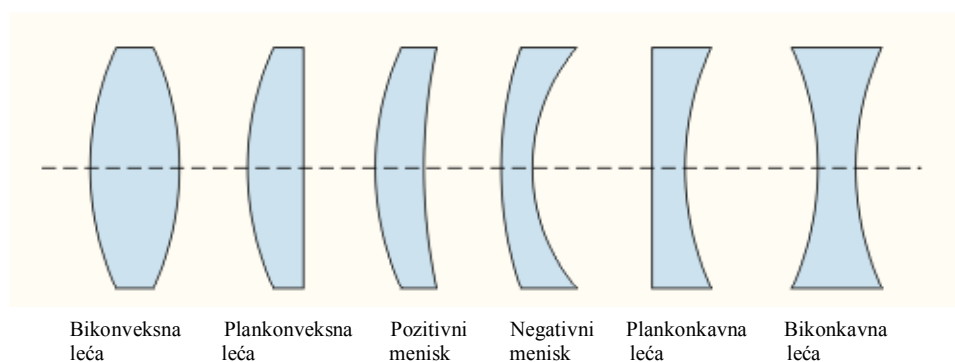
Opišite kakvu sliku daje svaka od prizmi.

## Vježba 3

### Određivanje žarišne duljine leća različitim metodama

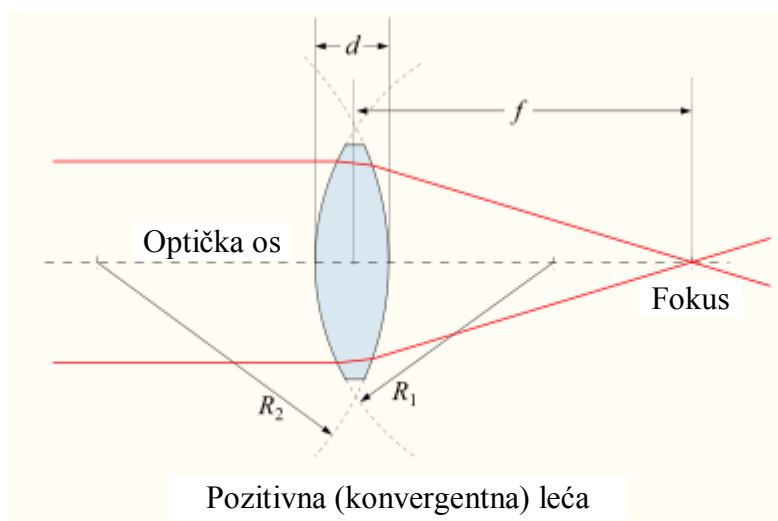
#### Uvod

Leće se izrađuju od stakla ili od sličnih prozirnih materijala koji lome svjetlost na svojoj površini. Ovisno o obliku, leće mogu skupljati ili raširiti snop paralelnih zraka koje padnu na njih. Leće koje su u sredini deblje nego na rubu zovu se konvergentne leće (pozitivne), a leće koje su u sredini tanje nego na rubu zovu se divergentne leće (negativne).



Slika 1

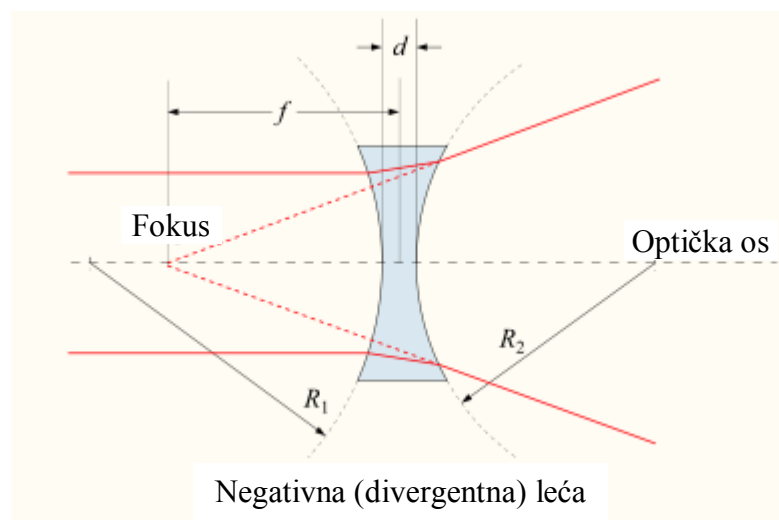
Snop paralelnih zraka koji upada na konvergentnu leću nakon loma se skuplja, a zrake se sijeku u jednoj točki koja se zove fokus leće. Udaljenost fokusa od leće je žarišna duljina. Žarišna duljina  $f$  je karakteristika dane leće i ovisi o vrsti stakla i obliku same leće.



Slika 2

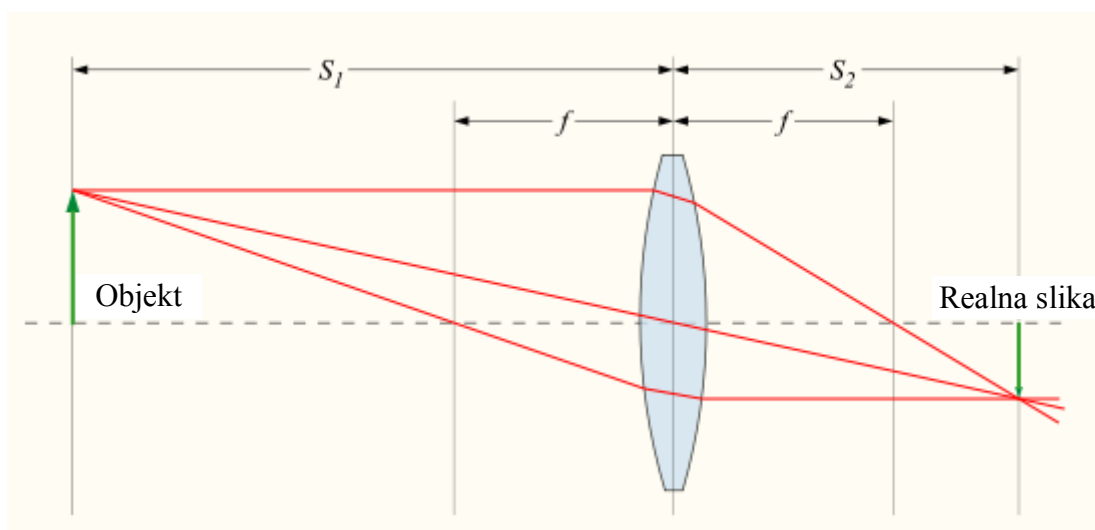
Snop paralelnih zraka koji upada na divergentnu leću raširi se poslije loma, a produžeci tih zraka sijeku se u fokusu. Svaka leća ima dva fokusa (sa svake strane leće) koji leže na optičkoj osi.





Slika 3

Kao i kod sfernih zrcala (Vježba 1), za određivanje slike pri uporabi leća postoje jednostavna pravila.



Slika 4

- Upadne zrake koje su paralelne optičkoj osi, nakon loma prolaze kroz fokus.
- Upadne zrake koje prolaze kroz fokus, izlaze paralelno s optičkom osi.
- Zrake koje prolaze kroz centar leće prolaze ravno i ne lome se.

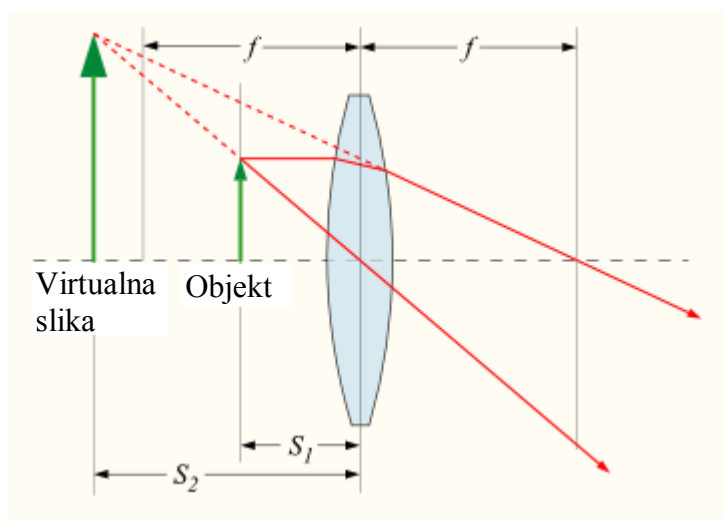
To je grafička metoda za određivanje položaja slike. Formula koja povezuje položaj predmeta i položaj slike je

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}$$

Konvencija koja se ovdje koristi za predznak je sljedeća: Vrijednost  $f$  pozitivna je za konvergentnu leću, a  $S_1$  je pozitivan na lijevoj strani, gdje se nalazi objekt.

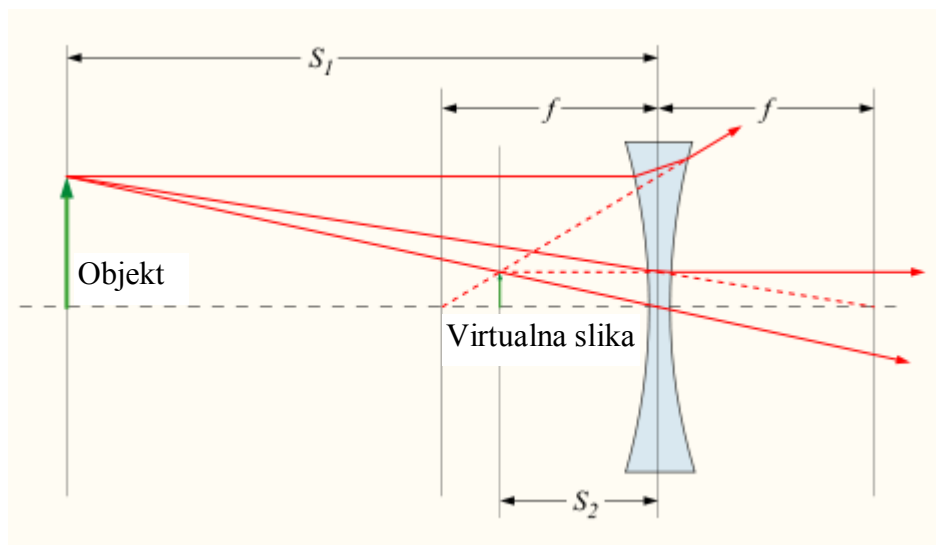
Za  $S_1 > f$ ,  $S_2$  je također pozitivan, realna slika je na desnoj strani (Slika 4). Ta realna slika može se zabilježiti na zaslonu pa na tom principu funkcioniraju fotoaparati.

Ako je predmet na manjoj udaljenosti od  $f$  ( $S_1 < f$ ), tada jednačba leće daje negativan  $S_2$ . To odgovara virtualnoj slici koja se nalazi s lijeve strane leće (Slika 5). Na tom princip radi povećalo.



Slika 5

Formula navedena na stranici 17 može se koristiti i za divergentne leće (uvrštavanjem negativnog fokusa  $f$ ). Divergentne leće mogu proizvesti samo virtualne slike (Slika 6).



Slika 6

Gornja formula vrijedi čak i kad leće nisu tanke ili kad se radi o sustavu s više leća. U tom slučaju  $S_1$  i  $S_2$  se računaju od glavnih ravnina sustava.<sup>2</sup>

Povećanje slike je omjer visine slike i visine samog predmeta. Lako je geometrijski dokazati da je povećanje jednako omjeru  $S'/S$ .

<sup>2</sup> U glavnoj ravnini sijeku se upadne zrake koje prolaze fokusom predmeta sa zrakama koje izlaze iz sustava paralelno s osi sistema.

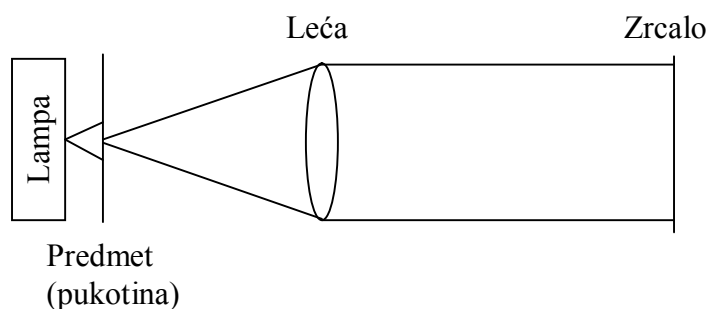
## 1. Mjerenje žarišne duljine pozitivne leće – predmet u beskonačnosti

Najbrži, ali samo približni način određivanja fokusa pozitivne leće je uzeti leću i usmjeriti je prema nekom udaljenom osvijetljenom predmetu, na primjer, prema objektu vani (koji se vidi kroz prozor) ili prema udaljenom predmetu u laboratoriju. Za takav objekt možemo reći da se nalazi približno u beskonačnosti pa će stvoriti realnu sliku u fokusu.

- Uzmite leću i okrenite je prema udaljenom izvoru svjetla (npr. osvijetljenim ulaznim vratima)
- Iza leće postavite zaslon od bijelog papira (registar s bijelim papirom)
- Mijenjajte udaljenost leće od zaslona dok na zaslonu ne dobijete realnu sliku udaljenog izvora.
- Odredite udaljenost leće od zaslona. Procijenite točnost s kojom možete odrediti tu udaljenost.

## 2. Mjerenje žarišne duljine pozitivne leće – autokolimacija

S jedne strane leće postavite lampu i predmet (maska s pukotinom), a s druge zrcalo (Slika 7).



Slika 7

Kada je predmet u fokalnoj ravnini leće (tj.  $S = f$ ), sve zrake s predmeta izaći će iza leće paralelno. Nakon refleksije na ravnom zrcalu zrake ostaju paralelne, prolazom kroz leću natrag konvergiraju u točku u fokalnoj ravnini. Dakle, žarišna duljina može se odrediti mijenjanjem udaljenosti između leće i predmeta, sve dok se na objektu-zaslonu ne formira oštra slika. Ta udaljenost predmeta-zaslona od leće jednaka je žarišnoj duljini.

- Složite eksperiment na optičkoj klupi prema shemi na Slici 7.
- Odredite položaj leće tako da se na zaslonu dobije oštra slika.
- Je li slika uspravna ili obrnuta? Je li uvećana?
- Je li udaljenost od leće do zrcala važna? Zašto?
- Odredi nepouzdanost mjerenja.
- Daje li ova druga metoda isti rezultat, unutar odstupanja, kao i prethodno mjerenje?
- Koji su glavni uzroci greške?

### 3. Mjerenje žarišne duljine pozitivne leće – jednačba leće

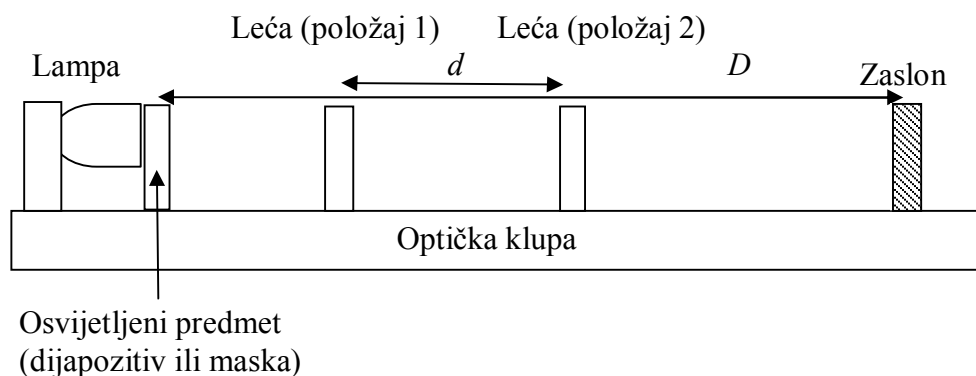
U ovom dijelu mjerenja su jednaka kao kod autokolimacije, samo što se umjesto zrcala postavi zaslon. Iz mjerenja  $S$  i  $S'$  računa se žarišna duljina  $f$ .

- Postavite eksperiment za istu leću koju ste koristili u prethodnom dijelu.
- Za pet različitih vrijednosti  $S$  odredite vrijednost  $S'$ .
- Nacrtajte graf na kojem je  $1/S$  na osi x, a  $1/S'$  na osi y.
- Nacrtajte pravac koji najbolje odgovara danim točkama i odredite  $1/f$  koji je jednak odsječku pravca na osi y.
- Je li vrijednost  $f$  konzistentna s prethodnim mjerenjima?
- Koja je vrijednost nagiba pravca? Odgovara li nagib pravca predviđenoj vrijednosti?
- Koji je glavni izvor greške?

### 4. Mjerenje žarišne duljine pozitivne leće – Besselova metoda

Kada su predmet i zaslon na fiksnoj udaljenosti  $D$  (koja je barem 4 puta veća od žarišne duljine leće koja se mjeri), postoje dva položaja u kojima će pozitivna leća dati realnu obrnutu sliku. Ako je  $d$  razmak između ta dva položaja leće, žarišna duljina može se izračunati iz sljedeće formule:

$$f = \frac{D^2 - d^2}{4D}.$$



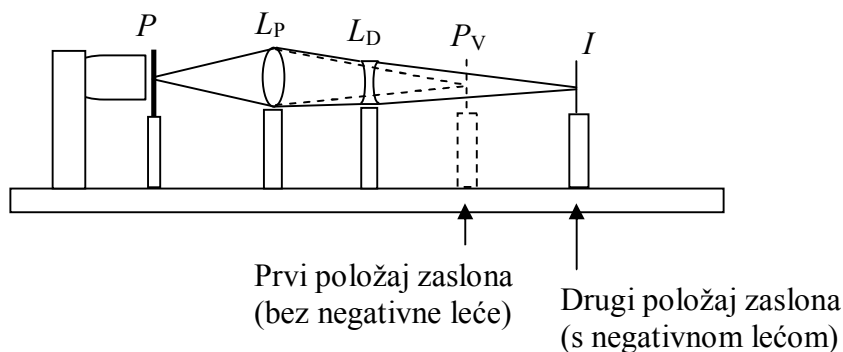
Slika 8

- Pripremite eksperiment kao na gornjoj slici. Kao predmet može se koristiti maska s trokutastom mrežom ili dijapozitiv. Udaljenost objekta od zaslona mora biti barem četiri puta veća od žarišne duljine leće koja se koristi. Zabilježite udaljenost  $D$  između predmeta i zaslona.
- Odredite dva položaja u kojima leća daje jasnu sliku, zabilježite ih te izračunajte  $d$ .
- Ponovite postupak za četiri različite udaljenosti  $D$ . Izračunajte  $f$  za svaku od njih.
- Usporedite rezultate svih metoda koje ste koristili za određivanje  $f$ .

## 5. Mjerenje žarišne duljine negativne leće pomoću virtualnog predmeta

Negativne (divergentne leće) mogu dati samo virtualnu sliku realnog predmeta. Da bi se dobila realna slika, treba uzeti virtualni predmet. Virtualni predmet  $P_V$  može se dobiti upotrebom pomoćne leće  $L_P$  koja daje na prvom položaju zaslona realnu sliku  $P_V$ , predmeta  $P$ . Ta realna slika bit će virtualni predmet za divergentnu leću  $L_D$  ako tu leću stavimo na put zraka koje izlaze iz  $L_P$ .

U drugom položaju zaslona dobiva se realna slika  $I$  virtualnog predmeta  $P_V$ .



Slika 9

Udaljenost leće  $L_D$  od prvog položaja zaslona  $P_V$  je u stvari  $S$ , udaljenost predmeta (u ovom slučaju virtualnog) od leće, a udaljenost drugog položaja zaslona  $I$  od leće  $L_D$  je  $S'$ .

Žarišna duljina se dobiva iz jednadžbe leće.

U ovom slučaju  $S$  je negativan,  $S'$  je pozitivan, a  $f$  na kraju treba biti negativan (negativna, tj. divergentna leća).

- Postavite na optičku klupu izvor svjetlosti, predmet, pozitivnu leću i zaslon.
- Nađite realnu sliku  $P_V$  pozitivne leće  $L_P$ . Zabilježite položaj  $P_V$ .
- Između pozitivne leće  $L_P$  i zaslona dodajte negativnu leću. Udaljavajte zaslon sve dok opet ne dobijete oštru realnu sliku. Zabilježite položaj  $L_D$  i položaj  $I$ .
- Izračunajte  $S$ ,  $S'$  i  $f$  iz sljedećih izraza:

$$S = -|P_V - L_D| \quad S' = |I - L_D|$$
$$\frac{1}{f} = \frac{1}{S} + \frac{1}{S'} = \frac{1}{|I - L_D|} - \frac{1}{|P_V - L_D|}$$

## 6. Simulacija optičke klupe (za Vježbe 1, 3 i 4)

## Vježba 4

### Sustavi leća, optički instrumenti

#### Mjerenje fokalne duljine sustava leća

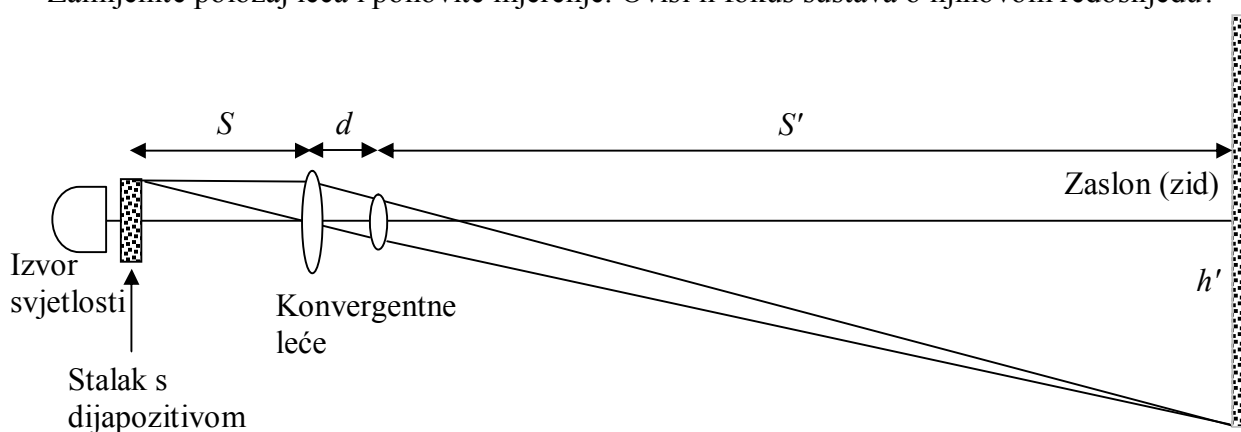
Ako se sustav sastoji od dvije tanke leće fokalne duljine  $f_1$  i  $f_2$  koje su međusobno udaljene  $d$  onda je fokalna duljina cijelog sustava  $f$  jednaka:

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

Ili jednostavnije:

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

- Postavite na optičku klupu izvor svjetlosti i stalak s dijapozitivom. Iza stalka s dijapozitivom postavite dvije pozitivne leće (jednu s crnim rubom i jednu s crvenim rubom) tako da se baze nosača dodiruju.
- Pomičite zajedno nosače s lećama dok ne dobijete oštru sliku na zidu.
- Izmjerite udaljenost predmeta (dijapozitiva) od prve leće  $S_1$ , udaljenost između leća  $d$  i udaljenost od druge leće do zaslona (zida)  $S_2$ .
- Iz poznatih  $S_1$  i  $S_2$  pomoću jednadžbe leće<sup>3</sup> odredite  $f$ .
- Usporedite  $f$  dobiven na taj način s fokalnom duljinom dobivenom iz gornje jednadžbe. Poznate su fokalne duljine leće s crnim rubom  $f_1 = 223,1$  mm i leće s crvenim rubom  $f_2 = 86$  mm.
- Zamijenite položaj leća i ponovite mjerenje. Ovisi li fokus sustava o njihovom redoslijedu?



Slika 1

<sup>3</sup> Jednadžba leće:  $\frac{1}{f} = \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_2}$

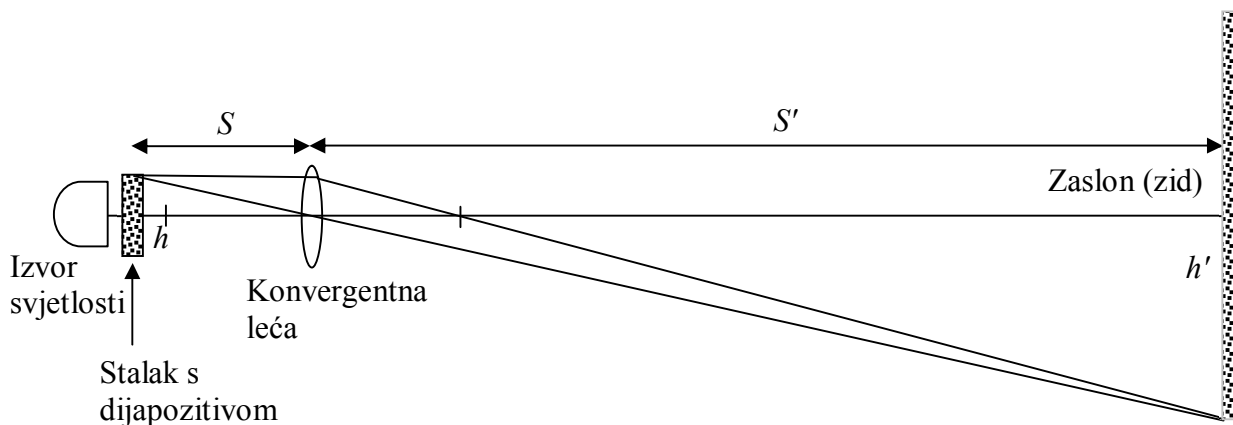
## Projektor

Projektor se sastoji od izvora svjetlosti, kondenzora koji skuplja tu svjetlost da bi što bolje osvijetlio dijapozitiv, dijapozitiva („predmeta“ u ovom optičkom sustavu) i pozitivne leće koja na platnu (zaslonu) stvara realnu uvećanu sliku. Kada je dijapozitiv u fokusu leće (ili vrlo blizu njega), slika je realna, obrnuta (da bi projekcija bila uspravna, dijapozitiv treba biti obrnut) i uvećana. Ako se predmet nalazi u samom fokusu, slika je smještena u beskonačnosti.

U realnim uvjetima, beskonačno znači „vrlo daleko“ u odnosu na parametre sustava, na primjer, za leću fokalne duljine  $f = 10$  cm, dvadeset fokalnih duljina tj. 2 m već se može smatrati beskonačnošću.

U ovoj vježbi potrebno je složiti projektor bez kondenzora (koji utječe samo na osvijetljenost slike).

- Složite projektor kao što je prikazano na slici. Na kraj optičke klupe stavite nosač s lampom, zatim nosač s dijapozitivom prislonite direktno na izvor svjetlosti (pazite da dijapozitiv ne dodiruje žarulju), a nosač s lećom (crni rub) polagano odmičite dok ne dobijete ostru sliku na zidu.
- Odredite povećanje sustava iz omjera veličine slike i veličine predmeta  $h'/h$ .
- Odredite povećanje iz omjera udaljenosti slike od leće i udaljenosti predmeta od leće  $S'/S$  (Vježba 3).
- Ponovite postupak za leću s crvenim rubom.

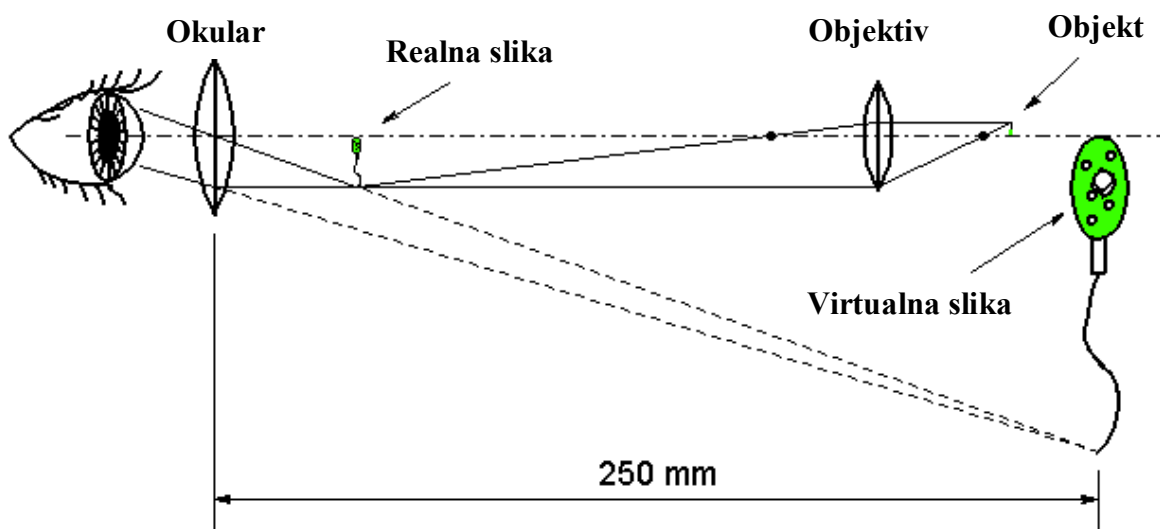


Slika 2

## Mikroskop

Pomoću mikroskopa možemo vidjeti uvećanu virtualnu sliku malih realnih predmeta. Sastoji se od okulara i objektiva.

Objektiv je konvergentna leća (ili češće sustav leća) vrlo kratkog fokusa. Predmet (objekt) nalazi se sasvim blizu fokusa objektiva, malo ispred njega. Objektiv daje realnu, obrnutu, uvećanu sliku predmeta. Ta slika se promatra pomoću okulara, koji je također konvergentna leća (ili sustav leća). Realna slika koju je proizveo objektiv pada blizu fokusa okulara, malo iza njega, tako da je slika koju okular stvara virtualna, uvećana i jednako orijentirana kao i realna slika.



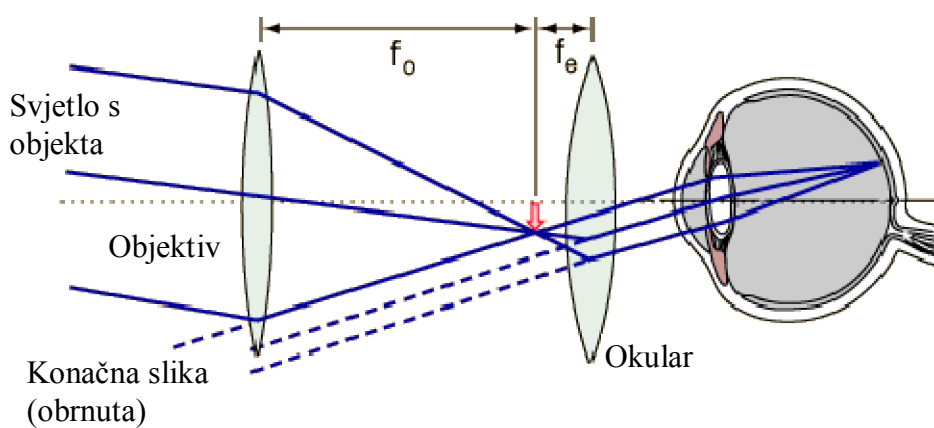
Slika 3

- Na optičku klupu postavite nosač s mjernom skalom. Uz nju postavite nosač s pozitivnom lećom fokusa 42,9 mm (leća s plavim rubom). To je objektiv mikroskopa.
- Postavite blizu nosač s lećom fokusa 223,1 mm (leća s crnom rubom). To je okular mikroskopa. Gledajte kroz okular i postupno ga odmičite dok ne dobijete jasnu povećanu sliku mjerne skale.
- Ponovite cijeli postupak s drugim okularom (leća s crvenim rubom  $f = 86$  mm). Je li povećanje veće ili manje nego u prethodnom slučaju?



## Keplerov teleskop (astronomski)

Astronomski ili Keplerov teleskop sastoji se od dvije pozitivne leće: objektiva, koji formira sliku udaljenog predmeta u svojoj fokalnoj ravnini i okulara koji se ponaša kao povećalo i povećava sliku koju je formirao objektiv. Princip je sličan onome kod mikroskopa, osim što je u ovom slučaju predmet na jako velikoj udaljenosti, a kod mikroskopa na maloj udaljenosti. Za razliku od mikroskopa teleskopi su afokalni sustavi, što znači da im je fokalna duljina u beskonačnosti. To znači da će paralelni snop zraka koji uđe u afokalni sustav izaći kao paralelni snop zraka. Duljina teleskopa jednaka je sumi fokalnih duljina okulara i objektiva, a kutno povećanje je:  $-f_o/f_e$ . Minus znači da je slika obrnuta.

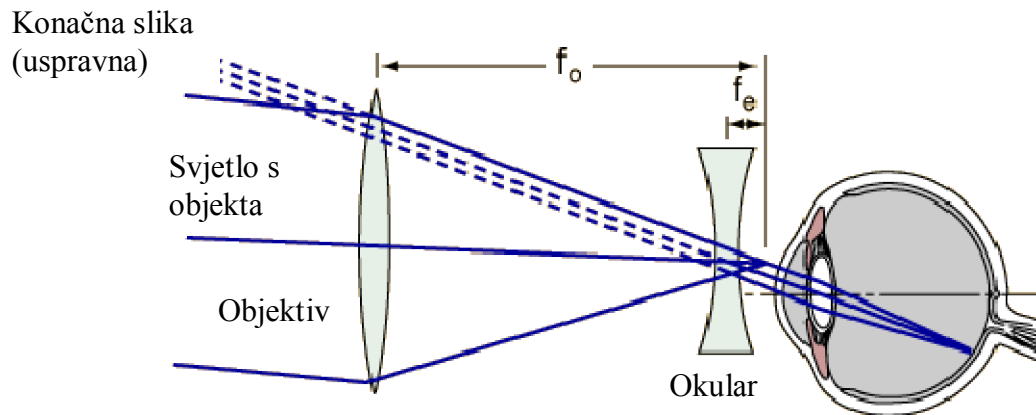


Slika 4

- Na optičku klupu postavite leću s crnim rubom kao objektiv (prema zidu na kojem je stranica sa sitnim tekstom). Leća s plavim rubom je okular kroz koji gledate dok ga polako odmičete da bi dobili oštru sliku.
- Iz omjera fokalnih duljina  $-f_o/f_e$  izračunajte kutno povećanje.
- Ponovite postupak za Keplerov teleskop upotrijebivši leću s crvenim rubom ( $f = 86 \text{ mm}$ ) kao objektiv. Kakvo je sad povećanje?

## Galileov teleskop

Galileov teleskop ima negativnu leću kao okular. Daje uspravnu sliku i kraći je od Keplerovog teleskopa. I u ovom slučaju vrijedi da je njegova duljina jednaka sumi fokalnih duljina okulara i objektiva, no kako je fokalna duljina okulara negativna, ukupna duljina je manja od fokalne duljine objektiva  $f_o$ . Kutno povećanje iznosi  $-f_o/f_e$ .



Slika 5

- Na optičku klupu postavite leću s crnim rubom kao objektiv (prema zidu na kojem je stranica sa sitnim tekstom). Leća sa zelenim rubom ( $f = -52,6 \text{ mm}$ ) je okular kroz koji gledate dok ga polako odmičete da bi dobili oštru sliku.
- Iz omjera fokalnih duljina  $-f_o/f_e$  izračunajte kutno povećanje.

## Simulacija optičke klupe (za Vježbe 1, 3 i 4)

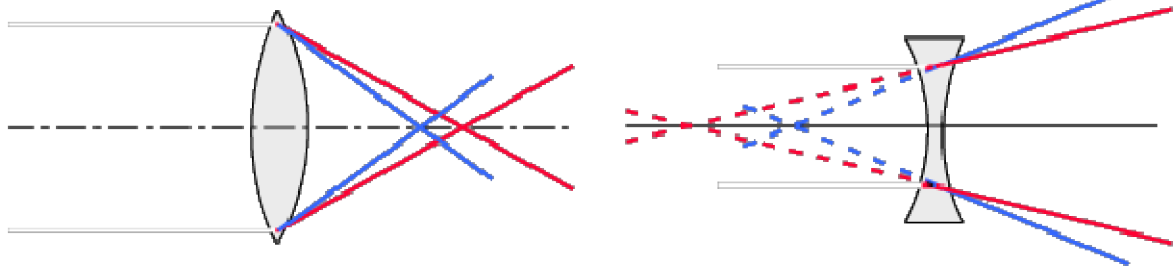
# Vježba 5

## Aberacije leća

### Uvod

U idealnom optičkom sustavu (u aproksimaciji paraksijalne optike), sve zrake iz jedne točke na objektu konvergiraju u jednu točku u ravni slike, formirajući jasnu sliku. U realnim slučajevima slika točke je zamučena zbog različitih utjecaja – aberacija. One se mogu podijeliti u dvije kategorije: kromatske i monokromatske.

Kromatske aberacije nastaju zbog različitog indeksa loma za različite valne duljine u staklu.



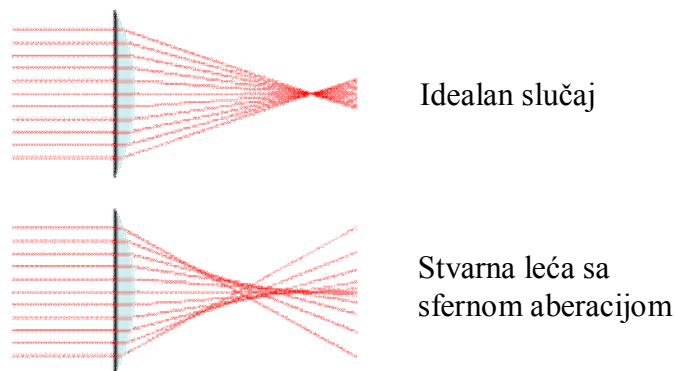
Slika 1

Budući da različite boje nemaju jednaku žarišnu duljinu, leća stvara sliku koja ima zamučene rubove u boji, najčešće ljubičastoj ili crvenoj.<sup>4</sup>

Monokromatske aberacije su: sferna aberacija, koma, astigmatizam, zakrivljenost polja i distorzija.

### Sferna aberacija

Kod leća koje imaju sferne površine, zrake koje su paralelne optičkoj osi, ali na različitoj udaljenosti od nje, fokusirat će se u različitim točkama. Marginalne zrake (to su zrake uz rub leće) imaju manji fokus od paraksijalnih zraka (zrake blizu optičke osi).<sup>5</sup>



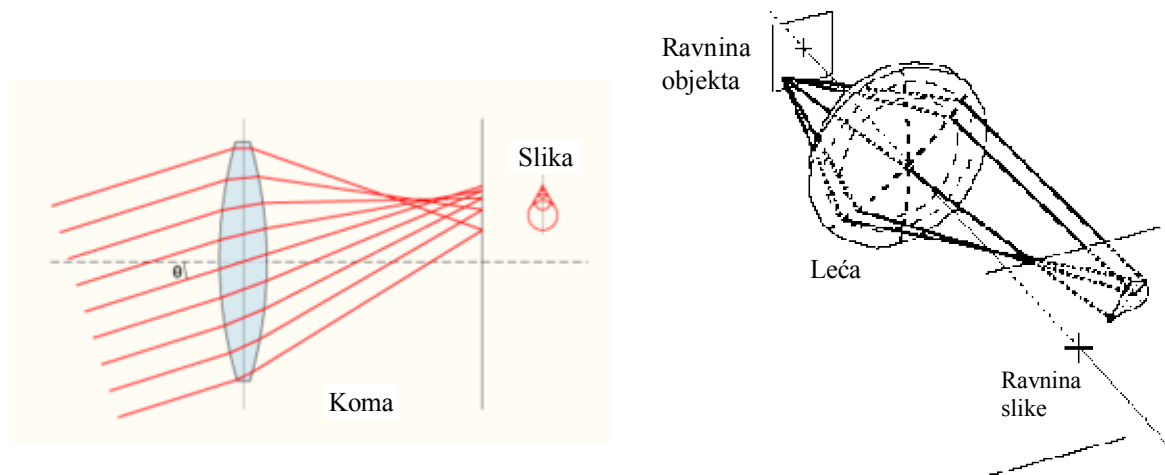
Slika 2

<sup>4</sup> Kromatska aberacija ispravlja se kombinacijom leća od krunskog i flint stakla, od kojih jedno ima manju, a drugo veću disperziju.

<sup>5</sup> Efekt ovisi o obliku leće, proporcionalan je četvrtoj potenciji dijametra i obrnuto proporcionalan trećoj potenciji žarišne duljine.

## Koma

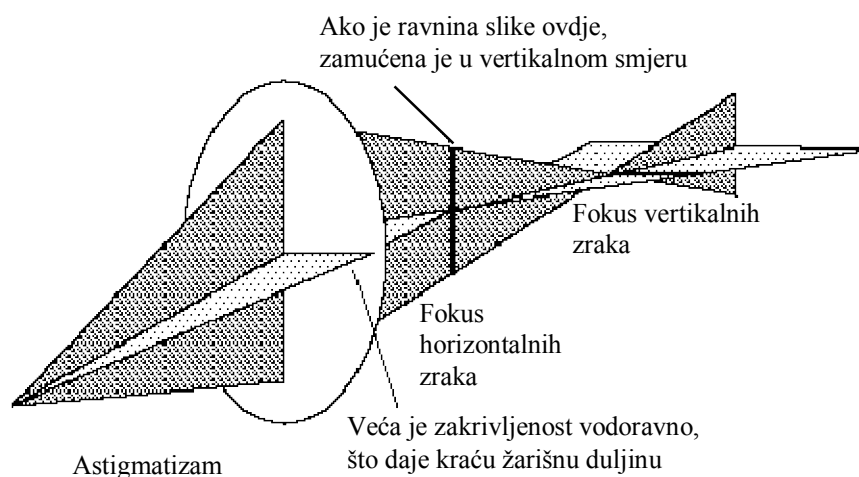
Kada se paralelan snop zraka koji upada pod nekim kutom na leću fokusira u fokalnoj ravнини u oblik komete umjesto u točku, kaže se da je u sustavu prisutna koma. Koma se definira kao promjena povećanja s ulaznom pupilom. Slika koju daje sustav s komom može biti oštra u sredini, ali mutna prema rubovima.



Slika 3

## Astigmatizam

Za analizu astigmatizma potrebno je promatrati zrake u dvije ravnine, horizontalnoj (sagitalnoj) i vertikalnoj (tangencijalnoj). Ako je prisutan astigmatizam, zrake u horizontalnoj (sagitalnoj) ravnini imaju fokus na različitom mjestu od zraka u vertikalnoj (tangencijalnoj) ravnini). Ti fokusi zovu se sagitalni i tangencijalni fokusi, i u njima zrake ne formiraju točku, već mali, oštri pravac.<sup>6</sup> Između njih je srednji fokus u kojem zrake formiraju krug koji je malo zamućen. Ta ravnina srednjeg fokusa najčešće je najbolji kompromis za položaj slike u sustavu sa astigmatizmom.



Slika 4

<sup>6</sup> Fokus vertikalnih zraka je horizontalna crta, a fokus horizontalnih zraka je vertikalna crta.

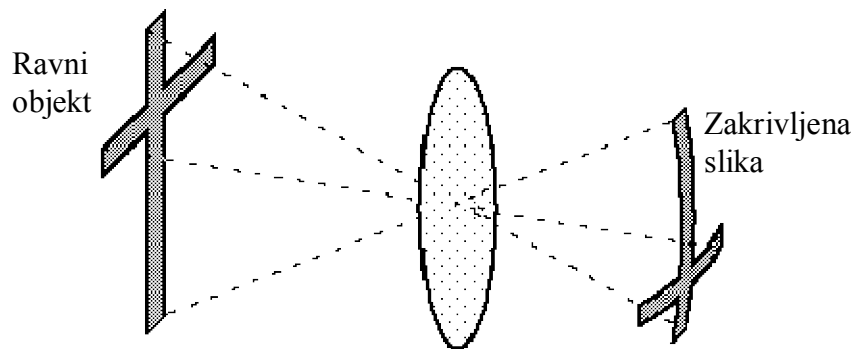
Primjer slike u sagitalnoj, tangencijalnoj i ravnini srednjeg fokusa prikazan je na Slici 5.



Slika 5

### Zakrivljenost polja

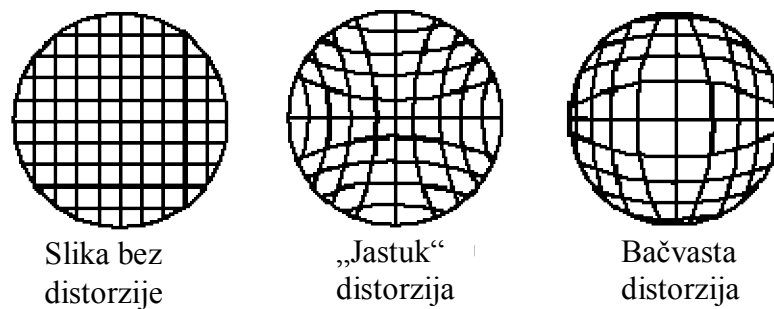
Zakrivljenost polja uzrokuje da se ravni predmeti preslikavaju na zakrivljenu plohu. Fokalna ravnina u tom je slučaju sferna ploha.



Slika 6

### Distorzija

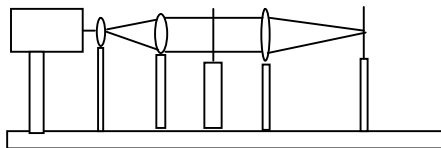
Distorzija je vrsta aberacije koja ne umanjuje oštrinu slike, ali je deformira. Distorzija je glavno ograničenje u povećanju obične lupe.



Slika 7

## Promatranje i mjerenje aberacija

Na optičkoj klupi nalaze se laserska dioda i dvije leće koje šire kolimirani (paralelni) laserski snop. Iza leća postavljeni su nosač u kojem se izmjenjuju različite maske i testna leća koja fokusira svjetlost na zaslon.



Slika 8

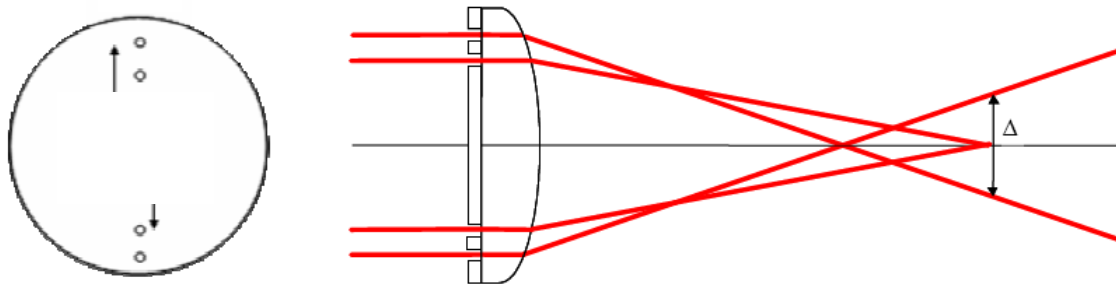
Da bi se maksimizirala sferna aberacija treba:

- ✓ maksimalno velik otvor (bez ikakve maske u nosaču)
- ✓ uzeti debelu leću i okrenuti ravnu stranu leće prema izvoru

Pomicanjem zaslona oko fokusa možete primijetiti da krug svjetlosti ima oštar rub prije fokusa (na udaljenosti manjoj od fokalne), u fokusu postoji jaki halo (utjecaj marginalnih zraka), a nakon fokusa nema oštrog ruba (vidi Sliku 2).

Sferna aberacija može se smanjiti ograničavanjem utjecaja marginalnih zraka (zraka koje prolaze rubom leće), tj. smanjivanjem otvora.

Stavite u nosač masku s malim otvorom i ponovo pomičite zaslon oko fokusa. U ovom slučaju svijetli krug ima oštre granice prije i poslije fokusa, a halo u samom fokusu nije toliko izražen.



Slika 9

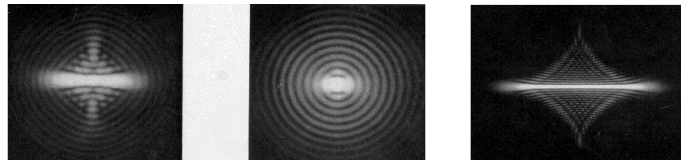
Da biste kvantitativno odredili količinu sferne aberacije postavite u nosač masku na kojoj piše „sferna aberacija“. Ta maska propušta po dvije marginalne vanjske i unutarnje zrake.

- Izmjerite udaljenost vanjskih zraka u fokalnoj ravni unutarnjih zraka ( $\Delta$  na Slici 9).

Da bi se mogao uočiti astigmatizam treba:

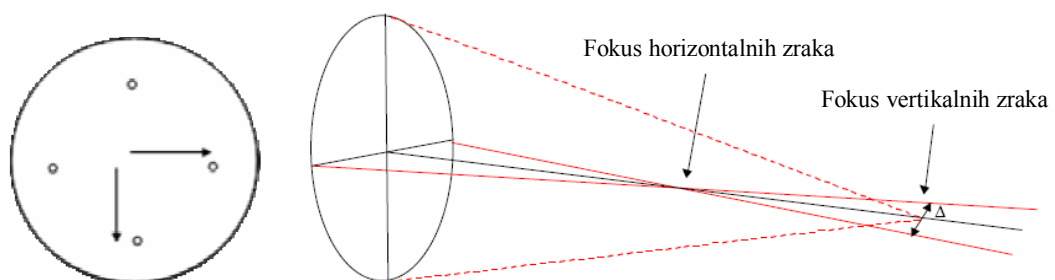
- ✓ uzeti tanju testnu leću na čijem rubu piše „astigmatizam“ i njenu zakrivljenu stranu okrenuti prema izvoru (da bi se minimizirala sferna aberacija)
- ✓ u nosač staviti masku s manjim otvorom
- ✓ zakrenuti za par stupnjeva

Pomicanjem zaslona oko fokusa pokušajte dobiti sagitalni, srednji i tangencijalni fokus



Slika 10

Da biste kvantitativno odredili količinu astigmatizma uzmite masku na kojoj piše „astigmatizam“ i stavite je u nosač umjesto manjeg otvora. Ta maska propušta po dvije tangencijalne i dvije sagitalne zrake.



Slika 11

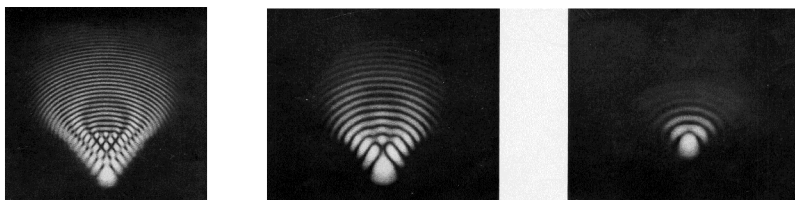
Izravnajte leću i promotrite pomicanjem zaslona kako se zrake ponašaju oko fokusa.

- Zakrenite leću za nekoliko stupnjeva i opet promotrite ponašanje zraka svjetlosti.
- Odredite udaljenost između tangencijalnih zraka u sagitalnoj fokalnoj ravnini ( $\Delta$  na Slici 11).

Da bi se mogla promatrati koma treba:

- ✓ ravnu stranu testne (tanke) leće okrenuti prema izvoru i lagano je zakrenuti
- ✓ maknuti sve maske

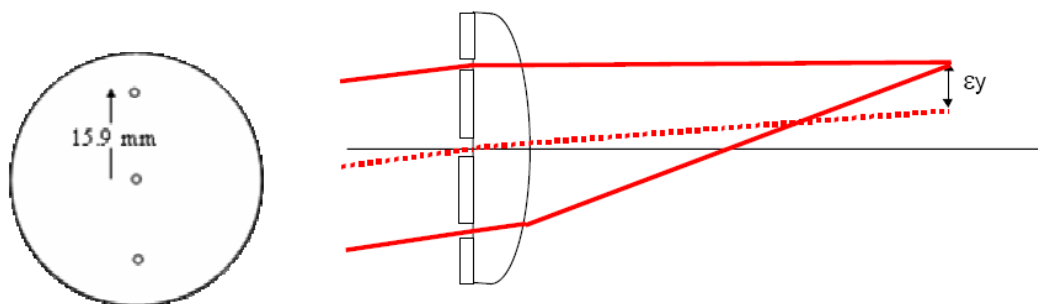
Isprobavanjem različitih zakreta pokušajte u fokusu dobiti čistu komu kao na Slici 12. Vjerojatno nećete u potpunosti uspjeti jer sustav sadrži također i sfernu aberaciju i astigmatizam. Zabilježite oblik slike.



Slika 12

Za kvantitativno određivanje kome postavite u nosač masku koja propušta glavnu zraku kroz centralnu rupu i dvije vanjske zrake (na maski piše „koma“).

- Promotrite ponašanje zraka oko fokusa kada leća nije zakrivljena
- Zakrenite leću i odredite udaljenost između fokusa marginalnih zraka i glavne zrake ( $\epsilon_y$  na Slici 13).



Slika 13

Za promatranje distorzije uzmite debelu leću i postavite je ravnom stranom prema izvoru. Postavite u nosač masku koja propušta dvodimenzionalan niz jednako udaljenih zraka (na maski piše „distorzija“).

- Kakav je oblik slike prije fokusa, a kakav nakon fokusa?

Za opažanje kromatske aberacije na drugi kraj optičke klupe postavite izvor bijele svjetlosti (lampu), ispred nje postavite nosač za maske te u njega stavite masku za kromatsku aberaciju. Maska se sastoji od jedne male rupice.

- Iza maske stavite leću kojoj na rubu piše „kromatska aberacija“.  
Na zaslonu promotrite sliku ispred fokusa, u fokusu i iza fokusa te opišite što se događa.
- Zamijenite leću s akromatskim dubletom i promotrite i opišite što se događa oko fokusa.