

TARTU ÜLIKOOL  
Teaduskool

# Geomeetriline optika

*Koostanud Henn Voolaid*

Tartu 2008

## Eessõna

Käesoleva õppevahendi kasutajana on mõeldud eelkõige täppisteaduste vastu huvi tundvaid gümnaasiumi õpilasi, kes on koondunud TÜ Teaduskooli juurde. Seetõttu põhineb õppematerjali esitus peamiselt gümnaasiumi füüsikakursusel. Õppevahendit võivad teatud määral kasutada ka kõrgkoolide üliõpilased, kelle erialaks ei ole füüsika.

# 1 Sissejuhatus

**Geomeetriline optika** ehk kiirteoptika on optika osa, kus valguse levimist kirjeldatakse valguskiirte abil, milleks on ristsirged valguse lainepinnale (pinnanormaalid). Võib ka öelda, et kiir on joon, mis näitab valgusenergia levimise suunda.

Geomeetrilises optikas käsitletakse valgust sirgjooneliselt levivana, ükskõik kui väikestest avadest see läbi läheb. Teiste sõnadega, geomeetrilises optikas loetakse valguse lainepikkus  $\lambda = 0$  ja seetõttu pole vaja difraktsiooni või interferentsi arvestada. Geomeetrilise optika ülesandeks on eseme kujutise leidmine pärast **optilise süsteemi** läbimist. Optiliseks süsteemiks võivad olla igasugused detailid, kus valguskiir peegeldub või murdub.

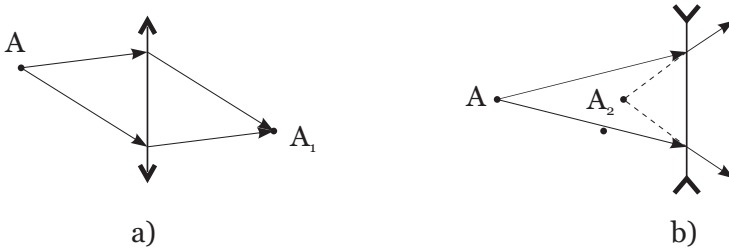
Meie käsitleme ainult **ideaalseid optilisi süsteeme**, st. selliseid süsteeme, mis annavad esemest sellega sarnase kujutise. Ideaalse optilise süsteemi korral vastab igale eseme punktile ainult üks kujutise punkt. Sellist kujutist nimetatakse stigmaatiliseks ehk punkt kujutiseks.

Ideaalsed optilised süsteemid on alati **tsentreeritud süsteemid**. Optiline süsteem on tsentreeritud, kui optiliste pindade kõverustsentrleid asuvad ühel sirgel, mida nimetatakse **optiliseks peateljeks**. Geomeetrilise optika kasutab ainult **paraksiaalseid kiiri** ehk teljelähedasi kiiri. Need on kiired, mis moodustavad optilise teljega väikesi nurki, st nurki, mille korral võime nende siinused ja tangensid lugeda võrdseks nurkade suursutega radiaanides.

Eseme **kujutiseks** nimetatakse mõne optilise seadme (ka silma) poolt tekitatud esemega sarnast pilti. Kujutisi jaotatakse **tõelisteks** ja **näivateks**. Kui eseme punktist  $A$  väljunud kiired koonduvad pä-

rast optilise süsteemi läbimist punktis  $A_1$ , siis on tegemist tõelise kujutisega. Kui aga süsteemi läbinud kiired näivad lähtuvat ühest punktist  $A_2$ , on tegemist näiva kujutisega.

Tõelist kujutist saab tekitada ekraanile, näivat ei saa. Silm annab esemest alati tõelise kujutise.



Joonis 1: Tõeline ja näiv kujutis

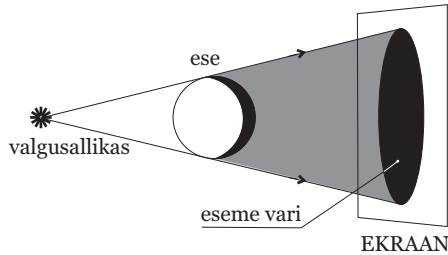
Geomeetrilises optikas kehtib **kiirte pööratavuse printsiip**: kiir läbib süsteemi päri- ja vastassuunas ühte teed mööda. Seetõttu võib vajadusel vahetada eseme ja selle kujutise asukohti. Näiteks, kui punktvalgusallikas panna punkti  $A$ , siis tema kujutis tekib punktis  $A_1$ . Kui aga valgusallikas panna punkti  $A_1$ , siis kiired läbivad süsteemi samu teid mööda, ainult vastassuunas ja kujutis tekib punktis  $A$ . Geomeetiline optika kasutab tihti **punktvalgusallikaid**, milleks nimetatakse valgusallikat või eseme piirkonda, mille mõõtmed on palju väiksemad kui kaugus vaatluskohani.

Valgus levib ühtlases (homogeenses ja isotroopses) keskkonnas **sirgjooneliselt**. Selle tõestuseks on punktvalgusallika poolt tekitatud varju terav piirjoon.

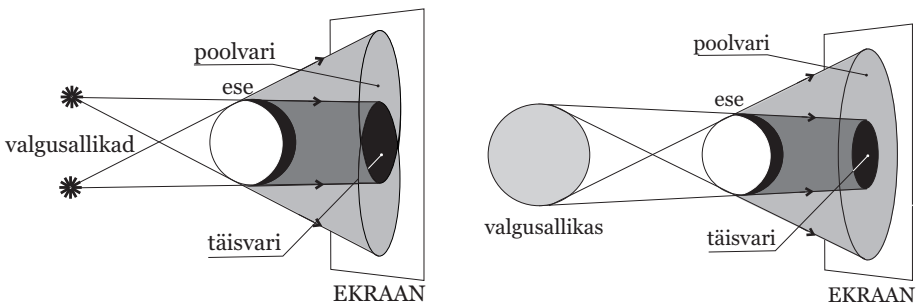
Punktvalgusallikas tekitab esemest **täisvarju**, mida näeme ekraanil eseme kontuuriga sarnase musta laiguna. Ruumi piirkonda, kuhu valgus ei satu, nimetatakse **täisvarju piirkonnaks**.

Kui on tegemist rohkem kui ühe punktvalgusallika või suure valgusallikaga, siis tekib lisaks täisvarjule ka **poolvari**, mida näeme ekraanil halli laiguna ümber täisvarju. Ruumi piirkonda, kuhu valgus

satub ainult osadest punktvalgusallikaist või osast suure valgusallika punktidest nimetatakse **poolvarju piirkonnaks**.



Joonis 2: Punktvalgusallikas tekitab esemest täisvarju.



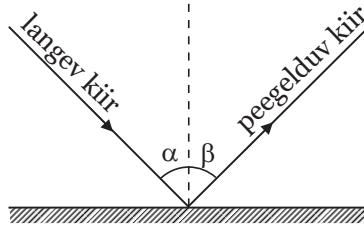
Joonis 3: Poolvarju tekkimine kahe punktvalgusallika ja suure valgusallika korral.

## 2 Valguse peegeldumine

Valguskiir levib ühtlases keskkonnas sirgjooneliselt, kuni jõuab mingi teise keskkonnani. Seal muudab kiir levimissuunda. Kui valgus pöörduv esimesse keskkonda tagasi, siis nimetatakse nähtust **peegeldumiseks**. Valgus võib peegelduda täielikult või osaliselt, viima-

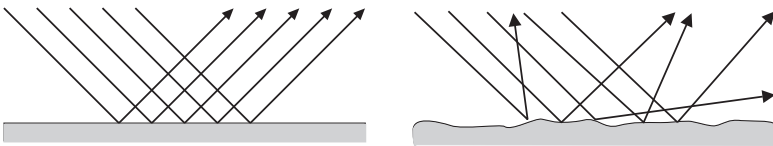
sel juhul läheb osa valgusest üle teise keskkonda (kas läbib seda või neeldub selles, st. valgusenergia muundub keskkonna siseenergiaks).

Valguse peegeldumisel kehtib peegeldumisseadus, mis ütleb, et **langev kiir, peegelduv kiir ja langemispunkti tõmmatud pinnanormaal asuvad ühes tasandis ning peegeldumisnurk võrdub langemisnurgaga.**



Joonis 4: Langemisnurk  $\alpha$  ja peegeldumisnurk  $\beta$  on võrdsed.

Keskkondade lahutuspinde käsitletakse kahel viisil. Ühel juhul on tegu sileda pinnaga, mis tähendab, et pinnakonaruste mõõtmed on väiksemad valguse lainepikkusest. Sel juhul käitub ka lai kiirtekimp vastavalt peegeldumisseadusele. Teisel juhul on tegu kareda pinnaga, kus pinna konaruste mõõtmed ületavad valguse lainepikkust. Sel juhul räägitakse hajusast ehk difuussest peegeldusest, mille korral iga kiire korral kehtib peegeldumisseadus, kuid laia kimbu korral ei kehti.



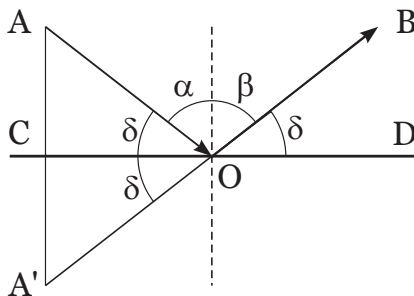
Joonis 5: Valguse peegeldumine siledalt ja karedalt pinnalt.

## 2.1 Valguse peegeldumise seadus

Valguse peegeldumise seadus tuleneb ühest printsiibist, mille esimesena sõnastas umbes 2000 a. tagasi Heron, kes väitis, et **valgus levib ühest punktist teise lühimat teed pidi**. Fermat' täpsustas seda 1662. a., väites, et **valgus levib teed mööda, mille läbimiseks kulunud aeg on minimaalne**.

Homogeense keskkonna korral on printsiibid samaväärsed, muidu mitte.

Tuletame Fermat' printsiibi abil valguse peegeldumise seaduse. Leiame kiire tee punktist  $A$  punkti  $B$  nii, et see peegelduks peegli pinnalt punktis  $O$  ja tee läbimiseks kulunud aeg oleks minimaalne.



Joonis 6: Valguse peegeldumise seaduse tuletamine.

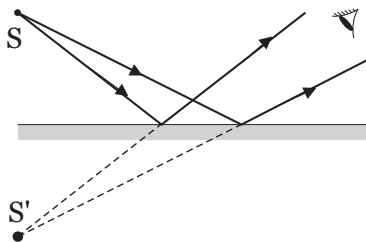
Kuna kiir liigub kogu aeg ühesuguses keskkonnas, võime leida minimaalse aja asemel minimaalse teepikkuse  $AOB$ .

Selleks konstrueerime peegli taha punkti  $A'$  nii, et  $AC = CA'$ . Sel juhul ka  $AO = A'O$ , sest  $\triangle ACO = \triangle A'CO$ . Seega ka  $AOB = A'OB$ . See tee on minimaalne, kui  $A'OB$  on sirge. Sel juhul on  $\angle A'OC = \angle BOD$  ja järelikult ka  $\angle AOC = \angle BOD$ . Siit on näha, et

$$\alpha = \beta$$

## 2.2 Tasapeegel

**Tasapeegel** on tasand, millelt valgus peegeldub. Kujutise leidmiseks tuleb eseme mingist punktist võtta vähemalt kaks kiirt ja vaadata nende peegeldumist.



Joonis 7: Kujutise leidmine tasapeeglis.

Tasapeegel annab esemest näiva kujutise, st. et meile näib, nagu läh-  
tuksid valguskiired peegli tagant. Kujutis on sama suur kui ese ja  
selle kaugus peeglist on samasuur kui eseme kaugus peeglist. Tarbe-  
peegliks on tasaparalleelne klaasplaat, mille tagumine pind on kae-  
tud peegeldava metallikihiga ja see on kriimustuste vältimiseks üle  
värvitud. Kui sellist peeglit kasutada optikas, tuleb arvestada val-  
guskiirte murdumist klaasplaadis.

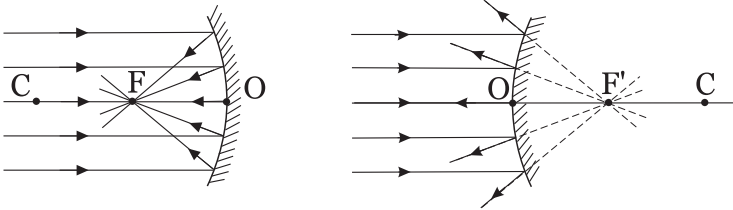
## 2.3 Sfäärilised peeglid

**Sfääriline peegel** on kerapinna (sfääri) osa, millelt valgus peegel-  
dub. Sfäärilisi peegleid jaotatakse **nõgusateks** ja **kumerateks**. Nõ-  
guspeegli korral toimub peegeldumine sfääri sisepinnalt, kumerpeegli  
korral - välispinnalt.

Punkti, kuhu koonduvad nõguspeeglile langevad paralleelsed kiired,  
nimetatakse peegli **fookuseks F** (tulipunktiks). Kumerpeegli kor-  
ral on tegemist **näiva fookusega F'**, st. punktiga, milles lõikuvad



peegeldunud kiirte pikendused. Fookuse kaugust peegelpinnast, mõõdetuna piki optilist peatelge, nimetatakse peegli **fookuskauguseks**. Nõguspeegli fookuskaugust loetakse positiivseks, kumerpeegli oma negatiivseks.



Joonis 8: Nõguspeegel (vasakul) ja kumerpeegel (paremal).

Fookuskaugus  $f$  ja peeglit moodustava sfääri raadius  $r$  on seotud järgmiselt:

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

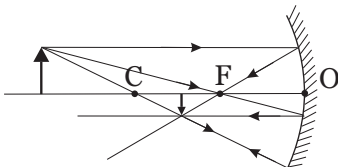
Sirget, mis läbib sfääri keskpunkti  $C$  ja fookust  $F$ , nimetatakse peegli **optiliseks peateljeks**. Optilise peatelje lõikepunkti peegli pinnaga nimetatakse **lagipunktiks**  $O$ .

## 2.4 Kujutise leidmine nõguspeegli puhul

Kasutame esemest väljuvatest kiirtest vähemalt kahte järgmisest kolmest:

- optilise peateljega paralleelset kiirt, mis pärast peegeldumist läbib fookuse;
- fookust läbivat kiirt, mis pärast peegeldumist on optilise peateljega paralleelne;

- sfääri keskpunkti  $C$  läbivat kiirt, mis pärast peegeldumist läheb sama teed tagasi.

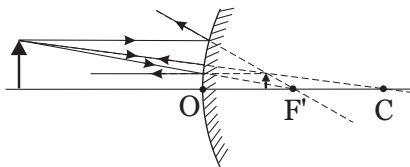


Joonis 9: Kujutise leidmine nõguspeeglis.

## 2.5 Kujutise leidmine kumerpeegli puhul

Kasutame esemest väljuvatest kiirtest vähemalt kahte järgmisest kolmest:

- optilise peateljega paralleelset kiirt, mille pikendus pärast peegeldumist läbib fookuse;
- fookusesse suunatud kiirt, mis pärast peegeldumist on optilise peateljega paralleelne;
- sfääri keskpunkti  $C$  suunatud kiirt, mis pärast peegeldumist läheb sama teed tagasi.



Joonis 10: Kujutise leidmine kumerpeeglis.

## 3 Valguse murdumine

### 3.1 Valguse murdumise seadus

Kahe läbipaistva keskkonna lahtuspääsil valgus murdub, st. muudab oma levimissuunda. Muutuse suurus on määratud murdumis-seadusega, mille kohaselt valguse üleminekul ühest keskkonnast teise valguskiir murdub nii, et **langemisnurga ja murdumisnurga siinuste suhe on jääv suurus ning langev kiir, murdub kiir ja langemispunkti tõmmatud pinnanormaal asuvad ühes tasandis**.

Seda siinuste suhet nimetatakse teise keskkonna suhteliseks murdumisnäitajaks esimese keskkonna suhtes. Esimeseks keskkonnaks nimetatakse seda keskkonda, kust kiir tuleb, teiseks seda, kuhu kiir läheb. **Suhteline murdumisnäitaja**  $n_s = n_2/n_1$  on keskkondade absoluutsete murdumisnäitajate suhe. **Absoluutne murdumisnäitaja** näitab, mitu korda on valguse kiirus vaakumis suurem kui antud keskkonnas:  $n = c/v$ . Kehtib ka seos  $n_s = v_1/v_2$ .

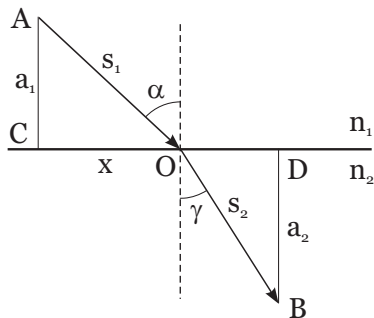
Tuletame valguse murdumise seaduse lähtudes Fermat' printsiibist. Selleks leiame valguskiire sellise tee  $AOB$ , mille läbimiseks kulunud aeg on minimaalne (vt joon. 11). Valguskiir tuleb esimesest keskkonnast, mille absoluutne murdumisnäitaja on  $n_1$  ja läheb teise keskkonda absoluutse murdumisnäitajaga  $n_2$ .

Valguse levimiseks punktist  $A$  punkti  $B$  kuluv aeg  $t = t_1 + t_2$ , kus  $t_1 = s_1/v_1$  ja  $t_2 = s_2/v_2$  ning  $v_1 = c/n_1$  ja  $v_2 = c/n_2$ .

Seega

$$t = \frac{\sqrt{a_1^2 + x^2}}{\frac{c}{n_1}} + \frac{\sqrt{a_2^2 + (b-x)^2}}{\frac{c}{n_2}},$$

kus  $x = CO$  ja  $b = CD$ .



Joonis 11: Valguse murdumise seaduse tuletamine.

Selleks, et valguse levimisaeg oleks minimaalne, tuleb leida saadud avaldise tuletis  $x$  järgi, võrdsustada see nulliga ja kontrollida, kas teine tuletis on positiivne.

Leiame tuletise

$$\frac{dt}{dx} = \frac{2n_1x}{2c\sqrt{a_1^2 + x^2}} + \frac{2n_2(b-x)(-1)}{2c\sqrt{a_2^2 + (b-x)^2}} = 0 .$$

Siit saame

$$\frac{n_1x}{s_1} - \frac{n_2(b-x)}{s_2} = 0 , \text{ aga kuna } \frac{x}{s_1} = \sin \alpha \text{ ja } \frac{b-x}{s_2} = \sin \gamma ,$$

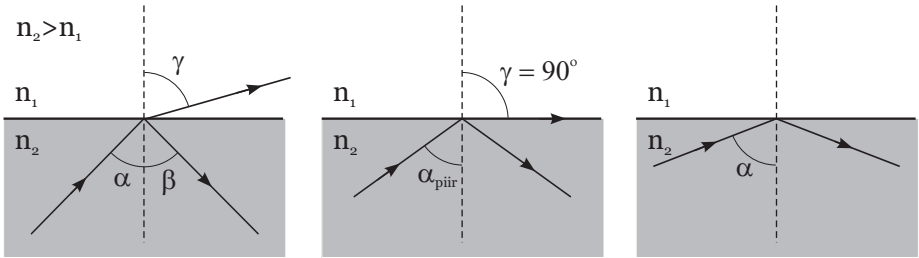
saame

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

## 3.2 Täielik peegeldus

Kui valgus suunata kahe keskkonna lahutuspinnaile optiliselt tihedamast keskkonnast, siis on valguse murdumisnurk  $\gamma$  suurem langemisnurgast  $\alpha$ . Mingi langemisnurga  $\alpha_{\text{piir}}$  korral on murdumisnurk

võrdne  $90^\circ$ . Seda nurka nimetatakse täieliku peegeldumise **piirnurgaks**. Sellest suuremate langemisnurkade korral valgus ei tungi teise keskkonda, vaid peegeldub esimesse tagasi. Seda nähtust nimetatakse **täielikuks peegelduseks** (varem kasutati ka nimetust **täielik sisepeegeldus**).



Joonis 12: Valguse murdamine optiliselt tihedamast keskkonnast hõredamasse.

Täieliku peegeldumise korral võtab murdamiseseadus kuju:

$$\frac{\sin \alpha_{\text{piir}}}{\sin 90^\circ} = \frac{n_2}{n_1} \text{ ehk } \sin \alpha_{\text{piir}} = \frac{n_2}{n_1} .$$

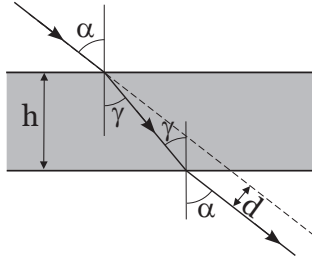
Kui esimeseks keskkonnaks on vaakum või õhk, siis on seose kuju  $\sin \alpha_{\text{piir}} = 1/n_1$ . Täielikku peegeldust kasutatakse optilistes riistades valguskiirte suuna muutmiseks, aga ka valgusjuhtides valguse edastamiseks.

### 3.3 Tasaparalleelne plaat

**Tasaparalleelne plaat** on mingi läbipaistev keha, mille kaks külge on paralleelsed tasandid. Plaadist läbiminekul valgus murdub kaks korda. Selle tulemusena valguse levimissuund ei muutu, kuid kiir nihkub iseendaga paralleelselt. Nihke suurus

$$d = \frac{h \cdot \sin(\alpha - \gamma)}{\cos \gamma},$$

kus  $h$  on plaadi paksus,  $\alpha$  valguse langemisnurk ja  $\gamma$  murdumisnurk.



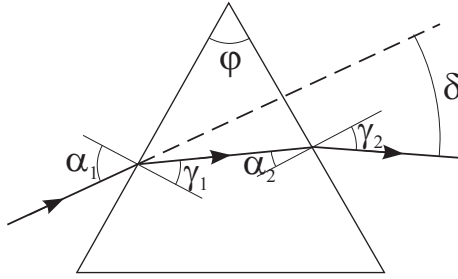
Joonis 13: Valguse murdumine tasaparalleelses plaadis.

### 3.4 Prisma

**Prisma** on läbipaistvast ainest keha, mille tahkudeks on tasandid. Meie vaatleme ainult kolmetahulist prisma. Nurka, mille moodustavad tasandid, kust valgus siseneb prismasse ja sealt väljub, nimetatakse **murdvaks nurgaks**  $\varphi$ . Prisma tahku, mis jääb murdva nurga vastu, nimetatakse **prisma aluseks**.

Kiir murdub prisma läbides kaks korda ja kõrvalekalde suurus  $\delta = \alpha_1 + \gamma_2 - \varphi$ .

Kui prisma aine absoluutne murdumisnäitaja on suurem kui ümbritseva keskkonna oma, siis valguskiir murdub alati prisma aluse poole.



Joonis 14: Valguse murdumine prisma.

### 3.5 Läätsed

**Läätses** nimetatakse kõverpindadega piiratud läbipaistvat keha. Meie vaatleme ainult läätsi, kus pindadeks on sfääri osad. Kui läätsese paksus on palju väiksem pindade kõverusraadiustest, siis on tegu **õhukese läätsesega**<sup>1</sup>. Sirget, mis läbib läätsese pindade kõveruskeskpunkte, nimetatakse **optiliseks peateljeks**.

Läätsese, mis on keskelt paksem kui äärtest, nimetatakse **kumerläätseseks** (koondavaks läätseseks). Kui aga lääts on keskelt õhem kui äärtest, siis seda nimetatakse **nõgusläätseseks** (hajutavaks läätseseks).

Kumerläätsese sümbol on  $\uparrow$ , nõgusläätsese sümbol on  $\frown$ .

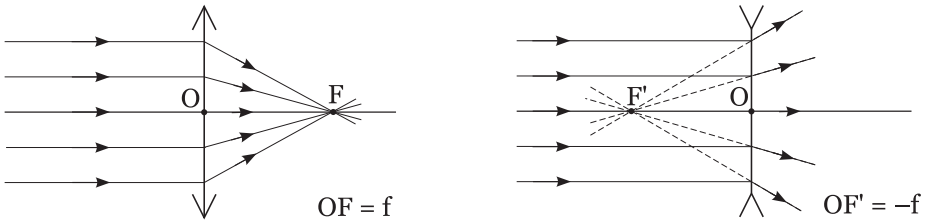
Kumerläätsesele optilise peateljega paralleelselt langevad kiired koonduvad pärast läätsese läbimist ja lõikuvad peatelje punktis, mida nimetatakse kumerläätsese **fookuseks**  $F$ . Nõgusläätsesele optilise peateljega paralleelselt langevad kiired hajuvad pärast läätsese läbimist, kuid nende kiirte pikendused lõikuvad peatelje punktis, mida nimetatakse nõgusläätsese fookuseks ehk **näivaks fookuseks**  $F'$ .

Tasandit, mis läbib fookust ja mis on risti optilise peateljega, nimetatakse **fokaaltasandiks**. Kõik läätsesele langevad paralleelsed kiirte-

<sup>1</sup>Meie vaatleme ainult õhukesi läätsi

kimbud koonduvad mingis fokaaltasandi punktis. Selle punkti asukohta määrab läätses keskpunkti läbiva kiire lõikepunkt fokaaltasandiga. Eelöeldu kehtib ka näiva fookuse korral.

Fookuse või näiva fookuse kaugust läätsesest, mõõdetuna piki optilist peatelge nimetatakse **fookuskauguseks**. Nõgusläätses fookuskaugust loetakse negatiivseks.



Joonis 15: Valguse murdumine kumerläätses (vasakul) ja nõgusläätses (paremal).

Igal läätsel on kaks fookust, mille fookuskaugused on võrdsed. Seda kinnitab ka kiirte pööratavuse printsiip, mille kohaselt kiirte käik läbi optilise süsteemi ei ole sellest, kas kiired liiguvad läbi läätses näiteks vasakult paremale või paremalt vasakule. Fookuskauguse pöördväärtust nimetatakse läätses **optiliseks tugevuseks**, mida tähistatakse  $D$ :

$$D = \frac{1}{f} .$$

Läätses optilist tugevust mõõdetakse **dioptriates** (dptr), kusjuures 1 dioptria on sellise läätses optiline tugevus, mille fookuskaugus on 1 m.

Läätses optiline tugevus on määratud läätses aine murdumisnäitaja ja murdvate pindade kõverusega:

$$D = (n_{21} - 1) \left( \frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) ,$$

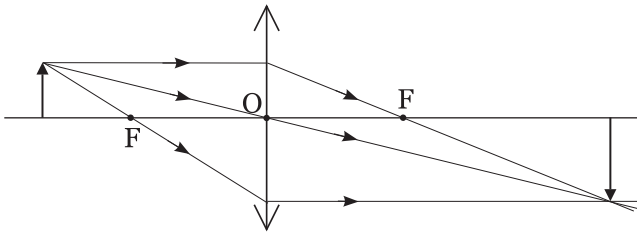


kus  $n_{21} = n_2/n_1$  ning  $n_2$  on läätse aine absoluutne murdumisnäitaja ja  $n_1$  läätse ümber oleva keskkonna absoluutne murdumisnäitaja;  $r_1$  ja  $r_2$  on läätse pindade kõverusraadiused.

### 3.5.1 Kujutise leidmine kumerläätse puhul

**Kumerlääts** koondab valguskiiri. Kui lääts on õhuke, siis kasutatakse **kujutise konstrueerimisel** esemest väljuvatest kiirtest vähemalt kahte järgmisest kolmest:

- optilise peateljega paralleelset kiirt, mis pärast läätse läbimist läbib fookuse;
- fookust läbivat kiirt, mis pärast läätse läbimist on optilise peateljega paralleelne;
- läätse keskpunkti  $O$  läbivat kiirt, mis pärast läätse läbimist suunda ei muuda.

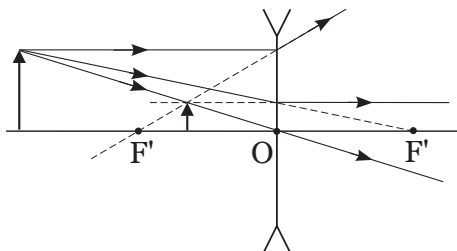


Joonis 16: Kujutise konstrueerimine kumerläätse puhul.

### 3.5.2 Kujutise leidmine nõgusläätse puhul

**Nõguslääts** hajutab valguskiiri. Kui lääts on õhuke, siis kasutatakse **kujutise konstrueerimisel** esemest väljuvatest kiirtest vähemalt kahte järgmisest kolmest:

- optilise peateljega paralleelset kiirt, mis pärast läätse läbimist suundub nii, et selle pikendus läbib näiva fookuse;
- näivasse fookusse suunatud kiirt, mis pärast läätse läbimist on optilise peateljega paralleelne;
- läätse keskpunkti  $O$  läbivat kiirt, mis pärast läätse läbimist suunda ei muuda.



Joonis 17: Kujutise konstrueerimine nõguslätse puhul.

### 3.5.3 Lätse valem

Õhukese lätse korral seob kolme suurust – **eseme kaugust** lätsest ( $a$ ), **kujutise kaugust** lätsest ( $k$ ) ja **lätse fookuskaugust** ( $f$ ) seos, mida nimetatakse **lätse valemiks**.

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{a} + \frac{1}{k}$$

Kui on tegemist näiva fookuse või näiva kujutisega, tuleb valemis kasutada vastava liikme ees miinusmärki.

Lätse valemit saab kasutada ka sfääriliste peeglite korral, kusjuures märkide suhtes kehtivad samad reeglid.

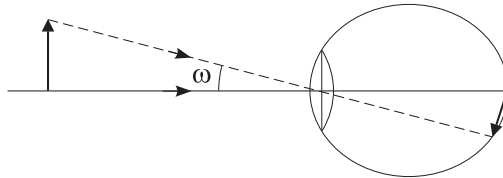
## 4 Optikariistad

**Optikariistad** on seadmed, mis annavad esemetest kas suurendatud või vähenetatud kujutisi.

Optikariista **joonsuurendus**  $s_j$  näitab, mitu korda on kujutise joonmõõde suurem eseme joonmõõtmest.

**Nurksuurendus**  $s_n$  näitab, mitu korda on **vaatenurk**  $\omega$  läbi optikariista vaadates suurem vaatenurgast palja silmaga vaatamisel.

**Vaatenurk** on nurk, mille all ese paistab. See on eseme äärmistest punktidest tulevate ja silmaläätse keskpunkti läbivate kiirte vaheline nurk.

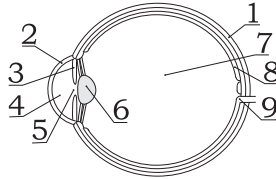


Joonis 18: Ese paistab vaatenurga  $\omega$  all.

### 4.1 Silm

Inimese silm on peaaegu kerakujuline, läbimõõduga umbes 2,5 cm (vt joon. 19). Väljastpoolt on silm kaetud valge kestaga 1 - **skleeraga**. Skleera eesmist, läbipaistvat osa 2 nimetatakse **sarvkestaks**. Sarvkesta taga asub **vikerkest** 3, mis annab silmale omase värvuse. Sarv- ja vikerkesta vahe on täidetud läbipaistva **vesivedelikuga** 4. Vikerkesta on **silmaava** 5, mille läbimõõt muutub olenevalt valguse intensiivsusest vahemikus 2 kuni 8 mm. Silmaava taga asub **silmaläätis** 6, mille kuju muudetakse lihaste abil, kui vaadatakse lähedasi või kauged esemeid. Ülejäänud silma täidab poolvedel **klaaskeha** 7. Silmapõhi on kaetud **võrkkestaga** 8, mis koosneb valgustundlikest

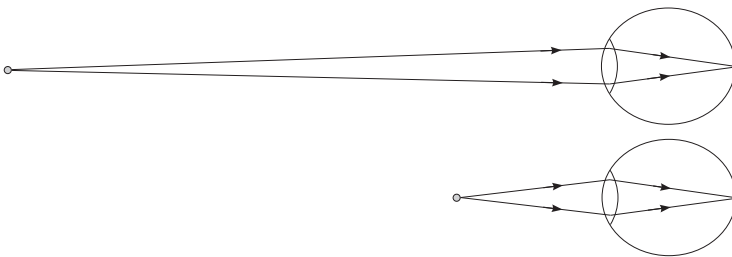
kepikeste ja kolvikeste kujulistest nägemisnärvilõpmetest. Kohta, kus nägemisnärv on ühendatud võrkkestaga, nimetatakse **pimetähniks** 9.



Joonis 19: Silma ehitus.

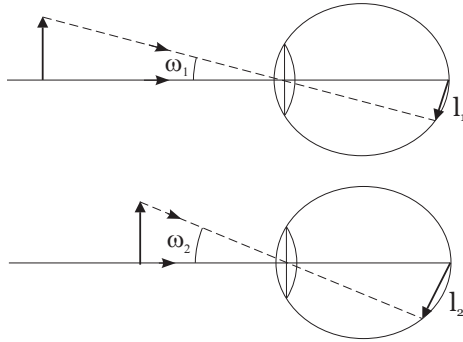
Silma langevad valguskiired murduvad sarvkesta välispinnal ja silmaläätses ning tekitavad võrkkestal eseme ümberpööratud kujutise. See muudetakse ajus päripidiseks pildiks. Edaspidi nimetame sarvkesta koos vesivedeliku ja silmaläätsesega lihtsalt silma läätsesks.

Normaalse silma korral tekib eseme kujutis alati võrkkestale. Eseme kaugust, mille puhul on eset kõige mugavam vaadata nimetatakse **parima nägemise kauguseks**. Selleks loetakse 25 cm.



Joonis 20: Normaalses silmas tekib terav kujutis võrkkestal nii kaugetest kui ka lähedastest esemetest.

Kujutise suurus võrkkestal on määratud vaatenurgaga: mida suurem vaatenurk, seda suurem kujutis. Sellepärast näemegi lähemal asuvaid esemeid suuremana kui kaugemal asuvaid (vt joon. 21).



Joonis 21: Mida suurem on vaatenurk  $\omega$ , seda suurem on kujutis silma võrkkestal.

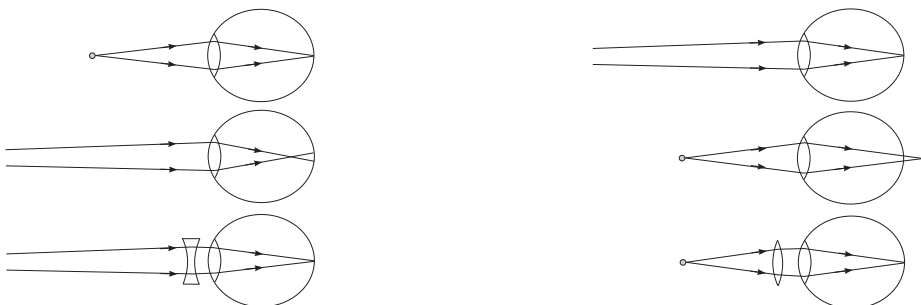
## 4.2 Prillid

Kui silma lääts ei tekita kujutist võrkkestale, näeme esemeid ebate-ravalt ja tuleb kasutada prille.

Nägemisdefekti, mille korral tekib kujutis võrkkesta ette, nimetatakse **lühinägelikkuseks**. Seda korrigeeritakse hajutavate läätsede ehk “miinusprillide” abil (vt joon. 22).

Kui kujutis tekib võrkkesta taha, siis sellist nägemisdefekti nimeta-takse **kaugnägelikkuseks**. Seda korrigeeritakse koondavate läätsede ehk “plussprillide” abil (vt. joon 23).

Prille iseloomustab prilliklaaside optiline tugevus dioptriates, näi-teks prilliklaasi markeering  $-5$  tähendab, et tegemist on nõguslätse-ga, mille optiline tugevus on  $-5$  dptr ehk fookuskaugus  $f = -0,2$  m.



Joonis 22: (vasakul) Lühinägelikkus: lähedalasuvatest esemetest tekib silma võrkkestale terav kujutis, kuid kaugelasuvatest esemetest tekib kujutis võrkkesta ette. Lühinägelikkust korrigeeritakse nõgusläätsedega.

Joonis 23: (paremal) Kaugnägelikkus: kaugelasuvatest esemetest tekib silma võrkkestale terav kujutis, kuid lähedalasuvatest esemetest tekib kujutis võrkkesta taha. Kaugnägelikkust korrigeeritakse kumerläätsedega.

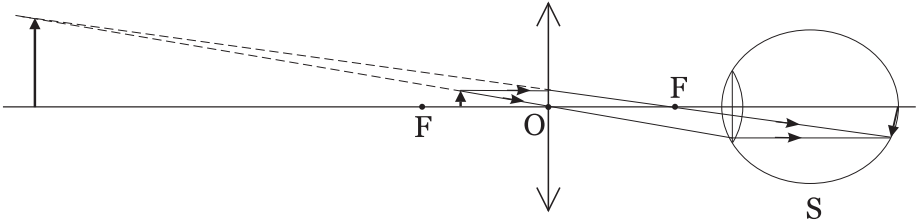
### 4.3 Luup

Luubi ehk suurendusklaasina võib töötada iga kumerlääts, tavaliselt kasutatakse selleks läätsi, mille optiline tugevus jääb vahemikku 10 ... 40 dptr. See tagab suurenduse 2,5x ... 10x. Suuremate suurenduste saamiseks kasutatakse mikroskoobe.

Koondav lääts töötab luubina, kui ese asub läätsel lähemal kui selle fookuskaugus (vt joon. 24).

Luup annab esemest päripidise, suurendatud ja näiva kujutise. Tavaliselt asetatakse ese praktiliselt luubi fookusesse. Sel juhul on luubi suurendus määratud järgmise valemiga:

$$s_j = \frac{\Delta}{f} ,$$



Joonis 24: Kujutise tekkimine luubis.

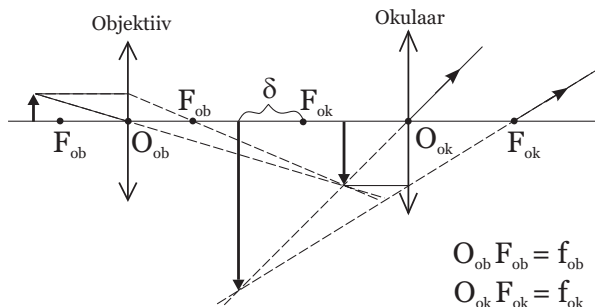
kus  $\Delta$  on parima nägemise kaugus ja  $f$  luubi fookuskaugus.

## 4.4 Mikroskoop

**Mikroskoop** on optikariist, mille abil saadakse suurendusi  $20\times\dots2000\times$ . Optilises piirkonnas pole võimalik saada suuremaid suurendusi silma võrkkesta ehituse ja valguse difraktsiooni tõttu. Suuremate suurenduste saamiseks kasutatakse elektronmikroskoobe, kus valguse asemel kasutatakse väga kiiresti liikuvate elektronide kimpe. Veel suuremaid suurendusi saadakse teravikmikroskoopide abil, mis võimaldavad eristada üksikuid aatomeid. Teravikmikroskoobi tööpõhimõtte tugineb kvantmehaanilisel nähtusel - tunneleefektile ja see ei ole kuidagi seotud optilise mikroskoobi tööpõhimõttega.

Mikroskoop koosneb kahest läätsesest (või läätsede süsteemist). Esemepoolset kutsutakse **objektiiviks**, silmapoolset **okulaariks** (vt. joon 25). Ese asetatakse mikroskoobi kasutamisel objektiivi fookuskaugusest pisut kaugemale. Sel juhul saame esemest suurendatud tõelise kujutise, mida vaatleme omakorda okulaari kui luubiga ja saame sellest veelkord suurendatud, kuid näiva kujutise.

Mikroskoobi joonsuurendust, juhul kui ese asub objektiivi fookuses ja objektiivi poolt antud kujutis asub okulaari fookuses saab leida avaldisest:



Joonis 25: Kujutise tekkimine mikroskoobis.

$$s_j = \frac{\delta \Delta}{f_{ob} f_{ok}} ,$$

kus  $\delta$  on objektiivi ja okulaari seesmistest fookustest vaheline kaugus (nn. **tuubuse pikkus**),  $\Delta$  parima nägemise kaugus,  $f_{ob}$  - objektiivi fookuskaugus ja  $f_{ok}$  - okulaari fookuskaugus.

## 4.5 Pikksilm

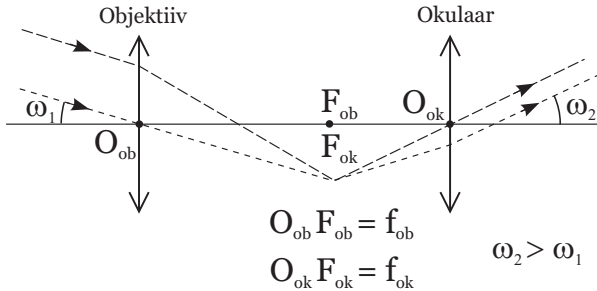
**Pikksilm** on optikariist kaugete esemete vaatlemiseks. See koosneb nagu mikroskoopki objektiivist ja okulaarist. Kaugetest esemetest tuleb optilisse riista praktiliselt paralleelne kiirtekimp, mis tekitab kujutise objektiivi fookuses. Seda kujutist vaadeldakse okulaari kui luubiga. Niisugusel juhul langevad pikksilma objektiivi ja okulaari fookused praktiliselt kokku ja pikksilmast väljub paralleelne kiirtekimp. Selliseid optilisi süsteeme nimetatakse **teleskoopilisteks**. Selline süsteem suurendab vaatenurka ja süsteemi nurksuurendus avaldub järgmiselt:

$$s_n = \frac{f_{ob}}{f_{ok}} ,$$



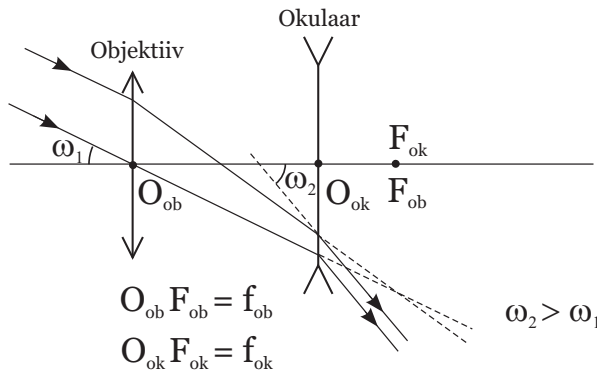
kus  $f_{ob}$  on objektiiv fookuskaugus ja  $f_{ok}$  okulaari fookuskaugus.

Kui objektiiv ja okulaarina kasutatakse kahte kumerlääts, siis saadakse esemest ümberpööratud kujutis. See on nn. **Kepleri pikksilm**, mis sobib kasutamiseks taevavaatlustel.



Joonis 26: Kepleri pikksilm.

Maapealsetel vaatlustel kasutatakse nn. **Galilei pikksilma**, kus okulaariks on nõguslääts. Selline pikksilm annab esemest päripidise kujutise.

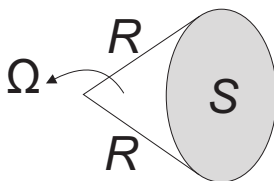


Joonis 27: Galilei pikksilm.

## 5 Fotomeetria alused

Inimene vajab elamiseks ja töötamiseks valgust. Meie lauale jõudva valguse hulk oleneb eelkõige sellest, kui tugev on valgusallikas (kui võimas lamp põleb) ja kui kaugel ta meie lauast on.

Enne seda, kui lähme fotomeetrias kasutatavate suuruste juurde, peame tutvuma ruuminurga mõistega. Ruuminurk iseloomustab seda, kui suurena paistab objekt mingis punktis asuva vaatleja jaoks. Lähedal asuv väike objekt võib hõivata sama suurt ruuminurka kui kaugel asuv suur objekt.



Joonis 28: Ruuminurga mõiste.

Vaatleme kera raadiusega  $R$ . Lõigaku koonus, mille tipp asub kera keskpunktis, kera pinnast välja pindala  $S$ . Siis ruuminurk võrdub definitsiooni kohaselt väljalõigatud pindala ja kera raadiuse ruudu suhtega, ehk valemina

$$\Omega = \frac{S}{R^2}.$$

Ruuminurki mõõdetakse steradiaanides (sr). Üks steradiaan on seega ruuminurk, mis erldab kera pinnal pindala, mis võrdub kera raadiuse ruuduga. Kui väljalõigatavaks pinnaks on kogu kera pind, võrdub ruuminurk

$$\Omega_0 = \frac{S_0}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi$$

steradiaani.

Valgusallika iseloomustamiseks kasutatakse fotomeetrias suurust **valgusallika valgustugevus**. Selle tähiseks on  $I$  ja ühikuks 1 **kandela** (cd), mis on valgustugevus, kui allikas kiirgab monokromaatset kiirgust sagedusega  $540 \cdot 10^{12}$  Hz ja see kiirgab ruuminurka 1 sr igas sekundis energiat  $1/683$  J. Niisugune valgustugevus vastab umbes ühe küünlaleegi valgusele.

Valgus levib allikast aga igas suunas ja ainult osa sellest jõuab meie-ni. Ruumis levivat valgust kirjeldatakse **valgusvooga**  $\Phi_L$ . Punktvalgusallika valgusvoog on määratud valgusallika valgustugevuse ja selle ruuminurga  $\omega$  korrutisega, milles valgus levib:

$$\Phi_L = I \cdot \omega \quad .$$

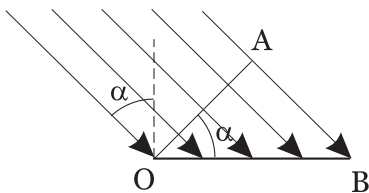
Valgusvoo ühikuks on 1 **luumen** (lm): see on valgusvoog, mille korral allikas tugevusega 1 cd täidab valgusega ühtlaselt ruuminurga 1 sr.

Mingile pinnale langeva valguse hulka kirjeldatakse suurusega, mida nimetatakse **valgustatuseks** või **valgustustiheduseks**, mis näitab pinnatühikule langeva valgusvoo suurust

$$E = \frac{\Phi_L}{S} \quad .$$

Valgustatuse ühikuks on 1 **luks**: see on valgustatus, kui valgusvoog 1 luumen jaotub ühtlaselt  $1 \text{ m}^2$  suurusel pinnal.

Valgustatus oleneb ka valguse pinnale langemise nurgast. Langegu valgus väikesele pinnatükile  $OB$  punktallikast (vt joon. 29). Sellisel juhul võib kiirtekimpu lugeda paralleelseks ja selle laius on  $OA$ . Langemismurk olgu  $\alpha$ . Leiame, kuidas valgustatus oleneb valgusallika valgustugevusest, kaugusest pinna ja allika vahel ning valguse langemismurgast. Lähtume seosest  $E = \Phi_L/S$ . Olgu kiirtekimbuga ristioleva pinna  $OA$  valgustatus  $E_0 = \Phi_L/OA$  (siin on  $OA$  kiirtekimbu ristlõikepindala) ja pinna  $OB$  valgustus  $E = \Phi_L/OB$ .



Joonis 29: Pinnatüki OB valgustatus.

Neist seostest leiame, et  $E/E_0 = OA/OB$  ja siit saame, et  $E = E_0 \cos \alpha$ . Definiitsiooni kohaselt on  $\Phi_L = I\omega$ . Kui tegemist on punktvalgusallikaga, siis  $\omega = 4\pi$  ja pind, millele valgus langeb, on kera pind. Selle väikest osa vaatleme tasandina OA. Niisugusel juhul pinna valgustatus  $E_0 = \Phi_L/S$ , kus  $S = 4\pi r^2$  (kera pindala). Asendades  $E_0$  avaldisse  $\Phi_L$  ja  $S$ , saame:  $E_0 = I/r^2$ . Pinna  $OB$  valgustatuseks saame

$$E = \frac{I \cos \alpha}{r^2} .$$

Lisaks valgustatusele kasutatakse ka sellist mõistet nagu pinna **heledus**  $B$ , mis näitab millise valgustugevusega valgusallikana võib antud pinnaühikut käsitleda.

$$B = \frac{I}{S \cos \alpha} ,$$

kus  $I$  on valgustugevus,  $S$  — pindala,  $\alpha$  — pinnanormaali ja vaatesuuna vaheline nurk.

Heleduse ühik on 1 **nitt** (nt).

$$1 \text{ nt} = \frac{1 \text{ cd}}{1 \text{ m}^2} .$$

## 6 Optikatermineid eesti, inglise ja vene keeles

## 7 Kirjandus

1. Ü. Ugaste. Füüsika gümnaasiumile II. Avita, Tallinn, 1998.
2. T. Lukki. Füüsika.. Ilo, Tallinn, 2000.
3. I. Saveljev. Füüsika üldkursus 3. Valgus, Tallinn, 1979.
4. G. Mjakišev. B. Buhhovtsev. Füüsika 12. klassile, Valgus, Tallinn, 1989.
5. O. Mankin. Optika. TRÜ, Tartu, 1986.
6. G. Peets. Materjale füüsika elementaarkursuse kordamiseks. Valgus, Tallinn, 1984.
7. F. Pedrotti, L. Pedrotti. Introduction to Optics. Prentice Hall, New Jersey, 1992.
8. D. V. Sivuhin. Obštšii kurs fiziki. Optika. Nauka, Moskva, 1980.
9. D. Džankoli. Fisika 2. Mir, Moskva, 1989.
10. M. Laan. Optika. TÜ, 2000. (<http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/optika/index.html>)