

O12. Optiliste instrumentide modelleerimine. (O14)

© Peeter Paris, TÜ, 2010

1. Tööülesanne

Mikroskoobi ning Kepleri või Galilei pikksilma mudeli koostamine ning nende suurenduse määramine.

2. Eelteadmised

Lisaks tööjuhendis toodud teooria lühiülevaatele, on vaja:

- Tunda kiirteoptika aluseid, osata konstrueerida kujutist põhikiirte abil koondavas ja hajutavas läätses.
- Teada kiirte käiku pikksilmas ja mikroskoobis
- Teada märkide reegleid ja õhukese läätse valemit

Täiendavat õppematerjali leidub optika aineveebis “Geomeetriline optika”.

<http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/opt/optika/geoopt/esileht.html>

Töös kasutatavate läätsede fookuskauguste praktilise määramisega saab täiendavalt tutvuda praktikumijuhendite O11 „Läätse fookuskaugus ja mitmeläätiselise süsteemi kardinaalelemendid“:

<http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/optika/prax/kardinaalelement.pdf> ja

(LOFY.01.035) erijuhendi O10 “Õhukese läätse fookuskauguse määramine” alusel:

<http://www.physic.ut.ee/instituudid/efti/loengumaterjalid/fmalused36/>

3. Teoreetilised alused

Optiliste detailide (läätsed, peeglid, prismad jne.) komplekti, mis transformeerib (koondab, murrab, hajutab jne.) valgusallikast lähtuvat valgust, nimetatakse optiliseks süsteemiks. Optiline süsteem on tsentreeritud, kui teda moodustavate sfääriliste murdvate ja/või peegeldavate pindade kõverusraadiuste tsentrid paiknevad ühel sirgel. Edaspidi käsitleme töös kaheläätselisi tsentreeritud süsteeme, mis koosnevad kahest optilisest põhielemendist – objektiivist ja okulaarist.

Reaalselt kasutatavate optiliste instrumentide ehitus võib olla üpris keeruline, nende objektiivid ja okulaarid koosnevad kujutise kõrge kvaliteedi saavutamiseks reeglina paljudest läätsedest. Lihtsuse mõttes käsitleme kõiki töös kasutatavaid läätsi õhukestena.

Kahe õhukese läätse kombinatsioon, kus läätsed on omavahel kontaktis, moodustab optilise süsteemi, mille fookuskauguse f saame leida seosest

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2}, \quad (1)$$

Kus f_1 ja f_2 on süsteemi moodustavate läätsede fookuskaugused

Fookuskauguse pöördväärtust $1/f$ nimetatakse läätsede optiliseks tugevuseks P . Seosest (1) näeme, et vaadeldud süsteemi optiline tugevus võrdub tema komponentide optiliste tugevuste summaga

$$P = P_1 + P_2 . \quad (2)$$

Kui aga vaadeldavad läätsed pole kontaktis vaid asetsevad teineteisest kaugusel d , siis sellise kombineeritud süsteemi fookuskauguse saab leida avaldisest

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{f_1} + \frac{1}{f_2} - \frac{d}{f_1 \cdot f_2} . \quad (3)$$

Kaugust sellise kaheläätselise süsteemi tagumise läätsede pinnast fookuseni kutsutakse ka süsteemi tagumiseks fookuskauguseks f_b (ka BFL – *back focal length*), mille saab leida avaldisest:

$$f_b = \frac{f_2(d-f_1)}{d-(f_1+f_2)} . \quad (4)$$

Valemitest (3) ja (4) näeme, et kahest koondavast läätsest saab kauguse d valikuga kombineerida nii koondava, hajutava kui ka **teleskoopilise e. afokaalse süsteemi** (Afokaalne süsteem – see on süsteem ilma fookuseta. Tuletage meelde läätsede fookuse definitsiooni!). Kui läätsede vaheline kaugus d läheneb nullile, siis kaheläätselise süsteemi fookuskaugus võrdub valemis (1) saaduga, kui aga kaugus d võrdub fookuskauguste f_1 ja f_2 summaga, siis on süsteemi fookuskaugus lõpmatus. Selline optiline süsteem transformeerib ühe kollimeeritud, paralleelse kiirtekimbu teiseks kollimeeritud kiirtekimbuks. Kuigi afokaalne süsteem ei koonda ega hajuta kollimeeritud kiiri, see tähendab, et sisenevad paralleelsed kiired jäävad ka väljudes paralleelseks, muudab ta siiski kiirtekimbu läbimõõtu ja kaldu langenud kiirte väljumisnurka võrreldes sisenemisnurgaga.

Optiliste riistade suurenduseks M nimetatakse suhet,

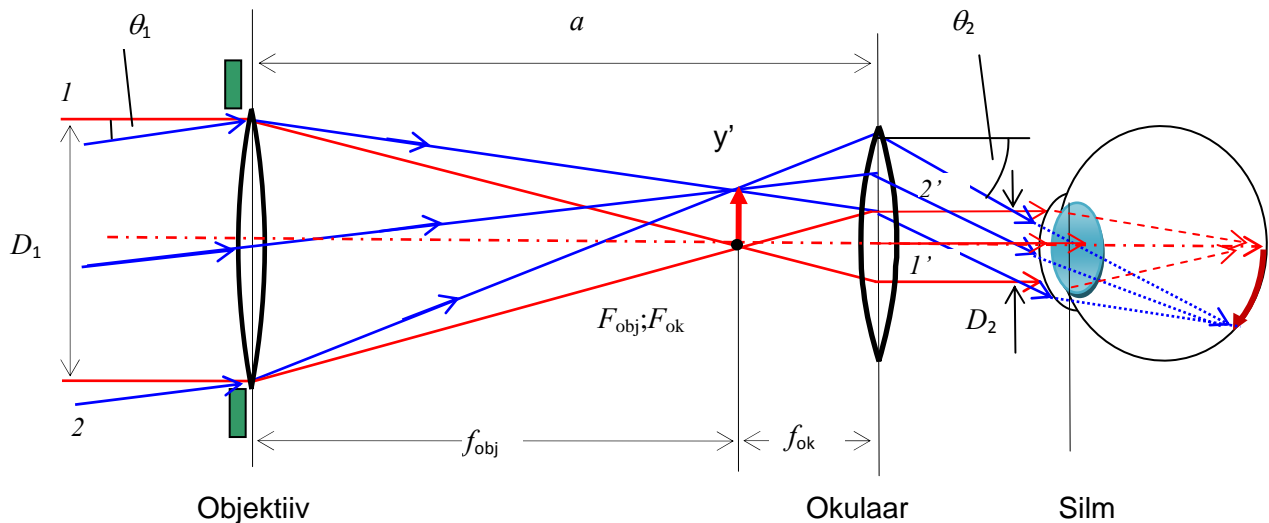
$$M = \frac{\theta_2}{\theta_1} , \quad (5)$$

kus θ_2 on nurk mille all näeme objekti läbi optilise riista ja θ_1 on nurk, mille all näeksime teda palja silmaga. Kuna nurgad θ_1 ja θ_2 on sageli väikesed, võib nad asendada ka nende nurkade tangensiga.

Järgnevalt on lühidalt käsitletud Kepleri ja Galilei pikksilma ning mikroskoobi tööpõhimõtet ja ehitust, esitatud põhilised valemid nende optiliste riistade suurenduste leidmiseks. Kahest läätsest saab moodustada lihtsaima pikksilma asetades nad teineteisest kaugusele $f_1 + f_2$, kusjuures okulaarina saab kasutada nii positiivset kui ka negatiivset läätsede. Mikroskoobis on positiivse objektiivi ja okulaari vaheline kaugus suurem kui $f_1 + f_2$.

3.1. Kepleri e. astronoomiline pikksilm

Pikksilm on optiline süsteem, mis on mõeldud kaugete objektide vaatlemiseks ja nende vaatenurga suurendamiseks.



Joonis 1 Kepleri pikksilma põhimõtteskeem. D_1 ja D_2 – sisenemis- ja väljumisava; θ_1 ja θ_2 – kiirte sisenemis- ja väljumisnurk; f_{obj} ja f_{ok} – objektiivi ja okulaari fookuskaugus, a – pikksilma tuubuse pikkus.

Kepleri pikksilm (joonis 1) koosneb kahest positiivsest läätses: pikafookuselisest objektiivist ja lühifookuselisest okulaarist, mis on asetatud nii, et objektiiviks oleva läätses tagumine fookus langeb kokku okulaari eesmise fookusega ($F_{obj}; F_{ok}$). Objektiivile langev optilise teljega paralleelne kiirtekimp 1 koondub objektiivi fookuses, teljega kaldu langev paralleelne kimp (näiteks kimp 2) koondub tema fokaaltasandis. Objektiiv tekitab kaugelasetsevast objektist oma fokaaltasandis ümberpööratud kujutise y' . Pikksilma normaalse justeeringu korral tekib see kujutis okulaari eesmise fokaaltasandis. Okulaar suurendab kaldulangeva kiirtekimbu väljumisnurka, kuid samas jätab kimbu kollimeerituks – väljuvad mittekoonduvad, paralleelsed kiired. Pikksilm ise pole kujutist tekitav süsteem. Pikksilmast väljuvad paralleelsed kiired murduvad silma läätses ja moodustavad võrkkestale kujutise, kollimeeritud kiired koondatakse võrkkestale kujutise punktideks.

Langegu kaugelt esemelt paralleelne kiirtekimp 2 objektiivile nurga θ_1 all. Kui konstrueerida pikksilmas nende kiirte käik, näeme, et see kiirtekimp väljub okulaarist nurga θ_2 all. Arvestades nende nurkade väiksust võime nurgad asendada nurga tangensitega. Pikksilma nurksuurendus avaldub seega $M_\theta = \frac{\tan \theta_2}{\tan \theta_1}$. Kuna objektiivi tagumine ja okulaari eesmine fookus ühtivad, siis näeme jooniselt, et nurksuurendus võrdub objektiivi ja okulaari fookuskauguste suhtega

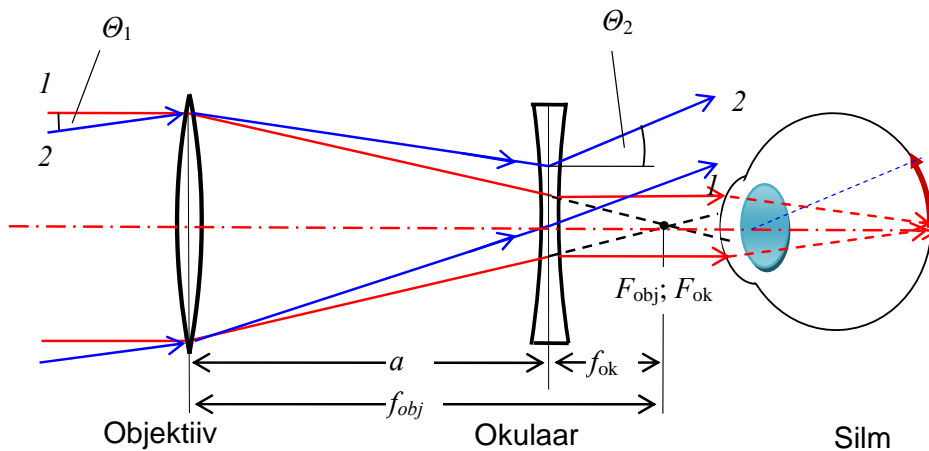
$$M_{\theta} = -\frac{f_1}{f_2} \quad (6)$$

ja samuti ka pikksilma sisend- ja väljundava suhtega

$$M_{\theta} = -\frac{D_1}{D_2}. \quad (7)$$

Märk „miinus“ avaldistes näitab, et Kepleri pikksilm annab ümberpööratud kujutise.

3.2. Galilei pikksilm



Joonis 2. Galilei pikksilm. θ_1 ja θ_2 - kiirtekimpude sisenemis- ja väljumisnurk; f_{obj} ja f_{ok} – objektiivi ja okulaari fookuskaugus; F_{obj} ja F_{ok} - objektiivi ja okulaari fookused; a – pikksilma tuubuse pikkus.

Galilei pikksilm on samuti afokaalne e. teleskoopiline optiline süsteem. Ka Galilei pikksilmas on objektiiviks pikafookuseline positiivne lääts, kuid okulaariks lühikese fookuskaugusega hajutav, negatiivne lääts (joonis 2). Siingi võrdub objektiivi ja okulaari vaheline kaugus nende fookuskauguste algebralise summaga – objektiivi tagumine fookus langeb kokku okulaari eesmise fookusega. Tuleb muidugi arvestada, et siin on okulaari fookuskaugus negatiivne (**NB! hajutava läätse puhul paikneb eesmine fookus läätsest paremal!**). Tänu negatiivse okulaari kasutamisele näeme Galilei pikksilmaga erinevalt Kepleri pikksilmast objekte päripidiselt.

Joonisel 2 on kujutatud kiirte käik Galilei pikksilmas. Kiirtekimpud 1 ja 2 lähtuvad kaugeloleva objekti punktide 1 ja 2. Mõlemast punktist pikksilmani jõudvate paralleelsete kiirtekimpude vaheline nurk on θ_1 . Kiirtekimp 1 on samasihiline pikksilma optilise peateljega. Kuna kiirtekimp 1 langeb hajutavale läätsele nii, et tema pikendus läbib hajutava läätse eesmist fookust, siis pärast murdumist okulaaris levib kiirtekimp 1' paralleelselt

pikksilma optilise teljega. Kiirtekimp $2'$ jääb okulaarist väljudes samuti paralleelseks ja moodustab optilise teljega nurga θ_2 . Jooniselt 2 näeme, et Galilei pikksilmas on väljuva kiirtekimbu $2'$ nurk θ_2 samamärgiline langeva kiirtekimbu nurgaga θ_1 . Seega, vaadeldes objekti läbi Galilei pikksilma, näeme päripidist kujutist. Lõplik kujutis tekib ka Galilei pikksilma korral vaataja silma võrkkestal. Kiirtekimbu $2'$ levikusuuna leidmine on toodud Lisas 1.

Sarnaselt Kepleri pikksilmaga võrdub ka Galilei pikksilma suurendus okulaari ja objektiivi fookuskauguste suhtega

$$M_{\theta} = \frac{f_1}{f_2}.$$

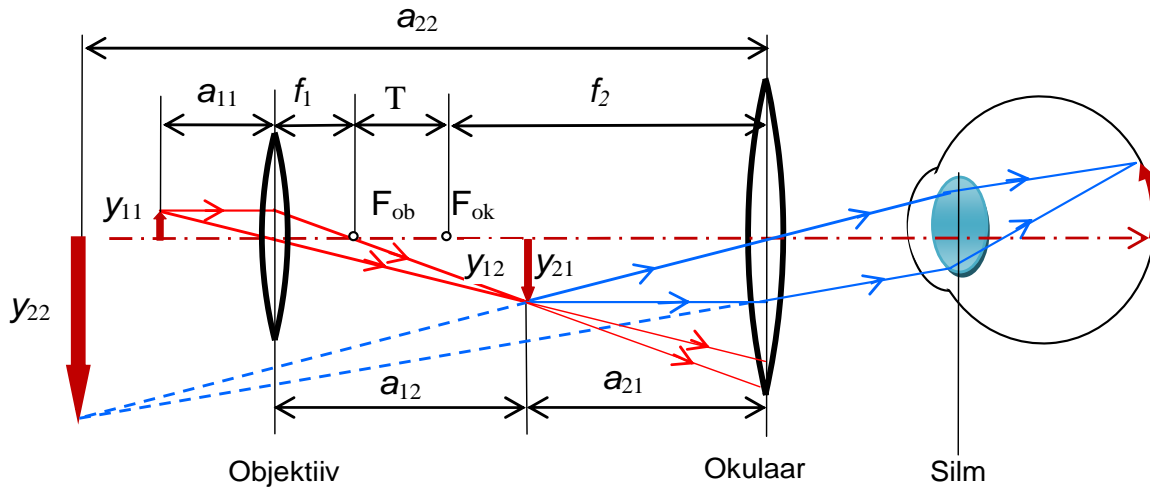
Pikksilma vaateväli on see ruumiosa, mida näeme vaadates läbi okulaari. Joonisel 2 on silm joonistatud kiirtekäigu paremaks esitamiseks okulaarist kaugemale. Tegelikult asetseb silm pikksilma vaatamisel okulaari lähedal, mis tagab ka suurema vaatevälja. Galilei pikksilma eeliseks tuleb pidada päripidise kujutise saamist, kuid puuduseks on, võrreldes sarnaste parameetritega Kepleri pikksilmaga, väiksem vaateväli.

Normaalse reguleerimise korral väljuvad pikksilmast paralleelsed kiired – kujutis tekib silma võrkkestal. Tänu silma akommodatsioonile on pikksilmas võimalik näha teravat kujutist ka siis kui pikksilmast ei välju paralleelsed kiired. Objektiivi ja okulaari vaheline kaugus on pikksilmades tavaliselt reguleeritav fokuseerimaks teda lõpmatusest erinevale kaugusele. Sageli on pikksilma jaoks antud tema teravustamise vahemik. Üheks tähtsamaks pikksilma omadusi määravaks teguriks on tema objektiivi läbimõõt D , mis otseselt määrab pikksilma lahutusvõime. Ka pikksilma valgusjõu määrab suures osas objektiivi läbimõõt, täpsemini objektiivi suhteline ava D/f , kus f on objektiivi fookuskaugus.

3.3. Mikroskoop

Mikroskoop on väikeste, lähedal asetsevate objektide vaatlemiseks mõeldud optiline süsteem.

Vaatame kiirte käiku mikroskoobis (joonis 3). Lihtsaimal juhul on mikroskoop kaheläatseline süsteem, kus objektiiviks on suure optilise tugevusega e. lühikese fookuskaugusega lääts. Objekt asetatakse pisut kaugemale objektiivi fookusest (suure suurendusega objektiivide korral on objekt praktiliselt tema fookuses), nii saadakse objektist suurendatud ümberpööratud tõeline kujutis y_{12} . Seda vahepealset tõelist kujutist vaadeldakse läbi okulaari, mis töötab luubina. Okulaar annab täiendavalt suurendatud näiva kujutise y_{22} . Objektiivi tagumise fookuse ja okulaari eesmise fookuse vahelist kaugust nimetatakse mikroskoobi tuubuse pikkuseks, T .



Joonis 3. Kujutise tekkimine mikroskoobis. y_{11} objekt; y_{12} ja y_{21} esimene esialgne kujutis, mis on okulaari jaoks objektiks, y_{22} lõplik näiv kujutis; a_{22} parima nägemise kaugus; f_1 – objektivi fookuskaugus; f_2 okulaari fookuskaugus.

Mikroskoobi suurendus võrdub tema objektivi ning okulaari suurenduste korrutisega. Okulaari suurendus M_{θ}^{Ok} lõdvestatud silma korral võrdub fookuskaugust f_2 omava luubi suurendusega:

$$M_{\theta}^{Ok} = \frac{a_{22}}{f_2} \quad (8)$$

kus a_{22} on parima nägemise kaugus, mis normaalse keskmise silma jaoks loetakse 25 cm.

Objektiiv annab esemest tõelise ümberpööratud suurendatud kujutise. Lääts valemil põhjal saame objektivi suurenduseks

$$M_T^{Obj} = \frac{y_{12}}{y_{11}} = \frac{a_{12}}{a_{11}} = 1 - \frac{a_{12}}{f_1} \quad (9)$$

Arvestades, et tavaliselt asetseb ese objektivi eesmise fookuse lähedal, siis objektivi ristisuurendus

$$M_T^{Obj} = \frac{T}{f_1} \quad (10)$$

Kus T on kaugus objektivi tagumisest fookusest okulaari eesmise fookuseni – mikroskoobi korral kutsutakse seda tuubuse pikkuseks. Seega saame mikroskoobi suurenduseks.

$$M = \frac{T}{f_1} \cdot \frac{a_{22}}{f_2} \quad (11)$$

Tabel 1. Mikroskoobi ja pikksilma tüüpilised erinevused:

Mikroskoop	Astronoomiline pikksilm
Objektiivläätsse fookuskaugus on väiksem kui okulaaril	Objektiivi läätsse fookuskaugus on palju suurem kui okulaaril
Objektiivi ja okulaari vaheline kaugus on suurem kui nende fookuskauguste summa $f_{ob}+f_{ok}$	Okulaari ja objektiivi vaheline kaugus võrdub nende fookuskauguste summaga $f_{obj} + f_{ok}$
Kasutatakse väga väikeste lähedal asuvate objektide vaatlemisel	Kasutatakse kaugete (astronoomiliste) objektide vaatlemiseks
Objektiivi sisenevate kiirte nurk optilise peatelje suhtes on suur	Objektiivi sisenevate kiirte nurk optilise peatelje suhtes on väike

4. Töö käik

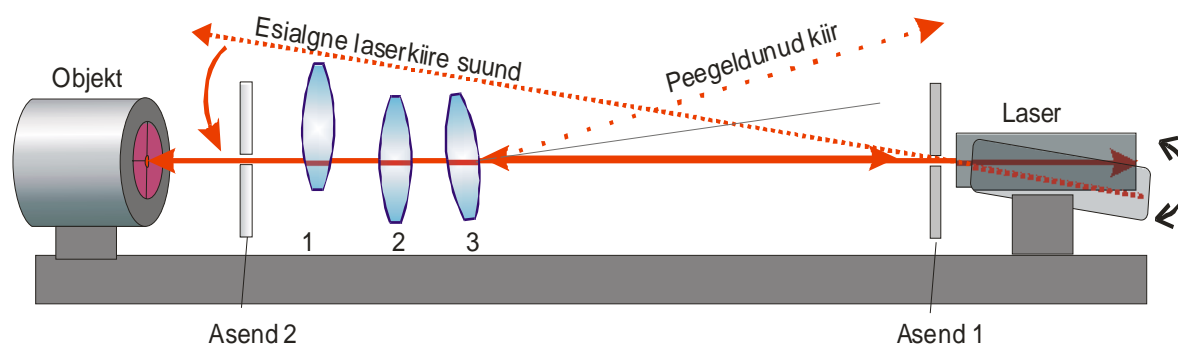
4.1. Katsevahendid

Optikapink, ratsurid, lätsehoidjad, komplekt koondavaid ja hajutavaid läätsi, objektskaala valgustiga, justeerimislaser, abipikksilm, abiskaala suurenduse määramiseks, kiire jagaja-poolpeegel, nihik, niitrist, mõõteluup, mõõtevarras (vt Lisa 4), [joonlaud](#).

4.2. Katsevahendite seadistamine

Mõõtmisi tehakse optikapingil, mida mööda saab liigutada ratsureid nii piki kui ka ristisihis. Korralike mõõtmistulemuse saamiseks tuleb kõik optika detailid justeerida optilisele teljele. Seda on töös võimalik teha laserkiire abil (joonis 4). Katseseade võimaldab laserit teatud piires kallutada, kuid mitte oluliselt nihutada kõrgus- või ristisihis. Seetõttu võtame aluseks laseri asendi ja reguleerime kõik vajalikud optikaelemendid lähtuvalt sellest. Esmalt tuleb reguleerida laseri kiir paralleelseks optilise pingiga. Laserikiire asukoha kontrollimiseks optikapingi ulatuses saab kasutada kas ekraani või mõne optilise detaili kindlat, selgesti fikseeritavat punkti (näiteks lätsehoidjate vardas olevat auku). Eemaldame optikapingilt muud komponendid peale selle ühe ja viime ta võimalikult laseri väljundava lähedale – asend 1. Reguleerime varrast kõrguse ja/või ristisihis, nii et laserkiir tabab täpselt seda fikseeritud kohta. Liigutame ratsuri optilise pingi teise otsa (asend 2) ja kontrollime, kuhu langeb laserkiir nüüd. Märki tabamiseks kallutame laserit. Liigume märgiga uuesti laseri lähetele ja kordame protseduuri kuni laserkiir on piisavalt hästi paralleelne optilise pingiga (pingi ulatuses kiire nihe ei ületa mõnda millimeetrit).

Töös kasutatavaks objektiks on metallkestas asuv skaalaga valgusti (Objekt), mis pole ristsuunas nihutatav. Reguleerime tema kõrgust, nii et optikapingiga paralleelne laserikiir tabaks skaala keskpunkti. Laserikiir määrab nüüd optikapingil süsteemi optilise telje.

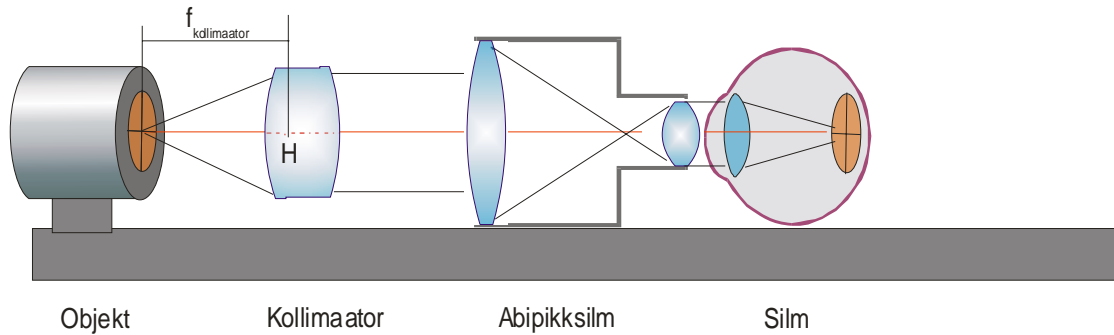


Joonis 4. Optikadetailide justeerimine laseriga

Edaspidi paigutame kõik vajalikud detailid laserikiire järgi. Kriteeriumiks, mille järgi saab otsustada, kas uuritava detaili optiline peatelg langeb kokku laseri kiirega, on laserikiire peegeldused ja murdumised detaili pindadelt. Kui näiteks mõlemalt läätse pinnalt peegelduv kiir satub tagasi laseri väljundavasse, siis võib lugeda, et detaili telg ühtib optikapingil oleva süsteemi teljega. Suure kõverusega lühifookuseliste läätselt peegelduse püüdmine, eriti kui lääts pole täpselt risti optilise teljega, võib põhjustada raskusi. Joonisel 4 lääts 1 ei ole tsentreeritud optilisele teljele, lääts 3 on kaldu teljega ja lääts 2 on asetatud õigesti. Peegelduste paremaks jälgimiseks võib läätsed viia laseri väljundavale lähemale. Optikelementide kõrgused reguleerime ratsuris esmalt jämedalt paika ja fikseerime varda kõrguse fiksaatoriga (vt. Lisa 4, joonis 9). Täpsemalt saame kõrgust reguleerida pöörates kõrguse regulaatorit.

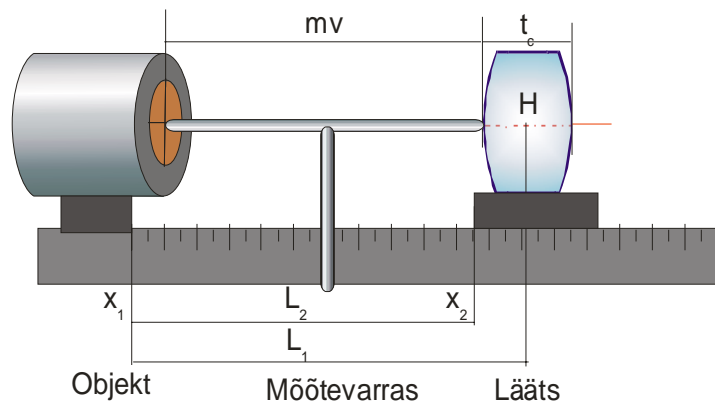
Pikksilmade modelleerimisel ja nende suurenduste mõõtmisel on vaja, et objektilt langeks pikksilma paralleelne kiirtekimp. Kuna me oma mõõteobjekti lõpmatusse viia ei saa, siis paralleelse kiirtekimbu saamiseks kasutame kollimaatorit. Kui objekt asetseb kollimaatoriks oleva suhteliselt pikafookuselise objektiivi fookuses, väljuvad sealt paralleelsed kiired. Kollimaatori paigaldamise täpsust saab kontrollida lõpmatusse fokuseeritud abipikksilmaga (Joonis 5). See abipikksilm tuleb eelnevalt teravustada läbi akna mõnele kaugele objektile ja reguleerida laserikiire järgi optilisele teljele. Nihutame kollimaatorit objekti suhtes ja jälgime tulemust läbi pikksilma. Õige kollimaatori paigutuse korral näeme pikksilmas objektskaala teravat suurendatud kujutist. Kollimeeritud kiirte korral ei tohi tulemus sõltuda abipikksilma ja kollimaatori vahelisest kaugusest. Selles veendumaks tuleb abipikksilmaga liikuda vahetult kollimaatori tagant optikapingi teise otsa. Edaspidi tuleb pikksilmale valida töötegemiseks mugav asukoht optikapingil.

Samamoodi kontrollime hiljem ka koostatud pikksilma mudelite läätsede õiget asetust, sest ka selle okulaarläätselt peavad väljuma paralleelsed kiired.



Joonis 5. Kollimaatori õige asendi leidmine

Optikapingil olevate elementide asukohad ei lange tavaliselt kokku kauguste lugemi võtmise näidikutega või ratsuri servadega, mille järgi lugemist võtta. Selleks et määrata detailide omavahelisi kaugusi, tuleb kasutada kaliibritud, tuntud pikkusega L mõõtevarda **mv** abi (joonis 6). Mõõtevarda pikkus tuleb kanda ka mõõtmisprotokollile! Mõõtevardaga mõõtmisel on vajalik ettevaatus, et kokkupuutel optiliste detailide pindadega ta neid ei kriimustaks ega kahjustaks.



Joonis 6. Detailide vahelise kauguse määramine.

Leidmaks objekti ja läätsede vahelist kaugust asetame mõõtevarda ühe otsaga vastu objektskaalat ja nihutame ettevaatlikult ratsuris paikneva Läätsede vastu mõõtevarda teist otsa. Fikseerime läätsede ratsuri näidu x_2 ratsuri serva järgi mõõteskaala. Nüüd on meil teada läätsede pinna ja objekti vaheline tegelik kaugus L ja sellele vastav skaalanäit. Edaspidi saame skaala lugemise põhjal leida selle läätsede esipinna tegeliku kauguse objektist. Sarnaselt saame mõõta ka ülejäänud optiliste elementide vahelised kaugused.

Tegelikult oleks vaja meil teada läätsede optilise keskpunkti H kaugust objektist. Selleks tuleks leida läätsede mõlema pinna koordinaadid ja nende koordinaatide vaheline keskpunkt lugeda läätsede optiliseks keskpunktiks. Kõigi läätsede mõlema pinna koordinaatide leidmine on aeganõudev ja praktikumis ülesande lihtsustamiseks on antud kasutatavate läätsede paksused. Lihtsuse mõttes võime töös läätsede optiliseks keskpunktiks lugeda tema pindade vahelist keskpunkti.

Optiliste instrumentide modelleerimisel on vaja teada ka kasutatavate läätsede fookuskaugusi. Positiivsete läätsede fookuskaugused tuleb määrata endal. Negatiivsete läätsede korral on fookuskauguse määramine mõnevõrra komplitseeritum ja ebatäpsem (vt. praktikumitöö erijuhend **O11** „Läätse fookuskaugus ja mitmeläätselise süsteemi kardinaalelemendid“), seetõttu on käesolevas töös nende fookuskaugused antud.

Kiirendamaks töö käiku ja olemasolevast komplektist sobivaid läätsede valikuid, tuleks esmalt jämedalt hinnata läätsede fookuskaugusi (Kuidas seda teha?). Lihtsaim viis on projitseerida piisavalt kaugel objekti kujutis ekraanile (paberitükile) ja mõõta/hinnata kaugust läätsest ekraanini. Loomulikult sõltub objekti piisav kaugus läätse fookuskaugusest.

Vastavalt juhendaja poolt saadud konkreetsele tööülesandele teeme läätsede esialgse valiku hinnates jämedalt nende fookuskaugusi, seejärel mõõdame nende fookuskaugused ja leiame ka vastavad mõõtemääramused.

4.3. Koondava läätse fookuskauguse leidmine.

Läätse fookuskaugust võib määrata mitmel viisil nagu on kirjeldatud töös (**O11** „Läätse fookuskaugus ja mitmeläätselise süsteemi kardinaalelemendid“). Selleks peab meil lisaks mõõdetavale läätsele olema sobiv objekt, mille kujutist saaksime silmaga vaadelda, kas siis ekraanil või pikksilma abil. Ükskõik, kas me vaatame kujutist ekraanil või läbi pikksilma, tekib meil alati raskusi, et tabada “kõige teravam” kujutis. Asi on selles, et kujutise “teravnemine” ja hägustumine õige asendi ümber toimub läätse, objekti või ekraani liigutamisel sujuvalt, mitte hüppeliselt. Seetõttu on kõige teravama olukorra tabamine raske, subjektiivne ning sellest tulevadki ebatäpsused mõõtmistel. Subjektiivsuse mõju vähendamiseks tuleb teha kordusmõõtmisi.

4.3.1. Fookuskauguse määramine, kui objekt on lõpmata kaugel

Kui objekt on kaugel $a_1 \rightarrow -\infty$, siis läätse valemi põhjal kujutise kaugus $a_2 = f$, s.t kujutis tekib läätse fokaaltasandis. Läätse ja ekraani vahemaa võrdub sel juhul läätse fookuskaugusega. Töös on seda meetodit soovitatav kasutada läätsede fookuskauguste esialgsel hindamisel. Kauge objektina võime kasutada mõnd eemal olevat valgustit või ka seadmes paika reguleeritud kollimaatorit.

4.3.2. Fookuskauguse määramine pikksilma abil

Koondava läätse fookuskaugust saab lihtsalt määrata ka lõpmatusse teravustatud pikksilma abil. Seda meetodit on soovitatav kasutada käesolevas töös.

Kui vaatleme läätse tekitatud objekti kujutist läbi lõpmatusse teravustatud pikksilma, on kujutis terav vaid siis, kui ese asub läätse fookuses, õigemini läätse fokaaltasandis. Sel juhul võrdub läätse fookuskaugus objekti ja läätse vahelise kaugusega.

Esmalt määrame ja paneme kirja läätse ratsuri näidu juhul, kui eseme ja tsentreeritud koondava läätse vahemaa vastab mõõtevarda pikkusele. Teise ratsurisse asetame optilisele teljele lõpmatusse teravustatud abipikksilma. Edasi tuleb läätse edasi-tagasi nihutades leida tema selline asend, kus objektskaala läbi süsteemi lääts-pikksilm paistab suurima teravusega. Katset korrata 3 – 5 korda nihutades enne taasteravustamist läätse paigast ja

panna iga kord kirja suurimale teravusele vastav läätse ratsuri näit. Tuleb leida nii läätse fookuskaugus kui ka vastav mõõtemääramatus. Mõõtmiste optiline skeem on analoogne kollimaatori justeerimisskeemiga Joonis 5. Mõõtmiste ajal võib abipikksilma ja läätse liigutada koos.

4.4. Kepleri pikksilma modelleerimine ja suurenduse määramine.

Pikksilma suurendus sõltub kasutatavate läätsede fookuskauguste suhtest. Seetõttu tuleb modelleerida juhendaja poolt etteantud suurendusele lähima võimaliku suurendusega pikksilm antud läätsede komplektist. Objektiiviks valime ühe pikafookuselise läätse, okulaariks lühemafookuselise läätse. Pikksilma moodustamiseks võimalikud suurendused arvutame valemi (6) põhjal kasutades läätsede enda mõõdetud fookuskaugusi. Modelleeritava pikksilma suurendus peaks jääma väiksemaks kui $5\times$, muidu pole seda võimalik suhteliselt suure suurendusega abipikksilmaga määrata kuna süsteemi modelleeritud pikksilm + abipikksilm vaatevälja jääks vähem kui üks objekti skaalajaotis.

Pikksilma modelleerimisel on vaja, et pikksilma langeks paralleelne e. kollimeeritud kiirtekimp. Selleks justeerime kollimaatori objektiivi punktis 4.2 kirjeldatud viisil (joon 5). Koostatava pikksilma objektiivi asetame kollimaatori lähedale, okulaari aga objektiivist kaugusele $a = f_1 + f_2$. Vaatame silmaga, kas näeme objekti teravat kujutist. Okulaarist väljuva kiirtekimbu paralleelsust kontrollime lõplikult lõpmatusse teravustatud abipikksilmaga. Läätsede vahelise õige kauguse korral peab ka abipikksilmas olema näha objekti terav kujutis.

Vajadusel tuleb muuta objektiivi ja okulaari vahelist kaugust, mõõta tegelik vajalik kaugus a ja analüüsida, miks arvutused ja modelleerimistulemused erinesid.

Kepleri pikksilmas kasutatakse sageli ka okulaarskaalat või niitristi. Kuhu tuleb asetada niitrist pikksilma mudelis? Asetage detail niitristiga koostatud süsteemi ja määrake tema asend läätsede suhtes. Õige asetuse korral peame teda objekti suhtes nägema parallaksivabalt. Pikksilma suurenduse määramise ajaks võib niitristi eemaldada.

Pikksilma suurenduse määramisel lähtume suurenduse definitsioonist (valemist 5). Selleks tuleks teada nurka θ_1 , mille all paistab objekt ilma modelleeritud pikksilmata ja nurka θ_2 , mille all paistab objekt läbi koostatud pikksilma. Nende nurkade suhte määramiseks kasutame okulaarläätse taha asetatud lõpmatusse teravustatud okulaarkruvikuga varustatud abipikksilma. Okulaarkruvikuga mõõdame näha oleva skaalajaotise vahelise kauguse d_2 . Mõõtemääramatuse hindamiseks teeme kordusmõõtmisi. Seejärel eemaldame modelleeritud pikksilma läätsed optikapingilt ja mõõdame okulaarkruvikuga kollimaatori taga nähtava skaalajaotiste vahelise kauguse d_1 . Nende kauguste suhe on

$$\frac{d_2}{d_1} = \frac{k \cdot \tan \theta_1}{k \cdot \tan \theta_2}, \quad (13)$$

kus k on abipikksilma iseloomustav suurendus. Kuna pikksilma suurendus avaldub $M = \frac{\theta_2}{\theta_1}$ ja nurkade väiksuse korral on nurk ja tema tangens ligikaudu võrdsed, siis koostatud pikksilma suurendus võrdubki mõõdetud pikkuste suhtega:

$$M = \frac{\theta_2}{\theta_1} \approx \frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{d_2}{d_1} \quad (14)$$

Suurendust saab määrata ka lähtuvalt valemist (7) mõõtes ära pikksilma sisenemis- ja väljumisavad D_1 ja D_2 . Kui kogu objektiiv on valgusega täidetud, võime sisenemisavaks võtta objektiivlääts läbimõõdu. Vastasel korral tuleks sisenemisava läbimõõt võtta võrdseks kollimaatori läbimõõduga. Väljundavaks on okulaari poolt tekitatud sisendava (objektiivi serva) kujutis (joonis 1, D_2). Selle mõõdame kas nihikuga väljundava tasandisse asetatud ekraanilt või väljundava tasandisse asetatud skaalalt luubiga. Esmalt peab luup olema teravustatud skaalal, seejärel nihutades teda okulaari taga edasi-tagasi, leiame asendi, kus ka väljundava servad on näha teravalt ja mõõdame selle läbimõõdu.

4.5. Galilei pikksilma modelleerimine ja suurenduse määramine.

Sarnaselt Kepleri pikksilmale koostame olemasolevatest läätsedest juhendaja poolt etteantud suurendusele võimalikult lähedase suurendusega Galilei pikksilma. Mudeli koostamine ja kontrollimine toimub samuti kui Kepleri pikksilmaga. Kuna Galilei pikksilma negatiivses okulaaris tekib objektiivist ebakujutis, siis sisend- ja väljundava suhte kaudu me tema suurendust leida ei saa. Suurenduse määrame abipikksilmaga mõõtes nurgad θ_1 ja θ_2 .

4.6. Mikroskoobi modelleerimine ja tema suurenduse määramine.

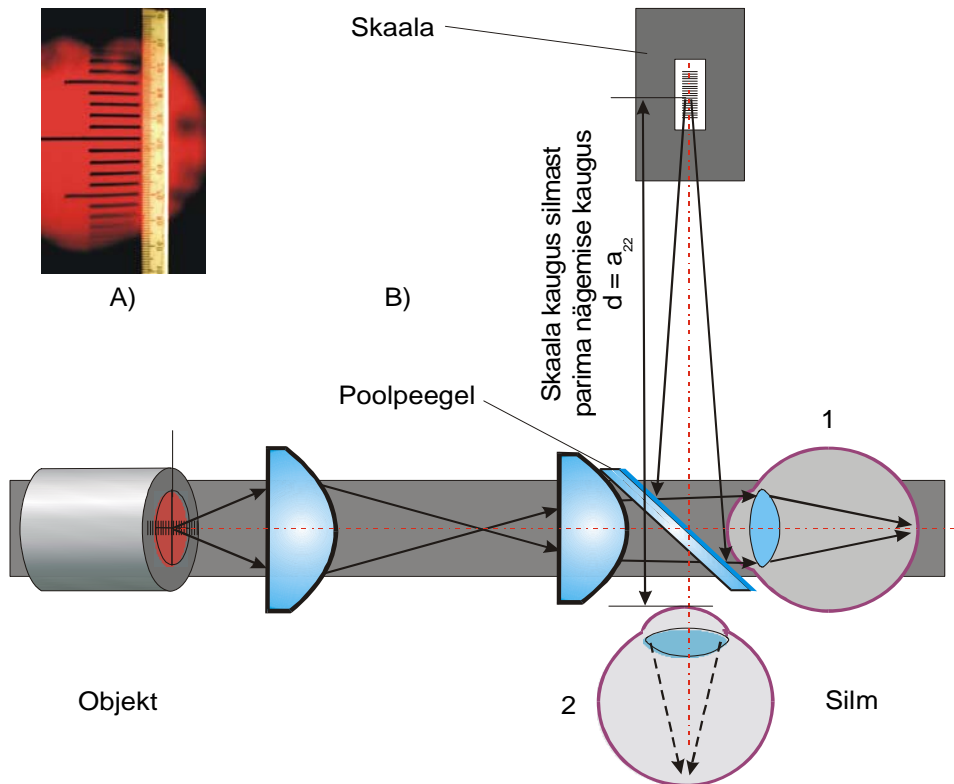
Koostame olemasolevatest läätsedest juhendaja poolt etteantud suurendusega mikroskoobi. Suurenduse paremaks määramiseks võiks modelleeritava mikroskoobi suurendus olla väiksem kui 20-30 korda. Juhendaja võib ette anda ka minimaalse lubatava mikroskoobi töökauguse, s. o. kauguse objektiivi läätsest objektini.

Valime kaks sobiva fookuskaugusega lääts (millised on kriteeriumid sobiva fookuskauguse valimiseks?). Vastavalt nõutud suurendusele tuleb valemi (11) alusel arvutada tuubuse pikkus T ning okulaari ja objektiivi vaheline kaugus. Asetame valitud läätsed optikapingile arvutatud kaugusele teineteisest. Koostatud mikroskoobi teravustame liigutades skaalaga objekti optikapingil lähemale-kaugemale. Kui valitud läätsede pinnad on oluliselt erinevate kõverustega, siis parema kvaliteediga kujutise saamiseks asetame nad nii, nagu on näidatud joonisel 7. Ka mikroskoobis on sarnaselt Kepleri pikksilmaga võimalik kasutada okulaarskaalat. Kuhu tuleb ta asetada, et näeksime teda objekti suhtes parallaksivabalt? Määrame selle koha, asetame niitristiga detaili sinna ja kontrollime tulemust. Suurenduse määramise ajaks võib niitristi eemaldada. Detailide asetamisel optikapingile jälgime, et ratsuri ristsuunas fikseerimiskruvid ei segaks detailide üksteisele piisavalt ligidale nihutamast. Vajadusel tuleb ratsur pöörata pingil teistpidi.

Mikroskoobi suurenduse määramiseks peame võrdlema mikroskoobist paistva eseme kujutise vaatenurka nurgaga, mille all paistab ese meie parima nägemise kauguselt 25 cm.

Suurenduse määramiseks asetame silmast parima nägemise kaugusele 25 cm võrdluskala ja optikapingile abivahendina poolpeegli (joonis 7B). Selleks eemaldame ratsurist pikksilma, asetame samasse ratsurisse poolpeegli ning nihutame ta okulaaril lähedale. Vaadates piki optikapingi telge läbi poolpeegli ja koostatud mikroskoobi (silma asend 1), näeme samaaegselt poolpeeglis peegeldunud abiskaalat ja suurendatud objekti (joonis 7A). Kui läbi mikroskoobi nähtavale N millimeetrile vastab abiskaalal n millimeeterjaotist, siis mikroskoobi suurendus võrdub n/N . Teeme kordusmõõtmisi, leiame mõõtemääramatused. Analüüsida tulemusi.

Suurendust on võimalik määrata ka vaatesuunast 2 (Joonis 7). Sel juhul peegeldub objekti kujutis ja läbi poolpeegli näeme abiskaalat.



Joonis 7. Mikroskoobimudeli suurenduse määramine

Küsimused

1. Kuidas teha ilma abivahenditeta kindlaks, kas on tegemist koondava või hajutava läätsesega?
2. Kuidas saab kiiresti hinnata läätsede fookuskaugusi?
3. Koondava lääts fookuskauguseks võetakse temast kaugel asetseva eseme kujutise kaugus. Kui suur peab olema eseme kaugus, et fookuskauguse määramisel tehtav suhteline viga ei ületaks 10%?
4. Kuhu tuleks asetada Kepleri pikksilmas, mikroskoobis okulaarskaala?
5. Kas Galilei pikksilmas saab kasutada okulaarskaalat? Põhjendada.
6. Mida peaks tegema, et koostatava mikroskoobimudeliga saaks projitseerida kujutist ekraanile, pildistamiseks CCD elemendile?
7. Selgitada mõisteid "kiirte käik" ja "kujutise konstrueerimine". Millised kiired valitakse kujutise konstrueerimiseks?
8. Tänu silma akommodatsioonile on pikksilmas võimalik näha teravat kujutist ka siis kui pikksilmast ei välju paralleelsed kiired, vaid lõplik näiv kujutis tekiks silma prima

nägemise kaugusel või kaugemal. Joonistage kiirte käik sellise pikksilma justearingu korral.

9. Miks me ei või piirduda koostatud pikksilma lõpmatusse teravustamise ja kujutise teravuse hindamisel ainult silmaga vaatamisega vaid tuleb kasutada ka abipikksilma?
10. Millise tulemuse saame kui mikroskoobi suurenduse määramisel abiskaala asub parima nägemise kaugusest lähemal, kaugemal?

Täiendavalt saab läätsede valikust tingitud optiliste instrumentide põhiparameetrite muutumist läbi mängida ka „Hüperfüüsika“ vörgulehtedel

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/geoopt/micros2.html> ja

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/geoopt/opinst.html#c1>

“HüperFüüsika” avalehelt :

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/Hbase/hframe.html> on võimalik lihtsalt jõuda ka teiste füüsikvaldkondade õppematerjalideni.

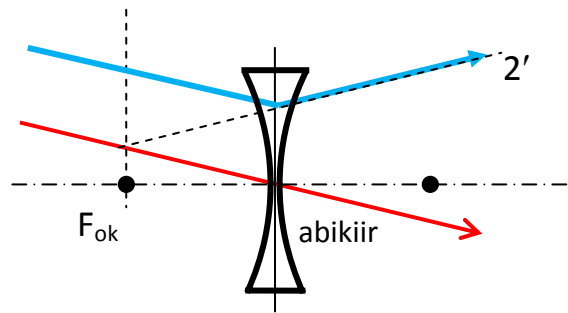
Lisad

LISA 1

Kiire levikusuuna määramine pärast murdumist hajutavas läätses.

Leidmaks kiire 2' levikusuunda (vaata ka joonis 2), tuleb lähtuda fokaaltasandi definitsioonist: kui läätsel langeb paralleelne kiirtekimp, siis pärast murdumist lõikuvad kiired või nende pikendused tagumises fokaaltasandis. Kiirte käik on geomeetrilises optikas pööratav. Kui kiired leviksid paremalt vasakule (joonis), siisi fokaaltasandi punktis koonduvad kiired või nende pikendusedon pärast murdumist paralleelsed. Hajutava läätses puhul paikneb tagumine fokaaltasand läätsesest vasemal.

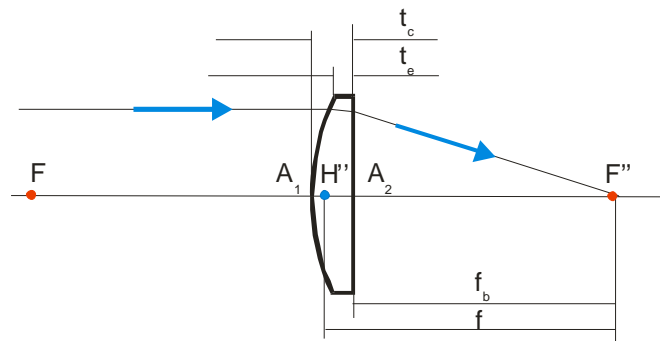
Kiire 2' levikusihi leidmiseks joonistame abikiire, mis on paralleelne langeva kiirega ja läbib läätses optilist keskpunkti. Selline kiir läbib läätses suunda muutmata. Selle kiire lõikepunkt fokaaltasandiga määrab punkti, kuhu koondub ka kiire 2' murdumise sihis tõmmatud kiirepikendus.



Joonis 8. Kiirte levikusuuna konstrueerimine hajutavas läätses

LISA 2

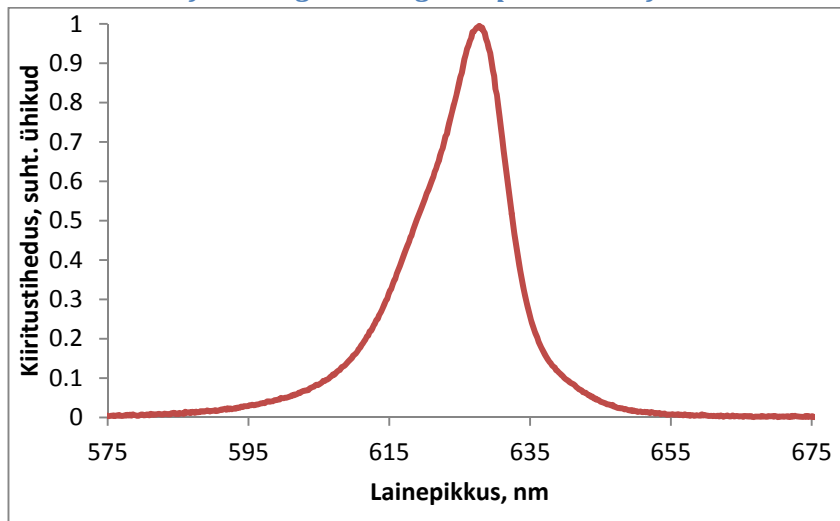
Läätse iseloomustavad suurused



Joonis 9. F ja F'' - eesmine ja tagumine fookus; H - peapunkt; f - fookuskaugus – kaugus peapunktidest fookuseni; f_b - tagumine fookuskaugus– kaugus läätses tagumisest pinnast (lagipunktist) fookuseni; lagipunktid A_1 ja A_2 , mille vaheline kaugus t_c on läätses tsentri paksus, t_e – läätses serva paksus.

LISA 3

Objekti valgusti kiirguse spektraalne jaotus.



LISA 4

Töös kasutatavad optikadetailid

