

N=16124
Sain
30. 9. 1946

J. LANG ja A. MITT

FÜÜSIKA

XI KLASSILE

RK

„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“

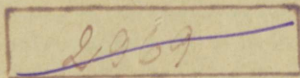
TALLINN 1946

2/25113

J. LANG ja A. MITT

FÜÜSIKA

XI KLASSILE

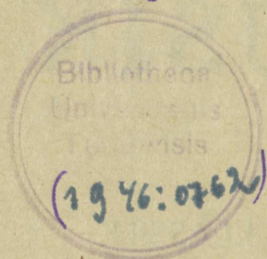


RK

„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“

TALLINN 1946

2



25113

A-16129

Valgusõpetus ehk optika.

I. Valgusallika ja pinnavalgustuse tugevus.

1. Valgusnähtused. Valgusallikad. Valgusnähtusi me tajume oma silma abil. Nende põhjustajaks on nn. valguskiired, mis silma tungides tekitavad valgusaistingu. Tuleb alati vahet teha subjektiivse, ainult meie teaduses esineva valgusaistingu, ja objektiivse, väljaspool meid toimuvate füüsikaliste nähtuste vahel, mis on valgusaistingu tekkimise põhjuseks. — Füüsika osa, kus valgusnähtusi lähemalt tundma õpitakse, kannab **optika** nime.

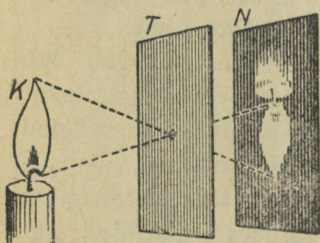
Valgusallikaks, s. o. kehaks, mis valgust kiirgab ehk lumineerib, võib olla iga kõrge temperatuuriga keha, näiteks Päike. Juba 525° alates hakkavad tahked ja vedelad kehad lumineerima. Kuid me tunneme rida nähtusi, kus valgus ei teki keha kõrgest temperatuurist, vaid teistest põhjustest, näiteks: valgusnähtused hõrenдатud gaasides, kui neist elektrivoolu läbi lasta; jaaniussikeste, merevee hiilgust tekitavate ja teiste organismide valgus; mõnede ainete lumineerimine keemiliste protsesside mõjul (fosfor). Oma füüsikalistelt omadustelt on nii „soe“ kui ka „külm“ valgus ühesugused ning alistuvad samadele korrapärasustele.

Lumineerivad kehad (Päike, tähed) kiirgavad n.-ö. omavalgust. Kuid ka tumedad kehad saada-

vad valgust välja, kui mõnest valgusallikast valgust nende peale paistab, mida nad siis osaliselt tagasi peegeldavad. See-tõttu ongi tumedad kehad (raamat, sein, Kuu, planeedid) meile nähtavad, nad muutuvad valgusallikaiks väljast-poolt saadud valguse arvel.

2. Valguskiirguse põhiomadusi. Esemed, milledele valgust peale paistab, soojenevad. Seega muundub valgus sooju-seks. Soojus aga on energia, tähendab, ka valgus on energia. Valgusallikas on kui saatejaam, mis energiat vahetpidamata välja saadab ehk kiirgab. Nn. valguskiir pole muud midagi kui valgusenergia levimis-suund.

Kineetilise teooria põhjal oleneb keha temperatuur keha molekulide liikumisenergiast. Akustikas nägime, et häält tekitab mõne ainelise keskkonna, harilikult õhu võnkumine. Uurimised näitavad, et ka valguskiirgus on eri-line liikumine, nimelt lainetusnähtus, mis tekib valgusallika aatomites elektri võnkumistest.



1. joon. Kujutiste tekitamine pisiava abil.

Hääle levimiseks on vajalik aineine keskkond (tühjas ruu-mis häält ei ole!). Päikese ja tähtede valgus tungib meieni läbi tühja maailmaruumi. Seega valguskiirgus ei vaja levimiseks mingit aine-list keskkonda.

Varjude tekkimise nähtused tõendavad, et valguskiir-gus levib sirgjooneli-selt. Silmaga võime tajuda valguskiirgust ainult selle levi-missuunas, s. o. valguskiirgust, mis otse meie silma tungib. Valguskiirgust, mis meie silmade eest mööda läheb, me ei näe. Me võime valguskiiri näha

ainult n.-ö. otsast, mitte aga küljelt. Vahel õhus tähelepanndavad „valguskiired“ tekivad valguse peegeldumistest tolmukübemeilt või väikestelt veepiiskadelt.

Kujutiste tekitamise võimalus pisiava abil tõendab mitte üksnes valguskiirguse sirgjoonelist levimist, vaid ka seda, et valguskiired võivad ristlemisel üksteisest ilma segamata läbi tungida. Viimane valguskiirguse omadus tõendab tema lainelist iseloomu, sest ainult lainetel on omadus üksteisest takistamatult läbi tungida, nagu me seda võime tähele panna ka veepinna lainetusel.

Ekraan on pisiavast 5 korda kaugemal kui ese, mille kaugus on 15 mm. Leida kujutise kõrgus!

3. Valgusallika valgustugevuse ühikud. Valgusallika valgustugevust (võimsust) mõõdetakse selle valgusenergia hulga põhjal, mis valgusallikas ühes sekundis välja saadab. Näiteks kui mõni elektripirn igas sekundis kiirgab 10 korda rohkem valgusenergiat kui küünal, siis ütleme, et selle elektripirni valgustugevus on küünla omast 10 korda suurem, ehk teisiti: elektripirni valgustugevus on 10 küünalt.

Valgusallika valgustugevuse ühikuna on viimasel ajal üldiselt tarvitusele võetud nn. **rahvusvaheline küünal** (r. k.), mille suurus 1937. a. otsuste kohaselt on määratud nn. **absoluutselt musta keha** (vt. § 100) valguskiirguse põhjal 1768° juures. Sellise keha 1 cm² suuruse pinna valguskiirgus võrdub 60 rahvusvahelise küünlaga. Seega puudub r. k. ühik — etaloon. Viimase asemel kasutatakse eriliselt ehitatud elektripirne, millede valgustugevus teatud pinge juures on rahvusvahelistes küünaldes täpselt määratud. Nendega võrreldaksegi teisi valgusallikaid.

Eespool defineeritud rahvusvaheline küünal erineb (umbes 2% väiksem) varem Nõukogude Liidus, USA-s, Inglismaal, Prantsusmaal jm. rahvus-

vahelise küünla (*International Candle Power*) nime all tarvitusel olnud valgusallika tugevuse ühikust.

Varem oli laialt tarvitusel, eriti Kesk-Euroopas, valgusallika valgustugevuse mõõtmise ühikuna nn. Hefner'i küünal (HK).

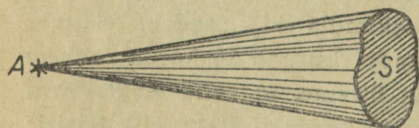
1 r. k. = 1,1 HK.

Hefner'i küünla valgustugevuse annab Hefner-Alteneck'i poolt 1884. a. eriliselt ehitatud lamp, milles põleb amüülatsetaat, kui tahi läbimõõt on 8 mm ja leegi kõrgus 40 mm.

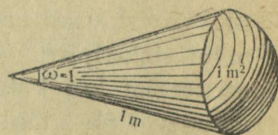
1. Varem tarvitati valgusallika valgustugevuse ühikuna nn. normaalküünalt (2-cm läbimõõduga parafiinküünla leegi tugevus, kui leegi kõrgus on 5 cm). Väljendada normaalküünla valgustugevus r. k.-des ja ümberpöörduvalt, kui 1 normaalküünal = $\sim 1,2$ HK!

2. Eelmise ülesande tulemuste põhjal reastada suuruse järgi kõik kolm valgusallika valgustugevuse ühikut: r. k., HK ja normaalküünal! Väljendada teiste suurus kõige väiksema abil neist! Mitmeprotsendilise vea teeme, kui r. k. asemel tarvitame HK või normaalküünalt?

3. Elektripirni valgustugevus on 40 HK. Mitu r. k. see on?



2. joon. Valgusvoog läbib pinna S.



3. joon. Ruuminurga-ühik.

4. **Valgusvoog. Luumen.** Valgusallikast mõnele pinnale langevaks valgusvooks nimetatakse sellele pinnale ühes sekundis langevat valgusenergia hulka. Et valgusvoogu isoleerimustab 1 ajaühiku (sek) kohta tulev valgusenergia hulk, siis võime valgusvoogu mõõta võimsusühikuis, näiteks vattides.

Olgu meile antud punktitaoline valgusallikas ehk nn. valguspunkt, mille valgustugevus on 1 r. k. (2. joon.). Oletame, et see valguspunkt kiirgab valgust (lumineerib) ühtlaselt igas suunas. Sel juhul on lihtne arvutada valgusvoo suurust antud pinnale S. Selleks kujutame antud valgus-

punktist A kiired läbi pinna S kontuuriõiga punkti. Siis saame koonilise pinna, mis moodustab nn. ruuminurga, mille tipp on punktis A .

Ruuminurkade mõõtmisel võtame ühikuks sellise ruuminurga, mis tema tipu ümber 1-m raadiusega kujutatud kerapinnast lõikab välja 1 m^2 suuruse osa (3. joon.). Et kogu selle kerapinna suurus on $4\pi 1^2 \text{ m}^2 = 4\pi \text{ m}^2 = 12,57 \text{ m}^2$, siis järelikult ühe punkti ümber oleva ruuminurga suurus on 12,57 ruuminurga-ühikut.

Muidugi ei sõltu ruuminurga suurus sellest, millise pikkusühiku valime kera raadiuseks — kas 1 m, 1 cm või mõne päris vabalt valitud pikkusühiku, sest vastavaid ruutühikuid mahub ühikraadiusega kujutatud kerapinda alati sama palju, nimelt 4π ehk 12,57.

Arvutame nüüd 1 r. k. valgusvoo võimsuse vattides ühes ruuminurga-ühikus. 1 r. k. valgustugevus ehk kogu tema valgusvoo võimsus on ümmarguselt 0,02 vatti, mis on jaotatud ühtlaselt kogu valguspunkti ümber olevasse ruumi, s. o. 12,57 ruuminurga-ühikusse. Järelikult iga ruuminurga-ühiku kohta tuleb sellest valgusvoost 0,02 vatti : 12,57 = 0,0016 vatti. Kui näiteks 1 r. k. tugevusest valguspunktist A pinnale S langev valgusvoog täidab ruuminurga $\omega = 0,25$ ruuminurga-ühikut, siis sellele pinnale langev valgusvoog võrdub $0,25 \cdot 0,0016 = 0,0004$ vatti.

Tavaliselt ei mõõdeta valgusvoo võimsust vattides, vaid luumenites. 1 luumen¹⁾ on sellise võimsusega valgusvoog, mis 1 rahvusvaheline küünal 1 ruuminurga-ühikusse kiirgab. Seega on 1 r. k. kogu valgusvoog 12,57 luumenit ehk 0,02 vatti; 1 luumen aga, nagu eespool nägime, on 0,0016 vatti.

Et 1 luumen on siiski küllalt väike valgusvoo võimsuse ühik, siis tarvitatakse tehnikas temast 10 korda suuremat ühikut — dekaluumenit, nagu seda elektripirnidelt sageli võime leida.

¹⁾ *Lumen* — ladina keeles valgus.

Tuleb silmas pidada, et valgusallikast väljuva valgusvoo tugevus hari-likult pole igas suunas ühesugune, nagu seda petrooleumi- või elektrihoõg- lampide juures kergesti võib tähele panna. Seepärast täpsuse mõttes peab kõnelema kas valgusallika keskmisest valgusvoo võimsu- sest või valgusvoo võimsusest teatud kindlas suunas.

Näidis. 38-väitse pirni valgustugevus on 40 dekaluumenit. Mitu vatti võimsust tuleb sel juhul 1 r. k. kohta? Mitu % kogu energiast muu- tub valguseks?

1) 1 r. k. valgustugevus on 12,6 luumenit ehk 1,26 dekaluumenit. Ulesande andmeil 1 dekaluumenile vastab $\frac{3,8}{10}$ vatti, järelikult 1 r. k. kohta tuleb $1,26 \cdot \frac{3,8}{10}$ ehk 1,2 vatti.

2) Nagu teame, vastab 12,6 luumenile ehk 1,26 dekaluumenile 0,02 vatti, järelikult 40 dekaluumenile $\frac{40 \cdot 0,02}{1,26}$ vatti. See vattide arv on kogu vattide arvust (38) $\frac{40 \cdot 0,02 \cdot 100}{1,26 \cdot 38}$ ehk 1,7%.

1. Kera pinnal, mille raadius 10 cm, on eraldatud pinnaosa 400 cm². Leida sellele pinnaosale vastav ruuminurk, mille tipp asub kerapinna tsentris!

2. Valguspunktist väljuv valgusvoog läbib temaga risti oleva pinna 0,2 m² 3 m kaugusel. Väljendada selle valgusvoo võimsus luumenites, kui valgusallika tugevus on 60 r. k. ja kiirgus toimub igas suunas ühtlaselt!

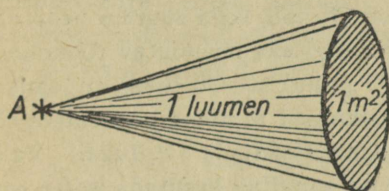
3. Valgusallika tugevus on 15 r. k. Leida selle valgusallika kogu- võimsus vattides! Mitmeluumeniline valgusvoog tuleb sel juhul keskmiselt iga ruuminurga-ühiku kohta?

4. Võrrelda dekaluumenit HK kogu valgusvooga! Kumb neist on suurem ja mitme % võrra?

5. Elektripirnile on trükitud: 25 dekaluumenit ja 27 vatti. Leida selle elektripirni valgustugevus r. k-des ja HK-des! Mitu % äratarvitatud ener- giast muutub selles pirnis valguseks?

5. Pinnavalgustuse tugevus. Luks. Kui valgusvoog langeb mõnele tumedale kehale, näiteks lambi valgusvoog raamatule, Päikese valgusvoog Kuule, siis valgustab ta selle keha pinda ja me näeme teda. Pinna valgustustugevust mõõdetakse sel- lele pinnale langeva valgusvoo võimsusega kas luksides või fottides.

Pinna valgustustugevus on 1 luks¹⁾, kui selle pinna 1 m²-le langeb ühtlaselt valgusvoog 1 luumen. Langeb aga sama valgusvoog — 1 luumen — pinnale 1 cm², siis on selle pinna valgustustugevus 1 fott.



$$1 \text{ luks} = 1 \frac{\text{luumen}}{\text{m}^2}$$

$$1 \text{ fott} = 1 \frac{\text{luumen}}{\text{cm}^2}$$

4. joon. Luksi ja foti määrang.

Luksi määratakse vahel ka kui valgustuse tugevust, mida tekitab valgusallikas 1 r. k. temast 1 m kaugusel oleval valgusvooga risti asetatud pinnal. Et 1 m kaugusel ruuminurgaühiku tipust tehtud ristlõigu pind on just 1 m², siis on mõlemad valgustustugevuse ühiku luksi definitsioonid sisult üheväärsed. Seetõttu 10 r. k. annab 1 m kaugusel valgustustugevuse 10 luksit, 25 r. k. — 25 luksit, jne. Kauguse suurenedes või vähenedes muidugi vastavalt vähem. Eelmise põhjal on 1 luks sama¹⁾, mis 1 meeterküünalgi, millist nimetust tarvitati varemalt.

Pinna valgustuse tugevus luksides näitab, kui palju valgusenergiat saab pind. Hoopis iseküsimus on, kui palju valgustatud pind sellest energiast jälle tagasi kiirgab. Viimastest asjaolust oleneb selle pinna nähtavus meie silmale. Nn. absoluutselt must keha (tahm — enam-vähem) neelab kõik tema peale langeva valgusvoog, valge paber neelab ära ainult umbes 10⁰/o, kuna 90⁰/o kiirgab tagasi, kriit kiirgab tagasi 84⁰/o, must kalev 1,2⁰/o, must samet 0,2⁰/o. Kuu pinnale:

¹⁾ Lux — ladina keeles valgus. Üleliidulise standardi OCT nr. 4891 järgi võetakse valgustusühikuks fott (phos — kreeka keeles valgus). Praktikas on luks üldisemalt tarvitusel kui fott.

langevast Päikese valgusest kiirgub tagasi maailmaruumi umbes 70%.

Töö edukuse ja silmade tervishoiu seisukohalt on tarvilik, et töökoht ja tööga seotud esemed oleksid küllaldaselt ning ühtlaselt valgustatud. Üldiselt kehtib nõue: mida peenemate esemete kallal toimub töö, seda suurem peab olema nende valgustustugevus. Nii näiteks on nõutav töökohta valgustustugevus jämedama töö puhul 10—20 luksit, lugemisel ja kirjutamisel 50 luksit, joonestamisel ja üldse peenemate tööde puhul (graveerijad, kellassepad, tikkijad) 100 luksit. Valgustuse ühtluse saavutamiseks on soovitatav kasutada mitte otseselt, vaid kaudset valgustust (piimklaasist pirnid, laevalgustus jne.), et valgust andev keha poleks silmale otseselt nähtav.

Nagu pole soovitatav töötamisel liiga nõrk valgustus, samuti rikub silmi ka liiga tugev valgustus. Õige tugev valgustus pimestab silma. Edasi tuleb hoiduda ka järskudest valgustustugevuse kõikumistest ja varjude ning valgustuse vaheldusest, mis on samuti silmadele sobimatu ning väsitav.

1. Mitu % on valgustustugevus ühelt r. k-lt suurem kui 1 HK-lt samas kauguses?
2. Valge paber on valgustatud 75 luksit tugevuselt. Mitu luumenit kiirguks tagasi sellise paberi din-formaadis poolpögnast (21 × 30 cm)?
3. Punktitaoline valgusallikas, mille tugevus on 50 r. k., asetseb 30 cm lauast kõrgemal. Leida laua valgustustugevus luksides 60 cm lambist eemal!
4. Kui suurele pinnale peab langema valgusvoog 1 luumen, et selle pinna valgustustugevus oleks 100 fotti?
5. Mitu luksit on 1 fott?

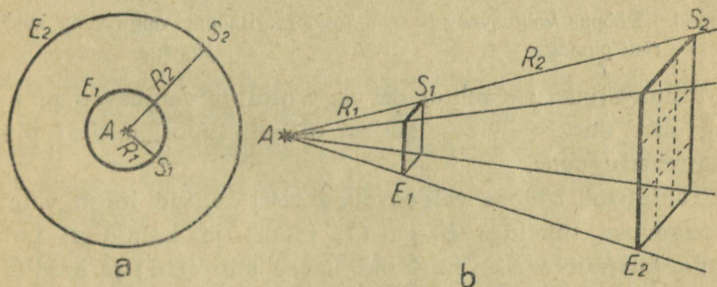
Mitu fotti on 1 miljon luksit?

Mitu luksit on 2,5 fotti?

6. **Pinnavalgustuse seadused.** Olgu meile antud punkti-
taoline valgusallikas, millest valgusvoog levib ühtlaselt igas
suunas (5. joon., a). Kujutame selle valgusallika ümber kera-
pinnad S_1 ja S_2 , millede raadiused on R_1 ja R_2 ning valgus-
tustugevused neil kerapindadel vastavalt E_1 ja E_2 . Et sama
valgusvoo hulk langeb ühtlaselt mõlemale kerapinnale, siis
nende kerapindade valgustustugevused E_1 ja E_2 peavad olema
pöördvõrdelised nende kerapindade suurustega, s. o.

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{S_2}{S_1} = \frac{4\pi R_2^2}{4\pi R_1^2} = \frac{R_2^2}{R_1^2}.$$

Siit näeme, et pinna valgustustugevus punkti-
taolisest valgusallikast on pöördvõrdeline
selle pinna kauguse ruuduga valgusallikast.



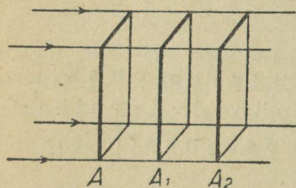
5. joon. Valgustustugevus väheneb pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga.

Samale tulemusele jõuame, vaadeldes ühest punktist (A) lähtuva val-
gusvoo, s. o. mõne ruuminurga valgusvoo löikumist rööpsete tasapinda-
dega (5. joon., b). Et ka sel juhul löikepindade S_1 ja S_2 suurused on
pöördvõrdelised nende kauguste R_1 ja R_2 ruutudega valgusallikast A (tões-
tada seda kujundite sarnasuse abil), siis jõuame samale tulemusele kui
varemgi.

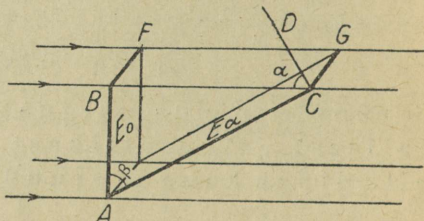
Eelmisest järgneb, et valgusallikat mõnest pinnast näiteks
2 korda kaugemale viies väheneb selle pinna valgustustugevus

2² ehk 4 korda, 3 korda kaugemale viies 3² ehk 9 korda jne. Lähemale viies valgustustugevus vastavalt suureneb.

Võtame nüüd rööpse valgusvoo ja lõikame teda rööpsete tasapindadega. Saame võrdsed lõikepinnad. Nii on 6. joon. kujutatud valgusvoo ristlõigud A, A_1, A_2, \dots , järelikult ka nende valgustustugevused kõik võrdsed. Seepärast kasutataksegi tugeva valgusvoo juhtimisel kaugema maa peale rööpset valgusvoogu (projektorid).



6. joon. Rööpne valgusvoo ristipinnaga.



7. joon. Rööpne valgusvoo kaldu pinnaga.

Pinnavalgustuse puhul on väga oluline valgusvoo pinnale langemise nurk (α), sest sellest oleneb suurel määral pinna valgustustugevus.

Tähistame rööpse valgusvooga risti tehtud lõigu valgustustugevuse luksides E_0 -ga (7. joon.) ja kaldlõigu puhul E_α -ga, kusjuures α on nurk valgusvoo sihi (BC) ja kaldlõigu pinnale (AC) tõmmatud ristjoone (CD) vahel. Seda nurka (α) nimetatakse nagu peegeldumiselgi valgusvoo langemisnurgaks. Et sama valgusvoo puhul on valgustustugevus pöördvõrdeline pindala suurusega, millele see valgusvoo jaguneb, siis

$$\frac{E_\alpha}{E_0} = \frac{AB \cdot BF}{AC \cdot CG} = \frac{AB}{AC} = \cos \beta = \cos \alpha,$$

sest $BF = CG$ ja $\alpha = \beta$ kui vastastikku risti külgedega nurkad. Sellest valemist järgneb, et

$$E_\alpha = E_0 \cos \alpha,$$

s. o. rööpse valgusvoo puhul on pinna valgustustugevus võrdeline valgusvoo langemisnurga koosinusega. Siit järgneb: kui valgusvoog langeb risti pinnaga, siis $\alpha = 0^\circ$, $\cos \alpha = 1$ ja valgustustugevus E_α saab maksimaalse väärtuse. Juhul, kui $\alpha = 90^\circ$, siis $\cos \alpha = 0$ ja $E_\alpha = E_0 \cdot 0 = 0$. Sel juhul liigub valgusvoog rööbiti löikepinnaga, n.ö. libiseb temast mööda ning seetõttu ka ei valgusta teda.

Näitena arvutame rõhtsa maapinna valgustustugevuse suhte suvisel ja talvisel pööripäeval Tartus. Vaatlused näitavad, et suvisel pööripäeval on keskpäeval Päikese valgusvoo langemisnurk rõhtsale pinnale Tartus 35° , talvisel pööripäeval 82° . Järelikult

$$\frac{E_{35}}{E_{82}} = \frac{E_0 \cos 35^\circ}{E_0 \cos 82^\circ} = \frac{\cos 35^\circ}{\cos 82^\circ} = \frac{0,819}{0,139} = \sim 6.$$

Sellest näeme, et suvisel pööripäeval valgustab Päike keskpäeval Tartus maapinda ligi 6 korda tugevamini kui talvisel pööripäeval. Nagu teame, muutub Päikese kiirguse langemisnurk maapinnale kogu aeg päeva jooksul. Ühes sellega muutub ka Päikese valgusvoo võimsus maapinnal.

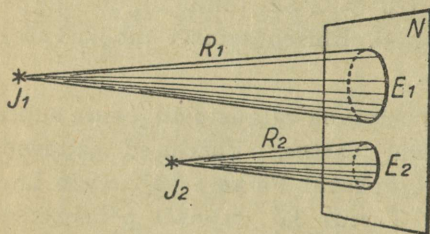
1. Mitu korda valgustab Päike tema kiirtega risti asetatud pinda Marsi kaugusel nõrgemini kui Maa pinnal, kui teame, et Marss on 1,5 korda Päikesest kaugemal kui Maa?

2. Mitu korda on Moskvas Päikese kiirgus keskpäeval suvisel pööripäeval suurem kui talvisel pööripäeval? Vastavad valgusvoo langemisnurgad on 32° ja 79° .

3. Kumb valgusallikas on tugevam: kas see, mis valgustab 3 m kaugusel kiirtega risti asetatud pinda 4 luksi tugevuselt, või see, mis valgustab 2,5 m kaugusel olevat pinda 3 luksi tugevuselt, kui kiirte langemisnurk on 60° ?

4. Valgusallikas 40 dekaluumenit valgustab ühtlaselt 50 cm kaugusel olevat pinda. Leida selle pinna valgustustugevus luksides, kui valgusvoo langemisnurk pinnale on 60° ?

7. Valgusallika tugevuse mõõtmine. Pinnavalgustuse seadustel põhineb valgusallikate tugevuse võrdlemine, milles seisabki nende tugevuse mõõtmine. Olgu meil antud kaks valguspunkti tugevusega J_1 ja J_2 (8. joon.). Asetame nad



8. joon. Valgusallikate tugevuse võrdlemine.

sellistele kaugustele R_1 ja R_2 ekraanist N , et nad valgustaksid seda ekraani ühetugevuselt, s. o. igale pinnäühikule (1 cm^2) langev valgusenergia hulk oleks mõlemal juhul sama. Valgustustugevus E on võrdeline valgusallika tugevusega (J) ja

pöördvõrdeline kauguse ruuduga (R^2), seega $E_1 = \frac{J_1}{R_1^2}$ ja $E_2 = \frac{J_2}{R_2^2}$. Et aga antud juhul $E_1 = E_2$, siis ka $\frac{J_1}{R_1^2} = \frac{J_2}{R_2^2}$, millest

$$J_1 : J_2 = R_1^2 : R_2^2,$$

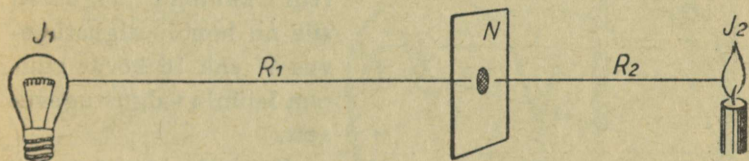
s. o. kui kaks valgusallikat valgustavad mõnd pinda samatugevuselt, siis on nende valgusallikate valgustugevused **võrdelised** nende kauguste ruutudega sellest pinnast.

Saadud valemi abil on hõlpus võrrelda valgusallikate tugevust. Vaatame, kuidas seda tehakse Bunseni fotomeetri abil.

Valgest paberist ekraani keskele on tehtud õlilaik. See tõttu muutub ekraan laigu kohas valguskiirgust läbilaskvaks kui ülejäanud osa ja paistab ümberolevast ekraanist tumedamana või heledamana, olenedes sellest, kus asuvad valgusallikas ja vaatleja silm. Nüüd asetame pimedas ruumis

valgusallikad (elektripirn ja küünal), millede tugevusi J_1 ja J_2 tahame võrrelda, mõlemale poole ekraani nõnda, et tume laik ära kaoks. See juhtub ainult siis, kui laigule mõlemast valgusallikast langev valgusvoog on ühetugevune. Sel juhul aga on valgusallikate tugevused võrdelised nende kauguste ruutudega, s. o.

$$J_1 : J_2 = R_1^2 : R_2^2.$$



9. joon. Bunseni fotomeetri skeem.

Mõõtes ära vastavad kaugused, võime arvutada J_1 ja J_2 suhte. Olgu näiteks $R_1 = 90$ cm ja $R_2 = 30$ cm. Siis on $J_1 : J_2 = = 90^2 : 30^2 = 3^2 = 9$, millest $J_1 = 9J_2$. Kui edasi teame, et näiteks $J_2 = 5$ rahvusvahelist küünalt, siis $J_1 = 5 \cdot 9 = 45$ r. k.

1. Teeme valgele paberile õli- või rasvalaigu ja vaatame seda vastu akent ning vastu seina hoides! Mida paneme tähele ja mispäras?

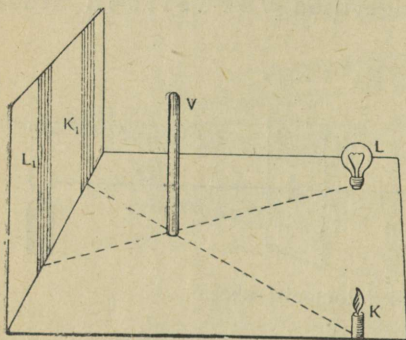
2. Lambi, mille valgustugevus on 10 r. k., ja elektripirni kaugused õlilaigust Bunseni fotomeetris, kui laik on mõlemalt poolt samatugevuselt valgustatud, võrduvad vastavalt 15 cm ja 42 cm. Leida elektripirni tugevus r. k-des!

3. Kumb valgustab tugevamini kiirte sihiga risti asetatud pinda: kas 100 r. k. valgustugevusega lamp 12 m kauguselt või 1200 r. k. valgustugevusega lamp 45 m kauguselt?

4. Missugusel kaugusel valgustab 75-dekaluumeniline lamp pinda niisama tugevasti kui 25-dekaluumeniline lamp 20 cm kauguselt?

8. Rumfordi fotomeeter. Lihtsamate fotomeetrite hulka kuulub ka nn. Rumfordi fotomeeter (10. joon.). Siin on vertikaalse ekraani E ette seatud püstvarras V ja sellest eemale valgusallikad: küünal K ja lamp L , millede varjud ekraanil on vastavalt K_1 ja L_1 . On selge, et vari K_1 saab valgust ainult lambilt ja vari L_1 — küünalt. Valgusallikate

vastava nihutamise saavutame mõlema varju ühetugevuse valgustuse. Siis on valgusallikate tugevused võrreldes nende kauguste ruutudega ekraanist. Mõõdame nüüd künla kauguse künla varjust ning arvutame sellest lambi ja künla



10. joon. Rumfordi fotomeeter.

valgustugevusesuhte. Kui näiteks lambi kaugus ekraanist oli 4 korda suurem künla kaugusest, siis on lambi valgustugevus 4^2 ehk 16 korda suurem künla valgustugevusest.

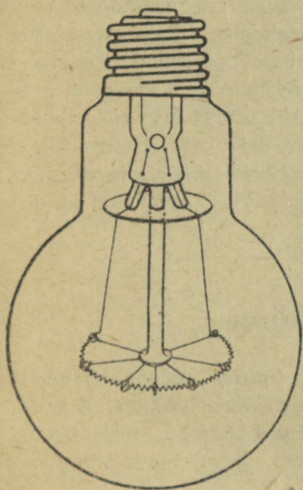
Eelmist katset tuleb teha pimedas ruumis, et künla nõrk valgus pääseks mõjule. Samuti on tähtis, et võrreldavad valgusallikad annaksid enam-vähem samavärvilist valgust.

9. Valgusallika valgusvoo jaotus ruumis. Eelmised valgustusseadused on tuletatud eeldusel, et meil on tegemist punktitaolise valgusallikaga, mis igas suunas ühtlaselt valgust kiirgab. Tegelikult on valgusallikate haldavad pinnad väga mitmekujulised, nagu seda näeme näiteks künlaleegi või elektripirni hõõgniitude juures. Seetõttu sõltub valgusallika valgusvoo tugevus valguskiirguse suunast. Tahame valgusallika kogutugevust mõõta, siis peame määrama valgustuse, ühes sellega ka valgusvoo tugevuse igas suunas ümber valgusallika. Saadud andmete põhjal võime valgustusseaduste abil arvutada nii valgusallika kogutugevuse kui ka valgustugevuse igas kohas ümberolevas ruumis.

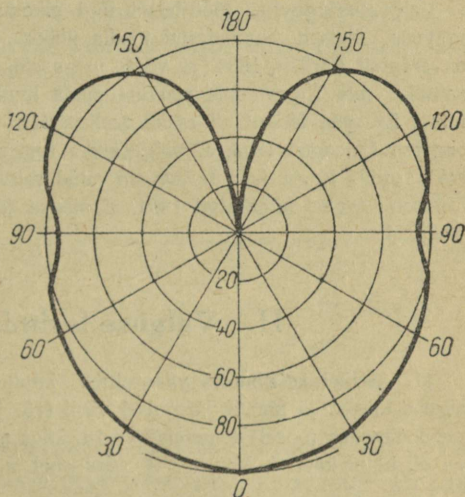
Harilikult on valgusallikad, näiteks elektripirnid, pöördkehakujulised. See hõlbustab ülesannet. Siis on küllaldane mõõta valgustugevust ühes, nimelt pöördtelge läbivas ehk meridiaani tasapinnas. Sümmeetria tõttu on teiste meridiaantaspindade vastavate punktide valgustugevus sama.

Näitena vaatleme 11. joon. kujutatud elektripirni valgusvoo jaotust ümberolevas ruumis. Tugev kõver ümber pirni näitab kohta, kus valgusvoo võimsus on ühesugune. Muidugi on siin eeldatud, et kiirgus langeb

pinnaga risti. Esitatud joonisest näeme, et samatugevust pinnavalgustust võime saada väga mitmesuguses kauguses valgusallikast, sõltuvalt sellest, missuguses suunas valgusallikast me seda soovime teha. Sedaviisi saadud valguse jaotuskõverad on praktiliselt väga tähtsad valgustustugevuse määramisel valgusallika ümber olevas ruumis, mis on väga oluline ruumi otstarbeka valgustuse korraldamisel.



11. joon. Osram Nitra pirn
110 V, 300 W.



12. joon. Gaasiga täidetud hõõglambi valguse jaotuskõver kõrvaloleva lambitüübi jaoks.

Nagu näha, on valgusallika kogutugevuse määramine, samuti valgustugevuse määramine ümberolevas ruumis kaunis keeruline ülesanne. Harilikult määratakse nn. külfotomeetri abil keskmine valgustugevus ja selle põhjal arvutatakse valgusallika kogutugevus. Valgustugevuse otseseks mõõtmiseks aga kasutatakse tehnikas erilisi riistu — luksmeetreid. Nende ehitus põhineb mõnede ainete omadusel muuta valgusenergiat elektrienergiaks. Mida tugevam on valgustus, seda tugevam elektrivool tekib selle valguse mõjul ja seda suurem on ka skaalal vastav hälve luksides.

10. Ajaloolisi märkusi. Kujutlus sirgjoonelistest valguskiirtest ja valguse sirgjoonelisest levimisest on väga vana. Selle aluseks on rida harilikke igapäevaseid tähelepanekuid, nagu päikesekiirte tungimine läbi kitsa pilvede prao või läbi pisiava aknaluugis. Juba kuulus matemaatik *Eukleides*

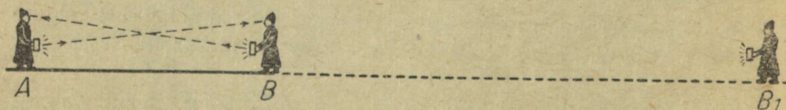
(umb. 300 a. e. m. a.) põhjendab valguse sirgjoonelise levimisega rea lauseid perspektiiviõpetusest. Seega oli valguse sirgjooneline levimine vanaaja teadusmeestele üldtuntud tõsiasi.

Valgustustugevuse kahanemist pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga tundsid juba **Leonardo da Vinci** (1452—1519) ja **J. Kepler** (1571—1630). Praeguse kuju valgustusseadustele andis **J. H. Lambert** (1728—1777).

Valgustustugevuse mõõtmisel tegi pikemat aega raskust valgusallika tugevuse üldiselt tunnustatud kindla ühiku puudumine. Rahvusvahelisel konverentsil Pariisis 1884. a. võeti valgusallika tugevuse ühikuks see valgushulk, mis 1 cm² sula plaatina pinda lumineerib tahkumistemperatuuri juures. Et seda ühikut oli raske realiseerida, siis tunnistas elektrikute kongress Chicagos 1893. a. valgusallika tugevuse ühikuks v. Hefner-Alteneck'i lambi. Nagu juba teame, on nüüd rahvusvahelise künla tarvitusele võtmisega tagasi pöördutud 1884. a. otsuse juurde, kuigi muudetud kujul.

II. Valguse levimiskiirus.

11. Galilei ja Römer'i viis. Juba kuulus **Galilei** katsus määrata valguse kiirust ja nimelt järgmisel viisil (13. joon.). Kaks vaatlejat **A** ja **B** asusid pimedas (dösel) teineteise vastu, käes põlevad laternad, millede valgus oli kinni kaetud. Vaatleja **A** avas oma laterna, ja kui vaatleja **B** mär-

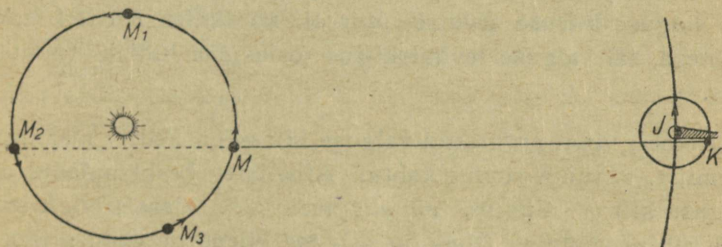


13. joon. Galilei viis valguse kiiruse määramiseks.

kas selle valgust, siis avas ka tema oma laterna, et **A** seda näeks. Ajavahemik vaatleja **A** laterna avamisest kuni momendini, mil ta vaatleja **B** laterna valgust nägi, pidi kuluma valguse levimiseks **A**-st **B**-ni ja tagasi. **A** ja **B** vahemaa suurenedes (asend **B**₁) peaks suurenema ka vastav valguse levimiseks kuluv ajavahemik. Teades läbitud tee pikkust ja selleks kulunud aega, pole raske arvutada valguse kiirust. — Galilei katsed aga ei andnud mingeid tulemusi, sest kasutatavad vahemaad olid valguse kiirusega võrreldes liiga väikesed.

Esimesena määras valguse kiiruse taani astronoom **Ola f R ö m e r** 1676. aastal Jupiteri kuude varjutuste abil. Nimelt

liigub ümber Jupiteri mitu kuud, mis Jupiteri varju sattudes muutuvad mõneks ajaks nähtamatuks. Teleskoobi abil vaadeldes on võimalik Jupiteri kuude varjumineku ehk varjutuse algust ja samuti ka lõppu täpselt kindlaks määrata. Sedaviisi määras Römer Jupiterile kõige lähema kuu kahe teineteisele järgneva varjutuse alguse vahe ehk tiirlemisperioodi ($\sim 42,5$ tundi) Maa kõige lähemas asendis Jupiterile (14. joon., asend



14. joon. Römeri viis valguse kiiruse määramiseks.

M). Et planeetide ja nende kaaslaste liikumine on ühtlane, siis peavad ka varjutuste algmomentid üksteisele järgnema võrdsete ajavahemikkude järel. Sel põhjal on võimalik varjutuste algust pikemaks ajaks ette kindlaks määrata, koostades vastavad tabelid. Römeri ülesandeks oligi selliste Jupiteri kuude varjutuste tabelite kontrollimine meresõidu otsarabeks. Pikemaajalised tähelepanekud aga näitasid, et ettearvutatud tabelid pole kooskõlas vaatlustega. Kui Maa liigub Jupiterist kaugemale (asend M_1), siis algavad varjutused hiljem; liigub aga Maa Jupiterile lähemale (asend M_3), siis varem, kui tabelites ette nähtud. Erinevuste seletamiseks oletas Römer, et valgus ei levi silmapilkselt, vaid tarvitab selleks aega. Varjutuste alguse hiline mine ongi tingitud sellest, et Maa kaugus Jupiterist on vahepeal suurenenud. Suurema vahemaa läbimiseks kulub valgusel ka rohkem aega. Maa lähenemisel Jupiterile esineb loomulikult vastupidine nähtus.

Kogusummas muutub Maa kaugus Jupiterist Maa tee läbi-mõõdu, s. o. 300 000 000 km võrra. Sellele vastav varjutuste algmomentide hilinemine aga võrdub ~ 1000 sek. Siit

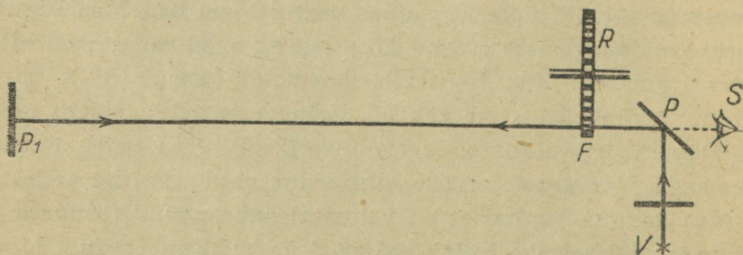
$$\text{valguse kiirus} = \frac{300\,000\,000}{1000} = 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$$

Römeri avastusse suhtuti kaasaegsete teadusmeeste poolt kaunis umbusklikult. Kui aga 50 aastat hiljem (1727) ka inglane Bradley (loe: brädli) nn. valguse aberratsioonist lähtudes valguse kiiruse arvutas, mis oli kooskõlas Römeri tulemustega, sai valguse levimiskiirus tõsiasjana üldise tunnustuse.

Römeri viisil arvatud valguse kiirus on kehtiv maailma-ruumi, s. o. tühja ruumi kohta. Ainelistes keskkondades on valguse kiirus väiksem, näiteks vees $\frac{3}{4}$ ja klaasis $\frac{2}{3}$ kiirusest tühjas ruumis. Õhus on valguse kiirus peaaegu niisama suur kui tühjas ruumis.

1. Eespool kirjeldatud Galilei katses oli vaatleja *A* ja *B* kaugus teineteisest umbes 1 miil (7,5 km). Arvutada ajavahemik valguse levimiseks *A*-st *B*-ni ja tagasi! Mispärast Galilei katse ei õnnestunud?

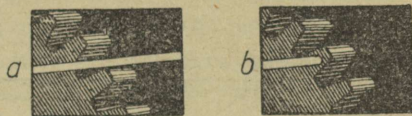
12. Fizeau' viis. Römer ja Bradley määrasid valguse kiiruse astronoomilisel teel. Galilei põhimõtte järgi maapealsete kauguste piires määras esimesena valguse kiiruse prantsuse õpetlane *Fizeau* (l.: fizoo) 1849. aastal. Fizeau' viis on skemaatiliselt järgmine (15. joon.). Valgusallikast



15. joon. Fizeau' viis valguse kiiruse määramiseks.

V langeb kitsas rööpne kiirtekimp poolläbipaistvale, kiirte sihiga 45° all asetatud peeglile P . Osa neid kiiri tungib läbi peegli, ülejäänud osa kiiri aga peegeldub ja langeb risti kaugemal asetsevale peeglile P_1 . Seetõttu peeglile P_1 langenud kiired tulevad tagasi endises sihis, langevad uuesti peeglile P ja tungivad osalt sellest läbi vaatleja silma S .

Kiirtekimbu teed läbibstab hammasratta R serv nõnda, et kohas F võib kiirte tee hammasratta pöörlemisel sattuda kas hammaste vahele või just hamba kohale. Esimesel juhul pääseb valgus takistamatult edasi, teisel juhul mitte (vt. 16. joonis, a ja b). Ratta R kiirel pöörlemisel näeb vaatleja silm S valgust ainult siis, kui hammaste vahet läbiv valguskiir kulgeb tee F -st P_1 -ni ja tagasi enne, kui valgust läbilaskva hambavahe asemele jõuab läbipaistmatu hammas. On aga hammasratta pöörlemiskiirus sedavõrd suur, et valguskiirte F -i tagasi jõudes on seal kohal juba hammas, siis me F -s valgust ei näe. Kiirust veelgi suurendades näeme valgust jälle, aga siis juba läbi järgmise hambavahe. Sedaviisi hammasratta pöörlemiskiirust muutes võime määrata ajavahemiku kahekordse F ja P_1 vahemaa läbimiseks ning sellest arvutada valguse kiiruse.



16. joon. Valguskiir võib sattuda kas hammaste vahele või hamba kohale.

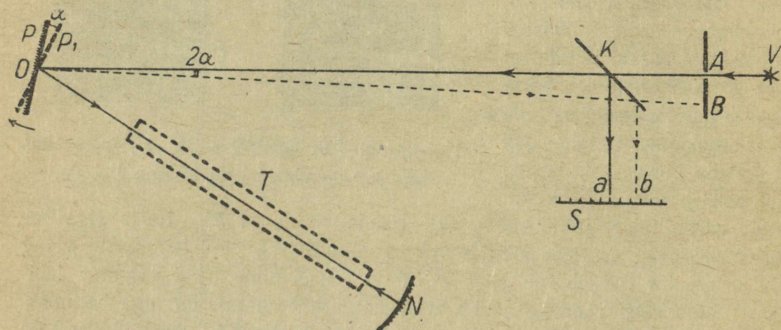
Fizeau' katse andmed olid järgmised: $FP_1 = 8,63$ km, hammaste arv 720 ning niisama palju hammastega ühelaiusi vahesid. Kui ratas tegi 12,6 tiiru sekundis, siis valgus kadus. Tähendab, peeglilt P_1 tagasi jõudnud valgus sattus hamba kohale. Selleks küls aega $\frac{1}{12,6 \cdot 720 \cdot 2}$ sek, järe-

likult valguse kiirus $c = s : t = 2 \cdot 8,63 : \frac{1}{12,6 \cdot 720 \cdot 2} = 313\,165 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$.

Hiljem prantslane Cornu (l.: kornüü) täpsustas Fizeau' meetodit, viies hammasratta tiirude arvu kuni 1600-ni ühes sekundis, F ja P_1 vahemaa aga oli 22,910 km. Sel viisil sai Cornu valguse kiiruse väärtuseks $300\,400 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$.

13. Foucault' ja Michelsoni viis. Valguse kiiruse mõõtmisel maapealsetes ulatustes teeb suurimat raskust siin esinevate äärmiselt lühikeste ajavahemikkude arvestamine. Fizeau

lahendas selle küsimuse kiiresti pöörleva hammasratta abil. Teine prantsuse õpetlane Foucault (1.: fukoo) kasutas selleks kiiresti pöörlevat peeglit. Vaatame, kuidas see toimub (17. joon.).



17. joon. Foucault' viis valguse kiiruse määramiseks.

Valgusallikast V tuleb rööpne kiirtekimp läbi ava A , samuti tasaparalleelse klaasplaadi K ja langeb tasapeeglile P tema keskkohas O . Pärast peegeldumist läheb kiir suunas ON ja langeb nõguspeeglile N . Viimane on asetatud nii, et punkt O on ühtlasi peegli kõverustsentriks. Seetõttu iga punktist O peeglile N suunduv kiir langeb tema pinnale risti (iga raadius on risti kerapinnaga!), järelkult peegeldunud kiir läheb tuldud teed mööda tagasi. Jõudes klaasplaadini K peegeldub osa sellest kiirtekimbust ja annab kujutise punkti A asemel punktis a , mis on punkti A sümmeetriliseks punktiks peegli K suhtes, kuna ülejäänud osa kiiri läbib klaasplaadi ja liigub suunas A . Seega paigalseisva peegli puhul tulevad kõik nõguspeeglist N peegeldunud kiired tagasi mööda sihti OA .

Peeglit P aga saab kiiresti pöörlema panna punkti O läbiva ja joonise pinnaga risti oleva telje ümber. Selle aja

sena loetakse praegusel ajal tõenäolisemaks valguse kiiruse väärtuseks tühjas ruumis

$$c = 299\,774 \frac{\text{km}}{\text{sek}} \text{ (täpsus } 0,001\% \text{).}$$

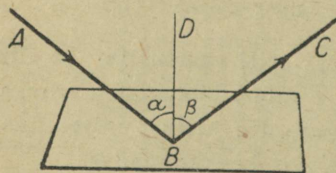
Üldse on valguse kiiruse suurus tühjas ruumis üks tähtsamaid ja ühtlasi väga täpselt mõõdetud füüsikalisi konstante.

14. Ajaloolisi märkusi. Vanaaja teadusmehed olid enamikus arvamusel, et valgus levib silmapilkselt. Sellisele veendumusele viisid loomulikult igapäevased tähelepanekud, nagu näiteks välgu puhul: pimedas välgu meie pea kohal sähvates näeme ümberringi kogu maastikku, kaugeid ja lähedasi esemeid korraga. Siit järeldus: kui valgus nõuaks levimiseks aega, siis peaksid kauged esemed meile hiljem nähtavaks saama.

Arvamus valguse silmapilkselt levimisest püsis uusaja alguseni ja seda jagasid isegi Kepler ja Descartes. Esimesena püüdis valguse kiirust katseliselt määrata kuulnud Galilei. Kuigi Galilei katsed ei andnud tulemusi, oli tema meetod siiski õige ja leidis hiljem rakendamist, kui õpiti täpsemalt mõõtma siin esinevaid õige lühikesi ajavahemikke (Fizeau' ja Foucault' viis).

III. Tasa- ja sfäärilised peeglid.

15. Peegeldumisseadused. Ühtlases keskkonnas levib valgus sirgjooneliselt. Valguskiire suund võib muutuda peegeldumise ja murdumise teel.



18. joon. Valguskiire peegeldumine.

2) Langemisenurk (α) võrdub peegeldumisenurgaga (β).

Valguse peegeldumine toimub järgmiselt (18. joon.):
1) Langev kiir (AB), peegeldunud kiir (BC) ja ristjoon peegliile kiire langemispunkti (BD) asetsevad samas tasapinnas.

Et langemis- ja peegeldumisnurk on võrdsed, siis võime neid teineteisega ära vahetada. Sellest järgneb: kui kiir langeb peegeldunud kiire sihis, siis ta peegeldub langeva kiire sihis (ümberpööratavuse printsiipt). Risti peeglile langenud kiir peegeldub samuti risti peeglile, sest sel juhul $\alpha = \beta = 0$ ja langemis- ning peegeldumissiht ühtivad.

1. Vaikselte veepinnalt peegeldunud päikesekiir moodustab langeva kiirega nurga 120° . Kui kõrgel horisondi suhtes on Päike?

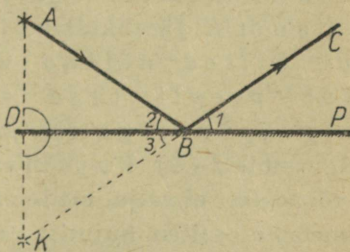
2. Kui suur peab olema langemisnurk, et valguskiire suund peegeldumisel muutuks 90° võrra?

3. Peegli pöördumise tõttu peegli langemisnurk suurenes 15° võrra. Kuidas muutus peegeldunud kiire suund? — Kuidas muutub peegeldunud kiire suund siis, kui peegli pöördumise tõttu langemisnurk väheneb 10° võrra?

4. Päikesekiir langeb horisondile 40° -se nurga all. Missuguse nurga all horisondi suhtes tuleb asetada tasapeegel, et pärast peegeldumist sellelt päikesekiir oleks rõhtne?

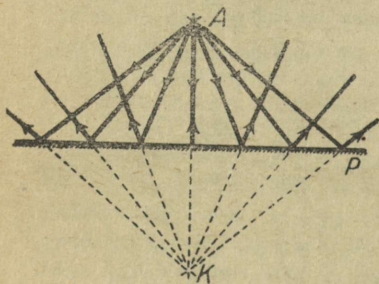
5. Päike on 50° kõrgusel. Millise nurga võrra tuleb rõhtsalt asetsevat tasapeeglit pöörata, et sellelt peegeldunud kiir oleks rõhtne?

16. Valguspunkti kujutis tasapeeglis. Võtame üsna väikese valgusallika (A), nn. valguspunkti, ja asetame ta tasapeegli ette (19. joon.). Valguspunkt saadab kiiri välja igas suunas, sest muidu me ei näeks teda ka igas suunas. Võtame ühe neist kiirtest (AB), mis langeb peeglile P punktis B ja peegeldub suunas BC . Tõmbame valguspunkti A ristjoone (AD) peeglile ja pikendame teda peegli taha kuni lõikumiseni

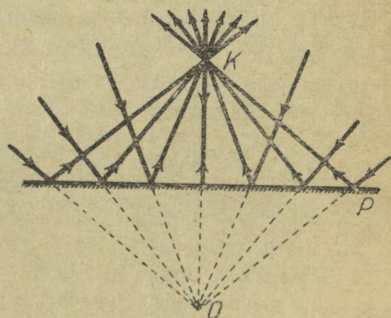


19. joon. Peegeldunud kiir näib väljuvat sümmeetrilisest punktist.

peegeldunud kiire BC sihiga punktis K . Lihtne geomeetiline arutus näitab, et punktid A ja K on peeglist ühekaugusel ($AD = KD$), s. o. K on A sümmeetriliseks punktiks peegli suhtes. Tõepoolest: $\sphericalangle 1 = \sphericalangle 2$ (peegeldumiseseaduste põhjal) ja $\sphericalangle 1 = \sphericalangle 3$ (kui tippnurgad). Järelikult $\sphericalangle 2 = \sphericalangle 3$ ja $\triangle ABD = \triangle KBD$ (täisnurksed kolmnurgad, millel ühine kaatet $[BD]$ ja $\sphericalangle 2 = \sphericalangle 3$). Seega siis $AD = KD$.



20. joon. Hajuva kiirtekimbu ebakujutis (K) tasapeeglis.

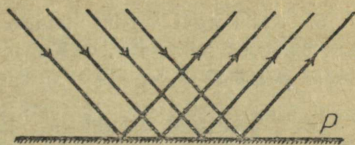


21. joon. Koonduva kiirtekimbu tõeline kujutis (K) peegeldumisel tasapeeglis.

Et kiir AB oli meil võetud vabalt, siis peab iga peegeldunud kiire sihi pikendus läbima punkti, mis on peegli suhtes sümmeetriline antud valguspunktiga. Selliseks punktiks on meil ainult K . Järelikult kõik tasapeeglist peegeldunud kiired näivad väljuvat punktist, mis asub peegli taga sümmeetriliselt antud valguspunktiga (19. joon.). See punkt (K) on antud valguspunkti (A) kujutiseks. Et valguskiired punktist K tõepoolest ei välju, meile vaid näivad sealt väljuvat, siis nimetame sellist kujutist ebakujutiseks vastandina tõelistele kujutistele, kust valguskiired tõepoolest väljuvad (20. joon.). — Ainult silma abil me ei suuda vahet teha,

kas kujutis on tõeline või ebakujutis, sest mõlemal juhul langevad kiired silma ühteviisi.

Üldiselt säilitab kiirtekimp peegeldumisel tasapeeglist oma iseloomu: hajuv kiirtekimp annab pärast peegeldumist hajuva, koonduva — koonduva ja rööpne — rööpse kiirtekimbu (vt. 21. ja 22. joon.).



22. joon. Rööpse kiirtekimbu peegeldumine.

1. Kumb peeglipind annab meile esemest kujutise, mida me harilikult peeglis näeme: kas eesmine või tagumine pind?
2. Kuidas on võimalik kujutise abil peegli paksuse üle otsustada?
3. Vaatleja läheb peeglile 3 korda lähemale. Kuidas muutub seetõttu kujutise kaugus vaatlejast?



23. joon. Eseme kujutis tasapeeglis.

17. Eseme kujutise ehitamine tasapeeglis. Valgustatud eseme pinnal iga punkt on kui valguspunkt, millest väljuvad kiired igas suunas. Seega võime eseme kujutist tasapeeglis ehitada tema üksikute punktide kaudu. Nagu nägime, on iga valguspunkti kujutis tasapeeglis sümmeetriline antud punktiga, tähendab, ka iga ese kui üksikute valguspunktide kogusumma annab tasapeeglis niisama suure, peegli suhtes sümmeetriliselt asetatud ebakujutise. Sellise kujutise ehitamine taandub eseme üksikute punktide sümmeetriliste punktide ehitamisele (vt. 23. joon.).

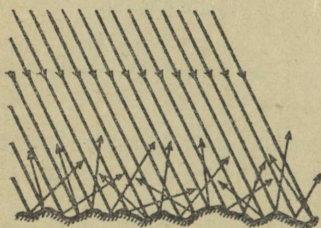
1. Kas on meie kujutis tasapeeglis meiega läpselt ühesugune?
2. Kui minna peeglist 25 cm võrra kaugemale, kuidas muutub siis kujutise kaugus meist?

3. Mitu kujutist saame esemest kahe rööpselt asetatud tasapeegli vahel? Kas on need kujutised kõik ühesugused?

4. Ehitada kolmnurga kujutis tasapeeglis!

5. Kui kõrget vertikaalseinale asetatud peeglit läheb vaja, et ennast täies pikkuses selles näha? Kas sõltub sellise peegli suurus vaatleja kaugusest peeglist?

18. Valguse difusioon. Kehade pind pole harilikult päris sile ega ka tasapinnaline, vaid konarlik, kare ja ebakorrapäraselt kõver. Sellist pinda võime



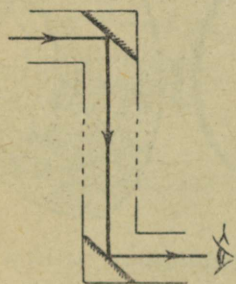
24. joon. Valguse difusioon.

vaadelda koosnevana suurest hulgast pisikestest, paljale silmale vaevalt nähtavatest tasapeeglitest, mis on ruumis asetatud väga mitut viisi. Seetõttu ka valgus, langedes sellisele pinnale, peegeldub igas suunas laiali ja me saame nn. h a j u n u d ehk difuusse valguse (24. joon.).

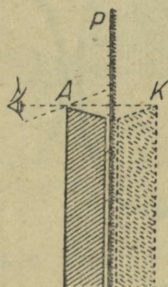
Meie loomulik Päikese, samuti ka kunstlik valgustus ongi harilikult selline hajunud ehk difuusne valgus.

19. Tasapeeglite rakendusi. Tasapeeglit rakendatakse juba vanast ajast saadik tualettpeeglitena. — Rätsepad kasutavad seljataguse näitamiseks nn. n u r k p e e g l e i d, s. o. mitut nurgeti asetatud tasapeeglit. — Ka periskoobi lihtsamal kujul võime ehitada 45° all nurgeti seatud tasapeeglitest (25. joon.). — Päikesekiirte abil signaliseerimist toimetatakse nn. heliograafi abil, mis koosneb ühest või kahest tasapeeglist. — Pöörlevat peeglit rakendatakse õige väikeste ajavahemikkude mõõtmiseks, nagu me seda nägime valguse kiiruse määramisel. — Meresõidul laialt tarvitava nurgamõõduriista sekstandi ehitus põhineb samuti tasapeeglite omadustel. — Ka jalgratta refleksklaas koosneb harilikult mitmest tasapeeglist.

Mõõtmistehnikas on sageli tarvitusel nn. peegelskaalad, mis võimaldavad täpsema lugemi saamist skaalal. Lihtsamal kujul näeme seda 26. joonisel. Et hoiduda nn. paralleelsete vea tekkimisest, kasutatakse peegelskaalat. Siin toimub viseerimine vaadeldava punkti (A) ja tema kujutise (K) sihis, sest see siht on alati risti peeglipinnaga ning ühtlasi temal asetseva skaalaga. Sedaviisi saadakse alati lugemi õige väärtus.



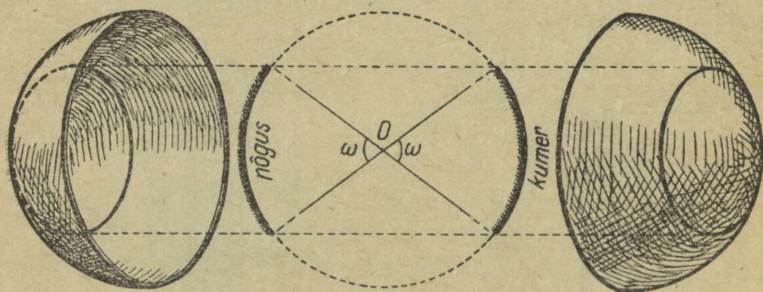
25. joon. Periskooibi skeem.



26. joon. Vaatama peab risti skaalaga.

1. Asetada kaks peeglit nurgi 90° ja vaadelda, mitu kujutist nende abil saame!
2. Kaks tasapeeglit on asetatud nurgi 60° . Ehitada nende vahel asetseva valguspunkti kõik kujutised! Mitu kujutist saame, kui peeglitevaheline nurk on 45° ? — Kuidas oleneb kujutiste arv peeglitevahelisest nurgast üldse?
3. Ehitada geomeetriliselt kõik valguspunkti kujutised nurktasapeeglis! Mis on kahes nurktasapeeglis asuva valguspunkti kujutiste geomeetriliseks kohaks?
4. Pääkese kujutis vaikselt veepinnalt paistab nurgi 30° veepinna suhtes. Kui suur on kiirte langemisenurk?
5. Pista mõni sirge pulk (pliiats) otsapidi vaiksesse vette! Kuidas saame kujutise põhjal otsustada, kas pulk on veepinna suhtes risti?
6. Kas on võimalik saada tasapeegli abil ka tõelisi kujutisi?

20. Sfäärilised peeglid. Kõverpeeglitest vaatleme nn. sfäärilisi peegleid, s.o. niisuguseid, kus peeglipinnaks on osa kerapinnast ehk sfäärist. Kui peeglipinnaks on kera sisepind, siis nimetame sellist peeglit nõguspeegliks. On aga peeglipinnaks kera välispind, siis on meil tegemist kumerpeegliga (27. joon.).



27. joon. Nõgus- ja kumerpeegel.

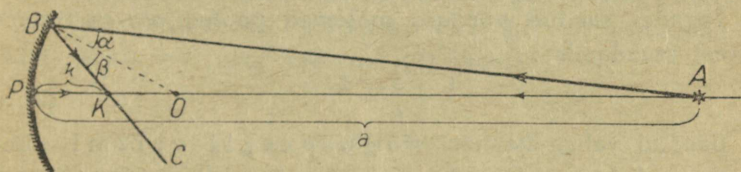
Harilikult on sfäärilise peegli kontuur ringjooneline. Kui kujutame koonuse pinna läbi sfääri tsentri ja peegli kontuuri, siis saame peegli ruuminurga (ω), mis näitab, kui suure osa kerapinnast moodustab antud nõgus- või kumerpeegel. Mida väiksem on sfäärilise peegli ruuminurk, seda teravamad kujutised peegel annab.

1. Kui suur on peegli ruuminurk, kui peegli läbimõõt on 5 korda väiksem kõverusraadiusest? Kui suure osa kerapinnast moodustab sel juhul peegli pind?

2. Ühe nõguspeegli läbimõõt on 10 cm ja tema kõverusraadius 20 cm. Teise nõguspeegli vastavad arvud on 6 cm ja 15 cm. Kui suur osa kerapinnast on peeglipind esimesel ja teisel juhul?

Kumb neist peeglitest on suurema ruuminurgaga? Kontrollida arvutuse tulemusi, ehitades samast kõveruskeskristist mõlema peegli ristlõik läbi optilise telje!

21. Nõguspeegli valem. Olgu meil antud 28. joon. nõguspeegel läbilõikes. Tema kõverustsenter on O , kõverusraadius OP , peegli tsenter P ja optiline telg sirge PO . Võtame optilisel teljel mõne valguspunkti A . Temast väljuvad kiired igas suunas. Osa neist langeb peeglile P . Tõestame matemaatilise arutluse abil, et valguspunkti A kiired, mis on langenud ja sellelt peegeldunud kiired koonduvad ühte punkti, s. o. tekitavad kujutise.



28. joon. Peegeldumine nõguspeeglist.

Optilist telge mööda nõguspeeglile langev kiir AP kui tsentrit O läbiv peegeldub tagasi samas sihis PA , kuid langemiskiirele vastassuunas. Mistahe teine kiir AB , langedes nõguspeeglile punktis B , peegeldub sellelt peegeldumisest järe järgi (AB , BC ja BO on samas tasapinnas ning $\alpha = \beta$). Peegeldunud kiir BC lõikub optilise telje sihis peegeldunud kiirega punktis K . Näitame, et punktis K koonduvad pärast peegeldumist ka kõik teised kiired, s. o. selles punktis on valguspunkti A kujutis.

Kolmnurgas ABK on raadius BO nurgapoolitajaks, sest $\alpha = \beta$. Tähendab, geometriast tuntud nurgapoolitaja omaduse põhjal:

$$\frac{AO}{OK} = \frac{AB}{BK} \quad (1).$$

Kui peegli ruuminurk on väike, s. o. kiired langevad peeglile optilise telje lähedal, siis võime öelda, et

$AB \approx AP = a$ (valguspunkti kaugus peeglist) ja
 $BK \approx KP = k$ (kujutise „ „).

Edasi $AO = AP - PO = a - r$ ja

$OK = OP - PK = r - k$, kus

r on peegli kõverusraadius (OP).

Asetades valemisse (1) vastavad uued tähistused, saame:

$$\frac{a-r}{r-k} = \frac{a}{k}, \text{ millest}$$

$$ak - kr = ar - ak \text{ ja } kr + ar = 2ak.$$

Jagades saadud võrduse mõlemad pooled akr -ga, saame pärast taandamist:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{2}{r} \quad (2).$$

Saadud valem kannab nõguspeegli valemi nime ja ta on kehtiv optilisel teljel võetud valguspunktist lähtuvate ning peegli tsentri lähedale langevate kiirte kohta.

22. Järeldusi nõguspeegli valemist. Valemist (2) võime tuletada mitu tähtsat järeldust:

1) Kõigi valguspunktist A väljuvate kiirte jaoks on a ja r väärtused samad, järelikult peab olema sama ka kaugus k , s. o. kõik nõguspeeglist peegeldunud kiired koonduvad ühte punkti (K), mis on antud valguspunkti (A) tõeliseks kujutiseks. Muidugi ei jää punkti K koondunud kiired sinna peatuma, vaid jätkavad liikumist pärast koonduspunkti läbimist endises suunas. Seega on kiirte koonduspunkt ühtlasi kiirte lõikepunktiks.

2) Kui viime valguspunkti mööda optilist telge peeglist järjest kaugemale, siis valemi (2) esimene liige $\frac{1}{a}$ väheneb järjest ja muutub lõpuks nulliks, kui $a = \infty$. Sel juhul langevad kiired nõguspeeglile rööbiti optilise teljega ja valemist (2) saame:

$$0 + \frac{1}{k} = \frac{2}{r}, \text{ millest } k = \frac{r}{2}.$$

Tähendab, rööpselt optilise teljega langevad kiired pärast peegeldumist nõguspeegli koonduvad nn. fookusesse ehk tulipunkti, mis on peeglist poole raadiuse kaugusel. Fookuse kaugust peeglist tähistatakse harilikult f -ga.

$$\begin{aligned} \text{Järelikult } f = k = \frac{r}{2}; \quad \frac{1}{f} = \frac{2}{r} \text{ ja} \\ \frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f} \end{aligned} \quad (3).$$

Viimasel kujul on nõguspeegli valemit hõlpus meeles pidada.

3) Kui asetame valguspunkti kõverustsentrisse, siis $a = r$, ning valemist (2) saame:

$$\frac{1}{r} + \frac{1}{k} = \frac{2}{r}, \text{ millest } k = r, \text{ s. o.}$$

kõverustsentrist väljuvad kiired pärast peegeldumist koonduvad jällegi kõverustsentrisse.

4) Nõguspeegli valemist $\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}$ nähtub, et valguspunkti ja ta kujutise asendid on vastastikku ümberasetatavad, sest valemi suurus ei muutu, kui a ja k väärtused ümber asetada. Sellest järgneb, et asetades valguspunkti tema kujutise kohale (punkti K), saame tema kujutise seal, kus enne oli valguspunkt (punktis A). See on peegeldumisel kehtiva ümberpööratavuse printsiibi otsene järeldus.

5) Lahendame nõguspeegli valemi $\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}$ kui võrrandi k suhtes. Saame:

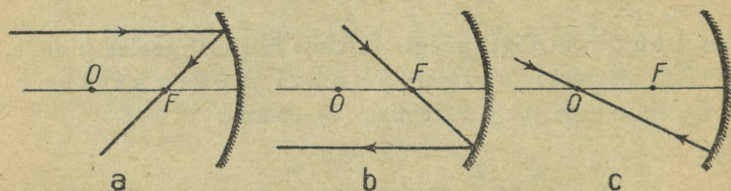
$$k = \frac{af}{a-f}.$$

Sellest valemist nähtub, et k saab positiivsed väärtused, kui $a > f$, s. o. valguspunkt asub peeglist kaugemal kui fookus. On aga $a < f$, s. o. valguspunkt asub peegli ja fookuse vahel, siis on $a - f < 0$ ja k omandab negatiivse väärtuse. Tähen-

dab, viimasel juhul me ei saa kujutist peegli ees, vaid tekib ebakujutis peegli taga.

Kõiki eelmisi juhtusid on võimalik tõestada ka katseliselt. Kokkuvõttena peame meeles:

1) Optilise teljega rööpselt langev kiir pärast peegeldumist nõguspeeglis läheb läbi fookuse (29. joon., a).



29. joon. Peegeldumisjuhud nõguspeeglist.

2) Läbi fookuse minev kiir pärast peegeldumist nõguspeeglis läheb rööbiti optilise teljega (70. joon., b).

3) Läbi kõveruskeskriiki minev kiir pärast peegeldumist nõguspeeglis läheb jällegi läbi kõveruskeskriiki (70. joon., c).

1. Nõguspeegli kõverusraadius on 40 cm (50 cm; 1 m). Kui suur on fookuse kaugus?

2. Nõguspeegli fookuse kaugus on 15 cm (12,5 cm; 75 cm). Kui suur on sel juhul kõverusraadius?

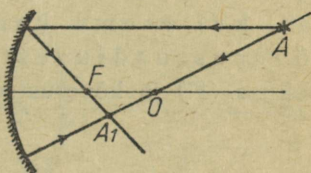
3. Ese on nõguspeeglist, mille $f = 10$ cm, 30 cm kaugusel. Kui kaugel peeglist on kujutis?

4. Ese annab nõguspeeglis, mille $f = 20$ cm, kujutise 30 cm kaugusel. Kui kaugel peeglist tekib kujutis, kui ese asetada kujutise asemele?

5. Nõguspeegel annab 32 cm kaugusele asetatud esemest kujutise 19,2 cm kaugusel peeglist. Arvutada peegli fookuse kaugus ja kõverusraadius!

23. Kujutiste ehitamine nõguspeeglis. Eespool nägime, et optilisel teljel võetud valguspunkt annab pärast peegeldumist nõguspeeglis kujutise, mis on samuti optilisel teljel. Olgu meil nüüd antud mõni valguspunkt väljas-

pool optilist telge (30. joon.). Tõmmates läbi selle valguspunkti (A) ja kõverustsenti (O) sirge AO , saame nn. optilise abitelje, mis oma geomeetriliste ja optiliste omaduste poolest ei erine optilisest teljest (ka abitelg on peeglipinnaga risti). Järelikult kõik arutlused optilisel teljel võetud valguspunkti suhtes on kehtivad ka optilisel abiteljel võetud valguspunkti suhtes, s. o. ka optilisel abiteljel võetud valguspunkt annab pärast peegeldumist nõguspeeglis kujutise, mis asub optilisel abiteljel.

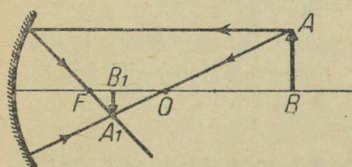


30. joon. Optilisel abiteljel asetseva valguspunkti kujutis.

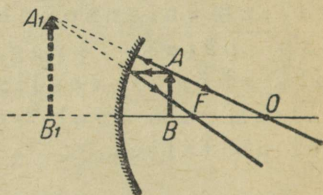
Teades, et iga valguspunkt pärast peegeldumist nõguspeeglis annab punktitaolise kujutise, peab ka iga ese pärast peegeldumist andma kujutise, sest valgustatud eset võime vaadelda koosnevana üksikuist valguspunktidest. Vaatame nüüd, kuidas leida mõne eseme, näiteks noole AB kujutist pärast peegeldumist nõguspeeglis (31. joon.). Lihtsuse mõttes kasutame esemena ühel pool optilist telge asetsevat noolt, sest teisel pool optilist telge olevate punktide kujutiste ehitamine toimub samalaadselt. Ka on kujutiste selguse mõttes kasutatud võrdlemisi suure ruuminurgaga peegleid.

Et kõik mõnest valguspunktist väljuvad kiired pärast peegeldumist koonduvad ühte punkti, siis on küllalt, kui leiame kahe sellest valguspunktist välja juva kiire lõikepunkti. Meil aga on teada koguni kolme kiire suund pärast peegeldumist (vt. eelmist §-i), nimelt: rööpne teljega, läbi fookuse ja läbi kõverustsenti minev kiir. Kus lõikuvad kaks neist kiirtest, seal lõikuvad pärast peegeldumist ka kõik teised antud valguspunktist väljuvad kiired.

31. joonisel on kasutatud rööpset ja läbi tsentri minevat kiirt. Sel teel esemest AB saadud kujutis A_1B_1 on **tõeline**, sest kiired tõepoolest lõikuvad kujutise kohal, mida on lihtne kontrollida ekraani abil. Edasi on see kujutis võrreldes eseme endaga **ümberpööratud** ja **vähendatud**. Samalaadsed kujutised (tõelised, ümberpööratud ja vähendatud) saame alati, kui eseme kaugus peeglist on suurem kõverusraadiusest. Kõik need kujutised asetsevad fookuse (F) ja kõverustsentri (O) vahel.



31. joon. Tõelise kujutise ehitamine nõguspeeglis.



32. joon. Ebakujutise ehitamine nõguspeeglis.

Ümberpööratavuse printsiibi põhjal, samuti ka joonisest pole raske näha, et juhul, kui ese asub fookuse ja kõverustsentri vahel, siis on kujutised **tõelised**, **ümberpööratud** ja **suurendatud** ning nad asetsevad väljaspool kõverustsentrit.

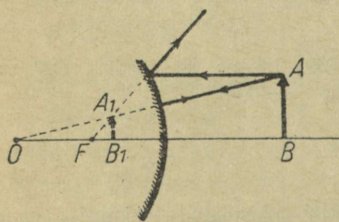
Samalaadset ehitusviisi rakendades juhul, kui ese on peegli ja fookuse vahel, näeme, et kiired pärast peegeldumist ei lõiku peegli ees, küll aga lõikuvad nende pikendused peegli taga. Sel juhul saame antud esemest **ebakujutise**, mis on päripidine ja suurendatud (32. joon.).

Kõiki eelmisi kujutise saamise juhtusid on lihtne demonstreerida ka katse abil. Selleks nihutame näiteks risti optilise teljega asetatud põleva kүүnla võimalikult kaugelt kuni peegliini. Kujutise juhime valgele ekraanile.

25. Kumerpeegli valem (1) on oma kujult täiesti ühesugune nõguspeegli valemiga. Ainult k ja f on vastasmärgiga, miinusega. See on ka loomulik, sest me ei mõõda neid suurusi peeglipinnast ette-, vaid tahapoole, just vastassuunas, võrreldes nõguspeegli. Sellest ka vastasmärk (miinus).

Et kumerpeegli valem on täiesti ühesugune nõguspeegli valemiga, siis kõik nõguspeegli suhtes kasutatud mõttekäigud on rakendatavad ka kumerpeegli kohta. Sel teel jõuame järgmistele tulemustele:

1) Kõik optilisel teljel asuvast valguspunktist (A) väljuvad kiired pärast peegeldumist näivad väljuvat ühest punktist (K), mis asub peegli taga ja on selle valguspunkti ebakujutiseks.



34. joon. Kujutise ehitamine kumerpeeglis.

2) Kõverustsenti suunas langevad kiired peegelduvad tagasi langemissihis.

3) Optilise teljega rööpsed kiired pärast peegeldumist kumerpeeglist näivad väljuvat ebafookusest, mis on poole raadiuse kaugusel peegli taga.

4) Fookuse suunas langevad kiired peegelduvad rööpselt optilise teljega.

5) Kumerpeegel annab esemetest päripidised vähendatud ebakujutised, nagu see nähtub 34. joonisest.

1. Kas muutub eseme kujutis, kui osa sfäärilisest peeglist kinni katta? Kui muutub, siis mis suhtes?

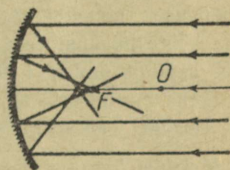
2. Nõguspeegel annab 2,4 m kaugusel olevast esemest tõelise kujutise 80 cm kaugusel peeglist. Leida fookuse kaugus ja kõverusraadius!

3. Nõguspeegli kõverusraadius on 10 cm, peeglist 15 cm kaugusel ja optilise teljega risti asetatud eseme kõrgus 4 cm. Võimalikult täpse joonise abil määrata kujutise suurus ja kaugus peeglist!

4. Ehitada kumerpeeglis, mille $f = 5$ cm, risti optilise teljega asetatud esemest võimalikult täpselt kujutis, kui eseme kaugus peeglist on 5 cm ja eseme kõrgus 3 cm (2 cm; 1 cm). Võrrelda saadud kujutiste asendeid omavahel! Millest tekivad erinevused?

5. Lahendada nõguspeegli valem k suhtes ning eritleda, kuidas muutub kujutise asend (k), kui ese nihkub lõpmatusest nõguspeegliini! Kus kohal kohtub ese oma tõelise, kus kohal ebakujutisega? Kuidas muutub seejuures kujutise iseloom (suurendatud — vähendatud, tõeline kujutis — ebakujutis)?

26. Sfääriline aberratsioon. Nõgus- ja kumerpeegli valemil tuletamise, järelikult ka kujutiste ehitamise reeglite kasutamise eelduseks oli nõue, et peegli ruuminurk oleks hästi väike, või me kasutame ainult optilise telje lähedasi ehk nn. tsentraalkiiri. Ainult sel juhul annab valguspunkt pärast peegeldumist punktitaolise kujutise. Tegelikult ei saa sellest nõudest alati kinni pidada, sest väga väikese peegli puhul on ka peegeldunud valguse hulk väike. Seetõttu tuleb suuremate peeglite puhul arvestada, et valguspunkti kujutis pole täpselt punktitaoline, vaid on väike laik, sest peegli äärtele langevad kiired koonduvad peeglile lähemale kui tsentraalkiired. Seepärast pole ka esemete kujutised päris teravad. Nähtust, kus peegli äärtele langevad kiired ei koonu samas fookuses kui tsentraalkiired, vaid peeglile lähemale, nimetatakse sfääriliseks aberratsiooniks ehk kõrvalekaldeks.



35. joon. Peegli ääre lähedased kiired ei koonu fookuses.

Sfääriline aberratsioon teeb palju tüli optiliste riistade ehitamisel. Tema vältimiseks kasutatakse kerapinnast erine-

vaid peeglikujusid, nn. paraboloidpeegleid, kus kõik rööpsed kiired pärast peegeldumist koonduvad ühte punkti, või jälle kaetakse peegli äärtele langevad kiired kinni eriliste valgustõkendite (diafragmade) abil.

27. Sfääriliste peeglite rakendusi. Sfäärilisi peegleid rakendatakse peamiselt prožektorite (helgiheitjate) ehitamisel, millede abil saab valgust juhtida soovitavas suunas, näiteks autolaternad, majakatuli, suured prožektorid sõjaväes vaenlase lennukite avastamiseks, lennuväljadel maandumiskohtade märkimiseks, arstidel silma, kõrva ja suu valgustamise peeglid jne. Samuti kasutatakse nõgus- ja kumerpeegleid teleskoopide ehitamisel (vt. § 58). Meil Nõukogude Liidus on käimas edukad katsed nõguspeeglitega Päikese energia koondamise abil käima panna aurumasinaid.

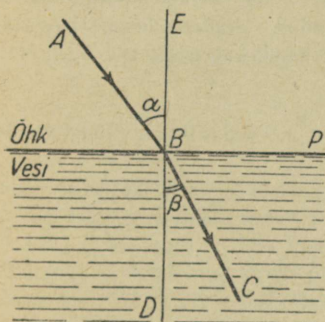
28. Ajaloolisi märkusi. Juba *Eukleides* tundis langemis- ja peegeldumisnurga võrdsust peegeldumisel, osalt ka tasapindade seadust. Mehhaanik *Heron* Aleksandriast (II saj. e. m. a.) andis nurkade seadusele teise põhjenduse, nimelt: peegeldumisel kulgeb valguskiir esemest vaatleja silma kõige lühemat teed, sest „loodus ei taha lasta meie silma nägemiskiirel asjatult ümber hulkuda“. Araabia õpetlane *Alhazen* (surn. 1038) esimesena formuleerib täpsemalt tasapindade seaduse peegeldumisel. Seega olid Alhazeni ajal valguse peegeldumise seadused lõplikult fikseeritud.

Metallist kumer- ja nõguspeegleid tunti juba õige vanal ajal. Alhazen teadis, et nõguspeegli fookus on poole raadiuse kaugusel peeglist. Lähemalt käsitleb nõguspeegli fookuse omadusi *G. Porta* (1538—1615) oma töös „*Magia naturalis*“.

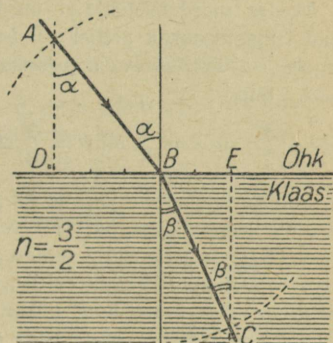
IV. Valguse murdamine.

29. Murdamisseadused. Ühtlases keskkonnas levib valgus sirgjooneliselt. Ühest keskkonnast teise minnes muudab valgus oma levimissuunda ehk murdub (36. joon.). Katsed näitavad, et valguskiire murdamisel kehtivad järgmised seadused:

1) Langev kiir (AB), murdunud kiir (BC) ja keskkondade lahtuspinnale langemise punktis (B) tõmmatud ristjoon (DE) on samas tasapinnas.



36. joon. Valguskiire murdumine.



37. joon. Murdunud kiire sihi ehitamine.

2) Langemisnurga (α) ja murdumisnurga (β) siinuste suhe on kahe antud keskkonna jaoks konstantne arv, mida nimetatakse murdumisnäitajaks (n), s. o.

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n = \text{const.}$$

Näiteks kui valguskiir langeb õhust vette, siis on langemisnurk alati suurem kui murdumisnurk, kui nende nurkade siinuste suhe omab kõigi nurkade paaride jaoks samasugust väärtust $n = \frac{4}{3}$. See konstant $n = \frac{4}{3}$ on vee murdumisnäitaja õhu suhtes. — Kui valgus langeb õhust klaasi, siis saame vastavalt langemis- ja murdumisnurga siinuste suhte väärtuseks $\frac{3}{2}$, nii et $\frac{3}{2}$ on klaasi murdumisnäitaja õhu suhtes.

Mingi aine murdumisnäitajat tühja ruumi suhtes nimetatakse selle aine absoluutseks murdumisnäitajaks. Ainete absoluutsed murdumisnäitajad ei erine kuigi palju (umbes 0,03% suuremad) nende ainete murdumisnäitajast õhu suhtes.

Teades murdumisnäitajat on lihtne arvutada murdumisnurga suurust antud langemisnurga põhjal või ümberpöörduvalt. Näitena leiame langemisnurgale $\alpha = 60^\circ$ vastava murdumisnurga β juhul, kui valguskiir läheb õhust klaasi. Siin

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{3}{2}; \quad \sin \beta = \frac{2}{3} \sin \alpha = \frac{2}{3} \sin 60^\circ = \frac{2}{3} \cdot 0,866 = 0,577, \text{ millest } \beta = 35^\circ.$$

Samale tulemusele jõuame ka puht-geomeetriliselt (37. joon.). Märgime langemispunkti (**B**) vasakule 3 vabalt valitud võrdset pikkusühikut (**BD**) ja paremale 2 samasugust ühikut (**BE**). Punkti **D** tõmbame ristjoone **DA** kuni lõikumiseni langeva kiire sihiga punktis **A** ja punkti **B** raadiusega **BA** kaare kuni lõikumiseni ristjoonega **EC**. Sel teel saadud punkt **C** ongi otsitav, mida läbib murdunud kiir. Tõepoolest,

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{BD \cdot BE}{AB \cdot BC} = \frac{BD}{BE} = \frac{3}{2},$$

sest konstruktsiooni põhjal $AB = BC$.

Samuti kui peegeldumisel, kehtib ka murdumisel ümberpööratavuse printsiip, s. o. kui valguskiir langeb keskkondade lahatuspinnale murdunud kiire sihis, siis ta murdub endise langemiskiire sihis. Sel juhul tuleb ka murdumisnäitajaks võtta endise murdumisnäitaja (n) pöördväärtus ($\frac{1}{n}$). Järelikult, kui valguskiir murdub veest õhku, siis on õhu murdumisnäitajaks vee suhtes $\frac{3}{4}$, klaasist õhku murdumise puhul $\frac{2}{3}$.

Mida suurem on mõne aine murdumisnäitaja, seda tugevamini murduvad valguskiired temas ja seda optiliselt tihedamaks loetakse see keskkond. Nii on vesi optiliselt tihedam kui õhk ja klaas omakorda optiliselt tihedam kui vesi.

Mingi aine optilist tihedust ei tule ära segada selle aine massi tihedusega (1 cm^3 mass grammides). Näiteks väävelsüsinikul on võrdlemisi suur murdumisnäitaja (1,63), kuigi ta tihedus on ainult $1,26 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$; samuti on võrdlemisi suur optiline tihedus piiritusel.

Toome siin mõnede tuntud ainete absoluutsed murdumisnäitajad.

Jää	1,31	Kvarts (räni)	1,54
Vesi	1,33	Kroonklaas	1,55
Piiritus	1,36	Flintklaas	1,74
Glütseriin	1,47	Väävelsüsinik	1,63
Kivisool	1,54	Teemant	2,42

1. Leida graafiliselt murdunud kiire siht valguskiire minnes õhust vette, kui langemisnurk $\alpha = 60^\circ$!

2. Leida graafiliselt langeva valguskiire siht, kui klaasist õhku minnes on murdumisnurk $\beta = 75^\circ$!

3. Tabeli andmete põhjal arvutada langemisnurgale 70° vastavad murdumisnurgad valguskiire kulgemisel tühjast ruumist (õhust) teemanti, väävelsüsiniku ja jäässe! Teha joonis, kus on enam-vähem õieti tõmmatud vastavad murdunud kiirte sihid!

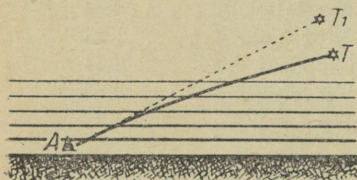
4. Tabeli andmeil arvutada õhu (sama, mis tühja ruumi) murdumisnäitaja piirituse ja flintklaasi suhtes!

5. Kiir läheb veest klaasi. Arvutada murdumisnurk β , kui langemisnurk α on 50° ! Klaasi murdumisnäitaja vee suhtes võrdub klaasi ja vee absoluutsete murdumisnäitajate jagatiseaga.

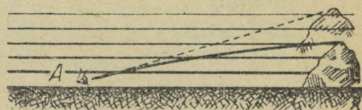
30. Valguse murdumise nähtusi Maa õhkkonna mõjul.

Õhkkond ümbritseb Maad kontsentrilise kihina, mille tihedus maapinnast kõrgemale tõustes järjest väheneb. Taevakehadelt (Päike, tähed) tulevad valguskiired, läbides Maa õhkkonna eri tihedusega kihte, murduvad ja nende tee muutub kõveraks (38. joon.). Meie aga näeme taevakeha temalt tulevate valguskiirte tee viimase osa sihis, järelikult kõrgemal, kui ta on tõepoolest. Seda nähtust nimetatakse astronoomiliseks refraktsiooniks. Refraktsiooni mõju on kõige

suurem horisoni lähedal ($35'$), peakohal (seniidis) võrdub see nulliga. Refraktsiooni tõttu näeme Päikest horisoni äärel veel siis, kui ta tõepoolest on juba horisoni all. Ka Päikese ketta lapikuks muutumine horisoni lähedal on seletatav refraktsiooniga, mis tõstab Päikese ketta alumist serva suuremal määral kõrgemale kui ülemist (umbes $\frac{1}{5}$ läbimõõdu võrra).



38. joon. Astronoomiline refraktsioon.



39. joon. Terrestriline refraktsioon.

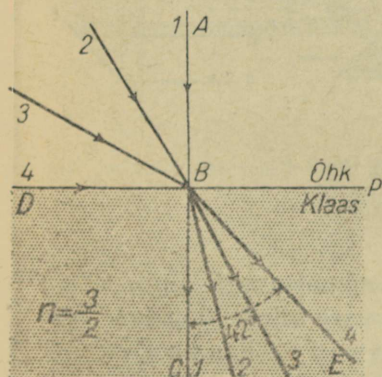
Mitte üksnes taevakehad, vaid ka kauged maapealsed esemed paistavad meile kõrgemal, kui nad tõepoolest on, sest murdumise tõttu painduvad valguskiired tihedamaisse õhukihtidesse minnes maale lähemale (39. joon.). Sellist nähtust nimetatakse terrestriliseks refraktsiooniks. Seetõttu näeme ka tublisti kaugemale, kui see ilma õhkkonnata võimalik oleks.

Päikesekiirte peegeldumise ja murdumisega õhkkonnas on seletatav ka hämariku nähtus. Veel tükk aega pärast Päikese loojangut tungivad tema kiired peegeldumise ja murdumise tõttu meie horisoni kohale ja tekitavad õhtuse hämariku (eha). Sama nähtus kordub ka hommikul enne Päikese tõusu (koit). Tähtede vilkumine on samuti seotud valguskiirte murdumisega Maa õhkkonnas. Õhuvoolude tõttu muutub alaliselt õhu tihedus valguskiirte teel, järelikult valguskiire tee õhus muutub alatasa, millest tulebki tähe vilkumine.

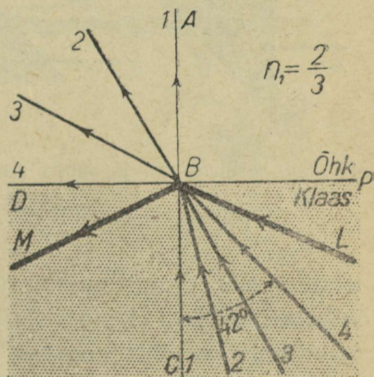
31. Täieline sisepeegeldumine. Kui valguskiir läheb optiliselt hõredamast keskkonnast optiliselt tihedamasse, näiteks õhust klaasi, siis on murdumisnurk alati väiksem kui langemisnurk ja me võime suuruselt igasugusele langemisnurgale leida vastava murdumisnurga. Kõige suuremale langeemisnurgale $\alpha_{\text{maks.}} = 90^\circ$ vastab muidugi ka kõige suurem murdumisnurk $\beta_{\text{maks.}}$. Leiame ta väärtuse.

Murdumiseaduste põhjal $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$, järelikult

$$\sin \beta_{\text{maks.}} = \frac{\sin \alpha_{\text{maks.}}}{n} = \frac{\sin 90^\circ}{n} = \frac{1}{n} = 1 : \frac{3}{2} = \frac{2}{3} = 0,667, \text{ millest } \beta_{\text{maks.}} = 42^\circ.$$



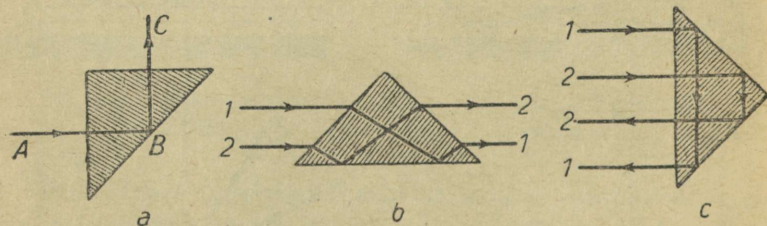
40. joon. Valguskiirte murdumine õhust klaasi.



41. joon. Valguskiirte murdumine klaasist õhku.

Tähendab, kõik AB ja DB vahel langevad kiired (40. joon.) peavad pärast murdumist mahtuma nurka $CBE = 42^\circ$. Väljapoole seda ruumi, s. o. nurka EBP , ei tungi ühtegi murdunud kiirt.

Ümberpööratavuse printsiipi rakendades võtame endised murdunud kiirte sihid langemiskiirte sihtideks (41. joon.), siis endised langemiskiirte sihid muutuvad murdunud kiirte sihtideks. Et sel juhul kiired lähevad optiliselt tihedamast keskkonnast (klaasist) optiliselt hõredamasse keskkonda (õhku), siis on murdumisnurgad suuremad kui langemisnurgad. Kõige suuremaks murdumisnurgaks õhus võib olla 90° . Nagu nägime, vastas sellele klaasis langemisnurk 42° . Kui teeme langemisnurga klaasis suuremaks kui 42° (kiir *LB*), siis murdumisestuste järgi ei leia me temale

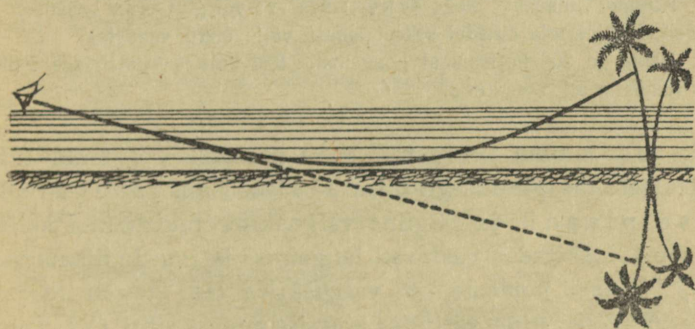


42. joon. Kiirte sihi ja suuna muutumine täielisel sisepeegeldumisel täisnurkses prisma.

enam vastavat murdumisnurka (murdumisnurga siinus ei saa olla suurem kui 1!), järelikult ei saa see kiir ka murduda. Mis siis toimub selliste kiirtega? Katsed näitavad, et kõik kiired, millede langemisnurk klaasist õhku minnes on suurem kui 42° , peegelduvad klaasi ja õhu lahtuspinnalt ning pöörduvad endisse keskkonda — klaasi tagasi. Kirjeldatud nähtus kannab valguse täielise sisepeegeldumise nime. Sõna „täieline“ rõhutab, et antud juhul peegelduvad **kõik** lahtuspinnale langevad kiired, sest kõigi nende jaoks osutub võimatuks murdumine vastavalt murdumisestustele. Tavalise peegeldumise puhul aga keskkondade lahtuspinnale langevaist kiirtest osa peegeldub, osa murdub.

Samalaadne täielise sisepeegeldumise nähtus esineb ka kõigi teiste ainete puhul, kui valguskiir kulgeb optiliselt tihedamast keskkonnast optiliselt hõredamasse keskkonda ja kui seejuures langemisnurk ületab teatud suuruse.

Nurka CBE , antud juhul 42° , nimetatakse täielise sisepeegeldumise **piirnurgaks**. Nagu nägime, võrdub täielise sisepeegeldumise piirnurga siinus murdumisnäitaja (n) pöördväärtusega, s. o. $\sin \beta_{\text{maks.}} = \frac{1}{n}$. Siit nähtub, et piir-



43. joon. Fatamorgaana.

nurga ($\beta_{\text{maks.}}$) väärtus oleneb ainult murdumisnäitajast ja on seda väiksem, mida suurem on murdumisnäitaja. Vastavad arvutused näitavad, et täielise sisepeegeldumise piirnurga suurus on veel 48° , klaasil 42° , teemandil 23° .

Täielise sisepeegeldumise nähtus leiab rohkesti kasutamist optiliste riistade ehitamisel, kui on vaja muuta valguskiirte sihti. Näiteks 42. joonisel (a) on näha, kuidas röntgiikiir AB pärast sisepeegeldumist muutub püstkiireks BC ja kuidas rööpsete kiirte järjekord pärast ühe- (b) või kahekordset (c) sisepeegeldumist muutub otse vastupidiseks (ülemised alumisteks). Samuti on antud juhul oluline, et siin peegelduvad kõik langevad kiired.

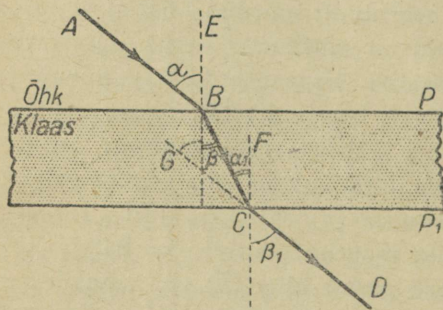
Täielise sisepeegeldumisega õhus on seletatavad ka mitmesugused õhupeegeldus-nähtused (miraaž, fatamorgaana). Näiteks kange kuumuse tõttu (kõrves) võivad õhkkonna maalähedased kihid omada vähemat tihedust kui kõrgemad kihid. Seetõttu tekib õhus täieline sisepeegeldumine ja me näeme näiteks kõrgete esemete (puude) peeglipilte maapinna suhtes (43. joon.).

1. Kala on 50 cm allpool veepinda. Missuguses ruumi piirkonnas näeb kala kõike ülalpool veepinda olevat „maailma“?

2. Arvutada täielise sisepeegeldumise piirnurk kivisoola ja glütseriini jaoks! Kumba „maailm“ oleks avaram: kas vee või glütseriini „elanikel“? teemandi või kivisoola omadel sellest ainest välja õhku vaadates?

3. Päike on 30° horisondist kõrgemal. Kui kõrgel paistab siis Päike rõhsta veepinna alt vaadatuna?

32. Murdumine tasaparalleelses plaadis. Võtame tüki paralleelsete tasapindadega piiratud klaasi, nn. tasaparalleelse plaadi, ja jälgime valguskiire murdumist selles (44. joon.). Ehitades vastavad langemis- ja murdumisnurgad (α ja β ; α_1 ja β_1) näeme, et valguskiire tee kulgeb klaasis mööda lõiku BC ning väljudes klaasist mööda sihti CD . Tasapindade P ja P_1 rööpsuse tõttu on ka ristjooned BE ja CF



44. joon. Valguskiire murdumine tasaparalleelses plaadis.

isekeskis rööpsed, järelilikult põiknurgad β ja α_1 on võrdsed. Sellest järgneb edasi ümberpööratavuse printsiibi põhjal, et ka $\alpha = \beta_1$, millest järeldus: $AB \parallel CD$. Tähen-dab, valguskiir, tungides läbitasaparalleelse plaadi, läheb pärast murdumist rööp-

selt oma esialgse sihiga, nihkudes temast vaid vähe kõrvale. Kõrvalekaldumine on seda suurem, mida paksem on plaat, mida suurem on plaadi murdmisnäitaja ning mida enam kaldu langeb plaadile kiir. Risti tasaparalleelsele plaadile langevad kiired ei muuda oma sihti.

Meie arutus kehtib igasugusest ühtlasest ainest koosneva tasaparalleelse plaadi kohta, olgu see näiteks vesi, õhk, kivi-sool vm. Samuti jääb ühe plaadi kohta tuletatud omadus kehtima ka mitmest tasaparalleelsest plaadist koosneva liitplaadi kohta.

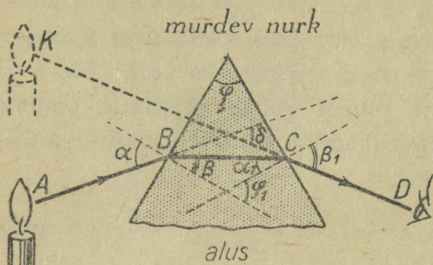
1. Millest võime järeldada, kas aknaklaas on ühtlase paksusega ja ilma nn. villideta?

2. Kevadel ja suvel soojal päikesepaistel võime tähele panna õhu virvendust maapinna ligi ja katuste kohal. Samalaadset nähtust võime tähele panna ka üle lõkke vaadates. Kuidas seda seletada?

33. Murdumine prismas. Optiliseks prismaks füüsikas nimetatakse kahe lõikuva tasapinnaga piiratud tükki läbipaistvat ainet, näiteks klaasi. Lõikuvaid tasapindu kutsutakse murdvateks tasapindadeks, nende lõikejoont murdvaks servaks ja nende tasapindade vahelist joonnurka murdvaks nurgaks. Murdva serva vastaspind on prisma aluseks.

45. joonisel on kujutatud läbilõikes selline prisma murdva nurgaga φ . Katsed ja kiirte käigu ehitamine näitavad, et optilist prisma läbivad valguskiired kalduvad kõrvale prisma aluse poole. Seetõttu nihkuvad läbi prisma vaadates esemete kujutised prisma murdva serva poole. Kõrvalekaldumise suurust mõõdab kaldenurk δ prismale langeva (AB) ja prismast väljuva kiire (CD) suuna vahel. Ühevärviliste (homogeensete) valguskiirte puhul kaldenurga δ suurus sõltub pris-

ma murdvast nurgast (φ), prisma aine murdumisnäitajast (n) ja kiirte langemisnurgast prismale (α) ning suureneb ühes nende suurenemisega. Sama prisma puhul on δ väärtus kõige väiksem siis,



45. joon. Valguskiire murdumine prisma.

kui valguskiir läbib prisma sümmeetriliselt ($\alpha = \beta_1$), s. o. kui kiired AB ja CD moodustavad prisma murdvate tasapindadega võrdsed nurgad. Määrates katsest δ minimaalse väärtuse, saame selle põhjal arvutada prisma murdumisnäitaja n .

Eelmised tulemused on muidugi kehtivad juhul, kui prisma murdumisnäitaja on suurem ümberoleva keskkonna murdumisnäitajast, näiteks klaasprisma puhul õhus. Ümberpööratud juhul (õhkprisma klaasis) on tulemused otse vastupidised.

Tuletame lõpuks valemi prisma murdumisnäitaja n arvutamiseks. Nagu teame, $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$. Tähendab, tuleb määrata φ ja δ abil nurgad α ja β . Et $\alpha = \beta_1$, siis ka $\beta = \alpha_1$ ning kolmnurga välisnurga omaduste põhjal $\varphi_1 = \beta + \alpha_1 = 2\beta$, millest $\beta = \frac{\varphi_1}{2} = \frac{\varphi}{2}$, sest $\varphi_1 = \varphi$ kui vastastikku risti külgedega nurgad. Edasi $\delta = (\alpha - \beta) + (\beta_1 - \alpha_1) = 2\alpha - \beta$. Siit $2\alpha = \delta + 2\beta = \delta + 2 \cdot \frac{\varphi}{2} = \delta + \varphi$ ja $\alpha = \frac{\delta + \varphi}{2}$. Järelikult

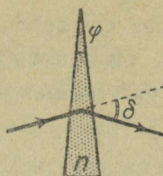
$$n = \frac{\sin \frac{\delta + \varphi}{2}}{\sin \frac{\varphi}{2}}$$

Kui prisma murdev nurk φ on väike, siis on väike ka δ ja me võime asendada siinused nende nurkväärtustega radiaanides. Sel juhul

$$n \approx \frac{\frac{\delta + \varphi}{2}}{\frac{\varphi}{2}} = \frac{\delta + \varphi}{\varphi} = \frac{\delta}{\varphi} + 1,$$

millest $\frac{\delta}{\varphi} \approx n - 1$ ja

$$\delta \approx (n - 1) \varphi,$$



46. joon. Väikese murdva nurgaga prisma.

s. o. väikese murdva nurga (φ) puhul on valguskiire kõrvalekaldumine prisma (δ) võrdeline murdva nurgaga (46. joon.).

1. Klaasprisma on asetatud õhust vette. Kuidas muutub seetõttu prisma läbiva kiire kaldenurk?

2. Õhukeste seintega, õhuga täidetud klaasprisma on asetatud vette. Joonestada valguskiire tee sellise prisma läbimisel! Võrrelda tulemusi kiirte murdumisega läbi klaasprisma õhus!

3. Valguskiir langeb risti korrapärasele kolmnurksele klaasprismale. Joonestada kiirte tee prisma läbimisel!

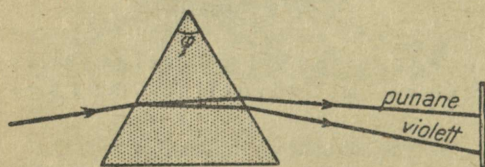
4. Arvutada prisma aine murdumisnäitaja n , kui sümmeetriliselt prisma läbiv kiir kaldub kõrvale $\delta = 45^\circ$ võrra ja prisma murdev nurk $\varphi = 60^\circ$!

Lahendada sama küsimus juhul, kui $\delta = 20^\circ$ ja $\varphi = 30^\circ$!

34. Värvide hajumine. Spekter. Eespool vaatlesime murdumist prisma ainult ühevärviliste valguskiirte, s. o. näiteks kollaste, punaste jne. kiirte puhul. Kui aga katsetada mitut värvi kiirtega, siis näeme, et samadel muudel tingimustel valguskiire kõrvalekaldumine prisma oleneb kiirte värvist. Näiteks kollased kiired kalduvad enam kõrvale kui punased, sinised enam kui rohelised, jne. Kui võtta mõni mitmest värvist koosnev valguskiir, milliseks osutub näiteks

iga valge kiir, siis prismat läbides laguneb selline kiir üksikuiks värvideks, sest erisuguse murdumise tõttu läheb iga värv prismas eri teed. Me ütleme sel puhul, et prisma hajutab ehk dispergeerib kiiri, lahutades need üksikuiks värvideks. Nähtust ennast aga nimetame värvide hajumiseks ehk **dispersiooniks**.

Esimesena tegi sellise katse kuulus inglise teadusmees I. Newton a. 1666, lahutades päikesekiired üksikuiks vikerkaarevärvideks. Seega valge kiirtekimp prismat läbides ei



47. joon. Valguse lahutumine prismas.

anna mitte valget kiirtekimpu, vaid hulga värvilisi. Üleminek ühest teise on pidev. Harilikult eraldatakse sedaviisi saadud värvilises ribas ehk spekt-

ris kõrvalekaldumise suuruse järjekorras järgmised värvid: punane, oranž, kollane, roheline, helesinine, tumesinine ja violet.

Kui mõne värvilise kiire prismast uuesti läbi laseme, siis kaldub ta küll kõrvale prisma aluse poole, kuid ei muuda enam oma värvi. Täheandab, spektrivärvid on **liht-** ehk **algvärvid**, milledest koosneb valge kui liitvärv. — Tahame spektrivärvist saada valget värvi, asetame prisma taha koonduva läätse, millest läbi minnes värvilised kiired koonduvad ja annavad meile valge laigu.

Valge kiire annavad liitmisel ka punane ja roheline, oranž ja helesinine, kollane ja tumesinine kiir. Kaht värvi, mis liitumisel annavad valge värvi, nimetatakse **täiendvärvideks**.

Eelmise põhjal tuleb mõne aine murdumisnäitajast kõneldes alati lisada, mis värvi valguskiire kohta see murdumisnäitaja käib, sest igal värvilisel kiirel on erisu-

gune murdumisnäitaja. Näitena toome siin ühe klaasisordi (kroonklaasi) murdumisnäitajad üksikute eri värvide teatud kiirte kohta:

punane	1,512	tumesinine	1,527
kollane	1,515	violett	1,531
roheline	1,521		

35. Akromaatileine prisma. Liitkiire värvide hajumine ehk dispersioon murdumisel on suureks takistuseks optiliste riistade ehitamisel. Seetõttu näiteks saame ühe valge kiire murdumisel prisma või läätses hulga värvilisi. Kiirtekimbu keskosas katavad värvid üksteist ja annavad meile valge värvi, kuna ääred jäävad ikkagi värviliseks ehk kromaatiliseks. Vaatame, kuidas on võimalik värvilisust ehk kromatismi kõrvaldada valguskiire läbimisel prismast.

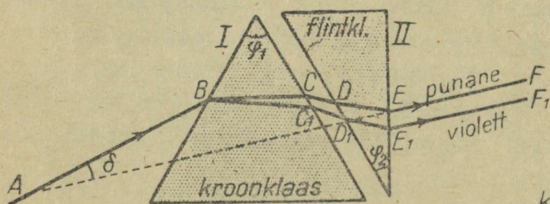
Vaatleme lähemalt järgmisi kroon- ja flintklaasi murdumisnäitajaid:

	punaste kiirte murdumisnäitaja	violetsete kiirte murdumisnäitaja
kroonklaas	1,53	1,55
flintklaas	1,63	1,67

Siit nähtub, et violetsete ja punaste kiirte murdumisnäitajate vahe on kroonklaasil $1,55 - 1,53 = 0,02$, flintklaasil aga $1,67 - 1,63 = 0,04$, seega kaks korda suurem. Järelikult on flintklaasi dispersioonivõime samuti kaks korda suurem kui kroonklaasil. Seda kroon- ja flintklaasi omadust kasutataksegi akromaatilise prisma ehitamisel.

Olgu meil näiteks kroonklaasist prisma murdva nurgaga φ_1 , kusjuures punaste kiirte kõrvalekaldumise nurk $\delta_1 = 70^\circ$

ja dispersiooninurk punaste ja violetsete kiirte vahel on 5° . Teine prisma flintklaasist, murdva nurgaga φ_2 , annab punaste kiirte jaoks kõrvalekaldumise $\delta_2 = 40^\circ$ ja punaste ning violetsete kiirte vahel oleva dispersiooninurga suurus samuti 5° . Kui need kaks prisma liita nii, nagu on kujutatud 48. joonisel (alused vastamisi), siis valge kiir, läbides mõlemad prismad, annab punaste kiirte jaoks üldise kõrvalekaldumise suuruse $\delta = \delta_1 - \delta_2 = 70^\circ - 40^\circ = 30^\circ$. Mis puu-



48. joon. Akromaatiline prisma.



49. joon. Akromaatiline lääts.

tub dispersioonisse, siis punaste ja violetsete kiirte dispersiooninurga võrdsuse tõttu mõlemaid prismaid läbinud violetset kiir, väljudes pärast murdumist teisest prismast, lähevad rööpselt punastega, s. o. ilma dispersioonita.

Sedaviisi on võimalik pärast murdumist punaseid ja violetseid kiiri rööpselt muuta. Teised kiired asetsevad nende vahepeal. Ka need koonduvad enam-vähem ühte. Tulemusena saame küll valguskiire kõrvalekaldumise murdumisel, kuid ilma üksikuiks värvideks hajumata ehk dispersioonita. Sellist liitprisma, mis muudab küll kiirte suunda, kuid ei hajuta neid üksikuiks värvideks, nimetatakse akromaatiliseks prismaks (49. joon.). On arusaadav, et akromaatiline prisma valget valgust spektriiks ei lahuta.

Analoogiliselt akromaatiliste prismadega ehitatakse ka akromaatilised läätsed (49. joon.).

36. Ajaloolisi märkusi. Valguse murdumise nähtus oli tuntud juba Eukleidesele. Ühes oma töös kirjeldab ta õpikuis sageli esinevat lihtsat katset valguse murdumise kohta järgmiselt: asetada mõni ese anumata põhja ja minna anumast kaugemale, nii et vaatlaja seda eset anuma ääretagant enam ei näeks; kui aga anumasse vett kallata, tuleb ese jälle nähtavale. Cl. Ptolemaios (II saj.) teadis, et kui valguskiir läheb murdumisel tihedamasse keskkonda, siis ta läheneb ristjoonele. Ptolemaios toimetaski rea mõõtmisi langemis- ja murdumisnurka suuruse kohta ning tuletas nende mõõtmiste põhjal lause: langemis- ja murdumisnurkade suhe on kahe antud keskkonna puhul konstantne, s. o. $\frac{\alpha}{\beta} = \text{const.}$

Alhazen omalt poolt täiendab murdumisnähtuste uurimist tasapindade seadusega, samuti kasutab ta ka ümberpööratavuse lauset. Vitello (umb. 1270. a.) koostab rea tabeleid valguskiire murdumise kohta õhust vette ja klaasi. Kuulus Kepler korraldas samuti rea katseid valguse murdumise kohta ja avastas täielise sisepeegeldumise nähtuse, lähtudes Alhazeni poolt avastatud ümberpööratavuse printsiibist. Õige suhte langemis- ja murdumisnurka vahel avastas hollandi õpetlane Willebrord Snellius (1591—1626), kuna R. Descartes (1596—1650) andis murdumisestadustele nende praeguse kuju.

Valguskiire nihkumist tasaparalleelse plaadi läbimisel kirjeldas esimesena Fr. Maurolycus (1494—1577).

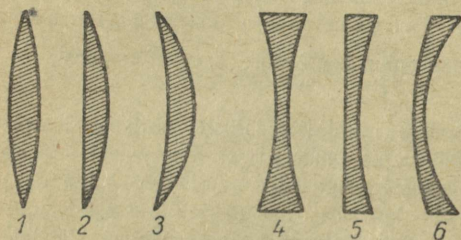
Kaua aega ei suudetud ära seletada murdumisel esinevat värvide hajumist ehk dispersiooni. Põhjuseks oli ekslik arvamus, et iga värvi valguskiirte murdumisnäitaja on kahe antud keskkonna jaoks sama. Püüti värvilist valgust seletada kui valguse ja pimeduse segunemisest tekkinud nähtust. Alles Newton (1643—1727) seletas lõplikult värvide tekkimise murdumisel, oletades, et valguse liike on väga palju ja igal liigil (värvil) on oma eriline murdumisnäitaja.

Akromaatiliste prismade valmistamist pidurdas pikemat aega Newtoni ekslik arvamus, et värvide hajumine prismas on võrdeline kaldenurgaga. Selle arvamuse kummutas L. Euler (1707—1783). Esimese akromaatilise prisma valmistas inglise optik John Dollond (1706—1761).

V. Sfäärilised läätsed.

37. Läätsede liigitus. Sfäärilise läätses all mõistetakse läbipaistvat keskkonda, harilikult klaasi, mis on piiratud kerapindadega. Ühe kerapinna asemel võib olla ka tasapind. Vas- tavalt sellele, kas lääts on keskelt paksem kui äärtest, või ümberpöörduvalt, jagatakse läätsed kahte liiki: **kumerateks** (kaksik-, tasa- ja nõguskumer) ning **nõgusateks**

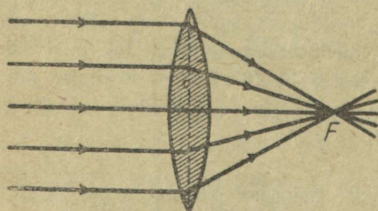
(kaksik-, tasa- ja kumernõgus). Nimetada 50. joonisel kujutatud läätsi 1—6-ni!



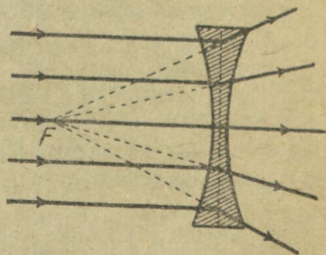
50. joon. Sfäärilised läätsed.

Kumerläätses üldiseks omaduseks on koondada, nõgusläätses omaduseks aga hajutada valguskiiri (51. ja 52. joon.).

See läätsede omadus, nagu hiljem näeme, oleneb läätses aine murdumisnäitajast (n) ja sfääriliste pindade kõverusraadiustest (r_1 ja r_2).



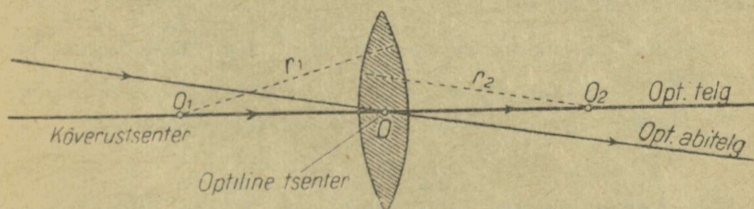
51. joon. Kumerlääts koondab kiiri.



52. joon. Nõguslääts hajutab kiiri.

38. Läätse optiline telg, abitelg ja tsenter. Fookus.

Sirget, mis läheb läbi läätse kõverustsentrite O_1 ja O_2 , nimetatakse läätse optiliseks teljeks (53. joon.). Loomulikult on optiline telg risti läätse pindadega ja seetõttu optilist telge mööda läätselangevad kiired läbivad läätsel ilma oma sihti muutmata. Peale selle on läätsel keskosas (sümmeetriliste pindadega läätsedel läätsel keskpunktis) veel eriline punkt, nn. **optiline tsenter** (O), mille suunas langevad kiired läbivad läätsel ilma oma sihti muutmata. Tõepoolest, läätsed on harilikult õhukesed ja kiired ei lange kaugel optilisest teljest. Et läätsel keskosa võime vaadelda kui tasaparalleelset plaati, siis läbivad kiired selle enam-vähem ilma oma sihti muutmata. Seetõttu nimetataksegi läbi optilise tsentri minevat sihti optiliseks abiteljeks.



53. joon. Läätsel iseloomustavad punktid ja jooned.

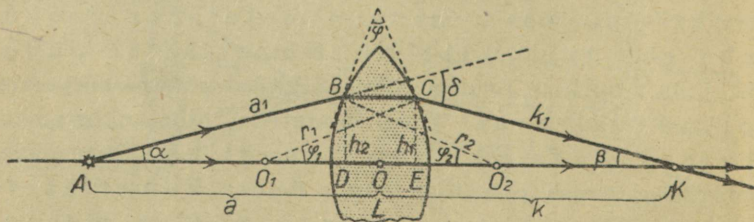
Optilise teljega rööpsed kiired pärast murdumist kumerläätsel koonduvad ühte punkti (51. joon.), mida nimetatakse fookuseks ehk tulipunktiks. Nõgusläätsel puhul (52. joon.) optilise teljega rööpsed kiired pärast murdumist näivad väljuvat ühest punktist, mida nimetatakse ebafookuseks ehk ebatulipunktiks. Rakendades ümberpööratavuse printsiipi võime öelda: kumerläätsel fookusest väljuvad kiired pärast murdumist kumerläätsel lähevad rööpselt opti-

lise teljega. Samuti lähevad rööpselt optilise teljega nõgusläätsse fookusse suunduvad kiired. Seega on meil nii kumer- kui ka nõgusläätsse puhul peale optilise telje teada veel kolme kiire siht pärast murdumist läätses, nimelt: optilise abitelje sihis, rööpselt teljega ja läbi fookuse minev kiir. Neid kiiri kasutame kujutise ehitamisel läätsedes samuti, nagu me seda tegime kujutiste ehitamisel sfäärilistes peeglites.

Läätsse üldiseks iseloomustamiseks kasutame nagu peegli-tegi puhul nn. läätsse ruuminurka, mille moodustab fookuse ja läätsse kontuuri abil kujundatud koonuse pind. Harilikult kasutatakse võrdlemisi väikese ruuminurgaga läätsi.

1. Kuidas ainult kompimise abil eraldada kumerläätsse nõgusläätses? kuidas ainult valguse abil?
2. Kuidas on võimalik katseliselt kumer- ja nõgusläätsse fookuse kaudust määrata?
3. Mispärast läätsse fookust nimetatakse teisiti tulipunktiks?

39. Läätsse valem. Olgu meil joon. 54 läbilõikes kumerlääts L optilise teljega $O_1 O_2$, kõverusraadiusega r_1 ja r_2 ning murdumisnäitajaga n . Joonise selguse huvides on läätsse paksusega tublisti liialdatud, kuna järgnev mõttekäik on keh-



54. joon. Kumerläätsse valemi tuletamine.

tiv ainult väikese ruuminurgaga läätsede ja optilise telje lähedaste, nn. tsentraalsete kiirte kohta.

Sel juhul võime siin rakendada § 33 tuletatud valemit

$$\delta = (n-1) \varphi \quad (1),$$

asendades selles δ ja φ avaldistega, mis on tuletatud läätsede karakteristiklikest suurusist. Et meie eelduste kohaselt nurgad α ja β ning φ_1 ja φ_2 on väikesed, siis võime nad asendada vastavate siinustega, samuti võrrandada pikkused:

$$h_1 = h_2 = h \text{ ja } a_1 = a \text{ ning } k_1 = k.$$

Arvestades eelmisi tähistusi võime joonise põhjal kirjutada:

$$\delta = \alpha + \beta \approx \sin \alpha + \sin \beta = \frac{h_2}{a_1} + \frac{h_1}{k_1} \approx \frac{h}{a} + \frac{h}{k};$$

$$\varphi = \varphi_1 + \varphi_2 \approx \sin \varphi_1 + \sin \varphi_2 = \frac{h_1}{r_1} + \frac{h_2}{r_2} \approx \frac{h}{r_1} + \frac{h}{r_2}.$$

Asetades saadud δ ja φ väärtused valemisse (1), saame:

$$\frac{h}{a} + \frac{h}{k} = (n-1) \left(\frac{h}{r_1} + \frac{h}{r_2} \right), \text{ millest}$$

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (2).$$

Nagu näeme, on läätsede valemi vasak pool kujult sama, mis nõguspeegli puhul. Ka parema poole võime teha nõguspeegli valemiga ühesuguseks. Oletame, et valguspunkt A nihkub mööda optilist telge läätsesest järjest kaugemale kuni lõpma-

tuseni. Siis $a = \infty$ ja $\frac{1}{a} = \frac{1}{\infty} = 0$ ning valem (2) saab kuju

$$\frac{1}{k} = \frac{1}{f} = (n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right) \quad (3),$$

kus f on tulipunkti ehk fookuse kaugus, s. o. kujutise K kaugus läätsesest juhul, kui kiired langevad rööpselt optilise tel-

jega. Asendades $(n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)$ temaga võrrandatud suurusega, saame kumerläätse valemi kujul

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f} \quad (4),$$

mis on täiesti sarnane nõguspeegli valemiga. Tähendab, kõik nõguspeegli puhul rakendatud mõttekäigud on rakendatavad ka kumerläätse kohta.

Valemist (3) saame:

$$f = \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)} \quad (5),$$

s. o. fookuse kauguse suurus sõltub läätse murdumisnäitajast ja kõverusraadiusest. Juhul, kui $n = 1,5$ (harilik klaas) ja $r_1 = r_2 = r$, siis

$$f = \frac{1}{(1,5-1)\left(\frac{1}{r} + \frac{1}{r}\right)} = \frac{1}{0,5 \cdot \frac{2}{r}} = r,$$

s. o. fookuse kaugus võrdub kõverusraadiusega.

Ka nähtub samast valemist (5), et läätse fookuse kaugused mõlemal pool läätse on ühesugused, sest raadiused r_1 ja r_2 esinevad valemis täiesti sümmeetriliselt, s. o. nende vastastikune ümbervahetus ei muuda valemi (5) suurust, järelikult ka f suurust.

Nõgusläätse puhul, analoogiliselt kumerpeegli, on k , r_1 ja r_2 märgid vastupidised, sest need suurused on mõõdetud kumerläätsega võrreldes vastassuunas. Järelikult

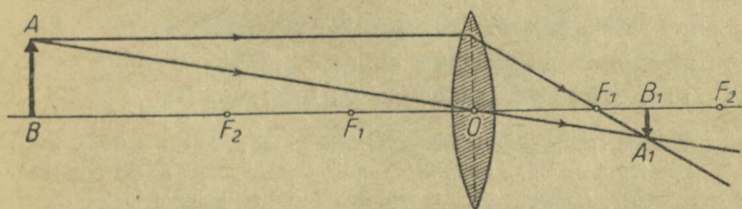
$$\frac{1}{a} + \frac{1}{-k} = (n-1)\left(\frac{1}{-r_1} + \frac{1}{-r_2}\right), \text{ millest}$$

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{-k} = \frac{1}{-f} \quad (6).$$

1. Kas ka kumernõgusa ja nõguskumera läätsel on fookuse kaugused mõlemal pool läätsel ühesuurused?
2. Millise kujutise saame läätsel abil siis, kui pool läätsel kinni katta?
3. Kumerläätsel $f = 10$ cm ja $a = 50$ cm. Kui kaugel läätselst on kujutis? Milline on see kujutis?
4. Kumerläätsel $f = 50$ cm ja kõverusraadiused $r_1 = 60$ cm ja $r_2 = 80$ cm. Arvutada läätsel murdumisnäitaja!
5. Künla kaugus seinast on 72 cm. Kuhu tuleb paigutada kumerlääts, mille $f = 16$ cm, et saada seinal künla terav kujutis?

40. Kujutiste ehitamine. Sfääriliste läätsede abil on võimalik saada esemetest kujutisi. Täheandab, eseme mõnest valgustatud punktist lähtuv hajuv kiirtekimp pärast murdumist sfäärilises läätsel annab enam-vähem punktitaolise kujutise.

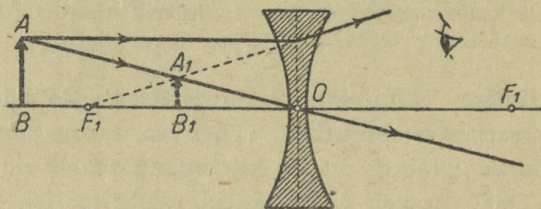
Sama järeldub ka läätsel valemist $\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}$, millest $k = \frac{af}{a - f}$. Siin on antud valguspunkti ja läätsel suhtes a ja f konstantsed, järelikult peab olema konstantne ka k , s. o. kõik



55. joon. Kujutise ehitamine kumerläätsel.

samast punktist väljuvad kiired pärast murdumist läätsel koonduvad ühte punkti. Kui teame, kus koonduvad näiteks 2 neist kiirtest, seal koonduvad ka kõik teised. Sellel kiirte omadusel põhinebki kujutiste ehitamine sfäärilistes läätsedes. Samuti kui sfääriliste peeglite puhul, kasutame kujutiste ehitamisel kahte neist kolmest kiirtest, millede sihid pärast murdumist on teada.

Näitena ehitame kujutise esemest, mis asetseb läätses kaugemal kui kahekordne fookuse kaugus, s. o. $a > 2f$ (55. joon.). Siin on kasutatud rööpset ja läbi optilise tsentri minevat kiirt. Saadud kujutis on tõeline, ümberpööratud ja vähendatud ning asetseb fookuse ja kahekordse fookusekauguse vahel.



56. joon. Kujutise ehitamine nõgusläätses.

Rakendades ümberpööratavuse printsiipi, missuguse kujutise saame, kui ese asub ühe- ja kahekordse fookusekauguse vahel?

Samal viisil ehitame ka kujutise nõgusläätses (56. joon.). Nagu näeme, on nõgusläätsel abil saadud kujutis alati ebakujutis, päripidine ja vähendatud.

1. Ehitada eseme kujutis kumerläätses juhtudel, kui $a = 2f$ ja $a < f$
2. Ese liigub mööda kumerläätsel optilist telge lõpmatuselt kuni kahekordse fookusekauguseni. Kuidas muutub kujutise kaugus läätses?
3. Ese liigub kumerläätsel kahekordsest fookusekaugusest ühekordse fookusekauguseni. Kuidas muutub kujutise kaugus läätses?
4. Milline on kujutis ja kuidas muutub ta kaugus kumerläätses, kui ese liigub fookusest läätseni?

41. Sfääriliste peeglite ja läätsede võrdlus. Nõguspeegli ja kumerläätsel ning kumerpeegli ja nõgusläätsel valemid on oma kujult täiesti samad. Sisuliselt samad on ka neis esinevate suuruste (a, k, f) tähendused. Järelikult kõik kujutiste ehitamise kohta nõgus- ja kumerpeeglis saadud tule-

mused on vastavalt kehtivad ka kumer- ja nõgusläätsede kohta, kusjuures peegli kõverustsentriale (O) läätsede puhul vastab kahekordne fookuse kaugus (F_2). Tõepoolest, peegli $r = 2f$, tähendab, ka peegli kõverustsentrite vastav punkt läätsede juures peab olema $2f$ kaugusel läätsest.

Kokkuvõttena kujutiste ehitamisest sfäärilistes peeglites ja läätsedes toome järgmise tabeli.

Nõguspeegel ja kumerlääts.

Eseme kaugus:	Kujutise kaugus:	Kujutise iseloom:
$0 < a < f$. . .	$k < 0$ (negat.)	ebakujutis, päripid., suurendatud.
$a = f$. . .	$k = \infty$. . .	kiired rööpsed, kujutist ei ole.
$f < a < 2f$. . .	$k > 2f$. . .	tõeline, ümberp., suurend.
$a = 2f$. . .	$k = 2f$. . .	tõeline, ümberp., niisama suur.
$a > 2f$. . .	$f < k < 2f$. . .	tõeline ümberp., vähend.
$a = \infty$. . .	$k = f$. . .	kiired koonduvad fookuses.

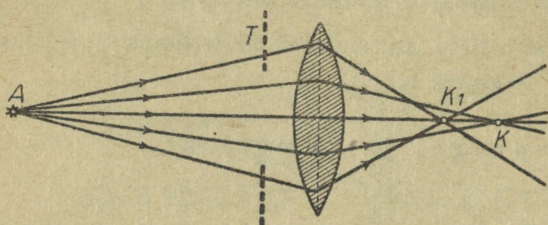
Kumerpeegel ja nõguslääts.

$a > 0$. . . $k < 0$. . . ebakujutis, päripid., vähendatud.

Harjutada määrama kujutise iseloomu, kui a või k on antud, samuti kujutise iseloomu põhjal määrama vastavaid a ja k ! Kontrollida tulemusi eelmise tabeli abil!

42. Sfääriline ja kromaatileine aberratsioon. Nõguspeegli puhul nägime, et kõik valguspunktist väljuvad kiired ei koonu pärast peegeldumist ühte punkti, vaid peegli äärtest peegeldunud kiired koonduvad peeglile lähemale kui peegli keskkohale langevad kiired. Samasugune nn. sfäärilise aberratsiooni ehk kõrvalekaldumise nähtus esineb ka sfäärilistel läätsedel. Nagu 57. joonisest näha, annab ühevärviline valguspunkt A õieti hulga kujutisi, mis asetsevad K ja K_1 vahel. Kui tahame saada ainult ühte ja hästi teravat kujutist, siis peame näiteks

kas läätses äärele langevad kiired erilise valgustõken-
diga (diafragmaga) kinni katma või vastavalt muutma
läätses äärepoolse osa kõverusraadiust, mis osutub aga kaunis
kulukaks.

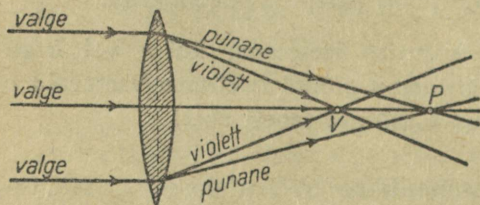


57. joon. Sfääriline aberratsioon.



Valgustõkend.

Peale sfäärilise aberratsiooni ilmneb läätsedes valge või
üldse liitvalguse puhul veel nn. kromaatileine aber-
ratsioon (58. joon.). Igal värvilisel valguskiirel on oma
murdumisnäitaja, näiteks violetsel suurem kui punasel. See-



58. joon. Kromaatileine aberratsioon.

tõttu murduvad
violetsed kiired
läätses tugevamini
ja koonduvad lää-
tsele lähemale kui
punased kiired.
Sellest tingituna
saame näiteks päi-
kesevalguse puhul
ühe valge kujutise asemel hulga värvilisi, mis keskosas kata-
vad üksteist ja tekitavad valge mulje, kuna ääred jäävad vär-
viliseks. Kromaatilise aberratsiooni kõrvaldamiseks kasuta-
takse erilist kahest läätses (kroon- ja flintklaasist) koosne-
vat liitläätses, nn. akromaatilist läätses (49. joon.),
mis samuti kui akromaatileine prismagi ei lahuta teda läbivat
valgust värvideks.

1. Näidata joonise abil, et kujutise joonsuurendus $s = \frac{k}{a}$!
2. Ese, mille kõrgus 5 cm, asetseb kumerläätses ($f = 20$ cm) 60 cm kaugusel. Määrata kujutise suurus ja kaugus läätsest!
3. Kumerläätses kõverusraadiused $r_1 = r_2 = 3$ cm ja murdumisnäitaja $n = 1,5$. Ese kõrgusega 2 cm on 8 cm kaugusel läätsest. Leida graafiliselt kujutise suurus ja asend!
4. Ese, mille kõrgus 6 cm, asetseb 20 cm kaugusel nõgusläätses ($f = 10$ cm). Arvutada kujutise suurus!

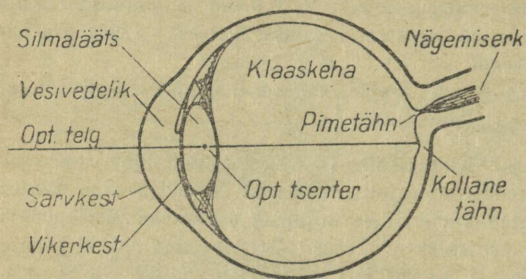
43. **Ajaloolisi märkusi.** Kumerläätses tuleklaasina tunti juba vanal ajal. Kumerläätsede abil suurendatud kujutiste saamist kirjeldatakse oma töödes Alhazeni G. Porta kasutab kumerläätses kujutiste saamiseks pimekambris (*camera obscura*). Ka projektsioonilaterna (*laterna magica*) kirjelduse annab esimesena G. Porta. J. Kepler ja Chr. Huygens (1629—1695) uurivad üksikasjaliselt peeglite ja läätsede omadusi peamiselt geomeetriliste meetoditega. Inglise astronoom E. Halley (1693) võtab sfääriliste peeglite ja läätsede uurimisel kasutamisele algebralise meetodi meile tuntud tähistustega ja saab seega nii peegli kui ka läätses valemid nende praegusel kujul.

VI. Silm ja nägemine.

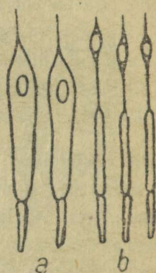
44. **Silma ehitus ja nägemine.** Silm on meie nägemiselund. Tema ehitus selgub skemaatiliselt 59. joonisest. Vaadelda seda!

Läbipaistev sarvkest koos vesivedelikuga, silmaläätsega ja klaaskehaga moodustavad silma valgusturmudva keskkonna. Kõige enam murduvad kiired õhust sarvkesta minnes, sest nende keskkondade (õhk — sarvkest) optilise tiheduse vahe on kõige suurem. Vesivedeliku, silmaläätse ja klaaskeha murdumisnäitajad on enam-vähem ühesugused (1,33—1,43), seetõttu ei murdu ka valguskiired kuigi palju ühest neist keskkondadest teise minnes. Kõik need silma valgusturmudvad keskkonnad ühtekokku moodustavad optilise süsteemi, mis mõjub kui üks kumerlääts, mille fookuse kaugus on ~ 15 mm ja mille optiline tsenter on silmaläätse tagumise seina läheduses.

Vikerkestaga piiratud silmaava (pupill) on kui valgustõkend (diafragma), mis reguleerib silma tuleva valguse hulka.



59. joon. Vasaku silma skemaatiline rõhtlõige (normaalsuurus).



60. joon. Kolvikesed (a) ja kepikesed (b).

Sarvkesta ja silmaläätse abil saame vaadeldavatest esemetest silma tagumisel seinal — võrkkestal — tõelised, ümberpööratud kujutised. Kuigi esemete kujutised võrkkestal on ümberpööratud, oleme teiste meelte kaudu saadud kogemuste põhjal õppinud vaadeldavaid esemeid siiski õieti, s. o. päripidi nägema.

Võrkkestas hargneb peajüst tulev nägemisnärv, mille kaudu on võrkkest peajuga otseses ühenduses. Võrkkest sisaldab kahte liiki valgustundlikke nägemisrakke: kepikesi ja kolvikesi (60. joon.), mis on ühenduses nägemisnärvi otstega. Kepikeste abil näeme peamiselt nõrga valgustuse puhul, hämaras tajutavat üldist halli valguskuma ja selle mitmesuguseid heledusastmeid. Kolvikeste abil näeme tugevama valgustuse puhul, s. o. valges, samuti ka värve. Hämaras, üldse nõrga valgustuse juures me pole suutelised nägema värve, sest siis näeme kepikestega, need aga pole

värvitundlikud. Kepikestele ja kolvikestele langenud valguse mõjul tekivad neis erilised keemilised protsessid, mis ärritavad silmanärvi otsi ja need omakorda närvi kaudu peaju. Silmanärvi ärritus ongi füüsiliseks aluseks valgusaistingu tekkimisel peajas.

45. Tsentraalne ja perifeerne nägemine. Võrkkest pole igas kohas ühteviisi valgustundlik. Võrkkesta kõige valgustundlikumaks kohaks on nn. kollane tähn, mis koosneb peamiselt kolvikestest ja asetseb silma optilisel teljel. Kui tahame mõnd eset või punkti hästi teravalt näha, siis fikseerime silmaga seda punkti, s. o. vaatame nõnda, et silma optiline telg läheks läbi selle punkti, järelkult kujutis tekiks just kollasel tähnil. Nägemist, kus kujutis tekib just kollasel tähnil, nimetatakse tsentraalseks nägemiseks. See toimub peamiselt kolvikeste abil ja on kasutatav päeval, üldse tugevama valgustuse puhul. Meie nägemine töötamisel on peamiselt tsentraalne nägemine.

Kollasest tähnist eemale väheneb kiiresti võrkkesta kolvikestesialdus ja ühes sellega ka võrkkesta värvitundlikkus ning nägemisteravus. Siin esinevad peamiselt kepikesed. Need on küll väga valgustundlikud musta—valge suhtes, kuid mitte värvitundlikud. Seetõttu nõrga valgustuse puhul, hämaras, kus kolvikesed enam ei tööta, näeme ainult kepikesega. Sellist nägemist nimetatakse perifeerseks nägemiseks, sest ta toimub kollasest tähnist eemalolevate, n.-ö. perifeersete võrkkesta osadega.

Huvitav on märkida, et koht, kus silmanärv silma tuleb, ei sisalda üldse närviotsi, samuti kolvikesi ega kepikesi. Järelkult ta pole üldse valgusega värvitundlik. Seda kohta nimetatakse pimetähniks.

1. Koguni selge vee sees (silmad vee all) vaadates paistavad ümberolevad asjad segaselt. Mispärast?

2. Vaadelda raamatu teksti fikseeritud ja fikseerimata silmaga! Mida paneme tähele?

3. Määrata oma silma nägemise lähim punkt! Kas on mõlema silma nägemise lähim punkt sama?

4. Teha valgele paberile umbes 10 cm kaugusele teineteisest kaks tugevat musta risti! Katta üks silm kinni ja fikseerida teisega ühte neist ristidest! Kui silma kaugust paberist muuta, kaob teine rist vahel hoopis ära. Kuidas seda seletada?

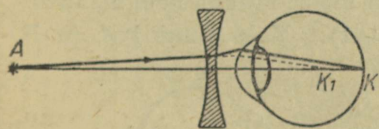
46. Kohastumine. Me näeme esemeid teravalt, kui nende kujutis langeb just võrkkestale. Et niihästi kaugeist kui ka lähedaist esemeist kujutis tekiks just võrkkestal, selleks peab silm kohastuma ehk akommodeeruma. Kohastumine toimub silmaläätse abil, mis võib oma kumerust muuta. Kui näiteks ese läheneb silmale ja seetõttu tema kujutis hakkab nihkuma võrkkesta taha, siis muutub silmalääts kumeramaks, koondab kiiri tugevamini ja me saame kujutise jällegi võrkkestal. Eseme eemaldumisel silmast toimub vastupidine nähtus.

Normaalsilm võib ilma erilise pingutuseta kohastuda lõpmatuses (kaugeim punkt) kuni 20—30 cm kauguseni. Viimast kaugust nimetatakse normaalsilma parima nägemise kauguseks. Teatud pingutusega aga võime teravalt näha veel lähemaid esemeid, näiteks 10 cm kaugusel olevaid. See nn. nägemise lähima punkti kaugus oleneb silmaläätse elastsusest, tema kohastumisvõimest, mis on nooremail inimestel märksa suurem kui vanemal.

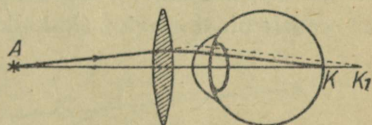
Silmalääts on ümbritsetud rõngakujulise ripslihasega, mille külge ta on kinnitatud õrnade niidikestega. Ripslihase rahulikus, tööta seisundis on lääts kõige lamedam, sest lääts külge kinnitatud niidikesed hoiavad teda pingul. Kui aga rõngakujuline ripslihas kokku tõmbub, siis lääts hoidvad niidikesed lõdveneivad, lääts saab vabaks ja muutub oma elastsuse tõttu ümmargusemaks, tema murdmisvõime suureneb. Kaob ripslihase pingutus, siis tõmbuvad lääts hoidvad niidikesed jälle pingule, lääts muutub lamedamaks, tema murdmisvõime väheneb.

Silmalääts koosneb sibulataoliselt üksikuist läbipaistvaist poolvedelaist kihtidest. Noortel on silmalääts väga elastne. Nii näiteks võib kümneaastase normaalsilm kohastuda koguni kuni 7 cm kaugusel olevate esemete teravaks nägemiseks. Mida vanemaks inimene saab, seda vähem elastseks muutub tema silmalääts, mis sklero-seerub, ja ühes sellega muutub vähem ulatuslikuks ka silma kohastumisvõime. Seetõttu terava kohastumise lähim kaugus nihkub vanusega silmast järjest kaugemale. Nii on terava kohastumise lähim kaugus 10-aastastel 7 cm, 20-aastastel 10 cm, 30-aastastel 13 cm, 40-aastastel 20 cm, 50-aastastel 40 cm; 60—70-aastastel puudub akommodatsioonivõime peaaegu täiesti.

47. Lühi- ja kaugelenägevus. Prillid. Nagu teame, on teravaks nägemiseks tarvilik, et eseme kujutis tekiks just võrkkestal. See pole aga alati nõnda. Lühinägijail on silma sügavus võrreldes silma murdmisvõimega liiga suur. Seetõttu tekib kaugemate esemete kujutis võrkkesta ees



61. joon. Lühinägija prill.



62. joon. Kaugelenägija prill.

(61. joon.). Selle puuduse kõrvaldamiseks kasutatakse prillina nõgusat (konkaav-) lääts, mis hajutab kiiri ning seetõttu nihutab kujutise jälle võrkkestale. Kaugelenägijal ümberpöörduvalt lõikuvad lähedate esemete kiired võrkkestaga enne, kui nad suudavad koonduda kujutiseks. Sel juhul tarvitatakse nägemise korrigeerimiseks prillina kumerat (konveks-) lääts (62. joon.).

Prilliklaasi nagu teistegi optiliste läätsede murdmisvõimet ehk optilist tugevust mõõdetakse dioptriates (D). Kumerlääts optiline tugevus on $+1$ dioptria, kui lääts fookuse kaugus $f = 1$ m. On lääts

$f = 0,5$ m, siis on tema optiline tugevus $D = 1 : 0,5 = 2$ dioptriad, jne. Üldse on lätse optiline tugevus

$$D \text{ (dioptriates)} = \frac{1}{f \text{ (meetrites)}}$$

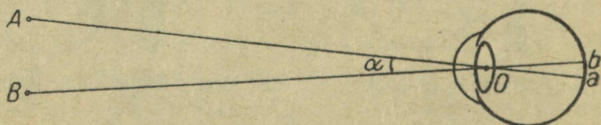
Kumerlätse dioptriade arvu märgitakse positiivse (+), nõguslätse dioptriade arvu negatiivse (—) arvuga, sest viimasel juhul on fookuse kaugus f negatiivne.

1. Kaugelenägiija vajab prilli +2,5 dioptriad. Milline on selle prilliklaasi fookusekaugus cm-tes?

2. Lühinägiija vajab prilli fookusekaugusega 25 cm. Milline on selle prilliklaasi optiline tugevus dioptriates?

3. Lühinägiija parima nägemise kaugus on 10 cm. Missugust prilli ta vajab, et parima nägemise kaugus oleks normaalne?

48. Vaatenurk. Kogemustest teame, et üksteise lähedal asuvad valguspunktid, kui nad on meist küllalt kaugel, liituvad vaatlemisel üheks (kaksiktähed). Kaks punkti A ja B



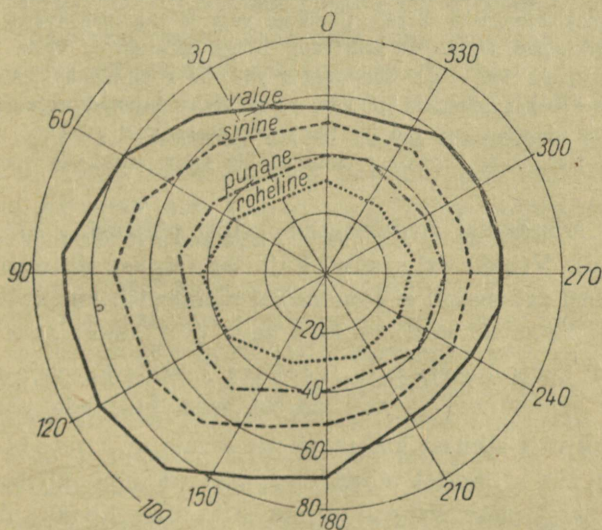
63. joon. Vaatenurk (α).

on ainult siis eraldi nähtavad, kui silma optilisest tsentrist (O) läbi antud punktide A ja B tõmmatud sihid annavad nurga vähemalt $1'$. Seda nurka nimetatakse vaatenurgaks. On kahe punkti vaheline vaatenurk väiksem kui $1'$, siis me ei näe neid punkte lahus, vaid nad liituvad üheks väikeseks kriipsukeseks. Lihtne arvutus näitab, et vaatenurga $1'$ saame, kui vaadelda teineteisest 3 mm kaugusel asetsevaid punkte 10 m kauguselt või 0,3 mm kaugusel olevaid punkte 1 m kauguselt või 0,1 mm kaugusel olevaid punkte 33 cm kauguselt. Nagu näha, ei suuda me sellist nurka ($1'$)

tema väiksuse tõttu käesoleval leheküljel kujutada. Vaatenurga suurendamiseks toome esemed silmale lähemale, sest esemetevahelise kauguse suurendamine pole alati võimalik.

1. Arvutada kraadides 63. joonisel kujutatud vaatenurga α suurus, mõõtes enne jooniselt vastavad kaugused!

2. Inimese juuksekarva keskmine jämedus on 0,03 mm. Kui kaugelt vaadates paistaks sellise juuksekarva jämedus meile nurgi 1'?



64. joon. Vasaku silma vaateväli.

3. Päikese läbimõõdu vaatenurk on keskmiselt 32'. Kui kaugel silmast peaks hoidma viiekopikast münti (nimetissõrme otsa), et ta Päikese täiesti kinni kataks?

4. Päike ja Kuu paistavad peaaegu sama vaatenurga all, ometi on Päike Kuust ligi 400 korda kaugemal. Kuidas seda seletada?

5. Missuguse vaatenurga all paistab inimene (pikkus 175 cm) 1 km kaugusel?

49. **Vaateväli.** Vaatevälja all mõistetakse seda osa ruumist, millest muutmatu vaatesuuna puhul saame võrkkestal veel selgesti tajutavaid kujutisi. Vaateväli oleks sümmeetriliselt ümmargune, kui silma ümbrus (nina ja kulmud) ümberolevast ruumist osa ära ei varjaks.

Suleme vasaku silma ja paneme tähele, mis me näeme parema silma vaateväljas, ning ümberpöördu!

Kahe silmaga vaatamisel saame keskosas mõlema silma ühise vaatevälja, kuna ärartele jääb kummagi silma jaoks sirbitaoline piirkond, milles võime näha ainult ühe silmaga.

Nagu 64. joonisest näha, on vaateväli kõige avaram valge valguse (hele, tume) tajumiseks üldse. Üksikute värvide tajumise vaateväljad on hoopis piiratumad, ühtlasi ka erinevad. Kõige piiratum on vaateväli rohelise värvi jaoks (30—40°), siis punase (40—50°) ja lõpuks sinise värvi jaoks (50—70°). Eelmisest järeldame, et värve tajuvad organid (kolvikesed) pole ühtlaselt jaotatud üle kogu võrkkesta, vaid esinevad peamiselt selle keskosas, kuna kepikesed ulatuvad üle kogu võrkkesta pinna.

50. **Mõningaid füsioloogilis-optilisi nähtusi.** a) Järelepildid. Võrkkestal saadud kujutise valguse tõttu tekkinud keemilised protsessid ei lõpe samal momendil, kui kaob kujutis, vaid kestavad veel lühikest aega ($\sim \frac{1}{10}$ sek) edasi, enne kui nad neutraliseeruvad. Seetõttu kestab ka valgusmulje esemest veel umbes $\frac{1}{10}$ sek pärast seda, kui teda põhjustav eseme kujutis silmast kadus, ja me saame nn. **positiivse järelpildi**. Sellel silma omadusel põhineb kiiresti üksteisele järgnevate valgusmuljete liitumine üheks pidevaks katkematuks muljeks, nagu me seda teame kinofilmist või mõnest kiiresti liikuvast esemest (rakett, lendtäht, liikuv hõõguguv süsi või taskulamp). Samal alusel seletuvad ka järgmised nähtused: harali sõrmedega kätt raamatu ja silmade vahel kiiresti edasi-tagasi liigutades võime läbi sõrmede vabalt lugeda; kiiresti pöörlev ventilaatori propeller muutub läbi-paistvaks jne.

Pikemat aega mõjuv samalaadne tugev valguserutus väsitab võrkkesta ja seetõttu tekivad nn. **negatiivsed jä-**

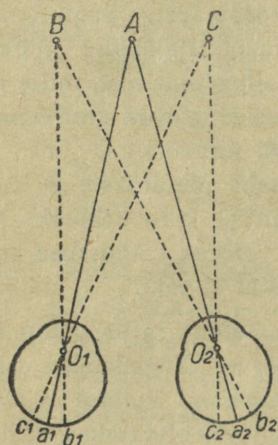
relpildid, s. o. pildid, mis oma heleduselt on endistele vastupidised. Kui näiteks liikumatult vaadelda hõõglambi hõõguvat niiti, siis saame hiljem järelpildina tumeda niidi heledal foonil. Vahel esinevad negatiivsed järelpildid ka täiendvärvides, kus näiteks punasele vastab roheline, kollasele sinine jne.

b) Irradiatsioon. Helendav hõõgniit näib meile tunduvalt jämedamana, kui ta on tööpoolest. Samuti noorkuu hele sirp näib tunduvalt suuremana ülejäänud „tuhkvalgusena“ paistvast osast. Seda meie silma omadust, mille põhjal heledasti valgustatud valged esemed näivad suurematena kui niisama suured tumedad esemed, nimetatakse irradiatsiooniks. Nähtuse seletamiseks oletatakse, et tugev valgustus erutab võrkkestal ka kujutise ääre naaberosakesi, mistõttu ese meile näib suuremana. Nõrga valgustuse puhul sellist kujutise suurenemist võrkkestal ei teki.

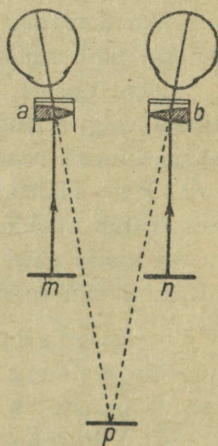
c) Värvipimedus on silma defekt, mille puhul silm pole suuteline eraldama üksikuid värve. Sagedamini esineb värvipimedus punase ja rohelise, harvemini kollase ja sinise värvi suhtes. Värvipimeduse seletamiseks oletatakse, et üksikuid värve tajuvad kolvikesed kas üldse puuduvad või on puudulikult arenenud. Huvitav on märkida, et värvipimeduse all kannatavad peamiselt mehed (4—5⁰/₀), kuna naistel esineb värvipimedus võrdlemisi harva (umbes 0,5⁰/₀).

d) Adaptatsioon. Nagu terava kujutise saamiseks tuleb silmal kohastuda, samuti tuleb tal kohaneda ka valgustusega üldse. Nii näiteks valgustatud toast öösel välja hämarasse minnes ei näe me algul peaaegu sugugi. Mõne aja pärast hakkavad aga silmad siiski päris hästi seletama. Kulub umbes pool tundi, et silm hämarusega päriselt harjuks. Sellist kohanemist valgustusega nimetatakse adaptatsiooniks. Ka hämarast valgusse minnes tuleb silmal kohaneda, kuid see nõuab võrdlemisi lühikest aega.

e) Nägemine kahe silmaga. Mõne eseme vaatlemisel saame kummaski silmas kujutise, kuid näeme siiski ühtainust eset. Selle põhjuseks on asjaolu, et mõlema silma võrkkesta vastavaist kohtadest, näiteks kollastest tähnidest väljuvad ärritused sulavad ajus kokku ühiseks pildiks. Sellise kujutiste asendite vastavuse mõlemas silmas saa-



65. joon. Nägemine kahe silmaga.



66. joon. Stereoskoop.

vutame eseme fikseerimisel mõlema silmaga. Kui aga kujutised tekivad võrkkestal mittevastavais kohtades, siis näeme eset kahekordselt. Näiteks 65. joonisel on mõlema silmaga fikseeritud punkti A , mille vastavais kohtades tekkinud kujutised võrkkestal on a_1 ja a_2 . A naaberpunktide B ja C vastavaiks kujutisteks võrkkestal on b_1 ja b_2 ning c_1 ja c_2 .

Elmise tõestuseks teeme järgmine katse. Hoia ühte sõrme umbes 30, teist 50 cm kaugusel silmast. Kui fikseerime ühte neist, siis näeme teist kahekordselt.

f) Ruumiline nägemine. Et meil on kaks silma, mis annavad samast esemest kujutised kahest eri kohast ruumis vaadatuna (silmade vahe on ~ 6 cm), siis saame sellest esemest ka ruumilise kujutise. Meil on võimalik kahe silmaga vaadates lähedalolevaid esemeid teatud määral nagu ümber haarata.

Fotopilt on tasapinnaline ja vastab kujutisele ainult ühes silmas. Kui teha samast esemest üks pilt nõnda, nagu seda näeks vasak silm, ja teine pilt nõnda, nagu seda näeks parem silm, ning mõlemad pildid vaatlemisel liita, siis saame sellest esemest ruumilise kujutise, just nagu oleksime teda tõepoolest vaadelnud kahe silmaga. Selliseks riistaks, millega saame kaks eri pilti liita üheks, on stereoskoop (66. joon.). Stereoskoobi peaosaks on kaks prisma a ja b , mis on pööratud murdvate nurkadega teineteise poole. Piltide vastavaist punktidest m ja n tulevad kiired murduvad prismades nõnda, et nad näivad väljuvat samast punktist p . Seetõttu saame kahe pildi asemel ühe, mis aga annab meile vaadeldavast esemest ruumilise kujutise.

1. Vaadelda natuke aega mõnd eredat värvi, näiteks punast või rohelist, ja katta siis kätega silmad! Mida näeme siis?
2. Värviliste järelpiltide abil määrata mõned täiendvärvide paarid!
3. Tugeva valguse käest hämarasse minnes määrata oma silmade adaptiooni aeg!

51. Kino. Kinematograaf ehk kino on eriline projektsiooniaparaat nn. kinopiltide projitseerimiseks ekraanile. Valgusmulje esemest kestab veel umbes 0,1 sek pärast seda, kui teda põhjustav eseme kujutis silmast kadus. Seepärast tehakse kinolindil ehk filmil kiiresti üksteise järel hulk silmapilkseid ülesvõtteid (umbes 16—25 ülesvõtet sekundis) ja projitseeritakse need erilise projektsioonilaterna abil üksteise järel sama kiiresti ekraanile. Muljed kiiresti üksteisele

järgnevaist ülesvõtteist, mida näeme ekraanil, liituvad ühte ja annavad meile nn. kinopildi.

Filmi liikumine kino projektsiooniaparaadi ees ei ole pidev, vaid katkeline, lükete kaupa. Seejuures langeb valgus ekraanile ainult siis, kui film seisab (umbes 0,04 sek). Filmi liikumise ajal (~ 0,02 sek) valgus ekraanile ei pääse. Selleks on kondensori ees pöörlev ketas, millesse on lõigatud sektori-kujulised avaused. Valgus pääseb ekraanile ainult siis, kui ketta ava on kondensori ees. Samal hetkel ka film seisab paigal.

Filmi liikumist kinoaparaadi ees kiirendades või aeglustades võime kiirendada või aeglustada projitseeritava sündmuse käiku. Viimast võtet kasutatakse nn. ajalubis, kus rida väga kiiresti üksteise järel tehtud ülesvõtteid (mitusada ülesvõtet sekundis) projitseeritakse aeglaselt ekraanile, mis hõlbustab nende jälgimist, näiteks hüpped.

52. Ajaloolisi märkusi. Nägemisprotsessi kohta oli vanaaja teadusmeestel kujunenud mitu vaadet. Pythagorase (umb. 500 a. e. m. a.) jt. arvates saadab silm välja erilisi nägemiskiiri, mis vastu esemeid põrgates meile need nähtavaks teevad. Vaatleja silma nägemiskiired nagu puudutavad või kombivad vaadeldavaid esemeid.

Sellise nägemisteooria aluseks olid ekslikult tõlgendatud tähelepanekud, et mõned inimesed ja loomad ka hämaras küllalt hästi näevad ja et mõnede loomade silmad hämaras läigivad („põlevad“). Samuti esitati selle vaate põhjenduseks asjaolu, et silm on väljapoole, kõrv aga sissepoole kumer. Sellest taheti järeldada, et silm saadab ise kiiri välja, kuna kõrv võtab vastu väljastpoolt meid tulevaid.

Hoopis vastupidisel seisukohal asusid Leukippos (V saj. e. m. a.) ja Demokritos (460—370). Nende arvates esemetest vahetpidamatult eralduvad aatomid on nagu esemete õrnad kestad või kujutised, mis liiguvad kiiresti läbi ruumi, tungivad silma ja seega võimaldavad esemete nägemist.

Ka ei puudunud kolmas, n.ö. kompromiss-seisukoht (Platon, IV saj. e. m. a.), mille järgi silmast väljuvad kiired kohtavad esemetest väljunud kujutisi ning nende mõlemate kohtumine võimaldab meile esemete nägemist.

Huvitav on märkida, et need vanaaja nägemisteooriad ei põhinenud katselisel alusel, vaid olid puht-spekulatiivset laadi. Kuigi algelised, püsi-

sid nad läbi kogu keskaja kuni uusaja alguseni. Lõpliku hoobi vanaaja nägemisteooriatele andis G. Porta oma töös „*Magia naturalis*“ (1553) kirjeldatud katsega esemete kujutise tekkimisest pisiava abil. Nüüd oli selge, et kujutis pidi tekkima mitte silmast, vaid ainult esemest väljuvaist kiirtest. Ühtlasi on see katse selgeks tõenduseks, et ka valgustatud esemetest väljuvad igas suunas valguskiired samuti kui lumineerivategi kehade puhul.

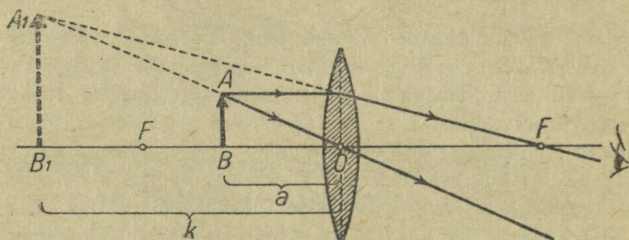
Silma ehitus oli üldjoontes tuntud juba Aristotelesele (384—322). Alhazen († 1038) annab silmast päris üksikasjaliku ja õige kirjelduse, seletab ka õieti kahe silmaga nägemist, kuid nägemine ise toimub tema arvates sel teel, et kujutised esemetest tekivad silmaläätsel. Maurolycus omistab silmaläätsele ta õige ülesande. Kepler aga oli esimene, kes täiesti õieti seletas kujutise tekkimist võrkkestal, samuti akommodatsiooni, lühi- ja kaugelenägevust ning irradiatsiooni. Pimetähni avastas Mariotte (1620—1684), kollase tähni aga Th. Sömmering tunduvalt hiljem (1796). Prillid võeti tarvitusele juba XIII sajandil, kuid alles Maurolycus andis nende kasutamise õige seletuse.

VII. Optilised riistad.

53. Optiliste riistade ülesanne. Kaks punkti vaatlemisel liituvad ühte, kui nendevaheline vaatenurk on väiksem kui 1' (§ 48). Vaatenurk on väike, kui vaadeldav ese ise on pisike või asub meist väga kaugel. Tahame vaadeldaval esemel enam peensusi näha, kui see palja silmaga võimalik, siis peame kunstlikult suurendama vaatenurka. Sellise kunstliku vaatenurga suurendamise annavad optilised riistad, nagu luup, mikroskoop, pikksilm. Kui mõne optilise riista, näiteks luubi abil vaadeldes kõik vaatenurgad palja silmaga võrreldes muutuvad 5 korda suuremaks, siis ütleme, et see optiline riist suurendab 5 korda.

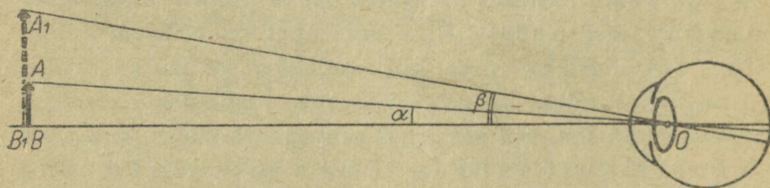
Lähedate väikeste esemete vaatlemisel kasutame luupi ja mikroskoopi, kaugete esemete vaatlemisel pikksilma (teleskoopi).

54. **Luup.** Luubina kasutatakse kumerat lääts. Asetame vaadeldava eseme AB läätsesse ja fookuse vahele fookuse F lähedale ning ehitame tema kujutise (67. joon.). Saame päripidise suurendatud ebakujutise A_1B_1 . Et mõnda eset, samuti ka kujutist on kõige kasulikum vaadelda vaatlaja



67. joon. Kiirtekäik luubis.

silma parima nägemise kauguselt (~ 25 cm), siis tuleb ese asetada luubist sellisele kaugusele, et ta kujutis tekiks just parima nägemise kaugusel luubist. Silma aga hoiame hästi luubi läheduses, et kujutisest rohkem valgust silma tuleks, sest kujutise suurus ei olene silma kaugusest luubist.



68. joon. Kujutise ja eseme vaatenurga võrdlus.

Luubi suurenduseks s nimetame kujutise A_1B_1 ja eseme AB vaatenurga suhet, kui vaadelda mõlemaid samalt kauguselt (68. joon.). Järelikult $s = \frac{\beta}{\alpha}$.

Geomeetriast teame, et ringi kesknurgad on võrdelised vastavate kaartega. Meie eelduste kohaselt on kujutis (A_1B_1) ja ese (AB) silmast samal kaugusel ($OB = OB_1$). Arvesta-

des nurkade α ja β väiksust, võime ilma tunduva veata neile vastavad ringi kaared, kus raadiuseks on $OB = OB_1$, asendada kujutise ja eseme suurustega. Seega siis $s = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{A_1B_1}{AB}$, s. o. luubi puhul võrdub suurendus ka kujutise ja eseme vastavate joonsuuruste suhtega.

Eelmise põhjal võime, kasutades 68. joonist, väljendada luubi suurenduse s järgmiselt:

$$s = \frac{\beta}{\alpha} \approx \frac{A_1B_1}{AB} = \frac{k}{a}.$$

Kumerlätse valemist $\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}$ määrame suhte $\frac{k}{a}$. Et antud juhul k on negatiivne, siis

$$\begin{aligned} \frac{1}{a} + \frac{1}{-k} &= \frac{1}{f}, \text{ millest} \\ \frac{k}{a} &= \frac{k}{f} + 1 \text{ ning} \\ s &= \frac{k}{f} + 1. \end{aligned}$$

Kui kujutist vaatleme parima nägemise p (tavaliselt 25 cm) kauguselt, siis $k = p$ ja

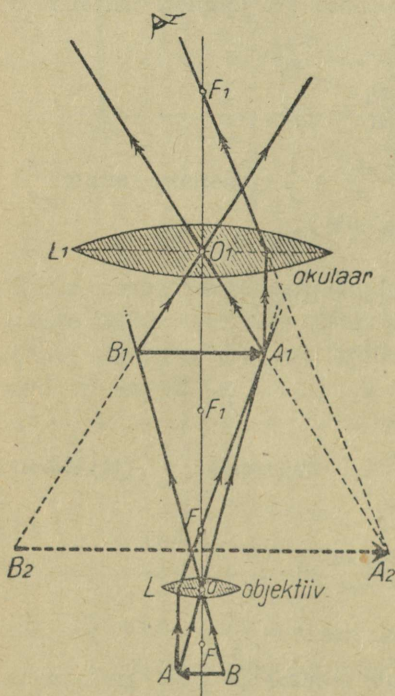
$$s = \frac{p}{f} + 1 = \frac{25 \text{ cm}}{f \text{ cm}} + 1.$$

Näiteks kui luubi $f = 5$ cm, siis $s = \frac{25}{5} + 1 = 6$ jne. Et parima nägemise kaugus sõltub silmast ja pole just päris jääv suurus, siis ka suurendus s kõigub teatud piirides. See tõttu on võimalik lihtsuse otstarbel suurenduse valemit $+1$ ära jätta ning anda ta kujul

$$s = \frac{p}{f},$$

nagu seda sageli tehaksegi.

1. Kumb näeb läbi luubi esemeid suuremana: kas lühi- või kaugelenägija?
2. Luubi optiline tugevus on 10 dioptriat. Mitu korda suurendab see luup normaalsilma puhul?
3. Millise fookusekaugusega kumerlääts suurendab normaalsilma puhul 6 korda?



69. joon. Kiirtekäik mikroskoobis.

55. Mikroskoop. Luubi suurendusvõime on võrdlemisi väike, keskmiselt 5—8 korda. Hoopis tugevamini (kuni 1000 ja enam korda) suurendab mikroskoop (kreeka k. *mikros* — väike ja *skopein* — nägema), mis koosneb kahest läätsede süsteemist: objektiivist (eseme läätsest) ja okulaarist (silma läätsest). Mikroskoobi ehitus ja kiirtekäik selgub skemaatilisest 69. joonisest. Vaadeldav ese on paigutatud objektiivile, fookusest natuke kaugemale. Seetõttu annab objektiiv esemest tõelise, suurendatud ja ümberpööratud kujutise A_1B_1 . Seda tõelist kujutist vaatleme okulaari kui luubi abil.

Okulaar annab kujutisest A_1B_1 päripidise suurendatud ebakujutise A_2B_2 , mida me näemegi mikroskoobis. Eseme endaga võrreldes aga on vaadeldav kju-

tis suurendatud ja ümberpööratud ebakujutis. Kui näiteks objektiiv suurendab 20 korda, s. o. tõeline kujutis A_1B_1 on 20 korda suurem esemest AB , ja okulaari kui luubi poolt tekitatud ebakujutis A_2B_2 on 5 korda suurem tõelisest kujutisest, siis on mikroskoobi kogusuurendus $5 \cdot 20$ ehk 100 korda. Üldse võrdub mikroskoobi suurendus (s) objektiivi (s_1) ja okulaari (s_2) suurenduste korrutisega, s. o. $s = s_1 \cdot s_2$.

Olgu objektiivi fookuse, eseme ja kujutise kaugused vastavalt f_1 , a_1 ja k_1 , okulaari fookusekaugus f_2 . Joonisest nähtub, et $s_1 = \frac{k_1}{a_1}$. Kumerläätsse valemist $\frac{1}{a_1} + \frac{1}{k_1} = \frac{1}{f_1}$ saame: $\frac{k_1}{a_1} = \frac{k_1 - f_1}{f_1}$. Seega $s_1 = \frac{k_1 - f_1}{f_1} \approx \frac{k_1}{f_1}$, sest f_1 on võrreldes k_1 -ga väike ja seetõttu võime ta ilma tunduva veata lugejast ära jätta. Okulaari kui luubi suurenduse s_2 kohta leidsime varem: $s_2 = \frac{p}{f_2} = \frac{25 \text{ cm}}{f_2 \text{ cm}}$. Järelikult mikroskoobi suurendus

$$s = s_1 \cdot s_2 = \frac{k_1}{f_1} \cdot \frac{p}{f_2}$$

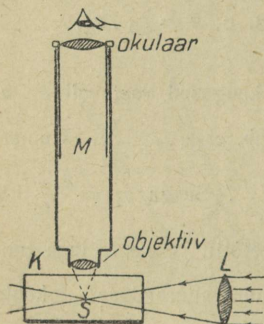
Teiselt poolt võrdub k_1 ligikaudu mikroskoobi toru pikkusega l . Asendades vastavad suurused, saame mikroskoobi suurenduse jaoks valemi lihtsamal kujul:

$$s = \frac{k_1}{f_1} \cdot \frac{p}{f_2} = \frac{lp}{f_1 f_2} = \frac{25 l}{f_1 f_2}$$

Nagu sellest suurenduse valemist nähtub, on võimalik mikroskoobi suurendust muuta, kui muudame objektiivi fookusekaugust f_1 ja okulaari fookusekaugust f_2 . Seepärast on iga parem mikroskoop varustatud mitme objektiivi ja okulaariga eriliste suurenduste saamiseks. Et ühes suurendusega kujutise valgustugevus väheneb, siis peab vaadeldav ese olema hästi tugevasti valgustatud. Seda tehakse erilise seade'lise — peeglite ja läätsede abil.

1. Mikroskoobi objektiivi fookusekaugus on 5 mm, okulaari oma 3.9 cm, parima nägemise kaugus 30 cm ja mikroskoobi pikkus 33 cm. Arvutada mikroskoobi suurendus!

56. **Ultramikroskoop.** Õige väikeste esemete, näiteks suitsu- või tolmukübemete vaatlemine mikroskoobis osutub võimatuks, sest nende väiksuse ja valguse difraktsiooni (paindumise) tõttu nad ei anna varju ning seetõttu kaovad ära valgustatud vaateväljasse. Selliste väikeste esemete vaatlemiseks kasutatakse nn. ultra- ehk pimeväljamikroskoopi, mille töötamise põhimõte selgub skemaatiliselt 70. joonisest.



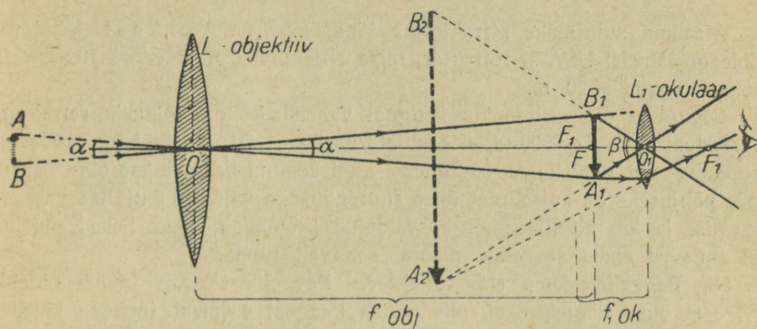
70. joon. Ultramikroskoobi skeem.

Mikroskoobi *M* ees on läbipaistvate seintega kast *K*, mis on täidetud näiteks suitsuga. Küljelt juhitakse kasti tugev valgusjuga, mis valgustab objektiivi fookuse lähedal olevaid suitsukübemeid *S*. Suitsukübemed peegeldavad neile langevat valgust igas suunas, järelkult ka mikroskoobi suunas, ning seetõttu paistavad nad meile mikroskoobis pisikeste heledate täpikestena tumedal foonil. Me ei saa siin vaadelda suitsukübemete pinda, mis on ühtlaselt heledasti valgustatud, küll aga võime neid loendada ning jälgida nende liikumisi (Brown'i liikumine). Oluline on siin hästi tugev kõrvaltvalgustus, mikroskoop vaid suurendab kübemetevahelisi kaugusi ning seega aitab neid üksteisest eraldada.

57. **Refraktor.** Kaugete esemete vaatenurga suurendamiseks kasutatakse pikksilmi ehk teleskoope (kreeka k. *tele* — kaugel ja *skopein* — nägema). Kui teleskoobis on objektiiviks kumerlääts, siis nimetatakse sellist teleskoopi refraktoriks (lad. k. *refrangere* — valguskiiri murdma), täidab aga objektiivi aset nõguspeegel, siis reflektoriks (lad. k. *reflectere* — tagasi painutama, peegeldama).

Refraktor samuti kui mikroskoopki koosneb kahest läätsede süsteemist: objektiivist ja okulaarist. Objektiiv annab kaugest esemest fookuse lähedal tõelise, vähendatud ja ümberpööratud kujutise. Seda tõelist kujutist vaatleme okulaariga kui luubiga ja

saame temast suurendatud päripidise ebakuju-
tise. Vaadelda 72. joonisel antud refraktori skeemi ühes
kiirtekäiguga kujutiste ehitamisel!



71. joon. Kiirtekäik refraktoris.

Luubi ja mikroskoobi puhul oli okulaaris vaadeldav kujutis esemest tõepoolest suurem, teleskoobis aga on nähtav kujutis vaadeldava esemega võrreldes hoopis väike. Mis on siis teleskoobi suurendus?

Analoogiliselt luubiga nimetame teleskoobi suurenduseks s okulaaris nähtava kujutise vaatenurga (β) ja eseme otsese vaatlemise vaatenurga (α) suhet, s. o. $s = \frac{\beta}{\alpha}$.

Et refraktori objektiivi abil saadud eseme kujutis AB on nii objektiivi kui ka okulaari fookuse lähedal (esimesest pisut väljaspool, teisest seespool), siis $OA_1 \approx f_{obj.}$ ja $A_1O_1 \approx f_{ok.}$

Edasi, vaadeldes kujutist A_1B_1 kui ringjoone kaart, mille raadiuseks on $OA_1 \approx f_{obj.}$, ja α -t kui sellele kaarele vastavat tsentraalnurka, võime kirjutada:

$$\alpha \text{ (radiaanides)} \approx \frac{A_1B_1}{f_{obj.}}, \text{ samuti } \beta \text{ (radiaanides)} \approx \frac{A_1B_1}{f_{ok.}}$$

Asendades saadud β ja α väärtused suurenduse valemisse,

saame:

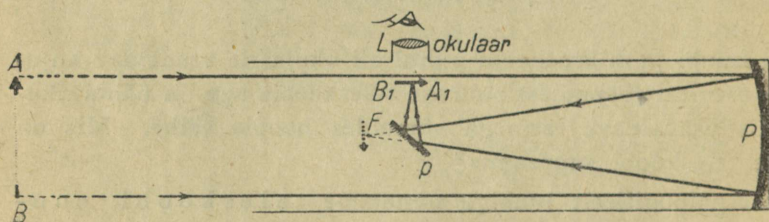
$$s = \frac{\beta}{\alpha} \approx \frac{A_1B_1}{f_{ok.}} \cdot \frac{f_{obj.}}{A_1B_1} = \frac{f_{obj.}}{f_{ok.}},$$

s. o. teleskoobi suurendus võrdub objektiivifookusekaugusega jagatud okulaari fookusekaugusega.

Maailma suurimaks refraktoriks tänapäeval on Yerkes'i tähetorni (Chicago lähedal USA-s) refraktor, mille objektiivifookusekaugus on 102 m ja fookusekaugus ~20 m.

Olgugi et okulaari fookusekaugust vähendades on võimalik refraktori suurendust tõsta 5—6000-ni, ei kasutata harilikult astronoomiistel vaatlustel suurendusi üle 1000 korra, suurendusi kuni 2000-ni kasutatakse õige harva. Selle põhjuseks on asjaolu, et ühes suurendusega väheneb kujutise valgustugevus, ja ka mittetäielikult kõrvaldatud kromatism ning teised puudused annavad endid suuremal määral segavalt tunda.

58. Peegelteleskoop ehk reflektor. Peegelteleskoobis täidab objektiivifookusekauguse aset suur nõguspeegel, mis annab kaugest esemest fookuse lähedal tõelise, vähendatud ja ümberpööratud kujutise (72. joon.). Seda kujutist



72. joon. Reflektori skeem.

vaadeldakse okulaari L kui luubi abil. Et aga teleskoobi toru sees osutub vaatlemine võimatuks, siis nõguspeegli optilise teljega 45° all seatud tasapeegliga P juhitakse kujutis ühele äärele, kust teda on võimalik okulaariga vaadelda. Sellise konstruktsiooni peegelteleskoobile andis esimesena Newton (1671). Okulaari paigutamiseks on kasutatud ka teisi viise, näiteks teleskoobi otsast (Herschel'i reflektor), peegli tagant, tehes peegisse väikese avause (Gregory ja Cassegrain'i viis), jt.

Reflektori suurendust arvutatakse samuti kui refraktorigi puhul valemiga $s = \frac{f_{\text{obj.}}}{f_{\text{ok.}}}$.

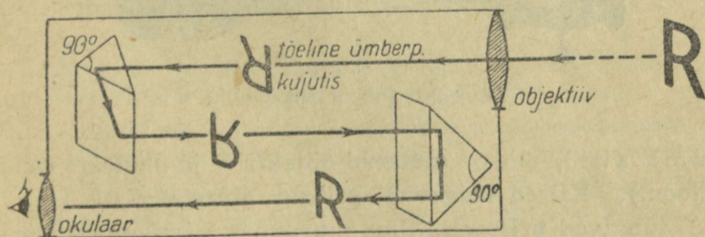
Seni oli suurimaks reflektoriks Mount-Wilsoni tähetorni reflektor Kalifornias. Selle reflektori hõbetatud klaaspeegli läbimõõt on 258 cm, fookusekaugus ~13 m ja koguraskus 4,5 tonni. Tänapäeva

suurimaks reflektoriks on Palomari mäel Kalifornias ülesseatud reflektor, mille peegli läbimõõt on 5 m ja fookusekaugus 16,8 m.

Reflektoritel on mitmeid paremusi, võrreldes refraktoritega. Objektiiivil puudub sfääriline ja kromaatilise aberratsioon: peegel on mitte sfääri, vaid paraboloidi pinna kujuline, mis koondab kõik rööpsed kiired täpselt ühte punkti, seega siis ilma sfäärilise aberratsioonita, samuti puudub peegeldumisel värvide dispersioon. Viimane reflektori omadus on eriti hinnatav fotograafiliste ülesvõtete ja teiste astrofüüsikaliste uurimiste puhul. Ka on reflektori peegli valmistamine palju hõlpsam refraktori objektiivi läätsede valmistamisest. Akromaatilise liitläätsse puhul tuleb täpselt lihvida 4 (vahel koguni 6) sfäärilist pinda, peegli puhul ainult üks. Suurimaks raskuseks aga selliste hiigelläätsede valmistamisel on läbipaistva, täiesti ühtlase klaasimassi (-tombu) valamine, mis peab olema ilma villideta ja eriliste pingeteta ning millest saaks lihvida refraktori objektiivi.

Refraktorite paremuseks, võrreldes reflektoritega, on nende vastupidavus, suurem sobivus täpsete mõõtmiste toimetamiseks ja hõlpsam käsitsus.

59. Prisma-pikksilm ja prisma-binokkel. Nii refraktor kui ka reflektor annavad vaadeldavaist esemeist ümberpööratud kujutised. Astronoomiliste vaatluste puhul pole see olu-

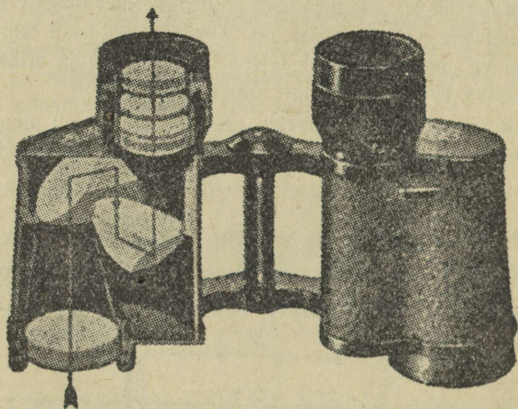


73. joon. Kujutise ümberpööramine prisma-pikksilmas.

line. Maapealsete esemete vaatlemisel aga on väga tähtis, et saaksime vaadeldavaist esemeist päripidised kujutised. Selle saavutamiseks kasutatakse pikksilmas kujutiste ümberpööramiseks kolmandat läätsse, mis objektiivi poolt tekitatud kujutise ümber pöörab, enne kui me

teda okulaariga vaatlema hakkame. Seetõttu muutuvad nii-
sugused maapikksilmad ehk kiikrid liiga pikaks
ning ühes sellega ebasobivaks kasutamisel. Hoopis praktili-
semad on maapealsete esemete vaatlemisel nn. prisma-
pikksilmad ja prisma-binoklid.

Prisma-pikksilm koosneb nagu refraktorgi objektiivist ja
okulaarist, kuid annab päripidised kujutised. Kujutiste
ümberpööramine toimub kahe täisnurkse



74. joon. Prisma-binokkel.

prisma abil, mis on asetatud objektiivi ja okulaari vahele
(73. joon.). Kiired langevad prisma alusele risti (vt. 73.
joon.), tungivad prismasse ilma murdumata ja langevad pris-
ma tagumisele sisepinnale nurgi 45° . Et siin langemisnurk
klaasis (45°) on suurem täielise sisepeegeldumise piirnurgast
kiirte murdumisel klaasist õhku (42°), siis peegelduvad
kõik kiired täielikult. Samuti peegelduvad täielikult
kõik kiired prisma teisest tagumisest pinnast. Kahekordse
sisepeegeldumise tulemusena väljuvad kiired prismast ümber-
pööratuina prisma murdvat serva läbiva ja alusega risti oleva
tasapinna suhtes. Et meil on vaja kujutis ümber pöörata

kahe teineteisega risti oleva tasapinna suhtes (parem — vasak, ülemine — alumine), siis lastakse esimesest prismast väljunud kiired teise, esimesega risti asetatud prismasse. Teine prisma pöörab kujutise veel kord ümber ja me saame okulaari ees esemega võrreldes päripidise kujutise, mida vaatleme okulaariga kui luubiga. Kujutise ümberpööramise käik prisma-pikksilmas on skemaatiliselt kujutatud 73. joonisel. Vaadelda seda!

Kahest prisma-pikksilmast koosnevat teleskoopi nimetatakse prisma-binokliks (74. joon.). Prismad mitte üksnes pööravad kujutise ümber, vaid teevad ka binokli hästi lühemaks, sest ühe pika kiire asemel saame n.-ö. viiekordseks kokkumurtud kiire. Objektiivide suurem kaugus teineteisest, võrreldes okulaaridega, soodustab ka ruumilist nägemist. Kõigi nende paremuste tõttu on prisma-binoklid laialdast kasutamist leidnud, eriti sõjaväes välibinoklitena.

Nn. teatri-binokkel koosneb kahest Galilei pikksilmast, kus objektiiviks on kumer- ja okulaariks nõguslääts. Nende suurendus on harilikult 3—5 korda.

1. Mispärast teleskoobi objektiiv on suur ja pika fookusega, kuna mikroskoobi objektiiv on ehitatud just vastupidiselt?

2. Kinnistähtede vaatlemisel ka suurimate teleskoopidega nende vaatenurk ei suurene. Mis kasu on siis teleskoobist kinnistähtede vaatlemisel?

3. Millise läbimõõduga tõelise kujutise annab Tartu Ülikooli tähetorni Fraunhofer'i refraktori objektiiv ($f = 450$ cm) Päikesest? Millise läbimõõduga maailma suurim refraktor ($f = 18,9$ m)?

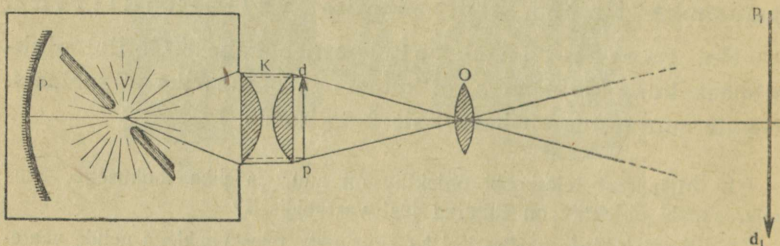
60. Ajaloolisi märkusi. Esimesed kumer- ja nõgusläätsed koosnevad pikksilmad, samuti mikroskoobi valmistas hollandi prillimeister Zacharias Jansen koos oma isaga 1590. ja 1609. a. vahel. Klaasilihviija Lipperseim (Lippersheim) omandas Jansenitelt nende oskuse (1609) ja hakkas pikksilmi suuremal määral müügiks valmistama. Teated Hollandis leitud pikksilmast ulatusid Galilei'ni, kes 1610. a. iseseisvalt ehitas seda tüüpi väga hea pikksilma, millega tegi rea astronoomilisi avastusi (Päikese laigud, Kuu mäed, Jupiteri kaaslased, Veenuse faasid jm.).

Kahest kumerläätsesest koosneva astronoomilise pikksilma (teleskoobi) ehitusskeemi esitas esimesena J. Kepler oma 1611. a. ilmunud töös „*Dioptrice*“. Mõni aasta hiljem (1613) ehitas selle skeemi järgi pikksilma jesuiit Chr. Scheiner.

Esimese peegelteleskoobi valmistas I. Newton a. 1668, kuna sellise teleskoobi kirjelduse andis inglise astronoom James Gregory juba 1663. a.

Prisma-binoklite ehitusprintsibi leiutas esimesena itaalia insener I. Porro 1850. a., kuid katsed ehitada prisma-binoklit ebaõnnestusid tehnilistel põhjustel. Teiskordselt leiutas prisma-binokli sakslane prof. E. Abbe 1893. a. Tema kavade järgi hakkas Zeiss'i firma neid müügiks valmistama.

61. Projektsioonilatern. Projektsioonilaterna ülesandeks on tugeva reguleeritava valgusjoa tekitamine. Selleks kasutatakse seestpoolt mustaks värvitud kinnist kasti, mille



75. joon. Projektsioonilaterna skeem.

keskele on asetatud mõni tugev valgusallikas, nagu hõõg- või leeklamp (joon. 75). Valgusallikast *V* tulev tugev valguskimp koos nõguspeeglist *P* peegeldunud valgusega langeb kumerläätsede süsteemile *K*, mis kannab kondensori (tihendaja, koondaja) nime ja mille ülesandeks on temale langeva valguse koondamine. Kondensorist väljunud kiirtekimp annab tugeva valgusjoa, mida kasutatakse väga mitmesugusteks otstarveteks, nagu diapositiivide ehk valguspiltide näitamiseks, mitmesugusteks läbinähtamatute esemete projek-

timiseks, füüsika (optika) katsete demonstreerimiseks, kinoks jne.

Näiteks läbipaistva valguspildi ehk **diapositiivi** ekraanile projektimiseks paigutame ta otse kondensori ette (dp). Sedaviisi tugevasti valgustatud diapositiivist tekitame kumerlääse (objektiivi) O abil kujutise ($d_1 p_1$) ekraanil. Kui kujutise nn. **joonsuurendus** on näiteks 20, siis on kujutise pindala $20 \cdot 20$ ehk 400 korda suurem diapositiivi pindalast (pindsuurendus). Järelikult ekraani valgustustugevus on 400 korda väiksem diapositiivi valgustustugevusest. Sellest nähtub tugeva valgustuse vajadus diapositiivide projektimisel.

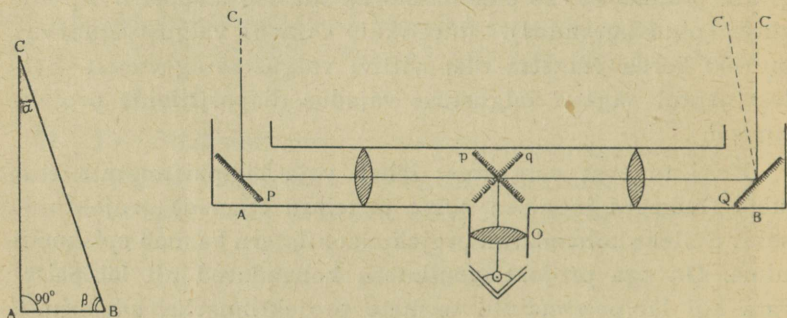
Eriti tugevat valgustust läheb vaja läbipaistmatute esemete (raamatu joonised, tekst ja teised esemed) projektimiseks. Selleks kohandatud projektsioonilatern kannab **episkoobi** nime. On aga projektsioonilatern kohandatud nii läbipaistvate kui läbipaistmatute esemete projektimiseks, siis nimetatakse teda **epidiaskoobiks** (kreeka k. *epi-* — pealt, *dia-* läbi, *skopein* — nägema).

1. Millised kujutised annab projektsioonilatern ekraanil?
2. Kus kohal objektiivi fookuse suhtes peab asetsema diapositiiv?
3. Kas on võimalik ainult objektiivi nihutamisega muuta kujutise suurust ekraanil, kui diapositiivi ja ekraani vaheline kaugus on konstantne?

62. Sõjatehnikas kasutatavaid optilisi riistu. Praegusa aja sõjas leiavad kasutamist väga mitmekesised optilised nähtused ning riistad. Periskoop (vt. § 20) on allveelaeva ja kaeviku silmaks, mis võimaldab vaenlase jälgimist ilma ennast ohustamata. Võimsad prožektorid valgustavad lennukite maandumiskohti ja otsivad vaenlase lennukeid pimedas. Binokkel on asendamatuks abiliseks mitte üksi luurekäikudel, vaid ka üldisel orienteerumisel maastikul, samuti tulejuhtimisel. Valgussignaaliid leiavad laialdast kasutamist sidepidamisel. Kauguste mõõtmiseks, mis on väga oluline täp-

seks tulejuhtimiseks, kasutatakse erilisi kauguse mõõtjaid. Skemaatiliselt kujutab ühe sedaliiki riista põhimõtet joon. 76.

Täisnurksest kolmnurgast ABC nähtub, et $AC = AB \cdot \tan \beta$. Kui AB ja β on teada, siis on teada ka kaugus AC . Sellel põhinebki joonisel 76 antud kauguse mõõtja ehitus.



76. joon. Kauguse mõõtja skeem.

Pika toru AB otstes on asetatud täisnurgi peeglid P ja Q . Toru keskel aga on neile vastavalt rööpsed peeglid p ja q , mis on risti üksteise peal ja ulatuvad ainult peeglite P ja Q poole laiuseni. See võimaldab külje pealt (eest) näha peeglitest P ja Q tulevaid kiiri korraka. Nad annavad kujutised kohakuti samal sirgel.

Väga kaugest esemest C tulevad rööpsed kiired CA ja CB pärast peegeldumist lähevad toru AB telje sihis, peegelduvad ristiolevatest peeglitest p ja q ning juhitakse nende poolt toru O kaudu vaatleja silma. Mõlema toru kaudu saadud kujutised sel juhul liituvad. On aga vaadeldav ese võrdlemise lähedal, siis nurk C ei võrdu nulliga, kujutised ei liitu ja meil tuleb kujutiste liitmiseks viimiseks pöörata näiteks peeglit Q . Sellest pöördumisnurgast saamegi nurga C , mille abil hindame kaugust AC , sest toru pikkus AB on teada.

VIII. Valgus lainetusnähtusena.

Huygens'i printsiip.

63. Vaateid valguse loomu kohta. Valgus on energia, seega kandub valguse levimisel energia ühest kohast teise. Me tunneme kahte energia edasikandumise viisi: liikuvate kehade abil ja lainetuse näol. Esimesel juhul liikuivad kehad, näiteks visatud kivi või kahurikuul, sisaldavad oma liikumise hoo tõttu energiat, mis võib edasi kanduda ja muutuda tööks hoopis eemal liikumise lähtekohast. Liikuvaks kehadeks, mis energiat edasi kannavad, ei tarvitse alati olla suured, silmale nähtavad kehad, vaid energia võib edasi kanduda ka ülipisikeste, meile nähtamatute osakeste (molekulid, aatomid, elektronid) liikumise kaudu.

Energia teise, lainelise levimisega tutvusime akustikas. Selle energia levimisviisi puhul on alati paratamatult tarvilik mõni aineine keskkond (õhk, vesi, puu, raud jne.), mille kaudu lainetusenergia edasi kandub. Tühjas ruumis hääl ei levi.

Vastavalt neile kahele energia edasikandumise viisile tekkis juba varakult (XVII saj.) kaks täiesti erinevat vaadet valguse loomu kohta. Esimese, nn. korpuskulaarse valgusteooria (ehk emissiooniteooria) põhjendajaks oli Newton (1643—1727), teise, lainetusteooria põhjendajaks oli Huygens (1629—1695). Korpuskulaarse valgusteooria järgi on valgus eriliste pisikeste valguskehakeste — korpusklite liikumine. Valguskorpusklid levivad valgusallikast ja silma sattudes tekitavad valgusaistingu.

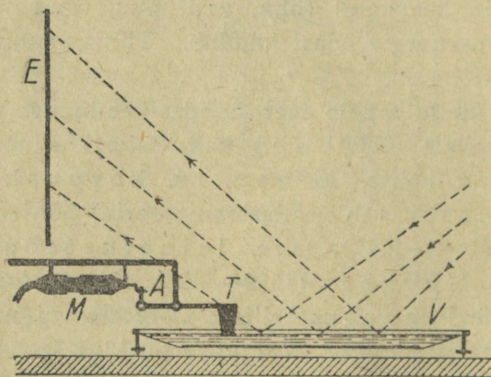
Pegeldumisnähtuste seletamiseks oletas Newton, et valgusaine osakesed, langedes peegeldavale pinnale, pörkavad sealt tagasi nagu täiesti elastsed kuulikesed. Murdumisnähtuste seletamiseks oletas Newton, et ümbritseva keskkonna osakesed tõmbavad valgusaine osakesi, ja seda tugevamini,

mida tihedam on keskkond. Seega peab valgusosakeste kiirus tihedamas keskkonnas suurem olema kui hõredamas.

Lainetusteooria järgi on kogu maailmaruum täidetud erilise keskkonnaga, mis kannab eetri nime ja milles valguse lainetus levib. See eetrihüpotees oli tarvilik, sest ilma selleta näiteks puuduks meil vahendaja, mis kannaks valguse lainetuse Päikeselt ja tähtedelt läbi tühja maailmaruumi Maani.

Esiälgu pöörati Huygensi teooriale vähe tähelepanu, mis on osaliselt seletatav Newtoni väga suure autoriteediga. Hiljem, kui avastati rida nähtusi, mida ei suudetud seletada emissiooniteooria abil, leidis valguse lainetamise teooria tunnustamist.

Kas valgus on lainetus või koosneb ta nn. valgusaineosakestest, selle küsimuse lahendamiseks tuleb näidata, kas valgus nagu häälgi annab interferentsi või mitte. Nagu katsed näitavad, interfereeruvad valguskiired nagu häälainedki. Sellest peame järeldama, et valgus on lainetus.



77. joon. Laineaparaat.

64. Laineaparaat. Laineliikumise lähemaks uurimiseks tarvitatakse erilist laineaparaati, mille abil võib tekitada laineid veepinnal ja neid siis lähemalt uurida.

Laineaparaat koosneb suuremast madalast veevannist ja lainetekitajast. Lainetekitajaks on kangitaoline vasar, mis võib võnkuda varre keskelt läbimineva horisontaalse telje ümber. Varre teine ots on ekstsentriliselt kinnitatud väikese elektrimootori võlli külge. Mootori pöörlemisel võngub vasar üles-alla, tekitades vannis veelaineid. Kui seda veepinda valgustada tugeva valgusallikaga, siis toob veepinnalt peegeldunud valgus valgel ekraanil nähtavale veelainete tekkimise ja kulgemise.

Christiaan Huygens (l.: hõigens), kuulub hollandi füüsik, matemaatik ja astronoom (1629—1695). Huygens on XVII sajandi suurimaid teadusmehi ja leiutajaid. Tema tähtsamad teaduslikud tööd käsitlevad kehade elastseid pörkeid, füüsilise pendli teooriat ja valguse lainetamise teooriat. Samuti tähtsad on Huygensi leiutised. Huygens leiutas pendlikella, mille kirjeldus ilmus 1656. a., ja ehitas pikksilma, mille jaoks leiutas uue okulaari. Selle pikksilmaga avastas ta Saturni rõnga tõelise kuju, Saturni esimese kuu ja Orioni udukogu.

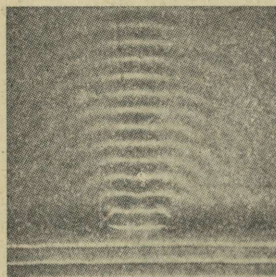


Christiaan Huygens.

65. Huygensi printsiip. Tekitame laineaparaadi vannis veelaine ja asetame selle ette kitsa pilu. Siis lähtub pilust uus ringikujuline lainetus, nagu oleks pilu ise laineallikas.

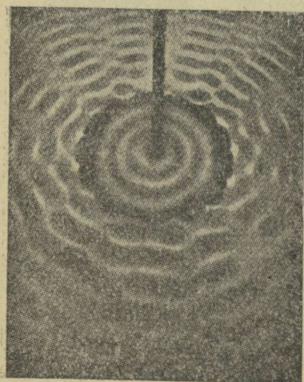
See uus laine tekib ka siis, kui pilule langeb ringikujuline laine.

Nüüd paigutame vanni ringikujulise vaheseina mõne piluga ja selle keskel tekitame ringikujulise lainetuse (pealaine). Igast pilust lähtub uus ringikujuline lainetus.

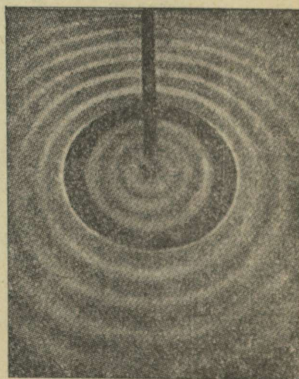


78. joon. Huygensi printsiip.

Kordame sama katset, tarvitades suure hulga piludega varustatud ringikujulist vaheseina. Nüüd levivad lained piludest läbi, nagu poleks vaheseina olemaski. Seega pilu taga tekkinud ringlained liitudes tekitavad meile nähtava lainetuse edasileviva ehk -kulgeva pealaine. Need katsed näitavad, et iga punkt, kuhu jõuab laine, muutub ise laineallikaks, kust lained levivad igas suunas. Seda nähtust tuntakse füüsikas nn. **Huygensi printsipi** nimetuse all.



79. joon.



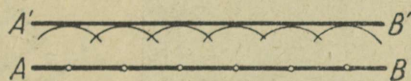
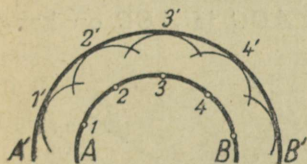
80. joon.

Veelainete levimine läbi pilude: joon. 79 — pilude arv väike, joon. 80 — pilude arv suur.

Iga punkti mistahes lainepinnal võib vaadelda kui laineallikat, millest lähtuvad ringlained.

Neid ringlaineid nimetatakse elementaarlaineks, elementaarlainete liitumisel tekkinud lainet aga pealaineks.

Joonis 81 kujutab ringlaine tekkimist Huygeni printsiibi alusel. 1, 2, 3 on elementaarlained. Nende liitumisel tekib pealaine pind $A'B'$, mis on Huygeni järgi elementaarlainete pindade mähispind.



81. joon. Ringlaine tekkimine Huygeni järgi. 82. joon. Tasapinnalise laine tekkimine Huygeni järgi.

Joonis 82 kujutab samasugust tasapinnalise laine tekkimist. Pealaine taga hävivad elementaarlained interferentsi tõttu.

66. Lainete peegeldumine. Langeb laineaparaadi vannis veelaine vanni asetatud vaheseinale (peeglile), siis, nagu näitab katse, peegeldub laine sellest tagasi.

Laine peegeldumist võime seletada Huygeni printsiibi põhjal järgmiselt.

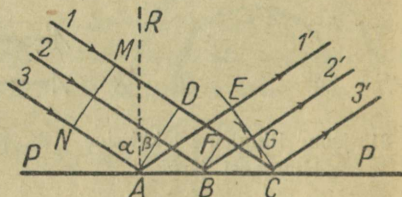
Langegu väga kaugel olevast laine tsentrist laine kaldu peeglile PP . Et laine tsenter on väga kaugel, siis on laine kiired 1, 2, 3 isekeskis ligikaudu rööpsed, nendega on risti lainerinne (-front) AD . Aja kestel, millal äärmine kiir 1 jõuab D -st C -ni, tekib Huygeni printsiibi järgi punkti A

ümber pool elementaarlainet raadiusega $AE = DC$, samuti B -st lähtub elementaarlaine raadiusega $BG = FC$. Neil elementaarlainel samuti kui teistel A ja C vahel olevaist punktidest lähtunud elementaarlainel on ühine puutepind EC . Sellest järgneb, et EC on peegeldunud liitlaine rinne, sellega risti olevad raadiused AE ja BG on peegeldunud laine kiired.



83. joon. Lainete peegeldumine.

Tõmbame ristjoone RA , siis on nurk $NAR = \alpha$ langemisnurk ja nurk $RAE = \beta$ peegeldumisnurk. Täisnurksed kolmnurgad ADC ja AEC on kong-



84. joon. Lainete peegeldumine Huygensi järgi.

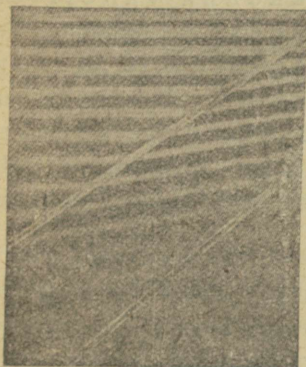
ruentsed, sest peale ühise hüpotenuusi AC külge $AE = DC$. Siit järeldub, et $\sphericalangle DAC = \sphericalangle ECA$. Et $\sphericalangle DAC = \alpha$ ja $\sphericalangle ECA = \beta$ (küljed on üksteisega risti), siis ka $\sphericalangle \alpha = \sphericalangle \beta$. Seega järgneb Huygensi printsiibi põhjal:

Tasapinnalise laine peegeldumisel on langemisnurk võrdne peegeldumisnurgaga.

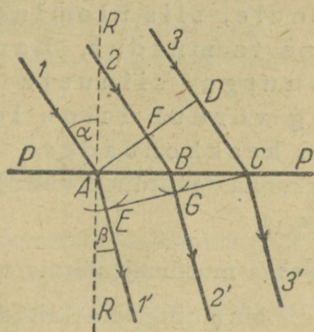
67. Lainete murdumine. Asetame laineaparaadi vanni põhjale tasase plaadi, näiteks peegliriba, mille kohal on siis veekiht õhem. Laseme langeda klaasiribale kaldu tasapinnalise laine.

Katse näitab, et peeglriba kohal veelained murduvad. Seda nähtust põhjustab veelainete väiksem levimiskiirus riba kohal.

Lainete murdumise seaduse võime tuletada Huygeni printsiibist. Olgu PP tasapinnaline piirpind kahe keskkonna vahel ja lainete levimiskiirus ülemises keskkonnas v_1 , alumises v_2 . Tasapinnaline laine langeb kaldu sellele piirpinnale. Sama aja kestel, millal ülemises keskkonnas äärmine kiir 3 levib D -st C -ni, tekib alumises keskkonnas A ümber elementaarlane raadiusega AE . Et DC ja AE kulgemiseks kulus



85. joon. Lainete murdumine.



86. joon. Lainete murdumine Huygeni järgi.

laine kiirtel sama ajavahemik, siis sellest järeldub, et $DC : AE = v_1 : v_2$, millest $AE = \frac{v_2}{v_1} \cdot DC$. Samuti tekib Huygeni printsiibi põhjal punkti B ümber elementaarlane raadiusega BG , kusjuures $BG = FB \frac{v_2}{v_1}$. Sama võib öelda kõikide A ja C vahel olevate punktide kohta.

Huygeni printsiibi põhjal on nende elementaarlainete ühine puutepind EC alumises keskkonnas leviva murdunud laine rinn. Sellega risti olevad sihid AE ja BG on murdunud laine kiired.

Tõmbame punktis A keskkondade piirpinnale langemisristjoone RR , siis moodustab see ülemises keskkonnas lainekiirega langemisnurga α ja alumises keskkonnas murdumisnurga β . Kolmnurkadest ADC ja ACE järgneb: $DC = AC \cdot \sin \alpha$ ja $AE = AC \cdot \sin \beta$. Jagades need avaldised teineteisega saame

$$\frac{DC}{AE} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2} = \text{const.}$$

Selle võrrandiga saame nn. murdumisseeduse: Kui lainelangeb kaldu kahe keskkonna vahelisele pinnale, siis üleminekul ühest keskkonnast teise ta murdub. Langemisnurga ja murdumisnurga siinuste suhe on konstantne ning võrdub laine levimiskiiruste suhtega neis keskkondades. Seda suhet nimetatakse teise keskkonna **murdumisnäitajaks** esimese keskkonna suhtes ($n_{1,2}$).

Seega murdumisnäitaja $n_{1,2} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$. Kui $v_1 > v_2$, siis $\sin \alpha > \sin \beta$ ning lainekiired murduvad ristjoonele lähemale. On aga $v_1 < v_2$, siis $\alpha < \beta$ ja lainekiired murduvad ristjoonest eemale. Keskkonda, milles laine levimiskiirus on väiksem, nimetatakse optiliselt tihedamaks, teist hõredamaks.

Et häälel on õhu lainetus, siis on arusaadav, et siin tuletatud peegeldumis- ja murdumisseedused kehtivad samuti häälele kohta, nagu me seda akustikast teamegi. Ka valguse peegeldumise ja murdumise kohta kehtivad samad seedused.

Eelmisest näeme, et valguse peegeldumise ja murdumise nähtusi on võimalik lihtsalt seletada ka Huygeni printsibiist lähtudes.

68. Ajaloolisi märkusi. Valguse korpuskulaarse ehk emissiooni teooria põhjendajaks oli I. Newton. Niisama vana kui valguse korpusku-

laarne teooria on valguse lainetuse teooria, mille püstitas Newtoni kaasaeglane Chr. Huygens. Esiialgu pöörati Huygensi lainetusteooriale vähe tähelepanu, mille põhjuseks oli Newtoni kõrge autoriteet. Valguse difraktsiooni avastas F. M. Grimaldi (1613—1663), kes pani tähele, et valgus + valgus võivad teineteist kustutada. Grimaldi poolt avastatud nähtust, samuti ka mitmeid teisi valgusnähtusi seletasid Huygensi eeskujul Th. Young ja R. Hooke lainetusteooria abil, kusjuures Hooke oletas, et valgus on transveraalne ehk ristlainetus. Aastal 1822 näitas A. Fresnel (1788—1827), et valgus annab interferentsi nagu häälelainedki, millega ta tõestas valguse lainetamise iseloomu. Hiljem mõõtis Foucault valguse kiirust vees ja leidis, et see on väiksem kui õhus, vastupidiselt Newtoni oletusele, mille järgi valguse kiirus vees pidi olema suurem kui õhus. Seega leidis valguse lainetuse teooria lõpliku tunnustuse.

Möödunud sajandi teisel poolel püstitas C. Maxwell valguse elektromagnetilise teooria, mille järgi valgus on elektromagnetiline lainetus.

IX. Valguse interferents.

69. Veelainete interferents. Lainetusi iseloomustab interferents, s. o. lained liitudes kas tugevdavad või nõrgendavad üksteist. Vaatleme lähemalt kahest teineteisele lähedal olevast punktist väljunud lainete interferentsi.

Asendame laineaparaadis lainetekitaja ühekordse vasara kahekordse vasaraga. Sellega saame kaks punktikujulist laineallikat. Nimetame neid *A* ja *B*. Et mõlemad vasarad võnguvad ühesuguse sagedusega, siis levivad neist punktidest ka ühesuguse sagedusega ringikujulised lained.

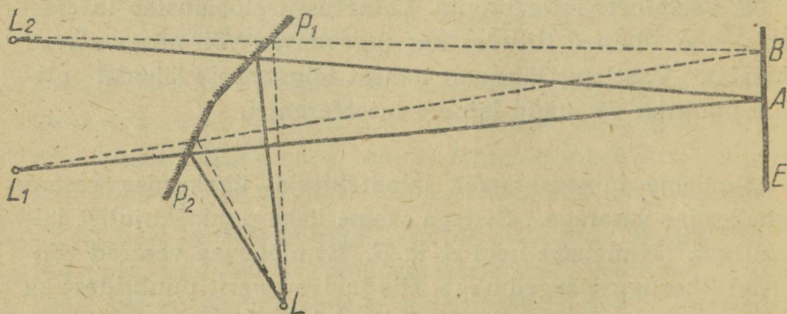
Mõlemad lained, jõudes mingisse punkti, panevad seal olevad veosakesed võnkuma, kusjuures nad vastastikku teineteist kas tugevdavad või nõrgendavad. Tugevdavad üksteist need lained, millede laineharjad või lainepõhjad saabu-
vad ühte ja samasse punkti. Vastupidist näeme, kui ühe laine

hari jõuab sinna üheaegselt teise laine põhjaga. Et mõlemad vasarad võnguvad üheaegselt ehk sünkrooniliselt, siis järgneb sellest, et kõik osakesed, mis on ühekaugusel laineallikast A ja B , saavad samasuunalise tõuke kummaltki lainelt, seega



87. joon. Lainete interferents.

nende võnkumise liitumisel tekib suurema amplituudiga võnkumine. Niisugune võnkumiste tugevdamine ilmneb punktides, mis on läbi AB keskkoha tõmmatud ristjoonel, sest kõik punktid sellel joonel on A -st ja B -st ühekaugusel. Samuti tugevdavad lained teineteist kohtades, kus B kaugus on A kaugusest ühe lainepikkuse λ , 2λ , 3λ , ... võrra suurem või, ümberpöörduvalt, A kaugus on sama võrra suurem B kaugusest.



88. joon. Fresneli peeglikatse.

Joonisel 87 on näha kohad, kus võnkumised üksteist tugevdavad. Nende vahel on alad, millede kauguste vahe A -st ja B -st või ümberpöörduvalt on $\frac{\lambda}{2}$, $3\frac{\lambda}{2}$, $5\frac{\lambda}{2}$, ... Neisse punkti-

desse jõuavad lained nii, et annavad veosakestele vastassuunalisi tõukeid, mistõttu nende võnkumine kustub.

70. Fresnel'i peeglikatse. Valguse interferents. Esimesena õnnestus *A. J. Fresnelil* (loe: frenél) katseliselt näidata, et valguslained interfereeruvad nagu teisedki lained, näiteks vee- ja häälelained. Selle katsega tõestas Fresnel lõplikult valguskiirte lainelise iseloomu.

Fresneli järgi võib valguse interferentsi näidata järgmise katsega (joon. 88). Kahele peeglile P_1 ja P_2 , mis on asetatud teineteise suhtes 180° -st väga vähe erineva nurga all, langeb valgusallikast L läbi kitsa pilu ühevärviline ehk monokromaatiline valgus. Seetõttu tekib kummaski peeglis valgusallikast L üks ebakujutis. Tähistame need ebakujutised L_1 ja L_2 . Nii viisi saame kaks valgusallikat, milledest väljuvad valguslained võivad anda interferentsi, nagu see esines kahe veelaine allika puhul eelmises paragrahvis. Peeglitelt peegeldunud valgus langeb ekraanile E , millele valgusallikalt otseselt valgust ei lange. Nagu katse näitab, on punktis A , mis asub läbi sirge L_1L_2 keskkoha tõmmatud ristjoonel, hele riba ja sellest kahele poolele vaheldumisi tumedad ja heledad jooned.



89. joon. Interferentsjooned Fresneli peeglikatse puhul.

Kujutleme, et L_1 -st ja L_2 -st lähtuvad valguslained, siis A -sse jõudes on nende võnkumised ühesuunalised ehk, nagu öeldakse, samas faasis, sest $L_1A = L_2A$, seega on nende kiirte käiguvahe null. Nii tugevdavad võnkumised üksteist ja tekib hele joon või riba. Kui aga mingisse

teise punkti B jõudnud kiirte käiguvahe $L_1B - L_2B$ on võrdne poole lainepikkusega, siis on nende võnkumised vastassuunalised ja nad kustutavad üksteise: tekib tume joon. Kusagil A -st veel kaugemas punktis on käiguvahe jälle terve lainepikkus, mistõttu tekib uus hele joon, jne.

Seega on valgel ekraanil vaheldumisi näha heledad ja tumedad jooned. Keskmise hele joon on seal, kus L_1 -st ja L_2 -st tulnud kiirte käiguvahe on null. Sümmeetriliselt sellest mõlemal pool asuvad teised heledad jooned. Analoogiline nähtus esineb, kui 87. joonisel kujutatud katses asetada vette ekraan risti veepinnaga. Sellele pinnale langevad veelained nii, et tugeva lainetusega kohad vahelduvad kohtadega, kus lainetust pole.

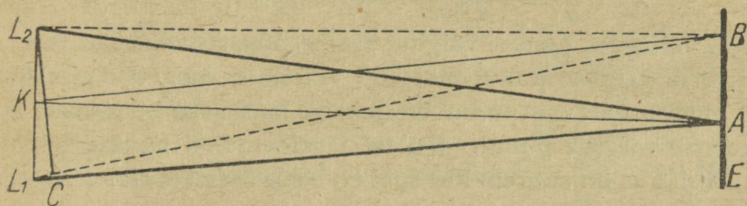
Kui tarvitada peeglikatse puhul valget valgust, tekivad heledate ja tumedate ribade asemel spektrivärvilised ribad, sest kui mõni osa valgusest interferentsi tõttu kustub, siis ülejäänud, eelmisest erineva lainepikkusega, ei kustu. Seega jääb alles interferentsi tõttu kustunud valguse täiendvärv.

Valguslainete interferentsjoooni Fresneli peeglikatse puhul kujutab joonis 89.

Kui peeglite asemel tarvitada kahte valgusallikat, siis ei teki mingisuguseid interferentsinähtusi. Interferents tekib ainult siis, kui mõlemast valgusallikast lähtunud lained on alati samas võnkumisolekus, s. o. kui nende võnkumised on sünkroonilised. Kahe isesuguse valgusallika puhul ei või seda eeldada valguse lainetuse kaootilisuse tõttu. Teisiti on lugu, kui mõlemad valgusallikad on tekitatud ühest valgusallikast lähtunud valguse peegeldumisel.

71. Valguslaine pikkuse määramine. Valguse interferentsil tekkinud tumedate (või ka heledate) interferents-

joonte kaugusest keskmisest heledast joonest võime arvutada valguse lainepikkuse λ .



90. joon. Valguse lainepikkuse määramine.

Olgu L_1 ja L_2 Fresneli peeglites tekkinud ebakujutised (joon 90). Olgu B esimene tume joon ekraanil ning selle kaugus keskmisest heledast joonest A võrdne $\frac{\delta}{2}$ -ga. Kui K on L_1L_2 keskpunkt, siis $KA = a$ on ekraani kaugus valgusallikast. Tähistame veel L_1L_2 kauguse d -ga. Et KB on väga suur, võrreldes d ja $\frac{\delta}{2}$, siis võib lugeda $KB \approx a$. Tõmbame raadiusega L_2B punkti B ümber kaare, mis lõikab joont L_1B punktis C . L_1C on seega kiirte käiguvahe $L_1B - L_2B$. Antud juhul on see võrdne $\frac{\lambda}{2}$ -ga. Et L_2C on väga väike osa kaarest, siis võib teda käsitada sirgena, kusjuures L_2C on risti BL_1 -ga. Täisnurksed kolmnurgad L_1L_2C ja KBA on sarnased ($\sphericalangle KBA$ küljed on risti $\sphericalangle L_1L_2C$ külgedega), seega $L_1C : BA = L_1L_2 : KB$. Et $L_1C = \frac{\lambda}{2}$, $BA = \frac{\delta}{2}$, $L_1L_2 = d$, $KB = a$, saame

$$\lambda = \frac{d \cdot \delta}{a}$$

Olgu ebakujutise L_1 ja L_2 kaugus teineteisest $d = 0,7$ mm, ekraani kaugus valgusallikast $a = 2,26$ m ja esimese heleda joone kaugus kesk-

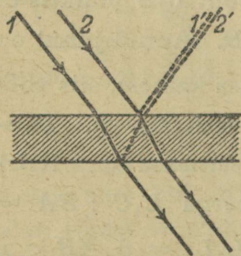
misest heledast joonest $2 \cdot \frac{\delta}{2} = 3,8$, seega $\frac{\delta}{2} = 1,9$ mm. Siis vastava kiire lainepikkus

$$\lambda = \frac{d\delta}{a} = \frac{0,7 \cdot 1,9}{2260} \approx 0,00058 \text{ mm} = 0,58 \mu.$$

Tarvitades punast valgust saame punased heledad jooned, violetse valguse puhul muidugi violetsed jne. Katse näitab, et punase valguse puhul on joonte kaugused suuremad kui violetse valguse puhul. Sellest järeldame, et punase valguse lainepikkus on suurem kui spektri teise äärmise ala, violetsete kiirte lainepikkus.

Vastavad arvutused annavad äärmiste punaste kiirte lainepikkuse umbes $700 \text{ m}\mu$ [$1 \text{ m}\mu$ (millimikron) = 10^{-7} sm] ja äärmiste violetsete kiirte lainepikkus on umbes $400 \text{ m}\mu$.

72. Õhukeste kelmete värvid. Seebimulli puhudes päneme tähele, et see hakkab helkima spektrivärviliselt, kui seebikelme on küllalt õhukeseks muutunud. Samuti helgib spektrivärviliselt veepinnal laialivalgunud õhuke kiht õli või tärpentiini või kahe klaasi vahel olev õhuke kiht õhku. Tarvitades ühevärvilist ehk monokromaatilist valgust, näiteks



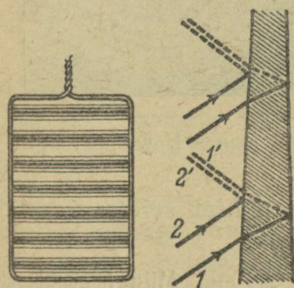
91. joon. Õhukeste kelmete värvid.

kollast naatriumvalgust, näeme neis õhukestes kihtides vaheldumisi heledaid ja tumedaid vöote. Neid valgusnähtusi nimetatakse õhukeste kelmete värvideks. Õhukeste kelmete värvide tekkimist seletatakse valguse interferentsiga. Langeb õhukesele kelmele üheväriline valgus, kiired 1 ja 2, siis peegeldub osa valgusest kelme eespinnal, osa tagapinnal (joon. 91). Mõlemate peegeldunud

kiirte 1' ja 2' teepikkused pole võrdsed, mistõttu tekib käiguvahe. See käiguvahe oleneb kelme paksusest ja kiirte langemisnurgast. Võrdub käiguvahe paaritu arvu poollaine pik-

kustega ($1\frac{\lambda}{2}, 3\frac{\lambda}{2}, 5\frac{\lambda}{2}, \dots$), siis interferentsi tõttu kustuvad kiired teineteise. On aga kiirte käiguvahe poollained ($2\frac{\lambda}{2}, 4\frac{\lambda}{2}, 6\frac{\lambda}{2}$), siis nad teineteist ei kustuta.

Langeb õhukesele kelmele harilik valge valgus, siis seetõttu, et valgus sisaldab mitmesuguse lainepikkusega kiiri, osa neist interferentsi tõttu kustub, osa kiiri aga, mille käiguvahe pole võrdne paaritu arvu poollaine pikkustega, ei kustu. Seetõttu helgib õhuke kelme värviliselt. On arusaadav, et peegeldunud valgus on täiendvärviks interferentsi tõttu kustunud valgusele.



92. joon. Seebilahuse kelme.

näha tumedad ja heledad ribad vaheldumisi. Et siin kihi paksus suureneb ülalt allapoole, siis muutub ka kelme ees- ja tagapinnal peegeldunud kiirte käiguvahe, mistõttu ilmuvadki kelme hariliku valguse puhul horisontaalsed värvilised ribad, monokromaatilise valguse puhul aga vaheldumisi tumedad ja heledad ribad.

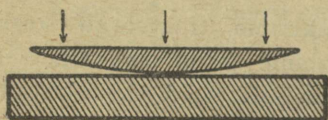
73. Newtoni rõngad. Kui asetada lihvitud klaasplaadile väikese kumerusega lääts (joon. 93), siis hariliku valguse puhul ilmuvad puutekoha ümber nähtavale spektrivärvilised rõngad, monokromaatilise valguse puhul aga vaheldumisi heledad ja tumedad rõngad. Seda nähtust seletame samuti

Tekitame traatvõrgu keskel seebikelme ja hoiame siis selle vertikaalselt: saame kiilukujulise seebikelme, sest raskuse tõttu koguneb seebilahust allapoole rohkem.

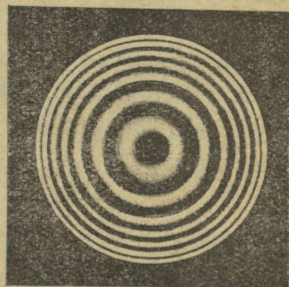
Kui valgustada seda kelmet valge valgusega, siis tulevad sellel nähtavale vikerkaarevärvilised horisontaalsed ribad. Monokromaatilise valguse puhul on sellel

kui õhukeste kihtide värvide tekkimist. Õhukeseks kelmeks on siin õhukiht klaasplaadi ja klaasläätse vahel. Et siin õhukihi paksus suureneb kaugusega puutekohast, siis on värvilised või heledad ja tumedad ribad muutunud rõngakujuliseks. Puutekoht on peegeldunud valguses näha tumeda täpina.

Seda nähtust katsus esimesena seletada Newton (1676), kes lähtus valguse emissiooni



93. joon.



94. joon. Newtoni rõngad.

teoriast. Valguse lainetuse teooria põhjal seletasid selle nähtuse hiljem Th. Young ja A. Fresnel.

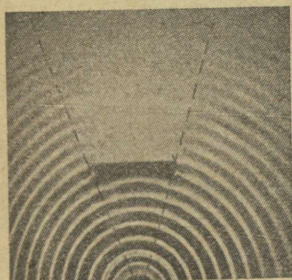
1. Kollase naatriumvalguse lainepikkus on $588 \text{ m}\mu$. Mitu lainepikkust mahub 1 cm ?
2. Kui suur on võnkesagedus, kui lainepikkus on $400 \text{ m}\mu$?
3. Kollase naatriumvalguse lainepikkus vaakuumis on $588 \text{ m}\mu$. Kui suur on selle valguse lainepikkus klaasis, mille murdumisnäitaja on $1,6$?
4. Kaks isokroonilist kollast kiirt lainepikkusega $600 \text{ m}\mu$ liituvad (interfereeruvad), kusjuures nende kiirte käiguvähe on $0,03 \text{ mm}$. Tugevdavad või nõrgendavad need kiired teineteist interferentsil?

X. Difraktsioon.

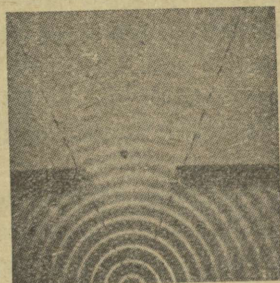
74. Veelainete difraktsioon. Tekitame laineaparaadi abil veevannis võimalikult suure raadiusega ringlaineid. Lainete teele asetame tõkke. Katse näitab, et tõkke taga tekib „vari“, kui tõkke suurus võrreldes lainepikkusega on suur. Varju

servad pole aga teravad, vaid osaliselt lähevad lained üle varju piiri: lained painduvad ka tõkke taha.

Asetame lainete teele pilu. Kui pilu on küllalt kitsas, siis levivad lained ka läbi pilu tõkke taha ja teravad varjud puu-

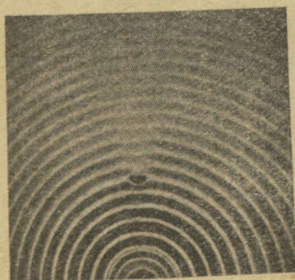


95. joon. Valguse tekkinine tõkke taga.

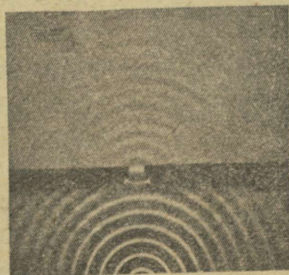


96. joon. Lainete levimine läbi pilu.

duvad. Ka siin painduvad lained tõkke taha. Mida väiksema tõkke või pilu võtame, seda rohkem painduvad lained selle taha. Väga väike tõkke varju ei anna.



97. joon. Lainete paindumine väikese tõkke taha.



98. joon. Lainete levimine läbi kitsa pilu ja paindumine selle taha.

Samuti ka väga kitsa pilu puhul levivad lained pilust tõkete taha, nagu seda nägime eelmises peatükis. Vastupidi, mida laiema tõkke või pilu võtame, seda väiksemaks muutub lainete paindumine tõkke taha ja seda teravamaks muutuvad varju servad.

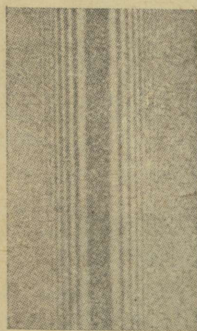
Lainete paindumist tõkke taha ehk difraktsiooni seletatakse Huygeni printsiibi põhjal, mille järgi iga punkti lainejoonel võib käsitada kui elementaarlainete allikat.

Katse näitab ka, et difraktsioon on märgatav siis, kui tõkke või pilu suurus ei erine palju lainepikkusest.

75. Valguse difraktsioon. Valgus on lainetus, seega peab esinema difraktsioon ka valguse puhul. Et valguse lainepikkus on väga väike, siis ilmneb valguse difraktsioon ainult siis, kui tõkke või pilu suurus on väga väike.

Laseme läbi kitsa pilu tulnud paralleelsel monokromaatilisel valguskiirte kimbul langeda piluga paralleelselt asetatud peenikesele nõelale.

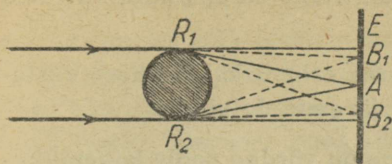
Siis näeme, et nõela taha asetatud ekraanil pole nõela vari terav, vaid selle äärtel esinevad vaheldumisi tumedad ja heledad jooned. Valge valguse puhul on need jooned värvilised. Kuid varju keskmine osa, mis peaks olema kõige tumedam, on vastu ootust suhteliselt hele (joon. 99).



99. joon. Nõela vari.

Nähtus on seletatav nagu veelaine difraktsioongi. Joonisel 100 on kujutatud nõela läbilõik. R_1 ja R_2 on nõela ääred, mida valguskiired riivavad.

Neid punkte võib Huygeni järgi käsitada kui elementaarlainete allikat, kust lähtuvad elementaarlained ka nõela taha. Seega sarnaneb see nähtus Fresneli peeglikatsega. Varju



100. joon. Valguse paindumine peenikese nõela taha.

keskmises osas A on elementaarlainete käiguvahe null, seetõttu ei kustu nad interferentsi tõttu: tekib hele joon. Seal kus käiguvahe on $\frac{1}{2}\lambda$, kustutavad lained teineteise ja tekib tume joon.

76. Difraktsioon ühe kitsa pilu puhul. Valguse difraktsioon esineb ka kitsa pilu puhul.

Järgmisteks katseteks tarvitame kitsast pilukujulist valgusallikat (tugevasti valgustatud kitsast pilu). Sellest valgusallikast tekitame kumerläätsel abil kujutise ekraanil.

Asetame kumerläätsel ja ekraani vahele teise kitsa pilu. Siis tekib ühe terava pilu kujutise asemel ekraanil mitu paralleelset heledat ja tumedat riba. Neist kõige heledam on keskmine riba. Valge valguse puhul on need ribad spektrivärvilised.

Valguse paindumist ehk difraktsiooni ühe pilu puhul selektame Huygensi printsiibi põhjal, mille järgi iga pilupunkti võib vaadelda kui elementaarlainete allikat, millest lähtuvad lainekiired igas suunas.

Et pilu laius, võrreldes pilu kaugusega ekraanist, on väga väike, siis võib pilust lähtunud kiiri, mis koonduvad ekraanil ühte punkti, lugeda paralleelseiks.

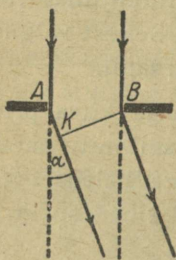
Joonis 102 kujutab pilu suurendatud kujul. Sellele pilule langeb paralleelne kiirtekimp, mille äärmised kiired on A ja B .

Nurka pilus paindunud kiirte ja nende esialgse suuna vahel nimetatakse **paindenurgaks** (α). Paindumata läbi pilu tulnud kiired annavad keskmise, kõige heledama riba. Äär-

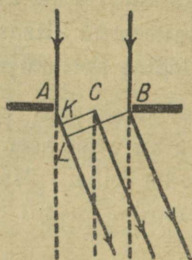
miste, samuti ka teiste kiirte käiguvahe on siis null, mistõttu nad üksteist tugevdavad.

Pilus paindunud kiirte juures esineb käiguvahe. Vastavalt käiguvahele esinevad siin järgmised juhud:

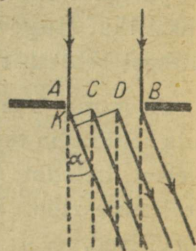
1) Äärmiste kiirte käiguvahe on võrdne poole lainepikkusega ($\frac{1}{2}\lambda$). Siis kustutavad need äärmised kiired teineteise interfereerumisel. Teistest A ja B vahel olevatest punktidest lähtunud elementaarlainete käiguvahe aga on väiksem kui $\frac{1}{2}\lambda$, mistõttu nad üksteist ei kustuta. Seepärast paindub osa kiiri nurga α võrra.



101. joon.



102. joon.



103. joon.

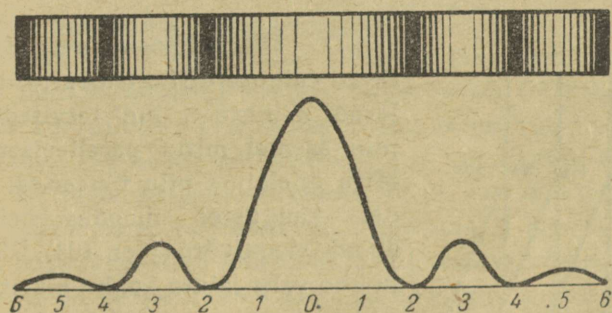
Valguse difraktsioon ühe kitsa pilu puhul.

Need pilus paindunud kiired muudavad keskmise heleda riba laiemaks, samuti muudavad nad selle ääred segasemaks.

2) Äärmiste kiirte käiguvahe on λ . Poolitades pilu nii, et $AC = CB$, saame punktidest A ja C väljunud kiirte käiguvaheks $\frac{1}{2}\lambda$, seega kustutavad need elementaarlained üksteist (joon. 102.).

Nagu joonisest kerge näha, vastab igale punktile A ja C vahel punkt C ja B vahel, millest lähtunud elementaarlainete käiguvahe on $\frac{1}{2}\lambda$. Seetõttu kustutavad nad üksteist ja ekraanil tuleb nähtavale tume riba.

3) On äärmiste kiirte käiguvahe $\frac{3}{2}\lambda$, siis ei kustu interfereerumisel kõik elementaarlained. Seletuseks jagame pilu kolmeks osaks: AC , CD , DB (joon. 103.). Nagu juhul 2, võime siin näidata, et kaks kõrvuti olevat osa, näiteks AC ja CD vahel olevaist punktidest lähtunud elementaarlained, interferentsi tõttu kustuvad. Pilu ülejäänud punktidest DB vahel väljunud kiired aga ei kustuta üksteist, nagu seda nägime juhul 1. Seega paindub ainult osa kiiri pilus ning ekraanile tuleb esimene hele riba, mis on palju nõrgem kui keskmine hele riba.



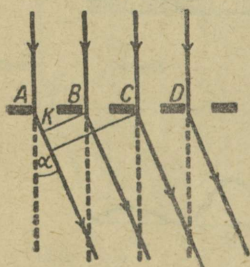
104. joon. Interferentsjooned.

Samuti võime näidata, et kui äärmiste kiirte käiguvahe on $4\frac{\lambda}{2} = 2\lambda$, $6\frac{\lambda}{2} = 3\lambda$ ja enam, siis kustutavad kiired üksteist ning ekraanil tekivad vastavais kohtades tumedad ribad.

On aga äärmiste kiirte käiguvahe $5\frac{\lambda}{2}$, $7\frac{\lambda}{2}$ jne., siis paindub osa kiiri ning ekraanil tekivad heledad ribad. Et käiguvahe suurenemisega väheneb paindunud kiirte hulk, siis väheneb ka heledate ribad heledus, kuni nad muutuvad nähtamatuks. Seetõttu polegi suurte käiguvahede puhul kiirte paindumist pilu taga märgata. Samasugused tumedad ja heledad interferentsribad tekivad ka teisele poole paindunud

kiirtest. Ühe pilu puhul tekkinud interferentsjoonte heledust kujutab graafiliselt joonis 104.

Et punaste kiirte lainepikkus on suurem kui näit. violetsete kiirte lainepikkus, siis käiguvahe $\lambda, 2\lambda$ jne. tekib punaste kiirte korral suurema paindenurga juures. Katse näitabki, et punaseid kiiri tarvitades on heledate ribade kaugus suurem kui violetsete kiirte puhul. Joonisest järgneb: mida laiem on pilu, seda väiksem on paindenurk sama käiguvahe puhul. Väga laia pilu korral on paindenurk null. See seletabki, miks difraktsiooninähtus esineb ainult kitsa pilu puhul.



105. joon. Difraktsioonivõre.

77. Difraktsioonivõre. Eriti teravad valguse difraktsioonijooned tulevad nähtavale, kui tarvitada ühe pilu asemel mitut paralleelset pilu. Mitu ühelaiust pilu üksteisest samadel kaugustel moodustavad nn. difraktsioonivõre (joon. 105). Ühe pilu ja ühe vahe laiust kokku nimetatakse difraktsioonivõre konstandiks. Difraktsioonivõre valmistatakse sel viisil, et teemandiga tõmmatakse klaasplaadile võrdsete

kauguste tagant kriipsud. Kriipsude vahed lasevad valgust läbi nagu pilud, kriipsud ise aga hajutavad kiiri. Ka fotograafimise teel võib valmistada difraktsioonivõresid.

Langegu monokromaatiline valgus difraktsioonivõrele risti. (Valgusallikana tarvitame kitsast pilu, mille kujutise tekitame kumerlätse abil eemaloleval ekraanil.) Paindumatult läbi difraktsioonivõre tulnud kiired annavad ekraanil keskmise heledaima joone, sellest kummalgi pool on teravad heledad jooned, mis on üksteisest eraldatud täiesti tumedate

joontega. Katse näitab ka, et mida väiksem on võre konstant, seda suuremad on heledate joonte kaugused üksteisest.

Et pilu iga punkti võime vaadelda elementaarlainete allikana, siis tekivad heledad jooned ekraanil kohtadel, kus nende lainete käiguvahe on täisarv lainepikkusi.

Et ekraan on pilust, võrreldes võre pilu laiusega, väga kaugel, siis võib nagu varemgi piludest lähtunud ja ekraani samasse punkti koondunud elementaarlainete kiiri vaadelda paralleelseina.

Jooniselt näeme, et kõik paindumatult läbi võre tulnud kiired annavad käiguvahe „null“. Need kiired annavadki keskmise, heledaima joone (0-joon).

Määrava tähtsusega, millal piludest lähtuvad lainekiired mingis punktis ekraanil üksteist tugevdavad või kustutavad, on kahe kõrvuti oleva pilu samapoolsest äärest väljunud kiirte käiguvahe. On nende käiguvahe λ , siis tugevdavad nad üksteist. Et igale punktile esimeses pilus vastab samasugune punkt teises pilus, mis annavad käiguvahe λ , siis kõik need kiired, koondudes ühte punkti ekraanil, annavad heleda joone. Samuti tekib ekraanil hele joon paindenurga puhul, kui see käiguvahe on 2λ , 3λ jne.

Iga teise käiguvahe puhul piludest lähtunud kiired, vaatamata pilude suurele arvule, kustuvad interferentsi tõttu.

Olgu näiteks kahe vastava kiire käiguvahe $\frac{1}{2}\lambda$. Siis kustutavad üksteist vastastikku paarikaupa kaks kõrvuti olevaist piludest lähtunud kiirt. On see käiguvahe $\frac{1}{10}\lambda$, siis annavad 1. ja 5. pilu kiired käiguvahe $5 \cdot \frac{1}{10}\lambda = \frac{1}{2}\lambda$, seega ka nemad kustutavad üksteist. Samasugune käiguvahe on 2. ja 6., 3. ja 7. pilust lähtunud kiirtel.

Seega on heledad jooned teravate äärtega ja nad on eraldatud üksteisest täiesti tumedate joontega.

Difraktsioonivõre taga ekraanil tekivad heledad jooned paindenurkade juures, millede puhul kahe kõrvuti oleva pilu

samapoolsest äärest väljunud kiirte käiguvahed on $\lambda, 2\lambda, 3\lambda$ jne.

Tähistame paindenurga α -ga ja difraktsioonivõre konstandi d -ga, siis, nagu kolmnurgast ABK näha, tekib esimene hele joon, kui $AK = \lambda$. Et $\sphericalangle ABK = \alpha$ (mõlemate küljed on vastastikku risti), siis

$$\sin \alpha = \frac{\lambda}{d}; \text{ siit } \lambda = \frac{d \sin \alpha}{1}$$

Teine hele joon tekib, kui $\sin \alpha = \frac{2\lambda}{d}$, millest

$$\lambda = \frac{d \sin \alpha}{2}$$

Kolmanda heleda joone puhul $\lambda = \frac{d \sin \alpha}{3}$, jne.

Seega üldiselt kehtib valem:

$$\lambda = \frac{d \sin \alpha}{k},$$

kus k on 1, 2, 3,

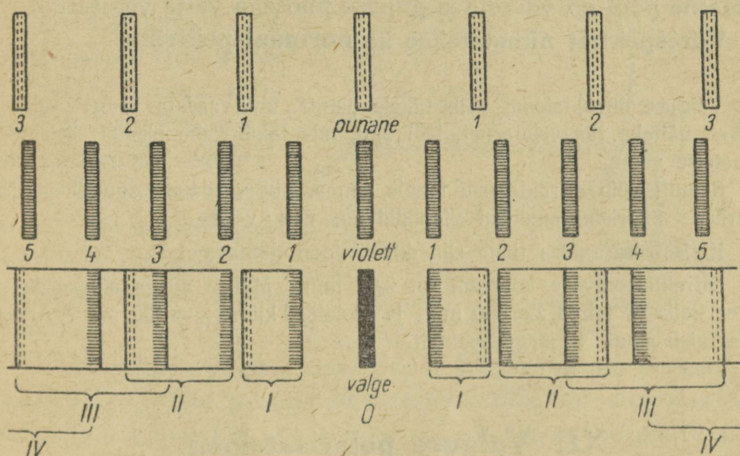
Et paindenurk α , samuti ka difraktsioonivõre konstant d on mõõdetavad suurused, siis võib nende abil määrata valguse lainepikkuse. Seda valguse lainepikkuse mõõtmisviisi rakendatakse laialdaselt praktilises füüsikas.

Pilude arvu suurenemisega muutuvad difraktsioonivõres paindunud kiirte tekitatud jooned kitsamaks ja teravamaks. Ühtlasi suureneb valguse hulk, seega ka joonte heledus. Et saada valgusrikkaid difraktsiooninähtusi, seks tarvitatakse suure pilude arvuga ja väikese võrekonstandiga difraktsioonivõresid. Ameerika füüsikul Rowland'il õnnestus valmistada eriti täpseid difraktsioonivõresid, millel oli ligi 1000 pilu 1 mm kohta, seega võre konstant 0,001 mm (Rowlandi võre).

78. Difraktsioonispekter. Valemist $\lambda = \frac{d \sin \alpha}{k}$ saame: $\sin \alpha = \frac{k\lambda}{d}$. Sellest järeldub, et punased kiired suurema lainepikkuse tõttu painduvad difraktsioonivõres rohkem kui violetid, mispärast punase valguse puhul on heledad jooned

keskmisest heledast joonest kaugemal kui violetse valguse puhul.

Lastes läbi kitsa pilu langeda difraktsioonivõrele valge valguse, paindub iga värv vastavalt lainepikkusele esialgselt suunast kõrvale isesuuruse paindenurga võrra, mistõttu võre taga ekraanil tuleb nähtavale spekter. Seda spektrit nimetatakse **difraktsioonispektri**ks.



106. joon. Difraktsioonispekter.

Paindumata läbi difraktsioonivõre tulnud kiired annavad heleda valge riba, sest sinna langevad kõik kiired spektris lahutumatult. Sümmeetriliselt sellest mõlemal pool on difraktsioonispektrid. Keskmisele heledale joonele lähemal on nn. 1. järgu spektrid (käiguvahe = λ), sellele järgnevad 2., 3. jne. järgu spektrid. Kuna 1. järgu spekter on selgesti eraldatud teistest spektritest ja samuti keskmisest heledast joonest, katavad seevastu 2. ja suuremate järkude spektrid osaliselt üksteist. Vastupidi prisma-spektrile painduvad punased kiired difraktsioonivõres rohkem, violetised kiired vähem.

Nagu prismatki, nii tarvitatakse ka väikese võrekonstandiga difraktsioonivõret spektraalaparatuurides spektri tekitamiseks.

Eelmisest valemist näeme, et kiirte paindumine difraktsioonivõres on ligikaudu võrdeline lainepikkusega. Seepärast on värvide jaotus difraktsioonivõre spektris ühtlane. Prisma spektril pole värvide jaotus võrdeline lainepikkusega, spektri violetne pool on võrreldes punase poolega välja venitatud.

Võrespektrit nimetatakse ka **normaalspektriks**.

Valguse difraktsiooni võib tähele panna, kui vaadata kaugel valgusallikat, näiteks tänavalaternat, läbi pilu, mis tekib kahe pliatsi asetamisel teineteise vastu.

Samuti võib difraktsiooni tähele panna, kui vaadata valgusallikat läbi siidriide. Siidriides annavad siidniidid nn. ristvõre.

Kirjeldada, kuidas tuleb siin difraktsioon nähtavale!

Difraktsioonivõre konstant on 0,01 mm. Millise nurga all painduvad selles kollased kiired, $\lambda = 580 \text{ m}\mu$, ja violetsed kiired, $\lambda = 400 \text{ m}\mu$? Arvestada tuleb ainult 1. järgu spektrit.

XI. Valguse polarisatsioon.

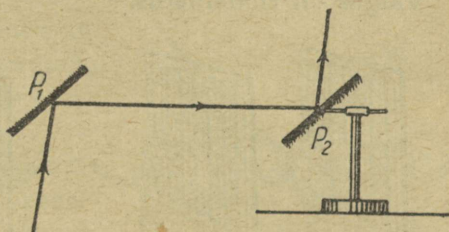
79. Polarisatsioon peegeldumisel. Valguse interferentsist ja difraktsioonist selgub, et valgus on lainetusnähtus. Kuid nende nähtuste järgi ei saa veel otsustada, kas valgus on rist- või pikilainetus, s. t. kas võnkumine toimub risti või pikuti valguse levimissuunaga. Järgnev katse näitab, et valgus on ristlainetus.

Juhime paralleelse kiirtekimbu peeglile P_1 nii, et langemisnurk oleks ligikaudu 57° (joon. 107). Peeglina tarvitame tagaküljelt tahmatud või musta paberiga kaetud klaasplaati, nii et peegeldavaks pinnaks on klaasi eespind. Olgu peegel asetatud nii, et valguskiirte langemistasapind, s. o. tasapind, milles asetsevad nende kiirte langemisnurgad, oleks

vertikaalne, kiirtekimbu siht aga pärast peegeldumist oleks horisontaalne.

Laseme selle kiirtekimbu langeda teisele samasugusele peeglile nõnda, et ka nüüd langemisnurk oleks 57° .

Teist peeglit saame peegeldunud kiirtekimbu kui telje ümber pöörata. Seda teist peeglit P_2 tähendatud telje ümber pöörates võib kiirtekimpu peegeldada kas üles, alla, vasakule või paremale. On teise peegli ette asetatud valge ekraan, millele langeb teist korda peegeldunud valgus, siis tekib seal hele laik. Peegli pööramisel liigub see hele laik ekraanil mööda ringjoont.



107. joon. Valguse polarisatsioon.

Katse näitab, et teist korda seda valgust ei saa peegeldada igas suunas. Kui juhime kiirtekimbu üles või alla, siis jääb valguslaik heledaks, seega neis suundades on võimalik kiiri peegeldada.

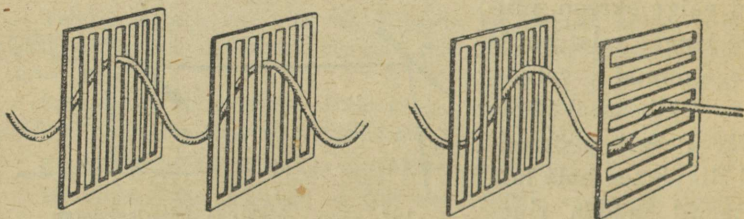
Mida rohkem teist korda peegeldunud kiir läheneb horisontaalsele tasapinnale, seda nõrgemaks muutub hele laik. Kui peegeldada neid kiiri horisontaalses tasapinnas vasakule või paremale poole, kaob peegeldunud valguse poolt tekitatud laik täielikult, see tähendab, selles suunas need kiired enam ei peegeldu. Nõnda peegeldub valguskiir teisel peeglil ainult siis, kui mõlemate peeglite langemistasapinnad on rööbiti, ta ei peegeldu aga, kui peeglite langemistasapinnad on risti.

Kui aga teisele peeglile juhtida valgus otseselt valgusallikalt ilma peegeldamata esimesel peeglil, siis teise peegli pööramisel jääb valguslaik, seega ka peegeldunud valguse

tugevus samaseks, ükskõik kuidas seda peeglit pöörata. Kirjeldatud katse näitab, et klaasi eespinnal 57° -se langemisnurgaga peegeldunud valgus erineb loomulikust valgusest. Peegeldunud valguse omadused pole enam igas sihis samad, nii et teda ei saagi teist korda igas sihis peegeldada.

Sellest katsest järeldub, et valgus ei saa olla pikilainetus, sest peegeldumisnähtus ei saa siis oleneda sellest, millise küljega on valguskiir peegeldava pinna poole pööratud.

Valgus on ristlainetus.



108. joon. Katse kumminööriga.

Et paremini kujutella, kuidas peegeldub eelmises katses valgus klaasi pinnal, vaatleme elastset ristlainetuse levimist, mida tekitame kumminööril.

Valmistame puuliistudest kaks võret nii laiade piludega, et kumminöör neist vabalt läbi mahub. Asetame mõlemad võred teineteise taha nii, et pilud oleksid vertikaalsed. Pistame kumminööri piludest läbi ja tekitame sellel vertikaalseid ristlaineid (joon. 108). Katse näitab, et lained levivad vabalt läbi võrede. Nüüd pöörame tagumist võret 90° võrra, nii et selle pilud oleksid risti eelmise võre piludega. Tekitame uuesti kumminööril samasuguseid ristlaineid. Nüüd need lained teisest võrest enam läbi ei lähe.

Tekitades ühe võre ees kumminööril ristlaineid mitmesugustes suundades, näeme, et läbi võre lähevad ainult need võnkumised, mis on rööbiti piludega. Kui aga tekitada kum-

minööris pikilainetus, levib see läbi võrede, ükskõik kuidas need on asetatud.

Eelmiste ja mitmete teiste katsete alusel on esitatud järgmine oletus valguse lainetuse kohta. Valguse lainetuse teooria järgi toimub võnkumine loomulikus valguses igasugustes sihtides, mis on risti kiirega. Seetõttu loomuliku valguse küljesihid on optilises mõttes täielikult üheväärsed.

Klaasi eespinnal peegeldunud valguskiires aga toimub võnkumine ainult ühes kindlas sihis.

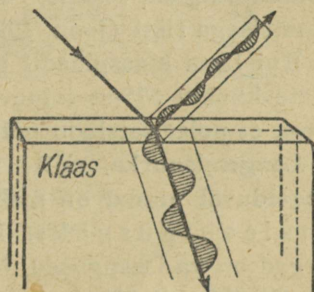
Valgust, milles võnkumine toimub ainult ühes kindlas sihis, nimetatakse polariseeritud valguseks. Polariseeritud valguse tekkimist loomulikust valgusest, näiteks peegeldumisel klaasi pinnal, nimetatakse valguse **polarisatsiooniks**.

Valguse lainetuse teooria järgi peegelduvad klaasi pinnal ainult need võnkumised, mis on risti langemistasapinnaga (joon.

109), kuna teised võnkumised murduvad klaasi. Seda langemistasapinda nimetatakse ka polarisatsioonitasapinnaks.

Seadist, mis polariseerib valgust, nimetatakse üldiselt **polarisaatoriks**; seadist, mille abil on võimalik kindlaks teha, kas valgus on polariseeritud või mitte, nimetatakse **analüsaatoriks**. Eelmises katses oli polarisaatoriks, samuti ka analüsaatoriks tagaküljelt tahmatud või musta paberiga kaetud klaasplaat.

80. Polarisatsioon valguse murdumisel. Ka valguse murdumisel võib saada polariseeritud valgust. Kui juhtida kiirtekimp läbipaistvale klaasplaadile (tagakülj mitte tahmatud



109. joon. Valguse polarisatsioon peegeldumisel ja murdumisel.

ega musta paberiga kaetud) langemisnurgaga 57° , siis klaasplaadist läbitulnud valgust analüüsides leiame, et see on polariseeritud nagu peegeldunud valguski. Katse näitab samuti, et klaasi läbinud kiire polarisatsioon pole täielik.

Asetades aga mitu klaasplaati üksteise peale (kuni 20 tk.), leiame, et sellest klaasplaatide kihist läbitulnud valgus on peaaegu täielikult polariseeritud. Tähendab, klaasplaatide kogu võib tarvitada polarisaatorina või analüsaatorina. Analüüsides klaasplaadil peegeldunud ja klaasplaati läbinud valgust, leiame, et nende polarisatsioonipinnad on teineteisega risti (joon. 109).

Kui lasta klaasplaadil peegelduda või murduda valguskiirte kimbul 57° -st erineva langemisnurga all, siis näitab katse, et polarisatsioon pole enam täielik.

Langemisnurka, mille puhul valguskiirte polarisatsioon peegelduval pinnal on maksimaalne, nimetatakse polarisatsiooninurgaks. Erisuguste ainete polarisatsiooninurgad on ka isesugused. Näiteks vee polarisatsiooninurk on 53° , flintklaasil 57° .

Tarvitades peegeldamisel metallpeegleid, leiame, et nendel peegeldunud valgus pole polariseeritud. Seda võime järeldada ka sellest, et metallpind (hõbe, nikkel) peegeldab tagasi peaaegu kogu temale langenud valguse, seega ka kõik võnkumised.

81. Polariseerimine kaksikmurdamisel. Täielikult polariseeritud valgust võib saada mitmete läbi-



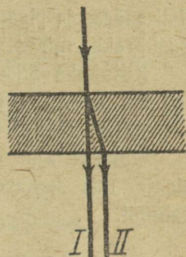
110. joon. Kiri vaadatuna läbi islandi pao.

saada mitmete läbi-
paistvate kristallide
abil, milledes esineb
nn. kaksikmurdamine.
Tuntuim neist kristalli-
dest on lubjapao
(CaCO_3) teisend, mida

nimetatakse islandi paoks. Kui vaadata läbi islandi pao kirja, siis paistab see kahekordsena. Ainult ühes sihis see nähtus puudub. Seda sihti nimetatakse kristalli optiliseks teljeks.

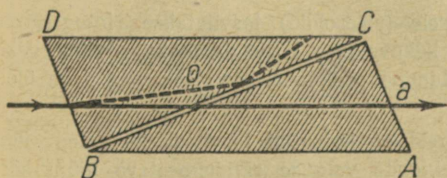
Kui islandi pao ülemisele tahule langeb valguskiir, siis lahutub see kiir islandi paos kaheks. Üks neist kiirtest käitub murdumisreeduse kohaselt, mispärast seda nimetatakse tavaliseks kiireks. Teise kiire kohta pole murdumisreedus kehtiv. Seda kiirt nimetatakse seepärast ebatavaliseks.

Uurides islandi paos murdunud kiiri analüsaatori abil, on leitud, et need mõlemad kiired on polariseeritud ja nende polarisatsioonipinnad on teineteisega risti.



111. joon. Kaksikmurdumine.

82. Nicol'i prisma. Et saada ainult ühte polariseeritud kiirtest, mis tekivad kaksikmurdumisel islandi paos, selleks kõrvaldatakse teine neist järgmise võttega. Olgu



112. joon. Nicol'i prisma.

$ABDC$ kristalli läbilõik. Alustahud AC ja BD lihvitakse nii, et teravnurgad A ja D oleksid pisut teravamad kui loomulikul kristallil. Seejärel lõigatakse kristall pooliks diagonaalpinda BC mööda ja kleebitakse uuesti kokku kanada palsamiga, mille murdumisnäitaja on väiksem kui islandi pao oma. Langeb tahule BD valguskiir, siis murdumisel islandi paos lahutub ta kaheks — tavaliseks ja ebatavaliseks kiireks. Korrapärase kiir murdub rohkem ja seetõttu langeb kanada palsami kihile suurema langemisnurga all. Kristalli tahud on lihvitud nii, et tavaline kiir heidetakse kanada palsami kihil tagasi täieliku sisepeegeldumise teel, kuna ebatavaline pääseb sellest läbi. Kristallist väljunud kiir on siis täielikult polariseeritud.

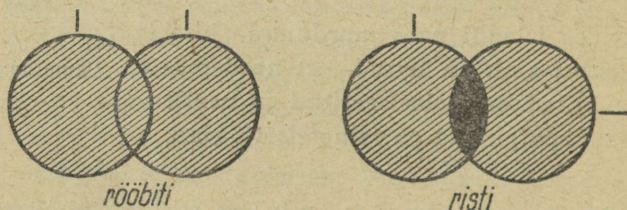
Säärast kunstlikult valmistatud kristalli nimetatakse **Nicoli prismaks** (joon. 112). Selle leiutas W. Nicol 1842. a.

Nicoli prismat võib tarvitada analüsaatorina, samuti ka polarisaatorina.

83. Turmaliintangid. Kui lõigata turmaliinkristallist tasaparalleelsed plaadid, nii et lõikepind oleks paralleelne kristalli optilise teljega, siis risti säärasele plaadile langenu valguskiir lahutub kaheks polariseeritud valguskiireks, millest aga üks kristallis täielikult absorbeeritakse.

Kui kaks niisugust turmaliinplaati asetada nii, et nende optilised teljed on rööbiti, siis lasevad nad valgust läbi. On aga need teljed risti, siis valgus läbi ei pääse. Segavalt mõjub siin turmaliini oliivroheline värv.

Uuemal ajal on õnnestunud kunstlikult valmistada läbipaistvaid plaate, mis samaselt turmaliinplaadiga läbi lasevad ainult polariseeritud valgust.



113. joon. Polarisatsioonifiltrid.

Neid nn. polarisatsioonifiltreid (polaroidid) tarvitatakse fotograafias, näiteks maalide fotograafimisel läikevalguse kõrvaldamiseks. Piltide läikimist põhjustab valguse peegeldumine pildipinnal ning see valgus on üldiselt polariseeritud.

Sääraseid polarisatsioonifiltreid on katsutud tarvitada ka autode juures — vastutuleva auto prožektorite valguse silmipimestava mõju kõrvaldamiseks. Selleks asetatakse autoprožektorite ette polarisatsioonifiltrid, mille polarisatsioonipind on horisontaalse tasapinna suhtes 45° võrra kaldu. Samasugused filtrid on ka autojuhi prillideks. Seetõttu näeb autojuht oma auto prožektorite valgust, mitte aga vastutuleva auto prožektorite oma, sest selle valguse polarisatsioonipind on risti tema enda auto prožektorite valgusega.

1. Võtta klaasplaat ja kleepida selle ühele küljele must paber ja tarvitada seda siis analüsaatorina! Kui päike paistab tuppa, määrata siis selle abil, millisel pinnal peegeldunud valgus on polariseeritud!

2. Kas häälelaineid saab polariseerida?

84. **Ajaloolisi märkusi.** Valguse polarisatsiooni avastas E. L. Malus (1775—1812), kes aastal 1808, vaadates läbi islandi pao kristalli Luxemburgi palee (Pariisis) aknaid pani tähele, et kristalli teatavas asendis on pilt ainult ühekordne. Maluselt on pärit ka nimetus „polarisatsioon”. Hiljem näitas Fresnel, et kaks teineteisega risti polariseeritud valguskiirt ei anna interferentsi. Sellest järeldas siis (1817) Th. Young, et valgus on ristlainetus.

Esimese polarisatsiooniaparaadi konstrueeris J. Nörrenberg aastal 1858.

Kaksikmurdumise avastas aastal 1669 taanlane *Erasmus Bartholinus* (arst, matemaatik ning jurist, 1625—1698).

XII. Luminestsents. Spektraalanalüüs.

85. **Fluorestsents ja fosforestsents.** Valgusallikate valguskiirgamise põhjuseks on peamiselt nende kõrge temperatuur.

Keha iseseisvat valguse kiirgamist temas neeldunud valguse arvel nimetatakse **foto-luminestsentsiks** ehk lihtsalt **luminestsentsiks**. Luminestsentsi nähtused jagunevad nende kestuse mõttes kahte liiki: **fluorestsentsiks** ja **fosforestsentsiks**. Kehade luminestsents võib esineda ka kehade madala temperatuuri puhul. Seega foto-luminestsents ei ole termineline nähtus.

Valgustame uraanklaasi või fluorestseiini-lahust violetsete või siniste kiirtega. Katse näitab, et uraanklaas sellisel valgustamisel helendab roheliselt, fluorestseiini-lahus aga heleroheliselt.

Valgustamise lõppedes kaob ka nende ainete luminestsents. Sellist foto-luminestsentsi alaliiki, mille puhul luminestsents lõpeb koos aine valgustamise lõppemisega, nimetatakse **fluorestsentsiks** (see nimetus on tuletatud mineraalist fluoriit, mille juures fluorestsentsi nähtust esma-

kordselt vaadeldi). On iseloomulik, et fluorestsents-valguses võivad puududa kiired, mis fluorestsentsi tekitavad. Uraanklaasi valgustamisel violetse valgusega fluorestseerib see klaas roheliselt, millist valgust temale ei langenudki. Seepoolest erineb fluorestsents põhiliselt valguse peegeldumisest. Valguse peegeldumisel heidetakse tagasi sama valgus, mis langeb peegelduvale pinnale. Hoides näiteks valge pabeririba spektris, näeme, et spektri punases osas näib see paber punasena, seega peegeldab ta punaseid kiiri, sinises osas sinisena, jne. Hoides aga spektris pabeririba, mis on kaetud näiteks plaatina baariumtsüanüüriga (see fluorestseerib roheliselt), näeme, et spektri violetses ja sinises osas helendab ta helerohelel. Seega fluorestseerivas kehas muundub keha langenud valguse energia jällegi vähemalt osaliselt valguse energiaks. Fluorestsentsi tekitavad peamiselt violetsed ja sinised kiired, kuna punased kiired fluorestsentsi spektri nähtavas osas ei tekita. Üldiselt kehtib reegel: Fluorestsents-valgus on pikemalaineline kui fluorestsentsi tekitav valgus. Peale uraanklaasi ja fluorestseeriva lahuse fluorestseerivad veel petrooleum, eosiin, klorofüllilahus, masinaõli jne.

Miks masinaõli paistab läbipaistvas valguses punakaskollane, muidu aga helgib roheliselt?

Fosforestsents erineb fluorestsentsist seepoolest, et fosforestseeriva keha helendab lühemat või pikemat aega ka pärast valgustamist: fosforestseeriva keha helendamine ei lõpe valgustamise lõpetamisega. Fosforestseerivaist kehadest tuntuimad on tsinkhelk, balmains fosfor ($\text{CaS} + \text{Bi}$) jt.

Fosforestseerivaist aineist valmistatakse sageli elektrihõõglampide kustutajate nupud, mis helendavad ka pärast hõõglambi kustutamist, seega on pimedas kergesti ülesleitaavad.

86. **Ultravioletsed kiired.** Tekitame prisma abil volta-leegi või päikesevalguse spektri valgel ekraanil. Kui asetame fluorestseeriva ekraani punase osa kohale, näeme, et punases valguses fluorestseeriv ekraan paistab punasena nagu valgegi ekraan. Nihutades fluorestseerivat ekraani spektri violetse osa poole näeme, et ta violetsete ja siniste kiirte toimet tugevasti rohekalt fluorestseerib. Fluorestseerivat ekraani edasi nihutades näeme, et fluorestseeriv ekraan helendab ka väljaspool spektri violetset osa, seal, kus valgel ekraanil midagi näha pole. See katse näitab, et spekter ulatub violetsest osast veelgi kaugemale, kuid sinna langenud kiirgus on silmale nähtamatu. Neid violetsest tugevamini murduvaid, tähendab — lühema lainepikkusega kiiri nimetatakse **ultravioletseiks kiirteks**. Eriti kaugele ulatub spektri ultravioletne osa, kui tarvitada kvartsist prisma ja läätse, sest harilik klaas neelab suure osa ultravioletsest kiirgusest.

Peale fluorestsentsi avaldavad ultravioletsed kiired tugevat keemilist toimet. Fotoplaadisse näiteks mõjuvad ultravioletsed kiired tugevamini kui nähtavad kiired. Samuti pleegivad paljud värvained ultravioletsete kiirte toimet.

Ka on ultravioletseil kiirtel tugev füsioloogiline toime inimese kehale, samuti hävitavad nad pisikuid jne. Inimese naha pruuniks muutumist — päevitumist — põhjustavad ultravioletsed kiired. Eriti tugeva füsioloogilise toimega on kiired lainepikkusega 320 kuni 290 m μ .

On leiutatud klaasisorte, mis ultravioletseid kiiri vähem absorbeerivad kui harilik klaas. Tuntumaid neist on uvioolklaas, vitaklaas. Kõrgetel mägedel on päikesekiirgus ultravioletsete kiirte poolest rikkam. Sellest nähtub, et ka õhk absorbeerib ultravioletseid kiiri.

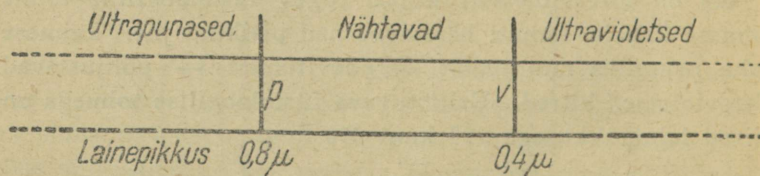
Tugev ultravioletne kiirgus mõjub silmadele kahjulikult. Rännakuil mägedes kantakse seepärast kaitseprille, mis ultravioletseid kiiri läbi ei lase.

Ultravioletseid kiiri tarvitavad arstid mitmesuguste haiguste (näit. rahhiidi) ravimisel. Sel puhul tarvitatakse kunstliku ultravioletsete kiirte allikana voltaleeki kvartstorus (kunstlik kõrguspäike).

87. Ultrapunased kiired. Kuhu langevad valguskiired, seal tekib soojust. Seega avaldavad valguskiired soojuslikku toimet.

Kiirte soojusliku toime uurimiseks tarvitatakse termopatareid, mis on ühendatud tundliku galvanomeetriga.

Katse näitab, et violetsed kiired tekitavad vähe soojust. Mida rohkem viia termopatareid spektri punase osa poole, seda suurema hälbe annab galvanomeeter, tähendab — seda rohkem soojust kiired tekitavad. Eriti tugeva soojusliku toimega on punased kiired.



114. joon. Spektri ulatus.

Kuid galvanomeeter näitab voolu ka siis, kui viia termopatarei spektri punasest äärest välja. See tähendab, et sinna

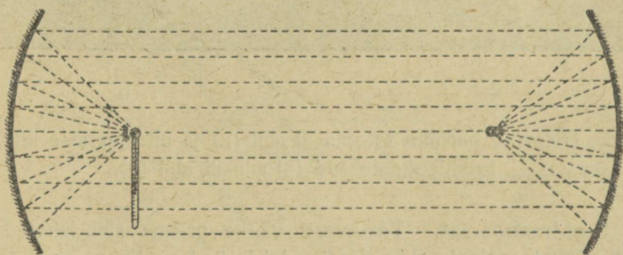
langevad silmale nähtamatud kiired, mis tekitavad soojust, kuid prismas kalduvad kõrvale vähem kui punased kiired.

Seega on need kiired pikemalainelised kui nähtavad valguskiired.

Neid soojusliku toimega kiiri nimetatakse ultrapunasteks kiirteks.

Tavalisele fotoplaadile ultrapunased kiired ei mõju samuti kui punased kiired. Uuemal ajal on siiski korda läinud valmistada fotoplaate, millesse mõjuvad ultrapunased kiired. Et ultrapunaseid kiiri iseloomustab nende soojuslik toime, siis nimetatakse neid kiiri ka **soojuskiirteks**, kuid see nimetus pole päris õige, sest ka teised kiired, nähtavad ja ultravioletsed kiired, avaldavad soojuslikku toimet, kuigi palju vähemal määral.

Ultrapunased kiired peegelduvad ja murduvad nagu nähtavadki kiired. Paigutades kaks metallist nõguspeeglit teineteise vastu ja asetades ühe peegli tulipunkti kuumutatud keha, mis kiirgab ultrapunaseid kiiri, siis peegeldumisel sellel peeglil muutuvad kiired paralleelseiks ja langevad teisele

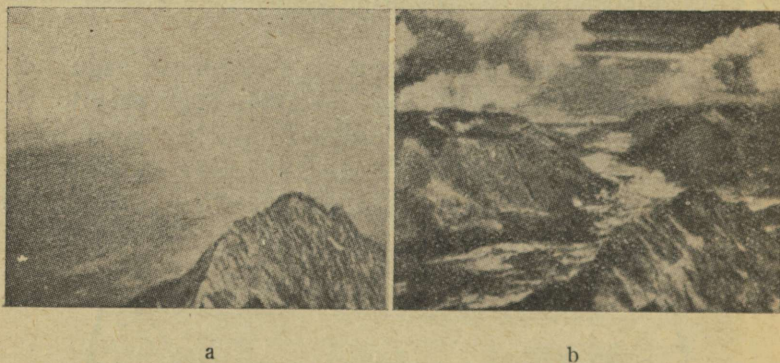


115. joon. Ultrapunaste kiirte peegeldumine.

nõguspeeglile. Teiselt peeglit peegelduvad ultrapunased kiired tagasi ja koonduvad peegli tulipunkti. Sinna asetatud termomeeter näitab seetõttu temperatuuri tõusu.

Paljud kehad, mis on nähtavate kiirte suhtes läbipaistvad, võivad ultrapunaste kiirte suhtes olla läbipaistmatud. Nii näiteks ei lase harilik läbipaistev klaas ultrapunaseid kiiri läbi. Seetõttu takistab aknaklaas toasoojuse kadu ultrapunaste kiirte näol.

Ultrapunased kiired oma suure lainepikkuse tõttu ei haju udupiiskades. Seepärast on udu ultrapunaste kiirte suhtes läbipaistev. Seda ultrapunaste kiirte omadust kasutatakse fotograafimiseks uduse ilmaga, tarvitades ultrapunaste kiirte suhtes tundlikke fotoplaate.



116. joon. Ülesvõtte hariliku fotoplaadi abil (a) ja ultrapunaste kiirte suhtes tundlikuks tehtud fotoplaadi abil (b).

88. Spektraalaparatuur. Teatavasti võime prisma abil lahutada valget, üldse liitvalgust spektri- ehk algvärvideks. Seda prisma omadust kasutatakse valgusallikate valguse koosseisu määramiseks ehk analüüsimiseks.

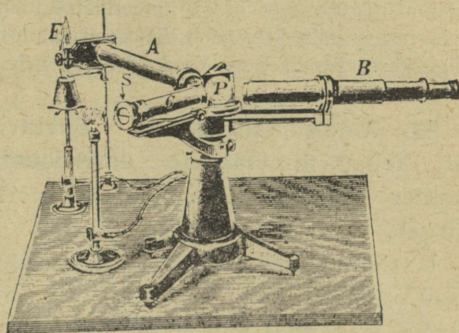
Spektrite uurimiseks tarvitatakse erilisi aparate, mida nimetatakse spektraalaparatuurideks ehk spektroskoopideks.

Joonis 117 kujutab Kirchhoff-Bunzeni spektraalaparauri, kuna joonis 118 kujutab kiirtekäiku selles.

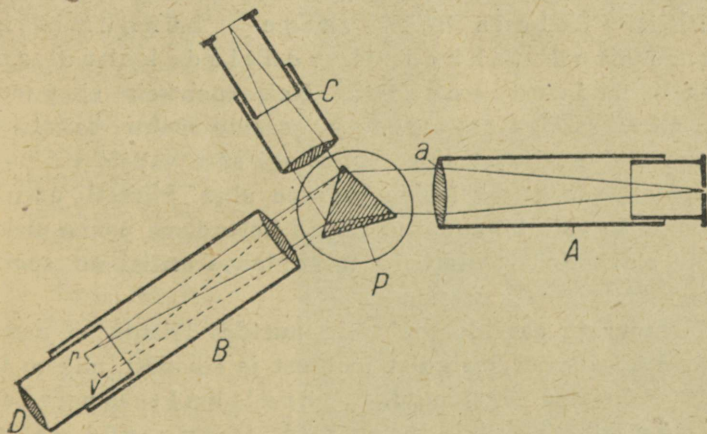
Kirchhoff-Bunseni spektraalaparaat koosneb alusele kinnitatud prismast *P*, pilutorust *A*, pikksilmast *B* ja skaalatorust *C*. Pilutoru prismapoolses otsas on kumerlääts, kuna toru teine ots on varustatud kitsa piluga. Selle

ette paigutatakse uuri-
tav valgusallikas, näi-
teks leek. Pilu asub
kumerläätsse tulipunk-
tis, seega läbi pilu kum-
erläätsse langenud
kiired pärast murdumist
läätses muutuvad paral-
leelseks. Prisma lah-
utab temale langeva
paralleelse kiirtekimbu
spektrivärvideks, kuid
samavärvilised kiired
jäävad isekeski paral-
leelseks. Tekkinud spekt-
rit vaadeldakse pikk-
silma *B* abil. Pikk-
silma objektiiv koondab

paralleelsed kiired tulipunkti, kus tekib pilu tõeline kujutis, iga värv ise ko-
has. Seda spektrit vaadeldakse pikksilma okulaariga kui luubiga.



117. joon. Kirchhoff-Bunseni spektraalaparaat.



118. joon. Kiirtekäik Kirchhoff-Bunseni spektraalaparaadis.

Pikksilma objektiivil tulipunktis tekib seega skaala kujutis samuti kui spektergi. Skaalatoru on paigutatud prisma ette nõnda, et ta optiline telg moodustab prisma tahuga sama nurga kui pikksilma *B* optiline telg. Tähe-
dab, vaatleja näeb spektrit skaala kohal. Skaalatoru *C* prismapoolses otsas on kumerlääts, teises otsas, kumerläätselise tulipunktis, on läbipaistev skaala, mida valgustatakse eestpoolt. Samaselt pilutoruga on skaalatorust väljunud valguskiired paralleelsed. Need kiired peegelduvad prisma tahul ja satuvad pikksilma.

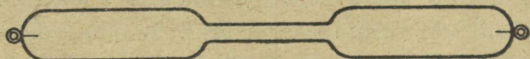
89. Emissioonispekter. Spektrit, mida annavad kiirgavad kehad, nimetatakse **emissioonispektri**ks. Emissioonispekter sisaldab kõiki neid spektrikiiri, mida antud keha kiirgab.

Uurides spektroskoobi abil voltaleegi, hõõguva plaatina-
traadi, elektripirni hõõgniidi või petrooleumileegi valgust, leiame, et nendes spektrites üks värv läheb teiseks üle pidevalt. Säärast spektrit nimetatakse **pidevaks spektri**ks. Voltaleegi valgusallikaks on positiivne süsi, mis on tahkes olekus. Samuti on tahkes olekus helendav elektripirni hõõgniit ja petrooleumilambi leegis helendavad väikesed söeosakesed. Samasuguse pideva spektri saame, kui valgusallikaks on hõõguv vedel keha, näiteks sularaud.

Niisiis heleda ehk valge hõõgumiseni kuumutatud tahked ja vedelad kehad annavad pideva spektri. Neis spektreis ei puudu ükski värv. Hõõguvate aurude ja gaaside spektri saamiseks asetame tüki uuritavat ainet voltaleegi süte vahele või bunseni põleti värvitusse leeki, kus see aine kiiresti auruks muutub. Ka võib hõõndatud gaasid helendama panna elektrivoolu abil. Seks otstarbeks tarvitatakse erilisi nn. spektraalitorusid.

Helendavate gaaside spektreid uurides leiame, et nende spektrid koosnevad üksikuist joontest ja ribadest, mis on teravalt üksteisest eraldatud. Järelikult annavad hõõguvad gaasid ja aurud joon- või riba-spektri.

Nii näiteks koosneb hõõguva naatriumauru spekter suure heledusega kollasest joonest, mis suure lahustusvõimega spektroskoobis jaguneb kaheks jooneks. Liitiumiauru spektris on üks punane ja üks nõrk oranž joon. Vesiniku spektris on üks punane, üks roheline, üks sinine joon ja üks sinise ning violetse spektriosa vahel. Mõnede ainete spektris on väga palju jooni, näiteks raua spektris.

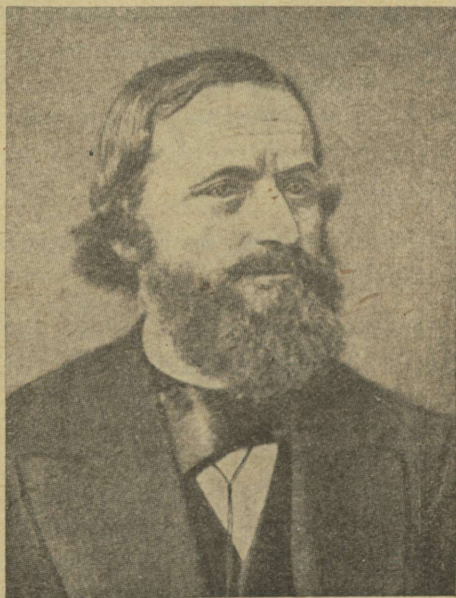


119. joon. Spektraaltoru.

Bunsen ja Kirchhoff leidsid, et iga keemilist ainet gaasilises olekus iseloomustavad isesugused spektrijooned, mis esinevad spektris alati samadel kohtadel.

Gustav Robert Kirchhoff (1824—1887) tegutses ülikooli professorina Breslaus, Heidelbergis ja Berliinis. Ühes Bunseniga leutas ta spektraalanalüüsi ning avastas siis selle abil rea uusi keemilisi elemente (rubiidium, tseesium jt.).

Suur tähtsus on Kirchhoffi poolt püstitatud temperatuurikiirguse seadusel, mis annab seose kiirguse absorptsiooni ja emissiooni vahel. Samuti tähtsad on ta uurimised elektrivoolu harunemise kohta, mille tulemuseks oli tema nime all tuntud haruvoolu seaduste sõnastamine.



Gustav Kirchhoff.

Igal gaasil või aurul on erisugune, ainult temale omane spekter.

Üldiselt on ribaspektrid keerulisema ehitusega kui joon-spektrid. Nagu lähemad uurimised näitavad, annavad ribaspektri aine molekulid, kuna joonspektri annavad aine aatomid.

Uurides hõõgivate gaaside ja aurude spektreid fluorestseeriva ekraani või termopatarei abil, leiame, et need ulatuvad ka väljapoole, silmale nähtamatusse piirkonda, nn. ultravioletsesse ja ultrapunasesse alasse.

90. Absorptsioonispekter. Asetame spektroskoobi pilu ette valgusallika, mis annab pideva spektri, näiteks elektri-hõõglambi. Pilu ja valgusallika vahele seame värvilise klaasi. Värviline klaas laseb ainult osa kiiri läbi, kuna osa kiiri ta neelab ära ehk absorbeerib, mistõttu need kiired spektris puuduvad. Säärast spektrit, kus osa kiiri absorptsiooni tõttu puudub, nimetatakse absorptsioonispektriks. Absorptsioonispekter oleneb absorbeeriva aine keemilisest koostisest.

Eriti suur tähtsus on hõõgivate gaaside ja aurude absorptsioonispektritel.

Hariliku temperatuuri juures pole gaasides valguse absorptsiooni märgata. Hoopis teisiti on lugu hõõgivate gaaside ja aurudega.

Lahutame voltaleegi valguse prisma abil spektriks: saame ekraanil pideva spektri. Asetame nüüd pilu ette bunseni põleti värvitu leegi, kuhu paigutame plekist tehtud pannikese abil tükikese naatriumi. Naatrium aurustub bunseni põleti leegis ja leek muutub kollaseks. Spektri kollases osas tuleb nähtavale tume joon. See tähendab, et naatriumi aur, mille

temperatuur on palju madalam kui voltaleegi temperatuur, neelab leegi valgusest seda osa, mida ta ise kiirgab. Pilu ees olev naatriumi aur muidugi kiirgab ise ka. Kuid et naatriumi auru temperatuur on palju madalam voltakaare temperatuurist, siis on naatriumi joon võrreldes ümbrusega tumedam.

Samuti näitab katse, et liitium absorbeerib punaseid kiiri, seega samu kiiri, mida ta ise kiirgab. Tähendab, hõõguvad gaasid ja aurud neelavad kõrgema temperatuuriga valgusallika kiirgusest neidsamu spektrivärve, mida nad ise kiirgavad (Kirchhoff'i seadus).

91. Päikesespekter. Lahutades päikesevalguse spektroskoobi abil spektri, tarvitades seejuures kitsast pilu, võime spektris tähele panna hulka tumedaid jooni. Neid tumedaid jooni päikesespektris nimetatakse Fraunhoferi joonteks. Tähtsamad Fraunhoferi jooned märgitakse tähtedega *A*, *B*, *C*, *D* jne. Fraunhoferi joonte arv päikesespektris ulatub mitme tuhandeni. Et Fraunhoferi joontel on spektris kindel asend, siis tarvitatakse neid sageli spektrivärvide asendi määramiseks.

Et päikesespektris on tumedaid neeldumisjooni, siis järeldame sellest, et Päikest ümbritseb atmosfäär, mis on gaasilises olekus. Fraunhoferi jooned on seega Päikese atmosfääris olevate aurude ja gaaside absorptsioonijooned.

Päikesespektri naatriumi kollase joone kohal on tume joon. Sellest järeldatakse, et Päikese atmosfääris on olemas naatriumi aur. Samal teel võib kindlaks teha, et Päikese atmosfäär sisaldab vesinikku, heeliumi, rauda jne. Ühtegi Maakeral tundmatut ainet Päikese atmosfääris ei ole.

Päikesespektri uurimiste tulemuseks oli seni tundmatu aine avastamine. N. Lockyer pani 1868. a. päikesespektris

tähele silmatorkavat tumedat joont, mida ei andnud ükski Maakeral seni tuntud aine. Seepärast oletati algul, et Päikese atmosfäär sisaldab Maakeral tundmatut ainet. Seda ainet nimetati heeliumiks. Hiljem, aastal 1895, avastati heelium ka Maakeral.

92. Spektraalanalüüs. Iga ainet iseloomustab isesugune emissiooni- ja absorptsioonispekter. Sellel nähtusel põhineb spektraalanalüüs, s. o. ainete keemilise koosseisu määramine nende spektrite järgi. See uurimisvõte on pärit Bunsenilt ja Kirchhoff'ilt.

Spektraalanalüüsi kasutatakse keemias, eriti neil juhtudel, kus on tegemist aine väga väikeste hulkadega. Nii näiteks võib veel $3 \cdot 10^{-7}$ mg naatriumi olemasolu märgata. Et määrata aine koosseisu spektraalanalüütilisel teel, selleks viiakse uuritav aine näiteks bunseni põleti värvitus leegis gaasilisse olekusse või pannakse spektraaltorus elektrivoolu abil helen-dama. Spektraalanalüütilisel teel on avastatud ka rida varem tundmatuid elemente, näiteks tsesium, rubiidium jt.

Kuid ka aine absorptsioonispektri järgi võib otsustada aine keemilise koosseisu üle. Et absorptsioonispektri annavad ka vedelad kehad, kui neist valgus läbi juhtida, siis võib seda meetodit tarvitada, ilma et oleks vaja uuritavat ainet kuumutada, mistõttu see võiks keemiliselt laguneda.

Nii näiteks annab nõrk verelahus tugeva absorptsiooni-joone spektri rohelisel alal.

Eriti suur tähtsus on spektraalanalüüsil astronoomias Päikese jt. taevakehade keemilise koosseisu määramisel.

Taevakehade spektreid uuritakse sel teel, et fotograafitakse nende spektrid fotoplaadile. Selleks tarvitatakse pikk-silma, kus okulaari asemel on fotoaparaadi-taoline sisseseade. Nii saadakse nn. s p e k t r o g r a m m, mille abil määrataksegi, millised ained esinevad uuritava taevakeha pinnal.

Kinnistähtede spektreid on mitmesuguseid. Ühe liigi

kinnistähete spektrid on sarnased Päikese spektriga ja neis leidub hulk tumedaid absorptsioonijooni. Teiste kinnistähete spektrites leiduvad jälle heledad vesiniku ja heeliumi emissioonijooned.

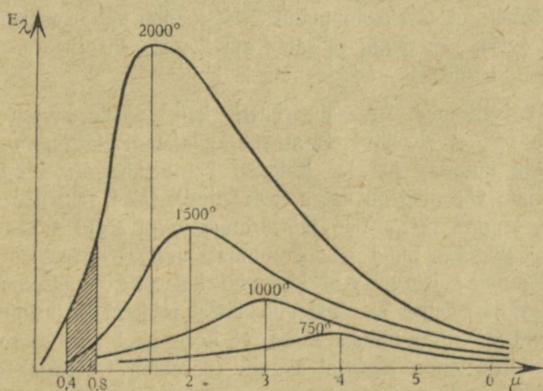
Planeetide ja Kuu valgus on peegeldunud päikesevalgus, seetõttu ühtivad nende spektrid täielikult Päikese spektriga.

XIII. Temperatuurikiirgus.

93. Kiirgusenergia jaotuskõver. Keha kiirgust (soojuskiirgust, nähtavat ja ultravioletset kiirgust), mida põhjustab keha kõrge temperatuur, nimetatakse keha temperatuurikiirguseks.

Keha, mille temperatuur on alla 525°C , kiirgab ainult silmale nähtamatu soojuskiiri. Kuumutamisel üle 525°C hakkab keha punaselt hõõguma. Veel kõrgema temperatuurini kuumutamisel muutub keha kiirgus kollaseks ja helevalgeks.

Vaatleme allpool lähemalt temperatuurikiirguse seadusi.



120. joon. Energia jaotus spektris.

Kiirgusenergia jaotust spektris võib mõõta termopatarei abil. Säärased mõõtmised näitavad, et energia jaotus spektris mitmesuguste lainepikkustega aladel pole ühtlane. Kandes püstteljele kiirgusenergia suturuse, rõhtteljele vastava kiirguse lainepikkuse, saame kõvera, mis kujutab graafiliselt energia jaotust spektris (energia jaotuskõver). Joonis 120 kujutab

energia jaotuskõverat mitmesuguste temperatuuride juures. Nagu joonisest nähtub, tõuseb energia, mida keha kiirgab 1 sek kestel, alates ultrapunase spektri poolelt, ja tõustes maksimumini langeb ultravioletsel poolel järsku. On arusaadav, et pindala, mida piirab energia jaotuskõver, kujutab graafiliselt kogu keha kiirgust. Kiirgusenergia, mis tuleb spektri nähtava osa kohta, on joonisel eraldi märgitud.

94. Absoluutselt must keha. Temperatuurikiirguse seadused võtavad lihtsa kuju, kui määrata need absoluutselt musta keha kohta.

Absoluutselt mustaks kehaks nimetatakse keha, mis absorbeerib täielikult kehale langenud kiirguse. Absoluutselt musta kehaga sarnaneb madalais temperatuurides tahmatud pinnaga keha. Teised kehad erinevad absoluutselt mustast kehast vähe, kui temperatuur on küllalt kõrge.

Keha, mille temperatuur on ümbruse temperatuurist kõrgem, kaotab soojust soojusejuhtivuse, konvektsiooni ja samuti ka soojuskiirguse näol. Kaks erineva temperatuurini kuumutatud keha kiirgavad soojust teineteisele, kusjuures soojem keha kiirgab soojusenergiat külmemale kehale rohkem kui külmem keha soojemale. Kui nende temperatuurid on ühtlustunud, ei lakka kehade soojuskiirgus. Et nende temperatuurid enam ei muutu, sellest järeldame, et tasakaalu puhul keha kaotab soojusenergiat kiirguse näol niisama palju, kui palju ta sama aja kestel absorbeerib soojuskiirgust. See kehtib üldiselt kõikide kehade kohta.

Et absoluutselt must keha absorbeerib kõik temale langenud kiirguse, siis tähendab see, et absoluutselt musta keha soojuskiirgus on ka kõige suurem. Seda kinnitab katse. Kallame kahte ühesuurusesse plekkanumasse, mille ühe välispind on valge (poleeritud), teise välispind aga tahmatud, ühepalju kuuma vett. Vee temperatuur olgu algul mõlemas anumast ühekõrgune. Jälgides nüüd vee jahtumist anumais näeme, et tahmaga kaetud plekkanumas jahtub vesi kiiremini kui valge välispinnaga plekkanumas. Sellest järeldame, et must pind kiirgab rohkem soojuskiirgust kui valge poleeritud pind. Samuti näitab katse, et kore pind kiirgab rohkem soojust kui poleeritud pind. Eespool nägime (Kirchhoff'i seadus), et iga gaas neelab neid kiiri, mida ta ise sama temperatuuri juures kiirgab. Seepärast kehtib üldiselt iga lainepikkuse puhul seadus: Iga keha kiirgab seda tugevamini, mida rohkem kiiri ta sama temperatuuri juures neelab.

95. Stefan-Boltzmann'i seadus. Seose keha kogu kiirguse ja temperatuuri vahel annab Stefan-Boltzmanni seadus:

Keha kogu kiirgus ühe ajaühiku kestel on võrde-

line selle keha absoluutse temperatuuri neljanda astmega, ehk lühidalt

$$E = \sigma T^4,$$

kus E on keha energia kiirgus 1 sek kestel, T keha absoluutne temperatuur ja σ võrdetegur, mis oleneb tarvitatavaist ühikuid.

Nagu siit nähtub, suureneb keha kiirgus keha temperatuuri tõusuga väga kiiresti, sest temperatuuri tõustes 2 korda, näiteks 273° kuni 546° abs., suureneb kiirgus $2^4 = 16$ korda; temperatuuri tõustes 3 korda, 273° kuni 819° abs., suureneb kiirgus $3^4 = 81$ korda.

Wien'i nihkeseadus. Joonisest 121 nähtub samuti, et kiirgusenergia maksimum temperatuuri tõusuga nihkub spektri violetse osa poole, s. o. lühema lainepikkuse poole.

Sellest järgneb, mida kinnitavad ka vaatlused, et keha kuumutamisel algul hõõgub keha punaselt, hiljem temperatuuri tõusmisel muutub hõõgumine kollaseks. Temperatuuri veelgi kõrgemale tõusmisel hakkab keha hõõguma helevalgelt. Toetudes teoreetilisele arvutusele avastas W. Wien 1893. a. järgmise lihtsa seaduse:

Kiirguse intensiivsema osa lainepikkuse (λ maks.) korrutis kiirgava keha absoluutse temperatuuriga on konstantne, ehk lühidalt:

$$\lambda \text{ maks.} \cdot T = \text{const.}$$

Seda seadust, mida kinnitasid hilisemad katselised uurimised, tuntakse füüsik Wieneri nihkeseaduse nime all.

Alljärgnevas tabelis on antud mõnede valgusallikate temperatuurid ja intensiivsema ala lainepikkused μ -tes.

Valgusallikas	Temperatuur	Lainepikkus μ -tes
Küünal	1960° abs.	1,47
Söeniidi-hõõglamp	2100 „	1,37
Gaasilamp	2450 „	1,18
Voltaleek	4200 „	0,69

Arvutades iga valgusallika jaoks korrutise λ maks. T , näeme, et see on igal juhul 2880.

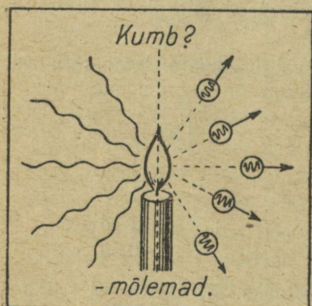
Wieni nihkeseadust rakendatakse laialdaselt. Et pole raske määrata energia maksimumi spektris, siis kasutatakse seda seadust valgust kiirgavate kehade temperatuuri määramiseks.

Päikesespektris on energia maksimum lainepikkusel $0,5 \mu$. Kasutades Wieneri nihkeseadust leiame Päikese pinna temperatuuri, mis on ligi 5800° abs. Samal viisil võib määrata ka teiste kinnistähedete temperatuuri. Kuuemate kinnistähedete pinnatemperatuur on kuni $20\,000^\circ$ abs.

Wieni nihkeseadusel põhinevad optilised püromeetrid, mille abil saab määrata valgust kiirgavate kehade temperatuuri. Nii määratakse tehnikas sageli sulatus-, kõrg- jt. ahjude temperatuuri optiliste püromeetrite abil.

96. Meie valgusallikate kasutegur. Lähtudes temperatuurikiirguse seadustest võime otsustada meie valgusallikate kasuteguri üle.

Välja arvatud mõned erandid, on peaaegu kõik meie kunstlikud valgusallikad temperatuurikiirgajad. Kuid ainult väike osa nende kiirgusest on silmale nähtav. Suurem osa nende kiirgusest on peamiselt silmale nähtamatu soojus- (ultrapunase) kiirgus. Wiener nihkeseadusest järgneb, et valgusallika temperatuuri tõusuga nihkub intensiivsem kiirgus nähtava spektri ossa. Inimese silm on kõige tundlikum kollase kiirguse suhtes. Valgusallikas, mille intensiivsema osa kiirgus langeb spektri kollasesse ossa, peab omama temperatuuri, nagu see järgneb Wiener nihkeseadusest, umbes 5600° . See on ligikaudu Päikese pinna temperatuur. Nii kõrge temperatuuriga kunstlikke valgusallikaid pole. Seetõttu on ka meie valgusallikate optiline kasutegur väike. Optiline kasutegur on suhe nähtava kiirguse ja kogu valgusallika poolt kiirguseks tarvitatud energia vahel. Näiteks petrooleumi- ja gaasilambi kasutegur on 0,2%, parimal juhul küünib see moodsail elektri-hõõglampidel kuni 4%.



121. joon.

97. Kvantide teooria. Energia jaotust spektris on katsutud mitmete teadlaste poolt teoreetiliselt põhjendada. Kuid kaua aega ei andnud need katsed tulemusi. Aastal 1900 õnnestus saksa füüsikul **M. Planck**'il teoreetiliselt leida seos 1 sekundel kiirgunud energiahulga, keha temperatuuri ja lainepikkuse vahel (kiirgunud energia kui funktsioon lainepikkusest ja absoluutsest temperatuurist). Sellest nn. Plancki seadusest tuletatud energia jaotuskõver on täies kooskõlas katse teel leitud kõveraga. Seejuures selgus ka, et Stefan-Boltzmanni seadus ja Wiener nihkeseadus on tuletatavad Plancki seadusest.

Planck lähtus selle seaduse tuletamisel oletusest, et kiirgusenergia pole lõpmatult jagatav, vaid et see koosneb nagu ainegi algosakestest. Neid kiirgusenergia algosakesi nimetatakse fotoniteks, valguskvantideks ehk lihtsalt kvantideks. Järelikult kiirgavad või neelavad keha aatomid energiat mitte igasugustes hulkades, vaid ainult

kvantide kaupa. Valguskvant on kiirgusenergia algosake, nagu aatom on aine algosake. Edasi järgneb Plancki teooriast, et valguskvantide suurus sõltub lainepikkusest, seega ka võnkearvust. Kui ν on võnkearv, siis kiirgusenergia kvant $E = h \cdot \nu$, kus h on nn. Plancki mõjukvant $= 6,63 \cdot 10^{-27}$ erg. sek.

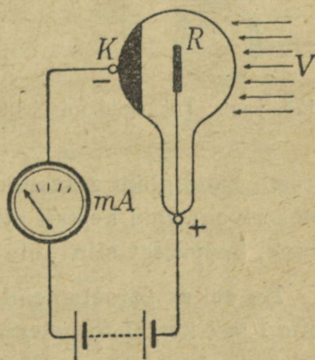
Vene füüsik *Hvolson* annab järgmise võrdluspildi kvantide suuruse kohta: punaste kiirte kvandid on peenikeste haavlite vool, violetsete kiirte kvandid — püssikuulide vool, röntgenikiirte kvandid on kahurimürskude sadu, γ -kiirte kvandid — suurimakaliibriliste kahurite mürsud.

Kvantide teooria, mille aluseks on eespool kirjeldatud oletus, on füüsika edaspidisele arengule sügavat mõju avaldanud.

Kvantide teooriaga on Newtoni valguse emissiooni teooria uuesti eluõiguse saanud, kuigi muudetud kujul. Küsimus, kas valgus on lainetus või annavad valguse valgusaine liikuvad osakesed, kaotab seega oma mõtte, sest mõlemad seisukohad on õiged. Sel valguse juures esineval dualismil on sügav tähendus. Nagu uuemad uurimised näitavad, on see dualism omane ka aine ja elektri algosakestele. Ka need annavad teatud tingimustel interferentsi, kuigi nende puhul on tegemist materiaalsete osakestega.

1. Kas joonspektri järgi võib otsustada valgusallika temperatuuri üle?
2. Mispärast ei sula lumi talvel selge ilmaga, kui päike paistab?
3. Mispärast harilikku fotoplaati ilmutatakse ja kinnistatakse punase valguse käes?

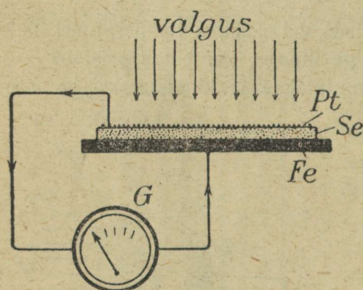
98. Fotoelement. Nähtavad valguskiired on võimelised eraldama mõnedest tahketest ainetest elektrone. Säärastest ainetest on tuntuimad leelismetallid kaalium, naatrium, tseesium jt. Sellel nähtusel põhineb **fotoelemendi** ehitus. Fotoelement koosneb õhutihjast klaaspirnist. Osa klaaspirni sisetmist pinda on kaetud näiteks kaaliumiga. See metallikiht on katoodiks *K*, kuna teine elektrood, anood *R*, asub klaaspirni keskel. Viimane on tavali-



122. joon. Fotoelement.

selt võreetaoline. Kui nüüd metallikiht ühendada galvanomeetri kaudu vooluallika negatiivse poolusega, teine elektrood aga vooluallika positiivse poolusega, siis galvanomeeter voolu ei näita, kui fotoelement on pimedas. Langeb aga fotoelemendi metallikihile valgus, siis hakkavad viimase toimel metallikihist väljuma elektronid, mis positiivsele elektroodile langedes tekitavad elektrivoolu. Katsed näitavad, et **fotovoolu intensiivsus** on võrdeline metallikihile 1 sek kestel langenud valgushulgaga. Ka ultraviolettkiired põhjustavad fotoefekti, ning isegi veel suurema hulga tahkete ainete juures kui valguskiired.

Eriti valgustundlikud on nn. **tõkkekihi** fotoelemendid. Tuntuimad neist on seleen-raua fotoelement. See koosneb raudplaadist, mille üks pind on kaetud seleenkihiga. Seleenikihi peale on sadestatud valgust läbilaskev äärmiselt õhuke



123. joon. Tõkkekihi fotoelement.

kiht plaatinat. Viimane on üheks elektroodiks, kuna teiseks elektroodiks on raudplaat. Kui valgustada läbi platinakihi seleeni, siis vabanevad valguse toimel seleenist elektronid, mis liiguvad platinakihti, kuna nende minek raudplaati on tõkestatud, nagu katse seda näitab.

Kui ühendada platinakiht traadi kaudu läbi galvanomeetri raudplaadiga, siis tekib selles elektrivool, mis kestab niikaua, kuni kestab seleeni valgustamine. Seepärast siin pole tarvis mingit välisvooluallikat.

Ka selles fotoelemendis on fotovoolu intensiivsus võrdeline 1 sek kestel fotoelemendile langenud valgushulgaga, s. o. valgustustugevusega. Fotoelemente, eriti aga tõkkekihi fotoelemente kasutatakse laialdaselt valgusreleedena helifilmis,

kaugenägemise aparaatides, sõjaasjanduses ja kõigepealt fotomeetritena. Kui fotovoolu mõõtev galvanomeeter on kaliibritud mitte ampriks ega selle osades, vaid luksides, siis nimetatakse sellist riista luksmeetriks.

99. Elektromagnetiliste lainete spekter. Uurimused valguse kohta (Maxwell, 1873) on näidanud, et valguskiirgus kuulub elektromagnetiliste lainete liiki koos hertsilainetega, ultrapunaste, ultravioletsete, röntgenikiirtega jne. Eri-nähtavus kõigi nende kiirguste vahel seisab ainult nende iseseisvustes lainepikkustes. Kõigi võimalikkude lainepikkustega elektromagnetiliste lainete peret nimetatakse elektromagnetiliste lainete spektriks. Valgus võtab enda alla ainult väga väikese piirkonna kogu elektromagnetiliste lainete spektrist, sest omadus mõjutada nägemiserke on ainult neil elektromagnetilistel lainetel, mille lainepikkus on umbes 360—780 m μ . Kõik teised lainepikkused ei ärrita meie nägemiserke ja vastavad kiirgused ei ole seetõttu silmaga nähtavad, kuid nende olemasolu võime kindlaks teha teistsuguste meetoditega. Nii näiteks põhjustavad valgusest lühemate lainepikkustega kiirgused mitmesuguste ainete luminesentsi, suurema lainepikkusega ultrapunased kiired on kindlaks tehtud nende soojusliku toime kaudu, hertsilained — induktioonvoolude kaudu, mida nad juhtmetes esile kutsuvad, jne. Piltliku ülevaate kogu elektromagnetiliste lainete spektrist annab järgmine tabel.

Kiirgus	Lainepikkus
Lühimad γ -kiired	0,0005 m μ
Röntgenikiired	0,016—66 m μ
Ultraviolettkiired	13,6—360 m μ
Valgus	360—780 m μ
Ultrapunased kiired	780—340 000 m μ = 0,34 mm
Hertsilained	200 000 m μ (= 0,2 mm) — ∞

Laboratoorseid töid.

Laboratoorne töö nr. 1. Valgusallikate valgustugevuse võrdlemine bunseni fotomeetri abil (§ 7 juurde).

Töövahendid. Bunseni fotomeeter või selle puudumisel puuklopi külge kinnitatud tükk valget paberit, mille keskele on tehtud õlilaik, 2 valgusallikat, vähemalt meetripikkune mõõtjoonel või mõõtpael ja pikem laud või pink pimendamisevõimalustega ruumis.

Töökäik. Asetame valgusallikad laua otstele ja fotomeetri nende vahele. Seejuures peab hoolitsema, et kõik kolm — valgusallikad ja fotomeetri laik — oleksid samal sirgjoonel. Nüüd nihutame fotomeetri õlilaiku edasi-tagasi seni, kui ta enam-vähem ära kaob. Siis mõõdame valgusallikate kaugused õlilaigust ja saadud andmed ning arvutustulemused kirjutame tabelisse järgmiselt:

Katse järjek. nr.	R_1	R_2	R_1^2	R_2^2	$J_1 : J_2$
1					
2					
3					

Muuta valgusallikate vahelist kaugust ja määrata vastavad kaugused fotomeetri õlilaigust. Sedaviisi toimetada vähemalt 3 korda, arvutada valgusallikate valgustugevuste suhe ja võtta neist aritmeetiline keskmine.

Pimendamisevõimaluste puudumisel koolis teha see töö kodus.

Laboratoorne töö nr. 2. Nõguspeegli fookuse kauguse määramine (§ 23 juurde).

Töövahendid. Nõguspeegel fookuse kaugusega 10—20 cm, küünal, kitsas (1—2 cm lai) ja teine suurem valge ekraan, mõõtjoonel.

Töökäik. Võimalikult pimedas ruumis asetame lauale nõguspeegli ja temast umbes 50 cm kaugusele põleva küünla, nõnda et peegli keskkohast ja leek oleksid lauast samal kõrgusel. Mõlema vahele asetame kitsa ekraani ja selle edasi-tagasi nihutamise saavutame asendi, kus küünlaleegi terav kujutis tekib just ekraanil. Nüüd mõõdame küünla ja kujutise kauguse peeglist (vst. a ja k) ning arvutame neist andmeid nõguspeegli valemi põhjal fookuse kauguse.

Nüüd asetame küünla ühe- ja kahekordse fookuskauguse vahe peale ning leiame jälle küünla terava kujutise ekraanil. Selle saavutanud, mõõdame vastavad a ja k.

Muutes küünla asendit, toimime sedaviisi vähemalt 3 korda. Saadud vaatlus- ja arvutustulemused korraldame tabelisse järgmiselt:

Mõõtmise järjek. nr.	Küünla kaugus a	Kujutise kaugus k	$f = \frac{ak}{a+k}$	Kujutise iseloom
1				
2				
3				
	Keskmine			

Mõõta päikesekiirte või kaugel lambivalguse abil läätse fookuse kaugus otseselt ja võrrelda saadud tulemust eelmistest mõõtmistest saadud tulemustega.

Milline tekib kujutis, kui küünla ja ekraani kohad ümber vahetada?

Laboratoorne töö nr. 3. Klaasi murdumisnäitaja määramine (§ 32 juurde).

Laboratoorne töö nr. 4. Kiirte kaldemiinimumi määramine prisma läbimisel ja sellest prisma aine murdumisnäitaja arvutamine (§ 33 juurde).

Töövahendid. Kolmetahune klaasprisma, nööpnõelu, valget paberit ja mall.

Töökäik. Asetame lauale lehe valget paberit ja selle keskele püsti prisma, murdja servaga vaatelejast eemale, nagu see kujutatud joon. 45. Prismale langeva kiire sihi märkimiseks tõmbame paberile mõne sirge AB ja pistame lauasse, vasakule prismast, püsti kaks nööpnõela — üks prisma lähedale (B), teine (A) võimalikult eemale esimesest. Nüüd püüame tabada silmaga paremalt poolt prisma temas murdunud kiire AB sihti CD. Selle leidnud, pöörame ettevaatlikult prisma ja jälgime ühtlasi sihi CD asendi muutumist võrreldes sihiga AB. Kui siht CD moodustab paberile tõmmatud sihiga kõige väiksema nurga, s. o. kaldemiinimumi δ , siis jätame prisma paigale ja tähistame sihi CD kahe püsti lauasse torgatud nööpnõelaga. Sel juhul prismast paremalt poolt vaadates paistavad kõik neli nööpnõela samal sirgel. Edasi tõmbame prisma äärt pidi paberile terava joone. Pikendame nööpnõeltega tähistatud sihid kuni lõikumiseni prisma äärjoontega ja ühendame sel teel saadud punktid sirglõiguga (BC). Samuti ehitame paberil kaldemiinimumnurga δ .

Möödame malliga paberilt kaldemiinimumi δ , prisma murdva nurga φ ja nurgad sihtide AB ja CD ning prisma aluse (otsa) äärjoonte vahel.

Saadud andmetest nähtub, et kaldemiinimumi puhul läbib valguskiir prisma sümmeetriliselt. Veenduda, et valguskiire mittesümmeetrilise läbimineku korral on kaldenurk alati suurem.

Mõõdetud φ ja δ põhjal arvutame prisma aine murdumisnäitaja ξ -is 33 toodud valemi abil.

Laboratoorne töö nr. 5. Kumerlääitse fookuse kauguse määramine (§ 40 juurde).

Töövahendid. Kumerlääitse fookuse kaugusega 20—30 cm, küünal, valge ekraan ja mõõtjoonel.

Töökäik. Võimalikult pimedas või vähese valgusega ruumis asetame ühele laua otsale põleva küünla ja temast 100—120 cm kaugusele valge ekraani. Nende vahele küünlaga ühele kõrgusele seame kumerlääitse, nii et küünla terav kujutis tekiks just ekraanil. Selles asendis mõõdame küünla kauguse a ja ekraani kauguse k läätest ning arvutame neist andmeist lääitse valemi põhjal fookuse kauguse f .

Muudame nüüd küünla ja ekraani vahelist kaugust ning mõõdame jälle vastavad a ja k . Sedaviisi toimime vähemalt 3 korda. Saadud vaatlus- ja arvutustulemused korraldame tabelina järgmiselt:

Mõõtmise järjek. nr.	Küünla kaugus a	Kujutise kaugus k	$f = \frac{ak}{a+k}$	Kujutise iseloom
1				
2				
3				
Keskmine				

Mõõta päikesekiirte või kauge lambi valguse abil lääitse fookuse kaugus otseselt ja võrrelda saadud tulemust eelmistest mõõtmistest saadud tulemustega.

Milline on kasutatava lääitse optiline tugevus, s. o. meetrites väljendatud fookusekauguse pöördväärtus ($1:f$ meetrites)?

Milline tekib kujutis, kui küünla ja ekraani kohad ümber vahetada?

Laboratoorne töö nr. 6. Luubi suurenduse määramine (§ 54 juurde).

Töövahendid. Luup ja kaks mm-jaotistega mõõtjooneliit.

Töökäik. Asetame ühe mõõtjooneli otse (rinnaga risti!) enda ette lauale oma parima nägemise kaugusele (umbes 20—30 cm) silmast. Teist mõõtjooneliit hoiame käes rööbiti esimesega silma ja esimese mõõtjooneli vahel. Vaatleme ühe silmaga läbi luubi teisel mõõtjoonelil mõnd kriipsude vahemikku, näiteks 1 cm, ja samaaegselt teise silmaga luubi kõrvalt (mitte läbi luubi!) jälgime esimese mõõtjooneli skaalat. Sedaviisi katsetame seni, kuni saavutame olukorra, et kujutis tekib laual oleva esimese mõõtjooneli skaalal, osalt kattes seda. Siis märgime üles, millise vahemiku (cm; mm) laualoleval mõõtjoonelil katab läbi luubi nähtav 1 cm kujutis. Saadud arvude suhe annabki meile luubi suurenduse. Näiteks, kui läbi luubi vaadeldud 1 cm kujutis katab 5 cm, siis on selle luubi suurendus 5.

Oluline nende vaatluste juures on asjaolu, et läbi luubi selgesti nähtav kujutis oleks just mõõtjoonelil. Selline olukord on saavutatud, kui silma ühele või teisele poole nihutamiseega kujutise asend mõõtjoonelil ei muutu — puudub nn. pärallaktiline viga.

Vaatleme sedaviisi vähemalt 3 korda, võttes aluseks erinevad vahemikud mõõtjoonelil. Arvutame igast vaatlusest suurenduse ja võtame neist aritmeetilise keskmise.

Vaatlusest saadud luubi suurendust võrrelda eelmises paragrahvis antud valemi põhjal arvutatud suurendusega.

Kuidas sõltub luubi suurendus vaatleja parima nägemise kaugusest?

Vastuseid.

§ 3.

1. 1 n. k. = 1,1 r. k.; 1 r. k. = 0,9 n. k.
2. n. k. > r. k. > HK; 1 n. k. = 1,1 r. k. = 1,2 HK; 10%.
3. 36,4 r. k.

§ 4.

1. $\frac{1}{\pi}$
2. $\frac{4}{3}$ luumenit.
3. 0,3 vatti; 15 luumenit.
4. HK on suurem 13% võrra.
5. 20 r. k.; 22 HK; 1,5%.

§ 5.

1. 10%.
2. 4,25 luumenit.
3. 41,7 luksit.
4. 1 mm².
5. 10⁴ luksit; 100 fotti; 25 000 luksit.

§ 6.

1. 2,25 korda.
2. ~4,5 korda.
3. Teine on tugevam.
4. 63,7 luksit.

§ 7.

2. 78,4 r. k.

3. Esimene.
4. 34,7 cm.

§ 11.

1. $\frac{1}{200000}$ sek. Ei suudetud nii väikest ajavahemikku mõõta.

§ 15.

1. 30°.
2. 45°.
3. Muutus 30°; 20° vastassuunas.
4. 20°.
5. 25°.

§ 16.

1. Esimene.
2. Puudutada esemega vastu peeglit ja hinnata kujutise kaugus peeglist.
3. Väheneb 3 korda.

§ 17.

1. Ei ole.
2. Suureneb 50 cm.
3. Lõpmatu palju kujutisi.
5. Pool enda pikkusest. Ei olene.

§ 19.

2. Peeglitevahelise nurga vähenedes kujutiste arv suureneb.

3. Ringjoon, mille raadiuseks on valguspunkti kaugus peeglite lõikejoonest.
4. 30° .
5. Ristiolekus veest väljas ja vees olev osa moodustavad ühe sirge.
6. Ainult koonduvast kiirtekimbust.

§ 20.

1. $\frac{\pi}{100}$; $\frac{1}{400}$.
2. $\frac{1}{64}$; $\frac{1}{100}$. Esimene.

§ 22.

1. 20 cm; 25 cm; 50 cm.
2. 30 cm; 25 cm; 1,5 m.
3. 15 cm.
4. 60 cm.
5. 12 cm ja 24 cm.

§ 25.

1. Muutub ainult kujutise valgustugevus.
2. 0,6 m ja 1,2 m.
3. 2 cm ja 7,5 cm.

§ 29.

3. $22^\circ 51'$; $35^\circ 12'$; $45^\circ 50'$.
4. 0,74; 0,58.
5. 43° .

§ 31.

1. Koonuses, mille moodustaja ning teljevaheline nurk on 49° .
2. Kivisoolal $40^\circ 30'$, glütseriiniil $42^\circ 52'$. Avaram seal, kus täieliku sisepeegelduse piirnurk on suurem (vesi ja kivisool).
3. $49^\circ 30'$.

§ 32.

1. Esemete kuju moonutusest läbi klaasi vaadates.
2. Valguskiirte sihi alalisest muutusest õhu murdumisnäitaja muutumise tõttu.

§ 33.

1. Väheneb.
4. 1,59; 1,63.

§ 39.

1. On.
2. Kujutise valgustugevus on nõrgem.
3. 12,5 cm; tõeline, vähendatud, ümberpöördud.
4. 1,69.
5. 48 või 24 cm kaugusele.

§ 42.

2. 2,5 cm; 30 cm.
3. 1,2 cm; $k = 4,8$ cm.
4. Sama suur.

§ 45.

1. Veest silma minevad kiired murduvad vähem kui õhust silma minevad kiired.
4. Kujutis satub pimetähnile.

§ 47.

1. 40 cm.
2. — 4 dioptriad.
3. — 6 dioptriad.

§ 48.

1. $9,3^\circ$.
2. 10 cm.
3. 2,6 m.

4. Kuu läbimõõt on vastavalt väiksem.

§ 55.

5. 5,8'.

1. ~ 500 korda.

§ 50.

§ 59.

1. Täiendvärve.

3. 8,4 cm; 17,6 cm.

§ 54.

§ 73.

1. Kaugelenägija.

1. 17 000.

2. Umbes 3 korda.

2. $7,5 \cdot 10^{14}$.

3. 4,2 cm.

3. 367,5 $m\mu$.

4. Tugevdavad.

NIMEDE JA MÖISTETE REGISTER.

(Arvud nimede ja mõistete taga tähendavad lehekülgi.)

- | | | |
|-------------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Abbe 88 | Difraktsioonivõre 112 | Galilei 18, 87 |
| Aberratsioon, kromaati-
line 63 | Dioptria 69 | Gregory 88 |
| Aberratsioon, sfääriline
39, 63 | Dispersioon 52 | Grimaldi 99 |
| Absoluutselt must keha
5, 9, 136 | Dollond 55 | Halley 65 |
| Absorptsioonispekter
132 | Ebatavaline kiir 121 | Hefner-Alteneck
6 |
| Adaptatsioon 73 | Eeter 92 | Helgheitja 40 |
| Akommodeerumine 68 | Elementaarlane 95 | Heliograaf 28 |
| Akromaatiline lääts 54 | Emissioonispekter 130 | Heron 40 |
| Akromaatiline prisma
53 | Epidiaskoop 89 | Hooke 99 |
| Alhazen 40, 55, 65 | Episkoop 89 | Huygens 65, 91, 93,
99 |
| Analüsaator 119 | Eukleides. 17, 40,
55 | Huygensi printsiip 91,
93 |
| Aristoteles 77 | Euler 55 | Hämarik 44 |
| Bartolinus 123 | Fatamorgaana 47 | Interferents 99, 101 |
| Bradley 20 | Fizeau 20 | Irradiatsioon 73 |
| Cornu 21 | Fluorestsents 123 | Jansen 87 |
| Dekaluumen 7 | Fookus 33, 57 | Joonspekter 130 |
| Demokritos 76 | Footon 138 | Järelpildid 72 |
| Descartes 55 | Fosforestsents 123 | Kaksikmurdamine 120 |
| Diapositiiv 89 | Fotoelement 139 | Kaugelenägevus 69 |
| Difraktsioon 106, 108 | Fotomeeter 14, 15, 17 | Kepler 18, 55, 65,
88 |
| Difraktsioonispekter
114 | Fott 9 | Kiiker 86 |
| | Foucault 21 | Kino 75 |
| | Fraunhoferi jooned 133 | |
| | Fresnel 99, 123 | |
| | Fresneli peegliktse
100 | |

- Kirchhoff 131
 Kohasfumine 68
 Kondensor 88
 Korpuskulaarne valgus-
 teooria 91
 Kujutis 25
 Kujutiste ehitamine 27,
 34, 61
 Kumerpeegel 37
 Kvantide teooria 138
 Kõverustsenter ja -raa-
 dius 31
 Küünal (valgusühik) 5,
 6
 Laboratoorseid töid 142
 Laineaparaat 92
 Lainete murdumine 96
 „ peegeldumine
 95
 Lainetusmasin 9
 Lainetusteooria 91
 Lambert 18
 Leonardo da Vinci
 18
 Leukippos 76
 Lipperseim (Lip-
 persheim) 87
 Lockyer 133
 Luks 9
 Luksmeeter 17, 141
 Lumineerivad kehad 3
 Luminesentsents 123
 Luumen 7
 Luup 78
 Läätsed 56
 Lühinägevus 69
 Maapikksilm 86
 Malus 123
 Mariotte 77
 Maurolycus 55
 Maxwell 99
 Meeterküünal 9
 Michelson 23
 Mikroskoop 80
 Miraaž 48
 Murdumisnäitaja 41
 Murdumisseeadused 40
 Mõjukvant 139
 Newton 52, 55, 88,
 91, 98
 Newtoni rõngad 105
 Nicoli prisma 121
 Normaa!spekter 116
 Nurkpeegliid 28
 Nõguspeegel 30
 Nägemine 65, 75, 76
 Nörrenberg 123
 Optika 3
 Optiline telg 31, 57
 „ tihedus 42
 „ tsenter 57
 „ tugevus 69
 Optilised riistad 77
 Paraboloidpeegliid 40
 Pealaine 95
 Peegel, sfääriline 30
 Peggeldumisseadused
 24
 Peggelskaala 29
 Peggelteleskoop 84
 Periskoop 29
 Pidev spekter 130
 Pikksilm 82
 Pimetähn 67
 Pinnavalgustuse sea-
 dused 11
 Planck 138
 Planck'i seadus 138
 Platon 76
 Polarisaator 119
 Polarisatsioon, valguse
 116
 Polarisatsioonifiltrid
 122
 Polariseeritud valgus
 119
 Porta 40, 65, 77
 Prillid 69
 Prisma-binokkel 85
 Prisma, optiline 49
 Prisma-pikksilm 85
 Projektsioonilatern 88
 Prožektor 40
 Ptolemaios 55
 Päikesespekter 133
 Pythagoras 76
 Refleksklaas 28
 Reflektor 82, 84
 Refraktor 82
 Refraktsioon 43
 Ribaspekter 130
 Ruuminurk 7, 30
 Rõmer 18
 Scheiner 88
 Sekstant 28
 Silma ehitus 65
 Snellius 55
 Soojustkiired 127
 Spekter 51
 Spektraalanalüüs 134
 Spektraalaparaat 128
 Spektraaltoru 131
 Spektrogramm 134
 Spektroskoop 128
 Stefan-Boltzmanni sea-
 dus 136

- Stereoskoop 75
 Stoletov 141
 Sömmering 77
- T**avaline kiir 121
 Teatri-binokkel 87
 Teleskoop 82
 Temperatuurikiirgus 135
 Tulipunkt 33
 Tumedad kehad 3
 Turmaliintangid 122
 Täieline sisepeegeldumine 45
- Ultramikroskoop 82
 Ultrapunased kiired 126
- Ultravioletsed kiired 125
- Vaatenurk 70
 Vaateväli 72
 Valgusallikad 3
 Valgusallika tugevuse mõõtmine 14
 Valguse difusioon 28
 Valguse kiirus 20
 Valguse lainepikkus 102
 Valguskiired 4
 Valguskiirgus 4
 Valguskvant 138
 Valgusnähtused 3
 Valguspilt 89
 Valguspunkt 6
- Valgustugevus 5
 Valgustustugevus 8
 Valgusvoog 6
 Valgusvoo jaotus 16
 Wien'i nihkeseadus 137
 Viga, parallaktiline 29
 Vilkumine 44
 Vitello 55
 Värvide hajumine 51
 Värvipimedus 73
- Õ**hukeste kelmete värvid 104
- Ümberpööratavuse printsiip 25, 42
- Y**oung 99, 123

SISUKORD.

I. Valgusallika ja pinnavalgustuse tugevus.

	Lk.
1. Valgusnähtused. Valgusallikad.	3
2. Valguskiirguse põhiomadusi.	4
3. Valgusallika valgustugevuse ühikud.	5
4. Valgusvoog. Luumen.	6
5. Pinnavalgustuse tugevus. Luks.	8
6. Pinnavalgustuse seadused.	11
7. Valgusallika tugevuse mõõtmine.	14
8. Rumfordi fotomeeter.	15
9. Valgusallika valgusvoo jaotus ruumis.	16
10. Ajaloolisi märkusi.	17

II. Valguse levimiskiirus.

11. Galilei ja Römer'i viis	18
12. Fizeau' viis.	20
13. Foucault' ja Michelsoni viis	21
14. Ajaloolisi märkusi.	24

III. Tasa- ja sfäärilised peeglid.

15. Peegeldumisseadused.	24
16. Valguspunkti kujutis tasapeeglis.	25
17. Eseme kujutise ehitamine tasapeeglis.	27
18. Valguse difusioon.	28
19. Tasapeeglite rakendusi.	28
20. Sfäärilised peeglid.	30
21. Nõguspeegli valem.	31
22. Järeldotsi nõguspeegli valemist.	32
23. Kujutiste ehitamine nõguspeeglis	34

	Lk.
24. Kumerpeegel.	37
25. Kumerpeegli valem.	38
26. Sfääriline aberratsioon	39
27. Sfääriliste peeglite rakendusi.	40
28. Ajaloolisi märkusi.	40

IV. Valguse murdumine.

29. Murdumiseseadused.	40
30. Valguse murdumise nähtusi Maa õhkkonna mõjul.	43
31. Täieline sisepeegeldumine.	45
32. Murdumine tasaparalleelses plaadis.	48
33. Murdumine prisma.	49
34. Värvide hajumine. Spekter.	51
35. Akromaatiline prisma.	53
36. Ajaloolisi märkusi.	55

V. Sfäärilised läätsed.

37. Läätsede liigitus.	56
38. Läätsede optiline telg, abitelg ja tsenter. Fookus.	57
39. Läätsede valem.	58
40. Kujutiste ehitamine.	61
41. Sfääriliste peeglite ja läätsede võrdlus.	62
42. Sfääriline ja kromaatiline aberratsioon.	63
43. Ajaloolisi märkusi.	65

VI. Silm ja nägemine.

44. Silma ehitus ja nägemine.	65
45. Tsentraalne ja perifeerne nägemine.	67
46. Kohastumine.	68
47. Lühi- ja kaugelenägevus. Prillid.	69
48. Vaatenurk.	70
49. Vaateväli.	72
50. Mõningaid füsioloogilis-optilisi nähtusi.	72
51. Kino.	75
52. Ajaloolisi märkusi.	76

VII. Optilised riistad.

	Lk.
53. Optiliste riistade ülesanne.	77
54. Luup.	78
55. Mikroskoop	80
56. Ultramikroskoop.	82
57. Refraktor.	82
58. Peegelteleskoop ehk reflektor.	84
59. Prisma-pikksilm ja prisma-binokkel.	85
60. Ajaloolisi märkusi	87
61. Projektioonilatern	88
62. Sõjatehnikas kasutatavaid optilisi riistu.	89

VIII. Valgus lainetusnähtusena.

63. Vaateid valguse loomu kohta.	91
64. Laineaparaat.	92
65. Huygensi printsiip.	93
66. Lainete peegeldumine.	95
67. Lainete murdumine.	96
68. Ajaloolisi märkusi.	98

IX. Valguse interferents.

69. Veelainete interferents.	99
70. Fresnel'i peeglikatse. Valguse interferents	101
71. Valguslaine pikkuse määramine.	102
72. Ohukeste kelmete värvid.	104
73. Newtoni rõngad.	105

X. Difraktsioon.

74. Veelainete difraktsioon.	106
75. Valguse difraktsioon.	108
76. Difraktsioon ühe kitsa pilu puhul.	109
77. Difraktsioonivõre	112
78. Difraktsioonispekter.	114

XI. Valguse polarisatsioon.

79. Polarisatsioon peegeldumisel.	116
80. Polarisatsioon valguse murdumisel.	119
81. Polarisatsioon kaksikmurdumisel.	120

	Lk.
82. Nicol'i prisma	121
83. Turmaliintangid.	122
84. Ajaloolisi märkusi.	123

XII. Luminestsents. Spektraalanaliüs.

85. Fluorestsents ja fosforestsents.	123
86. Ultravioletsed kiired.	125
87. Ultrapunased kiired.	126
88. Spektraalaparaat.	128
89. Emissioonispekter.	130
90. Absorptsioonispekter.	132
91. Päikese spekter	133
92. Spektraalanaliüs.	134

XIII. Temperatuurikiirgus.

93. Kiirgusenergia jaotuskõver.	135
94. Absoluutselt must keha.	136
95. Stefan-Boltzmann'i seadus.	136
96. Meie valgusallikate kasutegur.	138
97. Kvantide teooria	138
98. Fotoelement	139
99. Elektromagnetiliste lainete spekter.	141
Laboratoorseid töid	142

Rbl. 5. —

A-16129

A

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00423591 9

Rbl. 5.—

A-16129
A

A-16129
Summa
30. VII. 1946
J. LANG ja A. MITT

FÜÜSIKA

XI KLASSILE

J. LANG ja A. MITT — FÜÜSIKA KESKKOOLIXI KL



RK
„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“
TALLINN 1946