

V. ERLEMANN JA J. LANG

FÜÜSIKA

ÕPPERAMMAT KESKKOOLILE

II

Hääl ja valgus
humanitaar- ja reaalharu ulatuses

Teine trükk

Anta

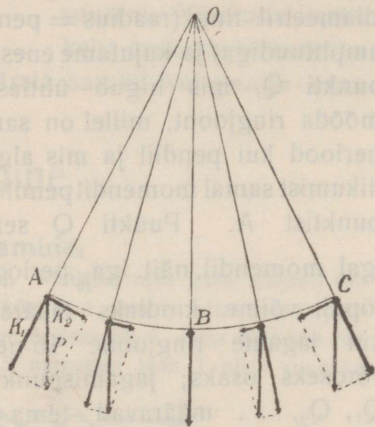
Riigik. V. K.

Autori kirjastus — Tartu, 1928

Hääl

Pendli ja elastse keha võnkumine

1. Pendli võnkumine. Viime pendli (näit. niidi otsas rippuva tinakuulikese) tasakaalust välja ja laseme ta lahti: pendel hakkab raskusetungi mõjul võnkuma. Lahutame raskusetungi P (joon. 1) kaheks komponendiks: niidi sihis (K_1) ja niidi sihile risti (K_2). K_1 tasakaalustub niidi pinevusega, K_2 panebki pendli võnkuma. Nagu joonisest näeme, muutub komponendi K_2 suurus ning ta mõjub kord liikumissihis, kord sellele vastassihis. Selle tõttu on pendli liikumine tasakaalu-seisu poole kiirenev, tasakaalu-seisust eemale tasanev; kõige suurema kiirusega läheb pendel tasakaalu-seisust läbi.



Joon. 1. Pendli võnkumine.

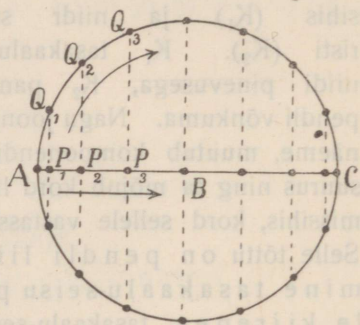
Kui pendel on võnkumisel tulnud sama seisuga ja selle juures liigub samas sihis, siis ütleme, et ta on samas faasis; nii siis **faas** tähendab pendli liikumisolekut. Me paneme tähele, et pendel viibib ühesugustes faasides võrdsete ajavahemikkude järele; tähendab, pendli liikumine on perioodiline. Nimetame **täisvõnguks** liikumist ühest äärmisest seisukohast teise ja tagasi, täisperioodiks ehk lihtsalt **perioodiks** (T) ühe täisvõngu kestvust, **võnkearvuks** (n) täisvõngete arvu sekundis, **amplituudiks** pendlikuulikese kõige suuremat kaugust tasakaalu-seisukohast. On näiteks $n = 2, \frac{1}{3}$ jne., siis järgneb sellest, et $T = \frac{1}{2}, 3$ jne.; siit näeme, et üldse on maksev valem

$$n T = 1.$$

Katse näitab, et väikese amplituudi puhul pendli võnkumisperiood ei olene amplituudi suuruselt, suureneb aga pendli pikkuse suurenemisega.

Pendel jääb viimaks seisma, võnkumine „kustub“, sest võnkumisenergia kulub hõõrumise ületamiseks.

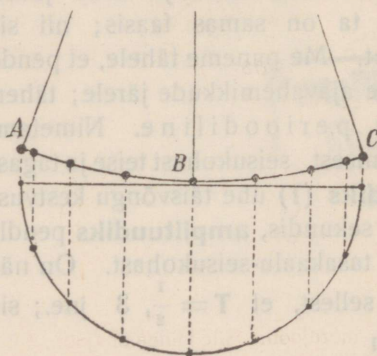
***2. Pendli seisu määramine.** Asub pendel perioodi algul ja lõpul punktis A (joon. 1), siis on ta perioodi keskel punktis C, $\frac{1}{4}$ ja $\frac{3}{4}$ perioodi pärast punktis B. Pendli seisu teistel momentidel võib ka kindlaks määrata, näiteks graafiliselt: kujutagu AC (joon. 2) võrdlemisi pika niidi otsas rippuva pendlikuulikese liikumisteed, mida võib lugeda sirgjooneliseks. Ehitame AC-l kui diameetril ringi (raadius = pendli amplituudiga) ja kujutame enesele punkti Q, mis liigub ühtlaselt mööda ringjoont, millel on sama periood kui pendlil ja mis algab liikumist samal momendil pendliga punktist A. Punkti Q seisu igal momendil, näit. iga $\frac{1}{16}$ perioodi lõpul, võime kindlaks määrata, kui jagame ringjoone 16-eks võrdseks osaks; jagamispunktid



Joon. 2. Pendli seisu määramine.

Q_1, Q_2, \dots määravad tema seisu otsitavael momentidel. — Ehitame nüüd punktide Q_1, Q_2, \dots projektsioonid P_1, P_2, \dots AC-le. Matemaatiline arutus näitab, et võnkuva pendlikuulikese

seisu iga järgneva $\frac{1}{16}$ perioodi lõpul kujutavad projektsioonid P_1, P_2, \dots Üldse langeb ühtlaselt ringi mööda liikuva punkti projektsiooni liikumine ringi diameetrit ühte sama ringi diameetrit mööda liikuva pendli liikumisega. Ka siis, kui pendli liikumistee tunduvamalt lahku läheb sirgjoonest,

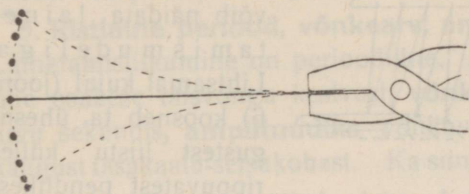


Joon. 3.

võib selle reegli põhjal tema seisu igal momendil ligikaudselt kindlaks määrata.

1. Seleta, mis kujutab joon. 3 ja kuidas on joonis ehitatud.

3. Elastse keha võnkumine. Tasakaalust välja viidud ja lahtilastud elastse keha osakesed võnguvad ka



pendlisarnaselt, mitte ühtlaselt (otsapidi kinnitatud vetruv varb joon. 4, spiraalvedru jne.); tasakaalu-seisust läbi minnes on kiirus kõige suurem. Võnkuva elastse keha osakeste seisuteatavatel momentidel võib kindlaks määrata samuti kui pendli oma.

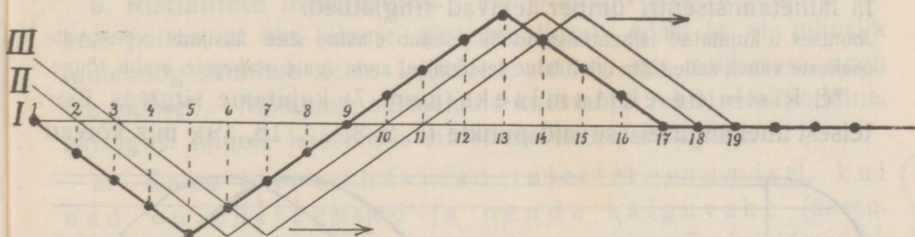
Joon. 4. Elastse varda võnkumine.

võib kindlaks määrata samuti kui pendli oma.

Lainetamine

4. Ristlaine tekkimine ja ehitamine.

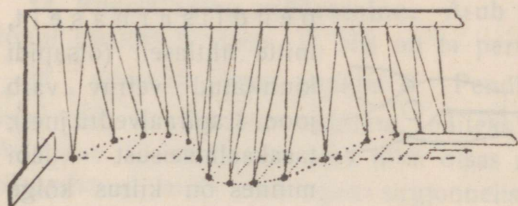
a. Kujuta sirgreas kõrvuti seisvaid õpilasi. Muusika takti järele hakkab esimene risti rea sihile marssima nõnda, et ta kõnnib 4 sammu edasi ja siis perioodiliselt 8 sammu tagasi-edasi. Iga järgmine õpilane algab sama liikumist ühe sammu võrra hiljem. Siis kujutab joonises 5 nurgeline joon I ülalt vaadates



Joon. 5.

õpilaste seisuteatavatel momentidel, kus esimene, liikumist algseisust ülespoole alates, on 16 sammu (ühe täisvõngu) teinud. Jooned II ja III kujutavad õpilaste seisuteatavate ühe ja kahe sammu võrra hiljem. Ülalt vaadates näib nurgeline joon I paremale poole edasi nihkuvat, kuna üksikud õpilased joone I edasiliikumissihile risti liiguvad. Edasinihkuv joon ei ole silejoon, vaid ta on murdjoon. Sile lainejoon (joon. 7) võiks tekkida siis, kui õpilased ei liiguks ühtlaselt, vaid pendlisarnaselt, algseisust läbi minnes suurema kiirusega (pikemate sammudega).

b. **Rist- ehk transversaallaine** tekib, kui sirgreas seisvad punktid hakkavad võnkuma pendlisarnaselt risti punktide rea ehk laine edasiliikumise suhtes, iga järgmine punkt sama ajavahemiku võrra hiljem eelmisest.



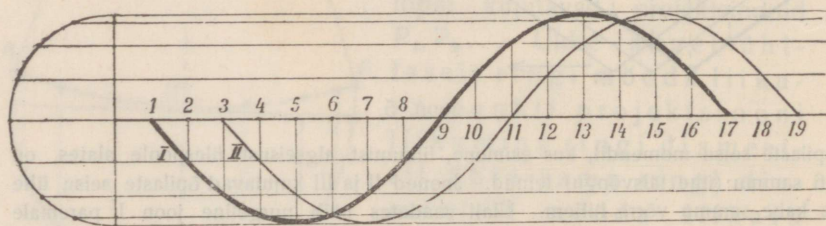
Joon. 6. Lainetamismudel.

kui mööda kuulikeste rida tõmmata kõrvalt reale kaldu hoitud liistuga või käega.

Samasugune ristlaine võib tekkida igas elastses kehas, mis oma kuju poolest enam-vähem vastab punktide reale, näiteks pingulolevas köies, traadis jne. Niisugustes elastses kehas on osakesed seotud molekulaartungidega, ning hakkab üks osake võnkuma, näiteks mõne tõuke mõjul, siis kisub ta enesega kaasa ka järgmise, mis algab liikumist eelmisest vähe hiljem. Tõuke energia kandub laine kaudu läbi keha edasi. Elastsel pinnal kandub osakese võnkumisenergia edasi igas sihis ja lainetamistsentri ümber tekivad ringlained.

Joonises 6 kujutatud lainetamismudelil puudub elastne side üksikute võnkuvate osakeste vahel; selle tõttu tuleb laine tekitamisel anda igale osakesele eraldi tõuge.

*c. Ristlaine ehitamiseks (joon. 7) kujutame sirgreas üksteisest ühekaugusel asuvaid punkte (1, 2, 3, ... 18, 19), mis võivad



Joon. 7. Ristlaine ehitamine.

võnkuda pendlisarnaselt risti rea suhtes. Jagame võnkumisperioodi näiteks 16 võrdseks osaks ja oletame, et iga järgmine punkt

algab võnkliikumist $\frac{1}{16}$ perioodi võrra eelmisest hiljem. Võnkuvate punktide seisud iga $\frac{1}{16}$ perioodi lõpul määrame kindlaks § 2 järelle ringi abil. Kõverjoon I kujutab siis punktide seisu ja laine kuju sel silmapilgul, kui esimene punkt, alates liikumist paigalseisust ülespoole, on lõpetanud ühe täisvõngu.

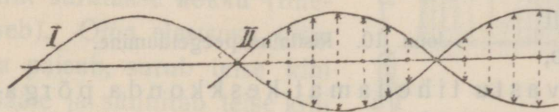
5. Ristlaine periood, võnkearv, amplituud, pikkus ja kiirus. Lainetamisliikumine on perioodiline. **Perioodiks (T)** nimetatakse ühe osakese täisvõngu kestvust, **võnkearvuks (n)** tema võngete arvu sekundis, **amplituudiks** võnkuva osakese kõige suuremat kaugust tasakaalu-seisukohast. Ka siin jääb maksma valem $nT = 1$.

Ristlaines paneme tähele laine harja (kõige kõrgem koht) ja laine põhja (kõige madalam koht). Laines võime leida punktid, mille **faasid** igal momendil on ühesugused (joonises 7 punktid 1 ja 17, 2 ja 18 jne.). Nimetame **laine pikkuseks** (λ) kahe üksteisele järgneva harja või põhja kaugust või üldse kahe üksteisele järgneva ühesugustes faasides viibivate punktide kaugust (kaugus punkti 1 ja 17, 2 ja 18 vahel jne.).

Perioodi jooksul liigub laine edasi ühe lainepikkuse λ võrra. Teeb nüüd esimene osakene sekundis n võnku, siis on selle aja jooksul laine edasi jõudnud n lainepikkust ehk $n\lambda$. Nii on siis sekundis käidud laine tee ehk **levimiskiirus** $v = n\lambda$.

6. Ristlainete interferents. Vee pinnal võime mõnikord tähele panna, et üks lainete süsteem liigub edasi ja et juhuslik tuulehoog sünnitab teise lainete süsteemi, mis esimesest nagu üle jookseb. Mõlemate süsteemide koosmõjul tekib resultantlaine. Niisugust lainete koosmõju nimetame **interferentsiks**.

a. Kaks lainet hävivad interfereerumisel, kui nad on ühesugused ja nende käiguvähe (ühesugustes faasides viibivate punktide vahe)



Joon. 8. Ühesuguste ristlainete hävimine interfereerumisel.

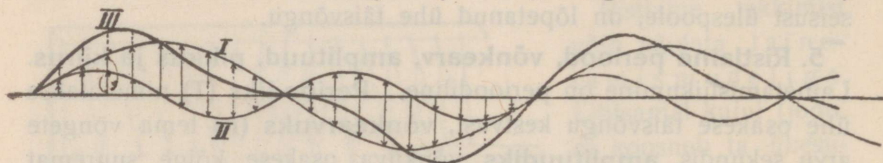
võrdub poollaine pikkusega (joon. 8, võrdvastupidised tõuked

hävivad). Hävimine sünnib ka, kui käiguvähe on poollaine paaritu mitmekordne. — On aga ühesuguste lainete käiguvähe

null või poollaine paarisarv, siis tekib interfereerumisel kaks kord suurema amplituudiga resultantlaine (selgita seda joonise abil).

b*. Interfereeruvad lained võivad olla mitmesugused ning resultantlained õige keerulised.

Kujutame näiteks, et osakesed samal ajal osa võtavad kahest ristlainetamisliikumisest (I ja II joon. 9), ning võtame arvesse,

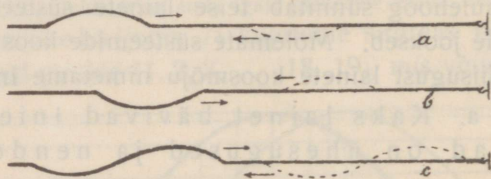


Joon. 9. Ristlainete interferents.

ühte osakesse samas sihis mõjuvaid tõeskeid tuleb liita, vastas-sihis mõjuvaid aga lahutada, siis on kerge ehitada resultant- ehk interferentslaine (III) liikumise teede liitmise põhjal.

1. Ehita kahe interfereeruva laine resultantlaine, kui ühe laine pikkus ja amplituud on pool teise laine omast ja lähtekohtade vahe on $\frac{1}{4}$ suurema laine pikkusest. Võrdle oma joonis joonisega 9, kus lähtekohad langevad ühte.

7. Ristlaine peegeldumine. Kinnitame kõie (kummitoru) otsapidi seinale, tõmbame ta käega pingule ja liigutame kätt järsku üles või allapoole ja algseisu tagasi. Tekib vastavalt laine hari või põhi, mis liigub kõit mööda edasi ja pörgates vastu seina tuleb säält tagasi (peegeldub), kusjuures hari peegeldub põhjana ning põhi harjana (joon. 10, a, b). Kätt üles-alla ja algseisu tagasi liigutades teki-

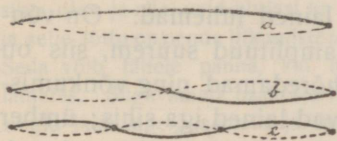


Joon. 10. Ristlaine peegeldumine.

tame terve laine, mis peegeldub seinal ka terve lainena; harjaga ees liikuv laine liigub peegeldudes põhjaga ees ja ümberpöörduvalt (joon. 10, c). Tähendab, laine peegeldub, vastu tihedamat keskkonda pörgates, faasi vastupidiseks muutumisega.

8. Seisvad ristlained. Kui me kõiega tekitame vahetpidamata ühesuguseid laineid, siis peegelduvad nad ka vahetpidamata seinalt, ja me saame kõie! kaks võrdset vastassihis liikuvat lainete süs-

teemi. Mõlemate niisuguste lainete süsteemide interfereerumisel jäävad mõned kõieosakesed täiesti paigale, kuna teised võnguvad suurema või väiksema amplituudiga (joon. 11). Niisuguseid otseminevate ja peegeldunud lainete interfereerumisel saadud resultantlaineid, milles üksikud punktid jäävad paigale, nimetame **seisvateks laineteks** (eelpool käsitletud lained nimetatakse kulgevateks laineteks). Paigalolevaid punkte nimetame **sõlmpunktideks**, kahe sõlmpunkti vahel olevaid võnkuvaid laine osasid **paisudeks**. Kõik seisva laine võnkuvad osakesed liiguvad samal momendil läbi tasakaalu-seisukoha.



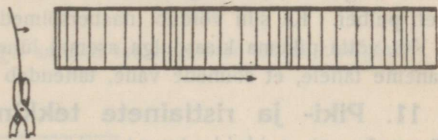
Joon. 11. Seisvad ristlained.

Sama kõiega võime tekitada mitmesuguseid seisvaid laineid (joon. 11), näiteks lained kahe sõlmpunktiga (otsadel), kolme sõlmpunktiga jne. Seisvas laines võrdub kahe naabersõlme vahe poolaine pikkusega.

9. Pikilaine. Piki- ehk **longitudinaallaine** tekib, kui sirgreas asuvad punktid hakkavad võnkuma pendlisarnaselt piki punktide rida ehk laine edasilikumise sihti, iga järgmine punkt sama ajavahe miku võrra hiljem eelmisest. Pikilaine tekkimist võib näidata ka lainetamismudeliga, kui mööda kuulikeste rida tõmmata alt kaldu hoitud liistuga. Pikilaines paneme tähele laine tihenduse ja hõrenduse.

10. Pikilaine tekkimine õhus. a. Lihtsuse mõttes kujutame lahtise klaastoruga eraldatud õhusamba, mille ühes otsas võngub elastne pind (joon. 12). Paremale poole liikudes surub pind esimese õhukihi pääle. Inertsitõttu ei hakka terve samm korraga liikuma, vaid ainult esimene kiht surutakse kokku (tiheneb).

Oma elastsuse tõttu ta paisub, surub teise kihi pääle ja sünnitab teise kihi tihenduse; see sünnitab edasi kolmanda kihi tihenduse jne.,



Joon. 12. Pikilaine tekkimine õhusambas.

kuna eelmised kihid muutuvad järjest normaalseteks. — Liigub pind võnkudes pahemale poole, siis voolab algul õhk esimesest

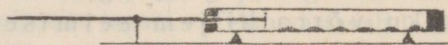
kihist järele ja esimene kiht hõrendub. Edasi volab õhk teisest kihist esimese poole ja hõrendub teine kiht jne., kuna eelmised kihid muutuvad järjest normaalseteks. Nii lähevad pinna võnkumisel vaheldumisi tihendused ja hõrendused sammast mööda edasi ja sünnib pikilainetamine, sest õhuosakesed võnguvad laine edasiliikumise sihis.

Perioodil, võnkearvul, amplituudil, faasil ja lainepikkusel on siin samad tähendused kui ristlainete juures; ka siin on maksvad samad valemid $nT = 1$ ja $v = n\lambda$.

Laine edasiliikumise kiirus õhus on antud temperatuuri juures jääv. Võngub pind kiiremini, siis on lained lühemad. On võnkuva pinna ja võnkuvate õhuosakeste amplituud suurem, siis on tihendused tihedamad, ja hõrendused hõredamad ning võnkumiseenergia on suurem. — Vabas õhus levivad lained iga sihis; ümber võnkuva keha tekivad kerasarnased tihendused ja hõrendused, lained on keralained.

b. Õhus tekivad ka seisvad lained, kui peegeldunud lained interfereeruvad otseminevate lainetega.

Seisvaid õhulaineid võib näidata Kundt'i toruga (joon. 13). Võtame peenikese klaaspulga (toru), mille ühe otsa külge on kleebitud väike papist ketas, kinnitame ta keskelt ja hõõrume teda pikuti märja lapiga. Pulk hakkab pikuti võnkuma ja heliseb. Asetame pulga otsapidi jämedasse klaastorusse, mille teine ots



Joon. 13. Kundt'i toru.

on kinnine ja millesse on raputatud kerge pulber (semen lycopodi), siis hakkab pulga hõõrumisel ja helisemisel pulber torus liikuma ja koguneb üksteisest samal kaugusel asuvasse hunnikutesse (et katse hästi välja tuleks, on tarvis õhusamba pikkust torus reguleerida).

Nähtust võib seletada ainult sellega, et pulgast ketta kaudu õhu päale ülekantud pikilained peegelduvad kinnisel toru otsal, ja et õhulainete interfereerumisel (nagu kõie juures § 8) tekivad seisvad lained, mille sõlmpunktidesse koguneb pulber. Ka siin võrdub naabersõlmede vahe poollainepikkusega.

Kui võtta pikema klaaspulga asemel lühem, siis kuuleme kõrgema heli ja paneme tähele, et sõlmede vahe, tähendab laine pikkus, on ka väiksem.

11. Piki- ja ristlainete tekkimise tingimused. Eelmisest järgneb, et pikilainetamine on ruumala muutumise nähtus. Et kõik kehad on ruumala suhtes enam-vähem elastsed, siis võib pikilainetamine tekkida igas kehas. Selle juures tekib iga osakese võnkumisel tihendus osakese liikumise sihis ja hõrendus sellele vastassihis.

Ristlainetamine on **kuju** muutumise nähtus ja võib tekkida ainult kuju suhtes elastsetes kehaosades, mis oma kuju poolest vastavad punktide reale või pinnale (pingulolev traat või köis, pingulolev membraan, plaat, õhuke laud jne.), tähendab ainult kõvades või pingul olevates kehaosades, mitte aga vedelikkudes ja gaasides. Ristlaine võib tekkida ka vedeliku pinnal, sest vedeliku pinda võime lugeda elastsete pindade hulka (tasakaalu-seisust väljaviidud osakene püüab tagasi oma endisse seisu).

Veepinna osakesed liiguvad lainetamisel mitte ainult vertikaalsisihis üles ja alla, vaid ühtlasi ka horisontaalsisihis edasi-tagasi ja selle tõttu on nende liikumisteed ringisarnased kõverjooned. Seda võib tähele panna, kui näit, jälgida korgi liikumist lainetes. Sügavamate osakeste liikumisel muutuvad liikumisringid ikka lapergusemaks ja väiksemaks ja nad võnguvad teatud sügavuses ainult horisontaalset sirgjoont mööda, tähendab vedeliku sees sünnib võnkumine pikilainetamise näol.

Vaatlused näitavad, et veelained, mõnest tõkkest mööda minnes, ei liigu ainult endises sihis edasi, vaid kalduvad ka kõrvale (joon. 14). Samasugust nähtust võib tähele panna ka teiste lainete juures. Lähem seletus selle nähtuse kohta järgneb valguseõpetuses.

Ühtlasel tasapinnal või ühtlases kehas on lainetamistsentrist (lähtekohast) ühekaugusel olevad osakesed ühesugustes faasides ja laine on vst. **ring-** või **keralaine**; ringi või kera raadiust nimetatakse **laine kiireks**.

Lained on energia edasi kandjad. Ring- või keralaine levimisel kauguse suurenemisega jaguneb energia suurema massi pääle, mille tõttu amplituud väheneb. Osa liikumisenergiast muutub hõõrumise tagajärjel ka soojuseks.

Merelainetes peituvat energiat on püütud ära kasutada praktiliseks otstarbeks, kuid seni pole veel korda läinud valmistada masinaid, mis oleksid suutnud anda rahuldavaid resultate.

1. Kas joon. 5 kujutatud mudeliga saadud laine kannab edasi energiat?

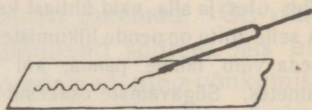


Joon. 14. Veelained, tõkkest mööda minnes.

Hääl lainetamisnähtusena

12. Hääle tekkimine ja levimine. Vaatlused ja katsed näitavad, et iga helisev keha kiiresti võngub.

Pikk kruustangi vahele kinnitatud elastne terasriba (joon. 4.) võngub aeglaselt ja ei helise; teeme ta lühemaks, siis ta võngub kiiremini ja heliseb. Mida lühem ta on, seda kiiremini ta võngub ja seda kõrgema tooni ta annab. Hoiaime võnkumise riba kinni, siis heli kustub. — Heliseva pika bassikeele või suure helihargi võnkumist (suur amplituud) võime näha palja silmaga. — Ka väikese helihargi võnkumist võib teha nähtavaks, kui tema otsa külge kinnitada teravik ja sellega tõmmata mööda nõetatud klaasplaati (joon. 15); saame plaadil lainelise joone, mis kujutab helihargi võnkumist. — Kui helisevat keha (helihark, keel) puudutame näit. katseklasi äärega, siis kuuleme kõrinat, mis näitab, et keha võngub; puhkpilli puhumisel Joon. 15. Helihargi võnkumine. tunne huulte võnkumist jne.



Heliseva keha võnkumine tekitab õhus või mõnes teises ümbritsevas keskkonnas laineid.

Tugeva heliallika läheduses panevad õhulained teisi kehi võnkuma, näit. plahvatuse juures lõhkevad aknaruudud isegi mitme km kaugusel. — Heli-tundlik gaasileek muudab oma kuju, kui tema läheduses kõlistada võtmekim-buga või vilistada (helitundliku gaasileegi saame, kui gaasi laseme voolata läbi peenikese ja laperguse otsaga torukese).

Õhulained ärritavad meie kuulmisorganit ja teki-tavad selle kaudu peaaegu hääle aistingut (nähtuse seletamine kuulub füsioloogiasse).

Tühjas ruumis hääl ei levi (katse õhupumba kupli alla asetatud heliallikaga); levimine on võimalik ainult mingisuguse keskkonna kaudu. On arusaadav, et ainult elastsed kehad võivad olla hääle allikateks ja juhtideks, näit. gaasid, vedelikud, kõvad ja ka pehmemad, kuid pingul olevad kehad (nõör, membraan), mitte aga vilt, villane riie, lumi, liiv jne.

Nagu veelainedki (joon. 14) ei levi häälained mõnest tõkkest mööda minnes ainult sirgjooneliselt, vaid kalduvad ka kõrvale ümber nurga tõkke taha. Too näiteid selle kohta igapäevasest elust.

13. Hääle levimiskiirus. Igapäevaste nähtuste (missuguste?) tähelepanemisest järeldame, et hääl tarvitab levimiseks aega.

Hääle levimiskiirust õhus võib määrata järgmiselt: kahest üks-teisest eemal seisvast vaatlejast üks laseb püssi ja teine mõõdab

ajavahemiku suitsu (tule) ilmumise ja paugu kuulmise vahel sekundites ning mõõdab kauguse meetrites. Arvesse võttes, et valgus levib silmapilkselt, saame levimiskiiruse $\frac{m}{sek}$ -tes, kui meetrite arvu jagame sekundite arvuga. Analoogiliselt võib määrata hääle kiirust vees, kui paadi küljes ripuvad ja vette ulatuvat kella lüüa vasaraga ja samal momendil lasta püssi, kuna eemalseisev vaatleja teises paadis kuuleb vett mööda edasikantud häält vette asetatud kuulmistoru abil.

Mõõtmised näitavad, et hääle kiirus õhus 0° juures on $\sim 333 \frac{m}{sek}$, toatemperatuuri juures $\sim 342 \frac{m}{sek}$. Vees on ta suurem ümmarguselt 4 korda, puus, rauas ja klaasis rohkem kui 10 korda.

Et kõik hääled oma iseloomu peale vaatamata ühesuguse kiirusega levivad, seda järeldame näiteks orkestri mängust, sest me kuuleme mängitavat tükki moonutamata kujul igasugusel kaugusel.

1. Müristamine kuulub 5 sek. pärast välgulöömist; kui kaugel on pikne?
2. Tööline teeb kirvega iga 3 sek. pärast ühe hoobi. Vaatleja kuuleb kaugenemisel hoobe seda hiljem, mida kaugemale ta läheb. Ühe km kaugusel kuuleb ta eelmist hoopi samal momendil, kui ta järgmist näeb. Arvuta nende andmete põhjal hääle kiirus õhus!

14. Hääle tugevus. Pikema heliseva keele või suurema helihargi juures võime palja silmaga tähele panna, et hääle tugevuse vähenedes väheneb heliseva keha amplituud, järelikult ka helilaine amplituud. Nii siis hääle tugevus oleneb amplituudi suurusest. Matemaatiline harutus näitab, et hääle tugevus on võrdeline amplituudi ruuduga.

Hääle tugevus oleneb ka heliseva keha pinna suurusest, mis ongi arusaadav, sest suurem pind võib võnkumisenergiat paremini õhu pääle üle kanda.

Hääle tugevus väheneb heliseva keha kauguse suurenemisega, sest suuremal kaugusel jaguneb võnkumisenergia suurema massi päale. Kerakujulisel levimisel on hääle tugevus pöördvõrdeline kauguse ruuduga (kui mitte arvesse võtta energia moonustumist soojuseks), sest kauguse suurenedes kaks, kolm jne. korda suureneb võnkuv mass neli, üheksa jne. korda (mispärast?)

1. Seleta, mispärast hääle tugevus rääkimistorudes (näit. kapteni-silla ja masinaruumi vahel laevadel) lühema maa pääl kauguse suurenemisega tunduvalt ei vähene, kuid pikema maa pääl siiski tunduvalt vähenema peab, ja milleks sel juhusel muutub võnkumisenergia.

15. Hääle peegeldumine. a. Et hääл võib peegelduda, seda tõendab **kaja** nähtus. Kaja põhjal on ka võimalik ära määrata peegeldava pinna kaugust heliallikast. On näiteks hüütud silp kuulda kajana 4 sek. pärast, siis on peegeldava pinna (mäe või metsa) kaugus 2×340 m (mispärast mitte 4×340 m?). On lähemas ümbruses mitu suuremat peegeldavat pinda, siis kuuleme mitmekordse kaja.

Toas on peegeldavad pinnad (seinad) ligidal. Peegeldunud hääle kiired jõuavad heliallikast otseminevate kiirtega peaaegu samal ajal kuulaja kõrva ja hääл kõlab selle tõttu kõvemini kui vabas ruumis, kus puuduvad peegeldunud kiired.

Peegeldumisnähtuste arusaamiseks kinnises ruumis tuleb silmas pidada, et hääle mulje kestvus on $\sim \frac{1}{9}$ sek; tähendab, me kuuleme hääлт veel $\sim \frac{1}{9}$ sek pärast viimase häälelaine kõrva jõudmist. Hääл liigub toas aga edasi $\frac{1}{9}$ sek

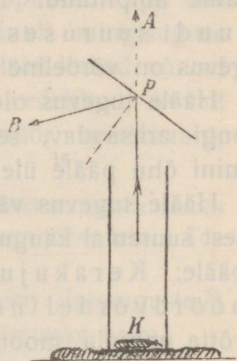
jooksul $\frac{340}{9}$ m ehk ümmarguselt 40 m võrra. Järelikult peaks peegeldava seinaga kaugus olema vähemalt 20 m (mispärast?), et kaja oleks kuulda. Vastasel korral kuuleme suuremas tühjas ruumis ainult vastukõla.

1. Kui kaugel on peegeldavad pinnad, kui hüütud silbi kaja on kuulda 6 ja 9 sek. pärast?

b. Häälelained ei peegeldu tasapinnalt mitte igas sihis ühetugevuselt; siht, milles häälekiired kõige tugevamini peegelduvad, moodustab peegeldava pinnaga sama nurga kui langevate kiirte siht.

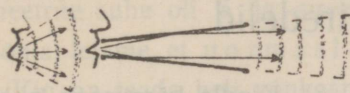
Seda näitab järgmine katse. Asetame lahtisse (vildist) silindrisse vilditüki pääle taskukella (joon. 16). Ilma peegeldava pinnata p kuuleme kella tiksumist võrdlemisi tugevasti KA sihis. Asetame aga lauakese p silindri ja kõrva vahele, siis nõrgeneb tiksumine KA sihis märksa, on aga hästi kuulda pB sihis, kuid nõrgeneb sääl märksa, kui me lauakese p ära võtame või teda pöörame.

Kõnetoru abil juhitakse võnkumisenergia peegeldumise teel edasi enam-vähem ühes sihis, kuna ta ilma toruta laiali laguneb samal kaugusel suurema õhumassi pääle (joon. 17). On arusaadav, et kõnetoru läbi räägitud kõne on selle tõttu kuulda samal kaugusel tugevamini kui ilma toruta.



Joon. 16. Hääle peegeldumine.

Kuulmistoru abil ümberpöördukt koondatakse peegeldumise läbi kuulaja kõrva suurema massi võnkumisenergia ja selle tõttu kõlab hääl tugevamini.



Joon. 17. Kõnetoru.

2. Seleta kõlakoja tegevus.

3. Seleta, mispärast tühjas kirikus on kõne raskesti arusaadav, inimesi täis kirikus aga selgelt arusaadav? Mispärast kõlab mõnes toas muusikariist ja laulja hääl nõrgalt?

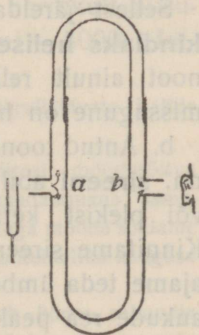
16. Hääle interferents. a. Hoiame kõrva ääres heliseva helihargi ja pöörame teda ümber varre kui telje, siis kuuleme vaheldumisi hääle kõvenemist ja nõrgenemist.

Nähtus on seletatav sellega, et kumbki helihargi haru saadab kõrva oma lainete süsteemi, mis interfereeruvad. Helihargi pööramisega muudame järjest mõlema süsteemi lainete käiguvahet, mille järelduseks on hääle kõvenemine või nõrgenemine.

Hääle lainete interfereerumisel võivad tekkida õige keerulised resultantlained, näiteks orkestri mängul, kus samal ajal tekivad ja levivad kõiksugused helilained. Meie kuulmisorgan on nii ehitatud, et ta suudab kuulda üksikuid helisid eraldatult; ta nagu lahutab keerulise resultantlaine komponentlaineteks. Selle poolest on meie nägemisorgan puudulikum, sest värvide segu muljes ei suuda ta eraldada üksikuid värve.

b. Interfereerumisel hävivad ühesugused helilained, kui nende käiguvahet võrdub poollaine pikkusega või selle paaritu mitmekordsega (vaata § 6). Hävimist interfereerumisel võib näidata Quincke' toruga (joon. 18), mille ühe haru pikkust võib muuta nagu mõne puhkpilli juures. Heli, mis levib torus haruneb punktis a ja ühineb uuesti punktis b, ei ole kuulda toru teise otsa juures, kui harude pikkuste vahet vastavalt reguleerida. Haru pikkuse reguleerimise tarvidus järgneb sellest, et helide häävimine interfereerumisel on seotud nende laine pikkusega, mitmesuguste helilainete pikkused ei ole aga ühesugused (vaata katse Kundt'i toruga § 10).

Interferentsnähtuste hulka kuuluvad ka heljumised (§ 32).



Joon. 18.
Quincke' toru.

Helid ja heliredelid

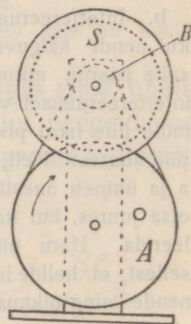
17. Heli võnkearv. Normaal-a. a. Kindla kõrgusega puh-
tad hääled nimet. helideks ehk toonideks; teised on müra, kahin,
paugud jne.

Tõmbame heliseva teravikuga varustatud helihargiga ühtlaselt
mööda nõetatud klaasplaati. Plaadil saame lainetaolise joone, mis
kujutab helihargi võnkumist (vaata joon. 15). Helihargi ühele täis-
võngule vastab terve laine, helihargi amplituudile — laine ampli-
tuud; lainete tihedus näitab võnkumise sagedust. Jälgides mitme-
suguste heliharkidega, kuid sama kiirusega tõmmatud lainejooni,
paneme tähele, et kõrgema heliga helihargi lained on tihedamad,
tähendab, vastava helihargi võnkearv on suurem. Sama heliga
heliharkide lainejooned on sama tihedusega, tähendab, vastavate
heliharkide võnkearvud on ühesugused. Nii siis oleneb heli
kõrgus helihargi võnkearvust; samale võnkearvule vastab sama
toon ning suuremale võnkearvule kõrgem toon. — Vastavad
katsed keelte ja teiste heliallikatega annavad sama resultaadi.

Sellest järeldame, et **heli kõrguse määrab
kindlaks heliseva keha võnkearv** (absoluutselt,
noot ainult relatiivselt), vaatamata selle päle,
missugune on helisev keha.

b. Antud toonile vastavat võnkearvu määratakse
nn. **sireeni** abil; see on lihtsamal kujul papist
või plekist ketas kontsentrilise aukude reaga. Kinnitame sireeni tsentrifugaalmasinale (joon 19),
ajame teda ümber ja puhume läbi torukese õhku
aukude rea peale, siis kuuleme heli, mille kõrgus
tõuseb tiirlemise kiirusega. Tiirlemisel katkestub
torust tulev õhujuga korrapäraselt ning teisel
pool ketast õhus tekivad korrapärase tõugete tõttu helilained.

Määrame näit. muusikas tarvitatava kindla tooni nn. **normaal-a**
(ā, kammerton, keskmine a klaveril) võnkearvu. Selleks paneme
normaal-a helihargi heliseva ja tiirutame sireeni nii kiiresti, et
ta annaks sama kõrge tooni kui helihark; siis peavad mõlemate
helide võnkearvud olema ühesugused.



Joon. 19.
Ketassireen.

Loeme nüüd ketta A tiirude arvu teatud ajavahemiku jooksul. Olgu, ketas A tegi 3 minutiga 174 tiiru, ketaste A ja B perimeetrite suhe oli 5 ja sireenil oli 90 auku. Nende andmete põhjal leiame, et normaal-a võnkearv on $\frac{174 \cdot 5 \cdot 90}{3 \cdot 60} = 435$.

Kui on teada heli võnkearv ja hääle levimiskiirus, siis võib arvutada helilaine pikkust, jagades levimiskiiruse võnkearvuga. Näiteks on normaal-a laine pikkus õhus toa temperatuuri juures $\frac{340}{435}$ m, ümmarguselt 78 cm.

Katsetest sireeniga selgub, et kindla kõrgusega heli võib tekkida ainult siis, kui helisev keha pikema ajavahemiku jooksul võngub korrapäraselt.

1. Antud tooni ja kirjeldatud sireeni juures tegi ketas A 4 minuti jooksul 464 tiiru. Leia tooni võnkearv.

2. Mitu tiiru teeb eelmises katses ketas A kuue minuti jooksul, kui heli võnkearv on 580?

3. Kui suur on Quincke' toru harupikkuste vahe, kui tema kustutab normaal-a heli?

18. Kuulmisaistingu piirid. Meie kuulmisaisting on piiratud. Kuulmisaistingut tekitavad ainult võnkumised, mille sagedus on ~ 16 kuni $\sim 30\,000$ sekundis; tooni kõrguse aisting kaob $\sim 20\,000$ ümber. Nimetatud piirid on aga individuaalsed ning olenevad ka tooni tekkimise viisist. Muusikas tarvitatakse harilikult niisuguseid helisid, mille võnkearvud ulatuvad ~ 30 kuni ~ 5000 . Inimeshääle võnkearvude piirid on ~ 80 ja ~ 1300 .

1. Arvuta äärmiste kuuldavate ja äärmiste muusikas tarvitatavate helide lainepikkused õhus.

19. Doppler'i efekt. Me võime tähele panna, et kiiresti möödasoitva veduri vile kuuldub lähenemisel kõrgemana ja kaugenemisel madalamana; samasugust nähtust paneme ka tähele, kui ise kiiresti näit. jalgrattaga mööda sõidame paigalolevast heliallikast. Heli kõrguse muutumist kuulaja ja heliallika kauguse muutumisel nimetatakse Doppler'i efektiks.

On arusaadav, et kuulaja liikumisel vastu heliallika langeb kõrva sekundis rohkem laineid kui kuulaja paigalolekul, tähendab, heli võnkearv suureneb; ümberpöörduvalt kaugenemisel langeb kõrva vähem laineid sekundis ja võnkearv väheneb.

20. Heliredelid. a. Kõrguse järele teatud viisil korraldatud helide rida nimetame heliredeliks. Muusikas tarvitatakse sagedasti nn. diatoonilist duur-heliredelit, mis koosneb seitsmest toonist. Tema kõige madalam toon nimetatakse heliredeli põhitooniks ehk priimiks; järgnevate toonide nime

tused on sekund, terts, kvart, kvint, sekst, septiim ja oktaav. Muusikas märgitakse heliredeli toonid tähtedega. C-duur heliredelis (põhitoon c) on toonide järjekord c, d, e, f, g, a, h, \bar{c} , \bar{d} , \bar{e} , . . .

Et leida sidet duur-heliredeli toonide võnkearvude vahel, selleks tarvitame sireeni mitme kontsentrilise aukude reaga. Säärase sireeniga võib saada korraga kaks tooni, kui puhuda korraga kahe augu rea pääle.

Olgu näiteks aukude arv ühes reas 24 ja teises 48. Puhudes mõlema rea pääle kuuleme kaht tooni. Tiirlemise kiiruse muutmisel muutuvad ka toonide kõrgused, kuid ikka kõlavad nad kokku nii kui diatoonilise duur-heliredeli põhitoon ja selle oktaav. Järelikult on oktaavi ja põhitooni võnkearvude suhe jääv, nimelt $48 : 24 = 2 : 1$. Toonide võnkearvude suhet nimetame **intervalliks**. Nii siis oktaavi ja põhitooni intervall on $2 : 1$.

On aukude arvud 24 ja 36, siis kuuleme igasuguse tiirlemise kiiruse juures kaht heli, mis kokku kõlavad nagu põhitoon ja kvint. Järelikult on ka kvindi ja põhitooni intervall jääv, nimelt $36 : 24 = 3 : 2 = \frac{3}{2} : 1$.

On aukude arvud 24 ja 30, siis kuuleme põhitooni ja tertsi; järelikult tertsi ja põhitooni intervall on $30 : 24 = 5 : 4 = \frac{5}{4} : 1$.

Kui on teada heliredeli toonide intervallid, siis võib leida heliredeli iga tooni võnkearvu, kui on antud ühe tooni võnkearv. On näiteks põhitooni võnkearv 600, siis on tertsi oma $600 \times \frac{5}{4} = 750$, kvindi oma $600 \times \frac{3}{2} = 900$, oktaavi oma $600 \times 2 = 1200$.

b*. Täieliku duur-heliredeli võime saada sireeniga, millel on 8 kontsentrist aukude rida järgmiste aukude arvudega

24 27 30 32 36 40 45 48.

Selle põhjal on kerge arvutada heliredeli iga tooni intervalli põhitooni suhtes (näit. on sekundi intervall $\frac{27}{24} = \frac{9}{8} : 1$, tertsi oma $\frac{30}{24} = \frac{5}{4} : 1$ jne.)

Tähendame põhitooni c-ga, siis on diatoonilise c-duur-heliredeli toonide

nimetused	c	d	e	f	g	a	h	\bar{c}
intervallid põhi- toonide suhtes	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2
kõrvuti seisvate toonide interv.	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{16}{15}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{10}{9}$	$\frac{9}{8}$	$\frac{16}{15}$	

Viimase rea intervallid saame eelmise rea omadest, jagades igat intervalli tema eelmisega ($\frac{9}{8} : 1 = \frac{9}{8}$, $\frac{5}{4} : \frac{9}{8} = \frac{10}{9}$ jne.).

Me näeme, et kõrvuti seisvate toonide intervallid (redeliastmed) on kolmesu-
gused. Intervalli $\frac{9}{8}$ nime-
tatakse suureks täistooniks,

$\frac{10}{9}$ väikeseks täistooniks ja
 $\frac{16}{15}$ pooltooniks.



Joon. 20. Heliredel klaveril.

Klaveril ja teistel kirdlate toonidega muusikariistadel on täistoonide vahele asetatud veel pooltoonid (mustad klahvid joon. 20), et iga tooni kui põhitooniga alates võiks mängida heliredelit. Niiviisi saadud toonide rida nimetatakse kromaatiliseks heliredeliks.

Diatooniline heliredel on aja jooksul kujunenud ja umbes 200 aastat vana. Orpheus'e lüüral oli ainult neli tooni (põhitoon, kvart, kvint ja oktaav). Hiinlaste heliredelis oli 6 tooni, Pythagorase heliredelis 7, kuid tema heliredel läheb lahku diatoonilisest duur-heliredelist.

1. Arvuta ligikaudselt klaveri äärmiste toonide võnkearvud, välja minnes toonist normaal-a, oletades, et see toon asub klaveri keskel ja klaveril on ümmarguselt 7 oktaavi.

2. Arvuta c-duur-heliredeli toonide võnkearvud, välja minnes kammertonist ($a = 435$).

21. Tempereeritud heliredel. Kujutame, et meil on mingisugune klaveri-sarnane muusikariist, mis on valmistatud vastavalt c-duur heliredelile. Kõrvuti-seisvate toonide intervallid on siis $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$, $\frac{16}{15}$, $\frac{9}{8}$ jne. Sellel riistal ei oleks aga võimalik mängida d-duur-heliredelit (algab tooniga d), sest järgnevate kõrvuti-seisvate toonide intervallid peaksid olema $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$, $\frac{16}{15}$ jne., on aga $\frac{10}{9}$, $\frac{16}{15}$, $\frac{9}{8}$ jne. Matemaatiline harutus näitab, et mõned diatoonilise d-duur-heliredeli toonid on olemas c-duur-heliredelis, kuna teised toonid puuduvad ja neid tuleks juurde lisada. Puuduvaid toone iga heliredeli (e-duur, f-duur jne.) jaoks juurde lisada ei ole aga võimalik, sest see teeks mänguriista liig keeruliseks ja mängimise võimatuks.

Sellest on üle saadud nõnda, et täistoonide vahele on paigutatud pooltoonid ja on tehtud kõrvutiseisvate pooltoonide intervallid täiesti ühesugusteks. Nii-sugust heliredelit nimetatakse ühtlaselt temperereeritud kromaatiliseks heliredeliks. Kui selles toonide reas ühest toonist välja minnes teatavad pooltoonid välja jätta, siis saame ühtlaselt temperereeritud duur-heliredeli, mis ei lähe tunduvalt lahku õigest diatoonilisest duur-heliredelist. Mänguriistad, kus iga keel või vile annab ühe ainsa kindla tooni, on temperereeritult häälestatud.

Kui temperereeritud kromaatilise heliredeli kõrvutiseisvate toonide intervallid tähendada x -ga, siis on toonide

nimetused	c	cis	d	dis	e	f	fis	g	gis	a	ais	h	\bar{c}
võrdl. interv.	1	x	x^2	x^3	x^4	x^5	x^6	x^7	x^8	x^9	x^{10}	x^{11}	x^{12}

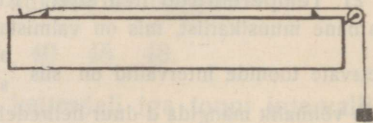
Oktaavi rel. võnkearv on $x^{12} = 2$. Siit leiame $x = \sqrt[12]{2} = 1,05946$.

Näiteks on temperereeritud kvindi võnkearv $(\sqrt[12]{2})^7 = 1,4983$ ja diatoonilise kvindi võnkearv 1,5. Sellest on näha, kui vähe mõlemad heliredelid teineteisest lahku lähevad.

Heliallikad

22. Keel. Keeled leiavad muusikariistade ehitamisel väga laialdast tarvitamist. Helisemisel nad võnguvad seisvate lainetena (joon. 11 a). Oleme igapäevases elus tähele pannud, et lühem või tugevamini pingule tõmmatud või peenem keel annab kõrgema tooni. Nii siis oleneb keele võnkearv keele pikkusest, pinevusest ja massist.

a. Paljude muusikariistade juures muudame mängimisel keele pikkust ja selle kaudu tooni võnkearvu (viiul, kannel jne.). Et leida sidet keele pikkuse ja võnkearvu vahel, seks tarvitame



Joon. 21. Monohord.

monohordi, piklikku puust kasti (joon. 21), millel keeled toetuvad teravservaliste tugede pääle ja on pingule tõmmatud kas kruvi või pommi abil. Keele pikkust võib muuta liikuva toe abil ja määrata kasti kaanele joonestatud cm-skaala abil.

Keele pikkust muutes kuuleme, et näit. $\frac{4}{5}$ terve keele pikkusest annab terve keele tooni tertsi, mille rel. võnkearv on $\frac{5}{4}$; $\frac{2}{3}$ terve keele pikkusest annab terve keele tooni kvindi, mille rel. võnkearv on $\frac{3}{2}$, jne. Järelikult on keele võnkearv pöördvõrdeline keele pikkusega.

1. Normaala keele pikkus viiulil on 33 cm. Kui kaugel kannast tuleb pääle panna sõrm, et saada järgmine kõrgem kvart või kvint?

b*. Olgu keele pinevus, tähendab, keele küljes rippuv pomm 1 kg. Keelel on siis mingisugune kindel toon. Keele pinevuse muutmisel muutub ka tooni kõrgus. Et saada esialgse tooni oktaav (rel. võnkearv 2), tuleb 1 kg asemel võtta $4 = 2^2$ kg; et saada esialgse tooni kvint (rel. võnkearv $\frac{3}{2}$), tuleb võtta $2\frac{1}{4} = \frac{9}{4} = (\frac{3}{2})^2$ kg jne. Järelikult on keele võnkearv võrdeline pinevuse ruutjuurega.

c*. Matemaatiline arutus näitab, et keele võnkearv on pöördvõrdeline ruutjuurega keele massist.

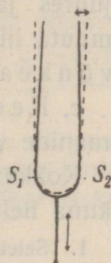
Kõrgema tooni võime saada, kui keele pikkust vähendada või tema pinevust suurendada. Et aga lühike keel annab väikese amplituudi tõttu nõrga tooni, siis tarvitatakse ikkagi pikemaid keeli, olgugi, et see nõuab suuremat keele pinevust ja tugevamat muusikariista ehitust (rauast raam klaveril). Viiuli nelja keele pinevuste summa on ~ 60 kg. — Madalamat tooni võime saada, kui keele pikkust suurendada või tema pinevust vähendada. Harilikult aga tarvitatakse madalate toonide saamiseks võrdl. lühikesi ja kaunis tugevasti pingule tõmmatud keeli, kuid siis suurendatakse keele massi (keel mässitakse ümber vasktraadiga).

Keel võngub harilikult risti, kuid teda võib võnkuma panna ka pikuti, kui teda näit. pikuti hõõruda kolofooniumiga kokku tehtud lapiga. Ta annab siis teissuguse tooni kui ristvõnkumisel.

2. Kaks ühesugust kandle keelt annavad toonid c ja f; kui suur on nende pinevuste suhe?

23. Helihark. Helihark on kaheharuline varrega varustatud terasvarb. Ta võngub seisva lainena nii, nagu näitab joon. 22. Katseklaasiga helisevat heliharki puudutades kuuleme kõrinat, mis kaob punktides S_1 ja S_2 ; järelikult sääl asuvad helihargi sõlmepunktid.

24. Plaati. Ka plaadid võime helisema panna, näit. elektrikella kausikesed. Nad jagunevad selle juures sõlmjoontega eraldatuteks ja vastassihis võnkuvateks naaberosadeks.



Joon. 22. Helisev helihark.

Et sõlmjoooni nähtavaks teha, kinnitame tasapinnalise plaadi horisontaalselt, riputame plaadi pääle peenikest liiva ja tõmbame mööda äärt poognaga. Plaadi helisemisel koguneb liiv sõlmjoontesse (Chladny' katse). Mitut viisi tõmmatud plaat annab mitmesugused toonid ja vst. mitmesugused kujundid (joon. 23). Plaadi



Joon. 23. Chladny' helikujundid.

kinnituse kohast läheb ikka läbi mõni sõlmjooon, kuna poogna külgepuutumise kohast ei või sõlmjoont läbi minna.

25. Õhusammas. a. Ka õhusambad helisevad võnkudes seisvate lainetena. Näiteks voolab õhk orel'i huulvile (joon. 24) puhumisel läbi kitsa pilu vastu teravservalist huult. Sää! murdub õhujuga, hakkab võnkuma ja tekitab viletorus seisvaid laineid.

Et ei helise võnkuv õhujuga, vaid torus olev õhusammas, seda võime näidata järgmiselt: lõikame huule ligidalt toru maha, siis ei helise vile, kui aga toru uuesti külge panna, siis heliseb ta jälle. — Et õhk torus seisvate lainetena võngub, seda võime näidata järgmiselt: võtame huulvile, mille kaks vastasseina on klaasist. Laseme torusse niidi otsas kaalukausi sarnaselt rippuva paberlehekese, mille pääl on kerge pulber. Sõlmpindade kohal jääb pulber paigale, kuna ta paisude kohal maha rappub.

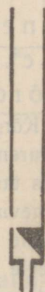
b. Huulvile võib olla lahtine või kinnine; lahtine huulvile annab kinnise vile tooni kõrgema oktaavi.

Õhusamba juures võib muutuda ainult samba pikkus, sest pinevus (tihedus) on antud temperatuuri ja rõhumise juures jääv. Kinnise huulvilega, mille pikkust võime muuta liikuva kanni abil, võime näidata, et heliseva õhusamba võnkearv on pöördvõrdeline tema pikkusega.

c. Keelviledes tekivad helid mitmesuguste keelte või membraanide võnkumise kaudu.

Kokkuvõttes näeme, et heliallikad võnguvad seisvate lainetena, kuna heli levib harilikult (kulgeva) laine kaudu.

1. Seleta, missugused tuntud puhkpillid kuuluvad huul- ja missugused keelviledes hulka. Kuhu kuulub inimese hääleorgan?



Joon. 24. Huulvile.

Resonants; kõla analüüs; ülemtoonid

26. **Resonants.** a. Võtame kaks kindla võnkearvuga keha, mille võnkearvud on samad, näiteks riputame horisontaalselt sirgutõmmatud niidi külge kaks ühepikkust pendlit ja paneme ühe võnkuma, siis kandub võnkumisenergia pingul niidi kaudu edasi ka teise pääle ja see hakkab esimesega kaasa võnkuma. Muudame aga teise keha võnkearvu (pendli pikkust), siis näeme, et teine ei võngu esimesega kaasa. Me järeldame: üks keha võngub teisega kaasa siis, kui nende võnkearvud on samad.

Analoogilise nähtuse paneme tähele ka kindla omatooniga (võnkearvuga) helisevate kehade juures, kus võnkumisenergia võib üle kanduda ühest võnkuvast helisevast kehast teise kas mänguriista seinte või õhu kaudu. Paneme näit. monohordil või kandlel ühe keele helisema, siis hakkab teine keel esimesega kaasa võnkuma ja helisema, kui keeled on unissoonis, tähendab, kui mõlemate võnkearvud on võrdsed. Paneme helisema puust kastikesele asetatud helihargi, siis hakkab kaasa võnkuma ja helisema tema läheduses ka teine samasugusele kastikesele asetatud helihark, kui nad on unissoonis. Laulame lahtise klaveri lähedal, siis võngub ja kõlab kaasa lauldud heliga ainult unissoonis olev keel ja me kuuleme klaverist sama tooni.

Üldiselt nimetame ühe keha kaasavõnkumist teise võnkuva kehaga **resonantsiks**. Arusaadav, et kindla võnkearvuga, tähendab, kindla omatooniga keha **resoneerib** ainult selle tooniga.

Helmholtz'i arvates on hääle aistingu tekkimine seotud resonantsiga. Kõrvas on olemas kiudude süsteem (Corti organ), mis koosneb mitmest tuhandest kiust, ja on võimalik, et need kiud **resoneerivad** üksikute toonidega. Sellega oleks siis seletatav üksikute toonide eraldatult kuulmine samal ajal.

b. Eelpool käsitletud resonantsi nimetame ka valivaks **resonantsiks**, sest keel või helihark valib näit. orkestri mängul ühe kindla tooni välja, millega ta **resoneerib**. On aga olemas ilma kindla võnkearvuta, tähendab, ilma kindla omatoonita elast-

sed kehad (klaveri resonantspõhi, kandle seinad, kõrva kuulmenahk, telefonimembraan jne.), mis iga tooniga kaasa võnguvad ja kaasa helisevad. Niisugust resonantsi nimetame üldiseks resonantsiks.

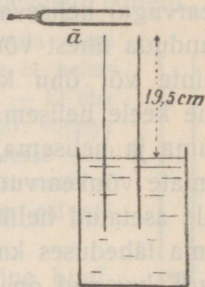
Asetame klaveri resonantspõhjale, monohordi või kandle kaanele väikese korgi harjast jalgadel, siis ta hakkab mängimise! liikuma. — Koputame vastu resonantspõhja või vastu kandle kaant, siis me ei kuule kindla kõrgusega omatooni; need kehad ei võngu korrapäraselt.

1. Mispärast kõlab keele heli klaveril või kandel kõvemini kui puullistul pingule tõmmatud keelel?

2. Mispärast kõlab helihargi heli kõvemini, kui tema vars toetada vastu elastset lauda?

3. Mispärast kustub helihargi võnkumine kiiremini, kui toetada vars vastu lauda?

27. Õhusamba resonants. a. Puhume pudeli avausest mööda, siis kuuleme alati sama tooni, tähendab, õhuhulgal pudelis on kindel oma toon. Sama nähtust paneme tähele iga enam-vähem piiratud õhuhulga juures (teekannus, lambisilindris jne.). Järelikult peab niisugusel õhu hulgal olema valiv resonants. Hoides kõrva ääres näit. laiema kaelaga pudeli avause kõrarikas ruumis (koridoris vahetunnil, klaveri mängu ajal jne.), kuuleme tõesti resonantsi tõttu pudelis oleva õhu omatooni.



Joon. 25. Õhusamba resonants.

b. Võtame lahtise silindri, asetame ta otsapidi vette ja hoiame päälmise otsa ligidal heliseva normaal-a helihargi (joon. 25).

Samba pikkust muutes kuuleme, et ta hakkab helihargiga tugevasti kaasa helisema, kui tema pikkus on 19,5 cm, see on $\frac{1}{4}$ helihargile vastava tooni laine pikkusest õhus. Katseid mitmesuguste heliharkidega korrates leiame, et õhusammas lahtise otsaga silindris helihargiga kaasa heliseb, kui tema pikkus on $\frac{1}{4}$ vastava tooni laine pikkusest õhus. Sel põhjal võib valmistada resonantoreid iga tooni jaoks, kui tema võnkearv on teada.

Silindrilisi resonantoreid võib kergesti teha plekist või papist. Üks ots jäetakse lahtiseks; teine kinnine, kuid auguga varustatud ots surutakse kuulamisel kõrva külge. — Oreli keelviled on ühendatud torudega, mis resonantsi tõttu kõvendavad keele heli. — Inimeshääli tekib häälepealade võnkumisel, ja suu ühes kõriga mõjub kui resonator.

1. Arvuta tooniga \bar{a} (870) ja $\bar{\bar{a}}$ (1740) resoneerivate silindriliste resonaatorite pikkused.

28. Kõla analüüs. Helmholtz tarvitas resonaatoreid kõlade analüüsimiseks, see on antud kõlas peituvate toonide kindlaks määramiseks. Nõrgalt helisevat tooni võib vastava resonaatori abil kõvemini kuulda.

Katsed resonaatoritega näitavad, et iga heliallika võnkumisel helisevad tugevasti kuuldava tooniga, põhitooniga, veel kaasa mõned nõrgad kõrgemad toonid, mida ülemtoonideks nimetame. Põhitooniga kaasa helisevate ülemtoonide tugevus on üksikute heliallikate juures mitmesugune ja oleneb muusikariista ehitusest ning tooni tekitamisviisist.

Ülemtoonid tekivad sellepärast, et heliallikas tervena võnkudes jaguneb ühtlasi ka võnkuvateks osadeks (vaata § 30).

29. Kõlavärv. Eelpool nägime, et helid võivad üksteisest lahku minna oma kõrguse ja tugevuse poolest. Igapäevastest nähtustest võime tähele panna, et meie kõrv võib vahet teha ka niisuguste helide vahel, mille kõrgused ja tugevused on ühesugused, kui aga heliallikad või heli tekitamisviisid on isesugused. Näiteks: kuulmise järele eraldame viiuli tooni klaveri toonist, tunneme hääle järele tuttavat inimest, teeme sama hääle juures vahet üksikute häälikute vahel jne. Niisugust heli omadust, mille põhjal võime eraldada üksteisest sama kõrguse ja tugevusega helisid, nimetame heli kõlavärviks.

Mitmesuguseid helisid analüüsides jõudis Helmholtz otsusele, et kõlavärv oleneb sellest, missugused ülemtoonid põhitooniga kaasa helisevad ja kui tugevad nad on. Inimeshäält analüüsides tegi ta kindlaks, et ka üksikute häälikute erinevise põhjuseks on põhitooniga kaasa helisevate toonide koosseis ja tugevus. Muutes rääkimisel suu kuju muudamegi sellega üksikute põhitooniga kaasa helisevate toonide tugevust ja koosseisu. Nii on siis võrdl. nõrkadel ülemtoonidel siiski suur tähtsus.

(30*. Keele võnkumiskuju. Ülemtoonide tekkimine. a. Keel võngub risti seisva lainena (kõie sarnaselt; § 8). Sõlmpunktid ja paisud võime kindlaks teha näit. paberist ratsanikkude abil: keele võnkumisel jäävad ratsanikud sõlmpunktide kohal paigale, paisude kohalt aga langevad nad maha. Harilikult võngub keel tervena ja sõlmpunktid on keele otsapunktides (joon. 11, a).



Hermann v. Helmholtz (1821—1894).

Kuulus saksa arst ja looduseurija. Juba koolipõlves avaldas haruldast matemaatika- ja vaatlemisannet. Oma raamatuga „Jõu alalhoidmisest“ pani kindla aluse energia jäävuse seadusele. Oli füsioloogia- ja hiljem füüsikaproffessor. Leiutas resonaatorid ja seletas nende abil kõlavärvi. Andis häälikute teooria. Leiutas silmapeegli. Töötas värvide nägemise teooria kallal. Oma uurimused füsioloogia alalt avaldas raamatutes „Hellaistingute õpetus“ ja „Füsioloogilise optika käsiraamat“.

Niisugusel juhul annab keel oma kõige madalama ehk põhi-
tooni: olgu see näit. c. Võnkuvat keelt keskkohal puudutades
kuuleme põhitooni järgmise kõrgema oktaavi \bar{c} , mille rel. võnkearv
on 2. Nähtust võib seletada ainult sellega, et puudutamise kohal
tekkis sõlmpunkt ja mõlemad keele pooled võnkusid kui kaks
iseseisvat keelt (joon. 11, b). Et keele võnkearv on pöördvõrdeline
tema pikkusega, siis on mõlema poole rel. võnkearv 2.

Võnkuvat keelt puudutades ühe kolmandiku kohal kuuleme
järgmise oktaavi kvindi \bar{g} . Ratsaniku abil võime näidata, et sõlm-
punkt on tekkinud mitte ainult puudutatud kolmandiku, vaid ka
teise kolmandiku kohal (joon. 11, c.). Keel on jagunenud kolmeks
ühesuguseks iseseisvalt võnkuvaks osaks ja järelikult iga osa rel.
võnkearv peab olema 3.

See arv on 2 ja 4 vahel ja vastav toon asub põhitooni järgmise kahe oktaavi
(\bar{c} ja $\bar{\bar{c}}$) vahel. Tema määramiseks peame leidma intervalli, millega tuleb
korrutada oktaavi (\bar{c}) rel. võnkearvu 2, et saada 3. Me leiame, et see arv on
 $\frac{3}{2}$ ($2 \cdot \frac{3}{2} = 3$); järelikult on meie toon järgmise oktaavi (\bar{c}) kvint \bar{g} . Arvutamise
resultaat langeb ühte katse resultaadiga.

Puudutame helisevat keelt ühe neljandiku, viiendiku jne. kohal,
siis ta jaguneb vst. neljaks, viieks jne. võrdseks iseseisvalt võn-
kuvaks osaks ja me kuuleme vst. tooni võnkearvuga 4 ($= 2 \cdot 2$,
teine oktaav $\bar{\bar{c}}$), 5 ($= 4 \cdot \frac{5}{4}$, teise oktaavi tertse $\bar{\bar{e}}$), 6 ($= 4 \cdot \frac{3}{2}$, teise
oktaavi kvint $\bar{\bar{g}}$) jne. Samuti võime saada veel kõrgemaid toone,
kuid nad on nõrgemad, sest lühemate keele osade amplituudid
on vähemad.)

Need toonid, mis tekivad heliallika osadena võn-
kumisel ja mille rel. võnkearvud moodustavad
loomuliku arvrea, ongi eelpoolnimetatud **ülemtoonid**.)

b. Tegelikult on vabalt võnkuva keele võnkumiskuju väga kee-
ruline, sest keel jaguneb, võnkudes tervena, selle juures iseenesest
ilma puudutamiseteta ka osadeks: pooleks, kolmandikkudeks jne.
Selle tõttu kõlavad põhitooniga alati kaasa nõrgad
ülemtoonid. Ainult harjunud kõrv kuuleb neid ilma resonaatorita
eraldi, samuti kui näit. ainult vilunud kokk tunneb mõnes keeru-
lisemas sõõgis üksikuid aineid eraldi.

Et kõik eelpool-arvutatud ülemtoonid põhitooniga alati kaasa
ei helise, selgub juba sellest, et nende ülemtoonide tekkimine on

takistatud, mille helisemisel sõlmpunkt peaks tekkima säääl, kus me keelt tõmbame või vasaraga lööme.

1. Leia normaal-a ($n = 435$) esimese 6 ületoonini võnkearvud.

31. Konsonants. Dissonants. Konsonantsi, meeldivat kooskõla, ja dissonantsi, ärritavat kooskõla, seletas juba Pythagoras sellega, et konsoneerivate helide intervallid on lihtsad (oktaav ja põhitoon — 2, kvint ja põhitoon — $1\frac{1}{2}$, tert ja põhitoon — $1\frac{1}{4}$), dissoneerivate helide intervallid aga keerulisemad (sekund ja põhitoon — $1\frac{1}{8}$, septiim ja põhitoon — $1\frac{7}{8}$). Helmholtz näitas, et ka ületoonide intervallid avaldavad mõju helide konsonantsi või dissonantsi.

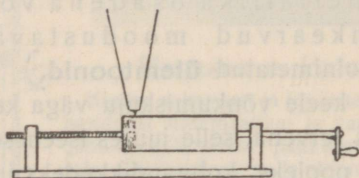
32. Heljumised. Kujutame kaht inimest, kes teevad samal kohal marssimisliigutusi. Kui üks teeb minutis näit. 60 sammupaari, teine 61, siis nad astuvad minuti jooksul üks kord samanimelise ja üks kord isenimelise jalaga. On ühe sammupaaride arv teise omast suurem kahe võrra, siis nad astuvad minuti kestes kaks korda samanimelise ja kaks korda isenimelise jalaga jne.

On ühe keele võnkearv monohordil (klaveril, kandelil) teise omast ühe võrra suurem, siis nad võnguvad sekundis üks kord samas ja üks kord vastassihis. Tekkinud õhulained interfereeruvad ja sekundis tekib ükskord suurema amplituudiga ja üks kord vähema amplituudiga õhulaine, vst. kõveneb ja nõrgeneb heli ning me kuuleme sekundis ühe heljumise. On võnkearvude vahe 2, siis kuuleme sekundis kaks heljumist jne. Heljumiste arv sekundis võrdub helide võnkearvude vahega.

Heljumised võivad tekkida igasuguste heliallikate juures. Heljumisi võib näidata kahe ligikaudu sama kõrgusega helihargiga (helihargi tooni kõrgust võib muuta liikuva plekist klambrikest abil). Tugevaid heljumisi võime kuulda kahe ühesuguse lahtise huulvile juures, kui ühe tooni kõrgust muudame, kattes osa avausest käega kinni. Sagedased heljumised mõjuvad kuulmisorganisse samuti ärritavalt kui vilkuv leek nägemisorganisse.

1. Seleta, kuidas võib heljumiste abil häälestada unissoonis kaht heliallikat.

2. Kaks ühesugust 30 cm pikkust keelt annavad normaal-a. Kui kaugele kannast tuleb näpp päälle panna ühele keelele, et oleks kuulda 5 heljumist sekundis?



Joon. 26. Fonograaf.

33. Fonograaf ja grammofon. Fonograafi ehitus on lihtsamal kujul järgmine: pehme pinnaga (vahast) silinder pöörduv kruvitaolisel teljel (joon. 26); silindri külge puutub nõel, mis on ühendatud kõnetoru otsa kinnitatud membraaniga ja vajutab silindri pöörduvatel selle sisse kruvitaolise vao. Torusse räägitud

või lauldud sõna paneb membraani ühes teravikuga võnkuma ja tekitab konarliku põhjaga vao. Kui pärast pinna kõvenemist nõel asetada vao algpunkti ja silindrit tiirutada endise kiirusega, siis libiseb nõel endist jälge (fonogrammi) mööda, membraan teeb samasuguseid võnkumisi kui rääkimisel, tekivad samasugused õhulained ja me kuuleme endist häält. Fonograafi leiutas Th. Edison (a. 1876).

Grammofoni tarvitatakse eboniit-plaadile spiraaljooneliselt ülesmäärgitud helide kuuldavaks tegemiseks.

Valgus

Valguse levimine ; varjud ; kiirus

34. Helenevad ja tumedad, läbinähtavad, läbipaistvad ja läbipaistmatud kehad. Valguseks nimetame põhjust, mis ärritab nägemisorganit ja tekitab selle kaudu peaaegu valguseaistingu.

Helenevad kehad ehk valguseallikad kiirgavad valgust ja on selle tõttu iseenesest nähtavad; tumedad kehad ei kiirga valgust ja on nähtavad ainult siis, kui nad tagasi heidavad võõrast valgust.

Harilikud valguseallikad on hõõguvad kehad (päike, hõõguv süsi), kuid on olemas ka külm valgus (jaaniussikesed; värvid, millega kaetakse taskukella näitajaid ja numbreid; elektrivoolu mõjul hõõguvad gaasid jne.).

Et valgus võiks valguseallikast silma pääseda, peab ta tungima läbi silma ja valguseallika vahel oleva keskkonna. Keskkonnad on läbinähtavad (õhk), läbipaistvad (tuhm klaas) ja läbipaistmatud (metallid). Olulist vahet ei ole nende liikide vahel, sest ka läbipaistmatud kehad (paber, õhuke metalli kiht) lasevad valgust läbi ja on läbipaistvad, kui nad on aga küllalt õhukesed. Ümberpöörduvalt, ka läbinähtavad kehad ei lase valgust täielikult läbi (klaas või vesi heidab päikese kiirtes varju ja seda rohkem, mida paksem on kiht).

Igale kehale langevast valgusest osa heitub tagasi (mille tõttu me näeme keha) ja osa tungib kehasse sisse; osa sissetunginud valgusest neeldub kehas ja ülejäänud osa läheb läbi (kui keha on küllalt õhuke).

1. Too näiteid selle kohta, et läbipaistmatud ained õhukese kihina on läbipaistvad ja läbinähtavad paksu kihina ainult läbipaistvad (või läbipaistmatud).
2. Missugune on valgustus sügava mere põhjas?
3. Millest on näha, et ka õhk paksema kihina valgust tunduvalt neelab?
4. Kuidas paistab õliplekk valgel paberil vaadates vastu akent ja vastu seina? Seleta nähtust.

35. Valguse levimine ühtlases keskkonnas. a. Nimetame ühtlaseks keskkonnaks niisuguse, milles igal kohal on aine keemiline koosseis ja kõik füüsikalised omadused (tihedus jne.) ühesugused.

Laseme päikese (laterna) valguse tungida pimedasse tuppa läbi väikese avause ja teeme valguse levimise tee nähtavaks tolmu, suitsu või kiirtele kaldu hoitud valge ekraani abil. Me näeme, et valguse levimine sünnib õhus sirgjooneliselt. Katsed mitmesuguste läbinähtavate keskkondadega (vesi) näitavad, et igas **ühtlases keskkonnas levib valgus sirgjooneliselt**; levimise sihti nimetame kiireks.

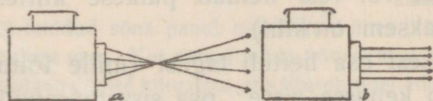
b. Punktisarnasest valguseallikast lähevad kiired laiali igas sihis (joon. 27). Langeb niisugune ühest valgusepunktist laiali minev ehk homotsentriline (samakeskne) kiirte kimp silma, siis me näeme valgusepunkti homotsentriliste kiirte lõikepunktis või langevate kiirte sihis, kui nad on paralleelsed.



Joon. 27. Valguse levimine.

Ka siis, kui kiirte kimp on muutnud oma sihi, näit. peegeldumisel, kuid on jäänud selle juures homotsentriliseks, näeme harjumuse tõttu ikkagi valgusepunkti silma langevate kiirte pikenduste lõikepunktis, olgugi, et teda tõepoolest sääl ei ole.

Väga kaugest valguseallikast tulevaid kiiri võime lugeda paralleelseteks, kui kiirte kimp on küllalt kitsas (päikese kiired). Valguse kiire all mõistame edaspidi ikka kitsast paralleelkiirte kimpu.



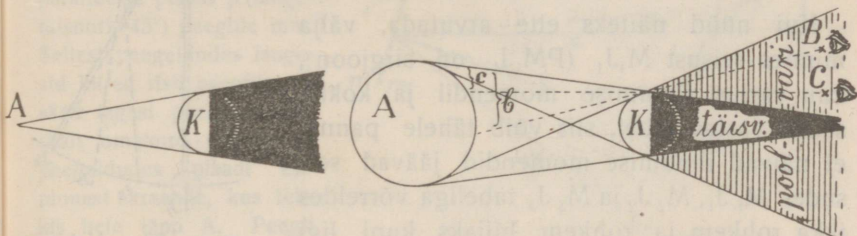
Joon. 28. Projektsioonlaterna kiirte kimbud.

Päikese kiirte asemel võime katsetes tarvitada projektioonlaterna kiiri. Laterana abil võime saada koonusetaolise kiirte kimbu (joon. 28, a), mille tugevasti valgustatud tippu võime kasutada kui heledat valguse-

punkti. Kui aga laternas lampi vastavalt ümber asetada, siis võime saada ka paralleelkiirte kimbu (joon. 28, b).

1. Mispärast teeb tolm või suits õhus kiirte käigu nähtavaks?
2. Too näiteid valguse sirgjoonelise levimise kohta igapäevases elust.
3. Mispärast võime vaadelda valgustatud keha iga punkti kui valgusepunkti?
4. Mispärast kaob kindel kaugusetunne kaugel olevate asjade kohta, — mispärast paistavad taevakehad samal kaugusel olevat?

36. Varjud. Valguse sirgjoonelise levimise tõttu tekib läbi-
paistmatu keha taga v a r i. Varju iseloom ei olene ainult läbi-
paistmatust kehast, vaid ka valguseallikast, mis võib olla kas
punktitaoline või suurema pinnaga keha.



Joon. 29. Vari punktitaolise
valguseallika puhul.

Joon. 30. Vari suurema
pinnaga valguseallika puhul.

Punktisarnasest valguseallikast tekib ainult teravalt piiratud t ä i s v a r i (joon. 29), suurema pinnaga kehast ka p o o l v a r i (joon. 30).

1. Seleta varjude ehitus ja poolvarju valgustus joonistel 29 ja 30.

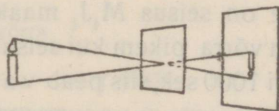
37. Kujutised väikese avause abil. Katame leeklambiga varustatud projektsioonlaterna avause kinni musta paberiga. Teeme paberisse väikese augu, siis näeme seinal hõõguvate sõepulkade kujutise. On tehtud paberisse mitu auku, siis näeme mitu kujutist.

Asetame pimedas toas lauale künula taha ühe läbipaistmatu ekraani väikese avausega ja teise valge ekraani (joon. 31). Valgel ekraanil näeme künula nõrga ümberpöörduv kujutise.

Kujutise tekkimist võime seletada ainult sellega, et asja igast punktist langeb läbi esimese ekraani avause teisele kitsas kiirte kimp ja annab sääl avausekujulise valgustatud täpi; kõik valgustatud täpid kokku sünnitavad aga asja ümberpöörduv kujutise.

Seleta, kuidas muutub kujutise suurus, kui muuta keha kaugust ekraanist.

Päevapildi-aparaadi ehitamisel võib väikest avaust tarvitada objektiiv asemel. Niisuguse aparaadiga tuleb ainult kaua valgustada, sest läbi avause langeb vähe valgust päevapildi-plaadile. Selle tõttu võib ülesvõtteid teha ainult paigalolevatest asjadest.



Joon. 31. Kujutis väikese
avause abil.

38. **Valguse kiirus.** a. Valguse kiiruse määras esimesena (a. 1675) Olaf Römer astronoomilise nähtuse põhjal.

Maakera teeb tiiru ümber päikese ühe aasta jooksul; jupiter tarvitab selleks ligi 12 aastat. Nii siis teeb maakera ~ 12 tiiru ümber päikese selle aja jooksul kui jupiter teeb ühe ainsa.

Vastavad maa ja jupitri seisud on joonises 32 tähistatud ühesuguste indeksitega.

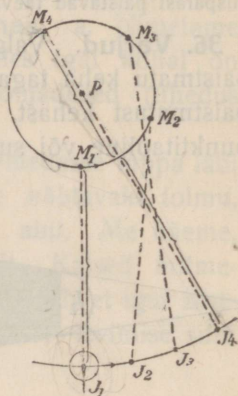
Üks jupitri kuudest teeb tiiru ümber jupitri $\sim 42\frac{1}{2}$ tunni jooksul; selle juures ta kaob kord lühikeseks ajaks jupitri varju.

Kui nüüd näiteks ette arvutada, välja minnes seisust M_1J_1 (PM_1J_1 on sirgjoon), kuu varjust ilmumise momendil ja kokku seada vastav tabel, siis võib tähele panna, et näivad ilmumise momendid jäävad seisudes M_1J_1 , M_2J_2 ja M_3J_3 tabeliga võrreldes ikka rohkem ja rohkem hiljaks kuni ligi 1000 sekundini seisus M_4J_4 (M_4PJ_4 ligikaudu sirgjoon); sellest seisust alates hakkab hiljaksjäämine vähenema, kuni viimaks kuu ilmumise moment langeb jälle ühte tabeliga, kui M ja J asuvad samal pool päikest temaga ühel sirgjoonel. Römer seletas nähtuse järgmiselt; jupitri kuu liigub ühtlaselt ja varjutused sünnivad ettearvatud momentidel; me näeme neid hiljem ainult sellepärast, et jupitri kauguse suurenemisel maakerast valgus tarvitab pikema tee ära käimiseks ($M_4J_4 > M_3J_3 > M_2J_2 > M_1J_1$) rohkem aega. Et nüüd valguse tee on seisus M_4J_4 maakera orbiidi läbimõõdu, s. o. $\sim 300\,000\,000$ km võrra pikem kui seisus M_1J_1 , hiljaksjäämine selles seisus aga ligi 1000 sek, siis peab valguse kiirus ilmaruumis võrduma ümmarguselt $\frac{300\,000\,000}{1000} \frac{\text{km}}{\text{sek}} = 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$.

Hiljem (a. 1849) läks Fizeau'l korda mõõta valguse kiirust õhus maakeral umbes $8\frac{1}{2}$ km pikkusel maal, Foucault'l (a. 1854) veel lühemal maal (toas), ja mitte ainult õhus, vaid ka teistes keskkondades.

Mõõtmised näitavad, et valguse kiirus õhus on ligikaudu sama suur kui ilmaruumis, tihedamates keskkondades aga väikesem.

1. Mispärast pole võimalik mõõta valguse kiirust sarnaselt hääle kiirusega?
2. Mitu korda jõuaks valgus käia 1 sek jooksul mööda ekvaatorit ümber maakera?



joon. 32. Valguse kiiruse määramine Römer'i järele.

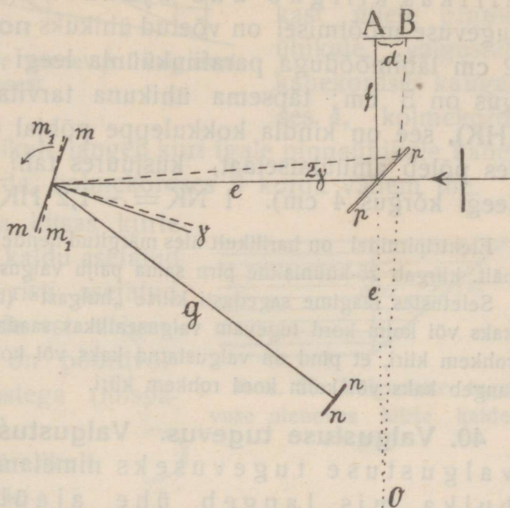
3. Lähem kinnistäh α -centauri on meilt 4,3 valgusaastat kaugel, see tähendab, nii palju aega tarvitab valgus selle kauguse ära käimiseks. Mitme aastaga jõuaks kiirrong ($70 \frac{\text{km}}{\text{h}}$) α -centauri'ni?

4. Kui palju aega tarvitab valgus

a) päikese ja maa vahelise tee ära käimiseks?

b) kuu ja maa vahelise tee ära käimiseks?

b. Foucault tarvitas valguse kiiruse määramiseks järgmist meetodit: Ta juhtis paralleelkiirte kimbu (joon. 33) läbi tasaparalleelse plaadi p (lange misnurk 45°) peeglile mm . Sellest peegeldudes lange sid kiired risti peeglile nn , säält tagasi peeglile mm , säält omakord plaadile p , peegeldudes plaadi esipinnast ekraanile, kus tek kis hele täpp A. Peegli mm kiirelt tiirutamisel nih kus hele täpp B-sse, sest selle aja jooksul, mida kiir tarvitas kahekordse kauguse g ära käimiseks, pöö rdu s peegel seisust mm seisu m_1m_1 nurga γ võrra, mille tõttu peegeldunud kiir pöö rdu s 2γ võrra ja langes punkti B.



Joon. 33. Valguse kiiruse määramine Foucault' järele.

On valguse kiirus δ hus c , siis tarvitas valgus kahekordse peeglite vahelise tee ära käimiseks $\frac{2g}{c}$ sekundit.

Tegi peegel n tiiru sekundis, siis ta pöö rdu s

1 sek jooksul $n \cdot 360^\circ$ võrra

$$\frac{2g}{c} \quad " \quad " \quad \frac{2g \cdot n \cdot 360^\circ}{c} \quad " \quad = \gamma \text{ võrra}$$

Kui pikendame ekraanile langevaid kiiri kuni lõikepunktini O, siis selgub, et

$$d = \frac{2\pi (e + f) \cdot 2\gamma}{360} = \frac{2\pi (e + f) \cdot 2 \cdot 2g \cdot n \cdot 360}{360 \cdot c} = \frac{8\pi g n (e + f)}{c}$$

Siit leiame, et $c = \frac{8\pi g n (e + f)}{d}$.

Et kõik suurused pääle c on mõõ detavad, siis võib arvutada kiirust c .

Asetades peeglite vahele veega täidetud toru, mää ras Foucault valguse kiiruse vees, samuti ka teistes keskkondades.

Valguse ja valgustuse tugevus

39. Valguse tugevus. Valguseallika valguse tugevuseks nimetame valguse (energia) hulka, mis valguseallikas kiirgab ühe ajaühiku (sek) jooksul. Valguse tugevuse mõõtmisel on võetud ühikuks **normaalküünal (NK)**, s. o. 2 cm läbimõõduga parafiinküünla leegi tugevus, kui leegi kõrgus on 5 cm; täpsema ühikuna tarvitatakse **Hefner'i küünalt (HK)**, see on kindla kokkuleppe põhjal ehitatud lambileek, (milles põleb amüülatsetaat, kusjuures tahi läbimõõt on 8 mm ja leegi kõrgus 4 cm). $1 \text{ NK} = \sim 1,2 \text{ HK}$.

Elektripirnidel on harilikult üles märgitud nende ligikaudsed tugevused HK-des; näit. kiirgab 25-küünlaline pirn sama palju valgust kui 25 HK ühtekokku.

Seletustes räägime sagedasti kiirte „hulgast“ (tihedusest). Näiteks ütleme, et kaks või kolm kord tugevam valguseallikas saadab välja kaks või kolm kord rohkem kiiri, et pind on valgustatud kaks või kolm kord tugevamini, kui temale langeb kaks või kolm kord rohkem kiiri.

40. Valgustuse tugevus. Valgustuse seadused. a. Pinna valgustuse tugevuseks nimetame valguse (energia) hulka, mis langeb ühe ajaühiku (sek) jooksul ühele pinnaühikule (cm^2).

Valgustuse tugevuse ühikuks on **luks (Lx)**, see on valgustuse tugevus, mis annab 1 HK 1 m kauguselt kiirtele risti asetatud (valgele) pinnale.

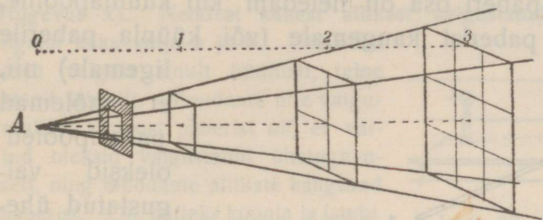
Igapäevases elust teame, et pinna valgustuse tugevus oleneb valguseallika tugevusest ja kaugusest ning kiirte kaldenurgast. Valguseallika antud tugevuse ja kauguse juures on valgustus kõige tugevam, kui kiired langevad pinnale risti (joonisest 35 näeme, et kiirtele risti asetatud pinnale p langevad kiired tihedamalt kui kaldu asetatud pinnale P).

b. Vaatame juhtu, kus kiired langevad pinnale risti. Valgustuse tugevuse kohta on siis maksev seadus: Valgustuse tugevus (v) on võrdeline valguseallika tugevusega (J) ja pöördvõrdeline kauguse (r) ruuduga:

$$v = \frac{J}{r^2} \dots \dots \dots 1$$

Lihtsuse mõttes on valemis ära jäetud võrdetegur; kui J mõõdame HK-des ja r m-tes, siis muutub tegur 1-eks ja tugevuse saame Lx-des.

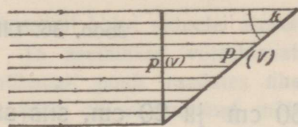
Selle seaduse esimene osa on iseenesest mõistetav. Teise osa



Joon. 34. Valguse tugevuse olenevus valguseallika kaugusest.

võime tõendada joonise 34 abil: Näeme, et kiirte hulk, mis langeb ühe m kaugusel valguseallikast ühele pinnauhikule, valgustab kahekordses kauguses 9 pinnauhikut; järelikult langeb kiiri igale pinnauhikule kahekordses kauguses 4 korda, kolmekordses 9 korda vähem jne.

c*. Kujutleme, et sama kitsas kiirte kimp valgustab kiirtele kaldu asetatud pinda P (joonis 35) ja risti asetatud pinda p . Nende pindade vst. valgustuse tugevused V ja v on pöördvõrdelised pindade suurusetega (mispärast?), s. o. $V : v = p : P$.



Joon. 35. Valgustuse tugevuse olenevus kiirte kaldenurgast.

Kuid $p : P = \sin k$; järelikult $V = v \sin k$.

Tähendab, pinna valgustuse tugevus on võrdeline langevate kiirte kaldenurga (k) sinusega.

Kokku võttes väljendub valgustuse tugevus V matemaatilisel kujul järgmiselt:

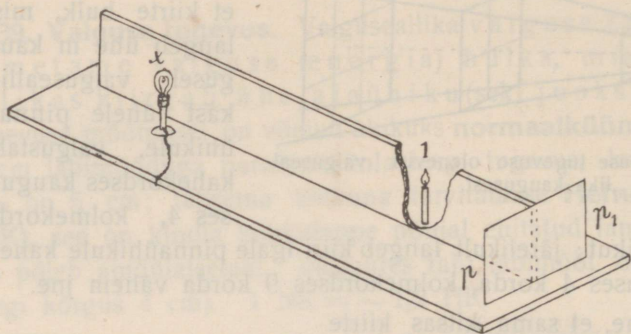
$$V = \frac{J}{r^2} \sin k \dots \dots \dots 2$$

1. Arvuta raamatu valgustus, kui valguseallika valguse tugevus on 25 NK, raamatu kaugus allikast $1 \frac{1}{2}$ m ja

- a) kiired langevad pinnale risti,
- b) kiirte kaldenurk on 60° .

41. Valguse tugevuse mõõtmine. a. Valguse tugevuse mõõtmise printsiibi selgitamiseks teeme järgmise katse: Asetame pimedas toas katselauale serviti pikema laua, mille otsa külge on kinnitatud valge läbipaistev paber (pp_1 joon. 36). Ühele poole lauda asetame normaalküünla (tugevus 1) ja teisele poole samal kõrgusel (mispärast samal?) lambi (tugevus x). Paberi üks pool (p_1) saab siis valgust

ainult künnlalt, teine pool (p) ainult lambilt. Kui vastu valgust vaadates lambipoolne paber osa on heledam kui künlapoolne, siis nihutame lambi paberist kaugemale (või künla paberile



Joon. 36. Lihtne fotomeeter.

ligemale) nii, et mõlemad paberipooled oleksid valgustatud ühetugevuselt, ja mõõdame siis lambi ning künla kaugused paberist. On näiteks mõlemad kaugused vst.

60 cm ja 20 cm, siis saame eelmise § põhjal

$$\frac{x}{60.60} = \frac{1}{20.20}$$

$$x = 9.1$$

Tähendab, otsitav lambi tugevus on 9 NK.

Nagu näeme, on mõõtmise printsiip järgmine: pinnad valgustatakse võrreldavatelt valguseallikatelt ühetugevuselt ja valguse tugevuse suhe arvutatakse vastavate kauguste põhjal. Täpsemate resultaate saamiseks tuleb mõõtmine viia läbi tumedate seinte ja laega toas (mispärast?).

Riistad, millega mõõdetakse valguseallikate tugevust, nimetatakse **fotomeetriteks**.

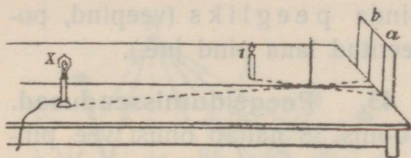
1. Lamp valgustab pinda 160 cm kauguselt samatugevuselt kui HK 30 cm kauguselt. Leia lambi valguse tugevus.

2. Missuguselt kauguselt valgustab 50-küünlaline lamp pinda samatugevuselt kui 16-küünlaline 30 cm kaugusel?

3. Kui kaugele pinnast tuleb asetada Hefner'i lamp, et ta valgustaks pinda samatugevuselt kui normaalküünlal 2 m kauguselt?

b. Ruhmford'i varju-fotomeetrit on lihtne valmistada järgmiselt: Kinnitame lauale vertikaalselt valge paberilehe ja ~ 10 cm kaugusel temast ümmarguse varda (sulevars, joon. 37). Tõmbame läbi varda aluse paberile rist-

joone ja asetame lauale ristjoone ligidale normaalküünla (tugevus 1) ja lambi (tugevus x). Nendest kahest allikast valgustatud paberil ilmuvad üksteise ligidal kaks varju a ja b . Üks neist saab valgust ainult küünlalt, teine ainult lambilt. Muudame ühe valguseallika kaugust paberist nii, et varjud oleksid valgustatud ühetugevuselt, ning mõõdame allikate kaugused paberist. On näiteks küünla ja lambi kaugused $vst.$ 30 ja 150 cm, ning mõlemad valguseallikad samal kõrgusel, siis saame eelmise § põhjal



Joon. 37. Ruhmford'i fotomeeter.

$$\frac{x}{150 \cdot 150} = \frac{1}{30 \cdot 30}$$

$$x = 25 \cdot 1$$

Otsitav lambi valguse tugevus on 25 NK.

Bunseni õlipleki-fotomeeter on lihtsamal kujul mõnele alusele vertikaalselt kinnitatud valge paber õliplekiga. Ta asetatakse võrreldavate valguseallikate vahele nii, et õliplekk paistaks mõlemalt poolt vaadates ühesugusena. See on võimalik ainult siis, kui paberi pind on valgustatud mõlemalt poolt ühetugevuselt. Mõõdetud kauguste põhjal arvutatakse valguse tugevus samuti kui eelmises näites.

Otsekoheisel valguseallikate vaatlemisel eksime harilikult nende tugevuste hindamisel; näiteks paistab elektri hõõglamp valgusetugevamana kui sama valgusetugev petrooleumi leek ja peene metallniidiga hõõglamp valgusetugevamana kui sama valgusetugev jämedama söeniidiga hõõglamp (nagu tinatükk paistab käega katsudes raskemana kui sama raske puutükk). Seleta eksituse põhjus.

4. Ruhmford'i fotomeetril on lambi ja normaalküünla kaugused varjudest $vst.$ 100 ja 25 cm, kui varjud on ühesugused. Leia lambi valguse tugevus.

Valguse peegeldumine tasapinnast

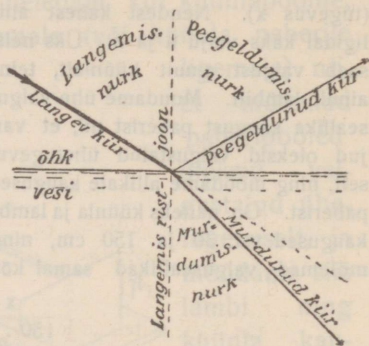
42. Peegel ja peegeldumine. Langevad valguse kiired ühest keskkonnast teise, siis läheb keskkondade lahuspinnast osa kiiri endisse keskkonda tagasi, osa aga tungib teise keskkonda. Vaadeldes ainult tagasiheidetud osa, järeldame (millest?), et kare lahuspind (joonistamispaper) heidab valgust tagasi igas sihis ühte viisi, hajutab valgust (eluruumide valgustamine), sile lahuspind (peegel) aga ainult ühes kindlas sihis (läigib).

Korrapärast valguse tagasiheitmist kindlas sihis nimetame peegeldamiseks, hästi siledat pinda peegliks (veepind, pooleeritud laua pind jne.).

43. Peegeldumisseadused.

Joonis 38 näitab õhust vee pinnale langenud kiire edaspidist käiku. Anna joonises 38 nimetatud nurkade definitsioonid (ära sega langemis- ja peegeldumisnurka kaldenurgaga!).

Vaatlused ja katsed näitavad, et peegeldumine sünnib järgmiste seaduste järele:



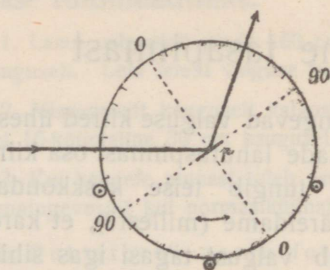
Joon. 38. Õhust veepinnale langeva kiire käik.

1) Langev kiir, peegeldunud kiir ja langemisristjoon asuvad samas tasapinnas.

2) Peegeldumisnurk võrdub langemisnurgaga.

Need seadused on maksivad ka iga kõvera peegli väga väikese pinnaosa kohta, sest niisugust pinnaosa võib vaadelda kui tasapinda. Peegeldumisseadustest järgneb, et peegeldumine on sihi poolest ümberpööratav nähtus (langev kiir ja peegeldunud kiir on sihi poolest ümberpööratavad).

Kiirte peegeldumist võib näidata hästi optilise ketta abil (joon. 39); see on kettakujuline ekraan, mis võib pöörduda ümber tsentri ja mille äär on jaotatud kraadideks.

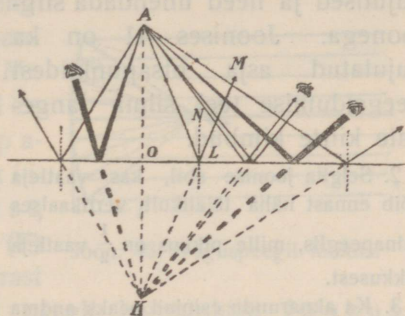


Joon. 39. Peegeldumise demonstreerimine opt. ketta abil.

Kinnitame ketta keskele väikese tasapeegli nii, et ta oleks risti joonega 00 ja laseme pimedas toas laternast läbi horisontaalse pilu tuleva kitsa kiirte kimbu langeda peeglile kaldu. Kettal näeme langevat ja peegeldunud kiirt. Ketta pöördumisel paneme tähele, et vst. langemis- ja peegeldumisnurgad on alati võrdsed.

1. Missuguse nurga võrra pöördub peegeldunud kiir, kui peegel (ühes kettaga) pöördub nurga γ võrra?

44. Homotsentriliste kiirte peegeldumine tasapeeglist. Valgusepunktist A (joon. 40) langeb peeglile laialiminev kiirte kimp. Ehitame punktile A peegli suhtes sümmeetrilise punkti K ja langevatele kiirtele AL jne. sümmeetrilised lõigud KL jne. Nende punktist K väljaminevate lõikude pikendused ongi langevate kiirte peegeldunud kiired.



Joon. 40. Homotsentriliste kiirte peegeldumine tasapeeglist.

1. Tõenda seda (näita, et joonlõigu KL pikendus LM on langevale kiirele AL vastav peegeldunud kiir).

Sellest järgneb, et samast punktist väljaminevad kiired paistavad pärast peegeldumist tasapeeglist välja tulevat ühest punktist, mis asub peegli taga sümmeetriliselt antud valgusepunktiga. Homotsentriline kiirte kimp jääb peegeldumisel tasapeeglist homotsentriliseks.

2. Tõenda geomeetriliselt, et paralleelkiired jäävad pärast peegeldumist tasapeeglist paralleelseiks.

3. Tõenda geomeetriliselt, et peegeldudes meile tuntud seaduste järele valguse kiire tee valgusepunktist tasapeegli ja säält vaatleja silma on kõige lühem.

45. Kujutised tasapeeglis. Seleta joon. 40 põhjal, mispärast vaatleja näeb valgusepunkti A kujutist punktis K.

a. Kujutised on üldse kahte liiki. Projektsioonlaternaga saadud kujutiste piirjooni võime ekraanil näidata kepiga ning ekraanil otse üles joonistada. Asetades ekraani asemele suure valgusetundliku päevapildiplaadi võiksime saada plaadil kujutise ülesvõtte; kujutiste kohtadele langevad valguse kiired tõelikult. Me nimetame niisuguseid kujutisi *tõelisteks*. — Kõik need tunnismärgid puuduvad aga kujutisel tasapeeglis. Kujutis tasapeeglis on ainult näiv; teda ei saa ekraanil näidata või päevapildiplaadile üles võtta, sest peegli taha tõelikult valgust ei pääse. Me nimetame niisuguseid kujutisi *ebakujutisteks*.

1. Missuguste igapäevases elust tuntud optiliste riistade abil võime saada kujutisi ja missugused on need kujutised (tõelised või ebakujutised)?

b. Ka valgustatud asjast, mis asub peegli ees, tekib peegli suhtes sümmeetriline ebakujutis, sest asja iga punkt annab oma eba-

kujutise. On asi sirge (joon. 41), siis on kujutise ehita-
 misel sümmeetriaalause te põhjal tarvis leida ainult otsapunktide
 kujutised ja need ühendada sirg-
 joonega. Joonises 41 on ka
 kujutatud asja otsapunktidest
 peegeldumise teel silma lange-
 vate kiirte kimbud.

2. Selgita joonise abil, kas vaatleja
 võib ennast näha täielikult vertikaalses
 seinapeeglis, mille pikkus on $\frac{1}{2}$ vaatleja
 pikkusest.

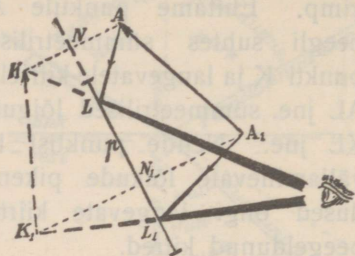
3. Ka aknaruudu esipind peaks andma
 meile kujutise. Mispärast me harilikult
 seda kujutist ei näe ja kuidas võime teda teha nähtavaks?

4. Kas oleks nähtav peegli pind, mis kõik langevad kiired peegeldab?

c. Kahe peegli vahele (n urk peegli d) asetatud asjast näeme mitme-
 kordse peegeldumise tõttu mitu kujutist, mille arv suureneb peeglivahelise
 nurga vähenemisel.

Ka harilikud amalgaamitud klaaspeeglid annavad kaks kujutist.
 Üks valgusetugev tekib peegeldumisel amalgaani pinnast, teine, valgusenõrk,
 mida me harilikult tähele ei pane, klaasi esipinnast.

5. Ehita valgusepunkti mõlemad kujutised paksemas amalgaamitud klaas-
 peeglis ja vaatleja silma peegeldunud kiirte käik, ning tee kindlaks kujutiste
 kauguse olenevus klaasi paksumusest.

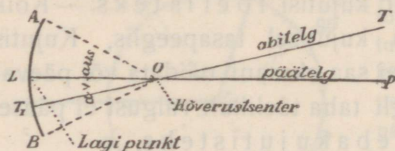


Joon. 41. Asja kujutis tasa-
 peeglis.

Peegeldumine sfäärilistest peeglitest*

46. Nõguspeegel. Sfääriline nõguspeegel on kerapinna
 osa, kus peegliks on kera sisepind.

Joonises 42 tähendab kaar AB nõguspeegli läbilõiget.



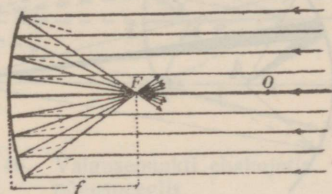
Joon. 42. Nõguspeegli läbilõige.

1. Anna joonises 42 tähendatud
 nimetuste definitsioonid.

2. Joonesta kolm nõguspeegli läbi-
 lõiget, mille raadiused on 2, 3 ja 5
 cm ning läbilõigete otsapunktide
 kaugused vst. 1,5, 2,5 ja 3 cm.
 Mõõda ja võrdle peeglite avauseid.

47. Nõguspeegli fookus. a. Asetame nõguspeegli päikese kiirte
 teele nii, et päätelg oleks kiirtega paralleelne. Siis paneme tä-

hele (suitsu abil), et kiired pärast peegeldumist koonduvad koonu-
setaoliselt ja lõikuvad pääteljel ühes punktis, kust nad edasi
laiali lähevad. Seda näitab ka ehi-
tus (joonises 43 punkteeritud lan-
gemisristjooned on raadiused). Me
nimetame punkti, milles
lõikuvad pääteljega pa-
ralleelselt langevad kiir-
red pärast peegeldumist,
nõguspeegli **fookuseks (F)**
ehk tulipunktiks (mispärast



Joon. 43. Nõguspeegli fookus.

tulipunktiks?) ja tema kaugust peegli lagipunktist fookuse
kauguseks (f). Ehitus ja matemaatiline arutus (§ 49) näitab,
et fookuse kaugus võrdub poole kõverusraa-
diusega. Fookust võime vaadelda kui lõpmata kaugel paa-
teljel asuva valgusepunkti tõelist kujutist (mispärast?).

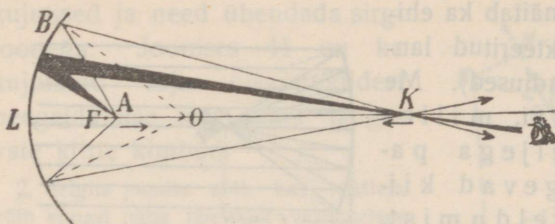
Peeglit pöörates näeme, et paralleelsed kiired lõikuvad pärast
peegeldumist ka siis ühes punktis, kui nad ei ole paralleelsed paa-
teljega; lõikepunkt asub siis fookuse kõrval samal kaugusel peeglist.

b. Ka peegeldumisel nõguspeeglist jääb maksma kiirte ümber-
pööratavuse printsiip. Tõelikult, asetame valgusepunktist (väi-
kesest valguseallikast, laterna kiirte koonuse tipust) laialiminevate
kiirte teele nõguspeegli nii, et valgusepunkt oleks foo-
kuse kaugusel, siis näeme, et kiired on pärast pee-
geldumist paralleelsed; valguseplekk, mis tekib seinal,
on sama suur kui peegel. Seda tõendabki ehitus. Võib ütelda,
et fookuse kauguses asuva valgusepunkti tõeline kujutis on lõp-
mata kaugel (mispärast?).

1. Kuidas leida nõguspeegli fookuse kaugust?

48. Homotsentriliste kiirte peegeldumine nõguspeeglist.
Valgusepunkti kujutis. a. Valgusepunkti pääteljel fookusest
(peeglist) kaugemale viies näeme (suitsu või ekraani abil), et
peegeldunud kiired alati koonduvad ja lõikuvad ühes punktis, kus
tekib valgusepunkti tõeline kujutis. Paneme tähele, et valguse-
punkti kaugenemisel fookusest ligineb tõeline kujutis. Seda
näitabki ehitus (joon. 44; valgusepunkti kaugenemisel vähenevad
langemisnurgad, järelikult ka peegeldumisnurgad, ning kujutis
ligineb). Vaatleja võib näha tõelise kujutise ka ilma ekraanita õhus

rippuvana, kui ta vaatab vastu kiirte sihti. Arusaadav, et tähenda-



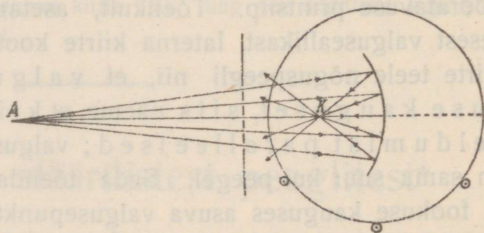
Joon. 44. Valgusepunkti tõeline kujutis nõguspeeglis.

tud valgusepunkti A ja kujutise K liikumisel (üksteisele vastu) peavad mõlemad kord ühte langema. See sünnib, kui valgusepunkt asub kõverustsentriss (risti peeglile langevad kiired peegelduvad samas sihis tagasi).

Nii siis valgusepunkti kaugenemisel fookusest kuni kõverustsentrini ligineb tõeline kujutis lõpmatuseni kuni kõverustsentrini.

Kiirte ümberpööratavuse printsiibi tõttu on valgusepunkt ja tema tõeline kujutis ümberpaigutatavad ning valgusepunkti kaugenemisel kõverustsentrini kuni lõpmatuseni ligineb tõeline kujutis kõverustsentrini fookuseni.

Üksikute kiirte käiku võib näha hästi opt. ketta külge kinnitatud nõguspeegli riba, kui valgusepunktist väljaminevate kiirte teele asetada ekraan paralleelsete piludega (joon. 45).



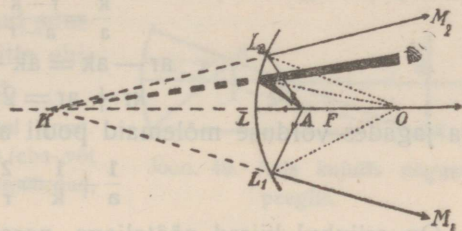
Joon. 45. Homotsentriliste kiirte peegeldumine nõguspeeglist.

b. Ligineb valgusepunkt fookusest peeglile, siis lähenevad kiired ka pärast peegeldumist laiali, paistavad aga välja tulevat ühest punktist peegli taga. Seda tõendab ehitus (joon. 46) ja katse; vaatleja näeb peegli taga punktis K valgusepunkti A kujutise, kuid see on e b a k u j u t i s.

Üldse jäävad homotsentrilised kiired pärast peegeldumist nõguspeeglist alati homotsentrilisteks.

Kõik, mis öeldud pääteljel asuva valgusepunkti kohta, on maksev ka abiteljel asuva valgusepunkti kohta, sest abitelg muutub pääteljeks, kui kinni katta vastav peegli osa.

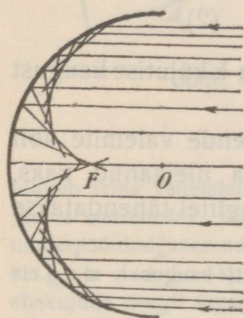
Et punkti kujutis on terav ainult peegli väikese avause juures (põhjus vaata c), siis tarvitatakse tegelikult peegleid väikese avausega (et joonised oleksid selged, on raamatus kujutatud peeglid suurte avaustega).



Joon. 46. Valgusepunkti ebakujutis nõguspeeglis.

1. Kuidas tuleks prožektoris nõguspeegli ees muuta valguseallika kaugust, et valgustada suurt pinda või intensiivsemalt valgustada väikest pinda?

2. Kuidas muutub ebakujutise kaugus nõguspeeglist, kui valgusepunkt ligineb fookusest peeglile?



Joon. 47. Sfääriline aberratsioon nõguspeeglis paralleelkiirte puhul.

c. Kiirte peegeldumist suure avausega nõguspeeglist ligidalt vaadates paneme tähele, et lagi-punkti L ligidale langevad kiired, nn. tsentraalkiired, lõikuvad pärast peegeldumist täpselt ühes punktis, kuna äärkiirte lõikepunktid on peeglile lähemal. Nähtust, et kõik homotsentrilised või paralleelkiired ei lõiku pärast peegeldumist samas punktis, nimetame **sfääriliseks aberratsiooniks**. Aberratsiooni tagajärjel on valgusepunkti kujutis suurema pinnaga plekk. Aberratsiooni on võimalik kõrvaldada, kui diafragma abil kinni pidada äärkiired.

3. Kirjelda kiirte peegeldumist joonises 47.

49. Nõguspeegli valem. Kujutise asukoha olenevust valgusepunkti asukohast ja kõverusraadiuse pikkusest võime kindlaks määrata analüütiliselt: Kolmnurga nurgapoolitaja lause põhjal (joon. 48)

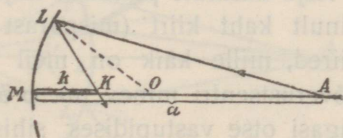
$$\frac{LK}{LA} = \frac{OK}{OA}$$

On L ja M võrdlemisi teineteise ligidal või O võrdlemisi kaugel (avaus väike), siis võime asetada ilma tunduva veata

$$LK = MK = k$$

$$LA = MA = a$$

Asetame veel $MO = r$, siis saame



Joon. 48.

$$\frac{k}{a} = \frac{r-k}{a-r}$$

$$ar - ak = ak - kr$$

$$kr + ar = 2ak$$

ja jagades võrduse mõlemad pooli akr-ga

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

On erijuhul kiired pääteljega paralleelsed, tähendab $a = \infty$ ja $\frac{1}{a} = 0$, siis tuleb k asemele asetada fookuse kaugus f ja me leiame

$$\frac{1}{f} = \frac{2}{r}$$

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

Asetame peegli valemisse f väärtuse, siis saame valemi teisel kujul

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f} \dots \dots (2),$$

kus a tähendab asja (valgusepunkti) kaugust ja k kujutise kaugust peeglist.

Valemid (1) ja (2) seovad kolme suurust; nende valemite abil võime alati leida ühe suuruse, kui on teada ülejäänud kaks. Harilikult tarvitatakse viimast valemit, sest peeglitel tähendatakse üles nende fookuse kaugused.

1. Nõguspeegli kõverusraadius on 30 cm, valgusepunkti kaugus 1 m. Leia kujutise kaugus.

2. Valgusepunkti kaugus on 3 m, kujutise kaugus 60 cm. Leia fookuse kaugus.

3. Fookuse kaugus on 60 cm. Kujutis ligineb 50-nest cm-rist kuni 40-ni. Missuguse tee käib ära valgusepunkt?

4. Aseta peegli valemisse $r = \infty$ ja seleta saadud resultaat.

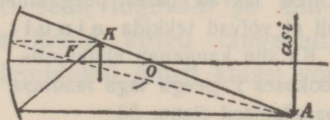
5. Kas nõguspeegli valemist on näha, et ümberpööratavuse printsiip on nõguspeegli juures maksev?

50. Kujutiste ehitamine nõguspeeglis. a. Nõguspeeglis tekib asja kujutis, sest asja iga punkt annab peeglis oma kujutise.

Asja üksikute punktide kujutiste ehitamiseks on küllalt tarvitada ainult kaht kiirt (mispärast mitte rohkem?); me valime seks kiired, mille käik on meil teada. Niisugused kiired on: läbi kõverustsentri minev nn. **p ä ä k i i r** (pärist peegeldumist tuleb tagasi otse vastupidises sihis); pääteljega paralleelne nn. **p a r a l l e e l k i i r** (läheb pärist peegeldumist läbi fookuse) ja l ä b i f o o k u s e m i n e v k i i r (läheb pärist peegeldumist paralleelselt pääteljega). Nimetatud kiirtest kasutame harilikult kaht esimest.

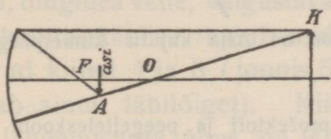
Ehituse lihtsustamise otstarbel vaatleme ainult sirget asja (nool) ja kujutame, et ta on asetatud sümmeetriliselt pääteljega, et mitte ehitada teise otsapunkti kujutist.

Seleta alljärgneval kolmel juhul (joon. 49—51) kujutise ehitus ja iseloom (eba- või tõeline, päripidine või ümberpööratud, suurendatud või vähendatud).

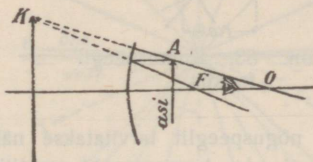


Joon. 49. Asja kujutis nõguspeeglis.

b. Katsete, ehituste või matemaatilise arutuse põhjal saame nõguspeegli jaoks järgmise liikumisreegli: liigub asi lõpmatuses tsentriini, siis



Joon. 50.



Joon. 51.

Asja kujutised nõguspeeglis.

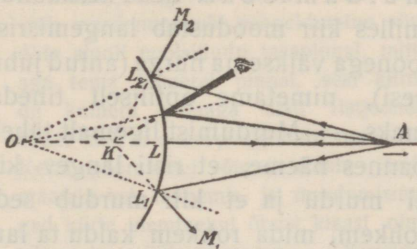
nihkub tema vähendatud ümberpööratud tõeline kujutis fookusest tsentriini, selle juures suurenedes; liigub asi tsentrist fookuseni, siis liigub tõeline ümberpööratud suurendatud kujutis tsentrist lõpmatuseni, seejuures suurenedes; liigub asi fookusest peegliini, siis liigub suurendatud päripidine ebakujutis peegli taga lõpmatuses peegliini, seejuures vähenedes.

1. Tõenda geomeetriliselt, et asja ja kujutise joonsuurused on võrdelised nende vastavate kaugustega peeglist.

2. Kui kaugele nõguspeeglist, mille $r = 60$ cm, tuleb paigutada asi, et saada tast peegli abil 4 korda suurendatud tõeline kujutis? Lahenda eelmise ülesande põhjal.

3. Selgita joonise abil, mispärast suurema sirge asja kujutis ei ole täiesti sirge ja missugune kujutise kül (kumer või nõgus) on pööratud peegli poole.

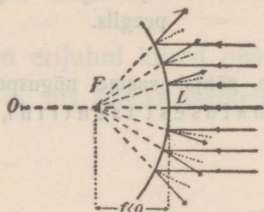
51. Kumerpeegel. Sfääriline kumerpeegel on kerapinna osa, kus peegliks on kera välispind. Katsed (opt. ketta külge kinnitatud ku-



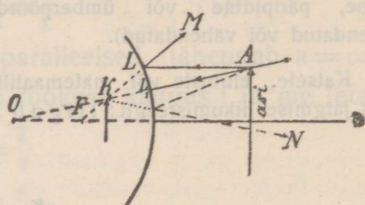
Joon. 52. Peegeldumine kumerpeeglist.

merpeegli ribaga) ja ehitused (joon. 52) näitavad, et ka siin homotsentrilised kiired jäävad pärast peegeldumist homotsentrilisteks, kuid lähevad laiali, nii et võivad tekkida **ainult ebakujutised** peegli taga.

Ka siin kaugeneb ebakujutis valgusepunkti kaugenemisel peeglist ja asub fookuses F peegli taga raadiuse keskkohas, kui langevad kiired on püteljega paralleelsed (joon. 53).



Joon. 53. Kumerpeegli fookus,



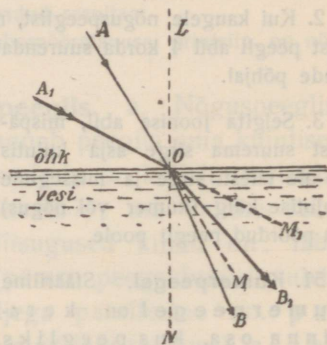
Joon. 54. Asja kujutis kumerpeeglis.

Kuna nõguspeeglit tarvitatakse näit. prožektoris ja peegelteleskoobi ehitamiseks, ei ole kumerpeegil praktilist tähtsust. Kõige suurema peegelteleskoobi peegli läbimõõt (Mount Wilsoni tähetornis) on 258 cm.

1. Seleta joon. 54. järele kujutise ehitus ja tema iseloom.

Murdumine ja täieline sisepeegeldumine

52. Valguse murdumise nähtused. a. § 43 nägime (joon. 38), et valgusekiired õhust vette minnes muudavad keskkondade lahtuspinnal oma sihi, lähenedes langemisristjoonele. Nähtust, kus valgusekiired ühest keskkonnast teise minnes muudavad oma sihi, nimetame valguse **murdumiseks**. Seda keskkonda, milles kiir moodustab langemisristjoonega väiksema nurga (antud juhul vesi), nimetame optiliselt tihedamaks. — Murdumist ligemalt tähele pannes näeme, et risti langev kiir ei murdu ja et kiir murdub seda rohkem, mida rohkem kaldu ta langeb, kuid vastavad langemis- ja murdumisnurgad ei ole võrdselised



Joon. 55. Murdumine vee ja õhu lahtuspinnal.

(joonises 55 $\angle LOA_1 = 2 LOA$, kuid $\angle NOB_1 < 2NOB$). — Me paneme ka tähele, et kiirte peegeldunud osa on seda tugevam ja murdunud osa seda nõrgem, mida rohkem kaldu kiired langevad.

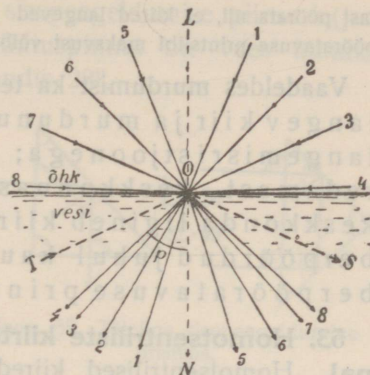
Samasuguse tulemuse saame kiire üleminekul õhust klaasi või teise tihedamasse keskkonda.

Optiline tihedus ei lange mitte alati ühte hariliku tihedusega; näiteks on piiritus harilikus mõttes hõredam, optiliselt aga tihedam kui vesi.

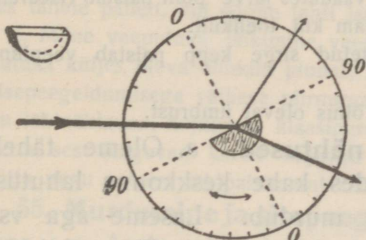
b. Katame veepinna musta paberiga, milles on väike avaus, ja laseme kiired langeda õhust vette läbi avause igas sihis. Kiired, tungides vette, valgustavad vees koonusetaolise ruumi, mida piiravad kiired 4 ja 8 (joonis 56 kujutab ainult läbilõiget). Kiir, mille langemisnurk õhus on 90° , moodustab vees koonuse piirkiire, piirkiir ristjoonega koonuse piirnurga (p). Kui vee asemel võtaksime mõne teise aine, mis murrab kiiri tugevamini, näit.

klaasi, siis oleks valgustatud koonus kitsam ja piirnurk väiksem. Näiteks on koonuse piirnurk õhu lahutuspinnal vees ümmarguselt 48° , klaasis $40^\circ - 42^\circ$, teemandis 23° .

Kui puudub kerge latern, mida võib hõlpsasti ümber asetada, et kiiri juhtida kaldu lahutuspinnale vst. joonisele 56, siis võib nähtust jälgida ka kindla kiirtekimbuga, kui lahutuspinda pöörata vastu kiirte kimpu; arusaadav, et siis vedela lahutuspinna asemel tuleb võtta kõva. Näiteks kinnitame klaaspoolsilindri opt. ketta külge ja asetame ta kitsa kiirte kimbu tee (joon. 57) nii,



Joon. 56. Murdumisnähtused vee ja õhu lahutuspinnal.



Joon. 57. Murdumisnähtuste vaatlemine poolsilindris.

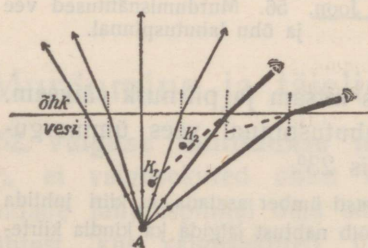
et kiired langevad tsentri sihis. Siis võib murdumine või peegeldumine sündida ainult poolsilindri tasapinnal, mitte aga tema kumeral pinnal, sest kiired on kumera pinnaga alati ristjoones. Kiirte käik ei olene poolsilindri suurusest. Ketta pööramisel võime skaala järele määrata vst. langemis- ja murdumisnurkad kiirte üleminekul õhust klaasi ning võime ka mõõta piirnurga. — Kirjeldatud katset võib teha ka vedelikuga, kui seda valada õõnes-poolsilindrisse.

c. Juhime kiired veest õhku (altpoolt läbi klaasist anuma põhja vette ja säält õhku või vette asetatud elektripirni abil) või klaasist õhku, siis paneme tähele ümberpööratud nähtuse: kiired kaugenevad ristjoonest. Kiirte käiku ühest keskkonnast teise ja ümberpöördult ligemalt vaadeldes näeme, et ka murdumisel on maksev kiirte ümberpööratavuse printsiip.

Nähtust võib hästi jälgida opt. ketta külge kinnitatud poolsilindriga, kui kestat pöörata nii, et kiired langevad kumerale pinnale tsentri sihis. Ümberpööratavuse printsiibi maksvust võib tõendada nurkade mõõtmise teel.

Vaadeldes murdumist ka teissugustel lahutuspiindadel näeme: langev kiir ja murdunud kiir on samas tasapinnas langemisristjoonega; üleminekul optiliselt hõredamast keskkonnast optiliselt tihedamasse keskkonda ligineb kiir langemisristjoonele, ümberpööratud juhul kaugeneb ta ristjoonest; ümberpööratavuse printsiip on maksev.

53. Homotsentriliste kiirte murdumine tasasel lahutuspiindal. Homotsentrilised kiired ei ole pärast murdumist tasasel lahutuspiindal enam homotsentrilised, murdunud kiirte pikendused ei lõiku ühes punktis (joon. 58).



Joon. 58. Kuidas vaatleja näeb valgusepunkti vees.

lahutuspiindal enam homotsentrilised, murdunud kiirte pikendused ei lõiku ühes punktis (joon. 58). Ainult kitsast murdunud kiirte kimpu võib lugeda ligikaudu homotsentriliseks ja sellepärast ka näeme näiteks vees olevat valgusepunkti, kuid mitte õigel kohal.

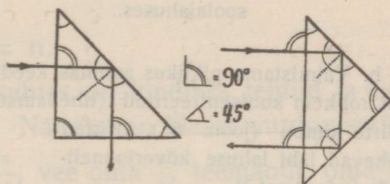
1. Kuidas tuleb sihtida püssiga, et lasta veepinna ligidal nähtava kala pihta?
2. Seleta joonise abil, mispärast kaldalt vaadates järve põhi paistab (iseäranis lapsele) tõstetuna ja selle tõttu vesi madalam kui tõelikult.
3. Seleta joon. abil, mispärast vette pistetud sirge kepp paistab veepinnal murtuna?
4. Seleta joonise abil, kuidas kala näeb õhus olevat ümbrust.

(54. Täielise sisepeegeldumise nähtused. a. Oleme tähele pannud (joon. 38), et valgus, langedes kahe keskkonna lahutuspiindale, osalt peegeldub ja osalt murdub. Laseme aga vst. joonisele 56 kiire langeda lahutuspiindale punkti O punktist T väljaspool koonust, siis ta peegeldub täielikult sama keskkonda

tagasi sihis OS ning murdumist üldse ei sünni (et antud juhul kiir keskkonnast välja ei pääse, järgneb ümberpööratavuse printsiibist). Niisugune täieline sisepeegeldumine sünnib alati siis, kui kiir tuleb optiliselt tihedamast keskkonnast ja kiire langemisnurk on suurem teatud nurgast, mida nimetame täielise sisepeegeldumise piirnurgaks. Täielise sisepeegeldumise piirnurk (joo- nises 56 koonuse piirnurk) õhu lahtuspinnal on vees ümmar- guselt 48° , klaasis $40^\circ-42^\circ$, teemandis 23° .

Täielist sisepeegeldumist võib hästi näha ja ka piirnurka mõõta opt. ketta külge kinnitatud poolsilindriga.

b. Täielistsisepeegeldumist klaasi ja õhu lahtuspinnal võib näidata täis-võrdhaarse klaas- prismaga (joon. 59), kui teda asetada kitsa kiirtekimbu teele. Seleta kiirte käik joonises 59



Joon. 59. Täieline sisepeegeldumine prismas.

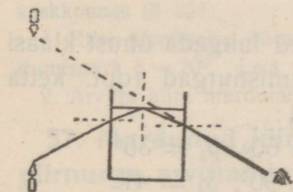
(piirnurk $< 42^\circ$). Niisugused prismad tarvitatakse mitmesuguste opt. riistade ehitamisel (prisma-binokkel, periskoop) peegli asemel.

1. Seleta joonises 60 kujutatud katses klaasi, vee ja küünlaga kiirte käiku.

2. Seleta joonise abil, kuidas kala näeks ülespoole kaldu vaadates ümbrust, kui vesi oleks täiesti läbinähtav ja veepind tasane.

3. Vala katseklaasi pisut vett, asetä ta kaldu veega täidetud teeklaasi ja seleta, mis sa ülalt vaadates tähele paned. Kuidas ja mispärast muutub nähtus, kui katseklaas täita veega?

4. Sule ümberpööratud klaaslehtri ots sõrmega, asetä lehter vette ja seleta, mis sa ülalt vaada-



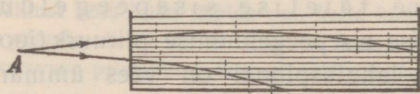
Joon. 60. Sisepeegeldumine vee ja õhu lahtuspinnal.

tes tähele paned, kui sõrme lahti lased. —

c. Mõne veeputuka läikimine vees on seletatav täielise sisepeegeldumisega putuka küljes oleva õhukihi pinnal; ka kalliskivide läikimine on seletatav tugeva sisepeegeldumisega väikese piirnurga tõttu. — Kuna terve klaas, jää või vesi on läbinähtavad, hajutavad klaasipuru, lumi või vaht valgust ja paistavad valgena, sest langevad kiired hajuvad mitmekordse murdumise ja peegeldumise tõttu nagu valgest läbipaistmatut kehast.)

55. Murdumine ja sisepeegeldumine mitteühtlases keskkonnas. a. Asetame projektsioonlaternaga valgustatud ekraani ette leegi, siis näeme ekraanil leegi ja soojendatud õhu kujutise murdumise tõttu mitteühtlastes liikuvates gaasi- ja õhukihtides. —

Tilgutame projektsioonilaterna ette asetatud anumasse veega soolalahust, siis näeme ekraanil soolalahuse põhja vajumist puhtas vees. — Murdumisega mitteühtlastes liikuvates õhukihtides seletub asjade virvendamine, kui vaadata üle tule läbi soojendatud õhu. — Ka

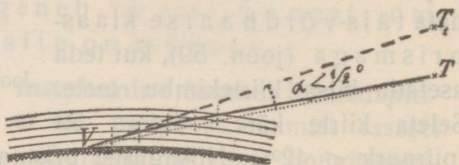


Joon. 61. Kiire käik mitteühtlases soolalahuses.

nn. fatamorgaana nähtused kõrves tekivad murdumise ja sisepeegeldumise tõttu õhus, mille üksikute kihtide temperatuurid ja tihedused tunduvalt erinevad päikese tugeva mõju tõttu.

b. Valmistame piklikus anumal keedusoola-lahuse vees, mille alumised kihid on rohkem kontsentreeritud (tihedamad), ja juhime lahuse sisse kitsa paralleelkiirte kimbu (joon. 61). Kiired lähevad läbi lahuse kõverjooneliselt (mispärast?).

c. Horisondi ligidal olevad tähed paistavad $\sim 0,5^{\circ}$ võrra kõrgemana kui tõelikult. Seleta seda astronoomiliseks refraktsiooniks nimetatud nähtust joonise 62. põhjal.



Joon. 62. Astronoomiline refraktsioon.

56. Murdumiseadused. Laseme kiired langeda õhust klaasi ja mõõdame vastavad langemis- ja murdumisnurgad (opt. ketta abil); me leiame näiteks järgmised nurgad:

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= 20^{\circ}, & \beta_1 &= 13^{\circ} & \alpha_3 &= 60^{\circ}, & \beta_3 &= 35^{\circ} \\ \alpha_2 &= 40^{\circ}, & \beta_2 &= 25^{\circ} & \alpha_4 &= 90^{\circ}, & \beta_4 &= 41^{\circ} \end{aligned}$$

Otse võib sellest ainult järeldada, et murdumisnurk ei kasva võrdeliselt langemisnurgaga. Arvutame aga nurkade sinuste suhted, siis näeme, et nad on ligikaudu võrdsed:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = 1,520, \quad \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = 1,521, \quad \frac{\sin \alpha_3}{\sin \beta_3} = 1,510, \quad \frac{\sin \alpha_4}{\sin \beta_4} = 1,501.$$

Nurkade mõõtmist täpsemalt toimetades ja vastavate nurkade sinuste suhteid arvutades leiame, et nad on võrdsed. Kiirte üleminekul õhust klaasi $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ on alati ümmarguselt $\frac{3}{2}$ ja ümberpööratud üleminekul klaasist õhku $\frac{2}{3}$. — Murdumist jälgides teiste keskkondade lahutuspinna saame samasuguse resultaadi, ainult selle vahega, et sinuste suhte arvuline suurus on teine. Me järeldame järgmised murdumiseadused:

1. Langev ja murdunud kiir on samas tasapinnas langemisristjoonega.

2. Langemis- (α) ja murdumisnurga (β) sinuste suhe on kahe antud keskkonna kohta jääv.

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

Selle seaduse teine osa on Snellius'e leitud.

Langeb kiir keskkonda õhust, siis nimetame langemis- ja murdumisnurkade sinuste suhet keskkonna **murdumisnäitajaks** õhu suhtes ja tähendame teda n -ga

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

Ainete murdumisnäitajad õhu suhtes on kindlaks tehtud ja üles märgitud sellekohastes tabelites. Näiteks on klaasi murdumisnäitaja õhu suhtes ümmarguselt $\frac{3}{2}$, vee oma $\frac{4}{3}$, teemandi oma $\frac{5}{2}$.

Kui me räägime edaspidi aine murdumisnäitajast, siis on alati mõeldud aine murdumisnäitajat õhu suhtes. Absoluutne murdumisnäitaja, s. o. aine murdumisnäitaja tühja ruumi suhtes, läheb sellest nii vähe lahku, et me tegelikult vahet ei tee.

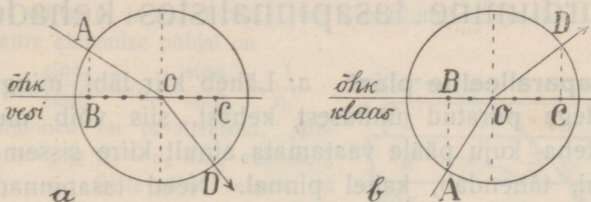
On leitud, et murdumisnäitaja võrdub valguse kiiruste suhtega mõlemas keskkonnas (§ 103).

1. Kiire üleminekul õhust teemandisse langemisnurgale $\alpha = 58^\circ$ vastab murdumisnurk $\beta = 20^\circ$. Leia teemandi murdumisnäitaja.

2. Arvuta kiire murdumisnurk β õhus, kui vastav langemisnurk vees on 40° .

57. Murdunud kiire ehitamine. Täielise sisepeegeldumise piirnurga arvutamine. a. Murdunud kiirt võib ehitada, kui on antud langemisnurk ja aine murdumisnäitaja:

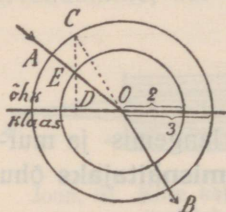
Olgu, et kiir AO langeb paberi pinnas õhust vette (joon. 63, a).



Joon. 63. Murdunud kiire ehitamine.

Tõmbame ümber langemispunkti O ringi ($r = 1$), lõikepunktist A ristjoone AB, jagame joonlõigu OB neljaks võrdseks osaks,

möödame $OC = \frac{3}{4} OB$, ehitame ristjoone CD , siis OD kujutab murdunud kiirt.



Joon. 64. Murdunud kiire ehitamine.

1. Tõenda, et kiire AOD kohta (joon. 63, a) on murdumise tingimused täidetud.

2. Seleta, mis kujutab joonis 63 b ja kuidas on joonis ehitatud.

3. Võta kiir, mis klaasist tulles langeb hästi längu õhu lahutuspinnaile, ja katsi ehitada murdunud kiirt.

4. Leia graafiliselt murdunud kiire sihid üleminekul õhust vette ja õhust klaasi, kui langemisnurk on 60° .

5. Leia graafiliselt murdunud kiire sihid üleminekul veest õhku ja klaasist õhku, kui kiire-langemisnurk on a) 30° , b) 60° .

6. Seleta joon. 64 põhjal murdunud kiire ehitus.

b.* Keskkonna täielise sisepeegeldumise piirnurka võib arvutada, kui on teada murdumisnäitaja:

Et täielise sisepeegeldumise piirnurgale α_p , kui langemisnurgale tihedamas keskkonnas, vastab õhus murdumisnurk $\beta = 90^\circ$, siis

$$\frac{\sin \alpha_p}{\sin 90^\circ} = \frac{1}{n}$$

$$\sin \alpha_p = \frac{1}{n}.$$

7. Leia täielise sisepeegeldumise piirnurk

a) vee jaoks, kui $n = \frac{4}{3}$

b) flintklaasi ja kroonklaasi jaoks, kui n on vast. 1,62 ja 1,53.

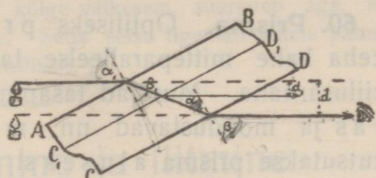
Murdumine tasapinnalistes kehad

58. Tasaparalleelne plaat. a. Läheb kiir läbi mingisugusest tasapindadega piiratud ühtlasest kehast, siis võib murdumine sündida keha kuju päale vaatamata ainult kiire sisseminekul ja väljatulekul, tähendab, kahel pinnal. Need tasapinnad võivad olla kas paralleelsed või mitteparalleelsed. Vastavalt kujutab keha osa, millest kiir läbi läheb, kas tasaparalleelse plaadi või prisma.

Ehitus joon. 65 näitab, et läbi tasaparalleelsete pindadega keha minnes kiirei muuda oma

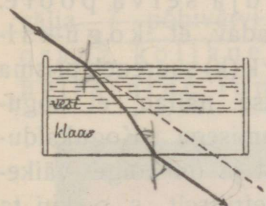
sihti, kuid nihkub kõrvale, seda rohkem, mida paksem on keha ja mida rohkem kaldu langeb kiir. Seda tõendavad ka vaatlused.

Kiirte kõrvalenihkumist tasaparalleelses plaadis võib nähtavaks teha pimedas toas suitsu abil. — Katame paberile tõmmatud sirgjoone osa paksema klaasplaadiga ja vaatame sirgjoonele kaldu, siis paistab läbi klaasi nähtav sirgjoone osa teise otse nähtava osa suhtes kõrvale nihutatuna. — Vaatame mõnele vertikaalsele sirgjoonele (aknaraami serv) ja asetame klaasplaadi kaldu silma ette nii, et näeme läbi klaasi ainult sirgjoone osa, siis paistab see osa teise osaga võrreldes kõrvale nihutatuna; pöörame plaadi rohkem kaldu vaatamissihile, siis kõrvalenihkumine suureneb. Paksemas plaadis on kõrvalenihkumine suurem.



Joon. 65. Kiire käik läbi tasaparalleelse plaadi.

1. Tõenda geomeetriliselt, et murdunud kiirel joonises 65 on sama siht kui langeval kiirel.



Joon. 66. Kiire murdumine tasaparalleelsetes plaadides.

2. Kui suur võib olla kiire maksimaalne kõrvalenihkumine antud plaadis?

3. Leia kõrvalenihkumise suurus, kui on antud plaadi paksus, kiire langemisenurk ja plaadi aine murdumisnäitaja.

b. Ka võib näidata, et kiir, minnes läbi mitme üksteise ligi asetatud tasaparalleelse keskkonna, pärast mitmekordset murdumist lõpuks edasi läheb langeva kiire sihis (joon. 66).

59. Aine suhtelise murdumisnäitaja määramine. Võib määrata analüütiliselt ühe aine murdumisnäitajat teise aine suhtes, kui on teada mõlemate ainete murdumisnäitajad sama kolmanda (õhu) suhtes.

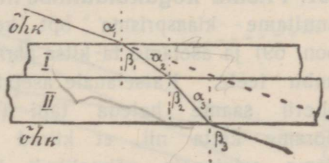
Olgu joon. 67 ainete I ja II lahutuspinna paralleelsed ja vastavad murdumisnäitajad õhu suhtes n_1 ja n_2 . Leiame aine II murdumisnäitaja aine I suhtes $n_{1,2}$. Murdunud kiire ehitamise põhjal on

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = n_1; \quad \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = n_{1,2}; \quad \frac{\sin \alpha_3}{\sin \beta_3} = \frac{1}{n_2}$$

Langemisristjooned on paralleelsed, järelikult on $\beta_1 = \alpha_2$ ja $\beta_2 = \alpha_3$ ning eelmise § põhjal ka $\beta_3 = \alpha_1$. Selle põhjal leiame, et

$$n_{1,2} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_1} = \frac{\sin \beta_1}{\sin \alpha_3} = \frac{\sin \alpha_1}{n_1} \cdot \frac{\sin \beta_3}{n_2}$$

$$n_{1,2} = \frac{n_3}{n_1}$$



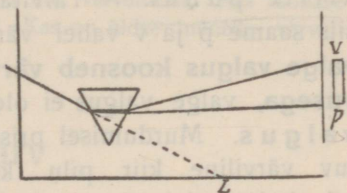
Joon. 67. Suhtelise murdumisnäitaja määramine.

langemisnurk väheneks, siis nihkub täpp kaugemale, tähendab, kogukaldumine väheneb; kuid ketast samas sihis edasi pöörates näeme, et täpp hakkab ketta alusele liginema, tähendab kogukaldumine jälle suureneb. Järelkult on teatavas kindlas seisus kogukaldumine kõige väikesem, suureneb aga, kui prisma pöörata ühele või teisele poole. Seda seisu ligemalt tähele pannes leiame, et kiir läheb läbi prisma sümmeetriliselt.)

Valguse lahutamine ja liitmine

62. Valguse dispersioon (värvideks hajumine); spekter.

Newton juhtis läbi väikese avause päikese kiired pimedasse tuppa ja asetaskiirte teele prisma (joon. 70). Kiired läksid pärast murdumist prisma laiali ja andsid ekraanil p ja v vahel värvilise paela, **spektri** (joon. 71), millest Newton valis välja 7 põhivärvi: punane, oranž, kollane, roheline, helesinine, tumesinine (indigo) ja violett.

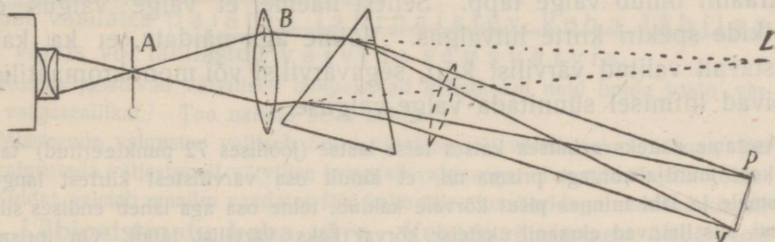


Joon. 70. Spektri tekkimine.



Joon. 71. Spekter.

Nähtuse seletamiseks korraldame katset laterna kiirtega joon. 72 järele esialgu ilma prismata; siis lääts B koondab tugevasti valgustatud pilust A väljatulevad kiired ekraanil L kohal, kus tekib



Joon. 72. Spektri tekitamine projektsioonlaterna kiirtega.

valge pilu kujutis. Asetame pilu ette värvilise klaasi, mis laseb läbi ainult teatud värvi kiired ja neelab teised, siis tekib ekraanil hoolimata kiirte värvist samal kohal värviline kujutis. Asetame aga läätse taha värviliste kiirte teele prisma, siis saame punaste kiirte puhul punase pilu kujutise p kohal, violetsete kiirte puhul violetse pilu kujutise v kohal ja teiste värviliste kiirte puhul värvilised pilu kujutised p ja v vahel. Katseist selgub, et üksikud värvilised kiired ei murdu sama tugevasti, et igal värvilisel kiirel on isesugune murduvus ehk ainel on isesugused murdumisnäitajad isesuguste värviliste kiirte puhul. — Tarvitame katses prisma ja valget valgust, siis saame p ja v vahel värvilise riba, spektri. Me järeldame: **valge valgus koosneb värvilistest kiirtest isesuguse murduvusega**, valge valgus ei ole füüsikaliselt mitte liht-, vaid **liitvalgus**. Murdumisel prisma annab iga valguses peituv värviline kiir pilu kujutise isekohal ja need värvilised pilu kujutised kokku sünnitavadki spektri.

Kui spektri kiirte kimbust eraldada ainult üht värvi kiired (näit. piluga varustatud läbipaistmatu ekraani abil) ja nende kiirte teele asetada teine prisma, siis kiired kalduvad teises prisma kõrvale, aga ei muuda oma värvi. Järelikult on üksikud spektri kiired **monokromaatilised** (ühevärvilised).

Ühes valge valguse murdumisega sünnib alati ka valguse värvideks hajumine. Seda võisime näha juba katses poolsilindriga (§ 52).

Ka vikerkaare tekkimine on seotud päikese kiirte murdumisega ja sisepeegeldumisega vihmatiljades.

63. Värvide liitmine. Täiendusvärvid. Tekitame spektri joon. 72. järele ja asetame prisma taha värviliste kiirte teele kumerläätse (joonises punkteeritud), mis koondab värvilised kiired. Ekraanil ilmub valge täpp. Sellest näeme, et valge valgus on kõikide spektri kiirte liitvalgus. Võime aga näidata, et ka kaks vastavalt valitud värvilist kiirt, segavärvilist või monokromaatilist, võivad liitmisel sünnitada valge valguse.

Asetame näiteks eelmises katses teise läätse (joonises 72 punkteeritud) taha väikese murdja nurgaga prisma nii, et ainult osa värvilistest kiirtest langeb prismale ja läbi minnes pisut kõrvale kaldub, teine osa aga läheb endises sihis edasi, siis ilmuvad ekraanil üksteise kõrval kaks värvilist täppi. On prisma murdja nurk küllalt väike ($\sim 40^\circ$), siis langevad mõlemad värvilised täpid osalt

ühte ja ühine osa on valge. Õhukest prisma ümber asetades muudame mõlemate täppide värviliste kiirte koosseisu, sellega ühtlasi muutuvad ka üksikute täppide värvid, kuid ühine osa jääb alati valgeks.

Monokromaatiliste kiirte segavärvi saame, kui tekitame prisma ligidal lühikese spektri, asetame spektri kohale läbipaistmatu ekraani kahe või mitme piluga ja koondame läbiläänud kiired läatse abil.

Kaks värvi, mis liitumisel sünnitavad valge värvi, nimetatakse **täiendusvärvideks**, näit. punane ja roheline, kollane ja tumesinine. Katsetest selgub, et igal värvil on oma täiendusvärv; arusaadav, et näit. teatava punase värvi toonile on täiendusvärviks ainult üks kindel roheline toon.

Eelpool rääkisime ainult värvilistest kiirtest, mitte värvaineist. Kas kollase ja sinise värvaine segu värv on ka valge? Kas on üldse mõnede värvainete segu värv valge?

Kehade värv

64. Läbipaistva keha värv. Iga läbipaistev keha laseb ainult osa langevast valgusest läbi, osa ta neelab.

Tekitame ekraanil spektri ja asetame kiirte teele läbipaistva värvitu keha, näiteks anuma puhta veega või paksema värvitu klaasplaadi. Spekter nõrgeneb vähe, kuid kõik värvid nõrgenevad ühteviisi. Järelikult värvitu läbipaistev keha neelab ja laseb läbi kõik värvilised kiired ühteviisi.

Asetame aga kiirte teele värvitu keha asemel värvilise, näit. punase klaasi, siis kaovad spektris kõik värvid pääle punase, (võib olla ka oranži ja osalt kollase). Rohelise klaasi asetamisel kaovad suuremad osad spektri otsadest, kollane ning helesinine nõrgenevad märksa, ainult roheline värv jääb muutumatuks. Katsetest näitavad, et värviline läbipaistev keha neelab värvilistest kiirtest ühti rohkem kui teisi (valiv neeldumisvõime); vastu valgust vaadates paistab läbipaistev keha läbilastud värvis või läbilastud värvide segavärvis.

1. Kuidas paistavad värvilised läbipaistvad kehad, kui neid hoida vastu värvilist valguseallikat? Too näiteid selle kohta.

2. Missugune valgustus valitseb õhtul värvilise või värvitu aknaga toas, kui teda valgustada väljastpoolt värvilise bengaali valgusega. Too näiteid selle kohta.

3. Kuidas paistab maailm vaadates läbi kahe täiendusvärvidega värvitud klaasi?

65. Läbipaistmatu keha värv. Kehade värvimisest õlivärviga või värvilise lakiga võime järeldada, et läbipaistmatu keha värv

oleneb pindkihist, mis alles teatud paksuse juures tunduvat mõju avaldab. See juba näitab, et läbipaistmatu keha värv ei olene välispinnast peegeldunud valgusest, vaid väliskihti teatava sügavuseni sissetunginud valgusest.

Läbipaistmatu keha värvi tekkimist seletame sellega, et valgus teatava sügavuseni väliskihti sissetungib, kusta osalt neeldub, osalt aga igas sihis tagasi heitub, hajub. Valge väliskiht neelab kõiki värve ühtviisi, nii et hajutatud valgusel on sama koosseis kui langeval valgusel; selle tõttu on ta valges valguses valge, punases punane jne. (valgel ekraanil näeme kõiki spektri värve). Näiteks punane väliskiht neelab kõiki värve päale punase (võib olla ka oranži ja osalt kollase) ja hajutab ainult punast värvi (ka oranži ja kollast); ta paistab selle tõttu valges valguses punasena (vaata spektrit punasel ja teisevärvilisel paberil). Nii siis väliskihti valiva neeldumisvõime tõttu paistab läbipaistmatu keha väliskihist hajutatud värvis või värvide segavärvis.

Nähtuse selgitamiseks teeme järgmised katsed: Asetame valge paralleelkiirte kimbu teele hästi poleeritud värvitu, värvilise või musta keha (klaasplaadi) ja juhime keha välispinnast peegeldunud kiired lakke. Me näeme lael valge täpi, vaatamata peegeldava keha värvi päale. — Muudame langeva valguse värviliseks (vaheleasetatud värvilise klaasiga), siis muutub vastavalt ka täpi värv lael ja on alati samavärviline kehale langeva valgusega. — Juhime peegeldunud kiired vaatleja silma, siis vaatleja näeb alati peegeldavale kehale langeva valguse värvi; peegeldavad kehad läigivad alati langeva valguse värvis. Katsetest selgub, et ei ole sidet keha värvi ja keha välispinnast peegeldunud valguse värvi vahel, millest järgneb, et keha värv võib oleneda ainult sissetunginud ja hajunud valgusest. (Kui me tegelikult tähele paneme, et näit. poleeritud vask läigib valges valguses punakana, siis ei olene see peegeldunud, vaid hajutatud valgusest; meie peeglid ei ole ideaalsed, nad ei peegelda kogu langevat valgust, vaid osa hajutavad igas sihis ja on selle tõttu ka igalt poolt nähtavad.)

Teame, et näit. punane läbipaistev klaas neelab kõiki värve päale punase (§ 64), ja nägime eelmistes katsetes, et punase klaasi välispinnast peegeldusid valged kiired kindlas sihis, näit. lakke, kus tekkis valge täpp. Hõõrume aga sama klaasi peeneks pulbriks, siis pulber on läbipaistmatu ja paistab valges valguses igalt poolt vaadates ühesuguse punasena; järelikult läbipaistmatu pulber hajutab igas sihis punast valgust. Nähtust võib seletada ainult nii, nagu eelpool seletasime läbipaistmatu keha värvi tekkimist (kuidas nimelt?).

1. Kuidas paistavad läbipaistvad valged ja värvilised kehad mõnes värvilises valguses? Too näiteid.

66. Värvainete segu värv. Kollase värvaine neeldumisvõimet uurides leiame, et ta neelab kõik värvid päale kollase, oranži ja roheline; samuti leiame, et

sinine värvaine neelab kõik värvid päale rohelise, sinise ja violetse. Sellepärast neelab kollase ja sinise värvaine segu kõik värvid päale rohelise, mida üksikult kumbki ei neela, ja paistab selle tõttu rohelisena.

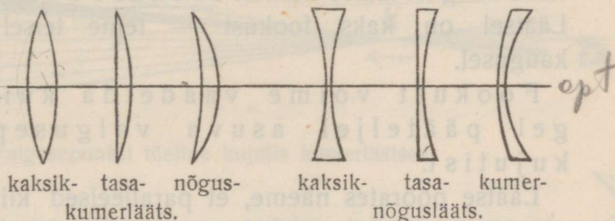
Sellest näitest selgub, et värvainete segu värvi tekkimine on seotud neeldumisega, tähendab, ta on värvide lahutamise nähtus, kuna värviliste kiirte segu värvi tekkimine on värvide liitmise nähtus.

Murdumine sfäärilistes läätsedes

67. Läätsede liigitamine. Sfäärilised läätsed on kahe kerapinnaga piiratud läbinähtavad kehad, harilikult klaasist. Joonises 73 on antud mitut liiki läätsed.

Kumerläätsed on keskelt paksemad, neid nimetatakse ka koondavateks ehk positiivseteks läätsedeks.

Nõgusläätsed on keskelt õhemad, neid kutsutakse ka hajutavateks ehk negatiivseteks läätsedeks. Kerapindade kõverustsentreid ühendav sirgjoon nimetatakse läätses optiliseks pääteljeks.

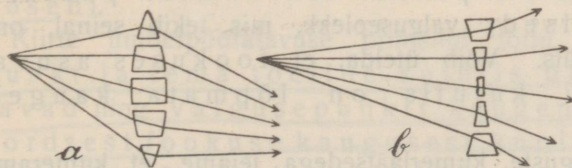


kaksik- tasa- nõgus- kaksik- tasa- kumer-
kumerlääts. nõguslääts.

Joon. 73. Läätsede liigid.

Lihtsustamise mõtte vaatlеме esialgu sümmeetrilist läätses.

Et kumerlääts koondab kiiri, see selgub, kui vaadelda läätses üksikuid osi kui prismasid (joon. 74, a).

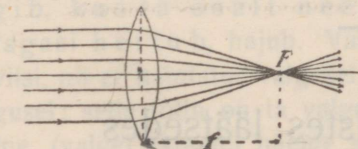


Joon. 74. Lääts kui prismade kogu.

Läbi läätses keskmise osa minev kiir ei muuda oma sihti, vaid nihkub ainult kõrvale (mispärast?), kuid kõrvalenihkumine ei ole tunduv (mispärast?); ääre poole aga suurenevad prismade nurdjad nurgad

ja selle tõttu kalduvad ääre pooled kiired rohkem päätelje poole. — Analoogiliselt seletub, et nõguslääts hajutab kiiri (joon. 74, b).

68. Kumerläätsse fookus. a. Asetame kumerläätsse päikese kiirte teele nii, et päätelg oleks kiirtega paralleelne. Siis paneme tähele (suitsu abil), et kiired pärast murdumist läätse pindadel



Joon. 75. Kumerläätsse fookus.

koonduvad koonusetaoliselt ja lõikuvad ühes punktis, kust nad edasi laiali lähevad. Me nimetame punkti, milles lõikuvad pääteljega paralleelsed kiired pärast murdumist, läätse **fookuseks (F)** ehk tulipunktiks (mispärast tulipunktiks?) ja

tema kaugust läätse keskelt fookuse kauguseks (f, joon. 75). Läätsel on kaks fookust — teine teisel pool läätse samal kaugusel.

Fookust võime vaadelda kui lõpmatu kaugel pääteljel asuva valgusepunkti tõelist kujutist.

Läätsse pöörates näeme, et paralleelsed kiired lõikuvad pärast murdumist ühes punktis ka siis, kui nad ei ole paralleelsed pääteljega; lõikepunkt asub siis fookuse kõrval samal kaugusel läätsest.

Katsetes võime tarvitada kumerläätsse fookust kui tugevat punktitaolist valguseallikat.

b. Murdumisel läätses jääb maksma kiirte ümberpööratavuse printsiip. Tõelikult, asetame valgusepunktist (laterna kiirte koonuse tipust) laialiminevate kiirte teele läätsse nii, et ta fookus langeks ühte valgusepunktiga, siis näeme, et fookusest tulevad kiired on pärast murdumist pääteljega paralleelsed; valguseplekk, mis tekib seinal, on sama suur kui lääts. Võib ütelda, et fookuses asuva valgusepunkti kujutis on lõpmata kaugel pääteljel.

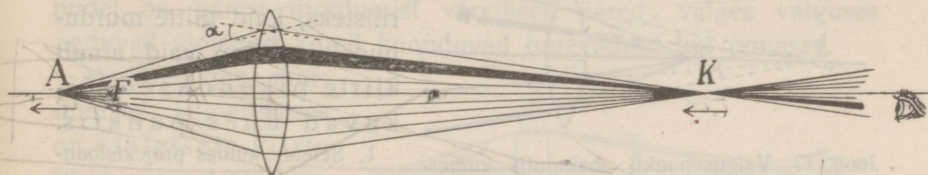
Katseist mitmesuguste kumerläätsedega leiame, et kumeram lääts koondab kiiri tugevamini ja tema fookuse kaugus on väikesem. Fookuse kaugus ei olene aga mitte ainult läätse kujust, vaid ka ainst (murdumisnäitajast). Harilikust klaasist

sümmeetrilise kumerläätsede fookuse kaugus võrdub ligikaudu tema kõverusraadiusega.

1. Kuidas võib leida katse teel läätsede fookuse kaugust?

69. Homotsentriliste kiirte murdamine kumerläätses. Valgusepunkti kujutis. a. Valgusepunkti läätsede püüdnud fookusest kaugemale viies näeme (suutsu või ekraani abil), et murdunud kiired alati koonduvad ja lõikuvad ühes punktis, kus tekib valgusepunkti tõeline kujutis. Paneme ka tähele, et valgusepunkti kaugenemisel fookusest ligineb ta tõeline kujutis.

Seda tõendab ka geomeetriline arutus: Valgusepunkti A (joon. 76) kaugenemisel vähenevad kiirte langemismurgad (α); selle tõttu vähenevad ka murdu-



Joon. 76. Valgusepunkti tõeline kujutis kumerläätses.

misnurgad. Kui nüüd kiired koonduvad tugevamini juba läätsede sees, siis nihkub lõikepunkt K läätsede ligemale.

Arusaadav, et tähendatud liikumisel mõlemad punktid A ja K kord samal kaugusel läätsedest peavad asuma. Katse näitab, et see tõelikult sünnib: on valgusepunkt kahekordses fookuse kauguses, siis asub ta kujutis teisel pool läätsede kahekordses fookuse kauguses. Nii siis, valgusepunkti kaugenemisel fookusest kuni kahekordse fookuse kauguseni (tõeline) kujutis ligineb teisel pool läätsede lõpmatuseni kuni kahekordse fookuse kauguseni.

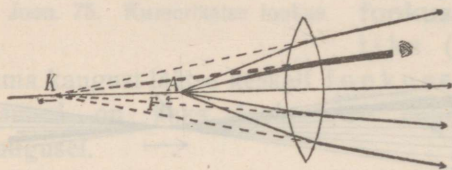
Kiirte ümberpööratavuse printsiibi tõttu on valgusepunkt ja tema tõeline kujutis ümberpaigutatavad ning valgusepunkti kaugenemisel kahekordsest fookuse kaugusest kuni lõpmatuseni ligineb (tõeline) kujutis kahekordsest fookuse kaugusest kuni fookuseni.

Asetame valgusepunkti püüdnud kõrvale (pöörame läätsede), siis näeme, et murdunud kiired lõikuvad läbi valgusepunkti ja läätsede

keskpunkti tõmmatud sirgel (abiteljel), kusjuures kujutise kaugus jääb endiseks.

Üksikute kiirte käiku võib näha hästi opt. ketta külge kinnitatud kumerläätsse ribaga, kui valgusepunktist väljaminevate kiirte teele asetada ekraan paralleelsete piludega.

b. Valgusepunkti fookusest ligemale tuues näeme, et fookuse ja läätsse vahel asuvast valgusepunktist tulev kiirte kimp läheb ka pärast murdumist laiali (joon. 77); asetame silma laialiminevate kiirte teele, siis näeme valgusepunkti kujutise, kuid see on ebakujutis.



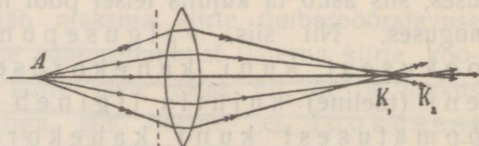
Joon. 77. Valgusepunkti ebakujutis kumerläätses.

ka sel juhul jäävad homotsentrilised kiired homotsentrilisteks, kuid mitte murdunud kiired ise, vaid ainult kiirte pikendused lõikuvad ühes punktis.

saada mitmesuguseid kiirte kimpe valguseallika ümberpaigutamise teel (joon. 28).

2. Seleta, kuidas liigub ebakujutis valgusepunkti liginemisel fookusest läätseni.
3. Kuidas muutuksid murdumisnähtused, kui valgusepunkt ja lääts oleksid vees?

70*. Sfääriline aberratsioon kumerläätses. Äär ja tsentraalkiirte murdumist (katses opt. kettaga) ligemalt tähele pannes näeme, et sfäärilisel kumerläätsel on äärkiirte lõikepunkt ligemal kui tsentraalkiirte lõikepunkt (joon. 78). Nimetame selle nähtuse **sfääriliseks aberratsiooniks**.



Joon. 78. Sfääriline aberratsioon.

Nähtust seletame sellega, et läätsse ääre poolsed osad kui prismad suurema murdja nurgaga koondavad kiiri rohkem kui läätsse keskmised osad.

Sfäärilise aberratsiooni tõttu ei ole valgusepunkti kujutis mitte punkt, vaid enam-vähem suurem täpp. Sfäärilise aberratsiooni mõju võib kõrvaldada difragnaga (ekraan avausega), mis ei lase äärkiiri läbi, kuid kujutis muutub selle tõttu nõrgemaks.

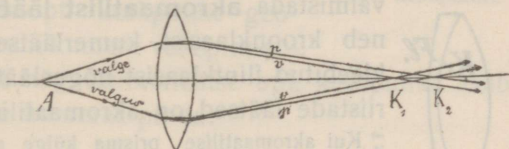
1. Missuguste läätsede juures on sfääriline aberratsioon iseäranis tunduv?

2. Olgu hästi kumera läätsse ääred kaetud musta paberiga, milles on ümmargune avaus tsentraalkiirte jaoks, ja olgu ekraan asetatud valgusepunkti kujutise kohale. Kuhu poole peame nihutama ekraani, et saada sama valgusepunkti kujutise, kui katame läätsse äärte asemel kinni keskmise osa väikese musta paberist kettaga?)

(71*. **Kromaatileine aberratsioon kumerläätses.** Hästi kumera läätsse abil saadud valgusepunkti kujutist ligemalt vaadates näeme, et kujutise ääred on värvilised. Nihutame ekraani pisut ligemale, siis on ääred punased, nihutame ta kaugemale, siis muutuvad ääred violetiks.

Vaatame ligemalt valgete kiirte murdumist kumerläätses (optilise ketta abil), siis näeme, et nimelt äärepoolsete kiirte kimpudel on pärast murdumist värvilised ääred; valges valguses peituvad violetsed kiired koonduvad tugevamini kui punased.

Me järeldame: murdumisel kumerläätses on violetsete kiirte lõikepunkt läätsesele ligemal kui punaste (joon. 79).



Joon. 79 Kromaatileine aberratsioon.

Üldse ei koondu isevärvkiired pärast murdumist kumerläätses täpselt ühes punktis. Nimetame selle nähtuse **kromaatiliseks aberratsiooniks**.

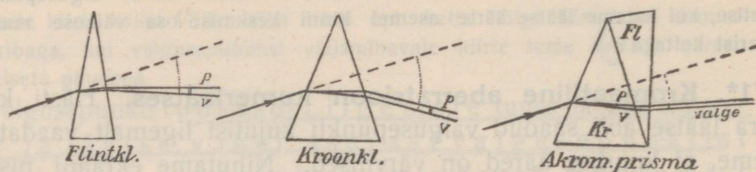
Kromaatileine aberratsioon takistas kauemat aega häädte optiliste riistade, iseäranis mikroskoopide valmistamist; alles ~ a. 1750 läks korda kõrvaldada kromaatilist aberratsiooni mitme läätsse kombinatsiooni teel (akromaatileine lääts, § 72).

Päälle eelpoolnimetatud aberratsioonide on läätsedel veel mõned „vead“; vigu võib kõrvaldada mitme läätsse kombinatsiooni teel (keerulised objektivid, näit. päevapildi-aparaatidel).

1. Missuguste läätsede juures on kromaatileine aberratsioon iseäranis tunduv?)

(72*. **Akromaatileine prisma ja lääts.** Võtame ühe prisma flintklaasist ja teise kroonklaasist kaks korda suurema murdja nurgaga, siis annavad mõlemad ekraanil samal kaugusel ühepekused spektrid, tähendab, prismade dispersioonid on samatugevused (flintklaasi dispersioon on suurem). Kroonklaasist prismaga saadud spekter on aga langevate valgete kiirte sihiga võrreldes ligi kaks korda rohkem kõrvale kallutatud kui flintklaasist prismaga saadud spekter, tähendab, kroonklaasist prisma juures on

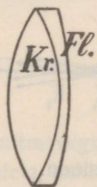
kiirte kogukaldumine suurem (joon. 80; mõlemate ainete kesk-
mised murdumisnäitajad on ligikaudu samad).



Joon. 80. Akromaatiline prisma.

Kui kaks niisugust prisma vastupidi kokku panna, siis sünnitavad nad nn. **akromaatilise prisma**, milles dispersioon on hävitatud, kuna kiirte kõrvalekaldumine on jäänud. Niisugusest prismast läbi minnes muudab kiir oma sihi ilma värvilisteks kiirteks laotumiseta.

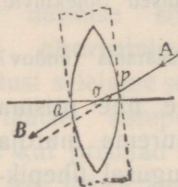
Akromaatilise prisma ehituse printsiibil on võimalik valmistada **akromaatilist lääts** (joon. 81), mis koosneb kroonklaasist kumerläätsel ja sellega kokku kleebitud flintklaasist nõgusläätsel. Paremate optiliste riistade läätsed on akromaatilised.



Joon. 81. Akromaatilise lääts.

Kui akromaatilise prisma külge asetada veel kolmas prisma, siis tekib uuesti dispersioon, samuti muutub ka kiirte keskmine siht. Kui kolmanda prisma murdja nurk valida nii, et uuesti värvideks lahutatud kiirte kimbu keskmine siht langeks ühte langevate kiirte sihiga, siis saame nn. **otsevaate prisma** (prisma à vision directe), mis lahutab langevad kiired värvilisteks ilma keskmise sihi muutmiseta.)

73. Kumerläätsel optiline keskpunkt, abitelg, pääkiir ja tsentraalkiir. Näitame geomeetriselt, et igal kumerläätsel on **optiline keskpunkt**, s. o. niisugune punkt, millest kiired lähevad läbi ilma sihi muutmiseta.



Joon. 82. Sümmetrilise kumerläätsel opt. keskpunkt.

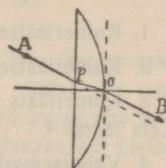
Joonisest 82 näeme, et läbi sümmeetrilise kumerläätsel geomeetriselise keskpunkti O minev kiir lõikab läätsel pinda punktides P ja Q, kus läätsel tömmatud puutumispinnad on paralleelsed. Kiir APOQB läheb läbi läätsel ilma sihi muutmiseta nagu läbi tasaparalleelse plaadi. Järelikult langeb sümmeetrilise kumerläätsel optiline keskpunkt ühte tema geomeetriselise keskpunktiga.

Läbi läätse opt. keskpunkti minevat sirget nimetame läätse **abiteljeks**, läbi opt. keskpunkti minevat kiirt **pääkiireks** ja läätse opt. keskpunkti ligidal läbiminevaid kiiri **tsentraalkiirteks**.

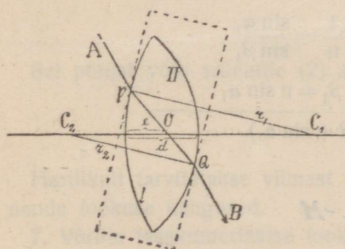
Harilikult on läätsed õhukesed ja nendele langevad kiired pea-aegu risti läätse esipinnaga. Selle tõttu ei ole pääkiire kõrvale- nihkumine läätsest läbimisekul tegelikult tunduv ja edaspidi me ei arvesta seda kõrvalenihkumist.

b*. Tasakumerläätse opt. keskpunkt asub ka pääteljel, nimelt läätse kumeral välispinnal (joon. 83; mispärast?).

Eelmisest võime järeldada, et mittesümmeetrilise kaksikkumerläätse opt. keskpunkt asub ka pääteljel läätse sees tema kumerama pinna läheduses, sest sümmeetrilise kumerläätse muutumisel tasakumerläätseks nihkub opt. keskpunkt geometrilisest keskpunktist kuni kumera välispinnani. Samuti võib järeldada, et nõguskumerläätse opt. keskpunkt asub pääteljel väljaspool läätse kumerat pinda.



Joon. 83. Tasakumerläätse opt. keskpunkt.



Joon. 84. Kumerläätse opt. keskpunkt.

c. Kumerläätse opt. keskpunkti võib kindlaks määrata analüütiliselt. Joonises 84 on P ja Q kahe paralleelse tasapinna puutumispunktid. Sirge PQ lõikab siis päätelje opt. keskpunktis O. Kolmnurkade sarnasuse põhjal on

$$C_1P : C_1O = C_2Q : C_2O$$

$$r_1 : (r_1 - e) = r_2 : [r_2 - (d - e)]$$

$$r_1 [r_2 - (d - e)] = r_2 (r_1 - e)$$

$$r_1 r_2 - r_1 d + r_1 e = r_1 r_2 - r_2 e$$

$$e(r_1 + r_2) = r_1 d$$

$$e = \frac{r_1 d}{r_1 + r_2} = \frac{d}{1 + \frac{r_2}{r_1}}$$

1. Määra viimase valemi põhjal optilise keskpunkti asukoht üksikuis kumerläätse tüüpides ($r_1 = r_2$, $r_2 < r_1 < \infty$, $r_1 = \infty$, r_1 negatiivne ja tema absol. suurus $> r_2$).

74. Läätse valem. a. Sfääriliste läätsede kohta on maksev valem

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

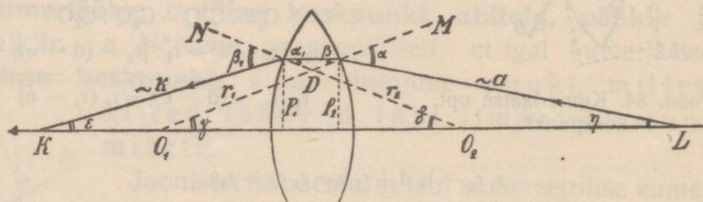
kus a ja k on valgusepunkti (asja) ja tema kujutise kaugused läätest ning f läätsede fookuse kaugus. Valem seob kolme suurust; valemil abil võime alati leida ühe suuruse, kui on teada ülejäänud kaks.

1. Kumerlääts $f = 15$ cm, $a = 60$ cm. Leia k .
2. Kumerlääts $f = 20$ cm, $k = 30$ cm. Leia a .
3. Kumerlääts annab 3 m kaugusel oleva valgusepunkti kujutise 60 cm kaugusel. Leia lääts f .
4. Valgusepunkt on lõpmata kaugel. Leia kujutise kaugus.
5. Valgusepunkt asub kahekordses fookuse kauguses. Leia kujutise kaugus.
6. Kas kiirte ümberpööratavuse printsiipi võib järeldada läätsede valemist?

b. Tuletame kumerläätsede valemil. Valemil tuletamisel vaatleme ainult tsentraalkiiri; sel juhul on nurgad α , β jne. väikesed ja sellepärast võib lugeda $\alpha = \sin \alpha$, $\beta = \sin \beta$ jne.

Murdumisnäitaja definitsiooni põhjal saame (joon. 85)

$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{1}{n} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1}$
$\sin \alpha = n \sin \beta$	$\sin \beta_1 = n \sin \alpha_1$
$\sin \alpha + \sin \beta_1 = n (\sin \beta + \sin \alpha_1).$	



Joon. 85.

Et aga nurgad on väikesed, siis $\alpha + \beta_1 = n(\beta + \alpha_1)$. Arvesse võttes, et

$$\alpha = \gamma + \eta; \beta_1 = \epsilon + \delta; \beta + \alpha_1 = \angle MDO_2 = \gamma + \delta,$$

saame

$$\gamma + \eta + \epsilon + \delta = n(\gamma + \delta)$$

$$\eta + \epsilon = (n - 1)(\gamma + \delta).$$

Et nurgad on väikesed, siis võib selle asemel kirjutada

$$\sin \gamma + \sin \varepsilon = (n - 1) (\sin \gamma + \sin \delta)$$

ehk

$$\frac{p_2}{a} + \frac{p_1}{k} = (n - 1) \left(\frac{p_2}{r_1} + \frac{p_1}{r_2} \right).$$

Et lääts on võrdlemisi õhuke, siis $p_1 = p_2$. Jagades võrduse mõlemaid pooli p_1 -ga, saame

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

See lääts valem seob viis suurust; tema abil leida võime ühe, kui on teada ülejäänud neli. Ta on maksev kõikide läätsede kohta. On lääts üks pind tasapind ($r = \infty$), siis kaob valemis üks murd. On lääts pind nõgus, siis tuleb võtta tema raadius negatiivse märgiga (raadius loetakse positiivseks, kui vastava kerapinna tšenter asub teisel pool läätsel, ja negatiivseks, kui ta asub samal pool läätsel).

Kui a ligineb lõpmatusale, siis k ligineb f-le, tähendab, kui asetame valemisse $a = \infty$, siis leiame fookuse kauguse

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

Sel põhjal võib valemile (2) anda lihtsama kuju:

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

Häriilikult tarvitatakse viimast valemit (1), sest läätsedel on üles märgitud nende fookuse kaugused.

7. Võrdle tasakumerläätsel fookuse kaugust sama kumerusega sümmeetrilise kaksikkumerläätsel omaga.

8. Leia sümmeetrilise kaksikkumerläätsel fookuse kaugus, kui $r = 25$ cm ja $n = \frac{3}{2}$.

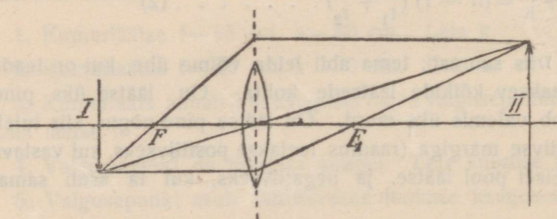
9. Leia valemi põhjal, kas mittersümmeetrilisel läätsel asuvad fookused samal kaugusel läätsel.

75. Asja kujutis kumerläätses. Et kumerlääts peab andma asja kujutise, jäeldame sellest, et asja iga punkt annab läätses kujutise.

a. Asetame pimedas toas väljaspool kumerläätsel fookust heleva asja (küünla), siis saame teiselpool läätsel ekraanil asja (leegi) tõelise kujutise. Ümber paigutades asja ja vastavalt ka ekraani nii, et kujutis oleks ikka selge, võime jälgida

kujutise kauguse ja suuruse olenevust asja kaugusest. — Asetame asja fookusest ligemale, siis me ei saa tõelist kujutist, kuid saame asja eba kujutise samal pool läätse, mida võime näha ilma ekraanita.

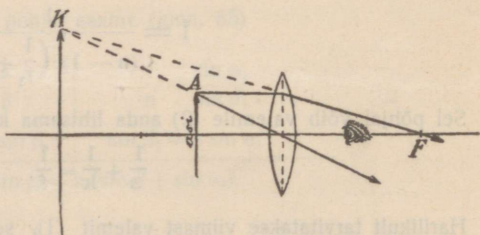
b. Asja kujutise ehitamisel tuleb ehitada asja üksikute punktide kujutised. Punkti kujutise ehitamiseks on küllalt tarvitada ainult kaht kiirt (mispärast?). Me valime seks kiired, mille



Joon. 86. Asja tõeline kujutis kumerläätses.

käik on meil teada. Niisugused kiired on **pääkiir** (läheb läbi läätse opt. keskpunkti otse edasi), pääteljega paralleelne nn. **paralleelkiir** (läheb pärast murdumist

läbi fookuse) ja läbi fookuse minev kiir (on pärast murdumist paralleelne pääteljega). Paralleelkiirt murrame lihtsustamise mõttes ilma tunduva veata ainult üks kord läbi opt. keskpunkti mineval läbilõikel (või tema pikendusel, kui asi on läätsest suurem).



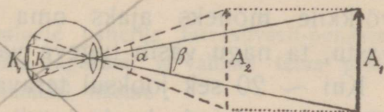
Joon. 87. Asja ebakujutis kumerläätses.

Seleta joon. 86 ja 87 näidatud asja kujutise ehitus ja iseloom (eba- või tõeline, päripidine või ümberpööratud, suurendatud või vähendatud).

c. Katsete ja ehituste (kui ka valemi analüüsi) tulemusi kokku võttes saame nn. liikumisreegli: liigub asi lõpmatuselt kahekordse fookuse kauguseni, siis nihkub tema vähendatud tõeline ümberpööratud kujutis fookusest kahekordse fookuse kauguseni, seejuures suurenedes; liigub asi kahekordsest fookuse kaugusest fookuseni, siis liigub tõeline ümberpööratud suurendatud kujutis kahekordsest fookuse kaugusest lõpmatuseni, seejuures suurenedes; liigub asi

Prillide optilist tugevust (koondamis- või hajutamisevõimet) määratakse dioptrites. On prilli fookuse kaugus f meetrit, siis on dioptrite arv $D = \frac{1}{f}$.

84. Asja vaatenurk. Kujutise suurus võrkkilel oleneb silmarterast asja äärpunktidesse tõmmatud sirgete vahelisest nurgast, nn. asja **vaatenurgast**. Mida lähemal on asi, seda suurem on vaatenurk ja, tähendab, ka kujutis (joonises $100 \alpha > \beta$).



Joon. 100. Vaatenurk.

Kaht asja punkti näeme ainult siis lahus, kui nende ühendusjoone vaatenurk on suurem kui $1'$, sest vastasel korral langevad nendest tulevad kiired kollasel täpil ühe ainsa ergu otsale. Näiteks ei või meie nägemisorgan eraldada 1 m kaugusel kaht punkti, mille kaugus teineteisest on väikesem kui 0,3 mm.

1. Mispärast näeme asja peenusi seda paremini, mida ligemal on asi?
2. Mispärast on peenuste nägemine piiratud?

85. Nähtused füsioloogilisest optikast. Asja kujutise tekkimine võrkkilel on füüsikaline nähtus. Valguse aistingu tekkimine ning kujutiste tõlgitsemine on füsioloogilised nähtused, mis ei ole veel täielikult selgitatud. Arvatavasti mõjub valgus keemiliselt võrkkiles olevasse nägemispurpurisse (vedel värvaine) ja see sünnitab nägemisergu kiudude ärrituse.

a. Positiivsed järelpildid. Kui silma ärritus tekib valguse keemilise mõju tagajärjel nägemispurpurisse, siis peaks ta pärast valguse kustumist veel edasi kestma, kuni nägemispurpur ainevahetuse teel uuendub. Pärast valguse kustumist peaks silmas veel püsima vaadeldud asja nn. **positiivne järelpilt**. Harilikult me seda tähele ei pane, mis on seletatav järelpildi lühikese vältusega ($\sim \frac{1}{20}$ sek).

Positiivsete järelpiltidega on seletatav liikuva pildi mulje kiinos, kus kiiresti ilmuvad ekraanil üksteise järele liikuva asja pildid (~ 30 sekundis), mis üksteisest väga vähe lahku lähevad. Eelmise pildi kujutise järelpildi katab silmas järgneva pildi kujutis ja tekib mõlema pildi segamulje; pärast eelmise pildi järelpildi kadumist jääb püsima ainult järgneva pildi kujutis jne.

1. Millega seletada, et me läbi pöörleva kodaratega ratta võime raamatut lugeda, samuti ka läbi hargis sõrmedega kiiresti edasi-tagasi liikuva käe.

2. Seleta kiiresti tiirutatud hõõguva sõe kuju, langeva tähe kuju.

b*. Negatiivsed järelpildid. Silma langevat valguse hulka reguleerib silm ise, muutes värvkile avause suurust. Kui aga intensiivne valgus mõjub võrkkilesele pikemat aega, siis kaotab võrkkile mõneks ajaks oma tundlikkuse nõrgemate ärrituste vastu, ta nagu väsib tugeva valguse mõjul.

Kui ~ 20 sek jooksul teravalt vahtida ~ 6—10 m kauguselt hästi valgustatud aknale ja siis vaadata nõrgalt valgustatud lakke või lubjatud seinale, siis näeme sääl tumedate ruutudega ja heledate raamidega akent, nn. negatiivset järelpilti.

3. Seleta niisuguse negatiivse järelpildi tekkimist.

4. Mis paned tähele, kui hästi valgustatud või pimedast ruumist tuled sama nõrgalt valgustatud ruumi?

5. Vahi õhtul lambi leegile ja siis peeglisse. Mis paned tähele silmatera suhtes?

c*. Irradiatsioon. Nähtust, et valged asjad paistavad suuremad kui samasuured tumedad, nimetatakse **irradiatsiooniks**. Irradiatsiooni paneme igapäevases elus tähele näit. valge ja musta kinda, suka, vesti ja teiste riiete juures. Heledasti valgustatud kuu sirp paistab suurema ringi osana kui ülejäänud nõrgalt valgustatud kuu pind. Sama elektri hõõglambi niit paistab hõõgumisel jämedamana kui külmas olekus.

Irradiatsiooninähtus seletatakse sellega, et silm mitte alati ei ole täpselt kohandatud, mille tõttu iga valgusepunkt tekitab võrkkilele suurema ulatusega pleki, mis on iseäranis tunduv intensiivse valgustuse juures.

6. Lõika mustast ja valgest paberist kaks ühelaiust riba, ~ 3 mm laiad, ja kleebi nad hallile paberile nii, et üks riba moodustaks teise pikenduse. Vaata ribade pääle (mitte teravalt). Kuidas paistavad ribade laiused?

d. Värvide nägemine. Värvipimedus. Young-Helmholtz'i värvide nägemise teooria järele on võrkkile pulgakesed üldiselt valgusetundlikud, kolvikesed peale selle ka värvitundlikud. Et värvipimedas silm ei ole küllalt tundlik kas punase, roheline või tumesinise värvi vastu, siis ollakse arvamusel, et kolvikesed võrkkilele on kolme liiki: ühed on tundlikud peamiselt punase, teised roheline ja kolmandad tumesinise värvi vastu. Segavärv ärritab neid teatavas proportsioonis ja vaatleja näeb sellele proportsioonile vastavat segavärvi.

On aga värvipimedal näit. punasetundlikud kolvikesed nõrgad, siis näeb ta maailma nii kui normaalne silm läbi helerohelise prilli, mis osalt neelab punaseid kiiri.

Sellel vaatel põhjeneb värviliste piltide trükkimine kolme värvilise kliše abil.

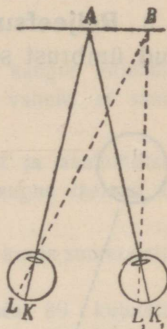
Värviline valgus tekitab ka valge mulje, kui ta on väga intensiivne.

e. **Värvilised järelpildid.** Paneme valgele paberile intensiivselt-punastest paberist väljalõigatud risti, valgustame teda tugevasti ja vahime tema päale teravalt ~ 20 sek jooksul. Risti eemaldamisel näeme valgel paberil rohelise risti. Me seletame selle täiendusvärvilise järelpildi mulje tekkimist punasetundlikude kolvikeste väsimusega.

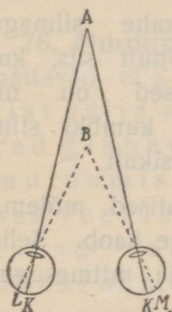
7. Missugused järelpildid tekivad valgel paberil kollase või rohelise asja vaatlemise järel?

f. **Kontrastvärvid.** Paneme intensiivselt-punasele paberile mingisuguse väikesema valge paberi tüki: ta paistab rohekana. Me seletame selle nn. kontrastvärvide üldise silma väsimusega punase värvide vastu.

g*. **Nägemine kahe silmaga.** Kahe silmaga vaatlemisel juhime silma teljed nii, et vaadeldava punkti (A joonises 101) kujutised langeksid mõlemas silmas kollasele täpile (K_1 ja K); need teljed lõikuvad siis vaadeldavas punktis. Selle juures näeme ühekordselt ka samal kaugusel kõrvalolevaid punkte (näit. B).



Joon. 101. Kahe silmaga ühekordselt nägemine.



Joon. 102. Kahe silmaga kahekordselt nägemine.

Ühekordselt nägemist kahe silmaga seletame sellega, et mõlema silma võrkkiel on üksteisele vastavad erguotsad (näit. K_1 ja K, L_1 ja L), mille kiud ühinevad pääajus; vastavad erguotsad on samalpool kollast täppi. Samal kaugusel olevate punktide kujutised langevad vaatlemisel vastavate erguotsade päale ja selle tõttu näeme neid ühekordselt. Surume aga ühe silmamuna sõrmega pisut kõrvale, siis näeme ümbrust kahekordselt (mispärast?).

Kui me kahest punktist, mis ei asu samal kaugusel (A ja B joonises 102), fikseerime ühe

(näit. A), siis näeme teda ühekordselt, teist (B) aga kahekordselt (mispärast?).

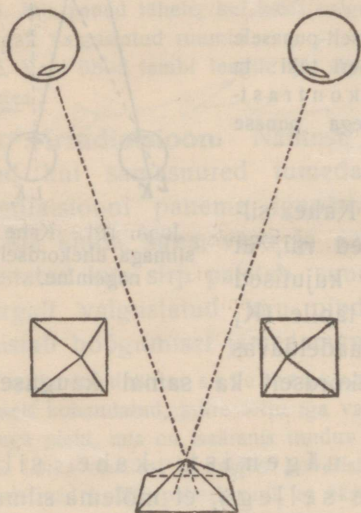
Niisugune kahekordselt nägemine kaob, kui punktide kaugus üksteisest võrreldes vaatleja kaugusega on väike. Harilikult kahekordset nägemist me tähele ei pane, sest me juhime oma tähelepanu ainult fikseeritud punktile.

Ruumi sügavuse tunne tekib peamiselt selle tõttu, et vaadeldavast asjast kaugemate või lähemate asjade kujutised on segased.

8. Seleta, mis sa tähele paned, kui holad ühe sõrme ~ 20 cm kaugusel silmast, teise aga samas sihis võimalikult kaugel ja fikseerid esimest või teist sõrme.

h. Reljeefsusetunde tekkimine. Lapsest saadik oleme õppinud ümbrust seletama reljeefselt, sellepääle vaatamata, et asjade kujutised tekivad pinnal (võrk-kilel). Reljeefsuse või ruumisügavuse tunde tekkimiseks aitab iseäranis kaasa nägemine kahe silmaga.

Kuna pildi vaatlemisel kahe silmaga on kujutised mõlema silma võrkkilil täiesti ühesugused, on nad isesugused reljeefse asja vaatlemisel (joon. 103 selgitab seda püramiidi kohta). Et me oleme harjunud saama mõlemal võrkkilil isesugused kujutised ainult reljeefse asja vaatlemisel kahe silmaga, siis tekib ilmne reljeefsusetunne kahe silmaga vaatlemisel, ja ainult siis, kui mõlemad kujutised on nii isesugused, nagu kumbki silm näeb seda asja üksikult.



Joon. 103. Asja nägemine reljeefselt kahe silmaga.

On asi kaugemal kui ~ 250 m, siis on kujutised mõlema silma võrkkilil täiesti ühesugused ja reljeefsusetunne kaob. Selle tõttu paistab maastik kaugelt vaadates joonisena ja mitmesugusel kaugusel olevad taevakehad samakaugel.

9. Mispärast, vaadates pilti ühe silmaga, on kergem kujutleda teda reljeefselt kui vaadates kahe silmaga?

fookusest läätсени, siis liigub suurendatud päripidine ebakujutis samal pool läätse lõpmatuses läätсени, seejuures vähenedes.

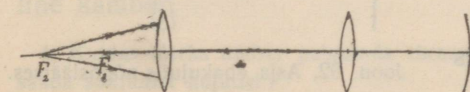
1. Tuleta kujutise ehituse põhjal (joon. 88) kumerläätsse valem $\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}$.

2. Tõenda geomeetriselt (sarnaste kolmnurkade abil), et asja ja kujutise joon-suurused on võrdelised nende vastavate kaugustega läätse opt. keskpunktist.

3. Kumerläätsse $f = 15$ cm, asja suurus on 10 cm, asja kaugus ekraanist 4 m. Kui kaugele asjast tarvis asetada lääts asja ja ekraani vahele, et saada ekraanil terav kujutis, ja kui suur on kujutis?

4. Kumerläätsse fookuse kaugus on 5 cm. Leia graafiliselt ja analüütiliselt 4 mm kõrguse asja kujutise asukoht ja suurus, kui asja kaugus läätsest on 3 cm. Võrdle saadud resultaate.

5. Kumerlääts annab tast 20 cm kaugusel seisvast asjast 4 korda suurendatud tõelise kujutise. Leia fookuse kaugus.

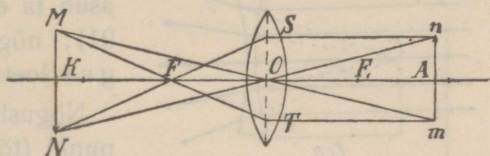


Joon. 89.

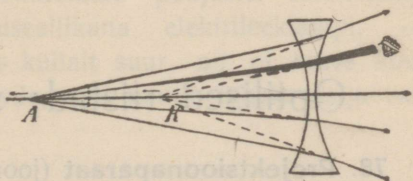
6. Joonises 89 kujutatud läätsede ja peegli fookuse kaugused on võrdsed; fookused ja kahekordsed fookuse kaugused on märgitud punktidega.

a. Ehitu punktist F_2 välja mineva kahe sümmeetrilise kiire käik läbi optilise süsteemi edasi-tagasi, tähistades kiirte sihid nooltega.

76. Murdumine nõgusläätses. Katsed ja ehitused (joon. 90) näitavad, et samast punktist välja minevad kiired lähenevad pärast murdumist nõgusläätses veellaiali ja paistavad välja tulevat ühest samalteljel samal pool läätse asuvast punktist, kus vaatleja näeb valgusepunkti ebakujutise.

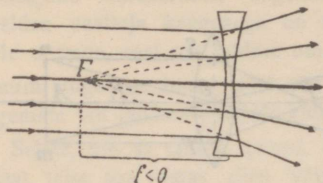


Joon. 88.



Joon. 90. Murdumine nõgusläätses.

Seleta joonise abil ebakujutise kaugenemist valgusepunkti kaugenemisel (langemismurkade muutumise põhjal).



Joon. 91. Nõgusläätsede fookus.

On valgusepunkt lõpmatutes, siis asub ta ebakujutis **fookuses** (joon. 91); nõgusläätsede fookuse kaugus loetakse negatiivseks.

Nõgusläätsel on optiline keskpunkt (tõenda seda graafiliselt).

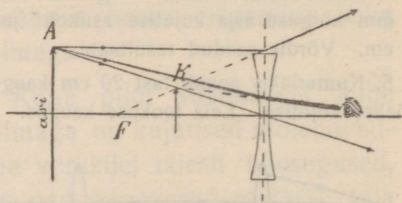
Nõgusläätsede fookuse kauguse määramine harilikult kumerläätsede abil. Seks võtame kumerläätsede, mis kompenseerib nõgusläätsede

hajumise (mõjuvad kokku kui tasaparalleelne plaat); siis on läätsede fookuskaugused arvuliselt võrdsed.

77. Kujutise ehitamine nõgusläätses. Valgusepunkti kujutise ehitamisel nõgusläätses tarvitame harilikult paralleel- ja pääkiirt nagu kumerläätses juures.

Seleta asja kujutise ehitus ja iseloom joon. 92.

1. Võrdle kumerläätsede nõguspeegli ja nõgusläätsede kumerpeegli. Missugused suurused vastavad teineteisele?
2. Tuleta asja kujutise ehituse põhjal nõgusläätsede valem (vaata § 75 nr. 1)?

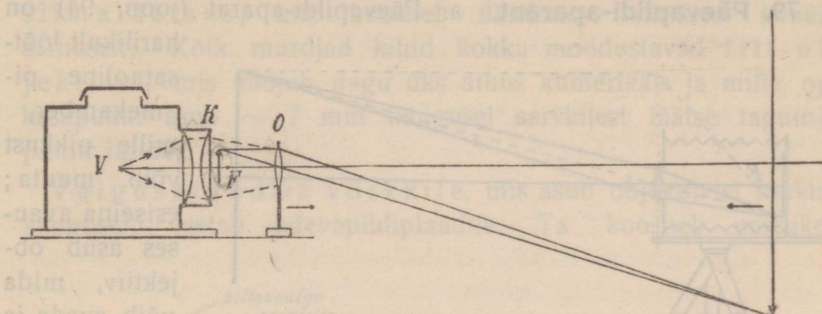


Joon. 92. Asja ebakujutis nõgusläätses.

Optilised riistad; silm ja nägemine

78. Projektsioonaparatuur (joon. 93). a. Läbipaistmatute seintega laternasse asetatud valguseallikast langevad laialiminevad kiired **kondensaatorile** (koosneb harilikult kahest tasakumerast läätsesest), koonduvad ja langevad edasi kumerläätsesle, nn. **objektiivile**. Teel nad valgustavad kondensaatori ja objektiivi vahele

asetatud keha või diaposiitivi (klaasile tehtud pilti). Pimedas toas ilmub ekraanil diaposiitivi tõeline ümberpööratud suurendatud kujutis, kui objektiivi või ekraani kaugus on selle-



Joon. 93. Projektsioonaparaat.

kohaselt reguleeritud. Hajutatud valguse kõrvaldamiseks asetatakse mõnikord veel objektiivi ja kondensaatori vahele lõõtsataoline kamber.

1. Kuidas tuleks ümber paigutada ekraan ja objektiiv, et sama objektiiviga saada suuremat kujutist?

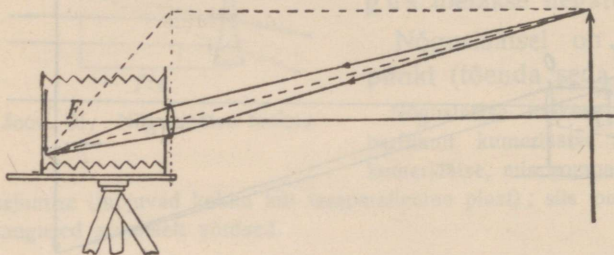
2. Missuguse objektiiviga võiks saada suuremat kujutist, kui ekraani kaugus laternast on jääv?

b. On näiteks kujutise joonsuurendus 30-kordne, siis on kujutise pindsuurendus 900-kordne ja kujutise valgustus 900 korda nõrgem diaposiitivi omast. Sellest selgub tugeva valguse allika tarvidus. Teisest küljest on soovitatav võimalikult punktitaoline valguseallikas. Nimetatud põhjustel tarvitatakse paremates aparaatides valguseallikana elektrileeklampi. — Tähtis on ka, et objektiiv oleks küllalt suur, nii et kiirte koonus langeks täielikult objektiivile, sest muidu läheks palju valgust kaduma.

c. Projektsioonmikroskoobil asetatakse väike preparaati kondensaatoriga koondatud kiirte koonuse tippu ja tarvitatakse lühikese fookusekaugusega objektiivi. Et aga ühes valgusega koondatud soojus ei rikuks preparaati ja objektiivi, asetatakse kiirte teele tasaparalleelne klaasanum külma veega, mis neelab soojust.

3. Ekraan on diapositiivist 4 m kaugel. Missuguse fookuse kaugusega objektiivi läheb tarvis ja kuhu kohta tuleb ta paigutada, et saada diapositiivist ekraanil 25 korda suurendatud kujutist? Mitu korda vähemalt on diapositiivi valgustuse tugevus kujutise omast suurem?)

79. Päevapildi-aparaat. a. Päevapildi-aparaat (joon. 94) on



Joon. 94. Päevapildi-aparaat.

harilikult lõõtsaoline pimekamber, mille pikkust võib muuta; esiseina avausasub objektiiv, mida võib avada ja sulgeda; tagaseinale võib

kinnitada mattklaasist ekraani või kasseti päevapildiplaadiga. Et asja kaugus objektiivi fookuse kaugusega võrreldes on harilikult suur, siis tekib kambris fookuse taga, kuid tema ligidal, vähendatud ümberpööratud tõeline kujutis, mida võib näha kohandatud mattklaasil.

1. Kuidas tuleks muuta pimekambril pikkust, et kaugemast (vst. ligemast) asjast saada tagaseinal selge kujutis?

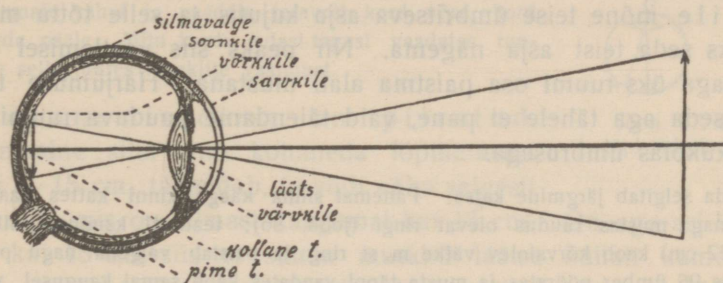
2. Seleta pildi ülesvõtmise ning negatiivi ja positiivi valmistamise käiku õpetaja või päevapildistamises vilunud kaasõpilase seletuse järele.

b. Lihtsamail väikesil aparaatidel on objektiivid väikese fookuse kaugusega, millega võrreldes asi asub praktiliselt lõpmatuses, kui ta on kaugemal kui paar meetrit. Niisugusel juhul tekivad kujutised alati samal kaugusel objektiivist, nimelt objektiivi fookuse kaugusel, ja sellepärast valmistatakse pimekambrid kindla pikkusega (mis võrdub objektiivi fookuse kaugusega). Ülesvõtmine niisuguse aparaadiga on lihtne, sest aparaati ei ole tarvis kohandada, kuid saadud pildi perspektiiv ei ole õige ja viga on seda tunduvam, mida ligemalt on asi üles võetud. Näiteks on kitsa uulitsa lähem osa pildil liiga lai. Ka paistab säärase objektiiviga ligidalt ülesvõetud kinopiltide juures silma lähenevate ja kaugenevate näitlejate ebaõige suuruse muutumine. Paremate aparaatide objektiivide fookuse kaugused on suuremad; ülesvõtmisel on tarvis aparaati kohandada.

80. Silm ja nägemine. Silma võime vaadelda kui pimekambril. Joon. 95 kujutab ülalt vaadates pahema silma horisontaalset läbilõiget.

Silmamuna tähtsamad kihid on (väljastpoolt alates) läbipaistmatu silmavalge, soonkile ja võrkile. Silma valge eelmine (kumeram) osa, nn. sarvkile, on läbinähtav. Väljastpoolt silma langevad kiired murduvad sarvkiles, silmalimas ning silmaläätses, mis koosneb üksikutest kihtidest (sibula-sarnaselt). Kõik murdjad kihid kokku moodustavad liit-objektiivivi, mis mõjub nagu üks ainus kumerlääts ja mille opt. keskpunkt asub ~ 7 mm kaugusel sarvkilest läätse tagumise pinna ligidal.

Valgusetundlik võrkile, mis asub objektiivist fookuse kaugusel, vastab päevapildiplaadile. Ta koosneb peenikes-



Joon. 95. Silm.

test kiududest, milleks jaguneb nägemiserk. Ergukiudude otsad kujutavad osalt silindritaolisi pulgakesi, osalt pudelisarnaseid kolvikesi. Objektiivivi päätelje, nn. kollase täpi, kohal puuduvad pulgakesed, kuid on rohkesti kolvikesi; kolvikete vastastikune kaugus on sääl ainult $\sim 0,004$ mm. Nägemisergu harunemise, nn. pime täpi, kohal ei leidu erguotsi.

Läbipaistmatu soonkile eesmine osa, nn. värvkile, ühes oma avausega, mida silma teraks nimetame, mõjub kui diafragma; ta reguleerib silma langeva valguse hulka.

Väljaspool silma asuvast asjast tekib võrkilel tõeline ümberpööratud kujutis, mis ärritab närviootsi ja tekitab püüa nägemis- aistingut. Ümberpööratud kujutisi oleme harjunud väikesest saadik teiste meelte abil seletama kui päripidiseid.

Joonistes ei võta me arvesse kiirte murdumist kõikides silma kihtides, vaid kujutame lihtsustamise mõttes silma kui kera-sarnast pimekambrit ühe ainsa

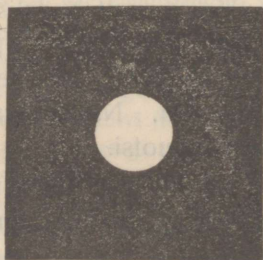
murdja kumerläätsuga ($f = 15$ mm), mille valgusetundlik tagasein (võrkkile) asub selle lääts fookuse kaugusel. Niisugust silma nimetame redutseeritud silmaks.

81. Kollane- ja pimetäpp. a. Võrkkile tundlikkus ei ole igal kohal ühesugune. Kõige paremini näeme asja või asja osa siis, kui tema kujutis langeb kollasele täpile. Sel põhjusel juhime silma alati nii, et vaadeldava asja kujutis langeks kollasele täpile; me näeme seejuures ka teisi ümbritsevaid asju, kuid mitte küllalt selgelt. Vaatlemisel kahe silmaga on meie vaatevälja laius $\sim 180^\circ$.

b. Mingisuguse asja vaatlemisel ühe silmaga langeb alati pimetäpile mõne teise ümbritseva asja kujutis ja selle tõttu me ei peaks seda teist asja nägema. Nii peaks siis vaatlemisel ühe silmaga üks ruumi osa paistma alati mustana. Harjumuse tõttu me seda aga tähele ei pane, vaid täiendame puuduva ruumi osa kokkukõlas ümbrusega.

Seda selgitab järgmine katse. Pahemat silma käega kinni kattes vaatame paremaga mustas ruudus olevat ringi (joon. 96); teataval kaugusel silmast (~ 22 cm) kaob kõrvalolev väike must ring ja paistab valgena nagu paber. Joonis 96 ümber pöörates ja musta täppi vaadates kaob samal kaugusel valge ring ning ruut paistab tervelt mustana.

Seleta nähtus joon. 97 abil.



Joon. 96. Pimetäpi demonstreerimine.

82. Silma kohanemisvõime (akkomodatsoon). Normaalse silma puhkeolekus langevad kaugelolevate asjade kujutised võrkkilele ja selle tõttu me näeme neid asju selgelt.

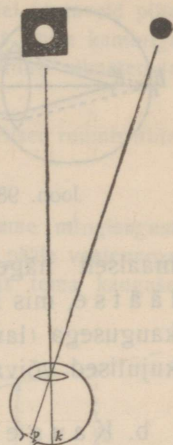
Ligineb aga asi silmale, siis peaks kujutis kaugenema võrk-
kile taha, kuid me muudame läätse ümb-
ritsevate musklite abil elastse läätse kumeram-
maks, nii et kujutis langeb jälle võrk-
kilele. Läätse kumeruse muutmist vastavalt asja kau-
gusele nimetame **kohanemiseks (akkomo-
datsiooniks)**. Musklid võimaldavad ainult
läätse kumeramaks muutmist; ei või läätse
teha lamedamaks kui ta on silma puhke-
olekus.

Kohanemist võib hästi tähele panna, kui hoida pee-
nike traat- või tindiga klaasile joonestatud võre silma
ja raamatu vahel ja vaadata teravalt kord võre, kord
tähtede pääle. Mitu korda edasi-tagasi vaadates tun-
neme selle juures musklite väsimust.

Kohanemise võime on piiratud. Normaalne silm võib kohaneda lõpmatuses
kuni ~ 15 cm, tähendab, ta võib näha selgesti
iga asja, mis on silmast kaugemal kui 15 cm. On aga asi lähe-
mal kui 15 cm, siis ei suuda musklid läätse küllalt kumeraks
teha, kujutis tekib kohanemispingutuse pääle vaatamata võrk-
kile taga ja me ei näe asja selgesti. Nii siis asub normaalse silma
lähem kohanemispunkt ~ 15 cm kaugusel (lapsel ~ 10
cm), kaugem kohanemispunkt lõpmatuses ning järe-
likult ulatub kohanemise kaugus 15 cm kuni lõp-
matuseni.

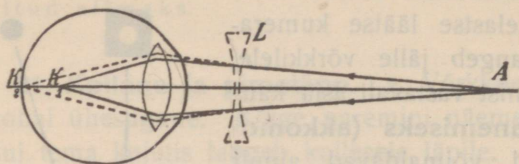
Igapäevastest nähtustest on teada, et me näeme asju seda pa-
remini, mida lähemal nad meile on. Sellepärast toome asja
silmale võimalikult ligidale, kui tahame tähele panna ta peenusi.
Lugemisel või kirjutamisel hoiame raamatu 25 — 30 cm kaugu-
sel, sest kohanemine lühema maa pääle väsitaks silma. Seda
kaugust (25 — 30 cm), milles normaalne silm on harjunud hästi
lugema ilma tunduva kohanemise väsimuseta, nimetame harilikult
normaalse silma selgenägemise kauguseks.

83. Lühinägija ja kaugelenägija. Prillid a. Lühinä-
nägija silma lääts on silmamuna pikkuse kohta liiga
kumer (võib ka ütelda, et silmamuna on läätse fookuse kauguse



Joon. 97. Pime-
täpi selgitamine.

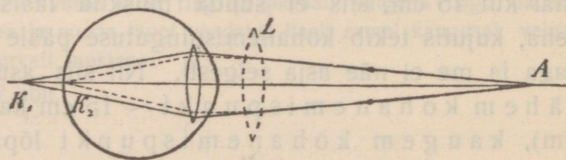
kohta liiga pikk). Selle tõttu tekivad kaugelolevate asjade kujuti-



Joon. 98. Lühinägija silm ja prillid.

sed võrkkile ees (punktis K_1 , joon. 98) ja neid asju ta selgesti ei näe. Ka akkomodatsiooni pingutus ei aita siin, sest see võiks läätse ainult veel kumeramaks teha. Normaalselt nägemiseks tarvitab lühinägija prillina nõguslääts, mis kokku silma objektiiviga moodustab pikema fookuse kaugusega (lamedama) objektiivi, nii et ka kaugemate asjade kujutised võivad tekkida võrkkilel (punktis K_2).

b. Kaugelenägija silma lääts on silmamuna pikkuse kohta liiga lame (silmamuna on läätse fookuse kauguse kohta liiga lühike). Selle tõttu ta ei suuda akkomodatsiooni pingutuse pääle vaatamata teha läätse küllalt kumeraks, et selgelt näha ligidal olevaid asju. Ligidal olevate asjade kujutised tekivad võrkkile taga



Joon. 99. Kaugelenägija silm ja prillid.

(punktis K_1 , joon. 99). Normalselt nägemiseks tarvitab kaugelenägija prillina kumer-

lääts, mis kokku silma objektiiviga moodustab lühema fookuse kaugusega (kumerama) objektiivi, nii et ka ligemate asjade kujutised võivad tekkida võrkkilel (punktis K_2).

c. Vanaduse kaugelenägemine tekib ka normaalse silma juures vanaduse või ületöötamise tagajärjel. Silm kaotab kohanemisvõime ja võib nagu normaalne silm puhkeolekus näha hästi ainult kaugel olevaid asju. Vastava prilliga (kumerlääts) võib näha hästi ka ligidalt, peab aga siis kaugemale vaatamisel prilli kõrvaldama või vaatama üle prilli.

Kaugelenägija ei riku oma silma, kui ta ei tarvita prilli, sest ta püüab siis ainult oma läätse kumeramaks teha, mis ei tee viga. — Et aga akkomodatsiooni pingutusega ei saa läätse lamedamaks teha, siis püüab lühinägija ilma prillita vaatlemisel võrkkilet läätsele ligemale tuua, mis silmale võib väga kahjulik olla (võrkkile võib koguni eralduda silma tagaseinast).

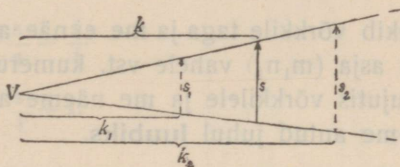
10. Mispärast on raske ühe silmaga vaadates niiti nõela taha ajada?

i. **Stereoskoop.** Asja kujutistele mõlema silma võrkkiel vastavaid pilte tehakse stereoskoop-päevapildi aparaadiga. Ta koosneb kahest ühise kambriiga päevapildi-aparaadist, mille objektiivide kaugus teineteisest võrdub silmaterade vahelise keskmise kaugusega.

Vaatamis-stereoskoobiga pilte vaadates langevad nende kujutised ruumis ühte ja me näeme ülesvõ. tud asja kehana.)

k. Asja kauguse ja suuruse määramine. Kui me vaatame mingisugust tundmatut asja rippumatult tema ümbrusest, nii et meil ei ole pääle vaatenurga mingisuguseid andmeid tema kohta, siis puudub meil kujutus tema kauguse või suuruse kohta.

Asja kaugust k (joon. 104) võime ainult siis ligikaudu määrata, kui meil on andmed tema suuruse s kohta. Need andmed võivad olla mitmesugused. On meil umbes teada asja suurus s (inimene, kahekordne maja), siis tekib vaatenurga põhjal ka vastav kaugusetunne. On aga asja enese suurus tundmatu, kuid



Joon. 104. Asja kauguse ja suuruse määramine.

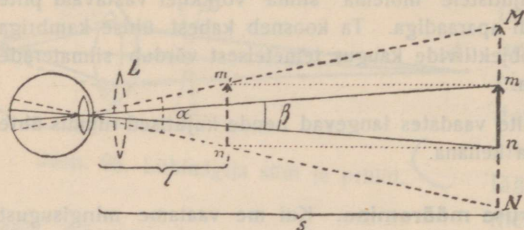
teada tema ligidal oleva teise asja suurus, järelikult ka kaugus, siis võrdleme tundmatu asja kaugust tema ümbruses olevate tuntud asjade kaugusega. Asja kauguse määramisel aitavad kaasa või mõjuvad segavalt mitmesugused asjaolud. Näiteks oleme harjunud kaugemaid asju nägema mitte selgesti ja selle tõttu paistab asja kaugus uduse ilmaga suurem, mägedes aga, kus õhk iseäranis puhas, vähem kui tõeliselt. Ka oleme harjunud ligemaid asju vaadeldes nägema enese ja vaadeldava asja vahel vähe vahepunkte ja loeme selle tõttu asja kaugust näit. üle vaikse järve pinna vaadates vähemaks ja läbi puiestee vaadates suuremaks kui ta on tõelikult. Samal põhjusel paistab kuu või päike horisondi ligidal kaugemana kui seniidi ligidal. Nii tekivad mitmesugustel põhjustel pettumused kauguse kohta. — Ligidalt vaatlemisel aitab kauguse määramisel kaasa reljeefusetunne; kahe silmaga vaadates võime kaugust õigemini määrata kui ühe silmaga vaadates.

Asja suurust võime ainult siis ligikaudu vaatenurga põhjal määrata, kui meil on andmed asja kauguse kohta. Eksime me selle juures asja kauguse suhtes, siis eksime me ka tema suuruse suhtes. Nii näit. paistavad kuu ja päike horisondi ligidal suuremana kui seniidi ligidal (mispärast?), tundmatud asjad uduse ilmaga suuremana kui selge ilmaga (mispärast?).

Mispärast paistavad päike ja kuu umbes ühesuurustena?)

86. Luup. a. Et asja mn (joon. 105) peenusi näha (või asja üldse näha, kui tema vaatenurk on $\beta < 1'$), selleks a s e-

tame asja silmale veelligemale kui temal lähem
kohanemispunkt,



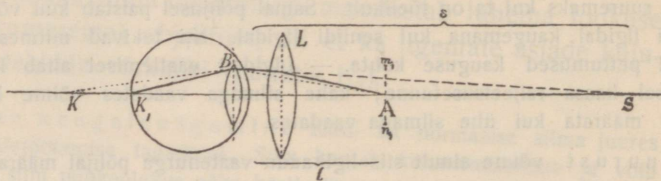
Joon. 105 Luubi mõju.

näit. m_1n_1 kohale. Vaatenurk ja vastavalt asja kujutis võrkkile suureneb ($\alpha > \beta$) ning selle tõttu on siis peenuste nägemise tingimused paremad. Asja lähendamine viib meid aga üle kohanemisvõime piiri, kujutis

tekib võrkkile taga ja me ei näe asja selgesti. Asetame aga silma ja asja (m_1n_1) vahele vst. kumerusega kumerlääts L , siis langeb kujutis võrkkilele ja me näeme asja selgesti. Kumerlääts nime-tame antud juhul **luubiks**.

Antud luubiga vaatamisel asetame asja (m_1n_1) luubi fookusest pisut ligemale; siis näeme suurendatud ebakujutise (MN) selgenägemise kaugusel.

Asuks asi luubi fookuses, siis langeksid mõnest asja punktist silma paralleel-sed kiired ja vaadeldav punkt paistaks kaugel olevat. Et me harjunud oleme vaatama asju selgenägemise kauguselt, siis nihutame asja fookusest pisut lige-male nii, et asja punktist tulevad kiired langevad silma (pärast murdumist luubis) laiali mineva kiirte kimbuna, mille pikendused lõikuvad selgenägemise kaugusel. — Joonises 106 asub asja punkt A pisut ligemal luubi fookusest.



Joon. 106. Luubi mõju.

Ilma luubita tekiks kujutis võrkkile taga (punktis k , kiire käik punkteeritud); luubi mõjul tekib kujutis võrkkilele (punktis k_1) ja silma langev kiir paistab tulevat selgenägemise kaugusest punktist S .

1. Seleta joon. 106 põhjal, kas tuleb valgusepunkt asetada kumeramale luu-bile ligemale või kaugemale, et teda näha selgenägemise kaugusel.

b. Luubi abil saadud ebakujutise MN ja asja m_1n_1 joonsuuste suhe $\frac{MN}{m_1n_1}$ nimetatakse luubi suurenduseks.

Luubi suurendus on (joon. 105)

$$\frac{MN}{m_1n_1} = \frac{s}{l}$$

Läätse valemist ebakujutise juhusel

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

leiame ($a = l$, $k = s$)

$$\frac{1}{l} - \frac{1}{s} = \frac{1}{f}$$

$$\frac{s}{l} - \frac{s}{s} = \frac{s}{f}$$

$$\frac{s}{l} = \frac{s}{f} + 1.$$

Nii siis luubi suurendus

$$\frac{MN}{m_1n_1} = \frac{s}{f} + 1.$$

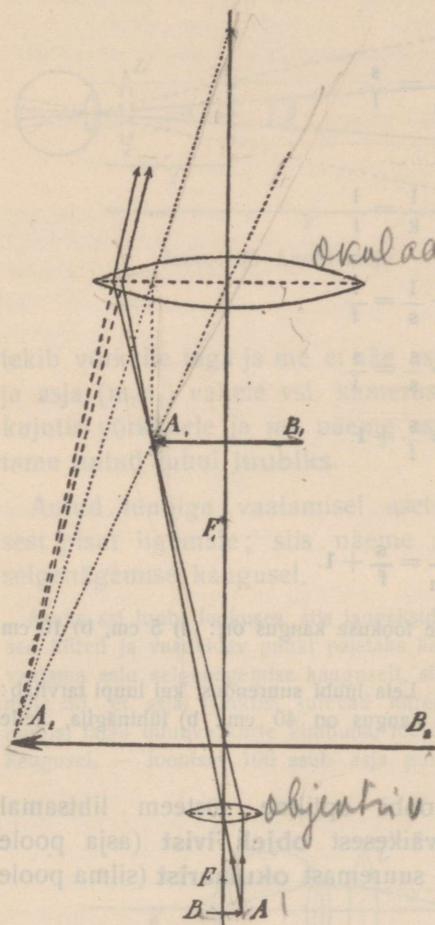
2. Mitu korda suurendab luup, mille fookuse kaugus on: a) 5 cm, b) 10 cm ($s = 25$ cm)?

3. Luubi fookuse kaugus on 4 cm. Leia luubi suurendus, kui luupi tarvitab: a) kaugelenägija, kelle selgenägemise kaugus on 40 cm; b) lühinägija, kelle selgenägemise kaugus on 15 cm.

87. Mikroskoop. Mikroskoobi optiline süsteem lihtsamal kujul koosneb hästi kumerast väikesest **objektiivist** (asja poole pööratud lääts) ja lamedamast suuremast **okulaarist** (silma poole pööratud lääts).

Kiirte käiku mikroskoobis näitab joon. 107. Väike asi AB pannakse väljaspool objektiivi fookust tema ligidale. Objektiivi mõjul tekib suurendatud tõeline kujutis A_1B_1 , mis täidab valgustatud keha aset, sest tema igast punktist lähevad kiired laiali homotsentriliselt. Kujutist A_1B_1 nagu asja läbi luubina mõjuva okulaari vaadeldes näeme suurendatud ebakujutise A_2B_2 (kujutise A_2B_2 ehitamisel on tarvitatud paralleel- ja pääkiirt, mis tõelikult puuduvad). Objektiiv ja okulaar asuvad ühises torus, mille kaugust lauakesele paigutatud asjast võib muuta. Vaatleja, kes on

harjunud asja vaatama selgenägemise kauguselt, reguleerib kaugust nii, et ta näeks suurendatud ebakujutise A_2B_2 oma selgenägemise kauguselt. Paremate mikroskoopidega võib näha kaht punkti veel eraldatult, kui nende kaugus üksteisest on $\frac{1}{4000}$ mm.



Samuti kui projektsioon-aparaadigi juures peab asi hästi valgusfotud olema (mispärast?). Selleks koondatakse ja juhatakse asja pääle päikese või lambi kiired nõguspeegli või kumerläätse abil.

Mikroskoobi kogusuurendus võrdub objektiiviga ja okulaari suurenduste korrutisega ja määratakse harilikult katseliselt.

Mikroskoobi suurendust määrab ligikaudselt valem $\frac{l}{f_1 f_2}$, kus l on mikroskoobi toru pikkus, s selgenägemise kaugus ning f_1 ja f_2 vst. objektiivi ja okulaari fookuste kaugused.

1. Kas on joonise 107 proportsioonid õiged? Kui mitte, mispärast on siiski tarvitatud niisugust joonist?

Joon. 107. Kiirte käik mikroskoobis.

2. Leia mikroskoobi suurendus, kui objektiivi ja okulaari fookuste kaugused on vst. 5 mm ja 3,9 cm, mikroskoobi pikkus 33 cm ning vaatleja selgenägemise kaugus 33 cm.

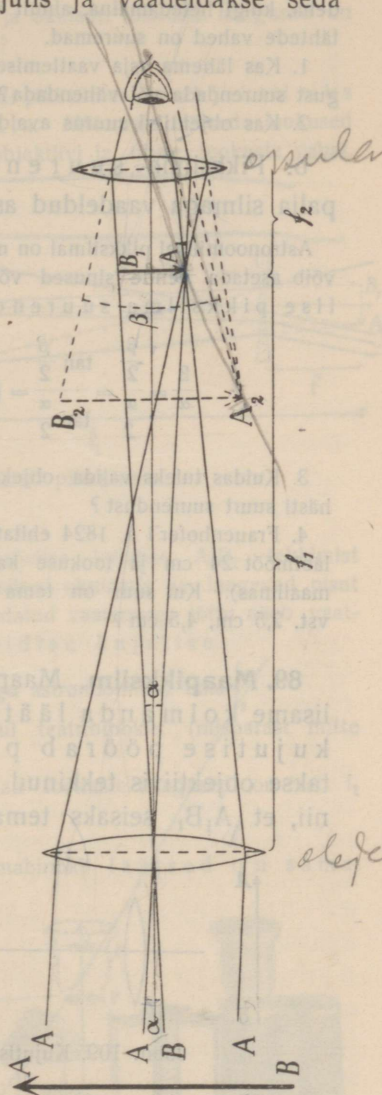
88. Astronoomiline (Kepler'i) pikksilm. Väga kaugel seisva asja (kuu) peenusi või ka asja ennast me ei näe, sest vastav vaatenurk on liiga väike. Et kaugeloleva asja vaatenurka ei saa

suurendada asja lähendamise teel, siis tekitatakse kumerläätse (objektiiv) abil asja väike tõeline kujutis ja vaadeldakse seda ligidalt läbi teise läätse (okulaari) kui luubi. Vaatenurk seejuures suureneb.

Astronoomilise pikksilma optiline süsteem koosneb suurema fookuse kaugusega objektiivist ja väiksema fookuse kaugusega okulaarist. Kaugeloleva asja kujutise ehitamine paberil harilikul viisil paralleel- ja pääkiire abil ei ole võimalik (mispärast?). Kaugest asja (A B, joon. 108) punktist A tulevad kiired on isekeskis paralleelsed ja moodustavad pööratud kujutisega väga väikese nurga $\frac{\alpha}{2}$. Objektiivi mõjul tekib objektiivi fookuse kaugusel väike tõeline ümberpööratud kujutis A_1B_1 , mis täidab asja aset. Läbi okulaari näeb vaatleja asja suuremana kui palja silmaga (vaatenurk $\beta > \alpha$), nagu oleks pikksilm asja ligemale toonud. Et asja kujutis on ümberpööratud, siis ei saa astronoomilist pikksilma tarvitada maakera pinnal olevate asjade vaatlemiseks.

Astronoomilise pikksilma pikkus võrdub ligikaudu objektiivi ja okulaari fookuste kauguste summaga.

Astronoomiliste pikksilmade objektiivid on sagedasti suured; suurema pikksilma objektiivi diameeter (Yerkes'i tähetornis) on 102 cm ja fookuse kaugus 19 m. Suurem objektiiv kogub vaadeldavast asjast rohkem valgust ja tarvitatakse selle tõttu valgusnõrkade taevakehade vaatlemiseks. Pikksilmaga näeme palju tähti, mis palja silmaga üldse näha ei ole, sest silmaterasse langeva väikese valgusehulga



Joon. 108. Kiirte käik astronoomilises pikksilmas.

mõju on liiga nõrk. Ka suuremates pikksilmades paistavad kinnistähed punktadena, kuigi heledamaina, ainult vaadeldava taevavõlvi osa on suurendatud — tähtede vahed on suuremad.

1. Kas lähema asja vaatlemisel tuleb okulaari ja objektiivi vastastikust kaugust suurendada või vähendada?

2. Kas objektiivi suurus avaldab mõju kujutise suurusesse?

b. Pikksilma suurenduseks nimetame pikksilmaga ja palja silmaga vaadeldud asja vaatenurkade suhet $\frac{\beta}{\alpha}$.

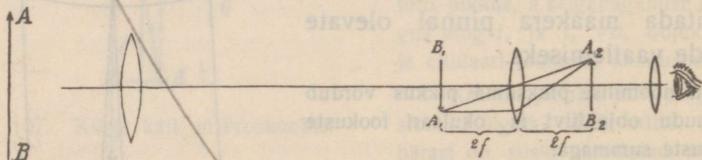
Astronoomilisel pikksilmal on nurgad α ja β nii väikesed, et nurkade asemele võib asetada nende sinused või tangensid; selle tõttu on astronoomilise pikksilma suurendus

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\frac{\beta}{2}}{\frac{\alpha}{2}} = \frac{\tan \frac{\beta}{2}}{\tan \frac{\alpha}{2}} = \left(\frac{A_1 B_1}{2} : f_2 \right) : \left(\frac{A_1 B_1}{2} : f_1 \right) = \frac{f_1}{f_2}.$$

3. Kuidas tuleks valida objektiivi ja okulaari fookuse kaugused, et saada hästi suurt suurendust?

4. Fraunhoferi a. 1824 ehitatud teleskoobil Tartu tähetornis on objektiivi läbimõõt 24 cm ja fookuse kaugus 450 cm (tol ajal oli ta kõige suurem maailmas). Kui suur on tema suurendus, kui okulaari fookuse kaugus on vast. 2,5 cm, 4,5 cm?

89. Maapikksilm. Maapikksilma saame astronoomilisest, kui me lisame kolmanda läätsesuurde, mis objektiivi ümberpööratud kujutise pöörab päripidiseks. Kolmas lääts asetatakse objektiivis tekkinud tõelise kujutise $A_1 B_1$ (joon. 109) taha nii, et $A_1 B_1$ seisaks tema kahekordsel fookuse kaugusel. Siis



Joon. 109. Kujutise ümberpööramine maapikksilmas.

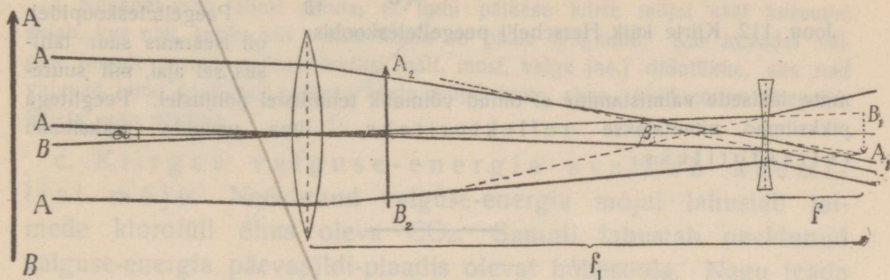
tekib teisel pool läätsesuurde kahekordsel fookuse kaugusel sama suur päripidine kujutis $A_2 B_2$ ja seda vaadeldakse okulaari kui luubi läbi.

Harilikult tarvitatakse kujutise ümberpööramiseks ühe kaksikkumerläätses asemel kaht tasakumerläätses. Suurema toru otsa on kinnitatud objektiiv; peenemas torus, mis liigub suuremas, asub okulaar ja ümberpööravad läätsed.

Tervet optilist süsteemi peenemas torus nimetatakse ka lühidalt pikksilma okulaariks.

1. Kui pikk on maapikksilm, kui objektiivi ja okulaari fookuste kaugused on vst. f_1 ja f_2 ning ümberpööraja läätse oma f_3 ?

90. Hollandi (Galilei') pikksilm. Hollandi pikksilmas on objektiiviks kumerlääts, okulaariks nõguslääts. Mõlemate läätsede fookused langevad ligikaudu ühte, kuid okulaar asub objektiivi ja ühise fookuste vahel.



Joon. 110. Kiirte käik hollandi pikksilmas.

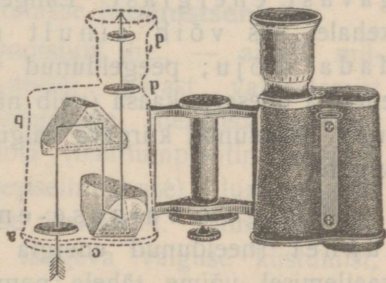
Kiirte käiku näitab joon. 110. Enne tõelise kujutise A_1B_1 tekkimist hajuvad vaadeldava asja punktist A tulevad kiired okulaaris ja langevad pisut laiali mineva kimbuna vaatleja silma. Suurendatud vaatenurga tõttu näeb vaatleja võrdl. suure ja pääle selle veel päripidise kujutise.

Hollandi pikksilma suurendus on nagu astronoomilise oma $\frac{f_1}{f_2}$.

Kaht hollandi pikksilma tarvitatakse kui teatrinoklit (mispärast mitte kaks maapikksilma?).

1. Hollandi pikksilma objektiivi ja okulaari fookuste kaugused on vst. f_1 ja f_2 ; kui pikk on pikksilm?

91. Prismabinokkel (joon. 111). Prismabinokli läätsed on sama sugused kui astronoomilise pikksilma omad. Kujutise ümberpööramine sünnib neljakordse täielise sisepeegeldumise teel kahes prisma (ühes prisma pöördu ümber kujutise parem ja pahem pool, teises prisma ülemine ja alumine pool). Kiired lähevad kolm korda läbi toru ja selle tõttu on toru lühike. Prismabinokliga vaatlemisel on reljeefsusetunde suurendatud, sest objektiivide vaheline kaugus on suurem kui silmaterade normaalne kaugus teineteisest.



Joon. 111. Prismabinokkel.

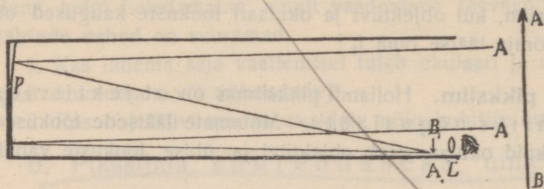
92. **Peegelteleskoop.** Peegelteleskoobis täidab objektiivivi aset nõguspeegel, mis tekitab asja väikese tõelise ümberpööratud kujutise;

seada kujutist vaadeldakse okulaari kui luubi läbi.

Seleta kiirte käiku joonises 112 kujutatud peegelteleskoobis.

Peegelteleskoopidel oli iseäranis suur tähtsus sel ajal, mil suure-

mate läätsede valmistamine ei olnud võimalik tehnilistel põhjustel. Peegli- telega pikksilmad nimetatakse reflektoriteks, ilma peegli- ta pikksilmad refraktoriteks.



Joon. 112. Kiirte käik Herschel'i peegelteleskoobis.

Nähtavate ja mittedähtavate spektri kiirte avaldused

93. **Valgus kui kiirgav energia.** Lained on energia edasi- kandjad. Et valgus on lainetamisnähtus (seada näeme füüsikalises optikas), siis peavad ka valguse kiired energiat enesega kaasas kandma ja see energia peab teatavil tingimusil avaldama mingisugust mõju. Igapäevasest elust teame, et see on tõelikult nõnda. Näiteks mõjuvad valguse kiired nägemisorganisse, soojendavad kehi, tumestavad päevapildi- plaati jne. Sellepärast võib rääkida valgusest kui kiirgavast energiast. Langeb kiirgav valguse-energia mõnele kehale, siis võib ainult neeldunud energia avaldada mõju; peegeldunud või läbiläinud valgus võtab oma energia enesega kaasa (võib näit. tekitada valgusetunnet ja soojust). Neeldunud kiirgava valguse-energia mõju võib olla mitmesugune:

a. Kiirgav valguse-energia sünnitab valguse- tunnet (neeldunud energia ärritab nägemisorganit). Spektri vaatlemisel võime tähele panna, et kollased kiired avaldavad seda mõju kõige tugevamini.

b. Kiirgav valguse-energia tekitab soojust (neeldunud energia soojendab kehi).

1. Päikese kiirte teele asetatud klaasplaat ei soojene tunduvalt, kuna samasugune nõetatud klaasplaat soojeneb tunduvalt. Seleta seda nähtust.

2. Kaks ühesugust termomeetrit on asetatud päikese kiirte teele, ühe kuulike on nõetatud, teise oma mitte. Kas termomeetrid näitavad sama temperatuuri? Põhjenda oma arvamist.

3. Kevadel võib tähele panna, et lumi päikese kiirte mõjul sääli kiiremini sulab, kus näit. tuhka või põllult tolmu on päälle langenud. Kui kevadel valgele lumele asetada mitmevärvilisi (näit. must, valge jne.) riidetükke, siis nad vajuvad lume sulamisel päikese kiirte mõjul lume sisse, kuid mitte ühepalju. Seleta seda nähtust.

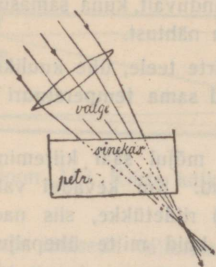
c. Kiirgav valguse-energia avaldab keemilist mõju. Neeldunud valguse-energia mõjul lahustab taimede klorofüll õhus oleva CO_2 . Samuti lahustab neeldunud valguse-energia päevapildi-plaadis olevat hõbesoola. Nagu teada päevapildistamisest, ei mõju värvilised kiired keemiliselt ühegevuselt.

d. Kiirgav valguse-energia tekitab luministsentsi, isesuguste kehade valguse kiirgamise (§ 94).

94. Luministsents. Harilikud kehad paistavad ainult niisuguses värvis, mis on olemas langevas valguses, ja langeva valguse kustumisel kaob ka keha värv; neeldunud valguse energia osa moonduv harilikult soojuseks. Kuid on ka erandeid, kehi, milles neeldunud valguse-energia moonduv jälle valguseks. Nad kiirgavad neeldunud valguse mõjul oma valgust, oma värvi, mis langevas valguses võib täiesti puududa, ja sagedasti veel pikemat aega pärast langeva valguse kustumist. Niisugust nähtust nimetatakse **luministsentsiks**.

Näiteks väävlisbaarium (väävlisstrontsium jne., — ained, millest tehakse nn. helenevad värvid) pärast valgustamist päikese või elektri leeklambi valgusega heleneb pikemat aega pimedas toas. Mõne teise soola (baariumplaatintsüanüüri) ja vedeliku (petrooleumi, fluorestseiinilahuse) luministsents kaob kiiresti pärast langeva valguse kustumist. Luministsentsi, mis kestab pikemat aega pärast langeva valguse kustumist, nimetatakse **fosforescentsiks**, kiiresti kustuvat luministsentsi **fluorescentsiks**.

Fosforestsentsi demonstreerimiseks tarvitame näiteks fosforestseeruvate ainetega täidetud klaastorusid või helenevaid värve (fosfor ei fosforestseeru!). — Fluorestsentsi demonstreerimiseks asetame harilikult fluorestseeruva aine läätsega koondatud päikese või laterna kiirte koonusesse (joon. 113). Petrooleumis paistab valgustatud koonus sinakana, uraanklaasis ja fluorestseiniilahuses rohekana. — Paneme ka tähele, et fluorestseeruvail kehil on vastu valgust vaadates teine värv kui kõrvalt vaadates.



Joon. 113. Petrooleumi fluorestsentsi demonstreerimine.

Katsed värviliste kiirtega näitavad, et luministsentsi tekitavad iseäranis violetsed ja sinised kiired, et keha luministsentsvärv on alati väikesema murdumusega kui luministsentsi tekitav neeldunud värv.

95. Mittenähtavate spektri kiirte avaldused. a. Järele kat-sudes värviliste spektri kiirte soojuslikku mõju väga tundliku termomeetriga (termosambaga) leiame, et soojuslik mõju tõuseb järjest violetsest spektri otsast alates punase poole ja on veel märgata punase otsa taga (Herschel a. 1800). Nii siis peituvad valges valguses ka mittenähtavad nn. **infrapunased kiired**, mis murduvad vähem kui äärmised nähtavad punased kiired ja mis avaldavad iseäranis soojuslikku mõju.

Ka infrapunaste kiirte kohta on maksvad peegeldumis- ja murdumisseadused. Seda näitab juba soojuse kogunemine nõguspeegli ja kumerläätse tulipunkti.

Iga keha kiirgab infrapunaseid kiiri. Näiteks köetud ahju läheduses tunneb käsi soojust. Asetame nõguspeegli või kumerläätse juures valguseallika kohale soojendatud (mitteheleneva) keha, siis näitab kujutise kohale asetatud termomeeter temperatuuri tõusu.

Klaas neelab infrapunaseid kiiri tugevasti. Infrapunaste kiirte demonstreerimiseks on kasulik tarvitada läätse ja prisma niisugusest ainest, mis neid kiiri tugevasti ei neela, näit. kivisoolast.

b. Asetame näit. roheliselt fluorestseeruva ainega kaetud pikema pabeririba piki spektrit ekraanile nii, et spekter osalt langeks ribale, osalt ekraanile. Me paneme tähele, et paber

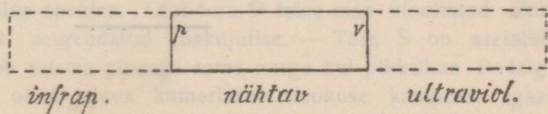
heidab tagasi kõik kiired punastest kuni rohelisteni samuti kui harilik ekraan; sinises ja violetses valguses ta fluorestseerub aga ja paistab rohekana. Kuna nähtav spekter lõpeb harilikul ekraanil violetse otsaga, näeme, et paberi riba kiirgab rohelist fluorestsents-valgust veel spektri violetse otsa taga. Järelikult peituvad valges valguses ka mittednähtavad nn. **ultraviolettkiired**, mis murduvad rohkem kui äärmised nähtavad violettikiired ja tekitavad tugeva fluorestsentsi.

Asetame spektri kohale fluorestseeruva riba asemele päevapildi-(ilmutamis-)paberi riba, tähendame pliiatsiga ära nähtava spektri piirid ja ilmutame paberi pärast valgustamist. Siis näeme, et punane valgus ei ole avaldanud paberisse tunduvat keemilist mõju; teiste värviliste kiirte mõju punasest spektri otsast violetse otsa poole on aga järjest suurenenud ja on kõige suurem violetse otsa taga (paber on tumenenud sääl kõige rohkem). Me järeldame, et ultraviolettkiired avaldavad tugevat keemilist mõju.

Nii siis koosneb spekter nähtavaist, infrapunastest ja ultraviolettkiirtest (joon.

114), mille vahel ei ole olulist vahet.

Klaas neelab ultraviolettkiiri tugevasti. Katsete tegemisel ultraviolettkiirtega tuleks tarvitada kvartsist läätsi ja prisma, sest kvarts laseb neid hästi läbi.



Joon. 114. Spektri kiired.

96. Kiirgamise olenevus temperatuurist. Valguse lainetamise teooria seisukohast vaadatuna on kõik spektri kiired ilma ruumi ja kehade aatomite vahet täitva eetri lainetamine, mis levib valguse kiirusega; värviliste kiirte vahe seisab ainult nende vastavate lainete pikkuses (või võnkearvus, sest lühemale lainele vastab suurem võnkearv).

Vaatlused näitavad, et kehad harilikus temperatuuris välja saadavad ainult pikemaid infrapunaste kiirte laineid, nad kiirgavad siis ainult soojust. Temperatuuri tõusmisel tekivad ka lühemad eetrilained ja umbes 500° juures hakkab keha välja saatma ka lühemaid punaste kiirte laineid,

mis mõjuvad meie nägemisorganisse. Edasikuumendamisel tulevad juurde ikka lähemad lained ja nendele vastavad kollased jne. kiired, kuni keha valgel hõõgumisel (üle $+1200^{\circ}$) tekitab kõiksuguseid eetrilaineid, ka niisuguseid, mis vastavad spektri ultravioletsele osale.

Kuna kiirgav energia avaldub madalamas temperatuuris ainult soojusena, tuleb kõrgemas temperatuuris valguse mõju juurde, kuid suurem osa energiat avaldub ka kõrgemas temperatuuris soojusena. Mida kõrgem on keha temperatuur, seda rohkem muutub vahetõrge valguse kasuks (sellepärast on näit. kasulik elektri-hõõglampide hõõguvat traati kuumendada võimalikult kõrge temperatuurini).

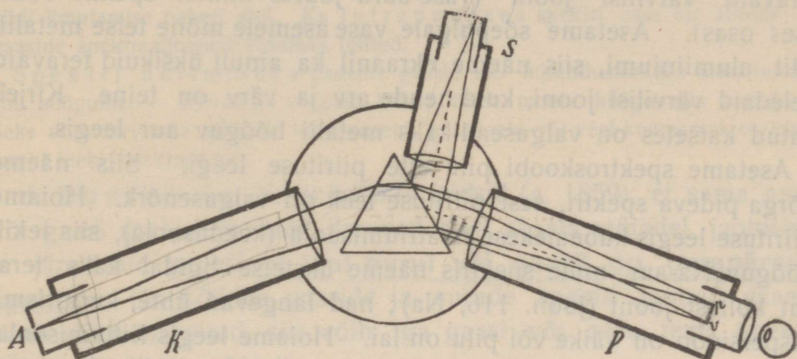
Kuidas tekivad valguse lained valguseallika ümbruses, see ei ole veel täiesti rahuldavalt selgitatud. Lihtsamal kujul võime seda seletada järgmiselt: on kindlaks tehtud, et ainete aatomid koosnevad väikestest osakestest, nimelt aine südamikust, mille ümber tiirlevad elektri elementaariosakesed, nn. elektronid, nõnda kui planeedid ümber päikese. Arusaadav, et see liikumine võib tekitada ümbristavas eetris liikumist, mis levib lainetaoliselt. Lühemate lainete tekkimist kõrgemas temperatuuris võiks seletada liikumisenergia tõusmisega.

Spektri tüübid; spektraalanalüüs

97. Spektraalparaat. Valgust võime analüüsida (määrata kiirte koosseisu) lahutades valgust spektriks. On valguseallikas küllalt tugev (el.-leeklamp), siis võime ta asetada projektsioonlaternasse ja spektrit nähtavaks teha objektiivselt suuremale hulgale samal ajal. On aga valguseallikas nõrk või tahame spektrit täpsemalt uurida, siis tuleb spektrit vaadelda subjektiivselt isesuguse spektraalparaadiga.

Kirjeldame Kirchhoffi ja Bunseni spektraalparaadi ehitust. Ta koosneb lauakesele kinnitatud prismast ja kolmest torust; teema optilist süsteemi ja kiirte käiku näitab joon. 115. Kollimaatoru K otsa kinnitatud pilu ette asetatakse uuritav valguseallikas A. Skaalatoru S otsa kinnitatud läbipaistev

mm-skala valgustatakse väljastpoolt. Spektrit ühes skaalaga vaadeldakse läbi toru P.



Joon. 115. Spektraalapaarat.

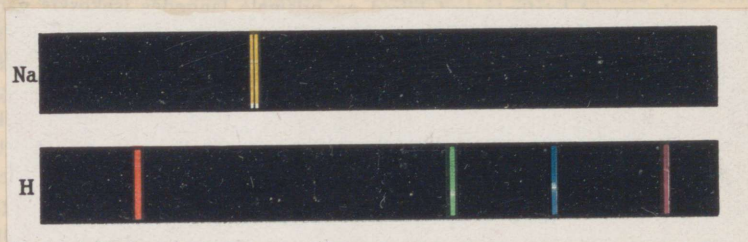
Pilu asub kollimaatoritoru teises otsas oleva läätse fookuse kaugusel ja läbi pilu torusse langevad laialiminevad kiired on prismale langedes isekeskis paralleelsed. Järelikult on ka samavärvilised kiired pärast murdumist prisma isekeskis paralleelsed. Toru P (kujutab lühikest astronoomilist pikksilma) otsas asuv kumerlääts kogub prismast tulevad värvilised kiired oma fookuse kaugusel, kus tekib väikene tõeline spekter. Läbi toru P teise otsa kinnitatud okulaari näeb vaatleja spektri suurendatud ebakujutise. — Toru S on asetatud nii, et tema telg moodustab prisma pinnaga sama nurga kui pikksilma P telg. Skaala asub toru S teises otsas oleva kumerlääts fookuse kaugusel. Igast valgustatud jaotuskriipsust tulevad kiired langevad paralleelse kimbuna prisma välispinnale ja säält peegeldudes pikksilma P objektiivile. Selle tõttu tekib ka skaala tõeline kujutis pikksilma objektiivi fookuse kaugusel ja vaatleja näeb ühes spektriga ka skaalat ning võib üles märkida, missugustel skaala kohtadel ilmuvad teatavad värvid.

98. Kiirgamis- ehk emissioonspekter. a. Harilikud valguseallikad on hõõguvad kõvad kehad (söepulgad el-leeklambis, traadid el-hõõglambis, söekübemed küünla või lambi leegis jne.). Niisuguste valguseallikate spektrites ei puudu ükski värv; neid spektreid nimetame pidevaks (joon. 71). Ka hõõguvate vedelike (sulanud metallid) spektrid on pidevad.

b. Tekitame spektri projektsioonlaterna abil. Asetame laternas oleva leeklambi alumise söepulga päale väikese metalli- (vase-) tüki, siis tekib leegis metalli (vase) hõõguvaur. Nihutame söepulgad üksteisest niikaugemale, et kiiri saadab kondensaatorile

pääasjalikult leegis hõõgav aur (mitte hõõguvad söepulga otsad), siis näeme ekraanil pideva spektri asemel üksikuid heledaid teravaid värvilisi jooni (vase-auru juures nimelt spektri rohelises osas). Asetame söepulgale vase asemele mõne teise metalli, näit. alumiiniumi, siis näeme ekraanil ka ainult üksikuid teravaid heledaid värvilisi jooni, kuid nende arv ja värv on teine. Kirjeldatud katsetes on valguseallikaks metalli hõõgav aur leegis.

Asetame spektroskoobi pilu ette piirituse leegi. Siis näeme nõrga pideva spektri, sest piirituse leek on valgusenõrk. Hoiame piirituse leegis kübemekese naatriumisoola (keedusoola), siis tekib hõõgav Na-aur, mille spektris näeme üksteise ligidal kaks teravat kollast joont (joon. 116, Na); nad langevad ühte, kui prisma dispersioon on väike või pilu on lai. Hoiame leegis liitiumisoola, siis tekib spektris kaks teravat punast joont. Kui valgustame skaalat, siis võime spektraaljoonte seisud üles märkida skaala järele. Kirjeldatud katseis on valguseallikaks hõõgav naatriumivst. liitiumi-aur.

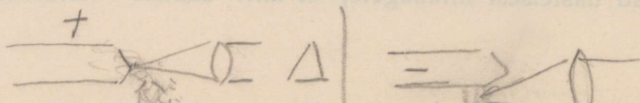


Joon. 116. Naatriumi ja vesiniku kiirgamisspektrid

c. Asetame spektroskoobi pilu ette klaastoru hõrendatud gaasiga ja paneme gaasi elektrivoolu abil hõõguma. Spektris näeme üksikuid teravaid jooni või laiemaid mitteteravate ääretega ribasid. Vesinik annab ühe punase, ühe rohelise, ühe sinise ja ühe violetse joone (joon. 116, H), lämmastik ribade rea. Spektrit, mis koosneb üksikutest värvilistest joontest või ribadest, nimetame katkeliseks.

Kokkuvõttes: hõõguvad kõvad ja vedelad kehad annavad pideva spektri, hõõguvad aurud ja gaasid katkelise (joon- või ribaspektri).

Kirjeldatud spektreid, milles on olemas kõik kiired, mida keha kiirgab, nimetatakse kehade kiirgamis- ehk emissioonspekriteks.



Laseme projektsioonlaterna abil tekitatud hõõguva auru spektri langeda fluorestseerivale ekraanile, siis näeme spektraaljooni ka spektri ultravioletses osas; veel rohkem jooni võime kindlaks teha ultravioletses osas päevapildi ilmutamise paberi abil. Ka infrapunases spektri osas on aurude ja gaaside spektraaljooned kindlaks tehtud.

Spektri uurimiseks paneme gaasid nn. hõrendustorudes elektrivoolu abil hõõguma. — Kõvad ja vedelad kehad tuleb muuta hõõguvaiks aurudeks. Seks võib tarvitada piirituse või Bunseni gaasileeki või veel kuumemat el-leeklambi leeki (elektrisädet).

d. Bunsen ja Kirchhoff leidsid (a. 1859), et sama auru või gaasi spektraaljooned ilmuvad alati skaala samadel jaotustel, ja järeldasid sellest, et **igal aurul või gaasil on omapärane spekter**. On kõikide gaaside ja aurude spektri jooned skaala järele üles märgitud, siis võib iga gaasi või auru tema spektri põhjal kindlaks määrata.

Et aine kiirgab omapäraseid värve ainult gaasi- või aurusarnases olekus, seda võib seletada valguse lainetamise teooria seisukohast sellega, et aineosakesed ainult nendes olekutes suuremate vahede tõttu võivad pikemat teed vabalt liikuda, nii et võivad tekkida korraldatud aatomite omapärasele ehitusele vastavad omapärsed võnkumised, mis tekitavad omapäraseid eetrilaineid (värve). Seda vaadet tõestab nähtus, et tugevasti kokkusurutud gaaside või aurude spektrid muutuvad pidevaiks.

99. Neeldumis- ehk absorptsioonspekter. a. Kõva ja vedela keha neeldumisspekter. Tekitame pideva spektri (valgustades pilu valge valgusega) ja asetame pilu ette valge valguse kiirte teele mitmesuguseid läbipaistvaid kehi. Paksem värvitu vee kiht või klaas teeb terve spektri nõrgemaks (mispärast?). Võtame aga värvilise keha, mis neelab ühti värve rohkem kui teisi, siis tekivad spektris rohkem neeldunud värvide kohal tumedad ribad või kaovad suuremad spektriosad. Niiviisi saadud spektreid nimetatakse neelavate kehade **neeldumis- ehk absorptsioonspektriteks**. Neeldumisribad võib fluorestseeriva ekraani abil nähtavaks teha ka spektri ultravioletses osas; nad on kindlaks tehtud ka infrapunases osas.

Asetame valge valgusega valgustatud spektroskoobi pilu ette näit. kaali-hüpermangaanikumi vedela lahuse (violetse), siis näeme spektris viis neeldumisriba. Võtame lahuse paksema kihina või rohkem kontsentreeritult, siis on ribad tumedamad ja laiemad. Veel paksema kihi juures ühinevad ribad ja suurem spektriosa

on tume. Samal viisiil võib vaadelda ka teiste kehade kihi pakuse ja vedelikkude kontsentratsiooni mõju ning üles märkida neeldumisribade kohad skaalal.

Katseist järeldame, et igal läbipaistval kõval või vedelal kehal on omapärane neeldumisspekter. Kehi, mille neeldumisjooned on küllalt teravad ja iseloomustavad, võib nende neeldumisspektrite põhjal kindlaks määrata.

1. Mõned läbipaistvad värvita kehad annavad siiski silmapaistvaid neeldumisjooni (näit. didüüm); kuidas seda seletada?

b. Hõõguva gaasi ja auru neeldumisspekter. Gaasidel (õhk) ei ole harilikudel tingimustel neeldumist märgata. Hõõguvad gaasid ja aured tekitavad aga neeldumisspektri, milles neeldumisjooned on iseäranis silmapaistvad ja teravad. Tekitame näiteks projektsioonlateranaga ekraanil pideva spektri ja asetame pilu ette valgete kiirte teele Bunsen'i gaasileegis hõõguvat naatriumi-auru. Spektris tekib kollaste kiirte kohal üksteise ligidal kaks teravat neeldumisjoont.

Liitiumi-aur sünnitab kaks teravat neeldumisjoont spektri punases osas. Nähtust spektraal-aparaadiga uurides pani Kirchhof tähele, et hõõguva gaasi või auru neeldumisjooned ilmuvad täpselt spektri samadel kohtadel, kus nende ainete kiirgamisjooned kiirgamisspektriteski. Ta leidis (a. 1860) absorptsiooni seaduse, mis lühidal kujul kõlab järgmiselt: iga hõõguv aur või gaas neelab (pääasjalikult) neid kiiri, mis ta ise kiirgab samas temperatuuris.



Robert Kirchhoff (1824 — 1887).

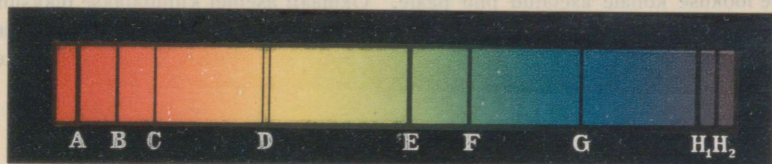
See seadus võimaldab iga hõõguvat auru või gaasi kindlaks määrata tema neeldumisspektri põhjal, kui on teada ainult tema kiirgamisspekter.

Valguse lainetamise teooria seisukohast seletame Kirchhoffi leiutatud absorptsiooniseaduse resonantsiga. Nagu helihark neelab

ainult niisuguste helilainete energiat, mida ta ise võib välja saata, ja neeldunud energia mõjul ise helisema hakkab, nii neelab näit. ka hõõguv Na-aatom langevast valgest valgusest ainult kollaste kiirte lained, mida ta ise võib välja saata. Seda neeldunud energiat ta hajutab valguse lainete näol igas sihis, nii et teda spektri kohale ekraanile vähem langeb kui teisi valges valguses olevaid värvilisi kiiri. Spektris, mis koosneb üksikutest värvilistest pilukujutistest (§ 62), on siis kollane pilukujutis nõrgem ja selle tõttu tume. Katame terve spektri päale tumeda riba kollases osas kinni musta paberiga, siis näeme nõrgalt valgustatud kollase riba.

100. Päikese spekter. Fraunhofer pani tähele (a. 1814) päikese valguse spektris tumedaid jooni ja tähendas silmapaistvamad neist tähtedega A — H (joon. 117). Suuremate spektroskoopidega võib päikese spektris kindlaks teha üle 10 000 **Fraunhofer'i joone.**

Fraunhofer'i jooni võime vaadelda kaht viisi: a. subjektiivselt, kui juhime spektraalparaadi kollimaator-toru taeva poole ja teeme pilu hästi kitsaks; b. objektiivselt, kui juhime pimedasse tuppa peegli abil päikese kiirte kimbu horisontaalses sihis pilule ja tekitame ekraanil spektri. Objektiivses päikese spektris võib näha Fraunhofer'i jooni ka ultravioletses osas fluorestseeruva ekraani abil. Ka võib spektrit fikseerida ilmutamispaberil.



Joon. 117. Päikese spekter.

Alles mõnikümmend aastat pärast Fraunhofer'i leidust oli võimalik absorptsiooniseaduse põhjal Fraunhofer'i joonte tekkimist järgmiselt seletada: Päikese hõõguv südamik, **fotosfäär**, kiirgab valget valgust, tähendab, kõiksuguseid kiiri; päikese hõõguv aurude ja gaaside atmosfäär, **kromosfäär**, neelab oma koosseisule vastavalt teatavad värvid, mille asemele ilmuvad tumedad jooned. Et Fraunhofer'i kahekordne joon D ilmub täpselt Na-auru kiirgamisspektri heleda joone kohal, see näitab, et päikese kromosfääris on olemas hõõguv Na-aur. Jooned C, F, G langevad täpselt ühte vesiniku kiirgamisjoontega; sellest järgneb, et kromosfääris on hõõguv vesinik. Fraunhofer'i jooni tuntud kiirgamisjoontega võrreldes on kindlaks tehtud, et suurem

osa meile tuntud elemente leiduvad ka päikese kromosfääris, millest järgneb, et päikesel on samasugune aineeline koosseis kui maakeral. Mõned neeldumisjooned päikese spektris, mis meile tuntud kiirgamisjoontega ühte ei langenud, näitavad, et päikese kromosfääris on mingisugune tundmatu element, mida mimetati heeliumiks. Hiljem (30 a.) leiti heelium (gaas) ka meie maakera atmosfääris.

Päikese spektri uurimisel on tähele pandud, et mõned väga nõrgad neeldumisjooned on hommikuti ja õhtuti tumedamad kui keskpäeval. Need jooned tekivad neeldumise tõttu maakera atmosfääris.

101. Spektraalanalüüs. Spektraalanalüüsiks kitsamas mõttes nimetame ainete keemilise koosseisu määramist nende kiirgamis- või neeldumisspektrite põhjal. Spektraalanalüüsil on suur tähtsus.

Astronoomias määratakse taevakehade aineeline koosseis ainult nende spektrite põhjal.

Valgusenõrkade taevakehade spektreid uuritakse päevapildistamise teel. Taeva-keha päale juhitakse pikksilm, mis kogub suure objektiiviga tõttu rohkesti valgust selle fookuse kohale asetatud pilu päale. Okulaari asemel kiinnitatakse pikksilma külge pimekamber, milles valgustatud pilust laialiminev valgus langeb prismale ja tekitab spektri päevapildi plaadil. Ilmutatud plaadil on näha vastav spekter.

Füüsikalises optikas näeme, et ainult spektroskoobi abil võib tähele panna ja mõõta taevakehade liikumist vaatamissihis, tähendab, nende lähenemist ja kaugenemist maakerast.

Ka keemias tarvitatakse spektraalanalüütilist meetodit ainete koosseisu määramiseks, olgugi et on selleks olemas teised keemilised meetodid. Juhtudel, kus aine hulk on väga väike, võib veel kasutada seda meetodit; näit. võib veel $\frac{1}{3.000.000}$ mg Na või $\frac{1}{1.000.000}$ mg Li spektri põhjal kindlaks teha. Spektraalanalüüsi abil on ka leitud mitmed uued elemendid (tsääsium, rubiidium, tallium jne).

Spektraalanalüüsi võib kasutada igakord, kui on tegemist aine- lise koosseisu määramisega, näit. toiduainete võltsimise kindlaks- tegemisel, mitmesuguste jäänuste (vere) määramisel kohtu uuri- mistel jne.

Ajaloo. Peeglid olid tuntud vanal ajal. Peegeldumise seadused olevat leiutanud Euklid (Aleksandria linnast, ~ a. 300 e. Kr.); Hero (Aleksandria lin- nast, ~ 100 a. e. Kr.) teadis, et valguse peegeldumisel kiire tee peeglile ja säält vaatleja silma on kõige lühem.

Ka lihtsamad murdumisnähtused olid tuntud vanal ajal. Archimedes teadis (~ 212 e. Kr), et kaldu vaadates veega täidetud anuma põhi paistab kõrgema kui ta on tõelikult. Juba Ptolomäus (~ a. 150) hakkas langemis- ja vst. murdumisnurki mõõtma ja võrdlema. Prillid olid tuntud 13. sajandil. Murdumise seaduse leiutas Willebrord Snell van Rojen (Snellius, 1581 — 1626), kuid laiemas ringkonnas sai seadus tuttavaks Descartes'i raamatu „Dioptrika“ kaudu (a. 1637). Mikroskoop on leiutatud Hollandis ~ a. 1590, hollandi pikksilm ~ a. 1608. Galilei Itaalias sai pikksilma leiutusest kuulda ja ehitas selle iseseisvalt ning valmistas pärast kõige paremad tolaeagsed pikksilmad, millega ta uuris taevakehi. Astronoomilise pikksilma ehitust kirjeldas Kepler ~ a. 1611; esimesena ehitas selle riista Scheiner a. 1615; Scheiner seletas ka, et abiläätsega on võimalik pöörata kujutist päripidiseks. Esimese peegelteleskoobi ehitas Newton a. 1668. Valguse kiiruse määras esimesena Olaf Römer tähetorni assistendina; ta teatas oma leiutusest Pariisi akadeemiale a. 1675, kuid tema leiutust ei tunnustatud tol ajal akadeemia poolt õigeks. Akromaatilised läätsed on tarvitusel ~ a. 1750 alates. Optik Jos. v. Fraunhofer pani tähele a. 1814 päikese spektris tema järele nimetatud jooni ja valmistas tol ajal kõige paremaid optilisi riistu. Alles Kirchhoff'i absorptsiooniseaduse leiutamise järele (a. 1860) oli võimalik seletada Fraunhofer'i joonte tekkimist. Esimesed päevapildid tegi Daguerre a. 1825. Prismabinokli ehituse printsiipi leiutati ~ 1850, kuid unustati hiljem. Prof. Abbe leiutas prismabinokli printsiibi uuesti läinud sajandi lõpu poole ja Zeiss'i tehas hakkas teda ehitama esimesena.

Juan

Füüsikaline optika

Newton'i ja Huygens'i vaade valguse loomu kohta

102. Geomeetiline ja füüsikaline optika. Senini käsitletud nn. geomeetrilises optikas oli nähtuste seletuse aluseks valguse sirgjooneline levimine ühtlases keskkonnas; valguse loomu me seejuures ei puudutanud.

Füüsikalises optikas tehakse kindel oletus valguse loomu kohta ja püütakse seletada kõik valguse nähtused välja minnes sellest oletusest.

103. Emissiooniteooria ja lainetamisteooria. a. Newton'i hüpoteesi järele on valgus aine; valguseallikad kiirgavad valguseaine osakesi. Sellele hüpoteesile on ehitatud valguse **emissiooniteooria**. Valguseaine osakesed levivad suure kiirusega. Silma langedes nad ärritavad nägemiserku ja tekitavad valguseaistingut. Keskkondade lahuspinnale langedes nad pörkavad osalt tagasi nagu elastsed kerakesed ja peegelduvad vastavalt peegeldumisseadustele, osalt tungivad teise keskkonda.

Murdumise seletamine selle teooria järele nõudis muu hulgas, et valguse kiirus optiliselt tihedamas keskkonnas on suurem kui hõredamas.

Murdumise seletamiseks oletas Newton, et ümbritseva keskkonna osakesed valguse osakesi ligi tõmbavad, ja seda tugevamini, mida tihedam on keskkond.

Ühtlases keskkonnas ei takista see valguse osakeste sirgjoonelist liikumist, sest tõmbetungid on tasakaalus. Langeb aga valguseosakene kahe keskkonna lahutuspinna punkti O (joon. 118), siis avaldab sääl tihedam keskkond II suuremat tõmmet, mille tõttu kiirusega OA, mis oli osakesel hõredamas keskkonnas I, tuleb liita lahutuspinna ristis tihedamasse keskkonda sihitud kiirus OB. Kiirust tihedamas keskkonnas kujutab siis sihi ja suuruse poolest OC, ja kiir ligineb tihedamas keskkonnas ristjoonele.

Tähistame kiirused vst, c_1 - ja c_2 -ga, siis leiame kolmnurgast OAC

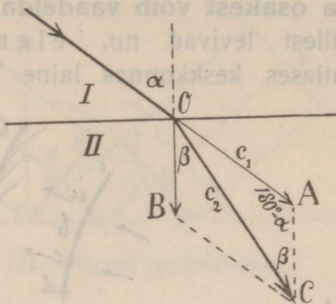
$$c_1 : c_2 = \sin \beta : \sin (180^\circ - \alpha) = \sin \beta : \sin \alpha,$$

tähendab, langemis- ja murdumisnurkade sinuste suhe on jääv (Snellius'e seadus on maksev). Et aga $\alpha > \beta$, siis $c_2 > c_1$, tähendab, valguse kiirus tihedamas keskkonnas selle teooria järele on suurem.

b. Newton'i kaasaeglase Huygens'i hüpoteesi järele on valgus eetri lainetamine, mis levib valguseallikast suure kiirusega. Sellele hüpoteesile on ehitatud valguse **lainetamisteooria**. Silma langedes ärritavad valguse lained nägemiserku ja tekitavad valguseaistingu. Keskkondade lahutuspinna langedes valguse lained osalt peegelduvad nagu teisedki lained, osalt tungivad aga teise keskkonda. Murdumise seletamine selle teooria järele nõuab, et valguse kiirus optiliselt tihedamas keskkonnas on väikesem kui hõredamas (§ 106).

Newton ja Huygens töötasid kaua aega oma teooria kallal ja avaldasid selle 1700. a. ümber. Newton'i autoriteedi tõttu ei leidnud Huygens'i teooria esialgu poolehoidu. Kui pandi tähele, et valgus mõnest tõkkest mööda minnes ka niiõelda ümber nurga tõkkele läheb, nagu vee või heli lained (diffraktsiooni nähtused, § 110), siis seletas Young seda nähtust lainetamishüpoteesi põhjal (~ a. 1810) ja juhtis sellega laiema loodusuurijate ringkonna tähelepanu Huygens'i teooriale. Alles pääle seda, kui Fresnel näitas (a. 1822) katseliselt, et valguse kiirte koosmõjul tekib teatud tingimustel tugevama valguse asemel pimedus (lainete interferentsnähtus § 107), hakati Huygens'i teooriat üldiselt tunnustama. Viimase hoobi saaj Newton'i teooria, kui Foucault (a. 1854) kindlaks tegi, et valguse kiirus on vees vähem kui õhus (tihedamas aines väikesem!).

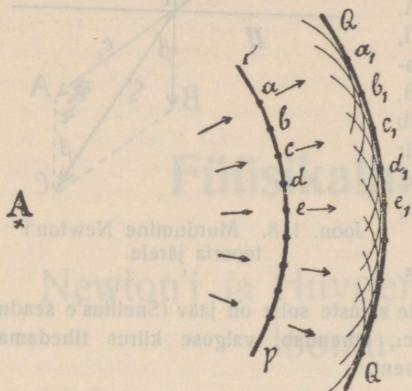
Maxwell'i järele (~ a. 1870) kuuluvad valguse lained nn. elektromagnetiliste lainete hulka, kuid on olemas veel uuemad vaated.



Joon. 118. Murdumise Newton'i teooria järele.

104. Huygens'i printsiip. Valguse levimine. Eetrilaine levimist, mille tekitajaks on hõõguva valguseallika (lainetamis-

tsentri) liikuvad elektronid, seletas Huygens järgmiselt: **laine iga osakest võib vaadelda kui iseseisvat lainetamistsentrit**, millest levivad nn. elementaarained. On näiteks ühtlases keskkonnas laine jõudnud lähtekohast A (joon. 119)

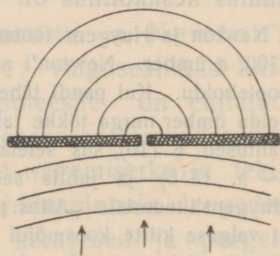


Joon. 119. Huygens'i printsiipt.

kerapinnani PP, siis levivad selle pinna ühesugustes faasides viibivatest punktidest a, b, c, . . . elementaarained. Teatava aja jooksul jõuavad nad kerapindadeni, mille raadiused aa_1 , bb_1 , cc_1 jne. on võrdsed. Kõik kerapindade osakesed võnguvad samades faasides. Matemaatiliselt võib tõendada, et kõikides elementaarlainete lõikepunktides hävineb liikumine interfereerumise tõttu

ja võnguvad ainult (samades faasides) osakesed a_1 , b_1 , c_1 . . . elementaarlainete ühisel puutumispinnal, s. o. kerapinnal QQ, mida me nimetame laine frondiks. Nii siis levib laine front ühtlases keskkonnas kerasarnaselt. On lainetamistsenter küllalt kaugel, siis võib laine fronti lugeda tasaseks. Laine front on laine kiirega (sihiga) alati perpendikulaarne.

Huygens'i printsiiibi selgitamiseks kujutleme vee lainet; läbi kitsa avause muulis ta levib teisel pool muuli ringisarnaselt (elementaaraine joon. 120). On muulis kõrvuti mitu avaust, siis tekib mitmete elementaarlainete interfereerumisel ühine laine front. Avauste arvu piiramatult suurenedes saame elementaarlainete süsteemi, mis annab interfereerumisel hariliku laine (sirgjooneline levimine).



Joon. 120.

105. Peegeldumine Huygens'i printsiiibi põhjal. a. Tasalaine peegeldumine tasapeeglist. Olgu, et kaugest lainetamistsentrist A (joon. 121) tulev tasalaine jõudis tasapinnani PQR; AP, AQ ja AR on selle laine kiired. Seni kui

tähendab, langemis- ja murdumisnurkade sinuste suhe on jääv (Snellius'e seadus on maksev) ja murdumisnäitaja võrdub levimiskiiruste suhtega.

Et $v_1 > v_2$, siis ka $\sin \alpha > \sin \beta$ ja $\alpha > \beta$, tähendab, keskkonnas, milles valguse kiirus on väikesem, ligineb kiir langemisristjoonele. Teame aga, et kiir ligineb ristjoonele tihedamas keskkonnas. Nii siis valguse kiirus tihedamas keskkonnas on väikesem.

Keralaine murdumist tasasel lahutuspinnaal, tasa- ja keralaine murdumist tasaparalleelses plaadis, prisma ja läätsedes võib ehitada ka Huygens'i printsipi põhjal.

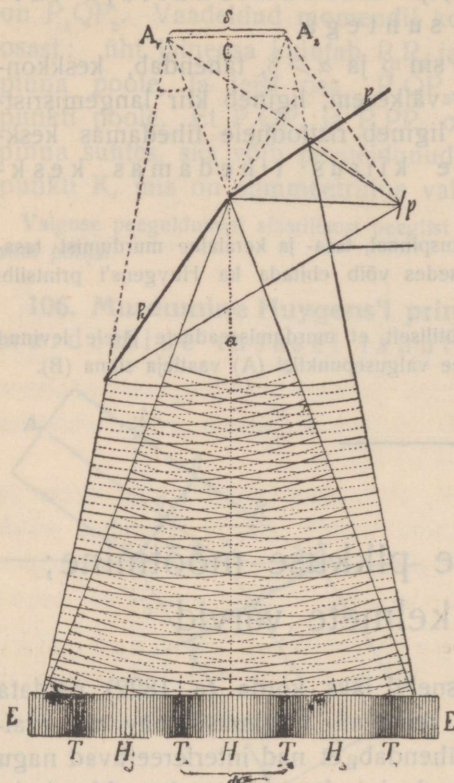
1. Tõesta geomeetriselt ja analüütiliselt, et murdumisseaduste järele levinud kiir kõige lühema ajaga käib ära tee valgusepunktist (A) vaatleja silma (B).

Interferents; laine pikkuse mõõtmine; õhukeste kelmete värvid

107. Interferents. a. Fresnel'il läks korda (a. 1822) näidata katseliselt, et valguse kiired teatavil tingimusil hävivad (valgus + valgus = pimedus), tähendab, et nad interfereeruvad nagu teisedki lained. Et võimalik pole interferentskatse korraldamiseks leida kaht valguseallikat (A_1 ja A_2 joon. 124), mis igal silmapilgul saadaksid välja amplituudi ja faasi poolest täiesti ühesuguseid laineid, siis kasutas Fresnel oma peeglikatses valguseallikatena sama valguseallika ebakujutisi kahes tasapeeglis järgmiselt: ta juhtis (joon. 124) tugeva monokromaatilise valguse läbi pilu P nurkpeeglile P_1P_2 , mille nurk oli ligi 180° . Siis peegeldusid kaks lainete süsteemi nii, nagu oleksid nende lähtekohtadeks pilu ebakujutised A_1 ja A_2 ; et peeglid moodustasid peaaegu tasapinna, siis olid A_1 ja A_2 teineteise ligidal. Kaugel ekraanil EE ilmusid paralleelsed vaheldumisi heledad ja tumedad ribad.

Pärastistes katsetes tarvitas Fresnel nurkpeegli asemel võrdta-hulist laia alusega prisma, nn. interferentsprisma, mille

murdja nurk oli ligi 180° . Nagu näha joonisest 125, muudavad



Joon. 124. Fresnel'i peeglikatse.

harjad (või tihendused), punkteeritud kaared põhjad (või hõrendused); kui arvesse võtta kaugused lähtekohtadest, siis $A_1T_2 - A_2T_2 = A_2T_1 - A_1T_1 = \text{jne.} \dots = \lambda/2$. Kohtadest T_1, T_2 jne. kõrvale minnes on valgustus seda tugevam, mida rohkem lainete käiguvahe lahku läheb poollaine pikkusest, ja kohtades H, kus käiguvahe on O (või poollaine pikkuse paarisarv), on ekraan hele.

Katset tehes mitmesuguste värviliste kiirtega leidis Fresnel, et ribade vahed on näit. violett-

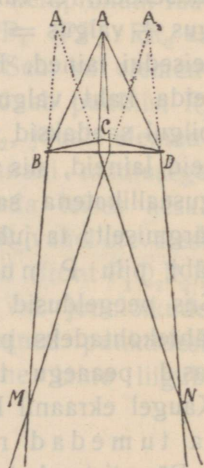
samast allikast A väljaminevad kiirte kimbud murdumisel prismas oma sihi nii, et ühe osa lähtekohaks võib lugeda punkti A_1 ja teise osa lähtekohaks punkti A_2 . Tingimused on täiesti samad kui Fresnel'i nurkpeegli juures, ja ekraanil ilmuvad M ja N vahel samasugused ribad kui peeglikatsetses.

Tumedate ribad T_1, T_2 jne. tekkimist võib seletada ainult sellega, et sääl mõlemate interfereeruvate lainete süsteemide käiguvahe võrdub poollaine pikkusega (või selle paaritu mitmekordsega), mille tõttu lained hävivad. Seda võib jälgida

joonises 124, kus siledad kaared on laine

harjad (või tihendused), punkteeritud kaared põhjad (või hõrendused); kui arvesse võtta kaugused lähtekohtadest, siis $A_1T_2 - A_2T_2 = A_2T_1 - A_1T_1 = \text{jne.} \dots = \lambda/2$. Kohtadest T_1, T_2 jne. kõrvale minnes on valgustus seda tugevam, mida rohkem lainete käiguvahe lahku läheb poollaine pikkusest, ja kohtades H, kus käiguvahe on O (või poollaine pikkuse paarisarv), on ekraan hele.

Katset tehes mitmesuguste värviliste kiirtega leidis Fresnel, et ribade vahed on näit. violett-



Joon. 125. Interferentsprisma.

kiirte puhul väikesemad kui punaste puhul. Sellest peab järeldama, et violettkiirte lained on lühemad kui punaste omad. Valge valguse puhul olid ribad värvilised. See on arusaadav, sest valges valguses peituvad värvid ei hävi interfereerumisel samadel kohtadel, ja iga koht paistab sääl hävinud värvi täendusvärvis.

b. Peeglikatse põhjal määras Fresnel (trigonomeetriliselt) üksikute värviliste kiirte lainete pikkused, kuid praegu tarvitatakse selleks hõlpsamaid meetodeid (§ 111). Ta leidis, et äärmiste nähtavate punaste **kiirte lainepikkused** (δ hus) on ligi **800 $\mu\mu$** (0,000800 mm) ja äärmiste nähtavate violettkiirte omad ligi **400 $\mu\mu$** .

Järgnevas tabelis on antud silmapaistvamate Frauenhofer'i joontele vastavate värviliste kiirte lainepikkused millimikronites:

A	D	E	F	G	H
$\lambda = 759 \ 590 \ 527 \ 486 \ 431 \ 397 \ \mu\mu$					

On korda läinud mõõta ka infrapunaste ja ultravioletsete kiirte lainepikkusi ja kindlaks teha, et ühes mittenähtavate kiirtega ulatavad päikese spektri kiirte lainepikkused $\sim 2800 \mu\mu$ kuni $\sim 300 \mu\mu$.

Helide reaga võrreldes kujutab spektri nähtav osa ainult ~ 1 oktaavi, päikese spekter ühes mittenähtavate osadega pisut üle kolme oktaavi. Maapäälsetest kiirgavatest kehadest on kindlaks tehtud palju pikemat infrapunaste kiirte ja lühemad ultravioletsete kiirte lained, kokkuvõttes ~ 11 oktaavi.

1. Arvuta eelpooltoodud andmete põhjal äärmiste

a) nähtavate kiirte võnkearvud,

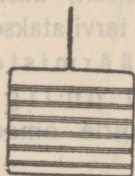
b) mittenähtavate päikese kiirte võnkearvud.

108. Doppler'i efekt. Nagu heliallika ja kuulaja vastastikuse kauguse suurenemisel või vähenemisel muutub kuulaja kõrva langevate helilainete arv sekundis ja vastavalt heli kõrgus (§ 19), nii peavad ka valguseallika ja vaatleja vastastikuse kauguse muutumisel muutuma sekundis vaatleja silma langevate valguse lainete arvud ning ühes sellega valguse värv. Värv muutumine võib ainult siis olla tunduv, kui liikumise kiirus on valguse kiiruse kohta küllalt suur. Niisuguste suurte liikumiskiirustega on meil tegemist ainult taevakehade liikumiste juures.

Meie nägemisorgan ei ole küllalt värvitundlik, et tähele panna valguse värvitooni väikesi muudatusi, küll aga on mõõtmise teel kindlaks tehtud, et mõne taevakeha spektris spektraaljooned (näit. kõik vesiniku jooned) ei asu samal kohal võrreldes päikese spektriga, vaid on kõik sama palju nihkunud kas spektri violetse või punase otsa poole (kuhu poole taevakeha liginemisel või kaugene-misel?). Nii siis Doppler'i efekt tekib ka valguse juures.

Astronoomias mõõdetakse niisugusel juhul spektraaljoonte kõrvalenihkumise suurus ja arvutatakse sellest kiirus, millega taevakeha läheneb maakerale või kaugeneb temast. See spektraalanalüütiline liikumise määramise meetod on iseäranis tähtis, sest pole võimalik teisel teel taevakeha liikumist vaatamissihis määrata ega üldse tähele panna.

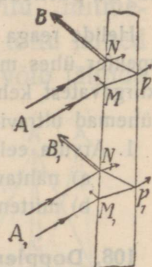
109. Õhukeste kelmete värvid. Värvitute ainete õhukesed kihid paistavad sagedasti värvilistena, näit. seebimullid, õhuke õlikiht vee pinnal, õhuke õhukiht jää või klaasi praos jne. Niisuguseid värve nimetame õhukeste kelmete värvideks.



Joon. 126.
Interferents-
ribad õhukesel
kelmel.

a. Hoiame traatvõru seebivee kelme ga vertikaalselt monokromaatilise leegi (naatriumi) valguses. Valgustatud kelme pinda valguse allika poolt vaadeldes näeme horisontaalseid paralleelseid vaheldumisi heledaid ja tumedaid ribasid (joon. 126).

Nähtust seletame järgmiselt: kelme läbilõige on kiilu sarnane (joon. 127), sest kelme kiht on allapoole paksem (mispärast?). Peegeldub langeva kiire AN osa kelme esipinnast sihis NB, siis leidub mõni teine kiir AM, mille üks osa läheb murdumise (kahekordse) ja sisepeegeldumise järele (kelme tagaseinast) samas sihis NB. Mõlemate sihis NB minevate kiirte tee pikkused ei ole ühesugused; sedaviisi tekib käiguvahet, mille suurus oleneb kelme kihi paksusest ja ka kiirte langemisnurgast. Kelme kohtadel, kus käiguvahet võrdub valguse poollainete pikkuse paarituuruga, hävib valgus interfereerimisel. Kohad, kus käiguvahet on poollainete pikkuse paarisarv, on heledad. Et kelme kihi paksus on samal horisontaalpinnal ligikaudu ühesugune, suureneb aga ülalt allapoole, siis ilmuvad vaheldumisi heledad ja tumedad horisontaalsed ribad. Monokromaatilise punase valguse puhul on ribade kaugus suurem kui violetse valguse puhul (mispärast?).



Joon. 127.
Interferents-
ribade tekkimine
õhukesel kel-
mel.

Kui valgustada kelmet valge valgusega, siis on ribad mitmevärvilised. See on arusaadav, sest kelme

igal kohal hävib kihi paksusele ja kiirte langemisnurgale vastavalt teatav värv ja koht paistab hävinud värvi täiendusvärvis.

Mispärast muutuvad õhukese õlikihi värvid veepinnal?

b. Vaadeldes seebivee kelmet monokromaatilises valguses vastu valguseallikat, näeme ka vaheldumisi heledaid ja tumedaid ribasid, mis tekivad kelmest läbiläinud valguse interferentsi tõttu.

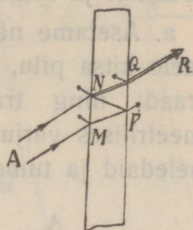
Seleta joon. 128 järele sihis QR interfereeruvate kiirte käiku ja ribade tekkimist.

Mispärast on läbiläinud valguses interferentsnähtused nõrgemad?

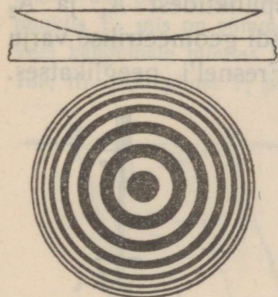
c. Newton'i rõngad. Asetame lameda prilliklaasi (0,25 dioptrit) peegelklaasi tükile ja valgustame ta monokromaatilise valgusega (joon. 129). Me näeme vaheldumisi heledaid ja tumedaid kontsentrilisi rõngaid, mis tekivad interfereerumise tõttu õhukeses plaadi ja läätselise vahelises õhukihis. Et interferentsribad moodustavad kontsentrilised rõngad, on arusaadav, sest ühepaksused õhukihid, mille suhtes kiirte käiguvahe võrdub poollaine pikkuse paarituarvuga, asuvad kontsentriselt ümber läätselise ja plaadi puutumispunkti. Esimesena tekitas neid rõngaid Newton ja tarvitas selleks tasakumerläätselise (joon. 129). Newton'i rõngaid kasutati ka lainepikkuse määramiseks.

Kuidas muutuvad rõngaste vahed, kui tarvitada monokromaatilise punase valguse asemel sinist?

Kuidas paistavad rõngad valges valguses?



Joon. 128. Interferentsribade tekkimine õhukesel kelmel.



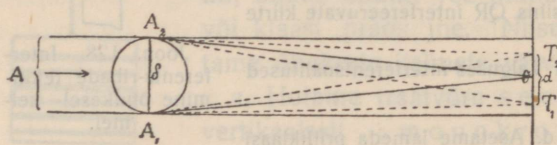
Joon. 129. Newtoni rõngad.

Diffraktsioon

110. **Diffraktsiooni nähtused.** Pikema sadamamuuli taha ei pääse merelained, muul varjab sadamat, kuid siiski painduvad vee lained ümber muuli ääre. Ümber kitsama tõkke äärte aga pääsevad lained peaaegu takistamata tõkke taha. On valgus lainetamine, siis peavad ka valguse kiired painduma ümber

tõkke ääre. Niisugune valguse paindumine ümber tõkke sünnib tõelikult ja nimetatakse valguse **diffraktsiooniks**.

a. Asetame näiteks monokromaatiliste paralleelsete kiirte kimbu teele kitsa pilu, paralleelselt pilule (paari m kaugusel) peenikese traadi ning traadi taha ekraani, siis näeme traadi geometrilises varjus (s. o. § 36 järele puutujate abil ehitatud varjus) heledaid ja tumedaid ribasid. Geomeetrilise varju keskkohas on hele riba. Ribade vahed on suuremad



Joon. 130. Diffraktsioon peene traadi juures.

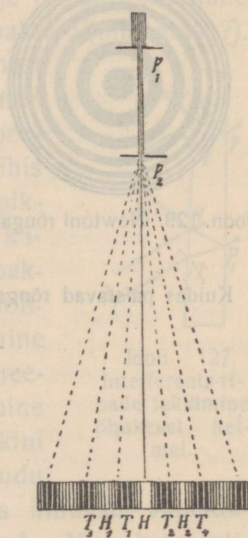
Nähtus on seletatav sellega, et puutumispunktidest A_1 ja A_2 (joon. 130) levivad elementaarained ka traadi geometrilise varju piirkonda; sääl nad interfereeruvad nagu Fresnel'i peeglikatses. Varju keskel punktis O on kiirte käiguvahe $A_1O - A_2O = 0$ ja sääl tekib hele riba; punktis T_1 on käiguvahe $A_2T_1 - A_1T_1 = \frac{\lambda}{2}$ ning sääl tekib tume riba jne.

Kirjeldataud nähtus võimaldab ka valguselaine pikkuse määramist.

b. Asetame monokromaatiliste paralleelsete kiirte kimbu teele pilu p_1 taha teise hästi kitsa pilu p_2 (joon. 131), siis näeme ekraanil mõlemal pool heledat riba H paralleelseid vaheldumisi tumedaid ja heledaid ribasid. Kaugemal keskmisest ribast H on heledad ribad nõrgemad. Kui teeme pilu p_2 kitsamaks, siis nihkuvad ribad üksteisest kaugemale. Valge valguse puhul on ribad värvilised. Ka siin interfereeruvad pilu p_2 punktidest geomeetrilisse varju langevad elementaarained.

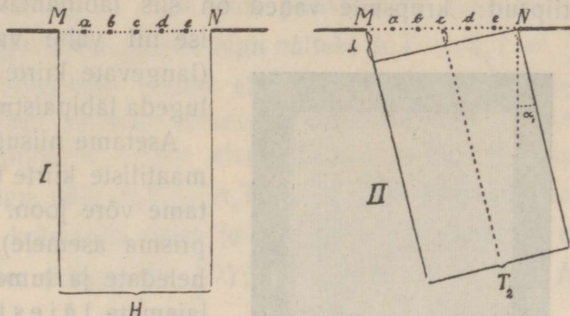
Nähtuse seletamiseks kujutame pilu p_2 suurendatud kujul. Olgu MN (joon. 132) pilu p_2 kujutis. Pilu punktid a, b, c, d, e on ühesugustes võnkumisaastades. Nad mõjuvad Huygens'i printsibi põhjal elementaarlainete tsentritena ja elementaarained lagunevad pilu taga igas sihis laiali.

Sihis $cH \perp MN$ (joon. 132, I) jõuavad elementaarained punkti H sama faasiga (ekraan on pilu laiusega võrreldes väga kaugel), järelikult on ekraanil H



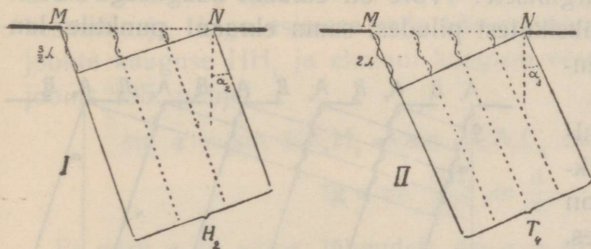
Joon. 131. Diffraktsioon kitsa pilu juures.

kohal hele riba. — Punktis H lähedal leiame punkti T_2 , mille suhtes äärkiirte käiguvähe $MT_2 - NT_2 = \lambda$ (joon. 132, II). Kui pilust sihis cT_2 mineva kiirte kimbu poolitame, siis näeme, et kimbu igast ühel poolel asuvast punkti (näit. e) väljaminevale elementaarlainele vastab kimbu teisel poolel asuvast punkti (b) väljaminev elementaar-



Joon. 132. Diffraktsioon kitsa pilu juures.

laine nii, et käiguvähe on $\frac{\lambda}{2}$ ($bT_2 - eT_2 = \frac{\lambda}{2}$). Interfereerumisel hävitab kiirte kimbu üks pool teise poole täiesti ja T_2 kohal ekraanil on tume; samuti ka punktis T_1 , mis on sümmeetriline punktiga T_2 punkti H suhtes. — Punktis H veel kaugemale minnes leiame punkti T_4 , mille suhtes $MT_4 - NT_4 = 2\lambda$ (joon. 133, II). Kui pilust T_4 poole leviva kiirte kimbu neljaks jagame, siis näeme, et mõlemad kimbu pooled eraldi hävi-



Joon. 133. Diffraktsioon kitsa pilu juures.

vad. — Nii edasi harutades leiame, et tumedad on kõik need T kohad, mille suhtes pilu äärtest tulevate elementaarlainete käiguvähe $MT - NT$ või $NT - MT$ on λ , 2λ , 3λ jne.

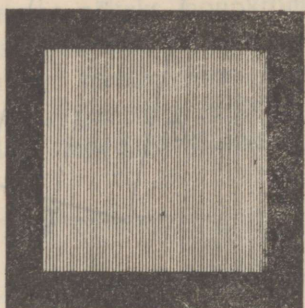
Et punktide T vahel elementaarlained ei hävi ja sääl valgus valitseb, on arusaadav. Et näit. punktis H_2 , mille suhtes $MH_2 - NH_2 = \frac{3}{2}\lambda$ (joon. 133, I), on hele, seda näeme, jagades kiirte kimbu kolmeks võrdseks osaks; kaks kõrvutiseisvat osa häviavad interfereerumisel (äärkiirte käiguvähe on λ), kuna kolmas osa valgustab punkti H_2 .

Ka seda nähtust võib kasutada valguselaine pikkuse määramiseks.

111. Diffraktsioonvõre; valguselaine pikkuse määramine.

a. Nimetame **diffraktsioonvõreks** väga kitsaste paralleelsete pilude süsteemi, milles pilude vahed on võrdsed ja väga väikesed (joon. 134). Niisugune võre tehakse näiteks järgmiselt: klaasplaadile

lõigatakse isesuguse aparadi abil võrdsete vahedega paralleelsed kriipsud; kriipsude vahed on siis läbinähtavad, kuna kriipsud ise nii vähe valgust läbi lasevad (langevate kiirte sihis), et neid võib lugeda läbipaistmatuteks.



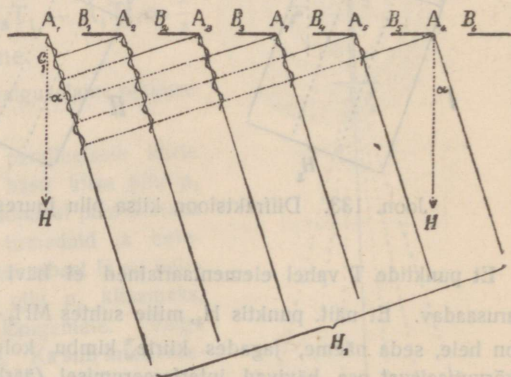
Joon. 134. Diffraktsioonvõre.

Asetame niisuguse võre monokromaatiliste kiirte tee (tegelikult asetame võre joon. 72 kujutatud katses prisma asemele), siis saame ekraanil heledate ja tumedate ribade asemel laiemate täiesti tumedate vahedega eraldatud teravad heledad jooned. Vahed on punase valguse puhul (joon. 136, P) laiemad kui violetse valguse puhul

(136, V). Valge valguse puhul tekivad värvilised ribad.

Valgustatud joonte ja tumedate vahede tekkimist seletame joonis 135. abil järgmiselt: Võre on ekraani kaugusega võrreldes nii kitsas, et üksikutest piludest sama ekraani punktile langevaid kiiri (elementaarlainete sihte)

võib lugeda paralleelseiks. Pilude üksikud punktid on ühesugustes faasides. Langevate kiirte sihis punktis H on ekraan valgustatud, sest elementaarlained jõuavad punkti H ilma käiguvaheta. Joonisest näeme, et ka kõik sihis A_1H_1 ekraanile langevad elementaarlained jõuavad punkti H_1 ilma käiguvaheta ($A_1H_1 - A_2H_1 = \lambda$), sellepärast on H_1 valgustatud. Samuti on valgustatud punktiga H_1 punkti H suhtes sümmeetriline punkt. Üldse on valgustatud kõik punktid H_n , mille suhtes kahe naaberpilu samapoolsetest äärtest tulevate elementaar-



Joon. 135. Interferents diffraktsioonvõres.

lained jõuavad punkti H_1 ilma käiguvaheta ($A_1H_1 - A_2H_1 = \lambda$), sellepärast on H_1 valgustatud. Samuti on valgustatud punktiga H_1 punkti H suhtes sümmeetriline punkt. Üldse on valgustatud kõik punktid H_n , mille suhtes kahe naaberpilu samapoolsetest äärtest tulevate elementaar-

lainete käiguvähe on $2\lambda, 3\lambda$ jne. ($A_1H_n - A_2H_n$ või $A_2H_n - A_1H_n$ on $2\lambda, 3\lambda$ jne.), sest nendes punktides interfereeruvad võrdsed lained ilma käiguvaheta. — Iga teine punktide H vaheline ekraani koht T on aga täiesti tume: olgu näiteks $A_1T - A_2T = \frac{1}{2}\lambda$, siis hävivad kõrvuti olevate pilude elementaarlained paarikaupa, sest antud pilu igast punktist minevale elementaarlainele vastab naaberpilu ühest punktist minev elementaarlane nii, et käiguvähe on $\frac{1}{2}\lambda$; olgu näit. $A_1T - A_2T = \frac{1}{4}\lambda$, siis hävivad paari-kaupa esimese ja kolmanda, teise ja neljanda pilu punktide elementaarlaineid jne. (käiguvähe $\frac{1}{2}\lambda$); on käiguvähe $A_1T - A_2T$ näit. $\frac{1}{10}\lambda$, tähendab, esimese ja kümnenda pilu elementaarlainete käiguvähe on λ , siis hävivad esimese ja kuuenda, teise ja seitsmenda pilu punktide elementaarlained (käiguvähe $\frac{1}{2}\lambda$) jne. Nii siis on heledate joonte vahed täiesti tumedad, kuna jooned on teravad ja ka heledad, sest läbi võre pääseb rohkesti valgust.

b. Diffraktsioonvõrega võib kõige hõlpsamalt ja täpsemalt määrata valguslaine pikkust. Tähdname H-ga keskmise ja H_1 -ga esimese selle kõrval oleva heleda joone, d-ga joonte kauguse HH_1 ja ekraani kauguse võrest a-ga, siis saame joonis 135. põhjal

$$\sin \alpha = \sin HA_1H_1 = \sin A_1A_2C_1 = \frac{A_1C_1}{A_1A_2} = \frac{\lambda}{A_1A_2}$$

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{HH_1}{A_1H} = \frac{d}{a}.$$

Et nurk α on väike, tähendab, $\sin \alpha = \operatorname{tg} \alpha$, siis

$$\frac{\lambda}{A_1A_2} = \frac{d}{a}.$$

Kui on teada antud võre suhtes kaugus $A_1A_2 = A_2A_3 = \dots = b$, mida nimetatakse võre konstandiks, siis võime laine pikkuse määrata valemi põhjal

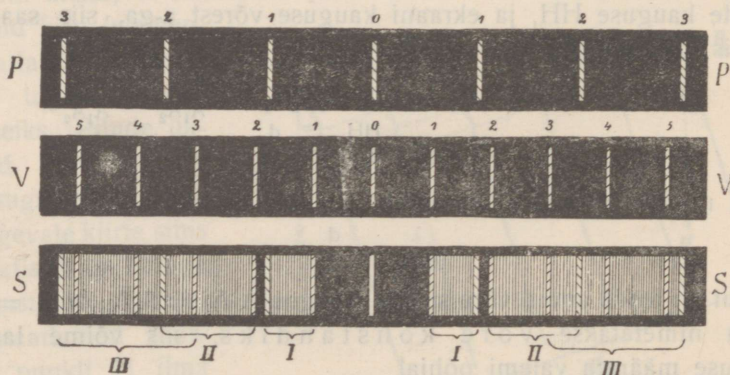
$$\lambda = \frac{bd}{a}.$$

Nagu valemist näha, on antud valguse ja ekraani kauguse juures diffraktsioonjoonte kaugus d seda suurem, järelikult mõõtmise seda täpsem, mida väikesem on võre konstant b. Täpsemate mõõtmiste jaoks on korda läinud valmistada võresid, kus ühe mm ulatusel on tõmmatud 1700 kriipsu.

1. Võre konstant on 0,1 mm, ekraani ja võre kaugus teineteisest 3 m, kollase valguse puhul heledate joonte kaugus $HH_1 = 1,8$ cm. Leia kollase valguse laine pikkus.

112. Normalspekter. Laseme võrele langeda monokromaatilise valguse asemel valge valguse, siis näeme ekraanil värvilise pildi, mis tekib järgmiselt: valges valguses peituvad punased kiired annavad oma jooned isekohal (joon. 136, P), violetsed kiired isekohal (joon. 136, V); teiste värviliste kiirte jooned ilmuvad nende joonte vahel spektri värviliste kiirte järjekorras. Nii siis tekivad valge valguse puhul spektrid (joon. 136, S). Esimene spekter ulatub violetsest joonest 1 kuni punase jooneni 1 ja on joonises S tähendatud I-ga; teine ulatub violetsest joonest 2 kuni punase jooneni 2 ja on joonises S tähendatud II-ga jne. Kuna esimene spekter I on puhas, langevad järgmised spektrid, näit. II ja III, osalt ühte ja tekitavad segavärve.

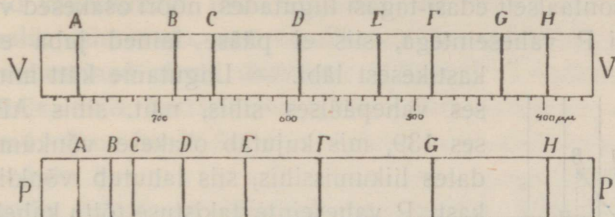
Väikese konstandiga võred annavad laia esimese spektri, milles puuduvate (neeldunud) värviliste kiirte asemel on näha teravad tumedad jooned. Niisuguseid võresid tarvitatakse spektrite uurimisel prisma asemel.



Joon. 136. Diffraktsioonvõre abil saadud jooned ja spektrid.

Viimasest lainepikkuse valemist (§ 111) näeme, et värviliste kiirte joonte kaugused (d) on võrdelised nende kiirte lainepikkustega (λ); sellest järgneb, et võre abil saadud spektris üksikud värvid on jaotatud võrdeliselt värviliste kiirte lainepikkustega. Prismaga saadud spektris ei ole värvide jaotus võrdeline

värviliste kiirte lainepikkustega, punane spektri ots on violetse otsaga võrreldes nagu kokku surutud. Seda näeme joonises 137,



Joon. 137. Fraunhofer'i joonte jaotus võre ja prisma abil saadud spektrites.

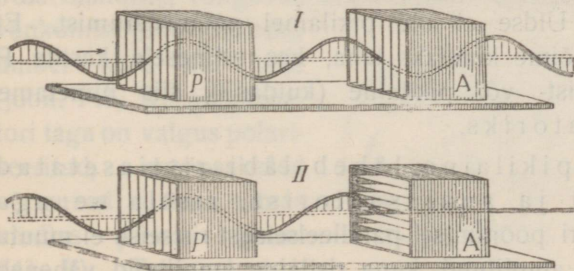
kus V kujutab Fraunhofer'i joonte jaotust võre abil saadud spektris ja P kujutab sama joonte jaotust prisma abil saadud spektris. Näeme näiteks, et kollane värv (Na joon D) võrega saadud spektris asub ligikaudu spektri keskel, prisma abil saadud spektris punase otsa ligidal. Võre abil saadud spektrid nimetatakse **normaalspektriteks**.

Diffraktsiooniga on seletatav värvide tekkimine, kui vaadata läbi linnu sule või silmaripsmete heleda valguseallika pääle.

Diffraktsioon tekib ka siis, kui valgus peegeldub pinnast, milles on mingisused üksteisele väga ligidal seisvad jooned. Niisuguse diffraktsiooniga on seletatav perlmutri, putukate ja peenikese siidriide värvide mäng.

Polarisatsioon

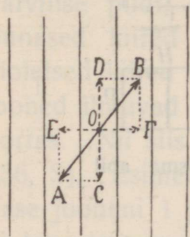
113. Ristlaine polarisatsioon. Võtame kaks lahtise otsaga kastikest, milles on tehtud riulisarnased vaheseinad (joon. 138),



Joon. 138. Polarisatsiooni mudel.

tõmbame läbi vaheseinte nõori ja tekitame käega ristlaineid. Liigutame kätt üles-alla, siis võnguvad nõori osakesed vastavalt joonisele paralleelselt kasti P

vaheseintega ja lained lähevad tast takistamata läbi; seisus I nad lähevad läbi ka teisest kastikesest A, seisus II aga mitte. — Paneme, kätt horisontaalselt edasi-tagasi liigutades, nõõri osakesed võnkuma risti kasti P vaheseintega, siis ei pääse lained juba esimesest



Joon. 139. Ristlaine lahutamine.

kastikesest läbi. — Liigutame kätt mingisuguses vahepäälses sihis, näit. sihis AB joonis 139, mis kujutab osakese võnkumist vaadates liikumissihis, siis lahutub võnkliikumine kasti P vaheseinte takistuse tõttu kaheks teineteisele risti sihitud komponendiks. Kastikesest P läheb läbi ainult komponentlaine CD, mille osakesed liiguvad vaheseinte sihis; ta pääseb ka läbi teisest kastist A seisus I, kuid mitte seisus II. — Liigutame kätt mitmesuguses sihis, näit. üles-alla, paremalt pahemale

poole, nende vahepäälses sihtides, ringi jne., siis tekib käe ja kasti P vahel keeruline ristlaine, mille üksikud võnkuvad osakesed muudavad alata oma võnkumissihiti. Kastikesest P läheb ristlaine läbi, kuid läbiläinud laines võnguvad osakesed ainult P vaheseinte sihis. Niisuguse keerulisema ristlaine muutumist lihtsamaks ristlaineiks, mille osakesed võnguvad ainult samas läbi laine kiire minevas tasapinnas, nimetame laine **polarisatsiooniks**; kastikesest P, mis polariseerib keerulisemat ristlainet, nimetame polarisaatoriks ja polarisaatorist läbiläinud lainet, mille osakesed võnguvad ühes kindlas tasapinnas, polariseerituks. Kastikeses P polariseeritud ristlaine läheb takistamata läbi kastikesest A, kui P ja A vaheseinad on paralleelsed, ei pääse aga läbi, kui vaheseinad on risti.

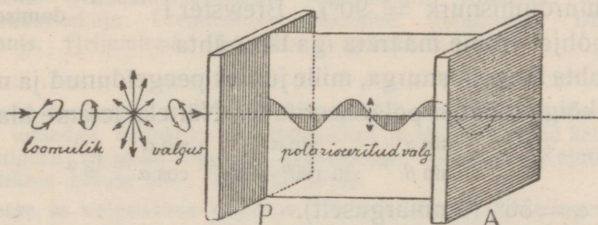
Pikilaine pääseb läbi mõlematest kastikesest takistamata igas kastikeste seisus. Üldse ei ole pikilainel polariseerumist. Et teise kasti A abil võime kindlaks teha, kas esimesele kastile P langev laine oli rist- või pikilaine (kuidas?), siis nimetame kasti A analüsaatoriks.

Peame meeles: pikilaine läheb läbi ristiasetatud polarisaatorist ja analüsaatorist, ristlaine aga mitte; analüsaatori pöörämisel paralleelseisust ristseisu ei muutu läbiläinud pikilaine amplituud, kuna ristlaine amplituud väheneb nullini.

114. Valguse polarisatsioon. a. Senini käsitletud valguse nähtusi võib seletada niihästi piki- kui ka ristlainetamisega. Kas-tisarnaseid vaheseintega riistu valguselainete loomu uurimiseks ei ole võimalik valmistada, sest üliväikesele lainepikkusele vastavalt peaksid vaheseinad olema üksteisele üliligidal. Looduses leiame aga kristalle, mille korrapärane molekulaarne ehitus on niisugune, et me neid võime tarvitada polarisaatoritena ja analüsaatoritena.

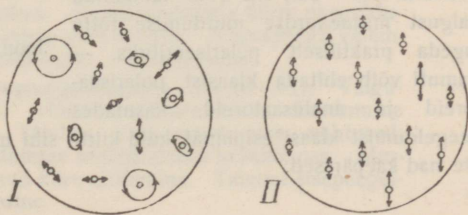
Võtame kaks turmaliiinikristallist tasaparalleelset plaadikest, mille tahud on lõigatud paralleelselt kristalli teljega. Tekitame kitsa paralleelkiirte kimbu abil ekraanil heleda täpi. Asetame ühe turmaliiniplaadi kiirte tee, siis tumeneb täpp, sest turmaliin ei ole hästi läbipaistev (värviline), kuid täpp jääb plaadi pööramisel muutmatuks. Järelikult ei ole plaadile langev valgus polariseeritud, ta võiks olla kas piki- või polariseerimatu ristlainne.

Asetame esimese plaadi taha teise nii, et nende teljed oleksid paralleelsed, siis muutub täpp ekraanil neeldumise tõttu veel tumedamaks. Pöörame aga teist plaati, siis muutub täpp ikka tumedamaks ja on täiesti tume, kui plaadid on telje sihtidega risti (joon. 140). Sellest järeldame: **valgus on ristlainetamine.**



Joon. 140. Valguse polarisatsioon turmaliiniplaadis.

Loomulikus valguses, mis langeb esimesele plaadile P, polarisaatorile, võnguvad eetriosakesed igas sihis, nagu pöörduks võnkumise pind ülikiiresti ümber kiire kui telje (joon. 141, I); polarisaatori taga on valgus polariseeritud, eetriosakesed võnguvad alatasasamas kindlas pinnas (joon. 141, II). Teine plaat A mõjub kui analüsaator.



Joon. 141. Võnkumine loomulikus ja polariseeritud kiirte kimbus.

Vaatame läbi ühe turmaliiniplaadi vastu taevast, siis ei muutu valgus plaadi pööramisel. Vaatame aga läbi kahe plaadi, siis muutub valgus ühe plaadi pööramisel ja läbi telgedega risti asetatud plaatide me valgust ei näe.

b. Vaatame läbi ühe turmaliiniplaadi päikese kiirtes läikivale vee pinnale, siis võime tähele panna, et plaadi pööramisel valgus heleneb ja tumeneb, kuid täiesti ei kao. Me järeldame, et peegeldunud valguses on osa kiiri polariseerunud. Võib näidata, et valguse murdumisel kahe keskkonna lahutus-pinnal murdunud valgus on ka osalt polariseerunud, kuid vähem kui peegeldunud valgus.

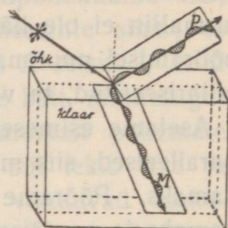
Joon. 142 näitab, missuguses pinnas suuremalt jaolt võnguvad eetriosakesed peegeldunud ja murdunud valguses.

Brewster uuris seda nähtust ja leidis, et peegeldunud ja murdunud valguse osa on kõige rohkem polariseerunud siis, kui kiired langevad nii, et kiirte peegeldunud ja murdunud osad moodustavad täisnurga (langemisnurk + murdumisnurk = 90°). Brewster'i seaduse põhjal võime määrata iga läbinähtava aine kohta langemisnurka, mille juures peegeldunud ja murdunud kiired on kõige rohkem polariseeritud. Näiteks leiame klaasi kohta

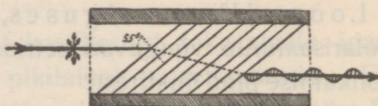
$$\frac{3}{2} = n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin (90^\circ - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha$$

ja sellest $\alpha = 56^\circ$ (ümmarguselt).

Turmaliiniplaatide asemel tarvitatakse ka klaaspolarisaatoreid ja -analüsaatoreid, mis koosnevad üksteise ligi asetatud klaasplaatidest (joon. 143). Kui võtta mitu plaadikest ja langevate kiirte langemisnurk on $\sim 56^\circ$, siis võib läbiläinud valgust mitmekordse murdumise tõttu lugeda praktiliselt polariseerituks. — Samuti võib ehitada klaasist polarisaatoreid ja analüsaatoreid, kasutades peegeldumist klaasi esipinnal, kuid kiirte sihi muutumise tõttu peegeldumisel ei ole nad käepärased.



Joon. 142. Polarisatsioon peegeldumisel ja murdumisel.



Joon. 143. Polarisatsioon klaasplaatide kihis.

Sisu

HääI

lhk.
3

Pendli ja elastse keha võnkumine (lhk. 3—4). Pendli võnkumine. Pendli seisumääramine. Elastse keha võnkumine.

Lainetamine (lhk. 5—11). Ristlaine tekkimine ja ehitamine. Ristlaine periood, võnkearv, amplituud, pikkus ja kiirus. Ristlainete interferents. Ristlaine peegeldumine. Seisvad ristlained. Pikiaine. Pikilaine tekkimine õhus. Piki- ja ristlainete tekkimise tingimused.

HääI lainetamisnähtusena (lhk. 12—15). HääI tekkimine ja levimine. HääI levimiskiirus. HääI tugevus. HääI peegeldumine. HääI interferents.

Helid ja heliredelid (lhk. 16—19). Heli võnkearv. Normaal-a. Kuulmisaistingu piirid. Doppleri efekt. Heliredelid. Tempereritud heliredelid.

Heliallikad (lhk. 20—22). Keel. Helihark. Plaat. Õhusõnnas.

Resonants; kõIa analüüs; ülemtoonid (lhk. 23—28) Resonants. Õhusõnnas resonants. KõIa analüüs. KõIavärv. Keele võnkumiskuju. Ülemtoonide tekkimine. Konsonants. Dissonants. Heljumised. Fonograaf ja grammofon.

Valgus

29

Valguse levimine; varjud; kiirus (lhk. 29—33). Helenevad ja tumedad, läbinähtavad, läbipaistvad ja läbipaistmatud kehad. Valguse levimine ühtlases keskkonnas. Varjud. Kujutised väikese avause abil. Valguse kiirus.

Valguse ja valgustuse tugevus (lhk. 34—36). Valguse tugevus. Valgustuse tugevus. Valgustuse seadused. Valguse tugevuse mõõtmine.

Valguse peegeldumine tasapinnast (lhk. 37—39). Peegel ja peegeldumine. Peegeldumisseadused. Homotsentriliste kiirte peegeldumine tasapeeglist. Kujutised tasapeeglist.

Peegeldumine sfäärilistest peeglitest (lhk. 40—45). Nõguspeegel. Nõguspeegli fookus. Homotsentriliste kiirte peegeldumine nõguspeeglist. Valgusepunkti kujutis. Nõguspeegli valem. Kujutiste ehitamine nõguspeeglist. Kumerpeegel.

Murdumine ja täieline sisepeegeldumine (lhk. 46—51). Valguse murdumise nähtused. Homotsentriliste kiirte murdumine tasasel lahutuspinnaI. Täielise sisepeegeldumise nähtused. Murdumine ja sisepeegeldumine mitteühtlases keskkonnas. Murdumisseadused. Murdunud kiire ehitamine. Täielise sisepeegeldumise piirnurga arvutamine.

Murdumine tasapinnalistes kehaes (lhk. 52—54). Tasaparalleelne plaat. Aine suhtelise murdumisnäitaja määramine. Prisma. Prisma gokukaldumise miinimum.

Valguse lahutamine ja liitmine (lhk. 55—56) Valguse dispersioon (värvideks lahutamine); spekter. Värvide liitmine. Täiendusvärvid.

Kehade värv (lhk. 57—58). Läbipaistva keha värv. Läbipaistmatu keha värv. Värvainete segu värv.

Murdumine sfäärilistes läätsedes (lhk. 59.—70). Läätsede liigitamine. Kumerlääste fookus. Homotsentiliste kiirte murdumine kumerläästes. Valgusepunkti kujutis. Sfääriline aberratsioon kumerläästes. Kromaatileine aberratsioon kumerläästes. Akromaatileine prisma ja lääts. Kumerlääste optiline keskpunkt, abitelg, pääkiir ja tsentraalkiir. Lääste valem. Asja kujutis kumerläästes. Murdumine nõgusläästes. Kujutise ehitamine nõgusläästes.

Optilised riistad; silm ja nägemine (lhk. 71—87). Proektsioon-aparaat Päevapildi-aparaat. Silm ja nägemine. Kollane- ja pimetäpp. Silma kohanemisvõime (akkomodatsioon). Lühinägija ja kaugelenägija. Prillid. Asja vaatenurk. Nähtused füsioloogilisest optikast. Luup. Mikroskoop. Astronoomiline (Kepler'i) pikksilm. Maapikksilm. Hollandi (Galilei') pikksilm. Prisma-binokkel. Peegelteleskoop.

Nähtavate ja mittenähtavate spektri kiirte avaldused (lhk. 88—91). Valgus kui kiirgav energia. Luministsents. Mittenähtavate spektri kiirte avaldused. Kiirgamise olenevus temperatuurist.

Spektri tüübid; spektraalanalüüs (lhk. 92—99). Spektraal-aparaat. Kiirgamis- ehk emissioonspekter. Neeldumis- ehk absorptsioonspekter. Päikese spekter. Spektraalanalüüs.

Füüsikaline optika 100

Newton'i ja Huygens'i vaade valguse loomu kohta (lhk. 100—104). Geomeetiline ja füüsikaline optika. Emissiooni-teooria ja lainetamisteooria. Huygens'i printsiip. Valguse levimine. Peegeldumine Huygens'i printsiibi põhjal. Murdumine Huygens'i printsiibi põhjal.

Interferents; lainepikkuse mõõtmine; õhukeste kelmete värvid (lhk. 105—108). Interferents. Doppler'i efekt. Õhukeste kelmete värvid.

Difraktsioon (lhk. 109—114). Difraktsiooni nähtused. Difraktsioonvõre; valguselaine pikkuse määramine. Normalspekter.

Polarisatsioon (lhk. 115—118). Ristlaine polarisatsioon. Valguse polarisatsioon.

Tähele pandud trükivead:

- lhk. 35 trükitud „Joon. 34. Valguse“, — peab olema „Joon. 34. Valgustuse“.
lhk. 55 trükitud „värvideks hajumine“, — peab olema „värvideks lahutamine“.