

A-4421

57799

Duplum

FRANZ HANDEL

Handwritten initials or signature

FÜÜSIKA

ÕPPERAHMAT KESKKOOLILE

II

See teos on mõeldud kasutamiseks keskkoolide füüsika õppevahendina

9876

Õpetaja: ...

A-4421

Duplum

V. ERLEMANN JA J. LANG

VII $\frac{21}{1258}$ (2)

FÜÜSIKA

ÕPPERAAMAT KESKKOOLILE

II

Hääl ja valgus humanitaar- ja reaalaru
III kl. ulatuses ühes füüsikalise optikaga

9896

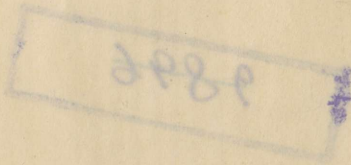
Autori kirjastus — Tartu, 1925



2-57799

II

A-4421



Hääl

Pendli võnkumine

1. Tasapendel. Viime pendli tasakaalust välja ja laseme ta lahti: pendel hakkab raskustungi mõjul võnkuma. Lahutame raskustungi P (joon. 1) kaheks komponendiks: niidi sihis (K_1) ja niidi sihile perpendikulaarselt (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 tasapendli liikumine kord kiirenev, kord tasanev.

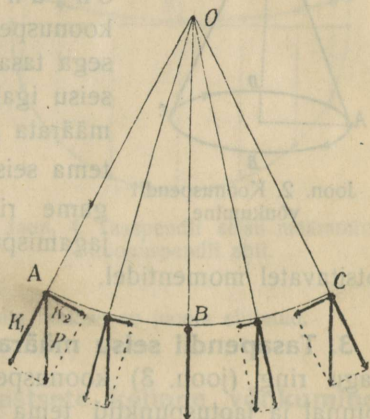
Seleta, kuidas muutub pendli liikumise kiirus.

Nimetame pendli liikumisolekut **faasiks**. 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** pendli pommi kõige suuremat kaugust tasakaalu seisukohast. On näiteks $n = 2$ või $\frac{1}{3}$, siis järgneb sellest, et $T = \frac{1}{2}$ või 3; siit näeme, et üldse on maksev valem

$$n T = 1$$

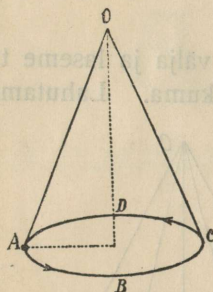
Katse näitab, et väikese amplituudi juures pendli võnkumisperiood ei olene amplituudi suurusest.



Joon. 1. Tasapendli võnkumine.

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. Tasapendli seisu teistel momentidel võib kindlaks määrata koonuspendli abil.

2. Koonuspendel. Anname tasakaalust väljaviidud pendlile lahtilaskmise momendil tõuke, siis võib pendel hakata liikuma

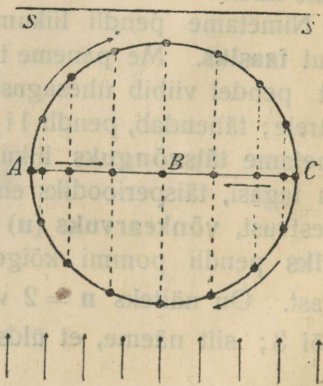


Joon. 2. Koonuspendli võnkumine.

mööda ringjoont (joon. 2). Nimetame ringjoont mööda liikuva pendli **ring- ehk koonuspendliks**. Katsed näitavad, et koonuspendli liikumine mööda ringjoont on ühtlane. Ka paneme tähele, et koonuspendli periood võrdub sama pikkusega tasapendli perioodiga. Koonuspendli seisu igal momendil võib kergesti kindlaks määrata graafiliselt. Tahame näiteks leida tema seisu iga $\frac{1}{6}$ perioodi lõpul, siis jagame ringjoone kuueks võrdseks osaks; jagamispunktid määravadki pendli seisu

otsitavatel momentidel.

3. Tasapendli seisu määramine koonuspendli abil. Kujutagu ring (joon. 3) koonuspendli liikumist horisontaalsel tasapinnal ja jaotuspunktid tema seisu iga $\frac{1}{16}$ perioodi lõpul. Ehitame jaotuspunktide projektsioonid diameetrile. Kuna koonuspendli enese liikumine on ühtlane, liigub tema projektsioon diameetril kord kiirenevalt kord tasanevalt; kõige suurema kiirusega liigub pendli projektsioon läbi ringi tsentri B. Katse ja matemaatiline harutus näitab, et koonuspendli projektsiooni liikumine diameetril on ühesugune sama amplituudi ja pikkusega võn-

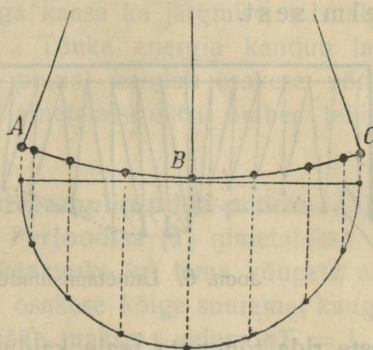


Joon. 3. Koonuspendli projektsiooni liikumine.

kuva tasapendli omaga (kui pendli amplituud on väike, võrreldes tema pikkusega).

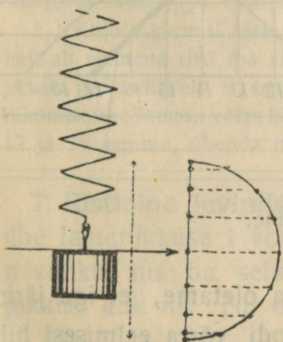
Kujutame, et samas punktis (mis asub joon. 3 punktist B tõmmatud ristjoonel) ripuvad kaks ühesugust pendlit; viime mõlemad tasakaalu seisukohast välja punkti A, laseme sama momendil ühe lahti ja anname teisele tõuke nii, et esimene hakkab võnkuma kui tasa- ja teine kui koonuspindel, siis langevad kaugemalt joonises 3 nooltega tähendatud sihis vaadates pendlid alati ühte. Kui päikese kiired langeksid noolte sihis perpendikulaarselt seinale SS, siis langeksid pendlite varjud samuti alati ühte.

Sel põhjal võib tasapendli seisu antud momendil kindlaks määrata koonuspendli abil. Tahame näiteks leida tema seisu iga $\frac{1}{6}$ perioodi lõpul, siis jagame amplituudi kui raadiusega joonistatud ringjoone 6 võrdseks osaks ja ehitame diametril jaotuspunktide projektsioonid. Viimased määravadki tasapendli seisu otsitavatel momentidel.



Joon. 4. Tasapendli seisu määramine koonuspendli abil.

1. Joon. 4 kujutab võnkuva tasapendli seisu iga $\frac{1}{16}$ perioodi lõpul. Seleta, kuidas on joonis ehitatud.



Joon. 5. Võnkuva spiraalvedru osakese seisu määramine.

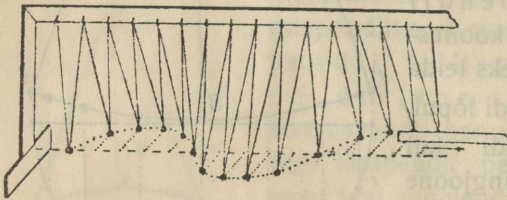
4. Elastsete kehade võnkumine.

Tasakaalust välja viidud ja lahti lastud elastsete kehade (spiraalvedru) osakesed võnguvad ka pendlisarnaselt; selle tõttu võib iga võnkuva elastse keha osakeste seisu kindlaks määrata samuti kui tasapendli oma.

1. Joonis 5 kujutab võnkuva spiraalvedru osakese seisu iga $\frac{1}{16}$ perioodi lõpul. Seleta, joonise 5 ehitus.

Lainetamine

5. Ristlaine tekkimine ja ehitamine. Rist- ehk transversaalaine tekib, kui sirgreas seisvad punktid hakkavad võnkuma pendlisarnaselt risti punktide rea ehk laine edasiliikumise sihile, iga järgmine punkt sama ajavahemiku võrra hiljem eelmisest.

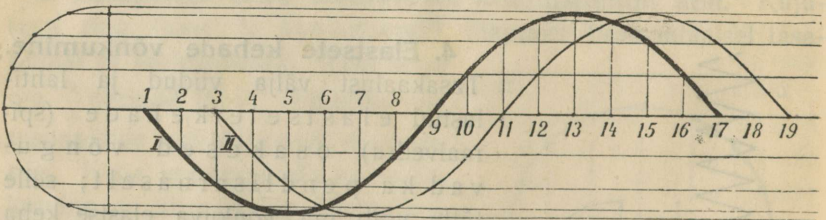


Joon. 6. Lainetamismudel.

Ristlaine tekkimist võib näidata lainetamismudeliga. Lihtsamal kujul (joon. 6) koosneb ta ühesugustest liistu küljes rippuvatest pendlikestest. Ristlaine saame, kui mööda kuuli-

keste rida tõmmata reale kaldu hoitud liistuga või käega.

Ristlaine ehitamiseks (joon. 7) kujutame sirgreas üksteisest ühekaugusel asuvaid punkte (1, 2, 3, 18, 19), mis võivad võnkuda pendlisarnaselt risti rea sihile. Jagame võnku-



Joon. 7. Ristlaine ehitamine.

misperioodi 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 koonuspendli abil. Kõverjoon I kujutab siis punktide seisu ja laine kuju sel silmapilgul, kui esimene punkt,

alates liikumist paigalseisust ülespoole, on lõpetanud ühe täisvõngu, — kõverjoon II sel silmapilgul, kui ta on teinud $1\frac{2}{16}$ täisvõnku.

Samasugune ristlaine võib tekkida igas elastses kehas, mis oma kaju poolest enam-vähem vastab punktide reale, näiteks pingulolevas kummitorus või köies, traadis jne. Niisugustes elastsetes 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 lainetamisentra ümber tekivad ringlained.

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

Igas laines võime leida punktid, mille **faasid** igal momendil on ühesugused (joonises 7 punktid 1 ja 17, 2 ja 18 jne.). Nime-tame **lainepikkuseks (l)** kahe üksteisele järgneva ühesugustes faasides viibivate punktide kaugust (kaugus punkti 1 ja 17, 2 ja 18 vahel jne.). Igas ristlaines paneme tähele laine **harja** (kõige kõrgem koht) ja laine **põhja** (kõige madalam koht).

1. Kujuta kõrvuti reas seisvaid õpilasi punktide reana. Muusika takti järele hakkab esimene risti rea sihile marssima nõnda, et ta kõnnib 4 sammu tagasi ja siis perioodiliselt 8 sammu edasi-tagasi. Iga järgmine õpilane algab sama liikumist ühe sammu võrra hiljem. Kujuta õpilaste seisude kui, esimene on teinud 16, 17 ja 18 sammu, ühenda nende seisud joonega ja võrdle oma joonist joonisega 6. 7

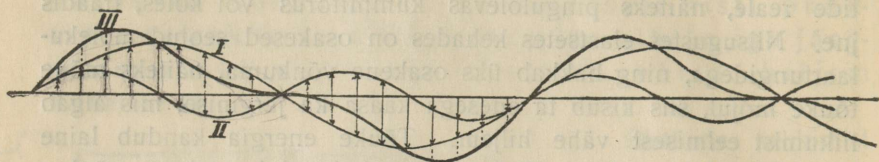
7. Ristlaine levimiskiirus. Perioodi jooksul liigub laine edasi ühe lainepikkuse l võrra. Teeb nüüd esimene osake sekundis n võnku, siis on selle aja jooksul laine edasi jõudnud n lainepikkust ehk nl . Nii on siis laine levimiskiirus

$$v = nl.$$

8. 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 keerulisem resultantlaine. Kahe laine koosmõju nimetame **interferentsiks**.

Kujutame näiteks, et osakesed samal ajal osa võtavad kahest ristlainetamisliikumisest I ja II (joon. 7). 8

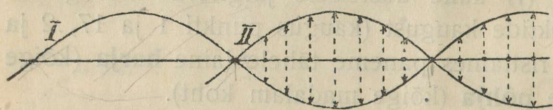


Joon. 8. Ristlainete interferents.

Kui arvesse võtta, et ühe osakese pääle samas sihis mõjuvaid tõukeid tuleb liita, vastassihis mõjuvaid aga lahutada, siis on kerge ehitada resultant- ehk interferentslaine III liikumise liitmise põhjal.

Seleta, kuidas seda teha.

Interfereeruvad lained võivad olla mitmesugused ning selle tõttu interferentslained õige keerulised. Erijuhusel hävinevad interfereerumisel kaks lainet, kui nad on ühesugused ja



Joon. 9. Ristlaine hävinemine interfereerumisel.

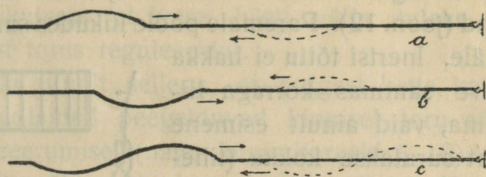
kui nende käiguvahe (ühesugustes faasides viibivate punktide vahe) võrdub poollaine pikkusega (joon.

9). Hävinemine sünnib ka, kui käiguvahe on poollaine paaritu mitmekordne.

1. Ehita kahe interfereeruva laine resultantlaine, kui ühe laine pikkus ja amplituud on pool teise laine omast ja lähtekohtade vahe on $\frac{1}{8}$ suurema laine pikkusest. Võrdle oma joonis joonisega 8, kus lähtekohad langevad ühte.

9. Ristlaine peegeldumine. Kinnitame kummitoru (kõie) otsapidi seinale, tõmbame ta käega pingule ja liigutame kätt järsku üles või allapoole. Tekib vastavalt laine hari või põhi, mis liigub toru mööda edasi ja pörgates vastu seina tuleb säält tagasi (peegeldub), kus juures hari peegeldub põhjana ning põhi

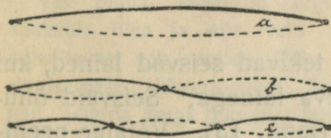
harjana (joon. 10). Kätt üles-alla liigutades tekitame terve laine, mis seinal peegeldub ka terve lainena; harjaga ees liikuv laine liigub peegeldudes põhjaga ees ja ümberpöördukt. Tähendab, laine peegeldub vastu seina pörgates faasi muutumisega.



Joon. 10. Ristlaine peegeldumine.

10. Seisvad ristlained. Kui me kummitoruga tekitame vahetpidamata ühesuguseid laineid, siis peegelduvad nad ka vahetpidamata seinalt, ja meie saame torus kaks vastassihis liikuvat lainete süsteemi. Mõlemate niisuguste lainete süsteemide interfereerumisel jäävad mõned toru osakesed täiesti paigale, kuna teised võnguvad suurema või väiksema amplituudiga (joon. 11). Niisuguseid ühesuguste ja vastupidi sihitud lainete interfereerumisel saadud resultantlaineid nimetame **seisvateks laineteks**. Paigalolevaid punkte nimetame **sõlmpunktideks**, kahe sõlmpunkti vahelolevaid võnkuvaid laine osasid **paisudeks**. Kõik seisva laine võnkuvad osakesed liiguvad samal momendil läbi tasakaalu seisukoha.

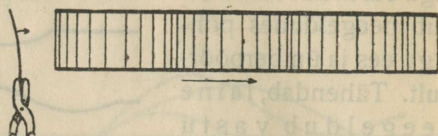
Sama kummitoruga võime tekitada mitmesuguseid seisvaid laineid (joon. 11), näiteks lained kahe sõlmpunktiga (otsadel), kolme sõlmpunktiga jne. Seisvas laines võrdub kahe naabersõlme vahe poollaine pikkusega.



Joon. 11 Seisvad ristlained.

11. Pikilaine tekkimine. Piki- ehk longitudinaallaine tekib, kui sirgreas asuvad punktid hakkavad võnkuma pendlisarnaselt piki punktide rida ehk laine edasiliikumise sihti, iga järgmine punkt sama ajavahemiku võrra hiljem eelmisest. Pikilaine tekkimist võib näidata ka lainetamismudeliga. Pikilaines paneme tähele laine tihenduse ja hõrenduse.

12. Pikilaine tekkimine õhus. Lihtsuse mõttes kujutame lahtise klaastoruga eraldatud õhusamba, mille ühes otsas võngub elastne pind (joon. 12). Paremale poole liikudes surub pind esimese õhukihi pääle. Inerti tõttu ei hakka terve sammaskorruga liikuma, vaid ainult esimene kiht surutakse kokku (tiheneb). Oma elastsuse tõttu ta paisub, surub teise kihi pääle ja sünnitab teise kihi



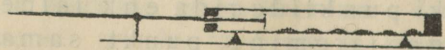
Joon. 12 Õhulaine tekkimine.

tihenduse; see sünnitab edasi kolmanda kihi tihenduse jne., kuna eelmised kihid muutuvad järjest normaalseteks. — Liigub pind võnkudes pahemale poole, siis voolab algul õhk esimesest kihist järele ja esimene kiht hõrendub. Edasi voolab 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 õhu osakesed võnguvad laine edasilikumise sihis.

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

Laine edasilikumise 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.

13. Seisvad õhulained. Ka õhus tekivad seisvad lained, kui peegeldunud laine interfereerub langeva lainega. 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. Me kuuleme heli. Asetame pulga otsapidi jämedamiasse klaastorusse, mille teine ots on kinnine ja millesse on raputatud



Joon. 13. Kundt'i toru.

kerge pulber (semen lycopodii), siis hakkab pulga hõõrumisel ja helisemisel pulber torus liikuma ja kogub üksteisest samal kausel asuvasse hunnikutesse (et katse hästi välja tuleks, on tarvis õhusamba pikkust torus reguleerida).

Nähtust võib seletada ainult sellega, et pulgast ketta kaudu õhu peale ülekantud pikilained peegelduvad kinnisel toru otsal, ja et õhulainete interfereerumisel (nagu kummitoruski § 10) teki-
vad seisvad lained, mille sõlmpunktidesse kogub pulber. Ka siin võrdub naabersõlme vahe poollainepikkusega.

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

14. Piki- ja ristlainete tekkimise tingimused. Eelmisest järgneb, et pikilainetamine on ruumala muutmise 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** muutmise nähtus ja võib tekkida ainult niisugustes kuju suhtes elastsetes keha-
des, mis oma kuju poolest vastavad punktide reale või pinnale (pingulolev traat või köis, pingulolev membraan, klaasplaat, õhuke laud jne.), tähendab ainult kõvades või pingulolevates keha-
des, mitte aga vedelikkudes ja gaasides.

Ristlaine võib tekkida ka vedeliku pinnal, sest vedeliku pinda võime lugeda elastsete pindade hulka (tasakaalu seisust välja-
viidud osakene püüab tagasi oma endisse seisu).

Vee pinna osakesed liiguvad mitte ainult verti-
kaalsihis üles ja alla vaid ühtlasi ka horisontaalsihis edasi-tagasi ja selle tõttu on nende liikumised ringisarnased kõverjooned. Seda võib tähele panna, kui näit. jälgida korgi liikumist lainetes. Sügavamate osakeste liikumisel muutuvad liikumisringid ikka lapergusmaks ja nad võnguvad teatud sügavuses ainult horisontaalset sirgjoont mööda, tähendab vedeliku sees sünnib võnkumine pikilainetamise näol. Laine edasikandumist vees on võimalik tähele panna kuni ligi 300-kordse laine amplituudi sügavuseni.

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



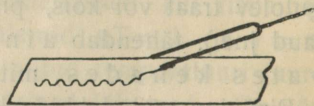
Joon. 14. Vee-
lained, tõkkest
mööda minnes.

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

Hääl lainetamisnähtusena

15. Hääle tekkimine ja levimine. Vaatlused ja katsed näitavad, et iga helisev keha võngub. Pika passi keele või suure helihargi võnkumist võime näha palja silmaga. Heliseva helihargi võnkumist võib teha nähtavaks, kui tema otsa külge kinnitada teravik ja sellega tõmmata mööda nõetud klaasplaati (joon. 15); saame plaadil lainelise joone, mis kujutab helihargi võnkumist. Kui helisevat keha (helihark, keel) puudutame näit. katseklaasi äärega, siis kuuleme kõrinat, mis näitab, et keha võngub; puhkpilli puhkumisel tunneme huulte võnkumist jne.



Joon. 15. Helihargi võnkumine.

Heliseva keha võnkumine tekitab õhus või mõnes teises ümbritsevas keskkonnas laineid. Et õhk keha võnkumisel ja helisemisel liikumisest osa võtab, seda võib näidata nn. helitundeliku gaasileegiga, mis muudab oma kuju, kui näiteks kõlistada võtmekimbuga või vilistada.

Helitundeliku gaasi leegi saame, kui me gaasi laseme voolata läbi peenikese ja laperguse otsaga torukese.

Õhulained ärritavad meie kuulmisorgaani ja tekitavad selle kaudu peaaegu hääle aistingut.

On arusaadav, et ainult elastsed kehad võivad olla hääle allikateks ja juhtideks, näit. gaasid, vedelikud, kõvad elastsed või

pingulolevad kehad (nöör, membraan), kuid mitte vilt, villane riie jne.

Too veel näiteid selle kohta.

Hääle levimise on võimalik ainult mingisuguse keskkonna (hari-likult õhu) kaudu. Tühjas ruumis hääl ei levi (katse õhupumba kupli alla asetatud heliallikaga).

16. Hääle levimiskiirus. Igapäevaste nähtuste tähelepanemi-
sest järeldame, et hääl tarvitab levimiseks aega.

Too näiteid selle kohta.

Hääle levimiskiirust õhus võib määrata järgmiselt: kahest üks-
teisest eemalseisvast 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 kau-
guse jagame ajavahemikuga. Analoogiliselt võib määrata hääle
kiirust vees, kui paadi küljes ripuvad ja vette ulatavat 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 on õhus 0° juures
 $332 \frac{m}{sek}$, toa temperatuuri juures $340 \frac{m}{sek}$. Vees on ta suurem üm-
marguselt 4 korda, puus 10 kuni 12 korda, rauas 14 korda.

Et kõik hääled oma iseloomu peale vaatamata ühesuguse kii-
rusega levivad, seda järeldame näiteks orkestri mängust, sest
meie 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.

17. Hääle tugevus. Pikema heliseva keele või suurema heli-
hargi juures võime tähele panna, et hääle tugevuse vähenedes
väheneb ka heliseva keha amplituud. Järelikult hääle tuge-
vus oleneb amplituudi suurusest. Matemaatiline har-
utus näitab, et hääle tugevus on võrdeline amplituudi ruuduga.

Hääle tugevus väheneb heliseva keha kauguse suurenemisega, sest suuremal kaugusel jaguneb võnkumise energia suurema massi peale. Kerakujulisel levimisel on hääle tugevus pöördvõrdeline kauguse ruuduga, sest kauguse suurenedes kaks, kolm jne. korda suureneb võnkuv mass neli, üheksa jne. korda.

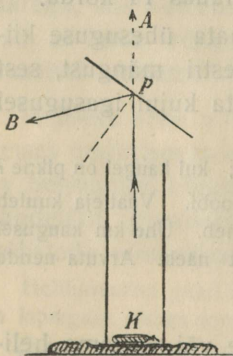
Hääle tugevus oleneb ka heliseva keha pinna suurusest, mis on ka arusaadav, sest suurem pind võib võnkumisenergiat paremini õhu päale üle kanda.

Seleta, mispärast hääle tugevus rääkimistorudes (laevadel) lühema maa peal kauguse suurenemisega tuntavalt ei vähene, kuid pikema maa pääl siiski tuntavalt vähenema peab ja milleks sel juhusel muutub võnkumisenergia.

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

1. Kui kaugel on peegeldavad pinnad, kui hüütud silbi kaja on kuulda 3 ja 7 sek pärast?

Toas on peegeldavad pinnad (seinad) ligidal. Peegeldunud hääle kiired jõuavad heliallikast otsekohe minevate kiirtega pea-aegu samal ajal kuulaja kõrva ja hääle kõlab selle tõttu kõvemini kui vabas ruumis, kus puuduvad peegeldunud kiired.



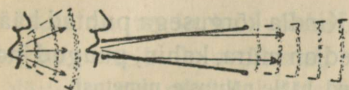
Joon. 16. Hääle peegeldumine.

Peegeldumistähtuste arusaamiseks kinnises ruumis tuleb silmas pidades, et hääle mulje kestvus on $\sim \frac{1}{9}$ sek; tähendab, me kuuleme häält veel $\sim \frac{1}{9}$ sek pärast viimase hääle laine kõrva jõudmist.

Hääl liigub toas aga edasi $\frac{1}{9}$ sek. jookul $\frac{340}{9}$ m ehk ümmarguselt 40 m võrra. Järelikult peaks peegelduva seina kaugus olema vähemalt 20 m (mispärast?), et kaja oleks kuulda. Vastasel korral kuuleme suuremas tühjas ruumis ainult vastukõla.

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

Hääle lained ei peegeldu tasapinnalt mitte igas sihis ühetugevuselt; seda näitab järgmine katse. Asetame lahtisse (vildist) silindrisse vildituki pääle taskukella (joon. 16). Ilma peegelduva pinnata p kuuleme kella tiksumist võrdlemisi tugevasti KA sihis. Asetame aga lauakese p silindri ja kõrva vahele, siis nõrgeneb tiksumiue KA sihis märksa, on aga hästi kuulda pB sihis, kuid nõrgeneb sääl märksa, kui me lauakese p ära võtame või teda pöörame. Siht, milles häälekiired kõige tugevamini peegelduvad, moodustab peegeldava pinnaga sama nurga kui langevate kiirte siht.



Joon. 17. Kõnetoru.

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

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

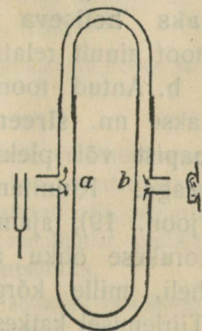
Kuulmistoru abil ümberpöörduvalt koondatakse peegeldumise läbi kuulaja kõrva suurema massi võnkumisenergia ja selle tõttu kõlab hääel tugevamini. Seleta kõlakoja tegevus.

19. Hääle interferents. 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 sääl interfereeruvad. Helihargi pööramisega muudame järjest mõlema süsteemi lainete käikudevahet, mille järelduseks on hääle kõvenemine või nõrgenemine.

Interfereerumisel hävinevad ühesugused helilained, kui nende käiguvahet võrdub poollainepikkusega või selle paaritu mitmekordsega (vaata § 8). Hävinemist interfereerumisel võib näidata Quincke toruga (joon. 18), mille ühe haru pikkust võib muuta nagu mõne puhkpilli juures. Heli, mis levinedes torus haruneb punktis a ja ühineb uuesti punktis b, ei ole kuulda teise toru otsa juures, kui harude pikkuste vahet vastavalt reguleerida. Haru pikkuse reguleerimise tarvidus järgneb sellest, et helide hävinemine interfereerumisel on seotud nende laine pikkusega, mitmesuguste helilainete pikkused ei ole aga ühesugused (vaata katse Kundt'i toruga § 13).

Hääle lainete interfereerumisel võivad tekkida õige keerulised interferentslained, näiteks or-



Joon. 18. Quincke toru.

kestri mängul, kus samal ajal tekivad ja levivad kõiksugused helilained. Meie kuulmisorgaan on nii ehitatud, et ta suudab kuulda üksikuid helisid eraldatult; ta nagu lahutab keerulise interferentslaine komponentslaineteks. Selle poolest on meie nägemisorgaan puudulik, sest värvide segu muljes ei suuda ta eraldada üksikuid värve.

Helid ja heliredelid

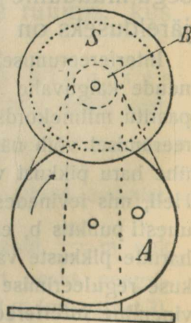
20. Heli võnkearv. Normaal-a. a. Kindla kõrgusega puhtad hääled nimet. helideks ehk toonideks; teised on müra, kahin, paugud jne.

Too veel mitmesuguseid eesti keeles tuntud hääle nähtuste nimetusi.

Tõmbame teravikuga varustatud helihargiga ühtlaselt mööda nõetud klaasplaati. Plaadil saame lainetaolise joone, mis kujutab helihargi võnkumist (vaata joon. 15). Helihargi ühe täisvõngule vastab terve laine; helihargi amplituudile — laine amplituud; lainete tihedus näitab võnkumise sagedust. Jälgides mitmesuguste heliharkidega kuid sama kiirusega tõmmatud laine jooni, 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; sama 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).

b. Antud toonile vastavat võnkearvu määratakse nn. **sireeni** abil; see on lihtsamal kujul papist või plekist ketas konsentrilise 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.



Joon. 19. Sireen.

Määrame näit. muusikas tarvitava kindla tooni nn. k a m m e r -
t o o n i (normaal-a, keskmine a klaveril) võnkearvu. Selleks pa-
neme normaal-a helihargi helisema ja tiirutame sireeni nii kii-
resti, et ta annaks sama kõrge tooni kui helihark; siis peavad
mõlemate helide võnkearvud olema ühesugused.

Loeme 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 ar-
vutada heli lainepikkust, jagades levimiskiiruse võnkearvuga.
Näiteks on normaal-a lainepikkus õhus toa temperatuuri juures
 $\frac{340}{435}$ m, ümmarguselt 78 cm.

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

1. Mitu tiiru teeb eelmises katses ketas A (joon. 19) kuue minuti jooksul,
kui heli võnkearv on 580?

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

21. Kuulmisaistingu piirid. Meie kuulmisaisting on piiratud.
Kuulmisaistingut tekitavad ainult võnkumised, mille sagedus on
 ~ 20 kuni ~ 30000 sekundis; tooni kõrguse aisting kaob \sim
20000 ümber. Nimetatud piirid on aga individuaalsed ning ole-
nevad ka tooni tekkimise viisist. Muusikas tarvitatakse ainult
niisuguseid helisid, mille võnkearvud ulatuvad ~ 30 kuni ~ 5000 .
Inimeshääle võnkearvude piirid on ~ 80 ja ~ 1300 .

1. Arvuta äärmiste kuuldavate ja äärmiste muusikas tarvitavate helide laine-
pikkused õhus.

22. Doppler'i printsiip. Meie võime tähele panna, et kiiresti mööda-
sõitva veduri vile kuuldub lähenemisel kõrgemana ja kaugenemisel madala-
mana; 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 printsiibiks**.

Olgu näit. heliallika võnkearv n ja hääle kiirus v ; seisavad heliallikas ja
kuulaja paigal, siis läheb heli kuulaja kõrvast mööda kiirusega v ja ta kuuleb
heli, mille võnkearv $n = \frac{v}{\lambda}$. — Liigub aga kuulaja kiirusega v_1 heliallika

poole, siis läheb heli tema kõrvast mööda kiirusega $v + v_1$ ja ta kuuleb heli, mille võnkearv $n_1 = \frac{v + v_1}{\lambda}$. Et $n_1 > n$, siis on ka heli viimasel juhusel kõrgem. Kaugeneb kuulaja paigalseisvast heliallikast kiirusega v_1 , siis on kuuldud heli võnkearv $n_2 = \frac{v - v_1}{\lambda}$. Et $n_2 < n$, siis on heli nüüd madalam.

23. Heliredelid. 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 nimetused on sekund, terts, kvart, kvint, sekst ja septim. Järgnev kaheksas kõrgem toon nimetatakse põhitooni oktaviks. Diatooniline duur-heliredel on aja jooksul kujunenud ja umbes 200 aastat vana.

Orpheus'e lüüral oli ainult neli tooni (põhitoon, kvart, kvint ja oktav). Hiinlaste heliredelis oli 6 tooni, Pytagorase heliredelis 7, kuid tema heliredel läheb lahku diatoonilisest duur-heliredelist.

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

Olgu näiteks aukude arv ühes reas 24 ja teises 48. Puhkudes mõlema rea päale kuuleme kaht tooni. Tiirlemise kiiruse muutmisel muutuvad ka toonide kõrgused, kuid ikka kõlavad nad kokku nii kui diatoonilise duur-heliredeli põhitoon ja selle oktav. Järelikult on põhitooni ja oktavi võnkearvude suhe jääv, nimelt $48 : 24 = 2 : 1$.

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 võnkearvude suhe jääv, nimelt $36 : 24 = 3 : 2 = \frac{3}{2} : 1$.

Täieliku duur-heliredeli võime saada sireeniga, millel on 8 kontsentrilist aukude rida järgmiste aukude arvudega

24 27 30 32 36 40 45 48.

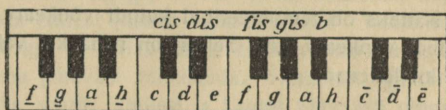
Sel põhjal on kerge arvutada heliredeli iga tooni võnkearvu suhet ehk **intervalli** põhitooni suhtes (näit. on sekundi intervall $\frac{27}{24} = \frac{9}{8}$, tertsi oma $\frac{30}{24} = \frac{5}{4}$ jne.)

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

nimetused	c	d	e	f	g	a	h	c̄
intervallid } (põhitooni 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.).

Meie näeme, et need intervallid on kolmesugused. Intervalli $\frac{9}{8}$ nimetatakse suureks täistooniks, $\frac{10}{9}$ väikeseks täistooniks ja $\frac{16}{15}$ pooltooniks.



Joon. 20. Heliredel klaveril.

Intervallide ehk suhteliste võnkearvude abil võime leida heliredeli iga tooni võnkearvu, kui on teada mingisuguse ühe tooni võnkearv. On näiteks põhitooni võnkearv 600, siis on tema tertsi võnkearv $600 \times \frac{5}{4} = 750$, kvindi oma $600 \times \frac{3}{2} = 900$ jne.

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

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

25. Tempereeritud duur-heliredel. Kujutame, et meil on mingisugune klaverisarnane muusikariist, mis on valmistatud vastavalt c-duur heliredelile. Kõrvutiseisvate toonide intervallid oleksid siis $\frac{9}{8}$, $\frac{10}{9}$, $\frac{16}{15}$ jne. Sellel riistal ei oleks aga võimalik mängida d-duur-heliredelit (algab tooniga d), sest järgnevate kõrvutiseisvate 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 dia-

toonilise d-duur-heliredeli toonid on olemas c-duur-heliredelis, kuna teised toonid puuduvad ja neid tuleks juure 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 toonide intervallid täiesti ühesugusteks. Niisugust heliredelit nimetatakse ühtlaselt tempereeritud kromaatiliseks heliredeliks. Kui selles toonide reas ühest toonist välja minnes teatavad pooltoonid välja jätta, siis saame ühtlaselt tempereeritud duur-heliredeli, mis ei lähe tuntavalt lahku õigest diatoonilisest dur-heliredelist. Mänguriistad, kus iga keel või vile annab ühe ainsa kindla tooni, on tempereeritult häälestatud.

Kui tempereeritud 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}

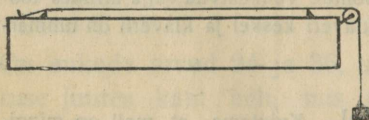
Oktavi rel. võnkearv on $x^{12} = 2$. Siit leiame $x = \sqrt[12]{2} = 1,05946$.

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

Heliallikad; ülemtoonid

26. Keele võnkumis-seadused. Heliallikaks võib olla iga elastne keha. Harilikult tarvitatakse selleks pingule tõmmatud keelt, varba, plaati jne.

Keeled leiavad muusikariistade ehitamisel väga laialdast tarvitamist. Keele võnkumis-seaduste uurimiseks tarvitatakse monohordi — piklikku puust kasti (joon. 21), millel keeled toetuvad teravaservaliste tugede pääle ja on pingule tõmmatud kas kruvi või pommi abil. Keele



Joon. 21. Monohord.

pikkust võib muuta liikuva toe abil.

Keelepikkust muutes kuuleme, et $\frac{8}{9}$ terve keele pikkusest annab terve keele tooni sekundi, mille rel. võnkearv on $\frac{9}{8}$; $\frac{4}{5}$ terve keele

pikkusest annab terve keele tooni tertsi, mille rel. võnkearv on $\frac{5}{4}$ jne. Järelikult on keele võnkearv pöördvõrdeline keele pikkusega.

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 oktavi (rel. võnkearv 2), tuleb 1 kg asemel võtta $4 = 2^2$ kg; et saada esialgse tooni kvindi (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.

Keele võnkearv oleneb (jääva pinevuse ja pikkuse juures) ka tema massist. Massi suurenedes väheneb keele võnkearv.

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 tõmmataid 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 kolofoniumiga kokku tehtud lapiga. Ta annab siis teistsuguse tooni kui ristvõnkumisel.

1. Normaala keele pikkus viiulil on 33 cm. Kui kaugel kannast tuleb päale panna sõrm, et saada järgmine kõrgem toon \bar{d} (kvart) või järgmine kõrgem toon \bar{e} ?

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

27. Keele võnkumiskuju. Ülemtoonid. a. Keel võngub risti seisva lainena (kummitoru sarnaselt, § 10). 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 siis keele otsapunktides (joon. 10, a). Niisugusel juhusel annab keel oma kõige madalama ehk põhitooni; olgu see näit. c. Võnkuvat keelt keskkohal puudutades kuuleme põhitooni järgmise kõrgema oktavi \bar{c} , mille rel. võnkearv on 2. Nähtust võib seletada ainult sellega, et puudutamise kohal tekkis

sõlmpunkt ja mõlemad keele pooled võnguvad kui kaks iseseisvat keelt (joon. 10, b). Et keele võnkearv on pöördvõrdeline tema pikkusega, siis on mõlema poole võnkearv 2.

Võnkuvat keelt puudutades ühe kolmandiku kohal kuuleme järgmise oktaavi kvinti \bar{g} . Ratsaniku abil võime näidata, et sõlmpunkt on tekkinud mitte ainult puudutatud kolmandiku, vaid ka teise kolmandiku kohal (joon. 10, 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{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 kvint \bar{g} . Arvutamise resultaati langeb ühte katse resultaadiga.

Puudutame helisevat keelt ühe neljandiku, viiendiku jne. kohal, siis ta jaguneb vst. neljaks, viieks jne. võrdseks iseseisvalt võnkuvaks osaks ja me kuuleme vst. toonid võnkearvuga 4 ($= 2.2$, teise oktaavi \bar{c}), 5 ($= 4 \cdot \frac{5}{4}$, teise oktaavi tertsi \bar{e}), 6 ($= 4 \cdot \frac{3}{2}$, teise oktaavi kvinti \bar{g}) jne. Samuti võime saada veel kõrgemaid toone, kuid nad on nõrgemad, sest nende amplituudid on vähemad.

Need (Descartes'i leitud) toonid, mis tekivad iga heliallika osadena võnkumisel ja mille rel. võnkearvud moodustavad loomuliku arvrea, nimet. põhitooni **harmoonilisteks ülemtoonideks**.

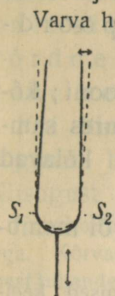
1. Leia normaal-a esimeste 6 ülemtooni võnkearvud.

b. Tegelikult on vabalt võnkuva keele võnkumiskuju väga keeruline, sest keel jaguneb, võnkudes harilikult tervena, selle juures iseenesest ilma puudutamiseteta ka osadeks: pooleks, kolmandikudeks jne. Selle tõttu kõlavad põhitooniga kaasa alati nõrgad ülemtoonid. Ainult harjunud kõrv kuuleb neid eraldi, samuti kui näit. ainult vilunud kokk tunneb mõnes keerulisemas söögis üksikuid aineid eraldatult.

Monohordil kuuleb suurem osa õpilasi esimesi tugevamaid ülemtoone, kui klassis valitseb täieline vaikus ja tähelepanu koondatakse ühe ainsa ülemtooni pääle.

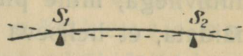
Et kõik ülemtoonid põhitooniga alati kaasa ei helise, selgub juba sellest, et ülemtooni tekkimine on takistatud, kui tema sõlmpunkt asub seal, kus me keelt tõmbame või vasaraga lööme.

28. Helihark. Varb, mis on toetatud kahes punktis (terasvarb kellade mängul, puuvarb ksylofonil), võngub nii, nagu näitab joon. 22.



Joon. 23.
Helisev
helihark.

Varva helisemisel kuuleme harilikult tugeva tooni kõrval veel teise nõrgema kuid kõrgema tooni, sest ühes ristvõnkumisega võngub varb ka pikuti.

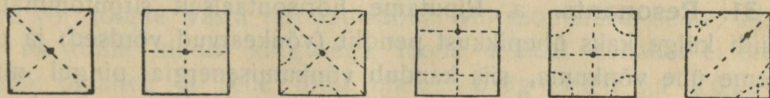


Joon. 22. Helisev varb.

Helihark — kaheharuline varrega varustatud terasvarb — võngub nii, nagu näitab joon. 23. Katseklaasiga helisevat heliharki puudutades kuuleme kõrinat. Punktides S_1 ja S_2 kaob kõrin, järelikut asuvad säääl helihargi sõlmepunktid.

29. Plaat. Plaadid võime helisema panna, tõmmates mööda nende äärt poognaga. Nad jagunevad selle juures sõlmjoontega eraldatuteks ja vastassihhis võnkuvateks naaberosadeks.

Et sõlmjooni nähtavaks teha, kinnitame tasapinnalise plaadi horisontaalselt ja riputame plaadi pääle peenikest liiva. Plaadi helisemisel kogub liiv sõlmjoontesse (Chladny katse). Mitmetviisi tõmmatud plaat annab mitmesugused toonid ja vst. mitmesugused kujundid (joon. 24). Plaadi kinnituse kohast



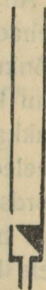
Joon. 24. Chladny helikujundid.

läheb ikka läbi mõni sõlmjoon, kuna poogna külgepuutumise kohast ei või kunagi sõlmjoont läbi minna.

30. Õhusammas. Ka õhusambad helisevad võnkudes seisvate lainetena.

Näiteks õhk voolab oreli huulviles (joon. 25) puhumisel läbi kitsa pilu vastu teraservalist huult. Seal murdub õhujuga, hakkab võnkuma ja tekitab viletorus seisvaid laineid. Et ei helise võnkuv õhujuga, vaid torusolev õhusammas, seda võime näidata järgmiselt: löikame huule ligidalt toru maha, siis ei helise vile, kui aga toru uuesti külge panna, siis heliseb ta jälle.

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



Joon 25
Huulvile.

Õhusamba juures võib muutuda ainult samba pikkus, sest pünevus 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.

Kui vilesse nõrgalt puhuda, siis annab ta oma põhitooni; kõvemini puhudes tekivad tugevad ületoonid, mille juures sammas jaguneb sõlmpindadega eraldatud osadeks. Ka kõlavad ületoonid harilikult samba põhitooniga nõrgalt kaasa.

Keelviiledes tekivad helid mitmesuguste keelte või membraanide võnkumise kaudu.

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

Resonants; kõla analüüs

31. Resonants. a. Riputame horisontaalselt sirgutõmmatud niidi külge kaks ühepikkust pendlit (võnkearvud võrdsed) ja paneme ühe võnkuma, siis kandub võnkumisenergia pingul niidi kaudu edasi ka teise pendli pääle ja see hakkab esimesega kaasa võnkuma. Muudame aga teise pendli pikkust (võnkearvud isesugused), siis näeme, et teine pendel ei võngu esimesega kaasa. Me jäeldame: üks pendel võngub teisega kaasa ainult siis, kui nende võnkearvud on samad.

Analoogilise nähtuse paneme tähele ka võnkuvate helisevate kehade juures, kus võnkumisenergia võib üle kanduda ühest võnkuvast helisevast kehast teise kas mänguriista seinte või õhu kaudu. Paneme näit. monohordil 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 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 unissoonisolev keel ja me kuuleme klaverist sama

toonid. — Ühe keha kaasahelisemist teise heliseva kehaga nime-tame **resonantsiks**.

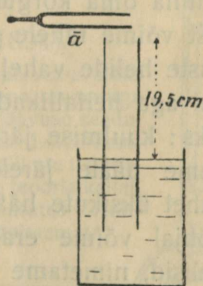
Resonants või kaasahelisemine võib sündida ai-nult siis, kui resoneeriva keha võnkearv on võrdne mõjuva heli võnkearvuga. Lühidalt: iga keha resoneerib ainult omatooniga.

Kui kindla omatooniga elastse keha pääle mõjuvad mitme-sugused helid, siis ta resoneerib ainult sama kõrge tooniga. Niisugust resonantsi nimetatakse valivaks resonantsiks.

Helmholtz'i arvates on ka hääle aistingu tekkimine seotud valiva resonant-siga. Kõrvas on olemas kiudude süsteem (Corti organ), mis koosneb mit-mest tuhandest kiust ja on väga võimalik, et need kiud resoneerivad üksikute tooni-dega. Sellega oleks siis seletatav üksikute toonide eraldatult kuulmine samal ajal.

b) Asetame klaveri resonantspõhjale (õhuke laud keelte all) või monohordi seinale väikese korgi harjast jalgadel, siis ta hak-kab mängimisel liikuma, tähendab, klaveri resonantspõhi või monohordi seinad võnguvad keeltega alati kaasa. Selle tõttu kõlabki keele heli klaveril jne. kõvemini kui puuliistul pingule tõmmatud keelel ja näit. ka helihargi heli kõvemini, kui tema vars toetada vastu elastset lauda (suurem võnkuv pind). Kopu-tame või lööme vastu resonantspõhja või monokordi seina, siis me ei kuule kindla kõrgusega tooni; nendel kehadel ei ole kindlat omaheli ja selle tõttu nad võnguvad ja kõla-vad kaasa iga heliga. Niisugust resonantsi nimetatakse üldiseks resonantsiks. Kõrva kuulmenaha ja telefoni membraani võnkumine on üldise resonantsi nähtused.

32. Õhusamba resonants. Puhume pu-deli avausest mööda, siis kuuleme alati sama tooni, tähendab, õhu hulgal pudelis on kin-del omaheli. Sama nähtust paneme tä-hele iga enam-vähem piiratud õhu hulga juures (lambi silindris või muus anum). Järelikult peab niisugusel õhu hulgal olema valiv resonants. Hoides kõrva ääres näit. laiema kaelaga pudeli avause kärarikkas ruumis (koridoris vahetunnil, klaveri mängu ajal jne.), kuuleme tõesti pudelisoleva õhu omaheli.



Joon. 26. Õhusamba resonants.

Võtame lahtise silindri, asetame ta otsapidi vette ja hoiame päälmise otsa ligidal heliseva normaal-a helihargi (joon. 26). 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 lainepikkusest õhus. Katseid mitmesuguste heliharkidega korrates leiame, et õhu sammas lahtise otsaga silindris alati helihargiga kaasa heliseb, kui tema pikkus on $\frac{1}{4}$ vastava tooni lainepikkusest õhus. Sel põhjal võib valmistada (papist või plekist) resonaatorid iga tooni jaoks, kui tema võnkearv on teada.

Oreli keelviled on ühendatud torudega, mis resonantsi tõttu kõvendavad keele heli. — Inimeshäääl tekib häälepaelade võnkumisel, ja suu ühes kõrga mõjub kui resonaator.

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

33. Kõla analüüs. Helmholtz tarvitas resonaatoreid (kerasarnaseid) helide analüüsimiseks, see on antud helis peituvate ülemtoonide kindlaks määramiseks. Nõrgalt kaasa helisevat ülemtooni võib vastava resonaatori abil kõvemini kuulda. Helmholtz leidis, et põhitooniga kaasahelisevate ülemtoonide tugevus ja koosseis on üksikute heliallikate juures mitmesugune ja oleneb muusikariista ehitusest ning tooni tekitamisviisist. Ta leidis näiteks, et meeshääle ülemtoonid on võrdl. tugevamad kui nais-hääle omad.

34. 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, tunne 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 analüüsid joudis Helmholtz otsusele, et kõlavärv oleneb sellest, missugused ülemtoonid põhitooniga



Hermann v. Helmholtz (1821—1894).

Kuulus Saksa arst ja loodusuurija. Juba kooli põlves avaldas haruldast matemaatika ja vaatlemise annet. Oma raamatuga „Jõu alalhoidmisest“ pani kindla aluse energia jäävuse seadusele. Oli füsioloogia ja hiljem füüsika professoriks. Leidis resonaatorid ja seletas nende abil kõlavärvi. Andis häälikute teooria. Leidis silma peegli. Töötas värvide nägemise teooria kallal. Oma uurimused füsioloogia alalt avaldas raamatutes „Heli-aistingute õpetus“ ja „Füsioloogilise optika käsiraamat“.

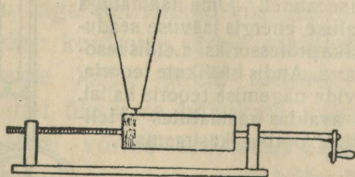
kaasa helisevad ja kui tugevad nad on. Inimeshäält analüüsides tegi ta kindlaks, et ka üksikute häälikute erinemise põhjuseks on ainult põhitooniga kaasahelisevate ülemtoonide koosseis ja tugevus. Muutes rääkimisel suu kuju muudamegi sellega üksikute kaasahelisevate ülemtoonide tugevust ja koosseisu. Nii on siis võrdl. nõrkadel ülemtoonidel siiski suur tähtsus.

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

36. Heljumised. Kujutame kaht inimest, kes teevad samal kohal marsimise liigutusi. Kui üks teeb minutis näit. 60 sammupaari, teine 61, siis nad astuvad minuti jooksul ükskord samanimelise ja ükskord 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 teise omast ühe võrra suurem, siis nad võnguvad sekundis ükskord samas ja ükskord vastassihis. Tekkinud õhulained interfereeruvad ja sekundis tekib ükskord suurema amplituudiga ja ükskord vähema amplituudiga õhuline, 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, kat-tes osa avaustest käega kinni. Sagedased heljumised mõjuvad kuulmisorgani pääle sama ärritavalt kui vilkuv leek nägemisorgani pääle.



Joon. 27. Fonograaf.

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

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

37. Fonograaf ja grammofon.

Fonograafi ehitus on lihtsamal kujul järgmine: pehme pinnaga (vahast silinder pöörduv kruvitaolisel teljel (joon. 27);

silindri külge puutub nõel, mis on ühendatud kõnetoru otsa kinnitatud membraaniga ja vajutab silindri pöördumisel selle pinna sisse kruvitaolise vao. Torusse räägitud või lauldud sõna paneb membraani ühes teravikuga võnkuma ja tekitab konarlise 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.

Grammofoni tarvitatakse eboniit-plaadile spiraaljooneliselt ülesmäärgitud helide kuuldavaks tegemiseks.

Fonograafi leidis üles Th. Edison (a. 1876).

Valgus

Valguse levimine; varjud; kiirus

38. Helenevad ja tumedad, läbinähtavad, läbipaistvad ja läbipaistmatud kehad. Valguseks nimetame põhjust, mis ärritab nägemisorgani ja tekitab selle kaudu peaaigus valguse aistingu.

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

Too näited selle kohta.

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

Too näiteid selle kohta, et läbipaistmatud ained õhukese kihina on läbipaistvad ja läbinähtavad paksu kihina ainult läbipaistvad (või läbipaistmatud).

Missugune on valgustus mere põhjas?

Millest on näha, et ka õhk paksema kihina valgust tuntavalt neelab?

Kuidas paistab õliplekk valgel paberil vaadates vastu akent ja vastu seina? Seleta nähtus.

Iga keskkond laseb temale langevast valgusest osa läbi (kui ta on küllalt õhuke), neelab osa ning ülejäänud osa heidab tagasi; kui me räägime läbinähtavast kehast, siis on mõeldud, et keha on läbinähtav antud tingimustel.

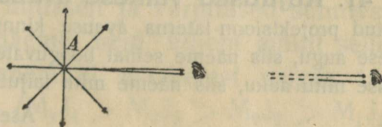
39. Valguse levimine ühtlases keskkonnas. Nimetame ühtlaseks keskkonnaks niisuguse, milles igal kohal on aine keemiline koosseis ja kõik füüsikalised omadused (tihedus jne.) ühesugused.

Laseme päikese (laterna) valguse tungida pimedasse tupp läbi väikese avause ja teeme valguse levimise tee nähtavaks tolmu, suitsu või 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**.

Too näiteid valguse sirgjoonelise levimise kohta igapäevases elust.

Mispärast teeb tolm või suits õhus kiire käigu nähtavaks?

Punktisarnasest valguseallikast lähevad kiired laiali igas sihis (joon. 28). Langeb niisugune ühest valguspunktist laialiminev ehk **homotsentriline (samakeskne)** kiirte kimp silma, siis me näeme valguspunkti laialiminevate kiirte pikenduste lõikepunktis või langevate kiirte sihis, kui nad on paralleelsed (valguseallik on väga kaugel).



Joon. 28. Valguse levimine.

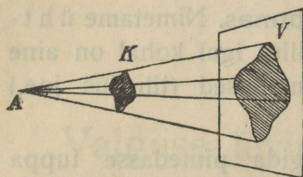
Ka siis, kui kiirte kimp on muutnud oma sihi, näit. peegeldumisel, kuid on jäänud selle juures homotsentriliseks, näeme harjumuse tõttu ikkagi valguspunkti silma langevate kiirte pikenduste lõikepunktis, kus teda tõepoolest ei ole.

Suurel kaugusel oleva valguseallika ühest punktist laialiminevaid kiiri võime lugeda praktiliselt paralleelseteks, kui kiirte kimp on küllalt kitsas (päikese

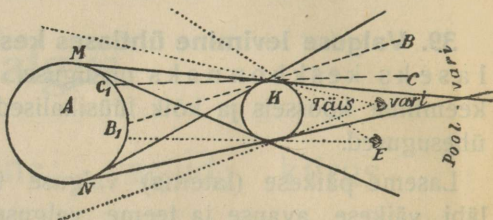
kiired). Valguse kiire all mõistame edaspidi ikka kitsast paralleelkiirte kimpu.

Mispärast võime vaadelda valgustatud keha iga punkti kui valguspunkti?

40. Varjud. Valguse sirgjoonelise levimise tõttu tekib läbipaistmatu keha taga **vari**. Varju iseloom ei olene ainult läbipaistmatust kehast vaid ka valguseallikast, mis võib olla kas punktitaoline või suurema pinnaga keha.



Joon. 29. Vari punktitaolisest valguseallikast.

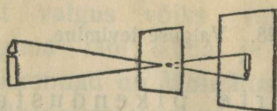


Joon. 30. Vari suurema pinnaga valguseallikast.

Punktisarnasest valguseallikast tekib ainult teravalt piiratud **täisvari**, suurema pinnaga kehast ka **poolvari**.

1. Seleta varjude ehitus ja poolvarju valgustus joonistel 29 ja 30.
2. Seleta päikese ja kuu varjutusi joonise 30. põhjal.

41. Kujutised väikese avause abil. Katame leeklambiga varustatud projektsioon-laterna avause kinni musta paberiga. Teeme paberisse väikese augu, siis näeme seinal hõõgivate söepulkade kujutise. On tehtud paberisse mitu auku, siis näeme mitu kujutist.



Joon. 31. Kujutis väikese avause abil.

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

Kujutise tekkimist võime seletada ainult sellega, et asja iga punkti langeb läbi esimese ekraani avause teisele kitsas kiirte kimp ja annab sääl avause kujulise valgustatud täpi; kõik valgustatud täpid kokku sünnitavad aga asja ümberpööratud 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.

42. Valguse kiirus. Valguse kiiruse määras esimesena (a. 1675)

Olaf Römer astronoomilise nähtuse põhjal.

Maakera käib oma orbiiti mööda korra ümber päikese ühe aasta jooksul; jupiter tarvitab selleks ligi 12 aastat. Üks jupiteri kuudest läheb iga tiiru juures $\sim 42\frac{1}{2}$ tunni pärast jupiteri varjust läbi ja kaob lühikeks ajaks. Vastavad maa ja jupiteri seisud on joonises 32 ära tähendatud ühesuguste indeksitega. Õiget mõõtu tarvitades peaks jupiteri kaugus päikesest olema maakera kaugusega võrreldes ~ 5 korda suurem.

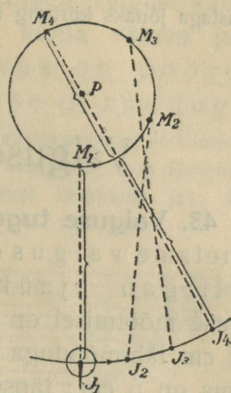
Kui nüüd näiteks ette arvutada seis M_1J_1 kohta (PM_1J_1 on sirgjoon) kuu ilmumise momendid ja kokku seada vastav tabel, siis võib tähele panna, et näivad ilmumise momendid jäävad järgnevates seisudes tabeliga võrreldes ikka rohkem ja rohkem hiljaks kuni ligi 1000 sekundini seisus M_4J_4 (M_4PJ_4 ligikaudu sirgjoon); sellest seisust alates hakkab hiljaksjäämine vähenema, kuni viimati kuu ilmumise moment langeb jälle ühte tabeliga, kui M ja J asuvad samal pool päikest temaga ühel sirgjoonel. Römer seletas nähtuse järgmiselt: jupiteri kuu liigub ühtlaselt ja varjutused sünnivad ettearvutatud momentidel; me näeme neid hiljem ainult sellepärast, et jupiteri kauguse suurenemisel maakerast valgus tarvitab pikema tee ärakäimiseks ($M_4J_4 > M_3J_3 > M_2J_2 > M_1J_1$) rohkem aega. Et nüüd valguse tee on seisus M_4J_4 maakera orbiidi läbimõõdu, s. o. ~ 300000000 km võrra pikem kui seisus M_1J_1 , hiljaksjäämine selles seisus aga ligi 1000 sek, siis peab **valguse kiirus ilmaruumis** võrduma üm m a r g u s e l t

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

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

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

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



Joon. 32. Valguse kiiruse määramine Römer'i järel.

3. Lähem kinnistäht 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?

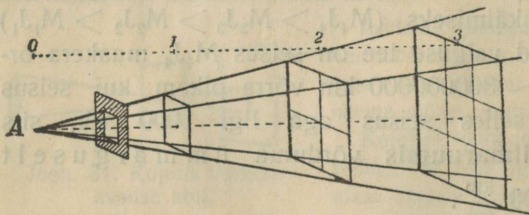
Valguse ja valgustuse tugevus

43. Valguse tugevus. Valguseallika **valguse tugevuseks** nimetame valguse (energia) hulka, mis valguseallik kiirgab ajaüksuse (sek) jooksul. Valguse tugevuse mõõtmisel on võetud üksuseks **normaalküünal (NK)**, s. o. 2 cm läbimõõduga parafiinküünla leegi tugevus, kui leegi kõrgus on 5 cm; täpsema üksusena tarvitatakse **Hefneri küünalt (HK)**, see on kindla kokkuleppe põhjal ehitatud lambi leek, milles põleb amüülatsetaat, kus juures tahi läbimõõt on 8 mm ja leegi kõrgus 4 cm. $1 \text{ NK} = \sim 1,2 \text{ HK}$.

Elektri pirnidel näiteks on üles märgitud nende ligikaudsed tugevused HK-des.

44. Valgustuse tugevus. Valgustuse seadused. Pinna **valgustuse tugevuseks** nimetame valguse (energia) hulka, mis langeb ühe ajaüksuse (sek) jooksul ühele pinnaüksusele (cm^2).

Valgustuse tugevuse üksuseks on **luks (Lx)**, see on valgustuse tugevus, mis annab



Joon. 33. Valgustuse tugevuse olenevus valguseallika kaugusest.

1 HK 1 m kaugusest kiirtele risti asetatud pinnale. Raamatu lugemisel peaks valgustuse tugevus olema vähemalt 10 Lx.

a. Pinna **valgustuse tugevus (V)** on võrdeline valguseallika **valguse tugevusega (J)**. Mispärast?

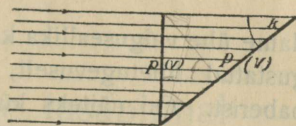
b. Joonis. 33 näeme, et valguse hulk, mis langeb näit. ühe m kaugusel valguseallikast ühele pinnaüksusele, valgustab kahekordses

kauguses 4, kolmekordses 9 pinnaüksust (kui pinnad on paralleelsed) jne., nii et igale pinnaüksusele langeb valgust kahekordses kauguses 4 korda, kolmekordses 9 korda vähem jne. Järelikult pinna valgustuse tugevus on pöördvõrdeline valguseallika kauguse (r) ruuduga.

Geomeetriast on teada, et kera pindala $= 4\pi r^2$. Valgusepunktist laialiminevad kiired valgustavad 1 m kaugusel $4\pi 1^2 \text{ m}^2$ suurust kerapinda, 2 m kaugusel $4\pi 2^2 \text{ m}^2$ suurust kerapinda, 3 m kaugusel $4\pi 3^2 \text{ m}^2$ suurust kerapinda jne. Kasel põhjal võime leida valgustuse tugevuse olenevuse valguseallika kaugusest.

Kuidas?

c. Kujutame, et sama paralleelkiirte kimp valgustab kiirtele risti asetatud pinda p ja kaldu asetatud pinda P (joonis 34). Nende pindade vst. valgustuse tugevused v ja V on pöördvõrdelised pindade suurustega (mispärast?), s. o. $V : v = p : P$.



Joon. 34. Valgustuse tugevuse olenevus kiirte kaldenurgast.

Et aga $p = P \sin k$, siis saame

$$V : v = P \sin k : P = \sin k$$

$$V = v \sin k.$$

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

Missuguse kaldenurga juures on valgustus kõige tugevam?

Kokku võttes väljendub valgustuse tugevus V matemaatilisel kujul järgmiselt:

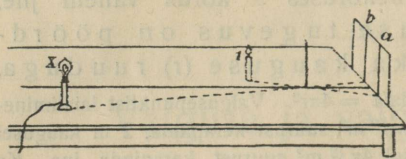
$$V = \frac{J}{r^2} \sin k$$

1. Arvuta raamatu valgustus, kui valguseallika valguse tugevus on 25 NK, raamatu kaugus allikast $1 \frac{1}{2}$ m ja kiirte kaldenurk 60° .

45. Valguse tugevuse mõõtmine. Riistad, millega mõõdetakse (valgustuse tugevuse põhjal) valguseallikate valguse tugevust, nimetatakse fotomeetriteks.

Ruhmford'i varju-fotomeetrit on lihtne valmistada järgmiselt: Kinnitame lauale vertikaalselt valge paberilehe ja

~ 10 cm kaugusel temast ümmarguse varda (sulevars) (joon. 35). Tõmbame läbi varda aluse paberile ristjoone ja asetame



Joon. 35. Ruhmford'i fotomeeter.

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. Muu-

dame 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, siis saame eelmise § põhjal

$$\frac{x \cdot \sin k_2}{150 \cdot 150} = \frac{1 \cdot \sin k_1}{30 \cdot 30},$$

kus k_1 ja k_2 tähendavad kiirte kaldenurki.

On valguseallikad ristjoonest sama kaugusel ja sama kõrgusel, siis on

$$\begin{aligned} k_1 &= k_2 \\ \frac{x}{150 \cdot 150} &= \frac{1}{30 \cdot 30} \\ x &= 25 \cdot 1 \end{aligned}$$

Otsitav lambi valguse tugevus on 25 NK.

Bunsen'i õlipleki-fotomeeter on lihtsamal kujul mõnele alusele 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.

Ka teised harilikud fotomeetrid põhjenevad samal printsiibil: mõni pind valgustatakse võrreldavatelt valguseallikatelt ühetugevuselt ja valguse tugevuste suhe arvutatakse vastavate kauguste põhjal. Täpsemate resultaaside saamiseks tuleb mõõtmise teha tumedate seinte ja laega pimedas ruumis.

Mõõtmist hõlbustab nn. **optiline pink**, see on pikem cm-jaotustega liist liikuvate statiividega, kuhu võib kinnitada valguseallikaid jne.

1. Ruhmfordi fotomeetril on lambi ja normaalküünla kaugused varjudest vast. 100 ja 25 cm, kui varjud on ühesugused. Leia lambi valguse tugevus.

2. Missugusel kaugusel valgustab 50-küünlaline lamp pinda sama tugevuselt kui 16-küünlaline 30 cm kaugusel?

3. Otsekoheselt valguseallikate vaatlemisel eksime harilikult nende tugevuste hindamisel; näiteks paistab elektri hõõglamp valgusetugevamana kui sama valgusetugev petrooleumi leek ja metallist niidiga hõõglamp valgusetugevamana, kui sama valgusetugev sõest niidiga hõõglamp (nagu tina tükk paistab käega katsudes raskemana kui sama raske puutükk). Seleta eksituse põhjus.

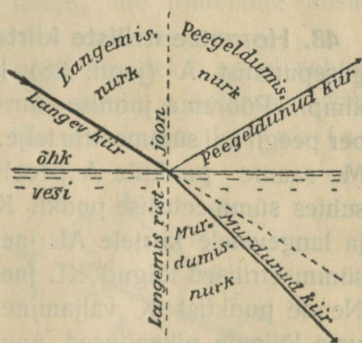
4. Kui kaugele pinnast tuleb asetada Hefneri lamp, et ta valgustaks pinda sama tugevuselt kui normaalküünal 2 m kauguselt?

Valguse peegeldumine tasapinnal

46. Peegel ja peegeldumine. Langevad valguse kiired ühest keskkonnast teise, siis läheb keskkondade lahtuspinnast osa kiiri endisse keskkonda tagasi, osa aga tungib teise keskkonna sisse. Vaadeldes ainult tagasiheidetud osa, järeldame (millest?), et kare lahtuspind (joonistamise paber) heidab valgust tagasi igas sihis ühteviisi, h a j u b valgust (eluruumide valgustamine), sile lahtuspind (peegel) aga ainult ühes kindlas sihis (läigib).

Korrapärast valguse tagasiheitmist kindlas sihis nimetame **peegeldumiseks**, hästi siledat pinda **peegliks** (veepind, poleeritud laua pind jne.).

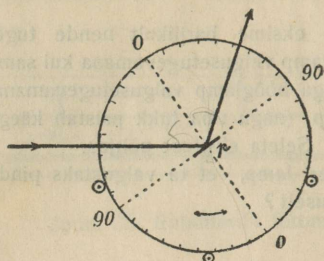
47. Peegeldumisseadused. Joonis 36 näitab õhust vee pinnale langenud kiire edaspidist käiku. Anna joonises 36 nimetatud nurkade definitsioonid (ära sega langemis- ja peegeldumisenurka kaldenurgaga!).



Joon. 36. Õhust vee pinnale langenud kiire käik.

Kiirte peegeldumist võib näidata hästi optilise ketta abil (joon. 37); see on kettakujuline ekraan, mis võib pöörduda

ümber tsentri ja mille äär on jaotatud kraadideks. Kinnitame ketta keskele väikese tasapeegli nii, et ta oleks risti joonega OO 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.



Joon. 37. Peegeldumiseaduste demonstreerimine opt. ketta abil.

Katses jäeldame, et peegeldumine sünnib järgmiste seaduste järele:

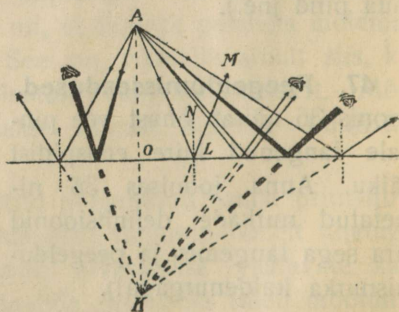
1) Langev kiir, peegeldunud kiir ja langemisristjoon asuvad samas tasapinnas.

2) Peegeldumisnurk võrdub langemisnurgaga.

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

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

48. Homotsentriliste kiirte peegeldumine tasapeeglis. Valguspunkti A (joon. 38) langeb peeglile laialiminev kiirte kimp. Pöörame joonise ümber peegli kui sümmeetria telje. Me saame punktile A peegli suhtes sümmeetrilise punkti K ja langevatele kiirtele AL jne. sümmeetrilised lõigud KL jne. Nende punkti K väljaminevate lõikude pikendused ongi langevate kiirte peegeldunud kiired.



Joon. 38. Homotsentriliste kiirte peegeldumine tasapeeglis.

Tõenda seda (näiteks, et joonlõigu KL pikendus LM on langenud kiire AL peegeldus).

Sellest järeneb, et samast punktist väljaminevad kiired paistavad pärast peegeldumist tasapeeglis välja tulevatuhest punktist, mis asub peegli taga sümmeetriliselt antud valgusepunktile. (Homotsentriline kiirte kimp jääb peegeldumisel homotsentriliseks).

Tõenda geomeetriliselt, et paralleelkiired jäävad pärast peegeldumist tasapeeglis paralleelseteks.

49. Kujutised tasapeeglis. Seleta joon. 38 põhjal, mis pärast vaatleja näeb valgusepunkti A kujutist punktis K.

Mille abil võib saada asjade või piltide kujutisi?

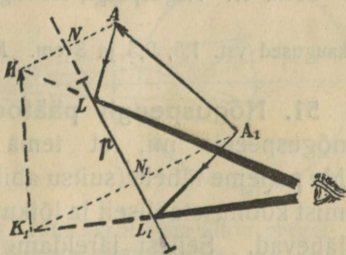
a. Kujutised on üldse **kaht liiki**. Kujutiste piirjooni ekraanil (kinos või mõnel loengul, ka päevapildi aparadi tagaseinal jne.), võime näidata kepiga ning ekraanil otse üles joonistada. Asetades ekraani asemele suure valgusetundeliku päevapildi plaadi võiksime saada plaadil kujutise ülesvõtte; kujutiste kohtadele langevad valguse kiired tõelikult; kujutised kaovad, kui optilise riista ja ekraani vahele asetada läbipaistmatu keha; me nimetame niisuguseid kujutisi **tõelisteks**. Kõik need tundemärgid puuduvad aga kujutisel tasapeeglis (luubis). Kujutis tasapeeglis on ainult näiv; teda ei saa ekraanil näidata või päevapildi plaadile ülesvõtta, sest peegli taha tõelikult valgust ei lange; me nimetame niisuguseid kujutisi **ebakujutisteks**.

b. Ka valgustatud asjast, mis asub peegli ees, tekib peegli suhtes sümmeetriline ebakujutis, sest asja iga punkt annab oma ebakujutise. On asi sirge (joon. 39), siis on kujutise ehitamisel sümmeetria lausete põhjal tarvis leida ainult otsapunktide kujutised ja need ühendada sirgjoonega. Joonises 39 on ka kujutatud asja otsapunktidest peegeldumise teel silma langevate kiirte kimbud.

Mida paned tähele, kui parema käega kammid päd peegli ees?

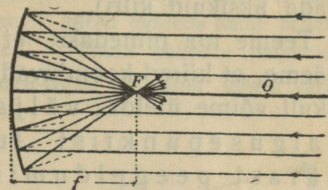
Kuidas paistub tähe F kujutis peeglis?

Kahe peegli vahele (nurkpeeglid) asetatud asjast näeme mit-



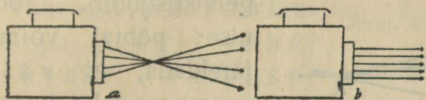
Joon. 39. Asja kujutis tasapeeglis.

kuseks (F , joon. 41) ehk **päätulipunkti**ks (mispärast tulipunkti) Pääfookuse kaugust (f) lagipunktist on kerge leida. Kuidas?



Joon. 41. Nõguspeegli pääfookus.

Asetame pimedas toas väikese heleda valguseallika pääfookuse kohale, siis näeme, et pääfookusest väljatulevad kiired on pärast peegeldumist nõguspeeglis paralleelsed pääteljega; seinaltekkiv valguse plekk on sama suur kui peegli pind. See on arusaadav, sest peegeldumise juures on maksev ümberpööratavuse printsiip.

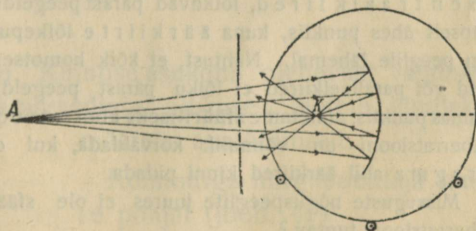


Joon. 42. Projektsioon-laterna kiirte kimbud.

Päikese kiirte asemel võime katsetes tarvitada projektsioon-laterna kiiri. Laterna abil võime saada koonuse taolise kiirte kimbu (joon. 42, a), mille tugevasti valgustatud tippu võime kasutada kui heledat val-

gusepunkti. Kui aga laternas lampi vastavalt ümber asetada, siis võime saada ka paralleelkiirte kimbu (joon. 42, b).

52. Valgusepunkti kujutis nõguspeeglis. a. Kujutame, et valgusepunkt asub nõguspeegli pääteljel lõpmata kaugel peeglist, siis võime temast väljaminevaid kiiri lugeda paralleelseteks. Eelmises § nägime, et niisugused kiired lõikuvad pääfookuses, kus me saame antud valgusepunkti kujutise. See kujutis on tõeline, sest kiired lõikuvad tõelikult pääfookuses ja kujutist võime paberil kinni püüda. Nii siis on lõpmatuses pääteljel asuva valgusepunkti kujutis nõguspeegli pääfookuses.



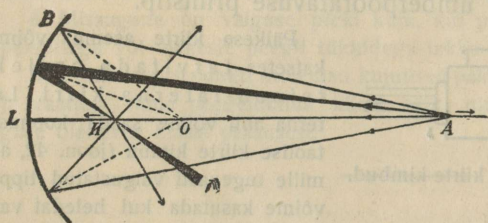
Joon. 43. Homotsentriliste kiirte peegeldumine nõguspeeglis.

b. Asetame punktitaolise valguseallika nõguspeegli pääteljele väljastpoole tema pääfookust punkti A (joon. 43, katse optilise kettaga) ja laseme kiired

langeda peeglile läbi paralleelsete piludega ekraanikese (et eraldada üksikuid kiiri).

Teeme toa pimedaks, et kiirte käik oleks paremini näha, siis näeme, et kiired koonduvad pärast peegeldumist punktis K. Järelikult võime ütelda: väljaspool pääfookust asuvast valgusepunktist tulevad kiired koonduvad pärast peegeldumist nõguspeeglis ja lõikuvad ühes punktis samal teljel, kus tekib valgusepunkti tõeline kujutis.

Kiirte käigu näitab sel juhusel joon. 44, kus A kujutab valgusepunkti, K tema kujutist ja raadiused langemisristjooni. Joonise põhjal võime järeldada, et valgusepunkt ja tema tõeline kujutis on ümberpaigutatavad, ja et valgusepunkti kaugenemisel



Joon. 44. Valgusepunkti tõeline kujutis nõguspeeglis.

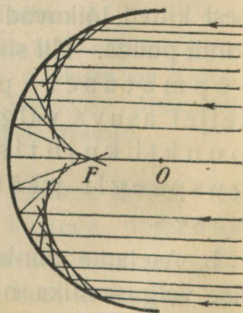
peeglist tema kujutis ligineb peeglile, sest valgusepunkti kaugenemisel suurenevad kõik langemisnurgad, järelikult ka peegeldumisnurgad, ja selle tõttu nihkub peegeldunud kiirte lõikepunkt peeglile lähemale.

c. Kiirte peegeldumist ligidalt vaadates paneme tähele, et lagipunkti L ligidale langevad kiired, nn. t s e n t r a a l k i i r e d, 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 on võimalik kõrvaldada, kui diafragma abil äärkiired kinni pidada.

Missuguste nõguspeeglite juures ei ole sfääriline aberratsioon tuntav?

1. Joonis 44 ei ole päris täpne; leia viga sirkli abil. Mispärast siiski on tarvitatud õpperaamatus niisugune joonis?

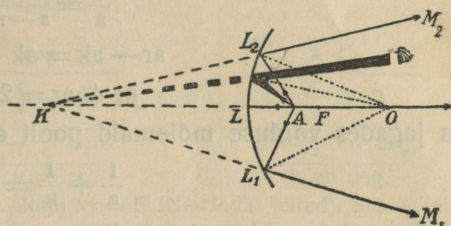
2. Kirjelda kiirte peegeldumist joonises 45.



Joon. 45. Sfääriline aberratsioon nõguspeeglis.

3. Lõika siledast läikivast plekist riba (ligi 4 cm lai ja 25 cm pikk). Joonesta lauakesele asetatud valgele paberile poolring ($r = 8$ cm), pane vst. painutatud riba ringjoonele, lase päikese või lambi kiired langeda kaldu sellele riistale ja pane tähele, mis sa näed paberil. Nihuta paberile ristjoones hoitud peenemat pliiatsit paberit mööda edasi-tagasi ja pane tähele varju liikumist.

d. Asetame valgusepunkti pääfookuse ja peegli vahele punkti A (joon. 46), siis näeme, et kiired lähevad pärast peegeldumist laiali ja paistavad välja tulevat punktist K.



Joon. 46. Valguspunkti ebakujutis nõguspeeglis.

Tähendab, pääfookuse ja peegli vahel asuvast valgusepunktist väljaminevad kiired lähevad ka pärast peegeldumist laiali, paistavad aga välja tulevat ühest punktist samal teljel, kus vaatleja näeb valgusepunkti ebakujutise.

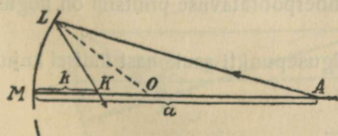
Kuidas muutub kujutise kaugus, kui valgusepunkt ligineb pääfookusest peegile?

Kuidas muutub peegeldunud kiirte kimbu kuju, kui valgusepunkt ligineb lõpmatusest kuni peeglini?

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

• 53. Nõguspeegli valem. Kujutise asukoha olenevust valgusepunkti asukohast ja kõverusraadiuse pikkusest võime kindlaks määrata analüütiliselt.

Kolmnurga nurgapoolitaja lause põhjal (joon. 47)



Joon. 47.

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

On avaus väike (L ja M võrdle-

misi üksteise ligidal, O võrdlemisi kaugel), siis võime asetada ilma tuntava veata

$$LK = MK = k$$

$$LA = MA = a.$$

Asetame veel $MO = r$, siis saame

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

$$ar - ak = ak - kr$$

$$kr + ar = 2ak$$

ja jagades võrduse mõlemad pooli akr -ga

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

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

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

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

Asetame peegli valemisse f väärtuse, siis saame valemi teisel kujul

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

kus a tähendab asja kaugust ja k kujutise kaugust peeglist.

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

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

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

3. Pääfookusekaugus 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 resultaati.

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

6. Et uurida kujutise asukoha olenevust valgusepunkti asukohast üldisel kujul, selleks anname esimese peegli valemile kuju

$$k = \frac{r}{2 - \frac{r}{a}}$$

Seleta selle valemi põhjal iga alljärgneva juhuse füüsikaline tähendus:

$$1) \frac{a}{r} = \infty$$

$$\frac{r}{a} = 0$$

$$2 - \frac{r}{a} = 2$$

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

$$2) \infty > a > r$$

$$0 < \frac{r}{a} < 1$$

$$2 > 2 - \frac{r}{a} > 1$$

$$\frac{r}{2} < k < r$$

$$3) \frac{a}{r} = 1$$

$$\frac{r}{a} = 1$$

$$2 - \frac{r}{a} = 1$$

$$k = r$$

$$4) r > a > \frac{r}{2}$$

$$1 < \frac{r}{a} < 2$$

$$1 > 2 - \frac{r}{a} > 0$$

$$r < k < \infty$$

$$5) \frac{a}{r} = 2$$

$$\frac{r}{a} = 0.5$$

$$2 - \frac{r}{a} = 1.5$$

$$k = \infty$$

$$6) \frac{a}{r} < \frac{r}{2}$$

$$\frac{r}{a} > 2$$

$$2 - \frac{r}{a} \text{ on neg.}$$

$$k \text{ on neg.}$$

7. Anna nõguspeegli valemile kuju $xy = f^2$ (Newton'i leitud), kus x ja y tähendavad vst. asja ja kujutise kauguseid pääfookusest.

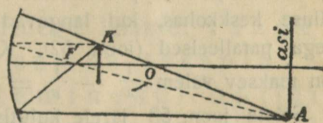
54. Kujutiste ehitamine nõguspeeglis. Liikumisreegel.

a. Ka 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 selleks kiired, mille käik on meil teada.

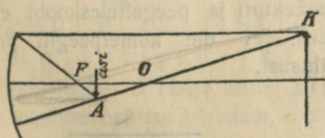
Niisugused kiired on: läbi kõverusetsentri minev nn. **pääkiir** (pärast peegeldumist tuleb tagasi otse vastupidises sihis); pääteljega paralleelne nn. **paralleelkiir** (läheb pärast peegeldumist läbi pääfookuse) ja läbi pääfookuse minev kiir (läheb pärast peegeldumist paralleelselt pääteljega). Nimetatud 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.

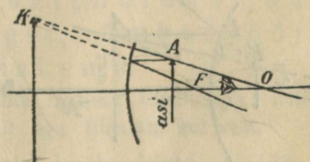
Seleta alljärgneval kolmel juhusel (joon. 48—50) kujutise ehitus ja iseloom (eba- või tõeline, päripidine või ümberpööratud, suurendatud või vähendatud.)



Joon. 48. Asja kujutis nõguspeeglis.



Joon. 49.



Joon. 50.

Asja kujutised nõguspeeglis.

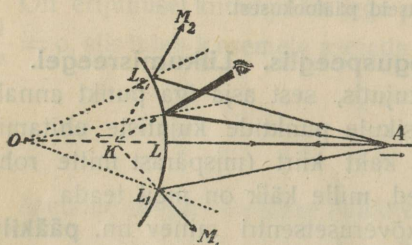
b. Katsete või matemaatilise harutuse põhjal saame nõguspeegli jaoks järgmise liikumisreegli: liigub asi lõpmatuses tsentrini, siis nihkub tema vähendatud ümberpöörduv tõeline kujutis pääfookusest tsentrini, selle juures suurenedes; liigub asi tsentrist pääfookuse ni, siis liigub tõeline ümberpöörduv suurendatud kujutis tsentrist lõpmatuseni, selle juures suurenedes; liigub asi pääfookusest peegli ni, siis liigub suurendatud päripidine ebakujutis peegli taga lõpmatuses peegli ni, selle juures 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 temast peegli abil 4 korda suurendatud tõeline kujutis? Lahenda eelmise ülesande põhjal.

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

4. Selgita joonise abil, mispärast suurema sirge asja kujutis ei ole mitte täiesti sirge ja missugune kujutise kõlg (kumer või nõgus) on pöörduv peegli poole.

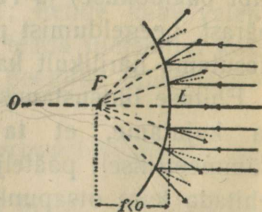


Joon. 51. Peegeldumine kumerpeeglis.

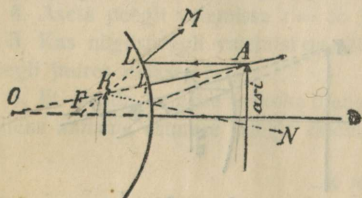
peegli ribaga) ja ehitused (joon. 51) näitavad, et ka siin homotsentrilised kiired jäävad pärast peegeldumist homotsentrilisteks, kuid lähevad laiali, nii et võivad tekkida ainult ebakujutised peegli taga.

Ka siin kaugeneb ebakujutis valgusepunkti kaugenemisel ja asub pääfookuses F peegli taga raadiuse keskkohas, kui langevad kiired on päteltega paralleelsed (joon. 52). Kumerpeegli kohta on maksev valem $\frac{1}{a} - \frac{1}{k} = \frac{1}{f}$.

Seleta joon. 53 järele kujutise ehitus ja tema iseloom.



Joon. 52. Kumerpeegli pääfookus.



Joon. 53. Asja kujutis kumerpeeglis.

Kuna nõguspeeglit tarvitatakse näit. prožektoris ja peegelteleskoobi ehitamiseks, ei ole kumerpeegilil praktilist tähtsust.

Murdumine ja täieline sisepeegeldumine

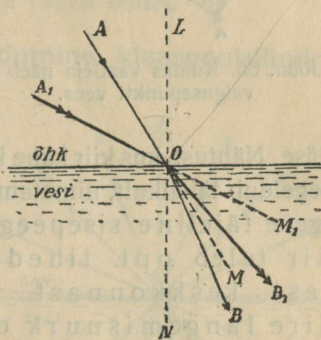
56. Valguse murdumise nähtused. a. § 46 nägime (joon. 36), et valguse kiired ühest keskkonnast teise minnes muudavad keskkondade lahtuspinnal oma sihi. Teeme selle kohta järgmise katse:

Juhime pimedas toas kitsa päikese või laterna kiirte kimbu kaldu õhust vette (joon. 54). Me näeme siis, et osa kiiri peegeldub, osa aga tungib vette ja muudab vee pinnal oma sihi, lähenedes langemisristjoonele. Nähtust, kus valguse kiired ühest läbinähtavast keskkonnast teise minnes muudavad oma sihi, nimetame **valguse murdumiseks**. Murdumist ligemalt tähele pannes näeme, et kiir murdub seda rohkem, mida rohkem kaldu ta langeb, kuid vastavad langemis- ja murdumisnurkad ei ole võrdselised. Ristilangev kiir ei murdu. — Kiiri altpoolt läbi klaasist anuma põhja veest õhku juhtides paneme tähele ümberpööratud nähtuse: kiired kaugenevad ristjoonest. — Me paneme ka tähele, et kiirte peegeldunud osa on seda tugevam ja murdunud osa seda nõrgem, mida rohkem kaldu kiired langevad.

Katset tehës mitmesuguste keskkondadega leiame: langev kiir ja murdunud kiir on samas tasapinnas langemisristjoonega; üleminekul optiliselt hõredamast keskkonnast optiliselt tihedamasse keskkonda ligineb kiir langemisristjoonele, ümberpööratud juhusel kaugeneb ta ristjoonest; ümberpööratavuse printsiip jääb maksma.

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

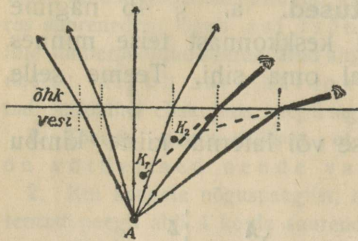
b. Samast punktist väljaminevate kiirte kimp ei jää pärast murdumist täiesti homotsentriliseks (joon. 55).



Joon. 54. Murdumine vee ja õhu lahtuspinnal.

Seleta joonise 55. järele, kus vaatleja näeb valgusepunkti A.

1. Seleta joon. abil, mispärast vette pistetud sirge kepp paistab veepinnal murtuna?



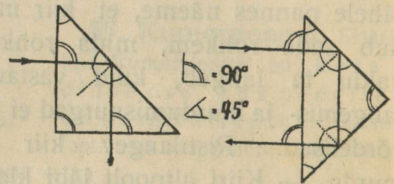
Joon. 55. Kuidas vaatleja näeb valgusepunkti A.

2. Seleta joonise abil, mispärast kaldalt vaadates järve põhi paistab (iseäranis lapsele) tõstetuna ja selle tõttu vesi madalam olevat kui tõelikult.

3. Kuidas tuleb püssiga sihtida, et lasta vee pinna ligidal nähtava kala pihta?

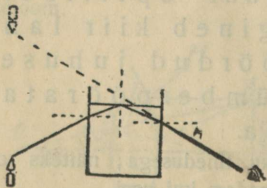
57. Täielise sisepeegeldumise nähtused. Juhime § 56 kirjeldatud katses kiired altpoolt läbi vee lahutuspinna hästi kaldu, siis nad peegelduvad täielikult ja kiiri õhku ei pääse. Nähtust, kus kiir kahe keskkonna lahutuspinna ei murdu, vaid peegeldub täielikult, nimetame **täieliseks sisepeegeldumiseks**. Nii-sugune täieline sisepeegeldumine sünnib ainult siis, kui kiir tuleb opt. tihedamast keskkonnast ja kiire langemisnurk on suurem teatud kindlast nurgast, mida nimetame täielise sisepeegeldumise piirnurgaks (p).

Näiteks on täielise sisepeegeldumise piirnurk õhu lahutuspinna klaasis ümmarguselt 40° – 42° , vees 48° , teemandis ainult 23° .



Joon. 56. Täieline sisepeegeldumine prismas.

Täielist sisepeegeldumist klaasi ja õhu lahutuspinna võib näidata hästi täis-sarikkolmnurkse klaasprisma ga (joon. 56), kui teda kinnitada opt. ketta külge ja asetada kitsa kiirte kimbu teele. Nii-sugused prismad tarvitatakse mitmesuguste opt. riistade ehitamisel (prisma-binokkel, periskoop) peegli asemel. Seleta kiirte käik joonises 56 (klaasi piirnurk 42°).



Joon. 57. Sisepeegeldumine vee ja õhu lahutuspinna.

1. Seleta joonises 57 kujutatud katset ja kiirte käiku (vee piirnurk 48°).

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

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

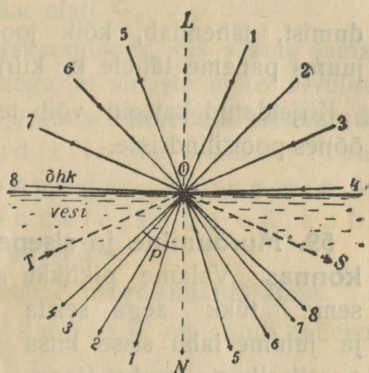
4. Sulu ümberpööratud klaaslehtri ots sõrmega, aseta lehter vette ja seleta, mis sa ülalt vaadates tähele paned, kui sõrme lahti lased.

Mõne veeputuka läikimine vees on seletatav täielise sisepeegeldumisega putuka küljes oleva õhukihi pinnal; ka kalliskivide läikimine on seletatav tugeva sisepeegeldumisega väikese piirnurga tõttu.

Klaasipuru, lumi, puuvill hajutavad valgust ja paistavad valgena, kuna terve klaasitükk, jää või vesi on läbinähtavad, sest langevad kiired hajuvad mitmekordse murdumise ja peegeldumise tõttu nagu valgest kehast.

58. Murdumine ja sisepeegeldumine klaaspoolsilindris.

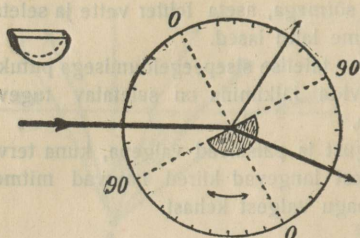
a. Kujutame, et veepind on kaetud musta paberiga, milles on väike ava, ja et kiired langevad avausele igas sihis. Kiired, tungides läbi avause vette, valgustavad vees koonusetaolise ruumi, mida piiravad kiired 4 ja 8 (joonis 58 kujutab ainult koonuse läbilõiget). Ümbepööratavuse printsiibi tõttu lähevad kiired, mis langevad veest koonusetaolisest ruumist avause kohale, veest õhku kaugenedes ristjoonest. Kiir, mille langemisnurk õhus on 90° , moodustab vees koonuse piirkiire, piirkiir ristjoonega koonuse piirnurga (p). Kui aga valguseallik (el. pirn) asetada vees väljaspoole koonust, siis ei pääse läbi avause valgust sugugi õhku, vaid avause poole sihitud kiired peegelduvad täiesti. Kujutatud koonuse piirnurk ongi täielise sisepeegeldumise piirnurk. Kui vee asemel võtaksime mõne teise aine, mis murrab kiiri tugevamini, näit. klaasi, siis oleks valgustatud koonus kitsam ja piirnurk väikesem.



Joon. 58. Murdumisnähtused vee ja õhu lahutuspinnal. Täielise sisepeegeldumise piirnurk.

b. Kirjeldatud nähtusi võib hästi jälgida opt. ketta külge kinnitatud ja kitsa kiirte kimbu teele asetatud klaaspoolsilindriga (joon. 59). Kui 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.

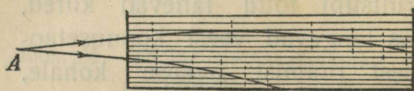


Joon. 59. Murdumistähtsuste vaatlumine poolsilindris.

Ketta pööramisel võime skaala järelle määrata vst. langemis- ja murdumisnurgad kiirte üleminekul õhust klaasi ning võime ka mõõta piirnurga. Ketast vastavalt pöörates võime jälgida sama nähtusi üleminekul klaasist õhku, samuti ka täielist sisepeegeldumist, tähendab, kõik joonises 58 kujutatud juhused. Selle juures paneme tähele ka kiirte käigu ümberpööratavust.

Kirjeldatud katseid võib teha ka vedelikuga, kui seda valada õõnes-poolsilindrisse.

59. Murdumine ja sisepeegeldumine mitteühtlases keskonnas. Valame piklikku anumasse keedusoola lahu vees, laste tükk aega seista ja juhime lahu sisse kitsa paralleelkiirte kimbu (joon. 60). Kiired lähevad läbi lahu kõverjooneliselt. Mis pärast?



Joon. 60. Kiire käik soola lahus.

Horisoni ligidal olevad tähed paistavad $\sim 0,5^\circ$ võrra kõrgema kui tõelikult. Selata seda astronoomiliseks refraktsiooniks nimetatud nähtust joonise 61 põhjal.



Joon. 61. Astronoomiline refraktsioon.

Ka nn. fatamorgaana nähtus kõrbes tekib murdumise ja sisepeegeldumise tagajärjel õhus, mille üksikute kihtide temperatuurid ja tihedused erinevad tuntavalt päikese tugeva mõju tõttu.

60. Murdumisseedused. § 58 kirjeldatud katses klaaspool-silindriga võime määrata vst. langemis- ja murdumisnurgad. Katsest leiame näiteks järgmised nurgad:

$$\begin{array}{l|l} \alpha_1 = 20^\circ, & \beta_1 = 13^\circ \\ \alpha_2 = 40^\circ, & \beta_2 = 25^\circ \end{array} \quad \begin{array}{l|l} \alpha_3 = 60^\circ, & \beta_3 = 36^\circ \\ \alpha_4 = 80^\circ, & \beta_4 = 41^\circ \end{array}$$

Snellius leidis, et nurkade α ja β vastavate sinuste suhe on jääv.

Arvuta eelpool toodud nurkade sinuste suhted $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1}, \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2}$ jne. ja võrdle saadud resultate.

Nurkade mõõtmist täpsemalt toimetades ja sinuste suhteid ar-
vutades leiame, et nad on tõelikult võrdsed.

Nii on siis kiirte üleminekul õhust klaasi $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ alati $\frac{3}{2}$ ja üm-
berpööratud üleminekul klaasist õhku alati $\frac{2}{3}$.

Kui murdumist jälgida teistes keskkondades, siis saame sama-
laadilise resultaadi, ainult selle vahega, et sinuste suhte arvuline
suurus on teine. Nii on siis maksvad järgmised **murdumisseedused**:

Langev kiir ja murdunud kiir on samas tasa-
pinnas langemisristjoonega; langemis- (α)
ja murdumisnurga (β) sinuste suhe on kahe
antud keskkonna kohta jääv.

Suhte $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = m = \text{const}$, nimetame **murdumisinäitajaks**.

Ainete murdumisinäitajad õhu suhtes on antud selleko-
hastes tabelites.

Näiteks on klaasi murdumisinäitaja õhu suhtes ümmarguselt
 $\frac{3}{2}$, vee oma $\frac{4}{3}$, teemandi $\frac{5}{2}$.

On leitud, et murdumisinäitaja võrdub valguse kiiruse suhtega mõlemas kesk-
konnas.

Kui me räägime edaspidi aine murdumisinäitajast, siis on alati mõeldud
aine murdumisinäitajat õhu suhtes. Absoluutne murdumisinäi-
taja, s. o. aine murdumisinäitaja tühja ruumi suhtes, läheb sellest nii vähe
lahku, et me tegelikult vahet ei tee.

Nurgale $\alpha = 90^\circ$ õhus vastab täielise sisepeegeldu-
mise piirnurk $\beta = p$. Järelikult

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin p} = m \text{ ja } \sin p = \frac{1}{m}.$$

1. Kiire üleminekul õhust teemandisse langemisnurgale $\alpha = 58^\circ$ vastab mur-
dumisnurk $\beta = 20^\circ$. Leia teemandi murdumisinäitaja.

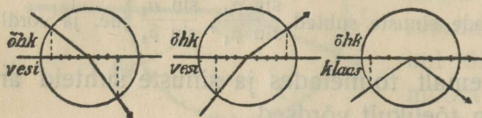
2. Arvuta kiire murdumisnurk β õhus, kui vastav langemisnurk vees on 40° .

3. Leia täielise sisepeegeldumise piirnurk flintklaasi ja kroonklaasi jaoks,
kui m vst. 1,62 ja 1,53.

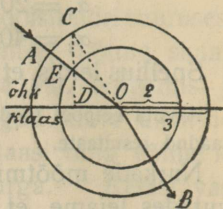
61. Murdunud kiire ehitamine. Murdunud kiirt võib ehitada, kui on teada murdumisnäitaja.

Seleta joonise 62 põhjal, kuidas tuleb murdunud kiirt ehitada.

1. Seleta joonise 63 põhjal murdunud kiire ehitus.
2. Leia graafiliselt murdunud kiirte sihid üleminekul õhust vette ja õhust klaasi, kui langemisnurk on 60° .



Joon. 62.
Murdunud kiire ehitamine.



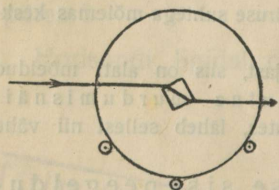
Joon. 63.

3. Leia graafiliselt murdunud kiirte sihid üleminekul veest õhku ja klaasist õhku, kui langemisnurk on 30° .

4. Leida graafiliselt murdunud kiire siht üleminekul veest õhku, kui langemisnurk on 60° .

Murdumine tasapinnalistes kehaes

62. Tasaparalleelne plaat. Kui vaadelda kiire läbiminekut mingisugusest tasapindadega piiratud kehast, siis näeme, et murdumine sünnib keha kuju päale vaatamata ainult kiire sisseminekul ja väljatulekul, tähendab, kahel tasapinnal. Need tasapinnad võivad olla kas paralleelsed või mitteparalleelsed. Vastavalt kujutab keha osa, millest kiir läbi läheb, kas tasaparalleelse plaadi või prisma.



Joon. 64. Kiirte murdumine tasaparalleelses plaadis.

Katame paberile tõmmatud sirgjoone paksema klaasplaadiga ja vaatame sirgjoonele kaldu, siis paistab läbi klaasi nähtav sirgjoone osa teise otses nähtava osa suhtes kõrvale nihutuna. Vaatame mõnele vertikaalsele sirgjoonele (akna-raami serv) ja asetame klaasplaadi kaldu silma ette nii, et näeme läbi klaasi ainult sirgjoone osa, siis paistab

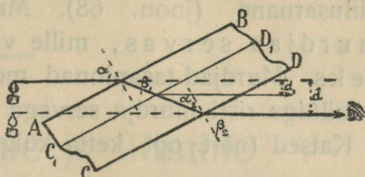
see osa teise osaga võrreldes kõrvale nihutuna.

Kinnitame klaaskuubikese opt. ketta külge ja asetame ta kitsa kiirte kimbu teele, siis näeme, et kiired läbi plaadi minnes on paralleelselt kõrvale nihkunud (joon. 64).

Me järeldame: Läbitasaparalleelsete pindadega keha minnes kiir ei muuda oma sihti, kuid nihkub kõrvale.

Ketast pöörates paneme tähele, et kõrvalenihkumise suurus väheneb kiirte langemisnurga vähenemisega.

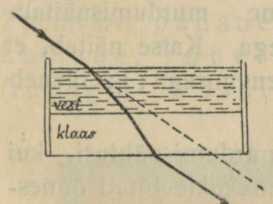
Joonis 65 näitab kiire käiku läbi tasaparalleelse plaadi. Joonisest on näha, et kõrvalenihkumise suurus väheneb ka plaadi paksuse vähenemisega.



Joon. 65. Kiirte käik tasaparalleelses plaadis.

1. Tõenda geomeetriliselt, et murdunud kiirel on sama siht kui langeval kiirel.
2. Kui suur võib olla maksimaalne kiire kõrvalenihkumine?
3. Leia kõrvalenihkumise suurus, kui on antud plaadi paksus, kiire langeisnurk ja plaadi aine murdumisnäitaja.

63. Aine suhtelise murdumisnäitaja määramine. Võtame võimalikult paksu põhjaga klaasanuma, valame vett sisse ja kinnitame ta statiivile nii, et veepind oleks paralleelne põhjaga.



Joon. 66. Kiirte murdumine tasaparalleelsetes plaatides.

Juhime peegli abil kitsa kiirte kimbu kaldu kas ülalt vee pinnale või alt klaasi pinnale. Me paneme tähele, et kiired murduvad ka vee ja klaasi lahutuspinna, ja mõlematest paralleelsetest kihtidest läbiläinud kiired on langevate kiirtega paralleelsed. Tähendab ühe tasaparalleelse plaadi kohta § 62 leitud reegel on maksev ka mitme üksteise ligi asetatud plaadi kohta.

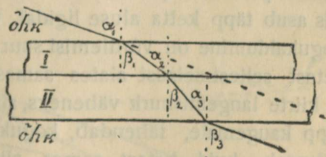
See võimaldab ühe aine murdumisnäitaja määramist teise aine suhtes, kui on teada mõlemate

ainete murdumisnäitajad sama kolmanda (õhu) suhtes.

Olgu joon. 67 ainete I ja II lahutuspinna paralleelsed ja vastavad murdumisnäitajad õhu suhtes m_1 ja m_2 . Leiame aine II murdumisnäitaja aine I suhtes $m_{1,2}$. Murdunud kiire ehitamise põhjal on

$$\sin \alpha_1 = m_1; \quad \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_1} = m_{1,2}; \quad \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_3} = \frac{1}{m_2}$$

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



Joon. 67. Suhtelise murdumisnäitaja määramine.

$$m_{1,2} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = \frac{\sin \beta_1}{\sin \alpha_3} = \frac{\sin \alpha_1}{m_1} \cdot \frac{\sin \beta_3}{m_2}$$

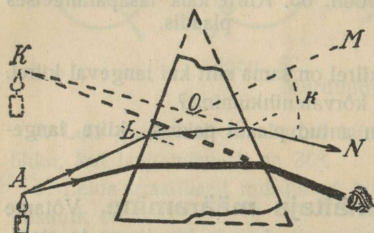
$$m_{1,2} = \frac{m_2}{m_1}$$

Näiteks on klaasi murdumisnäitaja vee suhtes $\frac{3}{2} : \frac{4}{3} = \frac{9}{8}$.

1. Leia klaasi murdumisnäitaja teemandi suhtes.

64. Prisma. Optiliseks prismaks võib olla iga läbinähtav keha kahe mitte paralleelse tasapinnaga. Harilikult on prisma kiilusarnane (joon. 68). Murdjad tasapinnad lõikuvad nn. murdjas servas, mille vastastahk kutsutakse prisma aluseks. Murdjad tasapinnad moodustavad nn. murdja nurga. Läbilõige risti murdja servaga nimetatakse pääläbilõikeks.

Katsed (näit. opt. ketta külge kinnitatud klaasist prismaga) ja ehitused (joon. 68) näitavad, et kiired pärast murdumist prismas kalduvad aluse poole, ja et läbi prisma vaadates asjad paistavad nihutuna murdja serva poole.



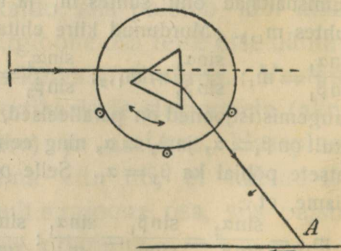
Joon. 68. Murdumine prismas.

On arusaadav, et kogukaldumise nurk (k) suureneb prisma aine murdumisnäitaja suurenemisega. Katse näitab, et

kogukaldumine suureneb murdja nurga suurenemisega; ka on kogukaldumine kiire langemisnurgast.

Vedeliku-prismas võime jälgida murdumisnähtusi, kui valame vedelikku õhukestest klaasplaatidest kokkukleebitud õõnesprismasse.

65. Prisma kogukaldumise miinimum. Kinnitame klaasprisma opt. ketta külge (joon. 69) ja asetame ta kitsa paralleelkiirte kimbu tee. Katselauale asetatud valgel paberil saame heleda täpi (värvilise). Pöörame ketta nii, et kiired langeksid prisma esipinnale võimalikult kaldu, siis asub täpp ketta aluse ligidal, tähendab, kogukaldumine on võrdlemisi suur. Pöörame ketta sellest seisust alates samas sihis nii, et kiirte langemisnurk väheneks, siis nihkub täpp kaugemale, tähendab, kogukaldumine väheneb, kuid ketta samas sihis edasi pöörates näeme, et täpp hakkab ketta alusele liginema, tähendab kogukaldumine suureneb. Järelikult on teatavas kindlas seisus (joonis 69) kogukaldumine kõige väikesem, suureneb aga, kui prisma pöörata ühele või teisele poole. Seda

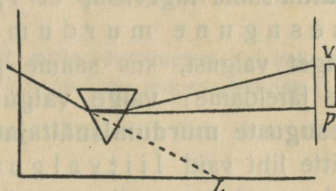


Joon. 69. Prisma kogukaldumise miinimum.

seisu ligemalt tähele pannes leiame, et kogukaldumine prisma on kõige väikesem, kui kiir läheb läbi prisma sümmeetriliselt, s. o. kui ta löikab prisma läbilõikest võrdhaarse kolmnurga.

Valguse lahutamine ja liitmine

66. Valguse hajumine (dispersioon); 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), milles Newton valis välja: 7 põhivärvi punane, oranž, kollane, roheline, helesinine, tumesinine (indigo) ja violett.

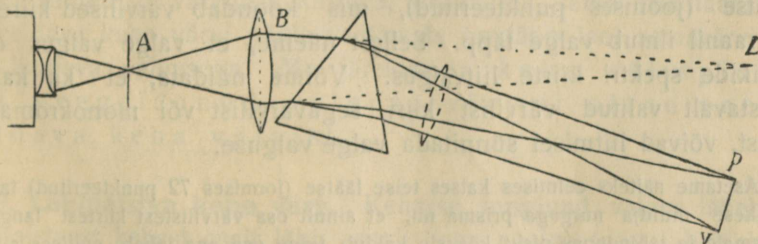


Joon. 70. Spektri tekkimine.



Joon. 71. Spekter.

Laterna kiirtega korraldame valguse lahutamise katse nõnda, kui näitab joon. 72 ülalt vaadates.



Joon. 72. Spektri tekitamine projektsioon-laterna kiirtega.

Läätis B koondab tugevasti valgustatud pilust A väljatulevad kiired ekraanil L kohal, kus tekib valge pilu kujutis. Asetame pilu ette värvilise klaasi, mis laseb läbi ainult teatud värvi kiired ja neelab teised, siis tekib samal kohal ekraanil värviline kujutis hoolimata kiirte värvist. Asetame aga läätse taha värviliste kiirte teele prisma, siis saame punaste kiirte puhul punase pilu kujutise p kohal, violett kiirte puhul violett pilu kujutise v kohal ja teiste värviliste kiirte puhul värvilised pilu kujutised p ja v vahel. Katsetest selgub, et üksikud värvilised kiired ei murdu sama tugevasti, et iga värvilisel kiirel on isesugune murdumisnäitaja. — Tarvitame katses valget valgust, siis saame p ja v vahel värvilise riba, spektri. Me järeldame: **valge valgus seisab koos värvilistest kiirtest isesuguste murdumisnäitajatega**, valge valgus ei ole füüsiliselt mitte liht vaid liitvalgus. Murdumisel prisma annab iga valgus valguses peituv värviline kiir oma pilukujutise ise kohal 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 (§ 58). Ka vikerkaare tekimine on seotud päikese kiirte murdumisega ja sisepeegeldumisega vihmakihtkades.

67. Värvide liitmine. Täiendusvärvid. Tekitame spektri joon. 72 järele ja asetame prisma taha värviliste kiirte teele kumerlääts (joonises punkteeritud), mis koondab värvilised kiired. Ekraanil ilmub valge täpp. Sellest näeme, et valge valgus on kõikide spektri kiirte liitvalgus. Võime 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 prisma ja läbimines pisut kõrvale kaldub, teine osa aga läheb endises sihis edasi, siis ilmuvad ekraanil üksteise kõrval kaks värvilist täppi. On prisma

murdja nurk küllalt väike ($\sim 4^\circ$), siis langevad mõlemad värvilised täpid osalt ühte ja ühine osa on valge. Õhukest prismat 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 läbiläinud kiired läätse 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 ja et näit. punase värvi toonile on täiendusvärviks ainult üks kindel roheline toon.

Eelpool rääkisime ainult värvilistest kiirtest, mitte värviainetest. Kas kollase ja sinise värviaine segavärv on ka valge? Kas on üldse mõnede värviainete segavärv valge?

Kehade värv

68. Peegeldunud valguse värv. Iga keha peegeldab osa temale langevast valgusest, kuna teine osa tungib kehasse. *lähipaistva või*

Asetame valge paralleelkiirte kimbu teele värvitu läbipaistmatu poleeritud keha (näiteks hariliku või musta klaasplaadi) ja juhime keha välispinnal peegeldunud kiired lakke. Me näeme lael valge täpi. Muudame langeva valguse värviliseks (laterna ette asetatud värvilise klaasiga), siis muutub vastavalt ka täpi värv lael; ta on samavärviline kehale langeva valgusega. Võtame värvitu peegeldava keha asemel värvilise läbipaistva või läbipaistmatu poleeritud keha (värvilise klaasi) ja kordame sama katset valgete ja värviliste kiirtega, siis saame sama resultaadi: peegeldava keha värvi pääle vaatamata on täpp lael samavärviline langeva valgusega. Me järeldame: keha välispinnal peegeldunud valguse värvi olene peegeldava keha värvist.

69. Läbipaistva keha värv. Kehasse tunginud valgus läheb läbipaistvast kehas osalt läbi, osalt aga neelub (näit. heidab klaas, jää, vesi päikese kiirtes varju).

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 näit. punase klaasi, siis kaovad spektris kõik värvid päälle punase, oranži ja osalt kollase. Rohelise klaasi asetamisel kaovad suuremad osad spektri otsadest, kollane ning helesinine nõrgenevad märksa, ainult roheline värv jääb muutumatuks. Katsed näitavad, et värviline läbipaistev keha neelab värvilistest kiirtest ühti rohkem kui teisi. Me järeldame: värvilised kehad paistavad läbilastud värviliste kiirte segavärvis.

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

70. Läbipaistmatu keha värv. Asetame läbipaistmatu keha spektri kohale ekraanile. Musta keha pääl kaob terve spekter, järelikult must keha neelab kõik värvilised kiired. Valge keha pääl on kõik spektri värvid ühteviisi hästi näha. Karmiiniga värvitud kehal on ainult punane spektri osa hästi näha, kuna teised värvid on täiesti kadunud, neelatud. Mõne teise punase värviga värvitud kehal on näha päälle punase ka oranž ja nõrgalt kollane spektri osa. Rohelisel kehal kaovad suuremad osad spektri otsadest ja ainult roheline osa jääb heledaks. Indigoga värvitud kehal on näha ainult sinine spektri osa.

Nende katsete põhjal võime läbipaistmatu keha värvi tekkimist seletada järgmiselt: läbipaistmatu värviline keha laseb valgust sisse tungida õhukesse pindkihti, kus osa neelub, osa aga igas sihis tagasi heitub, hajub. Pindkiht neelab ühti värvilisi kiiri rohkem kui teisi. Läbipaistmatu keha paistab hajunud värviliste kiirte segavärvis.

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

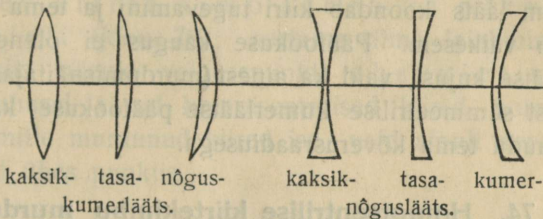
71. Värviainete segavärv. Kollase värviaine neelumisvõimet uurides leiame, et ta neelab kõik värvid päälle kollase, oranži ja rohelise; samuti

leiame, et sinine värviline neelab kõik värvid päale rohelise, sinise ja violeti. Sellepärast neelab kollase ja sinise värviline segu kõik värvid päale rohelise, mida üksikult kumbki ei neela, ja paistab selle tõttu rohelisena.

Sellest näitest selgub, et värviainete segavärvi tekkimine on seotud neelumisega, tähendab, ta on värvide lahutamise nähtus kuna värviliste kiirte segavärvi tekkimine on värvide liitmise nähtus.

Murdumine sfäärilistes läätsedes

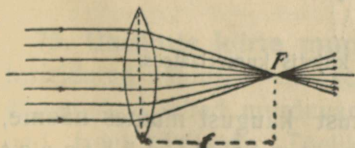
72. Läätsede liigitamine. Sfäärilised läätsed on kahe kerapinnaga piiratud läbinähtavad kehad, harilikult klaasist. Joonises 73 on antud mitmeid liiki läätsed. Kumerläätsed on keskelt paksemad, neid nimetatakse ka koondavateks ehk positiivseteks läätsedeks. Nõgusläätsed on keskelt õhemad, neid kutsutakse ka hajuvateks ehk negatiivseteks läätsedeks. Kerapindade kõveruskeskentreid ühendav sirgjoon nimetatakse läätsede optiliseks pääteljeks.



Joon. 73. Läätsede liigid.

Et kiirte käik läätses oleks paremini näha, joonistame läätsed hästi kumerad või nõgusad.

73. Kumerläätsede pääfookus. Asetame kumerläätsede päikesekiirte teele nii, et päätelg oleks kiirtega paralleelne. Siis panevad kiired (suutsu abil), et kiired pärast kahekordset murdumist läätses koonduvad koonusetaoliselt ja lõikuvad ühes punktis, kust nad edasi laiali lähevad. Analoogiliselt sfääriliste peeglitega nimetame ka läätsede juures punkti, milles lõikuvad pääteljega paralleelsed kiired pärast murdumist, **pääfookuseks (F)**



Joon. 74. Kumerläätsede pääfookus.

ehk päätulipunktiks ja tema kaugust läätse keskpunktist **pääfookuse kauguseks** (f , joon. 74). Läätsel on kaks pääfookust — teine teisel pool läätse samal kaugusel.

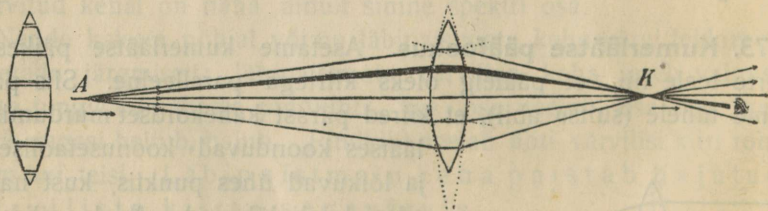
Kuidas võib leida katse teel läätse pääfookuse kaugust?

Katsetes võime tarvitada kumerläätse pääfookust kui tugevat punktitaolist valguseallikat.

Asetame valgusepunktist (laterna kiirte koonuse tipust) laialiminevate kiirte teele läätse nii, et tema pääfookus langeks ühte valgusepunktiga, siis näeme, et pääfookusest tulevad kiired on pärast murdumist pääteljega paralleelsed; valguseplekk, mis tekib seinal, on sama suur kui lääts.

Katsetest mitmesuguste kumerläätsedega leiame, et kumeram lääts koondab kiiri tugevamini ja tema pääfookuse kaugus on väikesem. Pääfookuse kaugus ei olene aga mitte ainult läätse kujust, vaid ka ainest (murdumisnäitajast). Harilikust klaasist sümmeetrilise kumerläätse pääfookuse kaugus võrdub ligikaudu tema kõverusraadiusega.

74. Homotsentrilise kiirtekimbu murdumine kumerläätses. Valgusepunkti kujutis. a. Valgusepunkti pääfookusest kaugemale viies näeme, et murdunud kiired koonduvad ja lõikuvad ühes punktis (joon. 75). Tähendab, väljaspool pääfookust asuvast valgusepunktist tulev kiirte kimp koondub pärast murdumist kumerläätses jälle ühes punktis samal teljel, kus tekib valgusepunkti tõeline kujutis.



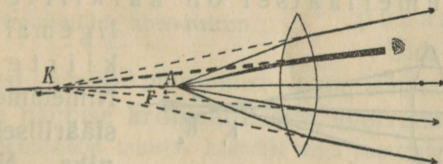
Joon. 75. Valgusepunkti tõeline kujutis kumerläätses.

Valgusepunkti ja läätse vastastikust kaugust muutes näeme, et valgusepunkti kaugenemisel läätsest tema tõeline kujutis ligineb läätsele.

Kui oleks võimalik valgusepunkti kaugust suurendada lõpmatuseni, nii et kiired oleksid paralleelsed pääteljega, siis saaksime kujutise läätse pääfookuses; tähendab, pääteljel lõpmata kaugel asuva valgusepunkti kujutis on pääfookuses.

Möödame valgusepunkti kauguse a ja vastava kujutise kauguse k läätsest, ja asetame siis läätse nii, et valgusepunkti kaugus oleks k , siis tekib kujutis läätse taga kaugusel a ; tähendab, valgusepunkt ja tema kujutis on ümberpaigutatavad.

b. Valgusepunkti pääfookust peeglile ligemale tuues näeme, et pääfookuse ja läätse vahel asuvast valgusepunktist tulev kiirte kimp läheb ka pärast murdumist laiali (joon. 76); asetame silma laialiminevate kiirte teele, siis näeme valgusepunkti ebakujutise. Tähendab, ka sel juhul jäävad homotsentrilised kiired homotsentrilisteks, kuid mitte murdunud kiired ise, vaid ainult nende pikendused lõikuvad ühes punktis.



Joon. 76. Valgusepunkti ebakujutis kumerläätses.

Seleta, kuidas projektsioon-laternaga, mille esiseinas asub kumerlääts (kondensaator) võib saada mitmesuguseid kiirte kimpe valguseallika ümberpaigutamise teel (joon. 42).

75. Üksikute kiirte murdumine kumerläätses. Eelmises § kirjeldatud nähtused on seletatavad ainult sellega, et läätse äärepoolsed kiired murduvad rohkem kui päätelje ligidale langevad tsentraalkiired. Tõelikult, kui vaadelda läätse üksikuid osi kui prismasid (joon. 75), siis suurenevad ääre poole nende

murdjad nurgad ja selle tõttu kalduvad ka ääreoolsed kiired rohkem päätelje poole.

Joonised 75 ja 76 näitavad kiirte käiku läbi läätses. Joonisest 75 selgub ka kiirte ümberpööratavus.

Asetame nagu katses nõguspeegliga (§ 52, joon. 43) valgusepunktist väljaminevate kiirte tee väikese ekraani paralleelsete piludega ja selle taha opt. ketta külge kinnitatud kumerläätses riba, siis võime hästi näha üksikute kiirte murdumist.

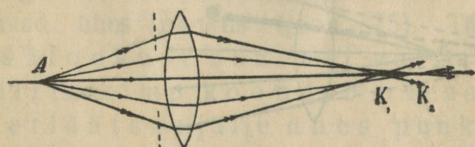
1. Seleta joonise abil tõelise kujutise lähenemist valgusepunkti kaugenemisel (langemisenurga muutumise põhjal) ja ümberpöördult.

2. Seleta joonise abil ebakujutise liikumist, kui läätses ja pääfookuse vahel asuv valgusepunkt kaugeneb läätsesest.

3. Kas muutuksid murdumisenähtused, kui valgusepunkt ja läätses oleksid vees?

4. Seleta joonise abil pääteljega paralleelsete kiirte käiku läbi õhuga täidetud õõnesläätses (taskukella klaasidest kokkukleebitud), mis on asetatud vette.

76. Sfääriline aberratsioon kumerläätses. Äär- ja tsentraalkiirte murdumist viimases katses ligemalt tähele pannes näeme, et sfäärilisel kumerläätses on äärkiirte lõikepunkt



Joon. 77. Sfääriline aberratsioon.

ligemal kui tsentraalkiirte (joon. 77)

Nimetame selle nähtuse **sfääriliseks aberratsiooniks**. Nähtust seletame

sellega, et läätses ääreoolsed osad kui pris-

mad, võrdlemisi suure murdja nurgaga, koondavad kiiri rohkem kui läätses keskmised osad.

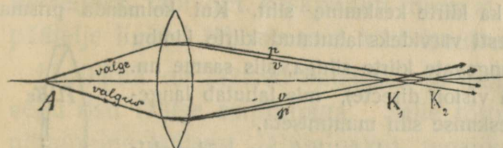
Asetame suure hästi kumera läätses valgusepunktist laialiminevate kiirte tee, katame tema ääred kinni musta paberiga, milles on tehtud avaus tsentraalkiirte jaoks, ja tekitame ekraanil valgusepunkti kujutise. Katame nüüd paberist kettaga kinni äärte asemel läätses keskmise osa, siis pääsevad läbi ainult äärkiired. Et saada ekraanil valguseallika terava kujutise, peame ekraani nihutama ligemale. Nähtus seletub sfäärilise aberratsiooniga. Kuidas?

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

Missuguste läätsede juures on sfääriline aberratsioon iseäranis tuntav?

77. Kromaatiline aberratsioon kumerläätses. Hästi kumera läätsel abil saadud valgusepunkti kujutist ligemalt vaadeldes näeme, et kujutise ääred on värvilised. Nihutame ekraani pisut ligemale, siis on ääred punased, nihutame ta kaugemale, siis muutuvad ääred violetiks.

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



Joon. 78. Kromaatiline aberratsioon.

Me järeltame: murdumisel kumerläätses on violett kiirte lõikepunkt läätsel ligemal kui punaste (joon. 78).

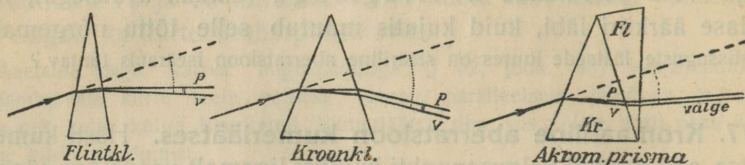
Üldse ei koondunud värvilised kiired pärast murdumist kumerläätses ühes punktis. Nimetame selle nähtuse **kromaatiliseks aberratsiooniks**.

Kromaatiline aberratsioon takistas kauemat aega paremate optiliste riistade, nimelt mikroskoopide valmistamist; alles ~ a. 1750 läks korda kõrvaldada aberratsiooni mitme läätsel kombinatsiooni teel.

Missuguste läätsede juures on kromaatiline aberratsioon iseäranis tuntav?

78. Akromaatiline prisma- ja lääts. Võtame kaks isesugusest ainekst valmistatud prisma, mis annavad samal ekraanil ühepikkused spektrid, siis paneme tähele, et need spektrid ei teki ekraanil samal kohal. Kui näiteks võtta üks prisma flintklaasist ja teine kroonklaasist kaks korda suurema murdja nurgaga, siis annavad mõlemad ekraanil samal kaugusel ühepikkused spektrid, tähendab, prismade dispersioonid on samatugevused. Kroonklaasist prismaga saadud spekter on aga langevate valge kiirte sihiga võrreldes ligi kaks korda rohkem kõrvale kallutatud kui flintklaasist

prismaga saadud spekter, tähendab, kroonklaasist prisma juures on kiirte kogukaldumine suurem (joon. 79).

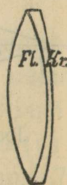


Joon. 79. Akromaatiline prisma.

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 laotumisetä.

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.

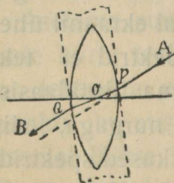
Akromaatilise prisma ehituse printsiibil on võimalik valmistada **akromaatilist lääts** (joon. 80), mis koosneb flintklaasist kumerläätsesest ning sellega kokkukleebitud kroonklaasist nõgusläätsesest. Paremate optiliste riistade läätsed on kõik akromaatilised.



Joon. 80. Akromaatiline lääts.

79. Kumerläätses optiline keskpunkt, abitelg, pääkiir ja tsentraalkiir.

Näitame geomeetriliselt, et igal kumerläätsel on **optiline keskpunkt**, s. o. niisugune punkt, millest kiired lähevad läbi ilma sihi muutmiseta.



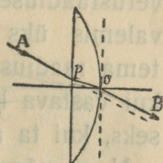
Joon. 81. Sümmetrilise kumerläätses opt. keskpunkt.

Joonisest 81 näeme, et läbi sümmeetrilise kumerläätses keskpunkti O minev kiir lõikab läätses pinde punktides P ja Q , kus läätsesle tõmmatud puutumispinnad on paralleelsed. Kiir $APQQB$ läheb läbi läätses ilma sihi muutmiseta nagu läbi tasaparalleelse plaadi. Järe-

likult langeb sümmeetrilise kumerläätsse optiline keskpunkt ühte tema geomeetrilise keskpunktiga.

Tasakumerläätsse opt. keskpunkt asub ka pääteljel, nimelt läätsse kumeral välispinnal (joon 82; mispärasst?).

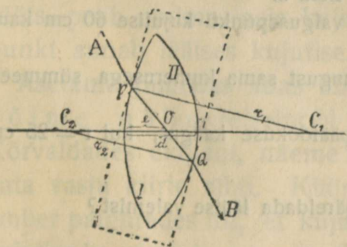
Elmisest võime järeldada, et mittesümmeetrilise kaksikkumerläätsse opt. keskpunkt asub ka pääteljel läätsse sees tema kumerama pinna läheduses, sest sümmeetrilise kumerläätsse muutumisel tasakumerläätsseks nihkub opt. keskpunkt geomeetrilisest keskpunktist kuni kumera välispinnani. Samuti võib näidata, et nõguskumerläätsse opt. keskpunkt asub pääteljel väljaspool läätsse kumerat pinda.



Joon. 82. Tasa-kumerläätsse opt. keskpunkt.

Läbi läätsse opt. keskpunkti minevat sirget nimetame läätsse **abiteljeks**, läbi opt. keskpunkti minevat kiirt **pääkiireks** ja läätsse päätelje ligidal läbiminevat kiirt **tsentraalkiireks**.

Harilikult on läätsed õhukesed ja nendele langevad kiired pea-aegu risti läätsse esipinnaga. Selle tõttu ei ole pääkiire kõrvalenihkumine läätssest läbiminekul tegelikult tuntav ja edaspidi me seda kõrvalenihkumist arvesse ei võta.



Joon. 83 Kumerläätsse opt. keskpunkt.

Kumerläätsse opt. keskpunkti võib kindlaks määrata analüütiliselt. Joonises 83 on P ja Q kahe paralleelse pinna puutumispunktid. Sirge PQ lõikab siis päätelje opt. keskpunktis O. Kolmnurkade sarnasuse põhjal on

$$C_1P : C_1O = C_2Q : C_2O$$

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

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

$$r_1r_2 - r_1d + r_1e = r_1r_2 - r_2e$$

$$e(r_1 + r_2) = r_1d$$

$$e = \frac{r_1d}{r_1 + r_2} = \frac{d}{1 + \frac{r_2}{r_1}}$$

Määra selle valemi põhjal optilise keskpunkti asukoht üksikute kumerläätsse tüüpides ($r_1 = r_2$, $r_2 < r_1 < \infty$, $r_1 = \infty$, r_1 negatiivne ja tema absol. suurus $> r_2$).

80. Läätse valem tarvitamine. Kõikide sfääriliste läätsede kohta on maksev üldine läätse valem

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

kus a ja k on valgusepunkti ja tema kujutise kaugused läätest, m läätsse aine murdumisnäitaja ning r_1 ja r_2 läätsse pindade kõverusraadiused. On üks läätsse pind tasapind ($r = \infty$), siis kaob valemis üks murd. On läätsse pind nõgus, siis tuleb võtta tema raadius negatiivse märgiga (raadius loetakse positiivseks, kui vastava kerapinna tšenter asub teiselpool läätsse, ja negatiivseks, kui ta asub samalpool läätsse).

Nagu nõguspeegli valemigi juures asetame $a = \infty$ ja leiame pääfookuse kauguse

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

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

Sel põhjal võib valemile (1) anda lihtsama kuju:

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

Harilikult tarvitatakse viimast valemit, sest läätsedel on ülesmärgitud nende pääfookuse kaugused (f).

1. Kumerläätsse $f = 15$ cm, $a = 60$ cm. Leia k .
2. Kumerläätsse $f = 20$ cm, $k = 30$ cm. Leia a .
3. Kumerlääts annab 3 m kaugusel oleva valgusepunkti kujutise 60 cm kaugusel. Leia läätsse f .
4. Võrdle tasakumerläätsse pääfookuse kaugust sama kumerusega sümmeetrilise kaksikkumerläätsse omaga.
5. Leia sümmeetrilise kaksikkumerläätsse pääfookuse kaugus, kui $r = 25$ cm ja $m = \frac{3}{2}$.
6. Kas ümberpööratavuse printsiipi võib järeldada läätsse valemist?

81. Läätsse valem tuletamine. Tuletame kumerläätsse valem. Valem tuletamisel vaatleme ainult tsentraalkiiri; sel juhusel on nurgad α , β jne. väikesed ja sellepärast võib lugeda $\alpha = \sin \alpha$, $\beta = \sin \beta$ jne.

Murdumisnäitaja definitsiooni põhjal saame (joon. 84)

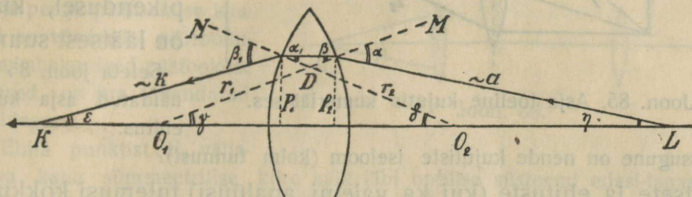
$m = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$	$\frac{1}{m} = \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1}$
$\sin \alpha = m \sin \beta$	$\sin \beta_1 = m \sin \alpha_1$
$\sin \alpha + \sin \beta_1 = m (\sin \beta + \sin \alpha_1)$	

Et aga nurgad on väikesed, siis $\alpha + \beta_1 = m(\beta + \alpha_1)$. Arvesse võttes, et
 $\alpha = \gamma + \eta$; $\beta_1 = \varepsilon + \delta$; $\beta + \alpha_1 = \angle MDO_2 = \gamma + \delta$,

saame

$$\gamma + \eta + \varepsilon + \delta = m(\gamma + \delta)$$

$$\eta + \varepsilon = (m - 1)(\gamma + \delta).$$



Joon. 84.

Et nurgad on väikesed, siis võib selle asemel kirjutada

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

ehk

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

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

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

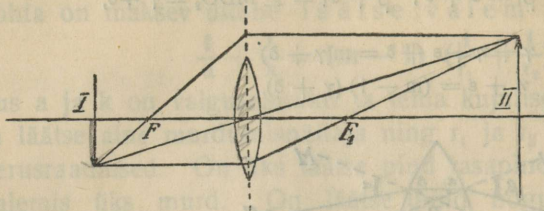
82. Asja kujutise ehitamine kumerläätses. a. Et kumerlääts peab andma asja kujutise, jäeldame sellest, et asja iga punkt annab läätses kujutise.

Asetame pimedas toas ühelt pool kumerläätses küünla (asi), siis võime näha teiselt pool läätses ekraanil leegi kujutise. Kõrvaldades ekraani, näeme kujutise endisel kohal õhus, kui vaadata vastu kiirte sihti. Küünalt lähendades ja ekraani vastavalt ümber paigutades nii, et kujutis oleks ikka selge, võime jälgida kujutise kauguse ja suuruse olenevust asja kaugusest.

Seleta katse põhjal, kuidas muutub kujutise kaugus ja kujutise suurus, kui asi läheneb läätses. Kui kaugel läätses asub asi ja tema kujutis, kui nad on ühesuurused?

b. Punkti kujutise ehitamisel tarvitame nagu sfääriliste peeglitegi juures ainult kaht kiirt (mispärast?), harilikult pääkiirt ja päteljega paralleelset kiirt, sest nende käik on meil teada (võiks ka kasutada läbi pääfookuse

minevat kiirt). Paralleelkiirt murrame lihtsustamise mõttes ilma tuntava veata ainult ükskord läbi opt. keskpunkti minevat läbilõikel (või tema pikendusel, kui asi on läätsest suurem).



Joon. 85. Asja tõeline kujutis kumerläätses.

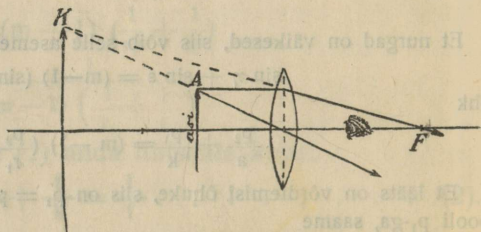
Seleta joon. 85 ja 86 näidatud asja kujutise ehitus.

Missugune on nende kujutiste iseloom (kolm tunnust)?

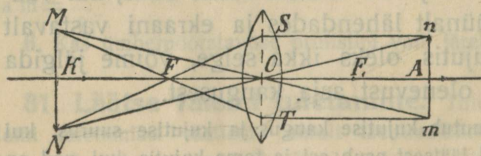
Katsete ja ehituste (kui ka valemi analüüsi) tulemusi kokku võttes saame nn. liikumis-

reegli: liigub asi lõpmatuses kahekordse pääfookuse kauguseni, siis nihkub tema vähendatud tõeline ümberpööratud kujutis pääfookusest kahekordse pääfookuse kauguseni, selle juures suurenedes;

liigub asi kahekordsest pääfookuse kaugusest pääfookuse ni, siis liigub tõeline ümberpööratud suurendatud kujutis kahekordsest pääfookuse kaugusest lõpmatuseni, selle juures suurenedes; liigub asi pääfookusest läätse ni, siis liigub suurendatud päripidine ebakujutis samalpool läätse lõpmatuses läätse ni, selle juures vähenedes.



Joon. 86. Asja ebakujutis kumerläätses.



Joon. 87.

1. Tuleta kujutise ehituse põhjal (joon. 87) kumerläätses valemi $\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}$.

2. Tõenda geomeetriliselt (sarnaste kolmnurkade abil), et asja ja kujutise joon suurused on võrdelised nende vastavate

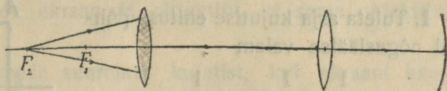
kaugustega läätse opt. keskpunktist.

3. Kumerläätses $f = 15$ 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. Kumerlääte pääfookuse 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 temast 20 cm kaugusel seisvast asjast 4 korda suurendatud tõelise kujutise. Leia pääfookuse kaugus.

6. Joonises 88 kujutatud läätsede ja peegli pääfookuse kaugused ja võrdsed; pääfookused ja kahekordsed pääfookuse kaugused on ära tähendatud punktidega.

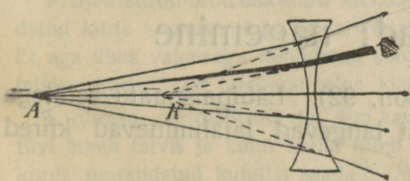


Joon. 88.

a. Ehitä punktist F_2 väljamineva kahe sümmeetrilise kiire käik läbi optilise süsteemi edasi-tagasi, äratähendades kiirte sihid nooltega.

b. Tee sama ehitus punktist F_1 väljaminevate kiirte kohta.

83. Murdumine nõgusläätses. Katsed (opt. ketta ja läätses ribaga) ja ehitused (joon. 89) näitavad, et samast punkti

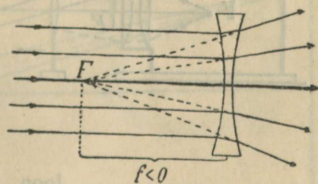


Joon. 89. Murdumine nõgusläätses.

tist väljaminevad kiired lähevad pärast kahekordset murdumist nõgusläätses laiali ja paistavad välja tulevat ühest samal teljel asuvast punktist, kus vaateleja näeb valgusepunkti ebakujutise.

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

On valgusepunkt lõpmatuses, siis asub tema ebakujutis pääfookuses (F joonises 90). Nõgusläätses pääfookus ja valgusepunkt asuvad samal pool läätses; nõgusläätses pääfookuse kaugus loetakse negatiivseks.



Joon. 90. Nõgusläätses pääfookus.

Nõgusläätses pääfookuse kauguse määrame harilikult kumerläätses abil. Selleks võtame kumerläätses, mis kompenseerib nõgusläätses hajumise (mõjuvad kokku kui tasaparalleelne plaat); siis on läätsede pääfookuse kaugused arvuliselt võrdsed.

Näita graafiliselt, et ka nõgusläätses on opt. keskpunkt.

84. Kujutise ehitamine nõgusläätses. Valgusepunkti kujutise ehitamisel tarvitame harilikult paralleel- ja pääkiiri, nagu kumerläätségi juures.

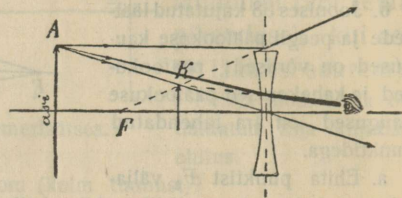
Seleta asja kujutise ehitus ja iseloom joon. 91.

1. Tuleta asja kujutise ehituse põhjal nõgusläätsse valem

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

kus a , k ja f tähendavad asja, kujutise ja pääfookuse absoluutseid kaugusi optilisest keskpunktist (vaata § 82 № 1).

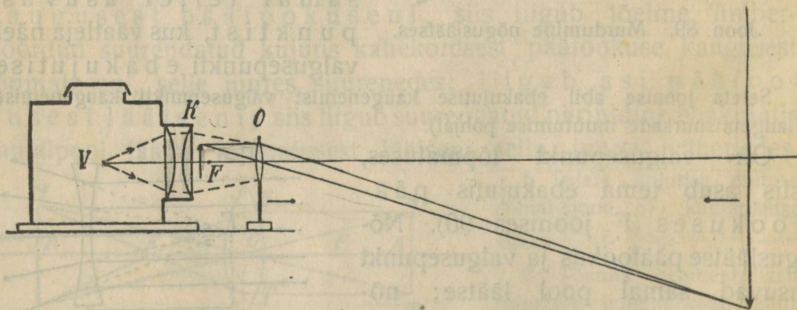
2. Võrdle kumerläätsse nõguspeeglita ja nõgusläätsse kumerpeeglita. Missugused suurused vastavad teineteisele?



Joon. 91. Asja ebakujutis nõgusläätses.

Optilised riistad; nägemine

85. Projektsioon-aparaat. (joon. 92). Läbipaistmatu seintega laternasse asetatud valguseallikast langevad laialiminevad kiired



Joon. 92. Projektsioon-aparaat.

kondensaatorile (koosneb harilikult kahest tasakumerast läätses), koonduvad ja langevad edasi kumerläätssele, nn. **objektiivile**. Teel nad valgustavad kondensaatori ja objektiivi vahele asetatud keha või diaposiitivi (klaasile tehtud pilti). Pimedas toas

ilmub ekraanil diapositiivi tõeline ümberpööratud suurendatud kujutis, kui objektiivi või ekraani kaugus asjast on sellekohaselt reguleeritud. Hajutud valguse kõrvaldamiseks asetatakse mõnikord veel objektiivi ja kondensaatori vahele lõõtsataoline kamber.

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

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

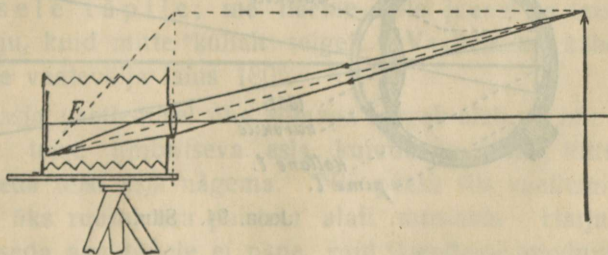
On näiteks kujutise joonsuurendus 30-kordne, siis on kujutise pindsuurendus 900-kordne ja kujutise valgustus 900 korda nõrgem kui diapositiivi oma. Sellest selgub tugeva valguse allika tarvidus. Teisest küljest on soovitatav võimalikult punktitaoline valguseallik. Nimetatud põhjustel tarvitatakse paremates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

Projektsioon-mikroskoobil asetatakse väike preparaati kondensaatoriga koondatud kiirte koonuse tippu ja tarvitatakse lühikese fookuse kaugusega objektiivi. Et aga ühes valgusega koondatud soojus preparaati ja objektiivi ei rikuks, asetatakse kiirte teele tasaparalleelne klaasanum külma veega, mis neelab soojust.

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

86. Päevapildi aparaat. Päevapildi aparaat (joon. 93) on ha-

rilikult lõõtsataoline pimekamber, mille pikkust võib muuta; esiseina tehtud avauses asub objektiiv, mida võib avada ja suluda; ta-



Joon. 93. Päevapildi aparaat.

gaseinale võib kinnitada mattklaasist ekraani või kasseti päevapildi plaadiga. On asja kaugus objektiivi pääfookuse kaugusega

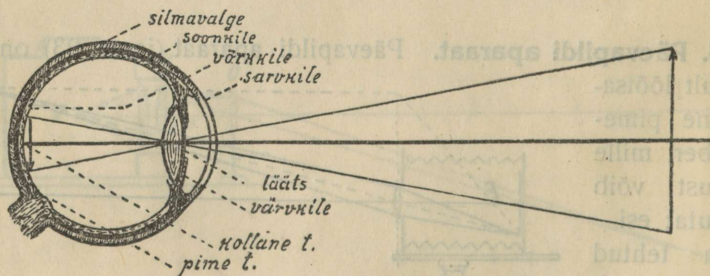
võrreldes suur, siis tekib kambris pääfookuse taga, kuid tema ligidal, vähendatud ümberpööratud tõeline kujutis, mida selgelt näha võib kohandatud mattklaasil.

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

Pildi ülesvõtmise ning negatiivi ja positiivi valmistamise käiku katsu õpetaja või päevapildistamises vilunud kaasõpilase seletuse järele meeles pidada ja seletada.

Lihtsamatel väikestel aparatuuridel on objektiiivid väikese pääfookuse kaugusega, millega võrreldes asi asub praktiliselt lõpmatuses, kui ta on kaugemal kui paar meetrit. Niisugusel juhusel tekivad kujutised alati samal kohal, nimelt objektiivi pääfookuse pinnal ja sellepärast valmistatakse pimekambrid kindla pikkusega (mis võrdub objektiivi pääfookuse kaugusega). Ülesvõtmise niisuguse aparatuuriga on lihtne, sest aparatuuri ei ole tarvis kohandada, kuid saadud pildi perspektiiv ei ole õige ja viga on seda tuntavam, mida ligemalt on asi üles võetud. Näiteks on kitsa uulitsa lähem osa pildil liig lai. Ka paistab sarnase objektiiiviga ligidalt ülesvõetud kinopiltide juures silma lähenevate ja kaugenevate näitlejate ebaõige suuruse muutumine. Asjaarmastajate paremate aparatuuride objektiivide fookuse kaugused on suuremad (umbes võrdsed plaadi pikema serva pikkusega) ja praktiline lõpmatus algab siin umbes 10–18 m kaugusel; ligemate asjade ülesvõtmisel on tarvis aparatuuri kohandada. Ligidalt ülesvõetud pildil ei anna need ka õiget perspektiivi, nimelt plaadi äärepoolses osas.

87. Silm ja nägemine. Silma võime vaadelda kui pimekambrit. Joon. 94 kujutab ülalt vaadates pahema silma horisontaalset läbilõiget.



Joon. 94. Silm.

Silmavalge on läbipaistmatu, sarvkile läbinähtav. Väljastpoolt silma langevad kiired murduvad sarvkiles, klaaslimas ning silmaläätses, mis koosneb üksikutest kihtidest (sibulasarnaselt). Kõik murdjad kihid kokku moodustavad keerulisema liit-objektiivivi,

mis mõjub nagu üksainus kumerlääts ja mille opt. keskpunkt asub ~ 7 mm kaugusel sarvkilest läätse tagumise pinna ligidal.

Valgusetundelik võrkile, mis asub objektiivi pääfookuse pinnal, vastab päevapildistamise plaadile. Ta koosneb peenikestest kiududest, milleks jaguneb nägemiserk. Ergu kiudude otsad kujutavad osalt silindritaolisi pulgakesi, osalt pudelisarna-seid kolbikesi. Objektiivi päätelje nn. kollase täpi kohal puuduvad pulgakased, kuid on rohkesti kolbikesi; kolbikete vastastikune kaugus on sääl ainult $\sim 0,004$ mm. Nägemisergu harunemise nn. pimetäpi kohal ei leidu erguotsi.

Läbipaistmatu värvkile ühes oma avausega (silmatera) mõjub kui diafragma.

Harilikult ei võta me arvesse kiirte murdumist kõikides silma kihtides, vaid kujutame lihtsustamise mõttes silma kui kerasarnast pimekambrit ühe ainsa murduva kumerläätsesega ($f = 15$ mm), mille valgusetundelik tagasein (võrkile) asub selle läätse pääfookuse pinnal. Niisugust silma nimetame redutseeritud silmaks.

Väljaspool silma asuvast asjast tekib võrkkilel tõeline ümberpööratud kujutis, mis ärritab närviotse ja tekitab pääajus nägemise aistingu. Ümberpööratud kujutisi oleme harjunud väikestest saadik teiste meelte abil seletama kui päripidiseid.

88. Kollane ja pimetäpp. Võrkkile tundelikkus ei ole igal kohal ühesugune. Kõige paremini näeme asja või asja osa siis, kui tema kujutis langeb kollasele täpile. Sel põhjusel juhim e silma alati nii, et vaadeldava asja kujutis langeks kollasele täpile; me näeme selle juures ka teisi ümbritsevaid asju, kuid mitte küllalt selgelt. Vaatlemisel kahe silmaga on meie vaatevälja laius 180° .

Mingisuguse asja vaatlemisel ühe silmaga langeb alati pime-täpile mõne teise ümbritseva asja kujutis ja selle tõttu ei peaks meie seda teist asja nägema. Nii peaks siis vaatlemisel ühe silmaga üks ruumi osa paistma alati musana. 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. 95); teataval kaugusel silmast (~ 22 cm) kaob kõrvalolev väike must ring ja paistab valgena nagu paber.

Joonist 95 ümberpöörates ja musta täppi vaadates kaob samal kaugusel valge ring ning ruut paistab tervelt mustana.

Seleta nähtus joon. 96 abil.

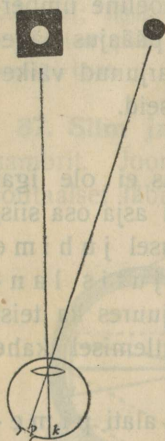


Joon. 95. Pimetäpi demonstreerimine.

89. Silma kohanemise võime (akkom^{ad}otatsioon). Normaalse silma puhkeolekus langevad kaugelolevate asjade kujutised võrkkilele ja selle tõttu me näeme neid asju selgelt.

Ligineb aga asi silmale, siis peaks kujutis kaugenema võrkkile taha, kuid me muudame siliaar-muskli abil läätse kumeramaks, nii et kujutis langeb jälle võrkkilele. Läätse kumeruse muutumist vastavalt asja kaugusele nimetame **kohanemiseks (akkomodatsiooniks)**.

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



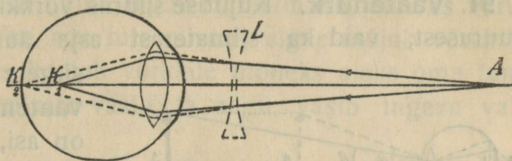
Joon. 96.
Pimetäpp.

Kohanemise võime on piiratud. Normaalse silm võib kohaneda lõpmatuseni kuni ~ 15 cm, tähendab, ta võib näha selgelt igat asja, mis on silmast kaugemal kui 15 cm. On aga asi lähemal kui 15 cm, siis ei suuda silm läätse küllalt kumeraks teha, kujutis tekib kohanemise pingutuse pääle vaatamata võrkkile taga ja meie ei näe asja selgelt. Nii siis asub normaalse silma lähem kohanemispunkt ~ 15 cm kaugusel (lapsel ~ 10 cm), kaugem kohanemispunkt lõpmatuseni ning järelikult ulatab kohanemise kaugus 15 cm kuni lõpmatuseni.

Igapäevastest nähtustest on teada, et me näeme asju seda paremini, mida lähemal nad meile on. Sellepärast toome asja silmale võimalikult ligidale, kui tahame tähele panna tema peensusi. Lugesel või kirjutamisel hoiame raamatu 25—30 cm kaugusel, sest kohanemine lühema maa päale väsitaks silma. Kaugust (25—30 cm), milles normaalne silm võib hästi lugeda ilma tuntava kohanemisväsimumeseta, nimetatakse normaalse silma **selgenägemise kauguseks**.

90. Lühidaltnägiija ja kaugelenägiija. Prillid. a. Lühidaltnägiija silma lääts on silma muna pikkuse kohta liig kumer. Selle tõttu tekivad kaugelolevate asjade kujutised silma puhkeolekus võrkkiile ees (punktis K_1 , joon. 97) ja neid asju ta selgelt ei näe.

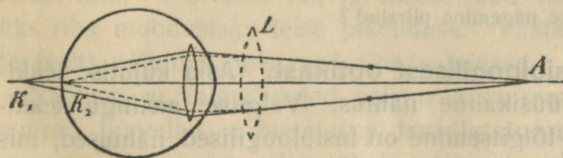
Ka akkomodatsiooni pingutus ei aita siin, sest see teeks läätsed veel kumeramaks. Normaalselt nägemiseks tarvitab lühidaltnägiija prillina nõgusläätsed, mis kokku silma objektiiviga moodustab pikema fookusekaugusega (lamedama) objektiivi, nii et ka kaugemate asjade kujutised võivad tekkida võrkkiel (punktis K_2).



Joon. 97. Lühidaltnägiija silm ja prillid.

b. Kaugelenägiija silma lääts on silma muna pikkuse kohta liig lame. Selle tõttu ta ei suuda akkomodatsiooni pingutuse päale vaatamata läätsed küllalt kumeraks teha, et ligidalt olevaid asju selgelt näha. Ligidalolevate asjade kujutised teki-

vad võrkkiile taga (punktis K_1 , joon. 98). Normaalselt nägemiseks tarvitab kaugelenägiija prillina kumerläätsed, mis kokku silma ob-



Joon. 98. Kaugelenägiija silm ja prillid.

jektiiviga moodustab lühema fookusekaugusega (kumerama) objektiivi, nii et ka ligimate asjade kujutised võivad tekkida võrkkiel (punktis K_2).

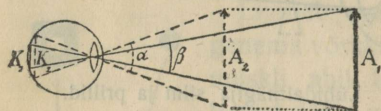
Vana duse kaugelenägemine tekib ka normaalse silma juures vanaduse või ülitöötamise tagajärjel. Silm kaotab kohanemisvõime ja võib nagu normaalne silm puhkeolekus näha hästi ainult kaugelolevaid asju. Vastava prilliga (kumerlääts) võib näha hästi ka ligidalt, peab aga siis kaugele vaatamisel prilli kõrvaldama või vaatama üle prilli.

On silma ligem kohanemispunkt kaugemal kui 30 cm (selgenägemise kaugus), siis nimetame teda kaugelenägijaks; on silma kaugem kohanemispunkt lähemal kui 30 cm, siis — lühidaltnägiaks.

Kaugelenägija ei riku oma silma, kui ta ei tarvita prilli, sest ta püüab siis ainult oma lääts kumeramaks teha, mis ei tee viga. — Et aga akkomodatsioon pingutusega ei saa lääts lamedamaks teha, siis püüab lühidaltnägija ilma prillita vaatlemisel võrkkiilet läätsel ligemale tuua, mis silmale võib väga kahjulik olla (võrkkiile võib koguni eralduda silma tagaseinast).

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

91. Vaatenurk. Kujutise suurus võrkkiilel ei olene ainult asja suurusest, vaid ka silmaterast asja äärpunktidesse tõmmatud sirgete vahelisest nurgast, nn.



Joon. 99. Vaatenurk.

vaatenurgast. Mida lähemal on asi, seda suurem on vaatenurk ja, tähendab, ka kujutis (joonises 99 $\alpha > \beta$).

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 üksteisest on väiksem kui 0,3 mm.

Mispärast näeme asja peensusi seda paremini, mida ligemal on asi?

Mispärast on peensuste nägemine piiratud?

92. Nähtused füsioloogilisest optikast. Asja kujutise tekkimine võrkkiilel on füüsikaline nähtus. Valguse aistingu tekkimine ning kujutiste tõlgitsemine on füsioloogilised nähtused, mis ei ole veel täielikult selgitatud. Arvatavasti mõjub valgus keemiliselt võrkkiilet katva nägemispurpuri (vedel värviaine) pääle ja see sünnitab nägemisergu kiudude ärrituse.

a. Järelpildid. Kui silma ärritus tekib valguse keemilise mõju tagajärjel nägemispurpuri pääle, siis ta peaks pärast valguse kustu-

mist veel edasi kestma kuni nägemispurpur ainete vahetuse läbi uuendatakse. Pärast valguse kustumist peaks silmas veel püsima vaadeldud asja nn positiivne järelpilt. Harilikult me seda tähele ei pane, mis on seletatav valguse mõju lühikese kestvusega.

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

Seleta kiiresti tiirutatud hõõguva sõe kuju, langeva tähe kuju.

Positiivsete järelpiltidega on seletatav liikuva pildi mulje kinos, 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.

Silma langevat valguse hulka reguleerib silm ise, muutes värvkile avause suurust. Kui aga intensiivne valgus mõjub võrkkile pääle pikemat aega, siis kaotab võrkkile mõneks ajaks oma tundelikkuse nõrgemate ärrituste vastu, ta nagu väsis tugeva valguse mõjul.

Mis paned tähele, kui hästi valgustatud või pimedast ruumist tuled sama keskmiselt valgustatud ruumi?

Vahi õhtul lambi leegile ja siis peeglisle. Mis paned tähele silmateras suhtes?

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

Seleta niisuguse negatiivse järelpildi tekkimist.

b. Irradiatsioon. Lõika mustast ja valgest paberist kaks ühe-laiust riba, ~ 3 mm lai, ja kleebi nad hallile paberile nii, et üks riba moodustaks teise pikenduse. Vaata ribade pääle (mitte teravalt). Kuidas paistavad ribade laiused?

Nähtust, et valged asjad paistavad suuremad olevat kui sama-suured 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 hõõgamisel jämedamana kui külmas olekus.

Irradiatsiooni nähtust seletame sellega, et silm mitte alati ei ole täpselt kohandatud, mille tõttu iga valgusepunkt tekitab võrkkiel suurema ulatusega pleki, ja mis on iseäranis tuntav intensiivse valgustuse juures.

c. Värvide nägemine. Värvipimedus. Joung-Helmholtz'i värvide nägemise teooria järele on võrkkiel pulgakesed üldiselt valgustundelikud, kolbikesed peale selle ka värvitundelikud. Et värvipimedada silm ei ole küllalt tundelik kas punase, rohelse või tumesinise värvi vastu, siis ollakse arvamusel, et kolbikesed võrkkiel on kolme liiki: ühed on tundelikud peamiselt punase, teised rohelse ja kolmandad tumesinise värvi vastu. Segavärv ärritab neid teatavas proportsioonis ja vaatleja näeb selle proportsioonile vastavat segavärvi. On aga värvipimedal näit. punasetundelikud kolbikesed nõrgad, siis näeb ta maailma nii, nagu normaalne silm läbi hele-rohelse prilli, mis punaseid kiiri osalt neelab.

Selle vaate pääl põhjeneb värviliste piltide trükkimine kolme värvilise kliše abil.

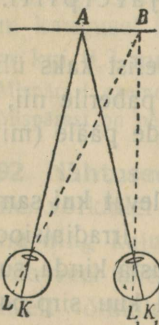
Värviline valgus tekitab ka valge mulje, kui ta on väga intensiivne.

Sinisetundelikud kolbikesed on tundelikumad kui teised; valguse nõrgenemisel kaovad teised värvid enne kui sinine.

d. Värvilised järelpildid. Pane valgele paberile intensiivpunasest paberist väljalõigatud rist, valgusta teda tugevasti ja vahi tema pääle teravalt ~ 20 sek jooksul. Risti eemaldamisel näed valgel paberil rohelse risti.

Seleta punase täiendusvärvis näiva värvilise järelpildi mulje tekkimist punasetundeliku kolbikete väsimusega.

Missugused järelpildid tekivad valgel paberil kollase või rohelse asja vaatlemise järele?



Joon. 100. Kahe silmaga ühekordselt nägemine.

e. Kontrastvärvid. Pane intensiivpunasele paberile mingisugune väikesem valge paberi tükk; ta paistab rohekana.

Seleta seda nn. kontrastvärvi tekkimist üldise silma väsimusega punase värvi vastu.

f. Nägemine kahe silmaga. Kahe silmaga vaatlemisel juhime silma teljed nii, et vaadeldava punkti (A joonises 100) 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).

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.

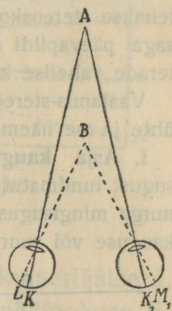
Seleta, mis sa näed, kui ühe silma muna sõrmega pisut kõrvale surud.

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

Kui meie kahest punktist, mis ei asu samal kaugusel (A ja B joonises 101), fikseerime ühe (näit. A), siis näeme teda ühekordselt, teist aga kahekordselt (mispärast?).

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

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



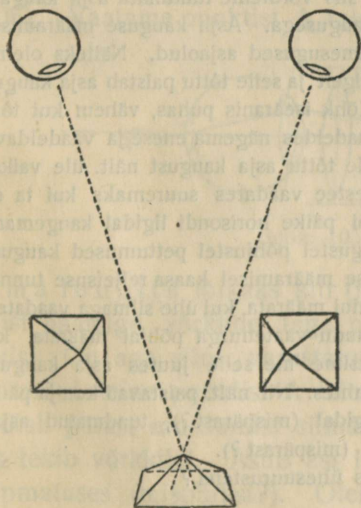
Joon. 101. Kahe silmaga kahekordselt nägemine.

g. Reljefsuse tunde tekkimine. Pildi vaatlemisel kahe silmaga on kujutised mõlema silma võrkkiel täiesti ühesugused, reljefse asja vaatlemisel aga mitte.

Selgita seda joonise 102 põhjal püramiidi kohta.

Me oleme harjunud saama võrkkiel mitte ühesugused kujutised ainult reljefse asja vaatlemisel kahe silmaga ja selle tõttu tekib reljefsuse tunne ainult kahe silmaga vaatlemisel, ja nimelt siis, kui mõlemad kujutised on niisugused nagu kumbki silm näeb seda asja üksikult.

On asjad kaugemal kui ~ 250 m, siis on kujutised mõlema silma võrkkiel täiesti ühesugused ja reljefsuse tunne kaob. Selle tõttu



Joon. 102. Reljefse asja nägemine kahe silmaga.

paistab maastik kaugelt vaadates joonisena ja mitmesugusel kaugusel olevad taevakehad samakaugel.

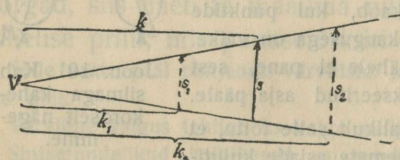
Mispärast vaadates pilti ühe silmaga on kergem teda reljefselt ette kujutada, kui vaadates kahe silmaga?

Mispärast on raske ühe silmaga vaadates niiti nõela taha ajada?

h. **Stereoskoop.** Asja kujutistele mõlema silma võrkkiel vastavaid pilte tehakse stereoskoop-päevapildi aparaadiga. Ta seisab koos kahest ühise lõõtsaga päevapildi aparaadist, mille objektiviide kaugus üksteisest võrdub silmarterade vahelise keskmise kaugusega.

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

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



Joon. 103. Asja kauguse ja suuruse määramine.

Asja kaugust k (joon. 103) võime ainult siis ligikaudu määrata, kui meil on andmed tema suuruse s kohta. Need andmed võivad olla mitmesugused. On meil asja suurus s umbes teada (inimene, kahekordne maja), siis tekib vaatenurga põhjal ka vastav kaugusetunne. On aga asja enese suurus tundmatu, kuid on

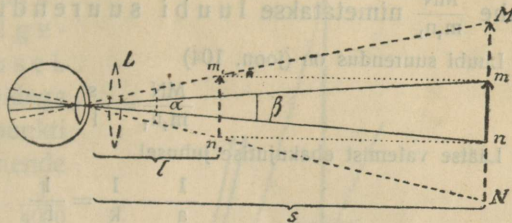
teada tema ligidaloleva teise asja suurus, siis võrdleme tundmatu asja kaugust tema ümbruses olevate tuntud asjade kaugusega. Asja kauguse määramisel aitavad kaasa või mõjuvad segavalt mitmesugused asjaolud. Näiteks oleme harjunud kaugemaid asju nägema mitte selgelt ja selle tõttu paistab asja kauguse ülduse 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 puistee 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 reljefsuse tunne; 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 suhtes. 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 ülduse ilmaga suuremana kui selge ilmaga (mispärast?).

Mispärast paistavad päike ja kuu umbes ühesuurustena?

93. Luup. Kui mõne väikese asja (joon. 104). peensused ei ole selgenägemise kaugusel küllalt selgelt näha, või on asi

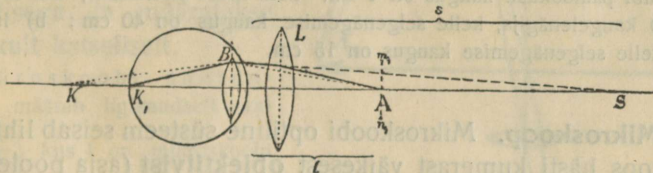
nõnda väike, et ta ei ole üldse näha ($\beta < 1'$), siis asetame asja silmale ligemale kui tema lähispunkt, näit. $m_1 n_1$ kohale. Vaatenurk ja vastavalt asja kujutis võrkkile suureneb ning selle tõttu on siis peensuste nägemise tingimused paremad. Asja lähendamine viib meid aga üle kohanemisvõime piiri, kujutis tekib võrkkile taga ja me ei näe asja selgelt.



Joon. 104. Luubi mõju.

Asetame aga silma ja asja (seisus $m_1 n_1$) vahele kumerlääts L nii, et asi asuks lääts ja tema pääfookuse vahel (pääfookuse ligidal), siis moodustab lääts ühes silma läätsesega lühema fookuse kaugusega objektiivi ja kujutis langeb võrkkilele. Niisuguse kumerlääts nimetame luubiks. Me näeme luubi abil suurendatud ebakujutise MN selgenägemise kaugusel.

Olgu asi seisus $m_1 n_1$ ja pääteljel asuv asja punkt A (joon. 105). Vaatame punktist A tuleva ja punkti B langeva kiire käiku.



Joon. 105. Luubi mõju.

Ilma luubit a lõikaks kiir (joonises punkteeritud) pärast murdumist päätelge võrkkile taga punktis K, kus tekiks punkti A kujutis. On aga silm varustatud luubiga, siis langeb punkti B mõni teine punktist A tulev kiir pärast murdumist luubis ja lõikab pärast murdumist silmas päätelge punktis K_1 , ning kujutis tekib võrkkilele. Asub asi luubi pääfookuses, siis näeme teda lõpmatuses (mispärast?). Oleme harjunud asja vaatama selgenägemise kauguselt ja nihutame asja pääfookusest ligemale nii, et punkti B langev kiir paistab tulevat selgenägemise kaugusest s.

Seleta joon. 105 põhjal, kas tuleb valgusepunkt asetada kumeramale luubile ligemale, et teda näha selgenägemise kaugusel.

Luubi abil saadud ebakujutise MN ja asja $m_1 n_1$ joonsuuruste suhe $\frac{MN}{m_1 n_1}$ nimetatakse luubi suurenduseks.

Luubi suurendus on (joon. 104)

$$\frac{MN}{m_1 n_1} = \frac{s}{l}$$

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 on luubi suurendus

$$\frac{MN}{m_1 n_1} = \frac{s}{f} + 1$$

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

2. Luubi pääfookuse kaugus on 4 cm. Leia luubi suurendus, kui luupi tarvitab: a) kaugelenägija, kelle selgenägemise kaugus on 40 cm; b) lühidalt-nägija, kelle selgenägemise kaugus on 15 cm.

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

Kiirte käiku mikroskoobis näitab joon. 106. Väike asi AB pannakse objektiivi pääfookuse ligidale tema taha. Objektiivi mõjul tekib suurendatud reaalkujutis $A_1 B_1$, mis täidab valgustatud keha aset, sest tema igast punktist lähevad kiired laiali homotsentriliselt. Kujutist $A_1 B_1$ läbi luubina mõjuva okulaari vaadeldes näeme suurendatud ebakujutise $A_2 B_2$ (kujutise $A_2 B_2$ ehitamisel on tarvitatud paralleel- ja pääkiirt, mis tõelikult puuduvad). Objektiiv ja okulaar asuvad ühises torus, mille kau-

gust võib muuta lauakesele paigutatud asjast. Vaatleja, kes on harjunud asja vaatama selgenägemise kauguselt, reguleerib kaugust nii, et ta näeks suurendatud ebakujulise A_2B_2 oma selgenägemise kaugusel. Paremate mikroskoopidega võib näha kaht punkti veel eraldatult, kui nende kaugus üksteisest on $\frac{1}{4000}$ mm.

Samuti kui projektsioonaparaadigi juures peab asi hästi valgustatud olema (mispärast?). Selleks koondatakse ja juhitakse asja pääle päikese või lambi kiired nõguspeegli või kumerläätse abil.

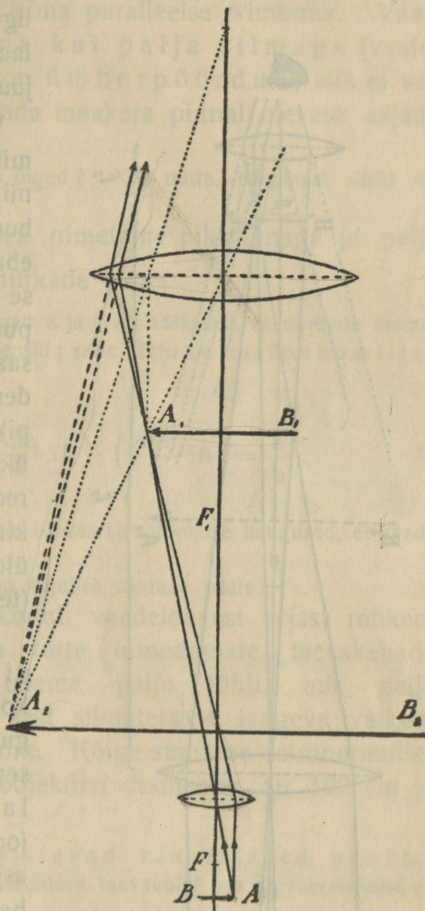
Mikroskoobi kogusuurendus võrdub objektiivi ja okulaari suurenduste korrutisega ja määratakse harilikult katseliselt.

Mikroskoobi suurendust määrab ligikaudselt va-

lem $\frac{l_s}{f_1 f_2}$, kus l_s on mikroskoobi toru pikkus, s selgenägemise kaugus ning f_1 ja f_2 vst. objektiivi ja okulaari pääfookuse kaugused.

1. Kas on joonise 106 proportsioonid õiged? Kui mitte, mispärast on siiski tarvitatud niisugune joonis?

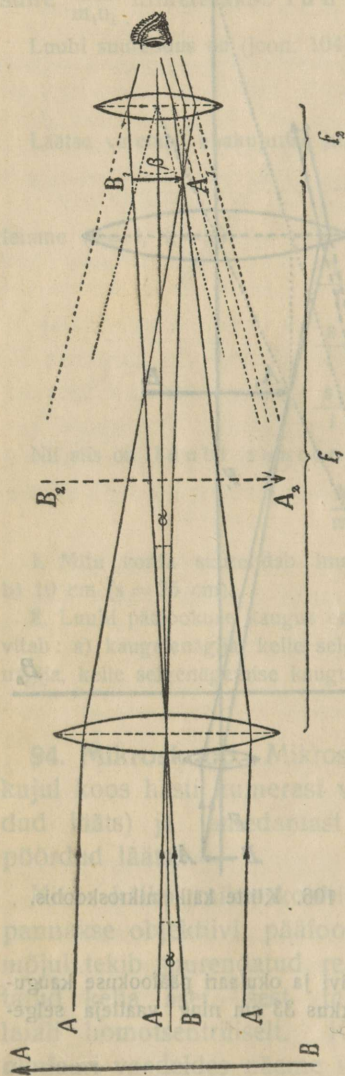
2. Leia mikroskoobi suurendus, kui objektiivi ja okulaari pääfookuse kaugused on vst. 5 mm ja 3,9 cm, mikroskoobi pikkus 33 cm ning vaatleja selgenägemise kaugus 33 cm.



Joon. 106. Kiirte käik mikroskoobis.

95. Astronoomiline (Kepleri) pikksilm. Väga kaugelseisva asja (kuu) peensusi või asja ennast meie ei näe, sest vastav

vaatenurk on liig väike. Et kaugeloleva asja vaatenurka ei saa suurendada asja lähendamise teel, siis tekitatakse kumerlääts (objektiiv) abil asja väike tõeline kujutis ja vaadeldakse seda ligidalt läbi teise lääts (okulaari) kui luubi. Vaatenurk selle juures suureneb.



Joon. 107. Kiirte käik astronoomilises pikksilmas.

Vaadeldes ligidalolevat asja mikroskoobi abil, reguleerime teda nii, et silma langevad kiirte kimbud oleksid laialiminevad ja asja ebakujutis tekiks selgenägemise kaugusel. Kaugeloleva asja punktidest aga oleme harjunud saama kiiri paralleelsete kimpudena. Sellepärast reguleerime pikksilma nii, et vaadeldava asja üksikutest punktidest tulevad kiired langeksid silma paralleelse kimbuna. — Need märkused on üldiselt maksivad pikksilmade (teleskoopide) kohta.

Astronoomilise pikksilma optiline süsteem seisab koos suurema pääfookuse kaugusega objektiivist ja väikese pääfookuse kaugusega okulaarist. Kiirte käiku näitab joon. 107. Väga kaugeloleva asja kujutise ehitamine paberil harilikul viisil paralleel- ja pääkiire abil ei ole võimalik piiratud ruumi tõttu. Kaugest asja punktist A tulevad kiired on isekesis paralleelsed ja moodustavad pääteljega väga väikese nurga $\frac{\alpha}{2}$. Objektiivi mõjul tekib objektiivi pääfookuse pinnal väike

töeline ümberpöörduv kujutis A_1B_1 , mis täidab asja aset. Okulaari pääfookus langeb ühte objektiivi omaga, selletõttu langevad punktist A tulevad kiired silma paralleelse kimbuna. Vaatleja näeb asja suuremana kui palja silmaga (vaatenurk $\beta > \alpha$). Et asja kujutis on ümberpöörduv, siis ei saa astronoomilist pikksilma tarvitada maakera pinnal olevate asjade vaatlemiseks.

Kas joonise 107 proportsioonid on õiged? Kui mitte, mispärast siiski on tarvitatud niisugune joonis?

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 asemel võib asetada nende sinused või tangensid; selle tõttu on astronoomilise pikksilma suurendus

$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\frac{\beta}{2}}{\frac{\alpha}{2}} = \frac{\frac{t}{g} \frac{\beta}{2}}{\frac{t}{g} \frac{\alpha}{2}} = \left(\frac{A_1B_1}{2} : f_2 \right) : \left(\frac{A_1B_1}{2} : f_1 \right) = \frac{f_1}{f_2}.$$

Kuidas tuleks valida objektiivi ja okulaari pääfookuse kaugused, et saada hästi suurt suurendust?

Kas objektiivi suurus avaldab mõju kujutise suuruse pääle?

Suurem objektiiv kogub vaadeldavast asjast rohkem valgust ja tarvitatakse selle tõttu tumedamate taevakehade vaatlemiseks. Pikksilmaga näeme palju tähti, mis palja silmaga näha ei ole üldse, sest silmaterasse langeva väikese valguse hulga mõju on liig nõrk. Kõige suurema astronoomilise pikksilma (Yerkesi tähetornis) objektiivi diameeter on 102 cm ja pääfookuse kaugus 19 m.

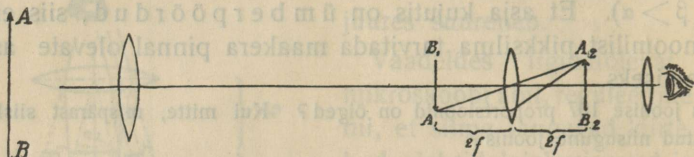
Ka suuremates pikksilmades paistavad kinnistähed punktide naha kuigi heledamatena, ainult vaadeldava taevavõlvi osa on suurendatud — tähtede vahed on suuremad.

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

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

96. Maapikksilm. Maapikksilma saame astronoomilisest, kui me lisame juure kolmanda läätse, mis objektiivi ümberpöörduv

kujutise pöörab päripidiseks. Kolmas lääts asetatakse objektiivis tekkinud reaalkujutise A_1B_1 (joon. 108) taha nii, et A_1B_1 seisaks tema kahekordsel pääfookuse kaugusel. Siis



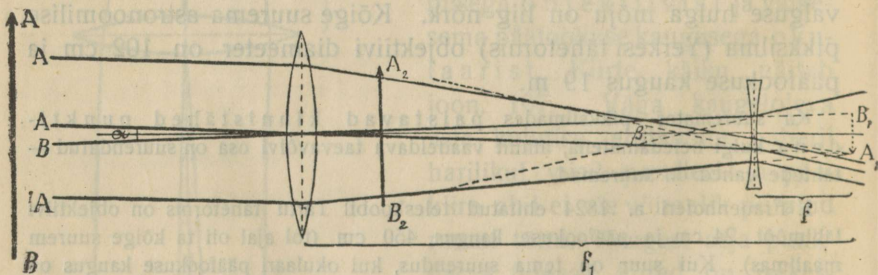
Joon. 108. Kujutise ümberpööramine pikksilmas.

tekib teisel pool läätsede kahekordsel pääfookuse kaugusel sama suur päripidine kujutis A_2B_2 ja seda vaadeldakse okulaari kui luubi läbi.

Kui pikk on maapikksilm, kui objektiivi ja okulaari pääfookuse kaugused on $vst. f_1$ ja f_2 ning ümberpööraja läätsede oma f_3 ?

Harilikult tarvitatakse kujutise ümberpööramiseks ühe kaksikkumerläätsede asemel kaht tasakumerläätsed. Suurema toru otsas on kinnitatud objektiiv; peenemas torus, mis liigub suuremas, asub okulaar ja ümberpööravad läätsed. Tervet optilist süsteemi peenemas torus nimetatakse ka lühidalt pikksilma okulaariks.

97. Hollandi (Galilei) pikksilm. Hollandi pikksilmas on objektiiviks kumerlääts, okulaariks nõguslääts. Mõ-



Joon. 109. Kiirte käik hollandi pikksilmas.

lemate läätsede pääfookused langevad ühte, kuid okulaar asub objektiivi ja ühise pääfookuse vahel.

Kiirte käiku näitab joon. 109. Enne reaalkujutise A_1B_1 tekkimist hajuvad vaadeldava asja punktist A tulevad kiired okulaaris ja langevad paralleelse kim-

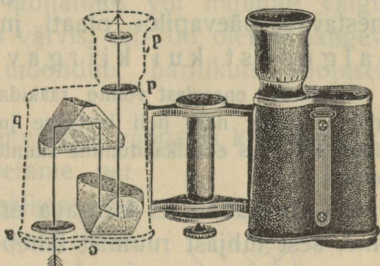
buna vaatleja silma. Suurendatud vaatenurga tõttu näeb vaatleja võrdl. suure
 ja päale selle veel päripidise kujutise.

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

Kaht hollandi pikksilma tarvitatakse kui teatri-binoklit (mispärast?).

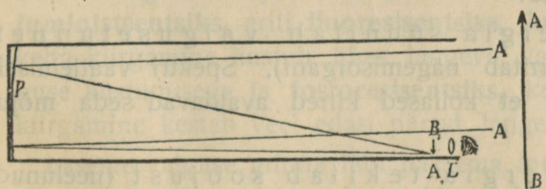
Hollandi pikksilma objektiivi ja okulaari pääfookuse kaugused on vst. f_1 ja f_2 ;
 kui pikk on pikksilm?

98. Prismabinokkel. (joon. 110). Prismabinokli läätsed on sama-
 sugused kui astronoomilise pikksilma omad. Kujutise
 ümberpööramine sün-
 nib neljakordse täielise sisepee-
 geldumise teel kahes prisma-
 s (ühes prisma pöörduv ümber kaju-
 tise parem ja pahem pool, tei-
 ses prisma ülemine ja alumi-
 ne pool). Kiired lähevad kolm
 korda läbi toru ja selle tõttu on toru
 lühike. Prismabinokliga vaatlemisel
 on reljeefsuse tunne suurendatud, sest
 objektiivide vastastikune kaugus on
 suurem kui silmaterade normaalne
 kaugus üksteisest.



Joon. 110. Prismabinokkel.

99. Peegelteleskoop. Peegelteleskoobis täidab objektiivi
 a set nõguspeegel, mis tekitab asja väikese tõelise ümberpööratud reaali-
 kujutise; seda kujutist
 vaadeldakse okulaari
 kui luubi läbi.



Joon. 111. Kiirte käik Herschel'i peegelteleskoobis.

kujutise; seda kujutist
 vaadeldakse okulaari
 kui luubi läbi.

Seleta kiirte käiku
 joonises 111 kujutatud
 peegelteleskoobis.

Peegelteleskoopidel
 oli suur tähtsus sel ajal,
 mil suuremate läätsede
 valmistamine ei olnud

võimalik tehnilistel põhjustel. Peeglitega pikksilmad nimetatakse reflek-
 toriteks, ilma peeglita pikksilmad refraktoriteks.

Nähtavate ja mitted nähtavate spektri kiirte avaldused

100. Valgus kui kiirgav energia. Lained on energia edasikandjad. Et valgus on lainetamisnähtus (seda näeme füüsikalises optikas), siis peaksid ka valguse kiired energiat enesega kaasas kandma ja see energia peaks teatavatel tingimustel avaldama mingisugust mõju. Igapäevasest elust teame, et see on tõelikult nõnda. Näiteks mõjuvad valguse kiired nägemisorgani pääle, soojendavad kehi, tumestavad päevapildi plaati jne. Sellepärast võib rääkida valgusest kui kiirgavast energiast.

Kiirgavast energiast võime rääkida igal juhusel, kus energia edasi kandub lainete kaudu, näit. heli levimise juures, kuid meie tarvitame seda nimetust ainult sääl, kus edasikandumine sünnib valguse levimise kiirusega ja ka tühjas ruumis.

On arusaadav, et kiirgava energia mõju ei avaldu tühjas ruumis, sest tühjast ruumist läheb valgus läbi takistamata, tähendab, ilma energia kaotamiseta või moonumiseta. Langeb kiirgav energia mõnele kehale, siis võib ainult neelunud kiirgav energia avaldada mõju; peegeldunud või läbiläinud valgus võtab oma energia enesega kaasa (võib näit. tekitada valgusetunnet ja soojust). Neelunud kiirgava energia mõju võib olla mitmesugune:

a. Kiirgav energia sünnitab valgusetunnet (neelunud energia ärritab nägemisorgani). Spektri vaatlemisel võime tähele panna, et kollased kiired avaldavad seda mõju kõige tugevamini.

b. Kiirgav energia tekitab soojust (neelunud energia soojendab kehi).

Too näiteid selle kohta igapäevasest elust.

Päikese kiirte teele asetatud klaasplaat ei soojene tuntavalt, kuna samasugune nõetud klaasplaat soojeneb tuntavalt. Seleta seda nähtust.

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

Kevadel võib tähele panna, et lumi päikese kiirte mõjul sääl kiiremini sulab, kus näit. tuhka või põllult tolmu on pääle langenud. Kui kevadel valgele lu-

mele 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 energia avaldab keemilist mõju. Neelunud kiirgava energia mõjul lahutab taimede klorofüll õhus oleva CO_2 . Samuti lahutab neelunud kiirgav energia päevapildi plaadis olevat hõbesoola. Nagu teada päevapildistamisest, ei mõju värvilised kiired keemiliselt ühetugevuselt.

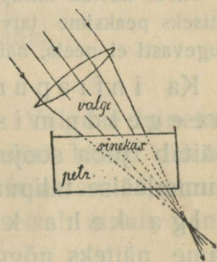
d. Kiirgav energia tekitab lumenistsentsi, ise-suguste kehade valguse kiirgamise (§ 101).

101. Luministsents. Kehast läbiläinud või hajunud valguse tõttu paistavad kehad niisuguses värvis, mis on olemas langevas valguses. Neelunud energia moondub harilikult soojuseks. Kuid on ka erandid.

Petrooleum paistab vastu valgust vaadates kollakana, kõrvalt vaadates aga sinakana. Asetame petrooleumi läätsega koondatud päikese või projektsioon-laterna kiirte koonusesse (joon. 112), siis paistab tugevasti valgustatud petrooleumi koonus sinakana, ta kiirgab sinist valgust. Uraanklaas kiirgab tugeva valguse mõjul rohelist valgust. Niisugust külma keha valguse kiirgamist neelunud võõra valguse mõjul nimetatakse üldiselt **luministsentsiks**, eriti **fluorestsentsiks**, kui keha kiirgamine kustub ühes langeva valguse kustumisega ja **fosforestsentsiks**, kui kiirgamine kestab veel edasi pärast langeva valguse kustumist.

Laseme valguse minna läbi paksema luministseeriva keha kihi, siis ta enam luministsentsi ei tekita. Me võime seda seletada ainult sellega, et luministsentsi tekitavad kiired neelusid kehas. Luministseerivates kehaes moondub neelunud kiirgav energia uuesti nägemisorgani pääle mõjuvaks kiirgavaks energiaks.

Katsed värviliste kiirtega näitavad, et luministsentsi tekitavad iseäranis violett ja sinised kiired ja et keha fluorestsents-värv võib täiesti puududa langevas valguses.



Joon. 112. Petrooleumi fluorestsents.

Mõned soolad fluorestseerivad iseäranis tugevasti (baariumplaa-tintsüanüür). Ka mõned soolad (näit. väävliisbaarium) fosfores-tseerivad tugevasti; nendest sooladest valmistatakse nn. helene-
vad värvid. Kui heleneva värviga kaetud keha (taskukella numbrid ja näitajad) valgustada päikese või elektri valgusega, siis on ta nähtav pimedas ruumis pikemat aega.

102. Mittenähtavate spektri kiirte avaldused. a. Järelkat-sudes värviliste spektri kiirte soojuslist mõju väga tundeliku ter-momeetriga (termosambaga) leiame, et soojusline mõju tõuseb järjest violett spektri otsast alates punase poole ja on veel mär-gata punase otsa taga (Herschel a. 1800). Nii siis peituvad val-ges valguses ka mittenähtavad nn. **infrapunased kiired**, mis murduvad vähem kui äärmised nähtavad pu-nased kiired ja mis avaldavad iseäranis soojuslist mõju.

Klaas neelab infrapunaseid kiiri tugevasti. Infrapunaste kiirte demonstreeri-miseks peaksime tarvitama läätse ja prismat niisugusest aimest, mis neid kiiri tugevasti ei neela, näit. kivisoolast.

Ka infrapunaste kiirte kohta on maksvad peegeldumise ja murdumise seadused. Seda näitab juba soojuste kogunemine ühes valgusega nõguspeegli ja kumerläätse tulipunkti.

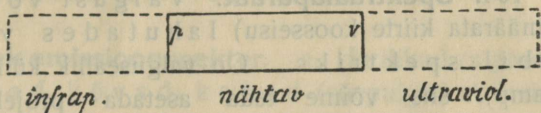
Iga keha kiirgab infrapunaseid kiiri. Ase-tame näiteks nõguspeegli või kumerläätse juures valguseallika kohale soojendatud keha, siis näitab kujutise kohale asetatud termomeeter temperatuuri tõusu.

b. Asetame näit. roheliselt fluorestseeriva pikema paberi riba piki spektrit ekraanile nii, et spekter ainult osalt langeks ribale. Me paneme tähele, et fluorestseeriv paber heidab tagasi kõik kiired punastest kuni rohelisteni samuti kui harilik ekraan; sini-ses ja violett valguses ta fluorestseerib aga ja paistab rohekana. Kuna nähtav spekter lõpeb harilikul ekraanil violett otsaga, näeme, et fluorestseeriv riba kiirgab rohelist fluorestsents-valgust veel spektri violett otsa taga. Järelikult peituvad valges valgu-ses ka mittenähtavad nn. **ultraviolett kiired**, mis murduvad rohkem kui äärmised nähtavad violett kii-red ja tekitavad tugeva fluorestsentsi.

Asetame spektri kohale fluorestseeriva riba asemele päevapildi (ilmutamise) paberi riba, tähendame pliiaitsiga ära nähtava spektri piirid ja ilmutame paberi pärast valgustamist. Siis näeme, et punane valgus ei ole avaldanud paberi pääle tuntuvat keemilist mõju; teiste värviliste kiirte mõju punasest spektri otsast violett otsa poole on aga järjest suurenenud ja on kõige suurem violett otsa taga (paber on tumenenud sääl kõige rohkem). Me järeldame, et ultraviolett kiired avaldavad tugevat keemilist mõju.

Klaas neelab ultraviolett kiiri tugevasti. Katsete tegemisel ultraviolett kiirtega tuleks tarvitada kvartsist läätse ja prisma, sest kvarts laseb neid hästi läbi.

Nii siis seisab spekter koos nähtavatest, infrapunastest ja ultraviolett kiirtest (joon. 113), mille vahel ei ole olulist vahet.



Joon. 113. Spektri kiired.

103. Kiirgamise olenevus temperatuurist. Valguse lainetamisteooria seisukohast vaadatuna on kõik spektri kiired ilma-ruumi ja kehade aatomite vahettäitva eetri lainetamine, mis levib valguse kiirusega; värviliste kiirte vahe seisab ainult nendele vastavate lainete pikkuses.

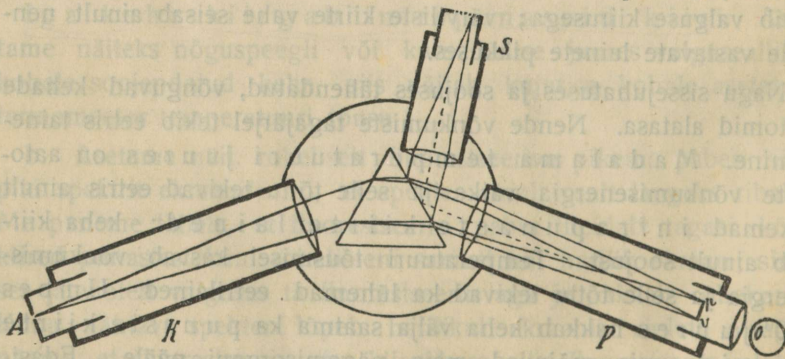
Nagu sissejuhatuses ja soojuses tähendatud, võnguvad kehade aatomid alatasa. Nende võnkumiste tagajärjel tekib eetris lainetamine. Madalama temperatuuri juures on aatomite võnkumisenergia väike ja selle tõttu tekivad eetris ainult pikemad infrapunaste kiirte lained; keha kiirgab ainult soojust. Temperatuuri tõusmisel kasvab võnkumisenergia ja selle tõttu tekivad ka lühemad eetrilained. Umbes 500° juures hakkab keha välja saatma ka punaste kiirte laineid, mis mõjuvad meie nägemisorgani pääle. Edasikuumendamisel tulevad juure ikka lühemad lained ja nendele vastavad kollased jne. kiired, kuni keha valgel hõõgumisel (üle +1200°) tekitab kõiksuguseid eetrilaineid, ka niisuguseid, mis vastavad spektri ultraviolett osale.

Kuna kiirgav energia avaldub madalama temperatuuri juures ainult soojusena, tuleb kõrgema temperatuuri juures valguse mõju juure, kuid osa energiast avaldub ka kõrgema temperatuuri juures soojusena. Mida kõrgem on keha temperatuur, seda rohkem muutub vahekord valguse kasuks ja sellepärast on näit. kasulik elektri hõõglampide juures kuumendada hõõguvat traati võimalikult kõrge temperatuurini.

Spektri tüübid; spektraalanalüüs

104. Spektraalapaarat. Valgust võime analüüsida (määrata kiirte koosseisu) lahutades valgust prisma abil spektriks. On valguseallik küllalt tugev (el. leeklamp), siis võime teda asetada projektsioon-laternasse ja spektrit nähtavaks teha objektiivselt suuremale hulgal samal ajal. On aga valguseallik nõrk, või tahame spektrit täpsemalt uurida, siis tuleb spektrit vaadelda subjektiivselt isesuguse spektraalapaaradiga.

Kirjeldame Kirchhoff'i ja Bunsen'i spektraalapaaradi ehitust. Ta seisab koos lauakesele kinnitatud prisma ja kolmest torust; tema optilist süsteemi ja kiirte käiku näitab joon. 114. Kollimaatoritoru K otsas kinnitatud pilu ette aseta-



Joon. 114. Spektraalapaarat.

takse uuritav valguseallik. Skaalatoru S otsa kinnitatud läbi-
paistev mm-skaala valgustatakse väljastpoolt. Spektrit ühes
skaalaga vaadeldakse läbi toru P.

Pilu asub kollimaatoritoru teises otsas oleva läätse pääfookuse pinnal ja läb pilu torusse langevad laialiminevad kiired on prismale langedes isekeskis paralleelsed. Järelikult on samavärvilised kiired pärast murdumist prisma isekeskis paralleelsed. Toru P (kujutab lühikest astronoomilist pikksilma) otsas asuv kumerlääts kogub prismast tulevad värvilised kiired oma pääfookuse pinnal, kus tekib väike tõeline spekter. Läbi toru P teise otsas 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 kumerläätsse pääfookuse pinnal. 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 pääfookuse pinnal ja vaatleja näeb ühes spektriga ka skaalat ning võib üles märkida, missugustel skaala kohtadel ilmuvad teatavad värvid.

105. Kiirgamis- ehk emissioonspekter. a. Harilikud valguseallikad on hõõguvad kehad (sõepulgad el. leeklambis, traadid el. hõõglambis, söekübemed küünla või lambi leegis jne.). Harilikkude valguseallikate spektrites ei puudu ükski värv; niisuguseid spektreid nimetame **pidevateks** (joon. 71). Ka hõõguvate vedelikkude (sulanud metallid) spektrid on pidevad.

b. Tekitame spektri projektsioon-laterna abil. Asetame laternas oleva leeklambi alumise sõepulga pääle väikese metalli (vase) tüki, siis tekib leegis metalli (vase) hõõguvaur. Nihutame sõepulgad üksteisest nii kaugemale, et kiiri saadab kondensaatorile pääasjalikult leegis hõõguvaur (mitte hõõguvad sõepulga otsad), siis näeme ekraanil pideva spektri asemel üksikuid heledaid teravaid värvilisi jooni (vase auru juures nimelt roheline spektri osas). Asetame sõepulgale vase asemel mõne teise metalli, näit. alumiiniumi, siis näeme ekraanil ka ainult üksikuid teravaid heledaid värvilisi jooni, kuid nende arv ja värv on teine. Kirjelatud katsetes on valguseallikaks metalli hõõguvaur leegis.

Asetame spektroskoobi pilu ette piirituse leegi. Siis näeme nõrga pideva spektri, sest piirituse leek on valgusenõrk. Hoiame piirituse leegis kübemekese naatriumi soola (keedusoola), siis tekivad spektris üksteise ligidal kaks teravat kollast joont (joon. 115, Na), mis langevad ühte, kui prisma dispersioon on väike. Hoiame leegis liitiumi soola, siis tekib spektris kaks teravat punast joont. Kui valgustame skaalat, siis võime spektraaljoonte seisud

üles märkida skaala järele. Kirjeldatud katsetes on valguseallikaks hõõgav naatriumi vst. liitiumi aur.



Joon. 115. 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 mitte terava äärtega ribasid. Vesinik annab ühe punase, ühe rohelise, ühe sinise ja ühe violett joone (joon. 115, H), lämmastik ribade rea. Spekitrit, mis koosneb üksikutest värvilistest joontest või ribadest, nimetame **katkeliseks**.

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

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

Kirjeldatud spektrid, milles on olemas kõik kiired, mida keha kiirgab, nimetatakse kehade **kiirgamis- ehk emissioonspektriteks**.

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 tuntud gaaside ja aurude spektri jooned skaala järele üles märgitud, siis võib tundmatut gaasi või auru tema spektri põhjal kindlaks määrata.

Spektrite uurimiseks paneme gaasid nn. hõrendustorudes elektri sädemete abil hõõguma. — Kõvad ja vedelad kehad tuleb muuta hõõguvateks aurudeks. Selleks võib tarvi-

tada piirituse või Bunseni gaasi leeki või veel kuumemat el. leeklambi leeki (elektri sädet).

Ainete aatomitel on omapärane ehitus. Et aga aine ainult gaasi- või aurusarnases olekus omapäraseid värve kiirgab, seda võib seletada valguse lainetamisteooria seisukohast sellega, et aine aatomid ainult nendes olekutes suuremate vahede tõttu võivad pikemat teed vabalt liikuda, nii et võivad tekkida korraldatud omapäraseid võnkumised, mis tekitavad omapäraseid eetri laineid (värve). Seda vaadet tõestab nähtus, et gaaside või aurude spektrid muutuvad tugeval kokkusurumisel pidevateks.

106. Neelumis- ehk absorptsioonspekter. a. Kõva ja vedela keha neelumisspekter. Tekitame pideva spektri, valgustades spektroskoobi pilu hõõglambiga (küünla leegiga) või tarvidades projektsioon-laternas elektri leeklampi. Asetame pilu ette valge valguse kiirte teele mitmesuguseid läbipaistvaid kehi. Paksem värvitu vee kiht või klaas teeb terve spektri nõrgemaks (mispärast?). Võtame aga värvilisi kehi, mis neelavad ühti värve rohkem kui teisi, siis tekivad spektris rohkem neelunud värvide asemel tumedad ribad (kui neelunud värvid on punase ja violeti värvi vahel) või kaovad osad spektri otsadelt. Niiviisi saadud spektreid nimetatakse neelavate kehade **neelumis- ehk absorptsioonspektriteks**. Neelumisribad võib fluorestseeriva ekraani abil nähtavaks teha ka spektri ultravioletti osas; nad on kindlaks tehtud ka infrapunases osas.

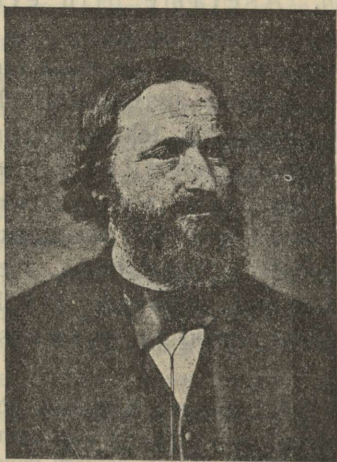
Neelumisspektri vaatlemise otstarbel asetame läbipaistva kõva või vedela keha paksema või õhema kihina pilu ette (vedeliku kihi asemel võime muuta tema kontsentratsiooni). Et vedeliku kihi paksust kergesti muuta, valame ta klaasplaatidest kokkukleebitud kiilusarnasesse anumasse. Ka mitte-läbipaistva keha neelumisspektrit võime uurida, kui on olemas selle keha läbipaistev lahu või sulatis.

Asetame näit. pilu ette kaali-hüpermangaaniumi vedela lahu (violett), siis näeme spektris viis neelumisriba. Võtame lahu paksema kihina või rohkem kontsentreeritult, siis on ribad tumedamad ja laiemad. Veel paksema kihi juures ühinevad ribad ja suurem spektri osa on tume. Samal viisil võib vaadelda ka teiste värviliste vedelikkude spektreid.

Mõned läbipaistvad värvitud kehad annavad siiski silmapaistvaid neelumisjooni näit. didüüm); kuidas seda seletada?

Katsetest järeldame, et igal läbipaistval kõval või vedelal kehal on omapärane neelumisspekter. Kehi, mille neelumisjooned on küllalt teravad ja iseloomustavad, võib tuntud neelumisspektrite abil kindlaks määrata.

b. Hõõguva gaasi ja auru neelumisspekter. Gaaside juures (õhk) ei ole harilikudel tingimustel neelumist märgata. Hõõguvad gaasid ja aurud tekitavad aga neelumisspektri, milles neelumisjooned on iseäranis silmapaistvad ja teravad. Tekitame näiteks projektsioon-laternaga ekraanil pideva spektri ja asetame pilu ette kiirte teele Bunseni gaasileegis hõõguvat naatriumi auru. Spektris tekib kollaste kiirte kohal üksteise ligidal kaks teravat neelumisjoont.



Robert Kirchhoff (1824—1887).

Liitiumi aur sünnitab kaks teravat neelumisjoont spektri punases osas. Nähtust spektraalaparaadiga uurides pani Kirchhoff tähele, et hõõguva gaasi või auru neelumisjooned ilmuvad täpselt spektri samadel kohtadel, kus nende ainete kiirgamisjooned kiirgamisspektrites. Ta leidis (a. 1860) absorptsiooni seaduse, mis lühidalt kujul kõlab järgmiselt: **iga hõõguv aur või gaas neelab (pääsjalikult) neid kiiri, mis ta ise sama temperatuuri juures kiirgab.**

Selle seaduse põhjal võib igat hõõguvat auru või gaasi kindlaks määrata tema neelumisspektri abil, kui on teada ainult tema kiirgamisspekter.

107. Päikese spekter. Frauenhofer pani tähele (a. 1814) päikese valguse spektris tumedaid jooni ja tähendas silmapaistvamad nendest tähtedega A-H. Suuremate spektroskoopidega võib päikese spektris kindlaks teha üle 10 000 **Frauenhofer'i joone.**

Fraunhoferi jooni võime vaadelda kaht viisi: a. Subjektiivselt, kui juhime spektraalparaadi kollimaatoru 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 ultraviolettses osas fluorestseeriva ekraani abil. Ka võib spektrit saada ilmutamise paberil.



Joon. 116. Päikese spekter.

Alles mõnikümmend aastat pärast Fraunhofer'i leidust oli võimalik absorptsiooni seaduse põhjal Fraunhoferi joonte tekkimist järgmiselt seletada. Päikese hõõguv südamik, fotosfäär, kiirgab kõiksuguseid kiiri, tähendab, valget valgust; päikese hõõguv aurude ja gaaside atmosfäär, kromosfäär, neelab oma koosseisule vastavalt teatavad värvid, mille asemel 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. Fraunhoferi jooni tuntud kiirgamisjoontega võrreldes on kindlaks tehtud, et suurem osa meile tuntud elemente leiduvad ka päikese kromosfääris, millest järgneb, et päikesel on samasugune ainealine koosseis kui maakeral. Mõned neelumisjooned päikese spektris, mis meile tuntud kiirgamisjoontega ühte ei langenud, näitasid, et päikese kromosfääris on mingisugune tundmatu element, mida nimetati heliumiks. Hiljem (30 a.) leiti helium (gaas) ka meie maakera atmosfääris.

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

108. Spektraalanalüüs. Spektraalanalüüsiks kitsamas mõttes nimetame ainete keemilise koosseisu

määramist nende kiirgamis- või neelumisspektrite abil. Spektraanalüüsil on suur tähtsus.

Astronoomias määratakse taevakehade aineeline koosseis ainult nende spektrite põhjal.

Valgusenõrkade taevakehade spektreid uuritakse päevapildistamise teel. Taevakeha pääle juhitakse pikksilm, mis kogub suure objektiiviga tõttu rohkesti valgust oma pääfookuse kohale asetatud pilu pääle. Okulaari asemel kinnitatakse 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 taevakehade liikumist vaatamissihis, tähendab, nende lähenemist ja kaugenemist maakerast tähele panna ja mõõta.

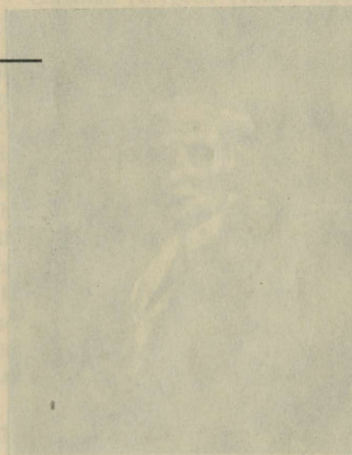
Keemias tarvitatakse ka spektraanalüütilist meetodi ainete koosseisu määramiseks, olgugi et on selleks olemas teised keemilised meetodid. Juhustel, kus aine hulk on väga väike, võib veel kasutada seda meetodi; näiteks võib veel $\frac{1}{3.000.000}$ mg Na või $\frac{1}{1.000.000}$ mg Li spektri abil kindlaks teha. Spektraanalüüsi abil on ka leitud mitmed uued elemendid (tsäesium, rubiidium, tallium jne).

Spektraanalüüsi võib kasutada igakord, kui on tegemist ainelise koosseisu määramisega, näit. toiduainete võltsimise jälgimisel, mitmesuguste jäänuste (vere) määramisel kohtu uurimiste juures jne.

Ajaloo. Peeglid olid tuntud vanal ajal. Peegeldumise seadused oleval leidnud Euklid (Aleksandria linnast, ~ a. 300 e. Kr.); Hero (Aleksandria linnast, ~ 100 a. e. Kr.) teadis, et valguse kiir käib peegeldumisel ära kõige lühema tee vaatleja silma.

Ka lihtsamad murdumisnähtused olid tuntud vanal ajal. Archimedes teadis (~ 212 e. Kr.), et kaldu vaadates veega täidetud anuma põhi paistab kõrgemana kui ta tõelikul on. Juba Ptolomäus (~ a. 150) hakkas murdumisnurke mõõtma. Prillid olid tuntud 13. aastasajal. Murdumise seaduse leidis Willebrord Snell van Rojen (Snellius, 1581–1626), kuid laiemas ringkonnas sai seadus tuttavaks Descartes'i raamatu „Dioptriika“ kaudu (a. 1637). Mikroskoop on leitud ~ a. 1590, Hollandi pikksilm ~ a. 1608. Galilei Itaalias sai pikksilma leidusest kuulda ja

ehitas selle iseseisvalt ning valmistas pärast kõige paremaid tolle-
aegseid pikksilme, 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 kujutist päripidiseks pöörata. Esimese peegelteles-
koobi ehitas Newton a. 1668. Valguse kiiruse määras esimesena
Olaf Römer tähetorni assistendina; ta teatas oma leidusest Pa-
riisi akadeemiale a. 1675, kuid tema leidust ei tunnistanud aka-
deemia poolt õigeks. Akromaatilised läätsed on tarvitusel ~ a.
1750 alates. Optik Jos. v. Fraunhofer pani tähele a. 1814 päi-
kese spektris tema järele nimetatud Fraunhoferi jooni ja val-
mistas tol ajal kõige paremaid optilisi riistu. Alles Kirchhoffi
absorptsiooni seaduse leidmise järele (a. 1860) oli võimalik sele-
tada Fraunhofer'i joonte tekkimist. Esimesed päevapildid tegi
Daguerre a. 1825. Prismabinokli ehituse printsiip leiti ~ 1850,
kuid unustati hiljem. Prof. Abbe leidis prismabinokli printsiibi
uuesti läinud aastasaja lõpupoole ja Zeiss'i tehas hakkas teda
ehitama esimesena.



Füüsikaline optika

Newton'i ja Huygens'i vaade valguse loomu kohta

109. Geomeetiline ja füüsikaline optika. Seni käsitatud nn. geomeetrilises optikas oli nähtuste seletuse aluseks valguse sirgjooneline levimine ühtlases keskkonnas; valguse loomu meie selle juures ei puudutanud.



Isaak Newton (1624—1727).

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

110. Emissioonteooria ja lainetamisteooria. Newtoni hüpoteesi järele on valgus aine; valguseallikad kiirgavad valguse-aine osakesi. Selle hüpoteesi põhjal on ehitatud valguse **emissioonteooria**. Valguse-aine osakesed levivad suure kiirusega. Silma langedes nad ärritavad nägemiserku ja tekivad valguse aistingut. Keskkondade lahtuspinnale langedes nad pörkavad osalt tagasi nagu elastsed kerakesed, osalt tungi-

vad teise keskkonda. Murdumise seletamiseks selle teooria järele tuleb oletada, et valguse kiirus optiliselt tihedamas keskkonnas on suurem (!) kui optiliselt hõredamas keskkonnas.

Newtoni kaasaeglase Huygens'i hüpoteesi järele on valgus eetri lainetamine, mis levib valguseallikast suure kiirusega. Selle hüpoteesi põhjal on ehitatud valguse lainetamisteooria. Silma langes ärritavad valguse lained nägemiserku ja tekitavad valguse aistingu. Keskkondade lahtuspinnale langes valguselained osalt peegelduvad nagu teisedki lained, osalt tungivad aga teise keskkonda. Murdumise seletamiseks selle teooria järele tuleb oletada, et valguse kiirus optiliselt tihedamas keskkonnas on väikesem (!) kui optiliselt hõredamas keskkonnas.



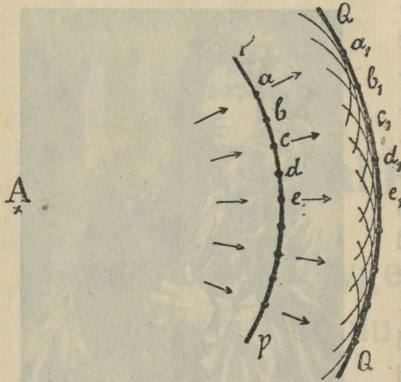
Christian Huygens (1629—1695).

Newton ja Huygens töötasid kaua aega oma teooria kallal. A. 1690 avaldas Huygens oma lainetamisteooria ja a. 1704 Newton oma emissioonteooria. Newtoni autoriteedi tõttu ei leidnud Huygens'i teooria esialgu poolehoidu. Kui pandi tähele, et valgus mõnest tõkkest mööda minnes ka nii öelda ümber nurga tõkke taha läheb, nagu vee või helilained (diffraktsioonnähtused), siis seletas Young seda nähtust lainetamishüpoteesi põhjal (~ a. 1810) ja juhtis sellega laiema loodusuurijate ringkonna tähelepanu Huygens'i teooria päale. Alles päale selle, kui Fresnel näitas (a. 1822) katseliselt, et valguse kiirte koosmõjul tekib teatud tingimustel tugevama valguse asemel pimedus (lainete interferentsnähtus), hakati Huygens'i teooriat üldiselt tunnustama. Viimase hoobi sai Newtoni teooria kui Foucault (a. 1854) kindlaks tegi, et valguse kiirus on vees vähem kui õhus.

Uuema vaate põhjal (Maxwell ~ a. 1870) kuuluvad valguse lained nn. elektromagnetiliste lainete hulka.

111. Huygens'i printsiip. Valguse levimine. Eetri laine levimist, mille tekitajaks on hõõguva valguseallika (lainetamistsentri) kiiresti võnkuvad aatomid, seletas Huygens järgmiselt: iga laine osakest võib vaadelda kui iseseisvat lainetamistsentrit,

millest levivad nn. elementaarained. On näiteks ühtlases keskkonnas laine jõudnud valguseallikast A (joon. 117) kerapinnani PP, siis levivad selle

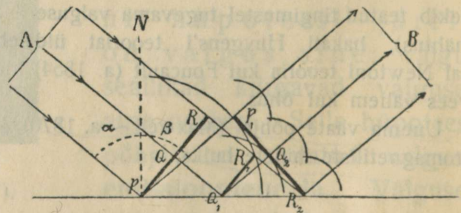


Joon. 117. Huygens'i printsiipt.

pinna ühesugustes faasides viibivatest punktides a, b, c, ... elementaarained. Teatava aja jooksul jõuavad nad kerapinnadani, mille raadiused aa_1 , bb_1 , cc_1 jne. on võrdsed. Kõik kerapindade osakesed võnguvad samades faasides. Matemaatiliselt võib tõendada, et kõikides elementaarlainete löikepunktides hävineb liikumine interfereerumise tõttu ja võnguvad ainult (samades faasides) osakesed $a_1, b_1, c_1 \dots$ elementaarlainete ühisel puutumispinnal, s. o. kerapinnal QQ, mida me nimetame frontlaineks. Nii siis levib frontlaine ühtlases keskkonnas kerasarnaselt ja frontlaine pind on laine kiirega (sihiga) alati perpendikulaarne. On lainetamisentsenter küllalt kaugel, siis võib frontlainet lugeda sirgeks.

112. Peegeldumine Huygens'i printsiiibi põhjal. a. Sirge frontlaine peegeldumine tasapeeglist. Olgu, et kaugest lainetamisentsentrist A (joon. 118) tulev sirge frontlaine jõudis tasapinnani PQR;

AP, AQ ja AR on selle laine kiired. Seni kui elementaarlaine jõuab tsentrist R peegeldava pinna punktini R_2 , jõuab elementaarlaine punktist P kerapinnani raadiusega $PP_1 = RR_2$. Seni kui elementaarlaine jõuab



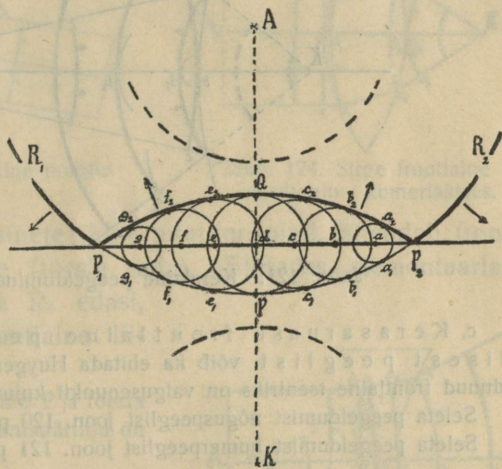
Joon. 118. Valguse peegeldumine.

tsentrist R_1 punktini R_2 , on elementaarlaine jõudnud punktist Q_1 kerapinnani raadiusega $Q_1Q_2 = R_1R_2$ jne. Elementaarlainete

ühine puutumispind, tähendab, frontlaine $R_2Q_2P_1$ on tasapind (tõestus kolmnurkade kongruentsuse abil). Punktidest R_2, Q_2 ja P_1 elementaarlaineid edasi ehitades leiame, et frontlaine liigub edasi sihis Q_1B .

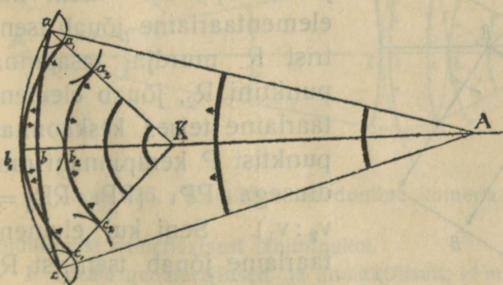
Tõesta joon. 118 põhjal kolmnurkade PRR_2 ja PP_1R_2 kongruentsuse abil, et jääb maksma tuntud peegeldumisseadus.

b. Kerasarnase frontlaine peegeldumine tasapeeglist. Ilma peegeldava pinnata P_1P_2 (joon. 119) oleks frontlaine teatava aja jooksul jõudnud punktist A kerapinnani P_1PP_2 , tähendab, punktidest $a, b, \dots g$ (mitte samal momendil) välja läinud elementaarlained oleksid jõudnud samal momendil ja sama faasiga punktideni $a_1, b_1, c_1, P, e_1, f_1, g_1$ frontlaine pinnal P_1PP_2 . Takistava pinna P_1P_2 tõttu need elementaarlained peegelduvad ja selle asemel, et jõuda punktideni a_1, b_1, \dots jõuavad nad samal momendil kerapindadeni, mille raadiused on $aa_2 = aa_1, bb_2 = bb_1$ jne. Peegeldunud frontlaine pind on P_1QP_2 . Vaadeldud momendil seisab



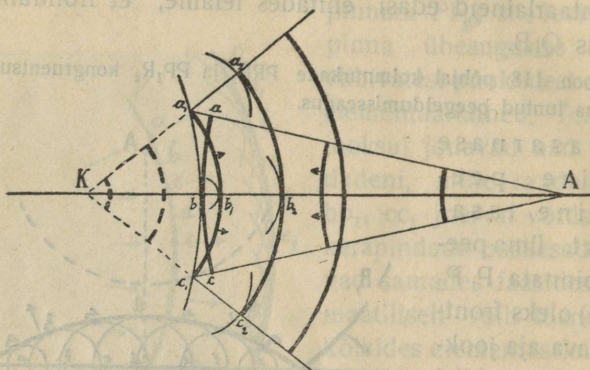
Joon. 119. Keralaine peegeldumine tasapeeglist.

siis terve frontlaine koos kahest osast: üht osa kujutab frontlaine $P_1R_1R_2P_2$, mis liigub peegeldava pinna poole, ja teist osa frontlaine P_1QP_2 , mis liigub tagasi valgusepunkti poole. Et P_1QP_2 ja P_1PP_2 on sümmeetrilised peegeldava pin-



Joon. 120. Keralaine peegeldumine nõguspeeglist.

na suhtes, siis võib peegeldunud frontlaine lähtepunktiks lugeda punkti K, mis on sümmeetriline valgusepunktiga A.



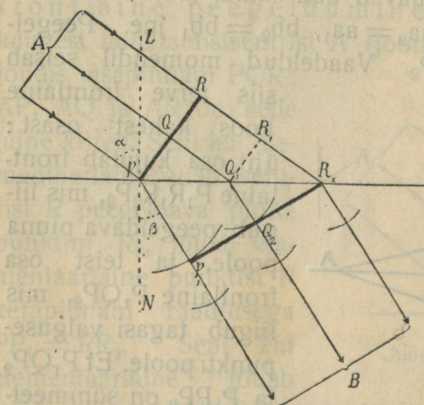
Joon. 121. Keralaine peegeldumine kumerpeeglist.

c. Kerasarnase frontlaine peegeldumist sfäärlisest peeglist võib ka ehitada Huygens'i printsiibi põhjal; peegeldunud frontlaine tsentriks on valgusepunkti kujutis.

Seleta peegeldumist nõguspeeglist joon. 120 põhjal.

Seleta peegeldumist kumerpeeglist joon. 121 põhjal.

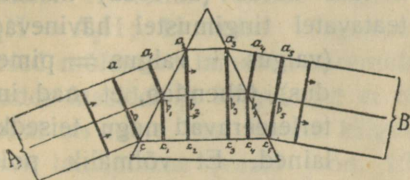
113. Murdumine Huygens'i printsiibi põhjal. a. Sirge frontlaine murdumine tasapinnal. Olgu, et frontlaine jõudis kaugest lainetamistsentrist A (joon. 122)



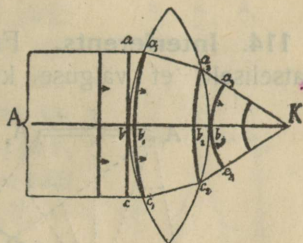
Joon. 122. Valguse murdumine.

sirgeni PQR. Laine levimiskiirus esimeses keskkonnas olgu v_1 ja teises v_2 , kusjuures $v_1 > v_2$. Seni kui elementaarlaine jõuab tsentrist R murdja tasapinna punktini R_2 , jõuab elementaarlaine teises keskkonnas punktist P kerapinnani raadiusega PP_1 ($PP_1 : RR_2 = v_2 : v_1$). Seni kui elementaarlaine jõuab tsentrist R_1 punktini R_2 , jõuab elemen-

taarlaine teises keskkonnas punktist Q_1 kerapinnani raadiusega Q_1Q_2 ($Q_1Q_2 : R_1R_2 = v_2 : v_1$). Samuti võiks ehitada teises keskkonnas elementaarlaineid, mis levivad P, Q_1 ja R_2 vahel olevatest



Joon. 123. Sirge frontlaine murdumine prismas.



Joon. 124. Sirge frontlaine murdumine kumerläätses.

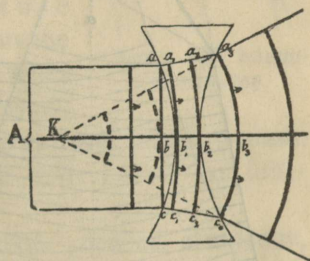
tsentritest. Elementaarlainete ühine puutumispind, tähendab, frontlaine $P_1Q_2R_2$, on tasane (tõesta seda). Ehitades elementaarlaineid tsentritest P_1 , Q_2 ja R_2 edasi, leiame, et murdunud frontlaine liigub edasi sihis Q_1B .

Ehita langemisristjoon punktis P ja tõesta kolmnurkade abil, et murdumisnäitaja on laine levimiskiiruste suhe

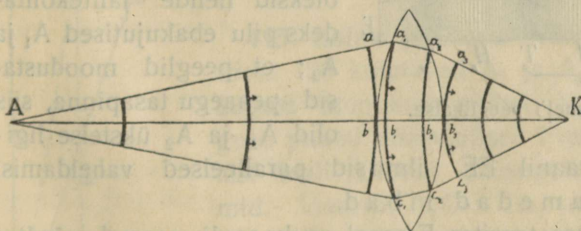
$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{v_1}{v_2}$$

b. Sirge frontlaine murdumist prismas ja läätses võib ka ehitada Huygens'i printsibi põhjal.

Seleta sirge frontlaine käiku jooniste 123, 124 ja 125 abil.



Joon. 125. Sirge frontlaine murdumine nõgusläätses.



Joon. 126. Keralaine murdumine kumerläätses.

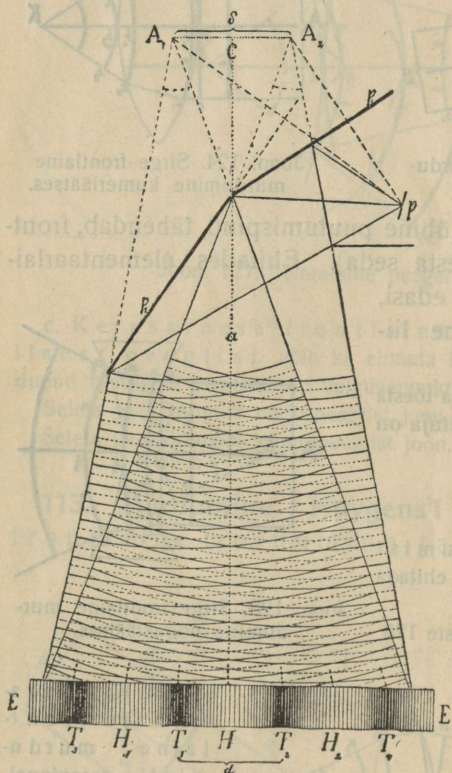
muutumist kumerläätses läbiminekul.

I. Tõesta geomeetriliselt ja analüütiliselt, et murdumiseaduste järele levinud kiir kõigeliühema ajaga käib ära tee valgusepunktist vaatleja silma.

c. Ka kera-sarnase frontlaine murdumist tasapinnal, prismas ja läätses võib ehitada Huygens'i printsibi põhjal, kuid ehitus on keerulisem. Joon. 126 näitab kera-sarnase laine kuju

Interferents; laine pikkuse mõõtmine; õhukeste kelmete värvid

114. Interferents. Fresnel'il läks korda (a. 1822) näidata katseliselt, et valguse kiired teataval tingimustel hävinevad



Joon. 127. Fresnel'i peeglikatse.

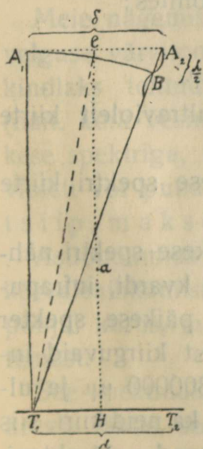
valgus + valgus = pimedus), tähendab, et nad interfereeruvad nagu teisedki lained. Et võimalik pole interferentskatse korraldamiseks leida kaht valguseallikat, mis igal silmapilgul saadaksid välja amplituudi ja faasi poolest täiesti ühesuguseid laineid, siis kasutas Fresnel oma peeglikatsetes valguseallikana sama valguseallika ebakujutusi kahes tasapeeglis järgmiselt: ta juhtis (joon. 127) tugeva monokromaatilise valguse läbi pilu P nurkpeegli le, 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 üksteise ligi-

dal. Kaugel ekraanil EE ilmusid paralleelsed vaheldamisi heledad ja tumedad ribad. Pärastistes katsetes tarvitas Fresnel nurkpeegli asemel võrdtavalist laia alusega prisma, nn. interferentsprisma, mille murdja nurk oli ligi 180°. Nagu näha joonisest 128, muudavad samast allikast A väljaminevad kiirte kimbud murdumisel prisma oma sihi nii, et ühe osa lähtekohaks võib lugeda punkti

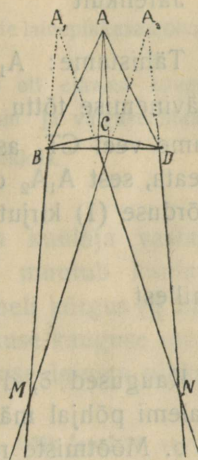
A_1 ja teise osa lähtekohaks punkti A_2 . Tingimused on täiesti samad kui Fresnel'i nurkpeegli juures, ja ekraanil ilmuvad M ja N vahel samasugused ribad kui peeglikatses.

Ribade tekkimist võib seletada ainult järgmiselt: H kohal valitseb tugev valgus, sest $A_1H = A_2H$; H kohal võnguvad eetri osakesed mõlemate lainete süsteemide suhtes samades faasides ja käiguvahet ei ole. T_2 ja T_1 kohal on tume, sest lainete käiguvahet on sääl pool lainepikkus (vaata joon. 129, $A_2T_1 - A_1T_1 = \frac{\lambda}{2}$, $A_1T_2 - A_2T_2 = \frac{\lambda}{2}$). H_1 ja H_2 kohal on valge, sest lainete käiguvahet on sääl terve lainepikkus, faasid on samad ($A_2H_1 - A_1H_1 = \lambda$, $A_1H_2 - A_2H_2 = \lambda$). Nii siis valitseb pimedus igal kohal, kus lainete käiguvahet on poollainepikkuse paaritu arv ja valgus sääl, kus käiguvahet on poollainepikkuse paarisarv. Katset tehes mitmesuguste värviliste kiirtega leidis Fresnel, et ribad vahed on näit. violett kiirte juures väikesemad kui punaste juures. Sellest peab järeldama, et violett kiirte lained on lühemad kui punaste omad.

Valge valguse juures olid ribad värvilised. See on arusaadav, sest valges valguses peituvad värvid ei hävine interfereerumisel samadel kohtadel, ja iga koht paistab sääl hävinenud värvi täiendusvärvis.



Joon. 129.



Joon. 128. Interferentsprisma.

115. Laine pikkuse määramine. a. Joonises 129 kujutavad A_1 ja A_2 kaht täiesti ühesugust monokromaatilist valguseallikat (valguse punkti ebakujutised Fresnel'i katses), millest laiali lähevad ühesugused lainete süsteemid. Joonises $A_1C = CA_2$ ja $CH \perp A_1A_2$. Ekraanil ilmub keskmine hele riba H kohal, esimesed sümmeetrilised tumedad ribad T_1 ja T_2 kohal. Tõmbame kaare A_1B raadiusega T_1A_1 . Punktide A_1 ja A_2 läheduse ja ekraani kauguse tõttu võime kaart A_1B vaadelda kui side-

joont ja kujundit A_1A_2B kui täisnurkset kolmnurka. Joonisest näeme, et

$$\triangle A_1A_2B \sim \triangle CT_1H.$$

Järelikult

$$A_1A_2 : A_2B = CT_1 : T_1H \quad (1).$$

Tähistame: $A_1A_2 = \delta$, $T_1T_2 = 2T_1H = d$, $CH = a$; valguse hävinemise tõttu punktis T_1 on $A_2B = A_2T_1 - A_1T_1 = \frac{\lambda}{2}$; asetame veel CT_1 asemel $CH = a$ (seda võime teha ilma tuntava veata, sest A_1A_2 on väike ja ekraan võrdl. kaugel). Nüüd võime võrduse (1) kirjutada järgmiselt:

$$\delta : \frac{\lambda}{2} = a : \frac{d}{2},$$

millest

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

Kaugused δ , d ja a on mõõdetavad, mis võimaldab saadud valemi põhjal määrata antud valguse lainepikkuse õhus.

b. Mõõtmiste resultaatidest on näha, et äärmiste nähtavate punaste kiirte lainepikkused (õhus) on ligi **800** $\mu\mu$ (0,000800 mm) ja äärmiste nähtavate violett kiirte omad ligi **400** $\mu\mu$.

Praegu tarvitatakse valguse lainepikkuse määramiseks teisi hõlpsamaid meetodeid (§ 120), sest Fresnel'i peeglikatse korraldamine on seotud raskustega ja ei anna täpseid resultaate (interferentsribad ei ole teravad).

Järgnevas tabelis on antud tähtsamate Frauenhofer'i joonte vastavate värviliste kiirte lainepikkused millimikronites:

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

On korda läinud mõõta ka infrapunaste ja ultravioletti kiirte lainepikkusi.

Ühes mittenähtavate kiirtega ulatavad päikese spektri kiirte lainepikkused $\sim 2800 \mu\mu$ kuni $\sim 300 \mu\mu$.

Helide reaga võrreldes kujutab päikese spektri nähtav osa ainult ~ 1 oktavi, ultravioletti osa \sim kvardi, infrapunane osa ligi kaks oktavi, kokkuvõttes terve päikese spekter pisut üle kolme oktavi. Maapäälsetest kehadest kiirguvaid infrapunaseid kiiri on kindlaks tehtud kuni $\lambda = 300000 \mu\mu$ ja ultravioletti kiiri kuni $\lambda = 100 \mu\mu$. Kui arvesse võtta ka neid kiiri, siis on infrapunaste, nähtavate ja ultravioletti kiirte piirkond ~ 11 oktavi.

1. Arvuta eelpool toodud andmete põhjal ligikaudselt äärmiste nähtavate päikese spektri kiirte võnkearvud.

2. Arvuta eelpool toodud andmete põhjal äärmiste mittenähtavate päikese spektri kiirte võnkearvud.

3. Leia Frauenhofer'i joonele D (naatrium) vastavate kiirte lainepikkused õhus, vees ja klaasis.

4. Punase valgusega korraldatud Fresnel'i peeglikses oli ekraani kaugus 20 m, esimeste sümmeetriliste tumedate ribade vahe $\frac{1}{8}$ mm ja valguseallikate ebakujutiste kaugus üksteisest 4 cm. Leia valguse lainepikkus.

116. Doppleri printsiip. Nagu heliallika ja kuulaja vastastikuse kauguse suurenemisel või vähenemisel muutub kuulaja kõrva langevate helilainete pikkus ja vastavalt heli kõrgus (§ 22), nii peaksid ka valguseallika ja vaatleja vastastikuse kauguse muutumisel muutuma vaatleja silma langevate valguse lainete pikkused ning ühes sellega valguse värv.

Missuguse spektri otsa poole nihutuna peaksid paistma kõik spektri värvid (ühes neelumisjoontega) vaatleja ja valguseallika vastastikuse kauguse suurenemisel või vähenemisel?

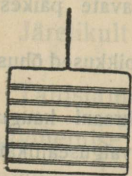
§ 22 leitud valemist $n_{1,2} = \frac{v \pm v_1}{\lambda}$ võime järeldada, et vaatleja lähenemine või kaugenemine võib ainult siis avaldada tuntavat mõju võnkearvu ja lainepikkuse pääle, kui liikumise kiirus v_1 on valguse kiiruse v kohta küllalt suur. Niisuguste suurte liikumiskiirustega on meil tegemist ainult taevakehade liikumiste juures.

Meie nägemisorgan ei ole küllalt värvitundelik, 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 violett või punase otsa poole. Nii siis on Doppleri printsiip maksev ka valguse kohta.

Astronoomias mõõdetakse niisugusel juhusel spektraaljoonte kõrvalenihkumise suurus ja arvutatakse sellest Doppleri printsiibi põhjal kiirus, millega taevakeha läheneb maakerale või kaugeneb temast.

See spektraalanalüütiline liikumise määrimise meetod on iseäranis tähtis, sest pole võimalik teisel teel liikumist vaatamisihis määrata ega üldse tähele panna.

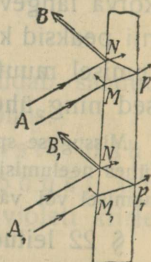
117. Õhukeste kelmete värvid. Värvitu ainete õhukesed kihid paistavad sagedasti värvilistena, näit. seebimullid, õhuke õlikiht vee pinnal, õhuke õhukiht jää või klaasi praos jne. Niisuguseid värve nimetame õhukeste kelmete värvideks.



Joon. 130. Interferentsribad õhukesel kelmel.

a. Hoiame traatvõru seebivee kelmega vertikaalselt monokromaatilise leegi (naatriumi) valguses. Valgustatud kelme pinda valguseallika poolt vaadeldes näeme horisontaalseid paralleelseid vaheldamisi heledaid ja tumedaid ribasid (joon. 130).

Nähtust seletame järgmiselt: kelme läbilõige on kiilu sarnane (joon. 131), sest kelme kiht on allapoole paksem (mispärast?). Peegeldub langeva kiire AN osa kelme esipinnal sihis NB, siis leidub mõni teine kiir AM, mille üks osa läheb kahekordse murdumise ja peegeldumise järele (kelme tagaseinal) samas sihis NB. Mõlemate sihis NB minevate kiirte tee pikkused ei ole ühesugused; sedaviisi tekib käiguvahed, mille suurus on kelme kihi paksusest ja ka kiirte langemisnurgast. Kelme kohadel, kus käiguvahed võrdub valguse poollainepikkuse paaritu arvuga, hävineb valgus interferenrumisel. Kohad, kus käiguvahed on poollainepikkuse paarisarv, on heledad. Et kelme kihi paksus on samal horisontaalpinnal ligikaudu ühesugune, suureneb aga ülalt allapoole, siis ilmuvad vaheldamisi heledad ja tumedad ribad.



Joon. 131. Interferents õhukesel kelmel.

Kuidas muutub ribade kaugus, kui monokromaatilise punase valguse asemel tarvitada monokromaatilist violett valgust?

Kui valgustada kelme valge valgusega, siis on ribad mitmevärvilised. See on arusaadav, sest kelme igal kohal hävineb kihi paksusele ja kiirte langemisnurgale vastavalt teatav värv ja koht paistab hävinenud värvi täiendusvärvis.

Mispärast on õhuke õli kiht veepinnal mitmevärviline ja mispärast muutuavad värvid?

b. Vaadeldes seebivee kelmel monokromaatilises valguses vastu valguseallikat, näeme ka vaheldamisi heledaid

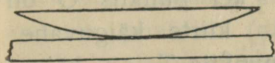
ja tumedaid ribasid, mis tekivad kelmest läbiläinud valguse interferentsi tõttu.

Seleta joon. 132 järele sihis QR interfereeruvate kiirte käiku ja ribade tekkimist.

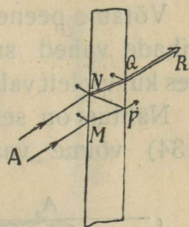
Mispärast on läbiläinud valguses interferentsnähtused nõrgemad ?

c. Newton'i rõngad. Asetame lameda prilliklaasi (0,25 dioptrit) peegelklaasi tükile ja valgustame ta monokromaatilise valgusega (joon. 133).

Me näeme vaheldamisi heledaid ja tumedaid kontsentrilisi rõngaid, mis tekivad interfereerumise tõttu õhukeses plaadi ja läätsevahelises õhukihis. Et interferentsribad moodustavad kontsentriselised rõngad on arusaadav, sest ühepaksused õhukihid,



Joon. 133.
Newtoni rõngad.



Joon. 132. Interferents õhukesel kelmel.

mille suhtes kiirte käiguvahe võrdub poollainepikkuse paaritu arvuga, asuvad kontsentriselt ümber läätse ja plaadi puutumispunkti. Esimesena tekitas neid rõngaid Newton ja tarvitas selleks tasakumerläätse (joon. 133). Newton'i rõngaid kasutati ka laine pikkuse määramiseks.

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

Kuidas paistavad rõngad valges valguses ?

Diffraktsioon

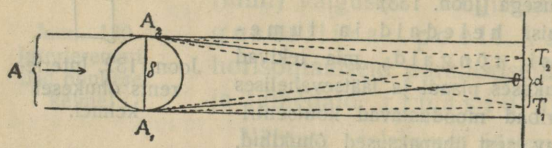
118. Diffraktsioon kitsa keha varjus. Pikema sadama muuli taha ei pääse merelained, muul varjab sadamat, kuid siiski painduvad vee lained ümber muuli ääre. Ümber kitsama tõkke äärte aga pääsevad lained peaaegu takistamata tõkke taha. On valgus lainetamine, siis peaksid ka valguse kiired painduma ümber tõkke ääre ja paindumine peaks olema iseäranis silmapaistev, kui tõkke on kitsas. Niisugune valguse paindumine ümber tõkke sünnib tõelikult ja nimetatakse valguse **diffraktsiooniks**.

Asetame kitsa monokromaatiliste paralleelsete kiirte kimbu teele peenikese traadi, siis näeme ekraanil traadi geomee-

trilise varju asemel heledaid ja tumedaid ribasid. Eriti hele riba asub geometrilise varju keskkohas.

Võtame peenema traadi, siis on ribade vahed suuremad. Ka on ribade vahed suuremad monokromaatilise punase valguse juures kui violett valguse juures. Valge valguse juures on ribad värvilised.

Nähtus on seletatav sellega, et puutumispunkte A_1 ja A_2 (joon. 134) võime vaadelda kui kaht valguseallikat (Fresnel'i katses),



Joon. 134. Interferents peene traadi varjus.

millest levivad elementaarained ka geometrilise varju piirkonda. Geometrilise 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.

Nagu Fresneli katse juureski on antud valguse laine pikkus

$$\lambda = \frac{\partial d}{a},$$

kui traadi paksus on δ , ekraani kaugus traadist a ning $d = 2OT_1$ on esimeste tumedate ribade vahe.

Valemist on näha, et antud valguse (λ) ja ekraani kauguse (a) juures on esimeste tumedate ribade vahe d seda suurem ehk riba O kohal seda laiem, mida väiksem on δ , tähendab, mida peenem on traat.

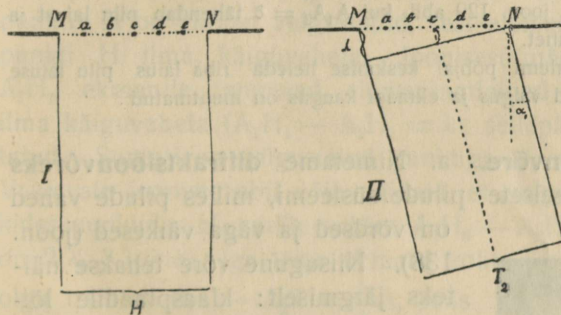
Kirjelatud nähtus võimaldab antud valguse lainepikkuse määramist, sest suurused δ , d ja a on mõõdetavad; d võime mõõta luubi abil mm-jaotustega varustatud mattklaasist plaadil.

119. Diffraktsioon kitsa pilu juures. Eraldame paralleelsete monokromaatiliste kiirte kimbust pilu p_1 abil kiirte riba ja valgustame sellega kitsama pilu p_2 (joon. 135). Me näeme ekraanil mõlemalpool keskmist heledat riba H paralleelseid vaheldamisi heledaid ja tumedaid ribasid. Ribade vahed on punase valguse juures suuremad kui violett valguse juures; valge valguse juures on ribad värvilised. Kui teeme pilu p_2 kitsamaks, siis nihkuvad ribad üksteisest kaugemale.

Nähtuse seletamiseks kujutame pilu p_2 suurendatud kujul. Olgu MN (joon. 136) pilu p_2 kujutis. Pilu punktid a , b ,

c, d, e on ühesugustes võnkumisfaasides. Nad mõjuvad Huygens'i printsiibi põhjal elementaarlainete tsentritena ja elementaarlained lagunevad pilu taga igas sihis laiuli.

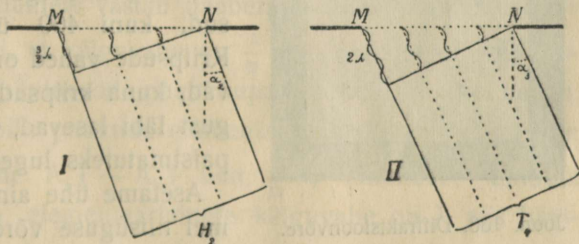
On $cH \perp MN$ (joon. 136, I), siis jõuavad elementaarlained punkti H sama faasiga (ekraan on pilu laiusega võrreldes väga kaugel), järelikult on ekraanil H kohal hele riba. — Punkti H kõrval leiame punkti T_2 , mille suhtes äärkiirte käiguvahe on $MT_2 - NT_2 = \lambda$ (joon. 136, II). Kui pilust sihis cT_2 mineva kiirte kimbu poolitame, siis näeme, et kimbu igast ühel poolel asuvast punktist (näit. e) väljaminevale elementaarlainele vastab kimbu teisel poolel asuvast punktist (b) väljaminev elemen-



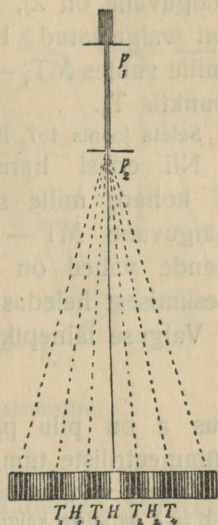
Joon. 136. Diffraktsioon kitsa pilu juures.

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_2 , mille suhtes $MH_2 - NH_2 = \frac{3}{2}\lambda$ (Joon. 137, I), on



Joon. 137. Diffraktsioon kitsa pilu juures.



Joon. 135. Diffraktsioon kitsa pilu juures.

taarlaine nii, et käiguvahe on $\frac{\lambda}{2}$

($bT_2 - eT_2 = \frac{\lambda}{2}$).

Interfereerimisel hävitab kiirte kimbu üks

hele. Jagades kiirte kimbu kolmeks võrdseks osaks, näeme, et kaks kõrvutiseisvat osa hävinevad interfereerumisel (äärkiirte käiguvähe on λ), kuna kolmas osa valgustab punkti H_2 ; samuti on valgustatud H_2 sümmeetriline punkt H_1 . — Punktis T_4 , mille suhtes $MT_4 - NT_4 = 2\lambda$, on tume, samuti ka sümmeetrilises punktis T_3 .

Seleta joonis 137, II põhjal, mispärast punkt T_4 on tume.

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., ning nende vahed on valgustatud; nähtus nõrgeneb kaugenemisega keskmisest heledast ribast.

Valguse lainepikkuse määrab valem

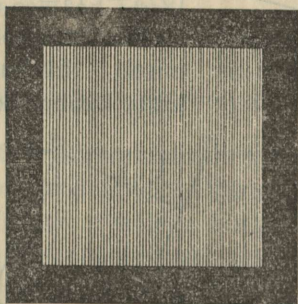
$$\lambda = \frac{\delta d}{2a},$$

kus a on pilu p_2 kaugus ekraanist, δ pilu laius ja d esimeste sümmeetriliste tumedate ribade vähe.

Valemit võib tuletada joon. 129 abil, kui $A_1A_2 = \delta$ tähendab pilu laiust ja $A_2B = \lambda$ äärkiirte käiguvähet.

I. Kuidas muutub valemi põhjal keskmise heleda riba laius pilu laiuse muutumisel, kui tarvitatud valgus ja ekraani kaugus on muutmatud?

120. Diffraktsioonvõre. a. Nimetame **diffraktsioonvõreks** väga kitsaste paralleelsete pilude süsteemi, milles pilude vahed



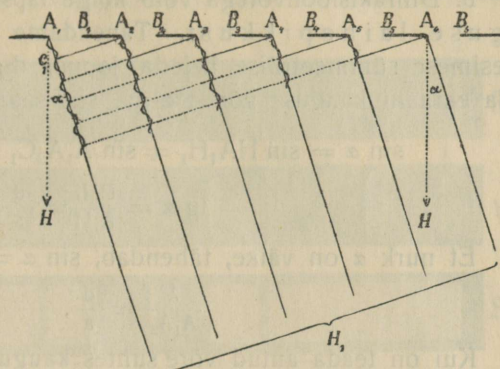
Joon. 138. Diffraktsioonvõre.

on võrdsed ja väga väikesed (joon. 138). Niisugune võre tehakse näiteks järgmiselt: klaasplaadile lõigatakse isesuguse aparadi abil võrdsete vahedega paralleelsed kriipsud, kuni 400 ühe mm pääle. Kriipsude vahed on siis läbinähtavad, kuna kriipsud ise nii vähe valgust läbi lasevad, et neid võib läbi paistmatuteks lugeda.

Asetame ühe ainsa kitsa pilu asemel niisuguse võre monokromaatiliste kiirte tee, siis saame ekraanil heledate ja tumedate ribade asemel täiesti tumedate vahedega eraldatud teravad heledad jooned.

Vahed on punase valguse juures (joon. 140, P) laiemad kui violeti valguse juures (140, V).

Valgustatud joonte ja tumedate vahede tekkimist seletame joonis 139 abil järgmiselt: Võre on ekraani kaugusega võrreldes nii väike, et üksikutest piludest sama ekraani punktile langevaid kiiri (elementaarlainete sihte) võib lugeda paralleelseteks. Pilude üksikud punktid on ühesugustes faasides. Langevate kiirte sihis punktis H on ekraan valgustatud, sest elementaarlained jõuavad punkti H ilma käiguvaheta. Joonisest näeme, et 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 sümmeetriline punkt. Vastavate jooniste abil võib näidata, et valgus on ekraanil kõikides punktides H_n , mille suhtes $A_1H_n - A_2H_n$ või $A_2H_n - A_1H_n$ on 2λ , 3λ jne. Iga teine ekraani koht T on aga täiesti tume: olgu näiteks $A_1T - A_2T = \frac{1}{2}\lambda$, siis hävinevad kõrvuti olevate pilude elementaarlained paarikaupa, sest antud pilu iga punktist mineva elementaarlainele vastab naaberpilu ühest punktist mineva elementaarlane nii, et käiguvahet on $\frac{1}{2}\lambda$; olgu näit. $A_1T - A_2T = \frac{1}{4}\lambda$, siis hävinevad paarikaupa esimese ja kolmanda, teise ja neljanda pilu punktide elementaarlained jne. (käiguvahet $\frac{1}{2}\lambda$); on käiguvahet $A_1T - A_2T$ näit. $\frac{1}{10}\lambda$, tähendab, esimese ja kümnenda pilu elementaarlainete käiguvahet on λ , siis hävinevad esimese ja kuuenda, teise ja seitsmenda pilu punktide elementaarlained (käiguvahet $\frac{1}{2}\lambda$) jne. Nii siis on heledate joonte vahed täiesti tumedad. Jooned on teravad ja ka palju



Joon. 139. Diffraktsioonvõre.

joonte vahed täiesti tumedad. Jooned on teravad ja ka palju

heledamad kui ühe ainsa pilu juures, sest läbi võre pääseb rohkem valgust kui läbi ühe ainsa pilu.

b. Diffraktsioonvõrega võib kõige täpsemalt määrata valguse lainepikkust. Tähendame H -ga keskmise ja H_1 -ga esimese sümmeetrilise heleda joone, d -ga joonte kauguse HH_1 ja ekraani kauguse võrest a -ga, siis saame joonis 139 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 on

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

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

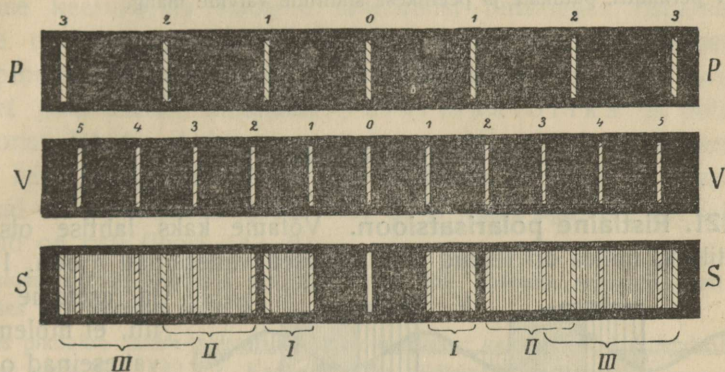
$$\lambda = \frac{bd}{a}.$$

Nagu valemist näha, on antud valguse ja ekraani kauguse juures diffraktsioonjoonte kaugus d seda suurem, 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 üksteisest 3 m, kollase valguse juures heledate joonte kaugus $HH_1 = 1,8$ cm. Leia kollase valguse laine pikkus.

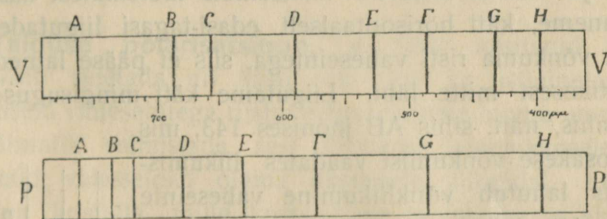
c. Laseme võrele langeda monokromaatilise valguse asemel valge valguse, siis näeme ekraanil värvilise pildi, mis tekib järgmiselt: valges valguses peituvad violett kiired annavad joonises S (joon. 140) omad jooned V_1, V_2 jne. kohal; punased kiired annavad joonises S omad jooned P_1, P_2 jne. kohal; teiste värviliste kiirte jooned ilmuvad nende joonte vahel spektri värviliste kiirte järjekorras. Nii siis tekivad joonises S spektrid. Esimene spekter ulatab violett joonest 1 kuni punase jooneni 1 ja on joonises S tähendatud I-ga; teine ulatab violett 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 (neelunud) värviliste kiirte asemel on näha teravad tumedad jooned. Niisuguseid võresid tarvitatakse spektrite



Joon. 140. Diffraktsioonvõre abil saadud jooned ja spektrid.

uurimisel prisma asemel. Viimasest lainepikkuse valemist 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, punase spektri ots on violet otsaga võrreldes nagu kokkusurutud. Seda näeme joonises 141,



Joon. 141. Fraunhofer'i jooned võre ja prisma abil saadud spektrites.

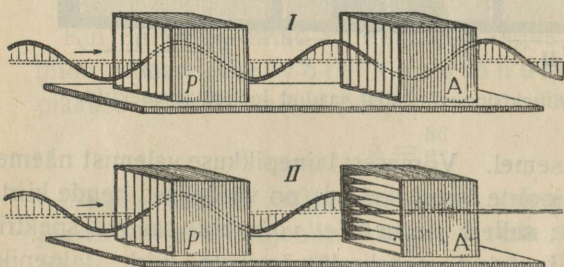
kus V kujutab Fraunhofer'i joonte jaotust võre abil saadud spektris ja P kujutab sama joonte jaotust prisma abil saadud spektris. Võre abil saadud spektrid nimetatakse normaal-spektriteks.

Diffraktsiooniga on seletatav värvide tekkimine, kui vaadata läbi linnu sule või silma ripsmete 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 siidiriide värvide mäng.

Polarisatsioon

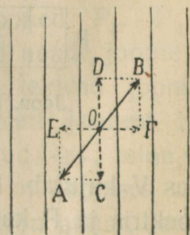
121. Ristlaine polarisatsioon. Võtame kaks lahtise otsaga kastikest, milles on tehtud riulisarnased vaheseinad (joon. 142),



Joon. 142. Polarisatsiooni mudel.

ja asetame nad nii, et mõlemate vaheseinad oleksid paralleelsed. Tõmbame läbi vaheseinte kumminööri ja paneme selle käega võnkuma. Liigutame kätt üles-alla, siis võngu-

vad nõõri osakesed vastavalt joonisele 142, I paralleelselt vaheseintega ja lained lähevad takistamata mõlematest kastikestest läbi. Paneme, kätt horisontaalselt edasi-tagasi liigutades, nõõri osakesed võnkuma risti vaheseintega, siis ei pääse lained esimesest kastikesest mitte läbi. Liigutame kätt mingisuguses vahepäälses sihis, näit. sihis AB joonises 143, mis kujutab osakese võnkumist vaadates liikumissihis, siis lahutub võnkliikumine vaheseinte takistuse tõttu kaheks teineteisele risti sihitud komponendiks. Mõlemast kastikesest läheb läbi ainult komponentlaine CD, mille osakesed liiguvad vaheseinte sihis. Liigutame kätt mitmesuguses sihis, näit. üles-alla, paremalt pahemale poole, nende vahepäälses sihtides, ringi jne., siis tekib käe ja kasti P vahel kee-



Joon. 143. Ristlaine lahutamine.

ruline ristlaine, mille üksikud võnkuvad osakesed muudavad alata oma võnkumissihti. Kastikesest P läheb laine läbi, kuid selle laine osakesed võnguvad alati ainult vaheseinte sihis. Nii-suguse keerulisema ristlaine muutumist lihtsamaks ristlaineiks, mille osakesed võnguvad ainult samas läbi laine kiire minevas tasapinnas, nimetame laine **polarisatsiooniks**; kastikest P, mis lainet polariseerib, nimetame polarisaatoriks ja polarisaatorist läbiläinud lainet polariseerituks. Polariseeritud laine läheb takistamata läbi kastikese A, kui P ja A vaheseinad on paralleelsed (joon. 142, I), ei pääse aga läbi, kui vaheseinad on risti (joon. 142, II).

Kuidas muutub kastist A läbiläinud laine, kui pöörame aeglaselt kasti A joonises 142 seisust I seisuga II?

Kas pikilaine läheb takistamata läbi mõlematest kastikestest, kui nende seisud on nagu joon. 142 II? Kas võib üldse pikilainet polariseerida?

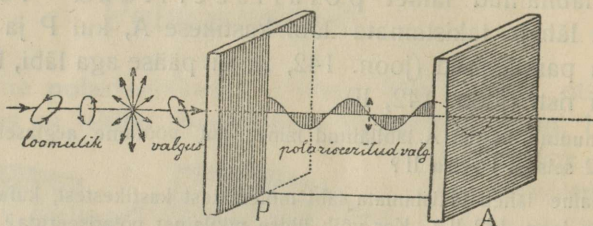
Laine võnkumistasapinnale risti asetatud kasti A abil võime lainet analüüsida s. o. kindlaks teha, kas esialgne polarisaatorile P langev laine oli rist või pikilaine (kuidas?); kastikese A abil võime kindlaks teha, kas temale langev laine on polariseeritud ristlaine ja missugune on polariseeritud ristlaine osakeste võnkumispind (kuidas?). Nimetame kastikest A analüsaatoriks. Kõigist eelöeldust järeldame: pikilaine läheb risti asetatud polarisaatorist ja analüsaatorist läbi, ristlaine aga mitte.

122. Valguse polarisatsioon. a. Seni käsitatud valguse nähtusi võib seletada nii hästi piki- kui ka ristlainetamisega. Kastisarnaseid vaheseintega riistu valguselainete loomu uurimiseks ei ole võimalik valmistada, sest üliväikese 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 turmaliin kristallist tasaparalleelset plaadikest, mille tahud on lõigatud paralleelselt kristalli teljega. Tekime kitsa paraleelkiirte kimbu abil ekraanil heleda täpi. Asetame ühe turmaliinplaadi kiirte teele, siis tumeneb täpp, sest turmaliin ei ole hästi läbipaistev (värviline), kuid täpp jääb plaadi

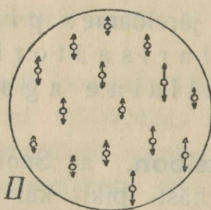
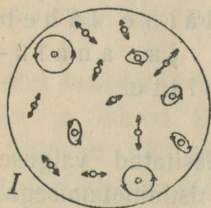
pöörämisel muutmatuks. Järelikut ei ole plaadile langev valgus polariseeritud.

Asetame esimese plaadi taha teise nii, et nende teljed oleksid paralleelsed, siis muutub täpp ekraanil neelumise tõttu tumedamaks. Pöörame aga teist plaati, siis muutub täpp ikka tumedamaks ja on täiesti tume, kui plaadid on telje sihtidega risti (joon. 144). Sellest järeldame: **valgus on ristlainetamine.**



Joon. 144. Valguse polarisatsioon.

Loomulikus valguses, mis langeb esimesele plaadile, polarisaatorile (P), võnguvad eetri osakesed igas sihis, nagu pöörduks võnkumise tasapind ülikiiresti ümber kiire kui telje



Joon. 145. Võnkumine loomulikus ja polariseeritud kiires.

(joon. 145, I); polarisaatori taga on valgus polariseeritud, eetri osakesed võnguvad alata samas kindlas pinnas (joon. 145 II). Teine plaat (A) mõjub kui analüsaator.

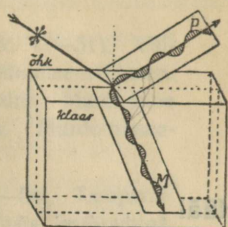
Vaatame läbi turmaliinplaadi vastu taevast, siis ei muutu valgus plaadi pöörämisel. Vaatame aga läbi kahe plaadi, siis muutub valgus ühe plaadi pöörämisel ja läbi telgedega risti asetatud plaatide me valgust ei näe.

b. Vaatame läbi turmaliinplaadi päikese kiirtes läikivale vee pinnale, siis võime tähele panna, et plaadi pöörämisel valgus heleneb ja tumeneb, aga täiesti ei kao. Me järeldame, et peegeldunud valguses on osa kiiri polariseerunud. Võib näidata, et valguse murdumisel kahe keskkonna

lahutuspinnaal murdunud valgus on ka osalt polariseeritud, kuid vähem kui peegeldunud valgus.

Joonis 146 näitab, missuguses pinnas suuremalt jaolt võnguvad eetri osakesed peegeldunud ja murdunud valguses.

Brewster uuris seda nähtust ja leidis, et peegeldunud ja murdunud valguse osa on kõige rohkem polariseeritud siis, kui kiired langevad nii, et peegeldunud ja murdunud kiired moodustavad täisnurga. Brewsteri seaduse põhjal võime määrata iga läbinähtava aine kohta langemisnurka, mille juures peegeldunud ja murdunud kiired on kõige rohkem polariseeritud. Näiteks leiame klaasi kohta

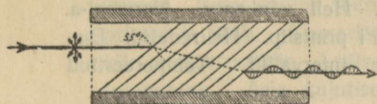


Joon. 146. Polarisatsioon peegeldumisel ja murdumisel.

$$\frac{3}{2} = m = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin (90^\circ - \alpha)} = \frac{\sin \alpha}{\cos \alpha} = \operatorname{tg} \alpha$$

ja sellest $\alpha = 56^\circ$ (ümmarguselt).

Turmalinplaatide asemel tarvitatakse ka klaaspolarisaatoreid ja analüsaatoreid, mis koosnevad üksteise ligi asetatud klaasplaatidest (joon. 147). Kui võtta rohkem kui 10 plaadikest ja langevate kiirte langemisnurk on $\sim 56^\circ$, siis võib läbiläinud valgust mitmekordse murdumise tõttu lugeda praktiliselt polariseerituks.



Joon. 147. Polarisatsioon klaasplaatide kihis.

Sisu

Hääli

lhk.

3

Pendli võnkumine (lhk. 3—5). Tasapendel. Koonuspendel. Tasapendli seisumääramine koonuspendli abil. Elastsete kehade võnkumine.

Lainetamine (lhk. 6—11). Ristlaine tekkimine ja ehitamine. Ristlaine periood, võnkearv, amplituud ja pikkus. Ristlaine levimiskiirus. Ristlaine interferents. Ristlaine peegeldumine. Seisvad ristlained. Pikilaine tekkimine. Pikilaine tekkimine õhus. Seisvad õhulained. Piki- ja ristlainete tekkimise tingimused.

Hääli lainetamisnähtusena (lhk. 12—15). Hääle tekkimine ja levimine. Hääle levimiskiirus. Hääle tugevus. Hääle peegeldumine. Hääle interferents.

Helid ja heliredelid (lhk. 16—19). Heli võnkearv. Normaal- ja kuulmisaistingu piirid. Doppleri printsiip. Heliredelid. Diaatoonilise duuri-heliredeli toonide intervallid. Tempereeritud duuri-heliredel.

Heli allikad; ülemtoonid (lhk. 20—23). Keele võnkumiseadused. Keele võnkumiskuju. Ülemtoonid. Helihark. Plaat. Õhusambas.

Resonants; kõla analüüs (lhk. 24—29). Resonants. Õhusamba resonants. Kõla analüüs. Kõlavärv. Konsonants. Dissonants. Heljumised. Fonograaf ja grammofon.

Valgus

30

Valguse levimine; varjud; kiirus (lhk. 30—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. Peegeldumiseadused. Homotsentriliste kiirte peegeldumine tasapeeglist. Kujutised tasapeeglist.

Peegeldumine sfäärilistest peeglitest (lhk. 40—46). Nõguspeegel. Nõguspeegli pääfookus. Valgusepunkti kujutis nõguspeeglis. Nõguspeegli valem. Kujutiste ehitamine nõguspeeglis. Liikumisreegel. Kumerpeegel.

Murdumine ja täieline sisepeegeldumine (lhk. 47—51). Valguse murdumise nähtused. Täielise sisepeegeldumise nähtused. Murdumine ja sisepeegeldumine klaaspoonsilindris. Murdumine ja sisepeegeldumine mitteühtlases keskkonnas. Murdumisseedused. Murdunud kiire ehitamine.

Murdumine tasapinnalistes kehades (lhk. 52—54). Tasaparalleelne plaat. Aine suhtelise murdumisnäitaja määramine. Prisma Prisma kogukaldumise miinimum.

Valguse lahutamine ja liitmine (lhk. 55—56). Valguse hajumine (dispersioon); spekter. Värvide liitmine. Täiendusvärvid.

Kehade värv (lhk. 57—58). Peegeldunud valguse värv. Läbipaistva keha värv. Läbipaistmatu keha värv. Värvianete segavärv.

Murdumine sfäärilistes läätsedes (lhk. 59—69). Läätsede liigitamine. Kumerläätsede pääfookus. Homotsentrilise kiirtekimbu murdumine kumerläätses. Valgusepunkti kujutis. Üksikute kiirte murdumine kumerläätses. Sfääriline aberratsioon kumerläätses. Kromaatiline aberratsioon kumerläätses. Akromaatiline prisma ja lääts. Kumerläätsede optiline keskpunkt, abitelg, pääkiir ja tsentraalkiir. Läätsede valemi tarvitamine. Läätsede valemi tuletamine. Asja kujutise ehitamine kumerläätses. Murdumine nõgusläätses. Kujutise ehitamine nõgusläätses.

Optilised riistad; nägemine (lhk. 70—87). Projektsioon-aparaat. Päevapildi aparaat. Silm ja nägemine. Kollane ja pimetäpp. Silma kohanemisvõime (akkomodatsioon). Lühidaltnägiija ja kaugelenägiija. Prillid. Vaatenurk. Nähtused füsioloogilisest optikast (järelpildid; irradiatsioon; värvide nägemine; värvipimedus; värvilised järelpildid; kontrastvärvid; nägemine kahe silmaga; reljefuse tunde tekkimine; stereoskoop; asja kauguse ja suuruse määramine). Luup. Mikroskoop. Astronoomiline (Kepleri) pikksilm. Maapikksilm. Hollandi (Galilei) pikksilm. Prismabinokkel. Peegelteleskoop.

Nähtavate ja mITTenähtavate spektri kiirte avaldused (lhk. 88—91). Valgus kui kiirgav energia. Luministsents. Mittenähtavate spektri kiirte avaldused. Kiirgamise olenevus temperatuurist.

Spektri tüübid; spektraalaralüüs (lhk. 92—99). Spektraal-aparaat. Kiirgamis- ehk emmissioonspekter. Neelumis- ehk

absorptsioon-spekter. Päikese spekter. Spektraalanalüüs. Aja-loost.

Füüsikaline optika 100

Newtoni ja Huygensi vaade valguse loomu kohta (lhk. 100—105). Geomeetiline ja füüsikaline optika. Emissioonteooria ja lainetamisteooria. Huygensi printsiip. Valguse levimine. Peegeldumine Huygensi printsiibi põhjal. Murdumine Huygensi printsiibi põhjal.

Interferents ; laine pikkuse mõõtmine ; õhukeste kelmete värvid (lhk. 106—110). Interferents (Fresnel). Laine pikkuse määramine. Doppleri printsiip. Õhukeste kelmete värvid.

Difraktsioon (lhk. 111—117). Difraktsioon kitsa keha varjus. Difraktsioon kitsa pilu juures. Difraktsioonvõre.

Polarisatsioon (lhk. 118—121). Ristlaine polarisatsioon. Valguse polarisatsioon.

Mõned trükivead

lhk.	rida	trükitud	peab olema
7	9 alt	joonisega 6	joonisega 7
8	4 ülalt	joon. 7	joon. 8
15	3 „	peegelduva	peegeldava
21	2 alt	c	\bar{c}
26	14 ülalt	a ja a	\bar{a} ja $\bar{\bar{a}}$
49	9 ülalt	puuvill	veevah
52	10 „	4. Leida	4. Katsu leida
53	12 alt	I ja 2	I ja II
53	11 alt	2 ja 1	II ja I
57	16 alt	läbipaistmatu	läbipaistva või läbipaistmatu
74	5 ülalt	akkomatatsioon	akkomadatsioon
102	3 „	PP ₁	PP
102	18 „	QQ ₁	QQ
109	8 „	valguseallikate	valguseallika

42

TÜ RAAMATUKOGU



10300015856521

A A

A421 π

57799 v