

14351

E. Kilksõn

J. Lang

Füüsika

Gümnaasiumi IV klassile

TOOTS

Tartu Eesti Kirjastus

E. KILKSON JA J. LANG

F Ü Ü S I K A

GÜMNAASIUMI IV KLASSILE

HÄÄL JA VALGUS

NOOR-EESTI TRÜKIKODA
TARTUS, KASTANI 98

33770

NOOR-EESTI TRÜKIKODA
TARTUS, KASTANI 98



TARTU EESTI KIRJASTUS



2-63987

A-14351

04785

Korrektor M. Kindlam.

AfV nr. I/00162. Trükiarv 6150 eks. Paber: 61 × 86 cm, ETK paberivabrik, Tallinn. Trükk ja brošeerimine: „Noor-Eesti“ trüki- ja köitekoda, Tartu. Ilmunud jaanuaris 1944. Hind Rmk. 3.—.

EESSÕNA.

Käesolev „Füüsika gümnaasiumi IV klassile“ kui viimane osa gümnaasiumi füüsikaõpikute sarjas on koostatud samadel põhimõtetel kui tema eelkäijadki — nimelt on püütud anda võimalikult lühike, lihtne ja konkreetne teemade tervikkäsitlus. Just tervikluse ja kordamise huvides pole saadud mööda osa nende küsimuste uuesti käsitlemisest, mis juba kord esinesid esimeses kontsentrīs. Kuid siin on neid küsimusi võetud hästi lühidalt, teises sõnastuses ning sageli ka teisest seisukohast.

Erilist rõhku on püütud panna sellele, et kogu ainekäsitlus oleks kooskõlas tänapäeva füüsikateadusega, samuti on püütud tuua rohkesti näiteid tehniliste rakenduste alalt ning anda küllaldaselt harjutusi õpilaste jaoks.

Uue momendina on iga peatüki lõpus antud rida ajaloolisi märkusi selles peatükis esinevate mõistete arenemise kohta. Kuigi napid ja lünklikud, tohiks need märkused siiski õpilastes huvi äratada füüsika ajaloolise arenemise vastu ning kaasa aidata teadusliku mõtlemisviisi kujunemisele. Ajaloolise elemendi rõhutamine meie õpikuīs on seda enam vajalik, et sellist materjali on õpilastel endil vastava eestikeelse kirjanduse puudumisel raske hankida.

Ka õpiku lõpus esinev nime- ja mõistete register tohiks soodustada õpiku kasutamist koolitöös.

Nagu teisteski õpikutes, välja arvatud peatükid XIV—XVI, on peenema kirjaga laotud need küsimused, mis on mõeldud kas reaalharu jaoks või seisavad väljaspool kava otseseid nõudeid, kuid siiski on vajalikud paremate õpilaste huvi rahuldamiseks või küsimusest tervikpildi saamiseks.

Tartu, mai 1943.

Autorid.

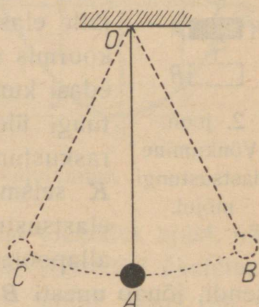
HÄÄL.

I. Rist- ja pikilained.

1. Pendli võnkumine. Mehhaanikast teame, et kui pendel tasakaaluasendist (1. joon., A) välja viia ning lahti lasta, hakkab ta raskustungi mõjul võnkuma. Selline liikumine ühest äärmisest asendist teise ja tagasi kestab seni, kuni õhu- ja teiste takistuste ületamiseks on ära tarvitatud pendlile tema liikumise alguses antud energia. Siis jääb pendel oma endisse tasakaaluasendisse jälle seisma.

Katsed näitavad, et pendli võnkumisel sama liikumine, näiteks ühest äärest teise ja tagasi, kordub võrdsete ajavahe-
mikkude ehk perioodide järel: seega on pendli liikumine perioodiline liikumine. Võnkeperioodiks on

ajavahe T , mille jooksul pendel teeb ühe täisvõnke, s. o. liigub ühest äärmisest asendist teise ja tagasi lähteasendisse. Võnkeamplituudiks nimetame äärmise asendi (B või C) kaugust tasakaaluasendist. Võnkesageduseks ehk -frekventsi n nimetatakse täisvõngete arvu ühes sekundis, järelikult $n = \frac{1}{T}$, millest $nT = 1$. Võnkesagedust mõõdetakse hertsides, kusjuures **1 herts (Hz)** on sagedus 1 täisvõnge ühes sekundis. Kui näiteks pendli võnkeperiood $T = 0,5$ sek., siis tema sagedus $n = 1 : 0,5 = 2$ Hz.



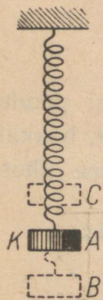
1. joon. Pendli võnkumine.

1. Kirjuta üles matem. pendli valemist ($T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}}$) pendli võnkumiseadused!

2. Pendli täisvõnke vältus (periood) on 1 sek. Kui pikk on see pendel?
3. Määra 1 m pikkuse pendli frekvents hertsides!
4. Missuguse sagedusega võngub pendel, mille pikkus on 5 cm? 4 m?

2. Võnkliikumine elastsustungi mõjul. Pendlitaoline võnkliikumine tekib mitte ainult raskustungi, vaid ka teiste tungide, näiteks elastsustungi mõjul.

Riputame paraja koormise K terasvedru või kumminiidi otsa (2. joon.). Koormise raskuse mõjul venib vedru sedavõrd pikemaks, et vedru elastsustung võrdub koormise raskusega. Siis on koormis K oma tasakaaluasendis A . Kui aga vedru veel enam välja venitada (asend B), siis muutub vedru elastsustung koormise raskusest suuremaks. Koormist nüüd lahti lastes hakkab ta elastsustungi mõjul liikuma ülespoole. Kui koormis jõuab tasakaaluasendisse A , võrdub tema raskus jälle elastsustungiga. Sellest hoolimata aga ei jää koormis siin seisma, vaid saadud hoo arvel liigub edasi kuni asendini C , kulutades oma hoo raskustungi ületamiseks. Kui kõik hoog on muutunud raskustungi potentsiaalseks energiaks, jääb koormis K seisma (asend C). Nüüd aga on raskustung elastsustungist suurem ja koormis hakkab uuesti allapoole liikuma, läbib hoo tõttu jällegi tasakaalu-



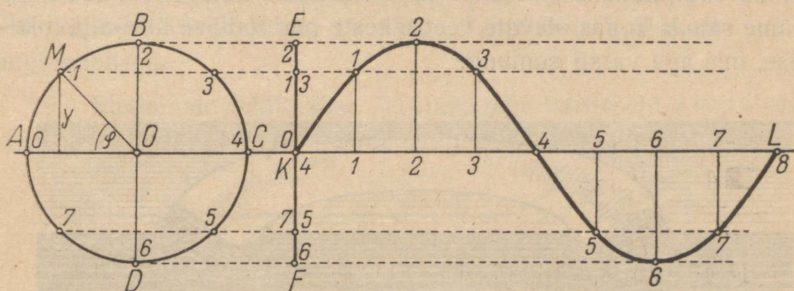
2. joon.
Võnkumine
elastsustungi
mõjul.

asendi, jõuab uuesti B -sse ja hakkab sealt tagasi liikuma. Seda viisi saame elastsustungi mõjul koormise K hoo muundumise kord raskustungi potentsiaalseks energiaks (asend C), kord elastsustungi potentsiaalseks energiaks (asend B). Liikumine ise aga on koormise pendlitaoline võnkliikumine üles-alla amplituudiga AB või AC . See liikumine kestab seni, kuni koormisele liikumise alguses antud energia on ära kulunud õhu- ja teiste takistuste ületamiseks. Me ütleme siis, et takistused **s u m m u t a s i d** koormise K võnkumise.

1. Mõõda eelmises katses võnkeperiood T ja sagedus n !

3. Võnkliikumise hälbe muutuse graafiline kujutamine. Pendlitaolist võnkliikumist võime vaadelda kui ühtlase ringliikumise projektsiooni mõnele ringi tasapinnas olevale sirgele (3. joon.). Alustagu vaadeldav keha ringliikumist diameetri AC otsast A . Projekteerime liikuva keha asendid AC -ga risti olevale diameetrile BD või temaga rööpsele sirgele EF . Siis saame sellel projekt-

siooni pendlitaolise edasi-tagasi liikumise (0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 0). Ringjoonel liikuva keha või tema projektsiooni kaugust diameetrist AC nimetatakse hälbeks ehk elongatsiooniks (y) ja raadiuse OA pöördumisnurka algasendist (OA) kuni antud asendini (OM) faasiks (φ). Hälvet mõõdame pikkusühikuis, faasi nurgamõõduühikuis. Nagu 3. joonisest näha, hälve $y = a \sin \varphi$, kus a on ringi raadius.

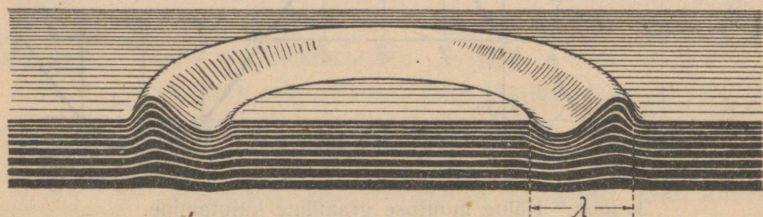


3. joon. Hälbe muutuse graafiline kujutamine.

Kui aga tahame jälgida hälbe muutumist olenedes ajast, näiteks ühe võnkeperioodi jooksul, siis märgime rõhtteljel üksteisele järgnevad ajamomendid (0, 1, 2, 3, ...), antud juhul iga $\frac{1}{8}$ perioodi järel, ja ehitame igale ajamomendile vastava hälbe suuruse. Sedaviisi ehitatud hälvete otsad ühendame ladusa joonega. Saame lainelise joone KL , mis kujutabki hälbe ehk elongatsiooni muutumise käiku ühe võnkeperioodi jooksul. See laineline kõver kannab ka sinusoidi nime, sest hälve on faasi siinuse funktsioon. Hälbe maksimumväärtuse ehk amplituudi saame, kui $\sin \varphi = 1$, siis $y = a \sin \varphi = a \cdot 1 = a$.

4. Lained veepinnal. Ristlaine. Eelmises §-s kirjeldatud võnkliikumisega sarnaneb veeosakeste üles-alla liikumine veepinna lainetamisel. Viskame vaiksesse vette puuklopi — see jääb pinnale ujuma — ja hakkame tekitama laineid. Nüüd võime tähele panna, kuidas puuklopp hakkab lainete mõjul perioodiliselt üles-alla võnkuma. Tähendab, sellises liikumises on veeosakesed, mis puukloppi kannavad. Samalaadseid tähelepanekuid võime teha ka lainetaval veepinnal oleva õngekorgi või lootsiku liikumisi jälgides.

Vaatame lähemalt veelaine tekkimist. Selleks viskame vaikesse vette näiteks kivi. Kivi vette langemisel tekib tema järel vees pinna läheduses nõgu. Ümberringi olevad veosakesed oma raskuse mõjul tungivad tekkinud nõkku, täidavad selle ja, veel enam, saadud hoo arvel kuhjuvad kühmana endise nõo kohale, suurendades nende veosakeste potentsiaalset energiat. Selle arvel langevad veosakesed jälle madalamale, läbivad hooga tasakaaluasendi, milleks on rõhtpind, ja tekitavad uuesti nõo. Sedaviisi saame samas kohas olevate veosakeste perioodilise üles-alla liikumise, mis aga varsti sumhub.



4. joon. Veepinnal leviva laine ristlõik.

Kirjeldatud nähtus ei piirdu ainult vee langemiskohaga, vaid levib sellest ringikujuliselt laiali. Põhjuseks on asjaolu, et veosakeste tasakaalukaotus vaikel veepinnal kivi langemiskohal andub edasi naaberosakestele, mis samuti hakkavad liikuma madalama koha (tekkinud nõo) suunas. Naaberosakeste tasakaalukaotus tekitab tasakaalukaotuse järgmistes osakestes jne. Seetõttu tekitavad veepinnal ringikujulised nõod ja kühmad, lained, mis levivad tekkimiskohast eemale kontsentriiliste ringidena. Et siin laine levimissuund (rõhtsiht) on risti laineosakeste liikumisega üles-alla (pütsiht), siis nimetatakse sellist lainet **ristlaine**ks.

Tuleb eraldada veosakese võnkumist, mis toimub samal kohal, laine levimisest, mis pole muud midagi kui võnkliikumise

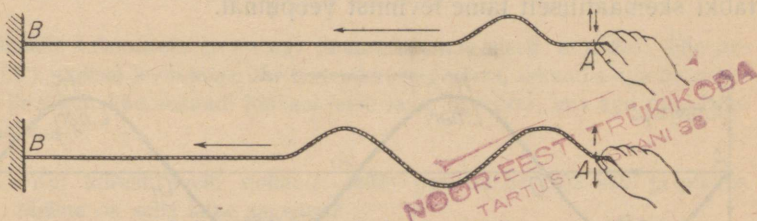


5. joon. Laine kiir ja laine front.

edasiandumine järjest uutele eemalseisvatele veosakestele. Et laine on võnkliikumise edasiandumine, iga liikuv keha aga sjsaldab energiat, siis ka laine liikumine on seotud energia levimisega lainetavas keskkonnas. Laine levimissuunda nimetatakse laine kiiriks. Laine kiir on alati risti laine eespinna ehk laine frondiga (rindega) selles kohas (5. joon.).

Eespool on antud veepinna lainetuse tekkimise lihtsustatud, skemaatiline seletus. Tegelikult on siin esinevad liikumised keerulisemad, sest veosakesed ei võngu lainetamisel üles-alla, vaid ringjooneliselt.

5. Ristlainete tekitamine. Veelainetega sarnaseid rist- ehk transversaallaineid võime hõlpsasti tekitada pikema tugeva

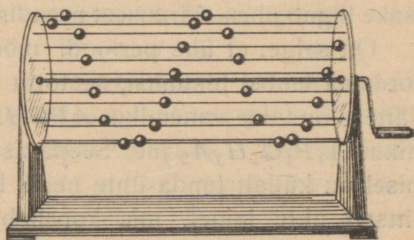


6. joon. Lainete levimine nööri.

nööri (pesunööri) või, mis veel parem, pika, veega täidetud kummitoru või terrasspiraali abil. Kui anname sellisele otsast kinnitatud ja lõdvalt pinguletõmmatud nööri teises otsas käega rea järskede tõukeid, tekivad lained, mis levivad mööda nööri edasi (6. joon.).

Veel sobivam on kasutada ristlainete levimise demonstreerimiseks 7. joon. kujutatud riista.

Tugev varb (telg) on varustatud otstes kahe ühesuguse kettaga, mis on ühendatud rööpsete niitidega. Neile niitidele on asetatud spiraalitaoliselt rida kergeid kuulikesi. Kui sedaviisi saadud silindrilist keha vändast ümber ajada, liigub iga kuulike ringjoont mööda ümber telje. Kui aga projekteerime (eest vaadates) kõik need liikuvad kuulikesed tasapinnale, saame pidevalt liikuva ristlaine mulje.



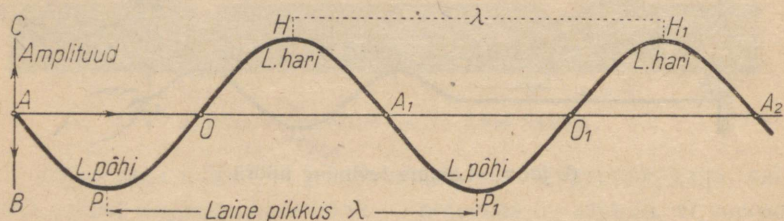
7. joon. Lainetusmasin.

1. Jäljenda käega ristlaine levimist! Kuidas kulgevad sel juhul laine kiir ja laine front?

2. Kuidas kulgevad 6. ja 7. joonisel kujutatud katsetes laine kiir ja laine front?

3. Vaatle lainetusmasinas ainult ühe kuulikese liikumist, kõiki teisi ära varjates! Millise näiva liikumise saame siis?

6. Ristlainet iseloomustavaid suurusi ning seoseid nende vahel. Kujutle, et rõhtsal veepinnal punktist A kui lainetustsentrist levivad ristlained. Läbilõikes kujutab seda skemaatiliselt 8. joon. Veeosake punktis A liigub pendlitaoliselt üles-alla. See liikumine andub edasi naaberosakestele, mis samuti hakkavad liikuma üles-alla. Kui aga lõikame lainetava veepinna läbi lainetustsentri A mineva püsttasapinnaga, siis saame **laine joone**, mis kujutabki skemaatiliselt laine levimist veepinnal.



8. joon. Laine levimise skeem.

Et laine tekib lainetustsentri osakeste pendlitaolisest edasi-tagasi (üles-alla) liikumisest, siis on pendli võnkliikumist iseloomustavad suurused rakendatavad ka lainetuse kohta, nimelt:

Laine amplituudiks nimetatakse lainetava osakese kõige suuremat kaugust tasakaaluasendist (AB või AC).

Laine periood T on ajavahemik, mille jooksul lainetav osake liigub ühest äärmisest asendist (näiteks B) teise (C) ja tagasi.

On selge, et ühe perioodi möödudes hakkab lainetav osake kordama endisi liikumisi, seetõttu hakkab korduma ka laine kuju. Näiteks on laine vahemikus $APOHA_1$ täpselt samasugune kui vahemikus $A_1P_1O_1H_1A_2$ jne. Seepärast lainelise liikumise tundmaõppimisel on küllalt tunda ühte neist korduvaist liikumiselementidest, lihtsalt ühte lainet, mis koosneb laine harjast ja laine põhjast. Kõik teised lained on samasugused. Selleks eraldame lainetest osa, näiteks mõnest laine harjast (H) kuni järgmise laine

harjani (H_1), või mõnest laine põhjast (P) kuni järgmise laine põhjani (P_1), s. o. ühe lainepikkuse (λ).

Üldse nimetatakse laine pikkuseks kahe lähima ja samasuguses liikumisolekus ehk faasis oleva lainetava osakese kaugust teineteisest.

Ühe perioodi T jooksul levib lainetus just ühe lainepikkuse λ võrra. Seetõttu laine ühe sekundi jooksul kulgetud tee ehk laine levimiskiirus

$$v = \frac{\lambda}{T}.$$

Et aga võnkesagedus $n = \frac{1}{T}$, siis saame eelmisest valemist:

$$v = \frac{\lambda}{T} = \frac{1}{T} \cdot \lambda = n\lambda.$$

Samale tulemusele ($v = n\lambda$) jõuame ka järgmiselt mõeldes: ühe perioodi (T) jooksul levib laine ühe lainepikkuse λ võrra, sekundis aga on n perioodi, järelikult ühe sekundi jooksul levib laine $n\lambda$ võrra, mis aga ongi laine levimiskiirus v .

1. Kui kiiresti levib ristlaine, mille periood on 0,02 sek. ja pikkus 40 m? Milline on selle laine sagedus?

2. Ristlaine (valgus) levimiskiirus on 300 000 km/sek. Määra periood ning sagedus, kui $\lambda = 0,75\mu$!

3. Joonesta ristlaine, mille pikkus $\lambda = 6$ cm ja amplituud $a = 1$ cm! Samast punktist alates joonesta sama faasi ja pikkusega ristlained amplituudiga $a_1 = 0,5$ cm ning $a_2 = 1,5$ cm! Võrdle neid laineid omavahel!

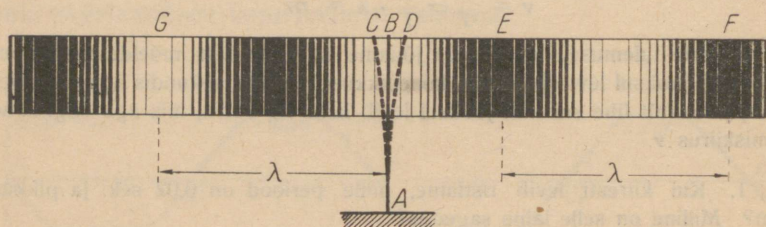
4. Joonesta ristlaine, mille $\lambda = 12$ cm ja $a = 2$ cm!

7. Pikilained. Eespool-käsitletud lainelises liikumises toimub aineosakeste võnkumine risti laine levimissuunaga. Sellest ka nimetus rist- ehk transversaallained. Kuid lainetusel võivad aineosakesed võnkuda ka pikuti laine levimissuunaga. Sel juhul on meil tegemist piki- ehk longitudinaallainega.

Tuletame meelde, kuidas lainetab rukkiväli. Rukkikõrred painduvad tuule käes ühele ja teisele poole kõrvale. Vahel on nende latvad üksteisega koos tihedasti, vahel hõredalt. Need kõrte latvade tihendused ja hõrendused ongi rukkivälja lainetuse elemendid, mis mööda välja edasi liiguvad, moodustades selle lainetuse. Muidugi jäävad kõik rukkikõrred oma kohale, võnkudes vaid latvadega teatud tasakaaluasendi üm-

ber. — Mitte üksnes peenikesed kõrred, vaid ka tugevad puud, vabrikukorstnad, raadiomastid, kirikutornid ja „pilvelõhkujad“ võnguvad tuule käes.

Analoogiliselt rukkikõrte võnkumisega võime tekitada elastse varva (plaadi) võnkumisi, mis omakorda tekitavad ümberolevas õhus tihendusi ja hõrendusi ehk pikilaineid. Olgu meil elastne varb AB kinnitatud punktis A (9. joon.). Kui painutame sellise varva tasakaaluasendist (AB) kõrvale (asend AC) ja laseme lahti, siis hakkab ta pendlitaoliselt võnkuma oma tasakaaluasendi ümber amplituudiga BC ehk BD . Õhutakistuse ja mittetäieliku elastsuse tõttu jääb võnkumisamplituud järjest väiksemaks ning varsti sumhub.



9. joon. Pikilainete tekitamine õhus elastse varva võnkumise abil.

Vaatame nüüd, kuidas mõjub varva AB võnkumine ümberolevasse õhusesse. Viime varva tasakaaluasendist AB vasakule asendisse AC , laseme lahti ning jälgime tekkinud liikumist. Varva asendist AC kiiresti asendi AD poole liikudes tekib varvast paremale poole õhu tihendus ja vasemale hõrendus. See kestab seni, kuni varb jõuab asendisse AD . Nüüd algab tagasiliikumine ja nähtus toimub vastupidiselt: paremal pool tekib hõrendus ja vasemal tihendus. Sedaviisi varva AB võnkudes tekivad õhu perioodilised tihendused ja hõrendused, mis levivad varvast kui lainetus- tsentrist ümberolevasse ruumi. Saame õhu pikilainetuse, nagu see on skemaatiliselt kujutatud 9. joonisel.

Analoogiliselt ristlainetega nimetatakse pikilainete puhul laine pikkuseks λ kahe lähima samasuguses liikumisaasis oleva võnkumise osakese kaugust teineteisest, näiteks mõnest suurimast tihendusest (E) kuni järgmise suurima tihenduseni (F), või mõnest suurimast hõrendusest (G) kuni järgmise suurima hõren-

duseni (B). Samuti kehtivad ka siin ristlainetuse puhul tuletatud valemid:

$$v = \frac{\lambda}{T} = n\lambda,$$

kus T on pikilainetuse võnkeperiood ja n sagedus.

1. Jäljenda käega pikilaine levimist! Kuidas kulgevad sel juhul laine kiir ja laine front?

2. Liiguta käega edasi-tagasi (viibuta) nii kiiresti kui suudad! Määra selle liikumise frekvents ja arvuta vastavad T ning λ , oletades, et käe viibutamistest tekkinud õhulained levivad kiirusega 340 m/sek!

3. Kärkse tiib pirisedes võngub sagedusega ~ 300 Hz. Leia vastavad T ja λ , kui lainetuse levimiskiirus on 340 m/sek!

4. Tihedama ja hõredama viirutuse abil kujuta pikilaineid, mille laine-pikkus λ on 4 cm!

8. Rist- ja pikilainete tekkimise eeldusi. Nagu nägime, tekib võnkliikumine juhul, kui keha osakestel on mõnesugune tasakaaluasend ja sellest neid välja viies tekib tung, mis püüab neid tasakaaluasendisse jälle tagasi tuua. Oluline tähtsus on ka aineosakeste inertsil, sest muidu jääksid tasakaaluasendist väljaviidud osakesed sinna tagasi jõudes kohe seisma. Seda aga ei juhtu, sest inertsil (hoo) tõttu liiguvad nad sellest läbi edasi.

Me tutvusime kahte liiki lainetega: rist- ja pikilained. Missugustes kehaosades on need lained võimalikud? Ristlainete tekkimise eelduseks on asjaolu, et keha mõne osakese tasakaaluasendist väljaviimine sunnib ka tema naaberosakese samas suunas kaasa liikuma. Selline nähtus on võimalik ainult tahketes kehaosades, kus aineosakesed on molekulaartungide varal üksteisega tugevasti seotud. Vedelais ja gaasilistes kehaosades puuduvad tungid, mis takistavad nende kehaosade kuju muutmist, puudub n.ö. elastsus kuju suhtes, seetõttu pole vedelais ja gaasilistes kehaosades ristlained võimalikud.

Et aga vedelad ja gaasilised kehaosad püüavad säilitada oma ruumala, s. o. neil on elastsus ruumala suhtes, siis on neis võimalik tihenduste ja hõrenduste tekkimine, järelikult ka

piki- ehk longitüdinaallained. Muidugi on longitüdinaallained võimalikud ka tahketes keha des, sest nemadki püüavad säilitada oma ruumala. Vedelikes ja gaasides aga on ristlained võimalikud ainult pinnal, nagu me seda nägime vee pinna lainetusest, kus lainetus tekib vee ja õhu kokkupuute pinnal.

9. Hää l kui lainetamisnähtus. Hää lenähtuste hulka kuuluvad need, mida me tajume oma kõ rva abil. Hää le tekkimise põhjuste selgitamiseks teeme järgmise katse (10. joon.).



10. joon. Helihargi võ nkeamplituud järjest väheneb.

amplituud heli nõ rgenedes järjest väheneb. Sellest katsest võ ime järeldada, et heliseva helihargi harud on korrapärase võ nkliikumises. Samuti tõendavad teisedki katsed ja tähelepanekud (keelte võ nkumine, müristamine), et hää le tekkimise põhjuseks on hää leallika kiire edasitagasi liikumine ehk võ nkumine. Hää leallika võ nkumine tekitab õhus tihendusi ja hõrendusi, s. o. pikilaineid. Need levivad ümber hää leallika ning meie kõ rva tungides ärritavad kuulmisnä rvi otsi. Kuulmisnä rvid annavad ärrituse edasi peaaugle ja me kuuleme hää lt.

Tuleb kindlasti silmas pidada, et hää leaisting on subjektiivne, psüühiline nähtus, kuna väljaspool meid toimuv õhu või mõne teise keskkonna võ nkumine on objektiivne, mehhaaniline nähtus. Sõna „hää l“ kasutame aga mõlemate, s. o. nii subjektiivsete kui ka objektiivsete hää lenähtuste puhul.

Füüsika osa, kus hää lenähtusi lähemalt tundma õpitakse, kannab akustika nime.

1. Mispärast hääle ei levi tühjas ruumis? Kirjelda mõned katsed selle tõestamiseks!

2. Hääle sagedusega 440 Hz levib vees kiirusega $1440 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$. Arvuta laine pikkus ja periood!

10. Ajaloolisi märkusi. Vanast ajast pole midagi säilinud lainetusõpetuse, samuti ka üldse hääle kohta. Küll aga tegelesid vanaaja teadusmehed muusikaga, mis oli tähtsaks õppeaineks koolides (Pythagoras, VI saj. e. Kr.). Kuulub ju muusika vanimate ja levinumate kunstide hulka, mis esineb kõigil rahvastel. Platon (IV saj. e. Kr.) oma töödes annab koguni toonide tabeli ja mainib, et kiire võnkumine tekitab kõrge, aeglane madala tooni. Need võnkumised anduvad edasi õhu kaudu kõrvale ja sealt edasi peaaugle.

Esimesena uuris veelaineid katseliselt Newton (1643—1727). Pärast teda on terve rida kuulsaid teadusmehi (D. Bernoulli, Euler, Laplace, Weber, Faraday, Helmholtz jt.) selle küsimusega tegelnud. Kuid praegugi pole suudetud kõiki veelainetuse puhul esinevaid nähtusi nende keerulisuse tõttu rahuldavalt seletada.

II. Hääle levimine.

11. Hääle kiirus. Et hääle tarvitab levimiseks aega, seda teame igapäevaseist tähelepanekuist (kauge puurauja vaatlemine, välg ja müristamine). Lainete levimiskiirust, järelikult ka hääle kiirust on hõlpus arvutada laine pikkusest (λ) ja sagedusest (n), sest $v = n\lambda$ (vt. § 6). Otseselt aga võime hääle kiirust arvutada kiiruse valemi põhjal: $v = \frac{s}{t}$, kus s on hääle levimisel käidud tee pikkus ja t vastav aeg. Et valgus levib peaaegu hetkeliselt, siis märkab vaatleja häälesignaali t sek. võrra hiljem sellega samaaegselt toimunud valgussignaalist. Mõõtes ära veel kauguse s , võime arvutada hääle kiiruse v .

Rohkearvulistest mõõtmistest (eelmise maailmasõja aegu toimetati tuhandeid selliseid mõõtmisi) on leitud, et

$$\text{hääle kiirus õhus (0° C)} = 331 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$$

Hääle kiirus õhus oleneb õhu temperatuurist ja suureneb temperatuuri tõustes. Üldse hääle kiirus õhus t° C juures, s. o.

$$v_t = 331\sqrt{1 + 0,004 t}$$

Hääle kiirus tahkeis ja vedelais kehades on üldiselt suurem kui gaasides. Näitena toome siin hääle kiiruse mõnedes ainetes.

Süsihappegaas (0° C)	258 $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$	Klaas	5190—5950 $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$
Vesinik (0° C)	1261 „	Kork	430— 530 „
Petrooleum (7° C)	1395 „	Raud	5000 „
Vesi (15° C)	1440 „	Seatina	1320 „
Alumiinium	5105 „	Tammepuu	3380—4310 „
Kirjutuspaber	2100 „	Vask	3900 „

1. Raudteerongi mürin on kuulda juba ammu enne, kui rong lähedale jõuab, eriti aga siis, kui hoida kõrv rööbaste lähedal. Millest see tuleb?

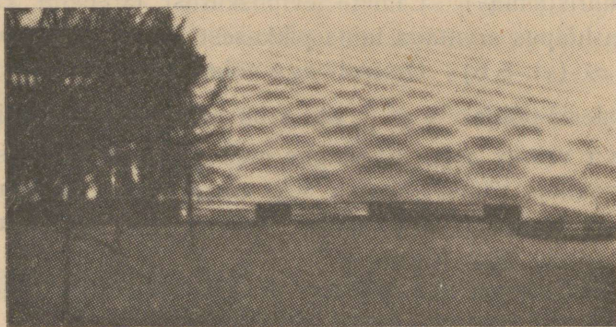
2. Müristamine algas 10 sek. pärast välguöömist. Kui kaugel sähvatas välg?

3. Millise sagedusega häälelaine pikkus on 1 m? Kuidas oleneb sagedus laine pikkusest, kui kiirus on konstantne?

4. Mitme $\frac{\text{m}}{\text{sek}}$ võrra suureneb hääle kiirus, kui õhu temperatuur tõuseb 50-st kuni 250-ni?

5. Määra sagedusele 440 Hz vastavad häälelaine pikkused õhus, korgis, vees ja rauas ning võrdle neid isekeskis!

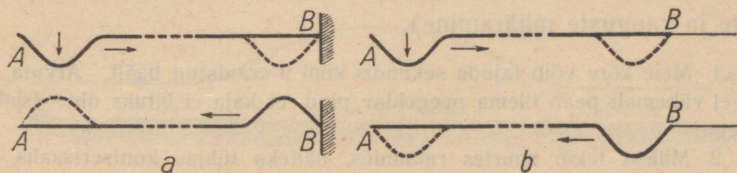
12. Lainete peegeldumine. Veepinnal levivate ristlainete puhul võime kergesti tähele panna, et vastu mõnd tõket (lauda,



11. joon. Veelainete peegeldumine kaldalt.

kallast) jõudes lained ei kao, vaid pörkavad sellest tagasi, peegelduvad (11. joon.). Sama nähtust võime tähele panna ka nõöri abil tekitatud lainetel. Kinnitame nõöri ühe otsa (B) seinale külge, teises otsas (A) aga anname talle ainult ühe järsu

tõuke (12. joon.). Sellest tekkinud nõgu (poollaine) liigub mööda nõõri teise otsa (*B*), muudab seal oma liikumisfaasi vastupidiseks (sümmeetriliselt alt üles) ja tuleb siis otsa *A* tagasi. Me ütleme sel juhul: laine peegeldub nõõri **kinnisest** otsast (tihedamast keskkonnast) vastupidise faasiga.



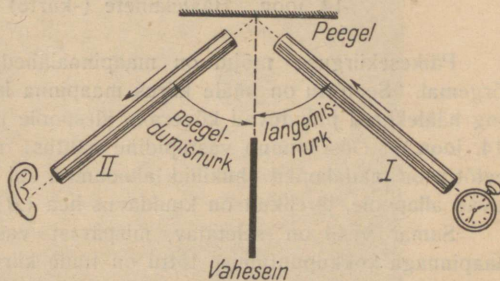
12. joon. Lainete peegeldumine nõõri kinnisest (*a*) ja lahtisest (*b*) otsast.

Kinnitame nüüd nõõri *AB* seinä külge mitte otseselt, vaid teise, umbes meetripikkuse peenikese nõõri abil (12. joon.). Sel juhul eelmist katset korrates näeme, et laine peegeldub nõõri **lahtisest** otsast (hõredamast keskkonnast) sama faasiga.

Üldse peame meeles, et elastses keskkonnas leviv laine, jõudes keskkonna piirini, muudab oma levimissuunda ehk peegeldub sellest. Seejuures muutub laine faas vastupidiseks, kui peegeldumine toimub tihedamast keskkonnast (kinnisest otsast); faas ei muutu, kui peegeldumine toimub hõredamast keskkonnast (lahtisest otsast).

13. Häälpeegeldumine. Häälpeegeldumise nähtus on üldiselt tuntud kaja näol. Siin võivad olla peegliks suured pinnad, nagu metsaserv, mäekülg, majasein jne. Katseliselt võime häälpeegeldumist demonstreerida järgmisel viisil (13. joon.).

Kaks toru (*I* ja *II*) on eraldatud suurema vaheseinaga (papi- või vineeri-



13. joon. Häälpeegeldumine.

tükk). Peegliks on mõni tasane lauatiük või raamat. Taskukella tiksumist *I* toru otsa juures on *II* toru otsas selgesti kuulda, kui torud moodustavad peeglile tõmmatud ristjoonega võrdsed nurgad, s. o. langemisnurk võrdub peegeldumisnurgaga.

Hääle peegeldumist kasutatakse nn. kajaloodi ehitamisel, mis leiab laialdast rakendamist nii mere- kui ka õhusõidul (sügavuste ja kauguste määramine).

1. Meie kõrv võib tajuda sekundis kuni 9 eraldatud häält. Arvuta, kui kaugel vähemalt peab olema peegeldav pind, et kaja ei liituks ühte esialgse häälega!

2. Millest tekib suurtes ruumides, näiteks tühjas kontsertsaalis, nn. järelkõla?

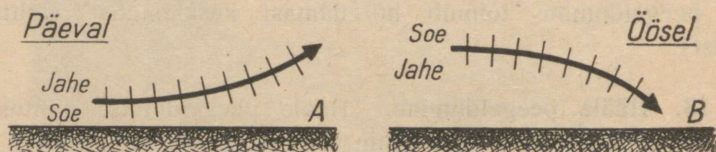
Mispärast me ei kuule omaendi kõne kaja toas?

3. Rahvaga täidetud saalis on kõne paremini kuulda kui tühjas ruumis. Mispärast?

4. Hääl jõudis merepõhjust laeva kajaloodi tagasi 6 sek. pärast. Kui sügav oli meri selles kohas?

5. Lennuki kajaloodi jõudis hääl maapinnast tagasi 30 sek. pärast. Kui kõrgel oli lennuk?

14. Hääle murdumine. Ühtlases keskkonnas levib hääl sirgjooneliselt. Kui aga keskkond pole ühtlane, näiteks kui õhus esinevad tunduvad temperatuurivahed, siis muudab hääl oma levimissuunda ehk murdub samuti, kui see toimub valguse puhul. Hääle levimissuuna muutumist ehk murdumist õhus tekitab eeskätt temperatuuri ja tuule mõju.



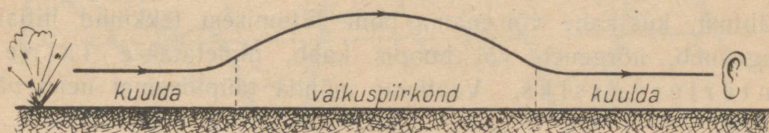
14. joon. Häälelainete (-kiirte) murdumine.

Päikesekiirguse mõjul on maapinnalähedane õhk sageli soojem kui kõrgemal. Seetõttu on hääle kiirus maapinna lähedal suurem kui kõrgemal ning häälekiired painduvad kõveraks ülespoole ja lähevad kuulajast (*A*) üle (14. joon.). Öösi toimub vastupidine nähtus: maapind jahtub kiiresti ning seetõttu on madalamad õhukihid jahedamad kui kõrgemad, häälelained painduvad allapoole, järelikult on kuuldavus hea (*B*).

Samal viisil on seletatav, mispärast vastutuult on kuuldavus halb. Maapinnaga kokkupuutumise tõttu on tuule kiirus maapinna ligidal väiksem kui kõrgemal. Seetõttu on ka hääle kiirus maapinnast kõrgemale tõustes väiksem kui maapinna ligidal, ning häälekiired painduvad kõveraks

ülespoole. Selle tulemusena läheb hääl meist üle ja me ei kuule teda. Päriltuult aga pöörduvad häälekiired allapoole ning seetõttu on kuuldavus hea.

Hääle murdumisega on seletatav ka nn. vaikusvöötmete (-piirkondade) tekkimine, kus mõnest tugevast hääleallikast levivad häält, näiteks kahurimürinat, pole sugugi kuulda, kuna tublisti kaugel-

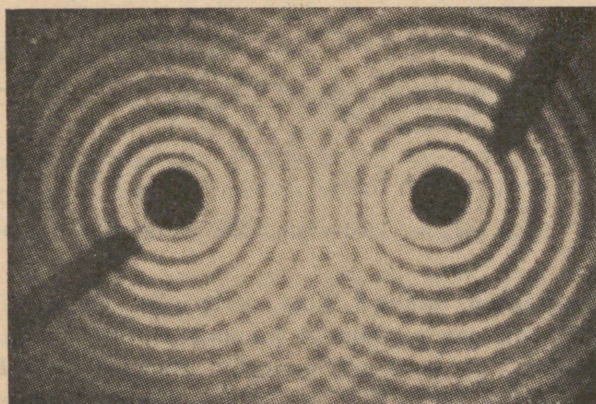


15. joon. Vaikuspiirkondade tekkimine hääle paindumise tõttu.

mal on sama hääl jälle hästi kuulda (15. joon.). Näiteks ühe suure plahvatuse puhul Moskvast (1920. a.) oli selle hääl kuulda ümberringi umbes 50 km ulatuses, sellele järgnes umbes 100 km laiune vaikusvööde, millest eemale hääl jällegi kuulda oli veel ligi 100 km laiuses vöötmes.

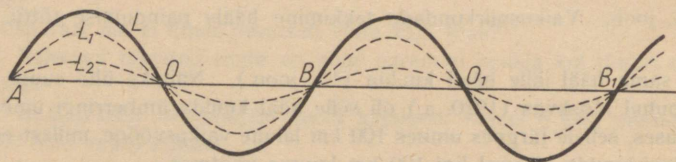
1. Päeval on üle vee (järve) sageli hoopis paremini kuulda kui samalt kauguselt üle maa. Kuidas seda seletada?

15. Lainete interferents. Mehhaanikast teame, et näiteks kaldu horisondiga visatud kivi võib korruga edasi liikuda ja ühtlasi allapoole langeda. Üks liikumine ei sega teist. Mõlema sirgjoonelise liikumise summana (resultandina) saame kivi kõverjoonelise liikumise mööda parabooli.



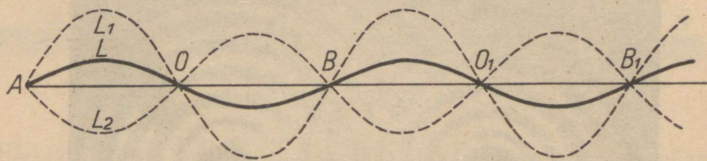
16. joon. Veelainete ristlemine.

See liikumiste olenematus printsiip kehtib ka lainetuse puhul. Üks laineline liikumine ei sega teist, vaid nad võivad vabalt teineteisest läbi tungida, ilma et nad oma liikumisest midagi kaotaksid (16. joon.). Vaatleja aga, kes mõlemaid laineid korraga näeb, paneb tähele nende liitumisest tekkinud liitlaine, mis võib olla hoopis erinev liitunuist. Seejuures tekkinud nähtust, kus kahe või enama laine liitumisest tekkinud liitlaine tugevneb, nõrgeneb või hoopis kaob, nimetatakse lainete interferentsiks. Vaatleme mõnda tüüpilisemat neist nähtusist.



17. joon. Sama pikkuse ja faasiga lainete liitumine.

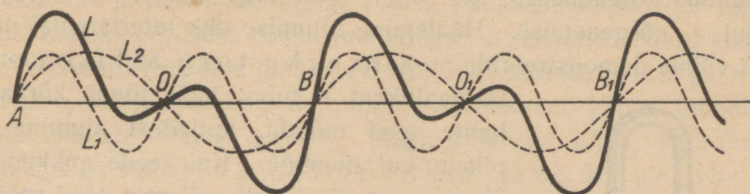
17. joonisel on kujutatud kaks sama pikkusega (AB) lainet L_1 ja L_2 . Alguspunkt A on mõlema laine suhtes samas liikumisolekus ehk faasis: ta alustab liikumist tasakaaluasendist ülespoole. Lainete L_1 ja L_2 liitumisest saadud liitlaine L on sama pikkusega (AB), kuid tema hälbed ja amplituud võrduvad liitunud lainete hälvete ja amplituudide summaga.



18. joon. Sama pikkuse, kuid vastupidise faasiga lainete liitumine.

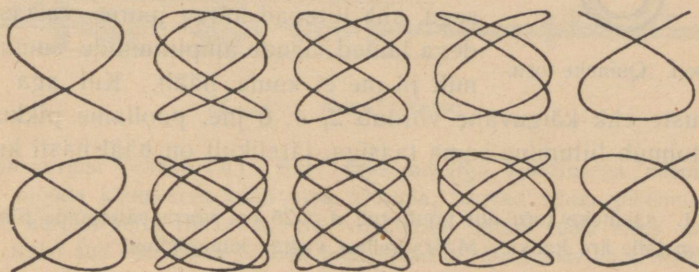
18. joonisel on liitunud sama pikkusega, kuid vastupidiste faasidega (L_1 alustab punktist A liikumist ülespoole, L_2 — allapoole) lained L_1 ja L_2 . Nende summana esineb liitlaine L . Juhul, kui liitunud lainete L_1 ja L_2 amplituudid oleksid võrdsed, saaksime summana sirge, s. o. laine kaoks hoopis ära.

19. joonisel on laine L_2 kaks korda suurema pikkusega kui L_1 ($AB = 2AO$). Punktis A on mõlemad lained samas faasis. Liitumisest tekkinud laine L omab siin keerulisemat kuju kui liitunud lained.



19. joon. Erineva pikkusega lainete liitumine.

Üldse võib liitumisel tekkinud laine omada väga keerulist kuju. Eriti keerulised lainekujud tekivad juhul, kui lainet tekitavate aineosakeste võnkumissuunad ei ühti, vaid moodustavad teineteisega nurga, näiteks 90° . 20. joon. on antud rida selliseid liitvõnkeid, mis on tuntud Lissajous' (loe: lissažuu) kujundite nime all.



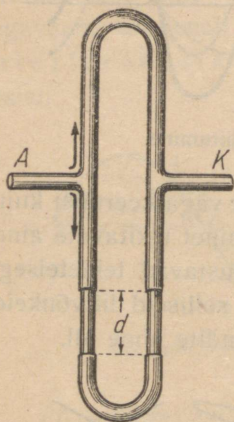
20. joon. Lissajous' kujundid.

Neid võnkuva osakese keerulisi liikumisteid (trajektoore) ei tule ära segada laine kui elastse keskkonna deformatsiooni levimiskujuga.

1. Liida kolm samast punktist kulgevat ning sama faasiga algavat lainet L_1 , L_2 ja L_3 , millede lainepikkused ning amplituudid on vastavalt $\lambda_1 = 4$ cm ja $a_1 = 0,5$ cm; $\lambda_2 = 8$ cm ja $a_2 = 1$ cm; $\lambda_3 = 6$ cm ja $a_3 = 2$ cm!

2. Liida eelmises ülesandes antud lained juhul, kui L_2 algab, võrreldes L_1 ja L_3 -ga, vastupidise faasiga!

16. Hääle interferents. Häälelained samuti kui veelainedki võivad liitudes tugevneda, nõrgeneda või hoopis kustuda. Tulemus oleneb liituvate lainete pikkusest, amplituudist ja faasist. Kui näiteks liitub ühe häälelaine tihendus teise häälelaine tihendusega või hõrendus hõrendusega, siis saame laine tugevnemise, vastupidisel juhul — nõrgenemise. Häälelaine liitumise ehk interferentsi nähtusi võime demonstreerida nn. *Quincke toru* abil (21. joon.).



21. joon. Quincke toru.

Hääleallikast *A* tulev hääle jõuab kõrva *K* kahte teed mööda, milledest alumine on pikem kui ülemine. Kui teede pikkus on ühesugune, siis jõuab mõlemat teed mööda tulev hääle kõrva sama faasiga ja me kuuleme häält selgesti. Kui aga alumist teed näiteks poole lainepikkuse võrra pikendada, toru vastavalt välja tõmmates, jõuavad lained kuulaja kõrva vastupidiste faasidega, s. o. liitudes nad kustuvad ja me ei kuule häält. Üldse, kui teede pikkuste ehk nn. käiguvahe võrdub 1, 3, 5 jne. poollaine pikkusega, siis liituvad kõrva juures vastasfaasidega lained, nende amplituudide summa on null ja me ei kuule häält. Kui aga teede pikkuste ehk käiguvahe võrdub 2, 4, 6 jne. poollaine pikkusega, siis toimub liitumine sama faasiga, järelikult on hääle hästi kuulda.

1. Quincke toru üht poolt tuli $d = 25$ cm võrra väljapoole tõmmata, et toon jälle ära kaoks. Määra sellest vastav lainepikkus!

17. Seisvad lained. 22. joonisel kujutatud viisil tekitame nõõri abil mitte ühe laine, vaid terve rea üksteisele järgnevaid. Nad peegelduvad nõõri kinnisest otsast (*C*), liituvad (interfereeruvad) otsast *A* tulevate uute samasuguste lainetega ning, kui

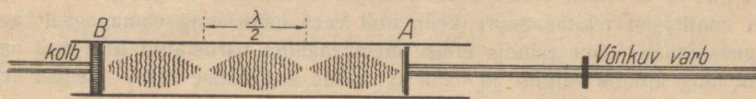


22. joon. Seisvad lained nõõril.

poollaine pikkus mahub nõõri pikkusesse täisarv kordi, moodustavad nn. seisvad lained (22. joon.). Nagu sõna ise näitab, püsib siin meie silmale nähtav laine kuju samal kohal paigal, kuna edasiliikuva ehk kulgeva laine puhul laine kuju võnkumas keskkonnas järjest edasi liigub. Meie näites on kogu nõõr jagunenud kuueks võrdseks osaks, mis võnguvad omaette. Nõõri kohti, mis võnkumisel paigale jäävad (*O, B*), nimetatakse sõlmpunktideks, kõige suurema amplituudiga võnkuvad kohad moodustavad seisvate lainete paisu. Nagu joonisest näha, võrdub kahe kõrvooleva sõlmpunkti vahe laine poole pikkusega.

1. Esimese ja neljanda sõlmpunkti vahe on 12 cm. Kui pikk on siis laine?

18. Kundt'i katse. Hääl seisvaid laineid õhus on hõlpus tekitada Kundt'i katse abil. Pikemasse klaastorru (23. joon.) käib ühest otsast (*B*) kolb, teisest otsast keskelt tugevasti kinnitatud klaas- või metallvarb, mille



23. joon. Kundt'i katse.

otsas on korgist kettake (*A*). Kui niiske korgiga (piiritusega niisutatud lapiga) mööda klaasvarva vaba otsa hõõruda, tekivad temas pikilained ja panevad korgist ketta võnkuma. See võnkumine andub edasi torus olevale õhule. Kolvi abil õhusamba pikkust torus muutes võime saavutada olukorra, kus õhk torus hakkab tugevasti võnkuma ja tekivad seisvad lained. Nende nähtavaks tegemiseks on torru asetatud peenikest korgipuru, mis paisukohtades võnkuma õhu mõjul võrdlemisi tugevasti liikuma hakkab ja seetõttu säbruliseks muutub, kuna sõlme kohtades korgipuru paigale jääb. Nagu nõõrilainetegi puhul, võrdub kahe teineteisele järgneva sõlme vahe laine poole pikkusega. Seega annab Kundt'i katse võimaluse otseselt mõõta häälalaine pikkust ning sellest arvutada kiirust, kui on teada sagedus.

1. Kahe teineteisele järgneva sõlme vahe Kundt'i katses võrdub 6,8 cm. Leia laine pikkus!

19. Ajaloolisi märkusi. Et hääl tarvitab levimiseks aega, oli juba vanast ajast üldtuntud tõsiasi. Aristotelese (384—322 e. Kr.) arvates aga levivad madalad toonid aeglasemalt kui kõrged toonid.

P. Gassendi (1592—1655) ühena esimestest mõõtis hääle kiirust ja näitas, et nii püssi- kui ka kahuripauk (kõrge ja madal hääl) levivad õhus sama kiirusega.

Esimese suurelatuslikuma ning täpsema hääle kiiruse mõõtmise korraldas Prantsuse Akadeemia 1738. a. Pariisi lähedal. Kaks vaatluspunkti asetsevad 17 kuni 18 miili kaugusel teineteisest. Kui esimeses vaatluspunktis välgatas kahuripauk, siis koos valgusega hakkas levima ka häälelaine. Viimase hilinemine võrreldes valgusega annabki hääle levimise aja mõlema vaatluspunkti vahel. Kontrolliks ja tuule mõju kõrvaldamiseks korraldati katsed ka vastassuunas: lasti kahuripauk II vaatluspunktist ja registreeriti I punktis hääle hilinemine võrreldes valgusega. Mitmekordsest „vastastikkult tulistamisest“ saadi keskmise tulemusena hääle kiiruse väärtuseks 80°C juures $337 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$.

Sama meetodi järgi on määratud hääle kiirust ka mitmel korral hiljem, eriti rohkel arvul eelmise maailmasõja ajal Saksa ja Prantsuse eriliste komisjonide poolt.

Pikemat aega püüti arvamisel, et hääle levimine vedelikes on võimatu, sest vedelikud pole kokkusurutavad ning seetõttu häälelained neis ei levi. Esimestena määrasid hääle kiiruse vees kaks Genfi teadlast — Colladon ja Sturm a. 1826. Nad asusid Genfi järvel 13,5 km kaugusele teineteisest. Üks vaatlejaist tekitas suure kella abil vees häält ning samaaegselt andis valgussignaale, teine püüdis erilise membraaniga varustatud toru abil hääle kinni ning mõõtis valgus- ja häälesignaalide saabumise vahe. Sellest arvutati hääle kiirus vees, mis oli 80°C juures $1435 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$.

Tuule mõju hääle levimisele (hääle murdumine) seletas ära inglise füüsik John Tyndall (1820—1893).

III. Hääle omadusi.

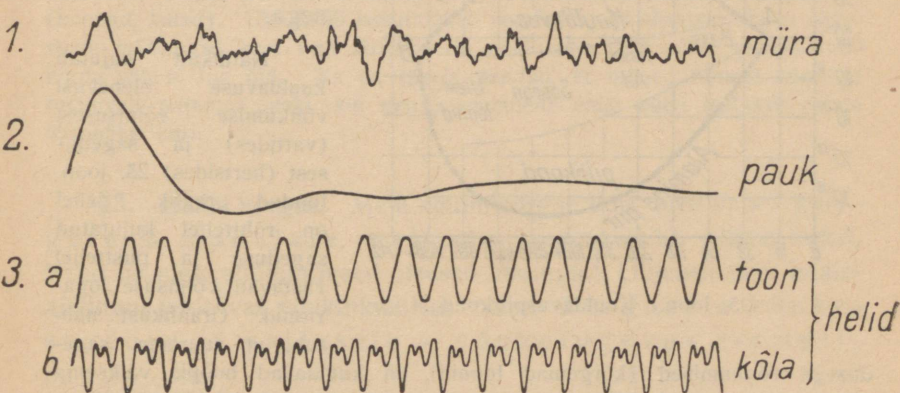
20. Häälte liigitus. Oma kuulmiselundi — kõrvaga — tajume väga mitmesuguseid hääli. Kõik hääled võime jagada kolme rühma:

1) **Mürad.** Siia kuuluvad mitmesugused ebakorrapäraseid hääled, nagu kohin, mühin, vihin, vuhin, vulin, sahin, krõbin, kõlin jne., mis on õieti suure hulga mitmesuguste häälte segu.

2) **Paugud** — väga lühikest aega kestvad tugevad hääled (hääletõuked).

3) Helid — korrapäraseid, pikemat aega vältavad hääled, mida me tarvitame muusikas. Seepärast nimetamegi muusikat teisiti helikunstiks.

Nagu hiljem näeme, jagunevad helid veel omakorda toonideks ja kõladeks. Toon on puhas heli, ilma teiste toonide seguta, kuna kõlas kuuleme ühte põhitooni koos hulga teiste nn. ülemtoonidega (vt. § 31).



24. joon. Häälte liigitusele vastavate võnkliikumiste tüübid.

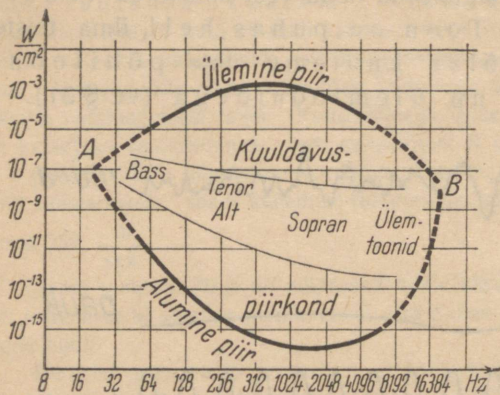
See häälte liigitus on tehtud meie kuulmisaistingute põhjal. Füüsikalisest seisukohast vastab igale häälte rühmale ka eriline võnkliikumise laad, nagu seda võime tähele panna 24. joon. Vaatle seda! Edaspidi tegeleme peamiselt helidega.

21. Kuuldavuspiirkond. Nagu teame, tekitab hääleaistingut meid ümbritseva ainelise keskkonna (õhu) võnkliikumine. Kuid mitte igasugune võnkliikumine pole suuteline tekitama hääleaistingut. Et meie kõrv oleks suuteline tajuma võnkliikumist häälena, selleks peab see võnkliikumine olema teatud tugevusega (amplituudiga), s. o. sisaldama nii palju energiat, et ta suudaks veel meie kuuldemehhanismi — kõrva — tegevusse panna.

Kõige nõrgem kõrvaga tajutav võnkumine moodustab nn. alumise ärrituskünnise (10^{-16} vatti 1 cm^2 kohta). Võnkumine, mis ületab ülemise ärrituskünnise (10^{-3} vatti 1 cm^2 kohta), tekitab kõrvas valu.

Teiselt poolt on kuuldavuseks vajalik ka teatud võnkesagedus. Siin loetakse alumiseks piiriks 16, ülemiseks piiriks ~ 20 000 hertsi ehk 20 kHz. Muusikas kasutatakse võnkumisi 30 ja 5000 hertsi vahel.

Üldse on kuuldavuspiirkonna ulatus väga individuaalne ja väheneb tunduvalt vanusega.

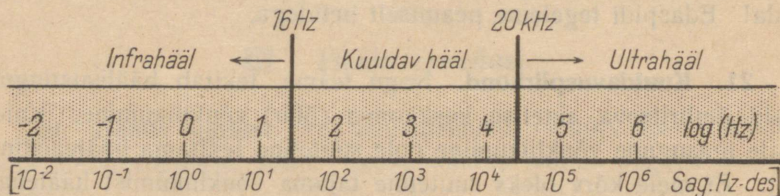


25. joon. Kuuldavuspiirkond.

dusega võnkumised (kõrgemad toonid) on kuuldavad hoopis väiksema võimsuse juures kui väiksema sagedusega võnkumised (madalad toonid).

Näitlikult kujutab kuuldavuse olemeyust võnkumise võimsusest (vattides) ja sagedusest (hertsides) 25. joon. toodud graafik. Sellel on rõhtteljel kujutatud sageduse ja püstteljel vastavad võimsuse logaritmid. Graafikust nähtub, et suurema sagedusega

22. Ultra- ja infrahäääl. Kõrv võib tajuda häälena võnkumisi 16 kuni 20 000 hertsi piirides. Kuid ka väljaspool neid piire, s. o. alla 16 ja üle 20 000 hertsi, võib tekitada võnkumisi. Need võnkumised aga pole meie kõrvaga tajutavad, kuigi nad oma iseloomult on täiesti ühesugused kõrvaga



26. joon. Kuuldavad ja mittekuuldavad hääled.

tajutavate võnkumistega. Selliseid väljaspool kuuldavuspiirkonda olevaid võnkumisi nimetatakse mittekuuldavaks hääleks. Kui mittekuuldava hääle sagedus on alla 16 hertsi, siis nimetame seda häält infrahääleks (värisemine, vabisemine), kui aga sagedus on üle 20 000 hertsi ehk 20 kHz — ultrahääleks.

Infrahäälelises võnkumises on näiteks maapind ja hooned tuule, maavärisemise, külma või merelainetuse mõjul. Siin esinevad võnkesagedused on $\frac{1}{200}$ ja 1 Hz piirides.

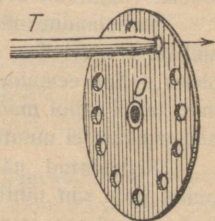
Ultrahääli tekitatakse kunstlikult eriliste elektrivõnkumiste abil alates 20 kHz-st kuni mitme miljoni Hz-ni. Ultrahääle võnkumised on mitmesuguse erilise füüsilise, keemilise ja bioloogilise toimega, näiteks: ultrahääle mõjul pihustuvad mõned ained vees ja annavad temaga emulsiooni (parafiin, elavhõbe jt.); ultrahäääl soodustab õhu eraldumist vedelikust, samuti kristalliseerumist; mõjub tapvalt ainuraksetele ja teistele väiksematele loomadele (konnad, kalad). Ultrahääli kasutatakse veelaluses signalisatsioonil ja sügavuste mõõtmisel, sest vesi absorbeerib neid suhteliselt vähe, umbes 1000 korda vähem kui õhk. Ka on tähele pandud, et mõned taimed annavad tunduvalt paremat saaki, kui nende seemneile enne külvi lastakse paista ultrahääle kiiri.

23. Hääle kõrgus. Meie kuulmisorgan kõrv teeb vahet kõrgete ja madalate, valjude ja tasaste häälte vahel. Need on meie subjektiivsed otsesed aistingud. Objektiivselt, hääle- aistingut tekitavas võnkliikumises vastab kõrgusele võnkesagedus ja valjusele — võnketugevus (-amplituud).

Et hääle kõrgus tõepoolest on võnkesagedusest, seda on lihtne näidata ketassireeni abil (27. joon.). Õhukesse kerasse, mida võib tsentri *O* läbiva telje ümber kiiresti pöörlema panna, on tehtud rida kontsentrilisi mulgukesi. Paneme ketta kiiresti pöörlema ja puhume läbi toru *T* mulgude reale õhku. Kui õhuvool satub mulgu kohale, tungib ta sellest läbi ja annab õhule teisel pool ketast tõuke.

Mulgude vahel katkeb õhuvool. Järgmisest mulgust saab õhk uue tõuke jne. Mida rohkem on mulke ja mida kiiremini kettas pöörleb, seda enam tõukeid saab õhk, seda suurem on tema võnkesagedus ning ühes sellega ka tekkinud hääle kõrgus. Kaks korda suurema sagedusega hääle moodustab esialgse häälega nn. oktaavi.

Kui reas on näiteks 40 mulku ja kettas teeb 10 tiiru sekundis, siis on võnkesagedus $10 \cdot 40$, s. o. 400 herti.

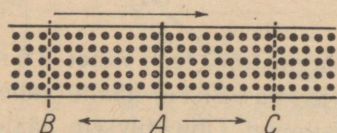


27. joon. Ketassireen.

Tahame mõne hääle võnkesagedust mõõta, siis tekitame sireeni- niga niisama kõrge hääle ja arvutame sireeni andmeist vastava sageduse.

1. Millest teame, et kõrged ja madalad toonid levivad sama kiirusega?
2. Sireeni kettas on 32 mulku ja ta teeb 25 tiiru sekundis. Arvuta tekkinud võnkumise sagedus!
3. Arvuta madalaima ja kõrgeima kuuldava hääle lainepikkus ning -periood!

24. Doppleri efekt. Kujutleme, et tänaval liigub kogu aeg samas suunas ühtlase tihedusega rahvavool (minnakse näiteks spordipidustustele). Seisame tänava ääres (28. joon., asend **A**) ja loendame, mitu inimest möödub



28. joon. Möödujate loendamine paigal seistes ja liikudes.

meist ühes minutis. Olgu see arv näiteks 300. Kui aga samasugust loendamist toimetame ise voolule vastu liikudes, saame suurema, päri voolu liikudes — väiksema arvu. Tõepoolest. Esimesel juhul tuleb 300-le lisaks veel see osa voolust (**AB**), mille võrra me ise voolule vastu kõnnime, teisel juhul jääb loendamata see osa voolust (**AC**),

mille võrra me ise päri voolu edasi läksime. — Analoogiliselt eelmisega lõikab lootsik vastutuult sõudes rohkem laineid kui pärituult sõudes.

Samalaadne nähtus esineb ka hääle puhul. Kui kuulaja läheneb hääleallikale (vedurivile), satub kuulaja kõrva sekundis rohkem võnkeid kui paigaloleku puhul, eemaldumisel vastavalt vähem. Esimesel juhul kuuleme kõrge- mat, teisel juhul madalamat häält, võrreldes olukorraga, kus kuulaja kaugus hääleallikast ei muutu.

Kirjeldatud nähtus kannab **Doppleri efekti** nime. Väikeste kiiruste puhul pole siin tähtis, kumb liigub — kas hääleallikas või kuulaja. Olu- line on vaid see, et nende vastastikune kaugus muutub. Doppleri efekt esineb ka valgusnähtustel (vt. § 130), kus ta leiab väärtuslikku rakendamist astro- füüsikas.

1. Meist kiiresti lähedalt mööduva lennuki hääl kuulub eemaldumisel madalamana kui lähenemisel. Mispärast?

2. Tulikahjukell saab iga 0,5 sek. pärast ühe löögi. Mitu lööki kuuleme 1 min. 40 sek. jooksul, kui läheneda sellele kellale kiirusega $17 \frac{\text{m}}{\text{sek}}$?

3. Mida kuuleme siis, kui eemaldume hääleallikast hääle kiirusega?

25. Hääle valjus oleneb häält tekitava võnkliikumise inten- siivsusest ehk tugevusest, mis oleneb võnkeamplituudi suurusest. Seda võime näha katsest helihargiga (10. joon.), kus

hääle nõrgenedes ühtlasi väheneb ka võnkeamplituud. Tuleb meeles pidada, et hääle valjus, samuti kui kõrguski, on puhtsubjektiivne hääle omadus, mis esineb ainult meie kuulmiselundis. Hääle tugevus aga iseloomustab võnkumisprotsessi olenematult sellest, kas keegi oma kuulmiselundiga seda tajub või mitte.

Hääle tugevust mõõdab ühes sekundis 1 cm² läbiva võnkumisenergia hulk, s. o. 1 cm² kohta tulev hääleenergia võimsus $\frac{W}{\text{cm}^2}$ -tes. See energia tekitab meie kuulmiselundi ärrituse, millele vastab teatud kuulmisaisting.

Psühholoogiast tuntud Weber-Fechneri seaduse järgi kasvab hääle valjus märksa aeglasemalt kui vastav ärritus (hääle tugevus), nimelt: kui hääle tugevus kasvab geomeetrilises progressioonis, siis kasvab vastav hääle valjus aritmeetilises progressioonis. Seega näiteks 10-kordsele hääle tugevuse suurenemisele vastab valjuse suurenemine ainult 10 valjusühiku võrra.

Kogemused näitavad, et kaugusega hääle valjus, järelikult ka hääle tugevus väheneb. Kui häälekiired levivad hääleallikast igas suunas ühtlaselt, siis toimub hääle tugevuse kahane mine pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga. Arvestades aga Weber-Fechneri seadust ei toimu hääle valjuse nõrgenemine võrdeliselt hääle tugevuse nõrgenemisega. Näiteks kuulaja kauguse 10 korda suurenedes kahaneb hääle tugevus 10² ehk 100 korda, kuna vastav hääle valjus väheneb ainult 20 valjusühiku (fooni) võrra.

Hääle valjust muusikas hinnatakse harilikult kuueastmelise skaala järgi: ff, f, mf, mp, p, pp. Tehnikas on valjuse mõõduühikutena tarvitusel foonid, kusjuures 1 foon vastab enam-vähem kõige väiksemale kõrvaga eraldatavale hääle valjuse muutusele. Kogu valjuse skaala ulatub 0-st kuni 130 foonini.

Hääle tugevust mõõdetakse detsibellides, kusjuures hääle tugevusele 0 db 1937. a. Pariisis toimunud rahvusvahelise kokkuleppe kohaselt vastab hääleenergia võimsus $10^{-16} \frac{W}{\text{cm}^2}$. See hääle võimsus on tugevuse alumiseks künniseks ja temale vastav valjus loetakse kuuldavuse alumiseks künniseks. Kõige suurem hääle tugevus, mida meie kõrv veel häälena suudab tajuda, on 10¹³ korda suurem hääle tugevuse alumisest künnisest, s. o. $10^{13} \cdot 10^{-16} \frac{W}{\text{cm}^2}$ ehk $10^{-3} \frac{W}{\text{cm}^2}$.

Kui hääle veel tugevamaks teha, tekib kõrvas valutunne, me ei suuda enam hääle tajuda. Et Weber-Fechneri seaduse järgi hääle valjus

võrdub hääle tugevuse logaritmiga, siis hääle tugevuse alumisele künnisele ($10^{-16} \frac{W}{cm^2} = 1$ tugevusühik) vastab valjus 0 ($\log 1 = 0$) ja tugevuse ülemisele künnisele (10^{13}) vastab valjus 13 ($\log 10^{13} = 13$). Seega saame hääle valjuse skaala 0—13-ni ja samuti temale vastava tugevusskaala 0—13-ni. Praktikas on ühikutena tarvitusele võetud selle skaala kümnendikud, mis kannavad tugevuse puhul nimetust detsibell (db) ja valjuse puhul — foon. Niisiis ulatub hääle tugevuse skaala 0—130 detsibellini ja valjuse skaala 0-st kuni 130 foonini.

Näitena toome järgnevalt tabeli, kus on antud mõned meile tuntud hääle valjused foonides ning neile vastavad hääletugevused detsibellides.

Hääle	Hääle valjus foonides	Hääle tugevus	
		detsibellides	suhteline
Vaevalt kuuldav (alumine künnis)	0	0	$1 = 10^{-16} \frac{W}{cm^2}$
Tasane sosin 1,5 m kaugusel	10	10	10
Tasane jutlemine	40	40	10^4
Vali jutlemine	60	60	10^6
Vali tänavamüra suurlinnas	70	70	10^7
Karjumine, maa-alune tramm	80	80	10^8
Trükimasinate müra	90	90	10^9
Suure orkestri fortissimo	100	100	10^{10}
Aeroplanimootori müra 3 m kaugusel	110—120	110—120	10^{11} — 10^{12}
Valutundega seotud hääle (ülem. künn.)	130	130	10^{13}

1. Esitatud tabeli abil määrata selles tabelis toodud hääle tugevus $\frac{W}{cm^2}$ -tes!
2. Kui ühe pasuna valjus on 60 fooni, kui suur on siis 10 sellise pasuna valjus ühtekokku?
3. Palju läheks vaja 60 fooni valjusega pasunaid, et nad koos annaksid valjuse 130 fooni?

26. Helireedel. Kui me kuuleme kahte häält korraga või järjestikku, siis nende koosmõju meisse võib olla kas meeldiv või ebameeldiv. Esimesel juhul kõneleme nende hääle kooskõlast ehk konsonantsist, teisel juhul ebakõlast ehk dissonantsist. Kõige harilikum ja hõlpsamini tajutav konsonants on oktaav, kus kaks eri kõrgusega heli liituvad nagu üheks kõlaks. Katseist sireeniga nägime, et oktaavis kõlavate helide sageduste suhe ehk intervall on alati paarisarv (2, 4, 8 jne.). Täheandab, kui mõne heli sagedus on näiteks 440 Hz,

siis temaga oktaavis kõlavate naaberhelide sagedus on 220 ja 880, neile järgnevate oktaavis kõlavate helide sagedus 110 ja 1760, 55 ning 3520 Hz jne.

Samuti näitavad katsed, et kaks heli annavad alati konsonantsi ka siis, kui nende sageduste suhe ehk intervall on hästi lihtne murd, nagu $\frac{3}{2}$, $\frac{4}{3}$, $\frac{5}{4}$. On aga sageduste suhe keerulisem, nagu $\frac{9}{8}$ või $\frac{16}{15}$, siis saame ebakõla ehk dissonantsi.

<i>Helide nimetused</i>	<i>do</i> <i>ehk</i> <i>c</i>	<i>re</i> <i>d</i>	<i>mi</i> <i>e</i>	<i>fa</i> <i>f</i>	<i>sol</i> <i>g</i>	<i>la</i> <i>a</i>	<i>si</i> <i>h</i>	<i>do'</i> <i>c'</i>
<i>Intervallide nimetused</i>	<i>priim</i> <i>põhiheli</i>	<i>sekund</i>	<i>terts</i>	<i>kvart</i>	<i>kvint</i>	<i>sekst</i>	<i>septiim</i>	<i>oktaav</i>
<i>Intervallid põhiheli suhtes</i>	1	$\frac{9}{8}$	$\frac{5}{4}$	$\frac{4}{3}$	$\frac{3}{2}$	$\frac{5}{3}$	$\frac{15}{8}$	2

29. joon. Duur-heliredel.

Muusikas reastatakse helid, lähtudes mistahes vabalt valitud helist, nn. heliredeliks 29. joon. antud viisil. Põhiheli sagedus on võetud ühikuks ja teiste helide intervallid on määratud põhiheli suhtes ning märgitud vastavates püstlahtrites. Nagu sellest tabelist nähtub, on oktaavi intervall 2, temale järgneb lihtsuse järjekorras kvint — $\frac{3}{2}$, siis kvart — $\frac{4}{3}$, edasi terts — $\frac{5}{4}$ ja sekst — $\frac{5}{3}$. Katseist võime veenduda, et kõik need intervallid annavad meeldiva kooskõla ehk konsonantsi. Kui aga võtame kaks kõrvuolevat heli, näiteks do ja re või mi ja fa, siis nende sageduste suhted ehk intervallid on võrreldes eelmistega keerulisemad ($\frac{9}{8}$ ja $\frac{16}{15}$), järelikult saame kooskõla asemel ebakõla ehk dissonantsi. Nii konsonants kui dissonants võib tekkida mitte üksnes kahe, vaid ka kolme, nelja ja enamagi heli koosmõjust. Sel juhul on meil tegemist helide akordiga.

Eelmises tabelis (29. joon.) toodud heliredelit nimetatakse duur- ehk mažoor-heliredeliks. Teda kasutatakse

rõõmsaimelise muusika loomiseks. Kurvailmelise muusika loomisel kasutatakse moll- ehk minoor-heliredelit, kus ühe oktaavi intervallid põhiheli suhtes on:

$$1; \frac{9}{8}; \frac{6}{5}; \frac{4}{3}; \frac{3}{2}; \frac{8}{6}; \frac{9}{5}; 2.$$

Kui arvutame duur-heliredeli kõrvuolevate helide intervallid ühe oktaavi piirides, siis saame järgmise rea:

do re mi fa sol la si do¹

$$\frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{16}{15} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{10}{9} \quad \frac{9}{8} \quad \frac{16}{15}$$

Sellest nähtub, et intervalle on kahte liiki: suuremaid ($\frac{9}{8}$ ja $\frac{10}{9}$) ja väiksemaid ($\frac{16}{15}$). Esimesi nimetatakse täis-, teisi pooltoonideks. Klaveril on kõik kahe teineteisele järgneva heli intervallid võrdseks tehtud. Selline heliredel kannab temperereeritud heliredeli nime. Seega on klaveril kõik täistoonilised intervallid omavahel võrdsed, samuti pooltoonilised. Viiulil aga võime võtta kahesuguseid täistoonilisi intervalle: $\frac{9}{8}$ (do-re) ja $\frac{10}{9}$ (re-mi).

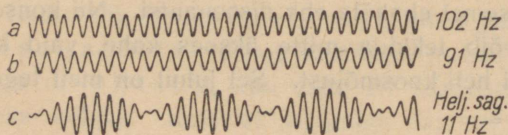
1. Arvuta ühe duur-heliredeli toonide sagedus, kui põhitooni sagedus on 72 Hz!

2. Arvuta moll-heliredeli toonide sagedus, kui põhitooni sagedus on 72 Hz! Võrdle tulemusi eelmise ülesande tulemustega!

3. Tempereeritud heliredelis on kõik kõrvuolevate toonide intervallid võrdsed. Tuleta valem tempereeritud heliredeli pooltoonilise intervalli määramiseks ja arvuta kvardi ning kvindi sagedus duur-heliredelis, kui põhitooni sagedus on 72 Hz! Võrdle saadud tulemusi esimese ülesande tulemustega!

27. Hõljumised. Vaatleme nüüd, mis toimub kahe erineva kõrgusega hääle võnkumiste liitumisel.

30. joon. on kujutatud kaks häält (*a* ja *b*), millede sagedused erinevad 11 Hz võrra. Nende liitumisest tekib hääl, kus amplituud perioodiliselt suureneb ja väheneb (*c*). See



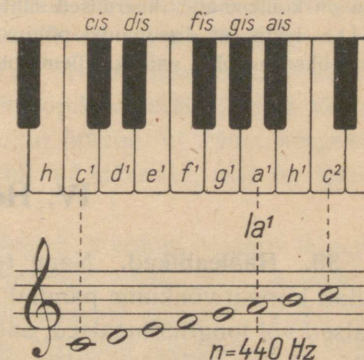
liithääle amplituudi perioodiline tugevnemine ning nõrgenemine kordub 11 korda sekundis ja kuulub meile hääle valjuse võnkumisena, mida nimetame hõljumiseks.

30. joon. Kahe laine liitumisest tekkinud hõljumised.

Liithääle kõrgus aga jääb endiseks, s. o. kuulduv liitunud hääle kõrguste vahepealsena. Sellised hääle hõljumised väsitavad meie kuulumismehhanismi ning seetõttu on üheks dissonantsi tekitavaks põhjuseks. — Praktiliselt kasutatakse hõljumisnähtust muusikariistade häälestamisel. Kui kaks keelt annavad hõljumisi, siis nad pole veel päriselt ühekõrgused.

28. Normaala¹. Heliredel määrab helide suhtelise ehk relatiivse järjekorra, s. o. olenematult helide kõrgusest. Tahame aga helide kõrgust määrata absoluutselt, s. o. nende sageduse abil, siis peame andma heliredeli mõne heli sageduse. Selle põhjal võime intervallide abil arvutada kõigi teiste heliredelis leiduvate helide sagedused.

1939. aasta rahvusvahelise kokkuleppe põhjal on heli la¹ ehk a¹ sageduseks võetud **440 Hz**. Varem oli 1885. a. kokkuleppe põhjal normaal-la¹ (kammertooni) sageduseks 435 Hz.



31. joon. Normaala¹.

1. Määra praeguse ja endise normaal-la¹ intervall! Mitu protsenti on see intervall suurem ühest (unisoonest)?

2. Kui palju erineb praeguse normaal-la¹ heli lainepikkus endise normaal-la¹ heli lainepikkusest?

29. Ajaloolisi märkusi. Inglise filosoof ja füüsik Fr. Bacon (1561—1626) oli esimene, kes tegi vahet hääle ja heli vahel. Tooni eristas kõlast esimesena saksa füüsik Georg Simon Ohm (1787—1854).

Kuuldavuse piire püüdis esimesena kindlaks määrata prantslane J. Sauveur (1653—1716), kes sai alumise piiri jaoks 25 ja ülemise piiri jaoks 12 800 võnget sekundis. Sama küsimusega tegelesid ka Euler, Savart jt. Saadud arvud erinesid tublisti, olenedes katseisiku individuaalsetest erinevustest, samuti hääle tekitamise viisist.

Tooni kõrgusega seotud arvulisi vahakordi uurisid juba pütaagorlased (VI saj. e. Kr.). Võnkesageduse mõõtmiseks konstrueeris esimese sireeni prantslane Cagniard de la Tour (1777—1859). See oli silindriline kast, mille kaanesele oli tehtud kontsentriiline rida mulke. Tihedalt kaane lähedal võis pöörelda ketas, milles oli teine rida samasuguseid mulke. Õhuvool kasti mulkudest tungib vastu pöörleva ketta mulke. Mõlemad mulgud

on asetatud teineteise suhtes kaldu. Õhuvool paneb ketta pöörlema ning mulkudest läbitunginud õhu tõuked tekitavad häält. Pöörlemiskiirusest ja mulkude arvust reas võib arvutada sagedust.

Savart määras võnkesageduse hammasratta abil. Ketassireeni (27. joon.) leiutas A. Seebeck (1805—1849).

Doppleri efekti avastas Chr. Doppler (1803—1853) 1842. a. valguskiirte suhtes. Hääle suhtes rakendas sama põhimõtet katseliselt esimesena Buys-Ballot (1817—1891) 1845. a.

Konsonantsi ja dissonantsi seletas L. Euler võnkesageduste suhte lihtsusega. Mida lihtsam on sageduste suhe (1 : 2, 1 : 3 jne.), seda meeldivam on konsonants; keerulised suhted annavad dissonantsi. H. v. Helmholtz leidis, et dissonantsi põhjustavad heljumised, mis võivad tekkida mitte üksnes põhi-, vaid ka ülemtoonide vahel.

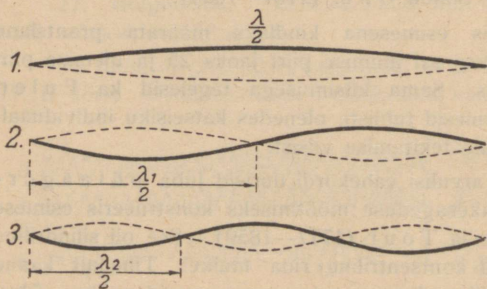
IV. Heliallikad.

30. Hääleallikad. Nagu teame, võib hääle allikaks olla iga küllalt kiiresti võnkuma pandud keha. Keha võnkumised, transversaalsed või longitudinaalsed, anduvad edasi ümberolevale keskkonnale, õhule, tekitades selles ainult longitudinaalseid võnkumisi. Need nn. häälelained, tungides meie kõrva, ongi füüsikaliseks põhjuseks hääleaiastingu tekkimisele peaaegu.

Muusikas kasutatakse heliallikatena pinguletõmmatud keeli (keelpillid), võnkuvaid varbu ja plaate (löökpillid) ning võnkuvat õhusammast (puhkpillid). Vaatleme lühidalt hääle tekkimist igaühes neist.

31. Keelte võnkumine. Ülemtoonid.

Keelte võnkumist lihtsamal kujul nägime katsetes nõoriga. Otstest kinnitatud nõor võib võnkuda tervikuna, moodustades ainult ühe seisva poollaine: pais keskel, sõlmpunktid otstes (32. joon., 1). Me võime ta võnkuma panna ka nii, et kogu



32. joon. Seisvad lained nõorigil.

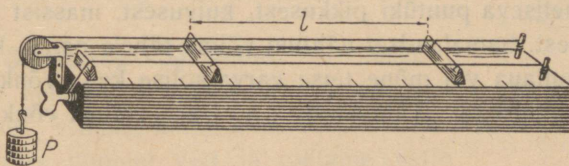
nööri pikkus jaguneb kaheks, kolmeks, neljaks jne. võrdseks seisvaks poollaineks (32. joon., 2 ja 3).

Just samuti toimub ka helisevate keelte võnkumine. Keel oma täies pikkuses võnkudes annab põhitooni, osakaupa võnkudes tekivad antud põhitooni ülemtoonid, millede sagedus on 2, 3, 4 jne. korda suurem põhitooni sagedusest. Põhitoon koos ülemtoonidega moodustab liitheli, mida nimetame kõlaks.

Et sama põhitooniga võivad liituda nii arvult kui ka kõrguselt väga erinevad ülemtoonid, siis võivad ka sama kõrgusega kõlad üksteisest erineda. Nii näiteks viiuli a^1 kõla on erinev klaveri omast, laulmisel ühe õpilase hääle niisama kõrgest teise õpilase häälest jne. Sel puhul ütleme, et sama kõrgusega kõlad erinevad oma värvilt ehk tämbrikt, neil on igaühel oma eriline kõlavärv.

Sageduse suurenemisega väheneb muidugi vastav lainepikkus. Kuigi keelte võnkumine toimub risti võnkumiste levimissuunaga (keele pikkus), on keelte võnkumisest tekkinud lained õhus pikilained, laine levimissuunas tekkinud tihendused ja hõrendused.

Keele osakaupa võnkumise demonstreerimiseks puudutame helisevat keelt näiteks keskelt mõne tikukesega. Siis saame ülemtoonid, mis on põhitoonist oktaav kõrgemad. — Ühe kolmandiku kohal keelt puudutades saame ülemtoonid, mille sagedus on 3 korda suurem põhitooni sagedusest, jne.



33. joon. Monohord.

32. Keelte võnkumisseadused. Millest oleneb võnkuva keele põhitooni sagedus, järelikult ka hääle kõrgus? Katsed näitavad, et 1) keele pikkusest, 2) pinevusest ning 3) massist, ja seda nimelt järgmiselt.

Põhitooni sagedus on:

1) pöördvõrdeline keele pikkusega,

2) võrdeline ruutjuurega keele pinevusest,
 3) pöördvõrdeline ruutjuurega ühe pikkusühiku kohta tulevast massist (joontihedusega).

Seega sagedus

$$n = \frac{1}{2l} \sqrt{\frac{P}{m}},$$

kus l on keele pikkus cm-tes, P — kogupinevus düünides ja m — ühe pikkusühiku mass $\frac{g}{cm}$ -tes.

Keele võnkumisseaduste demonstreerimiseks kasutatakse erilist riista, *monohordi*, millel on 2 keelt. Nende pikkust, pinevust ja massi saame muuta. Võttes ühe neist keeltest võrreldavaks, muudame teise keele juures kas pikkust, pinevust või massi ning võrdleme seejuures esinevaid kõrgusi. Kõrguste põhjal otsustame ka sageduse üle.

1. Külmetuse puhul muutub meie hääl sageli madalaks ja ebapuhtaks („hääl on ära“). Kuidas seda seletada?

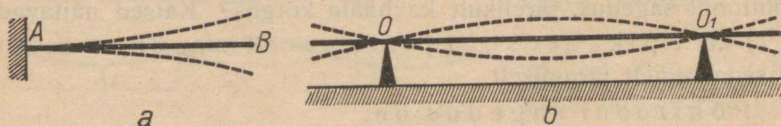
2. Mitu korda tuleks antud keel tugevamini pingule tõmmata, et ta endise tooniga võrreldes annaks kvindi?

3. Viieli d-keele pikkus on 33 cm. Kui kaugele kannast tuleb mängimisel näpp peale panna, et saada f- ja g-tooni?

4. 50 cm pikkune teraskeel kaalub 0,1 g. Kui tugevasti (kg-des) tuleb see keel pingule tõmmata, et ta põhitoon oleks normaal-la¹?

33. Varbade ja plaatide võnkumine. Kuivad puuhalud, kui neid koputada, annavad erilist teravat kõla. Selle kõla omadused olenevad heliseva puutüki pikkusest, kuivusest, massist ja sisemisest ehitusest. Samalaadset nähtust võime tähele panna ka näiteks pliiatsi, joonlaua või mõne teise varvataolise keha võnkumapanemisel koputamiseiga. Tähendab, *varvad* võivad võnkudes tekitada häält.

On varb kinnitatud ühest otsast, siis peab see ots võnkudes paigale jääma, seal tekib sõlm (34. joon., a), kuna vabas otsas tekib pais.

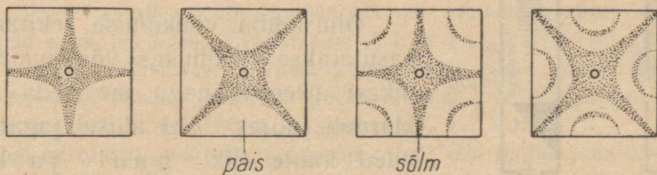


34. joon. Elastse varva ristivõnkumine.

Kui aga varb ei ole kinnitatud otsast (34. joon., *b*), siis tekivad kinnituskohas (O ja O_1) sõlmed, otstes aga paisud.

Võnkuv helihark pole muud midagi kui kõveraks käänatud ja käepidemega varustatud varb. Peale 34. joon. kujutatud ristivõnkumise võivad varvad võnkuda ka pikuti, longitudinaalselt, tekitades häält.

Võnkuvad plaadid võivad jaguneda osadeks väga mitmel viisil ja seetõttu anda ka väga mitmesuguseid hääli. See oleneb ühelt poolt plaadi iseloomust, teiselt poolt aga ka sellest, kust kohast ja kuidas on plaat võnkuma pandud. 35. joonisel on toodud

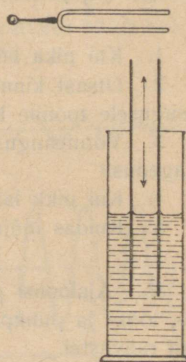


35. joon. Chladni kujundid.

mõned plaadi võnkumiskujud, nn. Chladni kujundid, mis on saadud liiva abil. Plaat kaetakse õhukeselt liivaga. Võnkumisel koguneb liiv sõlmekohtadesse, kuna paisud jäävad liivast puhtaks.

Plaatide, eriti puust pindade omadust väga mitmel viisil võnkuda kasutatakse muusikariistade (kannel, viiul, klaver) ehitamisel, varustades neid eriliste kõlapindadega, mis kaasa võnkuma hakates tugevdavad tekitatud häält.

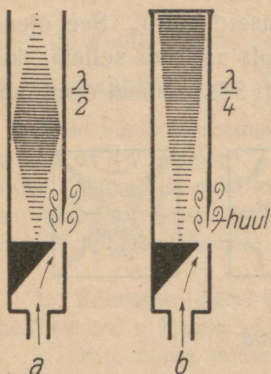
34. Õhusamba võnkumine. Et õhusammas võib heliallikana võnkuda, näitab järgmine katse. Võtame kõrge mensuuri, kallame sinna umbes pooleni vett ja pistame vette mõne mõlemast otsast lahtise toru (36. joon.). Hoiaime toru otsa kohal helisevat heliharki. Toru sügavust vees muutes muutub ka torus oleva õhusamba kõrgus. Teatud kõrguse juures hakkab õhusammas võrdlemisi tugevasti kaasa helisema. Täheandab, õhusambas tekivad pikilained, mis võnguvad sama sagedusega kui heliharkki. Et siin õhusammas ainult teatud



36. joon. Võnkuv õhusammas.

kindla pikkuse juures helisema hakkab, sellest järeldame, et igal õhusambal nagu keelelgi on oma kindel põhitoon. Selle kutsuvad esile võnkumine, mille sagedus võrdub põhitooni võnkesagedusega.

Eelmisel nähtusel põhineb võnkuva õhusamba kasutamine heliallikana viledes. Siin (37. joon.) voolab õhukiht vastu



teravat toru serva (huult). Seetõttu tekivad keerised, mis panevad õhu torus võnkuma; tekivad seisvad õhulained, mis anduvad edasi ümberolevale õhule, ja me kuuleme häält.

Õhusamba võnkumise tekitamiseks kasutatakse ka õhukesi võnkuvaid plaadikesi (keeli), nagu me seda näeme klarneti juures. Sel alusel jagatakse vilede kahte liiki: huul- ja keelviledeks. Esimesi kasutatakse orellis, teisi klarnetis, oboes jm.

37. joon. Lahtine (a) ja kinnine (b) orellivile.

Torus võnkuva õhusamba puhul on veel väga oluline, kas toru ots on kinnine või lahtine. Kinnine toru annab oktaav madalama heli kui lahtine, sest kinnise toru pikkus võrdub

põhitooni lainepikkuse veerandiga ($\frac{\lambda}{4}$), lahtise toru pikkus — poolega ($\frac{\lambda}{2}$).

1. Kui pika lahtise toru põhitoon on normaal-la¹?
2. Otsast kinnise vile pikkus on 10 cm. Määra põhitooni sagedus! Missugusele toonile heliredelis see sagedus enam-vähem vastab?
3. Võtmeaugu sügavus on 2 cm. Kui suur on põhitooni lainepikkus ja sagedus?
4. Kui pikk lahtine toru annab sinu kõige madalama tooni?
5. Kuidas mõjub temperatuuri tõus puhkpillide tooni kõrgusele?

35. Ajaloolisi märkusi. Meie praeguste muusikariistade tüübid — keel-, löök- ja puhkpillid — olid tuntud juba õige vanal ajal ja peaaegu kõigil rahvastel.

Keelpillid kuuluvad vanimate muusikariistade hulka. Juba pütaagorlased kasutasid monohordi toonide arvuliste suhete uurimiseks. Tubli sammu edasi astus alles Fr. B a c o n, kes uuris keele pikkuse, pinevuse ja ristlõike

mõju toonile. Lõplikult fikseeris keelte võnkumisreedused jesuiit Mersenne (1588—1648), kes jõudis otsusele, et heli kõrgus oleneb ainult võnkesagedusest. Ka teadis Mersenne, et võnkuv keel peale põhitooni veel mõningaid kõrgemaid toone välja saadab. Põhjalikult uuris ületoone J. Sauveur, kasutades selleks paberist „ratsureid“ monohordi keele. Temalt on pärit ka nimetus „harmoonilised ületoonid“, s. o. sellised toonid, millele sagedus on 2, 3, 4, ..., tähendab, üldse täisarv kordi suurem põhitooni sagedusest.

Keele võnkumise valemi andis inglise matemaatik B. Taylor (1685—1731).

Võnkuvate varbade teooria püstitas L. Euler. Helihark on leiutatud inglise sõjaväe muusiku J. Shore'i poolt 1711. a. Helihargi kui kahe sõlm-punktiga võnkuva varva seletus on pärit E. Chladni'lt (1756—1827). Chladni leiutas ka erilise võtte, kuidas plaatide võnkumisi nähtavaks teha, kattes neid hästi peenikese liivakorruga (Chladni kõlakujud).

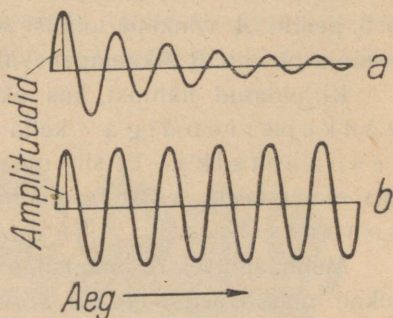
Mersenne avastas, et viled kohta kehtib sama seadus, mis keeltegi kohta, s. o. võnkesagedus on pöördvõrdeline vile pikkusega, ning et lahtine toru annab oktaavi võrra kõrgema tooni kui kinnine.

Kuigi mitut liiki puhkpillid (pasunad, viled) olid tuntud juba õige vanal ajal, suudeti puhkpillides toimuvad õhusamba võnkumise nähtused alles XIX sajandil ka teoreetiliselt rahuldavalt ära seletada.

V. Resonants ja kõla analüüs.

36. Vaba ja sundvõnkumine. Vabalt võnkuva pendli amplituud väheneb järjest ja varsti jääb pendel hoopis seisma. Mis pärast aga seinakella pendel seisma ei jää? Sellepärast, et üleskeeratud vedru või ülestõstetud koormiste energia arvel saab seinakella pendel iga täis- või poolvõnke jooksul liikumissuunas väikese tõuke, mis asendab (kompenseerib) võnkumisel ära kulunud energiat.

Käimalukatud kiik jääb samuti varsti seisma, kui ta mitmesuguste takistuste ületamiseks ära kulunud energia asemele uut energiat juurde ei saa. Uut energiat saab kiik harilikult kiikujalt, kes annab oma kehaga

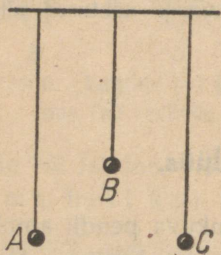


38. joon. Sumbuv (a) ja mitesumbuv (b) laine.

kiigele rütmilisi tõukeid. Siin on oluline, et antud tõuke suund ühtiks kiige (pendli) liikumissuunaga, sest ainult siis soodustab ta kiige liikumist — lisandab talle uut liikumisenergiat.

Eelmisis näiteis oli meil esimesel juhul tegemist v a b a v õ n k u m i s e g a, kus võnkeamplituud järjest kahanes ehk s u m b u s. Teisel juhul on meil tegemist n n. s u n d v õ n k u m i s e g a, kus rütmilised väljastpoolt saadud tõuked sunnivad võnkuvat keha oma amplituudi säilitama. Seepärast nimetataksegi sellist väljastpoolt saadud tõugete koosmõjul toimuvat võnkumist s u n d v õ n k u m i s e k s. Mõlema mainitud võnkumise amplituud on kujutatud joonisel 38.

37. Mehhaaniline resonants. Teeme järgmise katse. Võtame kolm pendlit, neist 2 (**A** ja **C**) ühepikkused (39. joon.). Riputame



nad elastse varva või traadi külge ja paneme ühe neist (**A**) võnkuma. Varsti näeme, et temaga ühepikkune pendel (**C**) hakkab esimesega kaasa võnkuma, kuna teine pendel (**B**) paigale jääb. Kust sai pendel (**C**) oma liikumisenergia? Neist väikestest tõugetest, mis pendel (**A**) talle kinnitusvarva kaudu andis. Need olid küll väikesed, aga et mõlema pendli võnkeperiood on sama, siis mõjusid kõik need väikesed tõuked alati pendli **C** liikumissuunas ja panid ta lõpuks võn-

39. joon. Pendlite resonants. kuma. Pendel **B** ei hakanud liikuma, sest tema võnkeperiood erineb pendli **A** võnkeperioodist ning seetõttu kõik saadud tõuked ei mõju pendlit **B** liikumapanevalt.

Kirjeldatud nähtust, kus üks võnkuv keha lka teise s a m a võnkeperioodiga keha võnkuma paneb, nimetatakse r e s o n a n t s i k s. Et siin oli tegemist mehhaanilise liikumisega, siis nimetatakse sellist resonantsi k a m e h h a a n i l i s e k s r e s o n a n t s i k s.

Mehhaanilisel resonantsil on suur tähtsus tehnikas. Näiteks pikad massiivsed sillad võivad kui hiiglatugevad keeled või varvad resonantsi tõttu võnkuma hakata, kui nad saavad rütmilisi tõukeid, millede sagedus võrdub silla enese võnkesagedu-

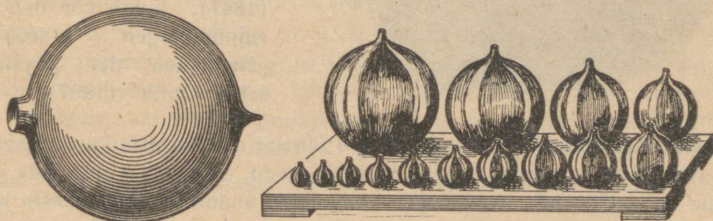
sega. Seejuures võib sild nii tugevasti võnkuma hakata, et ta koguni puruneb. Sellise võimaliku hädaohu vältimiseks ei lubata näiteks üle silla minnes suuremal inimeste rühmal (sõdureil) kõndida taktis. Ka laevade ehitamisel tuleb silmas pidada, et laeva kere enese võnkumised masinate võnkumisega resonantsis ei oleks, sest siis puudub energia ülekandumine masinatelt kerele ja laeva kere ei hakka masinatega kaasa võnkuma.

38. Akustiline resonants. Resonantsinähtused esinevad õige sageli ka akustikas. Olgu meil antud näiteks kaks keelt, mis annavad ühesuguse heli. Paneme ühe neist keeltest tugevasti võnkuma ja siis kohe seisma. Nüüd kuuleme, et ka seisev keel on hakanud helisema, järelikult ka võnkuma. Selle põhjuseks on resonants mõlemaid keeli ühendava õhu kaudu. Samaladset nähtust võime tekitada ka kahe ühesuguse võnkesagedusega helihargiga.

Resonantsinähtusi võivad tekitada ka antud põhitooni ülemtoonid. Näiteks kui vabastada klaveri keeled pedaalist ja panna mõni neist tugevasti helisema ning siis kohe seisma, kuuleme terve rea helisid, mis resoneerivad võnkuma pandud keele ülemtoonidega.

Resonantsinähtusel on suur tähtsus muusikas. Nimelt heli tekitamisel muusikariistas püütakse saavutada võimalikult valju ja meeldivat kõla mitte üksnes helisema pandud keha põhj- ja ülemtoonide, vaid ka nendega resoneerivate teiste kehade abil. Selliste resonaatorite ülesannet täidab näiteks kandlel ja viiulil kere, inimese hääleorganis neelukoobas, suu, ninakoobas ja rinnakorv.

39. Kõla analüüs. Nagu teame, on kõla liitheli, mis koosneb üksikuist toonidest (põhi- ja ülemtoonid). Kuidas eraldada kõlast tema üksikuid komponent- ehk liituvaid toone, s. o. teha kõla



40. joon. Helmholtzi resonaatorid.

analüüsi? Saksa õpetlane H. v. Helmholtz kasutas selleks järgmist viisi. Ta ehitas rea kerakujulisi resonatoreid (40. joon.). Neis olev õhk annab võnkudes ainult ühe, nimelt põhitooni, mitte aga ületoone. Seepärast just ongi resonatorid tehtud kerakujulised, et nad resoneeriks ainult ühele kindlale toonile. Tahame teada, kas antud kõla või üldse hääl sisaldab komponendina mõnd tooni, võtame vastava resonatori, pistame ta toru otsa pidi kõrva ja kuulame. Hakkab resonator helisema (undama), on vastav toon komponendina olemas, vastasel korral mitte. Muidugi peab sellise analüüsi puhul olema iga otsitava tooni jaoks oma vastav resonator (vt. 40. joon.).

Selliseid resonatoreid kasutades läks Helmholtzil korda analüüsida vokaale ja konsonante ning ümberpöörduvalt — tekitada neid kunstlikult, pannes korruga helisema rea vastavaid heliharke.



41. joon. Hermann v. Helmholtz (1821—1894), kuulus saksa füüsik ja füsioloog. Sündinud Potsdamis gümnaasiumiõpetaja pojana. Õppis Berliini ülikoolis arstiteadust. Oli algul mitmes ülikoolis anatoomia- ja füsioloogia-professoriks, alates 1871. a. füüsikaprofessor Berliini ülikoolis.

Avaldanud hulga põhjapanevaid uurimusi füüsika ja füsioloogia alalt ning teinud rea tähtsaid praktilisi leiutisi (resonaatorid, silmapeegel jm.). Tema tähtsamaid töid: „Über die Erhaltung der Kraft“ (1847), „Lehre von den Tonempfindungen“ (1863) ja „Handbuch der physiologischen Optik“ (1867).

40. Kuulmine. Resonants mängib tähtsat osa ka meie kuulmisprotsessis. Häälained, tungides väliskõrva, panevad võnkuma kuulmekile, mille pindala on $\sim 0,5 \text{ cm}^2$. Kuulmekile võnkumine andub kuulmeluukeste kaudu edasi sisekõrva vedelikule. See omakorda paneb võnkuma nn. Corti organi, mis koosneb suurest hulgast (umbes 5000) erilistest kiududest, mis on ühen-

duses peajust tuleva kuulmisnärvi. Corti organi kiud (kuulmisrakud) resoneerivad igaüks ainult teatud toonile, nende võnkumine ärritab kuulmisnärvi otsi ning andub edasi peajule, ja me kuuleme häält.

Kõrv on niisama tundlik kui silmgi, see tähendab: kõige nõrgema hääle kui ka valgusmulje tekitamiseks läheb vaja sama palju energiat

($\sim 5 \cdot 10^{-17} \frac{W}{cm^2}$ sageduse juures 2300 Hz).

Kõrvadega me mitte üksnes võtame vastu hääle muljeid, vaid ühtlasi määrame ka suuna, kustpoolt hääl tuleb. Siin on oluline tähtsus sellel, et meil on kaks kõrva. Kui hääl tuleb kõrvadesse otse eest, siis jõuab ta mõlemasse kõrva samaaegselt. Tuleb aga hääl külje pealt, siis jõuab ta ühte kõrva enne kui teise. See ajavahe ongi nähtavasti aluseks, mis võimaldab orienteerumist ruumis kuulmise järgi.

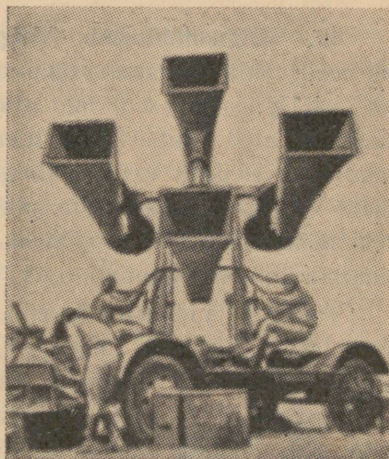
Samal põhimõttel, ainult suurendades täpsuse tõstmiseks „kõrvade“ vahekaugust, on ehitatud erilised aparaadid (42. joon.), mis võimaldavad täpselt määrata hääle suunda. Neid kasutatakse sõjaväes näiteks vaenlase patarei, lennuki või laeva asukoha kindlakstegemiseks.

41. Ajaloolisi märkusi. Üksikuid resonantsinähtusi tunti juba vanal ajal (keelpillide kõlapinnad, helisevad merikarbid, Aiolose kannel). Neist kõneleb Plinius (I saj. p. Kr.) oma töödes. Inglise W. Noble ja Th. Pigot (XVII saj.) uurisid keelte resonantsi mitte üksnes põhitooni, vaid ka ülemtoonide võnkumise kaudu. Siis muidugi olid kuulda põhitooni vastavad ülemtoonid. Põhjaliku uurimuse resonantsi kohta andsid vennad Weberid oma „Laineõpetuses“, mis ilmus a. 1825.

H. v. Helmholtz ehitas 1863. a. terve seeria mitmesuguses suuruses õhkresonaatoreid, millede abil ta uuris kõla koostist.

Juba G. S. Ohm väitis, et kõrv on suuteline kõlas eraldama tema üksikuid komponent-toone, kuigi ta veel ei käsitanud kõla üksikute toonide summana. Põhjaliku uurimuse kõla kui liittooni kohta andis esimesena H. v. Helmholtz, kes ühtlasi praktiliselt teostas tema poolt konstrueeritud resonaatorite seeria abil kõla analüüsi.

Nn. Corti organi avastas itaalia arst Alfonso Corti (1822—1876) a. 1846.



42. joon. Hääle suuna määraja.

VALGUS.

VI. Valgusallika ja pinnavalgustuse tugevus.

42. Valgusnähtused. Valgusallikad. Valgusnähtused on need, mida me tajume oma silma abil. Nende põhjustajaiks on nn. valguskiired, mis silma tungides tekitavad valgusaistingu. Tuleb alati vahet teha subjektiivse, ainult meie teadvuses esineva valgusaistingu, ja objektiivse, väljaspool meid toimivate füüsikaliste nähtuste vahel, mis on valgusaistingu tekkimise põhjuseks. — Füüsika osa, kus valgusnähtusi lähemalt tundma õpitakse, kannab optika nime.

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

Lumineerivad kehad (Päike, tähed) kiirgavad n.-ö. oma valgust. Kuid ka tumedad kehad saavad valgust välja, kui mõnest valgusallikast valgust nende peale paistab, mida nad siis osaliselt tagasi kiirgavad. Seetõttu ongi tumedad kehad (raamat, sein, Kuu, planeedid) meile nähtavad, nad muutuvad valgusallikaiks väljastpoolt saadud valguse arvel.

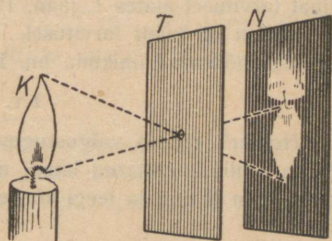
43. Valguskiirguse põhiomadusi. Esemed, milledele valgust peale paistab, soojenevad. Seega muundub valgus soojuseks. Soojus aga on energia, tähendab, ka valgus on energia. Valgusallikas on kui saatejaam, mis energiat vahetpidamata välja saadab ehk kiirgab. Nn. valguskiir pole muud midagi kui valgusenergia levimissuund.

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

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

Varjude tekkimise nähtused tõendavad, et valguskiirgus levib sirgjooneliselt. Silmaga võime tajuda valguskiirgust ainult selle levimissuunas, s. o. valguskiirgust, mis otse meie silma tungib. Valguskiirgust, mis meie silmade eest mööda läheb, me ei näe. Seega võime valguskiiri näha ainult n.-ö. otsast, mitte aga küljelt. Vahel õhus tähelepanndavad „valguskiired“ tekiavad peegeldumisest tolmu- ning veosakestelt.

Kujutiste tekitamise võimalus pisiava abil tõendab mitte üksnes valguskiirguse sirgjoonelist levimist, vaid ka seda, et valguskiired võivad ristlemisel üksteisest ilma segamata läbi tungida. Viimane valguskiirguse omadus tõendab tema lainelist iseloomu, sest ainult lainetel on omadus üksteisest takistamatult läbi tungida, nagu me seda võime tähele panna ka veepinna lainetusel (16. joon.).



43. joon. Kujutiste tekitamine pisiava abil.

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

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

Valgusallika valgustugevuse ühikuna on viimasel ajal üldiselt tarvitusele võetud rahvusvaheline küünal (r. k.), mis kannab ka uue küünla (NK) nime.

Uue küünla suurus 1937. a. otsuste kohaselt on määratud nn. absoluutselt musta keha (vt. § 133) valguskiirguse põhjal 1768° C juures. Sellise keha 1 cm² suuruse pinna valguskiirgus võrdub 60 rahvusvahelise küünlaga. Seega puudub r. k. ühik — etaloon. Viimase asemel kasutatakse eriliselt ehitatud elektripirne, millede valgustugevus teatud pinge juures on rahvusvahelistes küünaldes täpselt määratud. Nendega võrreldaksegi teisi valgusallikaid.

Praegu tarvitusel olev rahvusvaheline küünal (uus küünal) erineb (umbes 2% väiksem) varem USA-s, Inglismaal, Prantsusmaal jm. rahvusvahelise küünla (*International Candle Power*) nime all tarvitusel olnud valgusallika tugevuse ühikust. Uue küünla üldiselt kehtima paneku alguseks oli vastava komisjoni poolt määratud 1. jaan. 1940. Saksamaal on uus küünal tarvitusel alates 1. jaan. 1941.

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

1 r. k. = 1,1 HK.

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

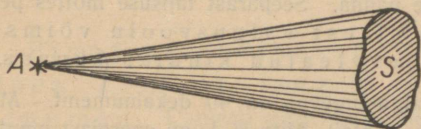
1. Varem tarvitati valgusallika valgustugevuse ühikuna nn. normaalküünalt (2 cm-se läbimõõduga parafiinküünla leegi tugevus, kui leegi kõrgus on 5 cm). Väljenda normaalküünla valgustugevus r. k-des ja ümberpöördult, kui 1 normaalküünal = ~ 1,2 HK!

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

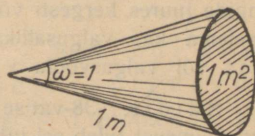
3. Elektripirni valgustugevus on 40 HK. Mitu r. k. see on?

45. Valgusvool. Luumen. Valgusallikast mõnele pinnale langevaks valgusvooluks nimetatakse sellele pinnale ühes sekundis langevat valgusenergia hulka. Et valgusvoolu iseloomustab 1 ajaühiku (sek.) kohta tulev valgusenergia hulk, siis võime valgusvoolu mõõta võimsusühikuis, näiteks vattides.

Olgu meile antud punktitaoline valgusallikas ehk nn. valguspunkt, mille valgustugevus on 1 r. k. (44. joon.). Oletame, et see valguspunkt kiirgab valgust (lumineerib) ühtlaselt igas suunas. Sel juhul on lihtne arvutada valgusvoolu suurust antud pinnale S . Selleks kujutame antud valguspunktist A kiired läbi pinna S kontuuri iga punkti. Siis saame koonilise pinna, mis moodustab nn. ruuminurga, mille tipp asetseb punktis A .



44. joon. Valgusvool läbib pinna S .



45. joon. Ruuminurga-ühik.

Ruuminurkade mõõtmisel võtame ühikuks sellise ruuminurga, mis tema tippu ümber 1 m-se raadiusega kujutatud kerapinnast lõikab välja 1 m^2 suuruse osa (45. joon.). Et kogu selle kerapinna suurus on $4\pi \cdot 1^2 \text{ m}^2 = 4\pi \text{ m}^2 = 12,57 \text{ m}^2$, siis järelikult ühe punkti ümber oleva ruuminurga suurus on 12,57 ruuminurga-ühikut.

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

Arvutame nüüd 1 r. k. valgusvoolu võimsuse vattides ühes ruuminurga-ühikus. On teada, et 1 r. k. valgustugevus ehk kogu tema valgusvoolu võimsus on ümmarguselt 0,02 vatti, mis on jaotatud ühtlaselt kogu valguspunkti ümber olevasse ruumi, s. o. 12,57 ruuminurga-ühikusse. Järelikult iga ruuminurga-ühiku kohta tuleb sellest valgusvoolust $0,02 \text{ vatti} : 12,57 = 0,0016 \text{ vatti}$. Kui näiteks valguspunktist A pinnale S langev valgusvool täidab ruuminurga

$\omega = 0,25$ ruuminurga-ühikut, siis sellele pinnale langev valgusvool võrdub $0,25 \cdot 0,0016 = 0,0004$ vatti.

Tavaliselt ei mõõdeta valgusvoolu võimsust vattides, vaid luumenites, kusjuures 1 **luumen** on sellise võimsusega valgusvool, mis 1 rahvusvaheline küünal (uusküünal) 1 sekundis 1 ruuminurga-ühikusse kiirgab. Seega on 1 r. k. kogu valgusvool 12,57 luumenit ehk 0,02 vatti; 1 luumen aga, nagu eespool nägime, on 0,0016 vatti.

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

Tuleb silmas pidada, et valgusallikast väljuva valgusvoolu tugevus harilikult pole igas suunas ühesugune, nagu seda petrooleumi- või elektrihoõglampide juures kergesti võib tähele panna. Seepärast täpsuse mõttes peab kõnelema kas valgusallika keskmisest valgusvoolu võimsusest või valgusvoolu võimsusest teatud kindlas suunas.

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

1) 1 r. k. valgustugevus on 12,6 luumenit ehk 1,26 dekaluumenit. Ülesande andmeil 1 dekaluumenile vastab $\frac{3,8}{40}$ vatti, järelikult 1 r. k. kohta tuleb $1,26 \cdot \frac{3,8}{40}$ ehk 1,2 vatti.

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

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

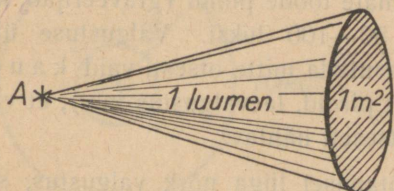
2. Valguspunktist väljuv valgusvool läbib temaga risti oleva pinna 0,2 m² 3 m kaugusel. Väljenda selle valgusvoolu võimsus luumenites, kui valgusallika tugevus on 60 r. k. ja kiirgus toimub igas suunas ühtlaselt!

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

4. Võrdle dekaluumenit HK kogu valgusvooluga! Kumb neist on suurem ja mitme % võrra?

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

46. Pinnavalgustuse tugevus. Luks. Kui valgusvool langeb mõnele tumedale kehale, näiteks lambi valgusvool raamatule, Päikese valgusvool Kuule, siis valgustab ta selle keha pinda ja me näeme teda. Pinna valgustustugevust mõõdetakse selle pinna 1 m^2 -le langeva valgusvoolu võimsusega ja nimelt luksides.



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

46. joon. Luksi määramine.

Pinna valgustustugevus on 1 luks, kui selle pinna 1 m^2 -le langeb ühtlaselt valgusvool 1 luumen. Langeb aga sama valgusvool — 1 luumen — pinnale 1 cm^2 , siis on selle pinna valgustustugevus 10 000 luksi, sest $1 \text{ m}^2 = 10^4 \text{ cm}^2$.

Luksi määratakse vahel ka kui valgustuse tugevust, mida tekitab valgusallikas 1 r. k. temast 1 m kaugusel oleval valgusvooluga risti asetatud pinnal. Et 1 m kaugusel ruuminurgaühiku tipust tehtud ristlõigu pind on just 1 m^2 , siis on mõlemad valgustustugevuse ühiku luksid definitioonid sisult üheväärsed. Seetõttu 10 r. k. annab 1 m kaugusel valgustustugevuse 10 luksit, 25 r. k. — 25 luksit, jne. Kauguse suurenedes või vähenedes muidugi vastavalt vähem. Eelmise põhjal on 1 luks sama, mis 1 meeterküünalgi, millist nimetust tarvitati varemalt.

Pinnavalgustuse tugevus luksides näitab, kui palju valgusenergiat saab pind. Hoopis iseküsimus on, kui palju valgustatud pind sellest energiast jälle tagasi kiirgab. Viimasest asjaolust oleb selle pinna nähtavus meie silmale. Nn. absoluutselt must keha (tahm — enam-vähem) neelab kõik tema peale langeva valgusvoolu, valge paber neelab ära vaid umbes 10%, kuna 90% kiirgub tagasi, kriit kiirgab tagasi 84%, must kalev 1,2%, must samet 0,2%. Kuu pinnale langevast Päikese valgusest kiirgub tagasi maailmaruumi umbes 7%.

Töö edukuse ja silmade tervishoiu seisukohalt on tarvilik, et töökoht ja tööga seotud esemed oleksid küllal d a s e l t n i n g ü h t l a s e l t valgustatud. Üldiselt kehtib nõue: mida peenemate esemete kallal toimub töö, seda suurem peab olema nende valgustugevus. Nii näiteks on nõutav töökooha valgustugevus jämedama töö puhul 10—20 luksi, lugemisel ja kirjutamisel 25—50 luksi, joonestamisel ja üldse peenemate tööde puhul (graveerijad, kellasepad, tikkijad) vähemalt 50—100 luksi. Valgustuse ühtluse saavutamiseks on soovitatav kasutada mitte otsest, vaid k a u d s e t v a l g u s t u s t (piimklaasist pirnid, laevalgustus jne.), et valgust andev keha poleks silmale otseselt nähtav.

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

1. Mitu % on valgustugevus ühelt r. k-lt suurem kui 1 HK-lt samas kauguses?

2. Valge paber on valgustatud 75 luksi tugevuselt. Mitu luumenit kiirguks tagasi sellise paberi din-formaadis poolpöognast (21 × 30 cm)?

3. Punktitaoline valgusallikas, mille tugevus on 50 r. k., asetseb 30 cm lauast kõrgemal. Leia laua valgustugevus luksides 60 cm lambist eemal!

4. Valgustugevuse ühik 1 fott (phot) = 10⁴ luksi. Kui suurele pinnale peab langema valgusvool 1 luumen, et selle pinna valgustugevus oleks 1 fott?

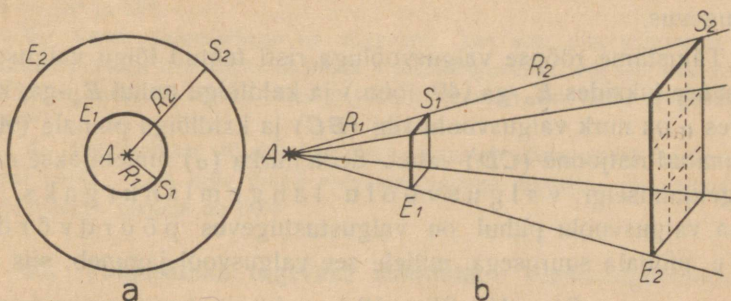
Mitu fotti on 1 miljon luksi?

Mitu luksi on 2,5 fotti?

47. Pinnavalgustuse seadused. Olgu meile antud punktitaoline valgusallikas, millest valgusvool levib ühtlaselt igas suunas (47. joon., a). Kujutame sellise valgusallika ümber kerapinnad S_1 ja S_2 , millede raadiused on R_1 ja R_2 ning valgustugevused neil kerapindadel vastavalt E_1 ja E_2 . Et sama valgusvoolu hulk langeb ühtlaselt mõlemale kerapinnale, siis nende kerapindade valgustugevused E_1 ja E_2 peavad olema p ö ö r d v ö r d e l i s e d nende kerapindade suurustega, s. o.

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

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



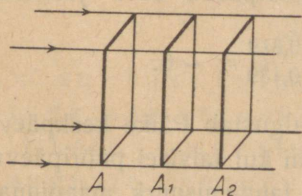
47. joon. Valgustustugevus väheneb pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga.

Samale tulemusele jõuame, vaadeldes ühest punktist (A) lähtuva valgusvoolu, s. o. mõne ruuminurga valgusvoolu löikumist rööpsete tasapindadega (47. joon., b). Et ka sel juhul löikepindade S_1 ja S_2 suurused on pöördvõrdelised nende kauguste R_1 ja R_2 ruutudega valgusallikast A (tõesta seda kujundite sarnasuse abil!), siis jõuame samale tulemusele kui varemgi.

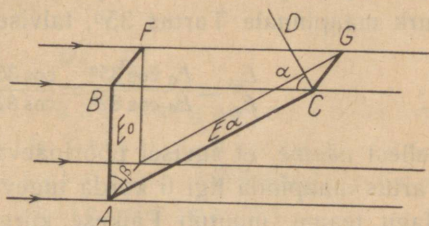
Eelmisest järgneb, et valgusallikat mõnest pinnast näiteks 2 korda kaugemale viies väheneb selle pinna valgustustugevus 2^2 ehk 4 korda, 3 korda kaugemale viies 3^2 ehk 9 korda jne. Lähemale viies valgustustugevus vastavalt suureneb.

Võtame nüüd rööpse valgusvoolu ja lõikame teda rööpsete tasapindadega. Saame võrdsed löikepinnad. Nii on 48. joon. kujutatud valgusvoolu ristlõigud A, A_1, A_2, \dots , järelikult ka nende valgustustugevused kõik võrdsed. Seepärast kasutataksegi tugeva

Exhibi. univ. Ta



48. joon. Rööpne valgusvool risti pinnaga.



49. joon. Rööpne valgusvool kaldu pinnaga.

valgusvoolu juhtimisel kaugema maa peale rööpset valgusvoolu (projektorid).

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

Tähistame rööpse valgusvooluga risti tehtud lõigu valgustugevuse luksides E_o -ga (49. joon.) ja kaldlõigu puhul E_α -ga, kusjuures α on nurk valgusvoolu sihi (BC) ja kaldlõigu pinnale (AC) tõmmatud ristjoone (CD) vahel. Seda nurka (α) nimetatakse nagu peegeldumiselgi valgusvoolu langemisnurgaks. Et sama valgusvoolu puhul on valgustugevus pöördvärdeeline pindala suurusega, millele see valgusvool jaguneb, siis

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

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

$$E_\alpha = E_o \cos \alpha,$$

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

Näitena arvutame rõhtsa maapinna valgustugevuse suhte suvisel ja talvisel pööripäeval Tartus. Vaatlused näitavad, et suvisel pööripäeval on keskpäeval Päikese valgusvoolu langemisnurk maapinnale Tartus 35° , talvisel pööripäeval 82° . Järelikult

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

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

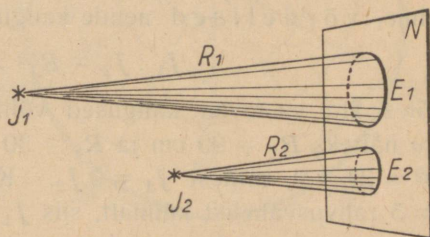
1. Mitu korda valgustab Päike tema kiirtega risti asetatud pinda Marsi kaugusel nõrgemini kui Maa pinnal, kui teame, et Marss on 1,5 korda Päikesest kaugemal kui Maa?

2. Mitu korda on Roomas Päikese kiirgus keskpäeval suvisel pöörpäeval suurem kui talvisel pöörpäeval? Vastavad valgusvoolu langemisnurkad on 18° ja 65° .

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

4. Valgusallikas 40 dekaluumentit valgustab ühtlaselt 50 cm kaugusel olevat pinda. Leia selle pinna valgustustugevus luksides, kui valgusvoolu langemisnurk pinnale on 60° !

48. Valgusallika tugevuse mõõtmine. Pinnavalgustuse seadustel põhineb valgusallikate tugevuse võrdlemine, milles seisabki nende tugevuse mõõtmine. Olgu meil antud kaks valguspunkti tugevusega J_1 ja J_2 (50. joon.). Asetame nad sellistele kaugustele R_1 ja R_2 ekraanist N , et nad valgustaksid seda ekraani ühetugevuselt, s. o. igale pinnaühikule (1 cm^2) langev valgusenergia hulk oleks mõlemal juhul sama. Nagu varem nägime, on valgustustugevus E võrdeline valgusallika tugevusega (J) ja pöördvõrdeline kauguse



50. joon. Valgusallikate tugevuse võrdlemine.

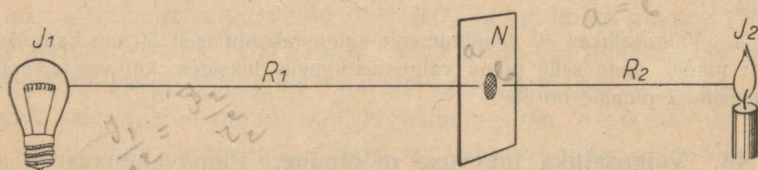
ruuduga (R^2), seega $E_1 = \frac{J_1}{R_1^2}$ ja $E_2 = \frac{J_2}{R_2^2}$. Et aga antud juhul $E_1 = E_2$, siis ka $\frac{J_1}{R_1^2} = \frac{J_2}{R_2^2}$, millest

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

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

Saadud valemi abil on hõlpus võrrelda valgusallikate tugevust. Vaatame, kuidas seda tehakse Bunsen'i fotomeetri abil.

Valgest paberist ekraani keskele on tehtud õlilaik. Seetõttu muutub ekraan laigu kohas valguskiirgust läbilaskvamaks kui ülejäänud osa ja paistab ümberolevast ekraanist tumedamana või heledamana, olenedes sellest, kus asetsevad valgusallikas ja vaatleja silm. Nüüd asetame pimedas ruumis valgusallikad (elektripirn ja küünal), millede tugevusi J_1 ja J_2 tahame võrrelda, mõlemale poole ekraani nõnda, et tume laik ära kaoks. See juhtub ainult



51. joon. Bunseni fotomeetri skeem.

siis, kui laigule mõlemast valgusallikast langev valgusvool on ühetugevune. Sel juhul aga on valgusallikate tugevused, nagu nägime, võrreldavad nende kauguste ruutudega, s. o.

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

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

1. Tee valgele paberile õli- või rasvalaik ja vaata seda vastu akent ning vastu seina hoides! Mida paned tähele ja mispärast?

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

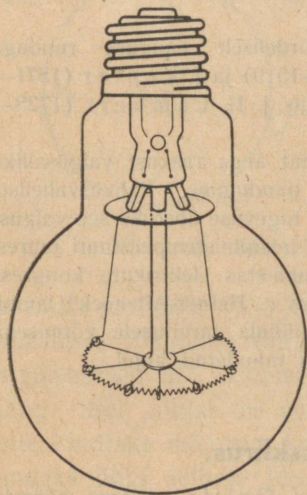
3. Kumb valgustab tugevamini kirrte sihiga risti asetatud pinda: kas 100 r. k. valgustugevusega lamp 12 m kauguselt või 1200 r. k. valgustugevusega lamp 45 m kauguselt?

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

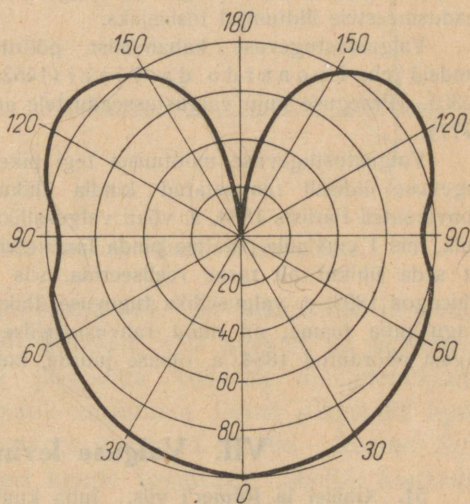
49. Valgusallika valgusvoolu jaotus ruumis. Eelmised valgustusseadused on tuletatud eeldusel, et meil on tegemist punktitaolise valgusallikaga, mis igas suunas ühtlaselt valgust kiirgab. Tegelikult on valgusallikate helendavad pinnad väga mitmekujulised, nagu seda näeme näiteks küünlaleegi või elektripirni hõõgniitude juures. Seetõttu oleneb valgusallika

valgusvoolu tugevus suunast, milles valguskiirgus toimub. Tahame valgusallika kogutugevust mõõta, siis peame määrama valgustuse, ühes sellega ka valgusvoolu tugevuse igas suunas ümber valgusallika. Saadud andmete põhjal võime valgustusseaduste abil arvutada nii valgusallika kogutugevuse kui ka valgustustugevuse igas kohas ümberolevas ruumis.

Harilikult on valgusallikad, näiteks elektripirnid, pöördkehakujulised. See hõlbustab ülesannet. Siis on küllaldane mõõta valgustustugevust vaid ühes, nimelt pöördtelge läbivas ehk meridiaani tasapinnas. Sümmeetria tõttu on teiste meridiaantasapindade vastavate punktide valgustustugevus sama.



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



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

Näitena vaatleme 52. joon. kujutatud elektripirni valgusvoolu jaotust ümberolevas ruumis. Tugev kõver ümber pirni näitab kohti, kus valgusvoolu võimsus on ühesugune. Muidugi on siin eeldatud, et kiirgus langeb pinnaga risti. Esitatud joonisest näeme, et samatugevust pinnavalgustust võime saada väga mitmesuguses kauguses valgusallikast, olenedes sellest, missuguses suunas valgusallikast me seda soovime teha. Sedaviisi saadud valguse jaotuskõverad on praktiliselt väga tähtsad valgustustugevuse määramisel valgusallika ümber olevas ruumis, mis on väga oluline ruumi otstarbeka valgustuse korraldamisel.

Nagu näha, on valgusallika kogutugevuse määramine, samuti valgustustugevuse määramine ümberolevas ruumis kaunis keeruline ülesanne. Harilikult määratakse nn. kuulfotomeetri abil keskmine valgustustugevus ja selle põhjal arvutatakse valgusallika kogutugevus. Valgustus-

tugevuse otseks mõõtmiseks aga kasutatakse tehnikas erilisi riistu — luksmeetreid. Nende ehitus põhineb mõnede ainete omadusel muuta valgusenergiat elektrienergiaks. Mida tugevam on valgustus, seda tugevam elektrivool tekib selle valguse mõjul ja seda suurem on ka skaalal vastav hälve luksides.

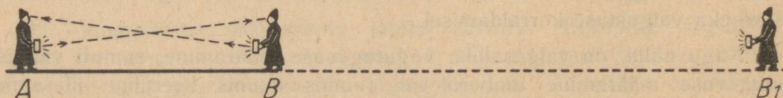
50. Ajaloolisi märkusi. Kujutlus sirgjoonelistest valguskiirtest ja valguse sirgjoonelisest levimisest on väga vana. Selle aluseks on rida harilikke igapäevaseid tähelepanekuid, nagu päikesekiirte tungimine läbi kitsa pilvede praao või läbi pisiava aknaluugis. Juba kuulus matemaatik Eukleides (umb. 300 a. e. Kr.) põhjendab valguse sirgjoonelise levimisega rea lauseid perspektiiviõpetusest. Seega oli valguse sirgjooneline levimine vanaaja teadusmeestele üldtuntud tõsiasiaks.

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

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

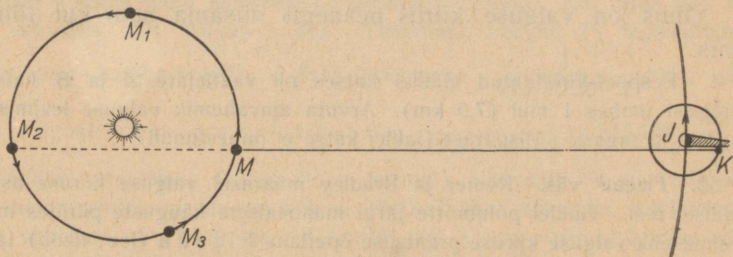
VII. Valguse levimiskiirus.

51. Galilei ja Römer'i viis. Juba kuulus Galilei katsus määrata valguse kiirust ja nimelt järgmisel viisil (54. joon.). Kaks vaatlejat *A* ja *B* asusid pimedas (öösi) teineteise vastu, käes põlevad laternad, millede valgus oli kinni kaetud. Vaatleja *A* avas oma laterna, ja kui vaatleja *B* märkas selle valgust, siis avas ka tema oma laterna, et *A* seda näeks. Ajavahemik vaatleja *A* laterna avamisest kuni momendini, mil ta vaatleja *B* laterna valgust nägi, pidi kuluma valguse levimiseks *A*-st *B*-ni ja tagasi. *A* ja *B* vahemaa suurenedes (asend *B*₁) peaks suurenema ka vastav valguse levimiseks kuluv ajavahemik. Teades käidud tee pikkust ja selleks kulunud aega poleks raske arvutada valguse kiirust. — Galilei katsed aga ei andnud mingeid tulemusi, sest kasutatavad vahemaad olid valguse kiirusega võrreldes liiga väikesed.



54. joon. Galilei viis valguse kiiruse määramiseks.

Esimesena määras valguse kiiruse taani astronoom Olaf Rømer 1676. aastal Jupiteri kuude varjutuste abil. Nimelt liigub ümber Jupiteri mitu kuud, mis Jupiteri varju sattudes muutuvad tükiks ajaks nähtamatuks. Teleskoobi abil vaadeldes on võimalik Jupiteri kuude varjumineku ehk varjutuse algust ja samuti ka lõppu täpselt kindlaks määrata. Sedaviisi määras Rømer Jupiterile kõige lähema kuu kahe teineteisele järgneva varjutuse alguse vahe ehk tiirlemisperioodi ($\sim 42,5$ tundi) Maa kõige lähemas



55. joon. Rømeri viis valguse kiiruse määramiseks.

asendis Jupiterile (55. joon., asend M). Et planeetide ja nende kaaslaste liikumine toimub ühtlaselt, siis peavad ka varjutuste algusmomentid üksteisele järgnema võrdsete ajavahemikkude järel. Sel põhjal on võimalik varjutuste algust pikemaks ajaks ette kindlaks määrata, koostades vastavad tabelid. Rømeri ülesandeks oligi selliste Jupiteri kuude varjutuste tabelite kontrollimine meresõidu otstarbeks. Pikemaajalised tähelepanekud aga näitasid, et ettearvutatud tabelid pole kooskõlas vaatlustega. Kui Maa liigub Jupiterist kaugemale (asend M_1), siis algavad varjutused hiljem; liigub aga Maa Jupiterile lähemale (asend M_3), siis varem, kui tabelites ette nähtud. Erinevuste seletamiseks oletas Rømer, et valgus ei levi silmapilkselt, vaid tarvitab selleks aega. Varjutuste alguse hilinemine ongi tingitud sellest, et Maa kaugus Jupiterist on vahepeal suurenenud. Suurema vahemaa läbimiseks kulub valgusel ka rohkem aega. Maa lähenemisel Jupiterile toimub loomulikult vastupidine nähtus.

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

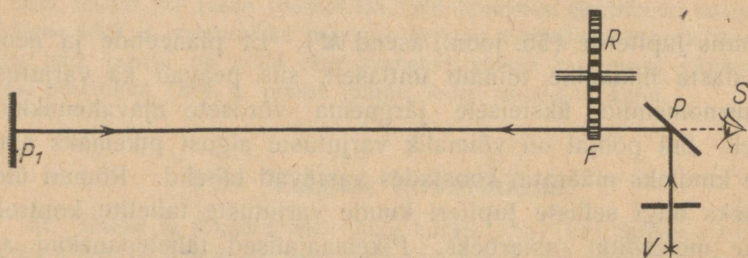
$$\text{valguse kiirus} = \frac{300\,000\,000}{1000} = 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{sek.}}$$

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

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

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

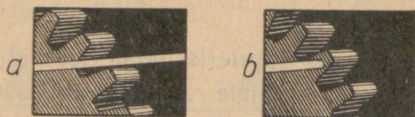
52. Fizeau' viis. Römer ja Bradley määrasid valguse kiiruse astronoomilisel teel. Galilei põhimõtte järgi maapealsete kauguste piirides määras esimesena valguse kiiruse prantsuse õpetlane F i z e a u (loe: fizoo) 1849. aastal. Fizeau' viis on skemaatiliselt järgmine (56. joon.). Valgusallikast



56. joon. Fizeau' viis valguse kiiruse määramiseks.

V langeb kitsas rööpne kiirtekimp poollābipaistvale, kiirte sihiga 45° all asetatud peeglile *P*. Osa neid kiiri tungib läbi peegli, ülejäänud osa kiiri aga peegeldub ja langeb risti kaugemal asetsevale peeglile *P*₁. Seetõttu peeglile *P*₁ langenud kiired tulevad tagasi endises sihis, langevad uuesti peeglile *P* ja tungivad osalt sellest läbi vaatleja silma *S*. Kiirtekimbu teed

läbib hammasratta *R* serv nõnda, et kohas *F* võib kiirte tee hammasratta pöörlemisel sattuda kas hammaste vahele või just hamba kohale. Esimesel juhul pääseb valgus takistamatult edasi, teisel juhul mitte (vt. 57. joonis, *a* ja *b*). Ratta *R* kiirel pöörlemisel näeb vaatleja silm *S* valgust ainult



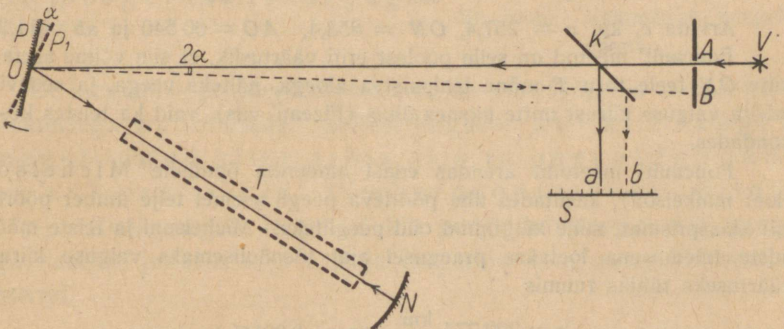
57. joon. Valguskiir võib sattuda kas hammaste vahele või hamba kohale.

siis, kui hammaste vahet läbib valguskiir kulgeb tee F -st P_1 -ni ja tagasi enne, kui valgust läbilaskva hambavahe asemele jõuab läbipaistmatu hammas. On aga hammasratta pöörlemiskiirus sedavõrd suur, et valguskiirte F -i tagasi jõudes on seal kohal juba hammas, siis me F -s valgust ei näe. Kiirust veelgi suurendades näeme valgust jälle, aga siis juba läbi järgmise hambavahe. Sedaviisi hammasratta pöörlemiskiirust muutes võime määrata ajavahemiku kahekordse F ja P_1 vahemaa läbimiseks ning sellest arvutada valguse kiiruse.

Fizeau' katse andmed olid järgmised: $FP_1 = 8,63$ km, hammaste arv 720 ning niisama palju hammastega ühelaiusi vahesid. Kui ratas tegi 12,6 tiiru sekundis, siis valgus kadus. Tähendab, peegilt P_1 tagasi jõudnud valgus sattus hamba kohale. Selleks kulus aega $\frac{1}{12,6 \cdot 720 \cdot 2}$ sek., järelikult valguse kiirus $c = s : t = 2 \cdot 8,63 : \frac{1}{12,6 \cdot 720 \cdot 2} = 313\,165 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$.

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

53. Foucault' viis. Valguse kiiruse mõõtmisel maapealsetes ulatustes teeb suurimat raskust siin esinevate äärmiselt lühikeste ajavahemikkude arvestamine. Fizeau lahendas selle küsimuse kiiresti pöörleva hammasratta abil. Teine prantsuse õpetlane Foucault (loe: fukoo) kasutas selleks kiiresti pöörlevat peeglit. Vaatame, kuidas see toimub (58. joon.).



58. joon. Foucault' viis valguse kiiruse määramiseks.

Valgusallikast V tuleb rööpne kiirtekimp läbi ava A , samuti tasaparaileelse klaasplaadi K ja langeb tasapeeglile P tema keskkohas O . Pärast peegeldumist läheb kiir suunas ON ja langeb nõguspeeglile N . Viimane on asetatud nii, et punkt O on ühtlasi peegli kõverustsentriks. Seetõttu iga

punktist O peegile N suunduv kiir langeb tema pinnale risti (iga raadius on risti kerapinnaga!), järelkult peegeldunud kiir läheb tuldud teed mööda tagasi. Jõudes klaasplaadini K peegeldub osa sellest kiirtekimbust ja annab kujutise punkti A asemel punktis a , mis on punkti A sümmeetriliseks punktiks peegli K suhtes, kuna ülejäänud osa kiiri läbib klaasplaadi ja liigub suunas A . Seega paigalseisva peegli puhul tulevad kõik nõguspeeglist N peegeldunud kiired tagasi mööda sihti OA .

Peeglit P aga saab kiiresti pöörlema panna punkti O läbiva ja joonise pinnaga risti oleva telje ümber. Selle aja kestel (τ sek.), mil valguskiir liigub O -st N -ni ja tagasi O -sse, s. o. läbib kauguse $2 ON$, on peegel P nihkunud asendisse P_1 , pöördues nurga α võrra. Seetõttu kiire NO langemisnurk väheneb nurga α võrra, tema peegeldumisnurk aga 2α võrra (tõesta seda geomeetriliselt!). Peegeldunud kiir ei lähe nüüd enam suunas OA , vaid suunas OB , tekitades a asemel skaalal kujutise b . Kujutise a nihkumist skaalal S mõõdetakse sellekohase mikroskoobi abil. Et $AB = ab$ kui peegli K suhtes sümmeetriliselt asetatud punktide vahe, siis radiaanides mõõdetud nurk $2\alpha = \frac{AB}{AO} = \frac{ab}{AO}$ ja $\alpha = \frac{ab}{2 \cdot AO}$. Kui seejuures peegel teeb n tiiru sekundis, siis

1 sekundis pöörduv peegel nurga $2\pi n$ võrra ja

τ " " " " " " α " .

Peegli pöördumisenurga suurus on võrdeline ajaga, seega

$$\frac{1}{\tau} = \frac{2\pi n}{\alpha}, \text{ millest } \tau = \frac{\alpha}{2\pi n} = \frac{ab}{2\pi n \cdot 2AO} = \frac{ab}{4\pi n \cdot AO}.$$

Et τ sekundi jooksul valgus läbib kauguse $2 ON$, siis sellest valguse kiirus

$$c = \frac{2ON}{\tau} = \frac{2ON \cdot 4\pi n \cdot AO}{ab} = \frac{8\pi n \cdot ON \cdot AO}{ab}.$$

Arvuta c , kui $n = 257,4$, $ON = 858,4$, $AO = 60\,540$ ja $ab = 11,251$

Foucault' meetod on selle poolest eriti väärtuslik, et siin võime asetada kiire ON teele toru T mõne läbipaistva ainega, näiteks veega, ja sedaviisi mõõta valguse kiirust mitte üksnes õhus (Fizeau' viis), vaid ka teistes keskkondades.

Foucault' meetodit arendas edasi ameerika õpetlane Michelson (loe: maikelson), kasutades ühe pöörleva peegli asemel telje ümber pöörlevat klaasprismat, mille külgtahud olid peegliteks. Michelsoni ja teiste mõõtmiste tulemusena loetakse praegusel ajal tõenäolisemaks valguse kiiruse väärtuseks tühjas ruumis

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

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

54. Ajaloolisi märkusi. Vanaaja teadusmehed olid enamikus arvamusel, et valgus levib silmapilkselt. Sellisele veendumusele viisid loomulikult igapäevased tähelepanekud, nagu näiteks välgu puhul: pimedas välgu

meie pea kohal sähvates näeme ümberringi kogu maastikku, kaugeid ja lähedasi esemeid korraga. Siit järeldus: kui valgus nõuaks levimiseks aega, siis peaksid kauged esemed meile hiljem nähtavaks saama.

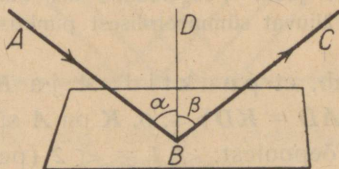
Arvamus valguse silmapilksest levimisest püsis uusaja alguseni ja seda jagasid isegi Kepler ja Descartes. Esimesena püüdis valguse kiirust katse- lisele määrata kuulus Galilei. Kuigi Galilei katsed ei andnud tulemusi, oli tema meetod siiski õige ja leidis hiljem rakendamist, kui õpiti täpsemalt mõõtma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

VIII. Tasa- ja sfäärilised peeglid.

55. Peegeldumisseadused. Ühtlases keskkonnas levib valgus sirgjooneliselte. Valguskiire suund võib muutuda peegeldumise ja murdumise teel.

Valguse peegeldumine toimub järgmiselt (59. joon.):

- 1) Langev kiir (AB), peegeldunud kiir (BC) ja ristjoon peeglile kiire langemispunktis (B) asetsevad samas tasapinnas.
- 2) Langemisnurk (α) võrdub peegeldumisnurgaga (β).



59. joon. Valguskiire peegeldumine.

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

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

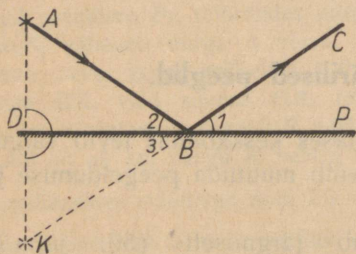
2. Kui suur peab olema langemisnurk, et valguskiire suund peegeldumisel muutuks 90° võrra?

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

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

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

56. Valguspunkti kujutis tasapeeglis. Võtame hästi väikese valgusallika (A), nn. valguspunkti, ja asetame ta tasapeegli ette (60. joon.). Valguspunkt saadab kiiri välja igas suunas,

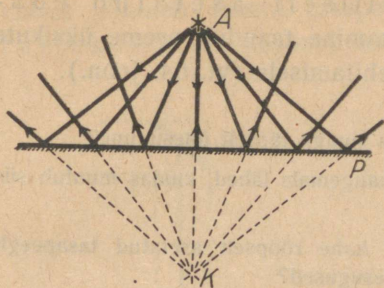


60. joon. Peegeldunud kiir näib väljuvat sümmeetrilisest punktist.

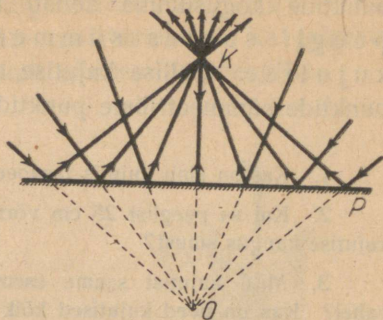
sest muidu me ei näeks teda ka igas suunas. Võtame ühe neist kiirtest (AB), mis langeb peeglile P punktis B ja peegeldub suunas BC . Tõmbame valguspunkti A ristjoone (AD) peeglile ja pikendame teda peegli taha kuni lõikumiseni peegeldunud kiire BC sihiga punktis K . Lihtne geomeetriline arutlus näitab, et punktid A ja K on peeglist ühekaugusel ($AD = KD$), s. o. K on A sümmeetriliseks punktiks peegli suhtes.

Tõepoolest: $\sphericalangle 1 = \sphericalangle 2$ (peegeldumisseaduste põhjal) ja $\sphericalangle 1 = \sphericalangle 3$ (kui tippnurgad). Järelikult $\sphericalangle 2 = \sphericalangle 3$ ja $\triangle ABD = \triangle KBD$ (täisnurksed kolmnurgad, millel ühine kaatet $[BD]$ ja $\sphericalangle 2 = \sphericalangle 3$). Seega siis $AD = KD$.

Et kiir AB oli meil võetud täitsa vabalt, siis peab iga peegeldunud kiire sihi pikendus läbima punkti, mis on peegli suhtes sümmeetriline antud valguspunktiga. Selliseks punktiks on meil ainult K . Järelikult kõik tasapeeglist peegeldunud kiired näivad väljuvat punktist, mis asetseb peegli taga sümmeetriliselt antud valguspunktiga (60. joon.). See punkt (K) on antud valguspunkti (A) kujutiseks. Et valguskiired punktist K tõepoolest ei välju, meile vaid näivad sealt väljuvat, siis nimetame sellist kujutist ebakujutiseks vastandina tõelistele kujutistele, kust valguskiired tõepoolest väljuvad (61. joon.). — Ainult silma abil me ei suuda vahet teha, kas kujutis on tõeline või ebakujutis, sest mõlemal juhul langevad kiired silma ühteviisi.

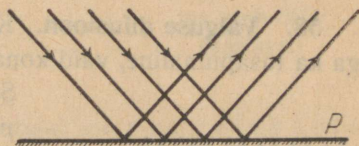


61. joon. Hajuva kiirtekimbu eba-
kujutis (K) tasapeeglis.



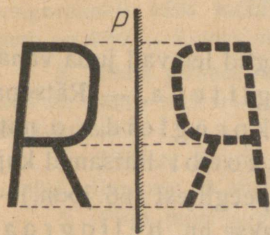
62. joon. Koonduva kiirtekimbu tõe-
line kujutis (K) peegeldumisel tasa-
peeglis.

Üldiselt säilitab kiirtekimp peegeldumisel tasapeeglist oma iseloomu: hajuv kiirtekimp annab pärast peegeldumist hajuva, koonduv — koonduva ja rööpnene — rööpnepse kiirtekimbu (vt. 62. ja 63. joon.).



63. joon. Rööpnepse kiirtekimbu peegeldumine.

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



64. joon. Eseme kujutis tasapeeglis.

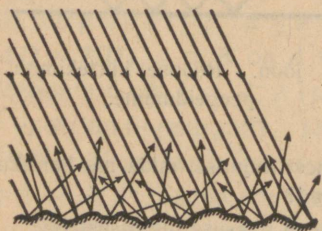
57. Eseme kujutise ehitamine tasapeeglis. Valgustatud eseme pinna iga punkt on kui valguspunkt, millest väljuvad kiired igas suunas. Seega võime eseme kujutist tasapeeglis ehitada tema üksikute punktide kaudu. Nagu nägime, on iga valguspunkti kujutis tasapeeglis sümmeetriline antud punktiga, tähendab, ka iga ese kui üksikute valgus-

punktide kogusumma annab tasapeeglis niisama suure, peegli suhtes sümmeetriliselt asetatud ebakujutise. Sellise kujutise ehitamine taandub eseme üksikute punktide sümmeetriliste punktide ehitamisele (vt. 64. joon.).

1. Kas on sinu kujutis tasapeeglis sinuga täpselt ühesugune?
2. Kui sa peeglist 25 cm võrra kaugemale lähed, kuidas muutub siis kujutise kaugus sinust?
3. Mitu kujutist saame esemest kahe rööpselt asetatud tasapeegli vahel? Kas on need kujutised kõik ühesugused?
4. Ehita kolmnurga kujutis tasapeeglis!
5. Kui kõrget vertikaalseinale asetatud peeglit läheb vaja, et ennast täies pikkuses selles näha? Kas oleneb sellise peegli suurus vaatleja kaugusest peeglist?

58. Valguse difusioon. Kehade pind pole harilikult päris sile ega ka tasapinnaline, vaid konarlik, kare ja ebakorrapäraselt kõver.

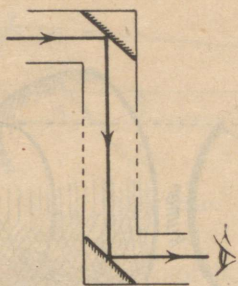
Sellist pinda võime vaadelda koosnevana suurest hulgast pisikestest, paljale silmale vaevalt nähtavatest tasapeeglitest, mis on ruumis asetatud väga mitut viisi. Seetõttu ka valgus, langedes sellisele pinnale, peegeldub igas suunas laiali ja me saame nn. hajunud ehk difuusse valguse (65. joon.). Meie loomulik Päikese, samuti ka kunstlik valgustus ongi harilikult selline hajunud ehk difuusne valgus.



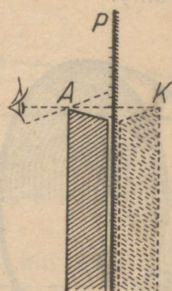
65. joon. Valguse difusioon.

59. Tasapeeglite rakendusi. Tasapeeglid leiavad juba vanast ajast laialdast rakendamist tualettpeeglitena. — Rätsepad kasutavad seljataguse näitamiseks nn. nurkpeegleid, s. o. mitut nurgeti asetatud tasapeeglit. — Ka periskoobi lihtsamal kujul võime ehitada 45° all nurgeti asetatud tasapeeglitest (66. joon.). — Päikesekiirte abil signaliseerimist toimetatakse nn. heliograafi abil, mis koosneb ühest või kahest tasapeeglist. — Pöörlev peegel leiab rakendamist õige väikeste ajavahemikkude mõõt-

miseks, nagu me seda nägime valguse kiiruse määramisel. — Meresõidul laialt tarvitatava nurgamõõduriista sekstandi ehitus põhineb samuti tasapeeglite omadustel. — Ka jalgratta refleksklaas koosneb harilikult mitmest tasapeeglist.



66. joon. Periskoobi skeem.

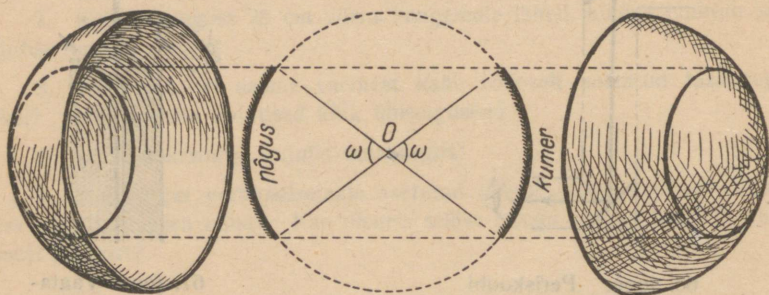


67. joon. Vaatama peab risti skaalaga.

Mõõtmistehnikas on sageli tarvitusel nn. peegelskaalad, mis võimaldavad täpsema lugemi saamist skaalal. Lihtsamal kujul näeme seda 67. joonisel. Et hoiduda nn. parallaktilise vea tekkimisest, kasutatakse peegelskaalat. Siin toimub viseerimine vaadeldava punkti (*A*) ja tema kujutise (*K*) sihis, sest see siht on alati risti peeglipinnaga ning ühtlasi temal asetseva skaalaga. Sedaviisi saadakse alati lugemi õige väärtus.

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

60. Sfäärilised peeglid. Kõverpeeglitest vaatleme nn. sfäärilisi peegleid, s. o. niisuguseid, kus peeglipinnaks on osa kerapinnast ehk sfäärist. Kui peeglipinnaks on kera sisepind, siis nimetame sellist peeglit nõguspeegliks. On aga peeglipinnaks kera välispind, siis on meil tegemist kumerpeegliga (68. joon.).



68. joon. Nõgus- ja kumerpeegel.

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

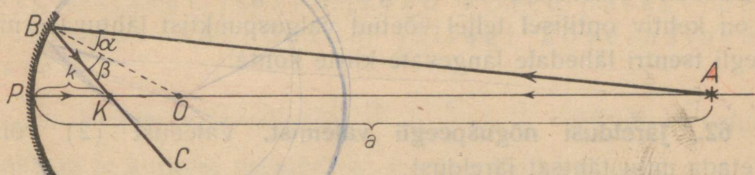
1. Kui suur on peegli ruuminurk, kui peegli raadius on 10 korda väiksem kõverusraadiusest? Kui suure osa kerapinnast moodustab sel juhul peegli pind?

2. Ühe nõguspeegli raadius on 5 cm ja tema kõverusraadius 20 cm. Teise nõguspeegli vastavad arvud on 3 cm ja 15 cm. Kui suure osa kerapinnast moodustab peeglipind esimesel ja teisel juhul?

Kumb neist peeglitest on suurema ruuminurgaga? Kontrolli arvutuse tulemusi, ehitades samast kõverustsentrist mõlema peegli ristlõiki läbi optilise telje!

61. Nõguspeegli valem. Olgu meil antud 69. joon. nõguspeegel läbilõikes. Tema kõverustsenter on O , kõverusraadius OP , peegli tsenter P ja optiline telg sirge PO . Võtame optilisel teljel mõne valguspunkti A .

Temast väljuvad kiired igas suunas. Osa neist langeb peeglile P . Tõestame matemaatilise arutluse abil, et valguspunktist nõguspeeglile langenud ja sellelt peegeldunud kiired koonduvad ühte punkti, s. o. tekitavad kujutise.



69. joon. Peegeldumine nõguspeeglist.

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

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

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

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

$$AB \approx AP = a \text{ (valguspunkti kaugus peeglist) ja} \\ BK \approx KP = k \text{ (kujutise " ")}.$$

$$\text{Edasi } AO = AP - PO = a - r \text{ ja} \\ OK = OP - PK = r - k, \text{ kus}$$

r on peegli kõverusraadius (OP).

Asetades valemisse (1) vastavad uued tähistused, saame:

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

Järelikult $f = k = \frac{r}{2}$; $\frac{1}{f} = \frac{2}{r}$ ja

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f} \dots \dots \dots (3).$$

Viimasel kujul on nõguspeegli valemit hõlpus meeles pidada.

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

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

kõverustsentrist väljuvad kiired pärast peegeldumist koonduvad jällegi kõverustsentrisse.

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

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

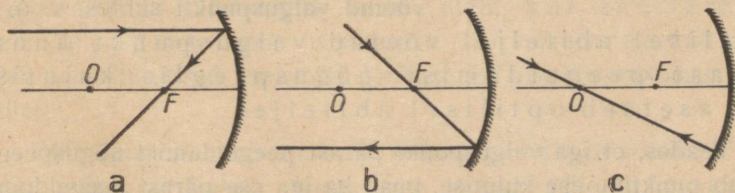
$$k = \frac{af}{a-f}$$

Sellest valemist nähtub, et k saab positiivsed väärtused, kui $a > f$, s. o. valguspunkt asetseb peeglist kaugemal kui fookus. On aga $a < f$, s. o. valguspunkt asetseb peegli ja fookuse vahel, siis on $a - f < 0$ ja k omandab negatiivse väärtuse. Tähendab, viimasel juhul me ei saa kujutist peegli ees, vaid tekib ebakujutis peegli taga.

Kõiki eelmisi juhtusid on võimalik tõestada ka katseliselt.

Kokkuvõttena peame meeles:

1) Optilise teljega rööpselt langev kiir pärast peegeldumist nõguspeeglis läheb läbi fookuse (70. joon., a).



70. joon. Peegeldumisjuhud nõguspeeglist.

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

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

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

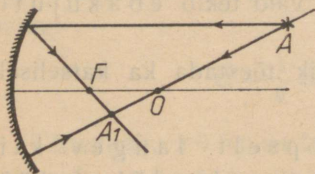
2. Nõguspeegli fookuse kaugus on 15 cm (12,5 cm; 75 cm). Kui suur on sel juhul kõverusraadius?

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

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

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

63. Kujutiste ehitamine nõguspeeglis. Eespool nägime, et optilisel teljel võetud valguspunkt annab pärast peegeldumist nõguspeeglis kujutise, mis asetseb samuti optilisel teljel. Olgu meil nüüd antud mõni valguspunkt väljaspool optilist telge (71. joon.). Tõmmates läbi selle valguspunkti (*A*) ja kõverustsentri (*O*) sirge *AO*, saame nn. optilise abitelje, mis oma geomeetriliste ja optiliste omaduste poolest ei erine optilisest teljest (ka abitelg on peeglipinnaga risti). Järelikult kõik arutlused optilisel teljel võetud valguspunkti suhtes on kehtivad ka optilisel abiteljel võetud valguspunkti suhtes, s. o. ka



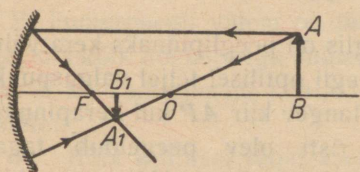
71. joon. Optilisel abiteljel asetseva valguspunkti kujutis.

optilisel abiteljel võetud valguspunkt annab pärast peegeldumist nõguspeeglis kujutise, mis asetseb optilisel abiteljel.

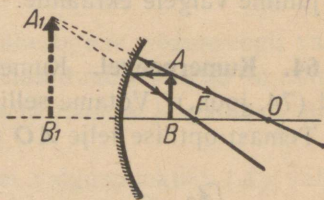
Teades, et iga valguspunkt pärast peegeldumist nõguspeeglis annab punktitaolise kujutise, peab ka iga ese pärast peegeldumist andma kujutise, sest valgustatud eset võime vaadelda koosne-

vana üksikuist valguspunktidest. Vaatame nüüd, kuidas leida mõne eseme, näiteks noole AB kujutist pärast peegeldumist nõguspeeglis (72. joon.). Lihtsuse mõttes kasutame esemena ühel pool optilist telge asetsevat noolt, sest teisel pool optilist telge olevate punktide kujutiste ehitamine toimub samalaadselt. Ka on kujutiste selguse mõttes kasutatud võrdlemisi suure ruuminurgaga peegleid.

Et kõik mõnest valguspunktist väljuvad kiired pärast peegeldumist koonduvad ühte punkti, siis on küllalt, kui leiame kahe sellest valguspunktist väljuva kiire lõikepunkti. Meil aga on teada koguni



72. joon. Tõelise kujutise ehitamine nõguspeeglis.



73. joon. Ebakujutise ehitamine nõguspeeglis.

kolme kiire suund pärast peegeldumist (vt. eelmist §-i), nimelt: rööpne teljega, läbi fookuse ja läbi kõverustsentri minev kiir. Kus lõikuvad kaks neist kiirtest, seal lõikuvad pärast peegeldumist ka kõik teised antud valguspunktist väljuvad kiired.

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

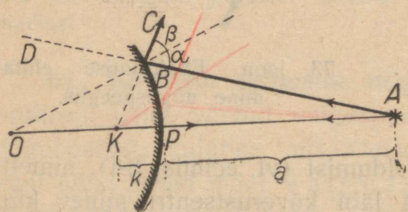
Ümberpööratavuse printsiibi põhjal, samuti ka joonisest pole raske näha, et juhul, kui ese asetseb fookuse ja kõverustsentri vahel, siis on kujutised tõe-

lised, ümberpööratud ja suurendatud ning nad asetsevad väljaspool kõverustsentrit.

Samalaadset ehitusviisi rakendades juhul, kui ese asetseb peegli ja fookuse vahel, näeme, et kiired pärast peegeldumist ei löiku peegli ees, küll aga lõikuvad nende pikendused peegli taga. Sel juhul saame antud esemest **ebakujutise**, mis on päripidine ja suurendatud (73. joon.).

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

64. Kumerpeegel. Kumerpeeglis on peeglipinnaks kera välispind (74. joon.). Võtame sellise peegli optilisel teljel valguspunkti A . Temast optilise telje AO sihis langev kiir AP kui kerapinnaga



risti olev peegeldub tagasi samas sihis. Mõne teise kiire AB sihi leidmiseks ehitame vastavad langemis- ja peegeldumisnurgad α ja β . Näeme, et need kaks kiirt AP ja AB pärast peegeldumist ei löiku

74. joon. Peegeldumine kumerpeeglist. peegli ees, sest nad on hajuvad kiired. Küll aga lõikuvad nende pikendused peegli taga punktis K . Samast punktist A näivad väljuvat pärast peegeldumist ka kõik teised punktist A kumerpeeglile langevad kiired.

Pikendades AB sihti peegli taha (BD) näeme, et raadius OB on $\triangle ABK$ suhtes välisnurga KBD poolitaja, järelikult

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

Kasutades nõguspeegli puhul tarvitatud lühendatud tähistusi, saame väikese ruuminurgaga peeglite puhul:

$$AB \approx AP = a \text{ (valguspunkti kaugus peeglist),}$$

$$BK \approx KP = k \text{ (kujutise " ").}$$

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

$OK = OP - PK = r - k$, kus r on peegli kõverusraadius.

Asendades saadud tähistused valemisse (1), saame:

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

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{-k} = \frac{2}{-r} \text{ ehk kui } \frac{r}{2} = f, \text{ siis}$$

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

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

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

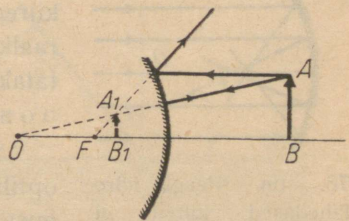
1) Kõik optilisel teljel asetsevast valguspunktist (A) väljuvad kiired pärast peegeldumist näivad väljuvat ühest punktist (K), mis asetseb peegli taga ja on selle valguspunkti ebakujutiseks.

2) Kõverustsentri suunas langevad kiired peegelduvad tagasi langemissihis.

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

4) Fookuse suunas langevad kiired peegelduvad rööpselt optilise teljega.

5) Kumerpeegel annab esemetest päripidised vähendatud ebakujutised, nagu see nähtub 75. joonisest.



75. joon. Kujutise ehitamine kumerpeeglis.

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

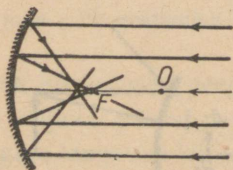
2. Nõguspeegel annab 2,4 m kaugusel olevast esemest tõelise kujutise 80 cm kaugusel peeglist. Leia fookuse kaugus ja kõverusraadius!

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

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

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

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



76. joon. Peegli ääre lähedased kiired ei koondu fookuses.

Nähtust, kus peegli äärtele langevad kiired ei koondu samas fookuses kui tsentraalkiired, vaid peeglile lähemale, nimetatakse sfääriliseks aberratsiooniks ehk kõrvalekaldeks.

Sfääriline aberratsioon teeb palju tüli optiliste riistade ehitamisel. Tema vältimiseks kasutatakse kerapinnast erinevaid peeglikujusid, nn. *paraboloidepeegleid*, kus kõik rööpsed kiired pärast peegeldumist koonduvad ühte punkti, või jälle kaetakse peegli äärtele langevad kiired kinni eriliste *valgustõkendite* (diafragmade) abil.

67. Sfääriliste peeglite rakendusi. Sfäärilised peeglid leiavad rakendamist peamiselt prožektorite (helgiheitjate) ehitamisel, millede abil saab valgust juhtida soovitavas suunas, näiteks autolaternad, majakatuli, suured prožektorid sõjaväes vaenlase lennukite avastamiseks, lennuväljadel maandumis-

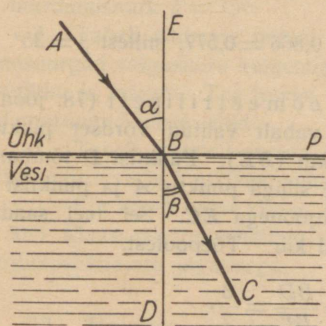
kohtade märkimiseks, arstidel silma, kõrva ja suu valgustamise peeglid jne. Samuti kasutatakse nõgus- ja kumerpeegleid teleskoopide ehitamisel (vt. § 96). Pääkesepaistelisel lõunamaadel on koguni katset tehtud nõguspeeglitega Pääkese energia koondamise abil käima panna aurumasinaid.

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

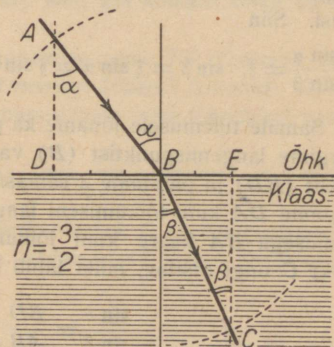
Metallist kumer- ja nõguspeegleid tunti juba õige vanal ajal. Alhazen teadis, et nõguspeegli fookus asetseb poole raadiuse kaugusel peeglist. Lähemalt käsitleb nõguspeegli fookuse omadusi G. Porta (1538—1615) oma töös „*Magia naturalis*“.

IX. Valguse murdumine.

69. Murdumiseseadused. Ühtlases keskkonnas levib valgus sirgjooneliselt. Ühest keskkonnast teise minnes muudab valgus oma levimissuunda ehk murdub (77. joon.). Katsed näitavad, et valguskiire murdumisel kehtivad järgmised seadused:



77. joon. Valguskiire murdumine.



78. joon. Murdunud kiire sihi ehitamine.

1) Langev kiir (AB), murdunud kiir (BC) ja keskkondade lahutuspinnaile langemise punk-

tis (B) tõmmatud ristjoon (DE) asetsevad samas tasapinnas.

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

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

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

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

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

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

Samale tulemusele jõuame ka puht-geomeetriliselt (78. joon.). Märgime langemispunkti (B) vasakule 3 vabalt valitud võrdset pikkusühikut (BD) ja paremale 2 samasugust ühikut (BE). Punkti D tõmbame ristjoone DA kuni lõikumiseni langeva kiire sihiga punktis A ja punkti B raadiusega BA kaare kuni lõikumiseni ristjoonega EC . Sel teel saadud punkt C ongi otsitav, mida läbib murdunud kiir. Tõepoolest,

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

sest konstruktsiooni põhjal $AB = BC$.

Samuti kui peegeldumisel, kehtib ka murdumisel ümberpööratavuse printsiip, s. o. kui valguskiir langeb keskkondade lahtuspinnale murdunud kiire sihile, siis ta murdub endise

langemiskiire sihis. Sel juhul tuleb ka murdumisnäitajaks võtta endise murdumisnäitaja (n) pöördväärtus ($\frac{1}{n}$). Järelikult, kui valguskiir murdub veest õhku, siis on õhu murdumisnäitajaks vee suhtes $\frac{3}{4}$, klaasist õhku murdumise puhul $\frac{2}{3}$.

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

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

Toome siin mõnede tuntud ainete absoluutsed murdumisnäitajad.

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

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

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

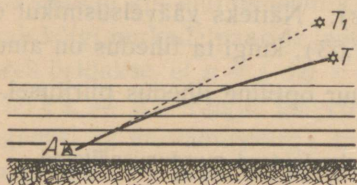
3. Tabeli andmete põhjal arvuta langemisnurgale 70° vastavad murdumisnurgad valguskiire kulgemisel tühjast ruumist (õhust) teemanti, väävelsüsinikku ja jäässe! Tee joonis, kus on enam-vähem õieti tõmmatud vastavad murdunud kiirte sihid!

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

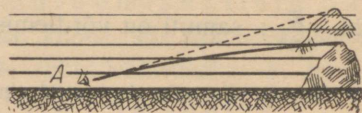
5. Kiir läheb veest klaasi. Arvuta murdumisnurk β , kui langemisnurk α on 50° ! Klaasi murdumisnäitaja vee suhtes võrdub klaasi ja vee absoluutsete murdumisnäitajate jagatisega.

70. Valguse murdumise nähtusi Maa õhkkonna mõjul. Õhk-kond ümbritseb Maad kontsentrilise kihina, mille tihedus maapinnast kõrgemale tõustes järjest väheneb. Taevakehadelt (Päike, tähed) tulevad valguskiired, läbides Maa õhkkonna eri tihedusega kihte, murduvad ja nende tee muutub kõveraks (79. joon.). Meie

aga näeme taevakeha temalt tulevate valguskiirte tee viimase osa sihis, järelikult kõrgemal, kui ta on tõepoolest. Seda nähtust nimetatakse astronoomiliseks refraktsiooniks. Refraktsiooni mõju on kõige suurem horisondi lähedal ($35'$), peakohal (seniidis) võrdub see nulliga. Refraktsiooni tõttu näeme Päikest horisondi äärel veel siis, kui ta tõepoolest on juba horisondi all. Ka Päikese ketta lapikuks muutumine horisondi lähedal on seletatav refraktsiooniga, mis tõstab Päikese ketta alumist serva suuremal määral kõrgemale kui ülemist (umbes $\frac{1}{3}$ läbimõõdu võrra).



79. joon. Astronoomiline refraktsioon.



80. joon. Terrestiline refraktsioon.

Mitte üksnes taevakehad, vaid ka kauged maapealsed esemed paistavad meile kõrgemal, kui nad on tõepoolest, sest murdumise tõttu painduvad valguskiired tihedamasse õhukihtidesse minnes maale lähemale (80. joon.). Sellist nähtust nimetatakse terrestriliseks refraktsiooniks. Seetõttu näeme ka tublisti kaugemale, kui see ilma õhkkonnata võimalik oleks.

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

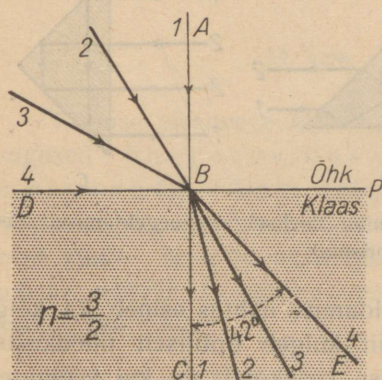
71. Täieline sisepeegeldumine. Kui valguskiir läheb optiliselt hõredamast keskkonnast optiliselt tihedamasse, näiteks õhust klaasi, siis on murdumisnurk alati väiksem kui langemisnurk ja me

võime suuruselt igasugusele langemisnurgale leida vastava murdumisnurga. Kõige suuremale langemisnurgale $\alpha_{\text{maks.}} = 90^\circ$ vastab muidugi ka kõige suurem murdumisnurk $\beta_{\text{maks.}}$. Leiame ta väärtuse.

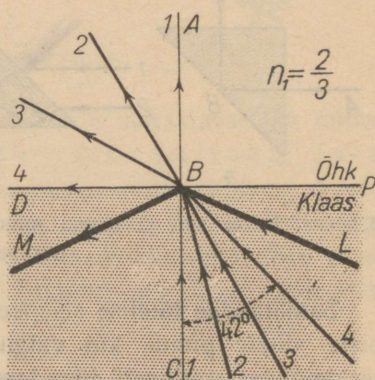
Murdumisreeduste põhjal $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$, järelikult

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

Tähendab, kõik **AB** ja **DB** vahel langevad kiired (81. joon.) peavad pärast murdumist mahtuma nurka **CBE** = 42°. Väljapoole seda ruumi, s. o. nurka **EBP**, ei tungi ühtegi murdunud kiirt.



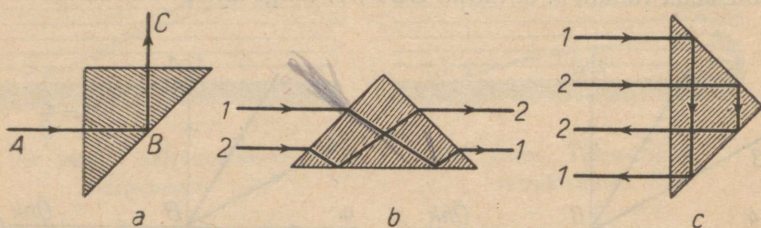
81. joon. Valguskiirte murdumine õhust klaasi.



82. joon. Valguskiirte murdumine klaasist õhku.

Ümberpööratavuse printsiipi rakendades võtame endised murdunud kiirte sihid langemiskiirte sihtideks (82. joon.), siis endised langemiskiirte sihid muutuvad murdunud kiirte sihtideks. Et sel juhul kiired lähevad optiliselt tihedamast keskkonnast (klaasist) optiliselt hõredamasse keskkonda (õhku), siis on murdumisnurgad suuremad kui langemisnurgad. Kõige suuremaks murdumisnurgaks õhus võib olla 90°. Nagu nägime, vastas sellele klaasis langemisnurk 42°. Kui teeme langemisnurga klaasis suuremaks kui 42° (kiir **LB**), siis murdumisreeduste järgi ei leia

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



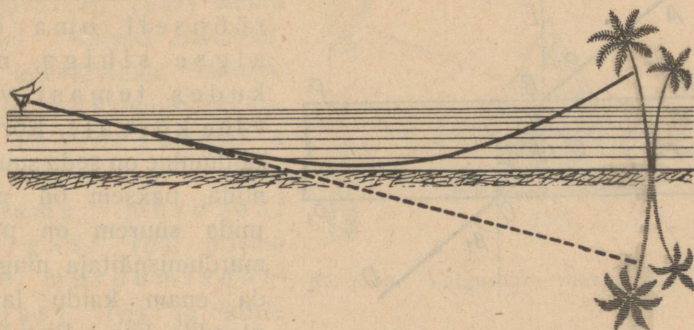
83. joon. Kiirte sihi ja suuna muutumine täielisel sisepeegeldumisel täisnurkses prisma.

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

Nurka CBE , antud juhul 42° , nimetatakse täielise sisepeegeldumise piirnurgaks. Nagu nägime, võrdub täielise sisepeegeldumise piirnurga siinus murdumisnäitaja (n) pöördväärtusega, s. o. $\sin \beta_{\text{maks.}} = \frac{1}{n}$. Siit nähtub, et piirnurga ($\beta_{\text{maks.}}$) väärtus oleneb ainult murdumisnäitajast ja on seda väiksem, mida suurem on murdumisnäitaja. Vastavad arvutused näitavad, et täielise sisepeegeldumise piirnurga suurus on veel 48° , klaasil 42° , teemandil 23° .

Täielise sisepeegeldumise nähtus leiab rohkesti kasutamist optiliste riistade ehitamisel, kui on vaja muuta valguskiirte sihti. Näiteks 83. joonisel (a) on näha, kuidas rõhtkiir AB pärast sise-

peegeldumist muutub püstkiireks BC ja kuidas rööpsete kiirte järjekord pärast ühe- (b) või kahekordset (c) sisepeegeldumist muutub otse vastupidiseks (ülemised alumisteks). Samuti on antud juhul oluline, et siin peegelduvad kõik langevad kiired.



84. joon. Fatamorgaana.

Täielise sisepeegeldumisega õhus on seletatavad ka mitmesugused õhupeegeldus-nähtused (miraaž, fatamorgaana). Näiteks kange kuumuse tõttu (kõrves) võivad õhkkonna maalähedased kihid omada vähemat tihedust kui kõrgemad kihid. Seetõttu tekib õhus täieline sisepeegeldumine ja me näeme näiteks kõrgete esemete (puude) peeglipilte maapinna suhtes (84. joon.).

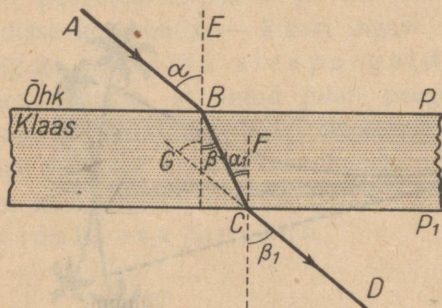
1. Kala on 50 cm allpool veepinda. Missuguses ruumpiirkonnas näeb kala kõike ülalpool veepinda olevat „maailma“?

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

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

72. Murdumine tasaparalleelses plaadis. Võtame tüki paralleelsete tasapindadega piiratud klaasi, nn. **t a s a p a r a l l e e l s e p l a a d i**, ja jälgime valguskiire murdumist selles (85. joon.). Ehitades vastavad langemis- ja murdumisnurgad (α ja β ; α_1 ja β_1) näeme, et valguskiire tee kulgeb klaasis mööda lõiku BC ning väljudes klaasist mööda sihti CD . Tasapindade P ja P_1 rööpsuse tõttu on ka ristjooned BE ja CF isekeskis rööpsed, järelikult põik-

nurgad β ja α_1 on võrdsed. Sellest järgneb edasi überpööratavuse printsiibi põhjal, et ka $\alpha = \beta_1$, millest järeldus: $AB \parallel CD$. Tähen-
dab, valguskiir, tungides läbi tasaparalleelse



85. joon. Valguskiire murdumine tasa-
paralleelses plaadis.

plaadi, kulgeb pä-
rast murdumist
rööpselt oma esi-
algse sihiga, nih-
kudes temast vaid
vähe kõrvale. Kõrvale-
kaldumine on seda suurem,
mida paksem on plaat,
mida suurem on plaadi
murdumisnäitaja ning mi-
da enam kaldu langeb
plaadile kiir. Risti tasa-
paralleelsele plaadile lan-
gevad kiired ei muuda
oma sihti.

Meie arutlus kehtib igasugusest ühtlasest ainest koosneva tasa-
paralleelse plaadi kohta, olgu see näiteks vesi, õhk, kivisool vm.
Samuti jääb ühe plaadi kohta tuletatud omadus kehtima ka mit-
mest tasaparalleelsest plaadist koosneva liitplaadi kohta.

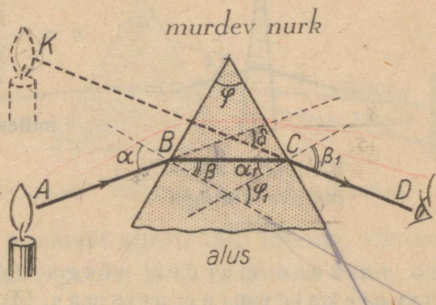
1. Millest võime järeldada, kas akn klaas on ühtlase paksusega ja
ilma nn. villideta?

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

73. Murdumine prismas. Optiliseks prismaks füü-
sikas nimetatakse kahe lõikuva tasapinnaga piiratud tükki läbi-
paistvat ainet, näiteks klaasi. Lõikuvaid tasapindu kutsutakse
murdvateks tasapindadeks, nende lõikejoont murd-
vaks servaks ja nende tasapindade vahelist joonnurka
murdvaks nurgaks. Murdva serva vastaspind on prisma
aluseks.

86. joonisel on kujutatud läbilõikes selline prisma murdva
nurgaga φ . Katsed ja kiirte käigu ehitamine näitavad, et optilist
prismat läbivad valguskiired kalduvad kõrvale

prisma aluse poole. Seetõttu nihkuvad läbi prisma vaadates esemete kujutised prisma murdva serva poole. Kõrvalekaldumise suurus mõõdab kaldenurk δ prismale langeva (AB) ja prismast väljuva kiire (CD) suuna vahel. Katsed näitavad, et ühevärviliste (homogeensete) valguskiirte puhul kaldenurga δ suurus oleneb prisma murdvastnurgast (φ), prisma aine murdumisnäitajast (n) ja kiirte langemisnurgast prismale (α) ning suureneb ühes nende suurenemisega. Sama prisma puhul on δ väärtus kõige väiksem siis, kui valguskiir läbib prisma sümmeetriliselt ($\alpha = \beta_1$), s. o. kui kiired AB ja CD moodustavad prisma murdvate tasapindadega võrdsed nurgad. Määrates katses δ minimaalse väärtuse, saame selle põhjal arvutada prisma murdumisnäitaja n .



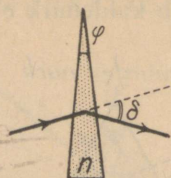
86. joon. Valguskiire murdumine prismas.

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

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

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

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



87. joon. Väikese murdva nurgaga prisma.

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

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

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

s. o. väikese murdva nurga (φ) puhul on valguskiire kõrvalekaldumine prisma (δ) võrdeline murdva nurgaga (87. joon.).

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

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

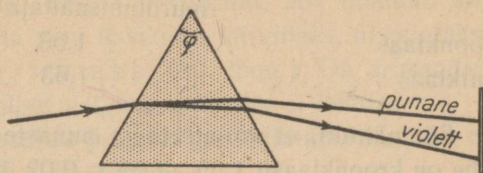
3. Valguskiir langeb risti korrapärasele kolmnurksele klaasprismale. Joonesta kiirte tee prisma läbimisel!

4. Arvuta prisma aine murdumisnäitaja n , kui sümmeetriliselt prisma läbiv kiir kaldub kõrvale $\delta = 45^\circ$ võrra ja prisma murdev nurk $\varphi = 60^\circ$! Lahenda sama küsimus juhul, kui $\delta = 20^\circ$ ja $\varphi = 30^\circ$!

74. Värvide hajumine. Spekter. Eespool vaatlesime murdumist prisma ainult ühevärviliste valguskiirte, s. o. näiteks kollaste, punaste jne. kiirte puhul. Kui aga katsetada mitut värvi kiirtega, siis näeme, et samadel muudel tingimustel valguskiire kõrvalekaldumine prisma on erinev kiirte värvist. Näiteks kollased kiired kalduvad enam kõrvale kui punased, sinised enam kui rohelised, jne. Kui võtta mõni mitmest värvist koosnev valguskiir, milliseks osutub näiteks iga valge kiir, siis prisma läbides laguneb selline kiir üksikuiks värvideks, sest erisuguse murdumise tõttu läheb iga värv prisma eri teed. Me ütleme sel puhul, et prisma hajutab ehk dispergeerib kiiri, lahutades need üksikuiks värvideks. Nähtust ennast aga nimetame värvide hajumiseks ehk dispersiooniks.

Esimesena tegi sellise katsed inglise teadusmees I. Newton a. 1666, lahutades päikesekiired üksikuiks vikerkaarevärvi-

deks. Seega valge kiirtekimp prismat läbides ei anna mitte valget kiirtekimpu, vaid hulga värvilisi. Üleminek ühest teise on pidev. Harilikult eraldatakse sedaviisi saadud värvilises ribas ehk spektris kõrvalekaldumise suuruse järjekorras järgmised värvid: punane, oranž, kollane, roheline, helesinine, tumesinine ja violett.



88. joon. Valguse lahtutumine prismas.

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

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

Eelmise põhjal tuleb mõne aine murdumisnäitajast kõneldes alati lisada, mis värvi valguskiire kohta see murdumisnäitaja käib, sest igal värvilisel kiirel on erisugune murdumisnäitaja. Näitena toome siin ühe klaasisordi (kroonklaasi) murdumisnäitajad üksikute eri värvide teatud kiirte kohta:

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

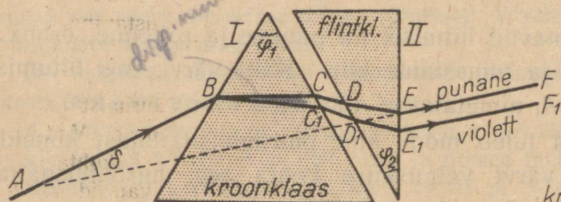
75. Akromaatiline prisma. Liitkiire värvide hajumine ehk dispersioon murdumisel on suureks takistuseks optiliste riistade ehitamisel. Seetõttu näiteks saame ühe valge kiire murdumisel prismas või läätses hulga värvilisi. Kiirtekimbu keskosas katavad värvid üksteist ja annavad meile valge värvi, kuna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

Vaatleme lähemalt järgmisi kroon- ja flintklaasi murdumisnäitajaid:

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

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

Olgu meil näiteks kroonklaasist prisma murdva nurgaga φ_1 , kusjuures punaste kiirte kõrvalekaldumise nurk $\delta_1 = 70^\circ$ ja dispersiooninurk punaste ja violetsete kiirte vahel on 5° .



89. joon. Akromaatiline prisma.



90. joon. Akromaatiline lääts.

Teine prisma flintklaasist, murdva nurgaga φ_2 , annab punaste kiirte jaoks kõrvalekaldumise $\delta_2 = 40^\circ$ ja punaste ning violetsete kiirte vahel oleva dispersiooninurga suuruseks samuti 5° . Kui need kaks prisma liita nii, nagu on kujutatud 89. joonisel (alused vastamisi), siis valge kiir, läbides mõlemad prismad, annab punaste kiirte jaoks üldise kõrvalekaldumise suuruse $\delta = \delta_1 - \delta_2 = 70^\circ - 40^\circ = 30^\circ$. Mis puutub dispersioonis, siis punaste ja violetsete kiirte dispersiooninurga võrdsuse tõttu mõlemaid prismasid läbinud violetset kiired, väljudes pärast murdumist teisest prismast, lähevad rööpselt punastega, s. o. ilma dispersioonita.

Sedaviisi on võimalik pärast murdumist punaseid ja violetteid kiiri rööpselt muuta. Teised kiired asetsevad nende vahepeal.

Ka need koonduvad enam-vähem ühte. Tulemusena saame küll valguskiire kõrvalekaldumise murdumisel, kuid ilma üksikuiks värvideks hajumata ehk dispersioonita. Sellist liitprismat, mis muudab küll kiirte suunda, kuid ei hajuta neid üksikuiks värvideks, nimetatakse akromaatiliseks prismaks (89. joon.). On arusaadav, et akromaatiline prisma valget valgust spektriiks ei lahuta.

Analoogiliselt akromaatiliste prismadega ehitatakse ka akromaatilised läätsed (90. joon.).

76. Ajaloolisi märkusi. Valguse murdumise nähtus oli tuntud juba Eukleidesele. Ühes oma töös kirjeldab ta õpikuis sageli esinevat lihtsat katset valguse murdumise kohta järgmiselt: asetada mõni ese anuma põhja ja minna anumast kaugemale nii, et vaatleja seda eset anuma ääre tagant enam ei näeks; kui aga anumasse vett kallata, tuleb ese jälle nähtavale. Cl. Ptolemaios (II saj. p. Kr.) teadis, et kui valguskiir läheb murdumisel tihedamasse keskkonda, siis ta läheneb ristjoonele. Ptolemaios toimetas ka rea mõõtmisi langemis- ja murdumisnurga suuruse kohta ning tuletas nende mõõtmiste põhjal lause: langemis- ja murdumisnurga suhe on kahe antud keskkonna puhul konstantne, s. o.

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

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

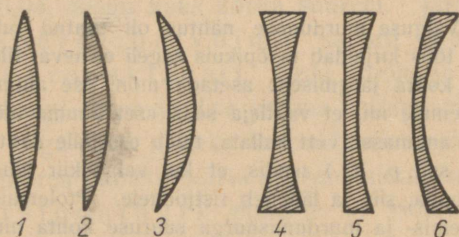
Valguskiire nihkumist tasaparalleelse plaadi läbimisel kirjeldas esimesena Fr. Maurolycus (1494 — 1577).

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

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

X. Sfäärilised läätsed.

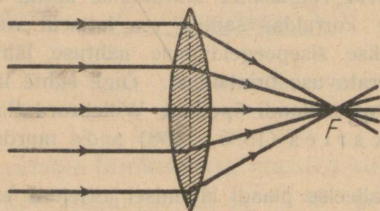
77. **Läätsede liigitus.** Sfäärilise läätses all mõistetakse läbi-
paistvat keskkonda, harilikult klaasi, mis on piiratud kerapinda-
dega. Ühe kerapinna asemel võib olla ka tasapind. Olenedes
sellest, kas lääts on keskelt paksem kui äärtest, või ümberpöördu-
lt, jagatakse läätsed kahte liiki: **kumerateks** (kaksik-, tasa- ja
nõguskumer) ning **nõgusateks** (kaksik-, tasa- ja ku-
mernõgus). Nimeta 91. joonisel kujutatud läätsi 1—6-ni!



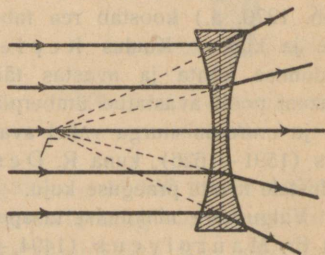
91. joonis. Sfäärilised läätsed.

ja sfääriliste pindade kõverusraadiustest (r_1
ja r_2).

Nagu teame, on ku-
merläätses üldiseks oma-
duseks koondada, nõ-
gusläätses omaduseks aga
hajutada valguskiiri
(92. ja 93. joon.). See
läätsede omadus, nagu
hiljem näeme, oleneb
läätses aine mur-
dumisnäitajast (n)



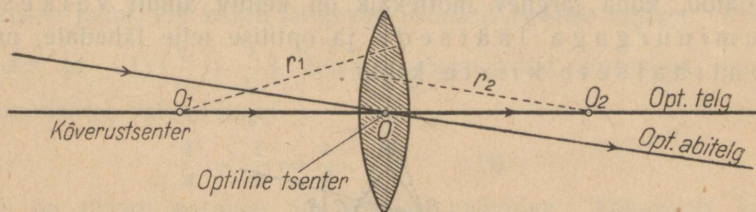
92. joon. Kumerlääts koondab kiiri.



93. joon. Nõguslääts hajutab kiiri.

78. **Läätses optiline telg, abitelg ja tsenter. Fookus.** Sirget, mis läheb läbi läätses kõverustsentrite O_1 ja O_2 , nimetatakse läätses optiliseks teljeks (94. joon.). Loomulikult on optiline telg risti läätses pindadega ja seetõttu optilist telge mööda läätses langevad kiired läbivad läätses ilma oma sihti muutmata. Peale selle on läätses keskosas

(sümmeetriliste pindadega läätsedel läätses keskpunktis) veel eriline punkt, nn. optiline tsepter (O), mille suunas langevad kiired läbivad läätses ilma oma sihti muutmata. Tõepoolest, läätsed on harilikult õhukesed ja kiired ei lange kaugel optilisest teljest. Et läätses keskosas võime vaadelda kui tasaparalleelset plaati, siis läbivad kiired selle enam-vähem ilma oma sihti muutmata. Seetõttu nimetataksegi läbi optilise tseptri minevat sihti optiliseks abiteljeks.



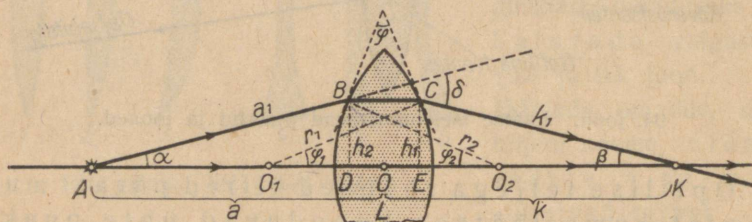
94. joon. Läätses iseloomustavad punktid ja jooned.

Optilise teljega rööpsed kiired pärast murdumist kumerläätses koonduvad ühte punkti (92. joon.), mida nimetatakse fookuseks ehk tulipunktiks. Nõgusläätses puhul (93. joon.) optilise teljega rööpsed kiired pärast murdumist näivad väljuvat ühest punktist, mida nimetatakse ebafookuseks ehk ebatulipunktiks. Rakendades ümberpööratavuse printsiipi võime öelda: kumerläätses fookusest väljuvad kiired pärast murdumist kumerläätses lähevad rööpselt optilise teljega. Samuti lähevad rööpselt optilise teljega nõgusläätses fookusse suunduvad kiired. Seega on meil nii kumer- kui ka nõgusläätses puhul peale optilise telje teada veel kolme kiire siht pärast murdumist läätses, nimelt: optilise abitelje sihis, rööpselt teljega ja läbi fookuse minev kiir. Neid kiiri kasutame kujutiste ehitamisel läätsedes samuti, nagu me seda tegime kujutiste ehitamisel sfäärilistes peeglites.

Läätses üldiseks iseloomustamiseks kasutame nagu peeglitegi puhul nn. läätses ruuminurka, mille moodustab fookuse ja läätses kontuuri abil kujundatud koonuse pind. Harilikult kasutatakse võrdlemisi väikese ruuminurgaga läätsi.

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

79. Läätsse valem. Olgu meil antud läbilõikes kumerlääts L optilise teljega $O_1 O_2$, kõverusraadiustega r_1 ja r_2 ning murdumisnäitajaga n . Joonise selguse huvides on läätsse paksusega tublisti liialdatud, kuna järgnev mõttekäik on kehtiv ainult väikese ruuminurgaga läätsede ja optilise telje lähedate, nn. tsentraalsete kiirte kohta.



95. joon. Kumerläätsse valemi tuletamine.

Sel juhul võime siin rakendada § 73 tuletatud valemit

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

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

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

Arvestades eelmisi tähistusi võime joonise põhjal kirjutada:

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

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

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

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

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

Nagu näeme, on läätse valem vasak pool kujult sama, mis nõguspeegli puhul. Ka parema poole võime teha nõguspeegli valemiga ühesuguseks. Oletame, et valguspunkt A nihkub mööda optilist telge läätsest järjest kaugemale kuni lõpmatuseni. Siis

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

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

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

dades $(n-1) \left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2} \right)$ temaga võrrandatud suurusega, saame kumerläätse valemikuju

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

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

Valemist (3) saame:

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

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

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

s. o. fookuse kaugus võrdub kõverusraadiusega.

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

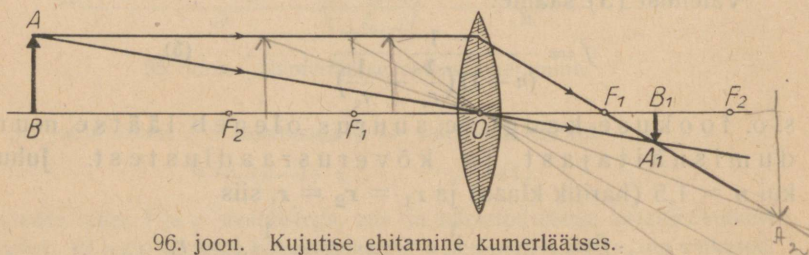
Nõgusläätse puhul, analoogiliselt kumerpeeglika, on k , r_1 ja r_2 märgid vastupidised, sest need suurused on mõõdetud kumerläätsega võrreldes vastassuunas. Järelikult

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

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

1. Kas ka kumernõgusa ja nõguskumera läätses puhul on fookuse kaugused mõlemal pool läätses ühesuurused?
2. Millise kujutise saame läätses abil siis, kui pool läätses kinni katta?
3. Kumerläätses $f = 10$ cm ja $a = 50$ cm. Kui kaugel läätses asetseb kujutis? Milline on see kujutis?
4. Kumerläätses $f = 50$ cm ja kõverusraadiused $r_1 = 60$ cm ja $r_2 = 80$ cm. Arvuta läätses murdumisnäitaja!
5. Kiiu laugus seinast on 72 cm. Kuhu tuleb paigutada kumerlääts, mille $f = 16$ cm, et saada seinale kiiu la terav kujutis?

80. Kujutiste ehitamine. Katsed näitavad, et sfääriliste läätsesde abil on võimalik saada esemetest kujutisi. Täheandab, eseme mõnest valgustatud punktist lähtuv hajuv kiirtekimp pärast murdumist sfäärilises läätses annab enam-vähem punktitaolise kujutise. Sama järeldub ka läätses valemist $\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}$, millest $k = \frac{af}{a-f}$. Siin on antud valguspunkti ja läätses suhtes a ja f konstantid, järelikult peab olema konstantne ka k , s. o. kõik samast



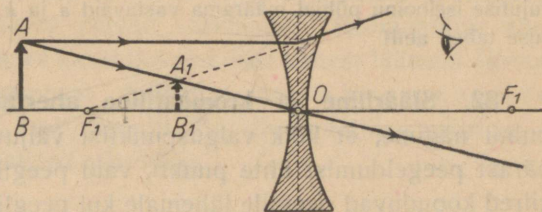
96. joon. Kujutise ehitamine kumerläätses.

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

Näitena ehitame kujutise esemest, mis asetseb läätses kaugemal kui kahekordne fookuse kaugus, s. o. $a > 2f$ (96. joon.). Siin on kasutatud rööpset ja läbi optilise tsentri minevat kiirt. Nagu näeme, on saadud kujutis tõeline, ümberpööratud ja vähendatud ning asetseb fookuse ja kahekordse fookusekauguse vahel.

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

Samal viisil ehitame ka kujutise nõgusläätses (97. joon.). Nagu näeme, on nõgusläätsel abil saadud kujutis alati ebakujutis, päripidine ja vähendatud.



97. joon. Kujutise ehitamine nõgusläätses.

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

81. Sfääriliste peeglite ja läätsede võrdlus. Nagu nägime, on nõguspeegli ja kumerläätsel ning kumerpeegli ja nõgusläätsel valemid oma kujult täiesti samad. Sisuliselt samad on ka neis esinevate suuruste (a , k , f) tähendused. Järelikult kõik kujutiste ehitamise kohta nõgus- ja kumerpeeglis saadud tulemused on vastavalt kehtivad ka kumer- ja nõgusläätsedel koosta, kusjuures peegli kõverustsentri (O) läätsedel puhul vastab kahekordne fookuse kaugus (F_2). Tõepoolest, peegli $r = 2f$, tähendab, ka peegli kõverustsentri vastav punkt läätsedel juures peab olema $2f$ kaugusel läätselt.

Kokkuvõttena kujutiste ehitamisest sfäärilistes peeglitel ja läätsedel toome järgmise tabeli.

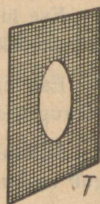
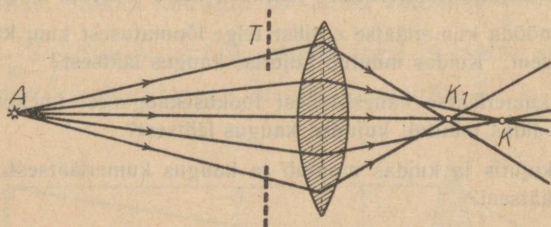
Nõguspeegel ja kumerlääts.

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

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

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

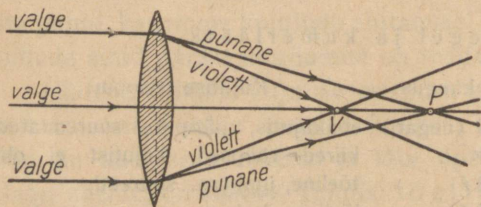
82. Sfääriline ja kromaatileine aberratsioon. Nõguspeegli puhul nägime, et kõik valguspunkstist väljuvad kiired ei koonu pärast peegeldumist ühte punkti, vaid peegli äärtest peegeldunud kiired koonduvad peeglile lähemale kui peegli keskkohale langevad kiired. Samasugune nn. sfäärilise aberratsiooni ehk kõrvalekaldumise nähtus esineb ka sfääri-



98. joon. Sfääriline aberratsioon.

Valgustõkend.

listel läätsedel. Nagu 98. joonisest näha, annab üheväriline valguspunkt A õieti hulga kujutisi, mis asetsevad K ja K_1 vahel. Kui tahame saada ainult ühte ja hästi teravat kujutist, siis peame näiteks kas läätse äärelle langevad kiired erilise valgustõkendi (diafragma) kinni katma või vastavalt muutma läätse äärepoolse osa kõverusraadiust, mis osutub aga kaunis kulukaks.



99. joon. Kromaatileine aberratsioon.

Peale sfäärilise toimub läätsedes valge või üldse liitvalguse puhul veel nn. kromaatileine aberratsioon (99. joon.). Igal värvilisel valguskiirel on oma murdamisnäitaja, näiteks violetsel suu-

rem kui punasel. Seetõttu murduvad violetsed kiired läätses tugevamini ja koonduvad läätsle lähemale kui punased kiired. Sellest tingituna saame näiteks päikesevalguse puhul ühe valge kujutise asemel hulga värvilisi, mis keskosas katavad üksteist ja tekitavad valge mulje, kuna ääred jäävad värviliseks. Kromaatilise aberatsiooni kõrvaldamiseks kasutatakse erilist kahest läätses (kroonja flintklaasist) koosnevat liitlääts, nn. **akromaatilist lääts** (90. joon.), mis samuti kui akromaatiline prismagi ei lahuta teda läbivat valgust värvideks.

1. Näita joonise abil, et kujutise joonsuurendus $s = \frac{k}{a}$!

2. Ese, mille kõrgus 5 cm, asetseb kumerläätses ($f = 20$ cm) 60 cm kaugusel. Määra kujutise suurus ja kaugus läätses!

3. Kumerläätses kõverusraadiused $r_1 = r_2 = 3$ cm ja murdumisnäitaja $n = 1,5$. Ese kõrgusega 2 cm on 8 cm kaugusel läätses. Leia graafiliselt kujutise suurus ja asend!

4. Ese, mille kõrgus 6 cm, asetseb 20 cm kaugusel nõgusläätses ($f = 10$ cm). Arvuta kujutise suurus!

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

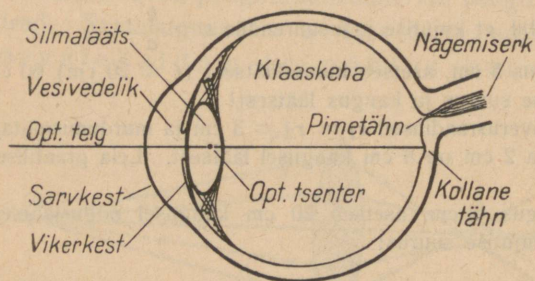
XI. Silm ja nägemine.

84. Silma ehitus ja nägemine. Silm on meie nägemiselund. Tema ehitus selgub skemaatiliselt 100. joonisest. Vaatle seda!

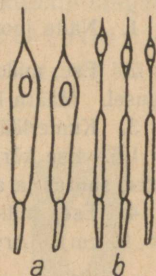
Läbipaistev sarvkest koos vesivedelikuga, silmaläätsega ja klaaskehaga moodustavad silma valgusturdva keskonna. Kõige enam murduvad kiired õhust sarvkesta minnes, sest nende keskkondade (õhk — sarvkest) optilise tiheduse vahe on kõige suurem. Vesivedeliku, silmaläätse ja klaaskeha murdumisnäitajad on enam-vähem ühesugused (1,33 — 1,43),

seetõttu ei murdu ka valguskiired kuigi palju ühest neist keskkonnadest teise minnes. Kõik need silma valgustumurdvad keskkonnad ühtekokku moodustavad optilise süsteemi, mis mõjub kui üks kumerlääts, mille fookuse kaugus on ~ 15 mm ja mille optiline tsenter asetseb silmaläätse tagumise seina läheduses.

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



100. joon. Vasema silma skemaatiline rönt-lõige (normaalsuurus).



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

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

Võrkkestas hargneb peajüst tulev nägemisnärv, mille kaudu on võrkkest peajuga otseses ühenduses. Võrkkest sisaldab kahte liiki valgustundlikke nägemisrakke: kepikesi ja kolvikesi (101. joon.), mis on ühenduses nägemisnärvi otstega. Kepikeste abil näeme peamiselt nõrga valgustuse puhul, hämaras tajutavat üldist halli valguskuma ja selle mitmesuguseid heledusastmeid. Kolvikeste abil näeme tugevama valgustuse puhul, s. o. valges, samuti ka värve. Hämaras, üldse nõrga valgustuse juures me pole suutelised nägema värve, sest siis näeme kepikestega, need aga pole värvi-

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

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

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

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

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

2. Vaatle raamatu teksti fikseeritud ja fikseerimata silmaga! Mida paned tähele?

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

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

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

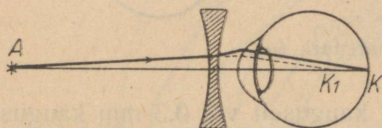
Normaalsilm võib ilma erilise pingutuseta kohastuda lõpmatuses (kauguspunkt) kuni **20 — 30 cm** kauguseni. Viimast kaugust nimetatakse normaalsilma parima nägemise kauguseks. Teatud pingutusega aga võime teravalt näha veel lähemaid esemeid, näiteks 10 cm kaugusel olevaid. See nn. nägemise lähima punkti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

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

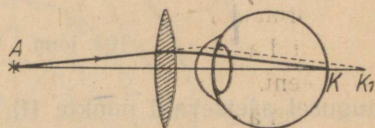
Silmalääts koosneb sibulataoliselt üksikuist läbipaistvaist poolvedelaist kihtidest. Noortel on silmalääts väga elastne. Nii näiteks võib kümneaastase normaalsilm kohastuda koguni kuni 7 cm kaugusel olevate esemete teravaks nägemiseks. Mida vanemaks inimene saab, seda vähem elastseks muutub tema silmalääts,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

87. Lühi- ja kaugelenägevus. Prillid. Nagu teame, on teravaks nägemiseks tarvilik, et eseme kujutis tekiks just võrkkestal. See pole aga alati nõnda. Lühinägijal on silma sügavus võr-

reldes silma murdmisvõimega liiga suur. Seetõttu tekib kaugemate esemete kujutis võrkkesta ees (102. joon.). Selle puuduse kõrvaldamiseks kasutatakse prillina nõgusast (konkav-) lääts, mis hajutab kiiri ning seetõttu nihutab kujutise jälle võrkkestale. Kaugelenägilal ümberpöörduvalt löikuvad lähedate esemete kiired võrkkestaga enne, kui nad suudavad koonduda kujutiseks. Sel juhul tarvitatakse nägemise korrigeerimiseks prillina kumerat (konveks-) lääts (103. joon.).



102. joon. Lühinägija prill.



103. joon. Kaugelenägija prill.

Prilliklaasi nagu teistegi optiliste läätsede murdmisvõimet ehk optilist tugevust mõõdetakse dioptrites (D). Kumerlääts optiline tugevus on $+1$ diopter, kui lääts fookuse kaugus $f = 1$ m. On lääts $f = 0,5$ m, siis on tema optiline tugevus $D = 1 : 0,5 = 2$ dioptrit, jne. Üldse on lääts optiline tugevus

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

Kumerlääts dioptrite arvu märgitakse positiivse (+), nõguslääts dioptrite arvu negatiivse (—) arvuga, sest viimasel juhul on fookuse kaugus f negatiivne.

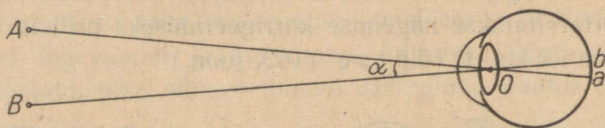
1. Kaugelenägija vajab prilli $+2,5$ dioptrit. Milline on selle prilliklaasi fookusekaugus cm-tes?

2. Lühinägija vajab prilli fookusekaugusega 25 cm. Milline on selle prilliklaasi optiline tugevus dioptrites?

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

88. Vaatenurk. Kogemustest teame, et üksteise lähedal asetsevad valguspunktid, kui nad on meist küllalt kaugel, liituvad vaatlemisel üheks (kaksiktähed). Kaks punkti A ja B on ainult siis eraldi nähtavad, kui silma optilisest tsentrist (O) läbi antud

punktide A ja B tõmmatud sihid moodustavad nurga vähemalt $1'$. Seda nurka nimetatakse vaatenurgaks. On kahe punkti vaheline vaatenurk väiksem kui $1'$, siis me ei näe neid punkte lahus, vaid nad liituvad üheks väikeseks kriipsukeseks. Lihtne arvutus näitab, et vaatenurga $1'$ saame, kui vaadelda teineteisest 3 mm



104. joon. Vaatenurk (α).

kaugusel asetsevaid punkte 10 m kauguselt või 0,3 mm kaugusel asetsevaid punkte 1 m kauguselt või 0,1 mm kaugusel asetsevaid punkte 33 cm kauguselt. Nagu näha, ei suuda me sellist nurka ($1'$) tema väiksuse tõttu käesoleval leheküljel kujutada. Vaatenurga suurendamiseks toome esemed silmale lähemale, sest esemetevahelise kauguse suurendamine pole alati võimalik.

1. Arvuta kraadides 104. joonisel kujutatud vaatenurga α suurus, mõõtes enne jooniselt vastavad kaugused!

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

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

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

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

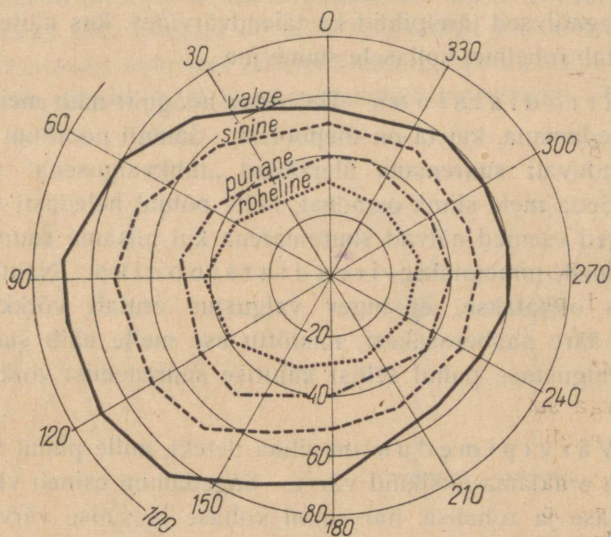
89. Vaateväli. Vaatevälja all mõistetakse seda osa ruumist, millest muutmatu vaatesuuna puhul saame võrkkestal veel selgesti tajutavaid kujutisi. Vaateväli oleks sümmeetriliselt ümmargune, kui silma ümbrus (nina ja kulmud) ümberolevast ruumist osa ära ei varjaks.

Sule vasem silm ja pane tähele, mis sa näed parema silma vaateväljas, ning ümberpöördu!

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

Nagu 105. joonisest näha, on vaateväli kõige avaram valge valguse (hele, tume) tajumiseks üldse. Üksikute värvide tajumise vaateväljad on hoopis piiratumad, ühtlasi ka erinevad. Kõige piiratum on vaateväli roheline

värvi jaoks (30—40°), siis punase (40—50°) ja lõpuks sinise värvi jaoks (50—70°). Eelmisest järeldame, et värve tajuvad organid (kolvikesed) pole ühtlaselt jaotatud üle kogu võrkkesta, vaid asetsevad peamiselt selle keskosas, kuna kepikesed ulatuvad üle kogu võrkkesta pinna.



105. joon. Vasema silma vaateväli.

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

Pikemat aega mõjuv samalaadne tugev valguserutus väsitab võrkkesta ja seetõttu tekivad nn. negatiivsed järelpildid, s. o. pildid, mis oma heleduselt on endistele vastupidised. Kui näiteks liikumatult vaadelda hõõglambi hõõguvat niiti, siis saame hiljem järelpildina tumeda niidi heledal foonil. Vahel esinevad negatiivsed järelpildid ka täiendvärvides, kus näiteks punasele vastab roheline, kollasele sinine jne.

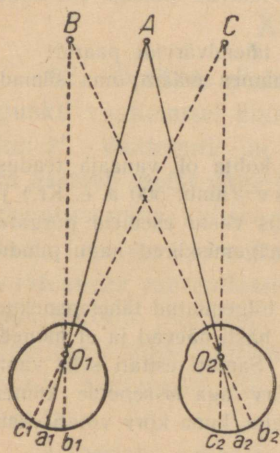
b) Irradiatsioon. Helendav hõõgniit näib meile tunduvalt jämedamana, kui ta on tõe poolest. Samuti noorkuu hele sirp näib tunduvalt suuremana ülejäänud „tuhkvalgusena“ paistvast osast. Seda meie silma omadust, mille põhjal heledasti valgustatud valged esemed näivad suurematena kui niisama suured tumedad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

c) Värvipimedus on silma defekt, mille puhul silm pole suuteline eraldama üksikuid värve. Sagedamini esineb värvipimedus punase ja rohelise, harvemini kollase ja sinise värvi suhtes. Värvipimeduse seletamiseks oletatakse, et üksikuid värve tajuvad kolvikesed kas üldse puuduvad või on puudulikult arenenud. Huvitav on märkida, et värvipimeduse all kannatavad peamiselt mehed (4—5%), kuna naistel esineb värvipimedus võrdlemisi harva (umbes 0,5%).

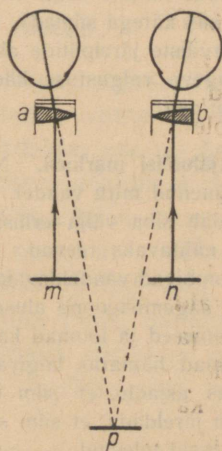
d) Adaptatsioon. Nagu terava kujutise saamiseks tuleb silmal kohastuda, samuti tuleb tal kohaneda ka valgustusega üldse. Nii näiteks valgustatud toast öösi välja hämarasse minnes ei näe me algul peaaegu sugugi. Mõne aja pärast hakkavad aga silmad siiski päris hästi seletama. Kulub umbes pool tundi, et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

e) Nägemine kahe silmaga. Mõne eseme vaatlemisel saame kummaski silmas kujutise, kuid näeme siiski ühtainust eset. Selle põhjuseks on asjaolu, et mõlema silma võrkkesta

vastavaist kohtadest, näiteks kollastest tähnidest väljuvad ärritused sulavad ajus kokku ühiseks pildiks. Sellise kujutiste asendite vastavuse mõlemas silmas saavutame eseme fikseerimisel mõlema silmaga. Kui aga kujutised tekiavad võrkkestal mittevastavaist kohtades, siis näeme eset kahekordselt. Näiteks 106. joonisel on mõlema silmaga fikseeritud punkti A , mille vastavaist kohtades tekkinud kujutised võrkkestal on a_1 ja a_2 . A naaberpunktide B ja C vastavaist kujutisteks võrkkestal on b_1 ja b_2 ning c_1 ja c_2 .



106. joon. Nägemine kahe silmaga.



107. joon. Stereoskoop.

Eelmise tõestuseks tee järgmine katse. Hoiu ühte sõrme umbes 30, teist 50 cm kaugusel silmast. Kui fikseerid ühte neist, siis näed teist kahekordselt.

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

Fotopilt on tasapinnaline ja vastab kujutisele ainult ühes silmas. Kui teha samast esemest üks pilt nõnda, nagu seda näeks vasem silm, ja teine pilt nõnda, nagu seda näeks parem silm, ning

mõlemad pildid vaatlemisel liita, siis saame sellest esemest ruumilise kujutise, just nagu oleksime teda tõepoolest vaadelnud kahe silmaga. Selliseks riistaks, millega saame kaks eri pilti liita üheks, on *stereoskoop* (107. joon.). Stereoskoobi peaosaks on kaks prismat *a* ja *b*, mis on pööratud murdvate nurkadega teineteise poole. Piltide vastavaist punktidest *m* ja *n* tulevad kiired murduvad prismades nõnda, et nad näivad väljuvat samast punktist *p*. Seetõttu saame kahe pildi asemel ühe, mis aga annab meile vaadeldavast esemest ruumilise kujutise.

1. Vaatle natuke aega mõnd eradat värvi, näiteks punast või rohelist, ja kata siis kätega silmad! Mida näed siis?

2. Värviliste järelpiltide abil määra mõned täiendvärvide paarid!

3. Tugeva valgustuse käest hämarasse minnes määra oma silmade adaptatsiooni aeg!

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

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

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

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

Huvitav on märkida, et need vanaaja nägemisteooriad ei põhinenud katselisel alusel, vaid olid puht-spekulatiivset laadi. Kuigi algelised, püüsid nad läbi kogu keskaja kuni uusaja alguseni. Lõpliku hoobi vanaaja nägemisteooriatele andis *G. Porta* oma töös „*Magia naturalis*“ (1553) kirjeldatud katsega esemete kujutiste tekkimisest pisiava abil. Nüüd oli selge, et kujutis pidi tekkima mitte silmast, vaid ainult esemest väljuvaist kiirtest. Ühtlasi on see katse selgeks tõenduseks, et ka valgustatud esemetest väljuvad igas suunas valguskiired samuti kui lumineerivategi kehade puhul.

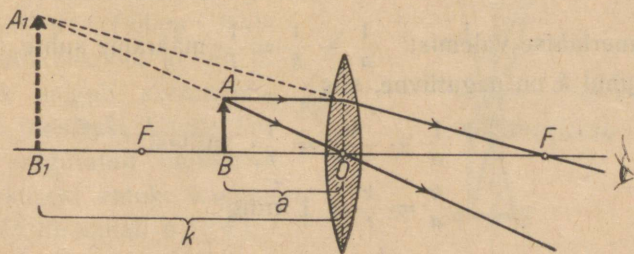
Silma ehitus oli üldjoontes tuntud juba Aristotelesele (384—322). Alhazen († 1038) annab silmast päris üksikasjalise ja õige kirjelduse, seletab ka õieti kahe silmaga nägemist, kuid nägemine ise toimub tema arvates sel teel, et kujutised esemetest tekivad silmaläätsel. Maurolycus omistab silmaläätsel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

XII. Optilised riistad.

92. Optiliste riistade ülesanne. Nagu nägime, liituvad kaks punkti vaatlemisel ühte, kui nendevaheline vaatenurk on väiksem kui $1'$. Vaatenurk on väike, kui vaadeldav ese ise on pisike või ta asetseb meist väga kaugel. Tahame vaadeldaval esemel enam peensusi näha, kui see palja silmaga võimalik, siis peame kunstlikult suurendama vaatenurka. Selline kunstlik vaatenurga suurendamine toimub optiliste riistade abil, nagu luup, mikroskoop, pikksilm. Kui mõne optilise riista, näiteks luubi abil vaadeldes kõik vaatenurgad palja silmaga võrreldes muutuvad 5 korda suuremaks, siis ütleme, et see optiline riist suurendab 5 korda.

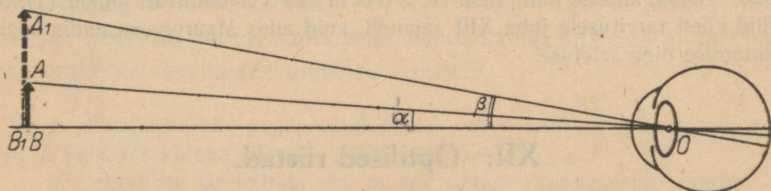
Lähedate väikeste esemete vaatlemisel kasutame luupi ja mikroskoopi, kaugete esemete vaatlemisel pikksilmi (teleskoopi).

93. Luup. Luubina kasutatakse kumerat läätse. Asetame vaadeldava eseme AB läätse ja fookuse vahele fookuse F lähedale ning ehitame tema kujutise (108. joon.). Saame päripidise suurendatud



108. joon. Kiirtekäik luubis.

ebakujutise A_1B_1 . Et mõnda eset, samuti ka kujutist on kõige kasulikum vaadelda vaatlaja silma parima nägemise kaugusest (~ 25 cm), siis tuleb ese asetada luubist sellisele kaugusele, et ta kujutis tekiks just parima nägemise kaugusel luubist. Silma aga hoiame hästi luubi läheduses, et kujutisest rohkem valgust silma tuleks, sest kujutise suurus ei olene silma kaugusest luubist.



109. joon. Kujutise ja eseme vaatenurga võrdlus.

Luubi suurenduseks s nimetame kujutise A_1B_1 ja eseme AB vaatenurga suhet, kui vaadelda mõlemaid samalt kaugusest (109. joon.). Järelikult $s = \frac{\beta}{\alpha}$.

Geomeetriast teame, et ringi kesknurgad on võrdelised vastavate kaartega. Meie eelduste kohaselt on kujutis (A_1B_1) ja ese (AB) silmast samal kaugusel ($OB = OB_1$). Arvestades nurkade α ja β väiksust, võime ilma tunduva veata neile vastavad ringi kaared, kus raadiuseks on $OB = OB_1$, asendada kujutise ja eseme suurusetega. Seega siis $s = \frac{\beta}{\alpha} = \frac{A_1B_1}{AB}$, s. o. luubi puhul võrdub suurendus ka kujutise ja eseme vastavate joonsuuruste suhtega.

Eelmise põhjal võime, kasutades 108. joonist, väljendada luubi suurenduse s järgmiselt:

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

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

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

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

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

Kui kujutise vaatlemine toimub parima nägemise p (tavaliselt 25 cm) kauguselt, siis $k = p$ ja

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

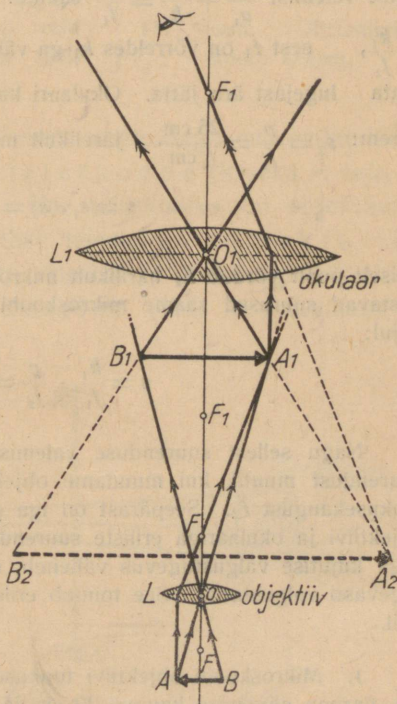
Näiteks kui luubi $f = 5$ cm, siis $s = \frac{25}{5} + 1 = 6$ jne. Et parima nägemise kaugus oleneb silmast ja seetõttu pole just päris jääv suurus, siis ka suurendus s kõigub teatud piirides. Seetõttu on võimalik lihtsuse otstarbel suurenduse valemist $+1$ ära jätta ning anda ta kujul

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

nagu seda sageli tehaksegi.

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

94. Mikroskoop. Luubi suurendusvõime on võrdlemisi väike, keskmiselt 5 — 8 korda. Hoopis tugevamini (kuni 1000 ja enam korda) suurendab mikroskoop (kreeka k. *mikros* — väike ja *skopein* — nägema), mis koosneb kahest läätsede süsteemist: objektiivist (eseme läätsest) ja okulaarist (silma läätsest). Mikroskoobi ehitus ja kiirtekäik selgub skemaatilisest 110. joonisest. Vaadeldav ese on paigutatud objektiivi ette, fookusest natuke kaugemale. Seetõttu annab objektiiv esemest tõelise,



110. joon. Kiirtekäik mikroskoobis.

suurendatud ja ümberpööratud kujutise A_1B_1 . Seda tõelist kujutist vaatleme okulaari kui luubi abil.

Okulaar annab kujutisest A_1B_1 päripidise suurendatud ebakujutise A_2B_2 , mida me näemegi mikroskoobis. Esemega võrreldes aga on vaadeldav kujutis suurendatud ja ümberpööratud ebakujutis. Kui näiteks objektiiv suurendab 20 korda, s. o. tõeline kujutis A_1B_1 on 20 korda suurem esemest AB , ja okulaari kui luubi poolt tekitatud ebakujutis A_2B_2 on 5 korda suurem tõelisest kujutisest, siis on mikroskoobi kogusuurendus $5 \cdot 20$ ehk 100 korda. Üldse võrdub mikroskoobi suurendus (s) objektiivi (s_1) ja okulaari (s_2) suurenduste korrutisega, s. o. $s = s_1 \cdot s_2$.

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

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

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

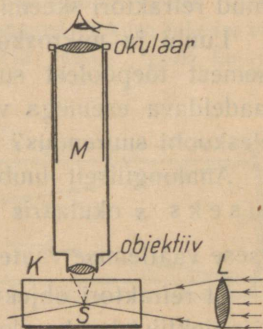
$$s = \frac{k_1}{f_1} \cdot \frac{p}{f_2} = \frac{lp}{f_1 f_2} = \frac{25l}{f_1 f_2}$$

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

1. Mikroskoobi objektiivi fookusekaugus on 5 mm, okulaari oma 3,9 cm, parima nägemise kaugus 30 cm ja mikroskoobi pikkus 33 cm. Arvuta mikroskoobi suurendus!

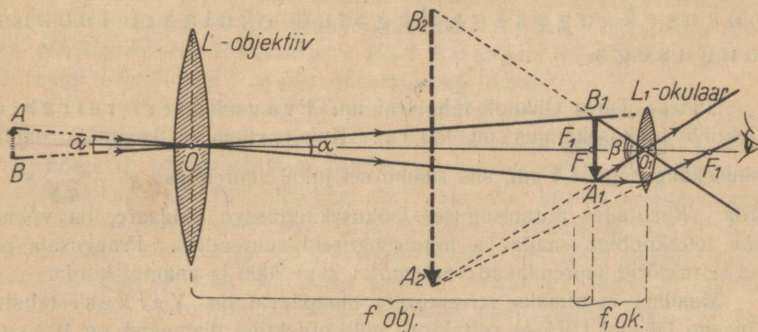
95. **Ultramikroskoop.** Õige väikeste esemete, näiteks suitsu- või tolmukübemete vaatlemine mikroskoobis osutub võimatuks, sest nende väiksuse ja valguse difraktsiooni (paindumise) tõttu nad ei anna varju ning seetõttu kaovad ära valgustatud vaateväljasse. Selliste väikeste esemete vaatlemiseks kasutatakse nn. ultra- ehk pimeväljamikroskoopi, mille töötamise põhimõte selgub skemaatilisest 111. joonisest.

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



111. joon. Ultramikroskoobi skeem.

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



112. joon. Kiirtekäik refraktoris.

Refraktor samuti kui mikroskoopki koosneb kahest läätsest süsteemist: objektiivist ja okulaarist. Objektiiv annab kaugest esemest fookuse lähedal tõelise, vähendatud ja ümberpööratud kujutise. Seda tõelist kujutist vaatleme okulaariga kui luubiga ja saame temast suurendatud päripidise ebakujutise. Vaatle 112. joonisel antud refraktori skeemi ühes kiirtekäiguga kujutiste ehitamisel!

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

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

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

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

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

Asendades saadud β ja α väärtused suurenduse valemisse, saame:

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

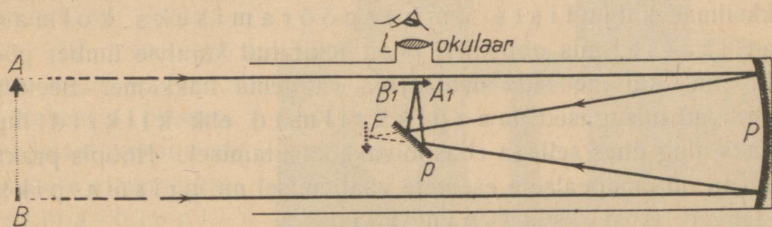
s. o. teleskoobi suurendus võrdub objektiivi fookusekaugusega jagatud okulaari fookusekaugusega.

Näiteks Tartu Ülikooli tähetorni nn. Fraunhoferi refraktori objektiivi fookusekaugus on 450 cm. Kui vaatlemisel kasutada okulaari fookusekaugusega 4,5 cm, siis saame sel juhul suurenduse $s = \frac{450}{4,5} = 100$ korda. Kasutades mitmesuguse fookusekaugusega okulaare, on võimalik sama teleskoobiga saada ka mitmesuguseid suurendusi. Praegusaja parimad refraktorid suurendavad vaatenurka kuni 2000 ja enamgi korda.

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

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

97. Peegelteleskoop ehk reflektor. Peegelteleskoobis täidab objektiivi aset suur nõguspeegel, mis annab kaugest esemest fookuse lähedal tõelise, vähendatud ja ümberpööratud kujutise (113. joon.). Seda kujutist



113. joon. Reflektori skeem.

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

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

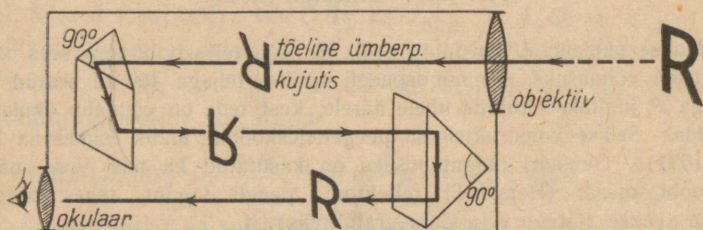
Seni oli suurimaks reflektoriks Mount-Wilsoni tähetorni reflektor Kalifornias. Selle reflektori hõbetatud klaaspeegli läbimõõt on 258 cm, fookusekaugus ~ 13 m ja koguraskus 4,5 tonni. Tänapäeva suurimaks reflektoriks on Palomari mäel Kalifornias ülesseatud reflektor, mille peegli läbimõõt on 5 m ja fookusekaugus 16,8 m.

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

massi (-tombu) valamine, mis peab olema ilma villideta ja eriliste pingeteta ning millest saaks lihvida refraktori objektiivi.

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

98. Prisma-pikksilm ja prisma-binokkel. Nii refraktor kui ka reflektor annavad vaadeldavaist esemest ümberpööratud kujutised. Astronoomiliste vaatluste puhul pole see oluline. Maapealsete esemete vaatlemisel aga on väga tähtis, et saaksime vaadeldavaist esemest päripidised kujutised. Selle saavutamiseks kasutatakse pikksilmas kujutiste ümberpööramiseks kolmandat läätsi, mis objektiivi poolt tekitatud kujutise ümber pöörab, enne kui me teda okulaariga vaatlema hakkame. Seetõttu muutuvad niisugused maapikksilmad ehk kiikrid liiga pikaks ning ühes sellega ebasobivaks kasutamisel. Hoopis praktilisemad on maapealsete esemete vaatlemisel nn. prisma-pikksilmad ja prisma-binoklid.

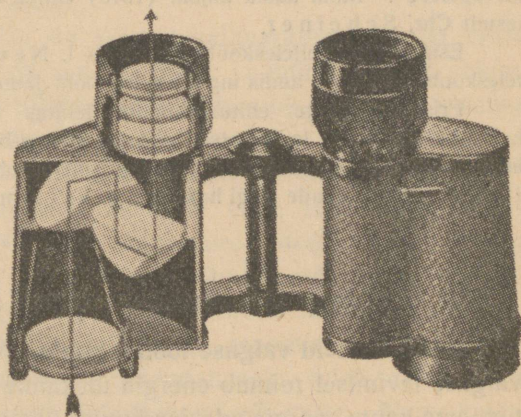


114. joon. Kujutise ümberpööramine prisma-pikksilmas.

Prisma-pikksilm koosneb nagu refraktorgi objektiivist ja okulaarist, kuid annab päripidised kujutised. Kujutiste ümberpööramine toimub kahe täisnurkse prisma abil, mis on asetatud objektiivi ja okulaari vahele (114. joon.). Kiired langevad prisma alusele risti (vt. 114. joon.), tungivad prissasse ilma murdumata ja langevad prisma tagumisele sisepinnale nurgi 45° . Et siin langemisnurk klaasis (45°) on suurem täielise sisepeegeldumise piirnergast kiirte murdumisel klaasist õhku (42°), siis peegelduvad kõik kiired täielikult. Samuti peegelduvad täielikult kõik kiired prisma teisest tagumisest pinnast. Kahekordse sisepeegeldumise tulemusena väljuvad kiired prismast ümberpööratuina prisma murdvat serva läbiva ja alusega

risti oleva tasapinna suhtes. Et meil on vaja kujutis ümber pöörata kahe teineteisega risti oleva tasapinna suhtes (parem — vasem, ülemine — alumine), siis lastakse esimesest prismast väljunud kiired teise, esimesega risti asetatud prismasse. Teine prisma pöörab kujutise veel kord ümber ja me saame okulaari ees esemega võrreldes päripidise kujutise, mida vaatleme okulaariga kui luubiga. Kujutise ümberpööramise käik prisma-pikksilmas on skemaatiliselt kujutatud 114. joonisel. Vaatle seda!

Kahest prisma-pikksilmast koosnevat teleskoopi nimetatakse *prisma-binoklik*s (115. joon.). Prismad mitte üksnes pööravad kujutise ümber, vaid teevad ka binokli hästi lühemaks,



115. joon. Prisma-binokkel.

sest ühe pika kiire asemel saame n.-ö. viiekordseks kokkumurtud kiire. Objektiivide suurem kaugus teineteisest, võrreldes okulaaridega, soodustab ka ruumilist nägemist. Kõigi nende paremuste tõttu on prisma-binoklid laialdast kasutamist leidnud, eriti sõjaväes *välibinoklitena*.

Nn. *teatri-binokkel* koosneb kahest Galilei pikksi'last, kus objektiiviks on kumer- ja okulaariks nõguslääts. Nende suuren-dus on harilikult 3—5 korda.

1. Mispärast teleskoobi objektiiv on suur ja pika fookusega, kuna mikroskoobi objektiiv on ehitatud just vastupidiselt?
2. Kinnistähtede vaatlemisel ka suurimate teleskoopidega nende vaate-nurk ei suurene. Mis kasu on siis teleskoobist kinnistähtede vaatlemisel?
3. Millise läbimõõduga tõelise kujutise annab Tartu Ülikooli tähetorni Fraunhofer'i refraktori objektiiv ($f = 450$ cm) Päikesest? Millise läbi-mõõduga maailma suurim refraktor ($f = 18,9$ m)?

99. Ajaloolisi märkusi. Esimesed kumer- ja nõgusläätsed koosnevad pikksilmad, samuti mikroskoobi valmistas hollandi prillimeister Zacharias Jansen koos oma isaga 1590. ja 1609. a. vahel. Klaasilihviija Lippert-

seim (Lippersheim) omandas Jansenitelt nende oskuse (1609) ja hakkas pikksilmi suuremal määral müügiks valmistama. Teated Hollandis leiutatud pikksilmast ulatusid Galilei'ni, kes 1610. a. iseseisvalt ehitas seda tüüpi väga hea pikksilma, millega tegi rea astronoomilisi avastusi (Päikese laigud, Kuu mäed, Jupiteri kaaslased, Veenuse faasid jm.).

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

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

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

XIII. Valgus lainetusnähtusena. Huygens'i printsip.

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

Energia teise, laineviisilise levimisega tutvusime akustikas, kusjuures selle energia levimisviisi puhul oli alati paratamatult tarvilik mõni aineeline keskkond (õhk, vesi, puu, raud jne.), mille kaudu lainetusenergia edasi kandus. Tühjas ruumis hääl ei levi.

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

Peegeldumisnähtuste seletamiseks oletas Newton, et valgusaine osakesed, langedes peegeldavale pinnale, põrkavad sealt tagasi nagu täiesti elastsed kuulikesed. Murdumisnähtuste seletamiseks oletas Newton, et ümbritseva keskkonna osakesed tõmbavad valgusaine osakesi ja seda tugevamini, mida tihedam on keskkond. Seega peab valgusosakeste kiirus tihedamas keskkonnas suurem olema kui hõredamas.

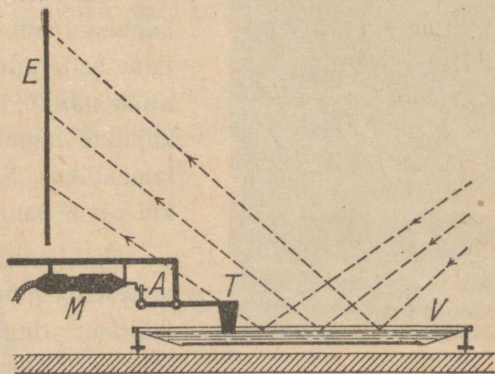
Lainetusteooria järgi on kogu maailmaruum täidetud erilise keskkonnaga, mis kannab eetri nime ja milles toimub valguse lainetuse levik. See eetrihüpotees oli tarvilik, sest ilma selleta näiteks puuduks meil vahendaja, mis kannaks valguse lainetuse Päikeselt ja tähtedelt läbi tühja maailmaruumi Maani.

Esialgul pöörati Huygensi teooriale vähe tähelepanu, mis on osaliselt seletatav ka Newtoni väga suure autoriteediga. Hiljem, kui avastati rida nähtusi, mida polnud võimalik seletada emissiooni-teooria abil, leidis valguse lainetamise teooria tunnustamist.

Kas valgus on lainetus või on ta moodustatud nn. valgusaine osakestest, selle küsimuse lahendamiseks tuleb näidata, kas valgus nagu häälgil annab interferentsi või mitte. Nagu katsed näitavad, interfereeruvad valguskiired nagu häälelainedki. Sellest peame järeldama, et valgus on lainetus.

101. Laineaparaat. Laineliikumise lähemaks uurimiseks tarvatakse erilist laineparaati, mille abil võib tekitada laineid veepinnal ja neid siis lähemalt uurida.

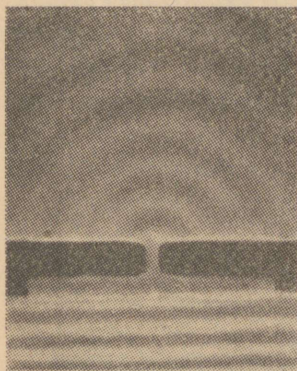
Laineaparaat (116. joon.) koosneb suuremast madalast veevannist ja lainetekitajast. Lainetekitajaks on kangitaoline vasar, mis võib võnkuda varre keskel läbimineva horisontaalse telje ümber. Varre teine ots on ekstsentriliselt kinnitatud väikese elektri-



116. joon. Laineaparaat.

mootori võlli külge. Mootori pöörlemisel võngub vasar üles-alla, tekitades vannis veelained. Kui seda veepinda valgustada tugeva valgusallikaga, siis veepinnalt peegeldunud valgus toob valgel ekraanil nähtavale veelainete tekkimise ja kulgemise.

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

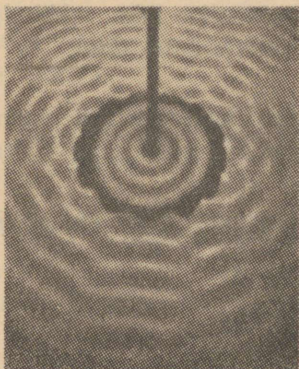


118. joon. Huygensi printsiip.

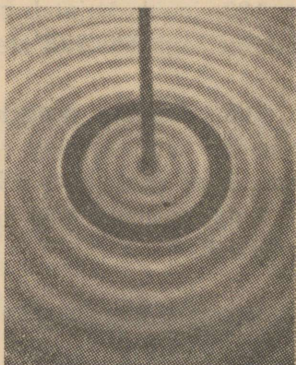
102. Huygensi printsiip. Tekitame laineaparaadi vannis veelaine ja asetame selle ette kitsa pilu (118. joon.). Katse näitab, et pilust lähtub uus ringikujuline lainetus, nagu oleks pilu ise laineallikas. See uus laine tekib ka siis, kui pilule langeb ringikujuline laine.

Nüüd paigutame vanni ringikujulise vaheseina mõne piluga ja selle keskel tekitame ringikujulise lainetuse (pealaine). Katse näitab, et igast pilust lähtub uus ringikujuline lainetus.

Kordame sama katset, kusjuures tarvitame suure hulga piludega varustatud ringikujulist vaheseina (120. joon.). Nüüd levivad lained piludest läbi, nagu poleks vaheseina olemaski. Seega pilu



119. joon.



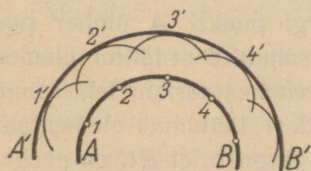
120. joon.

Veelainete levimine läbi pilude: 119. joon. pilude arv väike, 120. joon. pilude arv suur.

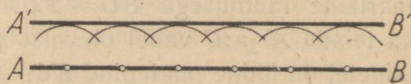
taga tekkinud ringlained liitudes moodustavad meile nähtava laine-
tuse edasileviva ehk -kulgeva pealaine. Need katsed näitavad, et
iga punkt, kuhu jõuab laine, muutub ise laineallikaks, kust lained
levivad igas suunas. Seda nähtust tuntakse füüsikas nn. Huy-
gens'i printsiibi nimetuse all:

iga punkti mistahes lainepinnal võib vaa-
delda kui laineallikat, millest lähtuvad ring-
lained.

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



121. joon. Ringlaine tekki-
mine Huygens'i järgi.



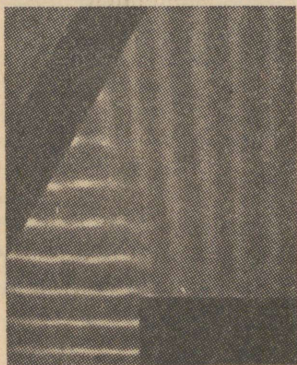
122. joon. Tasapinnalise laine tekki-
mine Huygens'i järgi.

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

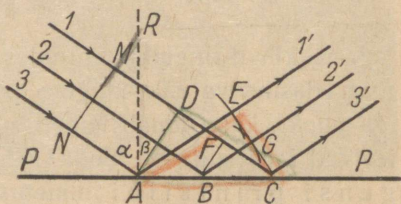
122. joonis kujutab samasugust tasapinnalise laine tekkimist. Pealaine taga hävivad elementaarlained interferentsi tõttu.

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

Laine peegeldumist võime seletada Huygeni printsiibi põhjal järgmiselt.



123. joon. Lainete peegeldumine.



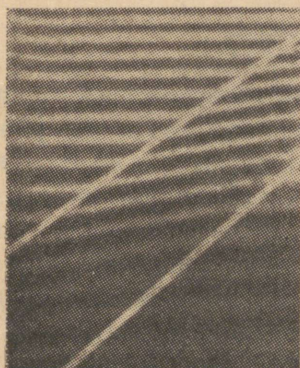
124. joon. Lainete peegeldumine Huygeni järgi.

Langegu väga kaugel olevast laine tsentrist laine kaldu peegilile PP (124. joon.). Et laine tsenter on väga kaugel, siis laine kiired $1, 2, 3$ on isekeskis ligikaudu rööpsed, nendega on risti lainerinne (-front) AD . Aja kestel, millal äärmine kiir 1 jõuab D -st C -ni, tekib Huygeni printsiibi järgi punkti A ümber pool elementaarlainet raadiusega $AE = DC$, samuti B -st lähtub elementaarlaine raadiusega $BG = FC$. Neil elementaarlainetel, samuti ka teistel A ja C vahel olevaist punktidest lähtunud elementaarlainetel on ühine puutepind EC . Sellest järgneb, et EC on peegeldunud liitlaine rinne, sellega risti olevad raadiused AE ja BG on peegeldunud lainekiired.

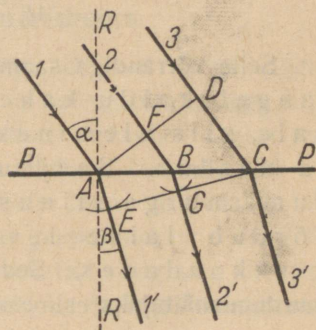
Tõmbame ristjoone RA , siis nurk $NAR = \alpha$ on langemisnurk ja nurk $RAE = \beta$ on peegeldumisnurk. Täisnurksed kolmnurgad ADC ja AEC on kongruentsed, sest peale ühise hüpotenuusi AC külge $AE = DC$. Siit järgneb, et $\sphericalangle DAC = \sphericalangle ECA$. Et $\sphericalangle DAC = \alpha$ ja $\sphericalangle ECA = \beta$ (küljed on üksteisega risti), siis ka $\sphericalangle \alpha = \sphericalangle \beta$. Seega järgneb Huygeni printsiibi põhjal:

tasapinnalise laine peegeldumisel on langemisnurk võrdne peegeldumisnurgaga.

104. Lainete murdumine. Asetame laineaparaadi vanni põhjale tasase plaadi, näiteks peeglriba, mille kohal on siis veekiht õhem. Laseme langeda klaasribale kaldu tasapinnalise laine.



125. joon. Lainete murdumine.



126. joon. Lainete murdumine Huygeni järgi.

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

Lainete murdumise seaduse võime tuletada Huygeni printsiibist. Olgu PP tasapinnaline piirpind kahe keskkonna vahel ja lainete levimiskiirus ülemises keskkonnas v_1 , alumises v_2 (126. joon.). Tasapinnaline laine langeb kaldu sellele piirpinnale. Sama aja kestel, millal ülemises keskkonnas äärmine kiir 3 levib D -st C -ni, tekib alumises keskkonnas A ümber elementaarlane raadiusega

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

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

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

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

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

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

Et hääl on õhu lainetus, siis on arusaadav, et siin tuletatud peegeldumis- ja murdumisseedused kehtivad samuti hääle kohta, nagu me seda akustikast teamegi. Nagu nägime, kehtivad ka valguse peegeldumise ja murdumise kohta samad seedused.

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

105. Ajaloolisi märkusi. Korpuskulaarse ehk emissioonivalguse teooria põhjendajaks oli I. N e w t o n (lk. 114). Niisama vana kui valguse korpuskulaarne teooria on valguse lainetuse teooria, mille püstitas Newtoni kaasaeglane Chr. H u y g e n s. Esialgu pöörati Huygensi lainetusteooriale vähe tähelepanu, mille põhjuseks oli Newtoni kõrge autoriteet. Valguse difraktsiooni avastas F. M. G r i m a l d i (1613—1663), kes pani tähele, et valgus + valgus võivad teineteist kustutada. Grimaldi poolt avastatud nähtust, samuti ka mitmeid teisi valgusnähtusi seletasid Huygensi eeskujul Th. Y o u n g ja R. H o o k e lainetusteooria abil, kusjuures Hooke oletas, et valgus on transversaalne ehk ristlainetus. Aastal 1822 näitas A. F r e s n e l, et valgus annab interferentsi nagu häälelainedki, millega ta tõestas valguse lainetamise iseloomu. Hiljem mõõtis F o u c a u l t valguse kiirust vees ja leidis, et see on väiksem kui õhus, vastupidiselt Newtoni oletusele, mille järgi valguse kiirus vees pidi olema suurem kui õhus. Seega leidis valguse lainetuse teooria lõpliku tunnustuse.

Möödunud sajandi teisel poolel püstitas C. M a x w e l l valguse elektromagnetilise teooria, mille järgi valgus on elektromagnetiline lainetus.

XIV. Valguse interferents.

106. Veelainete interferents. Nagu eespool (§ 15) nägime, iseloomustab lainetusi interferents, s. o. lained liitudes kas tugevdavad või nõrgendavad üksteist. Vaatleme lähemalt kahest teineteise lähedal olevast punktist väljunud lainete interferentsi.

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

Mõlemad lained, jõudes mingisse punkti, panevad seal olevad veeosakesed võnkuma, kusjuures nad vastastikku teineteist kas tugevdavad või nõrgendavad, vastavalt sellele, kas sinna jõudnud võnkumised toimuvad sama- või vastasuunaliselt, s. o. kas üheaegselt sinna punkti jõuavad laineharjad või lainepõhjad või ühe laine hari jõuab sinna üheaegselt teise laine põhjaga. Et mõlemad vasa-

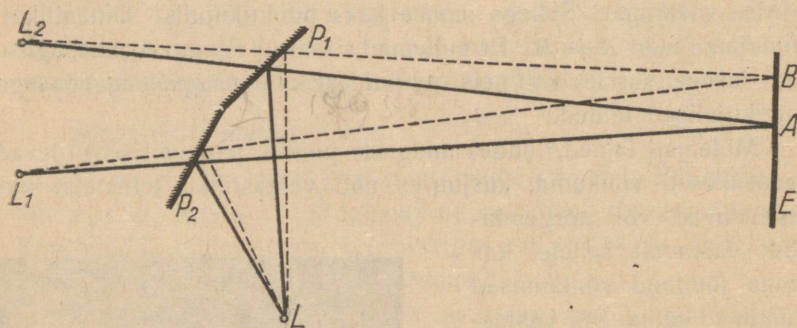


127. joon. Lainete interferents.

rad võnguvad üheaegselt ehk sünkrooniliselt, siis järgneb sellest, et kõik osakesed, mis on ühekaugusel laineallikaist A ja B , saavad samasuunalise tõuke kummaltki lainelt, seega nende võnkumise liitumisel tekib suurema amplituudiga võnkumine. Niisugune võnkumiste tugevdamine toimub punktides, mis asetsevad läbi AB keskkoha tõmmatud ristjoonel, sest kõik punktid sellel joonel on A -st ja B -st ühekaugusel. Samuti tugevdavad lained teineteist kohtades, kus B kaugus on A kaugusest ühe lainepikkuse λ , 2λ , 3λ , ... võrra suurem või, ümberpöörduvalt, A kaugus on samavõrra suurem B kaugusest.

Joonisel on näha kohad, kus võnkumised üksteist tugevdavad. Nende vahel on alad, millede kauguste vahe A -st ja B -st või ümberpöörduvalt on $\frac{\lambda}{2}$, $3\frac{\lambda}{2}$, $5\frac{\lambda}{2}$, Neisse punktidesse jõuavad lained nii, et nad annavad veeosakestele vastassuunalised tõuked, mistõttu nende võnkumine interferentsi tõttu kustub.

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



128. joon. Fresneli peeglikatse.

Fresneli järgi võib valguse interferentsi näidata järgmise katsega (128. joon.). Kahele peeglile P_1 ja P_2 , mis on asetatud teineteise suhtes 180° -st väga vähe erineva nurga all, langeb valgusallikast L läbi kitsa pilu ühevärviline ehk monokromaatiline valgus.

Seetõttu tekib kummaski peeglis valgusallikast L üks ebakujutis. Tähistame need ebakujutised L_1 ja L_2 . Niiviisi saame kaks valgusallikat, milledest väljuvad valguslained võivad anda interferentsi, nagu see esines kahe veelaine allika puhul eelmises §-s. Peeglitelt peegeldunud valgus langeb ekraanile E , millele valgusallikalt otsest valgust ei lange. Nagu katse näitab, on punktis A , mis asetseb läbi sirge L_1L_2 keskkoha tõmmatud ristjoonel, hele riba ja sellest kahel pool vaheldumisi tumedad ja heledad jooned.

Kujutleme, et L_1 -st ja L_2 -st lähtuvad valguslained, siis A -sse jõudes on nende võnkumised ühesuunalised ehk, nagu öeldakse, faasis, sest $L_1A = L_2A$, seega nende kiirte käiguvahe on null. Interferentsi tõttu võnkumised tugevdavad üksteist ja tekib hele joon või riba. Kui aga mingisse teise punkti B jõudnud kiirte käiguvahe $L_1B - L_2B$ on võrdne poole lainepikkusega, siis nende võnkumised on vastasuunalised ja interferentsi tõttu kustutavad üksteist: tekib tume joon. Kusagil A -st veel kaugemas punktis on käiguvahe jälle terve lainepikkus, mistõttu tekib uus hele joon, jne.

Seega valgel ekraanil on näha vaheldumisi heledad ja tumedad jooned. Keskmise hele joon on seal, kus L_1 -st ja L_2 -st tulnud kiirte käiguvahe on null. Sümmeetriliselt sellest mõlemal pool asetsevad teised heledad jooned. Analoogiline nähtus esineb, kui 127. joonisel kujutatud katses asetada vette risti veepinnaga ekraan. Sellele pinnale langevad veelained nii, et tugeva lainetusega kohad vahelduvad kohtadega, kus lainetust pole.

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

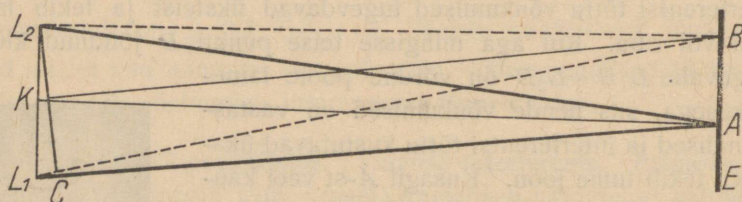
Valguslainete interferentsiooni Fresneli peeglikatse puhul kujutab 129. joonis.



129. joon. Interferentsjooned Fresneli peeglikatse puhul.

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

108. Valguslaine pikkuse määramine. Valguse interferentsil tekkinud tumedate (või ka heledate) interferentsjoonte kaugusest keskmisest heledast joonest võime arvutada valguse lainepikkuse λ .



130. joon.

Olgu L_1 ja L_2 Fresneli peeglites tekkinud ebakujutised (130. joon.). Olgu B esimene tume joon ekraanil ning selle kaugus keskmisest heledast joonest A võrdne $\frac{\delta}{2}$ -ga. Kui K on L_1L_2 keskpunkt, siis $KA = a$ on ekraani kaugus valgusallikast. Tähistame veel L_1L_2 kauguse d -ga. Et KB on väga suur võrreldes d ja $\frac{\delta}{2}$, siis võib lugeda $KB \approx a$. Tõmbame raadiusega L_2B punkti B ümber kaare, mis lõikab joont L_1B punktis C . L_1C on seega kiirte käiguvahe $L_1B - L_2B$. Antud juhul on see võrdne $\frac{\lambda}{2}$ -ga. Et L_2C on väga väike osa kaarest, siis võib teda käsitada sirgena, kusjuures L_2C on risti BL_1 -ga. Täisnurksed kolmnurgad L_1L_2C ja KBA on sarnased ($\sphericalangle KBA$ küljed on risti $\sphericalangle L_1L_2C$ külgedega), seega $L_1C : BA = L_1L_2 : KB$. Et $L_1C = \frac{\lambda}{2}$, $BA = \frac{\delta}{2}$, $L_1L_2 = d$, $KB = a$, saame

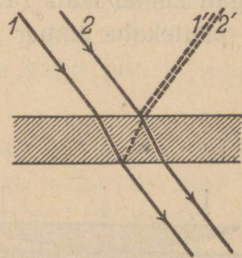
$$\lambda = \frac{d\delta}{a}.$$

Olgu ebakujutiste L_1 ja L_2 kaugus teineteisest $d = 0,7$ mm, ekraani kaugus valgusallikast $a = 2,26$ m ja esimese heleda joone kaugus keskmisest heledast joonest $2 \cdot \frac{\delta}{2} = 3,8$, seega $\frac{\delta}{2} = 1,9$ mm. Siis vastava kiire lainepikkus $\lambda = \frac{d\delta}{a} = \frac{0,7 \cdot 1,9}{2260} \approx 0,00058$ mm = $0,58 \mu$.

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

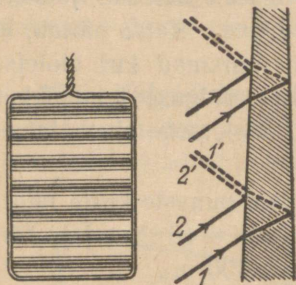
Vastavad arvutused näitavad, et äärmiste punaste kiirte lainepikkus on umbes $700 \text{ m}\mu$ [$1 \text{ m}\mu$ (millimikron) = 10^{-7} cm] ja äärmiste violetsete kiirte lainepikkus on umbes $400 \text{ m}\mu$.

109. Õhukeste kelmete värvid. Seebimulli puhudes paneme tähele, et see hakkab mitmevärviliselt helkima, kui seebikelme on küllalt õhukeseks muutunud. Samuti helgib spektrivärviliselt veepinnal laialivalgunud õhuke kiht õli või tärpentini või kahe k'aasi vahel olev õhuke kiht õhku. Tarvitades ühevärvilist ehk monokromaatilist valgust, näiteks kollast naatriumivalgust, näeme neis õhukestest kihtides vaheldumisi heledaid ja tumedaid vöote. Neid valgusnähtusi nimetatakse õhukeste kelmete värvideks. Õhukeste kelmete värvide tekki- mist seletatakse valguse interferentsiga. Langeb õhukesele kelmele ühevärviline valgus, kiired 1 ja 2, siis peegeldub osa valgusest kelme eespinnaal, osa tagapinnal (131. joon.). Mõlemate peegeldunud kiirte 1' ja 2' teepikkused pole võrdsed, mistõttu tekib käiguvahe. See käiguvahe on oleb kelme paksusest ja kiirte langemisnurgast. Võrdub käiguvahe paaritu arvu poollaine pikkustega ($1 \frac{\lambda}{2}, 3 \frac{\lambda}{2}, 5 \frac{\lambda}{2}, \dots$), siis interferentsi tõttu kustutavad kiired teineteise. On aga kiirte käiguvahe paarisarv poollaineid ($2 \frac{\lambda}{2}, 4 \frac{\lambda}{2}, 6 \frac{\lambda}{2}$), siis nad teineteist ei kustuta. Langeb õhukesele kelmele



131. joon. Õhukeste kelmete värvid.

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



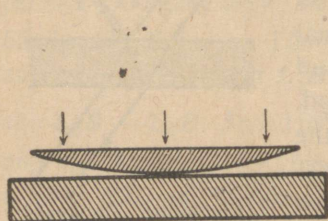
132. joon. Seebilahuse kelme.

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

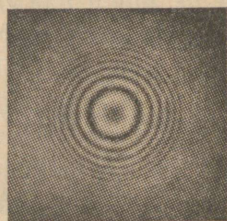
Kui valgustada seda kelmet valge valgusega, siis tulevad sellel nähtavale vikerkaarevärvilised horisontaalsed ribad. Monokromaatilise valguse puhul on sellel näha tumedad ja heledad ribad vaheldumisi.

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

110. Newtoni rõngad. Kui asetada lihvitud klaasplaadile nõrgalt kumer lääts (133. joon.), siis hariliku valguse puhul ilmuvad puutekohaga ümber nähtavale spektrivärvilised rõngad, mono-



133. joon.



134. joon. Newtoni rõngad.

kromaatilise valguse puhul aga vaheldumisi heledad ja tumedad rõngad. Seda nähtust seletame samuti kui õhukeste kihtide värvide tekkimist. Õhukeseks kelmeks on siin õhukiht klaasplaadi

ja klaasläätse vahel. Et siin õhukihi paksus suureneb kaugusega puutekohast, siis värvilised või heledad ja tumedad ribad on muutunud rõngakujuliseks. Puutekoht on peegeldunud valguses näha tumeda täpina.

Seda nähtust katsus esimesena seletada Newton (1676), kes lähtus valguse emissiooni teooriast. Valguse lainetuse teooria põhjal seletasid selle nähtuse hiljem Th. Young ja A. Fresnel.

1. Kollase naatriumivalguse lainepikkus on 588 m μ . Mitu lainepikkust mahub 1 cm?

2. Kui suur on võnkesagedus, kui lainepikkus on 400 m μ ?

3. Kollase naatriumivalguse lainepikkus vaakumis on 588 m μ . Kui suur on selle valguse lainepikkus klaasis, mille murdumisnäitaja on 1,6?

4. Kaks isokroonilist kollast kiirt lainepikkusega 600 m μ liituvad (interfereeruvad), kusjuures nende kiirte käiguvähe on 0,03 mm. Tugevdavad või nõrgendavad need kiired teineteist interferentsil?

XV. Difraktsioon.

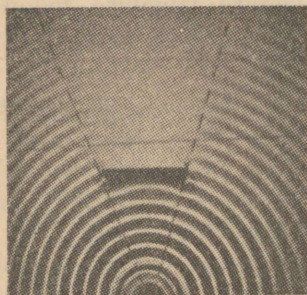
111. Veelainete difraktsioon. Tekitame laineaparaadi abiga veevannis võimalikult suure raadiusega ringlaineid. Lainete tee asetame tõkke. Katse näitab, et tõkke taga tekib „vari“, kui tõkke suurus võrreldes lainepikkusega on suur. Varju servad pole aga teravad, vaid osaliselt lähevad lained üle varju piiri: lained painduvad ka tõkke taha.

Asetame lainete tee pilu. Katse näitab, et kui pilu on küllalt kitsas, siis levivad lained ka pilu moodustava tõkke taha ning teravad varjud puuduvad. Ka siin painduvad lained tõkke taha. Mida väiksema tõkke või pilu võtame, seda rohkem painduvad lained selle taha. Väga väike tõke varju ei anna.

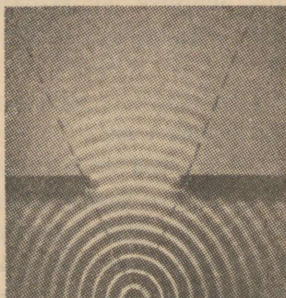
Samuti ka väga kitsa pilu puhul levivad lained pilust tõkete taha, nagu seda nägime eelmises peatükis (lk. 117). Vastupidi, mida laiema tõkke või pilu võtame, seda väiksemaks muutub lainete paindumine tõkke taha ja seda teravamaks muutuvad varju servad.

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

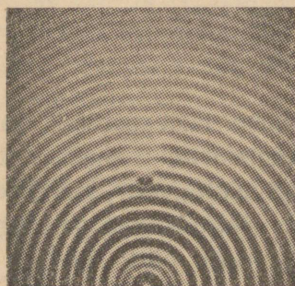
Katse näitab ka, et difraktsioon on märgatav siis, kui tõkke
või pilu suurus ei erine palju lainepikkusest.



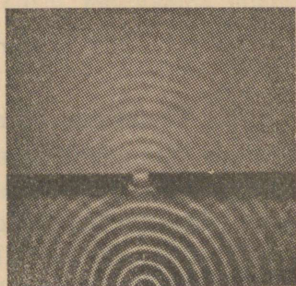
135. joon. Varju tekkimine
tõkke taga.



136. joon. Lainete levimine
läbi pilu.



137. joon. Lainete paindu-
mine väikese tõkke taha.



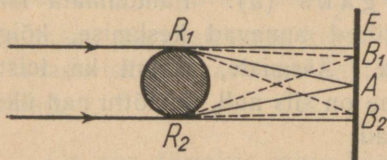
138. joon. Lainete levimine
läbi kitsa pilu ja paindumine
selle taha.

112. Valguse difraktsioon. Valgus on lainetus, seega peab
esinema difraktsioon ka valguse juures. Et valguse lainepikkus on
väga väike, siis esineb valguse difraktsioon ainult siis, kui ka tõkke
või pilu suurus on väga väike.

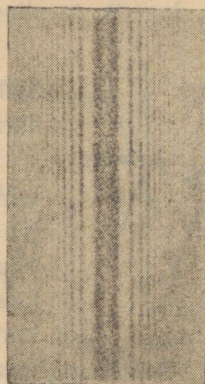
Laseme läbi kitsa pilu tulnud paralleelsel monokromaatilisel
valguskiirte kimbul langeda piluga paralleelselt asetatud peeni-
kesele nõelale.

Katse näitab, et nõela taha asetatud ekraanil pole nõela vari terav, vaid selle äärtel esinevad vaheldumisi tumedad ja heledad jooned. Valge valguse puhul on need jooned värvilised. Seejuures varju keskmine osa, mis peaks olema kõige tumedam, on vastu ootust hele.

Nähtus on seletatav nagu veelainete difraktsioongi. 139. joonisel on kujutatud nõela läbilõik. R_1 ja R_2 on nõela ääred, mida valguskiired riivavad.



139. joon. Valguse paindumine peenikese nõela taha.



140. joon. Nõela vari.

Neid punkte võib Huygeni järgi käsitada kui elementaarlainete allikat, kust lähtuvad elementaarlained ka nõela taha. Seega sarnaneb see nähtus Fresneli peeglikatsega. Varju keskmises osas A on elementaarlainete käiguvahe null, seetõttu ei kustu nad interferentsi tõttu: tekib hele joon. Seal, kus käiguvahe on $\frac{1}{2} \lambda$, kustutavad lained teineteise ja tekib tume joon.

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

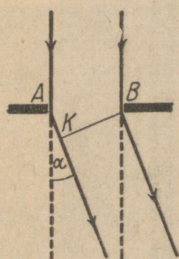
Järgmisteks katseteks tarvitame kitsast pilukujulist valgusallikat (tugevasti valgustatud kitsast pilu). Sellest valgusallikast tekitame kumerläätse abil kujutise ekraanil.

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

Valguse paindumist ehk difraktsiooni ühe pilu puhul seletame Huygeni printsiibist lähtudes, mille järgi iga pilupunkti võib

vaadelda kui elementaarlainete allikat, millest lähtuvad lainekiired igas suunas.

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



141. joon. Valguse difraktsioon ühe kitsa pilu puhul.

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

Nurka, mille moodustavad pilus paindunud kiired kiirte esialgse suunaga, nimetatakse *p a i n d e n u r g a k s* (α). Paindumata läbi pilu tulnud kiired annavad keskmise, kõige heledama riba. Äärmiste, samuti ka teiste kiirte käiguvähe on siis null, mistõttu nad üksteist tugevdavad.

Pilus paindunud kiirte juures esineb käiguvähe. Vastavalt käiguvähele esinevad siin järgmised juhud (142. joon.):

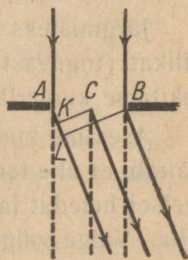
1) Äärmiste kiirte käiguvähe on võrdne poole lainepikkusega ($\frac{1}{2} \lambda$). Siis kustutavad need äärmised kiired teineteise interfereerumisel. Teistest A ja B vahel olevatest punktidest lähtunud elementaarlainete käiguvähe aga on väiksem kui $\frac{1}{2} \lambda$, mistõttu nad üksteist ei kustuta.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

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

2) Äärmiste kiirte käiguvähe on λ . Poolitades pilu nii, et $AC = CB$, saame punktidest A ja C väljunud kiirte käiguväheks $\frac{1}{2} \lambda$, seega kustutavad need elementaarlained üksteist (142. joon.).

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

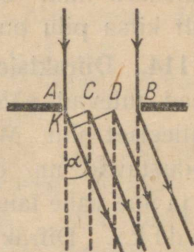
3) On äärmiste kiirte käiguvähe $\frac{3}{2} \lambda$, siis ei kustu interfereerumisel kõik elementaarlained.



142. joon.

Seletuseks jagame pilu kolmeks osaks: AC , CD , DB (143. joon.). Nagu juhul 2 võime näidata, et kaks kõrvuti olevat osa, näiteks AC ja CD vahel olevaist punktidest lähtunud elementaarlained, interferentsi tõttu kustuvad. Pilu ülejäänud punktidest DB vahel väljunud kiired aga ei kustuta üksteist, nagu seda nägime juhul 1. Seega paindub ainult osa kiiri pilus ning ekraanile tuleb esimene hele riba, mis on palju nõrgem kui keskmine hele riba.

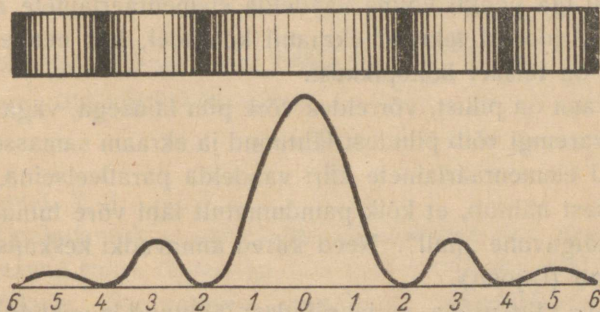
Samuti võime näidata, et juhul, kui äärmiste kiirte käiguvähe on $4\frac{\lambda}{2} = 2\lambda$, $6\frac{\lambda}{2} = 3\lambda$ ja enam, siis kustutavad kiired üksteist ning ekraanil tekivad vastavais kohtades tumedad ribad.



143. joon.

On aga äärmiste kiirte käiguvähe $5\frac{\lambda}{2}$, $7\frac{\lambda}{2}$ jne., siis paindub osa kiiri ning ekraanil tekivad heledad ribad. Et käiguvähe suurenemisega väheneb paindunud kiirte hulk, siis väheneb ka heledate ribad heledus, kuni nad muutuvad nähtamatuks. Seetõttu polegi suurte käiguvahede puhul kiirte paindumist pilu taga märgata. Samasugused tumedad ja heledad interferentsribad tekivad ka teisele poole paindunud kiirtest. Ühe pilu puhul tekkinud interferentsjoonte heledust kujutab graafiliselt 144. joon.

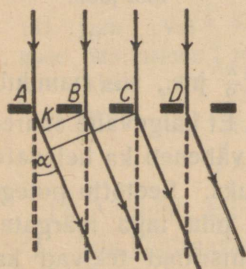
Et punaste kiirte lainepikkus on suurem kui näit. violetsete kiirte lainepikkus, siis käiguvähe λ , 2λ jne. tekib punaste kiirte korral suurema paindenurga juures. Katse näitabki, et punaseid



144. joon. Interferentsjooned.

kiiri tarvitades on heledate ribade kaugus suurem kui violetsete kiirte puhul. Joonisest järgneb: mida laiem on pilu, seda väiksem on paindenurk sama käiguvahe puhul. Väga laia pilu korral on paindenurk null. See seletabki, miks difraktsiooninähtus esineb ainult kitsa pilu puhul.

114. Difraktsioonivõre. Eriti teravad valguse difraktsiooni-jooned tulevad nähtavale, kui tarvitada ühe pilu asemel mitut paralleelset pilu. Mitu ühelaiust pilu üksteisest samadel kaugustel moodustavad nn. difraktsioonivõre (145. joon.). Ühe pilu ja ühe vahe laiust kokku nimetatakse difraktsioonivõre k o n s t a n d i k s. Difraktsioonivõre valmistatakse sel viisil, et teemandiga tõmmatakse klaasplaadile võrdsete kauguste tagant kriipsud.



145. joon.
Difraktsioonivõre.

Kriipsude vahed lasevad valgust läbi, moodustades seega pilud, kriipsud ise aga hajutavad kiiri. Ka fotograafimise teel võib valmistada difraktsioonivõresid.

Langegu monokromaatiline valgus difraktsioonivõrele risti. (Valgusallikana tarvitame kitsast pilu, mille kujutise tekitame kumerläätsel abil eemaloleval ekraanil.) Katse näitab, et paindumatult läbi difraktsioonivõre tulnud kiired annavad ekraanil keskmise heledaima joone, sellest kummalgi pool on teravad heledad jooned,

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

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

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

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

Määrava tähtsusega, millal piludest lähtunud laine kiired mingis punktis ekraanil üksteist tugevdavad või kustutavad, on kahe kõr-

vuti oleva pilu samapoolsest äärest väljunud kiirte käiguvahe. On nende käiguvahe λ , siis tugevdavad nad üksteist. Et igale punktile esimeses pilus vastab samasugune punkt teises pilus, mis annavad käiguvahe λ , siis kõik need kiired, koondudes ühte punkti ekraanil, annavad heleda joone. Samuti tekib ekraanil hele joon paindenurga juures, mille puhul see käiguvahe on 2λ , 3λ jne.

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

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

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

Difraktsioonivõre taga ekraanil tekivad heledad jooned paindenurkade juures, millede puhul kahe kõrvuti oleva pilu samapoolsest äärest väljunud kiirte käiguvahed on λ , 2λ , 3λ jne.

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

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

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

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

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

Seega üldiselt kehtib valem

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

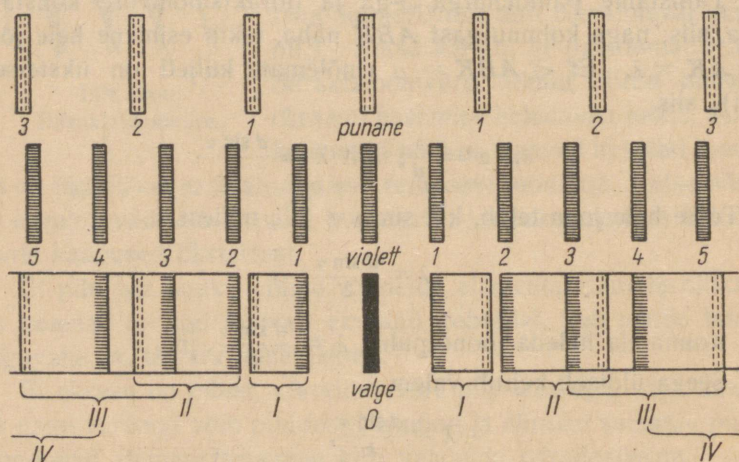
kus k on 1, 2, 3, ...

Et paindenurk α , samuti ka difraktsioonivõre konstant d on mõõdetavad suure täpsusega, siis võib nende abil määrata valguse lainepikkuse. See valguse lainepikkuse mõõtmise viis leiab laialdast rakendamist praktilises füüsikas.

Pilude arvu suurenemisega muutuvad difraktsioonivõres paindunud kiirte tekitatud jooned kitsamaks ja teravamaks. Ühtlasi suureneb valguse hulk, seega ka joonte heledus. Et saada valgusrikkaid difraktsiooninähtusi, seks tarvitatakse suure pilude arvuga ja väikese võrekonstandiga difraktsioonivõresid. Ameerika füüsikul Rowland'il õnnestus valmistada eriti täpseid difraktsioonivõresid, millel oli 20 000 pilu ühe inglise tolli ehk 787 pilu 1 mm kohta, seega võre konstant 0,00127 mm (Rowlandi võre).

115. Difraktsioonispekter. Valemist $\lambda = \frac{d \sin \alpha}{k}$ saame: $\sin \alpha = \frac{k\lambda}{d}$. Sellest järgneb, et punased kiired suurema lainepikkuse tõttu painduvad difraktsioonivõres rohkem kui violetsed, mispärast punase valguse puhul on heledad jooned keskmisest heledast joonest kaugemal kui violetse valguse puhul.

Lastes läbi kitsa pilu langeda difraktsioonivõrele valge valguse, paindub iga värv vastavalt lainepikkusele esialgselt suunast kõrvale isesuuruse paindenurga võrra, mistõttu võre taga ekraanil tuleb nähtavale spekter. Seda spektrit nimetatakse difraktsioonispektriks (146. joon.).



146. joon. Difraktsioonispekter.

Paindumata läbi difraktsioonivõre tulnud kiired annavad heleda valge riba, sest sinna langevad kõik kiired spektris lahutumatult. Sümmeetriliselt sellest mõlemal pool on difraktsioonispektrid. Keskmisele heledale joonele lähemal on nn. 1. järgu spektrid

(käiguvahe = λ), sellele järgnevad 2., 3. jne. järgu spektrid. Kuna 1. järgu spekter on selgesti eraldatud teistest spektritest ja samuti keskmisest heledast joonest, katavad seevastu 2. ja suuremate järkude spektrid osaliselt üksteist. Vastupidi prisma spektrile painduvad punased kiired difraktsioonivõres rohkem, violetsed kiired vähem.

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

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

Võrespektrit nimetatakse ka *normaalspektriks*.

Valguse difraktsiooni võib tähele panna, kui vaadata kauget valgusallikat, näiteks tänavalaternat, läbi pilu, mis moodustatakse kahe pliitsi asetamisega teineteise vastu.

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

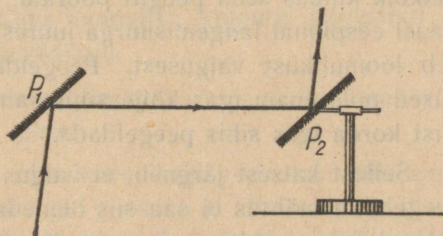
Kirjelda, kuidas tuleb siin difraktsioon nähtavale!

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

XVI. Valguse polarisatsioon.

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

Juhime paralleelse kiirtekimbu peeglile P_1 nii, et langemisnurk oleks ligikaudu 57° (147. joon.).



147. joon. Valguse polarisatsioon.

Peeglina tarvitame tagaküljelt tahmatud või musta paberiga kaetud klaasplaati, mistõttu peegeldavaks pinnaks on klaasi eespind. Olgu peegel asetatud nii, et valguskiirte langemistasapinnad, s. o. tasapinnad, milles asetsevad nende kiirte langemisnurgad, oleksid vertikaalsed, kiirtekimbu siht aga pärast peegeldumist oleks horisontaalne.

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

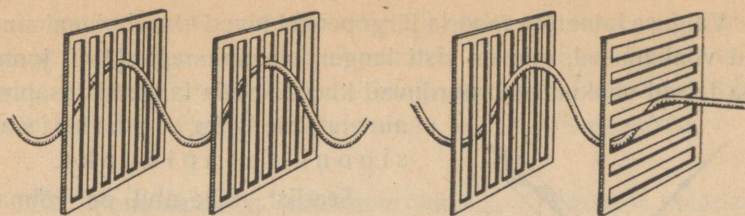
Teist peeglit saame peegeldunud kiirtekimbu kui telje ümber pöörata. Seda teist peeglit P_2 tähendatud telje ümber pöörates võib kiirtekimpu peegeldada kas üles, alla, vasemale või paremale. On teise peegli ette asetatud valge ekraan, millele langeb teist korda peegeldunud valgus, siis tekib seal hele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

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

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

Kui aga teisele peeglile juhtida valgus otseselt valgusallikalt ilma peegeldamata esimesel peeglil, siis teise peegli pööramisel jääb valguslaik, seega ka peegeldunud valguse tugevus samaseks, ükskõik kuidas seda peeglit pöörata. Kirjeldatud katse näitab, et klaasi eespinnal langemisnurga juures 57° peegeldunud valgus erineb loomulikust valgusest. Peegeldunud valguse külgede omadused pole enam igas külje sihis samad, mistõttu teda ei saagi teist korda igas sihis peegeldada.

Sellest katsest järgneb, et valgus ei saa olla pikilainetus, sest peegeldumisenähtus ei saa siis olneda sellest, millise küljega on valguskiir peegeldava pinna poole pööratud. Seega peame järeldama, et valgus on ristlainetus.



148. joon. Katse kumminööri.

Et paremini kujutella, mis toimub eelmises katses valguse peegeldumisel klaasi pinnal, vaatleme elastset ristlainetuse levimist, mida tekitame kumminööril.

Valmistame puuliistudest kaks võret nii laiade piludega, et kumminöör neist vabalt läbi mahub. Asetame mõlemad võred teineteise taha nii, et pilud oleksid vertikaalsed. Pistame kumminööri piludest läbi ja tekitame sellel vertikaalseid ristlaineid (148. joon.). Katse näitab, et lained levivad vabalt läbi võrede. Nüüd pöörame tagumist võret 90° võrra, nii et selle pilud oleksid risti eelmise võre piludega. Tekitame uuesti kumminööril samasuguseid ristlaineid. Katse näitab, et need lained teisest võrest enam läbi ei lähe.

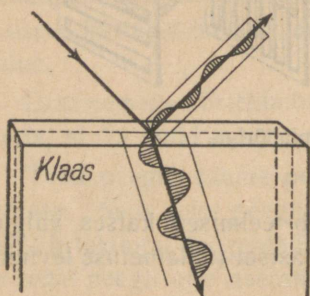
Tekitades ühe võre ees kumminööril ristlaineid mitmesugustes suundades, näeme, et läbi võre lähevad ainult need võnkumised, mis on rööbiti piludega. Kui aga tekitada kumminööris pikilainetus, levib see läbi võrede, ükskõik kuidas need on asetatud.

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

Klaasi eespinnal peegeldunud valguskiires aga toimuvad võnkumised ainult ühes kindlas sihis.

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

Valguse lainetuse teooria järgi peegelduvad klaasi pinnal ainult need võnkumised, mis on risti langemistasapinnaga (149. joon.), kuna teised võnkumised murduvad klaasi. Seda langemistasapinda nimetatakse ka polarisatsioonitasapinnaks.



149. joon. Kaksikmurdamine.

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

117. Polariseerimine valguse murdumisel. Ka valguse murdumisel võib saada polariseeritud valgust. Kui juhtida kiirtekimp läbipaistvale klaasplaadile (tagaküljelt mitte tahmatud ega musta paberiga kaetud) langemisnurka all 57° , siis klaasplaadist läbitulnud valgust analüüsides leiame, et see on polariseeritud nagu peegeldunud valguskiir. Katse näitab samuti, et klaasi läbinud kiire polarisatsioon pole täielik.

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

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

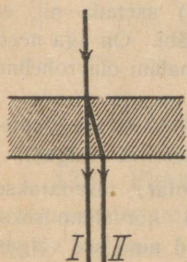
Nurka, mille all valguskiired peavad langema peegeldavale pinnale, mille juures polarisatsioon on täielik, nimetatakse polarisatsiooninurgaks. Erisuguste ainete polarisatsiooninurgad on ka isesuurused. Näiteks vee polarisatsiooninurk on 53° , flintklaasil 57° .

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

118. Polariseerimine kaksikmurdumisel. Täielikult polariseeritud valgust võib saada mitmete läbipaistvate kristallide abil, milles esineb nn. kaksikmurdumine. Tuntuim neist kristallidest on lubjapagu (CaCO_3), nimetatud ka islandi paoks. Kui vaadata läbi lubjapao kirja (150. joon.), siis paistab see kahekordsena. Ainult ühes sihis see nähtus puudub. Seda sihti nimetatakse kristalli optiliseks teljeks.



150. joon. Kiri vaadatuna läbi lubjapao.



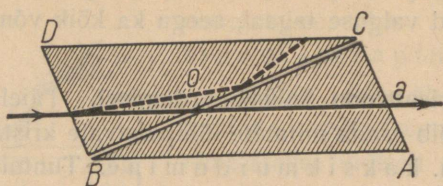
151. joon. Kaksikmurdumine.

Kui lubjapao ülemisele tahule langeb valguskiir, siis lahutub see kiir lubjapaos kaheks. Üks neist kiirtest käitub murdumiseaduste järgi, mispärast seda nimetatakse korrapäraseks kiireks. Teise kiire kohta pole murdumiseadus kehtiv. Seda kiirt nimetatakse seepärast ebakorrapäraseks.

Uurides lubjapaos murdunud kiiri analüsaatori abil, on leitud, et need mõlemad kiired on polariseeritud, kusjuures nende polarisatsioonipinnad on teineteisega risti.

119. Nicol'i prisma. Et saada ainult ühte polariseeritud kiirtest, mis tekivad kaksikmurdumisel lubjapaos, selleks kõrvaldatakse teine neist järgmise kunstvõttega. Olgu $ABDC$ kristalli läbilõik. Alustahud AC ja BD lihvitakse nii, et teravnurgad A ja D oleksid pisut teravamad kui loomulikul kristallil. Seejärel lõigatakse kristall pooleks diagonaalpinda BC mööda ja kleebitakse uuesti kokku kanada palsamiga, mille murdumisnäitaja on väiksem kui lubjapao oma. Langeb tahule BD valguskiir, siis murdumisel lubjapaos lahutub ta kaheks — korrapäraseks ja ebakorrapäraseks kiireks. Korrapärase kiir murdub rohkem ja seetõttu langeb kanada palsami kihile suurema langemisnurga all. Kristalli tahud on lihvitud nii, et korrapärase kiir heide-

takse Kanada palsami kihil tagasi täieliku sisepeegeldumise teel, kuna ebakorrapärane kiir pääseb sellest läbi. Seega kristallist väljunud kiir on täielikult polariseeritud.



152. joon. Nicoli prisma.

Säärast kunstlikult valmistatud kristalli nimetatakse *Nicoli prisma* (152. joon.). Selle leiutas W. Nicol 1842. a.

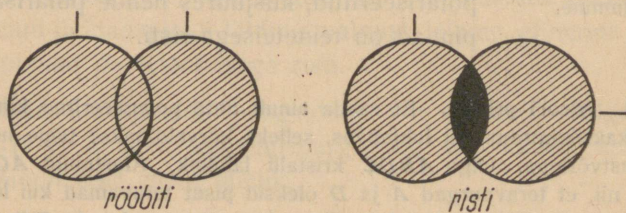
Nicoli prisma võib tarvitada analüsaatorina, samuti ka polarisaatorina.

120. Turmaliintangid. Kui lõigata turmaliinikristallist tasaparalleelsed plaadid, nii et lõikepind oleks paralleelne kristalli optilise teljega, siis risti säärasele plaadile langenud valgus lahutub kaheks polariseeritud valguseks, millest aga üks kristallis täielikult absorbeeritakse.

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

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

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



153. joon. Polarisatsioonifiltrid.

Sääraseid polarisatsioonifiltreid on katsutud tarvitada ka autode juures vastutuleva auto prožektorite valguse silmipimestava mõju kõrvaldamiseks. Selleks asetatakse autoprožektorite ette polarisatsioonifiltrid, mille polari-

satsioonipind on horisontaalse tasapinna suhtes 45° võrra kaldu. Samasugused filtrid on ka autojuhi prillideks. Seetõttu näeb autojuht oma auto prožektorite valgust, mitte aga vastutuleva auto prožektorite oma, sest selle valguse polarisatsioonipind on risti tema enda auto prožektorite valgusega.

1. Võta klaasplaat, kleebi selle ühele küljele must paber ja tarvita seda siis analüsaatorina! Kui päike paistab tuppa, määra siis selle abil, millisel pinnal peegeldunud valgus on polariseeritud!

2. Kas häälelaineid võib polariseerida?

121. Ajaloolisi märkusi. Valguse polarisatsiooni avastas E. L. Malus (1775—1812), kes aastal 1808, vaadates läbi lubjapao-kristalli Luxembourggi palee (Pariisis) aknaid, pani tähele, et kristalli teatud asendis on pilt ainult ühekordne. Maluselt on pärit ka nimetus „polarisatsioon“. Hiljem näitas Fresnel, et kaks teineteisega risti polariseeritud valguskiirt ei anna interferentsi. Sellest järeldas siis (1817. a.) Th. Young, et valgus on ristlainetus. Esimese polarisatsiooniaparaadi konstrueeris J. Nörrenberg a. 1858.

Kaksikmurdumise avastas a. 1669 taanlane Erasmus Bartholinus (arst, matemaatik ja jurist, 1625—1698).

XVII. Luminestsents. Spektraalanalüüs.

122. Fluorestsents ja fosforestsents. Meie valgusallikate valgusekiirgamise põhjuseks on peamiselt nende kõrge temperatuur. Valguse kiirgumist, mille põhjuseks pole kiirgava keha kõrge temperatuur, nimetatakse **luminestsentsiks**. Luminestsentsinähtustest on tähtsaimad fluorestsents ja fosforestsents.

Valgustame uraanklaasi või fluorestseiinilahust violetsete või siniste kiirtega. Katse näitab, et uraanklaas sellisel valgustamisel helendab roheliselt, fluorestseiinilahus aga heleroheliselt. Kehade kiirgumist, mida põhjustab kehale langenud valgus, nimetatakse **fluorestsentsiks**. Seejuures on iseloomulik, et fluorestsentsvalguses võivad puududa kiired, mis fluorestsentsi tekitavad: uraanklaasi valgustati violetse valgusega, kuid uraanklaas fluorestseerib roheliselt, millist valgust uraanklaasile ei langenudki. See-poollest erineb fluorestsents põhiliselt valguse peegeldumisest. Valguse peegeldumisel heidetakse tagasi sama valgus, mis langeb peegeldavale pinnale. Hoides näiteks valget pabeririba spektris,

näeme, et spektri punases osas näib see paber punasena, seega peegeldab ta punaseid kiiri, sinises osas sinine, jne. Hoides aga spektris pabeririba, mis on kaetud näiteks plaatina baariumtsüanüü-niga (mis fluorestseerib roheliselt), näeme, et spektri violetses ja sinises osas helendab ta heleroheliselt. Seega fluorestseerivas kehas muundub kehale langenud valguse energia teisekujuliseks valgusenergiaks. Katsed näitavad, et fluorestsentsi tekitavad peamiselt violetted ja sinised kiired, kuna punased kiired fluorestsentsi spektri nähtavas osas ei tekita. Üldiselt kehtib reegel: fluorestsentsvalgus on pikemalaineline kui fluorestsentsi tekitav valgus. Peale uraanklaasi ja fluorestsentsiinilahuse fluorestseerivad veel petrooleum, eosiin, klorofüllilahus, masinaõli jne.

Kuidas seletada, miks masinaõli paistab läbipaistvas valguses punakas-kollane, muidu aga helgib roheliselt?

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

Fosforestseerivaist aineist valmistatakse sageli elektrihoõglampide kustutajate nupud, mis helendavad ka pärast hoõglambi kustutamist.

123. Ultravioletsed kiired. Tekitame prisma abil volta kaare või päikesevalguse spektri valgel ekraanil. Kui asetame fluorestseeriva ekraani spektri punase osa kohale, näeme, et punases valguses fluorestseeriv ekraan paistab punasena nagu valgegi ekraan. Nihutades fluorestseerivat ekraani spektri violetse osa poole näeme, et ta violetsete ja siniste kiirte toimel tugevasti rohekalt fluorestseerib. Nihutades fluorestseerivat ekraani edasi näeme, et fluorestseeriv ekraan helendab ka väljaspool spektri violetset osa, seal, kus valgel ekraanil midagi näha pole. See katse näitab, et spekter ulatub violetsest osast veelgi kaugemale, kuid sinna langenud kiirgus on silmale nähtamatu. Neid violetsest tugevamini murduvaid, seega lühema lainepikkusega kiiri nimetatakse ultravioletseiks kiirteks. Eriti kaugele ulatub spektri ultra-

violetne osa, kui tarvitada kvartsist prisma ja läätse, sest harilik klaas neelab suure osa ultravioletsest kiirgusest.

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

Ka avaldavad ultravioletsed kiired tugevat füsioloogilist toimet inimese kehale, hävitavad pisikuid jne. Inimese naha pruuniks muutumist — päevitumist — põhjustavad ultravioletsed kiired. Eriti tugeva füsioloogilise toimega on kiired lainepikkusega 320 kuni 290 m μ .

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

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

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

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

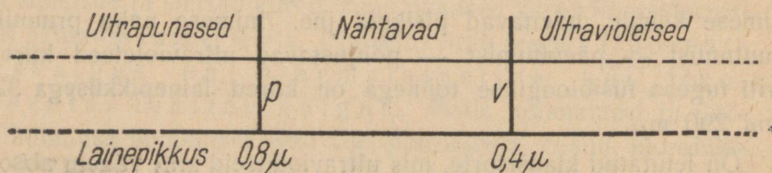
Kiirte soojusliku toime uurimiseks tarvitatakse termopatareid, mis on ühendatud tundliku galvanomeetriga.

Termopatarei koosneb mitmest järjestikku lülitatud termoelemendist. Viimase moodustavad kaks isesugust metalltraati, mis on otsapidi teineteisega kokku joodetud. Kui metallipaari ühte jootekohta soojendada, siis tekib selles elektrivool, mis on seda suurem, mida kõrgem on jootekohtade temperatuuri vahe. Seejuures annab galvanomeeter seda suurema hälbe, mida rohkem soojust langeb termopatareile.

Katse näitab, et violetsed kiired tekitavad vähe soojust. Mida rohkem termopatareid spektri punase osa poole viia, seda suurema

hälbe annab galvanomeeter, seega seda rohkem soojust kiired tekitavad. Eriti tugeva soojusliku toimega on punased kiired.

Kuid galvanomeeter näitab voolu ka siis, kui viia termopatarei spektri punasest äärest välja. Seega sinna langevad silmale nähtamatud kiired, mis tekitavad soojust, kuid prisma kalduvad kõrvale vähem kui punased kiired.

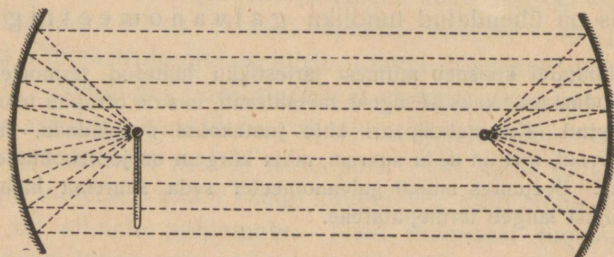


154. joon. Spektri ulatus.

Ultrapunased kiired on seega pikemalainelised kui nähtavad valguskiired.

Tavalisele fotoplaadile ultrapunased kiired ei mõju samuti kui punasedki kiired. Uuemal ajal on siiski korda läinud valmistada fotoplaate, millesse mõjuvad ultrapunased kiired. Et ultrapunased kiiri iseloomustab nende soojuslik toime, siis nimetatakse neid kiiri ka soojuskiirteks, milline nimetus pole aga päris õige, sest ka teised kiired, nähtavad ja ultravioletsed kiired, omavad soojuslikku toimet.

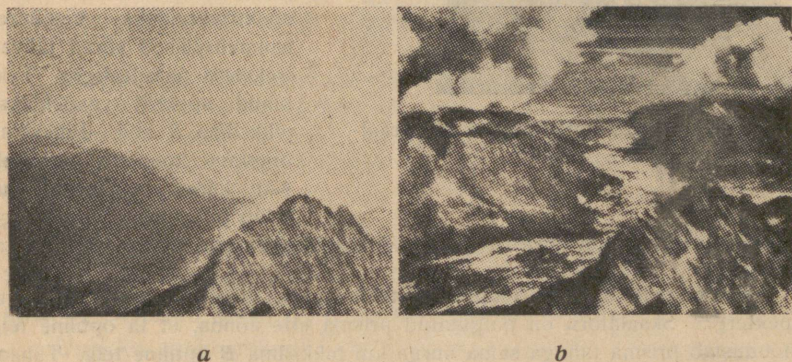
Ultrapunased kiired peegelduvad ja murduvad nagu nähtavadki kiired. Paigutades kaks metallist nõguspeeglit teineteise vastu ja asetades ühe peegli tulipunkti kuumutatud keha, mis



155. joon. Ultrapunaste kiirte peegeldumine.

kiirgab ultrapunaseid kiiri, siis peegeldumisel sellel peeglil muutuvad kiired paralleelseks ja langevad teisele nõguspeeglile. Teisel peeglil peegelduvad ultrapunased kiired tagasi ja koonduvad peegli tulipunkti. Sinna asetatud termomeeter näitab seetõttu temperatuuri tõusu.

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



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

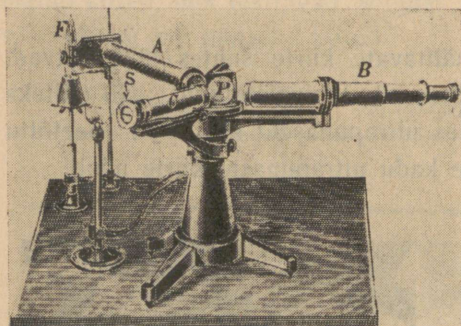
Ultrapunased kiired oma suure lainepikkuse tõttu ei haju udu-
piiskades. Seepärast on udu ultrapunaste kiirte suhtes läbipaistev. Seda ultrapunaste kiirte omadust kasutatakse fotograafimiseks uduse ilmaga, kusjuures tarvitatakse muidugi ultrapunaste kiirte suhtes tundlikke fotoplaate.

125. Spektraalaparaat. Nagu eespool (§ 74) nägime, võime prisma abil lahutada valget, üldse liitvalgust spektri- ehk algvärvideks. Seda prisma omadust kasutatakse valgusallikate valguse koosseisu määramiseks ehk analüüsimiseks.

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

157. joonis kujutab Kirchhoff-Bunseni spektraalaparati, kuna 158. joonis kujutab kiirtekäiku selles.

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

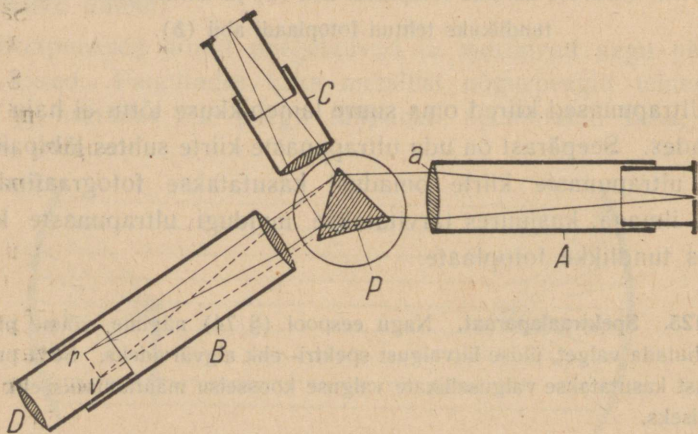


157. joon. Kirchhoff-Bunseni spektraalaparaat.

värv isekohas. Seda spektrit vaadeldakse pikksilma okulaariga kui luubiga.

Pikksilma objektiivi tulipunktis tekib seega skaala kujutis samuti kui spekteri. Skaalatoru on paigutatud prisma ette nõnda, et ta optiline telg moodustab prisma tahuga sama nurga kui pikksilma *B* optiline telg. Tähen-

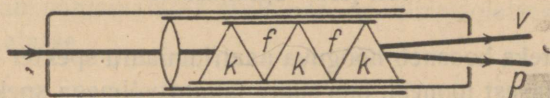
paigutatakse uuritav valgusallikas, näiteks leek. Pilu asetseb kumerläätsse tulipunktis, seega läbi pilu kumerläätsse langenud kiired pärast murdumist läätses muutuvad paralleelseks. Prisma lahutab temale langeva paralleelse kiirtekimbu spektrivärvideks, kusjuures samavärvilised kiired jäävad isekeskis paralleelseks. Tekkinud spektrit vaadeldakse pikksilma *B* abil. Pikksilma objektiiv koondab paralleelsed kiired tulipunkti, kus tekib pilu tõeline kujutis, iga



158. joon. Kiirtekäik Kirchhoff-Bunseni spektraalaparadis.

dab, vaatleja näeb spektrit skaala kohal. Skaalatoru C prismapoolses otsas on kumerläät, teises otsas, kumerläätse tulipunktis, on läbipaistev skaala, mida valgustatakse eestpoolt. Samaselt pilutoruga on skaalatorust väljunud valguskiired paralleelsed. Need kiired peegelduvad prisma tahul ja sätuvad pikksilma.

Lihtsamate spektraaltööde puhul tarvitatakse nn. otsevaate-prisma ga spektroskoobe, kus valgus lahutub küll spektrivärvideks, kuid ei kaldu oma sihist kõrvale.



159. joon. Otsevaate-spektroskoop.

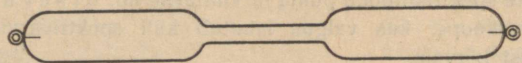
Otsevaate-spektroskoobi prisma koosneb mitmest vaheldumisi üksteisele taha paigutatud kroon- ja flintklaasist prismast. Et flintklaasist prisma hajutab spektrivärve suurema nurga all kui kroonklaasist prisma, siis valguskiired, läbides sellise prismade kombinatsiooni, lahutuvad spektrivärvideks, kuigi kiirte siht ei muutu.

126. Emissioonispekter. Spektrit, mida annavad kiirgavad kehad, nimetatakse emissioonispektriks. Emissioonispekter sisaldab kõiki neid spektrikiiri, mida antud keha kiirgab.

Uurides spektroskoobi abil volta kaare, hõõguva plaatinatraadi, elektripirni hõõgniidi või petrooleumileegi valgust, leiame, et nendes spektrites üks värv läheb teiseks üle pidevalt. Säärast spektrit nimetatakse pidevaks spektriks. Volta kaares on valgusallikaks positiivne süsi, mis on tahkes olekus. Samuti on tahkes olekus helendav elektripirni hõõgniit ja petrooleumilambi leek, kus helendavad väikesed söeosakesed. Samasuguse pideva spektri saame, kui valgusallikaks on hõõguv vedel keha, näiteks sularaud.

Seega heleda ehk valge hõõgumiseni kuumutatud tahked ja vedelad kehad annavad pideva spektri. Neis spektrites ei puudu ükski värv. Hõõguvate aurude ja gaaside spektri saamiseks asetame tüki uuritavat ainet volta kaare süte vahele või Bunseni põleti värvitusse leeki, kus see aine kiiresti auruks muutub. Ka võib hõõndatud gaasid helen-dama panna elektrivoolu abil. Seks otstarbeks tarvitatakse erilisi nn. spektraaltorusid (160. joon.).

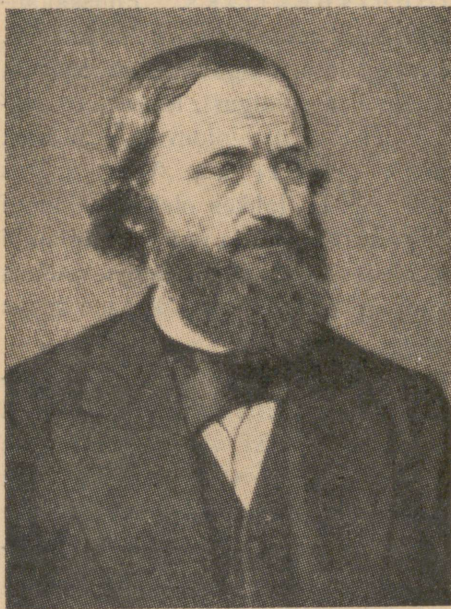
Helendavate gaaside spektreid uurides leiame, et nende spektrid koosnevad üksikuist joontest ja ribadest, mis on teravalt üksteisest eraldatud. Seega hõõguvad gaasid ja aurud annavad joon- või ribaspektri.



160. joon. Spektraaltoru.

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

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



161. joon. Gustav Robert Kirchhoff (1824—1887) tegutses ülikooli professorina Breslaus, Heidelbergis ja Berliinis. Ühes Bunseniga leiutas ja arendas ta spektraalanalüüsi ning avastas siis selle abil rea uusi keemilisi elemente (rubiidium, tseesium jt.). Suur tähtsus on Kirchhoffi poolt püstitatud temperatuurikiirguse seadusel, mis annab seose kiirguse absorptsiooni ja emissiooni vahel. Samuti tähtsad on ta uurimised haruvoolude kohta, mille tulemuks oli tema nime all tuntud haruvoolu reeglite püstimine.

Seega igal gaasil või aurul on erisugune, ainult temale omane spekter.

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

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

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

Eriti suur tähtsus on hõõguvate gaaside ja aurude absorptsioonispektritel.

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

Lahutame volta kaare valguse prisma abil spektriks: saame ekraanil pideva spektri. Asetame nüüd pilu ette Bunseni põleti värvitu leegi, kuhu paigutame plekist tehtud pannikese abil tükkise naatriumi. Naatrium aurustub Bunseni põleti leegis ja leek muutub kollaseks. Spektri kollases osas tuleb nähtavale tume joon. Katses nähtub, et naatriumi aur, mille temperatuur on palju madalam kui volta kaare temperatuur, neelab valgust, mida ta ise kiirgab. Pilu ees olev naatriumi aur mitte ainult neelab valgust, vaid kiirgab ka ise. Kuid et naatriumi auru temperatuur on palju madalam volta kaare temperatuurist, siis on naatriumi joon võrreldes ümbrusega tumedam.

Samuti näitab katse, et liitium absorbeerib punaseid kiiri, seega samu kiiri, mida ta ise kiirgab. Täheleb, hõõguvad gaasid ja aaurud neelavad kõrgema temperatuuriga valgusallika

kiirgusest neidsamu spektrivärve, mida nad ise kiirgavad (Kirchhoff'i seadus).

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

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

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

Päikesespektri uurimiste tulemuseks oli seni tundmatu aine avastamine. N. Lockyer pani 1868. a. päikesespektris tähele silmatorkavat tumedat joont, mida ei andnud ükski Maakeral seni tuntud aine. Seepärast oletati algul, et Päikese atmosfäär sisaldab Maakeral tundmatut ainet. Seda ainet nimetati heeliumiks. Hiljem, a. 1895, avastati heelium ka Maakeral.

129. Spektraalanalüüs. Iga ainet iseloomustab isesugune emissiooni- ja absorptsioonispekter. Sellel nähtusel põhineb spektraalanalüüs, ainete keemilise koosseisu määramine nende spektrite järgi, milline määramisviis on pärit Bunsenilt ja Kirchhoff'ilt.

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

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

Nii näiteks annab nõrk verelahus tugeva absorptsioonijoone spektri rohelisel alal.

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

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

Kinnistähtede spektreid on mitmesuguseid. Ühe liigi kinnistähtede spektrid on sarnased Päikese spektriga ja neis leidub hulk tumedaid absorptsioonijoone. Teiste kinnistähtede spektrites leiduvad jälle heledad vesiniku ja heeliumi emissioonijooned.

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

130. Doppleri efekt. Nagu teame, muutub hääleallika poolt tekitatud hääl kõrgemaks ja vastav lainepikkus lühemaks, kui hääleallika ja kuulaja vaheline kaugus väheneb; vastupidisel juhul, s. o. hääleallika ja kuulaja vahelise kauguse suurenedes muutub hääl madalamaks, lainepikkus suuremaks. Analoogiline nähtus esineb ka valguse puhul. Kui valgusallikas vaatlajale läheneb või temast kaugeneb, siis muutub valguse lainepikkus, seega ka tema värv. Et valguse kiirus on väga suur, siis muutub see nähtus meile märgatavaks vaid juhul, kui valgusallika kiirus on suur. Niisugust valguslainepikkuse muutust on seetõttu tähele pandud ainult taevakehade (kinnistähtede, udukogude) juures.

Täpsete mõõtmiste varal on kindlaks tehtud, et mõnede kinnistähtede spektris on spektraaljooned nihkunud spektri punase osa poole, seega lainepikkus on suurenenud, millest järeldame, et see taevakeha meist kaugeneb. Kui aga taevakeha spektrijooned on nihkunud spektri violetse ääre poole, siis järeldame, et see taevakeha meile läheneb. Vastavad mõõtmised näitavad, et need kiirused Päikese suhtes on mitusada $\frac{\text{km}}{\text{sek}}$.

Mõne kinnistähe spektris võib märgata perioodilist spektrijoonte laienemist. See näitab, et vastav kinnistäht koosneb kahest kinnistähhest, mis tiirlevad nende ühise raskuskeskme ümber. Juhul, kui üks neist meile läheneb, teine aga kaugeneb, siis tekibki spektraaljoonte laienemine.

1. Kuidas võib määrata, kas joonspektris on jooned peale nähtava osa ka spektri nähtamatus osas?

2. Kuidas seletada, et peaaegu alati on spektris olemas kollane naatriumi joon, kui valgusallikaks on mingi leek?

3. Kas punased kiired võivad tekitada luminesentsi?

131. Ajaloolisi märkusi. Et valge valguse võib lahutada spektri- ehk algvärvideks, selle avastas I. Newton 1666. a. W. Wollaston oli esimene, kes päikesespektris tähele pani tumedaid jooni, millist nähtust ta aga ei suutnud seletada. Lähemalt uuris tumedaid jooni päikesespektris Jos. Fraunhofer (1787—1826), kelle järgi hakatigi neid tumedaid jooni kutsuma Fraunhoferi joonteks. Fraunhofer avastas ligi 500 joont. Ühtlasi pani ta tähele, et õlilambi leegis esineb hele kollane joon samas kohas, kus päikesespektris on tume *D*-joon.

Spektraalanalüüsi leiutasid ja arendasid G. R. Kirchhoff ja R. W. Bunsen 1859. a.

Ultrapunased kiired avastas W. Herschel 1800. a., ultravioletsed kiired J. Ritter (1801). V. Schumann jõudis ultravioletsete kiirte uurimisel kuni lainepikkuseni 125 m μ . Praegusel ajal ulatub uuritud ala kuni 10 m μ .

Fluorestsentsi pani esimesena tähele Kircher (1601—1680), kuna fosforestsents oli tuntud juba vanadele kreeklastele.

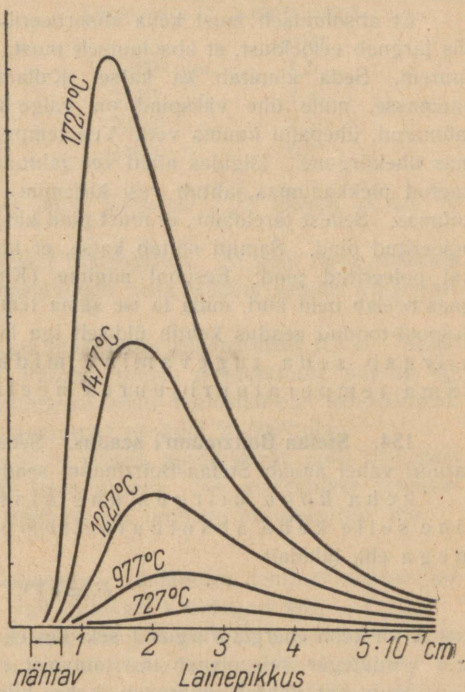
XVIII. Temperatuurikiirgus.

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

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

Vaatleme allpool lähemalt temperatuurikiirguse seadusi.

Kiirgusenergia jaotust spektris võib mõõta termopatarei abil (vt. lk. 143). Säärased mõõtmised näitavad, et energia jaotus spektris mitmesuguste lainepikkustega aladel pole ühtlane. Kandes püstteljele kiirgusenergia suuruse, rõhtteljele vastava kiirguse lainepikkuse, saame kõvera, mis kujutab graafiliselt energia jaotust spektris (energia jaotuskõver). 162. joon. kujutab energia jaotuskõverat mitmesuguste temperatuuride juures. Nagu joonisest nähtub, tõuseb energia, mida keha kiirgab 1 sek. kestel, alates ultrapunase spektri poolelt ja tõustes maksimumini langeb ultravioletsel poolel järsku. On arusaadav, et pindala, mida piirab energia jaotuskõver, kujutab graafiliselt kogu keha kiirgust. Kiirgusenergia, mis tuleb spektri nähtava osa kohta, on joonisel eraldi märgitud.



162. joon. Energia jaotus spektris.

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

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

Keha, mille temperatuur on ümbruse temperatuurist kõrgem, kaotab soojust soojusejuhtivuse, konvektsiooni ja samuti ka soojuskiirguse näol. Kaks isetemperatuurini kuumutatud keha kiirgavad soojust teineteisele, kusjuures soojem keha kiirgab soojusenergiat külmemale kehale rohkem kui kül-

mem keha soojemale. Kui nende temperatuurid on ühtlustunud, ei lakka kehade soojuskiirgus. Et nende temperatuurid enam ei muutu, sellest järeldame, et tasakaalu puhul keha kaotab soojusenergiat kiirguse näol niisama palju, kuipalju ta sama aja kestel absorbeerib soojuskiirgust. See kehtib üldiselt kõikide kehade kohta.

Et absoluutselt must keha absorbeerib kõik temale langenud kiirguse, siis järgneb eelöeldust, et absoluutselt musta keha soojuskiirgus on ka kõige suurem. Seda kinnitab ka katse. Kallame kahte ühesuurusesse plekkanumasse, mille ühe välispind on valge (poleeritud), teise välispind aga tahmatud, ühepalju kuuma vett. Vee temperatuur olgu algul mõlemas anumal ühekõrgune. Jälgides nüüd vee jahtumist anumais näeme, et tahmaga kaetud plekkanumas jahtub vesi kiiremini kui valge välispinnaga plekkanumas. Sellest järeldame, et must pind kiirgab rohkem soojuskiiri kui valge poleeritud pind. Samuti näitab katse, et kore pind kiirgab rohkem soojust kui poleeritud pind. Eespool nägime (Kirchhoff'i seadus, lk. 149), et iga gaas neelab neid kiiri, mida ta ise sama temperatuuri juures kiirgab. Seega eespool-toodud seadus kehtib üldiselt iga lainepikkuse puhul: iga keha kiirgab seda tugevamini, mida rohkem ta neid kiiri sama temperatuuri juures neelab.

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

keha kogu kiirgus ühe ajaühiku kestel on võrdeline selle keha absoluutse temperatuuri neljanda astmega ehk lühidalt

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

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

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

135. Wien'i nihkeseadus. Joonisest 162 nähtub samuti, et kiirgusenergia maksimum temperatuuri tõusuga nihkub spektri violetse osa poole, s. o. lühema lainepikkuse poole.

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

kiirguse intensiivsema osa lainepikkuse (λ_m) korutus kiirgava keha absoluutse temperatuuriga on konstantne ehk lühidalt

$$\lambda_m \cdot T = \text{const.}$$

Seda seadust, mida kinnitasid hilisemad katselised uurimised, tuntakse füüsikas **Wieni nihkeseaduse** nime all.

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

Valgusallikas	Temperatuur	Lainepikkus μ -tes
Küünal	1960 ^o abs.	1,5
Söeniidi-hõõglamp . .	2100	1,4
Gaasilamp	2450	1,2
Volta kaar	4200	0,7

Moodustades iga valgusallika jaoks korrutise $\lambda_m T$ näeme, et see on igal juhul 2940.

Wieni nihkeseadus leiab laialdast rakendamist. Et pole raske määrata energia maksimumi spektris, siis kasutatakse seda seadust valgust kiirgavate kehade temperatuuri määramiseks.

Päikesespektris asetseb energia maksimum lainepikkusel 0,5 μ . Kasutades Wieneri nihkeseadust leiame Päikese pinna temperatuuri, mis on ligi 5800^o abs. Samal viisil võib määrata ka teiste kinnistähedete temperatuuri. Kuumemate kinnistähedete pinnatemperatuur on kuni 20 000^o abs.

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

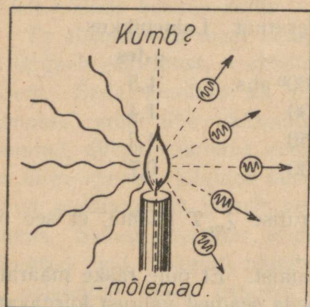
136. Meie valgusallikate kasutegur. Lähtudes temperatuurikiirguse seadustest võime otsustada meie valgusallikate kasuteguri üle.

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

137. Kvantide teooria. Energia jaotust spektris, nagu seda kujutab eespool-kirjeldatud joonis, on katsutud mitmete teadlaste poolt teoreetiliselt põhjendada. Kuid kaua aega ei andnud need katsed tulemusi. Aastal 1900 õnnestus saksa füüsikul M. Planck'il teoreetiliselt leida seos 1 sek. kestel kiir-

gunud energiahulga, keha temperatuuri ja lainepikkuse vahel (kiirgunud energia kui funktsioon lainepikkusest ja absoluutsest temperatuurist). Sellest nn. Planck'i seadusest tuletatud energia jaotuskõver on täies kooskõlas katse teel leitud kõveraga.

Seejuures selgus ka, et Stefan-Boltzmanni seadus ja Wieni nihkeseadus on tuletatavad Planck'i seadusest.



163. joon.

Planck lähtus selle seaduse tuletamisel oletusest, et kiirgusenergia pole lõpmatult jagatav, vaid et see koosneb nagu ainegi algosakestest. Neid energia algosakesi nimetatakse fotoniteks, valguskvantideks ehk lihtsalt kvantideks. Seega kiirgavad või neelavad keha aatomid energiat mitte igasugustes hulkades, vaid ainult kvantide kaupa. Valguskvant on seega kiirgusenergia algosake, nagu aatom on aine

algosake. Edasi järgneb Planck'i teoriast, et valguskvantide suurus on oleneb lainepikkusest, seega ka võnkearvust. Kui ν on võnkearv, siis kiirgusenergia kvant $E = h\nu$, kus h on nn. Planck'i mõjukvant $= 6,62 \cdot 10^{-27}$ erg \cdot sek.

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

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

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

138. Ajaloolisi märkusi. Et soojus võib levida kiirguse näol, oli tuntud juba vanal ajal. Nimetuse „soojuskiired“ võttis esimesena tarvitusele K. W. Scheele a. 1778, kuid juba sada aastat varem näitas H. Lambert, et „tulikiired“ peegelduvad samade seaduste järgi nagu nähtavadi valguskiired. Eriti hulga katseid soojuskiirtega korraldasid M. A. Pictet, John Leslie ja krahv Rumford XVIII ja XIX sajandi vahetusel. Stefani uurimus, millega ta püstitas nn. Stefan-Boltzmanni seaduse, ilmus a. 1878, kuna selle seaduse teoreetilise põhjenduse andis L. Boltzmann a. 1884. Wieni nihkeseadus on pärit a. 1893. M. Planck'i teos, millega pandi alus kvantide teooriale, ilmus a. 1900.

NIMEDE JA MÕISTETE REGISTER.

(Arvud nimede ja mõistete taga tähendavad lehekülgi.)

- | | | |
|--|--|---|
| <p>A b b e 114
 Aberratsioon, kromaati-
 line 94
 Aberratsioon, sfääriline
 74, 94
 Absoluutselt must keha
 46, 49, 153
 Absorptsioonispekter
 149
 Adaptatsioon 102
 Akommodeerumine 98
 Akord 31
 Akromaatiline lääts 86,
 95
 Akromaatiline prisma 85
 Akustika 14
 Alhazen 75, 87, 95
 Analüsaator 138
 Aristoteles 23, 105</p> <p>B a c o n 33, 38
 Bartolinus 141
 Bernoulli, D. 15
 Boltzmann 156
 Bradley 58
 Bunsen 152
 Buys-Ballot 34</p> <p>C a g n a r d d e l a T o u r
 33
 Chladni 39
 Chladni kujundid 37
 Colladon 24
 Cornu 59
 Corti 43</p> | <p>Corti organ 42</p> <p>D e m o k r i t o s 104
 Descartes 87
 Detsibell 29, 30
 Difraktsioon 127
 Difraktsioonispekter 134
 Difraktsioonivõre 132
 Dispersioon 84
 Dissonants 30
 Dollond 87
 Doppler 34
 Doppleri efekt 28, 151</p> <p>E b a k o r r a p ä r a n e k i i r 139
 Ebakõla 30
 Eeter 115
 Elementaarlaineline 117
 Elongatsioon 7
 Emissioonispekter 147
 Eukleidos 56, 75, 87
 Euler 15, 33, 34, 39, 87</p> <p>F a a s 7, 11
 Faraday 15
 Fatamorgaana 81
 Fizeau 58
 Fluorestsents 141
 Fookus 68, 88
 Foon 29
 Footon 156
 Fosforestsents 142
 Fotomeeter 53, 55
 Foucault 59, 121
 Fraunhofer 152</p> | <p>Fraunhoferi jooned 150
 Frekvents 5
 Fresnel 121
 Fresneli peeglikatse 122</p> <p>G a l i l e i 56, 114
 Gassendi 24
 Gregory 114
 Grimaldi 121</p> <p>H a l l e y 95
 Hefner-Alteneck
 46
 Helgiheitja 74
 Heli 25
 Helihark 14, 37
 Heliograaf 64
 Heliredel 30
 Helmholtz 15, 34,
 42, 43
 Heron 75
 Herschel 152
 Herts 5
 Hooke 121
 Huygens 95, 114, 116,
 121
 Huygensi printsiip 116
 Hõljumised 32
 Hälve 7
 Hämarik 78
 Hää 14
 Hääleasting 14
 Hääleallikad 34
 Hääle kiirus 15</p> |
|--|--|---|

- Hääle kõrgus 27
 „ murdumine 18
 „ peegeldumine 17
 „ suuna määraja 43
 „ tugevus 28, 29
 „ valjus 27, 28
- Infrahääl 26
 Interferents 19, 22, 121
 Intervall 30
 Irradiatsioon 102
- Jansen 113
 Joonspekter 148
 Järelpildid 101
- Kaja 17
 Kajalood 18
 Kaksikmurdumine 139
 Kaugelenägevus 98
 Keelte võnkumine 34
 Kepler 56, 87, 114
 Ketassireen 27
 Kircher 152
 Kirchhoff 148, 152
 Kohastumine 98
 Konsonants 30
 Kooskõla 30
 Korpuskulaarne valgus-
 teooria 114
 Korrapärane kiir 139
 Kujutis 62
 Kujutiste ehitamine 63,
 70, 73, 92, 93
 Kulgev laine 23
 Kumerpeegel 72
 Kundt'i katse 23
 Kuuldavuspiirkond 25
 Kuulmine 42
 Kvantide teooria 155
 Kõla 25, 35
 „ analüüs 41
 Kõlapinnad 37
 Kõlavärv 35
 Kõverustsenter ja -raa-
 dius 66
- Käiguvahe 22
 Küünal (valgusühik) 46
- Laine 9, 10, 11
 Laineaparaat 115
 Lained veepinnal 7
 Lainete murdumine 119
 „ peegeldumine
 16, 118
 Lainetusmasin 9
 Lainetusteooria 114
 Lambert 56, 156
 Laplace 15
 Leonardo da Vinci
 56
 Leslie 156
 Leukippos 104
 Lipperseim (Lip-
 persheim) 113
 Lissajous' kujundid 21
 Lockyer 150
 Longitudinaallaine 11
 Luks 49
 Luksmeeter 56
 Lumineerivad kehad 44
 Lumineestsents 122
 Luumen 48
 Luup 105
 Läätsed 88
 Lühinägevus 98
- Malus 141
 Mariotte 105
 Maurolycus 87, 105
 Maxwell 121
 Meeterküünal 49
 Mersenne 39
 Michelson 60
 Mikroskoop 107
 Miraaž 81
 Monohord 35
 Murdumisnäitaja 76, 120
 Murdumisseedused 75
 Mõjukvant 156
 Mürä 24
- Newton 15, 87, 114,
 121, 152
 Newtoni rõngad 126
 Nicoli prisma 139
 Noble 43
 Normaala-la¹ 33
 Normaalspekter 135
 Nurkpeegliid 64
 Nõguspeegel 68
 Nägemine 96, 102, 103
 Nörrenberg 141
- Ohm 33, 43
 Oktaav 27
 Optika 44
 Optiline telg 66, 70, 88
 „ tihedus 77
 „ tsenter 89
 „ tugevus 99
 Optilised riistad 105
 Otsevaate-spektroskoop
 147
- Paisud 23
 Paraboloidpeegliid 74
 Pauk 24
 Pealaine 117
 Peegel 66
 Peggeldumisseadused 61
 Peggelskaala 65
 Peggelteleskoop 111
 Pendli võnkumine 5
 Periskoop 64
 Pictet 156
 Pidev spekter 147
 Pigot 43
 Pikilaine 11
 Pikksilm 109
 Pimetähn 97
 Pinnavalgustuse seadu-
 sed 50
 Plaatide võnkumine 37
 Planck 156
 Planck'i seadus 156
 Platon 15, 104
 Plinius 43

- Polarisaator 138
 Polarisatsioon, valguse 135
 Polarisatsioonifiltrid 140
 Polariseeritud valgus 135
 Porta 75, 95, 104
 Prillid 98
 Prisma-binokkel 112
 Prisma-pikksilm 112
 Prožektor 74
 Ptolemaios 87
 Põhitoon 35
 Päikesespekter 150
 Pütaagorased 33
 Pythagoras 15, 104

 Quincke toru 22

 Refleksklaas 65
 Reflektor 109, 111
 Refraktor 109
 Refraktsioon 78
 Resonaator 42
 Resonants 40, 41
 Ribaspekter 148
 Ristlaine 8, 13
 Ritter 152
 Rumford 156
 Ruuminurk 47, 66, 89
 Römer 57

 Sauveur 33, 39
 Savart 33
 Scheele 156
 Scheiner 113
 Schumann 152
 Seebeck 34
 Seisvad lained 22, 138
 Sekstant 65
 Shore 39
 Silma ehitus 95
 Sinusoid 7
 Snellius 87

 Soojuskiired 144
 Spekter 85
 Spektraalanalüüs 141, 150
 Spektraalaparatuur 145
 Spektraalatoru 148
 Spektrogramm 151
 Spektroskoop 145
 Stefan 156
 Stefan-Boltzmanni seadus 154
 Stereoskoop 104
 Sturm 24
 Sõlmpunktid 23
 Sommering 105

 Zeiss 114

 Taylor 37
 Teatri-binokkel 113
 Teleskoop 109
 Temperatuurikiirgus 152
 Tempereeritud heliredel 32
 Toon 25
 Transversaalained 9
 Tulipunkt 68
 Tumedad kehad 44
 Turmaliintangid 140
 Täieline sisepeegeldumine 78
 Tämbur 35
 Tyndall 24

 Ultrahääli 26
 Ultramikroskoop 109
 Ultrapunased kiired 143
 Ultravioletsed kiired 142

 Vaatenurk 99
 Vaateväli 100
 Vaba ja sundvõnkumine 39
 Vaikusvööde 19

 Valgusallikad 44
 Valgusallika tugevuse mõõtmine 53
 Valguse difusioon 64
 Valguse kiirus 57
 Valguse lainepikkus 125
 Valguskiired 44, 45
 Valguskiirgus 45
 Valguskvant 156
 Valgusnähtused 44
 Valguspunkt 47
 Valgustugevus 46
 Valgustustugevus 49
 Valgusvool 47
 Valgusvoolu jaotus 54
 Varbade võnkumine 36
 Weber 15
 Weber-Fechneri seadus 29
 Vennad Weberid 43
 Wien'i nihkeseadus 154
 Viga, parallaktiline 65
 Viled 38
 Vilkumine 78
 Vitello 87
 Wollaston 152
 Võnkumine 5, 6
 Värvid 85
 Värvide hajumine 84
 Värvipimedus 102

 Õhukeste kelmete värvid 125
 Õhusamba võnkumine 37

 Ärrituskünnis 25

 Ümberpööratavuse printsiip 61, 76
 Ülemtoonid 34
 harmoonilised 39

 Young 121, 141

SISUKORD.

	Lk.
Eessõna	3
H ä ä l.	
I. Rist- ja pikilained	5
II. Hääle levimine	15
III. Hääle omadusi	24
IV. Heliallikad	34
V. Resonants ja kõla analüüs	39
V a l g u s.	
VI. Valgusallika ja pinnavalgustuse tugevus	44
VII. Valguse levimiskiirus	56
VIII. Tasa- ja sfäärilised peeglid	61
IX. Valguse murdumine	75
X. Sfäärilised läätsed	88
XI. Silm ja nägemine	95
XII. Optilised riistad	105
XIII. Valgus lainetusnähtusena. Huygens'i printsiip	114
XIV. Valguse interferents	121
XV. Difraktsioon	127
XVI. Valguse polarisatsioon	135
XVII. Luminestsents. Spektraalanalüüs	141
XVIII. Temperatuurikiirgus	152
Nimede ja mõistete juhataja	157

