

V. ERLEMANN

FÜÜSIKA
GÜMNAASIUMILE

II

KIRJASTUS OSAÜHING „LOODUS“
TARTU **TALLINN**

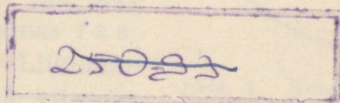
FÜÜSIKA

GÜMNAASIUMILE

II

HÄÄL JA VALGUS

KOOSTANUD
V. ERLEMANN



Haridusministeeriumi poolt koolidele
tarvitamiseks lubatud

KIRJASTUS OSAÜHING „LOODUS“
TARTU 1938 TALLINN

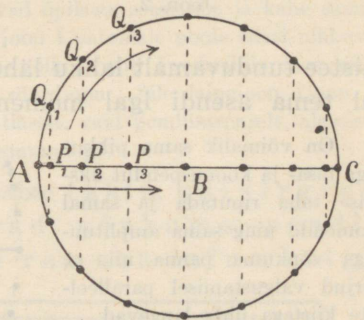


A-10998

Hääl.

Pendli ja elastse keha võnkumine.

1. **Pendli võnkumine.** Häälennähtuste põhjalikumaks tundmaõppimiseks on tarvis lähemalt uurida elastsete kehade võnkumist, mille seletamiseks vaatleme esmalt mehaanikas tundmaõpitud pendli liikumist. Seal nägime, et tasapendli liikumine on perioodiline; nimetasime pendli käiku ühest äärmisest asendist teise ja tagasi täisvõnkeks, ühe täisvõnke kestust perioodiks, täisvõngete arvu sekundis võngete arvuks (sageduseks) ja pendlikuulikesse kõige suuremat kaugust tasakaaluasendist amplituudiks. Iga perioodi järel on pendel samas faasis (liikumisolekus). Liikumine on tasakaaluasendi poole kiirenev, tasakaaluasendist eemale tasanev (kuid mitte ühtlaselt). Pendli võnkumine kustub hõõrdumise ja keskkonna takistuse tõttu.



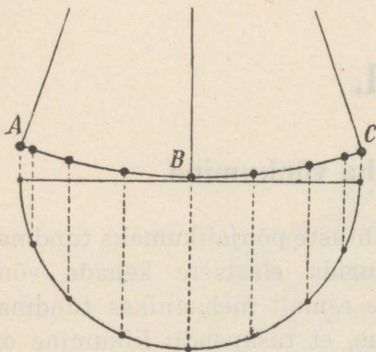
Joon. 1. Koonus- ja tasapendli liikumine.

*2. **Pendli asendi määramine.** Pendli asendit igal momendil võib kindlaks määrata graafiliselt.

Kujutagu AC (joon. 1) võrdlemisi pika niidi otsas rippuva pendlikuulikesse liikumisteed, mida võib lugeda sirgjooneliseks. Ehitame AC-l kui diameetril ringi (raadius = pendli amplituudiga) ja kujutleme punkti Q, mis liigub ühtlaselt mööda ringjoont

* märgitud on mõeldud R haru jaoks.

sama perioodiga nagu pendelgi ja mis algab liikumist samal momendil pendliga punktist A (koonuspendel). Punkti Q asendit igal momendil, näit. iga $\frac{1}{16}$ perioodi lõpul, võime kindlaks määrata, kui jagame ringjoone 16-neks võrdseks osaks; jaotuspunktid $Q_1, Q_2 \dots$ määravad tema asendid otsitavatel momentidel. — Ehitame nüüd punktide $Q_1, Q_2 \dots$ projektsioonid $P_1, P_2 \dots$

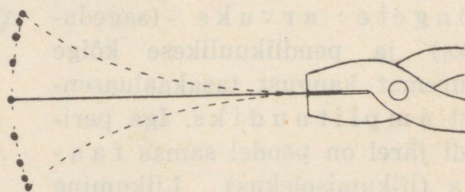


Joon. 2.

AC-le. Pendli võnkumise matemaatiline arutus näitab, et võnkuva tasapendlikuulikesse asendit iga järgneva $\frac{1}{16}$ perioodi lõpul kujutavad projektsioonid $P_1, P_2 \dots$ Üldse langeb ühtlaselt ringi mööda liikuva punkti projektsiooni liikumine ringi diameetrit ühesama ringi diameetrit mööda liikuva tasapendli liikumisega. Ka siis, kui pendli liikumistee tunduvamalt lahku läheb sirgjoonest, võib selle reegli põhjal tema asendi igal momendil ligikaudselt kindlaks määrata.

On võimalik sama pikkusega tasa- ja koonuspendlit üksteise taha riputada ja samal momendil ning sama amplituudiga võnkuma panna nii, et varjud valgustamisel paralleelsete kiirtega ühte langevad.

1. Seleta, mida kujutab joon. 2 ja kuidas on ta ehitatud.



Joon. 3. Elastse varva võnkumine.

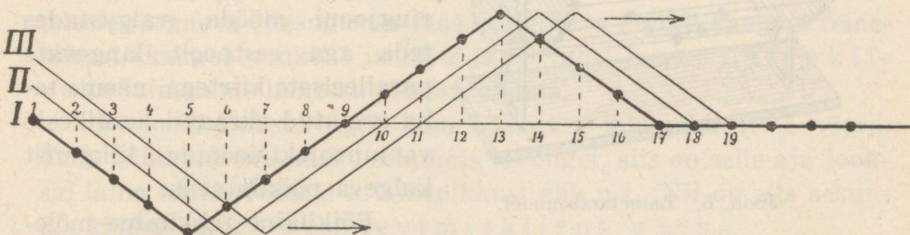
3. Elastse keha võnkumine. Tasakaalust väljaviidud ja lahtilastud elastse keha osakesed võnguvad ka pendlisarnaselt, mitte ühtlaselt (otsapidi kinnitatud vetruv varb joon. 3, spiraalvedru jne.). Kauguse suurenedes tasakaaluasendist kasvab pendli võnkumisel liikumist tekitav raskusekomponent — elastse keha võnkumisel kasvab liikumist tekitav elastsusetung.

Võnkuva elastse keha osakeste asendid teataval momendil võib kindlaks määrata nagu pendligi juures.

Lainetamine.

4. Näide perioodilise liikumise levimise kohta.

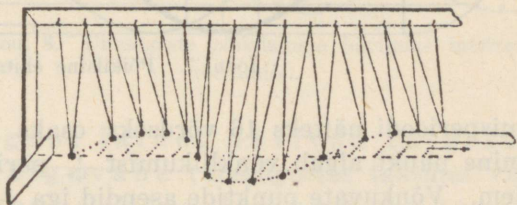
Kujuta sirgreas kõrvuti seisvaid õpilasi. Muusika takti järgi hakkab esimene põiki rea sihile marssima nõnda, et ta kõnnib 4 sammu edasi ja siis perioodiliselt 8 sammu tagasi-edasi. Iga järgmine õpilane algab sama liikumist ühe takti võrra hiljem. Siis kujutab joonises 4 nurgeline joon I ülalt vaadates õpilaste seisumomendil, kus esimene, liikumist algseisust ülespoole alates, on 16 sammu (ühe



Joon. 4.

täisvõngu) teinud. Jooned II ja III kujutavad õpilaste seisumomendi ühe ja kahe sammu võrra hiljem. Ülalt vaadates näib nurgeline joon I paremale poole edasi nihkuvat, kuna üksikud õpilased liiguvad edasi-tagasi põiki joone I edasilikumise sihile. Edasinihkuv joon ei ole silejoon, vaid on murdjoon. Sile lainejoon (joon. 7) võiks tekkida siis, kui õpilased ei liiguks ühtlaselt, vaid pendlisarnaselt, algseisust läbi minnes suurema kiirusega (pikemate sammudega).

5. a. **Põiki- ehk transversaalne** tekib, kui sirgreas seisvad punktid hakkavad võnkuma pendlisarnaselt põiki punktide rea ehk laine kulgemise sihile, iga järgmine punkt sama ajavahemiku võrra hiljem eelmisest.



Joon. 5. Lainetamismudel.

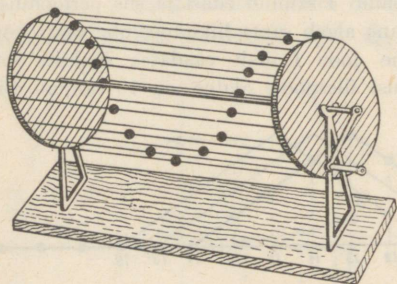
Seda võib näidata lainetamismudeliga. Lihtsamal kujul (joon.

5) koosneb see mudel ühesugustest liistu küljes rippuvatest pendlikestest. Põikilaine saame, kui mööda kuulikeste rida tõmmata kõrvalt reale kaldu hoitud plaadiga või käega.

Joonises 5 kujutatud mudelis puudub side üksikute võnkuvate osakeste vahel; seetõttu tuleb laine tekitamisel anda igale osakesele eriline tõuge. Kui kuulikesed elastsete kumminiiti-

dega kokku siduda, siis on tarvis ainult üht kuulikest võnkuma panna.

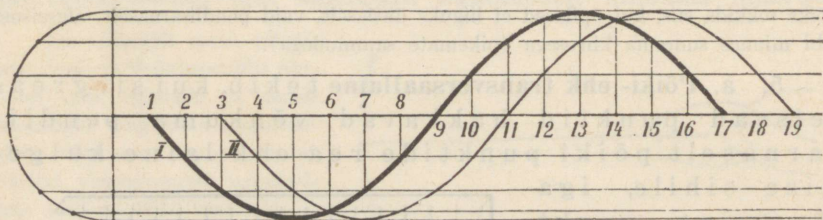
*b. Joon. 6 kujutatud lainetamismudelil on kaks paralleelset ketast ühendatud traatvarbadega, tekitades silindrilise kujundi. Varbade külge on kinnitatud kuulikesed, mis moodustavad kruvijoone. Riista pööramisel liiguvad kuulikesed ringjooni mööda, valgustades teda aga eestpoolt langevate paralleelsete kiirtega, näeme taha asetatud ekraanil kuulikeste varjuprojektsioonide liikumist kulgeva põikilainena.



Joon. 6. Lainetamismudel.

Põikilaine tekkimine mõlemate siin kirjeldatud mudelitega tõestab katseliselt § 2 toodud reeglit pendli võnkumise kohta.

*c. Põikilaine ehitamiseks (joon. 7) kujutame sirgreas üksteisest ühekaugusel asetsevaid punkte (1, 2, 3 ... 18, 19), mis võivad võnkuda pendlisarnaselt põiki rea sihile. Jagame võnku-



Joon. 7. Põikilaine ehitamine.

misperioodi näiteks 16 võrdseks osaks ja oletame, et iga järgmine punkt algab võnkliikumist $\frac{1}{16}$ perioodi võrra eelmisest hiljem. Võnkuvate punktide asendid iga $\frac{1}{16}$ perioodi lõpul määrame kindlaks § 2 järgi ringi abil. Kõverjoon I kujutab siis punktide asendit ja laine kuju sel silmapilgul, kui esimene punkt, alates liikumist paigalseisust ülespoole, on lõpetanud ühe täisvõnke. Kõverjoon II kujutab nende asendit $\frac{2}{16}$ perioodi võrra hiljem.

6. Põikilaine periood, võngete arv, amplituud, pikkus ja kiirus. Lainetamisliikumine on perioodiline. Perioodiks T nimetatakse ühe osakese täisvõnke kestust, võngete arvuks

(sageduseks) n võngete arvu sekundis, amplituudiks võnkuva osakese kõige suuremat kaugust tasakaaluasendist. On kehtiv valem $nT = 1$.

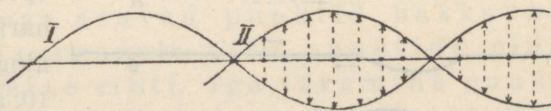
Põikilaines paneme tähele laine harja (kõige kõrgem koht) ja laine põhja (kõige madalam koht). Laines võime leida punktid, mille faasid igal momendil on ühesugused (joonises 7 punktid 1 ja 17, 2 ja 18 jne.). Lainepikkuseks λ nimetame kahe üksteisele järgneva harja või põhja kaugust või üldse kahe üksteisele järgneva ühesugustes faasides viibiva punkti kaugust teisest (kaugus punkti 1 ja 17, 2 ja 18 vahel jne.). Lainekiiriks nimetame laine kulgemise suunda.

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

Ei tohi unustada, et igasuguse lainetamise korral kulgeb lainetamine, mitte aga aine osakesed — need ainult võnguvad pendlisarnaselt ühele ja teisele poole tasakaaluasendist.

*1. Ehita põikilaine, mille pikkus on 9 cm ja amplituud 3,5 cm.

7. **Põikilainete interferents.** Veepinnal võime mõnikord tähele panna, et üks lainete süsteem liigub edasi ja et juhuslik tuulehoog sünnitab teise lainete süsteemi, mis esimesest nagu üle jookseb. Mõlemate süsteemide koosmõjul tekib resultantlaine. Lainete koosmõju nimetame üldiselt superpositsiooniks, võrdsete lainete koosmõju aga interferentsiks.

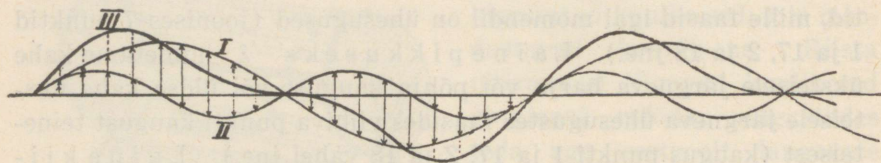


Joon. 8. Ühesuguste põikilainete hävimine interfereerumisel.

a. Kaks ühesugust lainet hävivad interfereerumisel, kui käiguvahe (ühesugustes faasides viibivate punktide vahe) võrdub poollaine pikkusega (joon. 8, võrdvastupidised tõuked hävivad). Hävimine sünnib ka siis, kui käiguvahe on paaritu arv poollaineid ($1 \cdot \frac{\lambda}{2}, 3 \cdot \frac{\lambda}{2}, 5 \cdot \frac{\lambda}{2} \dots (2n-1) \cdot \frac{\lambda}{2}$). — On aga ühesuguste lainete käiguvahe paaris arv poollaineid ($2 \cdot \frac{\lambda}{2}, 4 \cdot \frac{\lambda}{2} \dots 2n \cdot \frac{\lambda}{2}$), siis tekib interfereerumisel kaks korda suurema amplituudiga resultantlaine (selgita seda joonise abil).

b. Koosmõjuvad lained võivad olla mitmesugused ning resultantlained õige keerulised.

Kujutleme näiteks, et osakesed samal ajal osa võtavad kahest põikilainetamisliikumisest (I ja II joon. 9), ning võtame arvesse, et ühte osakesse samas suunas mõjuvad tõuked tuleb liita, vastas-

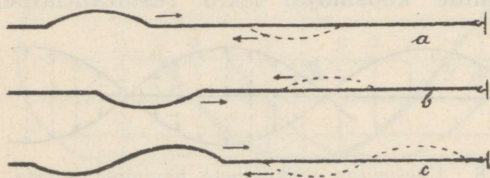


Joon. 9. Põikilainete superpositsioon.

suunas mõjuvad aga lahutada, siis on kerge ehitada resultantlainet (III) liikumisteede liitmise põhjal, superpositsiooni (pealeasetamise) teel.

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

8. **Põikilaine peegeldumine.** Kinnitame kõie (kummitoru) otsapidi seinale, tõmbame ta käega kergelt pingule ja liigutame kätt järsku üles- või allapoole ja algseisu tagasi. Tekib vastavalt laine hari või põhi, mis liigub köit mööda edasi ja pörgates vastu



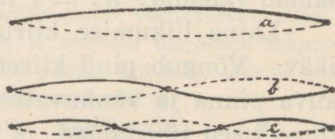
Joon. 10. Põikilaine peegeldumine.

seina tuleb sealt tagasi (peegeldub), kusjuures hari peegeldub põhjana ning põhi harjana (joon. 10, a, b). Kätt üles-alla ja algseisu tagasi liigutades tekitame terve laine, mis peegeldub seinal ka terve lainena; harjaga ees kulgev laine liigub peegeldudes põhjaga ees ja ümberpööratult (joon. 10, c). Täheandab, laine peegeldub tihedamast keskkonnast faasi vastupidiseks muutumisega.

Tekitame käes rippuvas pikemas kõies põikilaine, siis laine peegeldub alumisest vabast otsast ilma faasi muutumiseta. Sama nähtus ilmneb pinguletõmmatud kõie juures, kui selle ots peenema nõõri abil seinale kinnitada. Järeldame: hõredamast keskkonnast peegeldub laine ilma faasi muutumiseta.

9. **Seisvad põikilained.** Kui tekitame kõiega vahetpidamata ühesuguseid laineid, siis peegelduvad nad ka vahetpidamata seinalt, ja saame kõiel kaks võrdset vastassuunas kulgevat lainete süsteemi. Mõlemate niisuguste lainete süsteemide liitumisel jäävad mõned kõieosakesed täiesti paigale, kuna teised võnguvad suurema või väiksema amplituudiga (joon. 11). Niisuguseid otseminevate ja peegeldunud lainete liitumisel saadud resultantlaineid, milles üksikud punktid jäävad paigale, nimetame seisvateks laineteks (eespool käsitletud laineid nimetasime kulgevateks laineteks). Paigalolevaid punkte nimetame sõlmedeks, kahe sõlme vahel olevaid võnkuvaid laineosi paisudeks. Kõik seisva laine võnkuvad osakesed liiguvad samal momendil läbi tasakaaluasendi.

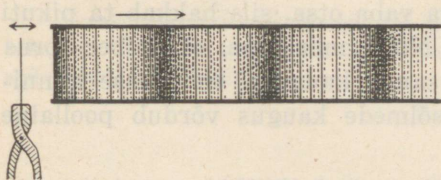
Sama kõiega võime tekitada mitmesuguseid seisvaid laineid (joon. 11), näiteks lained kahe sõlme (otsadel), kolme sõlme jne. Seisvas laines võrdub kahe naabersõlme vahe poolaine pikkusega.



Joon. 11. Seisvad põikilained.

Seisvaid põikilaineid võib hästi näidata elekterkõlistaja vasara külge köidetud ja nõrgalt pingule tõmmatud lõngaga.

10. **Pikilaine.** Piki- ehk longitudinaallaine tekib, kui sirgreas asuvad punktid hakkavad võnkuma pendlisarnaselt piki punktide rida ehk laine kulgemise sihti, iga järgmine punkt sama ajavahemiku võrra hiljem eelmisest. Pikilaine tekkimist võib näidata ka lainetamismudeliga, kui mööda kuulikeste rida tõmmata alt kaldu hoitud plaadiga. Pikilaines paneme tähele tihendusi ja hõrendusi.



Joon. 12. Pikilaine tekkimine õhusambas.

õhukihti. Inertsitõttu ei hakka terve samm korraga liikuma, vaid ainult esimene kiht surutakse kokku (tiheneb). Elastisuse

11. **Pikilaine tekkimine õhus.** a. Lihtsuse mõttes kujutleme lahtise klaastoruga eraldatud õhusammast, mille ühes otsas võngub elastne pind (joon. 12). Paremale poole liikudes surub pind esimest

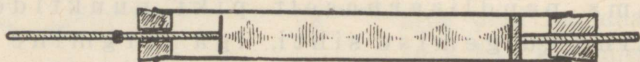
tõttu ta paisub, surub teist kihti ja sünnitab teise kihi tihenduse; see sünnitab edasi kolmanda kihi tihenduse jne., kuna eelmised kihid muutuvad järjest normaalseteks. — Liigub pind võnkudes vasakule, siis voolab algul õhk esimesest kihist järele ja esimene kiht hõreneb. Edasi voolab õhk teisest kihist esimese poole ja hõreneb teine kiht jne., kuna eelmised kihid muutuvad järjest normaalseteks. Nii lähevad pinna võnkumisel vaheldumisi tihendused ja hõrendused sammast mööda edasi ja sünnib pikilainetamine, sest õhuosakesed võnguvad laine kulgemise sihis.

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

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

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

Seisvaid õhulaineid võib näidata Kundt'i toruga (joon. 13). Klaaspulk (toru), mille ühe otsa külge on kleebitud papist ketas, on keskelt kinnitatud ja koos kettaga otsapidi asetatud



Joon. 13. Kundt'i toru.

jämedamasse klaastorru, mille teine ots on kinnine. Torru on raputatud kergelt pulbrit (kork, *semen lycopodii*). Kui hõõrume niisutatud lapiga piki klaaspulga vaba otsa, siis hakkab ta pikuti võnkuma ja ühtlasi helisema. Nüüd märkame, et pulber torus võngub, kogunedes teineteisest samal kaugusel olevatesse hunnikutesse (sõlmedesse). Naabersõlmede kaugus võrdub poollaine pikkusega.

Kui võtta pikema pulga asemel lühem, siis kuuleme kõrgemat heli ja sõlmede kaugused on väiksemad, tähendab, lained on lühemad.

12. Piki- ja põikilainete tekkimise tingimused. Eelmisest järgneb, et pikilainetamine on ruumala muutu-

mise nähtus. Et kõik kehad on enam-vähem ruumelastsed, siis võib pikilainetamine tekkida igas kehas.

Põikilainetamine on kuju muutumise nähtus ja võib tekkida ainult kujuelastsetes kehaosades, mis sarnlevad punktide reaga või pinnaga (pingulolev traat või köis, pingulolev membraan, plaat, õhuke laud jne.), tähendab, ainult tahketes või pingulolevates kehaosades, mitte aga vedelikes ja gaasides. Põikilaine võib tekkida ka vedeliku pinnal, sest vedeliku pinda võime lugeda kujuelastsete pindade hulka (tasakaaluasendist väljaviidud osake püüab tagasi oma endisse asendisse).

Veepinna osakesed liiguvad lainetamisel mitte ainult vertikaalsihis üles ja alla, vaid ühtlasi ka horisontaalsihis edasi-tagasi ja seetõttu on nende liikumised ringisarnased kõverjooned. Seda võib tähele panna, kui näit. jälgida korgi liikumist lainetes. Sügavamate osakeste liikumisel muutuvad liikumisringid ikka lapergusemaks ja väiksemaks. Paarikümne m sügavuses pole merelainete liikumist ka tormi korral märgata.

Vaatlused näitavad, et veelained, mõnest tõkkest mööda minnes, ei liigu ainult endises suunas edasi, vaid kalduvad ka kõrvale (joon. 14). Samalaadset nähtust võib tähele panna ka teiste lainete juures (häälelained).

Ühtlasel tasapinnal või ühtlases kehas on lainetamistsentrist (lähtekohast) ühekaugusel olevad osakesed ühesugustes faasides ja laine on vst. ring- (vettevisatud keha ümber) või keralaine (õhus hääleallika ümber).

Lained on energia edasikandjad. Ring- või keralaine levimisel kauguse suurenemisega jaguneb energia suurema massi peale, mille tõttu amplituud väheneb. Osa liikumisenergiast muutub lainetava keskkonna sisehõõrdumise tagajärjel ka soojuseks.

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



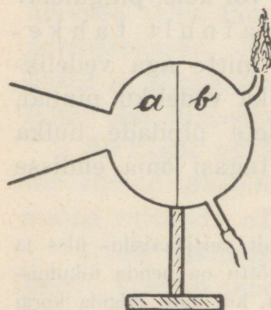
Joon. 14. Veelained tõkkest läbi minnes.

Hääl lainetamisnähtusena.

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

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

Tugeva heliallika läheduses panevad õhulained teisi kehi võnkuma, näit. plahvatus juures purunevad aknaruudud isegi mitme km kaugusel. — Helitundlik gaasileek (peenikesest torust väljavoolav valgustusgaas pannakse pealpool traatik võret põlema) muudab oma kuju, kui toas vilistada või kõlistada võtmekimbuga. — Et hääle levimisel õhus tekivad tihendused ja hõrendused, st. perioodilised rõhumise muutumised, seda näitab katse joon. 15 kujutatud nn. König'i karbiga. Õhuke kelme jaotab metallist karbi kahte ossa a ja b. Läbi b voolab valgustusgaas, kuna a on varustatud kuulamistoruga. Valitseb toas vaikus, siis põleb leek ühtlaselt. Langevad aga hääleained kuulamistoru kaudu ossa a, siis hakkab õhuke kelme tihenduste ja hõrenduste mõjul võnkuma, pannes omakorda leegi värisema. See väärin toimub häälelainete suure sageduse tõttu niivõrd kiiresti, et seda otseselt näha ei olegi, kuid pildistades leeki liikuvale kinofilmil



Joon. 15. König'i karp.

saame sellest saetaolise kujutise (joon. 16).

Leegi kõikumist võib ka nn. keerleva peegliga otse nähtavaks teha.

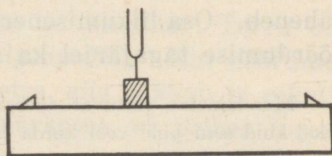


Joon. 16.

Õhulained ärritavad meie kuulmisorganit ja tekitavad selle kaudu peaaegu häälealistingut.

Ainult elastsed kehad võivad olla hääleallikateks ja -juhtideks. Tühjas ruumis hääle ei levi (katse õhupumba kupli alla asetatud heliallika).

Ühendame vst. joon. 17 heliseva helihargi varre monohordiga (§ 24) puu, raua, korgi, vildi jne. kaudu, siis näitab helitugevus, misugune aine helilaineid paremini või halvemini juhib.



Joon. 17.

Nagu veelajnedki (joon. 14), levivad hääleained mõnest tõkkest mööda minnes mitte ainult sirgjooneliselt, vaid kalduvad ka kõrvale ümber nurga tõkke taha.

14. Hääle levimise kiirus. Igapäevaste nähtuste tähelepanekutest järeldame, et hääle tarvitab levimiseks aega.

Täpsemad mõõtmised näitavad, et hääle kiirus õhus oleneb temperatuurist ja niiskusest, vähemal määral ka rõhumisest. Näiteks on kiirus kuivas õhus 0° puhul $330,8 \frac{m}{sek}$, 15° puhul $339,8 \frac{m}{sek}$, toatemperatuuri puhul harilikel tingimustel $342 \frac{m}{sek}$.

Hääle kiirus teistes keskkondades on ümmarguselt:

klaasis	5200 $\frac{m}{sek}$	merevees	1500 $\frac{m}{sek}$
rauas	5000 „	magedas vees	1435 „
puus	3000—5000 „	vesinikus	1260 „
kummis	35 „	süsihappugaasis	260 „

Tugeva plahvatuse läheduses on hääle levimise kiirus suurem, muutub aga kauguse suurenemisel normaalseks.

Teades hääle levimise kiirust, on võimalik määrata hääleallika kaugust.

Seda kasutatakse sõjaasjanduses. Erilised heli- ja kõlamõõtemeeskonnad määravad samaaegselt mitmes vaatluspunktis vastase patarei kauguse laskudest tekkinud valgusesähvatuste ja paukude päralejõudmise ajavahemikkude kaudu. Töötades vaatluspunktidest saadud andmed kiiresti läbi, saadakse määrata vastase patarei asukoht maastikul küllaldase täpsusega, et seda piirkonda võtta oma kahurväe tule alla.

1. Tööline teeb kirvega iga 3 sek. pärast ühe hoobi. Vaatleja kuuleb kaugenemisel hoope seda hiljem, mida kaugemale ta läheb. Ühe km kaugusel kuuleb ta eelmist hoopi samal momendil, kui ta järgmist näeb. Arvuta nende andmete põhjal hääle kiirus õhus!

2. Missuguses ajavahemikus levib hääle 1500 m kaugusele päri- ja vastu- tuult, mille kiirus $20 \frac{m}{sek}$?

15. Hääle tugevus. Pika heliseva keele või suurema helihargi juures võime palja silmaga tähele panna, et hääle tugevuse vähenedes väheneb heliseva keha amplituud, järelikult ka helilaine amplituud. Niisiis hääle tugevus oleneb amplituudi suurusest. Matemaatiline arutus näitab, et hääle tugevus on võrdeline amplituudi ruuduga.

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

Hääle tugevus väheneb heliseva keha kauguse suurenemisega, sest suuremal kaugusel jaguneb võnkumisenergia suuremale masile. Kerakujulisel levimisel on hääleenergia tugevus pöördvõrdeline kauguse ruuduga (kui mitte arvestada energia moondumist soojuseks), sest kau-

guse suurenedes kaks, kolm jne. korda suureneb võnkuv mass neli, üheksa jne. korda. Füsioloogilistel põhjustel ei ole aga hääle valjus võrdeline hääle füüsikalise energiaga.

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

16. Hääle peegeldumine. Et häääl võib peegelduda, seda tõendab kaja nähtus. Suund, milles häälekiired kõige tugevamini peegelduvad, moodustab peegeldava pinnaga sama nurga, mis langevate kiirte suund. Kaja põhjal on võimalik ära määrata peegeldava pinna kaugust heliallikast.

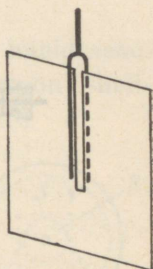
Peegeldumisnähtuste mõistmiseks kinnises ruumis tuleb silmas pidada, et hääle mulje kestus on $\sim \frac{1}{9}$ sek.; tähendab, me kuuleme häält veel $\sim \frac{1}{9}$ sek. pärast viimase häälelaine kõrva jõudmist. Häääl liigub toas aga edasi $\frac{1}{9}$ sek. jooksul $\frac{34}{9}$ m ehk ümmarguselt 40 m võrra. Järelikult peaks peegeldava seina kaugus olema vähemalt 20 m, et kaja oleks kuulda. Vastasel korral kuuleme suuremas tühjas ruumis ainult vastukõla. Lühike vastukõla kestus kõvendab häält; toas kõlab häääl kõvemini kui vabas õhus, kus puuduvad peegeldavad seinad. Pikem vastukõla kestus (üle $\frac{1}{2}$ või 1 sek.) suuremas kinnises ruumis mounutab häält.

Et häääl ka kinnises ruumis kustub, kus helilainete energia ei jagune suuremale õhumassile, siis tuleb järeldada, et peegeldavad seinad osa hääleenergiast neelavad. Sellekohased mõõtmised näitavad, et veepind ja poleeritud kivisein 95% neile langevast hääleenergiast tagasi heidavad, lubjatud tasane sein 80%, lubjatud reljeefne sein 64%, plüüšriie 20%, mets 17%. Pärast kahekordset peegeldumist on hääleenergiast järele jäänud poleeritud kiviseina puhul 90,25%, reljeefse lubjatud seina puhul 41%, plüüšriidiga kaetud seina puhul 4%. Nii-siis oleneb vastukõla kestus ja tugevus suurel määral seinte ja lae ehitusest. Sellega tuleb arvestada kontsertsaalide ja eriti ringhäälingu-saateruumi ehitamisel.

Kajaloodi tarvitatakse mere sügavuse määramiseks. Laeva ligidal tekitatakse vees järsk heli, näit. paukpadruniga. Häääl peegeldub merepõhjalt ja kaja on veeluse mikrofoni ja telefoni kaudu kuulda. Isesugune mõõteriist märgib ära ajavahemiku hääle saatmise ja kaja vastuvõtmise momendi vahel. Olgu see näit. 2,5 sek., siis on mere sügavus $\frac{2,5 \cdot 1500}{2}$ m = 1835 m. Täpsemate mõõtmiste juures arvestatakse seda, et häääl sügavamas ja tihedamas vees kiiremini levib. — Sama seadeldisega võib lähedalolevat jäämäge või teist laeva (allveepaati) kuulda, kui teda uduse ilma või pimeduse tõttu ei saa näha. Jää sulamisel jäämäest vabanenud õhumullikesed tekitavad vees tugeva kahina; laevadelt ja allveepaatidelt on kuulda nende masinate müra. — Kahe mõlemal pool laeva keret asetseva helivastuvõtuaparaadiga võib ligikaudu jäämäe või teise laeva asukohta määrata.

Sagedasti on tähele pandud hääle levimisel nn. vaikusepiirkondi. Tugev hääel (plahvatus, udusireen) mõnikord pole teataval kaugusel hääleallikast üldse kuuldav, veel suurematel kaugustel on aga jälle selgesti tajutav. Nähtus seletub sellega, et häälekiired sarnaselt valgusekiirtega läbi mitmesuguse tihedusega õhukihtide levides murduvad ja peegelduvad ning erilistel atmosfääritingimustel mõnest kohast nagu üle hüppavad. Et hääel vees korrapärasemalt levib, siis tarvitatakse veealuseid udusignaale.

17. **Hääle interferents.** a. Ka suure helihargi poolt tekitatud hääel on vabas õhus nõrk. Lõikame aga papist kitsa riba välja ja asetame heliseva hargi kuulaja poole pöördunud haru väljalõigatud riba kohale (joon. 18), siis on heli tugevamini kuuldav. Nähtus seletub sellega, et kumbki hargi haru saadab laineid. Lainete interfereerumisel vabas õhus heli nõrgeneb. Papp aga takistab ühe lainesüsteemi levimist kuulaja poole ning kõrvaldatud interferentsi tõttu on hääel kõvem.



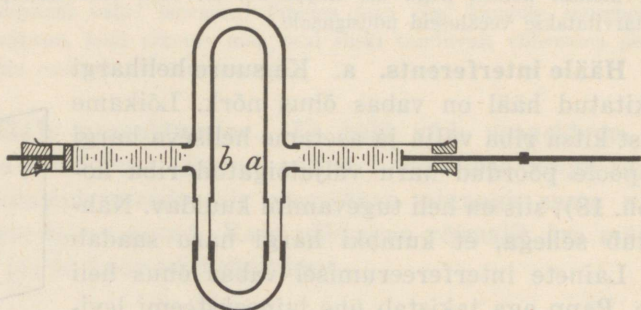
Joon. 18.

Kui hoiame kõrva ääres helisevat heliharki ja pöörame seda ümber varre kui telje, siis kuuleme vaheldumisi heli kõvenemist ja nõrgenemist, sest pööramisel muutub mõlema süsteemi lainete käiguvähe.

Häälelainete koosmõjul võivad tekkida õige keerulised resultantlained, näiteks orkestri mängul, kus samal ajal tekib ja levib kõiksuguseid helilaineid. Meie kuulmisorgan on nii ehitatud, et ta suudab kuulda üksikuid helisid eraldatult, st. ta analüüsib kõla, ta nagu lahutab keerulise resultantlaine komponentlained. Selle poolest on meie nägemisorgan puudulik, sest värvide segu muljes ei suuda ta eraldada üksikuid värvusi.

b. Häälelainete hävimist interfereerumisel võib näidata Quincke toruga ühenduses Kundt'i toruga (joon. 19). Plekist valmistatud Quincke toru koosneb kahest harust, kusjuures ühe pikkust võib muuta. Kinnitame Quincke toru ühe lahtise otsa külge Kundt'i toru ja teise lahtise otsa külge kerge pulbriga täidetud ning suletud klaastorus. Kui nüüd tekitame Kundt'i torus õhulaineid, siis nad harunevad a kohal ja ühinevad b kohal ning suletud klaastorus tekib interferentslaine. Harilikult võngub pulber suletud torus ja koguneb hunnikutesse. Muudame aga ühe haru pikkust nii, et harupikkuste vahe on pool lainepikkust, siis jääb pulber suletud torus paigale, hakkab aga võnkuma, kui üks haru sulgeda.

Kui Quincke toru ühe otsa külge kinnitada resonaator (§ 29) heli kõvendamiseks ja selle ees hoida helisevat heliharki, siis kuulab kuulaja teise otsa juures helisemist ja heli hävimist haru pikkuse muutumisel.



Joon. 19. Quincke toru ühenduses Kundt'i toruga.

Helid ja heliredelid.

18. **Heli võngete arv.** a. Kindla kõrgusega puhtad hääled nimet. helideks ehk toonideks; teised on müra, kahin, paugud jne.

Asetame grammofonikettale auguga varustatud ja tahma või tolmuga (*semen lycopodii*) kaetud klaasplaadi ja selle alla pabeririba nii, et tema ülespoole pööratud ots oleks kõrvvalt näha (tiirude lugemiseks). Paneme grammofoni käima ja loeme tiirude arvu teatavas ajavahemikus. Olgu tiirude arv 3 min. jooksul 168, siis teeb ketas minutis $168 : 3 = 56$ tiiru ja ühe tiiru kestus on $\frac{6}{56}$ sek. Hoiame tiirlemisel heliseva helihargi ühe haru külge kinnitatud teravikku (külge köidetud või joodetud vetruv terastraadike) vastu tahmatud plaati, siis tekib viimasel laineline joon, mis kujutab helihargi võnkumist. Olgu lainelisel ringil 260 lainet; siis tegi hark $\frac{6}{56}$ sek. jooksul 260 võnget, sekundis seega $\frac{260 \cdot 56}{60} = 242,7$ võnget.

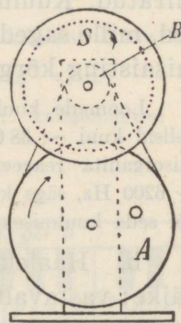
Kui kordame katset teise helihargiga, mis niisama kõrge tooni annab, siis saame endise tulemuse. Võib ka pinguletõmmatud keele varustada teravikuga ja määrata selle võngete arvu sekundis; see on ühesuguse kõrguse puhul sama. Katsed teiste helihar-

kidega ja keeltega näitavad, et kõrgema tooni korral on võngete arv sekundis suurem, sama kõrguse puhul aga alati ühesugune. Sellest järeldame, et heli kõrguse määrab heliseva keha võngete arv (sagedus) teatavas ajavahemikus. Võngete sageduse ühikuks on **herts (Hz, füüsik Hertz'i auks)**. 1 täisvõnge sekundis = 1 Hz. 1 kHz = 1000 Hz. Näit. on eespoolkirjeldatud katses võngete arv 242,7 Hz.

Kokkuleppe põhjal tarvitatakse muusikariistade hääldeseadmisel kindla kõrgusega nn. normaal-a (la, kammerton) -heli harki, mille võngete arv on 435 Hz.

Kui on teada heli võngete arv ja levimiskiirus, siis võib arvutada helilaine pikkust, jagades levimiskiiruse võngete arvuga ($\lambda = \frac{v}{n}$). Näiteks on normaal-a laine pikkus õhus toatemperatuuri puhul $\sim \frac{340}{435}$ m \approx 78 cm.

b. Heli võngete arvu määramiseks tarvitatakse nn. sireene. Joonisel 20 on kujutatud lihtne auk-sireen, tsentrifugaalmasinale kinnitatud papist või plekist ketas ringikujulise aukude reaga. Kui puhume tiirlemisel läbi torukese õhku aukude reale, siis tekib heli. Kui sireeni ketas teeb näit. 8 tiiru sekundis ja ringil on 90 auku, siis on heli võngete arv 720 Hz ($90 \cdot 8 = 720$).



Joon. 20.
Auk-sireen.

Hammarratas-sireen on tsentrifugaalmasinale kinnitatud hammasrattas. Pöörlemisel ratta vastu asetatud pabeririba (visiitkaart) saab hammasrattalt korrapäraseid tõukeid, hakkab võnkuma ja tekitab heli. Vastava seadeldisega võib ratta tiirude arvu sekundis mõõta. Olgu see 10 ja hammaste arv 80, siis on vastava tooni võngete arv 800 Hz.

Katsed sireenidega näitavad, et kindla kõrgusega puhas heli tekib ainult siis, kui aukude või hammaste vahed on ühesuurused ja pöörlemise kiirus on jääv, tähendab, kui helisev keha pikema ajavahemiku vältel võngub korrapäraselt.

Muusikas tarvitatavate helide võngete arvud ulatuvad \sim 30 kuni \sim 5000 Hz-ni, klaveri omad \sim 30 Hz kuni \sim 3500 Hz, inimhääle omad \sim 90 Hz (bass) kuni 1100 Hz (sopraan).

1. Kas heli kõrguse määramine noodi abil on täpne?
2. Arvuta äärmiste kuuldavate ja äärmiste muusikas tarvitavate helide lainepikkused õhus ja vees!
3. Kui suur on Quincke toru harupikkuste vahe, kui ta kustutab normaal-a heli?
4. Kui suur on heli võngete arv, mille lainepikkus õhus on 1 m?
5. Katses õhuga täidetud Kundt'i toruga oli sõlmede vahe toatemperatuuri puhul 5 cm. Kui suur oli heli võngete arv?
6. Katses õhuga täidetud Kundt'i toruga oli toatemperatuuri puhul naabersõlmede vahe 5 cm, valgustusgaasiga täidetud toruga aga 8 cm. Leida hääle levimiskiirus valgustusgaasis!

19. **Kuulmisaistingu piirid.** a. Meie kuulmisaisting on piiratud. Kuulmisaistingut tekitavad ainult niisugused võnkumised, mille sagedus on 16 Hz kuni 20 000 Hz; vanaduses kaob kuulmisaisting kõrgete toonide suhtes.

Loomade kuulmisaistingu piirid erinevad inimese omist; näit. kuuleb koer helisid kuni $\sim 38\,000$ Hz, valge hiir kuni ~ 4150 Hz. — Ka ilma erilise kuulmisorganita reageerivad mõned loomad häälelainedele, näit. lepamaim kuni ~ 6200 Hz, säga kuni ~ 3140 Hz; kuna neil loomadel kuulmisorgan puudub, ei või seda kuulmiseks nimetada.

b. Häälelainetes peituv mehaanilise energia hulk on väga väike; vastavalt väikesele energiahulgale on kuulmisorganid väga tundlikud.

Hääle kustumisel muutub lainete mehaaniline energia soojuseks. Arvutused näitavad, et inimene peaks vahetpidamata umbes kaks ööd-päeva rääkima, et soojuseks moondunud hääleenergia ulatuks kalorini. — Heli levimisel tekivad õhus rõhumise (tihenduse-hõrenduse) muutumised umbes 0,000 000 1 atmosfääri ulatuses, kusjuures võnkuvate õhuosakeste amplituudid on üliväikesed, umbes 0,000 000 1 cm. Rõhumise kõikumised 1%-lise atmosfääri rõhumise suuruses vigastaksid kuulmisorganit. — Mõne looma kuulmisorganid on inimese omist palju tundlikumad; näit. kuuleb hundikoer nõrka heli, mida inimene 5 m kauguselt vaevalt kuulda suudab, veel 24 m kauguselt.

c. Füüsikas nimetatakse suure sagedusega mittekuuldavaid hääli ultrahääleks, kusjuures neid võib tekitada elektri abil sagedusega kaugelt üle 100 000 Hz. Ultrahäältel on erilised omadused, nad võivad põhjustada keemilisi reaktsioone, purustada protoplasmataimed rakukestes, surmata väikesi loomi jne.

20. **Doppler'i nähtus.** a. Kiiresti möödastuva veduri vile kuuldub lähenemisel kõrgemana ja kaugenemisel madalamana. Samalaadset nähtust märkame, kui jalgrattaga paigalolevast heliallikast kiiresti mööda sõidame. Heli kõrguse muutumist kuulaja ja heliallika kauguse muutumisel nimetatakse Doppler'i nähtuseks. Ta on arusaadav, sest kauguse vähenemisel langeb kuulaja kõrva

sekundis rohkem laineid, kauguse suurenemisel vähem kui kuulaja ja heliallika paigalolekul; seetõttu hääle kõrgus tõuseb või langeb.

Kui kinnitame umbes 2 m pikkuse kummivooliku külge metallist vile, puhume ja pöörame vile ringi (horisontaalselt), siis kõrvalolev kuulaja kuuleb heli kõrguse kõikumist.

b. Olgu heli kiirus õhus c , paigaloleva heliallika võngete arv n Hz ja heli laine pikkus λ . Paigaloleva kuulaja kõrva langeb siis sekundis $n = \frac{c}{\lambda}$ lainet.

Kui kuulaja liigub kiirusega v paigaloleva heliallika poole, siis liigub heli tema kõrvast mööda kiirusega $c + v$ ja kõrva langeb sekundis $n = \frac{c}{\lambda}$ asemel $n' = \frac{c+v}{\lambda} = \frac{c}{\lambda} + \frac{v}{\lambda} = n + \frac{v}{\lambda}$ lainet, tähendab $n' > n$.

Analoogiliselt on kuulaja kaugenemisel paigalolevast heliallikast kõrva langevate lainete arv sekundis $n'' = \frac{c-v}{\lambda} = n - \frac{v}{\lambda}$, tähendab $n'' < n$.

c. Hääleallika lähenemisel paigalolevale kuulajale vst. kaugenemisel on kuulaja kõrva langevate lainete arv sekundis $n_{1,2} = \frac{n}{1 \mp \frac{v}{c}}$.

21. Heliredel. Kõrguse järgi korraldatud helide rida nimetatakse heliredeliks. Muusikas tarvitatakse sagedasti nn. diatoonilist duur-heliredelit. See



Joon. 21. Heliredel klaveril.

koosneb seitsmest toonist, mille nimetused on põhitoon või priim, sekund, terts, kvart, kvint, sekst ja septim; sellele järgneb oktaav. Füüsikas märgitakse heliredeli toonid harilikult tähtedega. C-duur-heliredelis (põhitoon c) on toonide järjekord c, d, e, f, g, a, h (või $do, re, mi, fa, sol, la, si$).

Toonide kõrguste vahed nimetatakse muusikas intervallideks. Näiteks nimetame c ja e intervalli tertsiks, c ja g intervalli kvindiks jne.

Ürgrahvaste heliriistu tarvitati peasjalikult häälesignaalide andmiseks; need olid trummitaolised (õõnsad puupakud). Pärast hakati ka pinguletõmmatud keeli ja vilesid tarvitama. Kreeklaste lüüral oli neli keelt, mille helid vastasid priimile, kvardile, kvindile ja oktaavile; lüürat tarvitasid luuletajad oma ettekannete saatmiseks. Mitmehelilise harmoonilise muusika arenemisega oli algus pandud heliredeli arenemisele.

Kui auksireeni varustame nelja kontsentrilise aukude ringiga, mille aukude arvud suhtuvad nagu $1 : \frac{5}{4} : \frac{3}{2} : 2$ (näit. 24,

30, 36 ja 48 auku), ja pööramisel puhume vastu aukude rida, siis kuuleme pööramise kiirusest hoolimata alati neli tooni, mis kõlavad nagu priim, terts, kvint ja oktaav (samuti ka nelja rattaga varustatud hammasratas-sireeni puhul, kui hammaste arvud suhtuvad nagu $1 : \frac{5}{4} : \frac{3}{2} : 2$). Katsed näitavad, et helide intervallid olenevad võngete arvude suhtest. Seepärast füüsikas nimetame intervalliks antud toonide võngete arvude suhet. Näiteks on priimi ja tertsi intervall $1 : \frac{5}{4} = 4 : 5$, priimi ja kvindi intervall $1 : \frac{3}{2} = 2 : 3$, priimi ja oktaavi intervall $1 : 2$.

Diatoonilise duur-heliredeli toonide intervallid põhitooni suhtes on järgmised:

$$1 : \frac{9}{8} : \frac{5}{4} : \frac{4}{3} : \frac{3}{2} : \frac{5}{3} : \frac{15}{8} : 2$$

priim	sekund	terts	kvart	kvint	sekt	septim	oktaav
-------	--------	-------	-------	-------	------	--------	--------

Kõrvutiseisvate toonide intervallid ei ole ühesugused. Seda näitab arvutamine: $c : d = 1 : \frac{9}{8} = 8 : 9$, $d : e = \frac{9}{8} : \frac{5}{4} = \frac{9 \cdot 4}{8 \cdot 5} = 9 : 10$, $e : f = \frac{5}{4} : \frac{4}{3} = \frac{5 \cdot 3}{4 \cdot 4} = 15 : 16$, jne. Et jäävate toonidega muusikariistadel (klaver, orel) võiks iga tooniga alates heliredelit mängida, selleks lisatakse oktaavi piirkonnas viis tooni juurde (mustad klahvid).

1. Leida toonide võngete arvud duur-heliredelis, mille põhitooni võngete arv on 192 Hz!

2. Kvindi võngete arv on 600 Hz. Leida priimi võngete arv!

3. Normaala (435 Hz) asub klaveril ligikaudu klaviatuuri keskkohas. Leida klaveri kõige kõrgema ja kõige madalama tooni võngete arvud (ümmarguselt), oletades, et klaveril on 8 oktaavi (tegelikult on ~ 7 oktaavi)!

22. Konsonants. Dissonants. Helide meeldivat kooskõla nimetame konsonantsiks, ärritavat kooskõla dissonantsiks. Kõige parem on priimi ja oktaavi ning priimi ja kvindi konsonants. Priim ja sekund, priim ja septim dissonaeruvad.

Täiesti ebumusikaalsetest inimestest ei suuda $\sim 75\%$ kooskõlavast priimist ja oktaavist üksikuid helisid eraldatult kuulda, kooskõlavast priimist ja kvindist $\sim 50\%$, kooskõlavast priimist ja kvardist $\sim 30\%$ jne. Niisiis on konsonants seda parem, mida rohkem helid nii koos kõlavad, et raske on neid üksteisest eraldada, st. mida rohkem nad ühte sulavad.

Juba Pütagoras seletas konsonantsi-dissonantsi nähtust sellega, et konsoneerivate helide intervallid on lihtsad (priim ja oktaav 2, priim ja kvint $1\frac{1}{2}$,

priim ja kvart $1\frac{1}{3}$), dissoneerivate helide intervallid aga keerulisemad (priim ja sekund $1\frac{1}{8}$, priim ja septim $1\frac{7}{8}$). Pärast näitas Helmholtz, et ka ülemtoonide (§ 31) intervallid avaldavad mõju helide konsonantsile ja dissonantsile. Üldse on konsonantsi-dissonantsi tunde põhjus osalt füüsikaline, osalt füsioloogiline ja seetõttu tema teooria on keeruline.

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

On ühe keele võngete arv monohordil (klaveril, kandel) teise omast ühe võrra suurem, siis nad võnguvad sekundis üks kord samas ja üks kord vastassuunas. Tekkinud õhulained interfereeruvad ja sekundis tekib üks kord suurema amplituudiga ja üks kord vähema amplituudiga resultantlaine; vst. kõveneb ja nõrgeneb heli ning me kuuleme sekundis ühe heljumise. On võngete arvude vahe 2, siis kuuleme sekundis kaks heljumist, jne. Heljumiste arv sekundis võrdub helide võngete arvude vahega.

Heljumised võivad tekkida igasuguste heliallikate juures. Heljumisi võib näidata kahe ligikaudu sama kõrgusega helihargiga (helihargi tooni võib muuta liikuva plekist klambrikest abil). Tugevaid heljumisi võime kuulda kahe ühesuguse lahtise huulvile juures, kui ühe tooni kõrgust muudame, kattes osa avausest käega kinni. Sagedased tugevad heljumised mõjuvad kuulmisorganisse ärritavalt nagu vilkuv leek nägemisorganisse. Heljumisi tarvitatakse ka muusikas (oreli ja harmooniumi register *vox coeleste*).

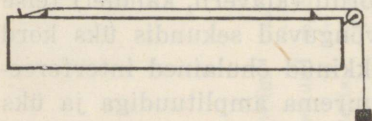
Kui kahe tooni võngete arvude vahe on suur, siis suure sagedusega heljumisi me ei kuule, küll aga kuuleme teatavatel tingimustel kolmandat madalamat tooni. Tekitame näiteks viiulil vabal g-keelel tooni g (~ 95 Hz) koos tooniga e (~ 325 Hz) d-keelel, siis kuuleme ka kolmandat madalamat tooni c (~ 125 Hz; $325 - 195 = 125$). Nähtus seletub sellega, et g ja e võngete arvud suhtuvad nagu $195 : 325 = 3 : 5$, tähendab, et heli g laine kolmas tihendus langeb ühte heli e laine viienda tihendusega, kusjuures hääl silmapilguks kõveneb. Need kõvenemismomendid korduvad sekundis 125 korda ja mõjuvad kuulmisorganisse nii, nagu kõlaks heli 125 Hz.

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

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

Heliallikad.

24. **Keel.** Keeled leiavad muusikariistade ehitamisel väga laialdast tarvitamist. Helisemisel nad võnguvad seisvate lainetena (joon. 11a). Oleme igapäevases elus tähele pannud, et lühem või tugevamini pinguletõmmatud või peenem keel annab kõrgema tooni. Üldiselt oleneb keele võngete arv keele pikkusest, pinevusest ja massist.



Joon. 22. Monohord.

a. Paljude muusikariistade juures muudame mängimisel keele pikkust ja selle kaudu tooni võngete arvu (viilul, kannel jne.). Et leida sidet keele pikkuse ja võngete arvu vahel, seks tarvitame *monohordi*, piklikku puukasti (joon. 22), millel keeled toetuvad teravaservalistele tugeledele ja on pingule tõmmatud kas kruvi või pommi abil. Keele pikkust võib muuta liikuva toe abil ja määrata kasti kaanele joonestatud cm-skaala abil.

Keele pikkust muutes kuuleme, et näit. $\frac{3}{4}$ terve keele pikkusest annab terve keele tooni kvardi, mille rel. võngete arv (põhi-tooni suhtes) on $\frac{4}{3}$. $\frac{2}{3}$ terve keele pikkusest annab terve keele tooni kvindi, mille rel. võngete arv on $\frac{3}{2}$. $\frac{1}{2}$ keele pikkust annab terve keele tooni oktaavi, mille rel. võngete arv on 2. Järelikult on keele võngete arv pöördvõrdeline keele pikkusega (seda näitab ka allpooltoodud valem).

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

c. Keele võngete arvu kohta on kehtiv valem

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

kus l tähendab keele pikkust cm-tes, p pinevust düünides ja m keele cm-lise osa massi g-des (nn. joontihedus). Nagu valemist näha, on keele võngete arv pöördvõrdeline ruutujuurega keele massist.

Kõrgema tooni võime saada, kui keele pikkust vähendada või tema pinevust suurendada. Et aga lühike keel annab väikese amplituudi tõttu nõrga tooni, siis tarvitatakse ikkagi pikemaid keeli, kuigi see nõuab suuremat keele pinevust ja tugevamat muusikariista ehitust (rauast raam klaveril). Näiteks on klaverikeelte pinevuste summa ligi 20 000 kg. — Madalama tooni võime saada, kui keele pikkust suurendada või tema pinevust vähenendada. Harilikult aga tarvitatakse madalate toonide saamiseks võrdl. lühikesi ja kaunis tugevasti pingule tõmmatud keeli, kuid siis suurendatakse keele massi (keel mässitakse ümber vasktraadiga).

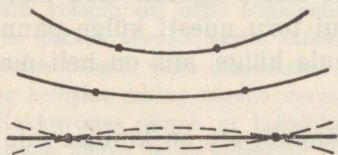
Keel võngub harilikult põiki, kuid teda võib võnkuma panna ka pikuti, kui teda näit. pikuti hõõruda kolofoniumiga kokkutehtud lapiga. Ta annab siis teissuguse tooni kui põikivõnkumisel.

1. Normaala keele pikkus viulil on 33 cm. Kui kaugele kannast tuleb sõrm asetada, et saada järgmine kõrgem kvart või kvint?

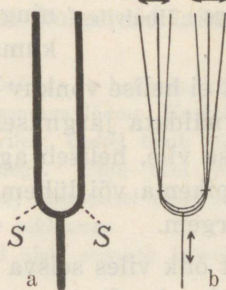
2. Kaks ühesugust kandlekeelt annavad toonid c ja f . Kui suur on nende pinevuste suhe?

25. **Helihark.** Põiki löödud vaba sirge varb võngub seisva põikilainena, kusjuures sõlmed asuvad $\sim \frac{1}{5}$ varda pikkusel otsadest (joon. 23). Varda kõverakspainutamisel nihkuvad sõlmed koomale.

Helihark on käepidemega varustatud kõverakspainutatud terasvarb.



Joon. 23.



Joon. 24. Helihark.

Katseklaasiga helisevat heliharki puudutades kuuleme kõrinat, mis on eriti intensiivne otsade juures ja kaob punktides S (joon. 24 a); järelikult seal asuvad sõlmed. Ta võngub nii, nagu näitab joon. 26 b; harud võnguvad põiki, vars aga pikuti.

26. **Plaat.** Ka plaadid võime helisema panna. Nad jagunevad seejuures sõlmjoontega eraldatud ja vastassuunas võnkuvateks naaberosadeks.

Et sõlmjooni nähtavaks teha, kinnitame ühtlase tasapinnalise (klaasist või plekist) plaadi horisontaalselt, riputame plaadile peenikest liiva ja tõmbame mööda äärt viulipoognaga. Tõmmates poognaga mitmesugustes kohtades ja muutes



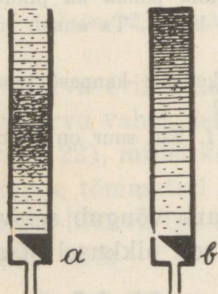
Joon. 25. Chladny helikujundid.

plaadi kinnituspunkte, kuuleme mitmesuguseid toone ja saame ühtlasi mitmesuguseid helikujundeid (joon. 25). Plaadi kinnituskohast läheb alati läbi mõni sõlmjoon, kuna poogna külgepuutumise kohast ei või sõlmjoon läbi minna.

Elekterkõlistaja kausid ja kirikukellad kujutavad kõveraid plaate. Helisemisel nad jagunevad sektoritaoliste sõlmjoontega eraldatud osadeks. Valame näiteks ühtlase (lihvimata) veiniklaasi vett ja tõmbame äärt mööda poognaga, siis näitavad vee pinnal tekkivad lained sõlmjoonte jaotust.

27. **Õhusammas.** Ka õhusambad võivad võnkuda ja heliseda. Huulviledes tekivad õhuvõnkumised puhumisel vastu teravat serva (huult), keelviledes puhumisel vastu elastset keelt (membraani).

a. Huulvile võib olla lahtine (joon. 26 a) või kinnine (joon. 26 b). Puhumisel voolab õhk läbi kitsa pilu vastu teravaservalist huult, seal murdub õhujuga, hakkab võnkuma ning paneb õhu vile torus seisva lainena võnkuma ja helisema.



Joon. 26. Huulvile.

Et ei helise võnkuv õhujuga, vaid torus olev õhusammas, seda võime näidata järgmiselt: lõikame huule ligidalt toru maha, siis ei helise vile, heliseb aga jälle, kui toru uuesti külge panna. Paneme pikema või lühema toru huule külge, siis on heli madalam või kõrgem.

Et õhk viles seisva lainena võngub, see on kinnise vile puhul arusaadav huule juurest torru edasiminevate ja kinnisest otsast tagasi peegeldunud lainete interferentsi tõttu. Kuid ka lahtises viles peegeldub laine lahtisest otsast, sest välisrõhk mõjub nagu hõredam keskkond (osakesed võivad igas suunas vabalt liikuda). — Seisvate lainete demonstreerimiseks võtame vile, mille kaks vastasseina on klaasist, ja laseme torusse niidi otsas kaalukaussisar-

naselt rippuva paberilehekese, millel on kergelt pulbrit. Sõlmpindade kohal jääb pulber paigale, kuna ta paisude kohal maha rappub.

Lahtises viles tekivad võnkumisel mõlematel otsadel paisud ja keskel sõlmpind ning helilaine pikkus (kahekordne naabersõlmede või naaberpaisude vahe) võrdub õhusamba kahekordse pikkusega. Kinnises viles tekib kinnises otsas, kus õhk võnkuda ei saa, sõlmpind ja lahtises pais ning helilaine pikkus võrdub õhusamba neljakordse pikkusega, seega on võngete sagedus kaks korda väiksem kui lahtise vile korral. Nii seletub, miks kinnine huulvile annab sama lahtise vile heli madalama oktaavi.

Heliseva õhusamba pikkust võime muuta kinnise vile puhul liikuva kanni abil, lahtise puhul ümbritseva liikuva toru abil. Vas-tavad katsed näitavad, et heliseva õhusamba võngete arv on pöördvõrdeline tema pikkusega.

Orkestris tarvitatavate puhkpillide juures võib heli kõrgust muuta puhumise tugevuse (ülemtoonid § 31) ja õhusamba pikkuse muutmise teel (torus olevate aukude avamine või sulgemine flöödi juures, harude lülimine või sulgemine vent-iilide abil trompeti juures).

b. Keelviles paneb õhuvool puust või metallist elastse keele (membraani) võnkuma, kusjuures keel õhuvoolu korrapäraselt katkestab. Mõnes keelviles (löötspill) tekitab elastse keele võnkumise mõjul katkestatud õhuvool otse kulgevaid laineid ümbritsevas õhus ning heli kõrgus oleneb ainult keele võngete arvust. Teistes keelviledes (orkestri keel-puhkpillid, näit klarnet) on võnkuv keel ühenduses õhusambaga, paneb õhusamba seisva lainena võnkuma ja see tekitab ümbritsevas õhus kulgevaid laineid; heli kõrgus oleneb siis õhusamba pikkusest.

c. Varvad võivad ka seisva pikilainena võnkuda ja heliseda, kui me neid pikuti hõõrume (Kundt'i katse) või pikisuunas vasaraga lööme. Keskelt kinnitatud varb võngub siis nagu õhusammas lahtises viles; keskel tekib sõlmpind ja helilaine pikkus võrdub varva kahekordse pikkusega. Ühte otsa pidi kinnitatud varb võngub nagu õhusammas kinnises viles; kinnitatud otsal tekib sõlmpind ja helilaine pikkus võrdub varva neljakordse pikkusega.

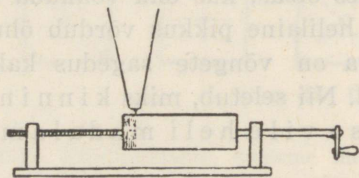
Kokkuvõttes näeme, et heliallikad võnguvad alati seisvate lainetena, kuna hääl nende ümber levib kulgevate lainetena.

1. Mille võrra tuleks lühendada 30 cm pikkust õhusammast, et ta annaks terve samba heli kvindi, kvardi või oktaavi?

2. Kuidas oleks võimalik Kundt'i katse (§ 11) põhjal määrata heli levimiskiirust heliseva varva aines?

3. Hääle kiirus on valgustusgaasis suurem kui õhus. Kas valgustusgaasiga puhutud vile annab sama, kõrgema või madalama tooni, kui puhumisel õhuga? Põh-jenda oma arvamust!

28. **Fonograaf ja grammofon.** Fonograafi ehitus on lihtsamal kujul järgmine: pehme pinnaga (vahast) silinder pöör-
 dub kruvitaolisel teljel (joon. 27); silindri külge puutub nõel, mis
 on ühendatud kõnetoru otsa kinnitatud membraaniga ja vajutab
 silindri pöördumisel selle pinna sisse kruvitoalise vao. Torusse



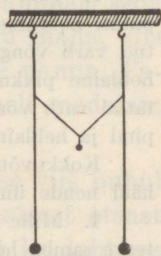
Joon. 27. Fonograaf.

räägitud või lauldud sõna paneb membraani ühes teravikuga võnku-
 ma ja tekitab konarliku põhjaga vao. Kui pärast pinna kõvastumist nõel asetada vao alguspunkti ja si-
 lindrit tiirutada endise kiirusega, siis libiseb nõel endist jälge (fono-
 grammi) mööda, membraan teeb niisamasuguseid võnkumisi kui rääkimisel, tekivad samalaadsed õhulained ja me kuuleme endist häält. Fonograafi leiutas Th. Edison a. 1876, tema esitajat peeti demonstreerimisel Pariisi akadee-
 mias esialgu kõhurääkijaks ja petjaks.

Grammofoni leiutaja Berliner tarvitas silindrite asemel plaate ja paljundas neid galvanoplastilisel teel. Fonograafis võngub nõel risti silindri pinnaga kruvitaolisel joonel. Gram-
 mofonis võngub nõel lainetaoliselt plaadi pinnas spiraalitaolisel joonel.

Resonants; kõlaanalüüs; ülemtoonid.

29. **Resonants.** a. Võtame kaks sama võngete arvuga keha, näit. riputame liistu külge kaks ühepikkust pendlit ja seome nad omavahel lahtiselt mitte pingul oleva nõoriga (joon. 28). Kui paneme ühe neist võnkuma, siis annab iga võnge nõöri kaudu teisele nõrga tõuke ja korduvate tõugete mõjul hakkab teine esimesega kaasa võnkuma. Et teise pendli võnkumine sünnib esimese võnkumise energia kulul, siis väheneb esimese amplituud sel määral, kuivõrd teise oma kasvab. Muudame aga teise pendli võngete arvu (pendli pikkust), siis ta esimesega kaasa ei võngu, sest tõugete periood ei lange ühte tema võnkumisperioodiga. Järeldame: (nõrga sideme puhul) üks keha võngub teisega kaasa siis, kui võngete arvud on samad. Ühe keha kaasavõnkumist teise



Joon. 28.

võnkuva kehaga sama võngete arvu korral nimetatakse resonantsiks.

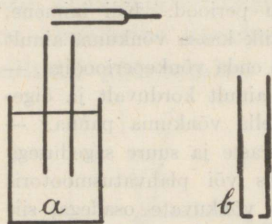
Kiigel kui pendlil on oma kindel võngete arv ja periood. Kui inimene, asudes kiigel, annab talle kehaga tõukeid, siis hakkab kiik kaasa võnkuma ainult siis, kui keha poolt antavate tõugete periood ühtub kiige enda võnkeperioodiga. — Resonantsi tekitav tung võib olla koguni nõrk, kui ta ainult korduvalt ja õigeaegselt mõjub; näiteks võib väike laps raske kirikukella võnkuma panna. — Tehnikas on masinate juures tihtipeale tegemist korrapäraste ja suure sagedusega võnkumistega (kolvi edasi-tagasi liikumine auruselindris või plahvatusmootoris jne.). Kui mõni teine masinaga seotud osa resonanceerib võnkuvate osadega, siis võivad võnkumised nii tugevaks minna, et masin kannatab. — Ka laeva kerel on oma võngete arv, seetõttu laevade ehitamise puhul püütakse saavutada seda, et masinate ja kere vaheline resonants oleks tunduv vaid masinate normaalsest väiksema tegevuskiiruse korral, st. normaalse ja normaalsest suurema kiiruse juures (tormi puhul) resonantsi ei teki. Kui laev liikuma hakkab, siis tunneme teatava alla normaalse kiiruse puhul kere värisemist, mis kiiruse normaalseks suurenemisel kaob. Kere ja masinate kestva resonantsi korral kuluvad needid ja kruvid lahti ja laev vananeb kiiresti.

b. Nõrgad helilained võivad suure sageduse tõttu ka tunduvalt resonantsi esile kutsuda. Kui lahtise klaveri juures kõlab tugev hääl ja pedaal on avatud, siis kuuleme klaverist sama häält (sama perioodiga keel võngub kaasa). Paneme kahest ühesugusest tugevast helihargist ühe helisema, siis hakkab teine mitme m kaugusel kaasa helisema (see on kuuldav, kui esimese helisemist käega summutada). Kahe keelega varustatud monohordil kandub ühe heliseva keele võnkumine riista seinte kaudu teisele üle, kui keeled on unissoonis.

Nägime (§ 27), et õhusambal viles on kindel võngete arv, mis oleneb samba pikkusest. Üldse on igal piiratud õhuhulgal kindel võngete arv, kindel omaheli. Puhume näiteks pudeli (lambiklaasi, võtme) avausest mööda, siis kuuleme kindlat heli. Arusaadav, et siis ka õhusambad võivad resonanceerida. Hoiame näiteks kärarikkas ruumis (koridoris vahetunnil, klaverimängu ajal) pudeli avaust kõrva ääres, siis kuuleme pudelis oleva õhu helisemist, kui sama heli käras on olemas. Pudel nagu valib kärast heli välja, millega ta kaasa heliseb (valiv resonants).

Hz-des antud tooni kohta võib resonanceeriva silindrilise, ühelt poolt kinnise õhusamba pikkust arvutada, sest see peab olema $\frac{1}{4} \lambda$ (vaata § 27). Et näit. normaal-a lainepikkus õhus on 78 cm, siis on temaga resonanceeriva silindrilise õhusamba pikkus 19,5 cm. Seda tõestab järgmine katse (joon. 29 a): Hoiame vetteasetatud

silindril heliseva a-helihargi, siis kuuleme samba pikkuse muutumisel, et ta 19,5 cm pikkuse puhul tugevasti kaasa heliseb. Resonaatoreid võib valmistada iga tooni jaoks, mille võngete arv on antud.



Joon. 29. Silindriline resonaator.

Silindrilist resonaatorit võib teha papist või plekist. Üks silindri ots jäetakse lahtiseks, teine kinnine ja auguga varustatud ots surutakse kuulamisel kõrva külge. Õhusamba pikkust võib muuta ümbritseva silindri abil (joon. 29 b).

Oreli keelvilede juures (kindla võngete arvuga metallist keel) on õhk vile torus resonantsis võnkuva keelega.

c. Tugeva sideme puhul võngub üks keha teisega kaasa ka siis, kui võngete arvud ei ole samad. Niisugust nähtust nimetame $s u n d k a a s a v \ddot{o} n k u m i s e k s$. Näiteks kisub pikem võnkumapandud pendel tugeva sideme puhul lühema kaasa ja mõlemad võnguvad koos. Kui teine on esimesega võrreldes kerge, siis ta ei muuda tunduvalt esimese perioodi. Kui nende vaheline side katkeb, siis teine ei võngu enam sunnitud, vaid oma perioodiga.

Kindla perioodita elastsete kehade sundkaasavõnkumist kasutatakse muusikariistade juures hääle kõvendamiseks. Näiteks ei „kiirga“ pingulolev keel väikese pinna tõttu kuigi palju hääleenergiat teda ümbritsevasse õhku; ta sunnib aga viiuli kere (klaveri resonantspõhja) kaasa võnkuma, mis suure pinna tõttu tugevaid õhulaineid tekitab ja keele häält kõvendab. Ka kõrva kuulmeha ja telefonimembraani tegevus seletub sundkaasavõnkumisega.

Mitte kindla võngete arvuga keelte (membraanidega) varustatud heliallikate juures viib õhusamba võnkumine keele võnkumise enesega unissoonis, samuti ka õhujoa võnkumise huulvile — sundkaasavõnkumine.

1. Mispärast on vastu lauda toetatud helihargi heli tugev, vastu tinaplaati toetatud hargi heli aga nõrk?
2. Sagedasti kinnitatakse helihark heli kõvendamiseks puukarbile, mille üks ots on lahtine. Kui pikk tuleks võtta kast, et kammertooni (435 Hz) heli tugevasti kuulda oleks?
3. Kuidas võib silindrilise resonaatoriga (joon. 29 b) määrata
 - a) heli kiirust õhus, kui on teada helihargi võngete arv?
 - b) helihargi võngete arvu, kui on teada heli kiirus õhus?
4. Kui joon. 29 a kujutatud katses tilgutame silindrisse eetrit, siis on tarvis resonaatori pikkust muuta. Millega seda seletada?

30. **Kuulmise resonantsteooria.** Kõrvas on basilaar-membraanil kiudude süsteem (Corti organ), mis koosneb umbes kahekümne viie tuhandest kiust. Kiudude pikkused on isesugused (sarnaselt klaverikeelte pikkustega). Helmholtz'i arvates need kiud resoneerivad üksikute toonidega ja tekitavad peaaegu toonide tunnet. Sellega on seletatav üksikute toonide eraldatud kuulmine ka polüfoonilises (mitmehäälelises) muusikas.

31. **Keele võnkumiskuju. Ülemtoonide tekkimine.** a. Keel võngub helisemisel seisva lainena, harilikult tervena, ja sõlmed on keele otsapunktides (joon. 11 a). Keel annab siis oma kõige madalama ehk põhitooni: olgu see näit. c. Võnkuvat keelt kesk-kohal puudutades kuuleme põhitooni järgmist kõrgemat oktaavi c, mille rel. võngete arv on 2. Nähtust võib seletada ainult sellega, et puudutamise kohal tekkis sõlmpunkt ja mõlemad keele pooled võnkusid nagu kaks iseseisvat keelt (joon. 11 b). Et keele võngete arv on pöördvõrdeline tema pikkusega, siis on mõlema poole rel. võngete arv 2.

Puudutades võnkuvat keelt ühe kolmandiku kohal, kuuleme järgmise oktaavi kvinti g. Seejuures on tekkinud sõlmpunkt mitte ainult puudutatud kolmandikul, vaid ka teise kolmandiku kohal (joon. 11 c); teise kolmandiku kohale asetatud väike paberist ratsanik jääb seal paigale, kuna ta paisu kohalt maha langeb. Keel on iseseisvalt jagunenud kolmeks ühesuguseks võnkuvaks osaks ja järelikult iga osa rel. võngete arv peab olema 3.

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

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

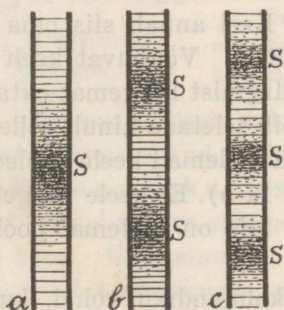
Toone, mis tekivad heliallika osadena võnkumisel ja mille rel. võngete arvud moodusta-

va d loomuliku arvrea, nimetatakse ülemtoonideks. Põhitooni ja ülemtoonide võngete arvud suhtuvad nagu 1:2:3:...

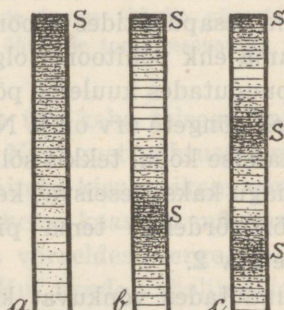
b. Ka helisevad õhusambad viledes võivad osadeks jaguneda, näiteks kõvemal puhumisel, kusjuures tekivad ülemtoonid.

Lahtise vile helisemisel on otsadel alati paisud; põhitooni puhul asub sõlmpind samba keskel (joon. 30 a). Sõlmpindade jaotust järgnevate ülemtoonide puhul näitavad joonisel b ja c.

Kinnise vile kinnisel otsal tekib alati sõlmpind ja lahtisel pais. Joonis 31 kujutab sõlmpindade jaotust põhitooni ja esimeste ülemtoonide puhul.



Joon. 30. Sõlmed lahtises viles.



Joon. 31. Sõlmed kinnises viles.

Lahtise vile ülemtoonid suhtuvad nagu 1 : 2 : 3 jne., kinnise omad nagu 1 : 3 : 5 jne., tähendab, kinnise vile ülemtoonide reas puuduvad paarisarvulised ülemtoonid. Seleta seda jooniste 30 ja 31 põhjal.

c. Tegelikult on vabalt võnkuva keele (samuti õhusamba ja teiste heliallikate) võnkumiskuju väga keeruline, sest keel jaguneb, võnkudes tervikuna, ka iseenesest ilma puudutamiseteta osadeks: poolteks, kolmandikkudeks jne. Seetõttu kõlavad põhitooniga alati kaasa nõrgad ülemtoonid. Nii näeme, et toonid ja helid on õieti keerulised kõlad. Ainult harjunud kõrv kuuleb ülemtoone eraldi, samuti näit. ainult vilunud kokk tunneb mõnes keerulisemas söögis üksikuid aineid eraldi. Et kõik eespool-arvutatud ülemtoonid põhitooniga alati kaasa ei helise, selgub juba sellest, et näit. keele juures ülemtoonide tekkimine on takistatud, kui helisemisel sõlmpunkt peaks tekkima seal, kus me keelt tõmbame või vasaraga lööme.

Helmholtz tarvitas kõlade analüüsimisel nõrkade ülemtoonide paremaks kuulmiseks resonaatoreid.

Täieliku vaikuse ja kontsentreeritud tähelepanu puhul võib ülemtoone klas- sis ilma resonaatorita kuuldavaks teha. Selleks puudutame näiteks monohordil

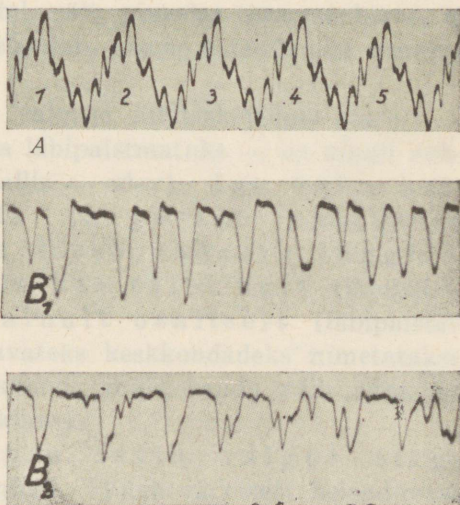
võnkuvat keelt kolmandiku kohal ja juhime sellega tähelepanu vastavale ülemtoonile (kvindile). Kordame seda paar korda ja paneme siis keele tugevasti võnkuma (põhitoon). Põhitooni nõrgenemisel ja kustumisel kuuleme siis nõrka kvinti. Teine, neljas ja viies ülemtoon on võrdl. hästi kuulda, esimene ja kolmas halvasti, sest oktaave on raskem põhitoonist eraldada. Kõrgemad ülemtoonid on väiksema amplituudi tõttu nõrgemad.

Kõige vähem ülemtoone on helihargi ja flöödi hääles. Puhkpillide juures oleneb ülemtoonide koosseis ja tugevus ka õhusamba läbilõikest ja pilli seinte materjalist.

1. Leia normaal-a (435 Hz) esimese viie ülemtooni võngete arvud!

32. Kõlavärvus. Eespool nägime, et helid võivad teineteisest erineda oma kõrguse ja tugevuse poolest. Igapäevastest nähtustest võime tähele panna, et meie kõrv võib vahet teha ka niisuguste helide vahel, mille kõrgused ja tugevused on ühesugused, kui aga heliallikad või heli tekitamisviisid on isesugused. Näiteks: kuulmise abil eraldame viiuli tooni klaveri toonist, tunneme hääle järgi tuttavat inimest, teeme sama hääle juures vahet üksikute häälikute vahel jne. Niisugust heli omadust, mille põhjal võime eraldada üksteisest sama kõrguse ja tugevusega helisid, nimetame heli kõlavärvuseks (tämbriks).

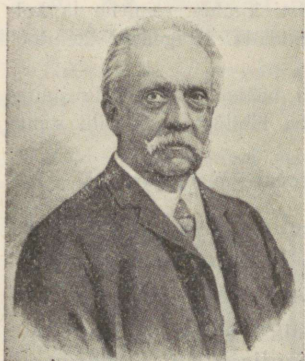
Mitmesuguseid helisid analüüsid joudis Helmholtz otsusele, et kõlavärvus oleneb sellest, missugused ülemtoonid põhitooniga kaasa helisevad ja kui tugevad nad on. Inimhäält analüüsid tegi ta kindlaks, et ka üksikute häälikute erinevuse põhjuseks on põhitooniga kaasa helisevate toonide koosseis ja tugevus.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



Joon. 32. Häälte graafikud.

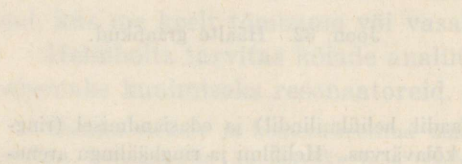
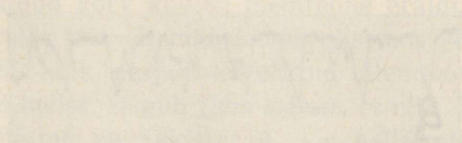
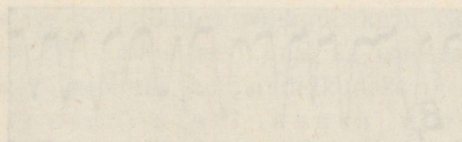
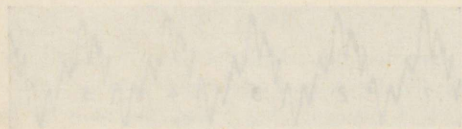
Hääle säilitamisel (grammofoniplaadil, helifilmilindil) ja edasiandmisel (ringhääling) on tähtis hääle moonutamatu kõlavärvus. Helifilmi ja ringhäälingu arene-

des hakati tarvitama keerulisi elektriseadiseid hääle analüüsimiseks, mis häälelaineid graafiliselt üles märgivad. Joon. 32 kujutab A viiuli, B₁ inimhääle (hääliku u puhul) ja B₂ konna hääle graafikut. Niiuguste graafikute põhjal võib mõõtmise ja arvutamise teel kõlas või hääliku helis peituvate üksikute ületoonide olemasolu ja tugevust määrata.



Hermann v. Helmholtz.

Hermann v. Helmholtz (1821—1894). Kuulus saksa arst ja looduseuurija. Juba koolipõlves osutas haruldast matemaatika- ja vaatlemisannet. Oma raamatuga „Jõu alalhoidmisest“ pani kindla aluse energia jäävuse seadusele. Oli füsioloogia- ja hiljem füüsika-professor. Leiutas resonaatorid ja seletas nende abil kõlavärvust. Andis häälikute teooria. Leiutas silmapeegli. Töötas värvuste nägemise teooria kallal. Oma uurimused füsioloogia alalt avaldas raamatutes „Heliastingute õpetus“ ja „Füsioloogilise optika käsiraamat“.



Valgus.

Valguse levimine ja kiirus.

33. Valgusallikad ja valguse levimine ühtlases keskkonnas. Valgus on teatav energia avaldis (neeldunud valgus tekitab soojust, keemilisi reaktsioone jne.). Harilikud valgusallikad on hõõguvad kehad, mille valguse kiirgamine sünnib soojusenergia mõjul. Külma valguse kiirgamine (jaaniussid, mädanepuu) toimub looduses peamiselt keemilistel põhjustel, võib tekkida aga ka teistel põhjustel, näit. pimedas toas märkame, et isoleerpael lahtitõmbamisel helendub, näeme sätendamist suhkru-tüki purustamisel jne.

Keskkondade liigitamine valguse läbilaskevõime poolest — läbinähtavaks, läbipaistvaks ja läbipaistmatuks — on ainult suhteline (nagu suur — väike; kallis — odav). Iga keha heidab ühe osa temale langevast valgusest tagasi, teise osa aga laseb endasse tungida, kusjuures neelab selle kas täielikult (läbipaistmatu keha — raamat) või ainult osaliselt (läbipaistev keha — kalapõis). Läbinähtavateks keskkondadeks nimetatakse niisuguseid läbipaistvaid keskkondi, mille kaudu võib näha ka valgusallikate piirjooni (aknaklaas).

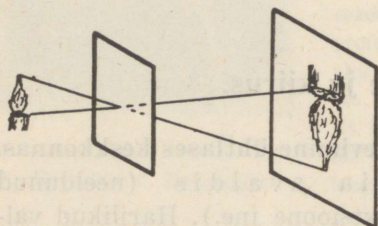
Ühtlases keskkonnas levib valgus sirgjooneliselt (varju tekkimine). Väga väikesest helenduvast pinnast, nn. valguspunktist, lähevad valgusekiired (levimise suunad) radiaalselt laiali; kui nad langevad silma, siis näeb vaatleja valguspunkti ühe silmaga teatavas suunas, kahe silmaga — teatavas kohas (mõlemate suundade lõikepunktis). Ühest punktist laialduvat kiirte kimpu nimetatakse homotsentriliseks (samakesk-

seks); kaugest valgusallikast (Päikesest) tulevaid kiiri loetakse praktiliselt paralleelseteks.

Optilistes katsetes tarvitatakse peamiselt projektsioonlaternakiiri; valgusallikaks on seejuures kas elektrileklamp või -hõõglamp. Laterna abil võib saada kas koonduva, paralleelse või hajuva kiirte kimbu.

1. Kuidas paistab õliplekk valgel paberil vaadates vastu seinu ja vastu akent? Seleta nähtust!

2. Mispärast näeme päeval hästi aknast välja uulitsale ja halvasti uulitsalt sisse tuppa, õhtuse valgustuse puhul aga ümberpöörduvalt?



Joon. 33.

34. **Kujutised väikese avause abil.** Asetame pimedas toas küünla taha läbipaistmatu ekraani väikese avausega (musta paberisse kuuma nõelaga põletatud auk) ja selle taha valge ekraani (joon. 33), siis näeme valgel ekraanil nõrka leegi ümberpööratud kujutist.

Kujutise tekkimist võime selektada ainult sellega, et igast punkti

tist langeb läbi esimese ekraani avause teisele kitsas kiirte kimp ja annab seal avausekujulise valgustatud täpi; kõik valgustatud täpid kokku moodustavad aga leegi ümberpööratud kujutise.

Fotoaparaadi ehitamisel võib väikest avaust tarvitada objektiivil asemel. Niisuguse aparaadiga tuleb ainult kaua valgustada, sest läbi avause langeb vähe valgust fotoplaadile. Seetõttu võib ülesvõtteid teha ainult paigaldlevatest esemetest.

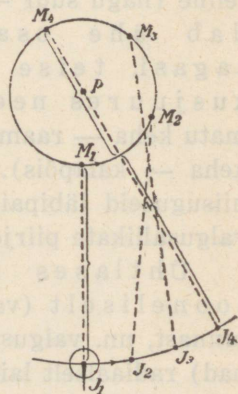
1. Seleta, kuidas muutub kujutise suurus, kui muuta küünla ja avause kaugust või ekraanide kaugust!

2. Missugused paremused on avausobjektiivil võrreldes läätsobjektiiviga?

35. **Valguse kiirus.** Suure kiiruse tõttu kulgeb valgus Maakeral nähtavaid kaugusi nii lühikese ajaga, et seda vanaaegsete mõõtmismeetoditega polnud võimalik tähele panna.

a. Valguse kiiruse määras esimesena (a. 1675) Olaf Römer astronoomiliste nähtuste abil.

Maakera teeb tiiru ümber Päikese ühe aasta jooksul; Jupiter tarvitab selleks ~ 12



Joon. 34. Valguse kiiruse määramine Römer'i järele.

aastat. Niisiis teeb Maakera ~ 12 tiiru ümber Päikese selle aja jooksul, kui Jupiter teeb üheainsa.

Vastavad Maa ja Jupiteri seisud on juunis 34 tähistatud ühesuguste indeksitega.

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

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

ümmarguselt $\frac{300\,000\,000}{1000} \frac{\text{km}}{\text{sek}} = 300\,000 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$, täpsemate mõõtmiste põhjal $299\,800 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$.

Hiljem läks korda mõõta valguse kiirust lühema vahemiku ulatusel (toas) õhus ja teistes keskkondades. Õhus on kiirus ligikaudu sama, mis maailmaruumis, vees $\frac{3}{4}$ ja klaasis $\frac{3}{5}$ kiirusest maailmaruumis.

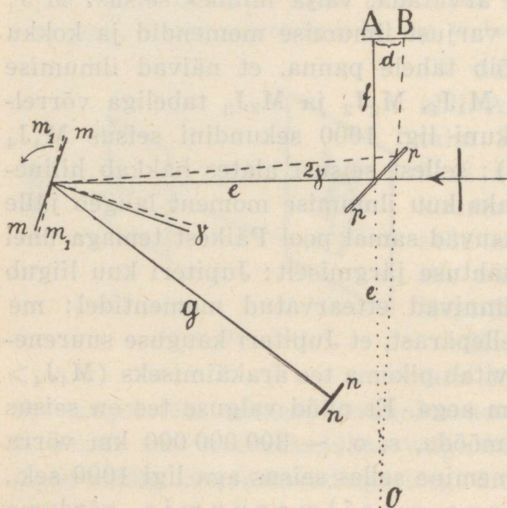
Valgus tarvitab Kuu ja Maa vahelise kauguse kulgemiseks ümmarguselt 1 sek., Päikese ja Maa kauguste läbistamiseks 8,5 min. Astronoomias tarvitatakse kinnistähtede vaheliste kauguste määramisel ühikuna valgusaastat, s. o. tee pikkust, mida valguskiir ühe aasta jooksul kulgeb. Näiteks on lähem kinnistäht α Centauri meilt 4,3 valgusaastat kaugel, Siirius 8,6 valgusaastat; linnutee tähtede kaugused on 3000—10 000 valgusaastat, mõnede udu laikude kaugused ulatuvad miljoni valgusaastani.

Väikesel määral oleneb kiirus tihedates keskkondades ka valguse värvusest,

näit. on punase valguse kiirus klaasis ja vees pisut suurem kui sinise oma, maa-ilmaruumis ja õhus aga sama.

1. Väljenda valgusaasta km-tes!

*b. Foucault (a. 1854) tarvitas valguse kiiruse määramiseks järgmist meetodit: Ta juhtis paralleelkiirte kimbu (joon. 35) läbi tasaparalleelse plaadi pp (langemisnurk 45°) peeglile mm. Sellest peegeldudes langesid kiired risti peeglile nn, sealt



Joon. 35. Valguse kiiruse määramine Foucault' järgi.

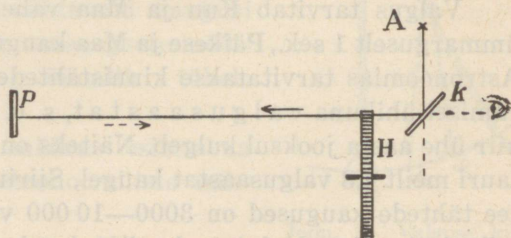
tagasi peeglile mm, sealt omakorda plaadile pp, peegeldudes plaadi esipinnast ekraanile, kus tekkis hele täpp A. Peegli mm kiirelt tiirutamisel nihkus hele täpp B-sse, sest selle aja jooksul, mida kiir tarvitas kahekordse kauguse g kulgemiseks, pöördus peegel seisust mm seisu m_1m_1 nurga γ võrra, mille tõttu peegeldunud kiir pöördus 2γ võrra ja langes punkti B.

Möödetavate kauguste ja peegli tiirlemise kiiruse põhjal arvutas Foucault valguse kiiruse lühikesel ulatusel (toas) õhus ja ka teistes keskkondades.

Tähistame peegli tiirude arvu sekundis n-ga ja teised suurused vastavalt joonisele, siis valguse kiirus

$$v = \frac{8 \pi g n (e+f)}{d}$$

*c. Fizeau (fiso) mõttis valguse kiirust (a. 1849) õhus $\sim 8,5$ km pikkuses ulatuses. Joon. 36 näitab tema seadise skeemi. Valgusallikast A langeb kiir tasaparalleelsele klaasplaadile K (langemisnurk 45°), peegel-



Joon. 36. Valguse kiiruse määramine Fizeau järgi.

dub sealt tasapeeglile P (langemisnurk 90°) ning sellest tagasi plaadile K ja langeb vaateleja silma. Plaadi K ette on asetatud hammasratas ühesuguste hammaste ja vahede laiustega nii, et hambad takistavad kiirte levimist peegli ja plaadi K vahel, kuna hammaste vahelt valgus võib läbi pääseda. Ratta aeglasel pöörämisel näeb vaateleja vahetpidamata valgust, sest lühiajalised valguse kustumised ei ole märgatavad. Teatava tiirlemise kiiruse puhul aga kustub valgus, sest läbi hammaste vahe peegli suunas levinud valgus langeb tagasitulekul hambale. See sünnib siis, kui valgusel ratta ja peegli vahelise kauguse kahekordseks kulgemiseks kulub aeg võrdub ajaga, mille kestel hammas nihkub vaheasemele. Mõõdetavate andmete põhjal arvutas Fizeau valguse kiiruse õhus.

Tähistame valguse kiiruse v -ga, ratta ja peegli vahelise kauguse g -ga, ratta hammaste arvu h -ga ja ratta tiirude arvu sekundis valguse kustumisel n -ga, siis

$$v = 4ghn.$$

Valgus- ja valgustugevus.

36. Valgustugevus. Valgusallikate valgustugevused ei ole ühesugused (päike, projektsioonlaternalamp, parafiinküünal). Valgustugevuse mõõtmisel tarvitatakse ühikuna nn. Hefner'i küünalt (HK), see on amüülatsetaatlambi leegi valgustugevus, kui tahi läbimõõt on 8 mm ja leegi kõrgus 40 mm.

Elektrihõõglampidel on sagedasti märgitud nende ligikaudsed tugevused HK-des; näiteks kiirgab 25 HK-line lamp niisama palju valgust kui 25 Hefner'i küünalt ühtekokku.

Otsesel valgusallikate vaatlemisel eksime nende tugevust hinnates ja palja silmaga võime ainult otsustada, kas kaks kõrvutiseisvat ühesugust pinda on ühetugevuselt valgustatud või mitte. Valgusallikate tugevusi mõõdame kaudselt sel teel, et võrdleme, kui tugevasti nad teatavail tingimusil kõrvutiseisvaid ühesuguseid pindu valgustavad, ja selleks on tarvis pinna valgustusseadustega tutvuda.

Valgustugevuse seletustes räägime kiirte „hulgast“ (tihedusest). Näiteks ütleme, et kaks või kolm korda tugevam valgusallikas saadab välja kaks või kolm korda rohkem kiiri, et pind on valgustatud kaks või kolm korda tugevamini, kui temale langeb kaks või kolm korda rohkem kiiri.

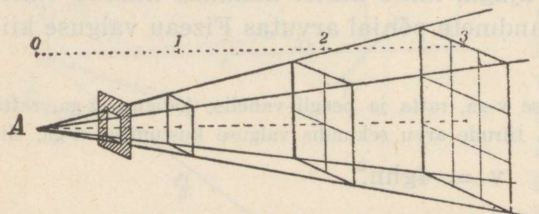
37. Valgustugevus. a. Igapäevasest elust teame, et pinna valgustugevus oleneb valgusallika tugevusest ja kaugusest ning

kiirte kaldenurgast. Valgusallika antud tugevuse ja kauguse juures on valgustus kõige tugevam, kui kiired langevad pinnale risti (joonisest 38 näeme, et kiirtele risti asetatud pinnale p langevad kiired tihedamalt kui kaldu asetatud pinnale P).

Vaatleme juhtu, kus kiired langevad pinnale risti. Valgustugevuse kohta on siis kehtiv seadus: valgustugevus (v) on võrdeline valgusallika tugevusega (J) ja pöördvõrdeline kauguse (r) ruuduga:

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

Selle seaduse esimene osa on endastmõistetav. Teise osa



Joon. 37. Valgustugevuse olenevus valgusallika kaugusest.

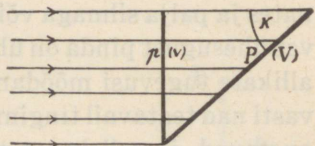
võime tõestada joonise 37 abil. Näeme, et kiirte hulk, mis langeb ühe m kaugusel valgusallikast ühele pindalaühikule, valgustab kahekordses kauguses 4, kolmekordses 9 pind-

alaühikut; järelikult langeb kiiri igale pindalaühikule kahekordses kauguses 4 korda, kolmekordses 9 korda vähem jne.

Katseliselt tõestame seda järgmiselt: kõrvaldame projektsioonlaternast kondensaatorlätse — siis söepulga hõõgav ots kujutab helenduva valguspunkti — ja kinnitame selle asemele plekist diafragma väikese ruudukujulise avausega. Asetame laterna näit. 1 m kaugusele ekraanist ja möödame ekraanil valgustatud ruudu külje pikkust. Asetame laterna ekraanist 2, 3 jne. korda kaugemale, siis on valgustatud ruudu külj 2, 3 jne. korda pikem, järelikult valgustatud ruudu pindala 4, 9 jne. korda suurem.

b. Kujutleme, et paralleelkiirte kimp valgustab kiirtele kaldu asetatud pinda P (joonisest 38) ja risti asetatud pinda p. Nende pindade vst. valgustugevused V ja v on pöördvõrdelised pindalade suurustega, s. o. $V:v = p:P$.

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



Joon. 38. Valgustugevuse olenevus kiirte kaldenurgast.

Tähendab, pinna valgustugevus on võrdeline langevate kiirte kaldenurga (k) siinusega (langemisnurga kosinusega).

Kokku võttes väljendub valgustustugevus V matemaatilisel kujul järgmiselt:

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

Valgustustugevuse ühikuks on **luks (Lx)**, see on valgustustugevus, mille tekitab 1 HK horisontaalsuunas 1 m kaugusel kiirtele risti asetatud valgel pinnal.

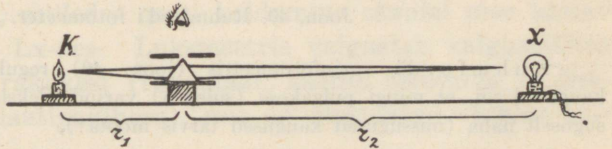
Tugevama valgustamise puhul on asja peenused paremini näha, seetõttu peab näiteks peenmehaaniku töökoht tugevamini valgustatud olema kui lukusepa töökoht, kuid omakorda liiga tugev valgustus väsitab silma. Soovitav valgustus lugemisel ja kirjutamisel on 30 kuni 40 Lx, joonestamisel vähemalt 50 Lx.

1. Arvuta raamatu valgustus Lx-des, kui lambi valgustugevus raamatu suunas on 25 HK, raamatu kaugus lambist $\frac{1}{2}$ m ja

- a) kiired langevad raamatule risti
- b) kiirte kaldenurk on 60° !

38. Valgustugevuse mõõtmine (fotomeetria). a. Riistu, millega mõõdetakse valgusallikate tugevust, nimetatakse fotomeetriteks.

Ritchie-tüübilise fotomeetri valmistame järgmiselt: Lõikame paberrossikes-tade karbi otsad lahti, värvime seestpoolt tindiga mustaks, kleebime põhja keskele katuseaoliselt mur-



Joon. 39. Ritchie fotomeeter.

tud joonestuspabeririba nii, et küljed põhipinnaga moodustaksid võrdsed nurgad, ja lõikame kaanest riba välja (joon. 39). Minge lambi valgustugevuse mõõtmiseks asetame lambi ja 1 HK fotomeetri mõeldava telje kõrgusele ja reguleerime siis nende kaugusi nii, et paberi pinnad oleksid mõlemalt poolt ühetugevuselt valgustatud. Siis

$$\frac{HK}{r_1^2} \sin k_1 = \frac{x}{r_2^2} \sin k_2$$

$$k_1 = k_2$$

$$\frac{HK}{r_1^2} = \frac{x}{r_2^2}$$

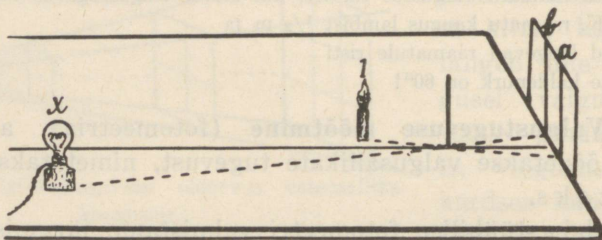
$$x = \frac{r_2^2}{r_1^2} HK.$$

Olgu näit. pindade ühetugevuse valgustuse puhul $r_1 = 20$ cm ja $r_2 = 80$ cm, siis lambi valgustugevus on 16 HK.

Täpsemate resultaaside saamiseks tuleb mõõtmine teostada segava hajunud valguse mõju ärahoidmiseks täiesti pimedas toas mustaksvärvitud seinte, lae ja põrandaga. Tegelikult tarvita-takse mõõtmisel HK asemel käepärasemat elektrihoõglampi, mille valgustugevus on täpselt määratud.

Parem on Ritchie fotomeetri kast teha puust, paberi asemel kinnitada kasti põhjale kaks peegelpaati ja lahtine riba kasti kaanes katta tuhmklaasiga, mis valgust igas suunas ühtlaselt hajutab. — Värvilise valgusallika tugevuse mõõtmisel tarvitatakse igasuguseid võtteid.

b. Bunsen'i fotomeetris paigutatakse õliplekiga paberist ekraan mõlemate valgusallikate vahele ja reguleeritakse kaugusi nii, et õliplekk paistaks mõlemalt poolt vaadates ühesugusena.



Joon. 40. Ruhmford'i fotomeeter.

Ruhmford'i varjufotomeetris (joon. 40) reguleeritakse valgusallikate kaugused nii, et mingi pulgakese (sulepea) varjud oleksid valgel ekraanil ühesuguselt näha (missugused kaugused tarvis mõõta?).

Peale nende leidub veel hulk teisi fotomeetreid.

c. Igapäevased vaatlused ja fotomeetrilised mõõtmised näitavad, et meie kunstlikud valgusallikad ühes suunas rohkem valgust kiirgavad kui teises; seetõttu on valguse kogutugevuse määramine keeruline toiming.

Uuemal ajal räägitakse valgustustehnikas valgusvoost, mida mõõdetakse luumenitega, kusjuures 1 luumen (Lm) on valgusvoog (kiirte hulk), mida 1 HK kiirgab ruumnurga ühikule, s. t. horisontaalsuunas 1 m kaugusel asuvale ruutmeetrilisele pinnale (valgustades seda 1 Lx tugevuselt).

Lm-i definitsiooni põhjal on valgustustugevuse ühik 1 Lx niisuguse pinna valgustus, mille puhul valgustatava pinna ühele ruutmeetrile langeb valgusvooühik 1 Lm.

Kujutleme valgusallikat, mille tugevus 1 HK on igas suunas sama ja teda ümbritsevat kerapinda raadiusega 1 m (joon.

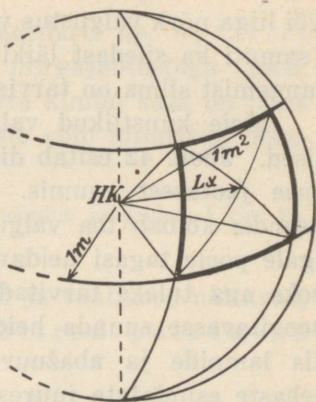
41), siis langeb kerapinna igale m^2 valgusvoog 1 Lm , ja kera kogupinnale $4\pi \text{ Lm}$. Niisiis on igas suunas 1 HK tugevuse allika kogu-valgusvoog $4\pi \text{ Lm}$, 1 HK tugevuse valgusallika kogu valgusvoog on $4\pi I \text{ Lm} \approx 12,6 \cdot I \text{ Lm}$.

Elektrihõõglampidel on märgitud ligikaudsed tugevused mitmet viisi. Mõnikord on tähendatud HK-de arv, mõnikord hõõgniidi kuumendamiseks kuluv vattide (W) arv, mille põhjal võib arvutada lambi tugevust, viimasel ajal aga ka Lm -te arv. On näiteks lambil märgitud $50 \text{ dLm} = 500 \text{ Lm}$, siis on selle valgus-tugevus HK-des $\frac{500}{12,6} \text{ HK} \approx 40 \text{ HK}$.

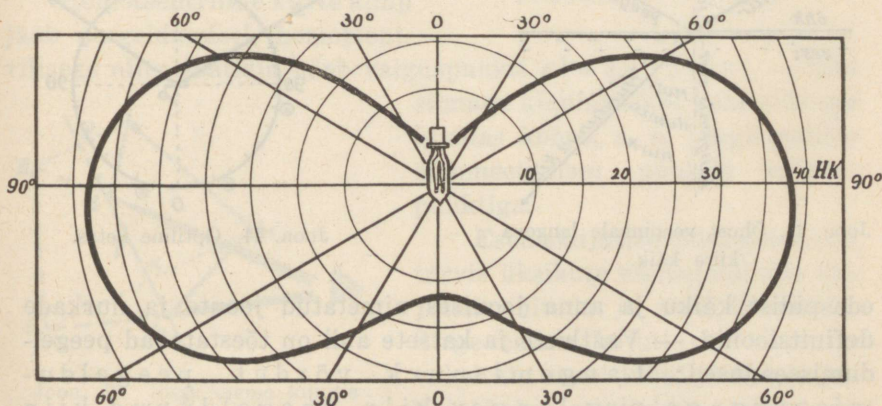
1. Lamp valgustab pinda 150 cm kauguselt niisama tugevalt kui 1 HK 30 cm kauguselt. Leia lambi valgustugevus!

2. Missuguselt kauguselt valgustab 50-HK -line lamp pinda sama tugevusega kui 16-HK -line 30 cm kauguselt?

39. Eluruumide ja töökohtade valgustamine. Valgustus-tugevuse mõõtmiseks eluruumides ja töökohtades tarvitatakse luksmeetreid, milledes osuti kaldumine skaalal otse näitab valgustustugevust Lx -des. Luksmeetris valgustab valgusallikas nn. fotoelektrilist rakukest (raudplaat, kaetud seleeniga ja õhukese läbipaistva platinakihiga), mis on ühendatud väikese gal-



Joon. 41.



Joon. 42. Hõõglambi valgustuse jaotus ruumis.

vanomeetriga. Valgustamisel tekib rakukeses elektrivool, mille tugevus kasvab valgustustugevuse suurenemisega.

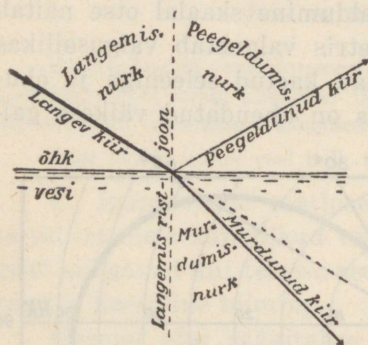
Kirjutuslaua (töökoha) valgustamisel on tähtis valgusallika tugevuse, kauguse ja kiirte kaldenurga õige valik, sest liiga tugev või liiga nõrk valgustus väsitab ja rikub silma. Valgusallika kiirte (samuti ka siledast läikivast paberist peegeldunud kiirte) otset langemist silma on tarvis vältida.

Meie kunstlikud valgusallikad on enamasti pöördkehakujulised. Joon. 42 esitab diagrammi tuntud hõõglambitüübi valgustuse jaotusest ruumis. Joonisest selgub, et see lamp vertikaalasendis kõlbab toa valgustamiseks, kui heledad seinad valgust igale poole tagasi heidavad. Kirjutus- või söögitoa valgustamiseks aga tuleks tarvitada reflektorit või abajuuri, mis valgust soovitasu suunda heidab. Valgustuse sisseseadmisel on tähtis lampide ja abajuuride valik, selleks on valgustustarvete tehaste esindajate juures saadaval graafikud abajuuride valguse jaotuse kohta.

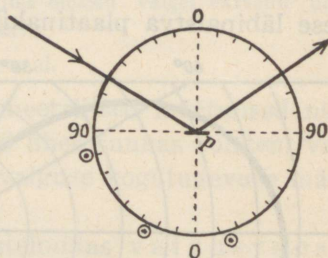
1. Missugune seinatahveli valgustamine on otstarbekohane? Põhjenda oma arvamust joonise abil!

Peegeldumine tasapinnast.

40. Peegeldumisseadused. Looduses kujutab vaikne vee-pind peeglit. Seleta joon. 43 põhjal õhust veepinnale langenud kiire



Joon. 43. Õhust veepinnale langeva kiire käik.



Joon. 44 Optiline ketas.

edaspidist käiku ja anna joonises nimetatud joonte ja nurkade definitsioonid. — Vaatluste ja katsete abil on tõestatavad peegeldumisseadused: Langemisnurk võrdub peegeldumiskurgaga ning langev kiir, peegeldunud kiir ja langemisristjoon asetsevad samas tasapinnas. Seadus on kehtiv ka kõvera peegli kohta, mille pinna väikest osa võib lugeda tasaseks.

Peegeldumine on suuna poolest ümberpööratav nähtus.

Optiliste katsete juures tarvitame sagedasti nn. optilist ketast, alusel pööratavat valget ketast nurgajaotustega (joon. 44). Laternast läbi kitsa pilu tuleva kiirte kimbu käik on näha längu asetatud kettal. Ketta tsentri kohale võib kinnitada peegleid ja teisi optilisi riistu.

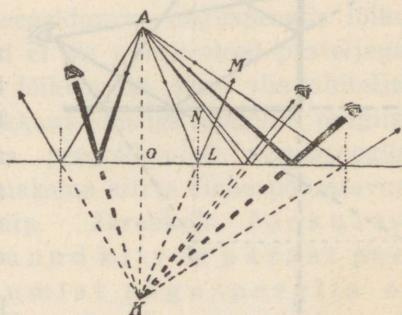
1. Selgita joonise abil, missuguse nurga võrra pöördub peegeldunud kiir, kui peegel pöördub nurga α võrra!

41. Kujutised tasapeeglis. a. Katsed ja vaatlused näitavad, et samast punktist lähtuvad kiired paistavad pärast peegeldumist tasapeeglist tulevat ühest punktist, mis asub peegli taga sümmeetriliselt antud valguspunktiga (joon. 45).

1. Tõesta seda geometriselt (näita, et valguspunktile A sümmeetrilisest punktist K tõmmatud joonlõigu KL pikendus LM on langevale kiirele AL vastav peegeldunud kiir, ja et

$$\widehat{ALN} = \widehat{NLM}.$$

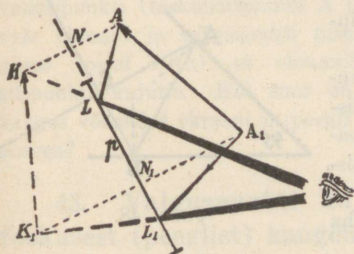
Homotsentriline kiirte kimp jääb peegeldumisel homotsentriliseks ning vaatleja näeb valguspunkti eba kujutist, — ühe



Joon. 45. Homotsentriliste kiirte peegeldumine tasapeeglist.

silmaga kindlas sihis, kahe silmaga kindlas kohas, s. o. peegli suhtes sümmeetrilises punktis valguspunktiga.

Esemekujutise ehitamiseks on tarvis üksikute esemepunktide kujutisi ehitada ja neid ühendada. Sirge eseme kujutis on sirge ja vahel nii, et sel juhul jätkub kujutise kahe otspunkti ehitamisest (joon. 46).



Joon. 46. Sirge eseme kujutis tasapeeglis.

2. Tõesta geometriselt, et paralleelkiired jäävad pärast peegeldumist tasapeeglist paralleelseteks!

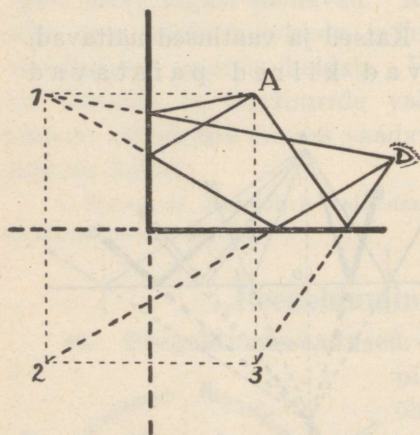
3. Tõesta geomeetriliselt, et peegeldudes meile tuntud seaduse järgi valguskiire tee valguspunktist peegli ja sealt vaatleja silma on kõige lühem!

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

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

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

7. Ehita valguspunkti mõlemad kujutised paksemas amalgaamitud klaaspeeglis ja vaatleja silma peegeldunud kiirte käik, ning tee kindlaks kujutiste vastastikuse kauguse olenevus klaasi paksusest!



Joon. 47. Valguspunkti kujutised nurkpeeglis.

10. Joon. 47 näitab kujutiste ehitust täisnurkse nurkpeegli puhul. Tõesta geomeetriliselt, et peegeldunud kiirte käik on õige (langemisenurgad võrdsed vst. peegeldumisenurkadega).

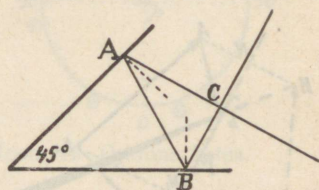
11. Tõesta geomeetriliselt, et joon. 48 kujutatud nurkpeeglis langev kiir moodustab täisnurga kahekordselt peegeldunud kiirega (maamõõtjad tarvitavad niisuguseid nurkpeegleid täisnurkade määramiseks).

12. Kas on võimalik enda profiili näha peeglis?

8. Mispärast tarvitatakse läbipaistmatute piltide projekteerimisel klaaspeegleid, mille esipind on hõbetatud?

9. Kuidas võib ära tunda, kas vette asetatud teivas on vertikaalne?

b. Nurkpeeglite vahele asetatud valguspunktist näeb vaatleja mitmekordse peegeldumise tõttu mitu ebakujutist, mille arv suureneb peeglitevahelise nurga vähenemisel. Katsed ja geomeetriline arutus näitavad, et ebakujutiste arv on $n-1$, kui peeglite vaheline nurk on $\frac{360^\circ}{n}$. Nurkpeeglid leiavad rakendust mõnes optilises riistas (peegelsekstant).



Joon. 48.

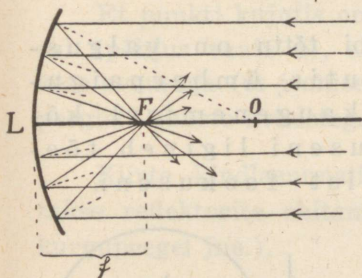
Pegeldumine sfäärilistest peeglitest.

42. Nõguspeegel. Sfääriline nõguspeegel on kera pinna osa, kus peegliks on kera sisepind.

Anna joon. 49 tähendatud nimetuste definitsioonid.

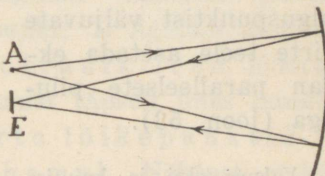
1. Joonesta kolm nõguspeegli läbilõiget, mille raadiused on 2, 3 ja 5 cm ning läbilõigete otspunktide kaugused vst. 1,5, 2,5 ja 3 cm. Võrdle peeglite avausi.

Katsed ja ehitused (joon. 50) näitavad, et peateljega paralleelselt langevad kiired koonduvad pärast peegeldumist nõguspeeglist ühte punkti, nn. fookusesse (tulipunkti) F , mida võib vaadelda kui peateljel lõpmatu kaugel asuva valguspunkti tõelist kujutist. Fookuse kaugus f võrdub poole kõverusraadiusega.



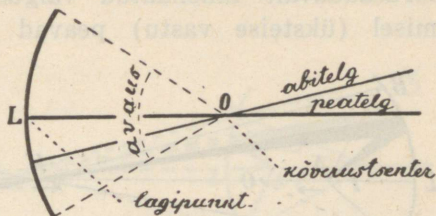
Joon. 50. Nõguspeegli fookus.

Päikesepaiste puudusel määrame nõguspeegli fookuse kauguse järgmiselt: Asetame valguspunkti (taskuhõõglambi A joon. 51) kõrvale ekraani ja nõguspeegli niisugusesse kaugusse (pisut viltu), et ekraanil tekiks valguspunkti kujutis. Kui suur on siis fookuse kaugus võrreldes ekraani ja peegli vahelise kaugusega?



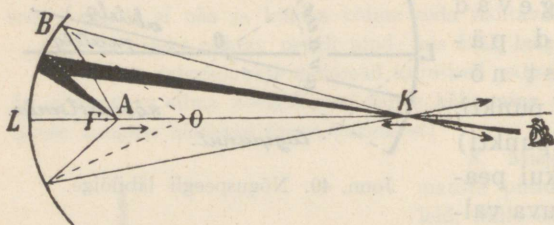
Joon. 51.

43. Valguspunkti kujutis nõguspeeglis. a. Valguspunkti fookusest (peeglist) kaugemale viies kuni tsentrini näeme (suitsu või ekraani abil), et peegeldunud kiired alati koonduvad ja lõikuvad ühes punktis, kus tekib valguspunkti tõeline kujutis. Paneme tähele, et valguspunkti kaugenemisel fookusest ligineb tõeline kujutis peeglile. Seda näitabki ehitus (joon. 52; valguspunkti kaugenemisel vähenevad langemisnurgad, järelkult ka peegeldumisnurgad,



Joon. 49. Nõguspeegli läbilõige.

ning kujutis ligineb). Vaatleja võib näha tõelist kujutist ka ilma ekraanita õhus, kui ta vaatab vastu peegeldunud kiirte suunda. Arusaadavalt tähendatud valguspunkti A ja kujutise K liikumisel (üksteise vastu) peavad mõlemad kord ühte langema.



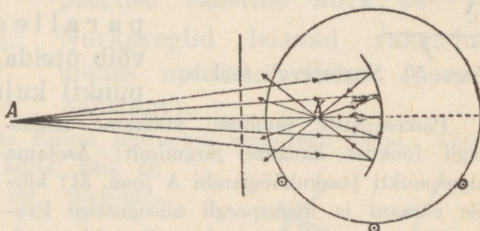
Joon. 52. Valguspunkti tõeline kujutis nõguspeeglis.

See sünnib, kui valguspunkt asub kõverustsentris (risti peeglile langevad kiired peegelduvad vastassuunas tagasi). Niisiis valguspunkti kaugenemisel fookusest kuni kõve-

rustsentrini ligineb tõeline kujutis lõpmatuses kuni kõverustsentrini.

Kiirte ümberpööratavuse printsiibi tõttu on valguspunkt ja tema tõeline kujutis ümberpaigutatavad ning valguspunkti kaugenemisel kõverustsentrist kuni lõpmatuseni ligineb tõeline kujutis kõverustsentrist fookuseni.

Üksikute kiirte käiku võib näha hästi opt. ketta külge kinnitatud nõguspeegli ribaga, kui valguspunkti väljuvate kiirte teele asetada ekraan paralleelsete piludega (joon. 53).



Joon. 53. Homotsentriliste kiirte peegeldumine nõguspeeglist.

Valguspunkti ja kujutise ümberpaigutatavuse demonstreerimiseks on tarvis üks kord valguspunkt (näit. taskuhõõglamp kitsa liistu küljes) peegli ligdale asetada ja kujutis kaugemale asetatud ekraanile projekteerida, — teine kord valguspunkt kaugemale ekraani endisele kohale asetada ja kitsa ekraaniga, mis kiirte langemist peeglile tunduvalt ei takista, näidata, et kujutis valguspunkti endisel asukohal tekib.

b. Kui valguspunkt ligineb fookusest peeglile, siis lähedavad kiired ka pärast peegeldumist laiali, näivad aga väljuvat ühest

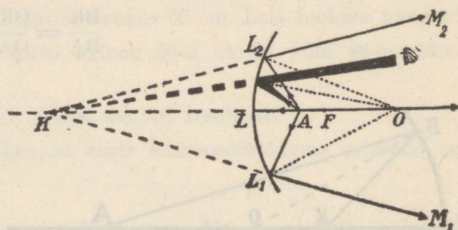
punktist peegli taga. Seda tõestab ehitus (joon. 54) ja katse; vaatleja näeb peegli taga punktis K valguspunkti A ebakujutist.

Üldse jäävad homotsentrilised kiired pärast peegeldumist nõguspeeglist alati homotsentrilisteks.

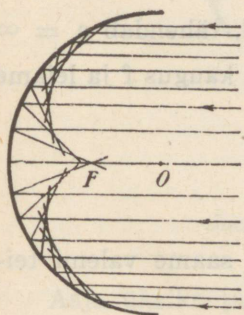
Kõik, mis öeldud peateljel asuva valguspunkti kohta, on kehtiv ka abiteljel asuva valguspunkti kohta, sest abitelg muutub peateljeks, kui kinni katta vastav peegli osa.

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

Kiirte kindlasuunalist peegeldumist nõguspeeglist kasutatakse reflektorite ehitamisel (autolatern, helgiheitja, silma- ja kurgupeegel jne.).



Joon. 54. Valguspunkti ebakujutis nõguspeeglis.



Joon. 55. Sfääriline aberratsioon nõguspeeglis paralleelkiirte puhul.

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

Sfääriline aberratsioon puudub parabolsete peeglite korral.

Harilikult tarvitatakse viimast valemit, sest peeglitel tähendatakse üles nende fookuse kaugus.

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

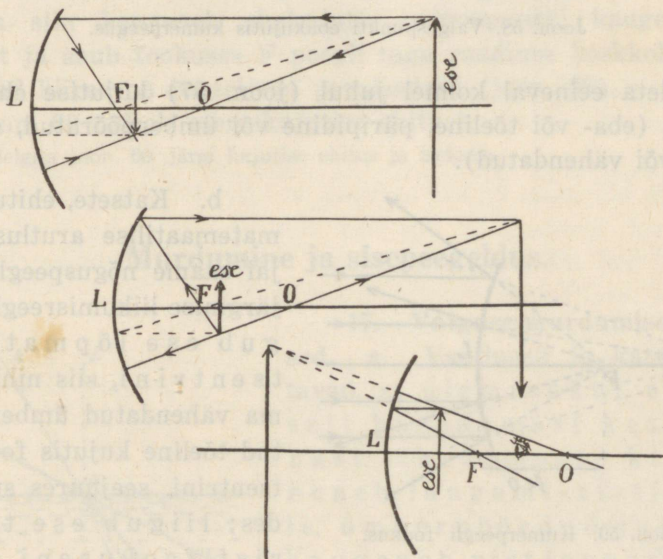
2. Valguspunkti kaugus on 3 m, kujutise kaugus 60 cm. Leia fookuse kaugus!

3. Fookuse kaugus on 60 cm. Kujutis ligineb 50-st cm-ist kuni 40-ni. Misuguse tee kulgeb valguspunkt?

4. Aseta peeglivalemissse $r = \infty$ ja seleta saadud resultaat!

5. Kas nõguspeegli-valemist on näha, et kiirte ümberpööratavuse printsiip on nõguspeegli juures kehtiv?

45. **Esemekujutis nõguspeeglis.** a. Nõguspeeglis tekib esemekujutis, sest eseme iga punkt annab peeglis oma kujutise.

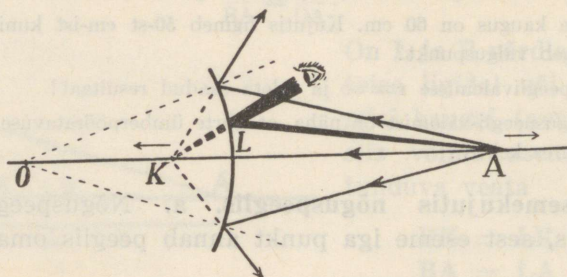


Joon. 57. Esemekujutised nõguspeeglis.

Asja üksiku punkti kujutise ehitamiseks jätkub kahest kiirrest (mispärast mitte rohkem?); valime seks kiired, mille käik on meil teada. Niisugused kiired on: läbi kõverustsentri minev nn. peakiir (pärast peegeldumist tuleb tagasi otse vastupidises suunas); peateljega paralleelne nn. paralleelkiir (läheb pärast peegeldumist läbi fookuse) ja läbi fookuse minev kiir (läheb pärast peegeldumist paral-

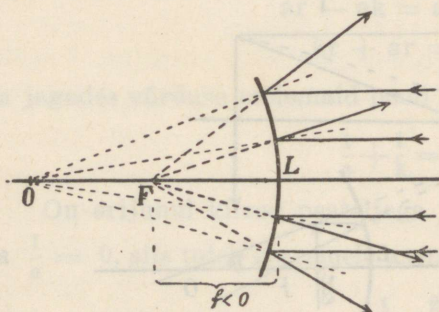
leelselt peateljega). Nimetatud kiirtest kasutame harilikult kaht esimest.

Ehituse lihtsustamise otstarbel vaatleme ainult sirget eset (nool) ja kujutleme, et ta on asetatud sümmeetriliselt peatelje suhtes, et mitte ehitada teise otspunkti kujutist.



Joon. 58. Valguspunkti ebakujutis kumerpeeglis.

Seleta eelneval kolmel juhul (joon. 57) kujutise ehitus ja iseloom (eba- või tõeline, päripidine või ümberpööratud, suurendatud või vähendatud).



Joon. 59. Kumerpeegli fookus.

b. Katsete, ehituste või matemaatilise arutluse põhjal saame nõguspeegli jaoks järgmise liikumisreegli: liigub ese lõpmatuses tsentrini, siis nihkub tema vähendatud ümberpööratud tõeline kujutis fookusest tsentrini, seejuures suurenedes; liigub ese tsentrist fookuseni, siis liigub

tõeline ümberpööratud suurendatud kujutis tsentrist lõpmatuseni, seejuures suurenedes; liigub ese fookusest peegli ni, siis liigub suurendatud päripidine ebakujutis peegli taga lõpmatuses peegli ni, seejuures vähenedes.

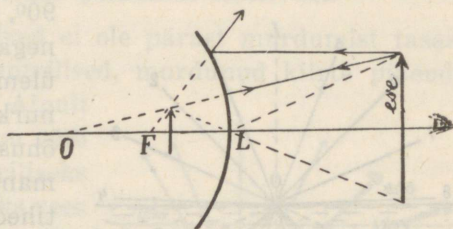
1. Tõesta geomeetriliselt, et eseme ja kujutise joonsuurused on võrdelised nende vastavate kaugustega peeglist!

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

3. Missugusel tingimusel näeb vaatleja nõguspeeglis enda kujutist?

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

46. **Kumerpeegel.** Sfääriline kumerpeegel on kera-pinna osa, kus peegliks on kera välispind. Katsed (opt. ketta külge kinnitatud kumerpeegli-ri-baga) ja ehitised (joon. 58) näitavad, et ka siin homo-tsentrilised kiired jäävad pärast peegeldumist homo-tsentrilisteks, kuid lähevad alati laiali, nii et võivad tekkida ainult ebakujutised peegli taga.



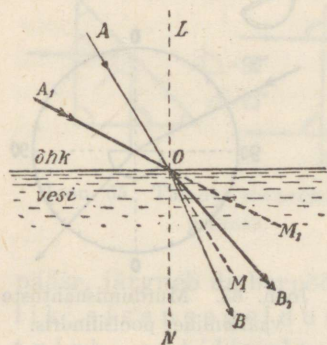
Joon. 60. Esemekujutis kumerpeeglis.

Ka siin kaugeneb ebakujutis valguspunkti kaugenemisel peeglist ja asub fookuses F peegli taga raadiuse keskkohas, kui langevad kiired on peateljega paralleelsed (joon. 59).

Joon. 60 näitab esemekujutise ehitust.

1. Selgita joon. 60 järgi kujutise ehitus ja iseloom.

Murdumine ja sisepeegeldus.

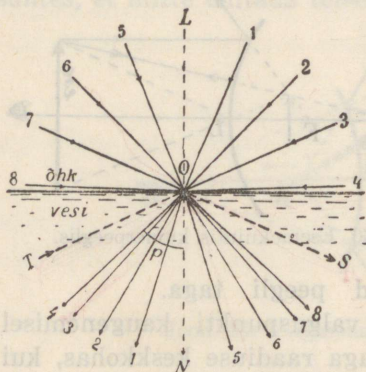


Joon. 61.

47. **Valguse murdumise nähtu-sed.** a. Vaatlused ja katsed näitavad, et üleminekul optili-selt hõredamast keskkon-nast tihedamasse kiir lä-heneb langemisristjoone-le, überpööratud juhul ta kaugeneb ristjoonest (joon. 61). Langev ja murdunud kiir on samas tasapinnas langemisristjoonega. Mur-dumisel on kehtiv kiirte üm-berpööratavuse printsiip.

Keskkondade lahtuspinnale risti langev kiir ei murdu. Lange-misnurga suurenedes suureneb ka murdumisnurk (kuid mitte võrdeliselt) ja ühtlasi suureneb ka lahtuspinnalt samasse kesk-konda tagasipeegeldunud kiirte hulk (sisepeegeldus).

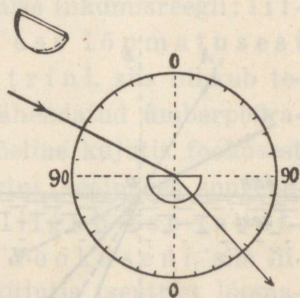
Joon. 62 kujutab läbilõikes õhust vette langevate kiirte murdumist (veepind olgu musta paberiga kaetud, milles O kohal väike avaus). Kõik läbi O langevad kiired valgustavad vees koonuseaolist ruumi. Koonuse piirkiir (8, 4), mille langemisnurk õhus on 90° , moodustab langemisristjonega nn. piirnurga (p). Kiire üleminekul õhust vette on piirnurk ümmarguselt 48° , üleminekul õhust klaasi 40° — 42° , õhust teemanti 23° ; teemant on optiliselt tihedam kui klaas, klaas tihedam kui vesi.



Joon. 62. Murdumisnähtused vee ja õhu lahutuspinnal.

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

Kui puudub kerge latern, mida võib hõlpsasti ümber asetada, et kiiri juhtida kaldu lahutuspinnaile vst. joonisele 62, siis võib nähtust jälgida ka kindla kiirte kimbuga, kui lahutuspinna pöörata vastu kiirte kimpu; on arusaadav, et siis vedela lahutuspinna asemel tuleb võtta tahke. Näiteks kinnitame klaaspoolsilindri opt. ketta külge ja asetame ta kitsa kiirte kimbu teele (joon. 63) nii, et kiired langeksid tsentri suunas. Siis võib murdumine või peegeldumine sündida ainult poolsilindri tasapinnal, mitte aga tema kumeral pinnal, sest kiired on kumera pinnaga alati risti. Kiirte käik ei olene poolsilindri suurusest. Ketta pööramisel võime skaala järgi määrata vst. langemis- ja murdumisnurgad kiirte üleminekul õhust klaasi ning võime ka mõõta piirnurga. — Kirjeldatud katset võib teha ka vedelikuga, kui seda valada klaasist õõnes-poolsilindrisse.



Joon. 63. Murdumisnähtuste vaatlemine poolsilindris.

Juhime kiired veest õhku (vette asetatud elektrihõõglambi abil, joon. 62) või klaasist õhku (pöörame optilise ketta

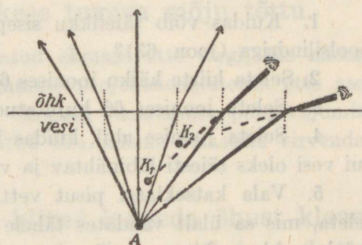
joon. 63 nii, et kiired langevad poolsilindri kumerale pinnale tsentri suunas), siis näeme murdunud kiirte kaugenemist ristjoonest, näeme ka osalist sisepeegeldust ja võime nurkade mõõtmise abil tõestada kiirte ümberpööratavuse printsiibi kehtivust.

b. Homotsentrilised kiired ei ole pärast murdumist tasasel lahutuspinnaal enam homotsentrilised, murdunud kiirte pikendused ei lõiku ühes punktis. Ainult kitsast murdunud kiirte kimpu võib lugeda ligikaudu homotsentriliseks ja sellepärast ka näeme näiteks vees olevat valguspunkti, kuid mitte õigel kohal (joon. 64).

1. Kuidas tuleb sihtida püssiga, et lasta veepinna ligidal nähtava kala pihta?

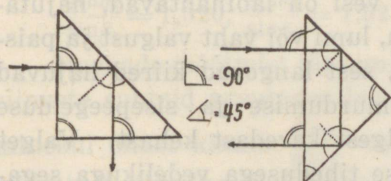
2. Seleta joonise abil, mispärast kaldalt vaadates järve põhi paistab (iseäranis lapsele) tõstetuna ja seetõttu vesi madalam kui tõeliselt.

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



Joon. 64. Kuidas vaatleja näeb valguspunkti vees.

48. Täielik sisepeegeldus. a. Oleme tähele pannud, et valgus, langedes kahe keskkonna lahutuspinnaale, osalt peegeldub ja osalt murdub. Laseme aga vst. joonisele 62 kiire langeda veest lahutuspinnaale punkti O punktist T väljaspool koonust, siis ta peegeldub täielikult vette tagasi suunas OS ning murdumist üldse ei sünni (et kiir antud juhul keskkonnast välja ei pääse, järgneb ümberpööratavuse printsiibist). Järeldame: täielik sisepeegeldus sünnib alati siis, kui kiir tuleb optiliselt tihedamast keskkonnast ja kiire langemisnurk on suurem nn. täieliku sisepeegelduse piirnurgast.



Joon. 65. Täielik sisepeegeldumine prisma.

Täielikku sisepeegeldust klaasi ja õhu lahutuspinnaal võib näidata täisnurkse võrdhaarse klaasprismaga (joon. 65, kas suitsu või opt. ketta abil), kui teda asetada kitsa kiirte kimpu tee. Niisuguseid prismsid tarvitatakse mitme-

suguste opt. riistade ehitamisel (prisma-binokkel, periskoop) peegli asemel. Harilikud peeglid peegeldavad ainult osa langevast valgusest, teine osa valgusekiirtest läheb aga peegli keskkonda üle (kõige vähem neelab siledakspoleeritud hõbedane pind), see-eest täieliku sisepeegelduse korral valgus teise keskkonda üldse ei pääse ja kiirtest läheb kaotsi vaid niipalju, kuipalju lähtekeskkond ise neelab.

1. Kuidas võib täielikku sisepeegeldust näidata optilise kettaga ja klaasist poolsilindriga (joon. 63)?

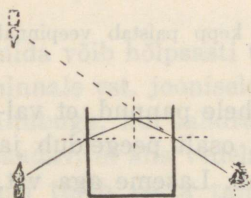
2. Seleta kiirte käiku joonises 65!

3. Seleta joonises 66 kujutatud katses klaasi, vee ja küünlaga kiirte käiku!

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

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

6. Sule ümberpööratud klaasleetri ots sõrmega, aseta lehter vette ja seleta, mis sa ülalt vaadates tähele paned, kui sõrme lahti lased.



Joon. 66. Sisepeegeldus vee ja õhu lahutuspinnaal.

b. Mõne veeputuka läikimine vees on seletatav täieliku sisepeegeldusega putuka küljes oleva õhukihi pinnal; ka kalliskivide helkimine on seletatav tugeva sisepeegeldusega väikese piirnurga tõttu. — Kuna terve klaas, jää või vesi on läbinähtavad, hajutavad klaasipuru, lumi või vaht valgust ja pais-tavad valgena, sest langevad kiired hajuvad mitmekordse murdumise ja sisepeegelduse tõttu nagu valgest karedast kehast. Valget

klaasipulbrit ligikaudu sama optilise tihedusega vedelikuga segades saame läbipaistva segu.



Joon. 67. Kiire käik mitteühtlases soolalahuses.



Joon. 68. Astronoomiline refraktsioon.

49. Murdumine ja sisepeegeldus mitteühtlases keskkonnas.

Valmistame piklikus anum as keedusoola-lahuse vees, mille alumised kihid on rohkem kontsentreeritud (tihedamad), ja

juhime lahusesse kitsa paralleelkiirte kimbu (joon. 67). Kiired lähevad läbi lahuse kõverjooneliselt (mispärast?).

Horisondi ligidal olevad tähed paistavad $\sim 0,5^{\circ}$ võrra kõrgemal oma tõelisest asukohast. Seleta seda astronoomiliseks refraktsiooniks nimetatud nähtust joonise 68 põhjal.

Nn. fata morgana-nähtused kõrves tekivad murdumise ja sisepeegelduse tõttu õhus, mille üksikute kihtide temperatuurid ja tihedused tunduvalt erinevad päikese tugeva mõju tõttu.

1. Asetame projektsioonlaternaga valgustatud ekraani ette leegi, siis näeme ekraanil soojendatud õhu ülestõusmist, — tilgutame projektsioonlaterna ette asetatud anumasse veega soolalahust, siis näeme ekraanil soolalahuse põhjavajumist puhtas vees, — vaadates üle tule läbi soojendatud õhu, näeme maastiku virvendamist, — millega neid nähtusi seletada?

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

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

Sellest tabelist võib järeldada, et murdumisnurk ei kasva võrdeliselt langemisnurgaga. Arvutame aga nurkade siinuste suhted, siis näeme, et nad on ligikaudu võrdsed:

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

Nurkade mõõtmist täpsemalt toimetades ja vastavate nurkade siinuste suhteid arvutades leiame, et nad on võrdsed. Kiirte üleminekul õhust klaasi $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ on alati ümmarguselt $\frac{3}{2}$ ja ümberpööratult üleminekul klaasist õhku $\frac{2}{3}$. — Murdumist jälgides teiste keskkondade lahutuspinnaal saame sama resultaadi, ainult selle vahega, et siinuste suhte arvuline suurus on teine. Sellest järeldame järgmise murdumisseaduse: langemis- (α) ja murdumisnurga (β) siinuste suhe on kaheantud keskkonna kohta jääv ($\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \text{konst.}$)

See on Snellius'e seadus (a. 1618).

Langeb kiir keskkonda õhust, siis nimetame langemis- ja murdumisnurkade siinuste suhet keskkonna murdumisnäitajaks õhu suhtes ja tähistame seda n-ga

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

Ainete murdumisnäitajad õhu suhtes on kindlaks tehtud ja märgitud sellekohastes tabelites. Näiteks on klaasi murdumisnäitaja õhu suhtes ümmarguselt $\frac{3}{2}$, teemandil on see $\frac{5}{3}$, veel $\frac{4}{3}$.

On leitud, et murdumisnäitaja võrdub valguse kiiruste suhtega mõlemas keskkonnas (§ 97).

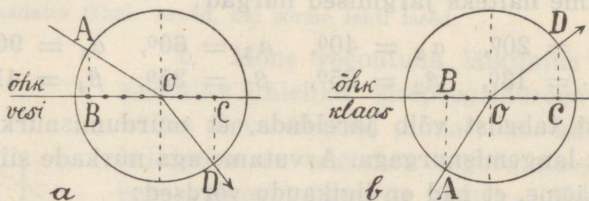
Kui edaspidi räägime aine murdumisnäitajast, siis on alati mõeldud aine murdumisnäitajat õhu suhtes. Absoluutne murdumisnäitaja, s. o. aine murdumisnäitaja tühja ruumi suhtes, erineb sellest nii vähe, et me tegelikult vahet ei tee.

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

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

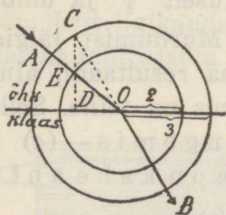
51. Murdunud kiire ehitamine. Täieliku sisepeegelduse piirnurga arvutamine. a. Murdunud kiirt võib ehitada, kui on antud langemisnurk ja aine murdumisnäitaja:

Langegu kiir paberi pinnas õhust vette (joon. 69, a). Tõm-



Joon. 69. Murdunud kiire ehitamine.

bame ümber langemispunkti O ringi ($r = 1$), lõikepunktist A ristjoone AB, jagame joonlõigu OB neljaks võrdseks osaks, mõõdame $OC = \frac{3}{4} OB$, ehitame ristjoone CD, siis OD kujutab murdunud kiirt.



Joon. 70. Murdunud kiire ehitamine.

1. Tõesta, et kiire AOD kohta (joon. 69, a) on murdumise tingimused täidetud!

2. Seleta, mis kujutab joonis 69 b ja kuidas on joonis ehitatud!

3. Võta kiir, mis klaasist tulles langeb hästi längu õhu lahutuspinnale, ja katsu ehitada murdunud kiirt!

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

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

6. Selgita joon. 70 põhjal murdunud kiire ehitus!

b. Keskkonna täieliku sisepeegelduse piirnurka α_p võib arvutada, kui on teada murdumisnäitaja:

Et täieliku sisepeegelduse piirnurgale α kui langemisnurgale tihedamas keskkonnas vastab õhus murdumisnurk $\beta = 90^\circ$, siis

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

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

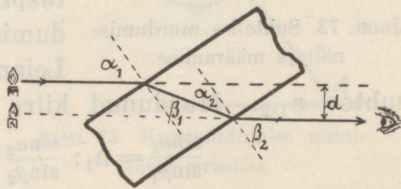
7. Leia täieliku sisepeegelduse piirnurk

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

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

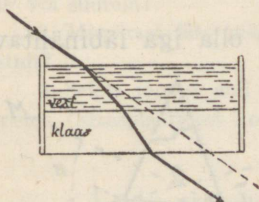
Murdumine tasapinnalistes kehades.

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



Joon. 71. Kiire käik läbi tasaparalleelse plaadi.

Ehitus joon. 71 näitab, et läbi tasaparalleelsete pindadega keha minnes kiir ei muuda oma suunda, kuid nihkub kõrvale, seda rohkem, mida paksem on keha ja mida rohkem kaldu langeb kiir. Seda tõestavad ka vaatlused. Katseliselt võime kiirte kõrvalenihet tasaparalleelses plaadis nähtavaks teha pimedas toas suitsu või optilise ketta külge kinnitatud plaadi abil.



Joon. 72. Kiire murdumine tasaparalleelsetes plaatides.

Ka võib näidata, et kiir, minnes läbi mitme üksteise ligi asetatud tasaparalleelse keskkonna, pärast mitmekordset murdumist lõpuks edasi läheb langeva kiire suunas (joon. 72).

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

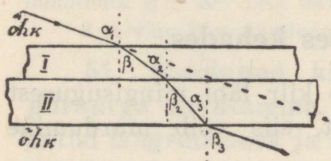
sirgjoone osa, siis paistab see osa teise osaga võrreldes kõrvale nihutatuna; pöörame plaadi rohkem kaldu vaatamissihile, siis kõrvalenihe suureneb. Paksemas plaadis on kõrvalenihe suurem.

1. Tõesta geomeetriliselt, et murdunud kiirel joonises 72 on sama suund kui langeval kiirel!

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

3. Leia nihke suurus, kui on antud plaadi paksus, kiire langemisnurk ja plaadi aine murdumisnäitaja!

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



Joon. 73. Suhtelise murdumisnäitaja määramine.

Olgu joon. 73 ainete I ja II lahutuspinnad paralleelsed ja vastavad murdumisnäitajad õhu suhtes n_1 ja n_2 . Leiame aine II murdumisnäitaja aine I suhtes $n_{1,2}$. Murdunud kiire ehituse põhjal on

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

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

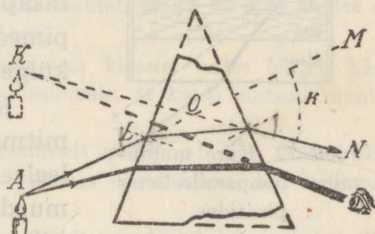
$$n_{1,2} = \frac{\sin \alpha_2}{\sin \beta_2} = \frac{\sin \beta_1}{\sin \alpha_3} = \frac{\sin \alpha_1}{n_1} \cdot \frac{\sin \beta_3}{n_2}$$

$$n_{1,2} = \frac{n_2}{n_1}.$$

1. Leia klaasi murdumisnäitaja vee suhtes!

54. Prisma. Optiliseks prismaks võib olla iga läbinähtav keha kahe mitteparalleelse tasapinnaga. Harilikult on prisma kii-lusarnane. Murdjad tasapinnad lõikuvad nn. murdjaservas ja moodustavad nn. murdja-nurga, mille vastastahku kutsutakse prisma aluseks.

Katsed (näit. opt. ketta külge kinnitatud klaasist prismaga) ja ehitused (joon. 74 kujutab läbi-lõiget risti murdjaservaga) näitavad, et kiired pärast mur-dumist prismas kalduvad prisma aluse poole, ja



Joon. 74. Murdumine prismas.

et läbi prisma vaadates esemed paistavad nihutatuna murdjaserva poole.

Vedelikuprismas võime jälgida murdumisnähtusi, kui valame vedelikku õhukestest klaasplaatidest kokkukleebitud õõnesprismasse.

Kogu-kaldumisnurk (k) suureneb prisma aine murdumisnäitaja suurenemisega ja murdjanurga suurenemisega. Kogukaldumise suurus oleneb ka kiire langemisnurgast ja on kõige väiksem siis, kui kiir läheb läbi prisma sümmeetriliselt, s. o. kui ta löikab prisma läbilõikest võrdhaarse kolmnurga.

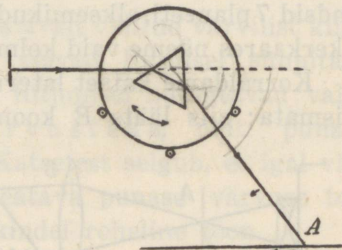
Kogukaldumise miinimumi näitame järgmiselt: kinnitame klaasprisma opt. ketta külge (joon. 75) ja asetame ta kitsa paralleelkiirte kimbu teele. Katselauale asetatud valgel paberil saame heleda laigu. Pöörame ketta nii, et kiired langeksid prisma esipinnale võimalikult kaldu, siis asub laik ketta aluse ligikal, tähendab, kogukaldumine on võrdlemisi suur. Pöörame ketast sellest seisust alates nii, et kiirte langemisnurk väheneks, siis nihkub

laik kaugemale, tähendab, kogukaldumine väheneb; kuid ketast samas sihis edasi pöörates näeme, et laik hakkab ketta alusele liginema, tähendab kogukaldumine jälle suureneb. Järelikult on teatavas kindlas seisus kogukaldumine kõige väiksem, suureneb aga, kui prismat pöörata ühele või teisele poole. Seda seisu ligemalt tähele pannes leiame, et kiir sedapuhku läheb läbi prisma sümmeetriliselt.

1. Selgita joomise abil, kas läheb kiir läbi klaasprisma, mille murdjanurk on 90° või suurem!

2. Mispärast läbi mõne aknaruudu vaadates näeme asjade kujutisi moonutatult?

3. Seleta joonise abil kiire käiku läbi vette asetatud ja õhuga täidetud õõnesprisma (klaasplaatidest kokku kleebitud)!



Joon. 75. Kogukaldumise miinimum prisma.

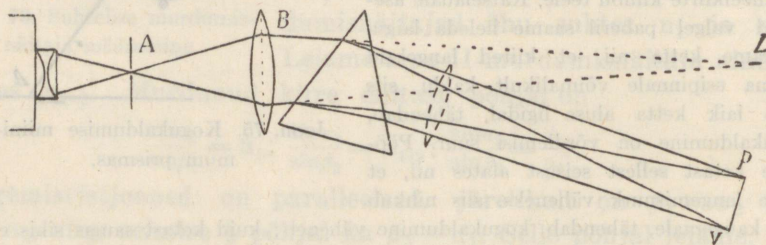
Valguse lahutamine ja liitmine.

55. Valguse lahutamine (dispersioon); spekter. Katsed värviliste kiirtega näitavad, et üksikud värvilised kiired ei murdu ühevõrra üleminekul ühest keskkonnast teise; sellest järeldame, et ainetel on erilised murdumisnäitajad isesuguste värviliste kiirte korral. Näiteks violetsete kiirte puhul murdumisnäitaja on suurem kui punaste kiirte

puhul. Sellega seletub ka valge kiire lahutamine spektriks, millise katse esimesena korraldas Newton a. 1666, jaotades ühtlasi spektri meelevaldselt 7 põhivärvuseks: punane, oranž, kollane, roheline, helesinine, tumesinine, violetne (v. spektrite tabel). Spektri-nähtusest järeldame, et valge valgus ei ole mitte liht-, vaid liitvalgus.

Vaadeldes spektrit näeme temas vaid viit silmapaistvamat värvust, nagu ka Newton oma katsete alguses neid eritles: punane, kollane, roheline, sinine ja violetne. Jaotus: punane—oranž, helesinine—tumesinine on tingitud ebausust arvu 7 suhtes (astroloogid tundsid 7 planeeti, alkeemikud 7 põhimetalli, muusikud 7 põhitooni). Vikerkaares näeme vaid kolme värvust: punane, roheline, violetne.

Korraldame katset laternakiirtega joon. 76 järgi esialgu ilma prismata; siis lääts B koondab tugevasti valgustatud pilust A



Joon. 76. Spektri tekitamine projektsioonlaternakiirtega.

väljuvad kiired ekraanil L kohal, kus tekib pilu valge kujutis. Asetame pilu ette värvilise klaasi, mis laseb läbi ainult teatud värvusest kiired ja neelab teised, siis tekib ekraanil hoolimata kiirte värvusest samal kohal värviline kujutis. Asetame aga läätse taha värviliste kiirte teele prisma, siis saame punaste kiirte puhul pilu punase kujutise p kohal, violetsete kiirte puhul pilu violetse kujutise v kohal ja teiste värviliste kiirte puhul pilu värvilised kujutised p ja v vahel. — Tarvitades katses valget valgust, saame p ja v vahel värvilise riba, spektri. Iga valges valguses peituv värviline kiir annab pilu kujutise eri kohal ja need pilu värvilised kujutised kokku sünnitavadki spektri.

Kui spektrikiirte kimbust eraldada ainult üht värvust kiired (näit. piluga varustatud läbipaistmatu ekraani abil) ja nende kiirte teele asetada teine prisma, siis kiired kalduvad teises prisma küll kõrvale, kuid ei muuda oma värvust. Järelikult on üksikud spektrikiired monokromaatilised (ühevärvilised).

Ühes valge valguse murdumisega sünnib alati ka valguse värvusteks hajumine. Seda võisime näha juba katses poolsilindriga (§ 47).

Ka vikerkaare tekkimine on seotud päikesekiirte murdumisega ja sisepeegeldusega vihmaticades.

Ka
56. Värvuste liitmine. Täiendvärvused. a. Tekitame spektri joon. 76 järgi ja asetame prisma taha värviliste kiirte teele läätse (joonises punkteeritud), mis koondab värvilised kiired. Ekraanil ilmub valge laik. Sellest näeme, et valge valgus on kõigi spektrikiirte liitvalgus.

Võime aga näidata, et ka kaks vastavalt valitud värvilist kiirt, segavärvilist või monokromaatilist, võivad liitmisel sünnitada valge valguse. Kahte värvust, mis liitumisel sünnitavad valge värvuse, nimetatakse täiendvärvusteks, näit. punane ja roheline, kollane ja tumesinine. Katsetest selgub, et igal värvusel on oma täiendvärvus; näit. teatava punase värvuse toonile on täiendvärvuseks ainult üks kindel roheline toon.

b. Katseliselt näitame spektri värvuste liitmist ja täiendvärvusi järgmiselt: Asetame pilu asemele (joon. 76) diafragma väikese ümmarguse avausega (iirisdiafragma), siis saame spektri ringikujuliste otsadega. Koondame aga värvilisi kiiri prisma taha asetatud läätse abil (joonises punkteeritud), siis saame spektri asemel avause valge kujutise. — Asetame teise (punkteeritud) läätse taha veel väikese murdjanurgaga prisma nii, et ainult osa värvilistest kiirtest langeb prismale ja kaldub läbi minnes pisut kõrvale, teine osa aga läheb endises suunas edasi, siis ilmuvad ekraanil üksteise kõrval kaks värvilist laikku. On prisma murdjanurk küllalt väike ($\sim 40^\circ$), siis langevad mõlemad värvilised laigud osalt ühte ja ühine osa on valge. Õhukest prismat ümber asetades muudame mõlemate laikude värviliste kiirte koosseisu, sellega ühtlasi muutuvad ka üksikute laikude värvused, kuid ühine osa jääb alati valgeks.

Monokromaatiliste kiirte segavärvuse saame, kui tekitame prisma lähedal lühikese spektri, asetame spektri kohale läbipaistmatu ekraani kahe või mitme piluga ja koondame läbiläinud monokromaatilised kiired läätse abil.

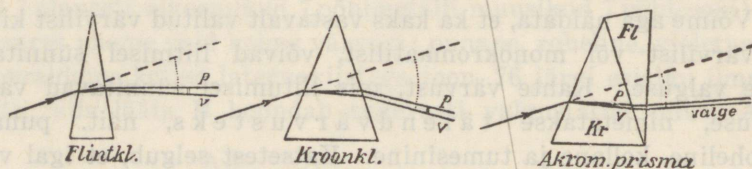
Eespool rääkisime ainult värvilistest kiirtest, mitte värvaineist. Kas kollase ja sinise värvaine segu värvus on ka valge? Kas on üldse mõnede värvainete segu valge?

*57. Akromaatileine ja otsevaateprisma. a. Kroonklaasi ja flintklaasi murdumisnäitajad punaste ja violetsete kiirte puhul on järgmised:

kroonklaas: $n_p = 1,526$, $n_v = 1,547$; $n_v - n_p = 0,021$

flintklaas: $n_p = 1,628$, $n_v = 1,671$; $n_v - n_p = 0,043$.

Sellest näeme, et ainete murdumisvõime ja värvusteks lahutamise võime ei ole võrdelised; flintklaasil on vähe suurema keskmise murdumisvõime juures ~ kaks korda suurem lahutamisevõime. Võtame ühe prisma flintklaasist ja teise kroonklaasist kaks korda suurema murdjanurgaga, siis annavad mõlemad ekraanil samal



Joon. 77. Akromaatileine prisma.

kaugusel ühepikkused spektrid. Kroonklaasist prismaga saadud spekter on aga langevate valgete kiirte suunaga võrreldes ligi kaks korda rohkem kõrvale kallutatud kui flintklaasist prismaga saadud spekter, tähendab, kroonklaasist prisma juures on kiirte kogukaldumine ~ 2 korda suurem.

Kui kaks niisugust prisma vastupidi kokku panna, siis moodustavad nad nn. akromaatilise prisma. Niisugust prisma läbistades muudab valge kiirte kimp küll oma suunda, kuid värvusteks näiliselt ei lagune (murdunud kimbus liituvad värvilised kiired uuesti valgeks valguseks).

b. Kui liitprismas valida flintklaasist prisma suurema murdjanurgaga nii, et murdunud kiirte kimbul oleks sama suund kui langeval, siis ka murdunud kiirte kimp on värviline. Niisugust prisma nimetatakse otsevaateprismaks; ta lahutab kiiri värvilisteks ilma keskmist suunda muutmata. Harilikult valmistatakse otsevaateprisma kiirte paremaks lahutamiseks mitmest prismast.

Kehade värvus.

58. Keha värvus läbiläinud valguses. Iga läbipaistev keha laseb ainult osa langevast valgusest läbi, osa ta neelab; näiteks

heidab ka läbinähtav värvitu klaas päikesekiirtes varju. Asetades sama klaasi spektrikiirte teele, spekter nõrgeneb, kuid kõik värvused nõrgenevad ühtlaselt. Järelikult värvitu läbipaistev keha neelab ja laseb läbi kõiki värvilisi kiiri ühtlaselt.

Asetame aga spektrikiirte teele värvitu keha asemel värvilise, näit. punase klaasi, siis kaovad spektris kõik värvused peale punase (võib-olla ka oranži ja osalt kollase). Rohelise klaasi asetamisel kaovad suuremad osad spektri otsadest, kollane ning helesinine nõrgenevad märksa, ainult roheline värvus jääb peaaegu muutmatuks. Katsed näitavad, et värviline läbipaistev keha neelab sissetunginud värvilistest kiirtest ühti rohkem kui teisi (valiv neeldumisvõime); vastu valgust vaadates paistab keha teda läbistanud värviliste kiirte sega värvuses.

1. Kuidas paistavad värvitud ja värvilised läbipaistvad kehad, kui neid hoida vastu värvilist valgusallikat? Too näiteid selle kohta!

2. Missugune valgustus valitseb öhtul värvilise või värvitu aknaga toas, kui teda valgustada väljastpoolt värvilise bengaalvalgusega? Too näiteid selle kohta!

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

Kaari

59. Keha värvus tagasiheidetud valguses. Kehade värvimisest õlivärviga või värvilise lakiga võime järeldada, et kehalt hajutatud kiirte värvus ei olene välispinnast, vaid pindkihist, mis alles teatava paksuse juures tunduvat mõju avaldab. Välispinnast tagasiheidetud valgusest keha värvus tunduval määral ei olene.

Seda näitavad järgmised katsed: Asetame valge paralleelkiirte kimbu teele peegeldava värvitu, värvilise või musta keha (klaasplaadi) ja juhime keha välispinnast peegeldunud kiired lakke. Me näeme lael valget laiku, peegeldava keha värvusest hoolimata. — Muudame langeva valguse värviliseks (vaheleasetatud värvilise klaasiga), siis muutub vastavalt ka laigu värvus lael ja on alati samavärviline kehale langeva valgusega.

Katsetest selgub, et ei ole sidet keha värvuse ja keha välispinnast peegeldunud valguse värvuse vahel, millest järgneb, et keha värvus võib oleneda ainult sissetunginud ja hajunud valgusest. Keha värvuse tekkimist tagasiheidetud valguses seletame sellega, et valgus teatava sügavuseni väliskihti sisse tungib, kus ta osalt neeldub, osalt aga igas sihis tagasi heitub, hajub. Valge väliskiht neelab kõiki värvusi ühtlaselt nii, et hajutatud valgusel on

sama koosseis, mis langeval valgusel; seetõttu on ta valges valguses valge, punases punane jne. (valgel ekraanil näeme kõiki spektri värvusi). Näiteks punane väliskiht neelab kõiki kiiri peale punaste (osalt ka oranžide ja kollaste) ja hajutab ainult punaseid (ka oranže ja kollaseid); ta paistab seetõttu valges valguses punasena (vaata spektrit punasel ja teisevärvilisel paberil). Niisiis oleneb kehalt hajutatud valguse värvus väliskihi neeldumisvõimest ja valgusallika poolt vaadates paistab keha hajutatud värviliste kiirte segavärvuses.

1. Kuidas paistavad valged ja värvilised kehad mõnes värvilises valguses valgusallika poolt vaadates? Too näiteid!

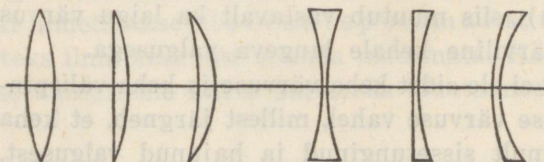
60. **Värvainete segu värvus.** Kollase värvaine neeldumisvõimet uurides leiame, et ta neelab kõik värvused peale kollase, oranži ja roheline; samuti leiame, et sinine värvaine neelab kõik värvused peale roheline, sinise ja violetse. Sellepärast neelab kollase ja sinise värvaine segu kõik värvused peale roheline, mida üksikult kumbki ei neela, ja paistab seetõttu rohelisena.

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

Värvainete segamisel saame ka niisuguseid värvusi, milliseid spektris ei leidu, näit. pruun, purpur, roosa.

Murdumine sfäärilistes läätsedes.

61. **Läätsede liigitamine.** Sfäärilised läätsed on kahe



kaksik-
kumerlääts.

tasa-
nõgus-
kumerlääts.

Joon. 78. Läätsede liigid.

kaksik-
nõguslääts.

tasa-
nõguslääts.

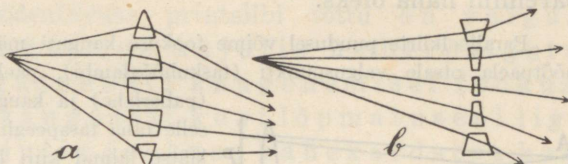
kerapinnaga piiratud läbinähtavad kehad (harilikult klaasist).

1. Seleta joon. 78 põhjal, missugused on läätsede liikide välised tunnemärgid!

2. Seleta joon. 79 põhjal, mispärast kumerlääts koondab ja nõguslääts hajutab kiiri!

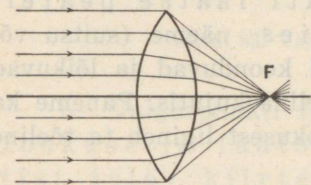
62. **Kumerlääts.** Vaatleme esialgu sümmeetrilist kumerlääts ja tema kohta kehtivaid kiirte murdumise reegleid; need reeglid on üldiselt kehtivad ka kumerlääts teiste liikide korral.

Kerapindade kõverusentreid ühendavat sirget nimetatakse lääts peateljeks; tasapinda, mis jaotab sümmeetrilist lääts kaheks ühtuvaks segmendiks, nimetatakse lääts sümmeetriapinnaks, tema lõikepunkti peateljega — lääts keskpunktiks, ja sirget, mis läbib keskpunkti — abiteljeks.



Joon. 79. Lääts kui prismade kogu.

Katsetest päikesekiirtega järeltame: paralleelselt peateljega langevad kiired pärast murdumist kumerläätses lõikuvad fookuses (tulipunktis F , joon. 80). Kiirte ümberpööratavuse printsiibi kehtivuse põhjal on fookusest väljunud kiired pärast murdumist kumerläätses peateljega paralleelsed. Läätsel on kaks fookust, mõlemal pool lääts samal kaugusel.



Joon. 80. Kumerlääts fookus.

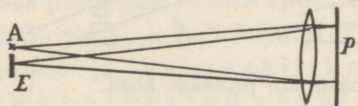
Fookuse kaugus (f) — fookuse F kaugus sümmeetriapinnast — on mitte ainult lääts kujust (kumerusest), vaid ka aine (murdumisnäitajast); seetõttu ei ole fookuse kaugus otseses matemaatilises seoses kõverusraadiusega, nagu sfääriliste peeglite juures. Harilikult klaasist sümmeetrilise kumerlääts fookuse kaugus võrdub ligikaudu tema kõverusraadiusega.

Fookust võime vaadelda kui lõpmatu kaugel peateljel asetseva valguspunkti tõelist kujutist, kuna fookuses asetseva valguspunkti kujutis on lõpmatu kaugel.

Lääts päikesekiirtes pöörates näeme, et paralleelsed kiired pärast murdumist lõikuvad ühes punktis ka siis, kui nad ei ole paralleelsed peateljega; lõikepunkt asub siis abiteljel läätsesest ligikaudu fookuse kaugusel.

Raamatu joonistes on läätsed liiga paksudena joonestatud ja nende fookuste kaugused liiga väikestena kujutatud, et kiirte käik paremini näha oleks.

Paralleelkiirte puudusel võime fookuse kaugust määrata järgmiselt: asetame mõõtpaela otsale valguspunkti (taskuhõõglambi), paela kõrvale valge ekraani (paberlehe) ja kaugemale paelale lääts ning selle taha tasapeegli pisut viltu nii, et ta läbi läätseläinud kiiri ligikaudu vastassuunas tagasi heidab. Ekraani edasi-tagasi nihutades näeme teatavas kohas valguspunkti teravat kujutist. Asetame nüüd ekraani valguspunkti kõrvale (joon. 81) ja nihutame lääts ühes peegliga niisugusesse kaugusse, et kujutis

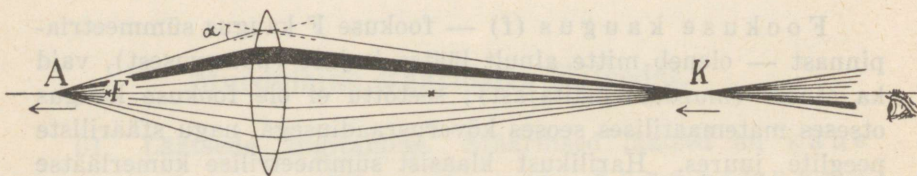


Joon. 81.

ekraanil valguspunkti kõrval terav oleks, siis võrdub valguspunkti ja läätseläinud kiirte vaheline kaugus fookuse kaugusega.

63. Homotsentriliste kiirte murdumine kumerläätses. Valguspunkti kujutis. a. Valguspunkti läätseläinud kiirte peateljel fookusest kaugemale viies näeme (suutsu või ekraani abil), et murdunud kiired alati koonduvad ja lõikuvad ühes punktis, kus tekib valguspunkti tõeline kujutis. Paneme ka tähele, et valguspunkti kaugenemisel fookusest ligineb ta tõeline kujutis.

Seda tõestab ka geomeetriline arutlus: Valguspunkti A (joon. 82) kaugenemisel vähenevad kiirte langemisnurgad (α); seetõttu vähenevad ka murdumisnurgad. Kui nüüd kiired koonduvad tugevamini juba läätseläinud kiirte sees, siis nihkub lõikepunkt K läätseläinud kiirte suunas.

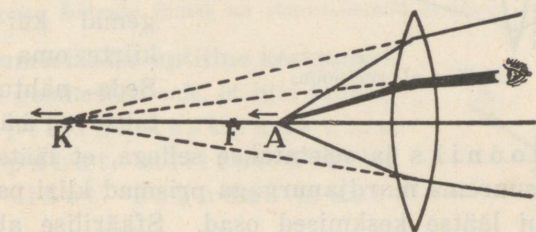


Joon. 82. Valguspunkti tõeline kujutis kumerläätses.

On ilmne, et tähendatud liikumisel mõlemad punktid (A ja K) peavad kord läätseläinud kiirte vahel asuma. Katse näitab, et see tõeliselt nii sünnib: on valguspunkt fookuse kahekordses kauguses, siis asub ta kujutis teisel pool läätseläinud kiirte vahel kahekordses kauguses. Niisiis valguspunkti kaugenemisel fookusest kuni fookuse kahekordse kauguseni tõeline

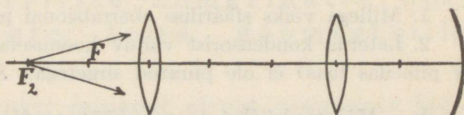
kujutis ligineb teisel pool läätsse lõpmatuses kuni fookuse kahekordse kauguseni.

Kiirte ümberpööratavuse printsiibi tõttu on valguspunkt ja tema tõeline kujutis ümberpaigutatavad ning valguspunkti kaugenemisel fookuse kahekordsest kaugusest kuni lõpmatuseni ligineb tõeline kujutis fookuse kahekordsest kaugusest kuni fookuseni.



Joon. 83. Valguspunkti ebakujutis kumerläätses.

b. Valguspunkti fookusest ligemale tuues näeme, et fookuse ja läätsse vahel asuvast valguspunktist tulev kiirte kimp läheb ka pärast murdumist laiali (joon. 83); asetame silma laialiminevate kiirte teele, siis näeme valguspunkti ebakujutist. Niisiis ka sel juhul jäävad homotsentrilised kiired homotsentrilisteks, kuid mitte murdunud kiired ise, vaid ainult nende pikendused lõikuvad ühes punktis.



Joon. 84.

1. Seleta, kuidas projektsioonilaternaga, mille esiseinas asub kumerlääts (kondensaator), võib saada mitmesuguseid kiirte kimpe valgusallika ümberpaigutamise teel!

2. Seleta, kuidas liigub ebakujutis valguspunkti lähenemisel fookusest läätseni!

3. Kuidas muutuksid murdumisnähtused, kui valguspunkt ja lääts oleksid vees?

4. Seleta joonise abil homotsentriliste kiirte käiku läbi vette asetatud ja õhuga täidetud õoneskumerläätsse (kella kattedklaasidest kokku kleebitud).

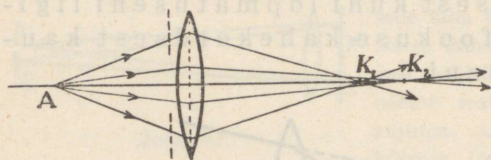
5. Joonisel 84 kujutatud läätsede ja peegli fookuste kaugused on võrdsed; fookused ja fookuste kahekordsed kaugused on märgitud punktidega;

a. Ehita punktist F_2 väljuva kahe sümmeetrilise kiire käik läbi optilise süsteemi edasi-tagasi, tähistades kiirte suunad nooltega.

b. Tee sama ehitus punktist F_1 väljuvate kiirte kohta!

64. Sfääriline ja kromaatileine aberratsioon kumerläätses.

a. Äär- ja tsentraalkiirte (peatelje ligidal läätse läbistavate



Joon. 85. Sfääriline aberratsioon.

kiirte) murdumist ligemalt tähele pannes näeme, et äärkiirte lõikepunkt on läätsele ligemal kui tsentraalkiirte oma (joon. 85). Seda nähtust nimetatakse sfääriliseks

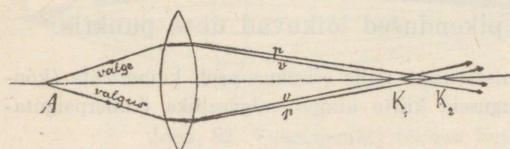
aberratsiooniks ja seletatakse sellega, et läätse äärepoolsed osad kui suurema murdjanurgaga prismad kiiri palju rohkem murravad kui läätse keskmised osad. Sfäärilise aberratsiooni tõttu ei ole valguspunkti kujutis mitte punkt, vaid enam-vähem suurem laik.

Aberratsiooni võib näidata suurema hästi kumera läätsega järgmiselt: kleebime läätse külge musta paberi kahe kontsentrilise aukude ringiga; üks ring laseb läbi äär- ja teine tsentraalkiiri. Asetame läätse päikesekiirte tee. Murdunud kiirte koondumist jälgime teisel pool läätse valge ekraani edasi-tagasi nihutamise abil.

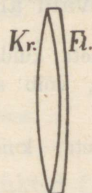
1. Millega võiks sfäärilise aberratsiooni mõju peaaegu ära hoida?

2. Laterna kondensorist väljuv koonusetaoline kiirte kimp (suutsu abil nähtav pimedas toas) ei ole piiratud sirgetega. Seleta nähtust joonise abil!

b. Kiirte käiku kumerläätses ligemalt vaadeldes näeme veel, et eriti äärepoolsetes kiirte kimpudes pärast murdumist ilmuvad



Joon. 86. Kromaatileine aberratsioon.



Joon. 87. Akromaatileine lääts.

värvilised kiired (joon. 86). Seda nähtust nimetatakse kromaatiliseks

aberratsiooniks ja seletatakse sellega, et valges valguses peituvad violetsed kiired murduvad tugevamini kui punased ja nende lõikepunkt on läätsele lähemal kui punaste oma.

Paremates optilistes riistades tarvitatakse nn. akromaatilisi läätsi, milledes kromaatile aberratsioon on kõrvaldatud. Nad koosnevad kahest kroon- ja flintklaasist kokkukleebitud läätsest (joon. 87).

Ka kahest läätsest koosnevas akromaatilises läätses ei ole kromaatilist aberratsiooni täielikult kõrvaldatud. Paremad on nn. apokromaatilised läätsed, mis koosnevad mitmest läätsest.

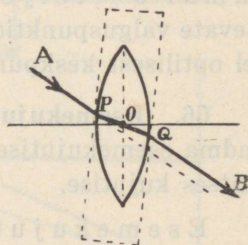
Peale eespoolnimetatud aberratsioonide on läätsedel veel mõned optilised vead, millest räägime allpool.

3. Missuguste läätsede juures on aberratsioonid iseäranis tunduavad?

65. Kumerläätsede optiline keskpunkt.

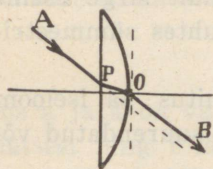
a. Näitame geomeetriselt, et igal kumerläätsel on optiline keskpunkt, s. o. niisugune punkt, millest kiired lähevad läbi suunda muutmata.

Joonisest 88 näeme, et läbi sümmeetrilise kumerläätsede geomeetriselise keskpunkti O minev kiir löikab läätsede pindades P ja Q , kus läätsede puutepinnad on paralleelsed. Kiir $APOQB$ läheb läbi läätsede suunda muutmata nagu läbi tasaparalleelse plaadi. Järelikult langeb sümmeetrilise kumerläätsede optiline keskpunkt ühte tema geomeetriselise keskpunktiga.



Joon. 88. Sümmeetrilise kumerläätsede optiline keskpunkt.

Läbi läätsede opt. keskpunkti minevat sirget nimetame läätsede biteljeks, läbi opt. keskpunkti minevat kiirt peakiireks ja läätsede opt. keskpunkti ligidalt läbiminevaid kiiri tsentraalkiirteks.



Joon. 89. Tasakumerläätsede optiline keskpunkt.

Harilikult on läätsed õhukesed ja nende langevad kiired peaaegu risti läätsede esipinnaga. Seetõttu ei ole peakiire nihe läätsede läbimiseks tegelikult tunduav ja edaspidi me ei arvestagi seda.

b. Tasakumerläätsede optiline keskpunkt asub peateljel läätsede kumeral välispinnal (joon. 89; mispärast?).

Eelmisest võime järeldada, et mittesümmeetrilise kaksikumerläätsede optiline keskpunkt asub ka peateljel läätsede sees tema

kumerama pinna läheduses, sest sümmeetrilise kumerläätsse muutumisel tasakumerläätses nihkub opt. keskpunkt geomeetrilisest keskpunktist kuni kumera välispinnani. Samuti võib järeldada, et nõguskumerläätsse opt. keskpunkt asub peateljel väljaspool läätsse kumerat pinda.

c. Me nägime, et peateljel asuva valguspunkti kujutis asub peateljel. Asetades valguspunkti peatelje kõrvale abiteljele (pöörame läätsse), näeme aga, et abiteljel asuva valguspunkti kujutis asub samal abiteljel. Näiteks asetsevad kõikide lõpmatu kaugel olevate valguspunktide kujutised fokaalpinna, samal kaugusel optilisest keskpunktist.

66. Esemekujutis kumerläätses. a. Et kumerlääts peab andma esemekujutise, järeldame sellest, et eseme iga punkt annab läätses kujutise.

Esemekujutise ehitamisel tuleb ehitada eseme üksikute punktide kujutised. Punkti kujutist on võimalik ehitada, kui saame tarvitada kaht kiirt (mispärast?). Selleks valime kiired, mille murdumine on meil teada. Niisugused kiired on peakiir (läheb läbi läätsse opt. keskpunkti murdumatult edasi), peateljega paralleelne nn. paralleelkiir (läheb pärast murdumist läbi fookuse) ja läbi fookuse minev kiir (on pärast murdumist paralleelne peateljega). Nimetatud kiirtest kasutame harilikult kaht esimest.

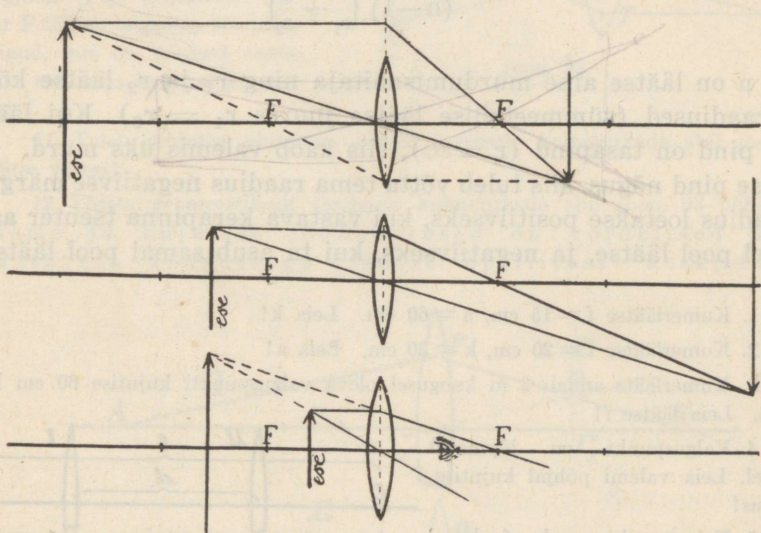
Töö lihtsustamiseks joonestame paralleelkiire murdumist ilma tunduva veata ainult üks kord läätsse sümmeetriapinnal (või tema pikendusel). Samuti lihtsuse mõttes leiame ainult sirge eseme kujutise, oletades, et ese on asetatud peatelje suhtes sümmeetriliselt.

Seleta joon. 90 näidatud esemekujutiste ehitus ja iseloom (eba- või tõeline, päripidine või ümberpööratud, suurendatud või vähendatud).

b. Katsete ja ehituste tulemusi kokku võttes saame nn. liikumisreegli: liigub ese lõpmatuses fookuse kahekordse kauguseni, siis nihkub tema vähendatud tõeline ümberpööratud kujutis fookusest fookuse kahekordse kauguseni, seejuures suurenedes; liigub ese fookuse kahekordsest kaugusest fookuseni, siis liigub tõeline ümber-

pööratud suurendatud kujutis fookuse kahekordsest kaugusest lõpmatuseni, seejuures suurenedes; liigub ese fookusest läätsele, siis liigub suurendatud päripidine ebakujutis samal pool läätse lõpmatusest läätsele, seejuures vähenedes.

Siin kirjeldatud esemekujutise ehitamine on enam-vähem täpne ainult õhukese läätse puhul.



Joon. 90. Esemekujutised kumerpeeglis.

67. Läätsse valem. a. Eelmise § sisust võib järeldada, et on olemas kindel seos eseme kauguse, kujutise kauguse ja fookuse kauguse vahel. Matemaatilise arutuse põhjal saame sfääriliste läätsede kohta kehtiva valemi

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

kus a ja k on valguspunkti (eseme) ja tema kujutise kaugused läätsest ning f läätse fookuse kaugus. Valem seob kolme suurus; valemi abil võime leida ühe suuruse, kui on teada ülejäänud kaks.

Kui $a < f$, tähendab ebakujutise puhul, tarvis valemis võtta k negatiivse märgiga.

Läätsse valemi tuletamine on sfäärilise peegli valemi tuletamisega võrreldes keeruline, sest siin on peale eseme ja kujutise kauguse tegemist kahe kõverusraadiusega ja veel läätse aine murdumisnäitajaga, samuti peale sfäärilise aberratsi-

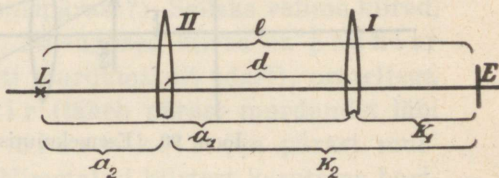
ooni veel teiste läätsede optiliste vigadega. Valem on ka ainult tingimisi kehtiv (tsentraalkiirte kohta, mis peateljega suurt nurka ei moodusta), — need tingimused on läätsede tarvitamisel harilikes optilistes riistades enam-vähem täidetud.

b. Fookuse kauguse kohta on kehtiv valem

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

kus n on läätsede aine murdumisnäitaja ning r_1 ja r_2 läätsede kõverusraadiused (sümmeetrilise läätsede juures $r_1 = r_2$). Kui läätsede üks pind on tasapind ($r = \infty$), siis kaob valemis üks murd. On läätsede pind nõgus, siis tuleb võtta tema raadius negatiivse märgiga (raadius loetakse positiivseks, kui vastava kerapinna tšenter asub teisel pool läätsede, ja negatiivseks, kui ta asub samal pool läätsede).

1. Kumerläätsede $f = 15$ cm, $a = 60$ cm. Leia k !
2. Kumerläätsede $f = 20$ cm, $k = 30$ cm. Leia a !
3. Kumerläätsed annab 3 m kaugusel oleva valguspunkti kujutise 60 cm kaugusel. Leia läätsede f !
4. Valguspunkt on lõpmatu kaugel. Leia valemi põhjal kujutise kaugus!
5. Valguspunkt asub fookuses kahekordses kauguses. Leia valemi põhjal kujutise kaugus!
6. Kas kiirte ümberpööratavuse printsiipi võib järeldada läätsede valemist?

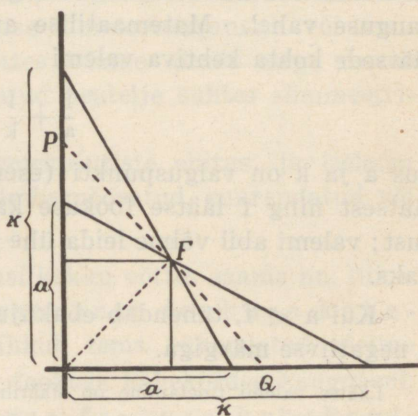


Joon. 91.

7. Võrdle tasakumerläätsede fookuse kaugust sama kumerusega sümmeetrilise kaksikkumerläätsede omaga.

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

9. Valguspunkti ja ekraani kaugus on 1 m (joon. 92) ning vahele asetatud kumerläätsed tekitab asendis I ekraanil terava kujutise. Nihutame läätsede d võrra valguspunkti poole asendisse II nii, et kujutis ekraanil oleks jälle terav. Määra läätsede f , kui $d = 40$ cm!

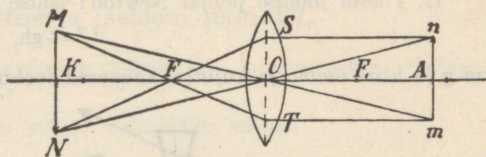


Joon. 92.

10. Katses antud kumerläätsel leitud valguspunkti kauguse $a = 33$ cm ja kujutise kauguse $k = 60$ cm märgime ära koordinaatide teljel ja joonestame ühendusjooned vst. joonisele 92. Tõesta geomeetriselt,

a) et lõikepunkti F kaugused telgedest on võrdsed läätsel fookuse kaugusega;

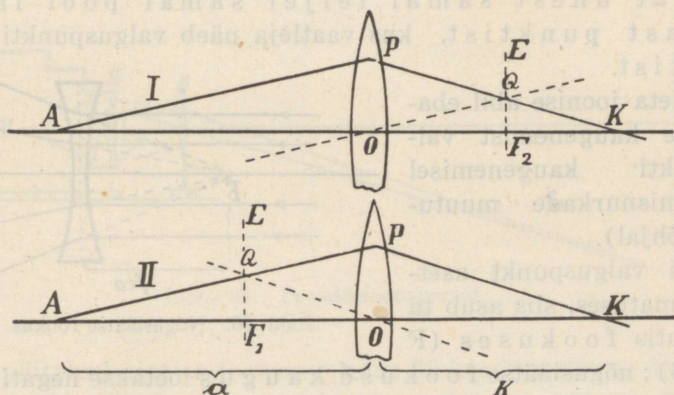
b) et läbi F joonestatud sirgjoon (PQ) pöörämisel ümber F lõikab telgedest ära joonlõigud, mis on võrdsed vastavate eseme ja kujutise kaugustega!



Joon. 93.

11. Tuleta kujutise ehitamise põhjal (sarnaste kolmnurkade abil joon. 93) läätsel valem!

12. Tõesta geomeetriselt (sarnaste kolmnurkade abil joon. 93 põhjal), et eseme ja kujutise joonsuurused on võrdselised nende vastavate kaugustega läätsel optilisest keskpunktist.



Joon. 94.

13. Kumerläätsel $f = 15$ cm, eseme suurus on 10 cm, eseme kaugus ekraanist 4 m. Kui kaugemale esemest tarvis asetada lääts eseme ja ekraani vahele, et saada ekraanil terav kujutis, ja kui suur on kujutis?

14. Kumerläätsel fookuse kaugus on 5 cm. Leia graafiliselt ja analüütiliselt 4 mm kõrguse eseme kujutise asukoht ja suurus, kui eseme kaugus läätsel on 3 cm. Võrdle saadud resultate.

15. Kumerlääts annab temast 20 cm kaugusel seisvast esemest 4 korda suurendatud tõelise kujutise. Leia fookuse kaugus!

16. Peateljel asuva valguspunkti A kujutise ehitamiseks on joonestatud

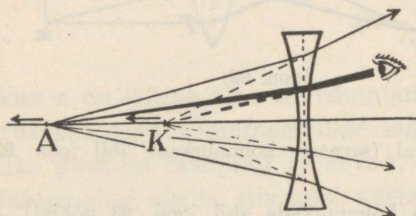
a) F_2E risti peateljega (joon. 94, I) kiir AP ja abitelg $QO \parallel AP$. Tõesta, et PK lõikab peatelge valguspunkti kujutises K (et ehituse kohta on kehtiv läätsel valem)!

b) F_1E risti peateljega (joon. 94, II), kiir AP ning abitelg QO. Tõesta, et PK//QO lõikab peatelge valguspunkti kujutises K (et ehituse kohta on kehtiv läätse valem)!

17. Tõesta joonise põhjal Newton'i läätse valem

$$f^2 = gh,$$

kui g ja h on eseme ja kujutise kaugused fookustest!



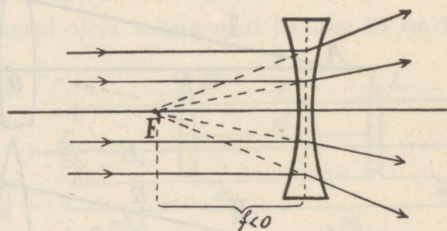
Joon. 95. Murdumine nõgusläätses.

tulevat ühest samal teljel samal pool läätse asuvast punktist, kus vaateleja näeb valguspunkti eba-kujutist.

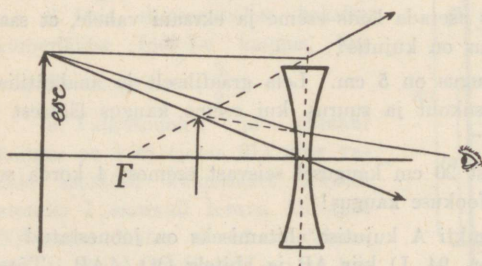
Seleta joonise abil eba-kujutise kaugenemist valguspunkti kaugenemisel (langemismurkade muutumise põhjal).

Kui valguspunkt asetseb lõpmatuses, siis asub ta ebakujutis fookuses (F joon. 96); nõgusläätsse fookuse kaugus loetakse negatiivseks.

Nõgusläätsel on optiline keskpunkt (tõesta seda graafiliselt), peatelg ja abiteljed.



Joon. 96. Nõgusläätsse fookus.



Joon. 97. Eseme ebakujutis nõgusläätses.

68. Nõguslääts. Kaitsed ja ehitused (joon. 95) näitavad, et samast punktist väljuvad kiired lähuvad pärast murdumist nõgusläätses veel rohkem laiali ja paistavad välja

Nõgusläätsse fookuse kauguse määrame harilikult kumerläätsse abil. Seks võtame kumerläätsse, mis kompenseerib nõgusläätsse hajumise (mõjuvad kokku nagu tasaparalleelne plaat); siis on läätsede fookuste kaugused arvu-liselt võrdsed.

69. **Esemekujutis nõgusläätses.** Valguspunkti kujutise ehitamisel nõgusläätses tarvitame harilikult paralleel- ja peakiirt nagu kumerläätsesi juures.

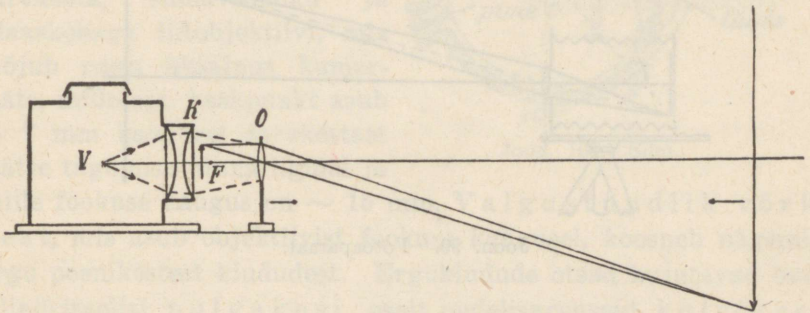
Seleta esemekujutise ehitus ja iseloom joon. 97.

1. Võrdle kumerläätsse nõguspeegli ja nõgusläätsse kumerpeegli. Missugused suurused vastavad teineteisele?

2. Tuleta esemekujutise ehituse põhjal nõgusläätsse valem!

Optilised riistad; silm ja nägemine.

70. **Projektsioonaparaat.** Seleta joon. 98 põhjal kiirte käiku projektsioonaparaadis diaposiitivi projektimisel (diaskoop).



Joon. 98. Projektsioonaparaat.

On näiteks kujutise joonsuurendus 30-kordne, siis on kujutise pindsuurendus 900-kordne ja kujutise valgustus 900 korda nõrgem diaposiitivi omast. Sellest selgub tugeva valgusallika tarvidus. Teisest küljest on soovitav võimalikult punktiitoline valgusallikas. Nimetatud põhjustel tarvitatakse paremates aparaatides valgusallikana elektrileeklampi. — Tähtis on ka, et objektiiv oleks küllalt suur, nii et kiirte koonus langeks täielikult objektiivile, sest muidu läheks osa valgust kaduma.

Läbipaistmatu joonise või pildi projektimisel asetatakse joonis laterna põhjas olevale alusele. Laterna kaanes asuv objektiiv tekitab hästi valgustatud joonisest kujutise (lael), mis tasapeegli abil ekraanile juhatakse (episkoop).

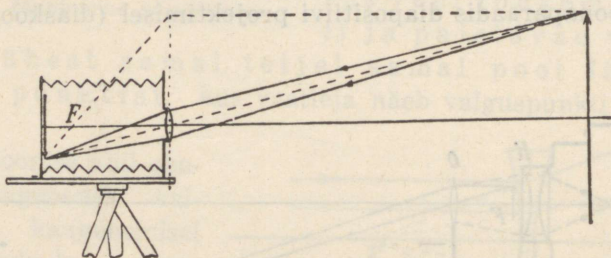
Projektsioonmikroskoobil asetatakse väike preparaat kondensaatoriga koondatud kiirte koonuse tippu ja tarvita-

takse lühikese fookuse kaugusega objektiivi. Et aga ühes valgusega koondatud soojus ei rikuks preparaati ja objektiivi, asetatakse kiirte tee tasaparalleelne klaasanum külma veega, mis neelab soojust.

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

2. Missuguse objektiiviga võiks saada suurema kujutise, kui ekraani kaugus laternast on jääv?

3. Ekraan on diapositiivist 4 m kaugel. Missuguse fookuse kaugusega objektiivi läheb tarvis ja kuhu kohta tuleb ta paigutada, et saada diapositiivist ekraanil 25 korda suurendatud kujutis? Mitu korda on kujutise valgustustugevus diapositiivi omast nõrgem?



Joon. 99. Fotoaparaat.

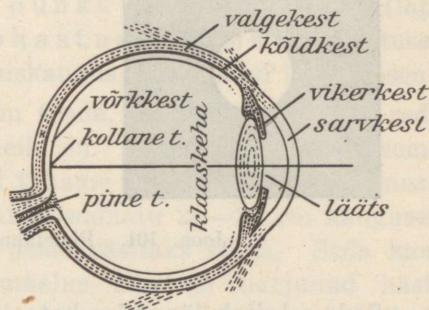
71. **Fotoaparaat.** Seleta joon. 99 abil fotoaparaadi ehitust ja kiirte käiku temas. Tuleta meelde pildistamise, negatiivi ja positiivi valmistamise käiku.

Lihtsamail väikesil aparaatidel on objektiivid väikese fookuse kaugusega, millega võrreldes esemed asetsevad praktiliselt lõpmatuses, kui nad on kaugemal kui paar meetrit. Niisugusel juhul tekiavad kujutised alati samal kaugusel objektiivist, nimelt objektiivi fokaalpinnal, ja sellepärast valmistatakse pimekambrid kindla pikkusega (mis võrdub objektiivi fookuse kaugusega). Pildistamine niisuguse aparaadiga on lihtne, sest aparaati ei ole tarvis kohastada, kuid saadud pildi perspektiiv ei ole õige ja viga on seda tundavam, mida ligemalt on pildistatud. Näiteks on kitsa uulitsa lähem osa pildil liiga lai ja lähemad asjad on kaugematega võrreldes liiga suured. Paremate aparaatide objektiivide fookuste kaugused on suuremad, seetõttu on pildistamisel tarvis aparaati kohastada.

Lihtne kumerlääts ei kõlba heaks päevapildistamiseks. Peale sfäärilise ja kromaatilise aberratsiooni on tal veel mitmesugused optilised vead. Näiteks ei asetse tasapinnas samal kaugusel olevate punktide kujutised tasa-, vaid kõveral pinnal, — peateljest kaugemal olevate punktide kujutised ei ole punktitaolised jne. Foto-käsiraamatuis kirjeldatud liitobjektiivide juures on optilised vead niivõrd kõrvaldatud, et nad tunduvat mõju ei avalda.

72. Silm ja nägemine. Silma võime vaadelda kui pimekambrit. Joon. 100 kujutab ülalt vaadatud vasaku silma horisontaalset läbilõiget. Tuleta meelde silma ehitust.

Silma läätis, mis koosneb üksikuist kihtidest (silbulasarnaselt), moodustab ühes sarvkesta, silmavedeliku ja klaaskehaga liitobjektiivi, mis mõjub nagu üksainus kumerläätis, mille opt. keskpunkt asub ~ 7 mm kaugusel sarvkestast läätse tagumise pinna ligidal ja mille fookuse kaugus on ~ 15 mm. Valgustundlik võrkkest, mis asub objektiivist fookuse kaugusel, koosneb nägemisergu peenikestest kiududest. Ergukiudude otsad kujutavad osalt silindritaolisi pulgakesi, osalt pudelisarnaseid kolvikesi. Objektiivi peatelje, nn. kollase tähni kohal puuduvad pulgakessed, kuid on rohkesti kolvikesi; kolvikeste vastastikune kaugus on seal ainult ~ 0,004 mm. Peateljest kaugemal puuduvad kolvikessed. Pimetähni (§ 73) kohal ei leidu erguotsi.

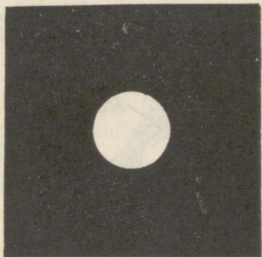


Joon. 100. Silm.

Väljaspool silma asuvast esemest tekib võrkkestal tõeline ümberpööratud kujutis, mis ärritab närviotsi ja tekitab peajus nägemisaistingu. Ümberpööratud kujutisi oleme harjunud väikesest saadik teiste meelte abil seletama kui päripidiseid.

73. Kollane ja pimetähn. Võrkkesta tundlikkus ei ole igal kohal ühesugune. Kõige paremini näeme eset või eseme osa siis, kui tema kujutis langeb kollasele tähnile. Sel põhjusel juhitakse silma alati nii, et vaadeldava eseme kujutis langeks kollasele tähnile; seejuures näeme ka teisi ümbritsevaid esemeid, kuid mitte küllalt selgelt. Vaatlemisel kahe silmaga on meie vaatevälja laius ~ 180°.

Mingisuguse eseme vaatlemisel ühe silmaga langeb alati pime-tähnile mõne teise ümbritseva eseme kujutis ja seetõttu me ei peaks seda teist eset nägema. Nii peaks siis vaatlemisel ühe sil-maga üks ruumi osa paistma alati mustana. Harjumuse tõttu ei pane me seda aga tähele, vaid täiendame puuduva ruumiosa, koos-kõlastades teda ümbrusega.



Joon. 101. Pimetähni demonstreerimine.

Seda selgitab järgmine katse. Vasakut silma käega kinni kat-tes vaatame paremaga mustas ruudus olevat ringi (joon. 101); teataval kaugusel silmast (~ 22 cm) kaob kõrvalolev väike must ring ja paistab valgena nagu paber. Joonist 101 ümber pöörates ja musta ringi vaadates kaob samal kaugusel valge ring ning ruut paistab ter-velt mustana.

Seleta nähtust joon. 102 abil.

74. Silma kohastumine (akkommodatsioon).

a. Normaalse silma puhkeolekus langevad kau-gelolevate esemete kujutised võrkkestale ja see-tõttu näeme neid esemeid selgelt.

Ligineb aga ese silmale, siis peaks kujutis kaugenema võrkkesta taha, kuid me muudame ümbritsevate musklite abil elastse läätsse kumera-maks nii, et kujutis langeb jälle võrkkestale. Lääts- se kumeruse muutmist vastavalt eseme kaugusele nimetame k o h a s t u m i s e k s (akkommodatsioo-niks).

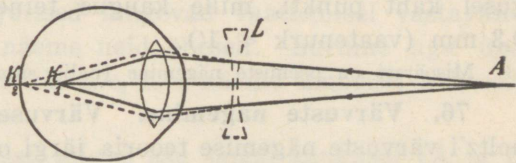
Kohastumist võib hästi tähele panna, kui hoida peenike traat- või tindiga klaasile joonestatud võre silma ja raamatu vahel ja vaadata teravalt kord võrele, kord tähtedele. Kui

oleme mitu korda edasi-tagasi vaadanud, tunneme musklite väsimust.

Kohastumisvõime on piiratud. Normaalne silm võib kohastuda lõpmatuseni kuni ~ 12 cm, tähendab, ta võib näha selgesti iga eset, mis on silmast kaugemal kui 12 cm. On aga ese lähemal kui 12 cm, siis ei suuda musklid läätse küllalt kumeraks teha, kujutis tekib kohastumispingutusele vaatamata võrkkesta taga ja me ei näe eset selgesti. Niisiis asub normaalse silma lähim kohastumispunkt ~ 12 cm kaugusel (lapsel ~ 10 cm), kaugem kohastumispunkt lõpmatuses ning järelikult ulatub kohastumiskaugus 12 cm kuni lõpmatuseni.

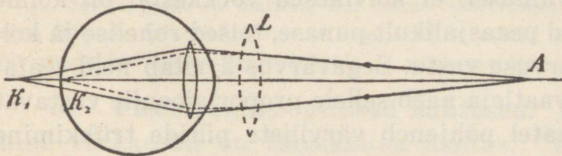
Igapäevastest nähtustest on teada, et näeme esemeid seda paremini, mida lähemal nad meile on. Sellepärast toome eseme silmale võimalikult ligidale, kui tahame tähele panna ta peenusi. Lugemisel või kirjutamisel hoiame raamatu 25—30 cm kaugusel, sest kohastumine lühema maa peale väsitaks silma. Seda kaugust (25—30 cm), milles normaalne silm on harjunud hästi lugema ilma tunduva kohastumisväsimumusega, nimetame harilikult normaalsilma parimaks nägemiskauguseks.

b. Lühinägija silmamuna on läätse fookuse kauguse kohta liiga pikk, mille tõttu tema kohastumiskaugus ~ 5 kuni 12 cm-ni ulatub. Tuleta meelde kujutise tekkimist lühinägija silmas ilma prillita ja prilliga.



Joon. 103. Lühinägija silm ja prillid.

Kaugelenägija silmamuna on läätse fookuse kauguse kohta liiga lühike, mille tõttu tema kohastumiskaugus ~ 40 cm kuni ∞ -ni ulatub. Tuleta meelde kujutise tekkimist kaugelenägija



Joon. 104. Kaugelenägija silm ja prillid.

silmas ilma prillita ja prilliga.

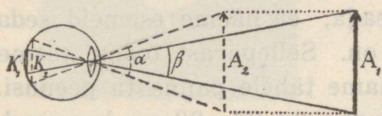
Prilliklaas koos silmaläätsega mõjub üldse nagu liitläätis, mille fookus asub normaalsel kohastumisel võrkkelele.

Silm ei ole sugugi ideaalne optiline riist, tal on mitmesugused optilised vead, osalt samalaadsed kui lihtsa läätsobjektiiviga varustatud fotoaparaadil. Harjumuse tõttu näeme selle puuduliku riistaga siiski hästi. — Anormaalse silma puudused võivad olla väga mitmesugused. Õigesti valitud prilliklaasiga (erijuhtudel mittedüüraalne) on mõned silmavead parandatavad.

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

Näide: $f = 25 \text{ cm} = 0,25 \text{ m}$; $D = \frac{1}{0,25} = 4$.

75. Eseme vaatenurk. Kujutise suurus võrkkestal oleneb läätses optilisest keskpunktist eseme äärpunktidesse tõmmatud sirgete vahelisest nurgast, nn. eseme vaatenurgast. Mida lähemal on ese, seda suurem on vaatenurk ja, tähendab, ka kujutis (joonises 105 on $a > \beta$) ning eseme peenused on paremini näha.



Joon. 105. Eseme vaatenurk.

Eseme kaht punkti näeme ainult siis lahus,

kui nende ühendusjoone vaatenurk on suurem kui $1'$, sest vastasel korral langevad nendest tulevad kiired kollasel tähnil üheainsa ergu otsale. Näiteks ei või meie nägemisorgan eraldada 1 m kaugusel kaht punkti, mille kaugus teineteisest on väiksem kui 0,3 mm (vaatenurk $< 1'$).

Mispärast on peenuste nägemine (palja silmaga) piiratud?

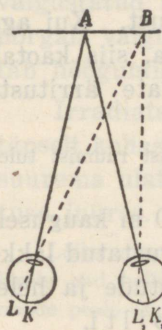
76. Värvuste nägemine. Värvusepimedus. Young-Helmholtz'i värvuste nägemise teooria järgi on võrkkesta pulgakesed üldiselt valgusetundlikud, kolvikesed väiksema üldise valgusetundlikkuse juures aga ka värvusetundlikud. Et värvusepimedate silmad ei ole küllalt tundlikud kas punase, roheline või tumesinise värvuse vastu, siis ollakse arvamusel, et kolvikesed võrkkestal on kolme liiki: ühed on tundlikud peaaesjalikult punase, teised roheline ja kolmandad tumesinise värvuse vastu. Segavärvus ärritab neid teatavas proportsioonis ja vaatleja näeb sellele proportsioonile vastavat segavärvust (sellel vaatel põhjeneb värviliste piltide trükkimine kolme värvilise kliše abil). On aga värvusepimedal näit. punasetundlikud kolvikesed nõrgad, siis näeb ta maailma nagu normaalne silm läbi helerohelise prilli, mis osalt neelab punaseid kiiri.

Harva leidub inimesi, kes üldiselt värvusetundelikud ei ole; arvatavasti on neil kolvikesed üldiselt puudulikud. — Nähtust, et mõningad inimesed öösi väga

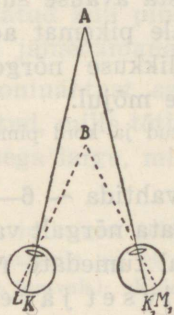
halvasti näevad (kanapimedus), tuleb seletada pulgakeste puuduliku arenemisega. Kassil ja teistel pimeduses nägijatel loomadel on kollase tähni kohal rohkesti pulgakesi.

Väga intensiivne värviline valgus tekitab valge mulje.

77. Nägemine kahe silmaga. Kahe silmaga vaatlemisel juhime silmade peateljed nii, et vaadeldava punkti A (joonises 106) kujutised langeksid mõlemas silmas kollasele tähnile (K_1 ja K); need teljed lõikuvad siis vaadeldavas punktis. Seejuures näeme üheselt ka samal kaugusel kõrvalolevaid punkte (näit. B).



Joon. 106. Kahe silmaga üheselt nägemine.



Joon. 107. Kahe silmaga kaheselt nägemine.

Üheselt nägemist kahe silmaga seletame sellega, et mõlema silma võrkkestal on üksteisele vastavad erguotsad (näit. K_1 ja K , L_1 ja L), mille kiud ühinevad peaaigus; vastavad erguotsad on samal pool kollast tähni. Samal kaugusel olevate punktide kujutised langevad vaatlemisel vastavaile erguotsadele ja seetõttu näeme neid üheselt. Surume aga ühe silmamuna sõrmega pisut kõrvale, siis näeme ümbrust kaheselt (mispärast?).

Kui me kahest punktist, mis ei asu samal kaugusel (A ja B joonises 107), fikseerime ühe (näit. A), siis näeme teda üheselt, teist (B) aga kaheselt (mispärast?).

1. Seleta, mida sa märkad, kui hoiad ühe sõrme ~ 15 cm kaugusel silmadest, teise aga samas suunas võimalikult kaugel ja fikseerid üht või teist sõrme.

2. Seleta, mida sa märkad, kui eseme fikseerimisel surud sõrmega üht silmamuna kõrvale (alkoholimürgituse tagajärjel ei suuda inimene oma silmatelgi täpselt vaadeldud eseme peale juhtida ja näeb seetõttu esemeid kaheselt).

78. Füsioloogilis-optilised nähtused. Esemekujutise tekkimine võrkkestal on füüsikaline nähtus. Valguseaistingu tekkimine ja kujutise tõlgitsemine on füsioloogilised nähtused, mis ei ole veel täielikult selgitatud.

a. **Positiivsed järelpildid.** Silma ärritus tekib valguse keemilise mõju tagajärjel nägemiskesta katvasse nägemispurpurisse (vedel värvaine) ja kestab pärast valguse kustumist veel edasi,

kuni nägemispurpur ainevahetuse teel uuendub. Pärast valguse kustumist püsib silmas vaadeldud eseme nn. positiivne järelpilt. Harilikult me seda tähele ei pane, mis on seletatav järelpildi lühikese vältusega ($\sim \frac{1}{20}$ sek.). Positiivsete järelpiltidega on seletatav liikuva pildi mulje kinos.

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

Mida märkad, kui kord hästi valgustatud ja kord pimedast ruumist tuled niisama nõrgalt valgustatud ruumi?

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

c. **Värvilised järelpildid.** Paneme hästi valgustatud helehallile paberile erepunasest paberist väljalõigatud risti, valgustame teda tugevasti ja vahime tema peale teravalt ~ 20 sek. jooksul. Risti eemaldamisel näeme valgel paberil rohelist risti. Selle täiendvärvilise järelpildi mulje tekkimist seletame punasetundlike kolvikeste väsimusega.

Missugused järelpildid tekivad kollase või rohelse eseme vaatlemise järel?

d. **Kontrastnähtused.** Sama helehall paberitükk paistab valgel paberil tumedamana ja mustal heledamana, samuti paistavad esemed heledal foonil tumedamana ja tumedal foonil heledamana. Nähtus seletub sellega, et hele foon silma üldiselt väsitab. Väsinud silmale (heleda fooni puhul) paistab ese tumedamana, mitteväsinud silmale (tumeda fooni puhul) heledamana.

Helehall paberitükk paistab erepunasel paberil rohekana. Selle nn. **kontrastvärvuse** tekkimist seletame kolvikeste väsimusega punase värvuse suhtes; seetõttu helehall (valge) keha paistab täiendvärvuses.

Kuidas paistaks helehall paber rohelisel või sinisel foonil?

Valgustame ekraani erepunase valgusega projektsioonlaterna abil. Hoiame käe ekraani ees ~ 1 m kaugusel ja valgustame käe varju kõrvalt nõrgema valge valgusallikaga (elektrihoõglamp, küünal). Käe vari ei ole helehall (valge), vaid on roheline. Selle nn. **värvilise varju** tekkimist seletame kolvikeste väsimusega.

Kuidas paistaks valge valgusega valgustatud käe vari ekraani valgustamisel rohelise või sinise valgusega?

e. **Irradiatsioon.** Nähtust, et valged esemed paistavad suuremad olevat kui niisama suured tumedad, nimetatakse *i r r a d i a t s i o o n i k s*. Irradiatsiooni paneme igapäevses elus tähele näit. valge ja musta kinda, suka, vesti ja teiste riiete juures. Heledasti valgustatud kuusirp paistab suurema ringi osana kui ülejäänud nõrgalt valgustatud kuu pind. Sama elektrihoõglambi niit paistab hõõgumisel jämedamana kui külmas olekus.

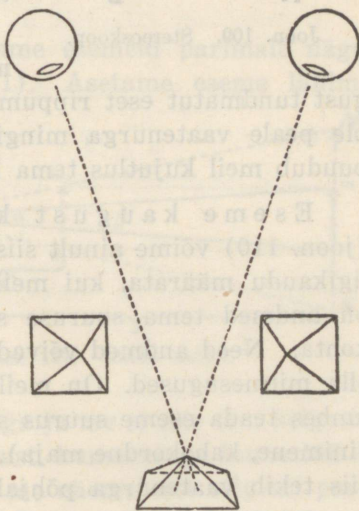
Irradiatsiooninähtust seletame sellega, et silm ei ole alati täpselt kohastatud, mille tõttu iga valguspunkt tekitab võrkkestal suurema ulatusega laigu, mis on eriti tunduv intensiivse valgustuse juures.

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

f. **Reljeefsusetunne.** Kuna tasase pildi vaatlemisel kahe silmaga on kujutised mõlema silma võrkkestal täiesti ühesugused, on nad reljeefse eseme vaatlemisel isesugused (joon. 108 selgitab seda püramiidi kohta). Et me oleme harjunud saama mõlemal võrkkestal isesugused kujutised ainult reljeefse eseme vaatlemisel kahe silmaga, siis tekib ilmne reljeefsusetunne kahe silmaga vaatlemisel, ja ainult siis, kui mõlemad kujutised on nii isesugused, nagu kumbki silm näeb seda eset üksikult.

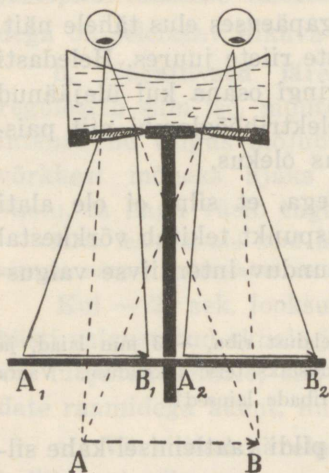
On ese kaugemal kui ~ 250 m, siis on kujutised mõlema silma võrkkestal täiesti ühesugused ja reljeefsusetunne (ruumi sügavuse tunne) kaob. Seetõttu paistab maastik kaugelt vaadates joonisena ja mitmesugusel kaugusel olevad taevakehad ühekaugusel.

Pilte, mis vastavad eseme kujutistele mõlema silma võrkkestal, tehakse stereoskoop-fotoaparaadiga. Ta koosneb kahest ühise



Joon. 108. Eseme nägemine reljeef-selt kahe silmaga.

kambriga fotoaparaadist, mille objektiivide kaugus teineteisest võrdub silmaterade vahelise keskmise kaugusega. Stereoskoobiga (joon. 109) pilte vaadates langevad nende kujutised ruumis ühte ja me näeme pildistatud eset kehana.



Joon. 109. Stereoskoop.

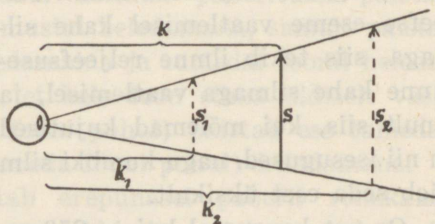
Värviliste piltide juures võib reljeefstunnet tekitada värvide abil. Näiteks paistavad pildi punased osad ligemal olevat kui sinised. Põhjus: punaste osade kujutised on punaste kiirte nõrgema murdumise tõttu läätsest kaugemal kui siniste omad. Pildi värviliste osade vaatlemisel teeb silm niisamasuguseid kohastumisi kui kaugemate ja lähemate esemete vaatlemisel. Maalimisel arvestatakse seda, samuti ka kontrastnähtusi.

1. Mispärast, vaadates tasast pilti ühe silmaga, näeme teda reljeefsemalt kui kahe silmaga vaadates?
2. Mispärast on raske ühe silmaga vaadates niiti nõelasilma ajada?

g. Eseme kauguse ja suuruse määramine.

Kui vaatleme mingisugust tundmatut eset rippumatult tema ümbrusest, nii et meil ei ole peale vaatenurga mingisuguseid andmeid tema kohta, siis puudub meil kujutlus tema kauguse või suuruse kohta.

Eseme kaugust k (joon. 110) võime ainult siis ligikaudu määrata, kui meil on andmed tema suuruse s kohta. Need andmed võivad olla mitmesugused. On meil umbes teada eseme suurus s (inimene, kahekordne maja), siis tekib vaatenurga põhjal ka vastav kaugusetunne. On aga eseme suurus tundmatu, kuid teada tema ligidal oleva teise eseme suurus, järelikult ka kaugus, siis võrdleme tundmatu eseme kaugust tema ümbruses olevate tuntud esemete kaugusega. Eseme kauguse määramisel aitavad kaasa või mõjuvad segavalt mitmesugused asjaolud. Näiteks oleme harjunud kaugemaid esemeid nägema mittedelgesti ja seetõttu paistab eseme kaugus uduse



Joon. 110. Eseme kauguse ja suuruse määramine.

ilmaga suurem olevat, mägedes aga, kus õhk iseäranis puhas, väiksem kui tõeliselt. Ka oleme harjunud ligemaid esemeid vaadeldes nägema enese ja vaadeldava eseme vahel vähe vahepunkte ja loeme seetõttu eseme kaugust näit. üle vaikse järve pinna vaadates vähemaks ja läbi puiestee vaadates suuremaks kui tõeliselt.

Samal põhjusel paistavad tähed horisondi ligidal kaugemaina kui seniidi ligidal. Nii tekivad mitmesugustel põhjustel pettumused kauguse kohta. — Ligidalt vaatlemisel aitab kauguse määramisel kaasa reljeefsusetunne; kahe silmaga vaadates võime kaugust õigemini määrata kui ühe silmaga vaadates.

Eseme suurust võime vaatenurga põhjal ligikaudu määrata ainult siis, kui meil on andmed eseme kauguse kohta. Kui eksime seejuures eseme kauguse suhtes, siis eksime ka tema suuruse suhtes. Nii näit. paistavad Kuu ja Päike horisondi ligidal suuremaina kui seniidi ligidal (mispärast?), tundmatud esemed uduse ilmaga suuremaina kui selge ilmaga (mispärast?).

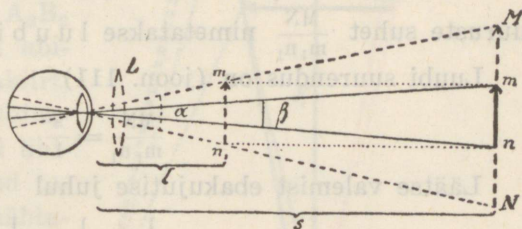
Mispärast paistavad Päike ja Kuu umbes ühesuurustena, kuigi Päikese diameeter on 400 korda suurem?

79. Luup. a. Harilikult vaatame esemeid parimalt nägemiskauguselt ($s \approx 25$ cm, joon. 111). Asetame eseme lähima kohastumispunkti kaugusele (~ 12 cm), siis suureneb tema vaatenurk ja eseme peenused on paremini näha.

Et vaatenurka veel suurendada, selleks toome eseme veelgi ligemale asendisse m_1n_1 ,

kuid kujutis tekib nüüd võrkkesta taga ja me ei näe eset selgesti. Asetame aga silma ja eseme vahele vst. kumerusega kumerläätse L , siis langeb kujutis võrkkestale ja me näeme eset selgesti parimal nägemiskaugusel. Kumerläätse nimetame antud juhul **luubi**ks.

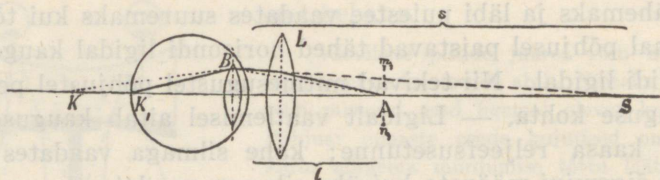
Kui antud luubi puhul ese asuks luubi fookuses, siis langeksid sinna mõnest eseme punktist paralleelsed kiired ja vaadeldav punkt paistaks kaugel olevat. Et me aga oleme harjunud vaatama esemeid parimalt nägemiskauguselt, siis nihutame eseme fookusest pisut ligemale nii, et eseme punktist tulevad kiired langevad



Joon. 111. Luubi mõju.

silma (pärast murdumist luubis) laialimineva kiirte kimbuna, mille pikendused lõikuvad parimal nägemiskaugusel. Niisiis asetame asja vaatamisel antud luubiga selle fookusest pisut ligemale.

b. Luubi mõju selgitamiseks vaatleme veel joonist 112. Ese



Joon. 112. Luubi mõju.

$m_1 n_1$ on silma lähimast kohastumispunktist, samuti ka luubi fookusest pisut lähemal. Ilma luubita tekiks punkti A kujutis võrkkesta taga (punktis K, kiire käik punkteeritud); luubi mõjul tekib kujutis võrkkestal (punktis K_1) ja silma langev kiir paistab tulevat parimast nägemiskaugusest punktist S. — Üldse mõjub silmalääts koos luubiga nagu lühikese fookuse kaugusega liitobjektiiv.

1. Seleta joon. 112 põhjal, kas tuleb valguspunkt asetada kumeramale luubile ligemale või kaugemale, et teda näha parimal nägemiskaugusel.

c. Luubi abil saadud ebakujutise MN ja eseme $m_1 n_1$ joon-suuruste suhet $\frac{MN}{m_1 n_1}$ nimetatakse luubi suurenduseks.

Luubi suurendus on (joon. 111)

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

Läätse valemist ebakujutise juhul

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

leiame ($a = 1, k = s$)

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

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

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

Niisiis luubi suurendus

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

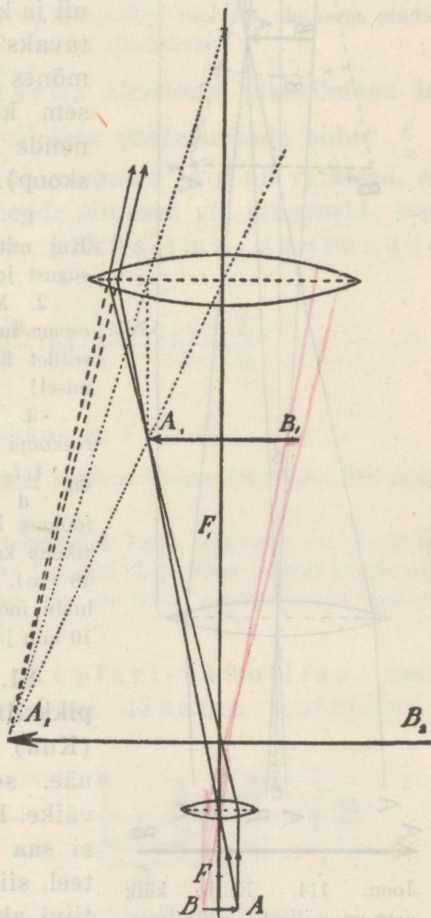
Väikese f puhul on suurendus ligikaudu $\frac{s}{f}$ (mispärast?).

Valemist näeme, et sama fookuse kaugusega luup annab kaugelenägijale palju suurema suurenduse kui lühinägijale.

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

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

80. **Mikroskoop.** Kiirte käiku lihtsamalt, kahest läätsest koosnevas mikroskoobis näitab joon. 113. Vaadeldav väike ese AB asetseb objektiivist veidi kaugemal tema fookuse kauguse ulatusest. Objektiivi mõjul tekib suurendatud tõeline kujutis A_1B_1 , mis täidab valgustatud keha aset, sest tema igast punktist lähevad kiired laiali homotsentriliselt. Kujutist A_1B_1 nagu eset läbi luubina mõjuva okulaari vaadeldes näeme suurendatud ebakujutist A_2B_2 (kujutise A_2B_2 ehitamisel on tarvitatud abi kiirtena paralleel- ja peakiirt, mis tõeliselt puuduvad). Objektiiv ja okulaar asetsevad ühisest seest mustaksvärvitud torus, mille kaugust läbinähtavale alusele paigutatud esemest võib muuta. Vaatleja reguleerib kaugust nii, et ta näeks suurendatud ebakujutist A_2B_2 oma parimal nägemiskaugusel. Mikroskoop suurendab eseme vaatenurka veel rohkem kui luup, mille tõttu eseme peenused on hästi nähtavad.

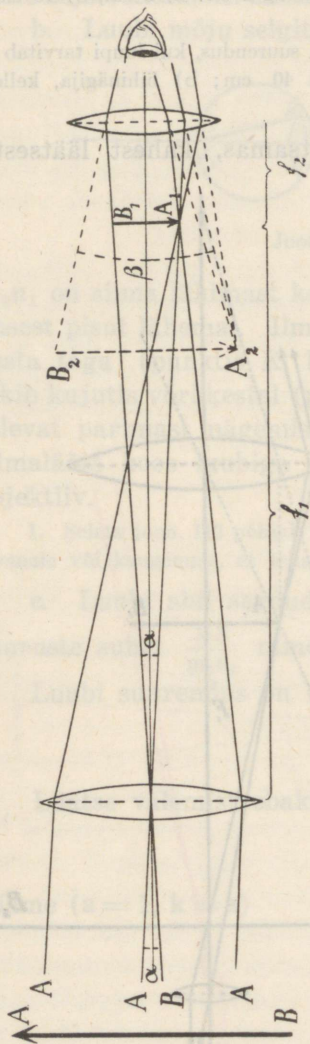


Joon. 113. Kiirte käik mikroskoobis.

Suurema suurenduse saamiseks on tarvis võtta lühi- kase fookuste kaugusega. Nende juures esinevad optilised vead on

aga väga tunduvad ja neid tuleb kõrvaldada. See on võimalik ainult mitme läätsse kombinatsiooni teel (liitobjektiivid). —

Mikroskoobi kogusuurendus määratakse harilikult katseliselt. — Teoreetiliselt võib mikroskoobiga veel lahus näha kaht punkti, mille kaugus on $\frac{1}{4000}$ mm, tähendab, ka mikroskoobi eraldusvõimel on piir. Erilistel tingimustel (mustal foonil ja külje pealt valgustades) võib nähtavaks teha osakeste olemasolu (näit. mõnes lahuses), mille läbimõõt on väiksem kui $\frac{1}{4000}$ mm, kuid pole võimalik nende kuju ära tunda (ultramikroskoop).



Joon. 114. Kiirte käik astronoomilises pikksilmas.

1. Kas on joonise 113 proportsioonid õiged? Kui mitte, mispärast on siiski tarvitatud niisugust joonist?

2. Mispärast on mikroskoopimisel tähtis eseme tugev valgustus? Seleta valgustamise sisseasetet läbipaistva ja läbipaistmatu asja vaatllemisel!

3. Teoreetiliste arutluste põhjal võib mikroskoopi vaadelda kui luupi, mille fookuse kaugus on $\frac{f_1 f_2}{d}$, kus f_1 ja f_2 on objektiivi ja okulaari fookuse kaugused ning d nende fookuste vastastikune kaugus mikroskoobi torus (harilikult 16—18 cm). Arvuta valemi põhjal mikroskoobi kui luubi fookuse kaugus, kui $f_1 = 5$ mm ja $f_2 = 10$ mm ja läätsede kaugus 16 cm!

81. Astronoomiline (Kepler'i) pikksilm. a. Väga kaugel seisva eseme (Kuu) peenusi või eset ennast meie ei näe, sest vastav vaatenurk on liiga väike. Et kaugeloleva eseme vaatenurka ei saa suurendada eseme lähendamise teel, siis tekitatakse kumerläätses-objektiivi abil esemest väike tõeline kujutis ja vaadeldakse seda ligidalt läbi okulaari kui luubi. Vaatenurk seejuures suureneb.

Kiirte käiku kahest kumerläätses koosnevas astronoomilises pikksilmas näitab joon. 114. Kauge eseme AB punktist A

tulevad kiired on isekeskis paralleelsed, ka punktist B tulevad kiired on omavahel paralleelsed, kuid A-st ja B-st tulevad kiired moodustavad väikese nurga α , eseme AB vaatenurga. Objektiivil mõjul tekib eseme AB väike tõeline ümberpööratud kujutis A_1B_1 , mida vaatleme iseseisva valgusallikana. Läbi okulaari näeb vaatleja eset suuremana kui palja silmaga (vaatenurk $\beta > \alpha$), nagu oleks pikksilm eset ligemale toonud.

1. Mispärast nimetame kirjeldatud pikksilma astronoomiliseks?
2. Kas suuremas pikksilmas paistavad kinnistähed suurema ulatusega pindadena? Kui mitte, missugune kasu on siis suurest objektiivist?

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

Astronoomilistel vaatlustel on nurgad α ja β nii väikesed, et nurkade asemele võib asetada nende siinused või tangensid; seetõttu on astronoomilise pikksilma suurendus

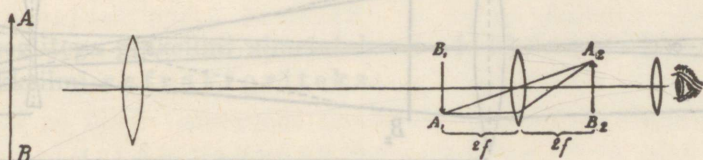
$$\frac{\beta}{\alpha} = \frac{\frac{\beta}{2}}{\frac{\alpha}{2}} = \frac{\tan \frac{\beta}{2}}{\tan \frac{\alpha}{2}} = \left(\frac{A_1B_1}{2} : f_2 \right) : \left(\frac{A_1B_1}{2} : f_1 \right) = \frac{f_1}{f_2}.$$

Astronoomilise pikksilma pikkus on $f_1 + f_2$.

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

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

82. **Maapikksilmad.** a. Kepleri-tüübilise maapikksilma saame astronoomilisest, kui lisame kolmanda



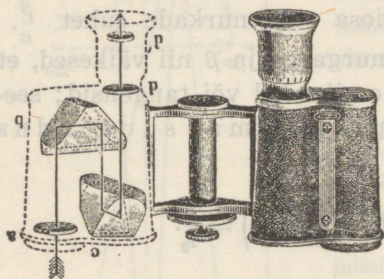
Joon. 115. Kujutise ümberpööramine maapikksilmas.

lääts, mis objektiivi ümberpööratud kujutise pöörab päripidiseks. Kolmas lääts asetatakse objektiivis tekkinud tõelise kujutise A_1B_1 (joon. 115) taha nii, et A_1B_1 seisaks tema

fookuse kahekordsel kaugusel. Siis tekib teisel pool läätse fookuse kahekordsel kaugusel niisama suur päripidine kujutis A_2B_2 ja seda vaadeldakse okulaari kui luubi läbi.

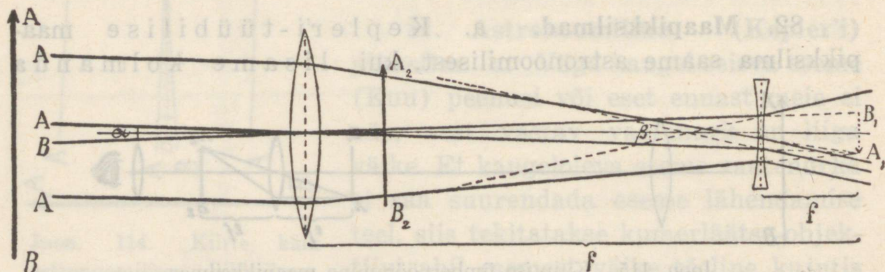
Harilikult tarvitatakse kujutise ümberpööramiseks ühe kaksikumerläätsse asemel kaht tasakumerläätsse. Suurema toru otsa on kinnitatud objektiiv; peenemas torus, mis liigub suuremas, asetsevad okulaar ja ümberpööravad läätsed. Tervet optilist süsteemi peenemas torus nimetatakse ka lühidalt pikksilma okulaariks.

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



Joon. 116. Prismabinokkel.

*b. Prismabinokli (joon. 116) läätsed on niisamasugused kui astronoomilise pikksilma omad. Kujutise ümberpööramine sünnib neljakordse täieliku sisepeegelduse teel kahes prisma (ühes prisma pöörduv ümber kujutise parem ja vasak pool, teises prisma ülemine ja alumine pool). Kiired lähevad kolm korda läbi toru ja seetõttu on toru lühike. Prismabinokliga vaatlemisel on reljeefsusetunne suurendatud, sest objektiivide vaheline kaugus on suurem kui silmaterade normaalne kaugus teineteisest. Reljeefsusetunne ulatub üle 250-meetrilise kauguse.



Joon. 117. Kiirte käik hollandi pikksilmas.

c. Hollandi (Galilei) pikksilmas on objektiiviks kumerlääts, okulaariks nõguslääts.

Mõlemate läätsede fookused langevad ligikaudu ühte, kuid okulaar asetseb objektiivi ja ühise fookuse vahel.

Kiirte käiku näitab joon. 117. Enne tõelise kujutise A_1B_1 tekkimist hajuvad vaadeldava eseme punktist A tulevad kiired okulaaris ja langevad pisut laialimineva kimbuna vaatleja silma. Suurendatud vaatenurga tõttu ($\beta > \alpha$) näeb vaatleja võrdl. suurt päripidist kujutist A_2B_2 .

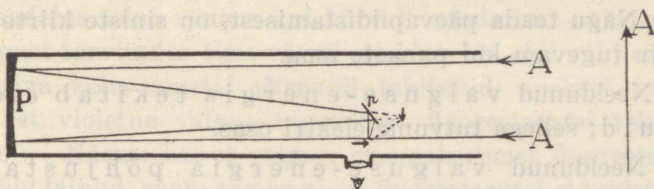
Hollandi pikksilma suurendus on nagu astronoomilise oma $\frac{f_1}{f_2}$, kuid pikkus $f_1 - f_2$.

Kaht hollandi pikksilma tarvitatakse kui teatribinoklit; selle suurendus on ~ 3 -kordne.

Maapikksilmade juures on peale suurenduse ja kujutise heleduse tähtis vaatevälja suurus ning ka käepärasus. Kepler'i-(prismabinokli-)tüübilisel pikksilmal on võrdlemisi suur vaateväli ja temaga võib ka suurt suurendust saada; Galilei-tüübiline annab heledama kujutise, kuid temaga pole võimalik suurt suurendust saada ja sama suurenduse puhul on vaateväli väiksem kui Kepler'i-tüübilisel.

***83. Peegeteleskoop.** Peegeliteleskoobis täidab lääts-objektiivi aset nõguspeegel (aberratsiooni vältimiseks paraboolne), mis tekitab eseme väikese tõelise ümberpööratud kujutise; seda kujutist vaadeldakse okulaari kui luubi läbi.

Seleta kiirte käiku joonises 118 kujutatud peegeliteleskoobis.



Joon. 118. Kiirte käik peegeliteleskoobis.

Peeglitega pikksilmi nimetatakse reflektoriteks, peeglita pikksilmi refraktoriteks.

Kaun Spektrikiirte avaldused.

84. Valgus kui kiirgav energia. Valgus on teatav energia liik. Ta avaldab mitmesugust mõju (peegeldunud või läbiläinud valgus võtab oma energia enesega kaasa). Igapäevasest elust

teame, et see on tõeliselt nõnda, näit. mõjuvad valguskiired nägemisorganisse, soojendavad kehi, tumestavad fotoplaati jne. Sellepärast võib rääkida valgusest kui kiirgavast energiast. Neeldunud kiirgava energia mõju võib olla mitmesugune:

a. Neeldunud valguse-energia ärritab nägemisorganit. Spektri vaatlemisel võime tähele panna, et kollased ja helerohelised kiired avaldavad seda mõju kõige tugevamini.

b. Neeldunud valguse-energia soojendab kehi; allpool näeme, et punased kiired tugevamat soojendavat mõju avaldavad kui violetsed.

1. Päikesekiirte teele asetatud klaasplaat ei soojene tunduvalt, kuid niisamaugune nõetatud klaasplaat soojeneb tunduvalt. Seleta seda nähtust!

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

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

c. Neeldunud valguse-energia avaldab keemilist mõju. Valguse-energia mõjul lahustab taimede klorofüll õhus oleva CO_2 ; valgus lahustab fotoplaadis olevat broomhõbedat. Nagu teada päevapildistamisest, on siniste kiirte keemiline mõju tugevam kui punaste oma.

d. Neeldunud valguse-energia tekitab elektrilanguid; sellega tutvume elektri osas.

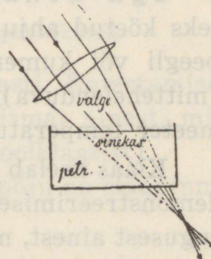
e. Neeldunud valguse-energia põhjustab luministsentsi (§ 85).

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

Näiteks väävlisbaarium (väävlisstrontsium jne., — ained, millest tehakse nn. helenduvad värvid) pärast valgustamist päikese- või elektrileeklambivalgusega helendub pikemat aega pimedas toas. Mõne teise soola (baariumplatinatsüanüüri) ja vedeliku (petrooleumi, fluorestseiniilahuse) luministsents kaob kiiresti pärast langeva valguse kustumist. Luministsentsi, mis kestab pikemat aega pärast langeva valguse kustumist, nimetatakse fosforestsentsiks, kiiresti kustuvat luministsentsi fluorestsentsiks.

Fosforestsentsi demonstreerimiseks valgustame fosforestseerivate ainetega (helenduvate värvidega) täidetud klaastorusid päikesepaistel või tugeva elektrilambiga ja vaatleme neid pimedas toas.

Fluorestsentsi demonstreerimiseks asetame pimedas toas fluorestseeriva aine (fluorestseini-, eosiini-, klorofüll-, hiniinsulfaadi-, uraanklaasi) projektsioonlaternakiirte koonusesse või päikesepaistel läätsega koondatud päikesekiirte koonusesse (joon. 119).



Joon. 119. Petrooleumi fluorestsentsi demonstreerimine.

b. Me paneme tähele, et fluorestseeruvail kehil on vastu valgust vaadates teine värvus kui kõrvalt vaadates. — Mitmevärvilist valgust tarvitades (kas värviliste klaaside abil või hoides fluorestseeriva keha mustal ekraanil tekitatud spektri värvides) näeme, et violetne valgus tugevamat fluorestsentsi tekitab kui punane. — Näeme ka, et valgus, mis paksemast fluorestseerivast kihist läbi läinud, enam samas aines fluorestsentsi ei tekitata. Nähtavasti on siis fluorestsentsi tekitavad kiired täielikult neeldunud.

Luministsentsvärvusi võrreldes luministsentsi tekitava valguse värvusega paneme tähele, et luministsentsvärvus on enamasti väiksema murdumusega kui teda põhjustava valguse värvus (Stokes'i seadus).

86. Mittenähtavad spektrikiired. a. Järele katsudes värviliste spektrikiirte soojuslikku mõju väga tundliku termomeetriga (termosambaga, radiomeetriga), leiame, et soojuslik mõju tõuseb järjest spektri violetsest otsast alates punase poole ja on veel märgata punase otsa taga (Herschel a. 1800). Niisiis peitu-

vad valges valguses ka mittenähtavad nn. ultrapunased kiired, mis murduvad veelgi vähem kui äärmised nähtavad punased kiired, ja mis avaldavad iseäranis soojuslikku mõju.

Ka ultrapunaste kiirte kohta on kehtivad peegeldumis- ja murdumisreed. Seda näitab juba soojuse kogunemine nõguspeegli ja kumerläätse tulpunkti.

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

Klaas neelab ultrapunaseid kiiri tugevasti. Ultrapunaste kiirte demonstreerimiseks on kasulik tarvitada läätse ja prismat niisugusest aimest, mis neid kiiri tugevasti ei neela (kivisoolast).

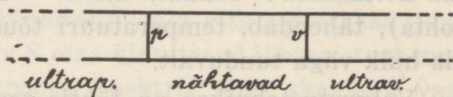
Mõned ained neelavad nähtavaid kiiri, lasevad aga ultrapunaseid hästi läbi. Asetame näiteks läätse abil koondatud päikesekiirte teele paralleelsete seintega klaasanuma joodilahusega väävelsüsinikus, mis nähtavat valgust läbi ei lase, siis võime fookuse kohal kehi süüdata. — Udu neelab tugevasti nähtavaid kiiri, läseb aga ultrapunaseid kiiri läbi; seetõttu on võimalik uduse ilmaga fotografeerida ümbruskonda erilistel plaatidel, tekitades kujutise ultrapunaste kiirte abil. Seda võtet kasutatakse sõjatehnikas, kus luurajad liginedes vastase positsioonile udu ajal pildistavad neid üksikasjaliselt.

b. Asetame näit. valge, kuid roheliselt fluorestseeruva ainega kaetud pikema pabeririba piki spektrit ekraanile nii, et spekter osalt langeks ribale, osalt ekraanile. Märkame, et paber heidab tagasi kõik kiired punastest kuni rohelisteneni nagu harilik ekraangi; sinises ja violetses valguses ta fluorestseerub aga ja paistab rohekana. Kuna nähtav spekter lõpeb harilikul ekraanil violetse otsaga, näeme, et pabeririba kiirgab rohelist fluorestsentsvalgust veel spektri violetse otsa taga. Järelikult peituvad valges valguses ka mittenähtavad nn. ultraviolettkiired, mis murduvad rohkem kui äärmised nähtavad violettkiired ja tekitavad tugeva fluorestsentsi.

Asetame spektri kohale fluorestseeruva riba asemele foto(ilmutamis-)pabeririba, märgime pliatsiga nähtava spektri piirid ja ilmutame paberi pärast valgustamist. Siis näeme, et punane

valgus ei ole avaldanud paberisse tunduvat keemilist mõju; teiste värviliste kiirte mõju spektri punasest otsast violetse otsa poole on aga järjest suurenenud ja on kõige suurem violetse otsa taga (paber on tumenenud seal kõige rohkem). Sellest järeldame, et ultraviolettkiired avaldavad tugevat keemilist mõju.

Niisiis koosneb spekter nähtavaist, ultrapunastest ja ultraviolettkiirtest (joon. 120), mille vahel ei ole sisulist vahet.



Joon. 120. Spektri kiired.

Harilik klaas neelab ultraviolettkiiri tugevasti. Katsetamisel ultraviolettkiirtega tuleb tarvitada läätse ja prismat aimest, mis ultraviolettkiiri hästi läbi laseb (kvartsist, uvioklaasist).

Päikesevalguses peituvate ultraviolettkiirte mõju on maapinna ligidal võrdlemisi nõrk, sest õhk neelab neid.

e. Ultraviolettkiirte on praktiline tähtsus. Arstid tarvitavad neid mitmesuguste haiguste ravimiseks. Selleks on konstrueeritud isesugune lamp (kõrgustiku-päike), mille valgusallikas (elavhõbeda-leeklamp) kiirgab tugevaid ultraviolettkiiri. Inimese keha pruunistub ultraviolettkiirte mõjul; silmad ei kannata neid, seepärast silmi kaitstakse nende hävitava mõju eest paksude klaasprillidega. — Bakteritele avaldavad ultraviolettkiired surmavat mõju.

Väga paljud ained fluorestseeruvad nõrgalt, nii et me seda harilikus valguses ei märkagi, sest nähtav valgus väsitab ja pimestab silma. N. a. n. a. l. ü. s. i. m. i. s. l. a. m. p. i. d. e. s. on tugevaid ultraviolettkiiri kiirgav valgusallikas kaetud isesuguse tumeda klaasiga, mis neelab kõiki nähtavaid kiiri, kuid hästi läbi laseb ultraviolettkiiri. Segava nähtava valguse puudusel on ka nõrk fluorestsentsvalgus hästi näha. Olenevuses keemilisest koosseisust fluorestseeruvad erisugused ained niisuguse lambi valguses erivärvustes. Niisuguse lambi abil võib näiteks toiduainete võltsimist ära tunda, võib kindlaks teha, kas äse on tehtud loomulikust või kunstainest (loomulik ja kunstsiid, loomulik ja kunstsarv, loomulik ja kunsthammas jne.), kas värviline paberraha (postmark) on õige või võltsitud, kas maal on originaalne või mitte, võib ka eseme peenusi ära tunda, mida vaatlemisel nähtavas valguses ei ole võimalik näha.

87. Kiirgamise sõltuvus temperatuurist. a. Juba harilikus temperatuuris saadavad kehad kiirgavat energiat, kuid mitte nähtavate, vaid ainult väikese murdumusega ultrapunaste kiirte (soojuse) näol. Temperatuuri tõusmisel tulevad juurde suurema murdumusega ultrapunased kiired ja ~ 5000 juures (punane hõõgumine) nähtavad punased kiired. Edasikuumendamisel tuleb juurde ikka tugevamini murduvaid kiiri (kollased, rohelised jne.), kus-

juures ka ultrapunaste kiirte intensiivsus tõuseb, ja $\sim 1200^{\circ}$ juures on keha valgel hõõgumisel, st. saadab kõiki nähtavaid kiiri. Edasikuumendamisel kasvab ka ultraviolettkiirte hulk.

b. Teoreetilised arutlused näitavad, et kiirgava energia hulk on võrdeline keha absoluutse temperatuuri neljanda astmega (Stefan-Boltzmann'i seadus, kehtiv vaid absoluutselt musta keha kohta), tähendab, temperatuuri tõusmisel kasvab kiirgava energia hulk väga tunduvalt.

Valgustustehnikas on tähtis teada, missuguse osa energiast kiirgab keha nähtava valguse näol, sest isegi keha kõrge hõõgumistemperatuuri korral avaldub kaugelt suurem osa kiirgavast energiast soojusena, kuid temperatuuri kasvades muutub see vahekind ikka rohkem ja rohkem valguse kasuks. Temperatuuri tõusmisel nihkub energia kiirgamise maksimum ultrapunastest kiirtest ultravioletsete poole (Wien'i seadus). Näiteks saadab kiirgamiseaduste põhjal elektri-hõõglambi hõõgniit 1875° puhul umbes kaks korda (100% võrra) rohkem nähtavaid kollaseid kiiri kui 1800° puhul. Sellest selgub termiliste valgusallikate kõrge temperatuuri tähtsus.

Järgmised arvud näitavad, mitu protsenti tuntud valgusallikate helendumisel vabanevast energiahulgast moodustab nähtava valguse näol kiiratud energia:

petrooleumileek (normaalpõleti)	$\sim 1,5\%$
gaasileek (sukaga)	$\sim 1,6\%$
elektri-hõõglamp	$\sim 4,6-6,3\%$
elektrileeklamp	kuni 10%

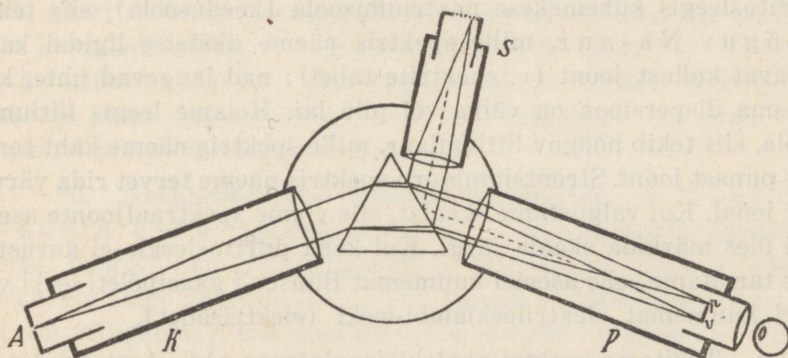
Termilised valgusallikad ei ole ökonoomsed ja paremaid tulemusi pole loota, sest hõõgniite pole võimalik rohkem kuumendada ($\sim 3000^{\circ}$), — nad sulavad. Paremaid resultate võib loota valgustustehnikas huumvalguse arenemisel (hõõguvad hõren-datud gaasid). Seni on korda läinud nn. elektri-huumlampe valmistada, mis vähe soojenevad ning väga vähe elektrienergiat tarvitavad; huumlampide valgustustugevus on aga (lugemiseks) liiga nõrk. Reklaami jaoks tarvitatakse elektri mõjul kiirgavate gaasidega silindrilisi lampe.

Spektri tüübid; spektraalanalüüs.

88. **Spektraalaparaat.** a. Valgust võime analüüside (määrata kiirte koosseisu) valgust spektriks lahutada. On valgusallikas küllalt tugev (el.-leeklamp), siis võime ta asetada projektsioonlaternasse ja spektrit nähtavaks

teha objektiivselt suuremale hulgal samal ajal. On aga valgusallikas nõrk või tahame spektrit täpsemalt uurida, siis tuleb spektrit vaadelda subjektiivselt isesuguse spektraalaparaadiga.

Kirjeldame Kirchhoffi ja Bunseni spektraalaparaadi ehitust. Ta koosneb alusele kinnitatud prismast ja kolmest torust; tema optilist süsteemi ja kiirte käiku näitab joon. 121. Kollimaatortoru K otsa kinnitatud pilu ette asetatakse uuritav valgusallikas A. Skaalatoru S otsa kinnitatud läbipaistvat mm-skaalat valgustatakse väljastpoolt. Spektrit ühes skaalaga vaadeldakse läbi toru P.



Joon. 121. Kiirte käik spektraalaparaadis.

*b. Pilu asub kollimaatortoru teises otsas oleva läätse fokaalpinnal ja läbi pilu torusse langevad laialiminevad kiired on prismale langedes isekeskis paralleelsed. Järelikult on ka samavärvilised kiired pärast murdumist prismas isekeskis paralleelsed. Toru P (kujutab lühikest astronoomilist pikksilma) otsas asuv kumerlääts kogub prismast tulevad värvilised kiired oma fokaalpinnal, kus tekib väike tõeline spekter. Läbi toru P teise otsa kinnitatud okulaari näeb vaatleja spektri suurendatud ebakujutist. — Toru S on asetatud nii, et tema telg moodustab prisma pinnaga sama nurga kui pikksilma P telg. Skaala asub toru S teises otsas oleva kumerlääts fokaalpinnal. Igast valgustatud jaotuskriipsust väljuvad kiired langevad paralleelse kimbuna prisma välispinnale ja sealt peegeldudes pikksilma P objektiivile. Seetõttu tekib ka skaala tõeline kujutis pikksilma objektiivi fokaalpinnal ja vaatleja näeb ühes spektriga ka skaalat ning võib üles märkida, mis-

sugustel skaala kohtadel ilmuvad teatavad värvused.

89. **Kiirgamis- ehk emissioonspekter.** a. Asetame spektroskoobi pilu ette hõõguva tahke keha (elektrihõõglambi hõõgniit, gaasileegi hõõgsukk), petrooleumilambi või küünlaleegi, siis näeme pidevat spektrit, milles ükski värvus ei puudu. Küünlavi petrooleumilambileek on küllastatud hõõguvatest söekübemeketest.

b. Asetame spektroskoobi pilu ette piiritusleegi. Siis näeme nõrka pidevat spektrit, sest piiritusleek on valgusnõrk. Hoiame piiritusleegis kübemekese naatriumisoola (keedusoola), siis tekib hõõguv Na-aaur, mille spektris näeme üksteise ligidal kaht teravat kollast joont (v. spektrite tabel); nad langevad ühte, kui prisma dispersioon on väike või pilu lai. Hoiame leegis liitiumisoola, siis tekib hõõguv liitiumiaur, mille spektris näeme kaht teravat punast joont. Strontsiumiauru spektris näeme tervet rida värvilisi jooni. Kui valgustame skaalat, siis võime spektraaljoonte asendid üles märkida skaala järgi. Kui keha piiritusleegis ei aurustu, siis tarvitame selle asemel kuumemat Bunsen'i gaasipõleti leeki või veel kuumemat elektrileeklambi-leeki (elektrisädet).

c. Tekitame spektri projektsioonlaterna abil. Asetame laternas oleva leeklambi alumisele söepulgale väikese metalli-, näit. vasetüki, siis tekib leegis metalli (vase) hõõguv aur. Nihutame söepulgad üksteisest niikaugele, et kiiri saadab kondensaatorile peaausjalikult leegis hõõguv aur (mitte söepulga hõõguvad otsad), siis näeme ekraanil pideva spektri asemel üksikuid heledaid teravaid värvilisi jooni (vase-auru juures nimelt spektri rohelises osas). Asetame söepulgale vase asemel mõne teise metalli, näit. alumiiniumi, siis näeme ekraanil ka ainult üksikuid teravaid heledaid värvilisi jooni, kuid nende arv ja värvus on teine.

Laseme projektsioonlaterna abil tekitatud hõõguva auru spektri langeda fluorestseeruvale ekraanile, siis näeme spektraaljooni ka spektri ultravioletses osas; veel rohkem jooni võime kindlaks teha ultravioletses osas fotopaberi abil. Ka spektri ultrapunases osas on spektraaljooned kindlaks tehtud.

d. Asetame spektroskoobi pilu ette klaastoru hõrendatud gaasiga ja paneme gaasi elektrivoolu abil hõõguma. Spektris näeme üksikuid teravaid jooni või laiemaid mitteteravate

äärtega ribasid. Vesinik annab ühe punase, ühe rohelise, ühe sinise ja ühe nõrga violetse joone (vt. spektrite tabel), lämmastik ribade rea.

Kokkuvõttes: hõõguvad tahked ja vedelad kehad annavad pideva spektri, hõõguvad aaurud ja gaasid katkelise (joon- ehk ribaspektri).

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

Bunsen ja Kirchhoff leidsid (a. 1859), et sama auru või gaasi spektraaljooned ilmuvad alati skaala samadel jaotustel, ja järeldasid sellest, et igal aurul või gaasil on oma pärane spekter. On kõigi gaaside ja aurude spektrijooned skaala järgi üles märgitud, siis võib iga gaasi või auru tema spektri põhjal kindlaks määrata.

90. Neeldumis- ehk absorptsioonspekter. a. Tahke ja vedela keha neeldumisspekter. Asetame spektroskoobi pilu ette valgusallika (el.-hõõglambi), siis saame pideva spektri. Paneme valge valgusallika ja pilu vahele värvitu läbipaistva keha (vesi, aknaklaas), siis muutub terve spekter nõrgemaks. Võtame aga värvilise tahke või vedela keha, mis neelab mõnda värvust rohkem kui teist, siis tekivad spektris rohkem neeldunud värvide kohal tumedad ribad või kaovad suuremad spektriosad. Niiviisi saadud spektreid nimetatakse neelavate kehade neeldumis- ehk absorptsioonspektriteks. Neelava keha paksema kihi puhul on neeldumisribad tumedamad.

Asetame valge valgusega valgustatud spektroskoobi pilu ette näit. kaali-hüpermangaanikumi vedela lahuse (violetse), siis näeme spektris viit neeldumisriba. Võtame lahuse paksema kihina või rohkem kontsentreeritult, siis on ribad tumedamad ja laiemad. Veel paksema kihi juures ühinevad ribad ja suurem spektriosa on tume. Samal viisil võib vaadelda ka teiste kehade kihi paksuse ja vedelikkude kontsentratsiooni mõju ning üles märkida neeldumisribade kohad skaalal.

Kui neeldumisspektreid vaadelda objektiivselt projektsioonlaternaga ja fluorestseeruva ekraaniga, siis võib neeldumisribasid tähele panna spektri ultravioletses osas. Ka ultrapunases osas on neeldumisribade olemasolu kindlaks tehtud.

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



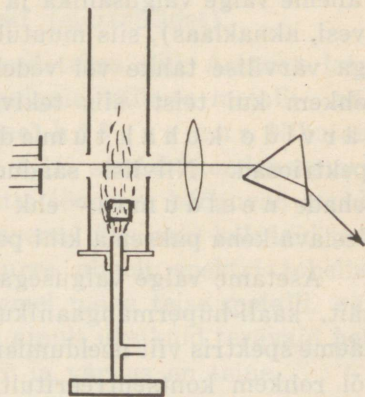
Joon. 122.

Robert Kirchhoff (1824—1887).

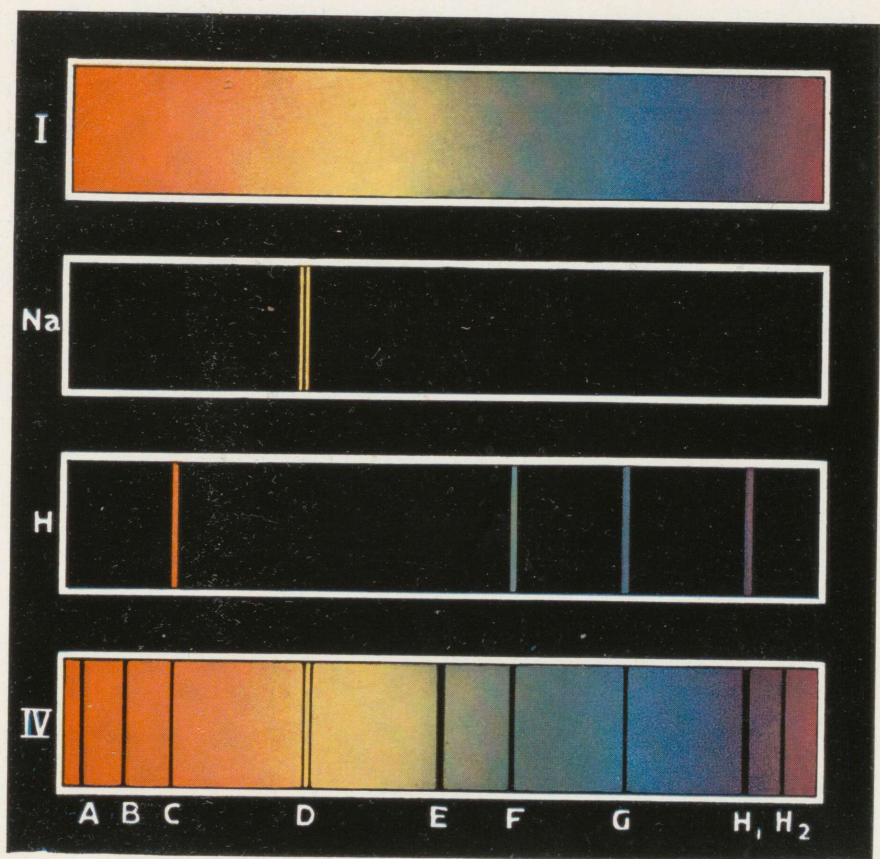
ilmuvad täpselt spektri samadel kohtadel, kus nende ainete kiirgamisjooned kiirgamisspektriteski. Ta leidis (a. 1860) absorptsiooniseaduse, mis kokkuvõttes kõlab järgmiselt: iga hõõguv auru või gaasi neelab (peasjalikult) neidkiiri, mista ise kiirgab samas temperatuuris.

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

c. Na-auru neeldumisspektrit näitame järgmiselt: Asetame § 55 kirjeldatud katses pilu taha plekist silindriga kaetud Bunsen'i gaasileegi nii, et valgus läbi kahe diametraalse avause silindris läbi pääseks (joon. 123). Gaasileek ei mõjasta oluliselt valget valgust ja ekraanil tekib pidev spekter. Paneme tükikese naatriumi metallist lusikale ja pistame ta leeki läbi silindris allpool asuva avause (joonisel neli-



Joon. 123. Na-neeldumisspektri demonstreerimine.



Spektrite tabel.

- I — pidev spekter,
- Na — naatriumiauru kiirgamisspekter,
- H — vesiniku kiirgamisspekter,
- IV — päikese spekter Fraunhofer'i joontega.

nurkne). Naatriumi aurutamisel läbib laterna valgus hõõguvat Na-auru ja ekraanil ilmub Na-neeldumisjoon.

91. **Päikese spekter.** Fraunhofer pani tähele (a. 1814) päikesevalguse spektris tumedaid jooni ja märkis silmapaistvamad neist tähtedega A—H (vt. spektrite tabel). Suuremate spektroskoopidega võib päikese spektris kindlaks teha üle 10 000 Fraunhofer'i joone (päevapildistamise abil).

Fraunhofer'i jooni võime vaadelda kaht viisi: a. subjektiivselt, kui juhime spektraalaparaadi kollimatortoru taeva poole ja teeme pilu hästi kitsaks; b. objektiivselt, kui juhime pimedasse tupp peegli abil päikesekiirte kimbu horisontaalses sihis pilule ja tekitame ekraanil spektri. Objektiivses päikese spektris võib näha Fraunhofer'i jooni ka ultravioletses osas fluorestseeruva ekraani abil. Ka võib spektrit fikseerida fotopaberil. Fraunhofer'i jooni on kindlaks tehtud ka spektri ultrapunases osas.

Alles mõnikümmend aastat pärast Fraunhofer'i leidust selekti absorptsiooniseaduse põhjal Fraunhofer'i joonte tekki- mist järgmiselt: Päikese hõõguv südamik, fotosfäär, kiirgab valget valgust, tähendab, kõiksuguseid kiiri (sellest ei või järeldada, et ta on tahke või vedel, sest suure rõhumise puhul annavad ka gaasid ja aurud pideva spektri). Päikese hõõguv aurude ja gaaside atmosfäär, kromosfäär, neelab oma koosseisule vastavalt teatavad värvused, mille asemele ilmuvad tumedad jooned. Et Fraunhofer'i kahekordne joon D ilmub täpselt Na-auru kiirgamispektri heleda joone kohal, see näitab, et Päikese kromosfääris leidub hõõguvat Na-auru. Jooned C, F, G langevad täpselt ühte vesiniku kiirgamisjoontega; sellest järgneb, et kromosfääris on hõõguvat vesinikku. Fraunhofer'i jooni tuntud kiirgamisjoontega võrreldes on kindlaks tehtud, et suurem osa meile tuntud elemente leidub ka Päikese kromosfääris, millest järgneb, et Päikesel on niisamasugune ainekoosseis kui Maakeral. Mõned neeldumisjooned päikese spektris, mis meile tuntud kiirgamisjoontega ühte ei langenud, näitasid, et Päikese kromosfääris on mingisugune tundmatu element, mida nimetati heeliumiks. Hiljem (30 a.) leiti heeliumi (gaasi) ka meie maakera atmosfääris.

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

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

Astronoomias määratakse taevakehade aineeline koosseis ainult nende spektrite põhjal. Valgusnõrkade taevakehade spektreid uuritakse fotograafimise teel. Taevakehale juhitakse pikksilm, mis kogub suure objektiivi tõttu rohkesti valgust selle fookuse kohale asetatud pilule. Okulaari asemel kinnitatakse pikksilma külge pimekamber, milles prisma ja läätse mõjul tekib spekter kõigi värviliste kiirte suhtes tundlikul fotoplaadil. Plaadi ilmutades saame kätte taevakeha spektri.

Spektraalanalüüs on tähtis ka taevakehade liikumise määramisel (§ 99) ja uuemal ajal isegi aatomite ehituse uurimisel.

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

Spektraalanalüüsi kasutatakse sageli toiduainete koosseisu määramisel, näit. nende võltsimise kindlakstegemisel; kohtulikel uurimustel määratakse spektraalanalüütilisel teel mitmesuguste jäänuste (vere) koosseis.

Ajalooost. Peeglid olid tuntud vanal ajal. Peegeldumise seadused olevat avastanud Eukleides (Aleksandria linnast, ~ a. 300 e. Kr.); Hero (Aleksandria linnast, ~ 100 a. e. Kr.) teadis, et valguse peegeldumisel kiire tee peeglile ja sealt vaatleja silma on kõige lühem.

Ka lihtsamad murdumisnähtused olid tuntud vanal ajal. Archimedes teadis (~212 e. Kr), et kaldu vaadates veega täidetud anuma põhi paistab kõrgemana, kui ta on tõeliselt. Juba Ptolemaios (~ a. 150) hakkas langemis- ja vst. murdumisnurki mõõtma ja võrdlema. Prillid olid tuntud 13. sajandil. Murdumise-seaduse avastas Willebrord Snell van Rojen (Snellius, 1581—1626), kuid laiemas ringkonnas sai seadus tuttavaks Descartes'i raamatu „Dioptrika“ kaudu (a. 1637). Mikroskoop on leiutatud Hollandis ~ a. 1590, hollandi pikksilm ~ a. 1608. Galilei Itaalias sai pikksilma leiutamisest kuulda ja ehitas selle iseseisvalt ning valmistas pärast kõige paremad tollaegsed pikksilmad, milledega ta uuris taevakehi. Astronoomilise pikksilma ehitust kirjeldas Kepler ~ a. 1611; esimesena ehitas selle riista Scheiner a. 1615; Scheiner seletas ka, et abiläätsega on võimalik pöö-

rata kujutist päripidiseks. Esimese peegelteleskoobi ehitas Newton a. 1668. Valguse kiiruse määras esimesena Olaf Römer Pariisi tähetorni assistendina; ta teatas oma leiutusest Pariisi akadeemiale a. 1675, kuid tema leiutust ei tunnustatud tol ajal akadeemia poolt õigeks. Akromaatilised läätsed on tarvitusel ~ a. 1750 alates. Optik Jos. v. Fraunhofer pani tähele a. 1814 päikese spektris tema järgi nimetatud jooni ja valmistas tol ajal kõige paremaid optilisi riistu. Alles Kirchhoff'i absorptsiooniseaduse leiutamise järel (a. 1860) oli võimalik seletada Fraunhofer'i joonte tekkimist. Esimesed päevapildid tegi Daguerre a. 1825. Prismabinokli ehituse printsiip leiutati ~ 1850, kuid unustati hiljem. Prof. Abbe leiutas prismabinokli printsiibi uuesti läinud sajandi lõpu poole ja Zeiss'i tehas hakkas neid esimesena ehitama.

* Füüsikaline optika.

Newton'i ja Huygens'i vaade valguse levimise kohta, Huygens'i lainetamisteooria.

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

Füüsikalises optikas seletatakse valgusenähtusi lainetamisteooriale toetudes ja püütakse selgusele jõuda valguse loomu kohta.

94. **Valguse emissiooniteooria ja lainetamisteooria.** a. Newton'i hüpoteesi järgi on valgus aine; valgusallikad kiirgavad valgusaine osakesi. Sellele hüpoteesile on ehitatud valguse emissiooniteooria. Valgusaine osakesed levivad suure kiirusega. Silma langedes nad ärritavad nägemiserku ja tekitavad valguseaistingut. Erivärvilise valguse osakesed on isesuurused.

Keskkondade lahtuspinnale langedes pörkavad nad osalt tagasi nagu elastsed kerakesed ja peegelduvad vastavalt peegeldumisseadustele, osalt tungivad teise keskkonda. Murdumise seletamine selle teooria järgi oli võimalik ainult eriliste oletuste põhjal, millest järgnes, et valguse kiirus optiliselt tihedamas keskkonnas on suurem kui hõredamas.

Murdumise seletamiseks oletas Newton, et ümbritseva keskkonna osakesed valguseosakesi ligi tõmbavad, ja seda tugevamini, mida tihedam on keskkond. Ühtlases keskkonnas ei takista see valguseosakeste sirgjoonelist liikumist, sest tõmbetungid on tasakaalus. Langeb aga valguseosake kahe keskkonna lahtuspinnale punkti O (joon. 124), siis avaldab seal tihedam keskkond II suuremat tõmmet, mille tõttu kiirusega OA, mis oli osakestel hõredamas keskkonnas I,

tuleb liita lahutuspinna risti tihedamasse keskkonda sihitud kiirus OB . Kiirust tihedamas keskkonnas kujutab siis suuna ja suuruse poolest OC , ja kiir ligineb tihedamas keskkonnas ristjoonele.

Tähistame kiirused $vst. c_1$ ja c_2 -ga, siis leiame kolmnurgast OAC $c_1 : c_2 = \sin \beta : \sin (180^\circ - \alpha) = \sin \beta : \sin \alpha$, tähendab, langemis- ja murdumisnurkade siinuste suhe on jääv (Snellius'e seadus on kehtiv). Et aga $\alpha > \beta$, siis $c_1 > c_2$, tähendab, selle teooria järgi on valguse kiirus tihedamas keskkonnas suurem.

b. Newton'i kaasaegse teadlase Huygens'i (höigens) hüpoteesi järgi on valgus lainetamine, mis levib maailma eetris suure kiirusega. Sellele hüpoteesile on ehitatud valguse lainetamisteooria (undulatsiooniteooria).

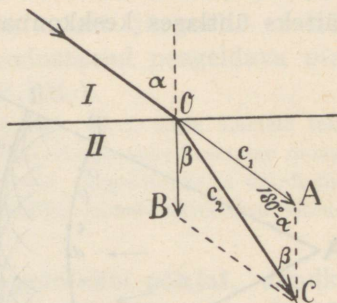
Silma langedes ärritavad valguselained nägemiserku ja tekitavad valguseaistingu. Keskkondade lahutuspinna langedes valguse lained osalt peegelduvad nagu teisedki lained, osalt tungivad aga teise keskkonda. Murdumise seletamine selle teooria järele nõuab, et valguse kiirus optiliselt tihedamas keskkonnas on väiksem kui hõredamas (§ 97).



Joon. 125.
Chr. Huygens (1629—1695).

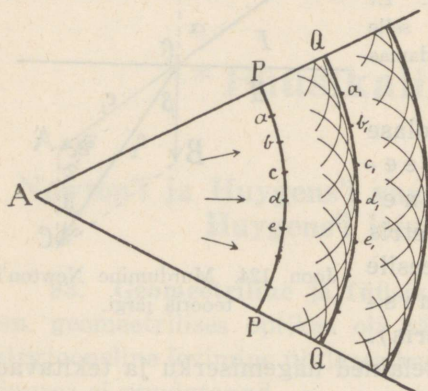
pärast seda, kui Fresnel katseliselt näitas (a. 1822), et valgusekiirte koosmõjul tekib teatud tingimustel tugevama valguse asemel pimedus (lainete interferentsinähtus, § 98), hakati Huygens'i teooriat üldiselt tunnustama. Viimase hoobi sai Newton'i teooria, kui Foucault (a. 1854) kindlaks tegi, et valguse kiirus on vees väiksem kui õhus (tihedamas aines väiksem!).

Maxwell'i järgi (~ a. 1870) kuuluvad valguselained nn. elektromagnetiliste lainete hulka, kuid on olemas terve rida teisi vaateid valguse loomu kohta. Viimasel ajal eelistatakse emissiooniteooriaid, kuigi teisendatud kujul.



Joon. 124. Murdumine Newton'i teooria järgi.

95. **Laine levimine Huygens'i printsiibi põhjal.** Lainete levimist seletas Huygens järgmiselt: laine iga osakest võib vaadelda kui iseseisvat lainetamistsentrit, millest levivad nn. elementaarained. On näiteks ühtlases keskkonnas laine jõudnud lähtekohast A (joon. 126) kerapinnani PP, siis levivad selle pinna ühesugustes faasides viibivatest punktidest a, b, c... elementaarained.

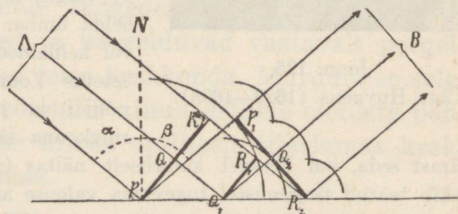


Joon. 126. Laine levimine.

Teatava aja jooksul jõuavad nad kerapindadeni, mille raadiused aa_1, bb_1, cc_1 jne. on võrdsed. Nende kerapindade osakesed võnguvad samades faasides. Matemaatiliselt võib tõestada, et kõigis elementaarlainete lõikepunktides hävib liikumine interfereerumise tõttu ja võnguvad ainult (samades faasides) osakesed $a_1, b_1, c_1 \dots$ elementaarlainete ühisel puutepinnal, s. o. kerapinnal QQ, mida nimetame laine frontiks. Niisiis levib laine front ühtlases keskkonnas kerapinnalt. On lainetamistsenter küllalt kaugel, siis võib laine fronti lugeda tasaseks. Laine front on laine kiirega (kulgemissuunaga) alati perpendikulaarne.

96. **Laine peegeldumine Huygens'i printsiibi põhjal.** Jõudku kaugest lainetamistsentrist A (joon. 127) tulev tasaline tasapinnani PQR; AP, AQ ja AR on selle laine kiired.

Seni kui elementaaraine jõuab punktist R peegeldava pinna punktini R_2 , jõuab elementaaraine punktist P kerapinnani raadiusega $PP_1 = RR_2$. Seni kui



joon. 127. Tasaline peegeldumine tasapinnast. elementaaraine jõuab punktist R_1 punktini R_2 , on elementaaraine jõudnud punktist Q_1 kerapinnani raadiusega $Q_1Q_2 = R_1R_2$. Samuti võiks ehitada elementaarlaineid ka teistest P ja R_2 vahelistest punktidest. Elemen-

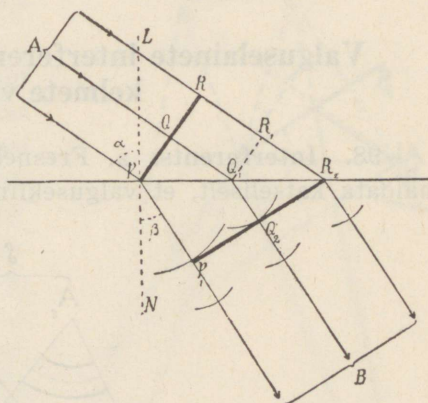
taarlainete ühine puutepind (laine front $R_2Q_2P_1$) on tasane (seda võib tõestada joonlõikude proportsionaalsuse abil). Punktidest R_2 , Q_2 ja P_1 elementaarlaineid edasi ehitades leiame, et laine liigub edasi suunas Q_1B .

Kolmnurkade PRR_2 ja PP_1R_2 ühtivusest järgneb, et langetava ja peegeldunud laine suunad moodustavad peegeldava pinnaga võrdsed nurgad ($\sphericalangle RRR_2P = \sphericalangle P_1PR_2$).

Veelainete levimist ja peegeldumist võib jälgida vaikes tiigis. Lainete tekitamiseks kasutame kivi, visates teda vette, peegeldavaks pinnaks kasutame mõnda laudtõket. — Toas katselaual võib veelainete levimist, peegeldumist ja murdumist demonstreerida erilise selleks ehitatud vanniga, milles lained tekitatakse vibraatori abil.

97. Laine murdumine Huygens'i printsíibi põhjal. Jõudku laine kaugest lainetamisestrist A (joon. 128) tasapinnani PQR .

Laine levimise kiirus esimeses keskkonnas (õhk) olgu v_1 ja teises v_2 , kusjuures näit. $v_1 > v_2$. Seni kui elementaarlaine jõuab punktist R murdajatasapinna punktini R_2 , jõuab elementaarlaine teises keskkonnas punktist P kerapinnani raadiusega PP_1 ($PP_1 : RR_2 = v_2 : v_1$). Seni kui elementaarlaine jõuab punktist R_1 punktini R_2 , jõuab elementaarlaine teises keskkonnas punktist Q_1 kerapinnani raadiusega Q_1Q_2 ($Q_1Q_2 : R_1R_2 = v_2 : v_1$). Samuti



Joon. 128. Valguse murdumine.

võiks ehitada teises keskkonnas elementaarlaineid, mis levivad teistest P ja R_2 vahel olevatest punktidest. Elementaarlainete ühine puutepind (front $P_1Q_2R_2$) on tasane (seda võib tõestada vst. joonlõikude proportsionaalsuse abil). Ehitades elementaarlaineid punktidest P_1 , Q_2 ja R_2 edasi, leiame, et murdunud tasalaine liigub edasi suunas Q_1B .

Joonisest näeme, et

$$\frac{v_1}{v_2} = \frac{RR_2}{PP_1} = \frac{\sin RPR_2}{\sin PR_2P_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta'}$$

tähendab, laine murdumisel on langemis- ja murdumisnurga siinuste suhe antud keskkondade (kiiruste) kohta jääv.

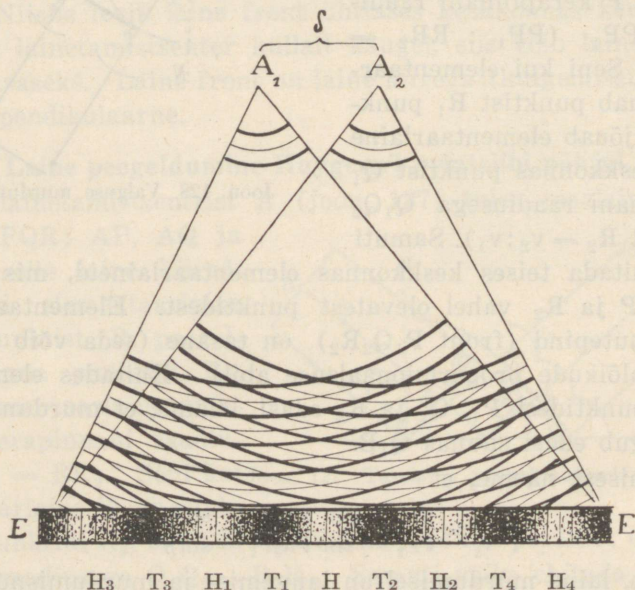
Et $v_1 > v_2$, siis ka $\sin \alpha > \sin \beta$ ja $\alpha > \beta$, tähendab, keskkonnas, milles laine kiirus on väiksem, ligineb laine kiir langemisristjoonele.

Nagu eespool antud tõestusest selgub, on valguse peegeldumise nähtus kooskõlas Huygens'i lainetamisteooriaga (langemisnurk on võrdne peegeldumisnurgaga), samuti ka murdumisnähtus (langemis- ja murdumisnurkade siinuste suhe on jääv, — murdunud kiir ligineb tihedamas keskkonnas, milles kiirus väiksem, langemisristjoonele). Valguse lainelise loomu lõplikuks tõestamiseks on aga tarvis veel näidata, et valgusekiired (lained) interfereeruvad ja teatavatel tingimustel hävivad.

1. Tõesta geomeetriliselt ja analüütiliselt, et murdumisseaduste järgi levinud kiir kulgeb kõige lühema ajaga tee valguspunktist (A) vaatleja silma (B).

Valguselainete interferents ja pikkus; õhukeste kelmete värvused.

98. **Interferents.** a. Fresnel'il (frenél) läks korda (a. 1822) näidata katseliselt, et valgusekiired teatavail tingimustel hävivad

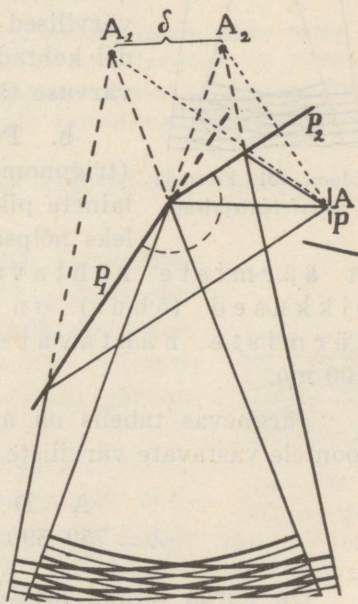


Joon. 129. Lainete interferents.

(valgus + valgus = pimedus), tähendab, et nad interfereeruvad nagu teisedki lained.

Saatku monokromaatilised valgusallikad A_1 ja A_2 (joon. 129) amplituudi, faasi ja pikkuse poolest täiesti ühesuguseid valguslaineid. Interfereerumise tõttu peavad siis ekraanil E ilmuma vaheldumisi heledad ribad H-ga märgitud kohtadel ja tumedad T-ga märgitud kohtadel. H kohtadel on käiguvahe 0 või poollaine pikkuse paarisarv ($A_1H - A_2H = 0$, $A_2H_1 - A_1H_1 = A_1H_2 - A_2H_2 = \lambda$ jne.). T kohtadel on käiguvahe poollaine pikkus või selle paaritu mitmekordne ($A_2T_1 - A_1T_1 = A_1T_2 - A_2T_2 = \frac{\lambda}{2}$, $A_2T_3 - A_1T_3 = A_1T_4 - A_2T_4 = \frac{3\lambda}{2}$ jne.). Kohtadel H ja T vahel peab valgustus seda tugevam olema, mida rohkem lainete käiguvahe lahku läheb poollaine pikkuse paaritu mitmekordsest.

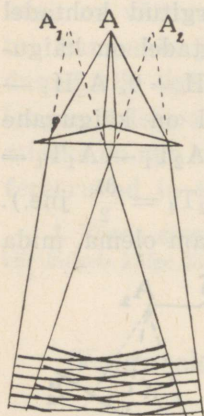
Et pole võimalik leida kaht valgusallikat A_1 ja A_2 , mis alatasa saadaksid välja amplituudi, faasi ja pikkuse poolest ühesuguseid laineid, siis kasutas Fresnel oma nn. peegli katses ühe valguspunkti ebakujutisi kahe peegli järgmiselt: ta juhtis (joon. 130) tugeva monokromaatilise valguse allikast A läbi pilu P nurkpeeglile P_1P_2 , mille nurk oli mõne minuti võrra vähem 180° -st. Siis peegeldusid kaks lainete süsteemi nii, nagu oleksid nende lähtekohtadeks pilu ebakujutised A_1 ja A_2 ; et peeglid moodustasid peaaegu tasapinna, siis olid A_1 ja A_2 teineteise ligidal. Kaugel ekraanil ilmusid paralleelsed vaheldumisi heledad ja tumedad ribad vastavalt joonisele 129.



Joon. 130. Fresnel'i interferencespeeglid.

Pärastistes katsetes tarvitab Fresnel nurkpeegli asemel õhukest prismat, nn. interferencesprismat (joon. 131), mille murdjanurk oli peaaegu 180° . Nagu näha joonisest, muudavad

samast allikast A väljuvad kiirte kimbud murdumisel oma suunad nii, et ühe osa lähtekohaks võib lugeda punkti A_1 ja teise osa lähtekohaks punkti A_2 . Tingimused on täiesti samad kui Fresnel'i nurkpeegli juures, ja ekraanil ilmusid niisamasugused ribad kui peeglikatses.



Joon. 131. Fresnel'i interferentsprisma.

Mitmesuguste värviliste monokromaatiliste kiirtega katseid tehes leidis Fresnel, et ribad vahed olenevad valguse värvusest. Näiteks on ribad vahed violettkiirte puhul väiksemad kui punaste puhul. Sellest peab järeldama, et violettkiirte lained on lühemad kui punaste omad. Valge valguse puhul olid ribad värvilised. See on arusaadav, sest valges valguses peituvad värvilised kiired ei hävi interfereerumisel samadel kohtadel, ja iga koht paistab seal hävinud värvuse täiendvärvuses.

b. Peeglikatse põhjal määras Fresnel (trigonomeetriselt) üksikute värviliste kiirte lainete pikkused, kuid praegu tarvitatakse selleks hõlpsamaid meetodeid (§ 102). Ta leidis, et äärmiste nähtavate punaste kiirte lainepikkused (õhus) on ligi $800 \text{ m}\mu$ ($0,000800 \text{ mm}$) ja äärmiste nähtavate violettkiirte omad ligi $400 \text{ m}\mu$.

Järgnevas tabelis on antud silmapaistvamate Fraunhofer'i joonte vastavate värviliste kiirte lainepikkused millimikronites:

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

On korda läinud mõõta ka ultrapunaste ja ultravioletsete kiirte lainepikkusi ja kindlaks teha, et ühes mittednähtavate kiirtega ulatuvad päikese spektri kiirte lainepikkused $\sim 2800 \text{ m}\mu$ kuni $300 \text{ m}\mu$.

Kuuldavate helide reaga võrreldes (me kuuleme ~ 10 oktaavi) kujutab spektri nähtav osa ainult ~ 1 oktaavi, päikese spekter ühes mittednähtavate osadega pisut üle kolme oktaavi. Laboratoorsel teel on võimalik saada palju suurema lainepikkusega ultrapunaseid ja palju lühema lainepikkusega ultraviolettkiiri.

1. Arvuta eespooltoodud andmete põhjal äärmiste

a) nähtavate kiirte võngete arvud,

b) mittenähtavate päikesekiirte võngete arvud.

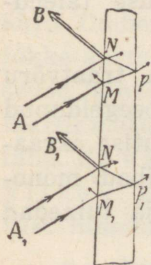
99. Doppler'i nähtus. Nagu heliallika ja kuulaja vastastikuse kauguse suurenemisel või vähenemisel muutub kuulaja kõrva langevate helilainete arv sekundis ja vastavalt heli kõrgus (§ 19), nii peavad ka valgusallika ja vaatleja vastastikuse kauguse muutumisel muutuma sekundis vaatleja silma langevate valguselainete arvud ning ühes sellega valguse värvus. Värvuse muutumine võib ainult siis olla tunduv, kui liikumiskiirus on valguse kiiruse kohta küllalt suur. Niisuguste suurte liikumiskiirustega on meil tegemist ainult taevakehade juures.

Meie nägemisorgan ei ole küllalt värvusetundlik, et tähele panna valguse värvitooni väikesi muutusi, küll aga on mõõtmiste teel kindlaks tehtud, et mõne taevakeha spektris spektraaljooned (näit. kõik vesinikujooned) ei asetse samal kohal võrreldes päikese spektriga, vaid on kõik niisama palju nihkunud kas spektri violetse või punase otsa poole.

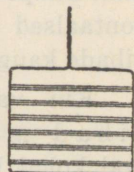
Astronoomias mõõdetakse niisugusel juhul spektraaljoonte nihke suurus ja arvutatakse sellest kiirus, millega taevakeha läheneb Maakerale või kaugeneb temast. See spektraalanalüütiline liikumise määramise meetod on iseäranis tähtis, sest pole võimalik teisel teel taevakeha liikumist vaatamise sihis (radiaalne liikumine) määrata ega üldse tähele panna.

1. Missuguse spektri otsa poole nihkuvad spektraaljooned taevakeha liginemisel või kaugenemisel?

100. Õhukeste kelmete värvused. Läbinähtavate ainete õhukesed kihid paistavad sagedasti värvilistena, näit. seebimullid, õhuke õlikiht veepinnal, õhuke õhukiht jää või klaasi praos jne. Niisuguseid värvusi nimetame õhukeste kelmete värvusteks.



Joon. 133.
Interferentsribade tekkimine õhukesel kelmel.

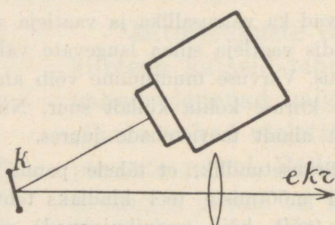


Joon. 132.
Interferentsribad õhukesel kelmel.

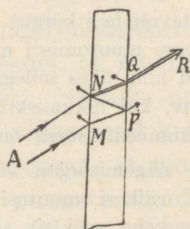
a. Hoiame traatvõru seebi-veekelmega vertikaalselt monokromaatilise leegi (naatriumi) valguses. Valgustatud kelme pinda valgusallika poolt vaadeldes näeme horisontaalseid paralleelseid vaheldumisi heledaid ja tumedaid ribasid (joon. 132).

Nähtust seletame järgmiselt: kelme läbilõige on kiilusarnane (joon. 133), sest kelme kiht on allapoole paksem (mispärast?). Peggeldub langeva kiire AN osa kelme esipinnast sihis NB, siis leidub mõni teine kiir AM, mille üks osa läheb murdumise

(kahekordse) ja sisepeegeldumise järel (kelme tagaseinast) samas suunas NB. Mõlemate suunas NB minevate kiirte tee pikkused ei ole ühesugused; sedaviisi tekib käiguvahe, mille suurus oleneb kelme kihi paksusest ja ka kiirte langemisnurgast. Kelme



Joon. 134. Interferentsribade demonstreerimine õhukesel kelmel.



Joon. 135. Interferentsribade tekkimine õhukesel kelmel.

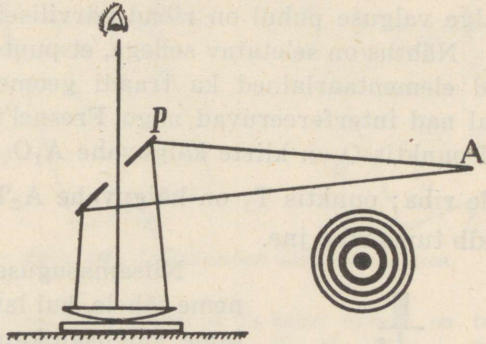
kohtadel, kus käiguvahe võrdub valguse poollaine pikkuse paaritu arvuga, hävib valgus interfereerumisel. Kohad, kus käiguvahe on poollaine pikkuse paarisarv, on heledad. Et kelme kihi paksus on samal horisontaalpinnal ligikaudu ühesugune, suureneb aga ülalt allapoole, siis ilmuvad vaheldumisi heledad ja tumedad horisontaalsed ribad. Monokromaatilise punase valguse puhul on ribade kaugus suurem kui violetse valguse puhul (mispärast?).

Kui valgustada kelmet valge valgusega, siis on ribad mitmevärvilised. See on arusaadav, sest kelme igal kohal hävib kihi paksusele ja kiirte langemisnurgale vastavalt teatav värvus ja koht paistab hävinud värvuse täiendvärvuses.

Valgustame pimedas toas projektsioonlaternaga traatvõru kelmega (k joon. 134), pöörame võru nii, et kelme peegeldunud valgus langeks objektiivile O, ja tekitame kelme kujutise ekraanil. Valge valguse puhul tekivad ekraanil värvilised ribad, monokromaatilise puhul (värviliste klaasidega) heledad ja tumedad ribad.

1. Kas ribad vahed on suuremad punase või violetse valguse puhul?
2. Mispärast muutuvad õhukese õlikihi värvused veepinnal?
3. Seleta joon. 135 järgi, mispärast, vaadates kelmet vastu valgust, näeme ka interferentsribasid ja mispärast ribad on nõrgemad kui peegeldunud valguse puhul?

b. **Newton'i rõngad.** Asetame lameda tasakumera lätse peegelklaasitükile (mustal alusel) ja valgustame ta monokromaatilise valgusega peegli abil nii, et kiired langeksid ligikaudu risti lätsele (joon. 136.). Teeme peegli osa läbinähtavaks (kaabime amalgaami ära) ja vaatame lätse, siis näeme vaheldumisi heledaid ja tumedaid kontsentrilisi rõngaid, mis tekivad interferentseerumise tõttu õhukeses plaadi ja lätse vahelises õhukihis. Et interferentsribad moodustavad kontsentrilised rõngad, on arusaadav, sest ühepaksused õhukihid, mille suhtes kiirte käiguvahe võrdub poolaine pikkuse paaritu arvuga, asuvad kontsentriselt ümber lätse ja plaadi puutepunkti. Esimesena tekitas neid rõngaid Newton. Newton'i rõngaid võib projektsioonilaternaga demonstreerida nagu õhukeste kelmete värvusigi (joon. 134); neid võib ka lainepikkuse määramiseks kasutada.



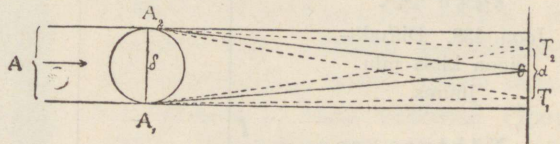
Joon. 136. Newton'i rõngad.

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

5. Kuidas paistavad rõngad valges valguses?

Diffraktsioon.

101. **Diffraktsiooni-nähtused.** Pikema sadamamuuli taha ei pääse merelained, muul varjab sadamat, kuid siiski painduvad lained ümber muuli ääre. Ümber kitsama tõkke äärte aga pääsevad lained peaaegu takistamatult tõkke taha. Ka valguse kiired painduvad ümber tõkke ääre ja seda nähtust nimetatakse diffraktsiooniks.



Joon. 137. Diffraktsioon peene traadi juures.

a. Asetame näiteks pimedas toas laterna monokromaatiliste paralleelsete kiirte kimbu tee kitsa pilu (A joon. 137, segava valguse summutamiseks) taha (paari m kaugusel) paralleelselt pilule peenikese traadi (joonisel diameeter δ) ning traadi taha ekraani, siis näeme traadi geomeetrilises varjus (s. o. puutujate

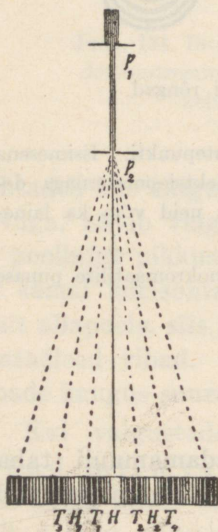
abil ehitatud varjus) heledaid ja tumedaid ribasid. Geomeetrilise varju keskkohas on hele riba. Tumedate ribade vahed ($T_1T_2 = d$) on suuremad punase valguse puhul kui violetse valguse puhul. Valge valguse puhul on ribad värvilised.

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

Niisamasuguseid interferentsribasid paneme tähele, kui laterna ja pilu asemel tarvitame valgusallikana elektrihoõglambi sirget hoõgniiti. Hoõgniit olgu traadiga paralleelne.

Kirjeldatud nähtus võimaldab ka valguslaine pikkuse määramist.

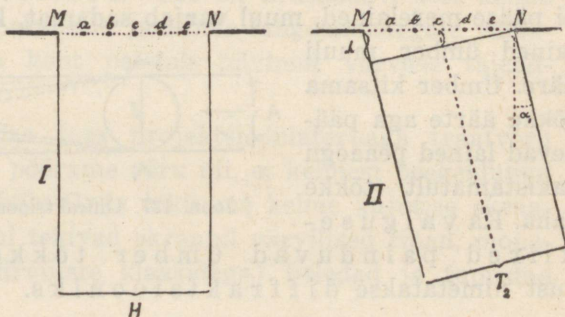
b. Asetame eelmises katses traadi asemele teise hästi kitsa pilu p_2 (joon. 138), siis näeme monokromaatilise valguse puhul ekraanil mõlemal pool heledat riba H paralleelseid vaheldumisi tumedaid ja heledaid ribasid. Kaugemal keskmisest ribast H on heledad ribad nõrgemad. Kui teeme pilu p_2 kitsamaks, siis nihkuvad ribad üksteisest kaugemale. Valge valguse puhul on ribad värvilised. Ka siin interfereeruvad pilu p_2 punktidest geomeetrilisse varju langevad elementaarlained.



Joon. 138. Diffraktsioon kitsa pilu juures.

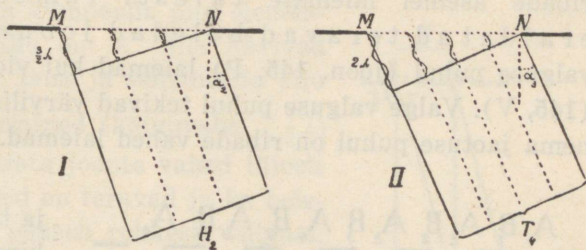
Nähtuse seletamiseks kujutame pilu p_2 suurendatud kujul. Olgu MN (joon. 139) pilu p_2 kujutis. Pilu punktid a, b, c, d, e on ühesugustes võnkumisfaasides. Nad mõjuvad Huygens'i printsibi põhjal elementaarlainete tsentritena ja elementaarlained levivad pilu taga igas suunas.

Suunas $cH \perp MN$ (joon. 139 I) jõuavad elementaarlained ribasse H sama faasiga (ekraan on pilu laiusega võrreldes väga kaugel), järelikult on ekraanil H



Joon. 139. Diffraktsioon kitsa pilu juures.

kohal hele riba. — Riba H lähedal leiame riba T_2 , mille suhtes äärkiirte käiguvahe $MT_2 - NT_2 = \lambda$ (joon. 139, II). Kui pilust suunas eT_2 mineva kiirte kimbu poolitame, siis näeme, et kimbu igast ühel poolel asetsevast punktist (näit. e) väljuvale elementaarlainele vastab kimbu teisel poolel asetsevast punktist (b) väljuv elementaarlainet nii, et käiguvahe on $\frac{\lambda}{2}$ ($bT_2 - eT_2 = \frac{\lambda}{2}$). Interfereerumisel

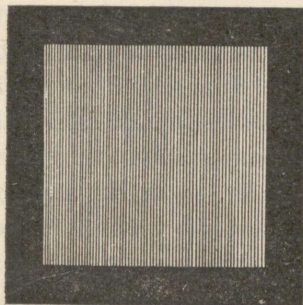


Joon. 140. Diffraktsioon kitsa pilu juures.

hävib kiirte kimbu üks pool teise poole täiesti ja T_2 kohal ekraan on tume; samuti ka ribas T_1 , mis on sümmeetriline ribaga T_2 riba H suhtes. — Ribast H veel kaugemale minnes leiame riba T_4 , mille suhtes $MT_4 - NT_4 = 2\lambda$ (joon. 140, II). Kui pilust T_4 poole leviva kiirte kimbu neljaks jagame, siis näeme, et mõlemad kimbu pooled eraldi hävivad. — Nii edasi arutades leiame, et tumedad on kõik need T kohad, mille suhtes pilu äärtest tulevate elementaarlainete käiguvahe $MT - NT$ või $NT - MT$ on $\lambda, 2\lambda, 3\lambda$ jne.

Et ribade T vahel elementaarlained ei hävi ja seal valgus valitseb, on arusaadav. Et näit. ribas H_2 mille suhtes $MH_2 - NH_2 = \frac{3}{2}\lambda$ (joon. 140, I), on hele, seda näeme, jagades kiirte kimbu kolmeks võrdseks osaks; kaks kõrvutiseisvat osa hävivad interfereerumisel (äärkiirte käiguvahe on λ), kuna kolmas osa valgustab riba H_2 . Riba H_2 on tumedam kui H.

Ka seda nähtust võib kasutada valguselaine pikkuse määramiseks.



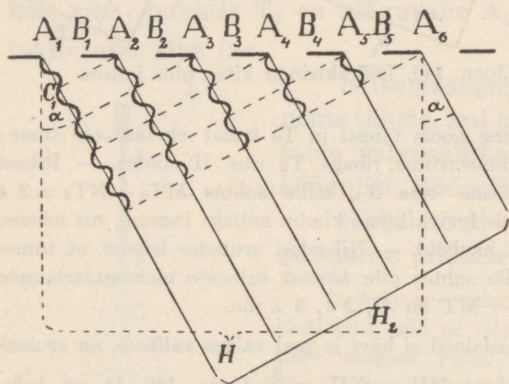
Joon. 141. Diffraktsioonivõre.

102. Diffraktsioonivõre; valguselaine pikkuse määramine.

a. Diffraktsioonivõreks nimetame väga kitsaste paralleelsete pilude süsteemi, milles pilude vahed on võrdsed ja väga väikesed (joon. 141). Niisugune võre tehakse näiteks järgmiselt: klaasplaadile lõigatakse isesuguse aparadi abil võrdsete vahedega paralleelsed kriipsud; kriipsude vahed on siis läbinähtavad, kuna kriipsud ise nii vähe valgust läbi lasevad (langevate kiirte suunas), et neid võib lugeda läbi-paistmatuteks. Võred valmistatakse ka fotograafimise teel.

Laseme võrele langeda monokromaati-

list valgust (tegelikult asetame võre joon. 76 kujutatud katses prisma asemele), siis saame ekraanil heledate ja tumedate ribade asemel laiemate täiesti tumedate vahedega eraldatud teravad heledad jooned. Vahed on punase valguse puhul (joon. 145, P) laiemad kui violetse valguse puhul (145, V). Valge valguse puhul tekivad värvilised ribad. Võre peenema jaotuse puhul on ribade vahed laiemad.



Joon. 142. Interferents diffraktsioonivõres.

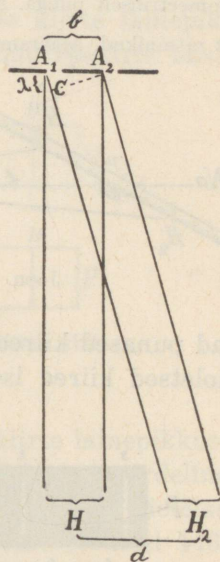
Valgustatud joonte ja tumedate vahede tekimist monokromaatilise valguse puhul seletame joon. 142 abil järgmiselt: Võre on ekraani kaugusega võrreldes nii kitsas, et üksikutest piludest samale ekraani punktile langevaid kiiri (elementaarlainete suundi) võib lugeda paralleelseiks. Pilude üksikud võnkuvad

punktid on ühesugustes faasides. Langevate kiirte suunas punktis H on ekraan valgustatud, sest elementaarlained jõuavad punkti H ilma käiguvaheta. Joonisel näeme, et ka kõik suunas A_1H_2 ekraanile langevad elementaarlained jõuavad punkti H_2 ilma käiguvaheta ($A_1H_2 - A_2H_2 = \lambda$), sellepärast on H_2 valgustatud. Samuti on valgustatud punktiga H_2 punkti H suhtes sümmeetriline punkt H_1 . Üldse on valgustatud kõik punktid H_n , mille suhtes kahe naaberpilu samapoolsetest äärtest tulevate elementaarlainete käiguvahe on $2\lambda, 3\lambda$ jne. ($A_1H_n - A_2H_n$ või $A_2H_n - A_1H_n$ on $2\lambda, 3\lambda$ jne.), sest nendes punktides interfereeruvad võrdsed lained ilma käiguvaheta. — Iga teine punktide H vaheline ekraani koht T on aga täiesti tume: olgu näiteks $A_1T - A_2T = \frac{1}{2}\lambda$, siis hävivad kõrvutiolevate pilude elementaarlained paarikaupa, sest antud pilu igast punktist minevale elementaarlainele vastab naaberpilu ühest punktist minev elementaarlaineline nii, et käiguvahe on $\frac{1}{2}\lambda$; olgu näit. $A_1T - A_2T = \frac{1}{4}\lambda$, siis hävivad paarikaupa

esimese ja kolmanda, teise ja neljanda pilu punktide elementaarlained jne. (käiguvahe $\frac{1}{2}\lambda$); on käiguvahe $A_1T - A_2T$ näit. $\frac{1}{10}\lambda$, tähendab, esimese ja kümnenda pilu elementaarlainete käiguvahe on λ , siis hävivad esimese ja kuuenda, teise ja seitsmenda pilu punktide elementaarlained (käiguvahe $\frac{1}{2}\lambda$) jne. Niisiis on heledate joonte vahed täiesti tumedad, kuna jooned on teravad ja ka heledad, sest läbi võre pääseb rohkesti valgust.

b. Diffraktsioonivõreaga võib kõige hõlpsamalt ja täpsemalt määrata valguseline pikkust. Tähistame H -ga keskmise ja H_2 -ga esimese selle kõrval oleva heleda joone, d -ga joonte kauguse HH_2 ja ekraani kauguse võrest a -ga, siis saame joon. 143 põhjal

$$\begin{aligned} \sin a &= \sin HA_1H_2 = \sin A_1A_2C = \frac{A_1C}{A_1A_2} = \\ &= \frac{\lambda}{A_1A_2}; \quad \tan a = \frac{HH_2}{A_1H} = \frac{d}{a}. \end{aligned}$$



Joon. 143.

Et nurk a on väike, tähendab, $\sin a = \tan a$, siis

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

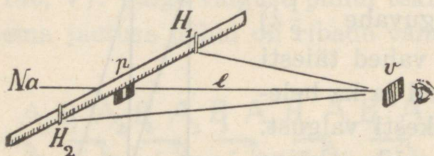
Kui on teada antud võre suhtes kaugus $A_1A_2 = A_2A_3 = \dots = b$, mida nimetatakse võre konstantiks, siis võime lainepikkuse määrata valemi põhjal

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

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

1. Võre konstant on 0,1 mm, ekraani ja võre kaugus teineteisest 3 m, kollase valguse puhul heledate joonte kaugus $HH_2 = 1,8$ cm. Leia kollase valguse lainepikkus!

c. Ilma laternata leiame võrega näit. Na-valguse lainepikkuse järgmiselt: asetame pilu peale joonlaua cm-jaotusega, valgustame pilu Na-leegiga ja vaatame pilu paari m kauguselt läbi võre (joon. 144), siis näeme heledaid ribasid sümmeetriliselt piluga. Asetame joonlauale esimeste ribade H_1 ja H_2 kohale paberist ratsanikud. Määrame $d = \frac{H_1 H_2}{2}$ ja võre kauguse a pilust, siis $\lambda = \frac{bd}{a}$.

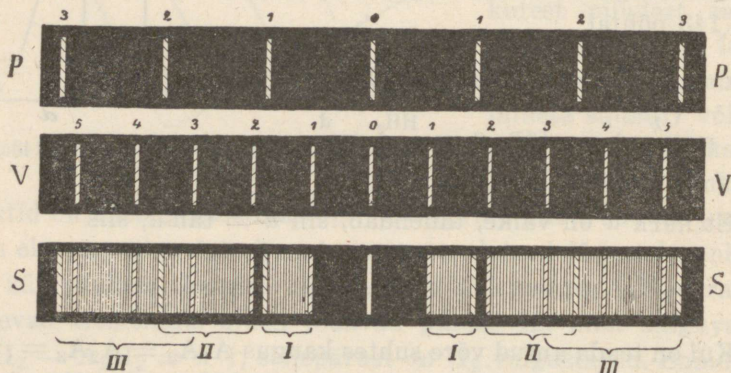


Joon. 144.

103. Normalspekter.

Laseme võrele langeva monokromaatilise valguse asemel valget valgust, siis saame ekraanil värvilise pildi, mis tekib järgmiselt: valges valguses peituvad

punased kiired annavad oma jooned isekohal (joon. 145, P), violetsed kiired isekohal (joon. 145, V); teiste värviliste kiirte



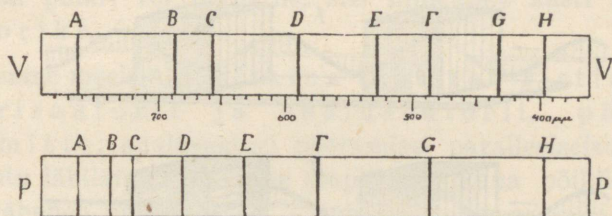
Joon. 145. Diffraktsioonivõre abil saadud jooned ja spektrid.

jooned ilmuvad nende joonte vahel spektri värviliste kiirte järjekorras. Niisiis tekivad valge valguse puhul spektrid (joon. 145, S). Esimene spekter ulatub violetsest joonest 1 kuni punase jooneni 1 ja on joonisel S märgitud I-ga; teine ulatub violetsest joonest 2 kuni punase jooneni 2 ja on joonisel S märgitud II-ga jne. Kuna esimene spekter I on puhas, langevad järgmised spektrid, näit. II ja III, osalt ühte ja tekitavad segavärvusi.

Väikese konstandiga võred annavad laia esimese spektri, milles puuduvate (neeldunud) värviliste kiirte asemel on näha tera-

vad tumedad jooned. Niisuguseid võresid tarvitatakse spektrite uurimisel prisma asemel.

Viimasest lainepikkuse valemist (§ 102) näeme, et värviliste kiirte joonte kaugused (d) on võrdelised nende kiirte lainepikkustega (λ); sellest järgneb, et võre abil saadud spektris üksi-



Joon. 146. Fraunhofer'i joonte jaotus võre ja prisma abil saadud spektrites.

kud värvused on jaotatud võrdeliselt värviliste kiirte lainepikkustega. Prismaga saadud spektris ei ole värvuste jaotus võrdeline värviliste kiirte lainepikkustega, spektri punane ots on violetse otsaga võrreldes nagu kokku surutud. Seda näeme joonisel 146, kus V kujutab Fraunhofer'i joonte jaotust võre abil saadud spektris ja P kujutab sama joonte jaotust prisma abil saadud spektris. Näeme näiteks, et kollane värvus (Na joon D) võre abil saadud spektris asub ligikaudu spektri keskel, prismaga saadud spektris punase otsa ligidal. Võre abil saadud spektrid nimetatakse *n o r m a a l s p e k t r i t e k s*.

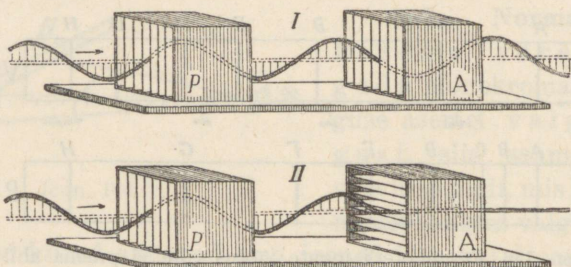
Diffraktsiooniga on seletatav värvuste tekkimine, kui vaadata läbi linnusule, peenikese siidriide või silmaripsmete heledale valgusallikale.

Diffraktsioon tekib ka siis, kui valgus peegeldub pinnast, milles on mingisugused üksteisele väga ligidal seisvad jooned. Niisuguse diffraktsiooniga on seletatav pärlnutri, putukate ja peenikese siidriide värvuste mäng.

Polarisatsioon.

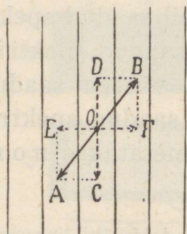
104. **Põikilaine polarisatsioon.** Interferentsi- ja diffraktsiooni-nähtused tõestasid, et valgus on lainetamine, kuid lahtiseks jäi küsimus, kas see on põiki- või pikilainetamine. Et selle kohta otsusele jõuda, vaatleme näiteks, kuidas võiks pimedas toas ära tunda, kas mingi antud köieosa lainetab põiki või pikuti.

Oletame, et kaks katsetajat tõmbavad kõie pingule läbi kahe lahtise otsaga kasti (joon. 147, I), mille vaheseinad on paralleelsed. Kui üks katsetaja tekitab põikilaineid paralleelselt kasti P vaheseintega, liigutades kätt üles-alla, siis teine tunneb lainetamist, sest laine läheb mõlemast kastist läbi. — Tekitab esimene põiki-



Joon. 147. Polarisatsiooni mudel.

laineid risti kasti P vaheseintega, siis ei läbista see juba esimest kasti. — Liigutab esimene kätt mingisuguses vahepeelses sihis, näit. sihis AB joonisel 148, mis kujutab osakese võnkumist vaadates liikumise suunas, siis lahutub võnkliikumine kasti P vaheseinte takistuse tõttu kaheks teineteisele risti sihitud komponendiks. Kastikesest P läheb läbi ainult komponentalaine CD, mille osakesed võnguvad vaheseinte sihis; ta pääseb ka läbi teisest kastist A seisus I, kuid mitte seisus II. — Liigutab esimene kätt vaheldumisi



Joon. 148. Põikilaine lahutamine.

mitmesuguses sihis, näit. üles-alla, paremalt vasemale poole, nende vahepealsetes sihtides, ringi jne., siis tekib käe ja kasti P vahel keeruline põikilaine, mille üksikud võnkuvad osakesed muudavad alataasa võnkumise sihti. Kastikesest P läheb põikilaine läbi, kuid läbiläinud laines võnguvad osakesed ainult P vaheseinte sihis. Niisuguse keerulisema põikilaine muutumist lihtsamaks põikilaineks, mille osakesed võnguvad ainult ühes kindlas läbi laine kiire minevas tasapinnas, nimetame laine polarisatsiooniks; kastikest P, mis polariseerib keerulist põikilainet, nimetame polarisaatoriks ja polarisaatorist läbiläinud lainet, mille osakesed võnguvad ühes kindlas tasapinnas, polariseerituks. Kastikeses P polariseeritud põikilaine läheb takistamatult läbi

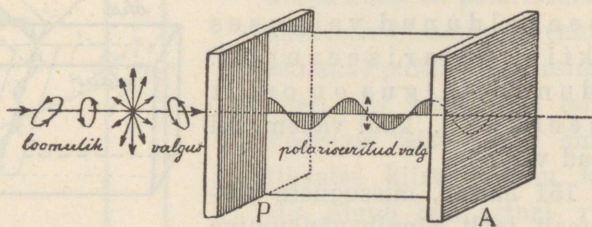
kastikese A, kui P ja A vaheseinad on paralleelsed (I), ei pääse aga läbi, kui vaheseinad on risti (II). Pikilaine aga pääseb läbi mõlematest takistamatult igas kastikeste seisus. Üldse ei ole pikilainel polariseerumist.

Et teine katsetaja kasti A abil võib ära tunda, kas langev laine oli põiki- või pikilaine, siis nimetame kasti A analüsaatoriks.

Peame meeles: pikilaine läbib ristiasetatud polarisaatorit ja analüsaatorit, põikilaine aga mitte; analüsaatori pööramisel paralleelseisust ristseisu ei muutu läbiläinud pikilaine amplituud, kuna põikilaine amplituud väheneb nullini.

105. **Valguse polarisatsioon.** a. Seni käsitletud valguse nähtusi võib seletada niihästi piki- kui ka põikilainetamisega. Kastisarnaseid vaheseintega riistu valguselainete loomu uurimiseks ei ole võimalik valmistada, sest üliväikesele lainepikkusele vastavalt peaksid vaheseinad olema üksteisele üliligidal. Looduses leiame aga kristalle, mille korrapärane molekulaarne ehitus on niisugune, et me võime neid tarvitada polarisaatoritena ja analüsaatoritena.

Võtame kaks turmaliinikristallist tasaparalleelset plaadikest, mille tahud on lõigatud paralleelselt kristalli teljega. Tekitame kitsa paralleelkiirte kimbu abil ekraanil heleda



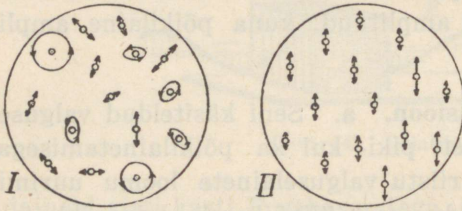
Joon. 149. Valguse polarisatsioon turmaliinplaadis.

laigu. Asetame ühe turmaliinplaadi kiirte teele, siis tumeneb laik, sest turmaliin ei ole hästi läbipaistev (värviline), kuid laik jääb plaadi pööramisel muutmatuks. Järelikult ei ole plaadile langev valgus polariseeritud, ta võiks olla kas piki- või polariseerimatu põikilaine.

Asetame esimese plaadi taha teise nii, et nende teljed oleksid paralleelsed, siis muutub laik ekraanil neeldumise tõttu veel tumedamaks ja on täiesti tume, kui plaatide teljed on teineteise suhtes risti (joon. 149). Sellest järeldame: valgus on põikilaine.

Vaatame läbi kahe turmaliinplaadi heledale valgusallikale ja pöörame ühte plaati, siis muutub valgustugevus ja teatavas asendis me valgust ei näe.

Valgusallikad on suuremad või väiksemad helenduvad pinnad, mille kõik osakesed kiirgavad valgust. Loomuliku valguse kiirte kimbus sünnib võnkumine igas sihis risti levimissuunaga (joon. 150 I, vastu levimissuunda vaadates). Polarisaatori taga on valgus polariseeritud ja võnkumine sünnib ainult polarisaatori vahedega paralleelsetes tasapindades (joon. 150 II).



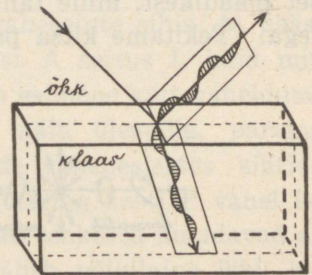
Joon. 150. Võnkumine loomulikus ja polariseeritud kiirte kimbus.

Viimasel ajal on korda läinud valmistada polariseerivat klaasi.

b. Vaatame läbi ühe turmaliinplaadi päikesekiirtes läikivale veepinnale, siis võime tähele panna, et plaadi pööramisel valgus heleneb ja tumeneb, kuid täiesti ei kao. Me järeldame, et peegeldunud valguses on osa kiiri polariseerunud. Ka murdunud valgus on osalt polariseerunud, kuid vähem kui peegeldunud valgus.

Joon. 151 näitab, missuguses pinnas suuremalt jaolt sünnib võnkumine peegeldunud ja murdunud valguses.

Brewster uuris seda nähtust ja leidis, et peegeldunud ja murdunud valguse osa on kõige rohkem polariseerunud siis, kui kiired langevad nii, et kiirte peegeldunud ja murdunud osad moodustavad täisnurga (langemisnurk + murdumisnurk = 90°). Brewster'i



Joon. 151. Polariseerimine peegeldumisel ja murdumisel.

seaduse põhjal võime määrata iga läbinähtava aine kohta lange-
 misnurga, mille juures peegeldunud ja murdunud kiir-
 red on kõige rohkem polariseeritud. Näiteks leiame
 klaasi kohta

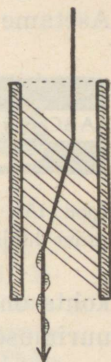
$$\frac{3}{2} = n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin (90^\circ - \alpha)} = \frac{\cos \alpha}{\sin \alpha} = \tan \alpha$$

ja sellest $\alpha \approx 56^\circ$.

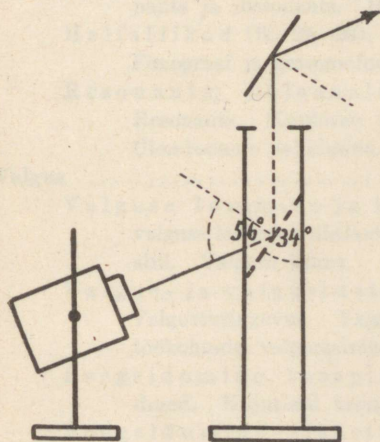
c. Turmaliinplaatide asemel tarvitatakse ka klaas-
 polarisaatoreid ja -analüsaatoreid, mis koosnevad üks-
 teise ligi asetatud klaasplaatidest (joon. 152). Kui võtta
 mitu plaadikest ja langevate kiirte langemisnurk on
 $\sim 56^\circ$, siis võib läbiläinud valgust mitmekordse murdu-
 mise tõttu lugeda praktiliselt polariseerituks.

Peegeldumist klaasi esiseinal kasutatakse polari-
 satsiooni demonstreerimiseks, näit. joon. 153 kujuta-
 tud riista, milles kaks puualusele liimitud lauakest on
 ülal ühendatud auguga varustatud lauakesega. Laua-
 keste vahele on kinnitatud klaasplaat (tagasein musta
 paberiga kaetud) nii, et ta moodustaks vertikaalsihiga nurga

34° . Asetame pimedas toas projektsioonlaterna nii, et klaasi esi-
 pinnast peegeldunud kiired langeksid vertikaalselt lakke, siis on
 langemisnurk 56° ja peegeldunud
 kiirte kimp on polariseeritud. Hoi-
 ame teise klaasplaadi (musta taga-
 seinaga) paralleelselt esimese plaa-
 digi, siis tekib hele laik seinal.
 Pöörame teise peegli ümber ver-
 tikaalse kiirte kimbu kui telje,
 siis liigub laik seinal ringi, tu-
 meneb ja kustub, kui oleme pöö-
 ranud teist peeglit 90° võrra.
 Edasi pöörates ta heleneb kuni
 180° -ni, siis jälle tumeneb jne.
 Kui laik on tume ja pöörame selles



Joon. 152.
 Polarisatsi-
 oon klaas-
 plaatide
 kihis.



Joon. 153. Polarisatsioon peegeldu-
 misel.

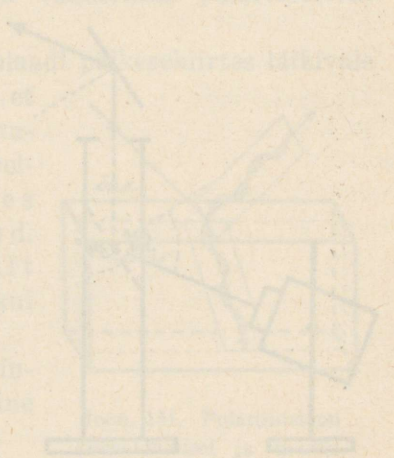
asendis teise peegli ümber horisontaaltelje (muudame kiirte lange-
 misnurka), siis laik heleneb.

d. On olemas kristalle isesuguse molekulaarse ehitusega, milles langev kiir murdumisel jaguneb kaheks osaks, näit. lubjapagu. Asetame niisuguse kristalli kirjale, siis näeme tähti kahekordselt (joon. 154). Murdunud kiiri analüsaatoriga katsudes leiame, et nad on polariseeritud. Niisuguseid kristalle tarvitatakse ka polarisatsiooni demonstreerimiseks.



Joon. 154. Kaksikmurdu-
mine lubjapagokristallis.

Oleme kindlaks teinud, et valgus levib laineliselt. Kuidas aga valgus tekib ja mis on tema lainetamise keskkonnaks, selle kohta on loota, et uuemad aatomite ehituse ja energia kiirgamise uurimused annavad lõpliku vastuse.



Sisu.

	Lk.
Hääl	3
Pendli ja elastse keha võnkumine (lk. 3—4). Pendli võnkumine. Pendli asendi määramine. Elastse keha võnkumine.	
Lainetamine (lk. 5—11). Näide perioodilise liikumise levimise kohta. Põiki- ehk transversaallaine tekkimine ja ehitamine. Põikilaine periood, võngete arv, amplituud, pikkus ja kiirus. Põikilainete interferents. Põikilaine peegeldumine. Seisvad põikilained. Pikilaine. Pikilaine tekkimine õhus. Piki- ja põikilainete tekkimise tingimused.	
Hääl lainetamisnähtusena (lk. 11—16). Hääle tekkimine ja levimine. Hääle levimise kiirus. Hääle tugevus. Hääle peegeldumine. Hääle interferents.	
Helid ja heliredelid (lk. 16—22). Heli võngete arv. Kuulmisaistingu piirid. Doppleri nähtus. Heliredel. Konsonants ja dissonants. Heljumised.	
Heli allikad (lk. 22—26). Keel. Helihark. Plaat. Õhusammas. Fonograaf ja grammofon.	
Resonants; kõlaanalüüs; ülemtoonid (lk. 26—32). Resonants. Kuulmise resonantsteooria. Keele võnkumiskuju. Ülemtoonide tekkimine. Kõlavärvus.	
Valgus	33
Valguse levimine ja kiirus (lk. 33—36). Valgusallikad ja valguse levimine ühtlases keskkonnas. Kujutised väikese avause abil. Valguse kiirus.	
Valgus- ja valgustustugevus (lk. 37—42). Valgustugevus. Valgustustugevus. Valgustugevuse mõõtmine. Eluruumide ja töökohtade valgustamine.	
Peegeldumine tasapinnast (lk. 42—44). Peegeldumisseadused. Kujutised tasapeeglis.	
Peegeldumine sfäärilistest peeglitest (lk. 44—51). Nõguspeegel. Valguspunkti kujutis nõguspeeglis. Nõguspeegli-valem. Esemekujutis nõguspeeglis. Kumerpeegel.	
Murdumine ja sisepeegeldus (lk. 51—57). Valguse murdumise nähtused. Täielik sisepeegeldus. Murdumine ja sisepeegeldus mitteühtlases keskkonnas. Murdumisseadus. Murdunud kiire ehitamine. Täieliku sisepeegelduse piirnurga arvutamine.	

Murdumine tasapinnalistes keha des (lk. 57—59). Tasa-
paralleelne plaat. Ainete suhtelise murdumisnäitaja määramine.
Prisma.

Valguse lahutamine ja liitmine (lk. 59—62). Valguse
lahutamine; spekter. Värvuste liitmine. Täiendvärvused.
Akromaatiline ja otsevaateprisma.

Kehade värvus (lk. 62—64). Keha värvus läbiläinud valguses.
Keha värvus tagasiheidatud valguses. Värvainete segu värvus.

Murdumine sfäärilistes läätsedes (lk. 64—75). Läätsede
liigitamine. Kumerlääts. Homotsentriliste kiirte murdu-
mine kumerläätses. Valguspunkti kujutis. Sfääriline ja kromaati-
line aberratsioon kumerläätses. Kumerläätsede optiline kesk-
punkt. Esemekujutis kumerläätses. Läätsede valem. Nõgus-
lääts. Esemekujutis nõgusläätses.

Optilised riistad; silm ja nägemine (lk. 75—91). Pro-
jektioonaparaat. Fotoaparaat. Silm ja nägemine. Kollane
ja pimetähn. Silma kohastumine. Esemee vaatenurk. Värvuste
nägemine. Värvusepimedus. Nägemine kahe silmaga. Füsiolo-
ogilis-optilised nähtused. Luup. Mikroskoop. Astronoomi-
line pikksilm. Maapikksilmad. Peegelteleskoop.

Spektri kiirte avaldused (lk. 91—96). Valgus kui kiirgav
energia. Luministsents. Mittenähtavad spektrikiired. Kiirga-
mise sõltuvus temperatuurist.

Spektri tüübid; spektraalanalüüs (lk. 96—103). Spekt-
raalaparaat. Kiirgamis- ehk emissioonspekter. Neeldumis- ehk
absorptsioonspekter. Päikese spekter. Spektraalanalüüs.

Füüsikaline optika 104

Newton'i ja Huygens'i vaade valguse levimise kohta.
Huygens'i lainetamisteooria (lk. 104—108). Geo-
meetiline ja füüsikaline optika. Valguse emissiooniteooria ja
lainetamisteooria. Laine levimine Huygens'i printsiibi põhjal.
Laine peegeldumine Huygens'i printsiibi põhjal. Laine murdu-
mine Huygens'i printsiibi põhjal.

Valguselainete interferents ja pikkus; õhukeste
kelmete värvused (lk. 108—113). Interferents. Doppleri
nähtus. Õhukeste kelmete värvused.

Diffraktsioon (lk. 113—119). Diffraktsiooni nähtused. Diffrakt-
sioonivõre; valguselaine pikkuse määramine. Normaalspekter.

Polarisatsioon (lk. 119—124). Põikiline polarisatsioon. Valguse
polarisatsioon.

Avaldan siin sügavat tänu füüsikaõpetajaile A. Mitile ja A. Vihman'ile väärtuslike näpunäidete eest käsikirja läbi-vaatamisel kui ka korrektuuri lugemisel.

Autor.

HIND KR. 2.50