E. MALTENEK JA M. KESKÜLA

FÜÜSIKA

ÕPERAAMAT
KESKKOOLILE

ESIMENE KÖIDE: SISSEJUHATUS, MEKAANIKA JA SOOJUS :: **TEINE KÖIDE:** HELI JA VALGUS
KOLMAS KÖIDE: MAGNETISM JA ELEKTER

TALLINNA EESTI KIRJASTUSE - ÜHISUSE KIRJASTUS

FÜÜSIKA

ÕPERAAMAT

KESKKOOLILE

TEINE KÖIDE

HELI JA VALGUS

TALLINNA EESTI KIRJASTUSE-ÜHISUSE TRÜKIKODA, PIKK TÄN. 2

Neljas jagu:

Lainetamine ja heli.

Peatükk I:

Lainetamine.

§ 1. **Lained.** Looduses näeme tihti iseäralist liikumist, mida lainetamiseks hüütakse: tuule käes hõljuvad rukkipead üles ja alla, nii et meile kaugelt vaadates paistab, nagu voolaksid mööda välja lained. Kui rahulisse vette visata kivikene, siis tekivad veepinnal ringikujulised veelained, mis järk-järgult suurenevad ja lainetamiskeskkohalt kaugemale nihkuvad. Esimesele laineringile järgneb teine, teisele kolmas jne., kunni terve veepind on kaetud konsentriliste lainetega. On kerge tähele panna, et kahe kõrvutiseisva laine kõige kõrgemad tipud — laineharjad — igalpool teineteisest ühekaugusel seisavad. Seda kaugust nimetatakse laine pikkuseks. Iga lainehari paistab meile edasi liikuvat mööda veepinda, selle liikumise kiirust nimetatakse laine laialilagunemise või lühidalt laine kiiruseks.

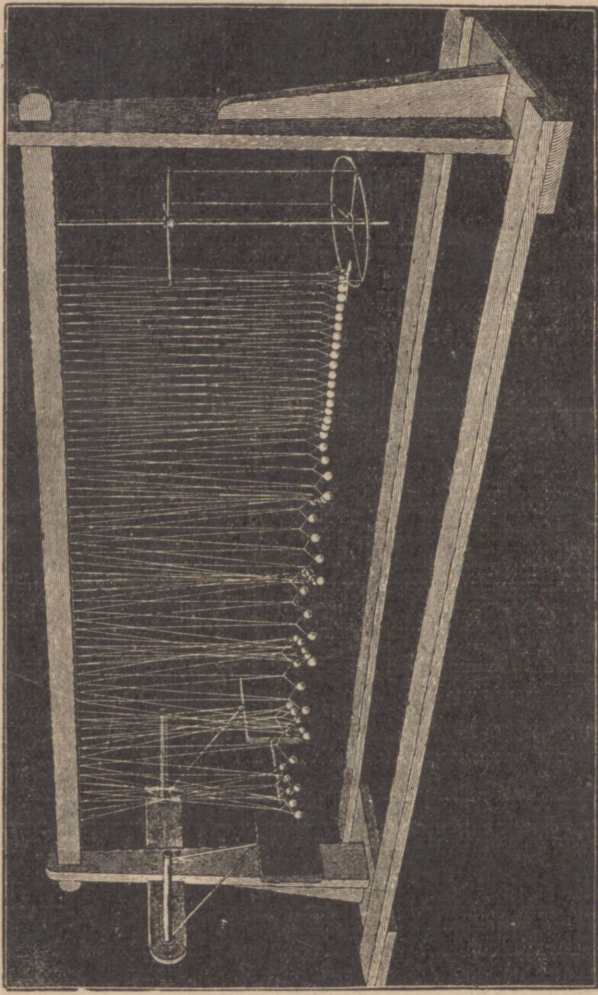
Viskame mõne kerge asjakese — näituseks korgitüki — lainetavale veepinnale: imelikul kombel ei liigu korgitükk edasiminevate lainetega mitte kaasa, vaid hõljub ainult ühe koha peal üles ja alla. Sellest peame järeldama, et **lainetamisel veejaokesed mööda veepinda mitte edasi ei liigu,** — muidu viiksid nad korgitüki enesega kaasa, — vaid et nad ainult ühe koha peal üles-alla liiguvad. Lainete edasiliikumine mööda veepinda on nii siis ainult näiv, kuna veejaoksed sellest osa ei võta.

Joon. 1.

Joon. 2.

§ 2. **Lainetamise mudelid.** Selleks, et tundma õppida lainete tekkimist, vaatleme veel ühte lainetamist: kui seina külge kinnitada pikk köis (veel parem aga jäme kumminöör) ja tema teist otsa käes hoida, siis võime selle köie hõlpsasti lainetama panna, liigutades kätt ühtlaselt üles-alla (joon. 1). Sellesama köie peal võime sünnitada ka ühe ainsa laine, kui kätt ainult üks kord üles-alla liigutada (joon. 2). Me näeme siis, et üksik laine mööda köit liikuma hakkab käejuurest seina poole. Mõõtes seda aega, mis lainel ära kulub seinani jõudmiseks, võime kergesti välja arvata laine laialilagunemise kiiruse, kui tuntud on köie pikkus.

Niisama kui vees, võib ka siin laine tekkida ainult köie jaokeste ülesalla liikumisest, sest et me köie otsa käes kinni hoides — tema jaokeste piki köit liikumist takistame. Mil teel niisugusel üles-alla liikumisel laine võib sündida, seda näeme kõige selgemini joon. 3 kujutatud lainetamismudeli juures.



Joon. 3.

Viimane kujutab raami, mille külge riputatud terve rida väikesi tinakuulikesi. Iga kuulikese küljest on tõmmatud kaks niiti ülemise raamipuu külge. Need niidid lähevad üleval vähe laiemale, nii et iga kahe kõrvutiseisva kuulikese niidid risti jooksevad.

Kui pahemal pool seisvat äärmist kuuli liikuma tõugata perpendikulaarselt kuulirea sihile, siis hakkab ta selles sihis edasi-tagasi õõtsuma, kaldudes paigalseisvate kuulide reast vaheldamisi ühele ja teisele poole. Kohe liikumise algusel tõukub tema niit kõrvalseisva teise kuuli niidi külge ja kisub sellega viimase enesega kaasa. Nagu kõik kaaluvad kehad, nii ei hakka ka teine kuul mitte silmapilk esimesega kaasa liikuma, vaid ta teeb seda alles teatava viivituse järgi. Kord aga juba liikuma hakanud, õõtsub ta niisama kui esimenegi. Teine kuul kisub liikuma kolmanda, kolmas neljanda jne. Iga järgmine kuul kordab esimese kuulikese liikumist, kuid algab seda liikumist ikka vähe hiljem eelmisest kuulist. Selle tagajärjel näeme liikumist piki kuuliderida laiali lagunevat ühtlase kiirusega. Üksikutel silmapilkudel kujutavad õõtsuvate kuulikeste seisukohad lainesarnast kõverjoont. Kõverjoone laineharjad ja laineorud liiguvad edasi piki kuuliderida ühesuguse kiirusega: meile paistab, nagu voolaksid lained kuulidereas pahemalt paremale poole.

Joon. 3 on mudel kujutatud sel silmapilgul, kui liikuma on hakanud juba üle poole kuulikestest. Me näeme seal juba nelja laineharja üksteise järel seisvat. Laine pikkust kujutab ka siin kaugus kahe naaberlaine harja vahel.

Kirjeldatud lainetamismudel näitab iseäranis selgesti, et lainetamine muud ei ole, kui aine üksikute jaokeste õõtsumine. **Jga kord, kui mingisuguse aine jaokesed õõtsuma hakkavad — järgmine ikka vähe hiljem kui eelmine, — tekib lainetamine.**

On selge, et lainetamise laialilagunemise kiirus peab olema seda suurem, mida rutemini kaasakistud jaokene järgneb eelmisele jaokesele; see sünnib seda kiiremini, mida kõvem on side kahe naaberjaokese vahel. Järjelikult on lainetamise laialilagunemise kiirus seda suurem, mida kõvemini on aine jaokesed üksteisega seotud. On teada, et näiteks terastraadis aine jaokesed tugevamini on seotud üksteisega kui kumminööris; tõepoolest näeme, et esimeses lained kiiremini edasi liiguvad kui teises.

Kõva keha osakesed on tugevamini, gaasi osakesed aga nõrgemini üks-teisega seotud kui vedeliku osakesed. Sellepärast peab lainetamise **laialilagunemise kiirus kõvas kehas suurem, gaasis aga väiksem kui vedelikus olema.**

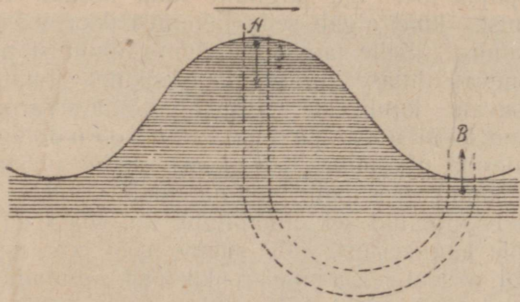
§ 3. **Keha osakeste õõtsumine.** 1) Mekaanikas, § 51_3 tutvunesime pendli õõtsumise seadustega. Kulub pendlil ühe terve õõtse tegemiseks aeg T, s. t. on tema periood ehk õõtsevälde T, siis teeb ta 1 sekundis $\frac{1}{T}$ õõtset. Laineõpetuses mängib arv N, mis näitab, mitu õõtset pendel 1 sekundis teeb, tähtsat osa, teda hüütakse lühidalt lainetamise õõtsearvuks. Eelmise järele on

$$\text{õõtsearv } N = \frac{1}{T}$$

$$\text{õõtsevälde } T = \frac{1}{N}, \text{ ehk}$$

$$\mathbf{NT = 1} \qquad (1)$$

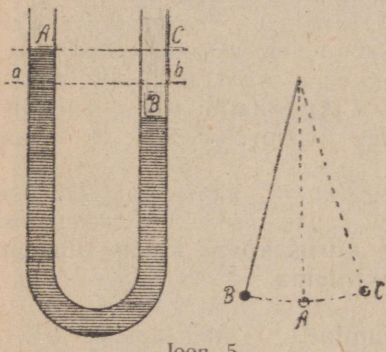
2) Pendli õõtsumine on ainult erijuhus kõigist nendest liikumistest, mis kuuluvad õõtsumiste liiki. Ka keha üksikud osad võivad õõtsuma hakata. Mitmel juhusel võime otsekohe katsega tõestada, et ka need õõtsumised sünnivad samade seaduste järele kui pendli õõtsuminegi. Nende jaoks on maksvad tuntud õõtsumisseadused, me võime neid järjelikult samuti käsitada kui hariliku pendli õõtsumist.



Joon. 4.

Vaatleme näiteks veejaokeste üles-alla õõtsumist veepinna lainetamisel: laineharjal asuvad veeosad A (joon. 4) langevad, kuna nad laineorus (B) tõusevad. Kujutame ette, et A ja B ühendatud on kõvertoruga AB. Veeosad punktides A ja B liiguvad lainetamisel samuti üles-alla, kui veenivoo ühendatud nõudes AB (joon. 5), ei muutu ju veeosade üles-alla liikumine sellega, kui me toru AB (joon. 4) vette asetame.

Ühendatud nõudes võime veenivoode õõtsumist soovi järele kunstlikult sünnitada. Selleks on ainult tarvis veenivood ühes toruharus alla suruda ja teda siis järsku vabaks lasta. Kui tekkinud õõtsumist võrrelda paraja pikkusega pendli OA õõtsumisega (joon. 5), siis selgub et mõlemad liikumised täiesti sarnased on. Valides näiteks pendli pikkus nii, et tema õõtsevälde sama suur on kui veenivoo õõtseväldegi, siis võime mõlemat liikumist alati nii korraldada, et nad ühel ajal sünnivad. Sarnasel puhul näeme, et samal ajal kui pendel asub punktis B, seisab veenivoo kõige madalamal kohal B, kui esimene läheb läbi punkti A, viibib ka veepind keskmisel tasakaalu pinnal ab, jõuab pendel punkti C, tõuseb veenivoo kõige kõrgemale (punkt C) jne. Samal ajal kui pendel teeb ühe t e r v e õ õ t s e (BC — CB), liigub veenivoo kõige madalamast punktist (B) kõige kõrgemani (C) ja tagasi kunni B, s. t. teeb ka ü h e t e r v e õ õ t s e.



Joon. 5.

3) Molekulaarhüpoteesi järele (II, § 54) on iga keha moleekulid vähe liikuvad ja asuvad nad kõik molekulaarjõudude mõju all, mis neid teatud tasakaalu-seisukohas hoiavad. Kui moleekul nimetatud tasakaalu seisust välja tõukub, siis tõmbavad molekulaarjõud teda sinna tagasi. Võib tõestada, et e l a s t s e k e h a moleekuli peale need molekulaarjõud sama seaduse järele mõjuvad, kui pendli koorma raskusjõud, mis pendli õõtsumist sünnitab. Satub moleekul korra liikuma, siis peab ta järjelikult samuti edasi-tagasi õõtsuma, kui pendelgi.

Hooke seaduse järele (II, § 57) on elastse keha deformatsioon proportsionaalne deformeeriva jõuga. Mida suuremaks kasvab see jõud, seda rohkem deformeerub keha, seda kaugemale peavad järjelikult nihkuma keha moleekulid oma esialgsest tasakaaluseisust. Et deformeeriv jõud ületama peab ainult neid molekulaarjõude, mis moleekulid tagasi tõmbab nende tasakaalu seisukoha poole, siis peavad nimetatud molekulaarjõud seda suuremaks kasvama, mida suuremaks saab deformeeriv jõud, s. t. mida suuremaks muutub keha deformatsioon, ehk mida kaugemale nihkuvad moleekulid oma tasakaalu-seisukohtadest. Seega järgneb Hooke seadusest, et molekulaarjõud, mis moleekulit tema tasakaalu-seisukoha poole tõmbavad, proportsionaalsed on moleekuli kaugusega sellest tasakaalu-seisukohast. § 7_3 tõestasime, et ka jõud, mis pendlit õõtsuma paneb, sama seaduse järele muutub. Järjelikult on moleekuli õõtsumine molekulaarjõudude mõjul samasugune harmooniline õõtsumine, nagu pendli õõtsuminegi.

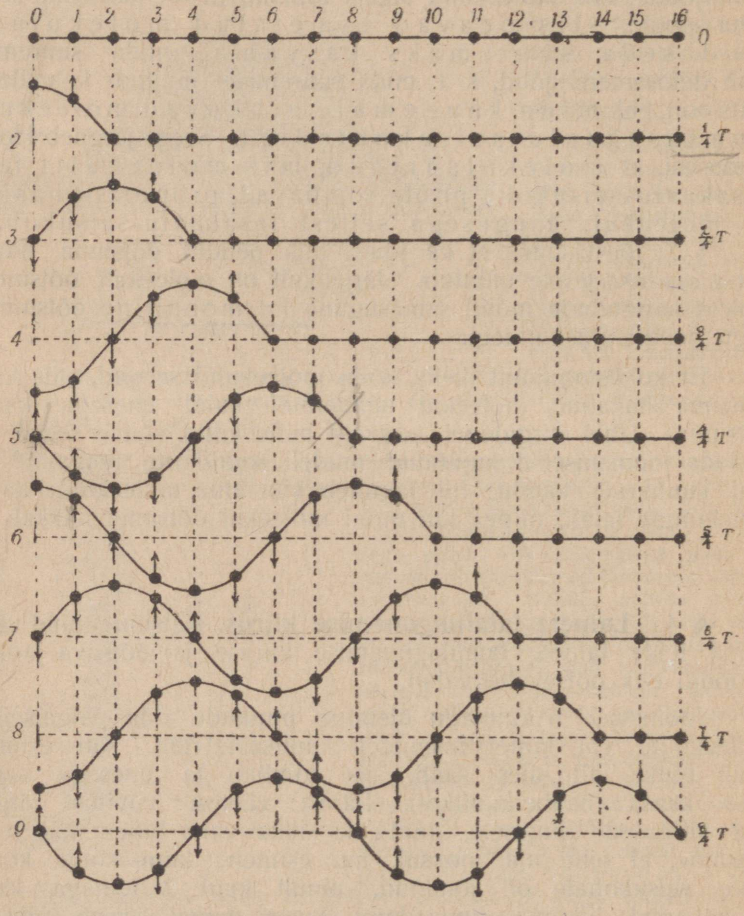
Et kohäsioonjõud keha kõiki moleekulid seovad, siis kisub õõtsuma hakanud moleekul naabermoleekulid enesega kaasaõõtsuma. Ühel sirgjoonel seisvaid moleekulid võime seega sarnastada joonistusel 3 kujutatud mudeli kuulikeste reaga. Nagu seal kuulikeste kaudu, nii laguneb siin aine moleekulite kaudu lainetamine laiali, niipea kui mõni moleekul õõtsuma hakkab.

§ 4. **Lainete laialilagunemise kiirus.** Katsume nüüd vahekorda leida lainete laialilagunemise kiiruse ja õõtsuva jaokese perioodi ehk õõtsevälte vahel.

Joonistusel 6 kujutagu ülemine punktide rida paigalseisvat moleekulite või lainetamismudeli kuulikeste rida. Kui esimene kuul tõuke alt üles saab, siis tõmbab ta enesega samas sihis kaasa naaberkuulikesi. Pärast väikest viivitust järgnevad viimased esimesele, kuid üks ikka vähe hiljem kui teine. Oletame, et selle aja jooksul, kui esimene kuul kõige kõrgemale seisukohale on jõudnud, ainult kuul 2 temaga kaasa on hakanud liikuma, kuna kuul 3 veel paigal seisab (rida 2). Liikudes tasakaaluseisukohalt äärmisele ülemisele seisukohale, on kuul 0 teinud ühe veerandi tervest õõtsest; selleks kulub tal $\frac{1}{4}$ õõtseväldet. Nii kujutab siis rida 2 kuulide seisu $\frac{1}{4}$ õõtseväldet peale liikumise algust.

Teise $\frac{1}{4}$ õõtsevälte lõpul jõuab 0 tagasi oma tasakaaluseisukohale (rida 3). Kuulike 1 tuleb ülemiselt äärmiselt seisukohalt juba tagasi, ei ole aga veel oma algseisukohani jõudnud; kuul 3 asub parajasti äärmisel seisukohal, 4 liigub alles sinnapoole, 5 seisab veel paigal.

Kolmanda $\frac{1}{4}$ õõtsevälte lõpul asub 0 alumisel äärmisel seisukohal (rida 4). Kuul 1 läheneb viimasele, 2 liigub läbi tasakaalu-seisukoha sinnapoole, 3 tuleb tagasi ülemiselt äärmiselt seisukohalt, 4 viibib parajasti seal, 5 läheneb sellele, 6 aga seisab veel liikumata.



Joon. 6.

Neljända $\frac{1}{4}$ õõtsevälte järele, s. t. ühe terve õõtsevälte lõpul on 0 jälle oma algseisukohal ja algab uut niisamasugust õõtset. Joonistusel kujutab rida 5 seda silmapilku: Kuulike 2 asub alumisel ja 6 ülemisel äärmisel seisukohal; 4 läheb parajasti läbi tasakaalu-seisukoha ja 8 seisab alles paigal. Me näema, et kuulid 0—8 asuvad ühe t e r v e l a i n e peal; 2 seisab laineoru keskkohal, 6 — laineharjal. Vahe kuulide 0 ja 8 vahel kujutab ühte lainepikkust. Sellest järgneb seadus:

Selle aja sees, kui õõtsuv ainejaoke lõpetab ühe terve õõtse, laguneb lainetamine laiali ühe terve lainepikkuse võrra. Teise õõtse vältel kordub sama sündmustik: kuulikese 0 juurest laguneb laiali uus laine, mille eest terve esimene laine ikka kaugemale paremale poole nihkub. Näiteks on reas 6 tekkinud $\frac{3}{4}$ uuest lainest (0—2), kuna esimene laine (2—10) sama pikkuse võrra edasi on nihkunud. Reas 7 on tekkinud $\frac{1}{2}$ uuest lainest (0—4), reas 8 juba $\frac{3}{4}$ lainet ja reas 9 terve uus laine. Sama aja jooksul on aga ka kuulikn 0 teise terve õõtse lõpetanud. Kolmanda õõtse lõpuks seisavad kolm tervet lainet üks-teise järele jne.

Selle järele, kui esimene liikuma hakanud jaoke (0) on teinud 5 tervet õõtset, seisavad kuulikeste reas (joon. 3) 5 tervet lainet üks-teise järele. Lainetamine on seega viie õõtsevälte jooksul viie lainepikkuse võrra laialilagunenud. Teeb esimene kuulike N õõtset sekundis (õõtsearv) ja on ühe laine pikkus l cm, siis laguneb lainetamine — esimesest kuulikesest arvatud — selle N õõtse ehk 1 sekundi jooksul $N \times l$ cm võrra laiali. Teiste sõnadega: **lainetamise laialilagunemise kiirus on õõtsearv × lainepikkus,** ehk

$$C = Nl \tag{2}$$

See tähtis formul seob laine laialilagunemise kiirust C lainepikkusega l ja lainetamise õõtsearvuga N. Temast järgneb

$$l = \frac{C}{N} \tag{2a}$$

$$N = \frac{C}{l} \tag{2b}$$

2) Kui silmitseda joonistuse 6 alumist rida, siis näeme, et punktid 0 ja 8 nii oma seisukoha kui ka liikumissihi poolest ühesugused on. Niisuguste laineosade kohta ütleme, et nad ühesugustes faasides viibivad. Ühesugustes faasides on ka punktid 1 ja 9, 2 ja 10, 3 ja 11 jne., millede vahe igal pool võrdub ühe laine pikkusega. Sellepärast defineeritakse lainepikkust ka tihti kui vahet kahe kõige lähemal seisva ühesugustes faasides viibiva laineosa vahel.

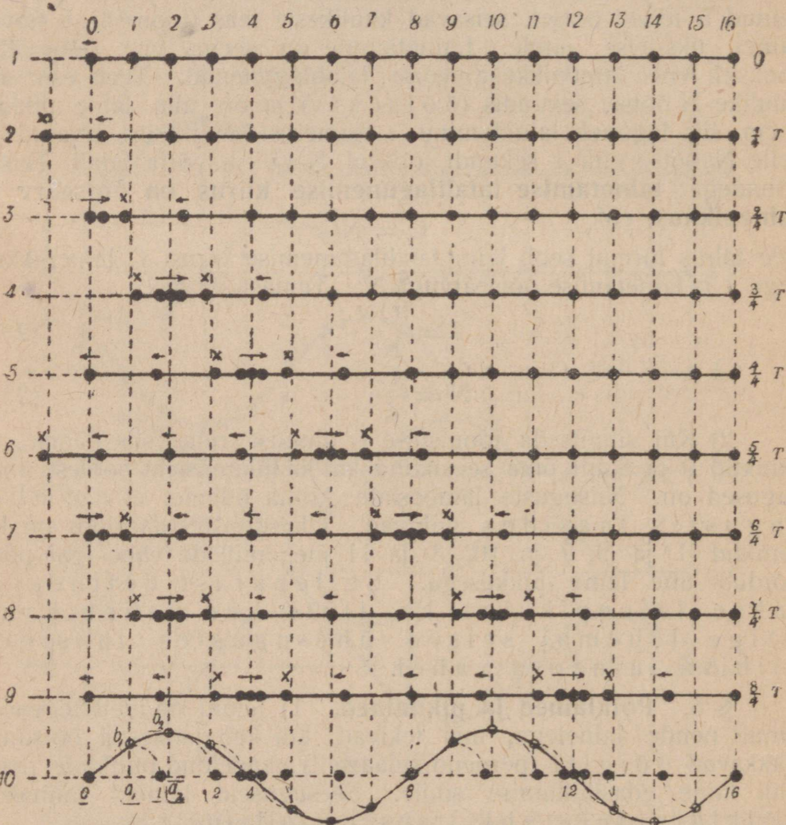
§ 5. **Põiklained ja pikilained.** 1) Senni oli meil tegemist ainult nende lainetega, mis tekivad, kui kehajaokesed õõtsuma hakkavad põigiti (perpendikulaarselt) vaadeldud punktide reale ehk laine edasiliikumise sihile. Seesuguseid laineid hüütakse põiklaineteks ehk transversaallaineteks.

Lained võivad aga sündida ka siis, kui jaokesed õõtsuvad piki kuulikeste rida ehk laine laialilagunemise sihti. Sellel juhusel sünnivad n. n. pikilained ehk longitudinaallained. Nende lainete tekkimist vaatleme nüüd lähemalt.

Torkame jämeda kumminööri sisse piki nööri terve rea üksteisest ühekaugusel seisvaid nõelu. Nööri ühe otsa kinnitame seina külge, teist otsa aga hoiame käes. Kui pingulseisev nöör järsu tõmbega välja venitada, siis näeme, et nõelad käe juures hõrenevad ja et see hõre koht edasi liigub mööda nööri kunni seinani.

Järsku tagasi lastes nööriotsa, näeme käe juures sündivat nõelte tihendust, mis ka seina poole edasi liigub piki nööri. Kui nööriotsa perioodiliselt tõmmata ja tagasi lasta, siis liigub käe juurest seina poole vaheldamisi ikka üks nõelte tihendus ja üks hõrendus. Kõrvutiseisev tihendus ja hõrendus kokku moodusdavadki ühe pikilaine.

2) Joonistusel 7 kujutab ülemine rida sirgjoonel asuvaid ainejaokesi 0—16, mille kaudu laiali lagunema hakkab pikilainetamine. Jaoke 0 hakkab kõige pealt õõtsuma, kaldudes pahemale



Joon. 7.

ja paremale poole oma tasakaalu-seisukohalt. Et ta aga molekulaarjõudude tõttu seotud on oma naaberjaokesega (1), siis tõmbab ta viimast enesega kaasa. Liikuma hakates tõmbab jaoke 1 omakord jaokest 2 enese järele jne. Nii kordavad järk-järgult kõik reas seisvad jaokesed esimese õõtsumist, liikudes niisama nagu esimenegi piki jaokeste rida, ja algades seda liikumist ikka vähe hiljem, kui eelmine jaoke.

Veerand õõtseväldet peale liikumise algust jõuab jaoke 0 äärmise pahempoolse seisukohani (rida 2). Et järgmine jaoke 1 vähe hiljemini talle järele hakkas liikuma, kuna jaoke 2 veel paigal seisab, siis muutub vahe jaokeste 0, 1 ja 2 vahel suuremaks kui järgmiste, paigalseisvate jaokeste vahel, nii et siin tekkinud on aine h õ r e n d u s (0—2).

Järgmise $\frac{1}{4}$ õõtsevälte lõpuks jõuab jaoke 0 tagasi oma tasakaalu-seisukohale. Selle aja sees on aga ka jaoke 3 juba liikuma hakanud (rida 3), — muidugi ka esiteks pahemale poole, nii siis otse vastu läbi tasakaalu-seisukoha paremale poole liikuvale jaokesele 0. Arusaadavalt tihenevad ainejaokesed nende kahe üksteise vastu liikuvate jaokeste (0 ja 3) vahel, nii et $\frac{1}{4}$ õõtseväldet hiljemini seal on sündinud aine t i h e n d u s 0—3 (rida 4). Esimene hõrendus on sellesama aja jooksul edasi nihkunud ja asub nüüd jaokeste 3 ja 6 vahel.

Veerand õõtseväldet hiljemini läheb jaoke 0 läbi oma tasakaalu-seisukoha, liikudes uuesti pahemale poole (rida 5). Ta kaugeneb nüüd jaokesest 1, mis alles oma tasakaalu-seisukohale läheneb, ja annab sellega põhjust uue hõrenduse (0—2) tekkimiseks. Nüüd liiguvad aga jaokesed 4 ja 7 teineteise vastu, nii et $\frac{1}{4}$ õõtsevälte järele (rida 6) jaokesed 4—8 aine tihendust moodustavad, kuna mõlemal pool viimasest hõrendused 0—4 ja 8—10 asuvad.

Kui niiviisi edasi jälgida, siis näeme, et iga $\frac{1}{4}$ õõtsevälte järgi nii tihendused kui ka hõrendused ikka ühevõrra edasi nihkuvad paremale poole, kuna jaokese 0 juurest ikka uued tihendused ja hõrendused juurde tulevad. Kahe õõtsevälte järele peale liikumise algust (rida 9) näeme näiteks kaks tervet tihendust 2—6 ja 10—14, mida mõlemalt poolt ümbritsevad hõrendused. Nagu joonistusest selgub, viibivad punktid 0, 8 ja 16 (rida 9) ühesugustes faasides, sest et nad kõik läbi oma tasakaalu-seisukoha lähevad, liikudes pahemale poole. Niisama nagu põiklainete juures, nii nimetame ka pikilainetamises l a i n e p i k k u s e k s v a h e t k a h e k õ i g e l ä h e m a ü h e s u g u s t e s f a a s i d e s v i i b i v a p u n k t i v a h e l. Sel silmapilgul, kui jaoke 0 lõpetab teist õõtset (rida 9) on lainetamine nii siis laiali lagunenud kahe laine 0—8 ja 8—16 pikkuse võrra. Sellest järgneb, et ka siin maksev on põiklainete jaoks leitud seadus:

Õõtsuvalt jaokeselt laguneb pikilainetamine õõtsumise sihis laiali iga õõtsevältel ühe lainepikkuse võrra.

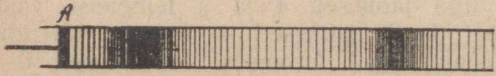
Nii seovad siis ka pikilaine laialilagunemise kiirust tema õõtsearvuga ja lainepikkusega eelmises § leitud formulid 2, $2^{\underline{a}}$ ja $2^{\underline{b}}$.

3) Pikilainetamises ei näe me kunagi tuntud lainejoont. Et meil aga siiski ka siin tõepoolest tegemist on lainetamisega, seda näeme kõige ülevaatlikumalt, kui punktide kaugust nende tasakaalu-seisukohtadest mitte ära ei märgi piki punktirida, nii kui see tõepoolest on, vaid põigiti, s. t. perpendikulaarselt

punktide reale. Joonistuse 7 rea 9 punktide jaoks on see nii tehtud reas 10: kõik punktid, mis asuvad paremal pool oma tasakaalu-seisukohta, on vastaval kôrgusel ära märgitud tasakaalu seisukohast püstitatud perpendikliltel, kuna pahemal pool tasakaaluseisukohta viibivad punktid üle on kantud vastavatele perpendiklitele allapoole punktide rida. Punkti 1 tasakaalu-seisukoht on, näiteks a_1, tema kaugus viimasest $a_1 1$ on üle kantud perpendiklile $a_1 b_1 = a_1 1$. Niisama on punkti 2 jaoks leitud vastav kõrgus $b_2 a_2 = a_2 2$ j. n. e. Kui kõverjoonega ühendada kõik leitud kõrgused, siis saame tuntud lainejoone.

Seal, kus lainejoon lõikab punktide rida, viibivad vastavad punktid tasakaalu-seisukohal (punktid 0, 4, 8, 12 ja 16). Neid punkte nimetatakse laine sôlmedeks. Nagu joonistusel näha, asuvad pikilainete sôlmedes vaheldamisi tihenduste ja hôrenduste keskkohad.

4) Iseäranis tähtsad on pikilained, mis tekivad gaasides või vedelikkudes. Vaatleme sellepärast seesuguse lainetamise tekkimist pikas, gaasiga täidetud torus (joon. 8). Toru otsas olgu vahesein A, mis piki toru kiirelt edasi ja tagasi õõtsub. Liikudes pahemale poole sünnib vaheseina taga hôrendatud gaasikiht, sest et kaugemalseisvad gaasijaokesed vaheseinale A mitte otsekohe ei järgne. See hõrendus hakkab piki toru paremale poole edasi liikuma, niisama, kui § 5_1 kirjeldatud nôelte hõrendus kumminööril seina poole liikus.



Joon. 8.

Tagasiliikumisel surub vahesein A gaasijaokesed kokku, sest et viimased oma esialgset liikumissihti (pahemale poole) veel muuta ei ole suutnud. Vaheseina ees sünnib gaasi tihendus, mis sealt piki toru paremale poole hakkab liikuma, järgnedes eelmisele hõrendusele.

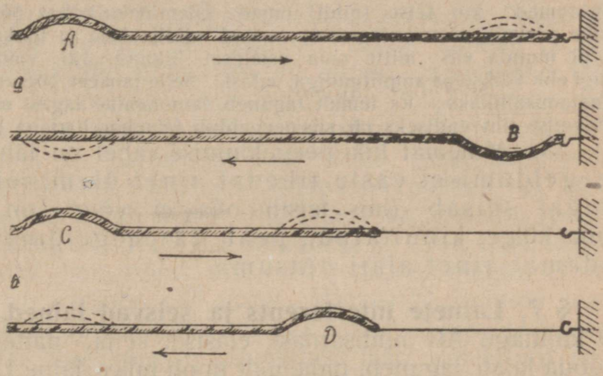
Vaheseina iga õõtse juures sünnib nii üks hõrendus- ja üks tihenduskiht, mis kokku ühe pikilaine moodustavad. Iga laine liigub toru mööda ühel õõtsevältel ühe lainepikkuse võrra edasi.

5) Me nägime, et pikilainetamisel ühed aineosad tihenevad, teised jälle hõrenevad, teiste sõnadega, et pikilaine juures muutub aine üksikute osade ruumala. Põiklainetamisel sellevastu painduvad aine üksikud osad ainult üles-alla, jäädes ikka ühesuguse tihedusega, s. t. põiklainetamisel muutub ainult keha kuju.

Sellest järgneb, et põiklained võivad tekkida ainult niisuguses aines, mis elastsuse tõttu keha kuju muutumist püüab takistada, sest muidu ei tuleks kohalt nihkunud ainejaoke üleüldse enam oma algseisukohale tagasi, ja ei hakkakski õõtsuma. Et säärase omadusega ainult kõvad kehad on, **siis võivad põiklained tekkida ainult kõvades kehades.**

Pikkilainete sündimine on võimalik, kui kokkusurutud aine-jaokesed peale surve kadumist jällegi laiali nihkuvad ja oma esialgset ruumala täidavad, nad võivad sündida nii siis ainetes, mis on elastsed ruumala muutmise suhtes. Niisuguse omadusega võivad olla nii gaasid kui ka kõvad ja vedelad kehad; **sellepärast võivad pikilained tekkida nii gaasides kui kôvades ja vedelates kehades.**

§ 6. **Lainete peegeldumine.** 1) Ühte otsapidi seina külge kinnitatud köit või kumminööri hoiame käega teisest otsast pingul. Nüüd liigutame kätt järsku ükskord üles-alla: käe juures sünnib lainehari A mis mööda nööri seina poole liigub (joon. 9a). Põrgates vastu seina, muutub ta laineoruks B ja tuleb sealt niisugusena käe juurde tagasi. Ümberpöördult muutub seinapoole liikuv laineorg pärast seina vastu põrkumist — laineharjaks. Selle asemel, et köieotsa otsekohe seina külge siduda, võime ta ka pika peenikese niidi abil seina külge kinnitada (joon. 9b). Korrates ülevalkirjeldatud katseid, näeme, et seina poole minev lainehari C samasuguse harjana D ja laineorg samasuguse oruna seinalt tagasi hakkab tulema.



Joon. 9.

Laine tagasipôrkumist nimetatakse üleüldse laine peegeldumiseks. Peegeldumine sünnib alati selles kohas, kus laine ühest ainest teise üle peab minema (näiteks köiest seina või niiti). On teise aine jaokesed kôvemini seotud üksteisega kui esimese omad, siis peegeldub laine tagasi ümberpöördud kujus (sein ja nöör), on nad aga nôrgemini seotud kui esimese aine jaokesed, siis peegeldub laine tagasi niisamasugusena nagu ta liikus peegelduskoha poole (niit ja köis). Me ütleme, et esimesel juhusel laine peegeldub vastu tihedamat ainet, teisel juhusel aga vastu hôremat ainet.

2) Mispärast lained peegelduvad, selle üle jôuame ehk kôige hôlpsamini selgusele, kui ainete moleekulite liikumist peegelduskohas vôrrelda kokkupôrkuvate elastiliste kuulide liikumisega. Teatavasti pôrkub väike liikuv kuulike, sattudes vastu paigalseisvat suurt kuuli, viimaselt tagasi ja liigub peale seda ümberpöördud sihis, kuna aga liikuv suur kuul paigalseisvat väikest kuuli enese ees edasi lükkab ja nii siis oma esialgset liikumist peale kokkupôrget jätkab.

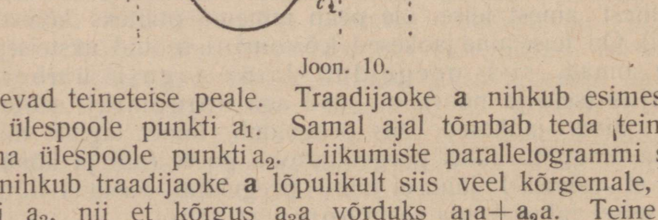
Peegelduskohas põrkuvad esimese aine õõtsuvad jaokesed vastu teise aine paigalseisvaid jaokesi. Et aga kõvemini üksteisega seotud ainejaokeste — niisama kui suurema kuuligi — liikumatôukamiseks suuremat jôudu tarvis on kui nôrgemalt seotud ainejaokeste juures, siis on tihedama aine jaokeste liikumine peale kokkupôrget sarnane suurema kuuli liikumisega, hôredama aine jaokeste liikumine aga väiksema kuuli omaga.

Ülevalkirjeldatud peegeldumiskatses on näiteks seina jaokesed tihedamini üksteisega seotud kui köie jaokesed. Peegeldumiskohas pôrkab nii siis „väike" õõtsuv köiejaoke „suurema" paigalseisva seinajaokesega kokku. Oli köiejaokese liikumise siht peegelduse silmapilgul näiteks alt üles, siis põrkub ta seinajaokeselt tagasi ja hakkab ülevalt alla liikuma. Nii muutub järsku köiejaokese õõtsumise siht otse vastupidiseks endisele. Tekkinud uus õõtsumine kandub tagasi järgmiste nöörijaokeste peale, mille tagajarjel mööda nööri laiali laguneb uus ümberpöördud laine: kui seina juurde tuli lainehari, siis läheb sealt peegeldatult tagasi laineorg jne.

Peegeldumisel vastu hôredamat ainet, on esimese aine (köie) jaokesed „suuremad" kui teise (niidi) omad. Ülemineku kohas ôôtsuv viimane nöörijaoke põrkub vastu nõrgemalt seotud niidijaokest ja tõukab teda enese eest; ta ei muuda siis mitte oma esialgset liikumissihti, vaid ôôtsub endiselt, kuigi ehk väiksema amplituudiga, edasi. Selle jaokese õõtsumine kujuneb uueks lainetamisallikaks; ka temalt laguneb lainetamine tagasi mööda nööri. Et aga õõtsumise siht endiseks jäi, siis peegeldub lainehari harjana ja laineorg — oruna.

3) Mõlemat liiki peegeldumise vahel on tähtis wahe: Kuna peegeldumisel vastu tihedat ainet ülemineku punkt alati paigal seisab (mis teisiti olla ei võigi, on ju näiteks köis seina külge kinnitatud), peab ta peegeldamisel vastu hôredamat ainet alati ôôtsuma.

§ 7. **Lainete interferents ja seisvad lained.** 1) Joonistusel 10 kujutagu AB niidisarnast elastset keha, näiteks traati, mida mööda laiali laguneb, pahemalt poolt tulles laine 1, paremalt poolt aga laine 2 Traadi keskkohas puutuvad mõlemad lained kokku



Joon. 10.

ja lähevad teineteise peale. Traadijaoke **a** nihkub esimese laine mõjul ülespoole punkti a_1. Samal ajal tõmbab teda teine laine niisama ülespoole punkti a_2. Liikumiste parallelogrammi seaduse järgi nihkub traadijaoke **a** lõpulikult siis veel kõrgemale, mõnda punkti a_3, nii et kõrgus a_3a võrduks $a_1a + a_2a$. Teine traadipunkt b kalduks esimese laine mõjul alla, punkti b_1 teise laine mõjul aga üles, punkti b_2. Tõepoolest nihkub ta siis üles punkti b_3, nii et $b_3b = b_2b - b_1b$. Kolmas traadijaoke C kaldub esimese laine mõjul üles (punkti C_1), teise mõjul aga sellesama võrra alla (punkti C_2). Lõpulikult jääb ta siis mõlema laine üheaegsel mõjul oma tasakaaluseisukohale (C) paigale.

Kui niiviisi algebraliselt summeerida lainete mõju kõigi traadijaokeste peale, siis leiame traadi tõelise kuju vaadeldud silmapilgul. Joonistusel 12 kujutab seda kõverjoon 3. Me näeme et kõik traadijaokesed asuvad uuel lainejoonel (3), mille sõlmpunktid seisavad nendes kohtades (C), kus mõlemate alglainete mõjud teineteist hävitavad. Selle resultantlaine kuju oleneb mõlema komponentlaine kujust ja võib üleüldse väga mitmekesine olla.

Teadagi summeeruvad kaks lainetamist ka siis, kui mõlemad ühes ja samas sihis laiali lagunevad.. On mõlemad alglained selle juures ühesugused ja liiguvad nad ühesuuruse kiirusega niiviisi edasi, et esimese laine harja kohal alati teise laine org asub, siis ütleme et lainete käigu vahe vôrdub poollainega. Liiguvad näiteks ühesugused lained R_1 ja R_2 (joon. 12). ühekiirelt paremale poole, ja langevad nende sõlmed (S_1, S_2 ja S_3) mingil silmapilgul ühte, siis ei muutu lainete seis üksteise suhtes kogu lainetamise aeg, vaid ühe laine harja vastu seisab alati teise laine org. Antud silmapilgul seisab laine R_2 hari vertikaaljoonel P. Laine R_1 hari jõuab nimetatud vertikaaljoonele $^1/_2$ õõtseväldet hiljem. Sellepärast paistab, et laine R_2 poollainevõrra ees liigub lainest R_1; sellest ka nimetus „poollaine suurune käiguvahe.“ Et laineharja ja tema vastu seisva samasuure laineoru koosmõjul õõtsuvad jaokesed paigalt ei või liikuda, siis kujutab sirgjoon CD (joon. 12) nende jaokeste seisu joonistusel kujutatud silmapilgul. Et aga käsitatud juhusel lainete seis üksteise suhtes kogu aeg muutumatuks jääb, siis ei või aine jaokesed nende lainete koosmõjul üleüldse liikuma hakata, vaid nad peavad jäädavalt sirgjoonele CD jääma, nii et lainetamine sootumaks hävineb.

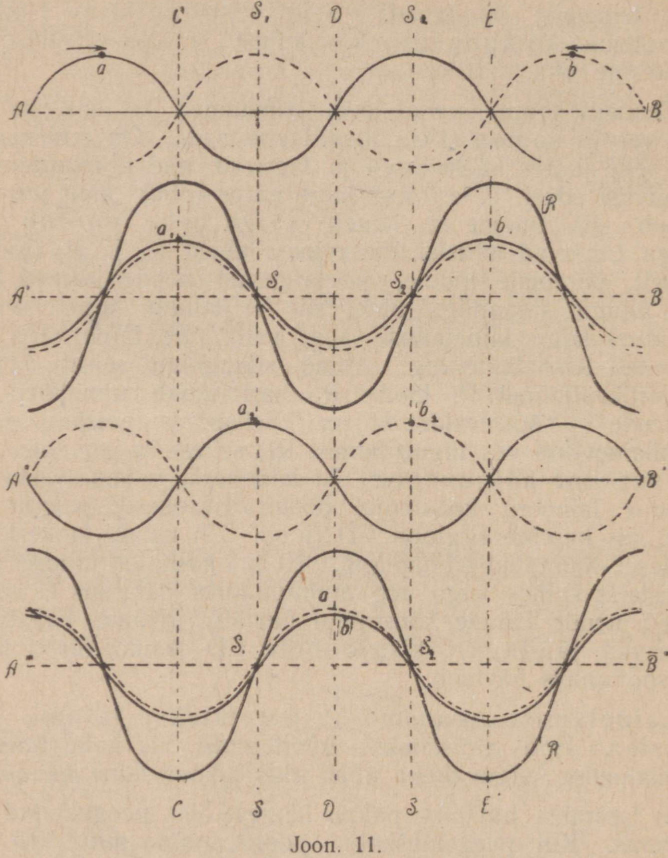
Lainetamiste koosmõju nimetatakse lainete interferentsiks. Eriti mõistetakse interferentsi all kahe ühesuguse ja poollainelise käiguvahega ühes sihis liikuva laine hävinemist.

2) Iseäralist huvitust pakub langeva ja peegeldatud laine interferents. Kui peegelduskoha poole saata mitte üks laine, vaid korduv, pikemat aega kestev lainetamine, siis tuleb sealt niisamasugune korduv lainetamine tagasi. Mõlemad lainetamised interfereeruvad, mille tagajärjena õõtsuval kehal tekivad n. n. seisvad lained.

Selle nähtuse seletamiseks kujutagu joonistusel 11 (ülemine rida) A pahemalt poolt paremale liikuvat langevat lainet ja B esimesele vastu tulevat peegeldatud lainet. Et peegeldumisel lainetamise õõtsearv muutumatuks jääb, siis on langeva ja peegeldatud laine pikkus alati ühesuurune. Lihtsuse pärast oletame, et ka mõlema laine amplituudid on võrdsed.

Olgu teataval silmapilgul mõlemate lainete seis niisugune, et nende sõlmpunktid C, D ja E ühte langevad (rida 1).

Iga ainejaoke sirgjoonel AB kalduks laine A mõjul niipalju ühele poole sirgjoont, kui palju ta laine B mõjul kalduma peaks teisele poole sirgjoont. Sellepärast jäävad sel silmapilgul kõik jaokesed oma tasakaaluseisukohale — sirgjoonele A B, nagu ei olekski laine-



Joon. 11.

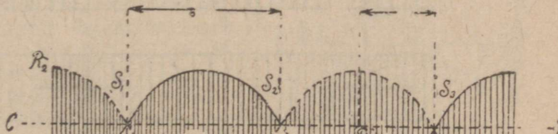
tamisi olemas. $\frac{1}{4}$ ôôtsevälte järele nihkub laine A $\frac{1}{4}$ lainepikkuse võrra paremale, laine B aga niisama palju pahemale poole (Lainehari a jõuab näiteks punkti a_1 (rida 2), lainehari b aga punkt b_1.) Nüüd langevad mõlemad lained ühte, nii et nende mõjud sirgjoonel asuvate ainejaokeste peale summeeruvad. Iga ainejaoke kaldub sellepärast kaks korda kaugemale sirgjoonelt, kui ta seda teeks üheainsa laine mõjul. Resultantlaine R kujutab ainejaokeste tõelist seisu vaadeldud silmapilgul. Me näeme, et laine R harjad ja orud on kaks korda suuremad kui alglainete omad, ja et tema sõlmpunktid S_1 ja S_2 ühte langevad viimaste sõlmpunktidega.

$\frac{1}{4}$ ôôtseväldet peale seda silmapilku on mõlemad lained jällegi $\frac{1}{4}$ lainepikkuse võrra teineteisele vastu nihkunud (rida 3).

Punkt a_1 jõuab punkti a_2 ja b_1 — punkti b_2. Jällegi seisab ühe laine harja vastu teise laine org ja ümberpöördult, nii et ainejaokesed uuesti sirgjoonel peavad viibima. $^1|_4$ õõtseväldet veel hiljem jõuavad mõlemad lained niikaugele teineteisele vastu, et punktid a_2 ja b_2 ühte langevad (rida 4). Lainete seis on nüüd sarnane reaga 2, ainult selle vahega, et harja kohal reas 2 asub nüüd laineorg ja ümberpöördult. Jällegi kujutab resultantlaine R kehajaokeste tõelist seisukohta; tema sõlmpunktid S_1 ja S_2 asuvad endistel kohtadel.

Järgmise veerandõõtsega lõpetavad ainejaokesed ühe terve õõtse, ja lained seisavad jällegi samuti, nagu see kujutatud on reas 1. Kordub kõik ülevalkirjeldatu teist korda jne. Kui samasugusel teel juurelda kehajaokeste seisukohti neil silmapilkudel, mis ilmuvad reas 1 ja 2, 2 ja 3 jne. kujutatud silmapilkude vahel, siis näeme, et resultantlaine sõlmpunktid alati ühe koha peale (S_1 ja S_2) jäävad. Et ridades 1 ja 3 kujutatud silmapilkudel terve resultantlaine sirgjooneks muutub, siis seisavad punktid S_1 ja S_2 jäädavalt ühel kohal paigal, kujutades nii paigalseisvaid sõlmpunkte. Teiselt poolt näeme aga, et need ainejaokesed, mis asuvad põikjoontel CC, DD, ja EE, alati ühel ja samal kohal õõtsuma peavad kahekordse amplituudiga. Neid kohti nimetatakse seisvate lainete puhetisteks. Puhetistes asuvad laineharjad ei liigu mitte edasi piki sirgjoont AB vaid seisavad ühel kohal paigal, muutudes iga $\frac{1}{2}$ õõtsevälte järele (read 2 ja 4) laineoruks ja ümberpöördult.

Seisva laine pikkuseks nimetame resultantlaine R pikkust. Joonistusel 12 kujutab R_1 resultantlaine seisu silmapilgul, mis vastab joonistusel 11, rida 2 kujutatud silmapilgule. R_2 kujutab sama laine seisu $^1/_2$ õõtseväldet hiljemini (joon. 11, rida 4), sirgjoon CD aga resultantlaine seisu $\frac{1}{4}$ õõtseväldet hiljemini (joon. 11, rida 3). Me näeme, et vahe kahe naabersõlme vahel (S_1 S_2) võrdub poollainega, vahe sõlme (S_3) ja kõige lähema puhetise (P) vahel aga veerandlainega.

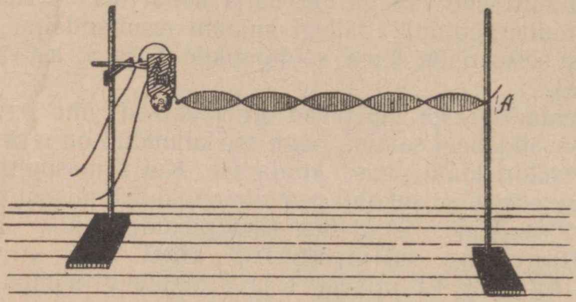


Joon. 12.

3) Seisvad lained lähevad tuntavalt lahku harilikest edasiliikuvaist laineist: kuna viimaste juures iga ainejaoke järgimööda kordab eelmise jaokese liikumist ja nii siis iga jaoke ühesuuruse amplituudiga õõtsub, on seisvatel lainetel üksikute jaokeste õõtsumisamplituud väga mitmesugune; sellevastu liiguvad aga kõik kahe sõlme vahel asuvad jaokesed ühel ajal üles või alla. Sõlm-

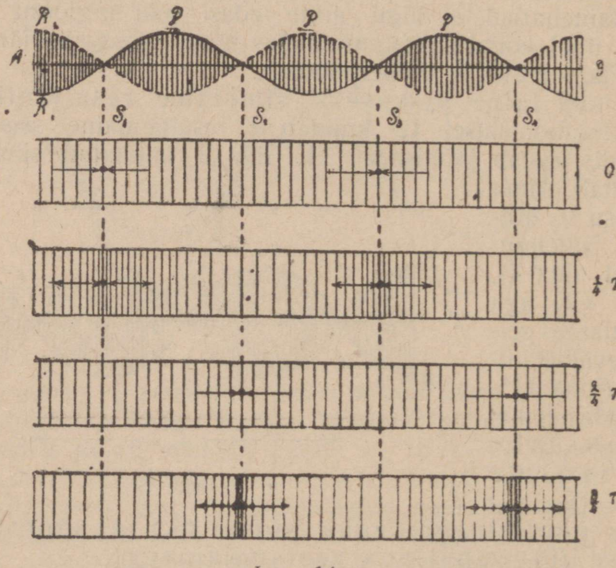
punktides on õõtsumisamplituud jäädavalt 0, puhetistes aga kõige suurem.

Edasiliikuvas laines lähevad kõik jaokesed üksteise järgi läbi oma tasakaalu-seisukoha, seisvates lainetes aga ühel ajal, ja nimelt silmapilkudel 1 ja 3 (joon 11).



Joon 13.

4) Seisvaid laineid võime hõlpsasti peenikesel niidil tekitada joon. 13 kujutatud viisil: Elektrikella haamri külge kinnitatakse pingulseiva niidi ots. Haamri õõtsumisel lagunevad lained mööda niiti laiali, nad peegelduvad punktis A ja interfereeruvad langevate lainetega. Niidi jaokesed õõtsuvad siis joonistusel kujutatud seisvate lainetena.



Joon. 14.

5) Ka pikilainete interferents sünnib samade seaduste järele. Kõige kergemini leiame nende interfereerumise resultaadi, kui komponentlaineid § 5_3 kirjeldatud viisil kujutada põiklainetena (joon. 7, rida 10). Nende põiklainete resultantlaine muudame siis uuesti pikilaineks. On arusaadav, et säherdune kä-

situsviis sündmustikus eneses midagi ei muuda ja et leitud resultaat tõeolule täiesti vastab.

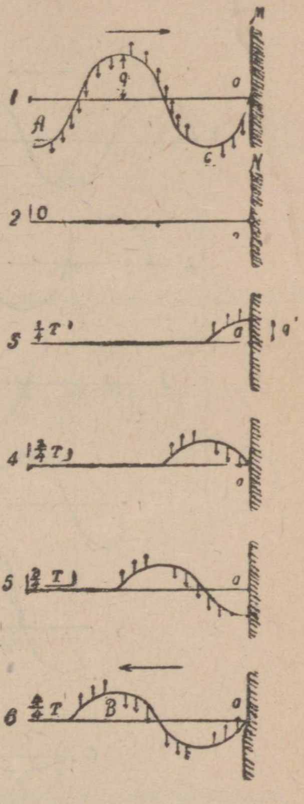
Seesugusel teel võime näha, et pikilainete interfereerumisel ilmuda võivad seisvad pikilained. Sõlmede kohal seisavad jaokesed paigal oma tasakaalu-seisukohas, kuna nad kõvasti õõtsuvad sõlmede vahel asuvates puhetistes. Kui kahe naaberpuhetise jaokesed liiguvad teineteisele vastu, siis tiheneb aine nende vahel seisvas sõlmes; kaugenevad nad mõlemad aga sõlmest, siis hôreneb viimases aine. **Seisvate pikilainete sõlmedes asuvad vaheldamisi aine tihendused ja hõrendused, nendes on liikumine kõige väiksem. Puhetistes sellevastu on aine tihedus enamvähem ühtlane, kuna liikumine siin on kõige intensiivsem.**

Joonistus 14 kujutab näiteks seisvaid pikilaineid torus olevas ôhus, nii kui nad seal ilmuda võivad lainete peegeldumisel ühes toru otsas. Rida 1 näitab põigiti kujutatud resultantlaine seisukohti R_1 ja R_2.

Rida 2 kujutab õhujaokeste liikumist sel silmapilgul, kui resultantlaine läheb läbi sirgjoone AB (rida 1): ôhk on igal pool ühesuguse tihedusega, kuid jaokesed liiguvad sõlmede S_1 ja S_3 poole.

Rida 3 kujutab jaokeste seisu $^1/_4$ õõtseväldet hiljemini, kus resutantlainel on kuju R_1 (rida 1): õhukihid on tihenenud sõlmede S_1 ja S_3 ümber, nad hakkavad sealt parajasti tagasi liikuma. Sõlmede S_2 ja S_4 juures asuvad õhuhõrendused.

Rida 4 vastab resultantlaine seisule sirgjoonel AB: kõik õhujaokesed viibivad uuesti oma tasakaalu-seisukohtadel,—tihedus on igalpool ühesugune Jaokesed hakkavad koonduma sõlmede S_2 ja S_4 ümber.



Joon. 15.

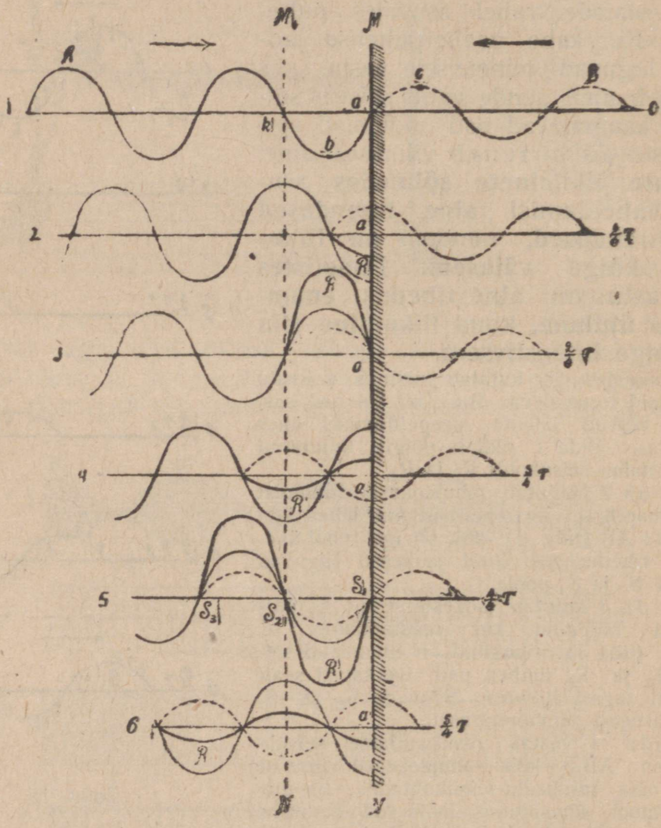
Rida 5: resultantlained on jõudnud seisu R_2; õhujaokesed on koondunud sõlmede ja S_2 ja S_4 ümber ja hakkavad sealt tagasi liikuma, et veerand õõtset hiljemini läbi tasakaalu-seisukoha minna (rida 2) jne.

§ 8. Sôlmede seisukohad peegeldumisel tekkinud seisvates lainetes.

1) Peegeldumine vastu tihedamat ainet. Vastu peegelduspinda M N. (joon. 15) langeva laine A õõtsuv osakene a muudab § 6, järele peegeldumispunktis oma õõtsumise sihti: selle asemel, et edasi alla liikuda, hakkab ta nüüd järsku üles liikuma (rida 2).

Read 3, 4, 5 ja 6 kujutavad sel teel sündiva peegeldatud laine B tekkimise üksikuid silmapilke.

Hôlbu pärast vôime aga ka ette kujutada, et laine B juba peegeldumisprotsessi algul tervelt peegelduspinna MN taga asub (joon. 16, rida 1). Kui teda sealt siis iga $^1/_4$ õõtse jooksul $^1/_4$ lainepikkuse võrra järk-järgult pahemale poole nihutada, siis kujutab pinna MN ette nihkunud laineots peegeldatud laine tõelist kuju. Nii langev laine A kui ka peegeldatud laine B (joon. 16, rida 1) puutuvad punktis a kokku ja lähevad järgmistel silmapilkudel teineteise peale, interfereerudes samuti, nagu see kirjeldatud § 7_2. Joonistusel 16 kujutavad read 2 — 6 resultantlaine R seisu silmapilkudel, mis järgnevad $^1/_4$, $^2/_4$, $^3/_4$ jne. õõtseväldet peale reas 1 kujutatud silmapilku.



Joon. 16.

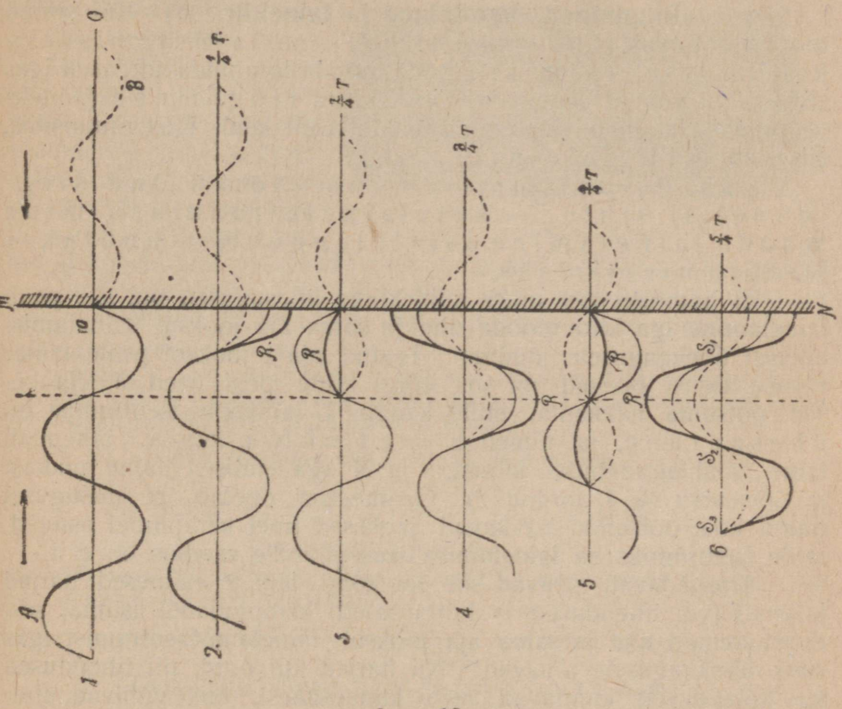
Me näeme, et resultantlaine ehk seisvate lainete esimene sõlmpunkt S_1 asub peegelduspunktis; järgmised sõlmed (S_2 ja S_3) seisavad peegeldavast pinnast $^1/_2$, $^2/_2$, $^3/_2$ jne. lainepikkuse kaugusel.

Kui peegeldav aine on palju tihedam esimesest ainest, siis võrdub peegeldatud laine amplituud peaaegu langeva laine amplituudiga. Siis seisab esimene sõlm S_1 (joon. 16) jäädavalt paigal.

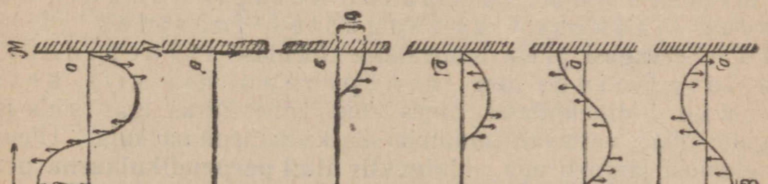
2) Peegeldumine vastu hõredamat ainet. Joonistus 17 kujutab endiselt peegeldatud laine tekkimist. Et ainejaoke **a** oma sihti ei muuda peale kokkupõrget „väiksema", teise aine jaokesega, siis õõtsub ta ainult väiksema amplituudiga edasi. Kanname jällegi leitud peegeldatud laine kuju B üle peegelduspinna MN taha (joon. 18). Interfereerides langevat lainet A peegeldatud lainega B, leiame endiselt seivate lainete kuju (joon. 18, read 2—6) teineteisele järgnevatel silmapilkudel.

Me näeme, et nüüd seisva laine esimene sõlm S_1 (joon. 18, rida 6) **mitte enam peegelduspunktil ei asu, vaid** $^1/_4$ **lainepikkuse kaugusel peegelduspinnast.** Järgmiste sõlmede (S_2 ja S_3) kaugus peegelduspinnast võrdub $^3/_4$, $^5/_4$ jne. lainepikkusega.

Peegelduspunktil enesel asub nüüd laine puhetis, nii et laine ots peab õõtsuma.



Joon. 18.



Joon. 17.

Leitud resultaadid on täiesti arusaadavad, kui silmas pidada, et tihedam aine takistab hõredama aine jaokese liikumist punktis a, nii et viimane paigal peab seisma. Teisel juhusel seesugust takistust ei ole, mispärast laine ots vabalt võib õõtsuda.

Joonistusel 18, rida 1 seisab peegeldatud laine aB nii, kui oleks ta langeva laine peegelpilt peeglis MN. Joonistusel 16, rida 1 seisab aga aB teistviisi: siin oleks ta langeva laine Ak peegelpilt, kui peeglit hoida pinnal M'N', mis asub ½ lainepikkust pinna MN ees. Sellepärast öeldakse ka, et **peegeldumisel vastu tihedamat ainet läheb pool lainepikkust** (k b a) **kaduma**.

§ 9. **Ringlained, keralained ja lainekiir.** 1) Kui lained mõnest õõtsuvast punktisarnasest kehast — nn. l a i n e t a m i s a l l i k a s t ehk -t s e n t r u m i s t mööda mõnda tasapinda ühtlaselt igas sihis laiali võivad laguneda, siis tekivad r i n g l a i n e d (näiteks veepinnal); laguneb lainetamine aga ühtlaselt laiali igas ruumisihis, siis sünnivad k e r a l a i n e d.

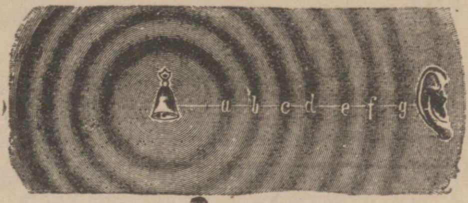
L ä b i l a i n e t a m i s t s e n t r u m i t õ m m a t u d s i r g j o o n e l i s i s i h t e — k e r a l a i n e t e r a a d i u s i, m i d a m ö ö d a l a i n e t a m i n e l a i a l i l a g u n e b, — h ü ü t a k s e l a i n e t a m i s k i i r t e k s.

Et homogeenses aines kõik kiired ühesugused on, siis peab lainetamine iga kiirt mööda ühe ja sama aja jooksul lainetamisallikast ühekaugusele jõudma. Teatud aja t jooksul peale lainetamise algust peavad nii siis kõigi kiirte peal need ainejaokesed õõtsuma hakkama, mille kaugus L lainetamistsentrumist on ü h e s u u r u n e, ja nimelt $L = c.t = l.N.t$, kus c tähendab laine laialilagunemise kiirust, l ja N aga endiselt laine pikkust ja õõtsearvu (§ 4, formul 2). Geomeetria õpetab, et niisugusel puhul kõik õõtsuma hakkavad jaokesed ühel kerapinnal asuvad, mille tsentrumiks on lainetamisallikas ja mille raadius on c. t.

Arusaadavalt peavad siis ka kõigi lainete esimesed harjad ja orud (või tihendused ja hõrendused) kerapindadel asuma, sest et ka nemad ühe ja sama aja jooksul lainetamistsentrumist igas sihis ühekaugusele jõuavad. Nii harjad kui orud, nii tihendused kui hõrendused kujutavad neid laineosakesi, mis viibivad ühesugustes faasides (§ 4). Sellest järgneb, et ü m b e r l a i n e t a m i s t s e n t r u m i t õ m m a t u d k e r a p i n n a l k õ i k õ õ t s u v a d j a o k e s e d ü h e s u g u s t e s f a a s i d e s v i i b i v a d. Seesugust pinda nimetatakse üleüldse l a i n e p i n n a k s; ü h t l a s e s a i n e s o n l a i n e p i n n a d n i i s i i s k e r a p i n n a d. Mitteühtlases aines võib laine kiirus igas sihis isesugune olla; vastavalt muutub siis ka lainepinna kuju. Üleval-kirjeldatust järgneb aga, et **lainekiir alati perpendikulaarne peab olema lainepinnale.**

Jga lainepunkt liigub mööda kiirt edasi laine laialilagunemise kiirusega. Niisama kiiresti kaugenevad lainetamistsentrumist iga kerapinna punktid. Läbi mõne ühelkohal paigalseisva ruumipunkti läheb nii siis üks keralaine teise järgi, tuues sinna enesega kaasa tema peal asuvaid laineharju (tihendusi) või laineorge (hõrendusi). Mõistagi on ka lainepindade edasiliikumine ruumis ainult näiv: tõepoolest õõtsuvad ainejaokesed terves ruumis ikkagi ainult ühel kohal paigal olles, ega koguni mitte edasiliikudes lainepinnaga.

3) Näiteks vaatleme lainete laialilagunemist õhus ümber mõne õõtsuva kõva keha. Joonistusel 19 kujutatud heliseva kella seinad õõtsuvad ja sünnitavad selle tõttu naabruses seisvate õhujaokeste keskel vaheldamisi õhu tihendusi ja hõrendusi. Algades kellalt liiguvad viimased pikilainetena igas s i r g j o o n e l i s e s sihis laiali (§ 5_4). Ühel ja samal ajal asuvad kõigi kiirte peal vastavate lainete tihendused ühekaugusel kellast, sünnitades viimase ümber kerasarnast õhutihendust. Samal ajal moodustavad kõik vastavad lainehõrendused mõnel teisel kerapinnal asuva hõrenduskihi. Nii tihendus- kui hõrenduskihid täidavad vaheldamisi tervet ruumi kella ümber ja kaugenevad viimaselt laine laialilagunemise kiirusega.



Joon. 19.

Näited: 1) 12 meetri pikkuse köie otsa õõtsutame igas sekundis 5korda üles-alla. Lained liiguvad köit mööda kunni seina külge kinnitatud otsani 1,5 sekundi jooksul. Kui pikad on need lained?

$$\text{Laine kiirus on: } C = \frac{12}{1.5} = 8 \text{ m./sek.}$$

$$\text{Formul (2a) annab siis: } l = \frac{C}{N} = \frac{8}{5} = \mathbf{1{,}6\ m.}$$

2) 24 m. pikka köit õõtsutame ühest otsast nii, et iga õõtse välde (periood) oleks 0,25 sekundit. Köiel ilmuvad 1,2 meetri pikused lained. Kui ruttu jõuavad nad köie teise otsani?

$$\text{Formul (1) annab: } N = \frac{1}{T} = \frac{1}{0{,}25} = 4 \text{ õõtset sekundis.}$$

$$\text{Formulist (2) leiame: } C = lN = 1{,}2 .\ 4 = 4{,}8 \text{ m. sek.}$$

$$\text{Küsitud aeg on siis: } t = \frac{24}{4{,}8} = \mathbf{5} \text{ sekundit.}$$

3) Veepinnal liiguvad 0,8 m. pikkused lained. Nad jõuavad 2 sekundi jooksul 12 meetri kaugusel seisvasse randa. Kui kaua kestab iga veejaokese õõtse?

$$\text{Laine kiirus on: } C = \frac{12}{2} = 6 \text{ m./sek.}$$

Õõtsete arv 1 sekundis on formuli (2b) järgi:

$$N = \frac{C}{l} = \frac{6}{0{,}8} = 7{,}5 \text{ õõtset 1 sekundis.}$$

Formuli (1) järgi on siis õõtsevälde:

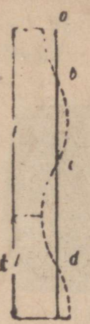
$$T = \frac{1}{N} = \frac{1}{7{,}5} = \mathbf{0{,}133} \text{ sek.}$$

4) 3 meetri pikkune köis ripub ülevalt alla. Ülemist otsa õõtsutatakse põigiti 6 korda sekundis. Köie vabalt otsalt peegelduvad lained ja interfereeruvad langevate lainetega. Kus kohal seisab kõige alumine s e i s v a l a i n e sõlm kui tuntud on laine laialilagunemise kiirus C = 12 m./sek.?

Laine pikkus köiel on formuli (2a) järele:

$$l = \frac{C}{N} = \frac{12}{6} = 2 \text{ m.}$$

3 meetri pikkusel seisab siis $\frac{3}{2} = 1{,}5$ tervet lainet. Et ülemist otsa



Joon. 20.

ôôtsutatakse, siis peab seal seisma laine puhetis (a, joon. 20). Niisamasugune puhetis peab ilmuma köie alumises otsas(e),—sünnib ju lainete peegeldumine seal vastu hôredamat ainet. Seisev laine jaguneb siis köiel, nagu näidatud on joonistusel 20. Kõige alumine sôlm d seisab $\frac{1}{4}$ lainepikkust, s. t. $\frac{2}{4} =$ **0,5 m. ülevalpool köie otsa.**

5) Kui kiirelt peab ôôtsutama sedasama köit, et tema peal tekiks **4** tervet seisvat lainet?

Laine pikkus peab olema: $l = \frac{3}{4} =$ **0,75 m.** Kui $C = 12$ m./sek. siis leiame formuli (2b) abil:

$$N = \frac{C}{l} = \frac{12}{0{,}75} = \mathbf{16} \text{ korda sekundis.}$$

Selle juures seisab alumine sôlm $\frac{1}{4} l = \frac{0{,}75}{4} = 0{,}1875$ m. $=$ $= 18{,}75$ cm. köie otsast kõrgemal.

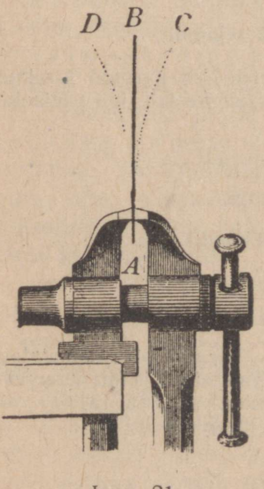
6) Kui õôtsutada seina külge kinnitatud nööri 10 korda sekundis edasi-tagasi, ilmuvad nöörile seisvad lained. Esimene sôlm asub seinast 0,3 meetri kaugusel. Kui suur on selle nööri peal lainete laialilagunemise kiirus?

Köie ots seina juures peab paigal seisma (peegeldus vastu tihedamat ainet), — kinnituspunktis asub nii siis sõlm. Järgmine sõlm ilmub teatavasti $\frac{1}{2}$ lainepikkuse kaugusel esimesest, s. t. 0,3 m. $= \frac{1}{2} l$, ehk $l =$ **0,6 m.**
Kui $l = 0{,}6$ m. ja $N = 10$, siis on formuli (2) järgi: $C = lN = 0{,}6 . 10 =$ **6 m. sek.**

Peatükk II:

Helilainete üleüldised omadused.

§ 10. Heli on niisugune lainetamine, mis meie kõrvade kaudu tekitab meis kuulmistunnet. Akustikaks ehk heliõpetuseks nimetame seda füüsikaharu, mis käsitab helinähtusi.



Joon. 21.

Heli allikaks ehk helisevaks kehaks võib olla iga elastne, kõva, vedel või gaasisarnane keha. Niipea kui seesugune keha õõtsuma hakkab, lagunevad temast laiali — harilikult läbi õhu — n.n. helilained. Kui viimased satuvad meie kõrva, siis äritavad nad seal kuulmiserku, mille tagajärjel me kuuleme õõtsuva keha helisemist.

Kinnitame laua külge terasvibu AB (joon. 21) ja tõukame tema vaba otsa. Vibu hakkab õõtsuma, mille tagajärjel teda ümbritsevas õhus tekivad perioodiliselt korduvad õhu tihendused ja hõrendused, mis helilainete näol igas sihis edasiliiguvad (vaata §9, joon. 19).

Iga õõtsuv pinnaosake üksikult tekitaks enese ümber keralaineid. Terve õõtsuva vibupinna ümbruses on lainete pinnad muidugi keerulisemad. Kui neid aga vaadelda mõnes kohas, mis õõtsuvast kehast väga kaugel asub, nii et keha võib käsitada nagu punkti, — siis on ka sellest heliallikast laialilagunevate lainete pinnad peaaegu kerasarnased.

Et õõtsuv terasvibu tõesti heli sünnitajaks on, selgub sellest, et heli otsekohe kaob, niipea kui käega vibu otsa kinni hoida ja tema õõtsumist takistada.

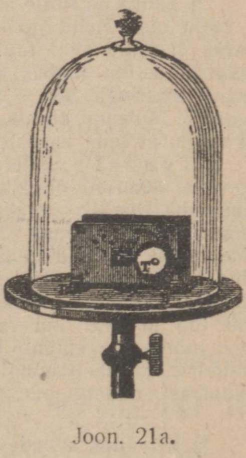
Liikuvate vedelikkude jaokesed võivad kohastel tingimistel õõtsuma hakata ja niisama kui kõvadki kehad helilaineid sünnitada; me kuuleme näiteks veepiiskade langemist, vee voolamist jne.

Gaaside liikumist ja õõtsumist me harilikult silmaga ei näe, küll aga kuuleme seda tihti, näiteks tuule ulumisena jne. Kui paukuva gaasiga täidetud seebi mull tule ligidale juhtida, siis plahvatab gaas ja me kuuleme pauku: gaasi äkilise ärapõlemise tagajärjel sünnib põlemiskohas üksainus õhu hõrendus ja järgnev tihendus. Selle õõtse tagajärjel laguneb ümbritsevas õhus laiali üksainus helilaine, mis meie kuulmiserku väga lühikest aega ärritab.

§ 11. **Heli edasikandumine.** 1) Nagu iga lainetamine, võib ka heli edasi kanduda ainult elastsetes kehades. Me vaatlesime helilainete laialilagunemist õhus; kuid ka iga teine elastne keha võib olla helijuhiks. Paigutame näiteks, taskukella pika puust laua otsa peale. Laua teise otsa juures ei kuule me enam kella tiksumist, kui aga kõrv suruda laua külge, siis on kella käik jälle kuuldav: kahtlemata on siin helijuhiks puu; ta peab heli koguni paremini juhtima kui õhk, sest viimast mööda ei ulatanud helilained meie kõrvani. Samasuguse katse abil võime leida, et ka raud, teras, kivi jne. on paremad helijuhid kui õhk. Korrates aga katset korgi peal, või — veel parem — pehme riide ja vildi peal, selgub, et need ained heli edasi ei juhi. Kuna raud, teras ja puu on elastsed ained, ei ole kork ja vilt seda mitte. Viimastes ei lagune lained laiali, — nad ei juhi sellepärast ka heli mitte.

Ka vedelikud juhivad heli: tuukrid, näiteks, kuulevad vee all olles rannas räägitud sõnu, kalad harjuvad vees kõlistatud kella heli peale söötmiskohale koguma jne.

Kõik gaasid on helijuhid. Et tõestada hariliku õhu heliedasikandmist, võime elektrikella paigutada õhupumba klaaskupli alla: Niikaua kui kella ümbritseb õhk, kuuleme kella heli; mida hõredamaks aga teeme õhu kupli all, seda nõrgemaks muutub heli,



Joon. 21a.

kunni ta viimaks täiesti kaob. **Sellest järgneb, et õhutus ruumis heli edasi ei kandu.**

2) Me teame, et gaasid on elastsed ainult ruumala muutmise suhtes. Kuju muutmiseks nad tõkestust ei anna. Kui nüüd helilained võivad edasi kanduda nii gaasides kui vedelates ja kôvades kehades, siis peavad nad olema pikilained, sest gaasides võivad ainult seesugused lained sündida (§ 5_5)*).

§ 12. **Heli kiirus.** 1) Heli kiiruseks nimetame lühidalt helilainete laialilagunemise kiirust. Igaüks on küll tähele pannud, et püssilaskmise puhul eemalseisev vaatleja enne näeb suitsu ja siis alles kuuleb pauku. Välk ja müristamine sünnivad ühel ajal, kuid siiski näeme enne välku ja alles mõne aja pärast kuuleme müristamist. Kahtlemata kulub helile selleks, et meie juurde jôuda, rohkem aega kui valgusel. Nagu me valgusõpetuses näeme, on valguse kiirus võrdlemisi heli omaga väga suur, nii et me praegusel juhusel suurt viga ei tee, kui oletame, et valgus püssilaskja juurest meieni tuleb ilma ajakaotuseta. Siis aga on meil kerge mõõta helikiirust õhus: Olgu kaugus vaatleja ja püssilaskja vahel näituseks 500 m.; mõõdame täpipealse kella abil ajavahet suitsu ilmumise ja paugu kuulmise vahel. On see ajavahe, näiteks 1,5 sekundit, siis tarvitab heli niipalju aega selleks, et püssilaskja juurest vaatlejani jõuda ehk 500 meetri kauguseni laiali laguneda. Ühes sekundis kandus heli siis $\frac{500}{1,5}$ ehk umbes 333 meetrit edasi. See arv ongi järjelikult heli kiirus. Niisuguste môôtmiste abil leiti, **et heli kiirus õhus 0 kraadi juures on 332 m.**/sek. Soemas ôhus on kiirus suurem: 15^0 C soojuses on ta 340 m./sek., veel soemas õhus — veel suurem.

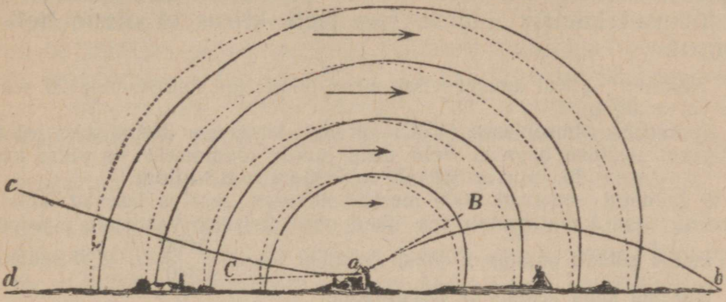
2) Tähtis on **tuule môju** heli laialilagunemise peale. On kerge tähele panna, et vastu tuult helid nii kaugele ei kosta, kui päri tuult. Selle nähtuse seletuseks ei jatku veel tuulekiiruse lihtsast summeerimisest helikiirusega: Kõva tuule kiirus on umbes 10 m./sek.; nii peaks siis heli päri tuult liikuma umbes kiirusega $330 + 10 = 340$ ja vastu tuult kiirusega $330 - 10 = 320$ m./sek. Môlema kiiruse vahe on nii vôrd väike, vôrdlemisi keskmise helikiirusega, et teda vaevalt tähele võiks panna.

J. Tyndall andis sellepärast tuule mõju kohta teise seletuse: tuulega liiguvad ülemised ôhukihid alati kiiremini kui alumised. Selle tôttu muutub lainepinna harilik kerakuju tuule sihis pikerguseks, deformeerudes üleval rohkem kui all (joon. 22 jämedad jooned). Et aga heli edasikandumine alati lainepinnale perpendikulaarsete kiirte sihis sünnib (§ 6), siis murduvad nüüd helikiired kôverjoonelisteks ja kalduvad kôrvale oma esialgsest sihist. Paigalseisvas ôhus jõuaks, näiteks, kiir aC vaatleja d juurde sirgjoonelises sihis (on ju aCd kui raadius perpendikulaarne kôigile laine-kerapindadele), tuule juures aga kaldub ta ülespoole, jäädes perpendikulaarseks uutele lainepindadele, ja läheb mingis sihis ac kôrgele üle vaatleja d. Viimane ei kuule sellepärast midagi punktis a sünnitatud helist.

---

*) **Kôvades** kehades vôivad ühtlasi pikilainetega laiali laguneda ka pôiklained. Môlemate lainete laialilagunemise kiirus ei ole aga mitte ühesuurune, nii et terve nähtus siin palju keerulisemaks muutub.

P ä r i t u u l t paindub kiir aB allapoole, jäädes perpendikulaarseks kôigile lainepindadele. Vaatleja punktis b kuuleb sellepärast nimetatud heli. Niisama painduvad kôik teised päri tuult väljaminevad kiired allapoole ja puudutavad maapinda punktide a ja b vahel. Kogu sellel pinnal on punktist a välja minev heli kuuldav.



Joon. 22.

3) V e d e l i k k u d e s on heli kiirus palju suurem kui õhus. C a l l o d o n ja S t u r m ja mõõtsid heli kiirust Genfi järves (1827). Selleks lasti paadilt vette suur, nööri otsas rippuv kell ja pandi ta haamrilöökidega vee all helisema. Ühel ajal haamrilöögiga anti paadist lühikeseajaline valgussignaal. Kaugel, teises paadis asuv vaatleja kuulis vett mööda edasikantud kellahelinat iseäralise k u u l m i s t o r u abil, mille kõver ots vette oli asetatud. Mõõtes aega valgussignaali nägemise silmapilgu ja nimetatud kuulmistoru abil kuuldud kellalöögi vahel, oli võimalik välja arvata heli laialilagunemise kiirust vees, sest paatidevaheline kaugus oli tuntud. Säherduste mõõtmiste järgi on **helikiirus vees 1435m./sek., s. t. üle 4 korra suurem kui õhus.**

B i o t mõõtis heli kiirust väga pikkades m a l m t o r u d e s (kunni 931 mt.). Heli allikas — harilik kell — oli kinnitatud toru ühe otsa külge. Temast lagunesid helilained laiali nii malmi, kui toru õõnsust täitvat õhku mööda. Et aga môlemate lainetamiste kiirus ühesuurune ei ole, siis kuulis teise toruotsa juures seisev vaatleja iga kellalööki 2 korda: esiteks läbi malmi edasikantud heli, ja siis alles õhu kaudu tulnud lainetamist. B i o t leidis, näiteks, et 931 m. pikkuse malmtoru tarvitamise korral esimene heli $2^1/_2$ sekundit varemini pärale jõudis kui teine. Läbi õhu tulnud helil kulus vaatleja juurde jõudmiseks $\frac{931}{332}$ sek. $=$ 2,8 sek. Malmi kaudu tulles kulus helil selleks 2,5 sek. vähem, s. t. kõigest $2{,}8 - 2{,}5 = 0{,}3$ sekundit. Järjelikult on h e l i k i i r u s m a l m i s $\frac{931}{0{,}3} = 3183$ m./sek., **nii siis ligi 10 korda suurem kui õhus.** Puhtas r a u a s on ta uuemate mõõtmiste järgi 4800 m./sek., p u u s (kuusk) 4800 m./sek.

4) Vaatlemised tõestavad, et **ühes ja samas aines kõiksugu helid laialil agunevad ühesuguse kiirusega** Tõepoolest, me kuuleme, näiteks, kontserdil väga mitmesuguseid akkorde. Kuid akkordi kõik toonid jõuavad ühel ja samal ajal meie kõrva. Hõlpsasti võime tähele panna, et püssipauk ja inimhääl ühel ajal jõuavad kuulaja juurde jne. **Heli kiirus ei olene heli iseloomust.**

Näited: 1) Kui kaugel seisab meist pikne, kui müristamine 20 sekundit peale välku algab?

Keskmises õhusoojuses (15°C) on heli kiirus $c = 340$ m. sek.; oletades, et valgusel üleüldse aega ei kulu meie juurde jõudmiseks, on pikse kaugus:

$$20 . \times c = 340 . 20 = 6800 \text{ m.} = \mathbf{6{,}8\ kilom.}$$

2) Soldatid seisavad 1000 meetri pikkuses reas ja lasevad kôik ühel ajal püssi. Kui kaua kestab rea ühes otsas seisvale vaatlejale püssipragin?

Viimase soldati püssipauk jôuab vaatleja juurde $\frac{1000}{340} = 2{,}94$ sekundi järele. Niisama kaua kestab ka püssipragin.

3) Soldatid marsivad 170 meetri pikkuses reas, orkester kõige ees. Kõik sammuvad täpipealt kuuldud taktis, kuid esimesed soldatid on oma liikumises tagumistest vähe ees. Kui palju nimelt, kui teada on, et iga soldat 90 sammu minutis teeb?

Helil kulub kunni viimaste soldatiteni jõudmiseks $\frac{170}{340} = 0{,}5$ sekundit.

Viimased hakkavad nii siis $\frac{1}{2}$ sekundit hiljemini marssima, kui esimesed

Selle aja sees on aga esimesed juba $\frac{90}{60} . 0{,}5 = 0{,}75$ sammu teinud. Oma liikumistes on nad nii siis $\frac{3}{4}$ sammu viimastest ees.

§ 13. **Heli tugevus.** 1) Me kuuleme, et suur kell kõvemini kõliseb kui väike. Kaks ühesugust kella annavad tugevama heli kui üksainus, kolm kella helisevad veel tugevamini jne. Mida suurem on heliseva keha pind, seda suurem on õõtsuma tõugatud õhu mass, seda tugevam on ka edasikantud heli. **Muidu ühesugustel tingimustel on heli tugevus seda suurem, mida suurem on heliseva keha pind.**

2) Heli tugevus oleneb ka sellest, kui kõvasti me kella pihta lööme. Vaadeldes helisevat teras-vibu (joon 21), näeme tema õõtsumise amplituudi järkjärgult vähenevat; ühtlasi väheneb ka kuuldava heli tugevus. Sarnane on asjaolu ka kella juures: mida kõvemini tema pihta lööme, seda suurema amplituudiga hakavad õõtsuma tema seinad, seda tugevam on ka tekkinud heli.

Täpipealsemad mõõtmised kui ka teooria tõestavad, et **heli tugevus on proportsionaalne heliseva keha amplituudi kvadraadiga.**

3) Heli tugevus oleneb veel selle aine tihedusest, milles keha heliseb. Tihedas õhus kandub heli tugevamini edasi kui hõredas. Kõrgete mägede otsas, kus õhk hõre, on kõik helid palju nõrgemad kui madalal maapinnal: **Ühes helisevat keha ümbritseva aine tihedusega kasvab ka heli tugevus.**

4) Mida kaugemal me seisame helisevast kehast, seda nõrgemini kostab heli.

Kui helisevat keha ümbritsev aine on ühtlane, siis lagunevad temast kerapinnalised helilained igale poole laiali (§ 6_3). Raadiusega R_1 tômmatud kerapinnal viibiv õhu tihenduskiht asub järgmisel silmapilgul teisel, suuremal kerapinnal (R_2). Sellejuures jaguneb terves õõtsumises peituv energia ühtlaselt suurema pinna peale, nii et lainetamise intensiivsus kui ka heli tugevus kaugemalseisval pinnal nõrgemaks peab jääma. Et kerapindade suuruste vahekord võrdub nende raadiuste kvatraatide vahekorraga, siis on kaugemal seisev kerapind $\frac{R_2^2}{R_1^2}$ korda suurem esimesest kerapinnast. Niisama palju kordi peab heli tugevus kaugemalseisval kerapinnal asuvas punktis vähem olema, kui esimesel kerapinnal. On R_2 n korda suurem kui R_1 siis kostab heli kaugemas punktis

$$n = \frac{R_2^2}{R_1^2}$$

korda nõrgemalt kui lähemas punktis.

Heli tugevus on ümberpöördult proportsionaalne heliallika kauguse kvadraadiga.

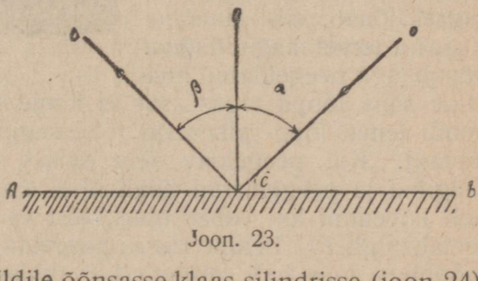
See seadus kaotab oma maksvuse, kui helilained mitte vabalt laiali ei saa laguneda. Kui, näiteks, tekitada helilaineid mônes pikas õõnsas torus, siis väheneb heli tugevus piki sede toru väga vähe. Siin tõukab iga ôhukiht õõtsuma niisamasuurt järgmist kihti, nii et õhujaokeste amplituud selle juures väiksemaks ei muutu.

Niisuguse pika toru abil on vôimali vôrdlemisi kauge maa peale rääkida; teda tarvitatakse majades ja laevadel telefoni asemel.

§ 14. **Heli peegeldumine.** 1) Helilained peegelduvad üle minnes ühest ainest teise. Langegu pinnale AB (joon. 23) heli kiir ac,—n.n. langev kiir. Langemispunktist c püstitame pinnale AB normaali cn — n.n. langemisnormaali. Peegeldatud kiire siht olgu cb. Nimetame nurka acn $= \alpha$ langemisnurgaks ja nurka bcn $= \beta$ peegeldusnurgaks. Katsed ja teooria tõestavad, et peegeldumine sünnib alati järgmise seaduse järgi:

a) **Langev ja peegeldatud kiir asuvad ühel tasapinnal langemisnormaaliga.**

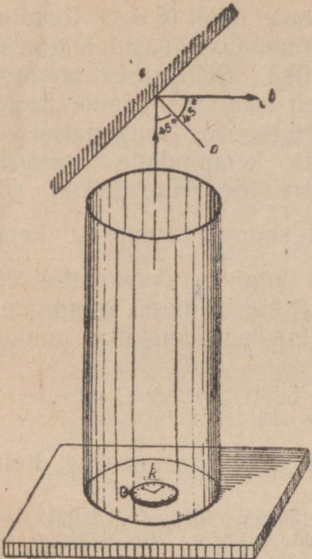
b) **Langemisnurk võrdub alati peegeldusnurgaga.**



Joon. 23.

Neid seadusi võib otsustada mitmesuguste katsete abil. Paigutame, näiteks, taskukell pehmele vildile õõnsasse klaas-silindrisse (joon. 24). Me kuuleme kella tiksumist ainult siis, kui kõrva hoiame silindri peal, tema vertikaalsel teljel. Nüüd asetame punkti c mône kõva plaadi, mille pind seisaks 45^0 all silindri teljele ck.

Me kuuleme kella tiksumist kõige tugevamini siis, kui kõrva hoida punktis b, nii et ka peegeldusnurk bcn oleks 45⁰. Pöörates pinda ümber telje c ja suurendades sellega langemisnurka kcn, peame kõrva ikka kõrgemale ja kõrgemale tõstma, s. t. ka peegeldusnurka suurendama, et niisama tugevalt kuulda kella tiksumist.

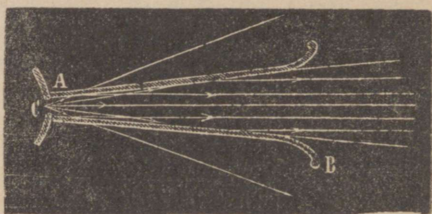


Joon. 24.

2) Tuntud kõnetorude juures (joon. 25) tarvitatakse peegeldamist selleks, et heli lainetamist juhtida ühes teatavas sihis ja sellega piirata heli laialilagunemist ruumis. Kiired peegelduvad vastu kõnetoru seina nii, et nad välja tulles peaaegu paralleelsed on, mille tõttu nende jaoks eespool leitud heli laialilagunemise seadus (§ 13_4) mitte enam maksev ei ole, ja räägitud sõnad palju kaugemale kostavad.

Kuulmistoru moodustab sama kõnetoru, mida selleks tarvitatakse, et kõrva tulevaid helikiiri koondada. Kui kõrva hoida punktis C, siis peegelduvad sinna kõik torru langenud kiired kokku, nii et heli tugevamini kostab.

3) Kui kaugel vaatleja ees mõni suurem peegeldav pind seisab, siis kuuleb ta iga räägitud sõna 2 korda: esiteks enese häält, ja siis — vähe hiljemini — vastu nimetatud pinda põrganud ja sealt tagasipeegeldunud heli. Seda nähtust tunneme nimetuse all: kaja ja järelkaja. Kui peegeldav pind seisab niivõrd kaugel, et räägitud sõna enne seda lõpeb, kui heli peegeldatult tagasi jõuab, siis kuuleme kajana tervet räägitud sõna. Jõuab aga peegeldatud heli enne sõna lõppu tagasi, siis ei kuule me sõna kordamist, küll aga venib tema lõpp pikemaks. Seesugusel puhul räägime järelkajast. Kui peegeldav sein seisab üsna ligidal, siis kuuleme räägitud ja peegeldatud häält ühel ajal. Väikses toas kõlab iga heli kõvemini kui vabas õhus, sest et seinadelt peegeldatud heli toetab algheli. Pehme riie ei peegelda heli, sellepärast on pehme mööbliga toas heli nõrgem kui tühjas või kõva mööbliga toas.



Joon. 25.

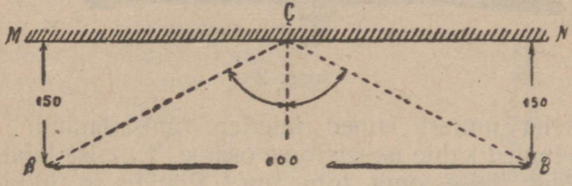
Kirikutes ja tühjades kontsertsaalides võib järelkaja räägitud sõna lõpu niivõrd ära katta, et kõne segaseks ja arusaamatuks muutub.

Tundes heli kiirust on kerge välja arvata, kui kaugel peab seisma peegeldav pind, et tekkida vôiks kaja. Ühesilbilise sôna väljaräākimiseks kulub meil vähemalt $\frac{1}{5}$ sekundit. Et peegeldatud heli tagasi jõuaks peale seesuguse sõna lõppu, peab ta peegeldumiskohani minemiseks ja sealt tagasi tulemiseks vähemalt $\frac{1}{5}$ sekundit tarvitama, s. t. ta peab vähemalt $\frac{340}{5} = 68$ meetrit edasi liikuma. Peegeldava seina kaugus on niisugusel juhusel vähemalt

$$\frac{68}{2} = 34 \text{ m.}$$

Mitmesilbiliste sõnade puhul peab sein muidugi vastavalt kaugemal seisma, kui me tervet sõna kajana tahame kuulda.

Näide: Seina M N vastu seisavad kaks inimest A ja B (joon. 26). Môlemate kaugus seinalt on 150 m., nende kaugus teineteiselt aga 600 m. A hüütud sõna kuuleb B kaks korda. Kui pikk on aeg mõlema kuuldud hääle vahel?



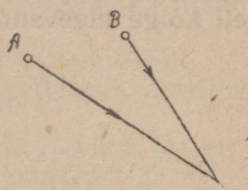
Joon. 26.

Hääl jôuab B juurde kahte teed mööda: AB ja ACB. Esimese pikkus on AB = 600 m. Teise pikkus on AC + CB = 2 AC =

$$= 2\sqrt{150^2 + 300^2} = 670{,}5 \text{ m.}$$

Häälel kulub liikudes esimest teed mööda: $\frac{600}{340}$ sek. = 1,765 sek., liikudes teist teed mööda aga: $\frac{670{,}5}{340}$ sek. = 1,972 sekundit. Môlema B kuuldud kôla vahe on : 1,972 — 1,765 = **0,207 sek.**

§ 15. **Heli interferents.** Kujutame ette, et ühest ja samast heliallikast päritud helilained juhitakse eraldi sihtides AC ja BC (joon. 27) ühte punkti C. Punktides A ja B olgu lained ühesugustes faasides (§ 4), s. t. nii tihendused kui ka hõrendused ilmugu mõlemas punktis ühel ajal. Jõudes punkti C, on aga laine AC pikema tee teinud kui BC. Kui mõlema pikkuse vahe on $\frac{1}{2}$ helilaine pikkust, siis ilmub ühel ja samal ajal laine AC lõpul (punktis C) õhu tihendus ja laine BC lõpul õhu hõrendus. Et aga mõlemad lained ühest heliallikast pärit, siis on tihendused ja hõrendused ühesuurused, nii et nad punktis C teineteise täiesti hävitavad, mille tagajärjel

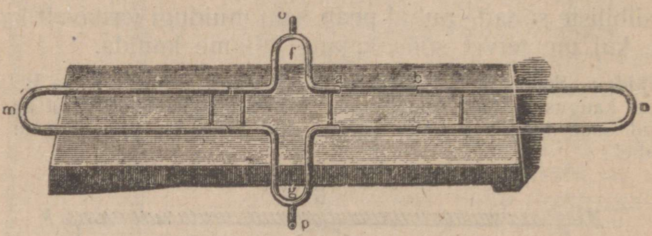


Joon. 27.

seal õhujaokesed jäädavalt seisavad. Sama nähtus kordub, kui AC ja BC vahe on $1\frac{1}{2}$, $2\frac{1}{2}$, $3\frac{1}{2}$ jne. lainepikkust.

Vôrdub aga vahe AC ja BC vahel 1, 2, 3 jne. terve laine pikkusega, siis ilmub mõlema laine lõpul ühel ajal õhu tihendus või hõrendus. Selle tagajärjel toetab seal üks laine teist, nii et punktis C peavad ilmuma 2 korda suuremad tihendused ja hõrendused.

Säärast helilainete interfereerumist võib vaadelda järgmisel katsel: Toru O mööda (joon. 28) juhitakse mõne



Joon. 28.

heliseva keha juurest lained interfereerimisaparaati. Punktis f harunevad lained kahte iseseisvasse osasse. Esimise lainetamise tee on toru fmg, teise oma toru fng. Punktis g ühinevad jälle mõlemad lained, kust neid mõne kummitoru kaudu vaatleja kõrva võib juhtida. Toruosa n võib kaugemale välja tõmmata või sügavamale sisse lükata, muutes sellega laine fng tee pikkust. Edasi-tagasi nihutades toruosa n, võime hõlpsasti leida tema jaoks niisuguse seisukoha, mille juures vaatleja mingisugust heli ei kuule. Sel puhul peab mõlema toruharu pikkuse vahe võrduma $^1/_2$, $1^1/_2$, $2^1/_2$ jne. lainepikkusega.

Tõmmame nüüd toru n järk-järgult kaugemale välja, siis muutub heli ikka tugevamaks. Selles seisukohas, kus heli kõige tugevamini kostab, on toruharude pikkusevahe 1, 2, 3 jne. lainepikkust. Kui veel edasi nihutada toru n, kaob heli uuesti; nüüd võrdub toruharude pikkuse vahe jällegi 1, 3, 5 jne. poollainega. **Jga kord, kui toruharude pikkuse vahe on paaritu arv poollaineid, kaob heli, on ta aga paaris arv poollaineid, siis kostab heli kõige tugevamini.**

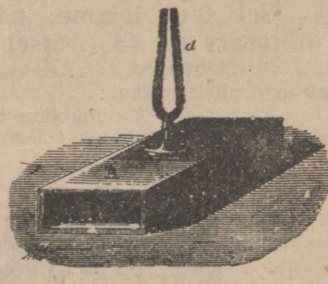
Peatükk III:

Toonid.

§ 16. **Toonid ja kahinad.** Kõik helid jagunevad kahte liiki. Ühtedel on lainetamine perioodiliselt korduv ja pikemat aega kestev, nii et saadud kuulmismulje on katketult ühesugune ja tekkinud tunne teatava kindla iseloomuga. Säärast lainetamist nimetame puhtaks heliks ehk tooniks. Lauluhääl, muusikariistade heli jne. on toonid. **Iseloomulik tooni juures on see, et ta võib kõlada kõrgemana või madalamana.**

Me kuuleme aga tihti ka helisid, mille kõrguses me vahet ei saa teha. Selle põhjus võib mitmesugune olla: heli võib, näiteks, nii lühikest aega kesta, et kõrv temast ei suuda saada täit tooni muljet; võib aga ka juhtuda, et palju mitmesuguseid lühikeseajalisi helisid üksteisele ruttu järgneb, nii et lainetamine küll pikemat aega kestab, kuid selle juures oma iseloomus alaliselt muutub. Vastavalt muutlik ja kindluseta on siis ka tekkinud kuulmistunne. Kõiki sarnaseid korratuid heliaineid nimetatakse kahinateks. Niisugused on, näiteks, vee kohin, rataste mürin, puulehtede sahin jne. Lühikeseajaliste kahinate hulka kuuluvad ka piitsa plaksumine, kella tiksumine, püssi pauk jne.

§ 17. **Tooni kõrgus; helihark; sireen.** 1) Peale tooni tugevuse võime veel vahet teha tema kõrguses. Võrdlemisi puhtaid ja alati ühekõrgusi toone sünnitab tuntud helihark (joon. 29). Ta on sellepärast toonide kõrguste võrdlemiseks väga kohane riist.



Joon. 29.

Nagu igaüks küll tähele on pannud, ei olene helihargi tooni kõrgus sellest, kas laseme tema harusid õõtsuda tugevamini või nõrgemini. Sellest järgneb, et **tooni kõrgus ei olene helilaine õõtsumisamplituudi suurusest,** sünnitab ju tugevamini õõtsuv helihark suurema amplituudiga laineid, mis niisama kõrgelt kõlavad kui nõrgemini õõtsuva helihargi omad.

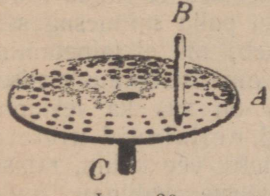
Võrreldes pika- ja lühikeseharuliste heliharkide toone, kuuleme, et esimese toon madalamalt kõlab kui teise oma. Teisest küljest teame aga, et pikad helihargi harud aeglasemalt peavad õõtsuma kui lühikesed, — õõtsub ju, näiteks, pikk pendel ka aeglasemalt kui lühike. Aeglasema õõtsumise korral tekivad väiksema õõtsearvu ehk perioodiga lained. Sellest peame järeldama, et **toon seda kõrgem on, mida suurem on helilainetamise õõtsearv.**

Kui kahe helihargi ôôtsearv on ühesuurune siis, kôlavad nende toonid ühekôrgustena. Me ütleme seesugusel puhul, et toonid kõlavad unissoonis.

2) Et mõõta teatava kõrgusega toonile vastavat õõtsearvu, tarvitatakse harilikult n. n. sireeni. Joonistus 30 kujutab Seebecki sireeni mille peaosa moodustab õhuke metallratas A. Läbi viimase on puuritud terve rida auke, mis ühesuuruste vahedega asuvad kontsentrilistel ringjoontel. Kui ratast A kiirelt võlli C ümber tiirutada ja seejuures läbi torukese B ühe aukude-

ringi peale õhku puhuda, siis tekib toon mis seda kõrgemalt kõlab, mida kiiremini tiirleb ratas, ja mida suurem on aukude arv ringjoonel.

Torukesest B välja voolav õhujuga pääseb ainult neil silmapilkudel ratta A läbi, kui toruots asub mõne augu kohal. Selle tõttu saab rattaalune õhk terve hulga ühtlaselt korduvaid tõukeid, mis seal õhu tihendusi ja hõrendusi sünnitavad ja mille tagajärjel õhus laiali laguneb tõugete arvule vastava õõtsearvuga helilainetamine. Tundes ratta A tiirude arvu minutis ja aukude arvu ringjoonel, võime välja arvata tõugete arvu ühes sekundis.



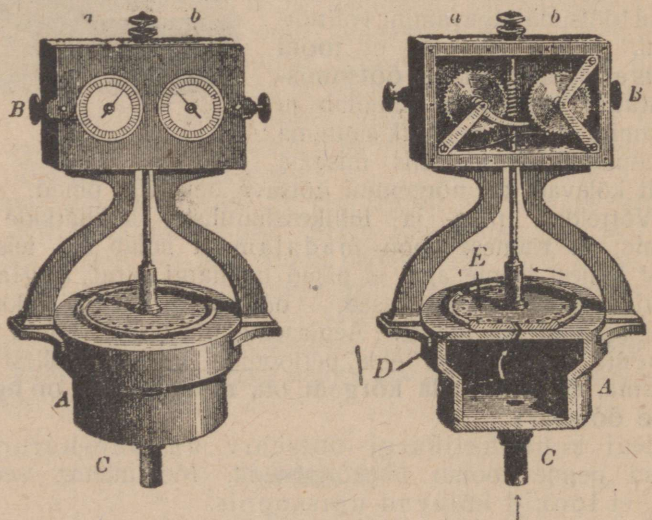
Joon. 30.

Mingi antud tooni õõtsearvu mõõtmisel sireeni abil kiirendatakse ratta A tiirlemist niikaua, kunni sireeni toon antud tooniga unissoonis kõlab. Siis on mõõdetava helilainetamise õõtsearv niisama suur kui sireeni õhutõugete arv ühes sekundis, mida hõlpsasti välja võib arvata.

Sel teel leiame, näiteks, et klaveri keskmise tooni a õõtsearv on 435 õõtset sekundis.

3) Môôtmistel tarvitatakse tihti joonistusel 30b kujutatud **Cagniard de Latour'i** leitud sireeni:

Reservuaari A puhutakse toru C kaudu ôhku. Tema kaane D sisse on puuritud rida ühesuuruste vahedega ühel ringjoonel asuvaid auke. Otse



Joon. 30-b.

kaane peal seisab metallratas E, mis püstvôlli ümber vabalt vôib tiirelda. Selle ratta sees on täpipealt nendessamades kohtades kui kaane D juureski samasugune aukude rida. Seisab ratas E nii, et tema augud otse kaane aukude peal asuvad, siis pääseb reservuaari puhutud õhk läbi aukude välja. Pöördub aga ratas vähe, siis katab ta kaaneaugud kinni, ja katkestab seega õhu voolu. On selge, et ühe terve tiiru puhul õhk reservuaarist niipalju kordi välja pääseb, kui palju auke on kaanel või rattal. Olgu, näiteks, aukude arv nii rattas kui kaanes 10, siis tekib iga tiiru aegu 10 õhutôuget, seega **n** tiiru aegu 10**n** tôuget. Kui tiirude arvu minutis nimetada M, siis on tekkinud helilainetamise ôôtsearv

$$N = \frac{M}{60} \cdot 10 \text{ ôôtset sekundis.}$$

Ratas E hakkab õhuvoolu mõjul iseenesest tiirlema: augukesed on nii kaanes kui rattas vähe längu puuritud, nagu see näidatud joonistusel 30b kujutatud lôikes. Kaane auk juhib õhu voolu längu paremale poole, sellepärast pôrkub ta teisele poole längu seisva rattaaugu seina vastu, ja tõukab seega ratta tiirlema. Õhurôhumise suurenemisel resesvuaaris A kasvab läbi aukude voolava ôhu kiirus, mille tõttu ka ratas E kiiremini tiirlema hakkab. Nii vôime ôhurôhumisega reguleerida tekkiva tooni ôôtsearvu.

Ratta tiirude äralugemiseks on tema püstvôlli ülemise otsa juures iseäraline t i i r u d e l u g e m i s e m e k a n i s m, milles püstvôllil asuva kruuvlôike kaudu väike hammasratas (a) liikuma pannakse. Hammasratta võlli külge on kinnitatud näitaja, mille abil tema all seisval ringskaalal otsekohe ära lugeda võib teatud aja jooksul tehtud vôllitiirude arvu kunni 100-ni. Hammasratas a on ühendatud teise hammasrattaga b, mille näitaja iga 100 võllitiiru puhul 1 skaalajaotuse vôrra edasi liigub. Tervet mekanismi võib nööbi B abil igal ajal vôlliga ühendada vôi temast eraldada.

Näide:

Lugemismekanism oli 1 minut võlliga ühendatud. Näitaja a liikus selle aja sees 60° võrra, näitaja b aga 12° võrra edasi. Võlli tiirude arv minutis oli siis $M = 60 + 12.\ 100 = 1260$. Tekkinud helilainetamise ôôtsearv on $N = \frac{M}{60} \cdot 10 = \frac{1260}{60} \cdot 10 = 210$ ôôtset sek., kui aukude arv ringis on endiselt 10.

3) Katsed näitavad, et mitte kõik õhulained kõrvas kuulmistunnet ei tekita: **kui lainetamise õõtsearv on väiksem kui 10 või suurem kui 40.000, siis ei „kuule" kõrv teda enam.** Need piirid ei ole aga iga kõrva jaoks ühesugused, vaid olenevad palju tema tundlikkusest. Puhta helina ehk t o o n i n a kõlab meile lainetamine, mille õõtsearv on 30 ja 5.000 vahel. Muusikas tarvitatakse ainult niisuguseid laineid.*) Juba 20.000 õõtse korral sekundis ei saa meie h e l i k ô r g u s e s enam vahet teha.

§ 18. **Helilainete pikkus.** 1) Kui tuntud on heli laialilagunemise kiirus C ja õõtsearv N, siis leiame lainepikkuse (formul 2a):

$$l = \frac{C}{N};$$

15° C. juures on lainekiirus õhus muutumatult 340 m. sek. Sellest järgneb, et **et ühes ja samas aines lainepikkus on seda väiksem, mida suurem on õõtsearv N,** teiste sõnadega: l o n s e d a l ü h e m, m i d a k ô r g e m o n t o o n. Eelmises §

*) Orelites tarvitatava kôige madalama C ôôtsearv on ainult 16. Teda ei vôiks aga kui iseseisvat tooni käsitada, sest et teda kunagi üksikult ei tarvitata: ta süvendab ainult terve akkordi kôlavärvi, kostab aga üksikult ennem põrisemisena kui toonina.

antud arvude najal leiame, et helilainetena on kuuldavad ainult need õhulained, mille pikkus (15^0 C. juures) on

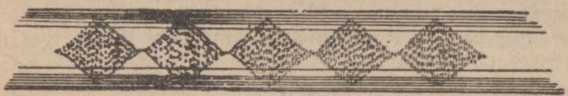
$$34 \text{ meetri } \left(=\frac{340}{10}\right) \text{ ja } 8{,}5 \text{ mm. } \left(=\frac{340}{40.000}\right) \text{ vahel.}$$

Muusikas tarvitatavate toonide lainepikkus on 11 meetrist kunni 7 sentimeetrini.

Võrreldes ühe ja sama tooni lainepikkust mitmesugustes ainetes, leiame formuli (2a) järgi, et tooni lainepikkus on seda suurem, mida suurem on lainekiirus vastavas aines.

2) Lainepikkust võime leida ka otsekoheste mõõtmiste kaudu. Üks hõlpsamatest on Kundt'i leitud ja tema järgi nimetatud mõõtmismetood, mis iseäranis väga kõrgete toonide kohta sünnis on:

Pikka klaastorru raputatakse vähe kerget korgipulbrit või karukolla (lükopoodiumi) seemet. Toru üks ots on kinni kaetud, teisest otsast aga juhitakse torru helilaineid, tarvitades selleks kas heliharki või vilet. Helilained peegelduvad vastu kinnist toruotsa, ja interfereeruvad langevate lainetega. Tekkinud seisvate lainete puhetistes õõtsuvad õhujoonekesed tugevasti piki toru ja pühivad kerge korgipulbri nende kohtade pealt ära, koondades teda sõlmedesse, kus õhuliikumist ei ole. Selle tagajärjel jaguneb pulber torus üksikutesse hunnikutesse (joon. 31), mille kaugus üks-teisest võrdub seisvate lainete sõlmede vahega, nii siis poollaine pikkusega (§ 8_2). Mõõtes korgipulbri koonduste vahet, leiame otsekohe vastava tooni poollaine pikkuse.



Joon. 31.

Õhu asemel võime kirjeldatud toru täita igasuguse teise gaasi või koguni vedelikuga, ja sellega leida helilaine pikkust vastavas aines.

Näited:

1) Joonistusel 28 kujutatud interferentsaparaadi mõlemad harud m ja n on täpipealt ühepikkused. Selle juures kostab heli kõige tugevamini. Kui haru n 19,55 cm. võrra välja tõmmata, siis kaob heli täiesti. Kui suur on tekitatud heli õõtsearv?

Esimesel juhusel jõuab heli mõlemaid harusid mööda ühel ajal ühenduskohta, Teisel juhusel jõuab sinna läbi haru n tulnud helilaine org ühel ajal läbi m tulnud helilaine harjaga. Mõlema haru pikkuse vahe $= 2 \times 19{,}55 = 39{,}1$ cm võrdub nii siis poollaine pikkusega s. t.

$$\frac{l}{2} = 39{,}1 \text{ cm., ehk } l = 2 \,.\, 39{,}1 = 78{,}2 \text{ cm.} = \mathbf{0{,}782\ m.}$$

$$\text{Vastav õõtsearv } N = \frac{c}{l} = \frac{340}{0{,}782} = \mathbf{435} \text{ õõtset/sekundis,}$$

kui oletada, et õhusoojus on 15°C. Tekitatud toon oli klaveri keskmisele toonile **a** vastava kõrgusega (§ 17_2).

2) Läbi joonistusel 30b kujutatud sireeni puhutakse õhu asemel vett. Terve siren on vee all, nii et toon vees tekib. Sireeni tiirude arv 3 minuti jooksul on 7830, aukude arv ratta sees on 10. Kui kõrge on tekkinud toon ja kui pikk on tema laine vees?

Lainetamise õitsearv $N = \frac{7830}{3 \cdot 60} \cdot 10 = 435$ õõtset/sek.,

s. t. tekkinud toon on keskmine **a**.

Lainekiirus on vees $c = 1435$ m./sek, tähendab lainepikkus

on seal $l = \frac{c}{N} = \frac{1435}{435} \backsimeq$ **3,3 m.**

3) § 18_2 kirjeldatud Kundt'i metoodi järele môôdetakse helilaine pikkust **vees**. Tekitatud tooni õõtsearv on 2762. Sõlmed seisavad torus 26cm. kaugusel üksteisest. Kui suur on vees laine kiirus c?

Laine pikkus $l = 2.26$ cm. $= 52$cm. $= 0{,}52$ m.

Laine kiirus $c = l \cdot N = 0{,}52 \cdot 2762 =$ **1436,2** m./sek.

§ 19. **Intervallid; toonide konsonants** ja **dissonants; akkord.** 1) Kahe tooni intervalliks nimetatakse nende kôrguse vahet, avaldatud môlema tooni ôôtsearvude vahekorraga.

Toonide üheaegne kooskõlamine võib meie peale avaldada kas rahulikku, meeldivat või enam-vähem teravat ja ärritavat muljet. Esimesel juhusel nimetame kooskõlavaid toone konsoneerivateks, teisel aga — dissoneerivateks Katsed tõestavad, et **kaks tooni seda paremini konsoneerivad, mida lihtsam on nende intervall, s. t. mida väiksemate tervete arvudega on kujutatav nende õõtsearvude vahekord.**

Kõige lihtsamaid intervalle sünnitavad niisugused toonid, mille õõtsearv on 2, 3, 4 j. n. e. korda suurem kui mingi teise — n. n. põhitooni õõtsearv. Neid toone nimetatakse valitud põhitooni harmoonilisteks ülemtoonideks. Seda tooni, mille ôôtsearv 2 korda suurem on kui pôhitooni oma, nimetatakse pôhitooni esimeseks oktaaviks. Oktaavi ja pôhitooni ehk priim'i intervall on nii siis 2:1.

Kui kolme tooni õõtsearvud on näiteks 870, 435 ja 217,5, siis on esimese ja teise tooni intervall $\frac{870}{435} = \frac{2}{1} =$ oktaav, teise ja kolmanda intervall $\frac{435}{217{,}5} = \frac{2}{1}$ jällegi oktaav. Keskmine toon on madalama tooni esimene oktaav, kõrgem toon aga madalama teine oktaav.

Järgmised lihtsamad intervallid oleksid $1\frac{1}{2} : 1 = 3:2$ ja $1\frac{1}{4} : 1 = 5:4$. Toone, mille õõtsearvud on $\frac{3}{2}$ ja $\frac{5}{4}$ korda suuremad põhitooni õõtsearvust, hüütakse vastavalt põhitooni kvindiks ja suureks tertsiks.

Intervallid $1\frac{1}{3} : 1 = 4:3$, $1\frac{2}{3} : 1 = 5:3$ ja $1\frac{1}{5} : 1 = 6:5$ moodustavad põhitooni kvardi, sekti ja väikse tertsi. Nende õõtsearvud on siis $\frac{4}{3}$, $\frac{5}{3}$ ja $\frac{6}{5}$ korda suuremad kui põhitooni oma.

Suuremate arvudega kujutatud intervallid kõlavad järk-järgult ikka dissoneerivamalt. Nii moodustavad intervallid 9:8 ja 15:8 dissoneeriva sekundi ja septiimi. Esimene nendest on kõige lähemal põhitoonile, teine aga oktaavile (2:1).

Mõisted konsonants ja dissonants ei ole mitte üsna kindlad. Vanemal ajal loeti, näiteks, juba suurt tertsi (5:4) dissonantsiks, kuna uuema aja muusikas koguni septiim (15:8) mitte liiga dissoneerivalt ei tundu.

2) Konsoneerida võivad ka 3 ja rohkem tooni korraga. Selleks on tarvis, et ülemised toonid mitte ainult põhitooniga, vaid ka omavahel konsoneeriksid. Seesuguste toonide kooskõla nimetatakse konsoneerivaks akkordiks. Muusikas nii tähtsad kolmkôlad on, näiteks, akkordid, millesse peale põhitooni veel kuuluvad kvint ja suur või väike terts ($\frac{3}{2}$ ja $\frac{5}{4}$ või $\frac{6}{5}$). Suure tertsiga ($\frac{5}{4}$) sünnib duurkolmkôla väikese tertsiga ($\frac{6}{5}$) aga mollkolmkôla. Õõtsearvude vahekorrad oleksid siis:

$$\text{duurkolmkôlas: } 1 : \tfrac{5}{4} : \tfrac{3}{2} = 4 : 5 : 6;$$
$$\text{mollkolmkôlas: } 1 : \tfrac{6}{5} : \tfrac{3}{2} = 10 : 12 : 15.$$

Et aga $12:10 = 6:5$; $15:12 = 5:4$ ja $15:10 = 3:2$, siis konsoneerivad ka viimases kolmkõlas kõik toonid omavahel.

3) On juba nimetatud, et toonide intervallides môôduandev on ainult nende ôôtsearvude vahekord. Sellepärast on täiesti ükskõik, missuguse tooni me põhitooniks valime. Iga teine toon, mille õõtsearv on, näiteks, 2 korda suurem kui põhitooni oma, kõlab ikkagi viimase oktaavina, olgugi et mõlema tooni ôôtsearvude vahe on kõrgema põhitooni korral suurem kui madala puhul. Et ühtlustada muusikariistade hääldeseadmist jne., on kokku lepitud nimetada muusikas kindlaks pôhitooniks seda tooni, mille ôôtsearv on 435; teda hüütakse keskmiseks **a**-ks.

§ 20. **Heliredelid.** 1) Kui eelmises § kirjeldatud toone nende kõrguse järgi ühte ritta korraldada, siis saame muusikas tarvitusel oleva diatoonilise heliredeli. Jntervalli kahe kõrvutiseisva heliredeli-tooni vahel hüütakse astmeks. Kui algada mingist põhitoonist, siis tõuseb toonide kõrgus heliredelis astmete kaupa priimist oktaavini. Igas teises oktaavis korduvad samas järjekorras nii astmed kui toonide nimetused. Ainult väliste märkide (1, 2, 3 ja —1, —2, —3) abil vastava tooni nimetuse juures eraldatakse ühe oktaavi toone teise oktaavi toonidest (näiteks a_{-2}, a_{-1}, a, a_1, a_2 jne.).

Duurheliredelit iseloomustab intervall suur terts (5:4). Kui põhitooni ehk priimi õõtsearv on N, siis kujuneb duurheliredel järgmiselt:

Tabel I.

Tooni nimi:	priim	sek.	terts	kvart	kvint	sekst	sept.	okt.
Õõtsearvude vahekord võrdl. põhitooniga (intervall)	1:1	9:8	5:4	4:3	3:2	5:3	15:8	2:1
Õõtsearv	N	$\frac{9}{8}N$	$\frac{5}{4}N$	$\frac{4}{3}N$	$\frac{3}{2}N$	$\frac{5}{3}N$	$\frac{15}{8}N$	2 N
Õõtsearvude vahekord kahel kõrvutiseisval toonil (astme suurus)	$\frac{\frac{9}{8}N}{N}=\frac{9}{8}$	$\frac{\frac{5}{4}N}{\frac{9}{8}N}=\frac{10}{9}$	$\frac{\frac{4}{3}N}{\frac{5}{4}N}=\frac{16}{15}$	$\frac{\frac{3}{2}N}{\frac{4}{3}N}=\frac{9}{8}$	$\frac{\frac{5}{3}N}{\frac{3}{2}N}=\frac{10}{9}$	$\frac{\frac{15}{8}N}{\frac{5}{3}N}=\frac{9}{8}$	$\frac{2N}{\frac{15}{8}N}=\frac{16}{15}$	
Aste:	1	2	3	4	5	6	7	

Selgub, et heliredeli astmed mitte ühesuurused ei ole. Me nimetame

intervalli 9:8 suureks täistooniks*)

„ 10:9 väikeseks täistooniks

„ 16:15 suureks pooltooniks.

Intervalli suure ja väikse täistooni vahel hüütakse kommaks; ta võrdub $\frac{9}{8}:\frac{10}{9}=\frac{81}{80}$ ja on nii siis väga ligidal ühele. Ainult muusikaliselt hästi väljaarenenud kõrv võib kuulda seda vahet. Sellepärast loetakse muusikas intervallid 9:8 ja 10:9 ühesuurusteks ja hüütakse neid lihtsalt täistooniks.

Valiksime, näiteks, põhitooniks tooni c, siis oleksid C-duur heliredeli astmed järgmised:

Tabel II.

Tooni nimetus:	c		d		e		f		g		a		h		c
Astme suurus:		1 toon		1 toon		½ tooni		1 toon		1 toon		1 toon		½ tooni	

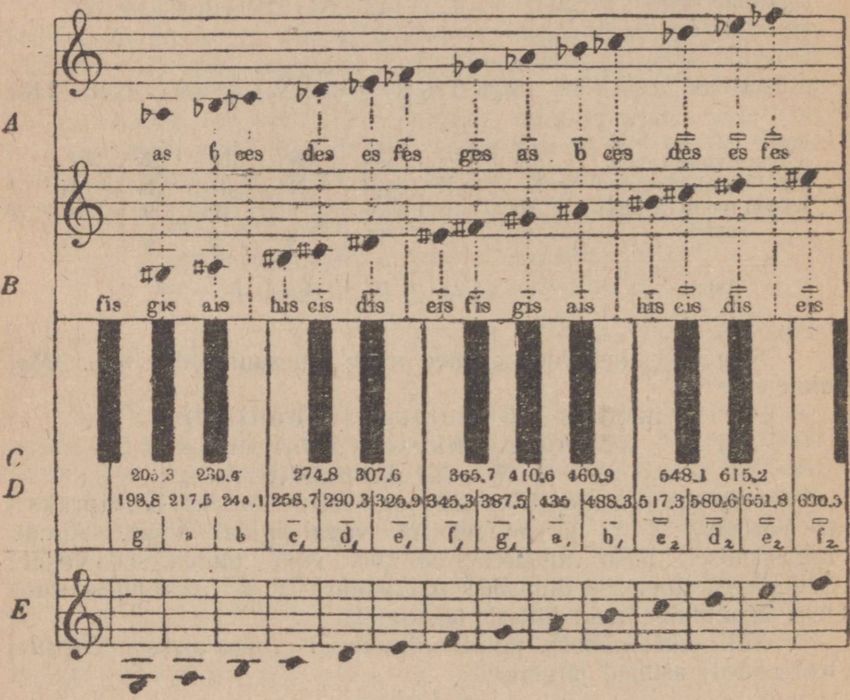
2) Tahaksime nüüd iga selles heliredelis leiduva tooni peale ehitada uue duur-heliredeli, mille astmed seisaksid samasuguses järjekorras, nagu tabelis II, siis leiaksime, et C-duur heliredeli toonidest selleks ei jätku. Algades, näiteks, toonist **d** (tab. II), saaksime astmete järjekorra:

tervetoon, ½ tooni, 3 tervetooni, ½ tooni, tervetoon,

mis ei vasta duurheliredeli üleüldisele skeemile (tab. II). Et saada endist astmete järjekorda, peaksime tooni f ja c (tab. II) ühe väikese pooltooni ($\frac{25}{24}$) võrra kõrgendama. Säärast toonide kõrgendust märgitakse vastava noodi ees märgiga ♯ ja nimetatakse kõr-

*) Sõnad „täis- ja „pooltoon“ tarvitatakse siin mõistes „intervall“.

gendatud tooni tema endisele nimetusele juurde lisades lõpusilp **is** (fis, cis). Intervall e-fis oleks siis näiteks: suur pooltoon × väike pooltoon $= \frac{16}{15} \times \frac{25}{24} = \frac{10}{9} =$ täistoon; intervall fis-g aga oleks tervetoon jagatud väikse pooltooniga $= \frac{9}{8} : \frac{25}{24} = \frac{27}{25} = \frac{16}{15} \cdot \frac{81}{80} =$ suur pooltoon × komma ehk umbes suur pooltoon. Niisama leiaksime, et aste h-cis on täistoon ($\frac{10}{9}$) ja cis-d — pooltoon. On kerge ära näha, et seesuguste toonikõrgendustega sünnib heliredel, mis vastab tab. II kujutatud duurheliredeli skeemile.



Joon. 32.

Mõnda põhitooni tarvitades saame otsitud heliredeli hõlpsamalt, kui teatud toone C-duur heliredelis alandada väikese pooltooni ($\frac{25}{24}$) võrra. Tooni alandamist kujutatakse märgiga ♭ (be) vastava noodi ees, ja nimetatakse alandatud tooni endise nimetusega, mille lõpule juurde lisatakse s või es (♭ d = des, aga ♭ h = b). Nii saame, näiteks, F-duur heliredeli, kui alandada tooni h (tab. II) j. n. e.

Kui niiviisi kõigi C-duur heliredeli toonide peale ehitada uued heliredelid, siis näeksime, et C-duur heliredeli iga täistooni astme vahele peaksime asetama veel kaks tooni: madalama tooni kõrgenduse (c-cis) ja järgmise kõrgema tooni alanduse (d-des); tarvilikud toonid ühe oktaavi piirkonnas oleksid nii siis järgmised:

	cis		dis			fis		gis		ais		
c		d		e	f		g		a		h	c
	des		es			ges		as		b		

3) Vahe cis ja des vahel, dis ja es vahel j.n.e. on aga nii võrd väike, et mõlemaid toone ilma tuntava veata üheks võib lugeda. Praktiliselt jagatakse sellepärast iga tervetooni intervall lihtsalt pooleks, ja tarvitakse niiviisi leitud pooltooni nii kõrgendatud kui ka alandatud tooni jaoks. Nii saame ühe oktaavi piirkonnas 12 pooltooni astet (kroomaatiline heliredel), mille abil moodustada võib iga heliredelit.

Nendel mänguriistadel, kus iga keel annab ainult ühe tooni (klaver), jagatakse terve oktaavi intervall 12 ühesuurusesse jakku, millest igaüks ühe pooltooni astet kujutab. Seesuguste toonide abil moodustatud heliredelit nimetatakse tempereeritud heliredeliks, vastandiks puhtale heliredelile (Tab. I), mille toonide õõtsearvud vähe lahku lähevad tempereeritud heliredeli omist.

Joonistus 32 kujutab näiteks põhitoonile $a_1 = 435$ õõtset sek. ehitatud tempereeritud heliredeli toonide õõtsearve (rida C ja D) ja vastavate toonide ning klaveri-sõrmiste nimetusi.

Tempereeritud heliredeli toonide õõtsearve on kerge välja arvata: olgu põhitooni õõtsearv N, siis on järgmiste toonide õõtsearvud:

$$N \quad xN \quad x^2N \quad x^3N \; \ldots\ldots \; x^{12}N,$$

kus x kujutab ühe pooltooni astme intervalli ehk kahe kõrvutiseisva tooni õõtsearvude vahekorda. Et aga 13-nes toon $x^{12}N$ peab võrduma esimese oktaaviga, siis on: $x^{12}N = 2N$,

$$\text{ehk } x = \sqrt[12]{2} = \mathbf{1{,}059463}.$$

Kasvatades valitud põhitooni õõtsearvu selle arvuga, leiame järgmise kõrgemalseisva tooni õõtsearvu; kasvatades viimast veel kord sama arvuga, saame teise tooni j. n. e.

4) Mollheliredel sünnib vastavast duurheliredelist, kui viimases suure tertsi asemele seada väike terts (6 : 5) ja suurt seksti (5 : 3) alandada väikse pooltooni võrra ($\frac{25}{24}$). Sel teel sündinud väikese seksti intervall on $\frac{5}{3} : \frac{25}{24} = \frac{8}{5}$.

C-moll heliredel sünnib näiteks, nii siis C-duuri heliredelist, kui suurt tertsi e ja seksti a alandada väikeseks tertsiks es ja väikseks sekstiks as. Mollheliredel kõlab pehmemalt ja kurvameelsemalt kui „hele“ duurheliredel.

Näited: 1) Missugused on diadoonilises c-duuri heliredelis ettetulevate toonide õõtsearvud „puhaste“ ja tempereeritud intervallide puhul, kui antud on tooni a_1 õõtsearv 435?

Puhta heliredeli intervallid on:

$$1:1 \quad 9:8 \quad 5:4 \quad 4:3 \quad 3:2 \quad 5:3 \quad 15:8 \quad 2:1.$$

Toon a_1 kujutab heliredeli põhitooni c_1 kuuendat tooni, s. t. seksti (5:3). Jaotades kõik intervallid $\frac{5}{3}$-ga, leiame toonide õõtsearvude vahekorra võrdlemisi põhitooniga a_1:

$1 : \frac{5}{3}$	$\frac{9}{8} : \frac{5}{3}$	$\frac{5}{4} : \frac{5}{3}$	$\frac{4}{3} : \frac{5}{3}$	$\frac{3}{2} : \frac{5}{3}$	$\frac{5}{3} : \frac{5}{3}$	$\frac{15}{8} : \frac{5}{3}$	$2 : \frac{5}{3}$
$= \frac{3}{5}a$	$= \frac{27}{40}a$	$= \frac{3}{4}a$	$= \frac{4}{5}a$	$= \frac{9}{10}a$	$= a$	$= \frac{9}{8}a$	$= \frac{6}{5}a$

Vastavad toonid on:

$c_1 = \frac{3}{5} \cdot 435$	$d_1 = \frac{27}{40} \cdot 435$	$e_1 = \frac{3}{4} \cdot 435$	$f_1 = \frac{4}{5} \cdot 435$	$g_1 = \frac{9}{10} \cdot 435$
$\doteq 261$	$= 293{,}6$	$\doteq 326$	$= 348$	$= 391{,}5$

a_1	$h_1 = \frac{9}{8} \cdot 435$	$c_2 = \frac{6}{5} \cdot 435$
$= \mathbf{435}$	$= 489{,}0$	$= 522$

Tempereeritud heliredelis võrdub pooltooni intervall $x = 1{,}05946$, täistooni intervall nii siis arvuga x^2. Toonist **a** kõrgemal seisvaid toone leiame, kasvatades järk-järgult 435 kas x või x^2-ga, selle järgi, kas intervall kahe kõrvutiseisva tooni vahel kujutab pool- või täistooni. Madalamaid toone leiame jagades vastavalt 435 kas x või x^2-ga. Sellel teel saame, algades toonist **a**:

c_1	d_1	e_1	f_1	g_1	$\leftarrow \mathbf{a_1} \rightarrow$	h_1	c_2
$\frac{d_1}{x^2} = \frac{435}{x^9}$	$\frac{e_1}{x^2} = \frac{435}{x^7}$	$\frac{f}{x} = \frac{435}{x^5}$	$\frac{g_1}{x^2} = \frac{435}{x^4}$	$\frac{a}{x^2} = \frac{435}{x^2}$	**435**	$a_1 x^2 = 435 x^2$	$h_1 x = 435 x^3$
$= 258{,}7$	$= 290{,}3$	$= 325{,}9$	$= 345{,}3$	$= 387{,}5$		$= 488{,}2$	$= 517{,}3$

2) Kolme sireeni läbi tekitatud toonide õõtsearvud on 435, 522 ja 652,5 Missuguse kolmkôla sünnitavad need toonid?

Teise tooni intervall, vôrdlemisi kôige madalamaga, on:

$$\frac{522}{435} = 6 : 5,$$ s. t. ta kujutab esimese **väikest tertsi.**

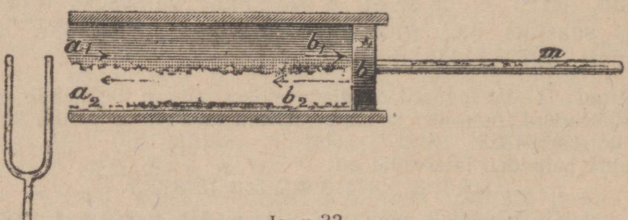
Kolmanda tooni intervall võrdlemisi esimesega on:

$$\frac{652{,}5}{435} = 3 : 2,$$ s. t. **kvint.**

Toonid on a, c, ja e $= 1 : \frac{6}{5} : \frac{3}{2}$. Nad sünnitavad **a-moll kolmkôla.**

3) Kui suur on puhtaid kvinte kujutavate toonide ô õ t s e a r v u d e v a h e. kui alumiseks tooniks valida esimesel juhusel $a_1 = 435$, teisel aga $c_1 = 261$? Kvindi a — e ülemise tooni ôõtsearv on $\frac{3}{2} a = \frac{3}{2} \cdot 435 = 652{,}5$. Kvindi c — g ülemise tooni õõtsearv on $\frac{3}{2}$ c $= \frac{3}{2} \cdot 261 = 391{,}5$. Esimesel juhusel on ülemisel toonil 652,5 — 435 = **217,5** õõtset rohkem kui alumisel, teisel juhusel aga ainult 391,5 — 261 = 130,5 õõtset.

§ 21. **Seisvate õhulainete mõju õõtsuva keha sünnitatud tooni peale.** Muusikas võime tarvitada ainult küllalt tugevaid ja kauakestvaid toone. Seesuguste toonide tekitamisel etendavad tähtsamat osa seisvad lained. Kõigis p u h k p i l l i d e s kujunevad



Joon 33.

seisvad lained mõnes õhusambas, milles jaokesed õõtsuvad § 7₅ kirjeldatud viisil. Et hõlpsam oleks aru saada nende lainete mõju puhkpillis tekkiva tooni peale, vaatleme allpool üksikasjaliselt järgmist nähtust

Õõnestoru ühes otsas asub edasi-tagasi lükatav vahesein (kann) b (joon. 33). Lahtise toruotsa ees hoiame õõtsuvat heliharki. Vaheseina b edasi-tagasi nihutamisel leiame tema jaoks kergesti niisuguse seisukoha, kus helihargi tooni tugevus tuntavalt kasvab.

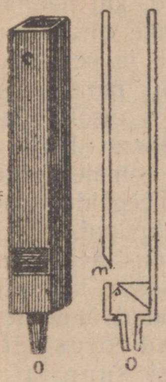
Selle nähtuse seletus oleks järgmine: iga kord, kui helihark oma õõtsumisel torule läheneb, tekib toruotsas väike õhutihendus (a_1). See liigub piki toru kunni vaheseinani b ja peegeldub sealt tagasi (a_2). Oletame, et b_2 jõuab helihargini parajasti sel silmapilgul, kui viimase haru juba tagasi liigub toru otsalt. Peegeldatud õhutihendus a_2 nagu tõukab siis helihargi haru ja toetab sellega viimase liikumist. Ühtlasi helihargi eemaleliikumisega sünnib toru otsas õhuhõrendus. Ka see peegeldub toru põhja vastu ja jõuab siis tagasi helihargini sel silmapilgul, kui viimane uuesti torule läheneb. Peegeldatud õhuhõrendus nagu tõmbab heliharki toru poole, ja toetab nii siis ka seda liikumist. Sama nähtus kordub iga uue õõtse puhul. Nimetatud õhuhõrenduste ja tihenduste peegeldumise tagajärjel tekivad torus seisvad pikilained, mis suurendavad helihargi sünnitatud õhulainetamist ja kõvendavad tooni tugevust.

On selge, et kirjeldatud nähtus võib ilmuda vaheseina b niisugusel seisul, kus õhutihendusel toru põhjani liikumiseks ja sealt tagasi tulemiseks sama palju aega kulub, kui helihargi otsal oma liikumissihi muutmiseks ehk $\frac{1}{2}$ õõtse tegemiseks. Me teame aga, et helihark iga $\frac{1}{2}$ õõtsevälte jooksul teeb $\frac{1}{2}$ õõtset, ja et lainetamine sama aja jooksul edasi liigub $\frac{1}{2}$ lainepikkuse võrra. Järjelikult peab õhutihenduse tee torus võrduma helihargi sünnitatud õhulainetamise $\frac{1}{2}$ lainepikkusega, ehk torupikkus peab võrduma $\frac{1}{2}$ poollaine pikkusega, s. t. $\frac{1}{4}$ lainepikkusega.

Leitud resultaat järgneb ka otsekohe laineõpetusest: selleks, et torus ilmuvad seisvad lained mõju võiksid avaldada välise õhulainetamise peale, on tarvilik, et lahtise toruotsa juures asuv lainejagu kõige tugevamini õõtsuks. **Lahtisel toruotsal peab nii siis alati lainete puhetis asuma.** Et aga peegeldumisel vastu tihedamat ainet (toru põhja) peegelduskohas asuma peab laine sõlm (§ 6), siis võib teises toruotsas seista puhetis ainult sel juhusel, **kui toru pikkus võrdub kas $\frac{1}{4}$, $\frac{3}{4}$, $\frac{5}{4}$ jne. lainega, ehk üleüldse veerandlainete paaritu-arvuga.**

Katsed tõestavad, et toru pidi liikuvad õhulained ka siis toru otsas peegelduvad, kui toru mõlemast otsast lahtine on. Vaba õhu jaokesed on nimelt liikuvamad kui toruseinte poolt piiratud õhujaokesed, nii et lahtises toruotsas lained peegelduvad vastu „hõredamat" vaba õhku, sünnitades peegelduskohas seisvate lainete puhetise (§ 7). Et puhetis ka helihargi juures võiks ilmuda, peab torupikkus võrduma vähemalt poollainega (joon. 12) ehk 2, 4 6 jne. (paaris-arvus) veerandlainega.

§ 22. **Viled.** 1) Mitmesugused tarvitusel olevad viled põhjenevad kõik ühel printsiibil. Joonistus 34 kujutab harilikku orelivile, millesse õhku puhutakse läbi torukese O. Alumisse kambrisse kogunud õhk voolab läbi pilu s õhukese joana vastu teravaservasilt vilehuult m. See õhujuga on elastse vibu sarnane, mis väiksema kui tõuke puhul põigiti õõtsuma hakkab, kaldudes pea ühele, pea teisele poole vilehuule serva m.



Joon. 34

Kaldugu esimesel silmapilgul õhujuga, näiteks, vähe paremale poole s. t. viletoru sisse. Toruotsas tekkinud õhutihendus peegeldub teises toruotsas ja põrkab — vilehuule m juurde tagasi jõudes — vastu nimetatud õhujuga. Viimane kaldub selle tagajärjel pahemale poole ja õhk voolab läbi avause m välja. Torus ilmub nüüd huule m juures õhuhõrendus, sest et ka torus olevast õhust üks jagu selle vooluga kaasa kistakse. Ka see õhuhõrendus peegeldub teises toruotsas, jõuab tagasi huuleni m ja imeb õhujoa uuesti torru. Seal sünnib jällegi tihendus ja kordub endine sündmustik. Nii sünnivad viletoru õhusambas seisvad pikilained, mille õõtsearv oleneb ainult viletoru pikkusest. Et ka siin laine puhetis alati vile huule juures peab seisma, siis on § 21 järele:

Kinnise otsaga vile torupikkus L võrdne 1, 3, 5 jne. veerandlaine pikkusega (joon. 35), lahtise otsaga vile torupikkus aga võrdne 2, 4, 6 jne. veerandlaine pikkusega (joon. 36.

Kirjeldatud seisvad lained ongi helilainetamise tekitajad, sest et toru enese õõtsumine vile tooni peale mingit mõju ei avalda: me võime toru kinni hoida ja sellega tema õõtsumist takistada, ilma et vile toon selle läbi muutuks. Me nägime, et seisvate lainete pikkus oleneb ainult torupikkusest, ja et lühemas torus ilmuma peavad ka lühemad lained. Sellest järgneb: **vile toon on seda kõrgem, mida lühem on vile toru.**

Kinnise otsaga viles on kôige pikema seisva laine pikkus $l = 4$ L, millest formuli (2) abil leiame, et ôôtsearv

$$N = \frac{c}{l} = \frac{c}{4L} \qquad 3)$$

Vastavalt on lahtise otsaga vile juures: $l = 2$ L, ja

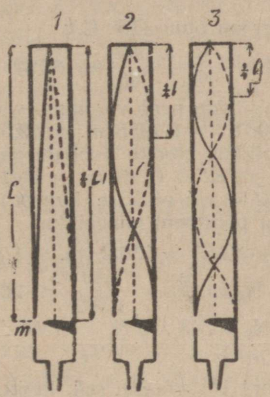
$$N = \frac{c}{2L} \qquad 3^a)$$

2) Kui vilesse võrdlemisi nõrgalt õhku puhuda, siis ilmub vile torus alati kõige pikem seisev laine. Vastavat tooni hüütakse vile põhitooniks. Mida kõvemini aga vilesse puhume, seda kiiremini voolab õhk läbi pilu s ja seda tugevamaks ja „kangemaks“ muutub õhujuga. Samuti nagu mõni jämedam ja kangem vibu õõtsub kiiremini kui peenike ja paenduvam, nii tahaks ka tugevam õhujuga kiiremini õõtsuma hakata kui nõrgem. Viletorus asuv õhusammas aga reguleerib endiselt õhujoa õõtsumist ja hoiab teda kunni teatud piirini ühesugusena. Lõpuks, kui õhu-

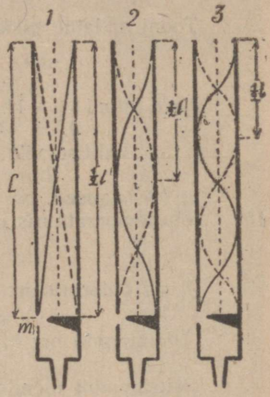
juga juba niivõrd „kangeks“ on muutunud, et õhusammas teda enam ei suuda tagasi hoida kiiremalt õõtsumast, muutub järsku seisvate lainete kuju nii, et viletorus tekivad järgmised — antud torupikkuse juures võimalikud — lühemad seisvad lained. Et uute lainete õõtsearv vastavalt nende pikkusele on suurem, siis hoiavad nad õhujoa õõtsumist jällegi teatava piirini ühesugusena, kunni veel „kõvemaks“ muutunud õhujuga viletorus veel lühemaid seisvaid laineid sünnitab.

Nii võib iga vile peale põhitooni anda veel teisi, kõrgemaid, n. n. ülemtoone (§ 19).

Nagu üleval kirjeldatud, võivad **kinnise otsaga viles** ilmuda ainult niisugused seisvad lained, mille pikkus on 3, 5, 7 jne. korda väiksem kui kõige pikem laine ($l = 4$ L). Ülemtoonide õõtsearwud on siis vastavalt 3, 5, 7 jne. korda suursemad kui põhitooni oma. **Lahtise otsaga viles** aga on lühemad lained 2, 3, 4. 5 jne. korda väiksemad kui kõige pikem laine ($l = 2$ L), nii et siin ülemtoonide õõtsearv 2, 3, 4, 5 jne. korda suurem on kui põhitoonil. Sellest järgneb, et **lahtise otsaga viles tekkida võivad kõik harmoonilised ülemtoonid kuna kinnise otsaga viles ilmuda võivad ainult niisugused, mille õõtsearv on 3, 5, 7 jne. korda suurem kui põhitoonil.** Joonistused 35 ja 36 näitavad põiklainetena kujutatud pikilainete seisu viletorus kinnise ja lahtise toruotsa juures, nii põhitoonil (1) kui ka järgmistel ülemtoonidel (2 ja 3).



Joon. 35.



Joon. 36.

3) Kuna kinnise otsaga vile põhitooni laine võrdub 4 kordse torupikkusege (joon. 35,1), lahtise otsaga vile oma aga 2-kordse lainepikkusega (joon. 36_1), siis on ühepikkuse toru juures lahtise vile põhitooni õõtsearv 2 korda suurem kui kinnise vile oma: **ühepikkuste torude juures on lahtise vile põhitoon kinnise vile põhitooni esimene oktaav**.

4) Joonistustes 35 ja 36 kujutatud pikilainete seisu võib kergesti tõestada järgmise lihtsa katse abil: klaasist viletorru (joon. 37) riputatakse niidi abil lapiti rippuv, elastilise membraaniga kaetud traatrõngas. Membraani peal on vähe liivateri, mis membraani õõtsumisel hüppama hakkavad. Puhetiste kohas tõukavad üles ja alla õõtsuvad õhujaokased ka membraani õõtsuma, mida liivaterade liikumisest näha võib. Tõstes järk-järgult membraani piki toru, võime sel teel kergesti üles leida puhetiste ja sõlmede seisukohti iga viletooni puhul.

Joon. 37.

5) Vilede printsiibil põhjenevad mitmed puhkpillid, millest tähtsam on f l ö ö t. Kuna kirjeldatud orelivilel ainult tema põhitooni tarvitatakse, võib flöödil sünnitada kõiki heliredeli toone. Selleks on toru külje sees terve rida auke, mida sõrmede ja klappide abil võib katta või avada. On mõni auk avatud, siis katkeb selles kohas õhusamba õõtsumine, nii kui oleks terve ülejäänud toruots sealt ära lõigatud. Selle tõttu kujunevad viletorus seisvad lained samati, nagu vastavalt lühemas vileski, ja toon on kõrgem. Lühendades säärasel teel järgjärgult õhusamba pikkust, võib flöödil tekitada terve kromaatilise heliredeli.

Näited: 1) Kui pikk peab olema viletoru (teoreetiliselt), et teme põhitoon oleks $a_1 = 435$ õõtset sek.?

Tooni a_1 laine pikkus on õhus (15^0 C.):

$$l = \frac{C}{N} = \frac{340}{435} = 0{,}782 \text{ m.}$$

K i n n i s e v i l e pikkus peab võrduma veerand-lainega, s. t.

$$L = \tfrac{1}{4} \cdot 0{,}782 = 0{,}1955 \text{ m.} = 19{,}55 \text{ cm.}$$

Lahtise vile pikkus võrdub poollainega, s. t.

$$L = \tfrac{1}{2} \cdot 0{,}782 = 0{,}391 \text{ m.} = 39{,}1 \text{ cm.}$$

2) Missugused on 32,55 cm pikkuse kinnise vile põhi- ja ülemtoonid? 15^0 C. õhutemperatuuris on põhitooni lainepikkus

$$l_0 = 4 \cdot 32{,}55 = 130{,}2 \text{ cm.} = 1{,}302 \text{ m.}$$

Tema õõtsearv on: $N_0 = \frac{c}{l_0} = \frac{340}{1{,}302} = 261$, ta kujutab nii siis tooni c_1.

Ülemtoonid on: $\underbrace{3\,N_0 = 783}_{= g}$, $\underbrace{5\,N_0 = 1305}_{e_3}$, $\underbrace{7\,N_0 = 1827}_{}$ jne.

Seitsmendat ülemtooni 1827 õõtset/sek. helired elites ei leidu.

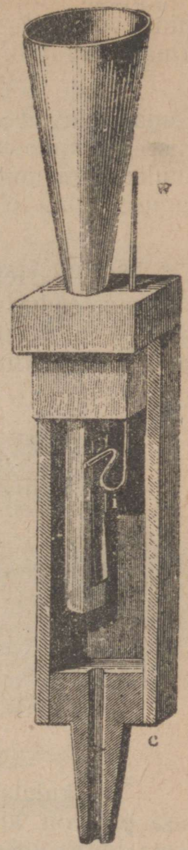
§ 23. **Keelviled, puhkpillid** ja **inimese hääleorgaan.**

1) Siia liiki kuuluvatel pillidel satub alguses õõtsuma mõni kõva keha (keel), mille liikumised ülekanduvad viletoru õhusamba peale. Joonistusel 38 kujutatud o r e l i k e e l v i l e s näiteks, hakkab, õhuvoolu mõjul õõtsuma õhuke m e t a l l k e e l i. Selleks puhutakse toru c kaudu õhku alumisse õhukambrisse, kust ta ainult metallkeele all seisva avause kaudu välja pääseb ülemisse koonusetaolisse kõlatorru. Iga kord, kui keel katab avause, katkeb õhuvool, et järgmisel silmapilgul uuesti algada. Need õhutõuked sünnitaksid ilma kõlatoruta võrdlemisi nõrga tooni, mille kõrgus oleneks ainult keele kujust ja ainest. Palju tugevamaks muutub aga toon kõlatoru abil, kui viimase pikkus niisugune on, et temas sündivad seisvad õhulained toetavad keele õõtsumist (§ 21).

Kui keel on valmistatud p e h m e s t e l a s t s e s t ainest, siis juhib tema õõtsumist kõlatorus õõtsuv õhusammas, sarnaselt nagu see kirjeldatud § 22_1. Sel puhul oleneb vile toon ainult toru pikkusest, ning küljeaukude ja klappide abil võib ühe keelvilega sünnitada kõiki helired eli toone. Säherdused keelviled on k l a r i n e t t, o b o e ja f a g o t t. Nende keeled on valmistatud õhukesest painduvast pilliroost.

2) Vaskpuhkpillidel ei ole keelt, kuid siiski kuuluvad nad samasse rühma: tooni sünnitava keele osa mängivad siin puhuja huuled, mis õhuvoolu mõjul õõtsuvad ja sellega õhku tõugete kaupa kõlatorru lasevad. Huulte õõtsumise kiirust reguleerivad ka siin pillitorus tekkivad seisvad lained.

Puhudes nõrgemini või tugevamini, võib sünnitada kas põhi- või ülemtoone. Peale selle on mõnedel puhkpillidel võimalik muuta toru enese pikkust (tromboon), välja tõmmates või koomale lükates üksikuid torujagusid. Teistel muudetakse toru pikkust, juhtides ventiilide abil õhuvoolu kas lühemaisse või pikemaisse toruharudesse (trompet, cornet à piston jne.). Nii siin kui seal muutub ühes toru pikkusega ka tekkinud lainetamise õõtsearv ja tooni kõrgus.

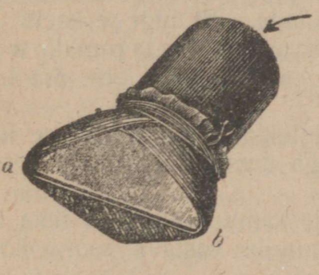


Joon. 38

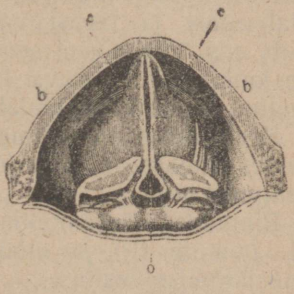
3) Inimese hääleorgaanil on palju sarnadust joonistusel 39 kujutatud keelvilega. Viimane kujutab lihtsat torukest, mille ots on kahelt poolt längu ära lõigatud, nii et mõlemad lõikepinnad umbes 90° all teineteise vastu seisavad.

Lõikepindade peale on köidetud kaks kummipaela nii, et nende ääred üsna kitsa pilu ab sünnitavad. Kui läbi seesuguse keelvile õhku puhuda, siis hakkavad kummipaelte ääred õõtsuma, kordamisi avades ja sulgudes nimetatud pilu. Õhk pääseb tõugete kaupa läbi vile, sünnitades helilainetamist, mille kõla meelde tuletab väikese lapse kisa

Kirjeldatud kummipaelte osa etendavad inimese häälekõris kaks elastset paela c-c (joon. 40) — n. n. häälepaelad.



Joon. 39.

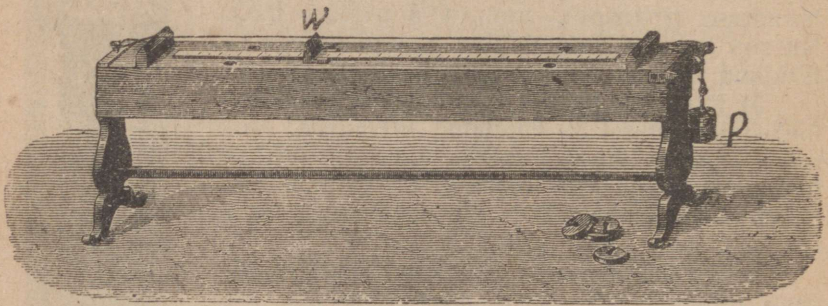


Joon. 40.

Kopsudest tulev õhk paneb nad õõtsuma, mille tagajärjel sünnibki hääl. Sellekohaste musklite abil võib häälepaelu kas pingutada või lõdvendada, nii et nende õõtsumine kas kiiremini või aeglasemini sünnib ja hääl kas kõrgemaks või madalamaks muutub.

Vilede kõlatoru osa etendab hääle sünnitamisel suu õõnsus. Temas tekivad seisvad õhulained, mis toetavad häälepaelte õõtsumist ja annavad häälele tema kõlavärvi. Kurgulae, keele ja huulte kuju muutumisel omandab tekkinud hääl igal juhusel isesuguse kõla. (Lähemalt selle üle vaata § 26_3).

§ 24. **Helisevad keeled; keelpillid.** 1) Niidikujuliste keelte õõtsumisseaduste tundmaõppimiseks tarvitatakse iseäralist aparaati — n. n. monokordi (joon. 41), mille abil hõlbus on mõõta nii õõtsuva keele pingutust kui ka tema pikkust.



Joon. 41.

Ta kujutab õhukeste seintega puukasti, mille külge ühte otsa pidi on kinnitatud teraskeel (traat). Keel hoidub pingul tema teises otsas rippuva pommi p abil, nii et keele pingutus alati proportsionaalne on tema otsas rippuva pommi kaaluga.

Õõtsuva keelejao pikkuse mõõtmiseks seisab kasti kaanel, keele all teravaservaline tugi w, mida piki kasti seisval sentimeeterskaalal edasi ja tagasi võib nihutada. Et tugi w keele külge puutub, siis õõtsub keel osadena nii nagu oleks ta punktis **w** kasti külge kinnitatud. Õõtsuva keeleosa pikkust võib otse ära lugeda nimetatud sentimeeterskaalalt.

Keele õõtsearvu võime mõõta tekkiva tooni kõrguse kaudu, võrreldes viimast mõne teise, temaga unissoonis kõlava ja tuntud õõtsearvuga tooniga.

Riputades järgemööda ühe ja sama keele otsa ikka raskemaid pomme (P) ja mõõtes pommile vastava tooni kõrgust, leiame järgmise seaduse:

Keele õõtsearv on proportsionaalne pingutusjõu (raskuse P) **kvadraatjuurega.** Kui üks keel on, näiteks, 4 korda pingumal kui teine, siis õõtsub ta $\sqrt{4} = 2$ korda kiiremini kui teine.

Nüüd jätame keele pingutuse muutmatuks ja lühendame õõtsuvat keeleosa, nihutades tuge w järk-järgult lähemale kasti külge kinnitatud keeleotsale. Kui mõõta iga keelepikkusele vastava tooni õõtsearvu, siis selgub, et:

Keele õõtsearv on ümberpöördult proportsionaalne keelepikkusega. Kui esimene keel on näiteks 2 korda pikem teisest, siis õõtsub ta 2 korda aeglasemalt kui teine.

Võrreldes raskemaid (paksemaid) ja kergemaid (peenemaid) keeli ühesuuruse pikkuse ja pingutuse juures, leiame, et:

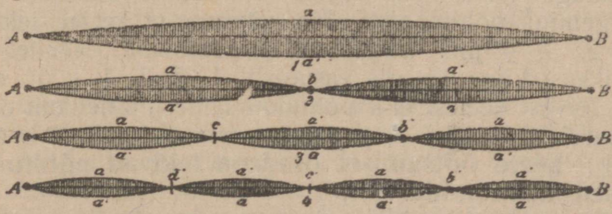
Keele õõtsearv on ümberpöördult proportsionaalne tema massi kvadraatjuurega. Kui kahest keelest esimene on 4 korda raskem kui teine, siis õõtsub esimene — ühesuguste teiste tingimuste maksvusel — $\sqrt{4} = 2$ korda aeglasemalt kui esimene. Sellest järgneb, et peenem keel sünnitab kõrgemaid toone kui jäme.

Kõik 3 ülevalkirjeldatud seadust sisalduvad formulis:

$$N = \frac{17{,}6}{QL} \sqrt{\frac{P}{D}} \qquad 5)$$

kus N tähendab õõtsearvu, Q — keele paksust (cm^2), L — tema pikkust (cm), P keele pingutusjôudu (g.) ja D tema erikaalu. Selle formuli abil võime välja arvata igasuguse keele ôôtsearvu.

2) Kui pingutatud keelt põigiti tõmmata või teda tõugata, siis laguneb lainetamine tõukekohalt mõlemale poole laiali. Lained

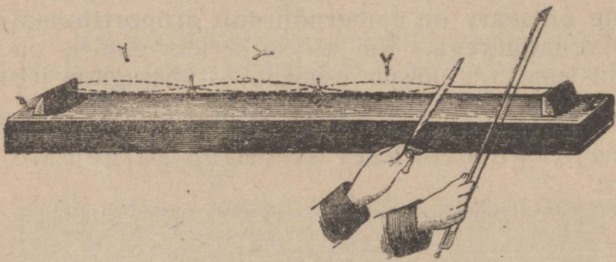


Joon. 42.

peegelduvad keele otsades ja sünnitavad keelel seisvaid põiklaineid. On selge, et keeleotsad ei või õõtsuda, sellepärast peavad mõlemas keeleotsas sõlmed asuma. Kõige lihtsamal juhusel õõtsub terve keel üles alla, nii et tema keskkohas sõlm aa[1] (joon. 42, rida 1) kujuneb. Keele pikkus võrdub siis poole seisva laine pikkusega. Antud tingimustel on see kôige pikem laine, mis üleüldse tekkida võib vaadeldud keelel; tema abil sündinud toon, — n. n. keele põhitoon, aga on järjelikult kõige madalam nendest toonidest, mida keel võib sünnitada.

Keel võib aga õõtsuda ka osadena, nii et tema pikkusel 2, 3, 4 j. n. e. poollainet järgemööda seisavad (joon. 42 alumised read). Asetame, näiteks, monokordi keele peale terve rea hargitaolisi paberitükikesi (joon. 43). Puudutame keelt pahema käega õrnalt tema esimese veerandi kohal, teise käega aga paneme piiratud veerandkeele viiulipoognaga õõtsuma.

Puhetiste kohtadel õõtsuv keel puistab sealt vastavad paberitükikesed maha, nii et nad lõpuks ainult sõlmede ligidal keele peale jäävad. Paigale jäänud paberitükikestest näeme, et puhetised ja sõlmed mitte ainult selle keeleosa peal ei ilmu, mis otsekohe õõtsuma pandi, vaid ka teisel pool puutumiskohta. Tervel keelel asuvad (ühes puutumiskohaga) 3 sõlme, — nii siis 4 puhetist, sest et ka keeleotsi sõlmedeks tuleb lugeda. Järjelikult õõtsub keel nii, nagu see kujutatud on joonistusel 42, rida 4.



Joon. 43.

Puudutades keelt esimese kolmandiku kohal, saaksime terve keele peal 3 seisvat poollainet (joon. 42, rida 3), puudutades teda keskkohal — 2 poollainet (rida 2) j. n. e.

Muidugi mõista kõlab keele õõtsumisel osadena ka tema toon kõrgemini põhitoonist. Me nägime, et keelel tekkida võivad 1, 2, 3, 4 jne. poollainet järgemööda. Nende seisvate lainete pikkused on nii siis vastavalt 1, 2, 3, 4 j. n. e. korda lühemad tervest keelest ehk põhitooni lainest, järjelikult on nende õõtsearvud 1, 2, 3, 4 j. n. e. korda suuremad kui põhitooni oma. Tähendab: **keele õõtsumisel osadena tekivad põhitooni harmoonilised ülemtoonid** (§ 19_1).

Harilikult nimetatakse põhitooni ennast esimeseks ülemtooniks, 2, 3, 4, jne. korda suurema õõtsearvuga tooni aga vastavalt *teiseks*, *kolmandaks*, *neljandaks* jne *ülemtooniks*.

Esimeste harmooniliste ülemtoonide intervallid põhitooniga oleksid:

Ülemtoon	Intervall	Ülemtooni kõrgus heliredelis	Lained joon. 42
I	1 : 1	priim	rida 1.
II	2 : 1	oktaav	rida 2.
III	$3:1 = \frac{2}{1} \cdot \frac{3}{2}$	oktaavi kvint	rida 3.
IV	$4:1 = \frac{2}{1} \cdot \frac{2}{1}$	II oktaav	rida 4.
V	$5:1 = \frac{2}{1} \cdot \frac{2}{1} \cdot \frac{5}{4}$	II oktaavi terts	
VI	$6:1 = \frac{2}{1} \cdot \frac{2}{1} \cdot \frac{3}{2}$	II oktaavi kvint	
VII	$7:1 = \frac{2}{1} \cdot \frac{2}{1} \cdot \frac{7}{4}$	Intervalli $\frac{7}{4}$ heliredelis ei leidu	

3) Keelpillideks hüütakse kõiki neid mänguriistu, mille tooni sünnitavad niidikujulised keeled. Mõnel keelpillil on terve hulk keeli, millest igaüks sünnitab ainult ühe tooni (klaver, kannel jne.); teistel on ainult mõni (harilikult 4) keel, kusjuures igaüks nendest sünnitada võib mitu tooni selle läbi, et keelepikkust lühemaks muudetakse, vajutades sõrmega keelt vastavas kohas vastu keeltealust (näiteks, viiul, gitarr jne.). Et keeltelt enestelt tekkinud heli võrdlemisi nõrk on, siis kinnitatakse nad harilikult õhukeste puulaudade või iseäraliste kastide peale. Keele õõtsumine kandub läbi nimetatud laudade kastis oleva õhu peale, mille tagajärjel õõtsuva keha pind suureneb ja toon tugevamaks muutub.

§ 25. **Tooni kõlavärv.** 1) Teravamalt kuulates lahtisel keelel sünnitatud põhitooni, kuuleb harjunud kõrv peale põhitooni enese veel mõnda ülemtooni. Tõepoolest ei õõtsu ükski keel nii lihtsalt, nagu eelmises § kirjeldatud, vaid peale terve keele õõtsumise (põhitoon) kujunevad keelel alati veel mõned iseseisvad ülemtooni-õõtsumised. Keel õõtsub, näiteks, tervena üles-alla (joon. 42, rida 1), tema üksikud osad, — pooled, kolmandikud, veerandid jne. — õõtsuvad peale selle veel iseseisvalt nii, nagu seda kujutavad joon. 42 read 2, 3 ja 4. Kõrva tulevad helilained kujutavad nii siis üksikute keeleõõtsumiste interferentsi resultaati. Helilainete kuju muutub selle läbi muidugi väga keeruliseks: põhitooni saledat lainejoont katavad ülemtoonide väikesed laineharjad ja orud, nii et esimese kuju keeruliseks kõverjooneks muutub.

Inimese kõrval on iseäraline omadus, mille tõttu kirjeldatud resultantlaine seal nagu lahutatakse tema alglainetamisteks, otsekui tuleksid kõigi toonide lained eraldi kõrva. Teatava harjumuse korral kuuleme sellepärast peale põhitooni eraldi veel üksikuid ülemtoone. Igal juhusel aga oleneb üleüldine mulje kõrvas peale põhitooni tugevuse ja kõrguse sellest, missugused ülemtoonid põhitooniga kaasa kõlavad ja kui tugevad nad on. Me ütleme lühidalt: **tooni kõlavärv oleneb üiemtoonide arvust ja tugevusest.** Klaveritoon kõlab teistviisi kui niisama kõrge ja tugev viiulitoon, inimese lauluhääl ei kõla nii, nagu orelivile toon jne. Kõlavärvi vahe on toonidel nii suur, et meie tema järgi hõlpsasti otsustada võime tooni tekitamise viisi üle.

2) Ülemtoone võime kergesti eraldada põhitoonist järgmise õpetliku katse korral: pingutame monokordi keelt niikaua, kunni tema põhitoon unisoonis kõlab, näiteks, klaveri tooniga c_1. Nüüd puudutame õõtsuvat keelt üsna õrnalt tema keskkohalt: selle läbi takistame keele õõtsumist tervena (joon. 42, rida 1), nii et põhitoon peab vaikima; endiselt võivad aga edasi kesta need keeleõõtsumised, mille sõlmed asuvad keele keskkohas (joon. 42, rida 2 ja 4), sest et nendes lainetes nimetatud koht nii-kui-nii paigal seisab. Põhitooni asemel kõlab nüüd kõige tugevamini II ülem-

toon, mille õõtsearv on 2 korda suurem kui põhitooni oma. Tõepoolest kuuleme nüüd endise tooni c_1 asemel tema ülemist oktaavi. Puudutades keelt tema kolmandiku kohal (näit. punktis c, joon. 42, rida 3), takistame nende lainete ilmumist, mille juures vastav keelepunkt peaks õõtsuma, nii siis põhitooni, II ja IV ülemtooni tekkimist (rida 1, 2 ja 4). Me kuuleme tõepoolest ainult III ülemtooni, õõtsearvuga 3 N, s. t. põhitooni teise oktaavi kvinti g_2.

3) Ühel ja samal keelel ei kosta mitte alati ühed ja samad ülemtoonid: kui näiteks viiulipoogna abil helisema panna keelt tema keskkohalt, siis ei või selles kohas muidugi mingisugust sõlme tekkida, — õõtsutame ju nimelt seda keelepunkti. Järjelikult peavad selle juures ära jääma kõik need seisvad lained, mille sõlmpunktid asuksid nimetatud kohas. Niisugused oleksid II ja IV ülemtooni õõtsumised (joon. 42, rida 2 ja 4). Ühes põõhitooniga kõlavad sellel juhusel siis ainult III, V jne. ülemtoon. Kui viiulipoognaga aga keelt kolmandiku kohalt tõmmata, siis kõlaksid põhitooniga kaasa ainult II, IV jne. ülemtoon. Tõepoolest oleneb tooni kõlavärv sellest, kus kohal keel õõtsuma pannakse.

Ka tooni tekitamise viis mõjub tuntavalt kõlavärvi peale: kui tõmmata näpuga keelt, siis kõlab ta üsna teisiti, kui teda poognaga õõtsutada või tema peale haamrikesega lüüa; kõik oleneb sellest, missugused ülemtoonid igal juhusel võivad tekkida ja kui tugevad nad on.

Heade klaverite mahe toon põhjeneb muu seas selle peal, et haamrid keele peale löövad $\frac{1}{7}$ keelepikkusel tema otsast. Selle tõttu kõlavad põhitooniga kaasa 6 esimest ülemtooni, kuna dissoneeriv VII ülemtoon, — mida heliredelites ei leidu, — ilmuda ei saa. Keelpillidel on põhitoon võrdlemisi tugevam kui klaveril, esimesed ülemtoonid nõrgemad, kõrged ülemtoonid (VI—IX) aga jälle tugevamad. Nimelt viimaste mõjul on viiuli toon „teravam" kui klaveri toon. Vaskpuhkpillidel on iseäranis tugevad väga kõrged ülemtoonid, mispärast nende toon „lõikavaks" muutub.

Ülemtoonide tugevuse ja kõlavärvi peale mõjub ka keele või pilli aine. Iseäranis metallosad hõlbustavad tugevate kõrgete ülemtoonide tekkimist ja annavad sellega toonile „metallilise" kõlavärvi.

Näited: 1) 60 cm pikkune keel annab tooni c_1. Kuskohal peab teda vastu monokordi kaant suruma, et tekiksid toonid c_2, f_1 ja g_1?

Kui tooni c_1 õõtsearv on N_0, siis on tema o k t a a v i c_2 õõtsearv $2N_0$, k v a r d i f_1 oma $^4/_3 N_0$ ja k v i n d i g_1 oma $\frac{3}{2} N_0$ (§ 20, tab. 1). Keelepikkus on ümberpöördult proportsionaalne õõtsearvuga, s. t. soovitud toonide tekitamiseks peab õõtsuva keeleosa pikkus olema

$$\text{tooni } c_2 \text{ jaoks: } \frac{N_0}{2N_0} \times 60 = 30 \text{ cm.}$$

$$\text{„ } f_1 \text{ „ } \frac{N_0}{^4/_3 N_0} \times 60 = \frac{3}{4} \cdot 60 = 45 \text{ cm.}$$

$$\text{„ } g_1 \text{ „ } \frac{N_0}{^3/_2 N_0} \times 60 = \frac{2}{3} \cdot 60 = 40 \text{ cm.}$$

2) Monokordi keele otsas ripub pomm $P_1 = 0{,}5$ kg. Selle juures tekkinud põhitoon on $c_1 = 261$ õõtset sek. Kui sama keele otsa riputada pomm $P_2 = 4{,}5$ kg. ja lühendada keelt $\frac{1}{3}$ võrra, missugune toon tekib siis?

Esialgse pikkusè korral annaks keel raskema pommiga P_2 tooni, mille õõtsearv N_1 vastaks võrrandile:

$$\frac{N_1}{c_1} = \frac{\sqrt{4{,}5}}{\sqrt{0{,}5}} = \sqrt{\frac{4{,}5}{0{,}5}} = \sqrt{9} = 3,$$

$$\text{ehk } N_1 = 3c_1 = 3.261 = 783.$$

Lühendades keelt $\frac{1}{3}$ võrra, tekib uus toon, mille õõtsearv N_2 on:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{1}{^2/_3} = \frac{3}{2}, \text{ ehk } N_2 = \frac{3}{2} N_1 = \frac{3}{2} \cdot 783 = 1174.$$

Leitud tooni õõtsearv $N_2 = 3 \cdot \frac{3}{2} c_1 = \frac{9}{2} c_1$. Tema intervall tooniga c_1 on: $\frac{9}{2} c_1 : c_1 = \frac{9}{2} = \frac{8}{8} \cdot \frac{9}{2} = \frac{8}{2} \cdot \frac{9}{8} = 4 \cdot \frac{9}{8} = 2 \cdot 2 \cdot \frac{9}{8}$

Toon $2c_1 = c_2$ on esimene oktaav; $2c_2 = c_3 =$ tooni c_1 teine oktaav.

Toon $\frac{9}{8} c_3 = 2 \cdot 2 \cdot \frac{9}{8} c_1$ on c_3-me sekund d_3, ehk tooni c_1 teise oktaavi sekund.

3) Teraskeele läbimõõt on $d_1 = 0,2$ mm. Missuguse intervalli sünnitab tema tooniga teise teraskeele toon, mille läbimõõt $d_2 = 0,6$ mm ja mille pikkus ja pinevus on niisama suur, kui esimese keele omad?

Ühesuguse pikkuse korral on keelte massid M_1 ja M_2 proportsionaalsed keelte läbilõigetega. Viimased aga on proportsionaalsed läbimõõdu (d) kvadraatidega, s. t. $\frac{M_1}{M_2} = \frac{d_1^2}{d_2^2} = \left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2$; õõtsearvud N_1 ja N_2 on ümberpöördult proportsionaalsed keelte masside kvadraatjuurtega:

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\sqrt{M_1}}{\sqrt{M_2}} = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} = \sqrt{\left(\frac{d_1}{d_2}\right)^2} = \frac{d_1}{d_2} = \frac{0,2}{0,6} = \frac{1}{3},$$

ehk $N_1 = 3N_2$ s. t. peenema keele toon kujutab jämedama keele tooni ülemise oktaavi kvinti $\left(2 \frac{3}{2} N_1\right)$.

§ 26. **Resonants; kõlade analüüs.** 1) Kui harilikku pendlit üsna nõrgalt õõtsuma tõugata, siis võib tema liikumine niivõrd väike olla, et me teda vaevalt tähele paneme. Kui aga iga õõtse järele korrata seda tõukekest, siis summeerub nende mõju, nii et pendel lõpuks väga kõvasti õõtsuma võib hakata. Seesugusel teel võib kõige nõrgem laps rasket kirikukella õõtsutada: selleks on ainult tarvis, et ta ikka teatud kindla aja järgi (rütmis) kella nööri tõmbaks ja sellega kella õõtsumisamplituudi järk-järgult suurendaks. Üksikute tõmmete vahe peab võrduma selle õõtsevältega, millega ükskord tõugatud kell ise edasi õõtsuma hakkaks, kui teda täiesti vabaks jätta. Säärase kord õõtsuma tõugatud ja siis vabaks jäetud kella õõtsete arvu ühes sekundis nimetame tema eneseõõtsearvuks; vastavat õõtseväldet aga — kella eneseõõtse välteks ehk perioodiks. Ülevalkirjeldatust järgneb üleüldine seadus: **Kui mõnda keha õõtsutada nii kiirelt et õõtsutamisperiood võrdub keha eneseõõtse perioodiga, siis hakkab ta järk-järgult ikka suurema amplituudiga õõtsuma;** seda nähtust nimetatakse **resonants'iks.**

Leitud seadus on maksev igasuguse õõtsumise jaoks, mitte ainult kõvade kehade, vaid ka gaaside ja vedelikkude kohta.

Iseäranis suure tähtsuse omandab resonantsi nähtus niisugustes väikestes ôôtsumistes, nagu helilainetamine seda on, sest et pea kôikidel kehadel niisugune ôôtsumine hôlpsasti vôib tekkida, mikspärast tihti asju leidub, mis juhtumisi resonantsis seisavad mône helilainetamisega ja selle tôttu viimasega kaasa ôôtsuma hakkavad.

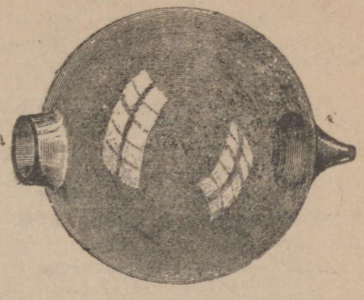
Kui näiteks 2 ühesuguste toonidega heliharki kinnitada sellekohaste puukastikeste — n. n. r e s o n a n t s k a s t i d e peale (joon. 29) ja neid paari meetri kaugusele teineteisest paigutada, siis hakkab esimese helihargi helisemisel ka teine helihark iseendast kaasa helisema: siin kanduvad esimese helihargi ôôtsed peaasjalikult tema resonantskasti seinte kaudu ôhku; ôhulained tôukavad, teise helihargini jôudes, selle resonantskasti seinu niisama kiirelt ôôtsuma, kust siis liikumine üle kandub teise helihargi enese peale. Et viimase eneseôôtse periood vôrdub esimese helihargi tooni ôôtseperioodiga, siis seisab teine helihark resonantsis helilainetamisega, nii et tema ôôtsumisamplituud iga uue ôhutôuke puhul kasvab ja lôpuks peaaegu niisama suureks vôib paisuda kui esimesegi helihargi oma.

On ainult tarvis ôige vähe muuta ühe helihargi eneseôôtsearvu, ja resonantsi nähtus kaob: kleebime, näiteks, helihargi haru külge tükikese vaha, — selle läbi muutub haru vähe raskemaks ja tema eneseôôtsearv väheneb. Kui tugevalt me nüüd ka ei paneks helisema esimest heliharki, teine ei hakka temaga enam kaasa helisema: kuigi ôhutôugete tugevus endine on, ei vôrdu nüüd nende periood enam teise helihargi eneseôôtsumise perioodiga, mille tôttu tõugete kogumôju väikeseks jääb ja helihargi ôôtsumisamplituud üleüldse nii suureks ei kasva, et ôôtsumist tähele vôiks panna.

Veel hõlpsamini võime vaadelda resonantsi nähtusi klaveril: Avame näiteks klaveri kaane ja tõstame üles tema pedaali. Kui nüüd kõva häälega laulda mõnda tooni, siis kõlab seesama toon peale hääle katkestamist klaveris edasi: siin panid laulu helilained õõtsuma klaveri laia resonantspõhja. Läbi metalljagude kandus see õõtsumine siis üle kõigi keelte peale. Tugevasti õõtsuma hakkasid saadud tõugete mõjul ainult need keeled, mille eneseõõtsearv võrdub helilainetamise omaga. Viimased toetavad nii siis lauldud tooni ja õõtsuvad omandatud hooga ka siis veel edasi, kui hääl ise juba vaikinud.

2) § 21 on kirjeldatud, kuidas torus asuv õhusammas võib õõtsuma hakata ja tema ligidal helisevat helihargi tooni toetada. Ka selle resonantsnähtuse juures peavad heliseva keha ja õõtsuva õhusamba eneseõõtsearvud ühesuurused olema. Viimane arv oleneb siin kõige pealt õhusamba pikkusest, sest et sellest oleneb see kiirus, millega ükskord tõugatud ja siis vabaks jäetud õhusammas edasi õõtsuma hakkab. Nimetatud katse puhul nägime, et õhusammas ühe tooniga mitme pikkuse juures resonantsis võib olla. Ümberpöördult võib

siis üks ja sama' õhusammas resonantsis seista ka mitme tooniga. Arvulised juurdlused kui ka katsed näitavad, et silindriline õhusammas tõepoolest peale põhitooni veel resonantsis olla võib viimase ülemtoonidega, nii et ta ka neid toetab.



Joon. 44.

Helmholtz leidis, et kerasarnastes nõudes asuv õhk ainult ühe põhitooniga resonantsis seisab, nii et õõnes klaas- või metallkera ainult ühte tooni kõvendab, ja nimelt seda, mille lainepikkus võrdub neljakordse keraläbimõõduga. Säherdust õõnest kera (joon. 44) nimetas ta resonaatoriks. Kui resonaatoori väiksem avaus b kõrva juures hoida, nii et helilained ainult läbi resonaatori kõrva pääsevad, siis hävivad õõneskeras kõik helilainetamised peale ühe, mille õõtsearv võrdub resonaatori enese ôôtsearvuga. Sel teel vôime mitmehelilisest kôlast eraldada ühe teatud puhta tooni. Ei leidu seda tooni kôlas üleüldse mitte, siis ei kuule me läbi resonaatori midagi.

Helmholtz valmistas terve rea üksteisest järk-järgult suuremaid resonaatorid, millest igaüks vastas ühele teatud puhtale toonile. Kuulates ühte kôla järgemööda läbi resonaatorite, vôis tema leida, missugustest puhtaist toonidest juureldud kôla on kokku seatud (kôlade analüüs.)

Muu seas on seesugusel teel selgusele jôutud, mismoodi tooni kôlavärv muutub ühe vôi teise ülemtooni ilmumisel vôi hävimisel.

3) Ülevalkirjeldatud kôlade analüüsi abil sai vôimalikuks ka häälikute (vokaalide) kôla uurimine Heimholtzi sellekohastest katsetest selgub, et ka üksikute häälikute iseloomulik kôlavärv ainult ülemtoonide mõjul tekib. Iga hääliku väljarääkimisel muudame suuôônsuse, keele ja huulte kuju, nii et seal igal juhusel isesugune ôhusammas ôôtsub. Vastavalt viimase kujule tekib kas üks vôi teine iseäranis tugev selle häälikule iseloomulik ülemtoon, mis tema kôlale annab tuntud kindla värvi.

Helmholtz ei leppinud mitte ainult häälikute kõla analüüsiga, vaid tal ônnestas leitud resultaatide pôhjal häälikuid ka kunstlikult sünnitada, ühel ajal kôlada lastes vastavaid puhtaid toone. Selleks tarvitas ta hulga heliharke, mille toonid kujutavad ühe põhitooni harmonilisi ülemtoone. Iga helihark seisis vastava resonaatori ees, mille tõttu tema toon ülemtoonidest peaaegu täiesti puhas oli. Sellekohase elektromagnetilise mekanismi abil võis iga heliharki püsivalt heliseda lasta, kusjuures tooni tugevust reguleerida sai resonaatori augu suurendamise või vähendamise abil. Helmholtzi katseteks tarvitatud helihargid andsid, näiteks järgmise tooniderea :

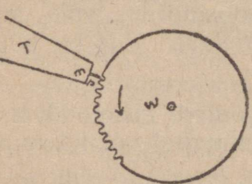
helihark:	toon:	õõtsearv:	helihark:	toon:	õõtsearv:
1.	b_{-1}	120	7.	as_2	7×120
2.	b_0	2×120	8.	b_2	8×120
3.	f_1	3×120	9.	d_3	10×120
4.	b_1	4×120	10.	f_3	12×120
5.	d_2	5×120	11.	as_3	14×120
6.	f_2	6×120	12.	b_3	16×120

Kôigi katsete puhul valiti hääliku pôhitooniks II toon, s. t. b_0 = 2×120. Siis sündisid täiesti puhtad häälikud järgmiste toonide koosmôjul:

häälik **u**: tugevasti kôlav puhas pôhitoon b_0 üksinda;
„ **o**: keskmise tugevusega b_0; kõvasti kôlav iseloomulik toon b_1 ja nôrgem toon f_2;
„ **a**: keskmiselt kôlav b_0, b_1 ja f_2; tugevad iseloomulikud toonid b_2 ja d_3;
„ **ä**: keskmise tugevusega b_0; tugevamad toonid b_1 ja f_2; tugev iseloomulik toon d_2; nõrgalt kõlav b_3 ja väga tugevad toonid d_3 ía f_3;
„ **e**: keskmise tugevusega b_0 ja b_1; tugev iseloomulik toon f_1, väga tugevad toonid f_3, as_3 ja b_3.

Ainult häälikuid **i** ja **ü** ei olnud võimalik sellel teel sünnitade, sest et nende iseloomulikud toonid liiga kôrged peavad olema.

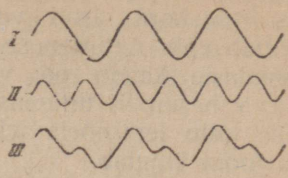
§ 27. **Fonograaf** ja **grammofon. 1)** Edisoni (1877) leittud fonograafi abil võime iga heli kui ka inimese kõneüles kirjutada ja teda soovi järgi siis korrata. Selle tähtsa aparaadi printsiipi kujutab joonistus 45ª. Lühikese koonusesarnase toru T sisse räägitakse või lauldakse, nii et helilainetamine koondub toru alumisse otsa. Viimast katab õhuke membraan (m), näiteks üsna õhuke klaas- või metallplaat, mille keskkohta on kinnitatud terasnõel (s). See nõel toetub sileda vahasilindri (w) peale ja vajutab silindri tiirlemise aegu tema pinna sisse väikese vao. Niikaua kui ümberringi kõik vaikne on, seisab membraan m ja temaga ühendatud terasnõel paigal, nii et vao sügavus tervel pikkusel ühesuuruseks jääb. Niipea aga, kui toru T ees mingisugune heli tekib, hakkab membraan helilainetamise mõjul korralikult õõtsuma, mille tagajärjel terasnõel s kas sügavalt või õhemalt vahapinda tungib.



Joon. 45-a.

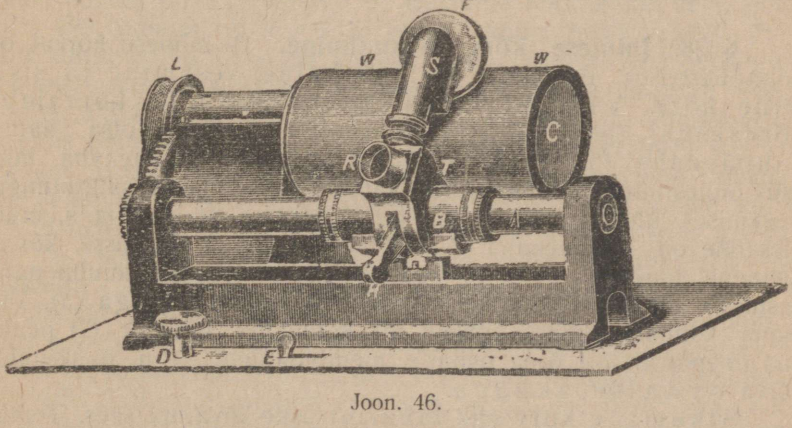
Vahasilindri tiirlemise aegu tekib siis konarlise põhjaga vagu, mille põhja kõrgendused ja lohud vastavad torru T juhitud helilainete harjadele ja orgudele. Kõrgema tooni puhul on õõtsumine kiirem, mispärast siis ka vaopõhja konarused on tihedamad; tugevama tooni puhul on nad sügavamad, nõrgema puhul madalamad jne.

Kui torru juhitud heli on mingi puhas toon, näiteks häälik u või mõne helihargi toon, siis on helilained lihtsad, s. t. ühest ainsast lainest koosseisvad, ja vaopõhja konarustel oleks lõikes joonistusel 45-b, rida I näidatud kuju. Seilesama puhta tooni esimene harmooniline ülemtoon (oktaav) jätaks vaha sisse lihtsa laine sarnase jälje mille lainete arv oleks kaks korda suurem kui esimese tooni oma (joon. 45-b, rida II). Kui nüüd mõlemad toonid korraga kõlavad, — nagu see näiteks hääliku o väljarääkimisel sünnib, — siis hakkab membraan ôôtsuma vastavalt môlema lainetamise interferents - lainele (joon. 45-b rida III). Me näeme, et kôrge harja ja sügava oru vahel veel teine, väiksem lainehari ja org asub. Mida rohkem puhtaid helisid sisaldab torru T juhitud kôla, seda rohkem lihtsaid laineid peitub ôhulainetamises, — seda keerulisemaks muutub vahasilindrisse vajutatud vaopôhja kuju.



Joon. 45-b.

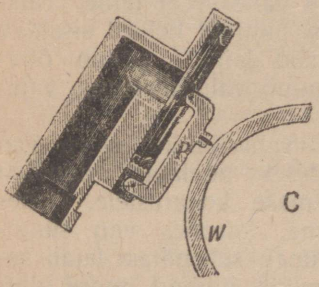
Kui nüüd terasnôela s paigutada vahasilindril oleva vao algusesse ja silindrit tiirutada, siis libiseb nôelaots vaopôhja mööda, tôustes ja langedes vastavalt viimase konarustele. Ühes nôelaga hakkab ka membraan ôôtsuma, korrates vao sündimisel tehtud liigutusi. Membraanilt laguneb sellepärast laiali samasugune ôhulainetamine, nagu ta torru T juhitud tooni üleskirjutamisel ôhus olemas oli. Sattudes meie kôrva, sünnitab see uus ôhulainetamine täpipealt niisamasuguse mulje, kui vahasilindrile üleskirjutatud alghelilaine seda oleks teinud. Me kuuleme siis inimese rääkimist, mänguriistade heli ja koguni kôiki kahinaid nende loomulikus kôlas.



Joon. 46.

Joonistus 46 kujutab lihtsat fonograafi: W on kirjeldatud ôônes vahasilinder, mida kergesti vähema metallsilindri C peale vôib lükata. Sellekohase kellavärgi abil vôib viimast reguleeritava kiirusega ühtlaselt tiirelda lasta. Membraan ja terasnôel asuvad kapsli F küljes (joon. 46-a), mida toru S ja R abil ühendada vôib kôlatoruga (joonistusel mitte näidatud). Nii kapsel F, kui kôlatoruots (R) on liikumata kinnitatud ôônessilindri B külge, mis omakord asub vôllil A. Viimase peal seisev kruvlôige nihutab vôlli A tiirlemise puhul silindrit B piki vôlli edasi. Hammasrataste kaudu on vôll A ühendatud silindriga C, nii et ühes vahesilindri tiirlemisega kapsel F piki silindrit edasi nihkub, mille tôttu terasnôela tekitatud vagu vahasilindri pinnal pikka kruvjoont kujutab.

Kôlade üleskirjutamisel asetatakse kapsel F ühes terasnôelaga vahasilindri ühte otsa. Toru R peale kinnitatakse kôlatoru ja pannakse terve aparaat kellavärgi abil käima. Üleskirjutamine sünnib nii kaua, kunni terasnôel on nihkunud vahasilindri teise otsani. Tahetakse nüüd üleskirjutatud helisid korrata, siis vahetatakse terasnôel vähe nürima, ümmariku otsaga nôela vastu ümber, ja asetatakse ta vaokese algusse. Viimast mööda libiseb nüüd nôelaots, korrates kôiki ülesmärgitud ôôtseid.

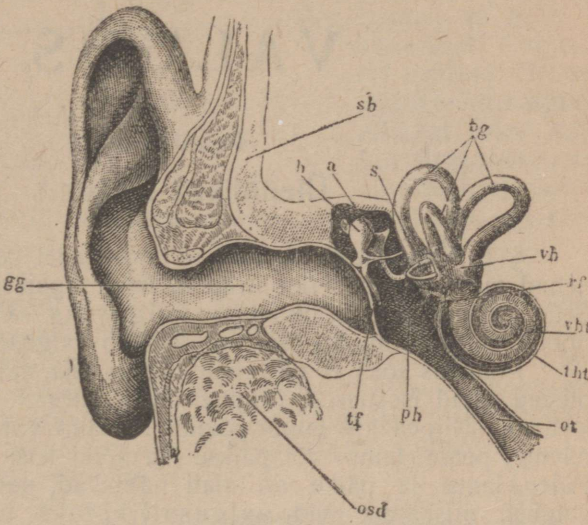


Joon. 46-a.

2) Tuntud grammofoni tarvitades ei märgita helisid üles mitte vahasilindrile vaid ümariku eboniitplaadile. Nôela sünnitatud vaoke kujutab siin spiraaljoont, mille algus on plaadi välisel äärel, lôpp aga tema tsentrumi ligidal. Nôela liikumised ei ole selle juures mitte pikiôôtsed vaid pôikôôtsed, nii et vaokese küljeseinte kuju pealt vaadates on lainesarnane, kuna tema sügavus igal pool ühesuguseks jääb.

§ 28. **Inimese kõrv ja kuulmine.** 1) Inimese kôrval on kolm üksteisest eraldatud osa: välimine, keskmine ja sisemine kôrv. Välimist kôrva moodustavad n. n. kôrvaleht, kôrvakanal (joon. 47 gg.) ja viimase sisemist otsa kattev kuulmenahk (tf.) Keskmist kôrva kujutab kuulmenaha taga asuv ôônesruum, mis kanali (ot) kaudu on ühendatud suuruumiga. Keskmises kôrvas asub kolm kuulmeluukest h, a ja s, mille ülesanne on kuulmenaha ôôtsumist üle kanda sisemisse kôrva. Esimene luukene — n. n. haamer (h) toetub otse kuulmenaha vastu ja on ühendatud teise luukesega, n. n. alasiga (a). Viimane kannab esimese ôôtseid üle kolmanda luukese (s) peale, mis ühenduses on ôrna ovaalse membraaniga, — n. n. sisemise kôrva ovaalse aknaga.

Sisemine kôrv ehk labürint asub kôva luu sees. Temas eraldub kolm osa: loogasarnased ôôneskäigud bg, tigu (vht) ja môlemate ühenduskoht (vh). Kôik need ôônsed jaod on üksteisega ühenduses ja on täidetud iseäralise vedelikuga — n. n. kuulmisvedelikuga. Tigu moodustab spiraalisarnane ôôneskäik, mida piki tômmatud vahesein kaheks jaotab. Niisugusel teel sündinud 2 spiraali lähevad eraldi ja paralleelselt kunni tigu tsentrumini, kus nimetatud vahesein lôpeb ja môlemad ôôneskäigud ühenduvad. Vahesein ise seisab koos suurest hulgast tihedalt üksteise ligi asuvatest kiududest mille pikkus tigu tsentrumile lähenedes väheneb (0,5 kuni 0,04 mm.). Need kiud on pingul ja kujutavad sellepärast rea keeli, mis ôôtsuma vôivad hakata — igaüks ühe teatud eneseôôtseperioodiga, vastavalt kiu pikkusele. Sama vaheseina peal asub veel hulk elastilisi karvu — n. n. Corti organ. Nii vaheseina kiud kui Corti orgaani karvakesed on ühendatud kuulmisergu otsadega, nii et arvatavasti iga kiu ja arva ôôtsumine ühte ergukiudu eraldi ärritab.



Joon. 47.

2) Kuulmisprotsessi enese üle on meil vôrdlemisi vähe teada. Kindel on, et välimine ja keskmine kôrv ainult helilainetamise ülekandjaiks on sisemisse kôrva: kôige pealt hakkab õhulainetamise môjul õõtsuma kuulmenahk, sealt kandub ôôtsumine keskmises kôrvas seisvate kuulmisluukeste kaudu sisemise kôrva ovaalse akna peale. Viimase môjul hakkab ôôtsuma kuulmisvedelik, mis omakord liikuma paneb tigu vaheseina kiudusid ja Corti orgaani karvakesi. Arvatakse, et selle juures tugevasti ôôtsuma hakkavad ainult need kiud, mille eneseôôtseperiood vastab kôrva tulnud helilaine õõtsumisperioodile. Puhas heli ehk toon paneks nii siis ôôtsuma ainult üheainsa vôi mône kôrvutiseisva kiu. Nendega ühendatud ergukiud ärrituvad selle tagajärjel ja sünnitavad peaajus ühe puhta tooni tunnet. Kui helilainetamine koos seisab mitmest puhtast helist, siis hakkab ôôtsuma niipalju kiudusid, kui palju lihtlaineid peitub kôrva tulnud helilainetamises. Selle tagajärjel ärrituvad mitmed ergukiud, ja peaajus ilmub iga tooni jaoks isesugune tunne. Vaevalt vôiks oletada, et üksainus erguots vôiks peaajus tekitada mitmesuguseid tundeid, mis vastaksid kuuldud toonide kõrgustele; küll aga on arusaadav, et iga kiu ärritus — kui ta eraldi ülekandub peaaiju — isesuguseid tundeid vôib tekitada.

Viies jagu:

VALGUS.

Peatükk I:

Üleüldised mõisted.

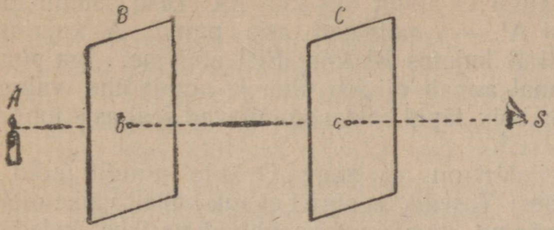
§ 1. **Valgusallikad.** Teatud tingimustel võivad kaugelseisvad kehad meie nägemiserku ärritada, mille tagajärjel meie „näeme“. Selle ärrituse põhjust nimetame valguseks. Optika ehk valgusõpetus on see füüsika osa, mis käsitab valguse nähtusi.

Pimedas toas ei näe meie ühtegi asja, millest järgneb, et toas olevad asjad iseenesest valgust välja ei kiirga — nad on tumedad kehad. Niipea kui lambi põlema süütame või aknaluugid avame, näeme, peale lambi või päikse ka kõiki teisi toas olevaid asju. Põlev lamp ja päike on alati nähtavad, nad kiirgavad enesest valgust, mispärast neid valgusallikateks hüütakse, eraldades neid sellega tumedatest kehadest, mis nähtavaks saavad ainult mõnelt valgusallikalt laenatud valguse abil. Tähtsamad valgusallikad on: päike, tähed, tulileek, hõõgav keha, elektrisäde jne.

§ 2. **Läbipaistvad ja läbipaistmatud kehad.** Kui silma ja valgusallika vahele asetada mõni keha, siis võib viimane kas valgust läbi lasta, või teda kinni pidada, olenedes sellest, missugusest ainest on nimetatud keha. Esimesel juhusel on keha läbipaistev ja silm näeb valgusallikat läbi tema; teisel juhusel on ta läbipaistmatu, nii et me keha taga valgust ei näe.

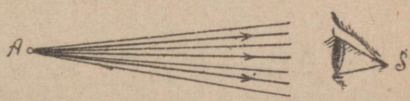
Mõisted „läbipaistev“ ja „läbipaistmatu“ on relatiivsed: klaas on, näituseks, üsna läbipaistev, kuna paber ainult vähe valgust läbi laseb. Pealegi oleneb ühe ja sellesama aine läbipaistvus keha paksusest. Ained, mis harilikult täiesti läbipaistmatud on, võivad üsna õhukeste kihtidena valgust läbi lasta ja sellega läbipaistvaks muutuda. Ümberpöördult, võib läbipaistev aine väga paksude kihtidena läbipaistmatu olla. Nii laseb üsna õhuke kulla kelme rohekat valgust läbi, kuna mere sügavuses täieline pimedus valitseb, ehk küll vesi läbipaistev on.

§ 3. **Valguse laiali lagunemine.** Asetame valgusallika A ja silma S (joon. 48) vahele kaks läbipaistmatut ekraani B ja C, milles väikesed augud b ja c. Ühele ja teisele poole nihutades mõlemaid ekraane, katsume läbi aukude näha valgusallikat A. Selgub, et see võimalik on ainult siis, kui mõlemad augud b ja c asuvad ühendusjoonel AS silma ja valgusallika vahel. Kust poolt küljest me ka ei vaataks valguseallika peale, ikka peavad mõlemad ekraanid nii seisma, et b ja c nimetatud sirgjoonel asuksid. Sellest järgneb, et **valgusallikast tulev valgus sirgjoonelistes sihtides igale poole laiali laguneb.** Neid laialilagunemise sihte hüütakse valguse kiirteks.



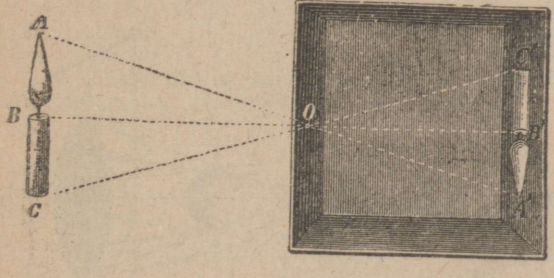
Joon. 48.

Kui päike läbi kitsa augu pimedasse tuppa paistab, siis võime iseäranis selgelt näha, et kiired sirgjoonelised on: õhus heljuvad tolmukübemed hakkavad valguskiirte tee peal kiirgama ja teevad niiviisi kiirte tee nähtavaks. Õieti ei ole meil siin aga tegemist üheainsa kiirega, vaid terve kiirte jaoga. Iga punktisarnane valgusallik saadab enesest välja hulga kiiri; teatud kogu nendest kujutab laiali minevat kiirtejuga (joon. 49). On valgusallik vaatlejast väga kaugel, siis võib kõigi silma tulevate kiirte peale kui paralleelsete peale vaadata. Niisugust paralleelset kiirtejuga kujutavad ülevalnimetatud päiksekiired pimedas toas. Iga üksik kiir on paralleelne joaga, ja nii siis sirgejooneline nagu jugagi.



Joon. 49.

§ 4. **Camera obscura.** Selle nimega tähendatakse kinnist kasti, mille eesseinas on väike auk O (joon. 50). Pöörates auguga seina mõne valgustatud asja poole, ilmub kasti tagaseinal asja ümberpöördud kujutus, mida vaadelda võib, kui tagaseina asemele mattklaas paigutada. See nähtus on seletatav ainult valguse sirgjoonelise laialilagunemisega; ta on seega uueks tõestuseks nimetatud väitele. Iga punkti valgustatud asja pinnal võib iseseisvaks punkti-



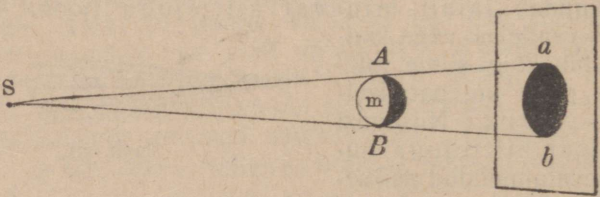
Joon. 50.

sarnaseks; valgusallikaks; — n. n. valgusepunktiks lugeda, millest kiired igale poole laialilagunevad. Punktist A väljatulnud kiirtest pääseb läbi augu O ainult üks kiir AA^1 kasti, sünnitades tagaseinal valgustäpi A^1, — vaadeldud asja punkti A kujutuse. Niisama tekib punkti B kujutus B^1 kiire BB^1 abil jne. Iga punkt valgustatud asja pinnal annab niiviisi ühe, ja ainult ühe valgustäpi kasti tagaseinal; kôik täpid kokku sünnitavad seal asja ümberpöördud kujutuse A^1 C^1.

Tähelepanemiseväärt on, et augu O kuju mingit môju ei avalda kujutuse peale. Tarvilik on ainult et auk küllalt väike oleks.

Päiksepaistel näeme puude varjus tihti ümarikke heledaid valgustäppe: päikse kiired satuvad maapinnale läbi kitsaste pilude lehtede vahel; nad annavad maapinnal, — niisama nagu camera obscura tagaseinal — enese allika kujutuse, s. t. päikse ümariku ketta, olgugi, et pilud ise kunagi ümarikud ei ole.

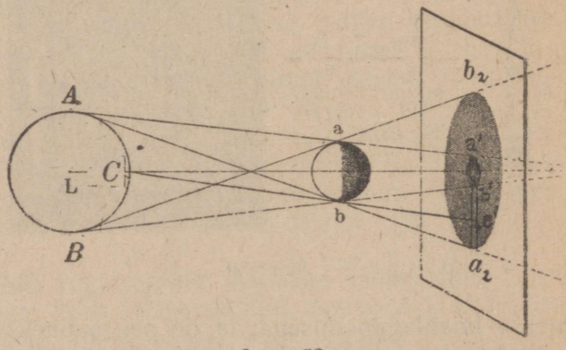
§ 5. **Vari ja poolvari.** Kni valguskiired langevad mônele läbipaistmatule kehale, siis ilmub ruumis selle keha taga pime juga, mida varjuks nimetatakse. Asetades varju piirkonda mône ekraani, saame viimse peal keha tumeda kujutuse,—tema varjupildi.



Joon. 51.

Kui valgusallik S (joon. 51) on niivôrd väike, et tema peale vaadata vôib kui valgusepunkti peale, siis on laiali minev kiirtejuga koonuse sarnane ja varjupilt ekraanil teravate piirjoontega; keha m riivavad kiired S A ja S B määravad ära varjupildi piirjoone ab mille sisse ei pääse mitte ükski kiir valgusallikast S. Varjupind peab sellepärast täiesti pime olema, teda hüütakse täisvarjuks.

Harilikult ei ole valgusallika pind mitte nii väike, et teda vôiks pidada punktisarnaseks. Siis muutub terve nähtus.



Joon. 52.

Kujutagu, näiteks kera AB (joon. 52.) valgusallikat, kera ab aga varju heitvat keha. Riivasjooned Aa ja Bb määravad ära varjukoonuse, mis ekraanil annab kera ab täisvarju a_1 b_1 ja millesse ei pääse ükski kiir valgusallikast AB.

Kuid ka täisvarju ümbritsev pind ei ole mitte täiesti valgustatud. Joonistusest 52 näeme, et punktist A välja tulevad kiired, mis riivavad keha ab alumist serva, satuvad ekraanil punkti a_2. Kôrgemal asuv piirkond b_1 a_2 ei saa nii siis mitte ühtegi kiirt punktist A, küll aga langevad sinna kôik kiired punktist B ja paljudest teistest valgusallika pinna osadest. Veel kõrgemal seisvasse piirkonda b_1 c_1 ei pääse peale kiirte, mis välja tulevad punktist A, ka need kiired mitte, mille allikaks on punkt C, ja teised punktid kera AB ülemisel poolel. See piirkond peab nii siis veel vähem valgust saama, kui c_1 a_2.

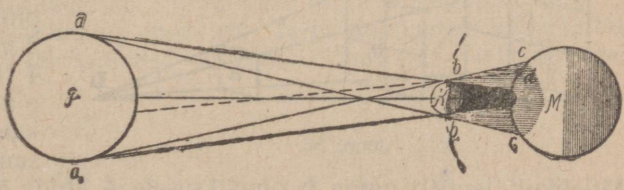
Sarnasel teel on hôlbus ära näha. et riba b_1 a_2 sihis ekraani pind seda tumedam peab olema, mida ligemale me jôuame täisvarju servale b_1. Alles allpool a_2 on ekraan täiesti valgustatud.

Kôik ülevalseletatu on muidugi teada maksev iga radiaalse sihi jaoks, mis tômmatud läbi täisvarju tsentrumi. Tôepoolest saame nii ümber täisvarju ab terve rôngakujulise kontsentrilise poolvarju a_2 b_2, mis ilma teravate piirjoonteta järkjärgult tumedamaks läheb varju keskkoha poole.

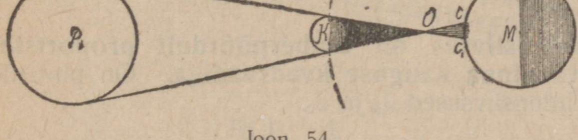
§ 6. **Päikse- ja kuuvarjutused.**

Maakera ja kuu on iseenesest tumedad kehad; nad saavad oma valguse päikselt. Nagu kôik läbipaistmatud kehad, nii annavad ka nemad varju. Nende varjudes sünnivad päikse- ja kuuvarjutused.

Kujutagu P, K ja M päikest, kuud ja maakera. Kui kuu oma teekonnal satub otse päikse ja maa vahele, siis langeb kuu poolt heidetud täisvari c-c_1 maakera pinnale. Varju piirkonda ei lange päikse kiired, sellepärast ei ole sealt päike ka mitte nähtav: sünnib päiksevarjutus, ja nimelt täieline. Poolvarju piirkonda pääsevad kiired ainult päiksepinna ühelt osalt. Sealt näeme siis ainult vastavat päikseosa. Vaadates näiteks punktist d, paistab meile ainult päikse ülemine pool, ja tekib osaline päiksevarjutus.



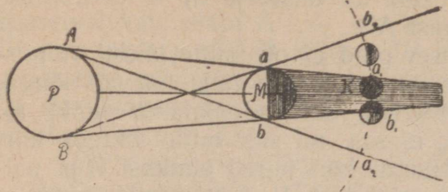
Joon. 53.



Joon. 54.

Juhtub maakera kuust nii kaugel olema, et täisvarju tipp O ei ulata maakerani (joon. 54), siis on võimalik ainult osaline varjutus, sest et piirkond cc_1 maapinnal ainult poolvarjus viibib.

Varju c-c_1 keskkohas seisev vaatleja näeb rôngasarnast päikseserva, kuna päikse keskkoht varjatud on. Sarnasel juhusel näeme rôngakujulist päiksevarjutust.

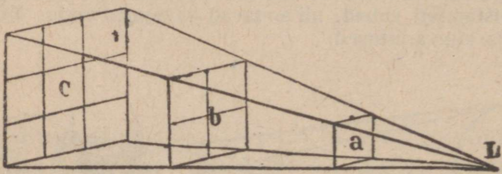


Joon 55.

Kuuvarjutus tekib siis, kui maakera satub päikse ja kuu vahele. On terve kuupind maakera täisvarju a_1-b_1 piirkonnas (joon. 55), siis sünnib täieline kuuvarjutus, vastasel korral ainult osaline kuuvarjutus. Poolvarjus a_1-b_2 ja b_1-a_2 kahaneb kuu valgus nii vähe, et mingisugust varjutust näha ei ole.

§ 7. **Valguse tugevus; valgustuse seadused.** 1) Tervet valguse hulka, mida valgusallik välja kiirgab, hüütakse viimase tugevuseks. Mône pinna pindüksusele langeva valguse hulka aga nimetatakse selle pinna valgustuse tugevuseks ehk intensiivsuseks. Esimese suuruse üle vôime otsustada teise kaudu, sest **ühesugustel tingimustel on valgustuse intensiivsus proportsionaalne valgusallika tugevusega.** Nii valgustavad näiteks 2 küünalt eemalseisvat pinda 2 korda heledamini kui sama koha peal seisev üksainus küünal, — 3 küünalt teevad seda 3 korda intensiivsemalt j. n. e.

2) Pinna valgustuse intensiivsus oleneb valgusallika kaugusest. Punktisarnasest valgusallikast L (joon. 56) laguneb valgus niiviisi laiali, et üks ja sama valguse hulk näiteks 1 mt. kaugusel pinda a valgustab, 2 mt. kaugusel aga 4 korda suuremat pinda b, ja 3 mt. kaugusel 9 korda suuremat pinda c.



Joon. 56.

Järjelikult langeb pinna b pindüksusele 4 korda vähem, pinna c üksusele 9 korda vähem valgust kui pinna a üksusele; teiste sônadega: kaks korda kaugemal seisva pinna (b) valgustuse intensiivsus on 4 korda väiksem, 3 korda kaugemal seisva pinna (c) valgustuse intensiivsus on 9 korda väiksem kui kaugusel 1 seisva pinna oma. Et 4 ja 9 on arvude 2 ja 3 kvadraadid, siis järgneb sellest seadus:

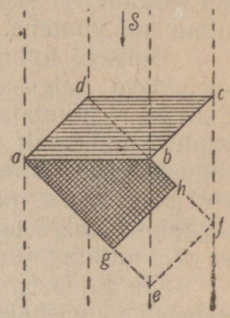
Valgustuse intensiivsus on ümberpöördult proportsionaalne valgustatava pinna kauguse kvadraadiga. On pinnade b ja c valgustuse intensiivsused J_b ja J_c

siis peab olema: $$\frac{J_c}{J_b} = \frac{Lb^2}{Lc^2}$$

3) Valgustuse intensiivsus oleneb ka sellest, missuguse nurga all kiired pinnale langevad. Paralleelne kiirtejuga S (joon. 57)

valgustab tasapinda abcd. Olgu valgustuse intensiivsus perpendikulaarselt seisva pinna abcd peal J, kaldu seisval pinnal aghd aga i. Nagu joonistusest 57 näha, jaguneb kogu kiirtejuga S ühtlaselt üle kaldpinna aefd, mis suurem on kui perpendikulaarpind abcd. Järjelikult on valguse hulk pindüksuse kohta, ehk valgustuse intensiivsus kaldpinnal nii mitu korda väiksem, kui mitu korda pind abcd on väiksem kui aefd,

s. t. $\frac{i}{J} = \frac{abcd}{aefd}$



Joon. 57.

Et aga pindade suurused proportsionaalsed on nende kõrgustega, siis on:

$$\frac{abcd}{aefd} = \frac{ab}{ae} = \frac{i}{J}$$

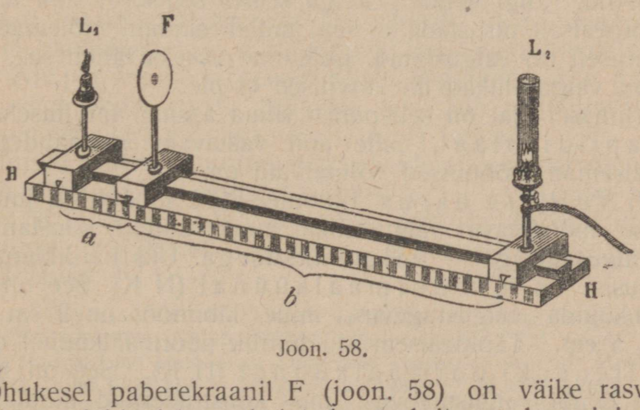
Kolmnurgast aeb leiame, et ab: ae $=$ *sin* aeb

s. t. $\frac{i}{J} = \frac{ab}{ae} = sin$ aeb, ehk i $=$ J *sin* aeb

Valgustuse intensiivsus on proportsionaalne selle nurga sinusega, mille all kiirtejuga langeb valgustatava pinna peale,

Perpendikulaarse pinna puhul on kiirte langemisnurk 90^0. s. t. *sin* $90^0 = 1$. Valgustuse intensiivsus on sellel juhusel kõige suurem, sest, et *sinus* kunagi suurem ei või olla kui 1. Pöörates järk-järgult pinda, väheneb ka i järk-järgult. Kui pinda asetada paralleelselt kiirte sihile, siis on nurk pinna ja kiirte vahel 0^0, *sin* $0^0 = 0$, ja i $=$ J. *sin* $0 = 0$, s. t. pind jääb täitsa pimedaks.

§ 8. **Fotomeetrid.** Fotomeeter on aparaat, mille abil võrrelda võib valgusallikate tugevust. Neid on olemas väga mitmesuguseid. Üks tähtsamatest on n. n. Bunseni fotomeeter.



Joon. 58.

Õhukesel paberekraanil F (joon. 58) on väike rasvaplekk. See koht on läbipaistvam kui teda ümbritsev ekraanipind. Kui valgustada sarnast ekraani tagant, siis paistab, eest vaadates rasvaplekk heledamana kui puhta paberi pind, sest et rasvane koht rohkem kiiri läbi ekraani meie silma laseb. Valgustades aga ekraani vaatleja poolt, paistab rasvaplekk tumedana heledal paberipinnal, sest et puhas paber vähem valguskiiri läbi laseb kui rasvane, ja sellepärast ka rohkem nendest tagasi heidab meie silma kui viimane.

Bunseni fotomeetri juures asetatakse kirjeldatud ekraan kahe vôrreldava valgusallika L_1 ja L_2 vahele ühisele alusele (joon. 58). Ekraani F nihutatakse piki alust nii kaua edasi-tagasi, kunni rasvaplekk môlemalt poolt vaadates üsna nägematuks muutub. Niisuguse seisu juures on ekraani môlemad pinnad ü h e v ô r r a v a l g u s t a t u d, näeme ju eest vaadates rasvapleki kaudu ekraani tagapinna valgustust, mis sel juhusel, kus plekk üleüldse nähtav ei ole, niisama suur peab olema, kui eespinna oma.

On S_1 ja S_2 vastavate allikate valguse tugevused (välja kiirgatavad valgushulgad), siis on eelpool leitud seaduse järele (§ 7_1) valgustuse intensiivsus ekraani pahemal pinnal $i_1 = \frac{S_1}{a^2}$, ja paremal pinnal $i_2 = \frac{S_2}{b^2}$. Praegusel juhusel on valgustusintensiivsus môlemal pool ühesuurune, s. t. $\frac{S_1}{a^2} = \frac{S_2}{b^2}$, millest järgneb, et $S_1 = S_2 \frac{a^2}{b^2}$. Kui on tuntud valgusallika L_2 tugevus, siis vôime fotomeetri abil leida allika L_1 tugevust, môôtes pikkusi a ja b.

Näide: olgu $L_2 = 80$ küünlavalgusline gaasilamp; b on mõõtmise järele 50 cm, a = 10 cm. Tundmata on valgusallika L_1 tugevus S_1. Eelpool leitud formuli järele on: $S_1 = S_2 \cdot \frac{a^2}{b^2} = 80 \cdot \left(\frac{10}{50}\right)^2 = 3,2$ k v.

Bunseni fotomeetri printsiibil pôhjeneb terve hulk teisi fotomeetrid. Kôigi nende peaviga seisab selles, et silm mitte küllalt täpipealselt otsustada ei saa, millal ekraani môlemad pooled ühesuuruselt on valgustatud. Iseäranis raskeks läheb see, kui vôrreldavad valgusallikad ühevärvilised ei ole.

Viimasel ajal on sellepärast silma asemel tarvitusele vôetud p ä e v a p i l d i p l a a t, mille abil vastavate aparaatidega palju täpipealsemad môôtmised vôimalikud on.

2) V a l g u s e ü k s u s. Fotomeeriliste môôtmiste juures vôrreldakse môôdetavat valgusallikat mône tuntud konstant suurusega valgusallikaga — v a l g u s ü k s u s e g a. Üks harilikumaist valgusüksusist on. n. n. n o r m a a l k ü ü n a l (N K). See on hariliku parafiinküünla valgustugevus, mille läbimôôt on 2 cm ja leegikôrgus 5 cm. Täpipealsem kui harilik noormaalküünal on H e f n e r-A l t e n e c k'i n o r m a a l k ü ü n a l (H K). See on niisuguse väikese lambi valgustugevus, mis konstrueeritud kindlate môôtude järele ja mille leek väga ühtlasena hoidub. Üks Hefnerküünal = I H K = umbes $\frac{5}{6}$ normaalküünla valgusest.

Et ettekujutust saada valgusüksuste suuruse üle, olgu siin nimetatud, et keskmine petroleumilamp umbes 8—10 H K annab. Elektri hõõglamp on harilikult 10—50 HK, gaasi hõõglamp 50—70 HK.

Peatükk II.

Peegeldumine.

§ 9. **Peegeldumine.** Kui valguskiired langevad mône keha peale, siis jagunevad nad harilikult kolme ossa: üks jagu kiiri pôrkub keha pinnalt tagasi, teine jagu tungib keha sisse ja hävineb seal, kolmas jagu pääseb läbi keha, muutes ainult oma sihti.

Kui kiirte tagasiheitmine sünnib täitsa siledalt (poleeritud) pinnalt, siis nimetame seda nähtust peegeldumiseks, tagasi heidetud kiiri peegeldatuiks, ja niisugust pinda — peegelpinnaks. Peegeldumise juures pôrkuvad kiired peegelpinnalt seadusepäralises kindlas sihis. Nii jääb, näiteks, paralleelne kiirtejuga ka pärast peegeldamist paralleelseks, mille tôttu meile peegelpind tumedaks vôi koguni nägematuks jääb, kui meie silm mitte otse peegeldatud valgusjoa sihil ei asu, olgugi et niisugusele pinnale tôepoolest valgust langeb ja ta nii siis valgustatud on.

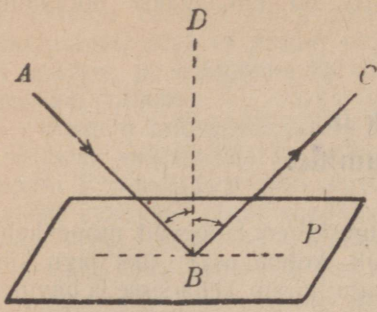
§ 10. **Peegeldatud ja hajutud valgus.** Mitte ainult peeglid ei heida tagasi valgust, vaid seda teevad enam või vähem ka tuhmi pinnaga kehad. Viimastelt põrkuvad üksikud valguskiired väga mitmesugustes sihtides tagasi, nii et kogu peegeldatud valgusel korralikku ja ühtlast sihti ei ole, — ta laguneb vastavalt pinnalt igale poole laiali. Valge paberi pind paistab meile, näiteks, ikka heledana, olenemata sellest, kust poolt me tema peale vaatame.

Nagu nimetatud sai, on hea peegli pind peaaegu üsna tume, kui vaatlemise siht mitte ühte ei lange tagasiheidetud kiirte sihiga. Nii pea aga kui peegli peale raputada vähe tolmu, — muutes seega tema pinda tuhmiks, siis saab ta nähtavaks igas sihis, kuna ta nüüd kiiri igas sihis tagasi heidab.

Tuhmilt pinnalt korratult tagasiheidetud valgust nimetatakse hajutud valguseks; vastavat nähtust aga — valguse hajutamiseks. Kõik asjad, mida me võõra valgusallika abil igas sihis näha võime, hajutavad valgust, — ainult selle tõttu ongi nad meile nähtavad. —

Peegeldamise ja hajutamise vôimsus on isesugune iga aine ja iga pinna juures. Üks aine heidab rohkem valgust tagasi, kui teine; sile pind peegeldab suurema jao tema peale langevaist kiirtest ja hajutab ainult väikse osa nendest, tuhm pind aga ei peegelda üleüldse, — ta vôib ainult hajutada. Näiteks peegeldab hästi poleeritud hôbeda pind $\frac{3}{4}$ tema peale langevatest kiirtest, valge paber hajutab suurema jao nendest, kuna must paber või nõgine pind peaaegu kôik kiired kinni peab ja üleüldse neid tagasi ei heida.

§ 11. **Peegeldumise seadused.** Kui valguskiir A (joon 59) peeglile langeb, siis põrkub ta tema pinnalt tagasi, muutes järsku oma sihti. Seda kohta B, kus tagasipõrkamine sünnib nimetatakse langemispunktiks. Kui langemispunktist püstitada normaal BD peegli pinnale, siis kujutab nurk ABD langemisnurka, nurk CBD aga peegeldusnurka.



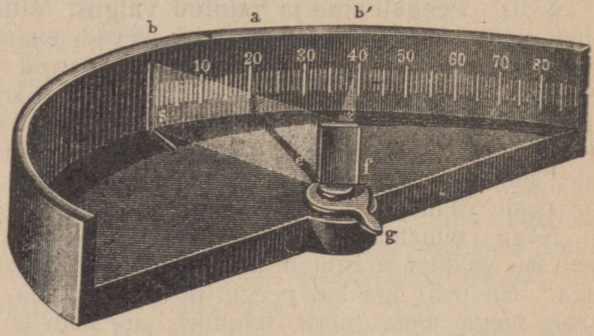
Joon. 59.

Katsed näitavad, et peegeldumine alati järgmiste seaduste järele sünnib:

1) **Langemisnurk võrdub peegeldusnurgaga.**

2) **Langev ja peegeldatud kiir asuvad ühel tasapinnal, mis läheb läbi langemispunktist püstitatud peegelpinna normaali** (joon. 59).

Mõlemaid seadusi võib tõestada n.n. peegeldusaparaadi abil (joon. 60). Poolsilindrit kujutava madala kasti seinale on märgitud nurgaskaala, mille abil mõõta võib silindri kahe raadiusega piiratud nurka. Silindri keskkohas seisab pööratav püsttelg, mille peal väike püstpeegel f asub. Perpendikulaarselt peegli pinnale on telje külge kinnitatud peenike nôel c, mille ots ulatab kunni nurgaskaalani kasti seinal. Ta kujutab niiviisi normaali peegli f pinnale.

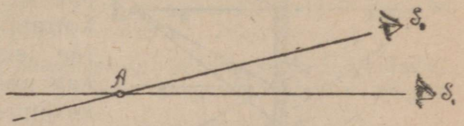


Joon. 60.

Kui läbi pilu Sb juhtida paralleelne kiirtejuga peegli f keskkohta, siis peegeldub ta kasti seinal asuva skaala peale (fb¹). Lugedes nurgakraadide arvu pilu (b) ja nôela otsa (a) vahel, leiame langemisnurga suuruse kraadides. Niisama vôime peegeldusnurga suurust ära määrata skaalakraadide arvuga, mis piiratud on nôelaotsa (a) ja peegeldatud kiirte poolt sünnitatud valgustäpiga (b¹). Vôrreldes leituid arve, näeme et nad vôrdsed on. Kuidas me ka ei pööraks peeglit tema püsttelje ümber, — môlemad nurgad jäävad alati vôrdseteks.

Seesama katse näitab ka, et nii langeva, kui ka peegeldatud kiirtejoa alumine serv paralleelne on kasti pôhjale, s. t. perpendikulaarne peegli pinnale, millest hôlbus on ära näha, et môlemad kiired ühel tasapinnal peavad asuma langemispunktist püstitatud peegelpinna normaaliga.

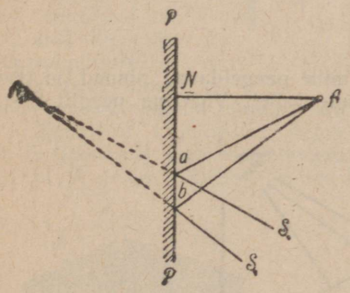
§ 12. **Tasapinnalised peeglid.** 1) Valgusallikat näeb meie silm alati temasse langeva kiire sihis. Vaadeldes näiteks valgusepunkti A (joon. 61) üheainsa silmaga S_1, näeme küll missuguses sihis (S_1 A) asub valguspunkt, ei saa aga tema kaugusest mingisugust ettekujutust. Kui vaadelda sedasama punkti A teise silmaga S_2, siis paistab ta meile uues sihis S_2A. Môlemad sihid ei ole paralleelsed, vaid nad lôikuvad valguspunktis A. Vaadeldes korraga môlema silmaga, näeb iga silm ühte ja sedasama punkti isesuguses sihis; môlema sihi lôikepunktis näemegi vaadeldud valgusepunkti ruumis. — Et kiired AS_1, ja AS_2 kujutavad laialiminevat kiirtejuga, siis järgneb sellest seadus:



Joon. 61.

Me näeme valgusallikat alati sealkohal, kuhu kokku jookseb temast välja kiirgatud laiali minev kiirtejuga.

2) Ka siis, kui meie silma môni peegeldatud kiir langeb, otsime valgusallikat ikkagi selle kiire sihis. Joonistusel 62 olgu PP peegli pind ja A valgusepunkt. Kiir Aa peegeldub ja langeb silma sihis aS_1, Meile paistab, et valgusepunkt kuskil peegli taga sihis S_1a seisab. Môni teine kiir Ab langeb silma peegeldatud sihis bS_2. Ka selles sihis otsib silm valgusepunkti A, ja näeb teda nii siis peegli taga seal, kus sihid aS_1, ja bS_2 lôikuvad. Seda punkti (A_1) hüütakse valgusepunkti A peegelpildiks.

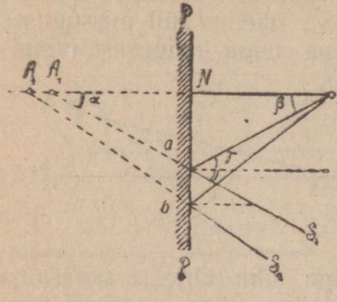


Joon. 62.

Tôepoolest ei ole punkti A_1 üleüldse olemas, meie ei saa teda, näiteks, valgustäpina paberile heita, ei ka mingil teisel teel kinni püüda: ta on ainult punkti A paistev, s. t. imaginaar- ehk ebakujutus. Kui peegli ees môni asi seisab, siis vôime ülevalkirjeldatud teel hôlpsasti leida terve asja peegelpildi. Selleks on ainult tarvis asja pinna peale vaadata kui terve hulga valgusepunktide peale, millest igaüks annab vastava ebakujutuse peegli taga. Kôik need imaginaarsed kujutused kokku loovad asja enese peegelpildi, mis on niisama imaginaarne, nagu üksikute punktide omadki.

Katsetest järgneb, **et peegelpilt ühesuurune on asjaga ja et ta niikaugel peegli taga ilmub, kui kaugel asi ise peegli ees seisab.** Et näiteks leida punkti A peegelpilti, peame läbi A tômbama normaali peegelpinnale, ja teda peegli taha AN vôrra pikendama.

Nimetatud seaduse tôestamiseks kujutagu PP (joon. 63) peegelpinda ja A valgusepunkti. Peegeldatud kiir aS_1, lôigaku peegelpinna normaali AN pikendust punktis A_1. Kolmnurgad NAa ja NA_1a on kongruentsed, sest et neil ühine külg aN on,



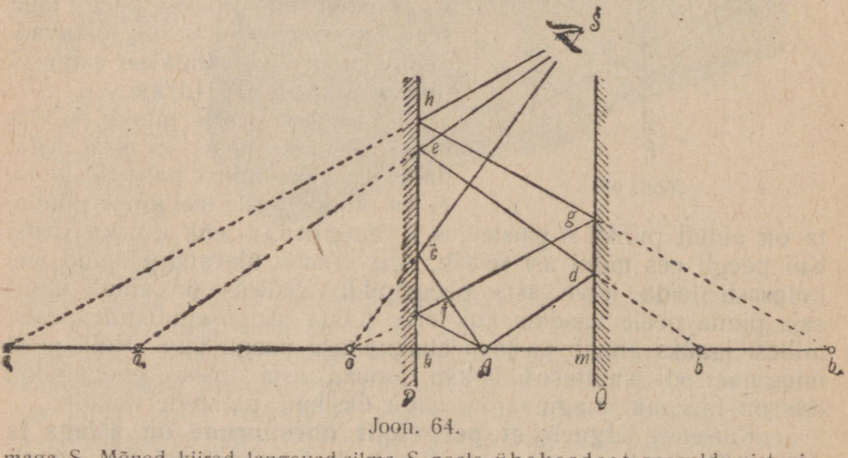
Joon. 63.

ja nurk ANa $=$ $aNA_1 = 90^0$. Peale selle on $\angle\alpha = \angle\gamma$ ja $\angle\beta = \angle\gamma$, s. t. $\angle\alpha = \angle\beta$. Sellest järgneb, et AN $=$ NA_1. Sedasama arutust vôib korrata iga peegeldatud kiire jaoks. Me leiame näiteks, et kiir S_2b lôikab normaali AN mingis punktis A_2, kusjuures jällegi peab olema $NA_2 = NA = NA_1$. Kui aga A ja A_2 seisavad ühekaugusel peegli pinna taga, siis langevad nad ühte.

Sellest järgneb, **et kõik punktist A väljatulevad kiired peegelduvad nii, et nende peegeldatud sihid kokku jooksevad ühte punkti peegli taha.** Selles punktis näemegi valgusepunkti A kujutust (§ 12). Kujutus asub normaalil AN niisama kaugel peegli taga kui kaugel punkt A seisab peegli ees. Et vastavad asja ja kujutuse punktid peegelpinna normaalidel asuvad, siis on peegelpilt ja peegeldatud asi ühesuurused ja seisavad sümmeetriliselt peegelpinnale.

§ 13. Paralleelsed peeglid.

Olgu P ja Q (joon. 64) kaks peeglit, mille peegeldavad pinnad on pööratud üksteise vastu. A on valgusepunkt nende vahel. Vaatame peeglit P sil-



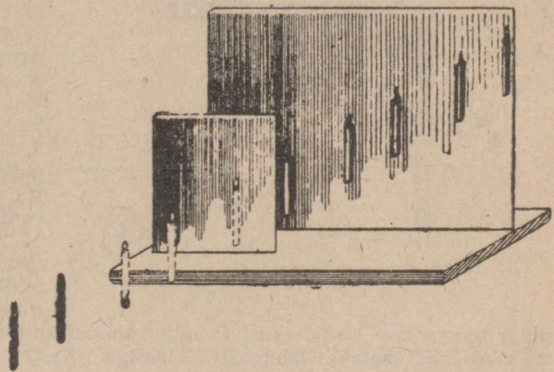
Joon. 64.

maga S. Mõned kiired langevad silma S peale ühekordset peegeldumist pinnal P. Nii satub kiir Ac peale peegeldumist silma sihis cS, andes hariliku peegelpildi punktis a peegli taga, kaugusel ak $=$ kA. Mõni teine kiir satub silma alles peale kahekordset peegeldumist: kiir Ad näiteks peegeldub kõige pealt peeglis Q ja annab hariliku peegelpildi punktis b, kusjuures jällegi Am $=$ mb. Peegeldatud kiir de ei pääse aga veel mitte silma, vaid langeb peegli P peale, nii nagu tuleks ta välja kujutusest b. Viimane peegeldub omakorda peeglis P, andes uue peegelpildi a_1 kiire eS sihis peegli P taga. Vaatleja näeb siis ainult punkti A teist peegelpilti a_1, kusjuures hariliku seaduse järgi $a_1k = kb$, peegeldub ja praegusel juhusel punkt b peeglis P.

Kolmas kiir Af langeb küll otsekohe peeglile P ja annab A peegelpildi a. Peegeldatult langeb ta aga sihis fg peeglile Q, kust ta omakorda tagasi heitub sihis gh. Selles sihis näeksime punkti a peegelpilti b_1 (nii et $b_1m = ma$). Et aga võimalik ei ole sihis hg otsekohe vaadata, siis näeme ainult punkti b_1 peegelpilti peeglis P: kiir hg langeb peale peegeldumist vastu P sihis h S meie silma, nii et me lõpulikult peegelpilti a_2 näeme.

On veel kiiri, mis enne silma langemist 4, 5 ja enam korda peegelduvad. Nad annavad rea punkti A peegelpilte, mis seda kaugemal seisavad peeglite taga, mida rohkem kordi nad peegeldusid.

Üleüldse näeb vaatleja S lõpmatu palju reas seisvaid valgustäppe (joon. 65), mis kõik läbi A tõmmatud peegelpindade normaalil asuvad. Kaugemad täpid on tumedamad kui lähemad, mis arusaadav on, kui silmas pidada, et kaugemal seisvad kujutused sündinud on kiirte abil, mis palju kordi peegeldusid, ja et iga peegelduse juures üks osa valgust kaduma läheb.



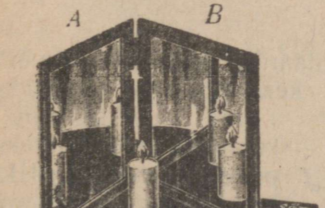
Joon. 65.

Eelmisest kirjeldusest järgneb peegelpiltide lihtne konstrueerimisviis: Läbi A (joon. 64) tõmbame normaali peeglipindadele ja leiame tema peal punkti a, nii et ak = kA. Niisama võime leida:

punkti b_1, kui am = mb_1;
„ a_2, „ $a_2k = kb_1$ jne.

Vastavalt leiame rea punkte, algades peegliga Q, — ja nimelt:

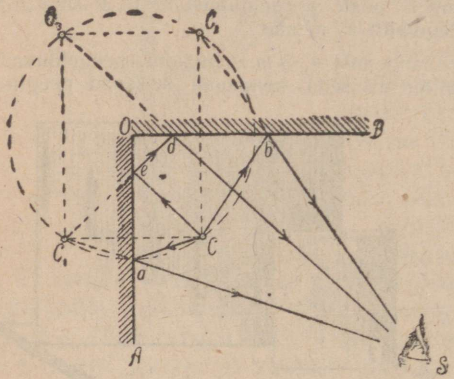
punkti b, kui mb = mA;
„ a_1 „ $a_1k = kb$ jne.



Joon. 66.

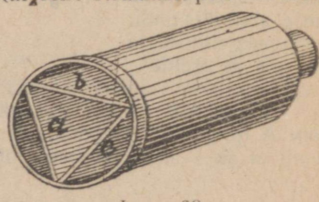
§ 14. **Nurkpeeglid.** Tasapinnalisi peeglid, mille pinnad kokku jooksevad, moodustades kahetahulist nurka, hüütakse nurkpeegliteks (joon. 66). Peeglite vahel seisvast asjast (näiteks küünlast) näeme hulga kujutusi, mis ühes asja enesega ringjoonel seisavad, mille tsentrumiks on peegelpindade lõikepunkt. Pöörates peeglit B ümber pindade lõikejoont, leiame, et kujutuste arv oleneb nurga suurusest peeglite vahel. Kui alusel ära märgitud nurgakraadidega mõõta peeglite nurga suurust ja samal ajal ära lugeda kujutuste arvu, siis selgub, et 90° juures 3 kujutust, 60° juures 5, 45° juures 7 j. n. e. kujutust ilmuvad. Üleüldse on seega kujutuste arv $a = \frac{360^0}{n^0} - 1$, kus n^0 tähendab peeglite nurga suurust kraadides.

Joonistus 67 kujutab kiirte käiku 90_5 all seisvate nurkpeeglite juures: kujutused C_1 ja C_2 on punkti C harilikud peegelpildid peeglites A ja B, mille seisu ära määravad üks kord peegeldatud kiired CaS ja CbS. C_3 tekib selle tõttu, et kiir Ce alguses peeglis A peegeldub, sealt sihis ed peeglile B langeb ja siis alles sihis dS silma satub. Silm näeb kolmandat kujutust punktis C_3, kus kõik 2 korda peegeldatud kiired lõikuvad. Kui nurka AOB väiksemaks teha, siis võivad kiired ka 3, 4, 5 jne. korda peegelduda, mille tagajärjel vastavalt neljas, viies ja kuues peegelpilt endistele juure ilmub.



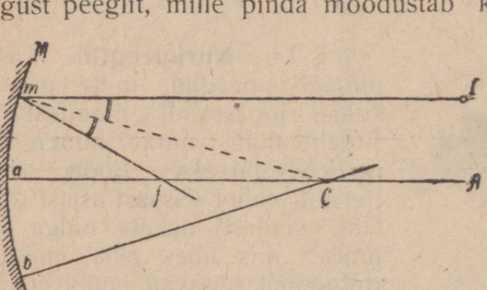
Joon. 67.

2) Kaleidoskoop on aparaat, mis koos seisab kolmest piklikust peeglist a, b ja c (joon. 68), mis mahutatud on ühise torusarnase kesta sisse. Peeglite pinnad kujutavad kolmtahkset prismat, mille ots abc kaetakse läbipaistva klaasiga. Kui selle otsaklaasi peale asetada mitmevärvilisi klaasitükke ja siis teisest otsast vastu valgust torru vaadata, siis peegelduvad klaasitükikesed kõigis kolmes peeglis, nii nagu seda nägime nurkpeeglite juures. Vaatleja näeb suurt hulka värvilisi klaasitükke, mis ringjoonte peale korraldatud on geomeetriliste kujudena. Pöörates aparaati, langevad klaasitükid uutesse seisukohtadesse, ja annavad ikka uusi ja uusi pilte.



Joon. 68.

§ 15. **Sfäärilised peeglid.** 1) Sfääriliseks nimetatakse niisugust peeglit, mille pinda moodustab kerapind. On peegeldav pind õõnes sisemine kerapind, siis hüütakse peeglit õ õ n e s p e e g l i k s, kujutab ta aga välimist kumerat kerapinda, siis nimetatakse vastavat peeglit k u m e r p e e g l i k s.



Joon. 69.

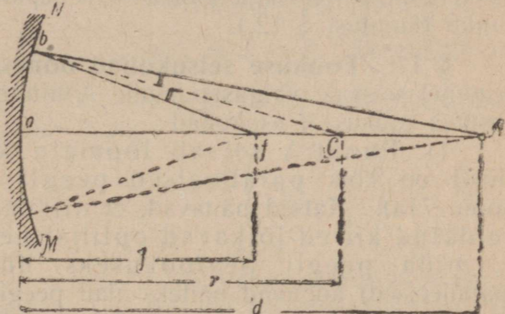
Joonistusel 69 on õõnespeegel MN, mille kerapinna tsentrum on C. Viimast punkti nimetatakse p e e g l i t s e n t r u m i k s ehk tema k õ v e r u s t s e n t r u m i k s. Peegli enese ulatust MN hüütakse tihti ka peegli avauseks. Harilikult on avaus väga väike, vôrdlemisi peegli kôverusraadiusega aC. Sirgjoon ACa läbi peegli keskkoha a ja tema tsentrumi C kujutab peegli optilist peatelge. Jga teist, läbi C tômmatud sihti (näiteks Cb) hüütakse optiliseks abiteljeks.

2) Geomeetriast on teada, et väikest kerapinnaosakest ümber punkti m (joon. 69) tasapinnaks vôib pidada, mis perpendikulaarne on punkti m tômmatud raadiusele Cm. Tasapinnalt aga peegeldub punkti m langev kiir Lm nii, et langemisnurk LmC vôrdub peegeldusnurgaga Cmf, ja et kiired Lm ja mf ühes noormaaliga mC ühel tasapinnal asuvad, — praegusel juhusel näiteks, paberi pinnal.

Et leida mingi kiire sihti peale peegeldumist sfääriliselt peeglilt, on ainult tarvis langemispunktist tômmata sirgjoon nii, et ta asuks ühel tasapinnal langeva kiire ja vastava peegliraadiusega ja et nurk sirgjoone ja raadiuse vahel vôrduks langemisnurgaga.

§ 16, **Õõnespeegli formul.** Olgu A môni valgusepunkt peegli optilisel peateljel (joon. 70). Kiir Ab peegeldub sihis bf nii, et nurk AbC vôrdub nurgaga Cbf; s. t. kolmnurgas Abf jaotab bC nurga Abf pooleks. Geomeetria ôpetab, et sarnasel puhul on:

$$\frac{fC}{CA} = \frac{bf}{bA}.$$



Joon. 70.

Nimetame lühidalt aA = d, af = f ja aC = r. Tähele pannes, et fC = r — f ja CA = d — r, vôime leitud proportsioonile anda järgmise kuju: $\frac{r-f}{d-r} = \frac{bf}{bA}$;

Kui vaadelda ainult niisuguseid peeglid, mille avaus on väike vôrdlemisi peegliraadiusega, siis asub langemispunkt (b) alati vôrdlemisi lähedal peegli keskkohale (a), — meil on siis tegemist ainult n. n. tsentralsete kiirtega. Nende juures aga vôib lugeda, et bf = af = f ja bA = aA = d, vähemalt ei ole selle juures tehtud viga praktiliselt tuntav. Sel puhul vôime kirjutada: $\frac{r-f}{d-r} = \frac{f}{d}$, kust järgneb et

$$dr + fr = 2fd \qquad 1)$$

Samale vôrrandile vôime anda järgmise kuju

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{2}{r}; \qquad 2)$$

Leitud 2 vôrrandit võimaldavad leida peegeldatud kiire ja optilise peatelje lôikepunkti kaugust $fa = f$ peeglist, kui tuntud on peegliraadius r ja valgusepunkti kaugus d: vôrrandist (1) järgneb, et

$$f = \frac{rd}{2d - r} \qquad 3)$$

See formul näitab, et fookuskaugus f oleneb ainult valgusepunkti kaugusest $aA = d$ ja peegli raadiusest $aC = r$. Sellepärast jääb suurus f üheks ja samaks kôigi kiirte jaoks, mis välja tulevad punktist A, on ju kôigi nende juures tähtedel d ja r ühesuurune arvuline tähendus. Kui aga kôik kiired peale peegeldumist lôikavad optilist peatelge ühekaugusel peeglist, siis ei tähenda see muud, kui et kôigi nende sihid kokku jooksevad ühisesse lôikepunkti.

Optilisel peateljel asuvast valgusepunktist väljaminevad tsentraalsed kiired lôikavad peatelge peale peegeldumist ühes ja samas punktis (f), mida hüütakse kiirte fookuseks. Fookuse kaugust peeglist nimetatakse fookuskauguseks. Fookuse taga asuvale silmale paistab, nagu tuleksid kôik kiired välja fookusest, sellepärast näeb ta seal valguse punkti (kujutust § 12_1).

§ 17. **Fookuse seisukohad õõnespeeglil.** Anname optilisel peateljel seisvale valgusepunktile A mitmesugused seisud, ja leiame vastava fookuse f asukohad:

1) Punkt A seisab lôpmatu kaugel; temast tulevad kiired on kôik paralleelsed peegli optilisele peateljele (joon. 71a). Katsed näitavad, et niisugusel puhul kôik peegeldatud kiired lôikavad optilist peatelge ühes punktis F, mida peegli peafookuseks hüütakse. Päikse kiired (paralleelsed) koguvad näiteks alali peegli peafookusse, kus selle tôttu terve kiirtes peituv energia koondub; paigutades peafookusse kergesti pôleva aine, vôime teda seal hôlpsasti kiirte abil pôlema süütada. Peafookuskaugust vôime môôta väikse ekraani abil, mida peegli ees aegamööda edasi-tagasi nihutatakse Teataval kaugusel on ekraanile ilmuv valgustäpp kôige väiksem ja kôige heledam, — see ekraanikaugus kujutabki otsitud peafookuse kaugust (F) peeglist. Meie leiame nii, et **peafookuskaugus F võrdub peegli $^1/_2$ kõverus-raadiusega (r).**

Õônespeegli formulit vôime kujutada järgmiselt:

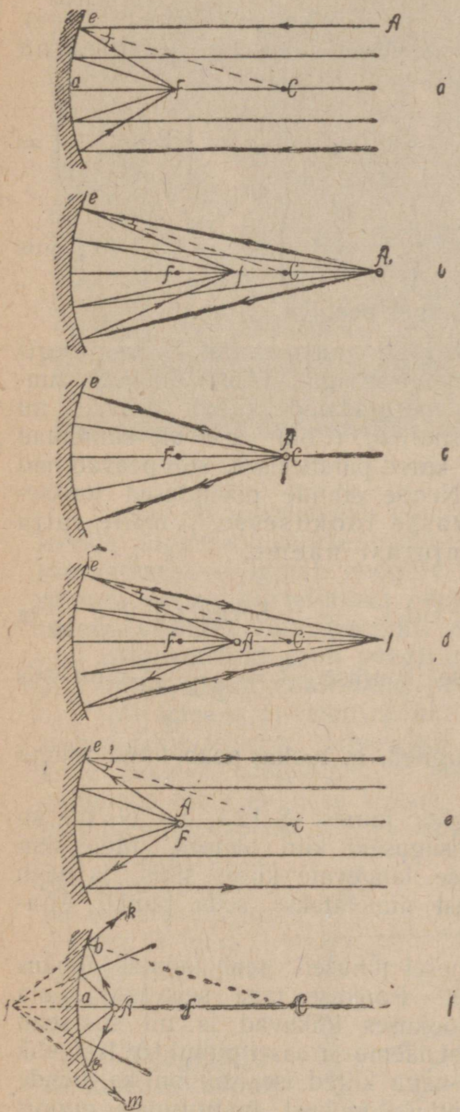
$$f = \frac{rd}{2d - r} = \frac{rd}{d} : \frac{2d - r}{d} = r : \left(2 - \frac{r}{d}\right) = \frac{r}{2 - \frac{r}{d}} \qquad 4)$$

Käsitatud juhusel on $d = \infty$, nii siis $\frac{r}{d} = 0$, ja

$$f = F = \frac{r}{2} \qquad 5)$$

Kui silmas pidada, et $F = \frac{r}{2}$, vôime vôrrandile (2) järgmise käepärasema kuju anda:

$$\frac{1}{f} + \frac{1}{d} = \frac{1}{F} \qquad 2a)$$



Joon. 71.

Et F antud peegli jaoks konstant on, siis vôib selle vôrrandi abil väljaarvata f, kui tuntud on d.

2) Valgusepunkt A läheneb peeglile (joon. 71b) Langemisnurk AeC väheneb vôrdlemisi esimese juhusega, järjelikult väheneb ka peegeldusnurk Cef. Fookus f seisab F ja C vahel.

Formulis (4) on murd $\frac{r}{d} < 1$, sest et $r < d$. Järjelikult on $2 > \left(2 - \frac{r}{d}\right) > 1$, mille tôttu:

$$r > \left(\frac{r}{2 - \frac{r}{d}}\right) > \frac{r}{2}$$

ja $r > f > F$.

3) Valgusepunkt A asub peegli kôverustsentrumis C (joon. 71 c.). Et kôik kiired perpendikulaarselt peegli pinnale langevad, siis peegelduvad nad otse vastupidises sihis tagasi (nii langemis-, kui ka peegeldusenurk on 0). Peegeldatud kiirte lôikepunkt (fookus) langeb ühte valgusepunktiga A; fookuskaugus $f = r$.

Et $d = r$, siis on

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

4) Valgusepunkt A asub peeglitsentrumi C ja peafookuse F vahel (joon. 71d).

Langemis- ja peegeldusnurkade AeC ja Cef vôrdsusest järgneb, et fookus f paremale tsentrumist C asub.

Formulis (4) on $d < r$, nii et $\frac{r}{d} > 1$, ja $\left(2 - \frac{r}{d}\right) < 1$.

Järjelikult on $f = \frac{r}{2 - \frac{r}{d}} > r$

5) Valgusepunkt asub peafookuses F (joon. 71 e). Kiirte siht on otse vastupidine esimesele juhusele; peegldatud kiired on paralleelsed optilisele peateljele.

Formulis (4) on $d = F = \frac{r}{2}$; siis on $2 - \frac{r}{d} = \left(2 - \frac{r}{\frac{r}{2}}\right) =$

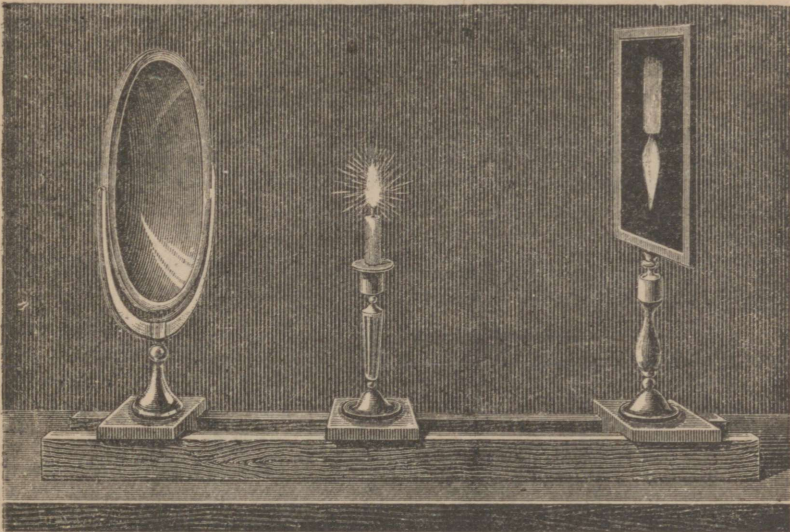
$(2 - 2) = 0$; järjelikult on $f = \left(\frac{r}{2 - \frac{r}{d}}\right) = \frac{r}{0} = \infty$, mis tähendab, et fookus lôpmatu kaugel peeglist seisab.

6) Valgusepunkt A seisab peafookuse F ja peegli enese vahel (joon. 71 f). Langemisnurgad (AbC) on veel suuremad kui eelmisel juhusel; peegeldatud kiired peavad nii sihitud olema, et ka peegeldusnurgad (Cbk) vastavalt suuremad oleksid. Seal olid peegeldatud kiired paralleelsed, siin peavad nad siis laialiminevad olema. Nende sihtide pikendused jooksevad kokku peegli taga seisvasse fookusesse f, mille tôttu meie seal valgusepunkti kujutust näeme.

Formulis (4) on $d < F$, s. t. $d < \frac{r}{2}$. Seega on $2 < \frac{r}{d}$ ja $\left(2 - \frac{r}{d}\right) < 0$ annabnegatiivse suuruse. $f = \frac{r}{2 - \frac{r}{d}}$ on siis niisama negatiivne, millest järgneb, et fookus peab nüüd asuma teisel pool peeglit.

Nagu tasapinnaliste peeglite juures (§ 12.), nii ei ole ka siin punktis f tôepoolest mingisuguseid kiiri olemas. Meie silm otsib valgusallikat alati temasse langevate kiirte sihis, ja näeb teda siis punktis f. Sellepärast nimetatakse seda punkti ebafookuseks.

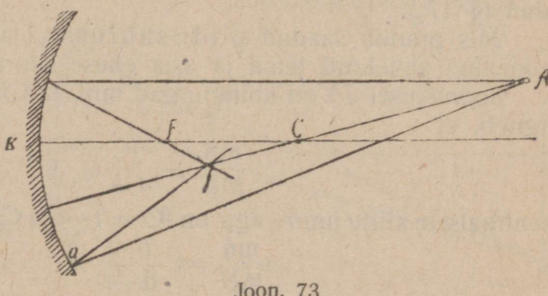
Teisiti oli lugu viiel esimesel juhusel: seal kujutas fookus alati kiirte eneste lôikepunkti. Fookuse taga seisvasse silma langevad kiired, mis tôeliselt fookuses lôikuvad ja nii siis sealt tôeliselt välja tulevad; sellepärast näeme sarnasel puhul tôelist ehk reaalset kujutust. Niisama nagu kiired ise, nii on ka nende sünnitatud valgusepunkti kujutus fookust ümbritsevas ruumis tôeliselt olemas. Selle tôestuseks on ainult tarvis fookusesse paigutada mõni ekraan c (joon. 72), mille peal siis valgusallika (b) kujutus ilmub. (Joonistusel 72 vastab valguspunkti (küünla) seisukoht neljandale juhusele.)



Joon. 72.

Kõiki ülevalseletatud võimalusi kokkuvõttes võime formuleerida järgmise üleüldise seaduse: **Kui valgusepunkt — tulles lõpmatusest — ligineb peeglile kunni tema peafookuseni, siis nihkub vastav kiirtefookus peegli peafookusest kunni lõpmatuseni, kohates valgusepunkti peegli kõverustsentrumis. Kui aga valgusepunkt asub peegli enese ja tema peafookuse vahel, siis ilmub ainult ebafookus, ja nimelt peegli taga.**

Me näeme, et valgusepunkt ja tema kujutus (fookus) on nagu seotud teine teisega: niipea kui esimene peeglile ligineb, nihkub teine peeglist kaugemale, ja ümberpöördult. Kui valgusepunkt paigutada tema kujutuse kohale, siis ilmub uus kujutus valgusepunkti endises kohas. Niiviisi seotud punkte nimetatakse r a k e n d a t u d   p u n k t i d e k s. Õõnespeegli juures on nii siis valgusallik ja tema kujutus rakendatud punktid.



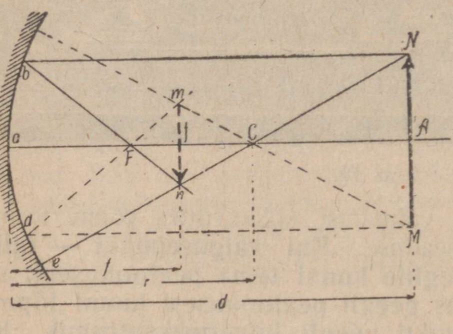
Joon. 73.

§ 18. **Peegelpiltide konstruktsioon õõnespeeglite juures.** 1) Kõik sennised arutused käisid ainult optilisel peateljel asuva valgusepunkti kohta. Sisuliselt vôime aga ka iga abitelje AC (joon. 73) kui peatelje peale vaadata, mis küll peegli keskkohta (k) ei lähe, kuid mida näiteks peegli suurendamisega alumise ääre sihis igal ajal tôeliseks peateljeks vôib muuta, ilma et kiirte peegeldumine selle läbi kudagi muutuks. On kerge tôestada, et ka abiteljel asuva valgusepunkti jaoks maksvaks jääb eelpool leitud ôônespeegli formul, ja et temast väljatulevad kiired Aa ja AC lôikuma peavad samal abiteljel seisvas fookuses f.

2). Ôônespeegli ees seisva asja pildi saame, kui me asja pinna iga punkti kujutuse ehk fookuse leiame. Peegelpildi seis ja suurus oleneb aga asja seisust, sellepärast käsitame allpool 4 iseloomulikku juhust:

I. Kujutatav asi seisab peegli kôverustsentrumi C taga (joon. 74):

Asja MN pinnal seisva punkti N kujutus ehk fookus asub seal, kus kaks temast väljaminevat kiirt lôikuvad, jooksevad ju kôik punktist N väljaminevad kiired nimetatud fookusesse kokku (§ 16). Abitelge NCe mööda minev kiir langeb perpendikulaarselt peeglile ja peegeldub sellepärast samas sihis. Paralleelne peateljele kiir Nb peegeldub läbi peafookuse F sihis bF. Môlemad peegeldatud kiired lôikuvad punktis n, kus siis ka punkti N kujutus peab seisma. Sarnaselt leiame kiirte Md ja MC abil punkti M kujutuse m jne.



Joon. 74.

Kôik leitud fookused kokku moodustavad asja MN peegelpildi mn, mida sinna paigutatud väikese ekraani peale vôib heita. Kiirte käigust selgub, et käsitatud juhusel peegelpilt vähendatud ja ümberpöördud tôeline ehk reaalne kujutus peab olema. Ta ilmub peafookuse F ja peeglitsentrumi C vahel (§ 17_2).

Mis puutub saadud pildi suurusse, siis on vôimalik leida täpipealne vahekord tema ja asja enese suuruse vahel.

Joonistusel 74 on kolmnurgad mnC ja CMN sarnased. Sellest järgneb, et

$$\frac{mn}{MN} = \frac{fC}{CA};$$

Tsentraalsete kiirte juures aga on fC = r—f ja CA = d—r, tähendab:

$$\frac{mn}{MN} = \frac{r-f}{d-r};$$

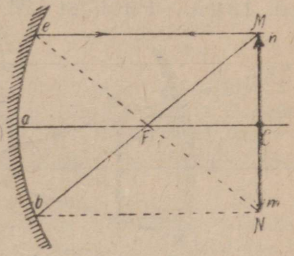
Vôrrandist (1) leiame, et $r = \frac{2fd}{d+f}$; seades selle eelmisse formulisse tähe r asemele saame:

$$\frac{mn}{MN} = \frac{r-f}{d-r} = \frac{\frac{2fd}{d+f} - f}{d - \frac{2fd}{d+f}} = \frac{2fd - fd - f^2}{d^2 + df - 2df} = \frac{f(d-f)}{d(d-f)} = \frac{f}{d}$$

Saadud resultaat ütleb:

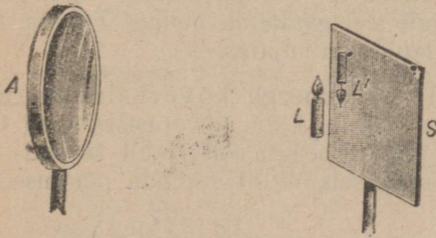
Kujutus on nii palju korda väiksem asjast enesest kui mitu korda asja kaugus peeglist on väiksem kujutuse kaugusest.

II. Peegeldatav asi seisab ôônespeegli kôverustsentrumis (joon. 75). Kiir Nb peegeldub läbi peafookuse F; kiir NFe peegeldub paralleelselt peatelje sihis eg. Peegeldatud kiirte eg ja bF lôikepunkt n on punkti N kujutus. Tähele pannes, et aF = FC, on kerge arusaada, et n ühte langema peab asja ülemise tipuga (M). Vastavalt leiame, et punkti M kujutus ühte langeb asja alumise tipuga (N), asja keskkoht C aga peegeldub samasse kohta. Kujutus ilmub ümberpöördult sealsamas kohas, kus seisab asi ise; tema suurus võrdub asja suurusega.



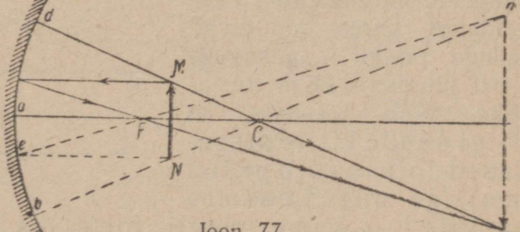
Joon. 75.

Kujutus on tõeline: me võime teda heita ekraanile, hoides viimast kõrvuti asjaga, ja pöörates vähe peeglit nii, et peegeldatud kiired ekraanile langevad (joon. 76).



Joon. 76.

III. Asi seisab peafookuse ja peegli kõverustsentrumi vahel (joon. 77). Tõmbame asja MN alumisest tipust N kiired CNb ja Ne. Esimene peegeldub sihis bCn, teine, kui paralleelne peateljele — sihis eFn Lõikepunkt n annab punkti N kujutuse. Samal teel leiame asja ülemise tipu M kujutuse m, ja terve



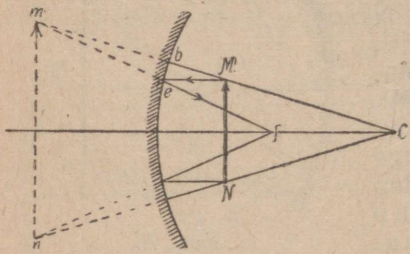
Joon. 77.

asja peegelpildi mn. Peegelpilt on ümberpöördud suurendatud ja re'aalne kujutus, ning asub peeglitsentrumi taga (joon. 72). Peegelpildi suurus on ära määratud endise formuliga

$$\frac{mn}{MN} = \frac{f}{d}; \text{ et siin } f > d, \text{ siis on } mn > MN.$$

Peegelpilt on nii mitu korda suurem asjast, kui mitu korda tema kaugus peeglist suurem on asja kaugusest. Mida lähemale tuleb asi peeglile, seda kaugemale nihkub ja seda suuremaks kasvab kujutus. Viimaks, kui asi otse peafookuses seisab, asub kujutus lõpmatu kaugel, s. t. teda ei ole üleüldse enam olemas, sest et kõik peegeldatud kiired paralleelsed on ja üleüldse ei lõiku.

IV. Asi seisab peegli enese ja tema peafookuse vahel (joon. 78). Nüüd on kõik asjapunktide fookused imaginaarsed (§ 17_6), ja peegeldatud kiirte pikendatud sihid lõikuvad peegli taga. Punktist M tulev paralleelne peateljele kiir Me peegeldub läbi F sihis eF; sealtsamast tulev teine kiir Mb peegeldub samas sihis bC. Nende sihtide lõikepunkt m moodustab otsitud punkti M kujutuse, sest vaatleja silma tulevad kiired eF ja bC on laialiminevad, mille tõttu silm nende lõikepunktis m kiirte allika (punkti M) kujutust näeb. Samal teel leiame asja alumise tipu N kujutuse n.

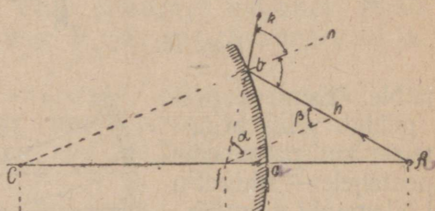


Joon. 78.

Nagu üksikud fookused, nii on ka terve kujutus mn — imaginaarne, meie ei saa teda milgil teel ekraanile heita. Ta asub peegli taga ja on asja suurendatud pärikujutus.

§ 19. **Kumerpeeglid.** 1) Kumerpeegli kõverustsentrum seisab alati peegeldava pinna taga. Läbi kõverustsentrumi C (joon. 79) tõmmatud sirgjooned (Cn) — peegli optilised teljed — lõikavad peegelpinda perpendikulaarselt, olles kerapinna raadiused.

Punktist A tulev valguskiir Ab peegeldub siis nii, et langemisnurk Abn võrdub peegeldusnurgaga nbk. Peegeldatud kiired muutuvad sellega punkti A igasuguse seisu juures laialiminevateks. Võib tõestada, et kõigi nende kiirte pikendused lõikavad optilist peatelge ühes ja samas punktis f — kumerpeegli fookuses. Et kiired alati laialiminevateks jäävad, siis võib kumerpeeglil ainult imagi-



Joon. 79.

naarne ehk ebafookus sündida. Vastavalt on ka valgusepunkti (A) peegelpilt kumerpeeglis alati ebakujutus.

2) Et tõestada kõigi peegeldatud kiirte lôikumist ühes ja samas fookuses, tuletame kumerpeegli formuli: Tômbame läbi f sirgjoone fh paralleelselt raadiusele Cb. Kolmnurgast AbC leiame, et

$$AC : Cf = Ab : bh$$

Nimetame pikkusi Aa = d, Ca = r ja af = f; siis on AC = r + d ja Cf = r — f. Leitud proportsioon saab nüüd järgmise kuju:

$$\frac{r + d}{r - f} = \frac{Ab}{bh}$$

Tsentraalsete kiirte juures võime ilma tuntava veata lugeda: Ab = Aa = d ja bf = af = f.

Kolmnurgas fbh on $\alpha = \beta$ sest et $\beta = \angle$ hbn; $\angle$ hbn = $\angle$ nbk ja $\angle$ nbk = α. Siis aga on nimetatud kolmnurgas ka bh = bf = f. Seades Ab ja bh asemele leitud suurused, saame: $\frac{r + d}{r - f} = \frac{d}{f}$, millest kerge on tuletada

$$\frac{1}{f} - \frac{1}{d} = \frac{2}{r} \qquad 6)$$

$$\text{ja } f = \frac{rd}{2d + r} \qquad 7)$$

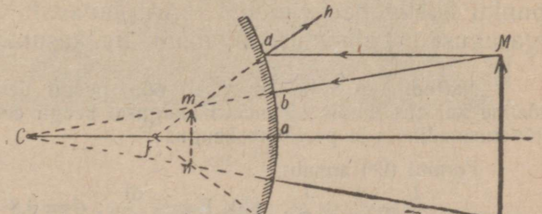
Vôrreldes (6) ja (7) võrrandiga (2) ja (3), näeme et mõlemad täiesti sarnased on: kui ôônespeegli formulid seada f asemele — f, ja r asemele — r, siis saame sealt otsekohe formulid (6) ja (7). See on arusaadav, kui silmas pidada, et kumerpeegli juures r ja f tahapoole peeglit on sihitud, kuna naad ôônespeegli juures peegli ette on sihitud.

Formul (7) näitab, et f oleneb ainult suurustest r ja d. Ühe ja sama valgusepunkti juures on mõlemad konstandid, nii jääb siis ka f ühesuuruseks kôigi kiirte jaoks, mis välja tulevad sellest valgusepunktist. Järjelikult lõikuvad kõigi nende kiirte sihid peale peegeldumist ühes punktis f, mis kujutab kumerpeegli fookust.

3. Paralleelsete kiirte fookust nimetatakse kumerpeegli peafookuseks (F). Peafookus asub kôverusraadiuse keskpaigas, tema kaugus F peeglist vôrdub $\frac{r}{2}$.

Formulist 7 leiame, kui $d = \infty$, et $f = \frac{r}{2 + \frac{r}{d}} = \frac{r}{2}$.

§ 20. **Peegelpildi konstruktsioon kumerpeeglil.** Joonistusel 80 on MN peegelduv asi, C ja F peegli tsentrum ja peafookus. Punktist M tômbame kiire M b C, mille pikendus läbi C läheb. Et see kiir perpendikulaarne on peegelpinnale, siis peegeldub ta samas sihis bM. Paralleelne peateljele kiir M d peegeldub nii, et tema siht läbi F läheb (dh).



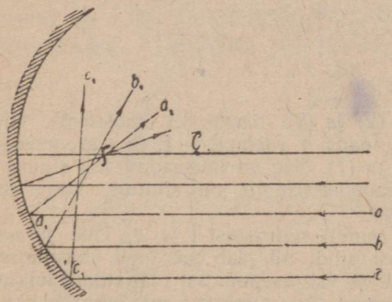
Joon. 80.

Peegeldatud kiirte sihtide lôikepunkt m annab punkti M kujutuse.

Niisama leiame punkti N kujutuse n, ja terve peegelpidi mn. Kuskohal ka ei seisaks peegelduv asi, peegelpilt on alati vähendatud, imaginaarne pärikujutus.

Kiirte käigust selgub, et peegelpilt on seda suurem ja seda lähedam peeglile, mida lähemal viimasele seisab peegelduv asi.

§ 21. **Sfääriline aberratsioon.** Eelmistes kirjeldustes vaatlesime ainult tsentraalseid kiiri (§ 16). Kui peegli avaus on suur, võrdlemisi tema kôverusraadiusega, siis ei ole need kiired, mis langevad peegli ääre peale, mitte enam tsentraalsed. Konstrueerides nende peegeldatud sihte, näeme, et viimased peatelge mitte kôik ühes punktis ei lôika. Joonistus 81 kujutab, näiteks, paralleelsete kiirte käiku suure avausega ôônespeeglis.



Joon. 81.

Me näeme, et peatelje ligidal olevad tsentraalsed kiired peale peegeldumist lähevad läbi peafookuse F. Kaugemal seisev kiir b aga lôikab peatelje juba vähe lähemal peeglile. Mida rohkem peegliääre poole langeb kiir, seda kaugemale peafookusest nihkub tema peegeldatud sihi ja peatelje lôikepunk. Me saame ühe fookuse asemel terve hulga neid. Kui punktis F hoida mônda väikest ekraani, siis näeme viimase peal terava valguspunkti asemel segaste piirjoontega valgustäppi. Niisamasuguste segaste piirjoontega ilmuks seal ka iga peegeldatud asja pilt. Kirjeldatud nähtust hüütakse sfääriliseks aberratsiooniks. Ta on seda tuntavam, mida suurem on peegli avaus vôrdlemisi tema kôverusraadiusega.

Sfäärilise aberratsiooni kôrvaldamiseks ehitatakse n. n. paraabolised peeglid. Nende pinna kôverus on nii valitud, et kôik ühest valgusepunktist väljaminevad kiired täpipealt ühte punkti kokku peegelduvad. Arusaadavalt vôib siis nende juures igasugust peegliavaust täielikult ära kasutada.

Näited: 1) 0,8 m. kaugusel ôônespeegli ees seisab mingi asi. Tema tôeline kujutus ilmub 2,2 meetri kaugusel peegli ees. Kui suur on selle peegli kôverusraadius r ja peafookuskaugus F?

Formul (2^a) annab:

$$\frac{1}{f}+\frac{1}{d}=\frac{1}{F}, \quad \text{ehk } F=\frac{df}{d+f};\ d=0{,}8 \text{ m.};\ f=2{,}2 \text{ m.};$$

seega on:

$$F=\frac{0{,}8.2{,}2}{0{,}8+2{,}2}=\frac{1.76}{3}=\mathbf{0{,}587\,m.}$$

$$r=2F=2.0{,}587=\mathbf{1{,}174\ m.}$$

2) Õõnespeegli peafookus $F = 0{,}6$ m. Tahetakse saada asja tõelist kujutust 0,2 loomulikust suurusest. Kui kaugel peab seisma asi ja kuskohal ilmub tema pilt?

§ 18_1 leidsime, et:

$$\frac{\text{kujutuse suurus}}{\text{asja suurus}} = \frac{f}{d} = 0{,}2, \text{ ehk } f = 0{,}2d;$$

Formuli (2a) järele on:

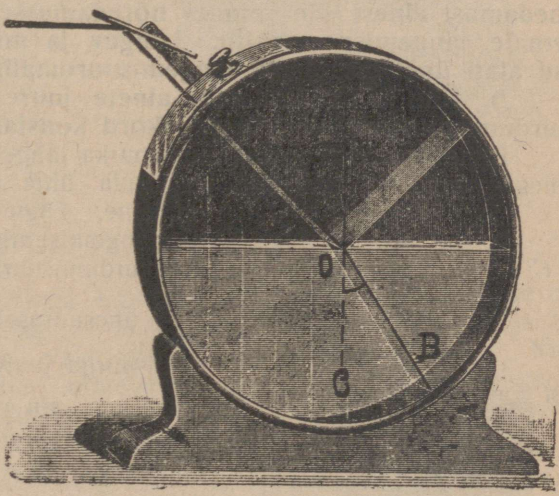
$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{d} + \frac{1}{0{,}2d} = \frac{1}{F} = \frac{1}{0{,}6}$$

$$\text{ehk } \frac{1{,}2}{0{,}2d} = \frac{1}{0{,}6}, \text{ ja } d = \frac{1{,}2 . 0{,}6}{0{,}2} = \mathbf{3{,}6\ m.}$$

Kujutuse kaugus $f = 0{,}2d = 0{,}2 . 3{,}6 = \mathbf{0{,}72\ m.}$

Peatükk III.
Valguse murdumine.

§ 22. **Valguse murdumine.** Jälgides vette langeva valguskiire sihti, vôime vastavate abinôude abil näha, et viimane vee pinnal järsku muutub. Nii vees, kui ka ôhus on kiire siht sirgjooneline, kuid ülemineku kohas ühest ainest teisse „murdub" ta. Seda nähtust nimetatakse valguse murdumiseks. Joon. 82 kujutab aparaati, mis vôimaldab näha nii langeva, kui ka murdunud kiire sihti. Ümmarik must kast on eesküljest kaetud läbipaistva klaasseinaga. Kasti sisse kallatakse mônda vedelikku, näiteks vett, niipalju, et ta täidaks umbes poole kasti. Läbi kitsa seinapilu A juhitakse kiirtejuga A O, vedeliku pinnale. Üks osa kiirtest peegeldub vedeliku pinnalt, teine osa aga tungib vedelikku sihis O B. Kujutame ette, et läbi O vedeliku pinnale on tômmatud normaal D C, ja nimetame teda „langemisnormaaliks". Siis kujutab nurk A O D langemisnurka ja B O C murdumisnurka. Joonistusest vôib näha, et läbi ôhu mineva kiire langemisnurk on suurem, kui vees oleva kiire murdumisnurk. Môlema nurga suurus oleneb



Joon. 82.

vastavate ainete (vee ja õhu) omadustest. Mida väiksem on murdumisnurk, võrdlemisi langemisnurgaga, seda optiliselt tihedam on murdev aine. Kui kirjeldatud aparaati vee asemele näiteks alkoholi kallata, siis näeme, et murdunud kiir veel rohkem läheneb langemisnormaalile, s. t. et murdumisnurk veel väiksemaks muutub. Alkohol „murrab" valgust kõvemini kui vesi, — ta on optiliselt viimasest tihedam*). Klaas on optiliselt veel tihedam kui vesi, kõige kõvemini murrab valgust teemant. Juhtides valgust kirjeldatud aparaati mitte ülevalt, läbi õhu, vaid kuskilt alt, läbi vee, ja nimelt nii, et kasti langeva kiirtejoa siht oleks endiselt B O, siis kujutab langemisnurka B O C. Ka sellel puhul murdub kiir üleminnes veest õhku ja — nagu katsed näitavad — nii, et murtud kiire siht on O A. Me näeme, et uus murdumisnurk A O D on suurem kui vastav langemisnurk B O C, millest järgneb, et õhk valgust vähem murrab kui vesi. Kui õhu väljapumpamise teel võimalik oleks kasti ülemises osas tekitada õhutut ruumi, siis näeksime, et murdunud kiir sellejuures ainult vähe oma sihti muudab: õhk ja tühi ruum on umbes ühesuuruse optilise tihedusega.

§ 23. **Murdumisseadused.** Hollandi õpetlane W. Snellius (1591 — 1626) leidis esimesena järgmise seaduse:

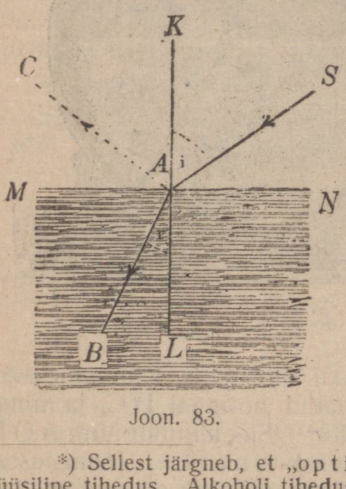
1) **Üleminnes optiliselt hõredamast ainest tihedamasse, murdub valguskiir lähenedes langemisnormaalile; optiliselt tihedamast ainest üle minnes hõredamasse, murdub ta kaugemale langemisnormaalilt. Langev ja murdunud kiir asuvad alati ühel tasapinnal langemisnormaaliga.**

2) **Ühe ja nendesamade ainete juures on langemis- ja murdumisnurkade sinus'te vahekord konstant.**

Teine seadus seob murdumisnurka langemisnurgaga, andes sellega võimalust arvestuse teel leida ühte nendest, kui tuntud on teine. Olgu näiteks, joonistusel 83 langemisnurgale SAK $= \alpha$ vastav murdumisnurk BAL $= \beta$, siis peab $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}$ ühesuuruseks jääma iga langemisnurga juures. Vahekorda

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

nimetatakse murdumiseksponendiks. Teine murdumisseadus ütleb nii siis: ühe ja nendesamade ainete juures jääb murdumiseksponent n konstandiks iga langemisnurga jaoks.



Joon. 83.

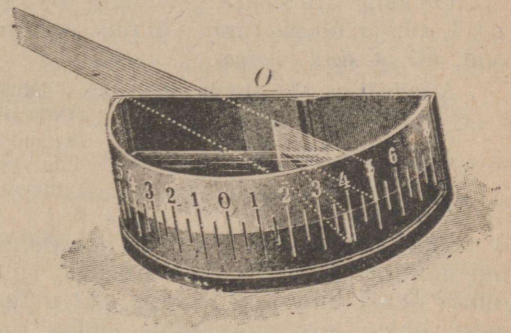
*) Sellest järgneb, et „optiline tihedus" mitte seesama ei ole, mis füüsiline tihedus. Alkoholi tihedus on väiksem kui vee oma, siiski on tema optiline tihedus viimasest suurem.

Juhtides valguskiirt punkti A mingi teise langemisnurga α_1 all, muutub murdumisnurk nii, et tema suurus β_1 vastab võrrandile:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n \qquad 8)$$

Mida väiksemaks teeme langemisnurga, seda väiksemaks saab ka murdumisnurk (α väheneb ühes $\sin \alpha$-ga). Kui langev kiir läheneb langemisnormaalile, s. t. kui α läheneb nullile, siis saab β lõpmatu väikseks, nii et ka murdunud kiir peab lähenema samale normaalile. Kui valguskiir langeb perpendikulaarselt murdva pinna peale, siis ei murdu ta üleüldse mitte, vaid läheb omas esialgses sihis läbi teise aine, sest et sellel juhtumisl $\alpha = 0$ ja $\beta = 0$.

Murdumisseaduste tõestamiseks tarvitatakse tihti joonistusel 84 kujutatud aparaati. Poolümmarikku silindrit kujutav madal kast on pooleni täidetud mõne vedelikuga. Kasti sirgseina keskkohas (0) asub kitsas pilu, mis kaetud läbipaistva klaasiga. Vastasseisvale kumerale kastiseinale on märgitud nurgakraadide skaala nii, et skaala nullpunkt selle seina keskkohta satub, ja seega läbi 0 tõmmatud kastiseina normalil asub.



Joon. 84.

Juhtides kiirtejuga läbi pilu O, läheb tema ülemine osa, mis ei puutu vedelikku, — murdumata oma algsihis edasi ja langeb skaalale, heites valgusjuti mingi kraadiarvu peale. Kraadide arv nullist kuni nimetatud valgusjutini kujutab langemisnurga suurust, on ju aparaadi murdvaks pinnaks kasti sirgsein, ja asub ju nullpunkt selle pinna langemisnormaalil.

Alumine pool kiirtejoast langeb läbi pilu O vedelikku ja murdub, lähenedes normaalile, s. t. skaala nullile. Tema sünnitatud valgusjutt näitab skaalal murdumisnurga suurust kraadides. Nii võime selle aparaadi abil hõlpsasti ära lugeda iga langemisnurgale vastava murdumisnurga suurust.

Pöörates aparaati nii, et kiirtejuga langeks ikka väiksema ja väiksema nurga all vedeliku pinnale, näeme et ka murdumisnurk ikka väiksemaks jääb ja alati väiksem on kui langemisnurk.

Kui kasti iga seisu jaoks ära lugeda vastavad langemis- ja murdumisnurgad ja vôrrelda nende sinus'eid, siis näeme, et tôepoolest $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}$ jääb konstandiks.

Langeb kiirtejuga normaalselt kasti sirgseinale, siis asuvad ülemise kui ka alumise kiirtejoa valgusjutid skaala nullpunktil, mis tôestab et kiired sarnasel puhul murdumata läbi vedeliku lähevad.

§ 24. **Murdumiseksponendid.** 1) Kui valguskiir langeb ôhutus ruumis viibiva aine peale, siis kujutab $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n$ viimase absoluutset murdumiseksponenti.

Harilikult ei vaatle meie aga murdumist ôhutus ruumis, vaid õhus viibiva keha juures. Nagu nimetatud sai, on ôhutu ruumi ja õhu enese optiline tihedus umbes ühesuurune, nii et murdumine mõlemal juhusel peaaegu ühesugune on. Absoluutset murdumis eksponenti vôime nii siis ilma tuntava veata ka ôhus mõôta.

On kerge aru saada, et viimane alati suurem peab olema kui 1, on ju ôhutu ruum vôi ôhk optiliselt kôige hôredam keskkond, nii et $\sin \alpha > \sin \beta$.

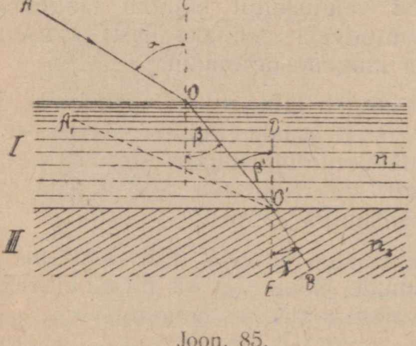
Arvuliselt on abs. murdumiseksponent tähtsamate ainete jaoks järgmine:

Õhutu ruum . . .	$n = 1,0$	Väävlissüsinik . . .	$n = 1,63$
Õhk	$n = 1,00029$	Kroonklaas	$n = 1,53$
Vesi	$n = 1,333$	Flintklaas	$n = 1,63$
Alkohol	$n = 1,36$	Teemant	$n = 2,49$
Terpentiin	$n = 1,47$		

Mida suurem on aine abs. murdumiseksponent, seda kôvemini murdub kiir, s. t. seda rohkem läheneb ta normaalile üleminnes ôhust ainesse. On kiire siht ümberpöördud, s. t. läheb ta ainest ôhku, siis moodustab endine langemisnurk α praegust murdmisnurka β^1 ja ümberpöördult. Murdumine sünnib siis seaduse järele:

$$\frac{\sin \alpha^1}{\sin \beta^1} = \frac{\sin \beta}{\sin \alpha} = \frac{1}{\frac{\sin \alpha}{\sin \beta}} = \frac{1}{n} = \text{konstant},$$

sest et $\alpha^1 = \beta$ ja $\beta^1 = \alpha$.



Joon. 85.

2) Murdumiseksponenti nimetatakse relatiivseks, kui murdumine sünnib üleminekujuures ühest ainest teise.

Joonistusel 85 kujutavad I (vesi) ja II (klaas) paralleelseid ainekihte, mille absoluutsed murdumiseksponendid n^1 ja n_2 on tuntud. Valguskiir AO langeb ôhust vette, murdudes nii, et

$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_1$. Vees murdunud kiir OO^1 langeb klaasi pinnale ja murdub seal veel kord, nii et tema siht klaasi sees on O^1B. Relatiivset murdumiseksponenti n vee ja klaasi vahel kujutab siis $\frac{\sin\beta^1}{\sin\gamma} = n$. Nii teoreetiliselt kui katsete abil vôib tôestada, et nurk $EO^1B = \gamma$ on käsitatud juhusel sama suur kui ta oleks siis, kui valguskiir AO langeks otsekohe klaasi peale, ilma et ta enne läbi vee peaks minema. Kui me näiteks vee klaasi pealt ära valaksime ja punkti O^1 juhiksime valguskiire A^1O^1 paralleelselt AO (nii et $\angle A^1O^1D = \angle AOC = \alpha$), siis on murdunud kiire siht klaasi sees ikkagi seesama O^1B ja murdumisnurk nii siis endiselt γ. Sellest selgub, et $\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma}$ kujutab II aine (klaasi) abs. murdumiseksponenti n_2.

Relatiivne murdumiseksponent vee ja klaasi vahel on siis

$$n = \frac{\sin\beta^1}{\sin\gamma} = \frac{\sin\beta}{\sin\gamma} = \frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} : \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{n_2}{n_1} \qquad 9)$$

Sellest järgneb seadus: e t l e i d a r e l a t i i v s e t m u r d u m i s e k s p o n e n t i k a h e a i n e v a h e l, p e a b II a i n e a b s o l u u t s e t m u r d u m i s e k s p o n e n t i j a g a m a I a i n e o m a g a.

Katsete juures môôdetakse tihti otsekohe nurgad β^1 ja γ (joon. 85), nii et tuntud on relatiivne muudumiseksponent $n = \frac{\sin\beta^1}{\sin\gamma}$ käsitatud ainete vahel. Et siis leida II aine abs. murdumiseksponenti n_2, peame võrrandist (9) leidma:

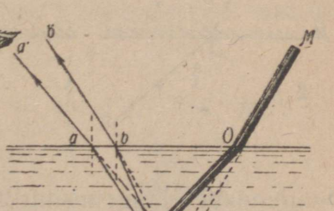
$$n_2 = n \times n_1 \qquad 10)$$

Näide 1) Õhu absol. murdumiseksponent on $n_1 = 1{,}00029$. Mõôtes läbi õhu vette langeva valguskiire langemis- ja murdumisnurka, leiame relatiivse murdumiseksponendi ôhu ja vee vahel $n = 1{,}33261$; Et leida vee absoluutset murdumiseksponenti n_2, peame n kasvatama n_1 peale, s. t.

$$n_2 = n \cdot n_1 = 1{,}33261 \times 1{,}00029 = 1{,}3330.$$

2) Tuntud on vee abs. murdumiseksponent $n_1 = 1{,}333$ ja klaasi oma $n_2 = 1{,}5$. Kui suur on relatiivne murdumiseksponent n vee ja klaasi vahel, kui kiir langeb veest klaasi? $n = \frac{n_2}{n_1} = \frac{1.5}{1.333} = 1{,}126.$

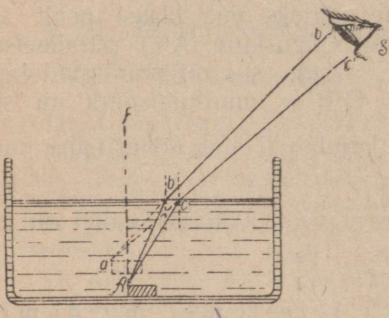
§ 25. **Valguskiirte murdumisega seletatavad loodusenähtused.** 1) Igaüks on tähele pannud, et v e t t e p i s t e t u d k e p i o t s m e i l e m u r t u n a p a i s t a b (joon. 86). Kepiotsast n lähevad välja tema poolt hajutud valguskiired, millest mõned sihis na ja nb veepinnale langevad ja üleminekul ôhku murduvad. Murdunult kaugenevad nad langemisnormaalilt, sest et ôhk on optiliselt hôredam kui vesi. Silma tulevate kiirte siht (aa_1 ja bb_1) on sellepärast niisu-



Joon. 86.

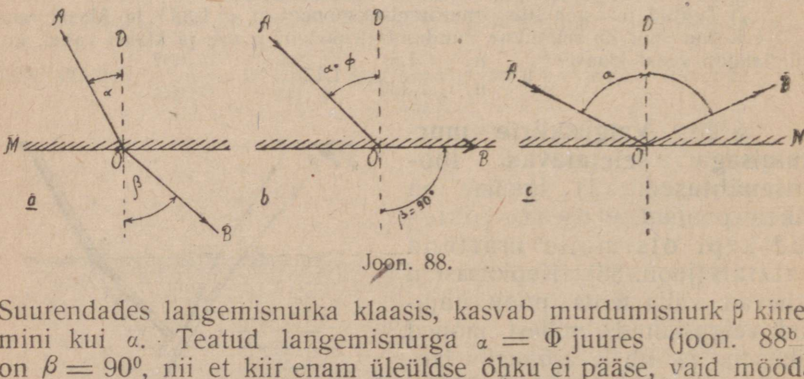
gune nagu tuleksid nad välja mitte punktist n, vaid kôrgemal seisvast lôikepunktist N. Me näeme sellepärast kepiotsa n punktis N. Niisama näeme ka kôiki teisi veealuseid kepi pinna punkte kôrgemal kui nad tôepoolest on. Kepiotsa on asemel paistab meile tema ebakujutus ON, mille tôttu kepp murtuna näib.

2) Kui vaadelda mônda vee all asuvat asja, siis ei näe meie teda harilikult mitte seal, kus ta tôepoolest seisab, vaid koguni teisel kohal. Olgu näiteks täidetud nôus (joon. 87) mingi asi A. Tema peale langevad valguskiired hajuvad igale poole. Môned nendest langevad sihis Ab ja Ac veepinnale ja murduvad üleminnes ôhku. Murdunud kiired langevad silma sihis bb^1 ja cc^1, nende sihtide lôikepunktis a näemegi asja A. Joonistusest selgub, et ebakujutus a seda kôrgemal asub, mida madalamal seisab silm. Ainult siis, kui asja peale vaadata normaali AF sihis, pääsevad asjast tulevad kiired perpendikulaarselt läbi vee pinna ja nii siis murdumatult silma; ainult sarnasel puhul näeme asja seal kus ta tôepoolest on.



Joon. 87.

§ 26. **Täieline sisepeegeldumine.** 1) Kui valguskiir tihedamast ainest hôredamasse läheb, näiteks klaasist ôhku (joon. 88a), siis on murdumisnurk β alati suurem kui langemisnurk α (§ 23_1).



Joon. 88.

Suurendades langemisnurka klaasis, kasvab murdumisnurk β kiiremini kui α. Teatud langemisnurga $\alpha = \Phi$ juures (joon. 88^b) on $\beta = 90^0$, nii et kiir enam üleüldse ôhku ei pääse, vaid mööda klaasi pinda MN libiseb. Katsed näitavad, et veel suurema langemisnurga juures kõik kiired pinnalt MN nagu peeglilt peegelduvad ja üleüldse läbi klaasi ôhku ei pääse (joon. 88^c). Seda nähtust hüütakse täieliseks sisepeegeldumiseks; langemisnurka $\alpha = \Phi$, mille juures sisepeegeldumine algab, nimetatakse sisepeegeldumise piirnurgaks.

Viimase suurus oleneb aine murdumiseksponendist n. § 24_1 järele on $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{1}{n}$, ehk $n \sin \alpha = \sin \beta$. Piirnurga Φ juures on $\beta = 90^0$, nii siis $\sin \beta = 1$. Järjelikult on

$$\sin \Phi = \frac{1}{n} \qquad 11)$$

Klaasi jaoks on n $1 \cong 1,5$, millest järgneb, et piirnurk Φ klaasi ja õhu jaoks on

$$\sin \Phi \doteq \frac{1}{1,5} = 0,6677 \text{; vastav nurk on}$$

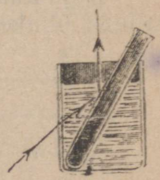
$$\Phi = 42^0.$$

Veest õhku minnes on piirnurk $48,5^0$, teemandist õhku minnes aga 24^0.

Tuleb silmas pidada, et täieline sisepeegeldumine võimalik on ainult üleminekul optiliselt tihedamast ainest hõredamasse.

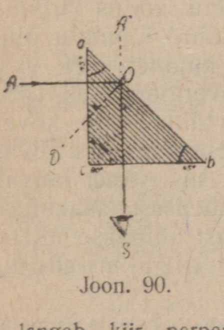
Ei lange kiir tihedamast ainest mitte õhku, vaid mõnda teise hõredamasse ainesse, siis tuleb formulis 11 tähe **n** all mõista relatiivset murdumiseksponenti hõredama ja tihedama aine vahel (§ 24_2).

2) Kuna harilikul peegeldumisel alati üks osa valgusest peegelpinna ainesse tungib, ja seal kas neelub või murtud kiirtena läbi peegli läheb, heitub täielisel sisepeegeldumisel kõik langev valgus tagasi. Sellepärast sünnib siin peegeldumine alati väga intensiivselt. Kui näiteks veega täidetud nõus (joon. 89) tühja klaastorukest hoida, siis peegelduvad läbi nõu küljeseinte tulevad kiired vastu torukeses seisvat õhku ja satuvad perpendikulaarselt läbi veepinna meie silma: meile paistab, nagu oleks torukese pind heledalt kiirgavast poleeritud hõbedast.



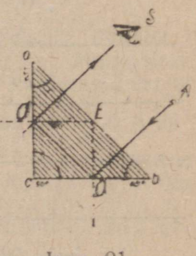
Joon. 89.

Ka klaasprismas (joon. 90) võime täielist sisepeegeldumist vaadelda: Valguskiir Ao langeb perpendikularselt läbi prisma tahu ac pinnale ab. Langemisnurk AOD $= 45^0$ on suurem kui klaasi piirnurk $\Phi = 42^0$, seega ei pääse kiir mitte läbi pinna ab, vaid ta peegeldub sealt sihis OS. Silm S näeb sellepärast valgustäppi A sihis SA^1, nii nagu oleks pind ab peegel.



Joon. 90.

Sarnane eelmisega on kiirte käik joon. 91 kujutatud prismas: Valgustäpilt A langeb kiir perpendikulaarselt läbi prismatahu ab ja jõuab murduma-



Joon. 91.

tult pinnani cb, langedes viimasele 45^0 all. See langemisnurk on suurem kui klaasi piirnurk (42^0), nii et kiir punktis O täleliselt peegeldub ja 45^0 all sihis OO^1 pinnale ac langeb. Punktis O^1 kordub eelmine nähtus. Teistkord peegeldatud kiir O^{1}S läheb perpendikulaarselt läbi ab, ja vaatleja näeb valgustäppi A sihis SO^{1}A^1.

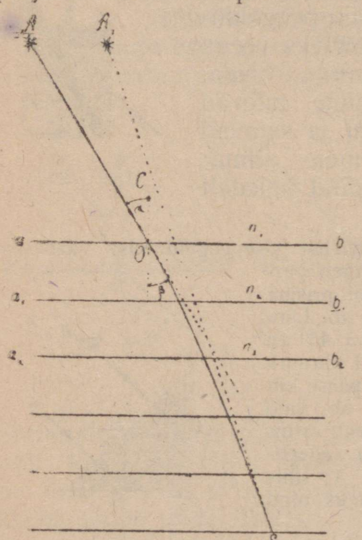
Niisuguseid peegeldavaid prismasid tarvitatakse optiliste aparaatide juures harilikkude peeglite asemel. Nad on vastupidavamad ja neelavad vähem valgust peegeldamisel kui harilikud peeglid.

§ 27. **Valguskiire murdumine mitteühtlases aines.** 1) Kuigi mitmesuguste ainete tihedused harilikult ei vasta nende optilistele tihedustele (§ 22), oleneb ühes ja samas aines optiline tihedus keha füüsilisest tihedusest: mida tihedamaks teeme aine, seda suuremaks kasvab tema optiline tihedus.

Võib juhtuda et ühe ja sama aine üksikud osad mitmesuguse füüsilise, järjelikult ka optilise tihedusega on. Seesuguses optiliselt mitteühtlases aines murdub valguskiir keset ainet, üleminnes hõredamast kohast tihedamasse. Et aine füüsiline tihedus kunagi järsku ei muutu, vaid järk-järgult, siis ei murdu ka valguskiir seal mitte ühes kohas järsku, vaid järk-järgult kiire teataval pikkusel. Selle tõttu muutub kiire tee mitteühtlases aines kõverjooneliseks.

2) Et atmosfääriline õhk seda hõredam on, mida kõrgemal ta asub, siis kujutab ta optiliselt mitteühtlast ainet.

Kujutame ette, et kogu atmosfäär koos seisab lõpmatu paljuist õhukestest paralleelsetest kihtidest, mille piirkonnas tihedus ühtlane ja murdumiseksponent konstant olgu. Siis on kõrgemal asuva kihi murdumiseksponent ikka pisut väiksem tema all seisva kihi omast, s. t. $n_1 < n_2 < n_3$ jne. (joon. 92).

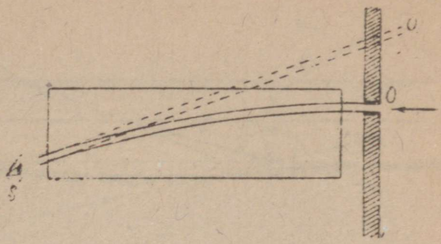


Joon. 92.

Tähest A langegu valguskiir esimesele kihile ab. Et $n_2 > n_1$ siis murdub valguskiir üleminekul teise kihti kaldudes normaali OC poole. Samuti murdub kiir kõigis järgmistes kihtides. Et kihid lõpmatu õhukesed on, siis kujuneb sel viisil valguskiire tee kõverjooneliseks (AS). Vaatleja S näeb tähte selle kõverjoone alumise otsa sihis, s. t. riivasjoonel SA^1, nii siis vähe kõrvale nihutatult tema tõelisest asukohast. Kirjeldatud nähtust hüütakse astronoomiliseks valgusmurdumiseks.

3) Valguskiire kõverjoonelist teed võime otsekohe vaadelda järgmisel katsel: Paralleelsete seintega klaasnõu täidetakse puhta veega (joon 93). Nõu

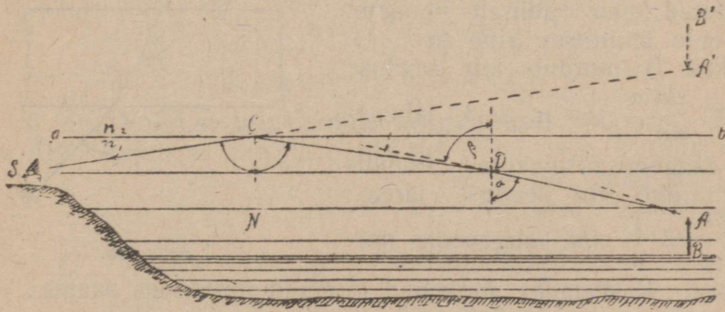
põhja kallatakse ettevaatlikult sifooni abil kontsentreeritud keedusoola sulatist. Kui saadud segu mõni päev seista lasta, siis diffundeerub soolasulatis; sünnib vedelik, mille erikaal põhjas on suurem kui pinnal. Kui läbi kitsa pilu 0 juhtida kiirtejuga vedelikku, siis murdub ta seal kôverjooneliseks sarnaselt nagu atmosfäärilisel valgusmurdumiselgi. Kiirtejoa ots paendub alla, nii et vaatleja S näeb pilu 0 kusagil kõrgemal, sihis $S0^1$. Kiirtejoa kôverjoonelist teed läbi vedeliku võime—külje pealt vaadates—hiilgava kaarena näha, kui vedeliku hulka môni tilk miskit fluorestseerivat värviainet oli segatud.



Joon. 93.

4) Õhupeegeldused. Tungides tihedamast ôhukihist hõredamasse. või vad valguskiired mitte ainult murduda, vaid ka sisemiselt peegelduda. See sünnib siis, kui kihtidevahelisele pinnale langeva kiire langemisnurk on suurem vastavate kihtide piirnurgast. Tulles tihedamast õhukihist, ei tungi valguskiir siis mitte hôredama kihi sisse, vaid peegeldub tema pinnalt. Selle õhupeegelduse järelduseks on mitmesugused huvitavad nähtused,—muu seas ka tuntud „fata morgana"

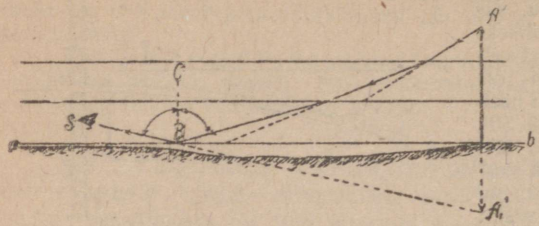
Polaarmeredel juhtub, et alumised õhukihid külma vee pinna läheduses niivôrd ära jahtuvad, et nad optiliselt palju tihedamaks muutuvad kui kôrgemal seisvad soojemad ôhukihid. Mõnest punktist A (joon. 94) tulev kiir



Joon. 94.

murdub üheminekul ühest kihist teise, kaugenedes normaalilt. Punktis D, näiteks, kaldub kiir AD peale murdumist nii, et nurk $\beta > \alpha$. Mingi kõverjoont AC mööda jõuab kiir viimaks kihini **ab**, kus langemisnurk NCD on suurem piirnurgast kihtide n_1 ja n_2 vahel $\left(\text{s. t. } \angle NCD > \Phi = \frac{1}{n}, \text{ kus } n = \frac{n_1}{n_2};\ \S\ 26\right)$. Niisugusel juhusel ei lähe kiir mitte läbi ab; vaid peegeldub sealt täieliselt, langedes silma sihis CS. Vaatleja S näeb siis punkti A kusagil üleval ôhus punktis A^1. Vastavalt ilmub mône teise punkti B kujutus kohas B^1 j. n. e. Nii näeme asja AB enese asemel teme õhus rippuvat ümberpöördud ebakujutust A^1B^1.

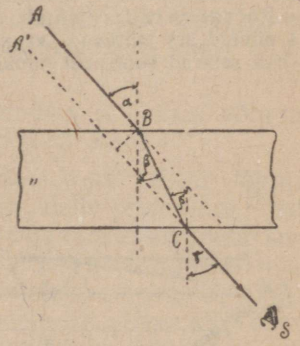
Kõrbedes vôib maapind niivôrd kuumeneda et tema külge puutuvad ôhukihid hulga soojemad on kui kôrgemad kihid. Alumised ôhukihid saavad hôredamaks, kui ülemised, ja kiirte murdumine nendes sünnib nii, et ülevalt tulev kiir AB (joon. 95) kaugeneb langemisnormalist. Mônes punktis B (joon. 95) vôib juhtuda, et langemisnurk CBA suurem on piirnurgast mõlemal pool pinda ab asuvate ôhukihtide vahel. Siis peegeldab pind ab kiiri, ja vaatleja S näeb punkti A kusagil allpool, punktis A^1. Sünnib asjade peegelpilt, nagu oleks ab peegeldav veepind. Kõrbes, kus veepuudus alati suur— näeb rändaja niiviisi vett seal kus teda olemas ei ole.



Joon. 95.

§ 28. **Valguse murdumine tasaparalleelsete pindadega kehades.** 1) Kui tasaparalleelsete pindadega keha môlemalt poolt ümbritsetud on ühe ja sama ainega (näiteks ôhuga), siis on temast väljatuleva kiire CS (joon. 96) siht paralleelne langeva kiire AB sihile.

Et seda tôestada, olgu joon. 96 kujutatud keha optiliselt tihedam, kui teda ümbritsev aine ($n > 1$). Punktis B murdub kiir seaduse järele: $\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n$, s. t. lähenedes langemisnormaalile. Punktis C murdub kiir seaduse järele: $\frac{\sin\beta^1}{\sin\gamma} = \frac{1}{n}$ s. t. kaugenedes normaalist. Kasvatades môlemad formulid üksteisega saame:



Joon. 96.

$$\frac{\sin\alpha \cdot \sin\beta^1}{\sin\beta \cdot \sin\gamma} = 1$$

Et aga $\beta = \beta^1$ siis annab leitud formul:

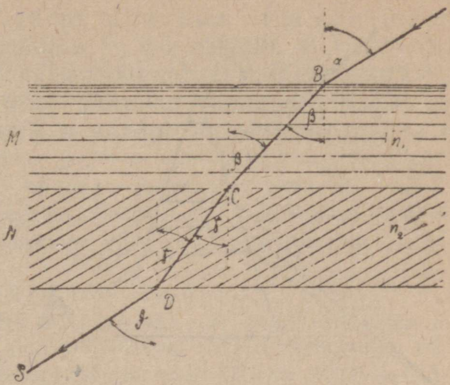
$$\frac{\sin\alpha}{\sin\gamma} = 1, \text{ millest järgneb, et}$$

$$\sin\alpha = \sin\gamma \text{ ehk } \alpha = \gamma.$$

Nagu joonistusest selgub, näeme läbi sarnase keha valgusepunkti A vähe kôrvalenihutatuna, punktis A^1. Kôrvale nihkumine on seda suurem, mida paksem on keha ja mida suurem on n ja α.

2) Analoogiliselt vôib tôestada, et valguskiir ka läbi mitme tasaparalleelse keha minnes oma langemissihile paralleelselt välja tuleb.

Joonistusel 97 olgu kehade M ja N absol. murdumiseksponendid n_1 ja n_2. Murdumisel punktides B, C ja D on maksev seadus:



Joon. 97.

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = n_1$$

$$\frac{\sin\beta}{\sin\gamma} = n$$

$$\frac{\sin\gamma}{\sin\vartheta} = \frac{1}{n_2},$$

kus n kujutab M ja N-vahelist relatiivset murdumiseksponenti. Kasvatades leitud 3 formulit üksteisega saame:

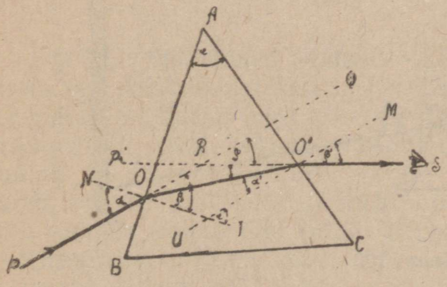
$$\frac{\sin\alpha}{\sin\beta}\cdot\frac{\sin\beta}{\sin\gamma}\cdot\frac{\sin\gamma}{\sin\vartheta} = \frac{n_1 \cdot n}{n_2}$$

§ 24_2 järele on $n = \frac{n_2}{n_1}$ seega annab eelmine kujutus:

$$\frac{\sin\alpha}{\sin\vartheta} = n_1 . \frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{1}{n_2} = 1,$$

ehk $\sin\alpha = \sin\vartheta$ ja $\alpha = \vartheta$.

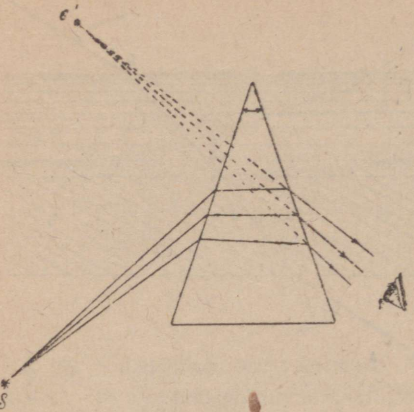
§ 29. **Valguse murdumine kolmtahkses prismas.** Kolmnurk ABC kujutagu prisma pôiklôiget (joon. 98). Prisma tahke AB ja BC, mille läbi läheb valguskiir, nimetatakse murdvateks pindadeks, nende lôikejoont A murdvaks servaks, nurka BAC $= \varphi$ murdvaks nurgaks. Valguspunktist P langeb kiir PO prisma tahu AB peale. On N0 selle tahu normaal, siis kujutab nurk PON $= \alpha$ langemisnurka. Prismas murdub kiir lähenedes normaalile, nii et murdumisnurk β on väiksem kui α. Murdunud kiir OO^1 tuleb läbi tahu AC ôhku ja murdub punktis O^1 kaugenedes normaalist O^1M ($\beta^1 > \alpha^1$). Väljatulev kiir O^1S kaldub alla, sünnitades langeva kiire PO sihiga nurga SRQ $= \vartheta$. Seda nurka hüütakse kaldumisnurgaks.



Joon. 98.

Vaatleja S näeb valgusepunkti P sihis SO^1P^1, kuskil kôrgemal kui ta tôepoolest on.

Kui prismasse tulevad kiired on paralleelsed, siis jäävad nad sarnasteks ka peale murdumist, ja valgusallik paistab meile endiselt lôpmatumas kauguses. On aga valgusallikast väljatulevad kiired laialiminevad, siis lôikuvad kôigi murtud kiirte sihid ühes punktis S_1 (joon. 99), s. t. kiired jäävad laialiminevateks ka peale murdumist.

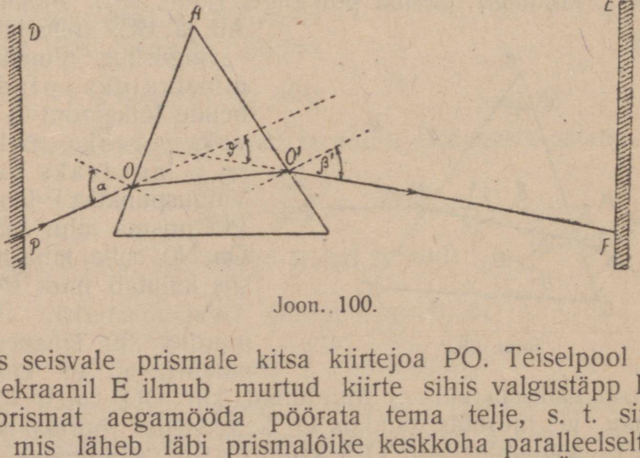


Joon. 99.

Kui prisma ümber pöörata, nii et tema murdev serv A alla sattuks, siis on kogu nähtus ümberpöördud ja asjad paistavad meile läbi prisma vaadates madalamal omast tôelisest asukohast.

2) Kaldumisnurga suurus oleneb prisma aine murdumiseksponendist, murdva nurga φ ja langemisnurga α suurusest. Joon. 98 selgub, et kaldumisnurk ϑ on seda suurem, mida suurem on prisma murdumiseksponent n ja murdev nurk φ. Kui $\varphi = 0$, siis on murdvad pinnad AB ja AC (joon. 98) paralleelsed, seega tuleb kiir välja paralleelselt oma langemissihile, s. t. ka $\vartheta = 0$ (§ 28).

Vahekorda langemisnurga α ja kaldumisnurga ϑ vahel vôime selgitada järgmise katse abil: Läbi diafragma D (joon. 100) juhime



Joon. 100.

pimedas seisvale prismale kitsa kiirtejoa PO. Teiselpool prismat seisval ekraanil E ilmub murtud kiirte sihis valgustäpp F. Kui nüüd prismat aegamööda pöörata tema telje, s. t. sirgjoone ümber, mis läheb läbi prismalôike keskkoha paralleelselt servadele, siis muudame sellega langemisnurka α. Ühtlasi näeme valgusplekki F üles vôi allapoole nihkuvat. Prisma teatud seisu juures asub F kôige kôrgemas kohas: kas pöörata nüüd prismat ühele vôi teisele poole, ikkagi hakkab F sellejuures langema. On selge, et selle langemisnurga juures murtud kiired kõige vähem alla kalduvad omast esialgsest sihist PO, s. t. et sellel juhusel on kaldumisnurgal ϑ kõige väiksem tähendus. Kui selle prismaseisu juures môôta murdumisnurka β^1, siis selgub, et ta vôrdub langemisnurgaga α. Sellest katsest järgneb, **et kaldumisnurk ϑ on kõige väiksem siis, kui kiired lähevad sümmeetriliselt läbi prisma, s. t. kui langemisnurk α võrdub murdumisnurgaga β^1.**

3) Kaldumisnurga ϑ jaoks leiame järgmise formuli: Joonistusest 98 selgub, et $\measuredangle$ QRS $= \vartheta$ on kolmnurga ORO^1 välisnurk. Geomeetriast teame, et $\measuredangle$ QRS $=$ $\measuredangle$ ROO^1 $+$ $\measuredangle$ RO^{1}O. Nurk ROO^1 aga on $\measuredangle$ ROT $- \beta$; $\measuredangle$ ROT $=$ $\measuredangle$ NOP $= \alpha$, nii et $\measuredangle$ ROO^1 $= \alpha - \beta$. Niisama on kerge näha, et $\measuredangle$ RO^{1}O $=$ RO^{1}U $- \alpha^1 = \beta^1 - \alpha^1$. Siis on

$$\vartheta = \mathrm{ROO^1} + \mathrm{RO^1O} = \alpha - \beta + \beta^1 - \alpha^1; \qquad 12)$$

Samast joonistusest näeme, et nurk OTU $=$ BAC $= \varphi$, sest et NT on perpendikulaarne AB-le ja MU on perpendikulaarne AC-le. Kolmnurga OO^{1}T jaoks on OTU $= \varphi$ välisnurk. Sellepärast on nurk OTU $=$ TOO^1 $+$ UO^{1}O, ehk

$$\varphi = \beta + \alpha^1.$$

Vôrrangust (12) leiame selle abil, et

$$\vartheta = \alpha + \beta^1 - \varphi. \qquad 13)$$

Kõige väiksema kaldumisnurga ϑ juures peab olema $\alpha = \beta^1$, nii siis ka $\beta = \alpha^1$. Sel juhusel annavad formulid (12) ja (13): $\varphi = 2\beta$ ja $\vartheta = 2\alpha - \varphi$, millest leiame et

$$\beta = \frac{\varphi}{2} \text{ ja } \alpha = \frac{\vartheta + \varphi}{2} \qquad 14)$$

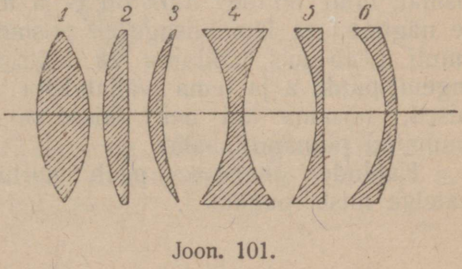
Kui katsest leida kôige väiksem kaldumisnurk ϑ, ja kui tuntud on prisma enese murdev nurk φ, siis vôime nende formulite abil välja arvata langemisnurga α ja murdumisnurga β suuruse. Tundes viimaseid, vôime leida prisma aine murdumiseksponendi n, sest et

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin\left(\frac{\vartheta + \varphi}{2}\right)}{\sin \frac{\varphi}{2}}; \qquad 15)$$

§ 30. **Sfäärilised läätsad.** Läätsaks hüütakse sfääriliste pindadega läbipaistvat keha. Harilikult tehakse läätsad klaasist, sellepärast hüütakse neid tihti ka sfäärilisteks ehk optilisteks klaasideks. Kui läätsa keskkoht on paksem tema äärtest, siis kuulub ta kumerläätsade hulka, on aga keskkoht ôhem kui ääred, siis kuulub ta ôônesläätsade sekka. Kôiki kumerläätsi vôib jaotada kolme liiki (joon. 101):

1) Kaksikumer lääts, môlemad küljed on kumerad kerapinnad;
2) Tasakumer lääts, üks külg on kerapind, teine— tasapind;
3) ôôneskumer lääts, üks külg on kumer, teine ôônes kerapind.

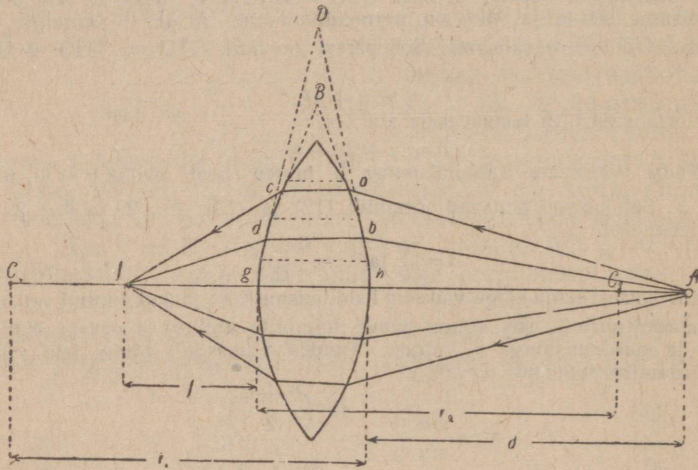
Vastavalt jagunevad ka ôônesläätsad kolme rühma:



Joon. 101.

4) Kaksiôônes lääts, môlemad küljed on ôônsad kerapinnad;
5) tasaôônes lääts, üks külg on ôônes kerapind, — teine tasapind;
6) kumerôônes lääts, üks külg on ôônes, teine kumer kerapind.

§ 31. **Murdumine kaksikumerläätsas; kumerläätsa formul.** 1) Olgu C_1 ja C_2 (joon. 102) läätsa külgi moodustavate kerapindade tsentrumid — n. n. läätsa kôverustsentrumid. Läbi C_1 ja C_2 sihitud kiir lôikab neid kerapinde perpendikulaarselt ja läheb sellepärast murdumata läbi läätsa ($\alpha = o$ ja $\beta = o$). Seda sihti hüütakse läätsa optiliseks peateljeks. Igas teises sihis, näiteks Aa ja Ab murdub kiir läätsas, kusjuures murtud kiir (fc ja fd) alati läbi optilise peatelje C_1C_2 ja langeva kiire tômmatud tasapinnal asub (§ 23).



Joon. 102.

Lihtsuse pärast vaatleme edaspidistes kirjeldustes murdumist ainult joonistuse pinnal. Teadagi murduvad kiired samuti ka igal teisel, läbi optilise peatelje tômmatud tasapinnal.

Läätsa môju kiire peale on sarnane prisma omaga. Meie vôime enesele ette kujutada, et läbi punktide a ja c (joon. 102) on tômmatud läätsa kerapindadele kaks riivaspinda aB ja cB perpendikulaarselt joonistuspinnale; nad kujutavad kolmtahkset prismat, mille murdev nurk on B ja mille pealôiget kujutab aBc. Me nägime, et läbi niisuguse prisma minev kiir alla kaldub; samuti peab siis kalduma ka läätsas murtud kiir, on ju kiire langemispunkt a ja tema väljatuleku punkt c prismal ja läätsal ühised, niisama kui neil ühised on läbi nimetatud punktide tômmatud pinnanormaalid.

Kaldudes allapoole, peab murtud kiir cf lôikama optilist peatelge miski punktis f.

Môni teine kiir langegu läätsale punktis b ja tulgu sealt välja punktis d. Ka seda läätsaosa vôime kujutada prismana, tômmates läbi b ja d kaks riivaspinda läätsa kerapindadele. Selles ettekujutatud prismas bDd murdub kiir samuti allapoole, kuid tema kaldumisnurk on väiksem kui kiire cf oma, sest et nüüdse prisma murdev nurk D on väiksem endisest murdvast nurgast B (§ 29). Samal teel vôib näidata et murdunud kiir kaldub seda järsumalt optilise peatelje poole, mida lähemal läätsa äärele asub tema langemispunkt. Läätsa äärele langevad kiired kalduvad nii siis langemisel küll järsumalt optilisest peateljest eemale, murduvad aga selle eest seda järsumalt optilise peatelje poole tagasi. Sellega on seletatav katse ja teoriaga tôestatud seadus:

Kõik kiired, mis tulevad läätsa optilisel peateljel asuvast valgusepunktist A, lõikavad peale murdumist seda telge ühes ja samas punktis f, mida kiirte fookuseks hüütakse.

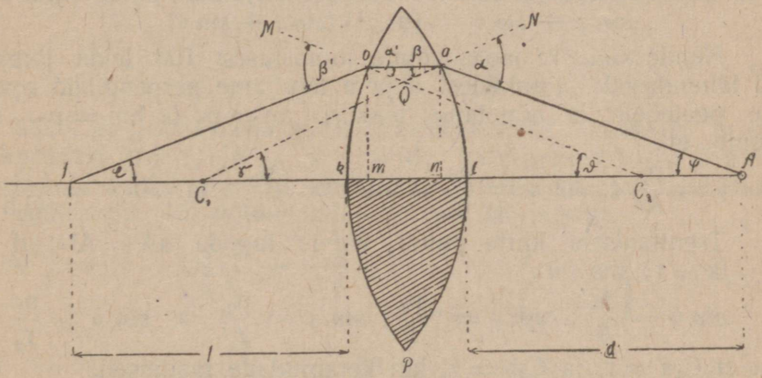
Olgu läätsa pindade raadiused $C_1h = r_1$ ja $C_2g = r_2$, valgusepunkti kaugus läätsast $Ah = d$ ja fookuse kaugus $fg = f$ (joon. 102). Suurusi r_1, r_2 ja d vôib otsekohe môôta, fookuskauguse f aga määrab ära järgmine kumerläätsa formul:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) \tag{16}$$

kus täht n kujutab läätsa aine murdumiseksponenti.

Nagu näha, oleneb f ainult kaugustest d, r_1 ja r_2, kuid mitte sellest, missuguse koha peale läätsapinnal langeb vaadeldud kiir. Suurus f on seega ühine kôigi kiirte jaoks, mis väljatulevad ühest, optilisel peateljel asuvast valgusepunktist. Järjelikult peavad kôik need kiired peatelge lôikama ühes ja samas punktis.

§ 32. Kaksikumerläätsa formuli tuletus. Vaadates punkti a ümber asuva läätsapinna osakese peale kui tasapinna peale,



Joon. 103.

kujutab kerapinna raadius C_1aN (joon. 103) langemisnormaali. Kiir Aa murdub sellepärast nii, et langemisnurk $AaN = \alpha$ suurem on kui murdumisnurk $baC_1 = \beta$.

Murtud kiir ab langeb läätsa teisele kerapinnale, mille raadius C_2bM kujutab langemisnormaali punktis b. Välja minnes õhku, kaugeneb kiir normaalist ($\beta_1 > \alpha_1$) ja kaldub optilise peatelje poole, lõigates viimast fookuses f.

Murdumisseadus annab kiire Aabf jaoks järgmised võrrandid:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = n; \text{ ja } \frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = \frac{1}{n};$$

Vaatleme tuletusel ainult tsentraalseid kiiri, s. t. seesuguseid, mille langemispunkti kaugus läätsa keskkohast on väike võrdlemisi kerapindade raadiustega. Sarnasel juhusel on ka nurgad α, β, α_1 ja β_1 väga väiksed. Trigonomeetria õpetab, et meie siis ilma tuntava veata *sinuste* asemele vastavad nurgad võime seada, s. t. et $\frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\alpha}{\beta}$ ja $\frac{\sin \alpha_1}{\sin \beta_1} = \frac{\alpha_1}{\beta_1}$. Sellest järgneb, et

$$\alpha = n\beta \text{ ja } \beta_1 = n\alpha_1, \text{ ehk et}$$

$$\alpha + \beta_1 = n\ (\beta + \alpha_1) \quad \ldots\ldots\ldots\ldots \quad 17)$$

Lihtsuse pärast nimetame nurka $aC_1A = \gamma$, nurka $bC_2f = \vartheta$, nurka $bfk = \varphi$ ja $aAl = \psi$ (joon. 103). Nurk NQC_2 on välisnurgaks nii kolmnurga abQ, kui ka kolmnurga C_1QC_2 jaoks. Sellest järgneb, et

$$\beta + \alpha_1 = NQC_2 = \gamma + \vartheta;$$

Kolmnurga C_1aA jaoks on $NaA = \alpha$ välisnurk, nii on siis

$$\alpha = \gamma + \psi;$$

sarnaselt leiame, et

$$\beta_1 = \varphi + \delta;$$

Seades leitud 3 formulit võrrandisse (17), saame:

$$\gamma + \psi + \varphi + \delta = n\ (\gamma + \delta) \text{ ehk: } \psi + \varphi = (n-1)\ (\gamma + \delta).$$

Tehtud oletuse järgi on need nurgad kõik väga väiksed: meie võime sellepärast nurkade asemele kirjutada nende *sinus*'ed;

$$\sin \psi + \sin \varphi = (n-1)\ (\sin \gamma + \sin \delta) \qquad 18)$$

Nende *sinus*'te jaoks võime joonistusest 103 leida järgmised tähendused: Punktidest a ja b tõmbame perpendiklid optilisele peateljele ja nimetame pikkust $an = p_2$ ja $bm = p_1$, siis näeme, et:

$$\sin \psi = \frac{p_2}{Aa}; \quad \sin \varphi = \frac{p_1}{bf}; \quad \sin \gamma = \frac{p_2}{C_1a} \quad \text{ja} \quad \sin \delta = \frac{p_1}{C_2b};$$

Tsentraalsete kiirte puhul võime lugeda $aA = Al = d$ ja $fb = fk = f$; siis on:

$$\sin \psi = \frac{p_2}{d}; \quad \sin \varphi = \frac{p_1}{f}; \quad \sin \gamma = \frac{p_2}{r_1} \quad \text{ja} \quad \sin \delta = \frac{p_1}{r_2}$$

sest et $C_1a = r_1$ ja $C_2b = r_2$ kui kerapindade raadiused.

Võrrand (18) annab leitud avalduste abil:

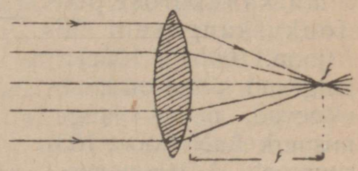
$$\frac{p_2}{d} + \frac{p_1}{f} = (n-1)\left(\frac{p_2}{r_1} + \frac{p_1}{r_2}\right);$$

Et aga läätsad praktiliselt alali ôhukesed on, siis vôime oletada et $p_1 = p_2$. Niisugusel puhul saab viimane vôrrand järgmise lôpuliku kuju:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right); \qquad 16)$$

§ 33. **Kaksikumerläätsa peafookus.** 1) Hoides kaksikumerläätsa paralleelsete päiksekiirte teel, vôime läätsa taga seisval ekraanil punktisarnase heleda valgustäpi saada, mille abil kerge on aineid, nagu must paber, puu jne. pôlema süüdata. Meie näeme ühtlasi, et nimetatud valgustäpp ainult ekraani teatud kindlal kaugusel läätsast punktisarnane on ja et ta kaugemal vôi lähemal seisval ekraanil suuremaks ja vähem heledaks muutub.

Nimetatud punktisarnane valgustäpp F on paralleelselt läätsale langevate kiirte ühine lôikepunkt — läätsa peafookus, tema kaugus läätsast — peafookuskaugus F (joon. 104). Kas juhtida kiiri ühelt vôi teiselt poolt läätsale, peafookus ilmub ikka samal kaugusel läätsa taga: **kaksikumerläätsal on 2 peafookust, mis ühekaugusel mõlemal pool läätsa seisavad.**



Joon. 104.

2) Formulis (16) on paralleelsete kiirte puhul $d = \infty$ ja $\frac{1}{d} = 0$; seega on peafookuskaugus F määratud vôrrandiga:

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

ehk

$$F = \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)} \qquad 19)$$

mis ütleb, et peafookus seda lähemal asub läätsale, mida väiksemad on r_1 ja r_2, s. t. mida kumeramad on läätsa pinnad ja mida suurem on läätsa murdumiseksponent n.

Vôrrandit (16) vôime kujutada veel järgmiselt:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = (n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right) = 1 : \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)} = 1 : F, \text{ s. t.}$$

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F} \qquad 20)$$

See vôrrand seob kiirte fookuskauguse f valgusallika kaugusega d ja läätsa peafookuskaugusega F. Tundes antud läätsa jaoks konstant peafookuskaugust F, vôime selle vôrrandi abil hôlpsasti välja arvata fookuskauguse f valgusallika igasuguse seisu juures.

§ 34. **Kaksikumerläätsa fookuse seisukohad.** Vôrrand (20) annab fookuskauguse jaoks järgmise formuli:

$$f = \frac{dF}{d - F} = \frac{F}{1 - \frac{F}{d}} \qquad 21)$$

Leiame fookuse seisukoha valguspunkti 4 tüübilise seisu juures:

1) Kiired on paralleelsed optilisele peateljele: $d = \infty$ ja $f = F$ (§ 33). Murtud kiired lôikavad peatelge läätsa peafookuses (joon. 105a).

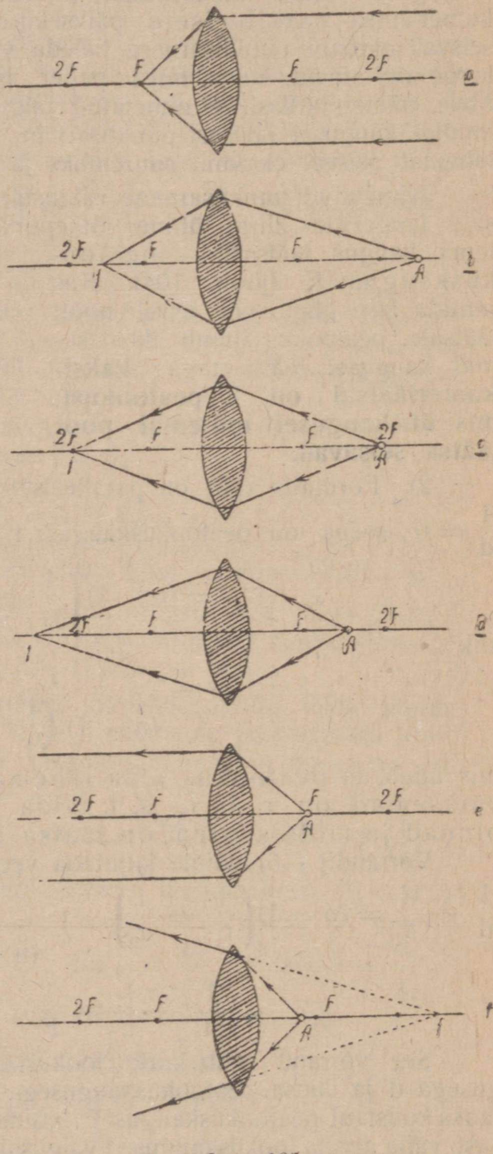
2) Valgusepunkt läheneb läätsale kunni tema kahekordse peafookuskauguseni 2F (joon. 105b ja 105c): langevad kiired on laialiminevad, nende langemisnurk AaN (joon. 103) suureneb A lähenemisel läätsale; selle tôttu kalduvad murtud kiired (bf) vähem optilise peatelje poole kui eelmisel juhusel. Nende lôikepunkt (f) optilise peateljega kaugeneb läätsast.

Kui A seisab kahekordsel peafookuskaugusel, siis on $d = 2F$ ja formuli (21) järgi:

$$f = \frac{F}{1 - \frac{F}{2F}} = 2F,$$

s. t. kahekordsel peafookuskaugusel seisva valgusepunkti murtud kiired lôikavad optilist peatelge niisama kaugel teisel pool läätsa (joon. 105c).

3) Valgusepunkt läheneb läätsale kahekordses pea fookuskauguses kunni ühe-



Joon. 105.

kordse peafookuskauguseni (joon. 105d ja 105e): Murdunud kiired kalduvad selle juures veel vähem optilise peatelje poole, nii et fookus ikka kaugemale ja kaugemale kahekordse peafookuskauguse taha nihkub.

Kui valgusepunkt otse peafookuses (F) asub,

siis on $d = F$, nii et $f = \dfrac{F}{1 - \dfrac{F}{F}} = \dfrac{F}{0} = \infty$,

s. t. peafookuses asuva valgusepunkti kiired murduvad läätsas paralleelseteks optilisele peateljele (joon. 105e).

4) Valgusepunkt asub läätsapinna ja tema peafookuse vahel (joon. 105f):

Kuigi kiired murdumisel ka nüüd optilise peatelje poole kalduvad, on nende langemissiht niivôrd järsult laialiminev, et murdumine enam ei jaksa muuta kiirtejoa iseloomu: juga jääb laialiminevaks ka peale murdumist. Niisugusel puhul ei lôika peatelge mitte murtud kiired ise, vaid ainult nende sihtide pikendused, sünnitades ebafookuse samal pool läätsa kus asub valgusepunkt. Vaatleja silma langevad murtud kiired nii, nagu tuleksid nad välja valgusepunkti ebakujutusest (f). Et selles punktis kiired üleüldse ei lôiku, siis ei saa me seda kujutust kinnipüüda, — ta on ainult imaginaarne.

Formul (21) annab praegusel juhusel, kus $d < F$ ja $\dfrac{F}{d} > 1$, fookuskauguse f jaoks negatiivse suuruse. Nagu harilikult nii tähendab negatiivne märk ka siin, et fookus nüüd nihkunud on omast harilikust seisust teisele poole läätsa.

Kokkuvôttes kôiki kirjeldatud juhuseid, vôime formuleerida järgmise seaduse:

Kui lôpmata kaugel seisev valgusepunkt läheneb optilist peatelge mööda läätsale kunni tema kahekordse peafookuskauguseni, siis nihkub teisel pool läätsa asuv kiirtefookus läätsa peafookuse seisukohast kunni tema kahekordse peafookuskauguseni. Valgusepunkti lähenemisel kahekordsest peafookuskaugusest kunni ühekordse peafookuskauguseni, kaugeneb vastav fookus sellestsamast kaugusest kunni lôpmatuseni. Kui valgusepunkt asub peafookuse ja läätsa vahel, siis jäävad murtud kiired laialiminevateks, sünnitades ebafookuse samal pool läätsa, kus asub valgusepunkt.

Meie nägime, et peafookuses asuva valgusallika kiired murduvad paralleelseteks optilisele peateljele. Ümberpöördult murduvad aga kôik paraleellselt tulevad kiired kokku peafookusse. Sarnane vahekord valitseb ka valgusallika ja vastava fookuse teiste seisukohtade juures: kui valgusallik ümberpaigutada tema kiirte fookusse, siis ilmub uus fookus valgusallika endisel seisukohal. Niisama nagu ôônespeegli juures nii kujutavad ka siin valgusallik ja tema fookus kahte rakendatud punkti.

§ 35. **Tasa- ja õõneskumerad läätsad.** 1) Tasakumera läätsa üks külg on tasapind, mille peale vaadata võib kui lôpmata suure raadiusega kerapinna peale. Seades formulis (16) $r_2 = \infty$ nii et $\frac{1}{r_2} = 0$, leiame tasakumerläätsa formuli:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \left(n - 1\right)\frac{1}{r_1} \tag{16a}$$

Vastavalt saame formulist (19):

$$F = \frac{1}{\frac{1}{r_1}(n - 1)} \tag{19a}$$

Kui vôrrelda sümmeetrilist kaksikumerläätsa ($r_1 = r_2 = r$) sama kumera tasakumerläätsaga ($r_1 = r$), siis leiame formuli (19) ja (19a) abil, et esimese peafookuskaugus on

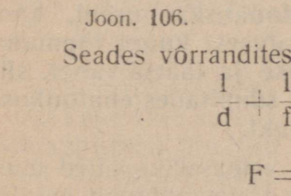
$$F_k = \frac{1}{(n - 1)\left(\frac{1}{r_1} + \frac{1}{r_2}\right)} = \frac{1}{2} \cdot \frac{1}{(n - 1)\frac{1}{r}},$$

kuna teise oma on:

$$F_t = \frac{1}{(n - 1)\frac{1}{r}}$$

s. t. kaksikumerläätsa peafookuskaugus (F_k) on pool väiksem sama kumera tasakumerläätsa omast (F_t). Harilikul klaasil on $n \cong 1,5$, seega $F_k = r$ ja $F_t = 2r$.

2) Õõneskumerläätsa formuli leiame, kui võrrandis (16) ja (19) vastavalt ära tähendame, et suurema kôverusraadiuse r_2 (joon. 106) siht vastupidine on endisele. (Kuna kaksikumerläätsa juures näiteks pinna a (joon. 106) kõverustsentrum C_2 asub pahemal pool läätsa, seisab ta ôôneskumerläätsa juures paremal pool.) Niisugust sihimuutmist kujutatakse geomeetrias negatiivse märgiga (—) vastava suuruse ees.



Joon. 106.

Seades vôrrandites (16) ja (19) $r_2 = - r_2$ ja $r_1 = r_1$ leiame:

$$\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = (n - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right) \tag{16b}$$

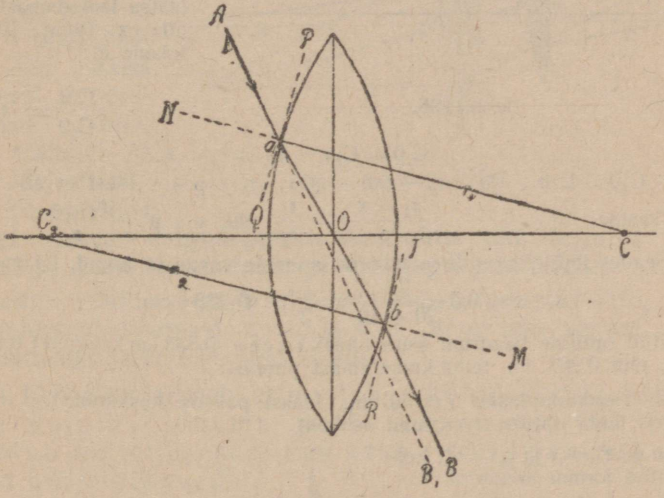
$$F = \frac{1}{(n - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)} \tag{19b}$$

Selgub, et õõneskumerläätsa F veel suurem on kui tasakumerläätsa oma, on ju nimetaja

$$(n - 1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_1}\right) < (n - 1)\frac{1}{r_1}.$$

3) Kôigil kumerläätsadel on ühine omadus: nende reaalne fookus asub alati läätsa taga (vaadates kiirte sihis) ja murtud kiired kalduvad koomale optilise peatelje poole. Kumerläätsad koondavad kiiri, neid hüütakse sellepärast ka koondusläätsadeks. Kôige tugevamini koondab kiiri kaksikumerlääts, sest et tema peafookus läätsale kôige ligemal seisab. Väiksema koondusvõimega on tasakumerlääts, veel väiksemaga — ôôneskumerlääts.

§ 36. **Läätsa optiline tsentrum.** 1) C_1a ja C_2b on kaks paralleelset kôverusraadiust. Läbi a ja b tômbame môttes läätsapindadele 2 riivaspinda PQ ja RT, mis perpendikulaarsed on nii joonistuspinnale kui ka raadiustele C_1a ja C_2b. Et need raadiused paralleelsed on, siis on ka tasapinnad PQ ja RT paralleelsed.



Joon. 107.

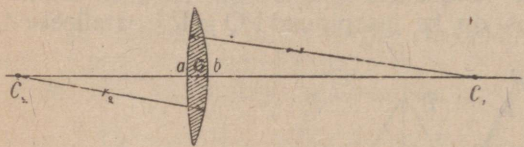
Punkti a langevatest kiirtest tuleb môni niisuguses sihis Aa, et ta peale murdumist punkti b satub. Et a ja b ühised on nii läätsa- kui ka riivaspindadel, siis läheb see kiir läbi läätsa nagu läbi tasaparalleelse keha (§ 28) ja jääb välja tulles paralleelseks oma langemissihile. Kui lääts ôhuke on vôrdlemisi tema kôverusraadiustega, siis on kiire bB paralleelne kôrvalenihkumine algsihist A B¹ niivôrd väike, et kiirt AabB sirgjooneliseks vôib pidada. Niisugust, sirgjooneliselt läbi läätsa minevat kiirt hüütakse läätsa optiliseks abiteljeks, tema lõikepunkti O peateljega C_1 C_2 — läätsa optiliseks tsentrumiks. Vôib tôestada, et **kõik läbi optilise tsentrumi sihitud kiired pääsevad sirgjooneliselt ja murdumata läbi läätsa.**

2) Et tôestada viimast väidet, leiame kolmnurkade C_1a0 ja C_2b0 sarnadusest, et

$$\frac{C_1 0}{C_2 0} = \frac{C_1 a}{C_2 b} = \frac{r_1}{r_2} \qquad 22)$$

Et raadiused r_1 ja r_2 konstandid on, siis on antud läätsa jaoks ka $\frac{C_1 0}{C_2 0}$ konstant. **Järjelikult oleneb optilise tsentrumi 0 seisukoht ainult läätsa kumerustest; ta asub antud läätsas ühes kindlas punktis.** Vadeldes näiteks mônda teist paralleelset raadiusepaari, jääb vahekord $\frac{C_1 0}{C_2 0}$ endiseks; seega läheb ka nende raadiuste otsade ühendusjoon läbi endise punkti 0. Sarnasel teel vôime läätsapinna iga punkti jaoks leida niisuguse sihi, mis läbi optilise tsentrumi läheb ja mida mööda valguskiir järjelikult murdumata läbi läätsa pääseb. Optilise tsentrumi seisu läätsas määrab proportsioon (22).

Näited: 1) Kaksikumerläätsal on $r_1 = 20$ cm ja $r_2 = 10$ cm. Läätsa paksus tema keskkohas $p = 0{,}5$ cm. Kus kohal asub lääta optiline tsentrum?



Joon. 108.

On teada, et optiline tsentrum 0 on peateljel C_1C_2 Nimetame tema kaugust läätsa lamedamast pinnast $a0 = x$ (joon 108). Siis leiame et:

$$\frac{C_1 0}{C_2 0} = \frac{r_1}{r_2}.$$

Kuid:
$$C_1 0 = C_1 a - a0 = r_1 - x.$$
ja
$$C_2 0 = C_2 b - 0b = r_2 - (ab - aO) = r_2 - p + x, \text{ sest et } ab = p.$$
Sellest saame:
$$\frac{r_1 - x}{r_1 - p + x} = \frac{r_1}{r_2}, \text{ ehk } x = p \cdot \frac{r_1}{r_1 + r_2};$$

Seades leitud formulisse tähtede asemele vastavad arvud, leiame:

$$x = 0{,}5 \frac{20}{20 + 10} = \frac{1}{3} = \mathbf{0{,}333} \text{ cm.}$$

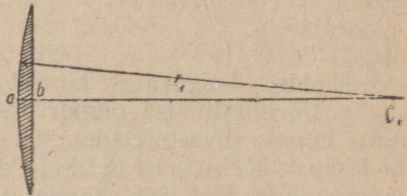
s. t. otsitud optiline tsentrum asub l ä ä t s a s e e s 0,333 cm kaugusel tema lamedamast, ehk 0,267 cm tema kumeramast pinnast.

2) Tasakumerläätsa $r = 50$ cm, klaasi paksus keskkohast $p = 0{,}8$ cm On tarvis leida optilise tsentrumi asukoht.

Siin on $r_1 = r$ ja $r_2 = \infty$. Eelpool leitud formul annab:

$$x = p \cdot \frac{r}{r + \infty} = \frac{rp}{\infty} = 0,$$

s. t. optilise tsentrumi kaugus punktist a (joon. 109) on null,— nii asub ta siis sellessamas punktis, s. t. l ä ä t s a k u m e r a l p i n n a l.

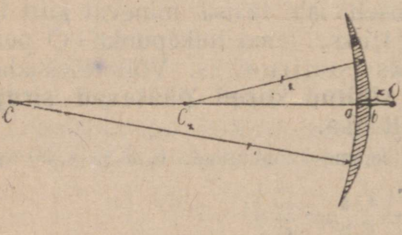


Joon. 109.

3) Õ õ n e s k u m e r l ä ä t s a l olgu $r_1 = -50$ cm ja $r_2 = 25$ cm, klaasi paksus $p = 0{,}3$ cm. Optiline tsentrum 0 asub peatejel, kaugusel x punktist a (joon. 110). Endine formul annab nüüd:

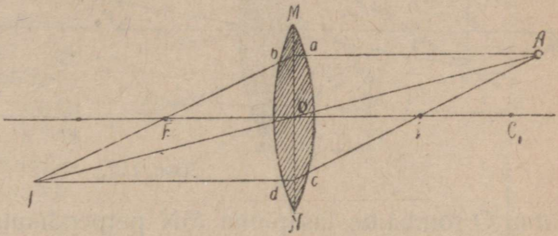
$$x = p \cdot \frac{r_1}{r_1 + r_2} = 0{,}3 \frac{-50}{-50 + 25}$$
$$= 0{,}3 \cdot \frac{50}{50 - 25} = \mathbf{0{,}6\ cm.}$$

s. t. optiline tsentrum asub v ä l j a s p o o l k l a a s i, l ä ä t s a k u m e r a p i n n a t a g a, sest et $x = 0{,}6 \text{ cm} > ab = 0{,}3$ cm.



Joon. 110.

§ 37. **Kujutuste konstruktsioon kumerläätsadel.** 1) Läätsa optilisel peateljel asuvast valgusepunktist A (joon. 105b) tulevad kiired koonduvad peale murdumist samal teljel seisvasse fookusse f, mida ekraanile vôib heita. Jättes valgusepunkt ja ekraan endisse kohta, pöörame läätsa ümber telje, mis on perpendikulaarne joonistuspinnale ja läheb läbi optilise tsentrumi. Ühes läätsaga pöördub siis ka tema peatelg, nii et valgusepunkt A mõnele abiteljele satub. Katse näitab, et fookus f selle juures oma asukohta ei muuda, vaid ekraanil endisse kohta seisma jääb. Seisis lääts alguses näiteks nii, et peatelje siht oli Af (joon. 111) ja kiirte fookus f, siis ei muuda f oma asukohta, kui läätsa joonistusel kujutatud seisu pöörda, kus A abiteljel Af asub. **Järjelikult ilmub ka optilisel abiteljel seisva valgusepunkti A fookus ekk kujutus samal abiteljel ja samade seaduste järele nagu peateljelgi.**



Joon. 111.

Leitud seadus järgneb otsekohe läätsa formulist (16), sest et temas leiduvad suurused r_1, r_2 ja d ei olene telje seisust, nii et f ühesuuruseks jääb telje igal seisul.

2) Eelmisest järgneb, et mistahes kohal seisva valgusepunkti kujutus ilmuma peab läbi nimetatud punkti tõmmatud abiteljel, seal kus kaks sellest punktist väljatulevat kiirt lõikuvad.

Iga punkti jaoks on meil tuntud kolme, läbi läätsa mineva kiire tee:

a) Läbi valgusepunkti tômmatud optilist telge Ao (joon. 111) mööda minev kiir läheb sirgjooneliselt läbi läätsa optilise tsentrumi;

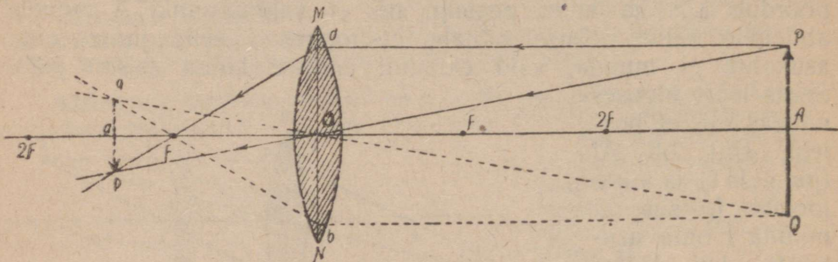
b) Läbi läätsa peafookuse F minev kiir AFc muutub paralleelseks optilisele peateljele (df);

c) Optilisele peateljele paralleelne kiir Aa murdub läbi peajookuse (bF).

Harilikult on lääts õhuke, nii et punktid a ja b ligistikku seisavad. Siis võime ilma suurema veata mõlemaid punkte üheks punktiks pidada. Terve lääts muutub siis tasapinna MN sarnaseks, mis perpendikulaarselt peateljele läbi optilise tsentrumi on tõmmatud. Kiirte lõikepunkti selle tasapinnaga vôib lugeda nii langemis- kui ka läätsast väljatulemispuuktiks. Selle lihtsustusega on kerge joonistada iga üleval nimetatud kolme kiire teed läbi läätsa, millest kaks juba ära määravad valgusepunkti kujutuse.

3) Asja kujutuse leidmiseks tuleb asjapinna iga punkti jaoks vastav fookus leida. Kôik fookused kokku loovadki asja pildi. Allpool konstrueerime pildi kolmel iseloomulikul kaugusel seisva asja jooks.

I. Asja (P Q) kaugus läätsast on suurem kui kahekordne peafookuskaugus 2F (joon. 112). Läbi optilise tsen-



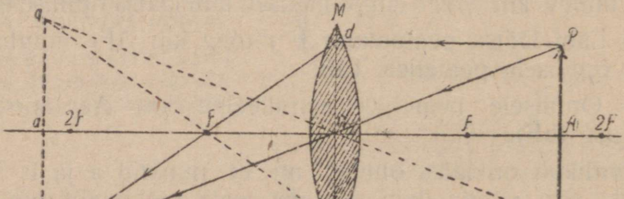
Joon 112.

trumi O tômbame tasapinna MN perpendikulaarselt peateljele AO. Punktist P välja tulev kiir POp läheb murdumata läbi läätsa; sealtsamast pärit kiir Pd murdub läbi peafookuse F sihis dFp, lôigates esimest kiirt punktis p, — asja ülemise tipu P kujutuses. Analoogiliselt leiame kiirte QO ja Qbq abil asja alumise tipu kujutuse q. Kôik teised punktid noole PQ pinnal asuvad vastaval sirgjoonel pq, mis järjelikult moodustabki otsitud kujutuse. Asja kujutus pq on ümberpöördud, vähendatud ja reaalne ehk tôeline; ta seisab F ja 2F vahel, sest et kôigi punktide fookused sellel kaugusel läätsa taga ilmuvad (§ 34_2).

Kolmnurgast Opq ja OPQ järgneb:

$$\frac{pq}{PQ} = \frac{aO}{AO} = \frac{f}{d} \qquad 23)$$

kus f on pildi kaugus, d — asja kaugus läätsast: Kujutus kasvab seda suuremaks, mida lähemale läätsale nihkub asi. Käsitatud juhusel on aO < AO, nii siis pq < PQ.

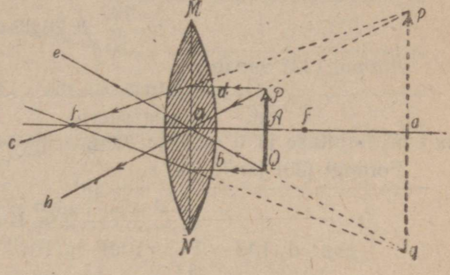


Joon. 113.

II. Asi seisab kumerläätsa ees, punktide F ja 2F vahel. Niisama kui esimesel juhusel leiame asja kujutuse pq (joon. 113) kiirte Pdp, POp ja Qbq, QOq abil. Et asja pinna kôik punktid asuvad F ja 2F vahel, siis peavad vastavad fookused seisma teisel pool läätsa, punkti 2F taga (§ 34_3). Sealsamas asub siis ka asja otsitud kujutus. Kujutus on ümberpöördud, suurendatud ja tôeline..

Formulis (23) on nüüd $f > d$, nii siis $pq > PQ$.

III. Asi seisab kumerläätsa enese ja tema peafookuse vahel. Kiired PdF ja POh ei lôiku üleüldse mitte, vaid moodustavad peale murdumist laialimineva kiirtejoa. Murtud kiirte pikendatud sihid lôikuvad punktis p. Seal asub siis punkti P ebafookus. Niisama leiame punkti Q ebafookuse q — kiirte QbF ja QOe abil. Vaatlejale paistab nagu tuleksid kiired cp ja hp välja punktist p, — ta näeb asja ebakujutust pq samal pool läätsa, kus asi seisab. Seda kujutust ei saa meie ekraanile heita ega mingil teisel teel kinni püüda, ta on imaginaarne. Nagu joonistusest näha, võib sellel juhusel ainult suurendatud pärikujutus ilmuda, mis seda suuremaks kasvab, mida lähemale läätsale nihkub asi.



Joon. 114.

Formulis (23) on $aO > AO$, järjelikult $pq > PQ$.

Näited: 1) Kaksikumerläätsa peafookuskaugus $F = 5$ cm. Kui kaugel läätsast seisab asi, kui tema ebakujutus ilmub 25 cm kaugusel läätsast?

Formul $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$ annab: $d = \frac{fF}{f - F}$;

Praegusel juhtumisel on d otsitud asjakaugus; f — fookuskaugus = ebakujutuse kaugus = — 25 cm ja F = 5 cm. Tähendab:

$$d = \frac{-25.5}{-25-5} = \frac{25.5}{25+5} = \frac{125}{30} = \mathbf{4{,}17\ cm}.$$

2) Kui suure kujutuse saame 0,5 cm suurusest asjast, mis asub **4,17** cm kaugusel eelmise läätsa ees?

Formul (23) järele on: $\frac{\text{kujutuse suurus}}{\text{asja suurus}} = \frac{f}{d} = \frac{-25}{4{,}17} \backsimeq -6$,

s. t. ebakujutus on 6 korda suurem kui asi ise.

3) Tasakumer klaaslääts annab asjast 3 korda suurendatud tôelise kujutuse, kui asja kaugus läätsast on $d = 30$ cm. Kui suur on selle läätsa peafookuskaugus F ja kõverusraadius r, kui klaasi murdumiseksponent on $n = 1{,}5$?

Formulist (23) järgneb, et

$$\frac{f}{d} = 3; \text{ ehk } f = 3d = 3.30 = 90 \text{ cm}.$$

Formul $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$ annab:

$$F = \frac{fd}{f+d} = \frac{30.90}{30+90} = \frac{30.90}{120} = \mathbf{22{,}5\ cm}.$$

Formuli (19 a) järele on:

$$F = \frac{r}{n-1}; \text{ ehk } r = (n-1)\,F = (1{,}5 - 1) \,.\, 22{,}5 = 11{,}25 \text{ cm.}$$

Läätsa peafookuskaugus on 22,5 cm ja kôverusraadius 11,25 cm.

4) Õõneskumera klaasläätsa kõverusraadiused on $r_1 = 10$ cm ja $r_2 = 40$ cm. Klaasi murdumiseksponant $n = 1{,}5$. Selle läätsa abil tahetakse saada 1 cm suurusest asjast 10 cm suurust tõelist kujutust. Kuskohal peab seisma asi?

Formulist (19 b) leiame:

$$F = \frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)} = \frac{1}{(1{,}5-1)\left(\frac{1}{10} - \frac{1}{40}\right)} = \frac{1}{0{,}5\left(\frac{40-10}{400}\right)} =$$

$$= \frac{400}{15} = 26{,}66 \text{ cm.}$$

Formul (23) annab:

$$\frac{f}{d} = \frac{\text{kujutuse suurus}}{\text{asja suurus}} = \frac{10}{1}; \text{ ehk } f = 10d,$$

kus f on kujutuse ja d on asja kaugus läätsast.

Formuli (20) järele on:

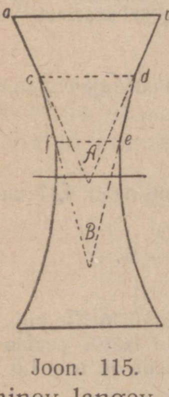
$$d = \frac{fF}{f-F} = \frac{10dF}{10d-F}$$

ehk: $d\,(10d - F) = 10dF$ ja $10d - F = 10F$; $10d = 11F$;

$$d = \frac{11}{10}F = \frac{11}{10} \cdot 26{,}66 = 29{,}326 \text{ cm.}$$

Kujutuse kaugus läätsast on $f = 10d = 11F =$ **293,26** cm.

§ 38. **Murdumine kaksiõõnesläätsas.** 1) Sarnaselt nagu see kirjeldatud § 31 vôime ka siin ôônesläätsa iga osa peale vaadata kui prisma peale, mille murdev nurk nüüd on läätsa telje poole sihitud. Joonistusel 115 kujutatud läätsalôige näitab, et äärmisele jaole abcd vastav prisma abA murrab kiiri nurgaga A. Järgmisele läätsajaokesele cdef vastab prisma cdB, mille murdev nurk B on väiksem kui A. Kui kogu lääts niiviisi prismadeks jaotada, siis selgub, et prismade murdvad nurgad on seda väiksemad, mida lähemal läätsateljele seisab vastav läätsajagu. Et aga prisma kiiri seda enam oma aluse poole murrab, mida suurem on tema murdev nurk (§ 26), siis k a l d u v a d õ õ n e s l ä ä t s a s m u r t u d k i i r e d s e d a k a u g e m a l e l ä ä t s a t e l j e s t, m i d a k a u g e m a l l ä ä t s a k e s k k o h a s t s e i s a b k i i r e l a n g e m i s p u n k t.

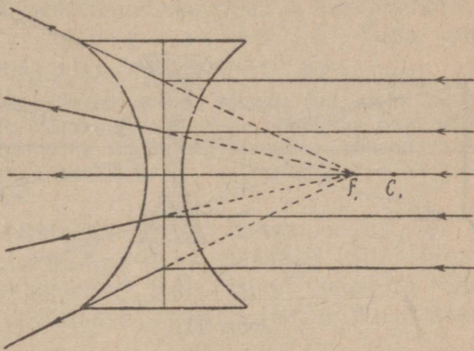


Joon. 115.

Kui kiirtejoa äärmised kiired enam laiali murduvad kui keskmised, siis muutub laialiminev langev kiirtejuga peale murdumist veel e n a m l a i a l i m i n e v a k s; paralleelselt langevad kiired muutuvad laialiminevateks jne.

Missugune ka ei oleks langeva kiirtejoa iseloom, murtud kiired ei lõika kunagi õõnesläätsa telge; küll aga võivad kõigi, ühest valguspunktist väljatulnud kiirte pikendatud murtud sihid lõikuda ühes punktis, sünnitades seal õ õ n e s l ä ä t s a f o o k u s e, mis olla võib ainult i m a g i n a a r n e. F o o k u s a s u b a l a t i õ õ n e s l ä ä t s a e e s, s. t. s a m a l p o o l l ä ä t s a k u i a s i g i.

On langev kiirtejuga paralleelne, siis jooksevad murtud kiirte pikendatud sihid kokku läätsa peafookusse F (joon. 116). Läätsa külgi moodustavate kerapindade tsentrume C_1 ja C_2 hüütakse läätsa k õ v e r u s t s e n t r u m i t e k s, läbi nende tõmmatud telge aga — läätsa o p t i l i s e k s p e a t e l j e k s.



Joon. 116.

Õ õ n e s l ä ä t s a f o r m u l i leiame kumerläätsa omast (16), kui temas r_1 asemele seada $-r_1$ ja r_2 asemele $-r_2$, tähendades negatiivse märgiga raadiuste ees seda, et läätsapinna kõverustsentrum praegusel juhusel teisel pool läätsa asub kui kumerläätsa puhul. Sarnasel teel saame formulist (16):

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=-(n-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right) \qquad 24)$$

formulist (19):

$$F=\frac{1}{(n-1)\left(\frac{1}{r_1}+\frac{1}{r_2}\right)} \qquad 25)$$

formulist (20):

$$\frac{1}{d}+\frac{1}{f}=-\frac{1}{F} \qquad 26)$$

ja formulist (21):

$$f=-\frac{F}{1+\frac{F}{d}}, \text{ kusjuures tähe F all alati} \qquad 27)$$

mõista tuleb ainult peafookuskauguse arvulist suurust.

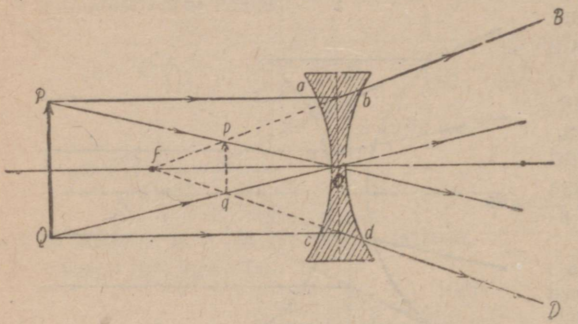
Need formulid tõestavad, et õõnesläätsa fookus tõepoolest alati l ä ä t s a e e s (vaadates kiirte sihis) peab ilmuma, sest et fookuskaugus f alati negatiivne on. Siis aga võib ta olla ainult i m a g i n a a r n e, sündides mitte kiirte eneste, vaid nende pikendatus sihtide lõikumisest.

Viimane formul näitab, et f o o k u s k a u g u s l ä ä t s a l e s e d a l ä h e m a l e n i h k u b, m i d a l ä h e m a l e a s u b v a s t a v v a l g u s e p u n k t.

T a s a õ õ n e s ja k u m e r õ õ n e s l ä ä t s murravad valgust samuti kui kaksiõõneslääts. Nende mõju kiirte peale on ainult nõrgem. Formulitest (24), (25), (26) ja (27) on kerge tuletada tasaõõnes- ja kumerõõnesläätsa formulid, kui kõverusraadiuste tähendusi nendes vastavalt muuta (§ 35).

Kõik õõnesläätsad h a j u t a v a d v a l g u s t, s. t. murtud kiirtejuga on alati enam laialiminev kui langev kiirtejuga. Sellepärast nimetatakse õõnesläätsi ka h a j u m i s l ä ä t s a d e k s.

§ 39. **Asjade kujutus õõnesläätsadel.** Ka siin võib tõestada, et igal õõnesläätsal on oma optiline tsentrum, millesihitud kiir pääseb murdumatult läbi läätsa. Tundes läbi peafookuse sihitud ja optilisele peateljele paralleelse kiirte teid, oskame leida antud valgusepunkti kui ka kogu asja kujutust.

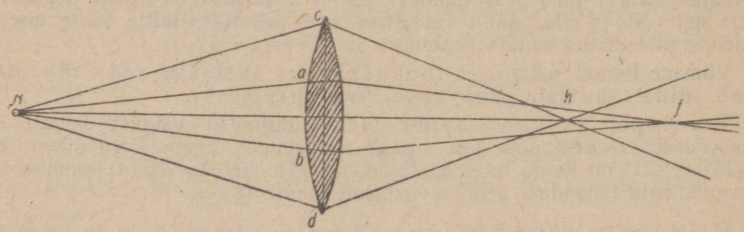


Joon. 117.

Joonistusel 117 olgu kujutatavaks asjaks nool PQ. Punktis P tulev kiir PO läheb sirgjooneliselt läbi optilise tsentrumi O. Sealtsamast tulev kiir Pa murdub nii, et tema sihi pikendus läheb läbi peafookuse F, sihis FbB. Sihtide PO ja FB lõikepunkt p annabki punkti P ebakujutuse. Samuti leiame punkt Q ebaku jutuse q ja kogu noole QP imaginaarse pildi pq. Kiirte käigust selgub, et **õõnesläätsa kujutus peab igal juhuses olema imaginaarne ja vähendatud pärikujutus, mis samal pool läätsa asub kui asigi.** Vaadates asja läbi õõnesläätsa, näeme tema kujutust läätsa taga seda kaugemal ja seda väiksemana, mida kaugemal seisab asi.

Võrreldes läätsi sfääriliste peeglitega, selgub, et kumerläätsad on sarnased õõnespeeglitega, sest et mõlemad koondavad valgust; selle vastu on aga õõnesläätsad sarnased valgust hajutavate kumerpeeglitega.

§ 40. **Läätsade sfääriline aberratsioon.** Läätsa formul (16) tuletati oletusel, et kõik kiired on tsentraalsed. Kui viimane tingimus mitte täidetud ei ole, s. t. kui kiired langevad suure läätsa peale võrdlemisi kaugel tema teljest, siis ei ole läätsa formul mitte kõigi kiirte jaoks maksev: läätsa ääre peale langevad kiired — n. n. äärkiired — lõikavad optilist peatelge seda lähemal läätsale, mida äärepoolsemad nad on.



Joon. 118.

Joonistusel 118 ilmub tsentraalsete kiirte Aa ja Ab fookus harilikus kauguses f, kuna aga äärkiired Ac ja Ad lõikavad peatelge kuskil lähemal läätsale (punktis h). Ühe fookuse asemel saame nii siis terve rea fookuseid punktide f ja h vahel. Kui selle koha peal ekraan hoida, siis ilmub viimasel valgusepunkti A kujutus mitte punktina, vaid väikese ümmariku täpina. Viimane on seda suurem, mida suurem on läätsa läbimõõt ja mida kumeramad tema pinnad. Teadagi ilmub ekraanil punkti asemel samasugune täpp ka asjapinna iga punkti kujutusena. Kõik need täpid lasuvad jaoti teineteise peal ja sünnitavad sellepärast segaste piirjoontega asjapildi. Seda nähtust hüütakse sfääriliseks aberratsioon'iks.

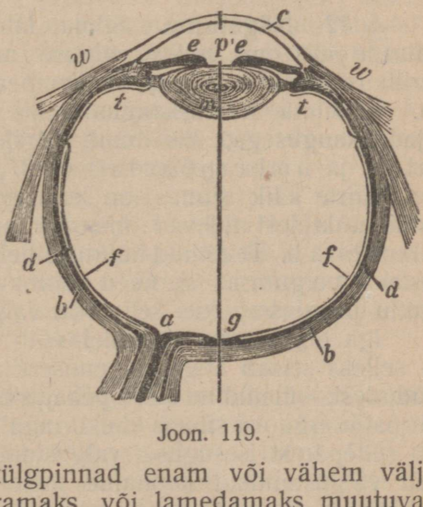
On teada, et lihtsa päevapildiaparaadiga võimatu on saada „teravaid" pilte, kui ülesvõtteid teha täie läätsaavausega. Selle põhjuseks ongi sfääriline aberratsioon. Diafragmaga võime äärkiri kinni pidada ja sellega vähendada aberratsiooni mõju. Mida väiksem on diafragma, seda tsentraalsemad on kiired ja seda teravamad pildi piirjooned.

On võimalik kombineerida kahte läätsa niiviisi, et kõik kiired selles läätsade süsteemis peaaegu ühte fookusse murduvad. Niisugune kokkuseatud lääts annab teravaid pilte ka täie avausega. Teda nimetatakse aplanaadiliseks läätsaks.

Peatükk IV.

Silm ja nägemine.

§ 41. **Inimese silm** on ümberringi kaetud kõva nahkkestaga b (joon. 119), mille väljastpoolt nähtavad osad w-w on tuntud nimetuse all silmavalge. Eestpoolt küljest on see väliskate vähe kumeram ja läbipaistev, — teda hüütakse seal sarvkileks c. Sarvkile taga asub n. n. värvkile (Jris) e-e, mille keskkohas on ümmarik avaus p — silmatera (Pupille). Otse viimase taga seisab läbipaistev läätsakujuline keha m, n. n. silmalääts. Silmaläätsa serva ümbritseb ringkujuline pael, mille pingutus muutuda võib sellekohaste musklite t mõjul. Ühes paela pingutamisega saab elastne silmalääts kas enam või vähem kokkusurutud, mille tõttu tema külgpinnad enam või vähem väljapainduvad ja sellega kumeramaks või lamedamaks muutuvad.



Joon. 119.

Väljastpoolt vaadates näeme seega igas silmas kõige pealt valget nahkkesta w-w, selles ümmarikku sinist, halli või pruuni värvkilet e ja viimase keskkohas musta „silmaterana“ paistvat avaust p.

Silmalääts jagab silma siseruumi kaheks, üks-teisest eraldatud kambriks. Välise sarvkile ja silmaläätsa vaheline kamber on täidetud vedela kehaga, — n. n. klaaslimaga. Tagumist suuremat kambrit täidab läbipaistev süldisarnane aine, — n. n. klaaskeha.

Läbipaistvate silmaosade murdumiseksponent on mitmesugune: kõige suurem on ta silmaläätsas (1,437) väiksem tagumise kambri klaaskehas (1,348) ja veel väiksem esimese kambri klaaslimas (1,342).

Seestpoolt on silma nahkkest kaetud n. n. soonkilega (d), mille musta pinna peal asub nägemisergu õhuke võrk f-f, mida nimetatakse võrkkileks (Retina). Nägemiserk ise tuleb silma a juures. Ta jaguneb ülipeenikesteks kiududeks, mis punktist a soonkile pinda mööda igale poole laiali lähevad, sünnitades seal nimetatud võrkkile. Ergukiudude otsadel on iseäralik kuju: mõned nendest kujutavad väikseid silindrilisi pulgakesi, teised aga pudelisarnaseid kolbikesi. Need pulgakesed ja kolbikesed õieti moodustavadki võrkkile valgustundliku kihi.

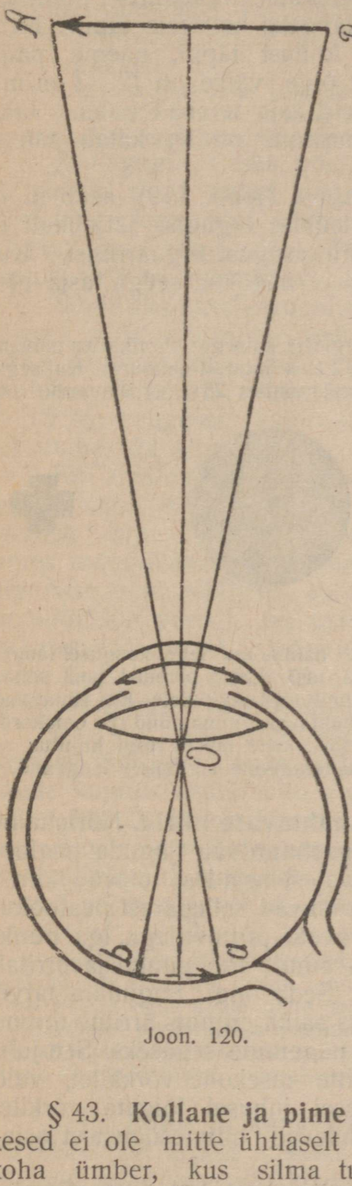
Pulgakesed valmistavad iseäralikku purpur-punast värviainet, mis ülitundlik on valguse vastu: elava looma juures kaotab ta valguses otsekohe oma punase värvi, muutub aga pimedas ruttu jällegi punaseks. See purpurvärv on väga sarnane päevapildi plaadi broomhõbekihiga: nagu seal, nii jääb ka silma võrkkilel jälg järele igast valguskiirest, mis langeb valgustundliku kihi peale. Tapetud loomade võrkkilel nähakse mõnikord varsti peale surma välisasjade valget pilti punasel põhjal.

§ 42. **Nägemine.** Silma läbipaistvad osad moodustavad läätsade süsteemi, milles valguse murdumine sünnib samuti kui harilikus koondusläätsas, mille peafookuskaugus umbes 15 mm on. Et silma fookuskaugus väike on võrdlemisi vaadeldavate asjade kaugusega, siis ilmub võrkkilel viimaste kujutus vähendatult ja ümberpöördult (§ 37_1).

Kiirte käik silmas on kujutatud joonistusel 120. Asja AB pinnapunktidest tulevad kiired murduvad silmas ja koonduvad fookustes a b. Tekkinud kujutuse heledad kohad ärritavad võrkkile vastavaid erguotsakesi, need kannavad seda ärritust nägemisergu kaudu peaajusse, kus selletõttu valgustunne tekib.

Iga erguotsake võrkkilel võib üksikult mõjuda peaaju peale, — selleks seisab kogu nägemiserk koos väga paljudest üksikutest kiududest,—üleüldine mõju peaajus oleneb siis sellest, missugused ja kui palju erguotsi silmas ühekorraga ärritusid. Iga pilt võrkkilel tekitab sellepärast isesuguse valgustunde peaajus. Neid mitmesuguseid valgustundeid kanname meie oma kogemuste ja harjumise põhjal üle vastavate asjade peale, lugedes viimaseid valgustunnete otsekohesteks põhjusteks: meie ei „näe“ mitte võrkkilel ilmuvat pilti, vaid otse teda sünnitavat asja.

Kui mingi koht võrkkilel ärritub sinna langeva valguse mõjul, siis tuleme teiste meelte, iseäranis katsumismeele abil otsusele, et vastav asi, millest „ärritus“, s. t. valgus, välja tuleb kas paremal või pahemal pool, üleval või all asub. Selle põhjal „näeme“ siis, et valgusallik kas paremal või pahemal pool, kõrgel või madalal seisab, vaatamata selle peale, et võrkkilel pilt otse ümberpöördult ilmub. Samuti kanname üle mitmesuguse kujuga kehadelt saadud muljed otse nende kehade peale. Lapsest saadik tunneme näiteks seda valgusmuljet, mida sünnitab meis ümmarik keha. Iga kord, kui meis nüüd tekib niisugune valgustunne, teame meie juba ilma katsumata, et vastav keha ümmarik peab olema: meie „näeme“ keha kuju, olgugi et võrkkilel ilmunud pilt peaajule mingisugust otsekohest märki ei anna keha ulatuse kohta ruumis. Liikudes oleme tähele pannud, mil viisil sellejuures ümberseisvatelt asjadelt saadud valgusmuljed muutuvad; võrreldes neid mälestusi vaatlemise juures, „näeme“ asja kaugemal või lähemal ruumis jne.



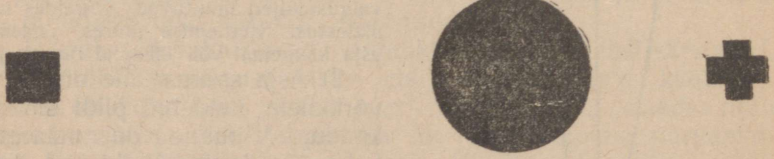
Joon. 120.

2) Asja suuruse üle otsustame võrkkilele heidetud pildi suuruse kaudu. Viimane on määratud keha äärmistest punktidest tulevate kiirtega, — n. n. vaatamisnurgaga AOB (joon. 120). Niikaua, kunni võrreldavad asjad seisavad ühekaugusel silmast, on vaatamisnurk proportsionaalne asja suurusega, nii et meie otsekohe selge ettekujutuse saame asjade suuruste vahekorrast. Asja kaugenemisel aga väheneb tema vaatamisnurk; seega võib kaugemal seisev suur asi samasuure kujutuse võrkkilel anda kui lähedal seisev väike asigi. Sel puhul võime jällegi ainult oma kogemuste abil otsustada asjade suuruste üle.

§ 43. **Kollane ja pime täpp.** Erguotsade pulgakesed ja kolbikesed ei ole mitte ühtlaselt ärajaotatud üle kogu võrkkile: selle koha ümber, kus silma tuleb nägemiserk (a, joon. 119), on koondatud rohkem kolbikesi, kuna võrkkile äärmistes osades ülekaal on pulgakestel. Ka mõlemate tihedus ei ole mitte ühesuurune üle kogu võrkkile. Kui silmaläätsa telge pikendada kunni võrkkileni, siis leiame lõikepunkti g ümber väikese pleki, millel tihedalt on koondatud ainult kolbikesed. Seda kohta nimetatakse tema värvi järgi kollaseks täpiks. Ta on kogu võrkkiles kõige valgustundlikum koht. Teravamal vaatlemisel pöörame silma nii, et vaadeldud asja kujutus langeks kollasele täpile. Neid asju, mille kujutus ilmub väljaspool kollast täppi, näeme palju halvemini. Et kollase täpi läbimõõt õige väike on (2—3 m/m), siis võime korraga ainult õige väikseid asju teravalt näha. Juba seesuguse asja kujutus, mille vaatamisnurk on 1^0, katab täiesti kogu kollast täppi.

2) Nägemisergu sissetuleku kohas a (joon. 119) asub n. n. pime täpp. Selles kohas ei leidu üleüldse erguotsi, järjelikult ei sünnita tema peale langev valgus mingisugust erguärritust. Kui kujutus langeb pimedale plekile, siis ei näe me seega asja üleüldse mitte.

Pimeda täpi olemasolu võib tõestada järgmise katsega: kinnikattes pahema silma, vaatame paremaga teravalt joonistusel 121 kujutatud nelinurka. Kui aegamööda pääd tõsta, siis kaob teataval kaugusel (umbes 25 cm.) ümmarik ring



Joon. 121.

üsna ära, kuna temast paremal pool seisav rist nähtav on. Sellel kaugusel langeb musta ringi kujutus otse meie silma pimeda täpi peale; paremal pool seisva risti kujutus aga satub kõrvalolevale valgustundlikule võrkkilele. Kui silma veel kõrgemale tõsta, siis saab must ring uuesti nähtavaks, kuna nüüd rist omakorda ära kaob: nüüd asub risti kujutus pimedas täpis, kuna musta ringi kujutus on vähe kõrvale nihkunud ja seega uuesti valgustundlikule võrkkilele langenud.

§ 44. **Akkomodatsioon ja asja nähtavuse piirid.** Normaalne silm on niiviisi ehitatud et tema valgustmurdvate jagude peafookus otse võrkkilel asub. Kaugelseisvatest asjadest tulevad kiired paralleelselt silma, nende kujutused ilmuvad sellepärast peafookuses ja võrkkilele heidetud pilt on teravate piirjoontega. Iga punkt asjapinnal annab sel puhul kujutuses ainult ühe punkti ja ärritab seega ainult ühte erguotsakest. Seda ongi tingimata tarvis selgelt nägemiseks. Nii pea kui üks ja sama erguots ärritub mitme asjapinnapunkti poolt, muutub meie nägemine segaseks. See juhtub siis, kui asja kujutus ei ilmu mitte otsekohe võrkkilel, vaid tema ees või taga, võivad ju sarnasel juhusel lõigata vôrkilet ühes ja samas punktis kiired, mis tulevad mitmesugustest asjapunktidest.

Oleks silmalääts kôva keha, siis ilmuksid kõigi lähedalseisvate asjade kujutused tagapool võrkkilet (§ 34) ja lähedaid asju ei võiks meie üleüldse selgelt näha. Tõepoolest võime aga tarbekorral silmaläätsa kumerust muuta, nii et mistahes kaugusel seisva asja kujutus otse võrkkilele satub. Seda nähtust nimetatakse akkomodatsiooniks. Vaadates mõnda lähedal seisvat asja, muutub silmalääts vastavate musklite abil vähe kumeramaks, kiired murduvad temas järsumalt ja kujutus nihkub võrkkile tagant otse võrkkilele.

Sellest selgub, miks lähedalt vaatamine enam väsitab, kui kaugelt vaatamine: kuna silmalääts ainult kaugele vaatamisel viibib omas loomulikus olekus, siis puhkavad tema kumerust muutvad musklid ainult sellel juhusel.

2) Olgugi, et silm võib näha nii kaugeid kui lähedaid asju, on olemas siiski teatud kaugus, mille juures me harilikul valgustusel kõige kergemini näeme. Seda kaugust hüütakse selgelt nägemise kauguseks. Tema juures loeme harilikult, kui valgustus on hea; normaalse silma jaoks on ta umbes 25 cm.

Silma akkomodatsioonivõimel on omad piirid. Kõige väiksem kaugus, mille juures me veel selgelt näha suudame, oleneb silma läätsa painduvusest. Mida noorem on inimene, seda painduvam on tema silmalääts; sellepärast võivad lapsed veel selgelt näha 8—10 cm kaugusel, kuna vanadel see võimalik on ainult algades umbes 22 sentimeetrist.

Kui nimetatud sai, et normaalne silm ka lõpmata kaugele selgelt näha suudab, siis ei tähenda see veel, et me kõiki nii kaugeid asju tõepoolest näeme. Peale valgustuse on selle juures mõõduandev asja suurus. Just viimane määrab ära meie nägemise piiri: selleks, et asi nähtav oleks kui niisugune (ja mitte kui punkt), on tarvis, et tema kujutus võrkkilel kataks vähemalt 2 kõrvutiseisvat erguotsakest. Vastasel korral ärritaks ta ainult ühte erguotsa ja peaajus sünniks viimase kaudu niisugune valgustunne, nagu oleks kogu asi ainult punkt.

Ka seal, kus erguotsad on kõige tihedamini koos, s. o. kollases täpis, on nende vahe siiski nii suur, et ainult nende asjade kujutus katab mitu erguotsa mille vaatamisnurgad on suuremad kui 1'. Sellest järgneb, et me kehadena näha võime ainult neid asju, mis meile paistavad suurema vaatamisnurga all kui 1'. Et vaatamisnurk suureneb asja lähenemisel, siis paistavad meile kauged asjad alguses punktina; lähenedes aga suureneb vaatamisnurk ja me näeme ikka enam ja enam asja kontuure.

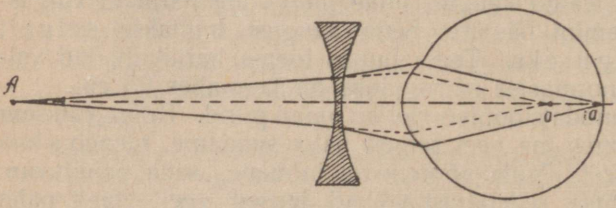
Silmale üsna lähedal olevaid asju võime eelpoolkirjeldatud asjaolu tõttu ka ainult siis näha, kui nende suurused võimaldavad vähemalt 1'-lise vaatamisnurga. Et me silma asjale mitte piiramata ei saa lähendada, siis on nähtavus ka sel juhusel piiratud asja suurusega. On asi nii väike, et me teda ka kõige lähemalt vaadates ei näe, siis suurendame kunstlikult vaatamisnurka, tarvitades selleks suurendusklaasi, mikroskoopi jne.

§ 45. **Lühi- ja kaugenägemine.** On olemas silmi, milles kaugelseisvate asjade kujutus heitub võrkkile ette, nii et ainult lähemad asjad otse võrkkilel kujutuvad.

Arusaadavalt ei või seesugune lühinägemisega silm kaugeid asju selgelt näha. Temas on silmalääts mingisugustel põhjustel liiga kumeraks muutunud, mille tõttu silma peafookus võrkkile ees asub. Et silmaläätsa kumerus akkomodatsiooniga ainult suureneda, seega tema peafookuskaugus ainult väheneda võib, siis ei suuda silm ise seda viga parandada.

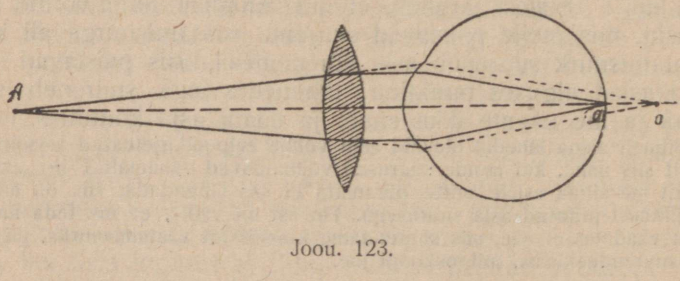
Kunstlikult kõrvaldub lühinägemine õõnesläätsa või õõnesprillide abil.

Asetades silma langevate kiirte teele õõnesläats, muutuvad kiired viimases enam laialiminevateks, nii et nende fookus a kaugemale silmaläätsa taha nihkub (joon. 122). Läätsa parajal kumerusel annavad siis kaugelt asjalt tulevad paralleelsed kiired võrkkilel teravjoonelise pildi, ilma et silmalääts akkomodeerida tarvitseks. Lähemate asjade kujutuse juhib siis silm ise akkomodeerimisega võrkkilele.



Joon. 122.

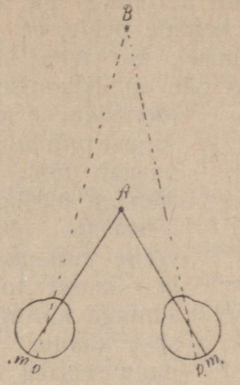
2) Kaugenägemise puhul on silmalääts lamedam kui normaalses silmas. Paralleelselt tulevad kiired murduvad temas liiga vähe, nii et nende lõikepunkt seisab võrkkile taga. Sellepärast peab sarnane silm akkomodeerima (s. t. läätsa kumeramaks muutma) juba kaugelseisvate asjade vaatamisel. Et aga akkomodeerimise võime on piiratud, siis jäävad lähedalseisvate asjade kujutused — vaatamata akkomodeerimise peale — ikkagi võrkkile taha, ja nende nägemine on segane.

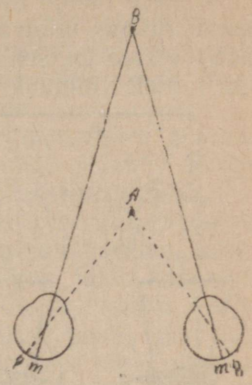


Joou. 123.

Kaugenägemist võib parandada kumerläätsa või kumerprillide abil. Joonistusel 123 kujutatud skeemil murduvad kiired juba enne silma kumerläätsas vähe koomale, nii et punkti A kujutus silmaläätsa loomuliku kuju juures võrkkilel ilmub. Läbi niisuguse prilli näeb kaugenägemisega silm ka lähedal olevaid asju selgelt.

§ 46. **Nägemine kahe silmaga; stereoskoop.** Joonistusel 124-a kujutagu m ja m^1 pahemat ja paremat silma. Vaadates punkti A peale, pöörame alati mõlemad silmad nii, et silmateljed Am ja Am^1 lõikuksid selles punktis. Niisuguse seisu juures langeb punkti A kujutus mõlemas silmas otse kollasele täpile, asub ju viimane silmateljel (§ 43).


Joon. 124-a


Joon. 124-b.

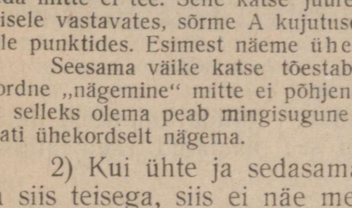
Vaadates mõlema silmaga punkti B peale (joon. 124-b), pöörame silmi nii, et nende teljed jällegi vaadatud punktis lõikuksid, s. t. et B kujutused m ja m^1 jällegi kollasel plekil ilmuksid.

Olgugi, et vaadatud punkti kujutus kummagis silmas eraldi, s. t. kaks korda ilmub, näeme meie teda ainult ühekordselt. Katsed näitavad, et meie ainult sel puhul ühekordselt näeme, kui asja kujutused mõlemas silmas üks-teisele vastavatele võrkkilepunktidele (näiteks kollasele täpile) langevad.

Seda võib tõestada lihtsate katsetega: hoiame, näiteks sõrme punktis A (joon. 124-b), ja vaatame teravalt kaugemal seisvat punkti B: sõrm paistab meile kahevõrdselt. Joonistusest selgub, et sõrme kujutus (p) ilmub ühes silmas pahempool kollast plekki, teises silmas aga—paremal pool. Punktid p ja p^1 ei ole mitte teine-teisele vastavad võrkkilekohad: kui, näiteks, mõlema silma lõiget nii üks-teise peale asetada, et silmade optilised teljed ühte langeksid, siis katavad teine-teist küll mõlema silma kollased täpid, kuna aga punktid p ja p^1 seda mitte ei tee. Selle katse juures ilmuvad nii siis punkti B kujutused teineteisele vastavates, sõrme A kujutused aga teine-teisele mittevastavates võrkkile punktides. Esimest näeme ühekordselt teist aga kahekordselt.

Seesama väike katse tõestab ka, et silmades ilmuvate kujutuste ühekordne „nägemine“ mitte ei põhjene meie kogemuste või harjumuse peal, vaid et selleks olema peab mingisugune sisemine põhjus, sest muidu peaksime alati ühekordselt nägema.

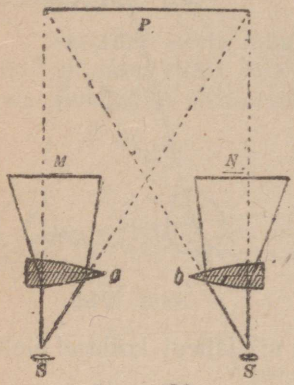
2) Kui ühte ja sedasama asja vaadata esiteks ühe silmaga, ja siis teisega, siis ei näe meie mõlemal juhusel mitte ühesugust pilti; parem silm näeb rohkem asja paremat külge (b) (joon. 125), pahem silm aga rohkem tema pahemat külge (a). Kui asja vaadata korraga mõlema silmaga, siis näeme teda ühekordselt, ja nimelt kehana ruumis. Ainult kahe silmaga vaadates võime selgelt vahet teha keha lähemate



Joon. 125.

ja kaugemate pindade vahel, niiet meei ruumi õieti ära tunda vôime ainult niisuguse vaatamisega.

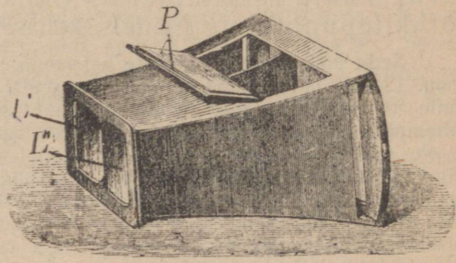
Meie oleme niivõrd harjunud iga sarnast valgusmuljet ülekand ruumis viibivate kehade peale, et me ruumi täitvat keha näha võime ka sel juhusel, kui teda üleüldse olemaski ei ole. On nimelt võimalik kas päevapildistamise või lihtsa perspektiivse joonistamise abil valmistada kaks niisugust pilti ühest asjast, nagu viimane paistab meile vaatamisel ühe ja teise silmaga üksikult (näiteks, joon. 125). Vastavate abinôudega (prismadega) võime môlema pildi kujutusi heita ühte ja samasse kohta. Kui nüüd mõlema silmaga korraga neid kujutusi vaadata, siis saame sarnase valgusemulje, nagu seisaks kujutuste asemel asi ise kehana ruumis.



Joon. 126.

Olgu m ja n (joon. 126) kaks kirjeldatud pilti. Läätspinnaliste prismade a ja b läbi näeme môlema pildi kujutust ühes ja samas kohas P; selle juures on saadud mulje niisugune, nagu seisaks punktis P piltide asemel ruumi täitev keha.

Kirjeldatud aparaati hüütakse stereoskoobiks. J. 127 kujutab stereoskoopi pealt vaadates. Läätspinnalised prismad L¹ ja L'' on kinnitatud kasti avaustesse. Pildid asetatakse vastasseisva kasti põhja külge, mida valgustada võib peegli P abil. Kasti sees olev vahesein hoiab ära, et pahemalt pildilt ükski valguskiir ei peaseks paremasse silma, ja ümberpöördult. Piltide kujutused ilmuvad kuskil kastipõhja taga, nii nagu see näidatud skemaatilisel joonistusel 126.



Joon. 127.

§ 47. **Valguse mulje kestvus.** Katsed tõestavad, et valgustunne meis mitte otsekohe ei hävine ühes valguse enese kustumisega, vaid et meie veel umbes $^1/_7$ sekundi jooksul peale selle „näeme". See tähendab, et nägemisergu ärritus nii kaua edasi kestab peale valguse kustumist.

Teatavasti ei näe meie kiirelt liikuvat asja ennast, vaid kogu tema liikumisteed. Tiirutades näiteks hôôgavat sütt traadi otsas, ei näe meie muud, kui katketut hõõgavat ringjoont, mida mööda süsi liigub. See nähtus on seletatav ülevalnimetatud valgusemulje edasikestvuse põhjal peale valguse kustumist: kuna liikuv süsi igas seisus meis valgusemulje tekitab, mis $^1/_7$ sekundit edasi kestab, siis läheb ta selle aja jooksul juba läbi mitme teise ruumipunkti, sünnitades meis ikka uusi ja uusi valgusmuljeid. Nii võib juhtuda et tervel ringil sündinud valgusemuljed veel ühel ajal meis edasi kestavad: meie näeme siis seda ringi, nagu kiirgaks iga tema punkt ühel ajal valgust välja.

Selle silmaomaduse peal põhjenevad mitmesugused aparaadid, mille abil sünnitada võib n. n. „liikuvaid pilte". Kõige tähtsamaga nendest, tuntud kinematograafiga tutvuneme § 55_2.

Valgusemulje kestvus oleneb valgustuse tugevusest. Eelpool nimetatud $^1/_7$ sekundit on maksev ainult hariliku, keskmise valgustuse puhul. Väga intensiivne valgus jätab kauemalt kestva mulje, nõrk valgus aga lühemat aega kestva ärrituse. Kui palja silmaga vaadata selge päikse peale, siis saab silm „pimestatud": erguotsade ärritus kestab siin pikemat aega, mille jooksul silm uusi valguseärritusi muidugi mitte vastu ei saa võtta ja nii siis ka asju ei näe.

§ 48. **Värvide nägemine**. Peale valguse intensiivsuse teeb meie silm veel vahet tema värvis. Värvide nägemist seletab Helmholtzi ja Young'i loodud teooria järgmiselt: võrkkiles leidub 3 liiki erguotsakesi: esimesed nendest tekitavad iseäralist valgustundlikku ainet, mille lagunemine valguse mõjul meis välja kutsub punase värvi tunde; teised sünnitavad ainet, mille lagunemine rohelise ja kolmandad niisugust, mille lagunemine sinise värvi tunnet meis tekitab. Kui kõik ained ühekorraga ja ühevõrra lagunevad, siis saame valge värvi tunde.

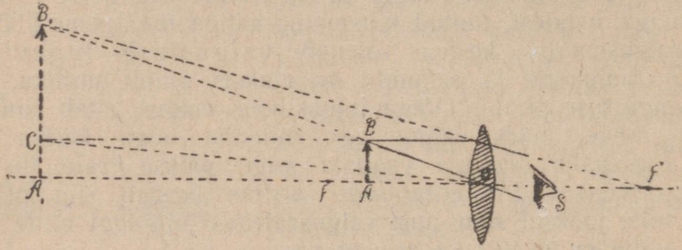
Nimetatud ainete lagunemist ei tekita aga mitte igasugune valgus ühevõrra: punase valguse mõjul laguneb kõige rohkem esimene aine, rohelise mõjul—teine ja sinise valguse mõjul kolmas aine. Vahepealse värviga valgus kujutab ainult nende kolme põhivärvi segu ja lahutab sellepärast kahte ehk koguni kõike kolme valgustundlikku ainet korraga. Sellest saadud mulje asub siis vastavate põhivärvide muljete vahel ja meie näeme nende segavärvi.

2) Nimetatud teooria abil on seletatav n.n. subjektiivsete värvide nägemine. Nii hüütakse neid värvitundeid, mis tekivad meis, ilma et meie silma langeks vastav värviline valgus. Igaüks on tähele pannud, et punase lambi juurest päevavalgusele tulles, kõik valged asjad paistavad rohekana: viibides pikemat aega punasel valgusel laguneb kõik see aeg ainult punasetundlik erguaine,—teda väljatöötavad organid väsivad ja võrkkile muutub vähem tundlikuks punase värvi vastu. Valges valguses peituvad punased kiired ei mõju siis vimase peale enam nii tugevasti kui vastavad rohelised ja sinised kiired, nii et saadud üleüldine mõju kaldub rohelise ja sinise poole. Meile paistab nagu sisaldaks valge valgus nüüd enam rohelisi ja siniseid kiiri kui harilikult ja näeme sellepärast valget pinda rohekana.

Peatükk V.

Optilised aparaadid.

§ 49. **Suurendusklaas ehk luup.** 1) Kui silma juures hoitud kumerläätsa L läbi mõnda väikest, teisel pool läätsa seisvat asja AB vaadata, siis näeme viimase suurendatud ebakujutust A'B' (joon. 128). § 37, III järele peab selleks asi läätsa ja tema peafookuse F vahel seisma. Lääts hoitakse niisugusel kaugusel asjast, et silm suurendatud kujutust A'B' selgeltnägemise kaugusel S = OA' näeks, sest ainult siis võime kujutust kõige selgemini ja hõlpsamini vaadata. Harilikult tarvitatakse suurendusklaasina ehk luubina väikese fookuskaugusega kummerläätse (F = 12 — 50 mm.)



Joon. 128.

2) Luubi suurenduseks nimetatakse arvu, mis ära määrab, mitu korda läbi luubi paistva kujutuse A'B' vaatamisnurk (§ 44_2 ja 44_3) suurem on kui palja silmaga vaadatud ja samal selgelt nägemise kaugusel seisva asja enese vaatamisnurk. Kui selgeltnägemise kaugus on S cm ja läätsa peafookuskaugus Fcm, siis on luubi suurendus v:

$$v = \frac{S}{F} + 1 \qquad 28).$$

Tõestus: Et silm läätsa ligidal seisab, siis võime hõlbu pärast oletada, et ta punktis 0 asub. Kui asi ise kujutuse A^1B^1 kaugusel seisaks, siis oleks ta nähtav vaatamisnurga $C0A^1$ all. Seega on luubi suurendus

$$v = \frac{A^10B^1}{A^10C} = \frac{tg\,A^10B^1}{tg\,A^10C}$$

sest et nurgad väiksed on.

Joonistusest selgub et $tg\,A^10B^1 = A^1B^1 : A^10$ ja

$$tg\,A^10C = A^1C : A^10 = AB : A^10, \text{ sest et } A^1C = AB.$$

Seega on

$$v = \frac{A^1B^1 : A^10}{AB : A^10} = \frac{A^1B}{AB} = \frac{A^10}{A0} = \frac{\text{kujutuse suurus}}{\text{asja suurus}}; \qquad 29)$$

Formuli 20 järele on $\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}$; käsitatud juhusel on

$$f = -A^10 = -S,\ d = A0, \text{ nii siis}$$

$$\frac{1}{A0} = \frac{1}{S} + \frac{1}{F} = \frac{S+F}{SF}$$

võrreldes seda formuliga (29), näeme, et

$$v = \frac{A^10}{A0} = \frac{S}{A0} = \frac{S+F}{F} = \frac{S}{F} + 1.$$

Et selgeltnägemise kaugus S iga vaatleja jaoks konstant on, siis järgneb leitud formulist: **luubi suurendus on seda**

kõvem, mida väiksem on läätsa F, s. t. mida kumeram on lääts. S on harilikult 25 cm; kui näiteks F = 3 cm, siis on suurendus

$$v = \frac{25}{3} + 1 \cong 9 \text{ kordne.}$$

Väga kumeratel läätsadel on suur aberratsioon, sellepärast ei ilmu nende kujutus enam selgelt. Kui seesuguse läätsaga siiski tahetakse selget pilti saada, siis peab vastava diafragmaga hävitama kõik äärkiired. Muidugi ilmub siis kujutus sedavõrd tumedamana.

On ka võimalik ühe läätsa asemel tarvitada mitmest läätsast kokku seatud luupi. Valides kohaselt läätsade kumerused, võime sellel teel saada üsna väikse aberratsiooniga ja kõva suurendusega luubi.

§ 50. **Mikroskoopi** tarvitatakse siis, kui nõutud on väga kõva suurendus. Kõige lihtsamas kujus moodustavad mikroskoopi kaks kumerläätsa: väiksem ja kumeram nendest Q (joon. 129) seisab vaadeldava asja AB ligidal, teda nimetatakse objektiiviks. Suurem lääts P asub silma juures, teda hüütakse okulaariks.

Objektiiv A annab vaadeldava väikese asja AB kõvasti suurendatud ümberpöördud ja reaalse kujutuse ab. Selleks peab asi allpool (kaugemal) objektiivi peafookust asuma (§ 37 II). Tekkinud reaalset kujutust ab vaadatakse nagu mõnda asja läbi okulaari P kui suurendusklaasi. Meie näeme siis ab suurendatud imaginaarset pärikujutust a"b". Et ab oli asja ümberpöördud kujutus, siis ilmub ka vaadeldav ebakujutus asja ümberpöördud pildina.

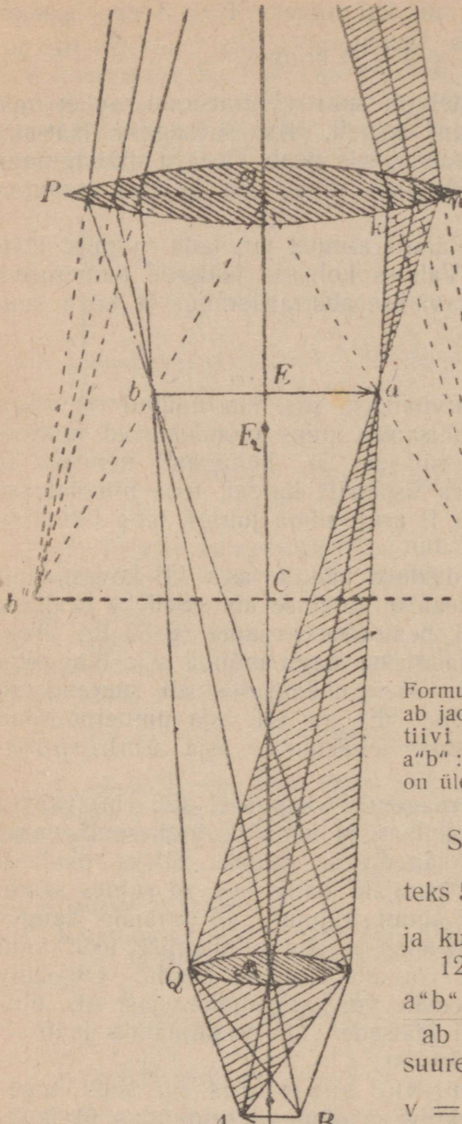
Selleks, et a"b" selgeltnägemise kaugusel (25 cm) vaatlejast võiks ilmuda, peab ab okulaari ja tema peafookuse F_2 vahel seisma, ja nimelt viimase läheduses. Selleks tuleks okulaari tõsta või langetada kunni ta parajale kaugusele ab suhtes satub.

Praktilistel põhjustel ei sünni kujutuse ab parajale kaugusele seadmine mitte okulaari üles ja alla nihutamise teel, vaid kogu läätsade süsteemi üles või alla tõstmise kaudu. Objektiiv nihkub selle juures kas lähemale või kaugemale asjast AB, ühtlasi liigub kujutus ab — kui läätsade vahe muutmataks jääb — lähemale või kaugemale okulaarist.

2) Mikroskoobi üleüldine suurendus on seda tugevam, mida tugevam on objektiivi ja okulaari suurendus üksikult. Arvuliselt võrdub mikroskoobi suurendus objektiivi ja okulaari suurenduste kasvatisega.

Tõestus: Joonistusel 129 on eraldi kujutatud selgeltnägemise kaugusel $0^1C^1 = 0C$ seisev asi $A^1B^1 = AB$. Asja vaatamisnurk on $A^10^1B^1$, niisama kaugel seisva kujutuse a"b" vaatamisnurk aga on a"0b". Samuti nagu luubi, nii on ka mikroskoobi suurendus v:

$$v = \frac{a''0b''}{A^10^1B^1} = \frac{a''0C}{A^10^1C^1} = \frac{tang\, a''0C}{tang\, A^10^1C^1} = \frac{a''C : 0C}{A^1C^1 : C^10^1} = \frac{a''C}{A^1C^1}$$

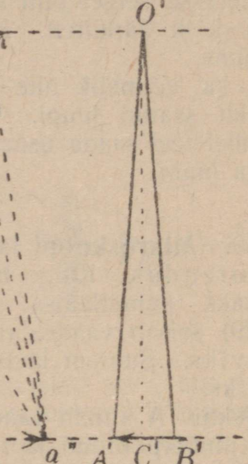


Et $A^IB^I = AB$, siis on

$$v = \frac{a''C}{A^IC^I} = \frac{a''b''}{A^IB^I} = \frac{a''b''}{AB}$$

Viimast vördsust vôime kujutada:

$$v = \frac{a''b''}{ab} \cdot \frac{ab}{AB}$$



Formuli (29) järele on kujutuse suurus ab jaotatud asjasuurusega AB — objektiivi suurendus v_1. Niisama on $a''b''$: ab — okulaarisuurendus v_2, seega on üleüldine suurendus:

$$\mathbf{v = v_1 \cdot v_2}$$

Suurendab objektiiv asja näiteks 50 korda, s. t. kui $\frac{ab}{AB} = 50$ ja kui okulaar kujutust ab veel 12 korda suurendab, nii et $\frac{a''b''}{ab} = 12$, siis on mikroskoobi suurendus

$$v = \frac{ab}{AB} \cdot \frac{a''b''}{ab} = 50.\ 12 = 600$$

Joonistus 129.

Tundes asja kangust objektiivist ja viimase peafookuskaugust vôime läätsaformulit (20) ja (23) abil välja arvata objektiivi suurenduse $\frac{ab}{AB}$. Okulaari suurenduse $\frac{a''b''}{ab}$ määrab ära formul (28) kui tuntud on vaatleja selgeltnägemise kaugus S ja okulaari peafookuskaugus.

Et saada võimalikult suurt üleüldist suurendust, peab nii objektiiv kui okulaar võimalikult tugevasti suurendama. Kuid siiski langeb suurendamise juures peaosa objektiivi peale, sest et okulaari suurendus kaunis piiratud on. Seda näeme järgmisest: kujutust ab ei saa meie okulaari läbi mitte niisama vaadelda kui mõnda tõepoolest seal viibikat asja. Kuna viimane ühest punktist (näiteks a) kiiri igale poole laiali saadab, lähevad kujutuse punktist a kiired välja ainult koonuse kan sees. Asja kujutust a"b" näeme ka siis, kui okulaari ette asetame üsna väikse auguga diafragma, sest et mõned kiired punktist a langevad ikkagi läbi diafraagma. Okulaari ees seisva kujutuse punktist a aga ei pääse kiired üleüldse meie silma kui diafragma avaus kunni punktini k ei ulata — langevad ju muidu kõik punktist a välja tulevad kiired (koonuse kan sees) diafragma seinale. Sarnasel puhul ei näe meie punkti a.

Sellest järgneb et okulaari ees seisev diafragma ära varjab kujutuse ab, äärmised punktid, — ta vähendab mikroskoobi nägemisvälja. Et see mitte soovitav ei ole, siis ei või meie okulaari ees väikest diafragmat tarvitada. Selle tagajärjel peab okulaar väikese kumerusega, s. t. nõrga suurendusega olema, muidu oleks sfäärilise aberratsiooni mõju liiga segav (§ 40).

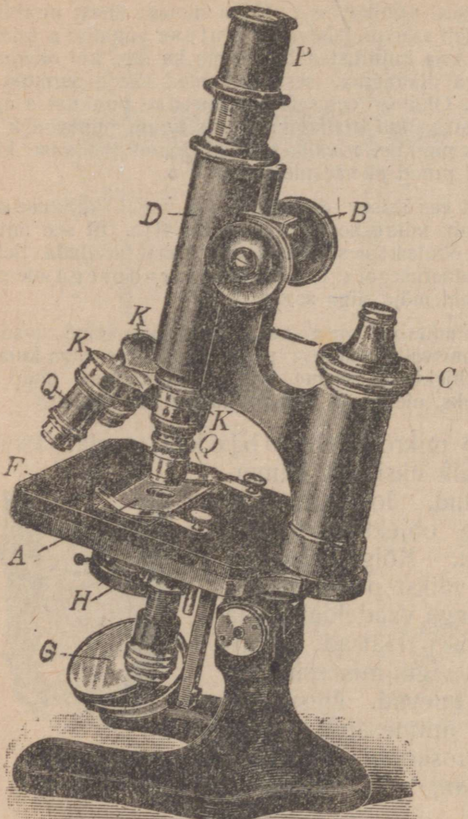
Objektiiv, selle vastu, sünnitab tõelise asja kujutuse, — teme avause suurus ei mõju sellepärast nägemisvälja suuruse peale. Tarvitades väga kumeraid ja väikese läbimõõduga objektiive, saame tugeva suurenduse, ilma et aberratsioni mõju liiga segav oleks, oleneb ju viimane läätsa läbimõõdust.

3) Tõepoolest kujutab mikroskoobi objektiiv alati tervet läätsade süsteemi, milles hulk üksikuid kumer- ja õõnesklaase on koondatud. Joonistus 130 kujutab näiteks ajakohase objektiivi lõiget; temas on tervelt 10 läätsa. Kõige esimene (alumine) nendest on ikka väikse poolkera sarnane, mis oma lameda pinnaga vaadeldava asja poole on pöördud. Järgmised läätsad parandavad aberratsiooni ja teisi vigu, mis esimeses läätsas paratamatu ilmsiks tulevad. Niisugune objektiiv üksi võimaldab mitmesaja kordset suurendamist, nii et mikroskoobi üleüldine suurendus kunni 3000 korrani võib tõusta.

Joon. 130.

Okulaar seisab harilikult koos kahest läätsast, mis samuti kui objektiivi omadki ühise lühema torukese sisse on kinnitatud. Harilikult on igal mikroskoobil mitu isesugust objektiivi ja okulaari, nii et — valides nendest kohase paari — ühe mikroskoobiga võimalik on saada igasugust suurendust.

Joonistus 131 kujutab modern mikroskoobi välist pilti. Objektiiv Q ja okulaar P on kinnitatud vertikaalse metalltoru D alumise ja ülemise otsa külge. Vaadeldav asjakene paigutatakse nelinurgelise klaastüki A peale lauakesele F, nii et ta seisaks viimase keskkohas oleva augu peal ja otse objektiivi all. Laua F alt juhitakse peegli G abil valgusjuga kumerläätsa H, — n. n. kondensaatori peale. Seal murduvad kiired, koondudes ühte punkti, mida läätsa H üles-alla liigutamise abil juhtida võib otse vaadeldava asjakese peale. Sel teel võib asja väga intentiivselt valgustada, mis kõvematel suurendustel tingimata tarvilik on, jaguneb ju asja pinnalt tulev valgus juba näiteks 100 kordse suurenduse juures $100^2 = 10.000$ korda suurema kujutuspinna üle.



Joon. 131.

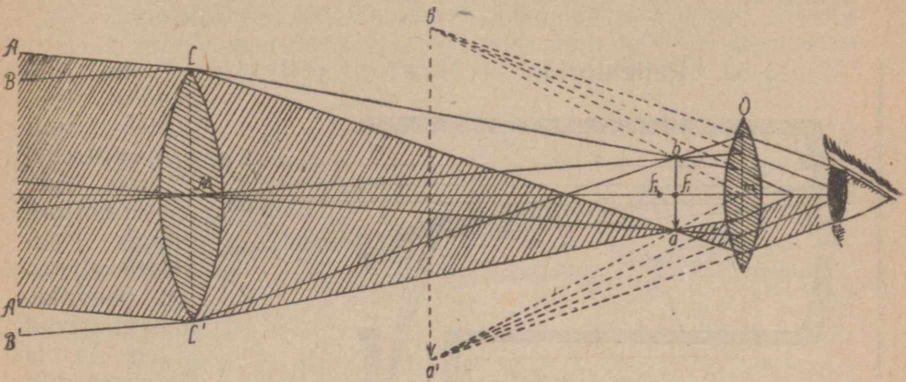
Läätsade toru D võib hammasratta B või mikromeeterkruvi C abil üles või alla lasta, nii et objektiiv Q asjast kaugemale väi lähemale nihkub. Sel teel juhitakse kujutus, ab (joon. 129) parajale kaugusele okulaarist, nii et lõpulik pilt ilmuks selgeltnägemise kaugusel.

Kujutatud mikroskoobil on 3 isesugust objektiivi Q. Nad on kôik kinnitatud iseäralise kolmnurgelise hoidja k külge, mille abil iga ühte nendest pöörata võib otse toru D alla, s. t. vaatamisseisu. Sel teel on hõlbus vahetada objektiive ja ühtlasi mikroskoobi suurendusi.

§ 51. **Refraktorid.** Teleskoope ehk astronoomilisi pikksilmi tarvitatakse kaugete, peaasjalikult taevakehade vaatlemiseks. Oma ehitusviisi poolest jagunevad kõik teleskoobid kahte liiki: refraktorid ja reflektorid. Esimestes sünnib valguskiirte sihi muutmine ainult läätsade, teistes aga jaoti ka õõnespeeglite abil. Praegusel ajal tarvitatakse peaasjalikult refraktore.

Kõige lihtsam refraktor, tema ülesleidja järele nimetatud Kepleri pikksilm seisab koos suurest objektiivist L ja väiksemast okulaarist O (joon. 132). Kaugelseisva vaadeldava asja ülemisest äärest tuleb objektiivi kiirte juga AL A'L' mida paralleelseks võime pidada. Need kiired murduvad objektiivis kokku kiirele AL paralleelsel abiteljel Ma seisvasse peafookusse, sünnitades seal asja ülemise ääre kujutuse a. Vastavalt annavad asja alumisest äärest tulevad kiired BL B'L' kujutuse b. Tekkinud ümberpöördud reaalset kujutust ab vaadatakse läbi okulaari

O kui hariliku luubi. Selgeltnägemise kaugusel näeb vaatleja pildi ab suurendatud pärikujutust ehk asja ümberpöördud kujutust a'b'.



Joon. 132.

Kujutus ab peab okulaari peafookuse F_2 ligidal seisma (F_2 ja O vahel); objektiivist L seisab ab peafookuskaugusel F_1. Seega võrdub Kepleri pikksilma üleüldine pikkus umbes tema läätsade peafookuskauguste summaga $MF_1 + mF_2 = F_1 + F_2$.

Teleskoobi suurenduseks (v) nimetame vahekorda vaadeldava kujutuse (a'b') ja asja enese vaatamisnurkade vahel.

Kui oletada, et silm objektiivi tsentrumis M seisab (teleskoobi pikkus on väike, võrdlemisi asja kaugusega), siis on asja vaatamisnurk ALB $= \measuredangle$aMb. Kujutust a^1b^1 aga näeme nurga a^1mb^1 all. Seega on teleskoobi suurendus

$$v = \frac{a^1mb^1}{aMb} = \frac{amb}{aMb} = \frac{amF_1}{aMF_1} = \frac{tang\ amF_1}{tang\ aMF_1};$$

Joonistusest 132 selgub, et $tang\ amF_1 = aF_1 : F_1m$ ja $tang\ aMF_1 = aF_1 : F_1M$ seega on

$$v = \frac{aF_1 : F_1m}{aF_1 : F_1M} = \frac{F_1M}{F^1m}$$

Et aga $F_1M = F_1$ ja F_1m võrdub ligikaudselt $F_2m = F_2$, siis on suurendus

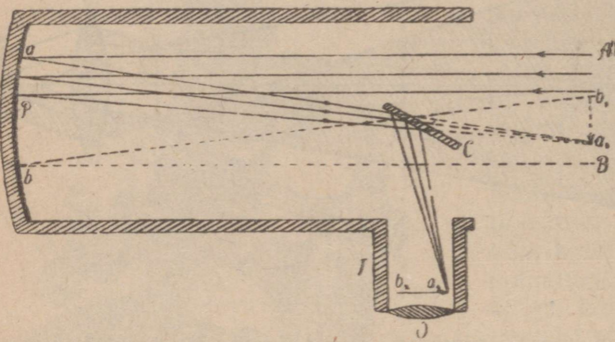
$$v = \frac{F_1}{F_2} \qquad 29)$$

S. t. teleskoobi suurendus on seda tugevam, mida suurem on tema objektiivi ja mida väiksem on okulaari peafookuskaugus.

Objektiivi fookuskauguse suurendamine nõuab ühtlasi ka kogu teleskoobitoru pikendamist, mis, muidugi mõista, ainult teatava piirini võimalik on. Okulaari peafookuskauguse vähendamine aga suurendab tema aberratsiooni segavat mõju, mille vähendamiseks tarvitada tuleks diafragmat. Sellega aga hävitame ühe jao kiirtest ja vähendame kujutuse heledust ning vaatamisvälja suurust, mis jällegi soovitav ei ole. Nii on teleskoobi suurendus praktiliste põhjustega piiratud.

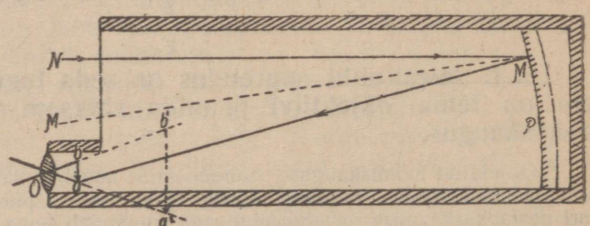
Selleks, et kujutus ka kõva suurenduse juures küllalt hele oleks, peame katsuma võimalikult rohkem kiiri teleskoopi juhtida. See on kättesaadav ainult objektiivi läbimõõdu suurendamisega. Suurte refraktorite juures näeme tôepoolest väga suuri objektiive: Kôige suurem nendest on Chicago observatooriumi refraktoril: — tema läbimõõt on 102 cm', toru pikkus on tervelt 18 m.

§ 52. **Reflektorid.** 1) Newtoni reflektori (joon. 133) peaosa moodustab suur õõnespeegel P, mis asub teleskoobi toru põhjas. Kaugelseisvalt asjalt (taevakehalt) langevad kiired Aa ja Bb peeglile P. Peegeldatult sünnitaksid nad asja ümberpöördud reaalse kujutuse a'b'. Kuid enne kiirte ühinemist kujutuseks, langevad need tasapeeglile C, mis seisab 45⁰ all peegli P peateljele. Sealt peegelduvad nad veel kord ja sünnitavad siis kujutuse a_2 b_2 lühikeses põiktorus T. Et ka see kujutus reaalne on, siis võib teda vaadata läbi okulaari O kui hariliku luubi. Suurendatud ebakujutus ilmub ka siin selgeltnägemise kaugusel.



Joon. 133.

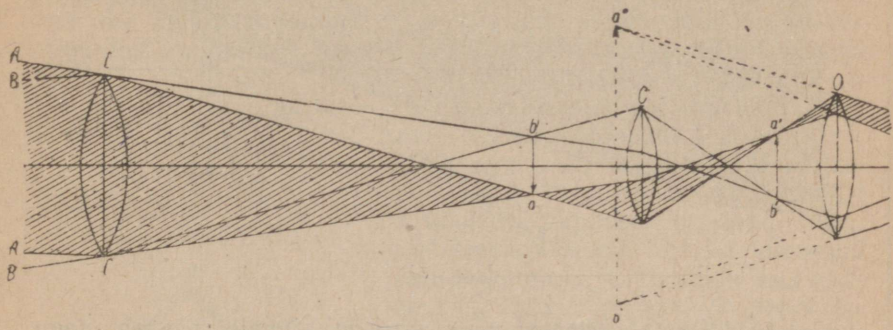
2) Et igal peegeldumisel osa valgust kaduma läheb, siis ehitas Herschel (1795 a.) uue reflektori, milles kiired ainult ükskord peegelduvad. Selleks paigutas ta suure õõnespeegli P (joon. 134) vähe längu, nii et vaadeldav asi mitte tema pea, vaid abiteljel (NM) asuks. Asja kujutus ab ilmub siis teiteiselpool peatelge MM kusagil reflektori-toru seina juures. Seal vôib teda siis otsekohe läbi okulaari O vaadata. Niisugust konstruktsiooni võib tarvitada ainult siis, kui õõnespeegel on väga suur, muidu varjaks vaatleja pea liiga palju sisselangevast valgusest. Herscheli reflektori õõnespeegel oli 1,5 meetrit läbimõõdus, tema teleskoobi toru pikkus oli tervelt 12 m.



Joon. 134.

§ 53. **Maapikksilmad**. Maapealsete asjade vaatamisel pikksilmaga oleks väga tülikas, kui meie asju ümberpöördult nägema peaksime. Sellepärast täiendatakse astronoomilist pikksilma ühe kummerläätsa võrra, mille abil objektiivilt saadud pilt veel kord ümber pöördub, nii et me lõpulikult asja pärikujutust näeme.

Joonistus 135 kujutab kiirte käiku maapikksilmas: Objektiiv L annab kaugelseisva asja reaalse ümberpöödud kujutuse ab



Joon. 135.

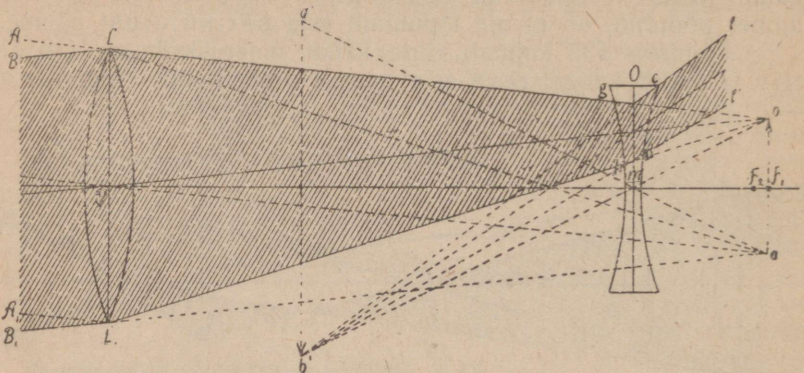
läätsa L peafookuskaugusel. Sellest kujutusest väljaminevad kiired murduvad kumerläätsas C, sünnitades teisel pool läätsa uue reaalse kujutuse a'b', mis on ümberpöördud võrdlemisi kujutusega ab, seega asja pärikujutus. Viimast vaadeldakse läbi okulaari O kui hariliku suurendusklaasi, nii et silm asja imaginaarset suurendatud pärikujutust a''b'' näeb.

Lisaläätsa C loetakse okulaari hulka; kirjeldatud kõige lihtsama maapikksilma okulaar seisab nii siis koos vähemalt kahest kumerläätsast. Harilikult kuulub aga okulaari enesesse juba 2 läätsa, pealegi sünnib kujutuse ümber pööramine tihti mitte üheainsa, vaid kahe läätsa abil. Sellepärast leiame tihti maapikksilma okulaaris 4 kumerläätsa, mis kõik on kinnitatud ühe toru sisse. Niisugust maapikksilma okulaari hüütakse tema ülesleidja järele ka Rheita-okulaariks.

Pikksilm suurendab ainult asja vaatamisnurka; siiski näeme tema läbi kõiki asju lähemal kui nad tõeliselt seisavad. Selle põhjus on puht-psükoloogiline: Vaatamisnurga suurenemist võime enesele seletada kas asja suuruse kasvamisega või tema lähenemisega vaatlejale. Tundes maapealsete asjade konstant suurusi, seletame enesele tahtmatult vaatamisnurga kasvamist alati asja lähenemisega. Mida tugevam on pikksilma suurendus, seda lähemal paistavad sellepärast tema läbi vaadatud asjad.

2) Ka n. n. Galilei-pikksilm kuulub maapikksilmade hulka, andes asjade pärikujutusi. Tema objektiivi moodustab kumerlääts L (joon. 136), kuna okulaariks on kaksiõõneslääts O.

Kaugelseisva asja ümberpöördud reaalne kujutus ab ilmuks objektiivi peafookuskaugusel F_1. Selle juures kooneduksid näiteks asja alumisest servast tulevad paralleelsed kiired BL B_1L_1 fookusse b. Enne lõikumist punktis b langeb aga kiirtekoonus L_1 L h g õõnesläätsa pinnale, murdudes seal laialiminevaks kiirte-



Joon. 136.

joaks l c d l^1. Õõnesläätsa taga asuvale silmale paistab nagu tuleks see laialiminev kiirtejuga välja punktist b'; seal näeb ta siis vaadeldava asja alumist serva. Vastavalt ilmub asja ülemine serv punktis a', jne. Nii näeme siis läbi pikksilma asja imaginaarset pärikujutust a'b'.

Õõnesläätsa O peafookus F_2 seisab läätsale vähe lähemale kui objektiivi peafookus F_1, kuid mõlemad punktid on väga ligistikku. Pikksilma toru pikkus võrdub sellepärast objektiivi ja okulaari peafookuskauguste vahega (F_1 — F_2). Ta on seega palju väiksem kui kõigi teiste eelpool kirjeldatud pikksilmade oma. Galilei - pikksilma tarvitatakse seal, kus ei nõuta kõva suurendust ega pildi iseäralist heledust, kuid kus tähtis on pikksilma käepärasus. Tuntud teater-binokl, näiteks, ei kujuta enesest muud, kui kahte väikest Galilei-pikksilma.

Galilei-pikksilma suurendus on

$$v = \frac{\measuredangle\, a^1mb^1}{\measuredangle\, aPb} = \frac{\measuredangle\, amb}{\measuredangle\, aPb} = \frac{tg\,\frac{amb}{2}}{tg\,\frac{aPb}{2}} = \frac{aF_1 : F_1m}{aF_1 : F_1P};$$

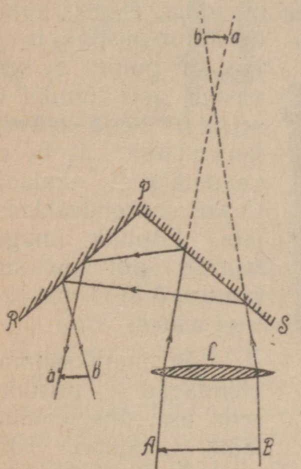
et aga F_1 ja F_2 alati peaaegu ühte langevad, siis on $F_1m \cong F_2m = F_2$, s. t.

$$v = \frac{F_1P}{F_1m} = \frac{F_1P}{F_2m} = \frac{F_1}{F_2} = \frac{\text{objektiivi peafookuskaugus}}{\text{okulaari peafookuskaugus}}.$$

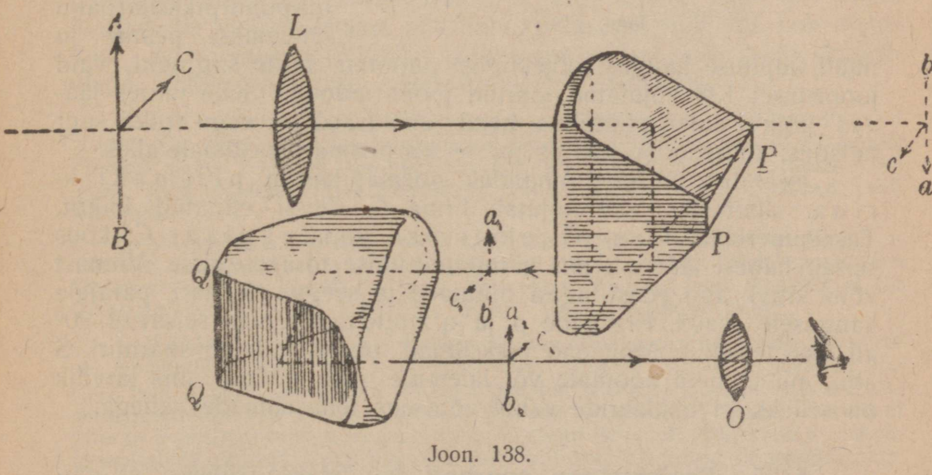
Kui võrrelda joonistust 136 Kepleri pikksilmaga (joon. 132), siis näeme, et viimase juures kiired okulaari taga kokku jooksevad ja sellepärast kõik silma satuvad, kuna aga Galilei-pikksilma okulaarist tulevad laialiminevad kiired ainult osalt silma pääsevad. Selle tõttu läheb viimase juures palju valgust kaduma nii et pilt võrdlemisi tume on. Galilei-pikksilma võib tarvitada ainult väikeste suurendustega; harva on suurendus enam kui 3—4 kordne.

§ 54. 1) **Prismapikksilm.** Et vähendada maapikksilmade torupikkust, ehitatakse viimasel ajal prismapikksilmi, milles objektiivilt saadud kujutuse ümberpööramine sünnib sisepeegeldavate prismade abil.

Kui kiirtejuga 90⁰ all seisvatelt pindadelt kaks korda järgemööda peegelduda lasta, siis satub peale peegeldumist parempoolne kiir pahemale poole ja ümberpöördult. Joonistusel 137 kujutatud peeglitelt või prisma tahkudelt RP ja PS peegeldub näiteks läätsas L murtud kiirtejuga nii, et me asja Ab ümberpöördud kujutuse ab asemel kujutuse a'b' saame, milles kujutuse parem pool vastab asja paremale poolele ja kujutuse pahem pool asja pahemale poolele. Tekkinud kujutus a'b' ei ole aga siiski veel asja AB pärikujutus, sest et ülemised ja alumised punktid on kujutusel ja asjal ikkagi veel ümberpöördud. Et ka viimaseid tagasi pöörda, s. t. et saada asja pärikujutust, võime pinnalt RP peegeldatuid kiiri juhtida veel teise peeglipaari vahele, mille nurk P seisaks perpendikulaarselt esimese peeglipaari omale. Peale peegeldumist teises peeglipaaris satuvad siis kujutuse a' b' ülemised punktid alla ja alumised üles, kuna parem- ja pahempoolsed endisse seisu jäävad. Lõpulikult tekib nii peale neljakordset peegeldust asja AB pärikujutus.



Joon. 137.

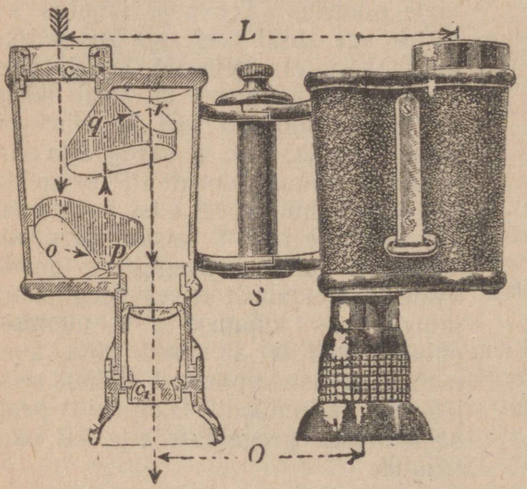


Joon. 138.

2) Ülevalkirjeldatu kergendab prismapikksilma skeemi (joon. 138) arusaamist. Vaadatava asja — noolide risti ABC —

kujutus abc ilmuks objektiivi L taga ümberpöördud seisus, kui tema tekkimist ei takistaks horisontaalse servaga (PP) prisma, milles objektiivist tulevad kiired kaks korda järgemööda peegelduvad. Joonistuse 137 abil on hõlbus arusaada, et prismast P välja tulevad kiired annaksid asja kujutuse $a_1b_1c_1$ milles punktid a_1 ja b_1 vastavad A ja B seisule, kuna c_1 ja C ümberpöördult seisavad.

Välja tulles esimesest prismast, langevad kiired otsekohe teise prismasse, mille serv QQ seisab vertikaalselt (s. t. perpendikulaarselt prismaservale PP). Peale kahekordset peegeldumist tulevad kiired sellest prismast juba nii välja, et asja kujutus ilmub seisus a_2 b_2 c_2, kus ka punkti c_2 seis vastab asja punkti C seisule. Seda pärikujutust a_2 b_2 c_2 vaadataksegi okulaari O kui suurendusklaasi läbi. Lõpulik imaginaarne pilt on siis samuti A B C pärikujutus.



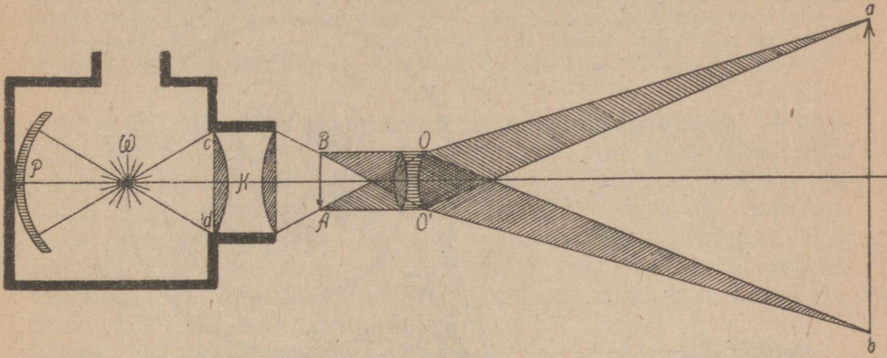
Joon. 139.

Prismapikksilmas etendavad prismad seda osa, mis kolmas lääts C (joon. 135) maapikksilmas. Arusaadavalt muutub prisma puhul pikksilm palju lühemaks, peame ju nüüd kujutuse kaugust objektiivist mõõtma mitte sirgjoont, vaid joonistusel 138 kujutatud murtud joont mööda. Selle juures jäävad kõik Kepleri-pikksilma head omadused — nagu pildi suur heledus, suurendusvõimalus jne. — ka prisma pikksilmale alles.

Iseäralise tähtsuse omandab prismapikksilm prismakiikrina. Joonistus 139 kujutab firma C. Zeissi ehitatud kiikrit. Tasakumerlääts C on objektiiviks, kuna okulaar C_1 koos seisab kahest läätsast, mis kinnitatud ühise torukese sisse. Viimast võib kruvi abil edasi-tagasi nihutada ja seega okulaari parajale kaugusele seada. Prismade p ja q murdvad servad seisavad 90^0 all üks-teisele. Mõlemad pikksilmad on ühendatud sharniiri S abil, nii et neid koomale või laiemale võib pöörda, mis tarvilik on selleks, et okulaaride vahet võrdseks teha silmade vahega.

§ 55. **Projektsioon-aparaati** tarvitatakse selleks, et väikeste läbipaistvate piltide (diapositiivide) suurendatud kujutust tugeva valgusejoa abil eemalseisvale ekraanile heita.

Ta kujutab laternat, mille keskkohas asub vôimalikult tugev ja ühe koha peale kontsentreeritud valgusallik W (joon. 140)— näiteks elektri leeklamp. Õõnespeegel P heidab kõik tahapoole langevad kiired tagasi punkti W, nii et esimesed, kui ka valgus-



Joon. 140.

allikast otsekohe väljatulevad kiired langevad koonusesarnase joana Wcd kumerläätsadele K. Selles n. n. kondensaatoris murdub kiirtejuga kokkuminevaks ja langeb teise kumerläätsa O, — n. n. objektiivi peale. Kuid enne seda seisab tema teel väike läbipaistev pilt AB, mis ümberpöördult aparaati on paigutatud. Tugevas koondatud valgusjoas saab pildike väga intensiivselt valgustatud; tema punktist A, näiteks, langeb terve kiirtekoonus A 0 0¹ objektiivile, muutub peale murdumist kokkuminevaks, ja koondub fookuses a ühte punkti. Samuti annab pildikese ülemine punkt B vastava kujutuse b. Kui ab kohta paigutada valge ekraan, siis ilmub viimasel pildi AB hele kujutus. Kôva valgusallika abil võib sarnasel teel pilti palju suurendada, ilma et kujutuse heledus selle all kannataks.

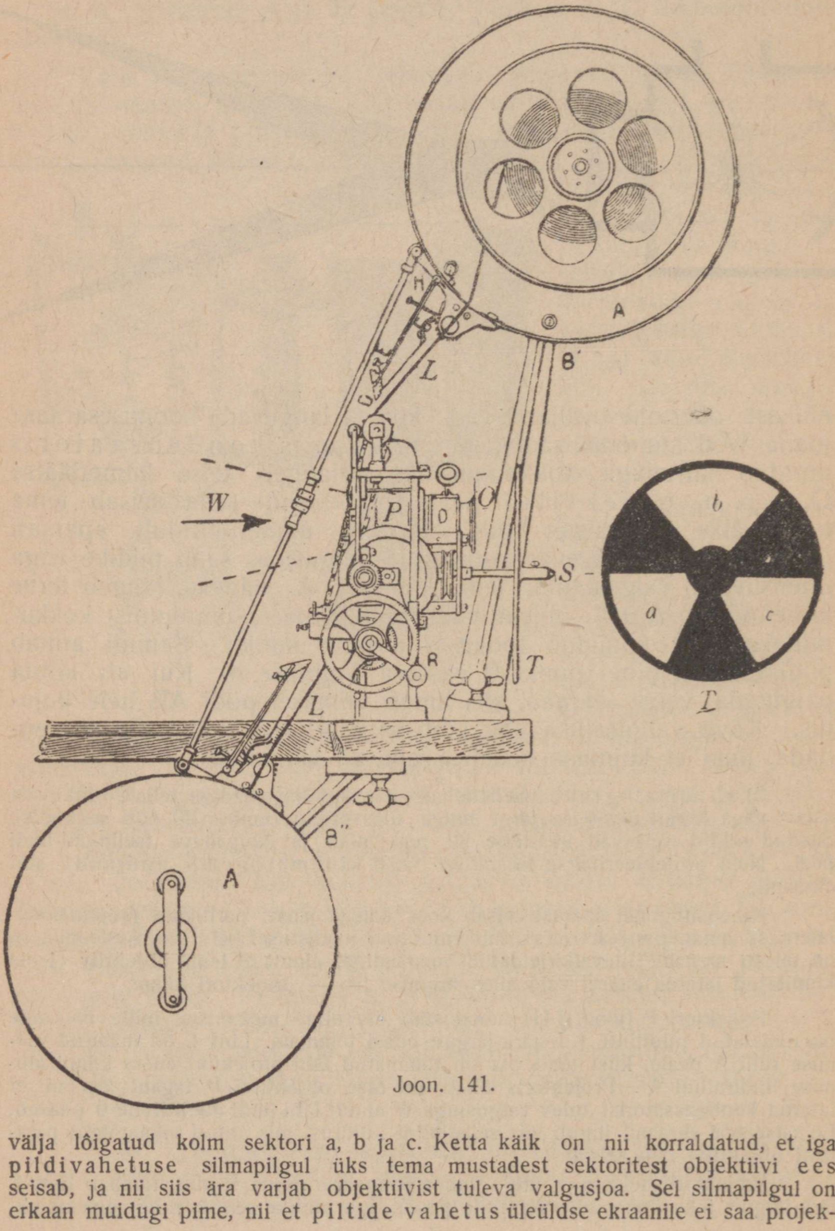
2) Kinematograaf. Sellekohase päevapildiaparaadiga tehakse liikuvast asjast väga kiirelt üks-teise järgi hulga ülesvõtteid (umbes 20 pilti sekundis). Saadud pildid seisavad üks-teise all reas pika ja läbipaistva tselluloïd-lindi peal. Neid projekteeritakse iseäralisel viisil kinematograafi aparaadi abil ekraanile.

Kinematograafi aparaat seisab koos kahest jaost: harilikust projektsioonlaternast ja n.n. projektorist, mis kujutatud joonistusel 141. Projektsioonlatern on täiesti sarnane ülevalkirjeldatud aparaadiga, ainult et tema objektiiv ei ole kinnitatud laterna enese, vaid alles järgmise jao — projektori külge.

Projektori P (joon. 141) moodustab keeruline mekanism, mille ülesanne on nimetatud pildilinti L L järk-järgult edasi tõmmata. Lint L on mähitud ülemise rulli A peale, kust tema ots on tômmatud läbi projektori enese kunni alumise lindirullini A¹. Projektoris läheb lint otse objektiivi 0 tagant alla, nii et laterna kondensaatorist tulev valgusjuga W ainult läbi lindi obektiivile 0 pääseb. Eemalseisval ekraanil ilmub siis selle pildi kujutus, mis antud silmapilgul parajasti objektiivi taga seisab.

Projektori mekanism, mida käima pannakse vända R abil, tômbab linti L järk-järgult ikka ühe pildi vôrra alla poole. Iga pildike seisab vähe aega objektiivi taga paigal ja hüppab siis järsku nii palju alla poole, et järgmine pilt endise asemele objektiivi taha satub. Nii lähevad järgemööda objektiivi taha 15—20 pilti ühes sekundis.

Ühes linti tômbava mekanismiga tiirleb objektiivi ees asuv õhuke ketas T oma vôlli S ümber. Ta on valmistatud õhukesest mustast plekist, ja on temast

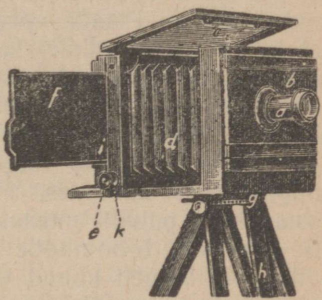


Joon. 141.

välja lôigatud kolm sektori a, b ja c. Ketta käik on nii korraldatud, et iga pildivahetuse silmapilgul üks tema mustadest sektoritest objektiivi ees seisab, ja nii siis ära varjab objektiivist tuleva valgusjoa. Sel silmapilgul on erkaan muidugi pime, nii et piltide vahetus üleüldse ekraanile ei saa projekteeritud. Alles siis, kui lint paigal seisab, on varjav sektor nii palju edasi pöördunud, et valgusjuga vabalt läbi ratta väljalõike pääseb ja ekraanil uue paigalseisva pildi kujutuse annab. Järgmise pildivahetuse ajal seisab juba järgmine tume sektor objektiivi ees jne.

Ekraanil ilmuvad üks-teise järele nii siis ainult paigalseisvad pildid. Et aga piltide vahetus sünnib väga tihti (15—20 pilti sekundis), siis kestab ühelt pildilt saadud mulje kunni järgmise pildi ilmumiseni. Sellepärast ei näe meie vahepealset pimedat ekraani üleüldse, vaid meile paistab nagu muudaks pildil kujutatud asi katkestamatult oma seisu, s. t. nagu liiguks ta ekraanil.

§ 56. **Päevapildi aparaat ja päevapildistamine.** Päevapildi aparaadi kere, — n. n. kaamera, on pime kast, mille küljed harilikult nahklöötsa (d) kujutavad. Viimase abil on võimalik kasti tagaseina kas lähemale või kaugemale nihutada tema eesseinast, ilma et selle juures väline valgus kasti tungiks. Eesseina külge on kinnitatud objektiiv O (joonistus 142). Ta kujutab lühikest metalltoru, mille sisse on paigutatud kas üks või mitu kumerläätsa. Tagasein on lihtne raam, millesse mahutada võib kas mattklaasi (c) või n. n. kassetti (F), — õhukest valguskindlat musta kastikest. Viimases asub valgustundlik päevapildi plaat.



Joon. 142.

Mattklaasil ilmub objektiivi eesseisvate asjade ümberpöördud reaalne kujutus, mis ainult siis teravate piirjoontega on, kui mattklaas asjast väljatulevate kiirte fookuses seisab. Et aga asjad objektiivist mitmesugusel kaugusel seisavad, siis peab kaamera tagaseina iga ülesvõtte juures vastava asja fookusse nihutama; seda tehakse kruvi e abil.

Pildistamine sünnib järgmiselt: peale selle, kui kaamera tagasein on kiirte fookusse asetatud, tõstetakse mattklaas raamist välja ja paigutatakse tema asemele kassett. Viimases peituv plaat satub siis sama koha peale, kus enne seisis mattklaas. Kasseti siiber F tõmmatakse välja ja avatakse objektiiv, nii et tema sünnitatud kujutus lühikest aega mõjuda võiks plaadi valgustundliku kihi peale. Peale selle kaetakse objektiiv ja kassett.

2) Päevapildi plaat on kaetud õhukese zhelatiin-kihiga, milles kõige väiksemad broomhõbe-kübemed ühtlaselt ära on jaotatud.

Neid plaate valmistatakse ülekallates puhtad klaasplaadid või tselluloïdlehed vedela broomhõbe-zhelatiin emulsiooniga ja neid siis pimedas kuivada lastes. Nimetatud emulsioon on zhelatiini sulatis vees, millele juure on segatud broomhõbedat kõige väiksemate kübemete näol. Plaatide valmistamisel tarvitatakse ainult tumepunast valgust, mis pea sugugi broomhõbeda paela ei mõju.

Broomhõbe on hõbeda ja broomi keemiline ühendus, mis ainult pimedas või tumepunase valguse juures võib püsida. Niipea kui kaamerasse paigutatud plaadi peale harilik valgus langeb, väheneb broomhõbeda püsivus nendes kohtades, mis valguse mõju alla sattusid, ja nimelt seda rohkem, mida heledam on plaadile langenud kujutuse vastav koht.

Iseenesest aga ei lagune broomhõbeda ühendus ka peale valguse mõju veel mitte; sellepärast asetatakse valgustatud plaat sellekohasse vedelikku, — ilmutajasse, kus broomhõbe lõpulikult laguneb nendes kohtades, milles ühenduse püsivus valguse mõjul vähenes. Lahutatud metalliline hõbe jääb zhelatiinkihti väikeste mustade kübemetena seisma, mispärast valgusest puudutatud plaadikohad mustadena, puutumatad kohad aga valgetena paistavad. Saadud pildis on asja heledad kohad mustad ja ümberpöördult, — teda hüütakse negatiiviks.

Peale ilmutamist fikseeritakse plaat: tema paigutatakse alaväävlishapu naatriumi (Natr. hyposulfurosum) sulatisse, milles lahutamata broomhõbe ära sulab, kuna puhta hõbeda kübemed jäävad. Plaadi valged kohad muutuvad nüüd läbipaistvateks ja zhelatiinikiht kaotab oma valgustundlikkuse. Et niisugust pilti valmistada, millel asja varjud tumedad ja heledad kohad heledad on, peame negatiivi veel kord kas samasuguse plaadi või vastava valgustundliku paberi peale kopeerima. Läbi negatiivi mõjub valgus uue valgustundliku kihi peale ainult läbipaistvates kohtades, mille tõttu seal broomhõbe laguneb ja vastav koht paberil mustaks muutub. Negatiivi mustade kohtade all aga jääb broomhõbe lahutamataks ja nii siis paber valgeks. Selle pildi valged kohad vastavad siis asja enese valgetele kohtadele, s. t. ta kujutab asja tõelist pilti. Muidugi peab ka see n. n. positiiv fikseeritud saama, enne kui teda jäädavalt valguse käes võib hoida.

Positiivi paber on kaetud kas broom- või kloorhõbe kihiga. Kloorhõbe laguneb valguses küll aeglasemalt kui broomhõbe, muutub aga selle juures otsekohe mustaks, nii et kloorhõbepaberite juures ilmutamist tarvis ei ole.

Peatükk VI.

Valgus kui lainetamine.

§ 57. **Esimesed valgusteooriad.** 1) Kõige vanem valgusteooria on Newtoni (1669) loodud emissioonteooria. Selle õpetuse järele hoovavad enesest kõik valgustkiirgavad kehad lõpmata väikseid jaokesi, mis ülisuure kiirusega läbi ilmaruumi lendavad. Need, — n. n. valguse aine jaokesed tungivad läbi läbipaistvate ainete, põrkuvad aga tagasi (peegelduvad) läbipaistmatute kehade siledatelt pindadelt. Sattudes silma, ärritavad nad oma tôukega nägemiserku ja tekitavad niiviisi meis valgusetunde.

Varsti peale Newtoni õpetust ilmus C. Huyghens'i poolt (1690) uus — n. n. elastse lainetamise teooria, mida pärastpoole T. Young ja A. Fresnel lõpulikult välja töötasid. Selle teooria järele ei ole valgus mitte mõni aine, vaid liikumine, — ja nimelt lainetamine. Nagu heliseva keha õõtsumine sünnitab õhus helilainetamise, mis meie kõrvas helitunde tekitab, niisama sünnitavad Huyghensi oletuse järgi kiirgava keha õõtsuvad moleekulid neid ümbritsevas ruumis iseäralise valguslainetamise, mis meie nägemiserku ärritab ja valgusetunde sünnitab.

Kuna helilained on võrdlemisi pikad lained, mis tekivad keha jaokeste võrdlemisi aeglasel õõtsumisel, on valguslained selle vastu ülilühikesed. Nad võivad näiteks siis sündida, kui ainemoleekulid või aatomid omavahel kokkupõrkuvad ja selle tagajärjel vibreerima satuvad. Näiteks, mõne keha kuumendamisel hakkavad tema moleekulid ikka suurema ja suurema amplituudiga õõtsuma, — viimaks põrkavad mõned nendest naabermoleekulitega kokku ja hakkavad järsu põrke mõjul kiirelt vibreerima. See vibreerimine ei ole muud, kui ülikiire ja väikese amplituudiga õõtsumine, mis moleekulit ümbritsevas ruumis vastavate lühikeste valguslainetena laiali laguneb. Kuigi iga üksiku moleekuli vibreerimine peale kokkupõrget ainult lühikest aega võib kesta, korduvad kokkupõrked ise nii tihti ja nii suure hulga moleekulite vahel, et kogu hõõgavast kehast välja kiirgatud valguslainetamine on katkestumatu. Arusaadavalt ei või niisugune lainetamine ühtlane olla, sest tema õõtsumised võivad sündida nii mitmesuguse kiirusega kui ka mitmesuguses sihis, võib ju iga üksiku aatomi vibreerimise siht ja kiirus isesugune olla.

Laineõpetusest teame, et lainetamine võib laiali laguneda ainult aines, mille jaokesed on õõtsumisvõimelised. Et aga valgus— näiteks tähtedelt ja päikselt — ka läbi tühja ilmaruumi tulla võib, siis ei ole valguslainetamise edasikandjaks ei õhk ega mõni teine meile tuntud aine. Sellepärast oletatakse, et ilmaruum tühi ei olegi, vaid täidetud mingi kaaluta ainega, — n. n. valguseetri ehk lühidalt eetriga. See aine on niivõrd hõre, et teda igal pool, koguni iga teise aine moleekulite vahel leidub. Läbipaistvas kehas ei kandu sellepärast valguslainetamine mitte keha moleekulite kaudu edasi — viimased võivad ainult erakorralistel tingimustel nii kiirelt õõtsuma hakata, — vaid ikkagi kehas peituvate eetrijaokeste kaudu.

Oletatakse, et ainemoleekulid nende lähedal seisvaid eetrijaokesi enesega enam või vähem tugevalt seovad, nii et aine sees oleva eetri omadused vähe lahku lähevad tühjas ilmaruumis oleva eetri omadest. Vastavalt peab siis muutuma ka valguslainetamise laialilagunemise kiirus üleminekul ilmaruumist mõnda ainesse, või ühest ainest teise. Aine moleekulid nagu koormavad ligidalõõtsuvaid eetrijaokesi, liikudes nendega vähe kaasa ja kahandades sellega lainetamise laialilagunemise kiirust. Nagu allpool näeme, on selle oletuse abil seletatav valguse murdumine.

Igal ainemoleekulil on oma teatav eneseõõtse periood (IV, § 26_1), mis oleneb moleekuli massist ja teda siduvatest moleekulaarjôudude suurusest. Kui aines juhtumisi palju niisuguseid moleekulid leidub, mille eneseõõtse periood võrdub valguslainetamise perioodiga, siis võtavad moleekulid õõtsuvates eetrijaokestes peituva energia järk-järgult enesesse ja hakkavad ise suurema amplituudiga õõtsuma. Valguslainetamine tungib siis ainult vähe aine pinna sisse, annab kogu oma liikumisenergia moleekulitele ja hävineb selle tõttu: valguse energia moondub moleekulite õõtsumiseks, s. t. soojusenergiaks, mis avaldub keha temperatuuri tôusus.

Meie ütleme, et niisugused kehad neelavad ehk absorbeerivad valgust. Nende hulka kuuluvad tuhmi pinnaga läbipaistmatud kehad.

2) Kui tuttavaks said valguse polarisatsiooni nähtused, mille kirjeldus allpool järgneb (§ 81), tuli Fresnel (1821) otsusele, et valguslainetamine peab oleme põiklainetamine (IV, § 5), nii siis üsna teise iseloomuga kui helilainetamine. Sellega ilmusid elastses lainetamisteoorias suured raskused: kuna põiklainetamine tekkida võib ainult kõvades kehades (IV, § 5_5), siis peab ka eetri elastsus sarnane olema kôva heha omaga. Teisest küljest ei või aga eeter mingit tuntavat takistust avaldada temas liikuvate kehade peale, sest muidu peaks, näiteks, taevakehade kiirus selle tõttu vähenema, mis aga tõepoolest ei sünni. Raske on ette kujutada niisugust ainet (eetrit), millel korraga mõlemad omadused oleksid: kôva keha elastsus kuju muutmise suhtes ja ühtlasi igasuguse takistuse puudumine temas viibivate kehade liikumisel.

Vaatamata nimetatud puuduse peale, pääsis lainetamisteooria siiski täiele võidule; otsustavaks said siin valguse interferentsnähtused, kus kaks „valgust“ teine teist hävitavad, mille järeldusena „pimedus“ sünnib. Newtoni teooria järele oleks see täiesti võimatu, — ei või ju kaks ainet kokkupuutudes kunagi hävineda, — küll aga võib kahe vastupidise õõtsumise resultaat 0 olla (IV § 7). Et valguses tõepoolest samasuguseid interferentsnähtusi leiti nagu helilaineteski, siis kaotas Newtoni teooria oma tõenäolisuse ja pidi ruumi andma lainetamisteooriale.

§ 58. **Elektromagnetiline valgusteooria.** Elastse lainetamisteooria kõige suurem tähtsus peitub küll selles, et ta just lainetamisteooria on, sest kuni tänapäevani on lainetamise printsiip valgusteooriates maksvaks jäänud, kuigi uuemate vaadete järele valguslainetamine mitte enam elastsete, vaid elektromagnetiliste jõudude abil tekib.

Juba Faraday leidis (1845), et magnetism võib valguse peale mõjuda. Sellest peab järeldama, et ka valguslainetamises eneses tegevad on mingid elektromagnetilised jõud. Toetades Fraday katsete ja mõtete peale, lôi C. Maxvell (1864 — 1874) uue, n. n. elektromagnetilise valgusteooria. Elektriõpetuses näeme, et elektri liikumisel (voolamisel) alati teatud muudatused ilmuvad voolu ümbritsevas tühjas ruumis, mis mõju võivad avaldada seal viibivate teiste elektriliste ja magnetiliste kehade peale. Need muudatused, — n. n. elektromagnetiline väli, — ei teki mitte ühekorraga terves ruumis, vaid nad lagunevad teatud mõõdetava kiirusega laiali: niipea kui elekter liikuma hakkab, sünnib alguses ainult tema ümber elektromagnetiline väli: sealt laguneb ta järk-järgult kaugemale ja kaugemale ruumi laiali. Jääb elekter paigale seisma, siis kaob väli esiteks katkestatud voolu ümbruses, ja siis alles järk-järgult kaugemates ruumipunktides. Elektri edasi-tagasi õõtsumisel tekib tema ümber elektromagnetiline väli, mis omas tugevuses õõtsumise sarnaselt perioodiliselt kasvab ja hävineb ja elektromagnetilise lainetamisena ruumi laiali laguneb. Selles lainetamises ei õõtsu nii siis mitte ainelised jaokesed, vaid temas muutub õõtsumise sarnaselt ainult nimetatud jõuväljade tugevus. Niisuguseid elektromagnetilisi laineid tarvitatakse teatavasti traadita telegrafis märkide edasikandmiseks.

Nagu meie elektromagnetiliste lainete lähemal tundmaõppimisel elektriõpetuses näeme, on ka sellel lainetamisel pôiklainete iseloom. Et siin aga eeterjaokeste otsekohest õõtsumist ei ole, siis ei mõju ei eetri tihedus ega tema elastsus selle lainetamise peale. Eeter saab Maxvelli õpetuses sellepärast kõrvalise tähenduse, ta kujuneb siin ainult ruumiks, milles tekkida võib harilik elektromagnetiline väli, nii nagu me viimast tunneme kõigi elektrivoolu nähtuste juures.

Maxvelli vaate järele ei ole valguslainetamine muud kui elektromagnetiline lainetamine, mille laine pikkus üliväike on. Ainult sarnase oletusega on seletatav, et magneti- ja elektrijõud mõjuda võib valguslainetamise peale.

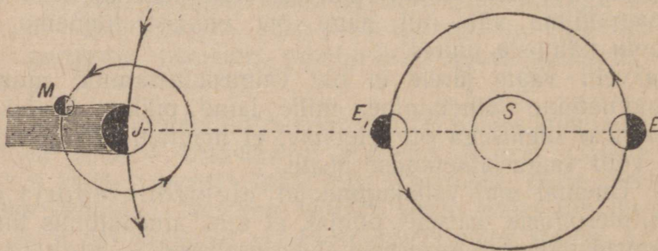
2) Uuemal ajal väljakujunenud elektroonteooria oletab väga mitmesuguste katsete põhjal, et igas aineaatomis tiirlevad või õõtsuvad väikesed iseseisvad elektriosakesed, — elektroonid, mis seotud aatomi keskkohaga elektri-külgetõmbejõuga. Neid õõtsuvaid elektroone ümbritseb vastavalt ôõtsuv elektromagnetiline väli, mis eelpoolkirjeldatud elektromagnetilise lainetamisena ilmaruumi laiali laguneb. Harilikult on elektroonide ôõtsumine liig aeglane selleks, et tekkinud lainetamine meile nähtav oleks valgusena. Kuid keha kuumendamisel näiteks, satuvad tema aatomites peituvad elektroonid moleekulite kokkupõrgete juures kiirelt viibreerima, nii et üks jagu lainetest nii lühikeseks muutub, et ta valgusena nähtav on. Mida kuumem on keha, seda suurema jõuga põrkuvad üks-teise vastu moleekulid, seda järsumaid liikumismuudatusi (õõtseid) teevad elektroonid ja seda

lühemaks muutuvad elektromagnetilised lained. Kuumem keha kiirgab sellepärast rohkem nii lühikesi laineid, mis valgusena on nähtavad, külmem keha kiirgab neid vähem ja on selle tõttu tumedam.

Kui elektromagnetiline lainetamine mône aine pinnale langeb, siis tôukab ta viimase aatomites olevaid elektroone kas tugevamalt või nõrgemalt õõtsuma, selle järele, kas elektrooni eneseõôtse periood on lainetamisperioodiga sarnane või teistsugune. Viimasel juhusel pääseb lainetamine vähe nõrgendatult ja aeglastatult läbi aine (läbipaistev keha), esimesel juhusel aga hävitavad tugevasti ôõtsuma kakanud elektroonid valguslainetamise (läbipaistmatu keha). Et aga elektroonid seotud on aatomi keskkohaga, siis kandub üks jagu valguse absorbeerimiselt päritud liikumisenergiast elektroonide õôtsete kaudu üle aatomite eneste peale, nii et ka viimased aeglaselt õõtsuma hakkavad. See õõtsumine avaldubki keha temperatuuri tõusuna.

Paljudes küsimustes ei mängi vaade valguslainetamise loomu peale mingit osa, paenduvad ju kõik lainetamised ühesuguste üleüldiste seaduste alla, kui jutt on näiteks laine kiiruse ja õõtsearvu vahekorrast jne. Sellepärast käsitame edaspidistes kirjeldustes valguslainetamist niisugusel puhul üleüldises mõttes, s. t. ainult kui lainetamist. Seal, kus lainetamise iseloom asjaolu muudab, tähendame seda eraldi.

§ 59. **Valguse kiirus.** 1) Kui valgus on lainetamine, siis peab ta teatud mõõdetava kiirusega laiali lagunema. Esimesena mõõtis valguse laialilagunemise kiirust ilmaruumis Daani astronoom O. Römer (1675). Jupiteri kuu M (joon. 143) läheb omal tiirlemisel ümber planeedi (J) viimase varju, nii et selle



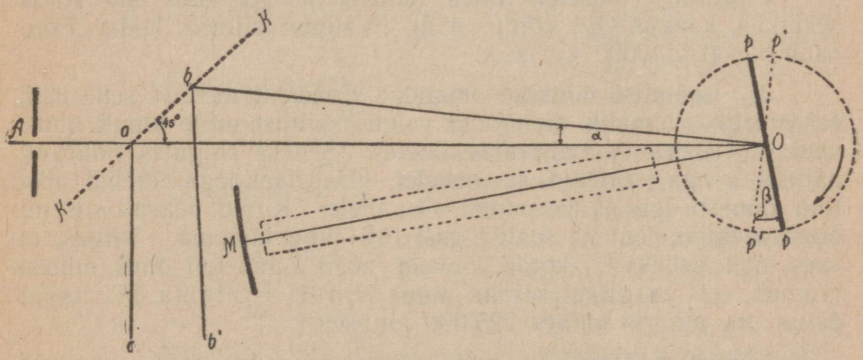
Joon. 143.

kuu varjutus tekib, mida maakeralt (E_1) vaadelda võib. Römer tahtis kahe üksteisele järgneva varjutuse ajavahega ära määrata selle kuu liikumise aega ümber Jupiteri. Kui maakera (E_1) vaatlemise ajal Jupiterile kõige lähemal seisis, siis kordusid kuuvarjutused täpipealt iga 42 tunni, 28 min. ja 36 sek. järele. Selle põhjal arvas Römer ette välja kõigi kuuvarjutuste alguse ajad terve aasta jaoks. Kontrolleerides saadud resultaate, pani ta tähele, et varjutused mitte alati väljaarvatud ajal ei alga, vaid seda hiljem, mida kaugemale maakera Jupiterist jõuab. Poole aasta järele, kui maakera Jupiterist kõige kaugemas punktis E_2 viibib, algasid kuuvarjutused ligi 1000 sekundit hiljem, kui väljaarvatud. Järgmise poole aasta jooksul, kus maakera uuesti läheneb Jupiterile, — hakkas nimetatud viga vähenema, kunni ta — maakera teistkordse seisu juures punktis E_1 — täiesti kadus, nii et varjutused jällegi väljaarvatud aegadel sündisid. Kirjeldatud nähtust seletas Römer sellega, et valgusel kauguse $E_1 E_2$ ärakäimiseks 1000 sekundit kulub, sest et varjutus ise kahtlemata alati väljaarvatud ajal sünnib, ja et viga ainult sellest tuleb, et meie teda punktis E_2 hiljem näeme, on ju sel juhusel valguse tee $E_1 E_2$ vôrra pikem kui esimesel juhusel.

Maakera orbiidi läbimõõt $E_1 E_2$ võrdub umbes 300.000.000 km. Sellest järgneb, et valguse kiirus on

$$c = \frac{E_1E_2}{1000} = \frac{300000000}{1000} \quad 300000 \text{ km/sek.}$$

2) Maapealsest valgusallikast tuleva valguse kiiruse mõõtmiseks on olemas mitu metoodi, mis kõik ühesuguseid resultaate annavad. Üks tähtsamatest on L. Foucault metood, mis skemaatiliselt kujutatud joonistusel 144. A kujutab kitsast pilu, mille läbi kitsas valgusejuga peeglile pp langeb. Viimaselt peegeldub ta ja satub sihis OM õõnespeeglile M, mille kõverustsentrum asub punktis O.



Joon. 144.

Oõnespeegel annab pilu A reaalse kujutuse, mis peeglill pp sihis OA tagasi heitub punkti A. Kiire OA teel asub 45^0 alt längu seisev poleeritud pinnaga läbipaistev klaasplaat kk millelt õõnespeegli poolt antud pilukujutus veel kord peegeldub ja lõpuks vaatlejale S sihis aa¹ paistab.

Kui peeglit pp aeglaselt tiirutada joonistuspinnale perpendikulaarselt seisva telje O ümber, siis näeme pilukujutust ainult neil silmapilkudel punktis a vilksatuvat, kui peegel läbi oma esialgse seisu pp läheb, satub ju ainult siis valgus õõnespeeglile M, mis nimetatud kujutust sünnitab. Kui peegel küllalt kiirelt tiirleb, siis korduvad nimetatud kujutuse-vilksatused nii ruttu, et silm S katkestamatult ühe koha peal (a) paigalseisvat pilukujutust, sarnaselt nagu paigalseisva peegli pp puhul näeb.

Tiirutades peeglit pp väga kiirelt, võib aga juhtuda, et peegel senniks juba mônda teise seisu pp^1 on pöördunud, kui valgus punktist O kunni õõnespeeglini ja sealt tagasi jõuab. Siis heitub pilukujutus, vastavalt peegli uuele seisule p^1p^1, mõnes teises sihis Ob tagasi, nii et ka vaatleja teda uues sihis bb^1 näeb. Mida kiiremine tiirutada peeglit, seda kaugemale pöördub ta nimetatud aja jooksul, seda kaugemale punktist a nihkub siis ka nähtav pilukujutus b.

Punktide a ja b abil on kerge väljaarvata nurga $\alpha = bOa$ suurust; viimasest aga leiame nurga $\beta = p\,O\,p^1$ mille võrra peegel pp selle aja jooksul pöördub, kui valgus temast kunni õõnespeeglini ja sealt tagasi jõuab. Kui peegel terve tiiru jaoks tarvitab T sekundit, siis pöördub ta nurga β võrra $\frac{\beta^0}{360}$ T sekundi jooksul; sama aja sees käib valgus 2 OM pikkuse tee ära. Järjelikult on valguse kiirus

$$c = 2\,OM : \frac{\beta}{360}\,T \text{ ehk } c = 2\,OM : \frac{\beta}{360}\cdot\frac{1}{N},$$

kus N kujutab peegli tiirude arvu sekundis.

Foucault'i katsetel tiirles näiteks peegel kuni 800 korda sekundis, kaugus OM võrdus 4 m. Valguse kiiruse leidis Foucault olevat 298.000 km/sek.

3) Iseäralise tähtsuse omandab Foucault metood selle läbi, et temaga võimalik on mõõta valguse kiirust mitte ainult õhus, vaid ka teistes läbipaistvates ainetes. Selleks paigutas Foucault näiteks veega täidetud ja otsadel klaasplaatidega kaetud pika toru õõnespeegli M ja punkti O vahele. Kiired peavad siis nii ôõnespeeglini, kui ka sealt tagasi läbi vee minema. Selgus, et vees neil selleks $^3/_4$ korda rohkem aega kulub kui õhus, millest järgneb, et valguse kiirus vees ainult $^3/_4$ tema kiirusest õhus on, nii siis umbes 225.000 km./sek.

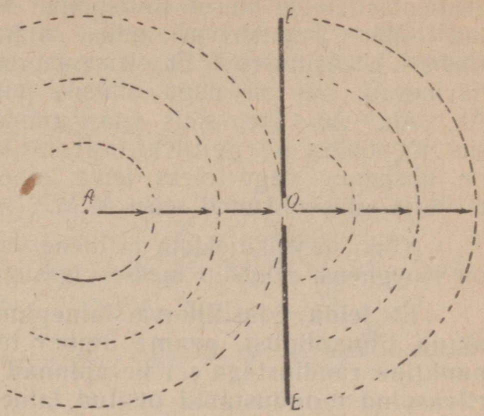
Kõigist mõõtmistest, mis hiljem nii mitu korda korratud järgneb, **et valguse kiirus tühjas ilmaruumis 300 000 km sek. on; ta ei olene ei valgusallika tugevusest ei tema värvist.** Õhus on valguse kiirus peaaegu niisama suur kui ilmaruumis, vees ja teistes ainetes aga tuntavalt vähem.

Valguse ülisuurest kiirusest saame ehk selgema ettekujutuse, kui välja arvame, et ta ühe sekundi jooksul umbes $7^1/_2$ korda ümber maakera võib liikuda. Päikselt tuleb ta meile $8^1/_4$ minuti jooksul, kuult aga umbes 1 sekundi vältel. Selle ülisuure kiirusega on seletatav nähtus, et valgus maa peal ilma ajakaotüseta ühest punktist teise paistab jõudvat.

Ainetes oleneb valguse kiirus teataval määral tema värvist: A. Michelson leidis, et näiteks punane valgus vees 1,4 % võrra kiiremine laialilaguneb kui sinine.

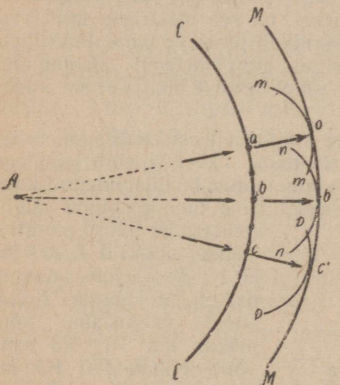
§ 60. **Huyghensi printsiip; valguse sirgjooneline laiali lagunemine.** Huyghens'i printsiibi all tuntud seadus sisaldab kaks reeglit, millest teine on õieti ainult esimese järeldus.

1) **Esimese reegli järele võib lainepinna iga punkti käsitada kui uut iseseisvat lainetamisallikat, millest laialilagunevad uued, vaadeldud lainepinnaga sarnased keralained.**



Joon. 145.

Lagunegu näiteks lainetamisallikast A (joon. 145) keralained (IV₁ § 9) laiali. Kui lainetamise laialilagunemist mõne ekraaniga E E takistada, siis pääseb teisele poole ekraani läbi avause O ainult väike lainepinna jaoke (punkt). Sellest lainepinnapunktist laguneb siis uus, — kuigi nõrgem lainetamine jällegi kerapindadena igale poole laiali, nii nagu oleks punkt O iseseisev lainetamistsentrum.



Joon. 146.

2) **Teise reegli järele peab ühtlases aines lainepinna iga punkt alati perpendikulaarselt lainepinnale edasinihkuma.** Tema abil võime leida antud edasiliikuva lainepinna LL (joon. 145) kuju igal järgneval silmapilgul.

Olgu näiteks teada, et antud silmapilgul keralaine pind kunni sfäärini LL on jõudnud. Vaadates õõtsuma hakkava punkti a kui uue iseseisva lainetamisallika peale, leiame temast laialilaguneva uue, n. n. elementaarlaine kuju t sekundit hiljem järgneval silmapilgul, kui punktist a nagu tsentrumist uue kerapinna mm tõmbame raadiusega ct, kus c tähendab laialilagunemise kiirust (IV, § 9_2). Sama aja t jooksul laguneb aga ka sfääri LL igast teisest punktist (b,c jne.) niisamasugune elementaarlaine laiali (nn, pp jne.). Viimased satuvad üks-teise peale ja interfereeruvad.

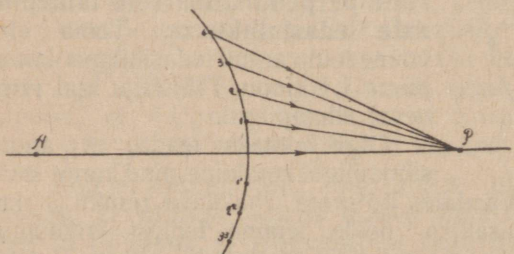
Nagu üksikasjalisemad matemaatilised juurdlused näitavad, hävinevad interfereerumisel kõik elementaarlainete osad peale nende, mis oma naaberlainetest puutumata jäävad. Niisugused punktid aga on, — nagu joonistusest 146 kerge näha, — ainult sfääride välimised punktid a^1, b^1, c^1 j.n.e. Nad asuvad elementaarlainete ühisel riivaspinnal MM, mis ümber A tõmmatud sfääri kujutab ja mille raadius on ct võrra suurem sfääri L L raadiusest. Et elementaarlainete küljepealsed punktid hävinevad, siis on nagu nihkuks punktid a, b, c jne. raadiuste Aa, Ab, Ac, jne. sihis edasi punktidesse a^1, b^1, c^1 jne., nii siis tõepoolest perpendikulaarselt lainepinnale L L. Resultaat on niisugune nagu oleks terve laine L L ise t sekundi jooksul ct võrra edasinihkunud seisu M M.

Kõik ülevalkirjeldatu ei olene laine L L kujust, sellepärast on Huyghensi printsiip maksev igasuguse lainepinna jaoks:

Et leida edasiliikuva lainepinna kuju t sekundit hiljem antud silmapilgust, peame ümber tema antud pinna üksikute punktide raadiustega c. t kerapinnad tõmbama; viimaste ühine riivaspind moodustabki otsitud lainepinna.

3) Eelpool kirjeldatud valguse sirgjooneline laialilagunemine (§ 3) paistab vastolus seisvat Huyghensi printsiibiga, sest kui lainepinna iga punkt uus valgusallik võib olla, siis peaks valgus ka „ümber nurga“ minna võima. Näiteks laguneks mõne läbipaistmatu ekrani servalt valguslainetamine laiali igas sihis, nii et ta ka ekraani varju peaks sattuma. Nagu meie allpool (diffraktsiooni nähtuste kirjeldusel) näeme, on see tõesti nii, kuid varju langev valgus on niivõrd nõrk, et meie teda harilikult tähele ei pane. Praktilistes küsimustes võime sellepärast oletada, et valgus sirgjooneliselt laialilaguneb, peame aga meeles pidama, et see mitte alati nii ei tarvitse olla ja et see kunagi täpipealt nii ei ole.

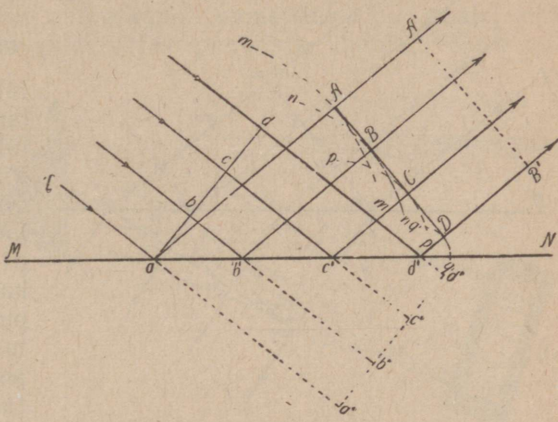
Kõige rohkem oleme õigustatud valguse sirgjoonelisest laialilagunemisest rääkima sel juhusel, kui valguslainetamine igale poole vabalt võib laialilaguneda. Olgu näiteks valgusallikast A (joon 147) lainetamine laialilagunenud kunni kerapinnani 4 —4“ Huyghensi printsiibi jarele saadab lainepinna iga punkt valguslainetamist miugi punkti P. Valime punktid 1, 2, 3 jne. ja 1^1, 2^1, 3^1 jne. lainepinnal nii, et kaugus P2 oleks poole valguslaine võrra pikem kui P1; P3 sama võrra pikem kui P2 jne. Siis on punktidest 1, 2, 3 jne. kunni punktini P jõudnud lainete käigu vahe poollainet, s. t. punktis P seisab laine P1 oru vastu P2 lainehari, P3, laineoru vastu P4 hari jne. Interfereerudes hävitab siis lainetamine P1 lainetamiste P2, P3 lainetamise P4 jne. (IV § 7_1).



Joon. 147.

Niisama hävinevad punktis P kõik lained, mis välja tulevad punktides, 1^1, 2^1 3^1 jne. Valgust sünnitab punktis P ainult see lainetamine mille allikaks on lainepinna väike osake $1—1^1$ sihi AP ümbruses. Nagu meie allpool näeme, on valguslainete pikkus nii väike, et selle lainepinna jaokese $1—1^1$ läbimõõt ainult mõni kümnetuhandik millimeetrit võib olla. Nii selgub siis, et valgusallikast A punkti P läheb sirgjooneline ülipeenike kiirtejuga läbilõikega $1—1^1$, mis praktilistes küsimustes küllalt sarnane on lõpmatu peenikese valguskiirega.

§ 61. **Lainepindade peegeldumine ja murdumine.** 1) Langegu peegeldavale pinnale MN (joon. 148) perpendikulaarselt joonistuspinnale seisev tasapinnaline lainepind ad. Huyghensi printsiibi järele liigub lainepind edasi perpendikulaarselt enese pinnale, s. t. sihis La. Seega jõuavad tema üksikud punktid a, b, c ja d üksteise järele peegeldava pinnani MN. Peegelpinna punktid a, b', c' ja d' hakkavad samuti üksteise järele õõtsuma ja saavad tsentrumiteks, millest uued keralained laiali lagunevad.

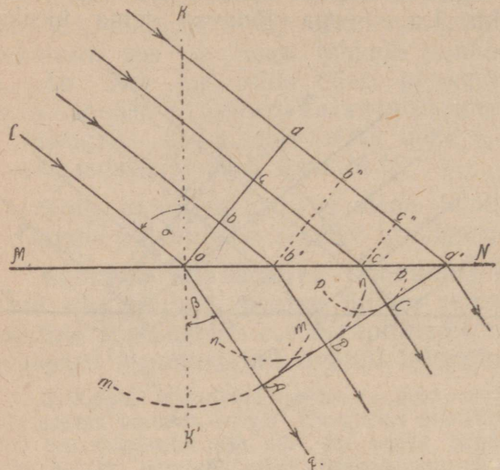


Joon. 148.

Oletame, et teatud aja jooksul lainepind seisust a d jõuaks seisuni a''d'' kui peegelpind seda liikumist ei takistaks. Õõtsuma hakanud peegelpinna punktist a laguneb sama aja jooksul lainetamine laiali kunni kerapinnani m, mille raadius võrdub kaugusega aa'', sest et lainete kiirus igas sihis ühesuurune on. Järgmine peegelpinna punkt b' tõukub vähe hiljem õõtsuma: sel ajal, kui lainepind ad jõuaks seisu a''d'', laguneb punktist b' lainetamine laiali väiksema kerapinnani n, mille raadius võrduma peab pikkusega b' b''. Veel hiljem hakkavad ôõtsuma punktid c' ja d'; nendest laguneb lainetamine vaadeldud silmapilguni laiali ainult kunni kerapindadeni p ja q, raadiustega c'c'' ja d'd''. Peegeldatud laine pinna leiame, kui kõigi nimetatud kerapindadele ühise riivaspinna AD perpendikulaarselt joonistuspinnale tõmbame. On kerge aru saada, et ka peegeldatud lainepind AD tasapinna moodustab ja et ta langeva laine kiirusega enesele perpendikulaarses sihis AA' peeglipinnalt kaugeneb. Sihid La ja a A' kujutavad langevat ja peegeldatud kiirt (IV, § 9_2). Et kaugused aa''=aA, b'b''= =bB, c'c'''=c' C jne., siis vôrdub ka nurk AaN nurgaga a''aN= =LaM, ehk langemisnurk vôrdub peegeldusnurgaga.

2) Murdumisel on nähtused sarnased ülevalkirjeldatud peegeldumisprotsessiga. Õôtsuma tôugatud ainepinna MN punktidest a, b', c' ja d' (joon. 149) laguneb lainetamine ka aine sees laiali. Meie nägime (§ 59_3), et ainetes valguse kiirus väiksem on kui eetris vôi ôhus: selle aja jooksul, kui lainepind punktist d punktini d' edasi liigub, laguneb lainetamine aine sees punktist a ainult kerapinnani m, mille raadius $\frac{c'}{c}$ korda väiksem on

pikkusest dd', kus c' ja c kujutavad valguse kiirusi vaadeldud aines ja tühjas ruumis või õhus. Vastavalt lagunevad hiljem õõtsuma hakanud punktidest b' ja c' keralained n ja p laiali. Viimaste raadiused on niisama $\frac{c'}{c}$ korda lühemad kui langeva laine vastavad edasiliikumised b''d' ja c''d'. Riivaspind A d' kõigile keralainetele kujutab murtud laine pinda sel silmapilgul, kui langev laine jõuab punktini d'. Joonistuse konstruktsioonist järgneb, et ka Ad^1 on tasapind.



Joon. 149.

Raadiused a'A, b'B ja c'C on perpendikulaarsed murtud lainepinnale; nad kujutavad nii siis murtud kiirte sihte. Nurk $Lak = \alpha$ on langemisnurk, $Aak^1 = \beta$ murdumisnurk. Joonistusest selgub, et $daN = \alpha$ (sest et $daN = 90^0 - dd'a = 90^0 - LaM = \alpha$) ja $ad'A = \beta$ (sest et $ad'A = 90^0 - Aad' = \beta$), järjelikult on

$$\sin\alpha = \frac{dd'}{ad'}; \ \sin\beta = \frac{aA}{ad'}, \text{ ehk } \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{dd'}{aA};$$

Esimese keralaine raadius aA oli $\frac{c'}{c}$ korda väiksem kui dd', s. t. $aA = \frac{c'}{c} . dd'$, millest järgneb, et murdumiseksponent

$$n_1 = \frac{\sin\alpha}{\sin\beta} = \frac{c}{c'}.$$

Et kiirused c' ja c on konstandid, siis peab ka aine murdumiseksponent konstant olema.

On mingis teises aines valguse kiirus c'', vastav murdmiseksponent aga n_2, siis leiame endiselt, et $n_2 = \frac{c}{c''}$. Võrreldes seda eelmise võrrandiga, näeme, et

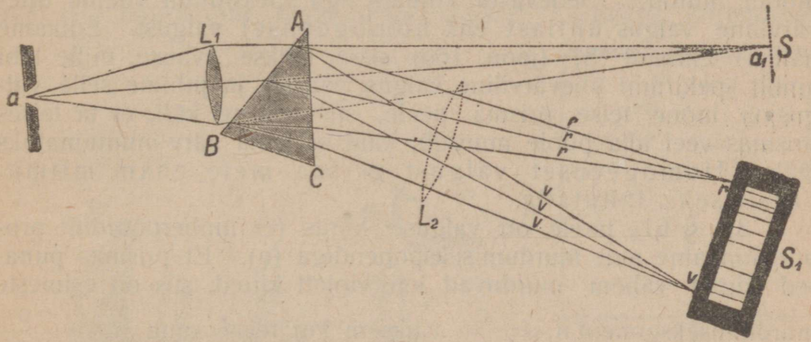
$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{c''}{c'}, \text{ s. t.}$$

Ainetes on valguslainetamise kiirused ümberpöördult proportsionaalsed ainete murdumiseksponentidega.

Peatükk VII.

Värvide hajumine (dispersioon) ja värvid.

§ 62. **Värvide hajumine prismas.** 1) Läbi kitsa pilu a (joon. 150) juhitakse valguskiired kumerläätsa L_1 peale, mille taga ekraanil S terav pilukujutus punktis a_1 ilmuks. Kiirte teele



Joon. 150.

paigutatakse klaasprisma ABC. Kiired murduvad temas alla, nii et pilukujutus a_1 ekraanil kusagil madalamal ilmuma peab. Kui pilust **a** tulev valgus näiteks punane on, siis saame ekraanil punase pilukujutuse punktis r, Sinine valgus annab sinise kujutuse aga teises, veel madalamas punktis v, kollane valgus sünnitab kujutuse jällegi uues kohas, kusagil **r** ja **v** vahel j. n. e. **Sellest järgneb, et värvilised valguskiired prismas mitte ühevõrra ei murdu, vaid et kollased kiired rohkem murduvad kui punased, sinised aga veel rohkem kui kollased.**

Juhime läbi pilu prismasse valget päiksevalgust: ühe kitsa pilukujutuse asemel ilmub ekraanil punktide r ja v vahel terve mitmevärviline pael, — päikse spektrum, milles Newtoni järele 7 peavärvi leidub: kõige kõrgemal (punktis r) punane, siis järgimööda madalamal oranzh, kollane, roheline, helesinine, tumesinine (indigo) ja violett. Tähelepanemise väärt on, et ka mitmevärvilisel spektrumil punane värv ekraani samal kohal ilmub, kus ülevalkirjeldatud punase valguse pilukujutus ilmus; niisama ilmub ka spektrumi kollane ja sinine värv alati ühes kindlas kohas, vaatamata selle peale, kas prismasse juhiti valge või vastava värviline valgus.

Prismast välja tulevaid värvilisi kiiri võime uuesti koondada teise kumerläätsa L_2 abil. Hoides viimast parajal kohal näeme ekraanil värvilise spektrumi asemel lihtsat valget heledat täppi. Sellest selgub, et spektrumi värvid mitte prismas ei sünni, vaid et nad valges valguses eneses peituma peavad.

Prisma ainult eraldab valges valguses olevaid mitmevärvilisi kiiri, murdes ühte värvi rohkem kui teist. Missugusest ainest prisma ka valmistatud ei oleks, spektrumi värvid jäävad alati ühesugusteks.

Kirjeldatud nähtust nimetatakse valguse dispersiooniks ehk värvide hajumiseks.

2) Valguse dispersiooni nähtusest järgneb, et valge valgus peab koos seisma paljuist värvilistest kiirtest, millest igaüks isemoodi murdub. Sellevastu kujutab aga spektrumilt võetud ühevärviline valgus ühtlast ehk homogeenset valgust. Lõikame näiteks ekraani S_1 (joon. 150) sisse väikse avause, mille läbi ainult spektrumi ühevärviline valgus pääseb ja juhime selle valgusjoa mõne teise prisma peale, siis näeme küll, et ta teises prismas veel alla poole murdub, kuid et tema värv muutumatuks jääb. Homogeenset valgust ei saa meie enam mitmevärviliseks lahutada.

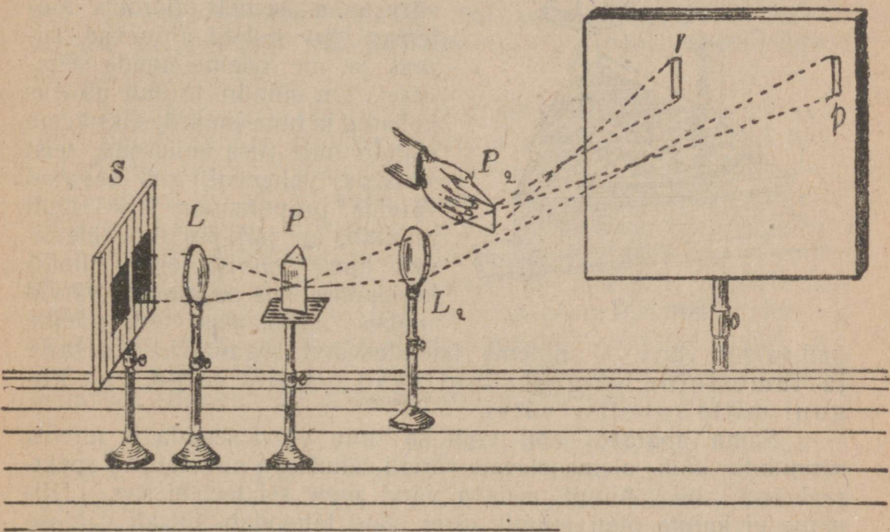
3) § 61_2 järele on valguse kiirus (c) ümberpöördult proportsionaalne aine murdumiseksponendiga (n). Et prismas punased kiired vähem murduvad kui violett kiired, siis on esimeste murdumiseksponent $n_1 = \frac{c}{c_1}$ väiksem kui teiste oma $n_2 = \frac{c}{c_2}$ (kus c on vastava valguse kiirus ilmaruumis, c_1 ja c_2 aines).

Astronoomilised vaatlused tõestavad, et ilmaruumis kõigil kiirtel ühesuurune kiirus c on, sest meie näeme näiteks iga tähte peale tema varjutust otsekohe valgena, mis nii olla ei võiks, kui näiteks punased kiired ennem siniseid meie juure jõuaks. Kui aga c on ühesuurune kõigi kiirte jaoks, siis võib n_1 väiksem olla kui n_2 ainult juhusel, kui c_1 on suurem c_2-st Järjelikult peab punase valguse kiirus (c_1) prismas suurem olema kui violett valguse oma (c_2) (võrdle § 59_3).

Selle põhjal seletab elektroonteooria dispersiooni nähtust järgmiselt: Valge valguslainetamine seisab koos mitmesuguse lainepikkuse ja õõtsearvuga lainetest, mis kõik ühesuguse kiirusega prismani jõuavad. Seal tõukavad nad õõtsuma prisma aine aatomites olevaid elektroone ja kaotavad selle juures seda rohkem oma liikumisenergiast, mida sarnasem on elektroonide eneseõõtsearv lainetamise õõtsearvuga (§ 58). Mõõtmised näitavad, et läbipaistvates ainetes, nagu klaas, vesi jne., kõige rohkem absorbeeruvad suure õõtsearvuga (s. t. lühikesed) lained, millest järgneb, et nende ainete aatomites suurema osa elektroonide eneseõõtsearv suurem on kui valguslainetamise oma. Sellepärast mõjuvad nende elektroonide peale kõige rohkem kiireltõõtsuvad lained; sarnased on, nagu allpool näeme, violett ja sinised valguslained. Need kaotavad nii siis prismas kõige rohkem energiat. Läbi prisma pääsevad nad aeglasemalt kui teised kiired, mille tõttu nad seal ka rohkem murduvad (§ 61_2). Dispersioon on nii siis tihedalt seotud absorbtsiooniga: aine, mis üleüldse kiiri ei absorbeeri (eeter) ei või neid ka mitte dispergeerida.

§ 63. **Valguse värv** oleneb tema lainete pikkusest, umbes nii, nagu tooni kõrgus oleneb helilainete pikkusest Kuna aga kõrv kokkuseatud kõlast iga üksikut tooni eraldi võib kuulda, ei suuda silm mitmesugustest lainetest kokkuseatud valgusest eraldada üksikuid värve, vaid ta näeb alati ainult ühte segavärvi.

Segavärvide tekkimist vôime vaadelda järgmisel katsel: Prisma P (joonistus 151) sünnitaks ekraanil päiksevalguse spektrumi. Läätsa L_2 abil vôime prismast tulnud värvilisi kiiri jällegi ühendada, mille tagajärjel ekraanil kôigi nende värvide segavärvi — valge täpp (p) ilmub. Kui kiirte teel hoida teine prisma P_2, siis kaldub üks osa kiirtest kõrvale ja ühineb teiseks täpiks r, kuna täpis p ühineda vôivad ainult prismast P_2 mööda pääsnud kiired. Nii esimene, kui ka teine täpp on värviline ja kujutab seal ühinenud spektraalvärvide segavärvi. Nihutades prismat P_2 järk-järgult sügavamale läätsast L_2 tuleva kiirtejoasse,



Joon. 151.

eraldame alguses ainult violett, kui kõige äärmise spektraalvärvi kiired, siis aga järgemööda ka sinise, rohelise ja kollase valguse kiired. Ekraanil näeme

prisma äärmisel seisul:

täpis r violetti, täpis p aga rohekas kollast värvi;

prismat sügavamal joas hoides:

täpis r indigo sinist „ „ kollast „ „

veel sügavamal hoides:

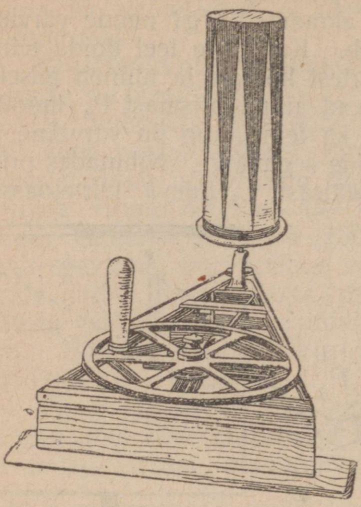
täpis r hele sinist „ „ oranzh „ „

ja lõpuks:

täpis r rohekas sinist „ „ punast „

On selge, et iga nimetatud värvipaar segatult jällegi valge värvi peab andma, sest niipea kui prisma P_2 kõrvaldada, seguvad mõlemaid värvilisi täppe sünnitavad kiired valgeks valguseks.

Kahte värvi, mis segatult valge värvi sünnitavad, hüütakse täiendusvärvideks. Nagu eelmisest tabelist näha, ei leidu spektrumi rohelise jaoks homogeenset täiendusvärvi, viimane on purpur-punane mis ise kujutab violeti ja punase segavärvi.



Joon. 152.

2) Värvide segamist võib vaadelda ka sellekohasel lihtsal aparaadil: püstsilindri pind on segatavate värvidega kaetud, nii nagu see näidatud joonistusel 152. Kui silindrit kiirelt tiirutada, siis jääb igalt värvilt saadud mulje silmas niikauaks püsima, kunni järgmine värv tema asemele pöördub. Mõlemad värvimuljed ühinevad silmas ja me näeme nende segavärvi. On silindri triibud näiteks kollased ja tumesinised, siis näeme silindri ühte otsa kollasena, teist sinisena, vahepeal, kus segatud värvide proportsioon järk-järgult muutub, on järk-järguline üleminek ühest värvist teise; silindri keskkohas, kus segatavad värvid umbes „tasakaalus“ on, näeme hall-valget värvi, — mõlema täiendusvärvi segavärvi. Kollane ja tumesinine valgus sünnitavad nii siis valge, ega koguni mitte rohelise värvi.

Sama aparaadi abil võib ka mitu värvi segada ja niiviisi sünnitada kôik olemasolevad värvid eelmises § nimetatud 7 spektraalvärvi abil. Ainult musta värvi meie sel teel ei saa, — viimane ei kujuta õieti mingit värvi, vaid tähendab lihtsalt valguse puudumist.

§ 64. **Keha värv**. 1) Kõik läbipaistvad kehad absorbeerivad enam või vähem läbi nende minevat valgust. Kui keha iga värvi ühevôrra absorbeerib, siis ei muutu selle juures valguslainetamises peituvate värvide proportsioon, mille tõttu valge valgus ka kehast välja tulles valgeks jääb. Niisuguseid värvituid läbipaistvaid kehi leidub vähe. Paksemate kihtidena absorbeerib pea iga aine ühte värvi rohkem kui teist. Paks klaas paistab näiteks rohekas-kollasena, sest et ta violett kiiri rohkem absorbeerib kui teisi; läbi klaasi pääsnud kiired moodustavad siis violeti täiendusvärvi — rohekas kollase (§ 63). Punane klaas absorbeerib pea kõik kiired peale punaste, sinine — kõik peale siniste kiirte j. n. e.

Läbi värvilise läbipaistva keha pääseb ainult keha värvile vastav valgus. Seda võib tõestada, kui päiksevalgust enne prismasse sattumist läbi värvilise keha juhtida: punase klaasi puhul näeme näiteks ainult spektrumi intensiivset punast osa, indigo-sinine annab spektrumil ainult sinise juti, kuna kõik teised värvid on hävinud. Selle vastu on aga purpur-punase klaasi taga spektrumi keskkoht tume, ning meie näeme ainult tema mõlemat otsa: punast ja violetti, — purpurpunase algvärve.

Kirjeldatud viisil võime kergesti analüseerida segavärve, s. t. leida antud värvi moodustavaid spektraalvärve. Nii näeme, näiteks, et roosa värv, mida spektrumis ei leidu, koos seisab intensiivsest punasest ja kõigist nõrgalt paistvatest teistest spektraalvärvidest. Et viimased segatult valge annavad, siis on roosa värv punaste ja valgete kiirte segu. Meie näeme ka, et looduses harva aineid leidub, mis ainult ühte spektraalvärvi läbi lasevad: harilikult pääseb läbi kollase aine peale kollase valguse ka veel vähe rohelist, läbi sinise — peale sinise valguse ka veel rohelist jne.

2) Läbipaistmatud kehad on nähtavad nende pinnalt hajutud valguse tõttu (§ 10), nende pinna värv oleneb nii siis hajutud valguse värvist. Meie teame, et õhukeste kihtidena kõik ained läbipaistvad on (§ 2); keha pinnal asuvad „läbipaistvad“ aine moleekulid lasevad sellepärast nende peale langenud valguskiiri kunni teatava sügavuseni pinna sisse tungida, kust nad siis alles tagasi heituvad. Läbi aine moleekulite pääsevad tagasi ainult need kiired, mis moleekulites ei absorbeeru. Sellest tuleb, et keha pind ainult ühte osa sinna langenud valgusest tagasi heidab, — kuna teine osa valgusest seal absorbeerub. Tagasi heidetud valguse värv määrabki ära pinna enese värvi.

Kui keha pinnalt kôik valguskiired tagasi hajuvad, siis on hajutud valgus valge ja keha paistab meile valgena. Absorbeerivad pinna moleekulid iga värvi valguse, siis ei pääse sealt üleüldse valgust meie silma, mille tagajärjel pinda mustana näeme. Kui keha pind temale langevast valgest valgusest ainult ühe värvi, näiteks punase, absorbeerib, siis heitub sealt tagasi vastav täiendusvärv (roheline), nii et pind rohelisena paistab.

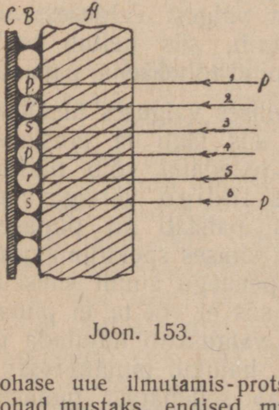
Ei leidu keha pinnale langevas värvilises valguses üleüldse niisuguseid kiiri, mida pind hajuda võib, siis jääb ta mustaks, olgugi, et ta teist värvi valguses üsna heledana võib paista. Viimase tôestuseks paigutame tumesinise indigo värviga värvitud paberitüki päikese spektrumi: ta paistab nii punases kui kollases valguses üsna mustana, ainult sinises spektrumi osas on ta intensiivselt sinine: Et indigo värv peaaegu ainult siniseid kiiri läbi laseb ja kôiki teisi absorbeerib, siis ei vôi ta ei punases ega kollases valguses mingisuguseid valguskiiri hajutada ja jääb sellepärast mustaks. Ümberpöördult, hajutab punane tsinnoober ainult punaseid kiiri, — ta paistab sellepärast punases valguses punasena, spektrumi sinises ja rohelises osas aga mustana.

3) Ülevalkirjeldatust järgneb, et värvilise valguse ja värviainete segamise resultaat koguni mitte ühesugune ei ole. Kuna

me esimesel juhusel tõepoolest ühe värvi (valguse) teisele juure lisame, ei tee meie seda värviainete segamisel mitte: punane värviaine hajutab näiteks ainult punaseid kiiri, kui teda segada rohelise värviainega, mis ka punase valguse absorbeerib, siis ei hajuta see segu mingit valgust ja värviainetega kaetud pind paistab peaaegu mustana. Sinine värviaine hajutab siniseid ja vähe rohelisi kiiri; kui segada teda kollase värviainega, mis siniseid kiiri absorbeerib ja rohelisi läbi laseb, siis pääseb läbi segu ainult roheline valgus. Seega ei sega meie siin sugugi kollast ja sinist valgust, vaid hävitame mõlemaid, eraldades nendest sellega rohelist valgust. Niiviisi on seletatav, miks kollane ja sinine valgus valge värvi sünnitavad, kuna vastavad värviained rohelise värvi annavad.

§ 65. **Fotografeerimine loomulikkudes värvides** põhjeneb ülevalkirjeldatud asjaolul, et värvilised läbipaistvad kehad ainult seda valgust läbi lasevad, mille värv vastab keha värvile. Vennaste Lumière poolt valmistatud autokroomplaadid võimaldavad kehade värvi kaunis loomutruult otsekohe päevapildistada. Nende plaatide pinnal asub iseäraline värvifilter, mille läbi valguskiired enne minema peavad, kui nad plaadi valgustundliku broomhõbeda kihini jõuavad. Värvifilter valmistatakse väga peeneks jahvatatud tärklisteradest, mille läbimõõt suurem ei ole kui 0,01 mm. Üks osa tärklisest värvitakse punaseks, teine roheliseks ja kolmas sinikas-violetiks. Värvilised tärklisterakesed segatakse ühtleseks pulbriks ja kantakse üliõhukese kihina klaasplaadile. Et kihi paksus palju suurem ei ole kui terakeste läbimõõt, siis ei või viimased üksteise peal asuda, vaid ainult kõrvuti seista. Niiviisi saadud värvifilter kaetakse hariliku valgustundliku broomhõbekihiga.

Päevapildistamisel pööratakse plaadi puhas klaaspind valguse poole, nii et kiired läbi klaasi ja värvifiltri lähevad ning siis alles hõbekihile langevad. Tulgu näiteks punased kiired pp plaadipinna väikse osakese peale (joon. 153).



Joon. 153.

Värvifiltris (B) asuvad selle pinna osakesel kolme värvi läbipaistvad terakesed kõrvuti. Rohelised (r) ja sinised (s) terakesed absorbeerivad punase valguse, nii et nende taga hõbekiht C valgusest puutumata ja plaadi ilmutamisel läbipaistvaks jääb. Punased terakesed (p) aga lasevad valguse läbi, mille tõttu nende taga hõbekiht mustaks muutub. Samuti läheks kollane valgus jaoti punaste, jaoti roheliste terakeste kaudu hõbekihini, ei pääseks aga mitte läbi siniste. Peale ilmutamist on siis hõbekiht punaste ja roheliste terakeste taga must, siniste taga aga läbipaistev.

Kui ilmutatud plaati vastu valgust vaadata, siis näeme punase kiire langemiskohta rohekassinisena, kollase kiire kohta aga indigosinisena, s. t. langeva kiire täiendus-värvides, sest et need filtriterakesed, mille värv vastab langeva kiire värvile, musta hõbekihiga on varjatud. Sellekohase uue ilmutamis-protsessiga muudetakse nüüd hõbekihi läbipaistvad kohad mustaks, endised mustad aga läbipaistvateks. Siis pääsevad valguskiired meie silma ainult läbi nende filtriterakeste, mille läbi nad päevapildistamisel plaadi hõbekihini tungisid. Sellepärast näeme punaste kiirte poolt puudutatud kohta punasena, siniste kohta—sinisena j. n. e. Segavärvidena tuleb valgus silma korraga läbi mitmet värvi terakeste, kus juures enam või vähem tume hõbekiht teda kas ühest või teisest terakesest enam läbi laseb ja sellega päevapildistamisel plaadile langenud värvile vastava värvivarjundi sünnitab.

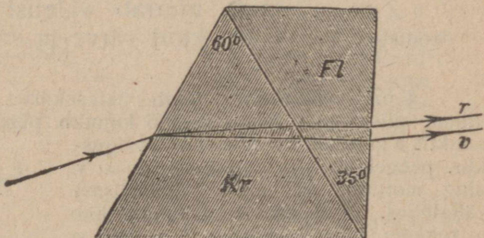
Kirjeldatud viisil saame päevapildi ainult klaasil vôi teistel läbipaistvatel ainetel.

§ 66. **Dispersiooni suurus ja aine murdumiseksponent; akromaatiline prisma:** 1) Kui prismas hajutud violett kiirte murdumiseksponenti kujutada tähega n_v ja punaste kiirte oma tähega n_p, siis annab vahe $n_v - n_p = d$ prisma aine dispersiooni suuruse, mis prisma aine värvihajutamise vôimet kujutab. Dispersiooni suurusest oleneb spektrumi pikkus: mida suurem on aine dispersioon, seda pikem on sellest ainest valmistatud prisma spektrum.

Katsed näitavad, et ainete dispersiooni suurus mitte proportsioonalne ei ole nende murdumiseksponentidega.

Näiteks on tina sisaldava n. n. flintklaasi murdumiseksponent (kollase valguse juures) $n = 1{,}7$, tema dispersioon $d = 0{,}037$; teise klaasisordi, n. n. kroonklaasi jaoks aga on $d = 0{,}019$, nii siis ligi pool väiksem, kuna tema murdumiseksponent $n = 1{,}61$ ainult 5% väiksem on kui flintklaasil.

2) Kui mõlemast nimetatud klaasisordist kaks ühesugust prismat valmistada, siis annaks flintklaasist prisma peaaegu 2 korda pikema spektrumi kui kroonklaasist prisma, olgugi, et spektrumi keskmised kiired môlemas prismas umbes ühekaugele alla kalduvad. Valmistame aga näiteks flintklaasist 35° murdva nurgaga prisma, kroonklaasist sellevastu 60° prisma, siis oleksid mõlemad spektrumid ühepikused, kuigi kiirte murdumine teises prismas suurem on kui esimeses.



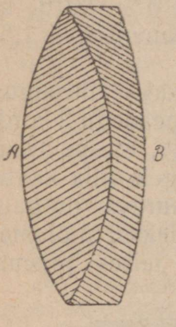
Joon. 154.

Asetame kaks viimati nimetatud prismat nii üksteise külge, et nende murdvad servad vastupidi seisavad (joon. 154), siis hajutab esimene prisma (60°) punaseid ja violett kiiri sedavõrra laiali, kui vôrra teine prisma neid jällegi vastastikku koomale murrab. Nii punased kui violett kiired (r ja v) tulevad sellepärast prismast paralleelselt välja ja ei haju laiali.

Sarnast kokkuseatud prismat, mille üks pool hävitab teise poole dispersiooni hüütakse akromaatiliseks prismaks. Valguskiired murduvad ka akromaatilises prismas, sest et 60° prisma kõvemine kiiri murrab, kui tema vastu mõjuv 35° prisma, kuid kiire üksikud värvid ei saa selle juures mitte hajutud, langevad ju kõik valguskiires peituvad värvilised kiired paralleelselt silma. Vaadates asju läbi hariliku prisma, näeme mingist asjapunktist tulevat valget kiirt peale dispergeerimist igas sihis ise värvis, nii et meie ühe valge punkti asemel hulga värvilisi punkte näeme Asja piirjooned on sellepärast värvilised ja segased. Akromaatilise prisma läbi näeme aga asju teravalt ja ilma nimetatud värvinähtusteta, missugune asjaolu praktilises optikas väga suure tähtsusega on.

§ 66. **Kromaatiline aberratsioon ja akromaatiline lääts.** 1) Et läätsa osad sarnased on prismadega (§ 31), siis peab. valgus ka läätsas dispergeeruma. See nähtus on tuntud kromaatilise aberratsiooni nimetuse all.

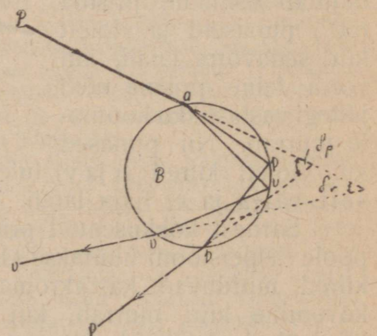
Juhime näiteks paralleelse kiirtejoa väga kumerale läätsale: et violett kiired rohkem murduvad kui punased, siis lôikavad esimesed peatelge (pärast murdumist) lähemal läätsale kui teised. Hoides peafookuskaugusel valge ekraani, saame seal valge punkti asemel värviliste äärtega täpi. Samasuguse kirju täpi annab kujutusel ka kehapinna iga punkt, mille tôttu saadud asjapilt värviliste ja segaste piirjoontega ilmub.



Joonistus 155.

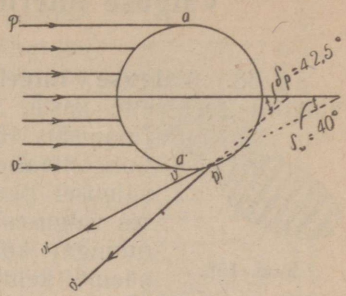
2) Et kromaatilist aberratsiooni kôrvaldada, tarvitatakse kahest läätsast kokku seatuid akromaatilisi läätse. Viimastes hajutab kroonklaasist tehtud kumerlääts A niivõrra värve, kui võrra neid uuesti koondab flintklaasist valmistatud õõneslääts B (joon. 155). Nagu akromaatilises prismaski, kaob siis dispersiooni nähtus, kuna kiirtemurdumine kumerläätsa suhtes — kuigi nõrgendatult — alles jääb. Joonistusel 155 kujutatud akromaatiline lääts murrab valgust nii nagu harilik kumerlääts, kuid värve ta selle juures ei hajuta.

§ 67. **Vikerkaar** tekib päiksekiirte murdumisel ja sisepeegeldusel vihma piiskades. Joonistus 156 kujutab päiksekiire Pa teed vihmapiisas B: punktis a murdub ja dispergeerub valguskiir, peegeldub siis punktides p ja v ning murdub veel korra vihmapiisast väljatulles. Meie näeme, et punane kiir p rohkem alla kaldub, kui violett v ($\delta p > \delta v$).



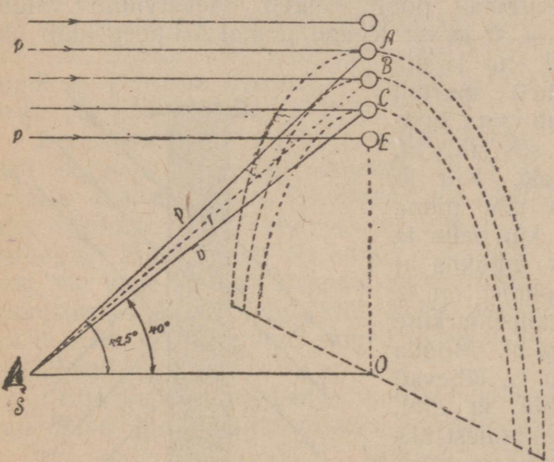
Joon. 156.

Iga vihmapiisa peale langeb terve hulk paralleelseid päiksekiiri. Kui nende kõikide teed vihmapiisas jälgida, siis selgub, et välja tulnud värvilised kiired suuremalt osalt ühtlaselt igale poole laiali hajuvad, välja arvatud iga värvi jaoks üks teatud siht milles vastavat värvi kiired peaaegu paralleelselt ja koondatult välja tulevad, nii et nad selles sihis vaadates—meie silmas värvilist valgusetunnet sünnitavad. Kui näiteks joonistusel 156-a kujutatud vihmapiiska (või veega täidetud klaaskera) päikse käes hoida, siis lähevad temast igas sihis värvilised kiired läbisegi laiali. Selle tôttu on viimaste mõju meie silmas nii nõrk, et vihmapiisk tumedana paistab. Ainult ühes sihis pp tulevad punased kiired paralleelselt ja koondatult meie silma, ärritavad seega tugevamini nägemiserku, nii et meie piiska punasena näeme. Mõnes teises sihis (vv) tulevad koondatud paralleelsed violett kiired, — teda mööda vaadates näeme piiska violetina, mingis kolmandas sihis rohelisena j. n. e. Matemaatilised juurdlused näitavad et punaste kiirte jaoks nimetatud siht seisab 42,5⁰ all langevate kiirte sihti vastu, violett kiirte jaoks — 40⁰ all, kuna teiste spektraalvärvide sihid nimetatud äärmiste sihtide vahel asuvad.



Joon. 156-a.

Joonistusel 157 olgu ABC vihmapilve serv, millele paralleelsed päikse kiired PA langevad. Vaatlejale S paistab see vihmapiisk punasena, mida ta 42,5⁰ all päiksekiirte sihi vastu näeb. Kui läbi S paralleelselt päiksekiirtele tõmmata siht SO, siis on nurk PAS = = 42,5⁰ = ASO, ja piisk A paistab punasena. Kôik kôrgemalseisvad piisad on tumedad, sest et nendest tulevad paralleelsed kiirtejoad üle vaatleja lähevad. Nurga PCS = 40⁰ = CSO all näeb vaatleja ainult violett piiska C, kuna roheline, kollane j. n. e. värv A ja C vahel paistab. Et kirjeldatud värvide nägemine vôi mittenägemine ainult nurgast oleneb, mille all meie vaatame, siis paistavad meile needsamad värvid ka igas teises kohas, mida meie nimetatud nurkade all näeme. Niisugused kohad asuvad läbi A, B ja C tômmatud kaartel, mille tsentrum on punktis O. Meie näeme nii siis tervet kirjut vikerkaari, mille välimine äär (A) on punane ja sisemine (C) violett.



Joon. 157.

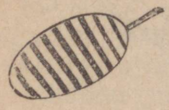
Täie poolkaarena vôib vikerkaar ainult siis ilmuda, kui päike otse horisondil seisab (joon. 157); muidu langeb vikerkaari tsentrum O alla horisonti, nii et poolkaarest ainult ülemine osa näha on. Kui päike 42⁰ üle horisondi seisab, siis langeb O nii sügavale horisondi alla, et vikerkaari ülemine tipp A otse horisondil seisab. Sarnasel puhul ei näegi meie enam vikerkaari: selleks, et vikerkaar ilmuda vôiks, peab päike madalamal kui 42⁰ üle horisondi seisma.

Peale kirjeldatud peavikerkaari ilmub ümber viimase tihti veel nôrgem teine vikerkaar, milles värvid vastupidi esimesele seisavad, s. t. punane all ja violett üleval. Tema sünnib sarnaselt nagu esimenegi, kuid nende kiirte abil, mis veepiiskades kaks korda sisemiselt peegulduvad.

Peatükk VIII.

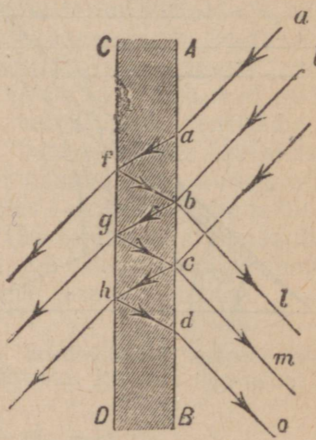
Valguse interferents ja diffraktsioon.

§ 68. **Valguse interferents õhukestes kelmetes.** Kui traatvôru seebivette kasta, siis saame võrul õhukese seebikelme (joonistus 158), millel iseäralised mitmevärvilised horisontaalsed triibud ilmuvad, kui teda päevavalgusel pealt vaadelda. Homogeenses värvilises valguses (§ 62_2), näiteks keedusoolaga (naatriumiga) kollaseks värvitud piiritusleegi valgusel näeme kelmel vaheldamisi heledaid (kollaseid) ja muste triipe. Punases valguses seisavad triibud kaugemal üksteisest kui kollases, violett valguses aga lähemal üksteisele.



Joon. 158.

Nähtuse seletamiseks kujutagu joonistus 159 kelme suurendatud põiklôiget. Paremalt poolt langeb ühevärviline valgus paralleelsete kiirtena a, b ja c. Kelme pinnal AB peegeldub üks osa kiirtest sihis bl, cm ja do, teine osa aga läheb murtult kelme sisse, peegeldub vastu tagapinda CD, ja tuleb siis sihis bf, gc ja hd uuesti tagasi. Kiir fb murdub välja tulles läbi pinna AB sama palju alla kui palju ta kelme sisse minnes (punktis a) üles murdus. Sellepärast on ta punktist b saadik paralleelne kiire bb peegeldatud sihiga bl. Mööda sihte bl, cm, do j. n. e., lähevad nii siis 2 kiirt: bbl ja afbl, ccm ja bgcm j. n. e., millest üks af + fb (= gb + gc) vôrra pikema tee peab ära käima kui teine. Interfereerudes võib kas fbl kôvendada vôi hävitada kiire bbl õõtsumist; esimesel juhusel on kelme pinna punkt b hele, teisel aga tume. Kui af + fb = bg + gc = ch + hd võrdub poollaine pikkusega, siis on kiirte fbl ja bbl käigu vahe poollainet, s. t. esimese kiire laineoru vastu seisab alati teise kiire lainehari. Selle tagajärjel hävineb lainetamine punktis b (IV § 7_1). Sama nähtus kordub kõigis teistes punktides (c ja d), nii et kogu kelme pind pealt vaadates tume peab olema. Võrdub aga af + fb terve lainega, siis toetuvad môlemad kiired, punktid b, c ja d on kõik heledad ja ka kelme pind on hele.



Joon. 159.

2) Tôepoolest on aga seebikelme alt paksem kui ülevalt, sest et vesi kelmet mööda alla vajub. Nii võib näiteks af + fb poollainega võrduda, ch + hd aga $1^1/_2$ lainega. Et ka viimasel

juhusel lainete käigu vahe poollainet on, siis jäävad môlemad punktid b ja d tumedaks. Nende vahel aga leidub hele punkt c, kus bg+gc võrdub terve lainega. Et kelme paksus horisontaaljoontel umbes ühesuurune on, siis ilmub üle kogu kelmepinna läbi b minev tume, läbi c — hele ja läbi d jällegi tume horisontaalne triip. Joonistusel 159a on ABC nimetatud kelme kiilusarnane läbilõige, mille kõrval kelme pinnal ilmuvad triibud eraldi on kujutatud: seal kus ülevalnimetatud kiirte käigu vahe võrdub poollainete paaritu arvuga (b, d ja f), on pind pealtvaadates pime, kus ta aga poollainete paarisarvuga võrdub (c,e,g), seal on pind hele.

Joon. 159a

3) Et kirjeldatud triibud punases valguses kaugemal teine-teisest seisavad kui sinises ehk violetis, on seletatav ainult oletusega, et punase valguse lained pikemad on kui violett valguse omad.

Joonistuselt 159 ja 159a on näha, et kõrvuti seisvate tumedate triipude (b ja d) kaugus oleneb vahest (ch+hd) — (af+bf), mis võrduma peab ühe terve lainepikkusega. Mida lühem on laine, seda väiksem see vahe, — seda lähemal seisavad siis joonistusel 159a kujutatud kiilu lôikel punktid b ja d, — nimetatud tumedate triipude keskkohad.

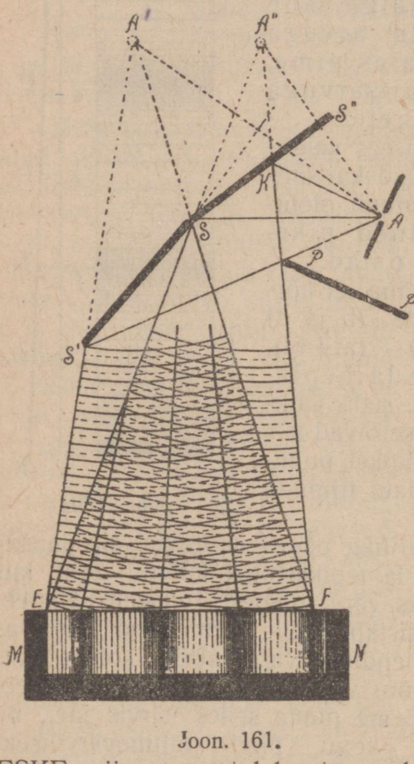
Kui kelme valgustada hariliku päevavalgusega, siis langevad tema peale mitmesuguse lainepikkusega kiired. Seal, kus üks värv interfereerumisel hävineb, paistab meile kelmepind vastavas täiendusvärvis, teises kohas, kus môni värv interfereerudes kõveneb, näeme pinda selles värvis jne., nii et kogu pind mitmevärviliseks muutub.

Joon. 160.

4) Ülevalkirjeldatud interferentsnähtusel põhjenevad õhukeste õlikihtide värvid veepinnal, terase karastamisel tekkiva õhukese oksüüd-kihi värvid terasel ja palju teisi nähtusi. Üks huvitavamatest on n. n. Newtoni värvirõngaste nähtus. Ta ilmub, kui tumedal alusel asuva klaasplaadi A peale paigutada väikse kõverusega tasakumerlääts B (joon. 160). Mõlema klaasi vahel asuv õhk moodustab õhukese ôhukelme, mille paksus kasvab läätsa tsentrumist kaugenemisega. Kui klaasi valgustada ühevärvilise valgusega, siis mõjub õhukelme iga raadiust

mööda samuti nagu joonistusel 159-a kujutatud õhuke kiil: ümber tumeda tsentrumi mn, kus klaasid kokku puutuvad ja kus selle tagajärjel valguse peegeldust ei ole, näeme hulga kontsentrilisi heledaid ja tumedaid rõngaid, mille seisukohad olenevad õhukelme paksusest. Punases valguses seisavad rõngad kaugemal, sinises aga lähemal üksteisele. Valges valguses näeme kõigis spektraalvärvides hiilgavaid rõngaid.

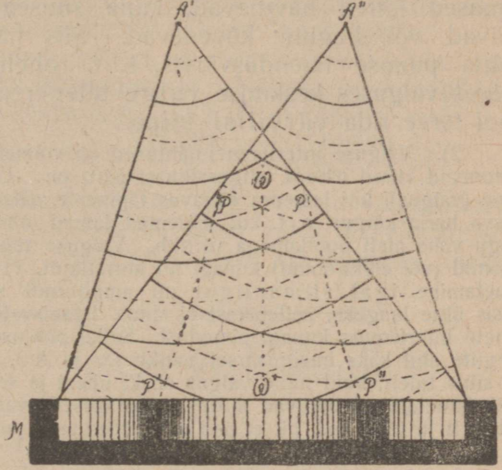
§ 69. **Fresneli interferents-katse.** Fresnel oli esimene, kes tõestas (1822), et valgus vôib interfereeruda ja kes sellega valguse lainetamisteooria lôpulikult võidule aitas. Kuulus interferentskatse n. n. Fresneli peeglitega on skemaatiliselt kujutatud joonistusel 161: SS' ja SS" on kaks peeglit, mis peaaegu ühel tasapinnal asuvad; seega on nurk S'SS" ligi 180°. Läbi kitsa pilu A juhitakse ühevärviline valgus peeglitele, kust ta peegeldub ja siis ekraanile EF heitub. Harilikkude peegeldusseaduste järele heidavad môlemad peeglid valguse niiviisi tagasi, nagu oleksid tema allikateks pilu A peegelpildid A' ja A". Kui môlemad peeglid ühel tasapinnal seisaksid, siis mõjuksid nad nagu üksainus peegel ja kujutused A' ja A" langeksid ühte. Et aga nurk S' SS" natuke väiksem on kui 180°, siis seisavad A' ja A" eraldi, kuigi väga ligistikku. (Et hôlbustada ülevaatlikust, on nad joonistusel 161 liialdatult kaugel üks-teisest kujutatud). Peeglilt S'S tuleb valgusjuga ES'SF, mille allikaks nagu oleks punkt A'; teiselt peeglilt langeb ekraanile juga ESKF nii, nagu tuleks ta punktist A". (Tôeline valgusallik A on varjatud sirmiga PP, nii et temast otsekohe ühtegi kiirt ekraanile ei pääse). Piirkonnas ESF interfereeruvad môlemad valgusjoad, kohati toetades, kohati hävitades üks-teist. Selle tagajärjel ei ole ekraani pind mitte ühtlaselt valgustatud, vaid temal ilmuvad vaheldamisi heledad ja tumedad pilule A paralleelsed triibud (MN).



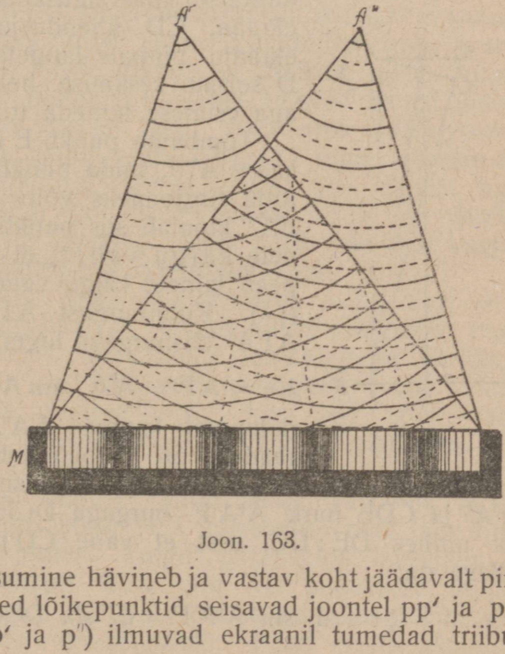
Joon. 161.

Lainetamisteooria järele laguneb valguslainetamine igast allikast kontsentriliste keralainetena laiali (IV, § 9). Et käsitatud juhusel mõlemad ettekujutatud valgusallikad A' ja A" joonistuse pinnal seisavad, siis lõikavad nendest laialilagunevad keralained joonistuspinda kontsentrilistel ringjoontel, mille tsentrumid on

A′ ja A″. Interfereerumise protsessi hôlpsamaks jälgimiseks on joonistustel 162 ja 163 suurendatult kujutatud punktidest A′ ja A″ väljatulevate keralainete lõikejooned joonistuspinnaga, — esimesel juhusel pikemate (punaste), teisel juhusel lühemate (siniste) lainete jaoks. Täisjoonega märgitud keralainetel asuvad alati laineharjad, punkteeritud joonega kujutatud lainepindadel aga laineorud. Nii esimeste kui teiste kerapindade kaugus üksteisest vôrdub nii siis valguslaine pikkusega. Seal, kus täisjoonega kujutatud lainepind lõikab teist samasugust pinda, langevad laineharjad môlemas lainetamises ühte ja toetavad üks-teist, nii et vastav koht hele peab olema. Heledaks jäävad ka need kohad, kus punkteeritud jooned lõikuvad, sest et seal laineorud üks-teist toetavad. Nagu joonistusel 162 näha, seisavad niisugused lôikepunktid joonel w—w¹. Seega ilmub ekraanil NM punktis w¹ hele triip. Kus täisjooneline kaar lôikab punkteeritut, seal seisab ühe valguslainetamise laineharja vastu alati teise lainetamise org, teiste sõnadega, seal vôrdub mõlema lainetamise käiguvahe poollainega, nii et õõtsumine hävineb ja vastav koht jäädavalt pime on (IV, § 7_1), Niisugused lõikepunktid seisavad joontel pp′ ja pp″; vastavates kohtades (p′ ja p″) ilmuvad ekraanil tumedad triibud.



Joon. 162.



Joon. 163.

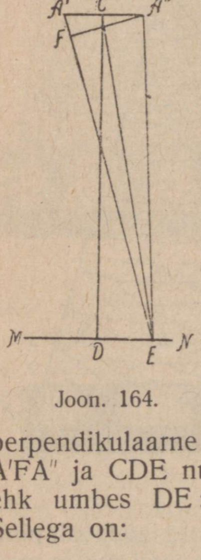
Joonistustest 162 ja 163 selgub, et lühemate lainete puhul, mille kerapinnad üks-teisele lähemal seisavad,—**ka interferentstriibud koomal peavad seisma.** Seega vôime triipude kauguse põhjal otsustada valguslainete pikkuse üle.

Tarvitame homogeense valguse asemel harilikku valget valgust, siis võib juhtuda, et interfereerudes ühes kohas näiteks punased kiired hävinevad, kuna sinised ja rohelised seal alles jäävad või koguni kõvenevad. Siis näeme vastavat ekraani kohta punase täiendusvärvis, s. t. rohelises. Sellepärast ilmub valges valguses keskmise valge interferentstriibu kõrval môlemal pool terve rida värvilisi triipe.

2). Valguse interferents-nähtused on võimalikud ainult siis, kui interfereeruvad kiired ühest valgusallikast pärit on: Ühes punktis hävineb õõtsumine (valgus), kui laineoru sügavus täpipealt niisama suur on, kui tema vastu seisva harja kõrgus, s, t. kui mõlemad lained ühesugused on ja kui nende käigu vahe alati poollainega võrdub. Valguse tekkimisel aga ei õõtsu aine aatomid (või elektroonid) kunagi nii korralikult, et kahe iseseisva valgusallika lainetamine igal silmapilgul nii amplituudi suuruses kui ka õõtsumise faasis ühte langeks, sellepärast ei anna iseseisvatest valgusallikatest tulevate lainete interferents kunagi pimedust. Sellel põhjusel luuaksegi Fresneli katses peeglite abil kaks imaginaarset punkti (A' ja A''), millest valgus küll eraldi ja ise sihis tuleb, kuid mille valgus siiski ühest ja sellestsamast allikast pärit on. Kõik lainetamises ilmuvad mittekorrapärasused avalduvad siis mõlemas punktis ühtlaselt ja ühel ajal, nii et nad interfereerumise peale ei mõju.

§ 70. Valguslainete pikkuse mõõtmine Fresneli katsel.

1) Joonistusel 164 olgu A' ja A'' eelmises § kirjeldatud peegelduskatse eba-valgusallikad (joon. 161), MN - ekraan, CD ühendusjoone A'A'' keskkohalt ekraani pinnale langetatud normaal. Punktis D seisku keskmise heleda triibu, punktis E aga esimese tumeda triibu keskkoht.



Joon. 164.

Tõmbame punkti E ümber raadiusega EA'' kaare A''F, mida punktide A' ja A'' läheduse tõttu sirgjooneks võib lugeda. A'F = A'E — EA'' kujutab siis punktis E lõikuvate keralainete käigu vahet; et see koht tume on, siis peab lainete käigu vahe võrduma poollainega ($\frac{1}{2}\lambda$). Kolmnurgast A'FA'' leiame, kui nurka A'FA'' täisnurgaks lugeda:

$$\tfrac{1}{2}\lambda = A'F = A'A''.\ \mathit{sin}\ A'A''F = d\ \mathit{sin}\ A'A''F,$$ kus d kujutab kaugust A'A''. Et aga EC kui kaare raadius on perpendikulaarne A''F, ja CD on perpendikulaarne A'A'', siis võrdub täisnurksetes kolmnurkades A'FA'' ja CDE nurk A'A''F nurgaga DCE. *Sin* DCE = DE : EC ehk umbes DE : DC, sest et vahe CD ja CE vahel väike on. Sellega on:

$$\tfrac{1}{2}\lambda = d.\ \mathit{sin}\ A'A''F = d.\ \mathit{sin}\ DCE = d.\ \frac{DE}{DC}:$$

Kui kahe tumeda triibu kaugus on k, siis on $DE = \frac{k}{2}$; olgu kõrgus $DC = h$, siis on:

$$\lambda = \frac{d. k}{h}.$$

Kaugusi d, k ja h võime katsel otsekohe mõõta; nende põhjal saame leitud formulist homogeense valguse lainepikkuse.

2) Interferentskatsetest selgub, et valguslainete pikkus üliväike ja iga värvi jaoks isesugune on. Näiteks on lainepikkus:

punases	valguses keskmiselt	$0{,}762\ \mu = 0{,}000762$	mm.
kollases	„ „	$0{,}589\ \mu = 0{,}000589$	„
violett	„ „	$0{,}397\ \mu = 0{,}000397$	„

Formuli $c = N l$ (IV, § 4) abil võime välja arvata valguslainetamise õõtsearvu N, kui valguse kiiruseks võtta 300000 km/sek. Leitud arvud, mille suurust raske on enesele ettekujutada, oleksid järgmised:

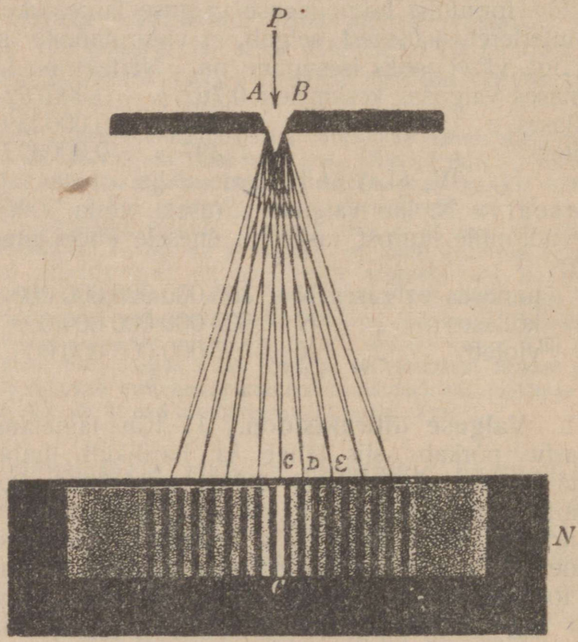
punases valguses	N =	395 000 000 000 000
kollases „	N =	509 000 000 000 000
violett „	N =	757 000 000 000 000

§ 71. **Valguse diffraktsioon.** 1) Kui lainetamine mingi tõkke vastu põrkab, siis läheb ta harilikult ümber viimase äärte ja täidab teatud kaugusel tõkke taga jällegi kogu ruumi. Seistes näiteks seina taga, kuuleme teiselt poolt tulevat heli, kuigi sein niisugusest ainest oleks, et ta helilainetamist edasi ei kanna: lainetamine peab nii siis ümber seina „paindudes" meie juurde tulema. Rannas võime tähele panna, et üksikud kivid, tulbad j. n. e. ei sega lainete liikumist; näiteks tulevad lained ümber väiksema kivihunniku ka viimase taha. Kuid pika sadama-muuli taga on veepind rahulik: muul nagu „varjab" mere lainetamist. Sellest peame järeldama, et lained ainult siis tõkke taga olevat ruumi võivad täita, kui tõkke ulatus väike on võrdlemisi lainepikkusega, teiste sõnadega: **vari tekib siis, kui varjav tõke (pind) suur on võrdlemisi lainepikkusega.**

Sellega on seletatav, miks läbipaistmatu keha alati varju heidab, nii et meie valguslainete „ümber nurga minemist" harilikult ei näe: valguslained on niivõrd lühikesed, et harilikud asjad nende jaoks seda on, mis veelainetamisele muul. Üsna kitsaste kehade, näiteks inimese juukse taga aga võime juba tähele panna valguse paindumist varju piirkonda ehk n. n. valguse diffraktsiooni.

2) Selle asemel, et valguse diffraktsiooni vaadelda mõne kitsa keha varjus, võime seda veel hõlpsamini teha läbi kitsa pilu juhitud valgusjoa juures. Tulgu paralleelne kiirtejuga P (joon. 165) läbi võimalikult kitsa pilu AB pimedasse tuppa. Pilusse jõudnud lainepinnal saab iga punkt uueks lainetamisallikaks, kust valgus igas sihis laialilaguneb. Paari meetri kaugusel

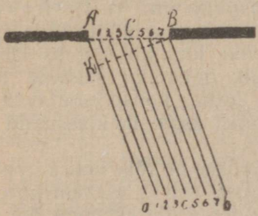
seisval ekraanil MN näeme peale keskmist heledat triipu C veel hulga teisi paralleelseid värvilisi triipe, mis tôestab, et valgus tõepoolest mitte ainult sirgjoonelises sihis PC laiali ei lagune, vaid ka kõrvale kaldub. Homogeense valguse puhul ilmuvad ekraanil vaheldamisi heledad ja tumedad paralleelsed triibud, mille heledus seda nôrgemaks jääb, mida kaugemal keskkohast C seisab triip.



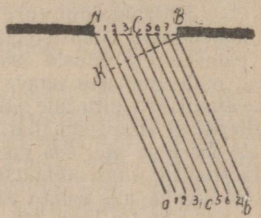
Joon. 165.

3) Triipude tekkimine diffraktsioonil on seletatav valguslainete interferentsiga. Et pilu väga kitsas peab olema ja ekraan MN (joon. 165) temast kaugel seisab, siis vôime lihtsuse pärast oletada, et kiir CA on paralleelne CB, DA paralleelne DB jne. Keskmisse punkti C tulevad kiired CA ja CB on ühepikkused, mispärast neid mööda tulev lainetamine interfereerudes kôveneb ja punkt C heledaks jääb. Mõnda kõrvalseisvasse punkti D langevas paralleelses kiirtejoas ADBD on kiir AD pikem kui BD, nii et punkti D jôudnud lained enam ühesugustes faasides ei ole. Äärmiste kiirte AD ja BD käiguvahet kujutab suurendatud joonistusel 166 pikkus AK, kus BK on tõmmatud perpendikulaarselt Aa-le. (AD ja BD-le joonistusel 165 vastab Aa ja Bb, joon. 166).

Võrdub AK ühe lainepikkusega, siis vôime terve kiirtejoa keskmise kiire Cc abil pooleks jagada; kiir Cc on poollaine võrra pikem kui Bb, ja Aa niisama vôrra pikem kui Cc. Iga kiire (1) vastu esimeses pooljoas Aa Gc seisab temast poollaine võrra lühem kiir (5) teises pooljoas Cc Bb. Sellepärast hävinevad interfeerumisel mõlemad joapooled, nii et vastav ekraanipunkt (D) t u m e on. Tumedaks jäävad ka need ekraa-



Joon. 166.



Joon. 167.

nikohad, millele kiired niivôrd längus langevad, et AK k a h e l a i n e p i k k u s e g a vôrdub (joon. 167): keskmise kiirega Cc jaotame kogu joa pooleks; siis on esimese kui ka teise pooljoa äärmiste kiirte käigu vahe jällegi üks terve lainepikkus (sest et Aa — Cc = λ ja Cc — Bb = λ) nii et môlemad pooled interfereerumisel hävinevad. Ü l e ü l d s e o n k õ i k n e e d e k r a a n i k o h a d t u m e d a d, k u s AK v õ r d u b 2, 4, 6 j. n. e. p o o l a i n e g a.

Võrdub aga AK $1\frac{1}{2}$ lainepikkusega, sis võime terve joa 3 osasse jagada: esimese $\frac{2}{3}$ moodustava joaosa äärmiste kiirte käigu vahe on 1 lainepikkus (AK $= \frac{3}{2}\lambda$; $\frac{2}{3}$ AK $= 1\ \lambda$), mille tõttu see osa hävineb; ainult järele jäänud kolmandik valgustab vastavat ekraanikohta. On AK $= \frac{5}{2}\ \lambda$, siis valgustab ekraanipinda ainult $\frac{1}{5}$ kiirtejoast jne. H e l e d a d t r i i b u d i l m u v a d n i i s i i s s e a l, k u s AK = 3, 5, 7 j. n. e. p o o l l a i n e p i k k u s t, kusjuures triip seda tumedam on mida kaugemal ta keskkohast C seisab.

4) **Ülevalkirjeldatust järgneb, et diffraktsioon-triibud seda koomal peavad seisma, mida lühem on laine pikkus;** nad on näiteks sinises valguses koomal kui rohelises ja rohelises koomal kui punases.

Triipude kaugusest võime leida tarvitatud valguse lainepikkuse λ. Olgu pilu laius AB (joon. 168) = a, ja F — esimese tumeda triibu keskkoht, siis on

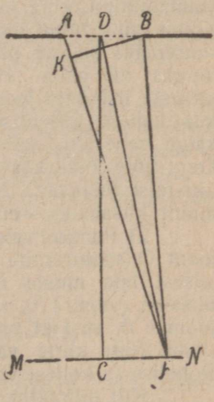
$$\lambda = AK = AB \sin ABK = a \sin ABK.$$

Nurk ABK = CDF, sest et DF peaaegu perpendikulaarne on BK ja DC $\perp$ AB. *Sin* ABK = *sin* CDF = CF : DF. Ilma tuntava veata võime lugeda DF = DC, nii et *sin* ABK = CF : DC. Olgu CF = δ ja CD = h, siis on:

$$\lambda = \frac{a\,\delta}{h};$$

Vastavalt leiaksime teise tumeda triibu kaugusest δ_1, et

$$2\,\lambda = \frac{a\,\delta_1}{h};$$



Joon. 168.

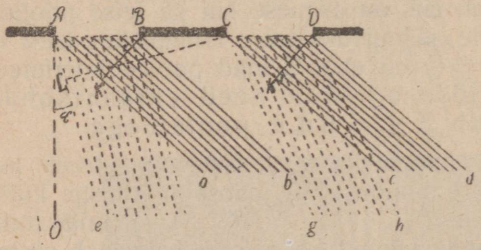
Näide: Pilu laius a = 0,26 mm. Rohelises valguses ilmub 1,7 m kaugusel ekraanil esimene tume triip δ = 3,5 mm kaugusel keskkohast. Rohelise valguse lainepikkus on seega:

$$\lambda = \frac{a\delta}{h} = \frac{0,26 \cdot 3,5}{1700} = 0,000525 \text{ mm.}$$

§ 72. **Diffraktsioonvôre; diffraktsioonspektrum.** 1). Diffraktsioonvõreks nimetatakse läbipaistmatut plaati, millel terve rida ülikitsaid ja ligistikku seisvaid paralleelseid pilusid asub. Niisugust võre kujutab näiteks läbipaistev klaasplaat, mille pinnasse terava teemandiga hulk ligistikku seisvaid jutte on lôigatud (kunni 400 jutti ühe millimeetri peale.) Juttide kohad hajutavad valgust ja on sellepärast läbipaistmatud, kuna nende vahel asuv sile klaasipind valgust vabalt läbi laseb ja pilu osa etendab.

Harilikult on kogu diffraktsioonvõre niivõrd kitsas, et kôiki neid kiiri paralleelseteks võib lugeda, mis temast paari meetri kaugusel seisva ekraani ühte punkti lähevad. Kui näiteks joon. 165 pilu AB asemel terve diffraktsioonvôre seisaks, siis võib ilma suurema veata kiirtejuga ADB paralleelseks pidada. Niisugusel puhul ou nähtus sarnane eelmises § kirjeldatud diffraktsioonnähtusega:

Joonistusel 169 on kujutatud ainult 2 diffraktsioonvôre pilu AB ja CD, millest paralleelsed kiirtejoad Aa — Bb ja Cc — Dd ühte ekraanipunkti lähevad. Üheainsa pilu AB puhul ilmuks ekraanil esimene tume triip selles kiirtesihis, mille juures äärmiste kiirte Aa ja Bb käigu vahe Ak vôrdub lainepikkusega (§ 71). Teine pilu CD ei muuda selle triibu seisu, sest ka temast lähevad paralleelsed kiired Cc — Dd niisamasuure käiguvahega ($Ak^1 = \lambda$) samasse ekraanipunkti. Ei muutu teise pilu môjul ka kõigi järgmiste tumedate triipude seis, vaid nad jäävad samasse kohta, kus neid esimene pilu üksinda sünnitab.



Joon. 169.

Kuid nimetatud tumedate trlipude vahel tekivad teise pilu CD môjul veel uued tumedad triibud, mis endiste heledate peale langevad. Kahe pilu juures ilmub näiteks uus tume triip seal, kus kiirte Aa ja Cc käigu vahe AL vôrdub poollainega või üleüldse $\frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, $\frac{5}{2}$ jne. lainepikkusega, sest et siis esimene, teine, kolmas jne. kiir joas Aa hävitab vastava esimese, teise, kolmanda jne. kiire joas Cc, nii et mõlemad joad koos ekraanil pimeduse annavad. Kolme pilu puhul ilmuvad veelgi uued tumedad triibud endistele juurde. Mida suuremaks kasvab pilude arv, seda rohkem ilmub tumedaid triipe. Neid tekib lôpuks nii palju, et heledad triibud üsna hävinevad, peale üksikute väga kitsaste heledate joonte, mis alles jäävad. Viimased ilmuvad nimelt selles sihis, kus kahest kõrvutiseisvast pilust tulevate äärmiste kiirte (näiteks Aa ja Cc) käigu vahe (AL) võrdub 1, 2, 3, 4 jne. lainepikkusega, sest et sel puhul üle kogu võre kaks kõrvutiseisvat kiirtejuga (Aa—Bb ja Cc—Dd) ikka paarikaupa üks-teist toetavad. Need heledad jooned muutuvad pilude arvu kasvamisel ainult kitsamaks,—ei hävine aga kunagi.

2) Punasel valgusel saame ekraanil nii siis kahelpool keskmist väga heledat joont O (spektrumite tabel, joon. 170) mitu punast jutti 1, 2, 3 jne,, mis üksteisest laia musta triibuga on lahutatud. Violett valgusel jagunevad jooned niisama (joon. 170, rida II) kuid nad seisavad nüüd kõik lähemal keskmisele joonele 0, sest et violett valguskiired lühemad on kui punased, nii et AL (joon. 169) kiirte väiksemal kôrvalekaldumisel võib võrduda lainepikkusega. Rohelise ja kollase valguse jooned ilmuksid punaste ja violett joonte vahel jne.

Kui diffraktsioonvôrele valge valgus langeb, siis toetavad üks-teist kôik need kiired, mis perpendikulaarselt võrest tulevad, nii et keskmine jutt 0 (joon. 170, rida III) valgeks jääb. Tema kõrval aga annavad valges valguses peituvad violett kiired violett joone, vähe kaugemal ilmuvad sinised, siis kollased, ja kõige kaugemal punased diffraktsioon-jooned. Need kõrvutilangevad värvilised jooned moodustavad mõlemal pool keskmist jutti 0 (joon. 170, rida III) terve rea diffraktsiooni spektrume (1, 2, 3 jne), mis üks-teisest mustade triipudega on lahutatud. Kõige lähemal keskkohale seisvat ja ühtlasi kõige lühemat ja heledamat hüütakse esimeseks spektrumiks (1). Järgmised spektrumid — teine, kolmas jne. — on pikemad, kuid tumedamad ja segasemad, sest et üksikud värvijooned nendel laiemad on, ja sellepärast jaoti üks-teise peal asuvad.

3) Kuna prismade abil sünnitatud spektrumid alati prisma aine dispersiooni suurusest (§ 66.) olenevad, nii et mitmesuguste ainete abil saadud spektrumid mitte sarnased ei ole, on diffraktsioonspektrumid alati ühesugused, oleneb ju nendes teatud värvi juti seis alati ainult selle värvi lainepikkusest. Kõigis prismaspektrumites on punased kiired vähem laiali hajutatud kui violett kiired, sest punaste kiirte piirkonnas muutub murdumiskoeffitsient ühes lainepikkusega vähem kui violett piirkonnas. Selle tagajärjel on prismaspektrumis punane ots võrdlemisi lühike, violett ots aga pikk. Diffraktsioonspektrumis seisavad kiired niiviisi reas, et nende kaugus üks-teisest igal pool proportsionaalne on vastavate kiirte lainepikkustega, seda spektrumi hüütakse sellepärast ka normaalspektrumiks.

Diffraktsioonspektrum võimaldab kõige lihtsamat ja kõige täpipealsemat lainepikkuse mõõtmist: ühevärvilises valguses määrab ära esimese diffraktsionjoone (1) seisu spektrumil nurk 0Ae (joon. 169) $= \varphi$. Kui pilu laius AB $= a$ ja piludе vahe BC $= b$, siis on $\sin \varphi = \sin 0Ae = \sin ACL = \frac{AL}{AC}$. Esimese diffraktsioonjoone juures võrdub AL vaadeldud ühevärvilise valguse lainepikkusega λ ja AC $= a + b$, järjelikult on $\sin \varphi = \frac{\lambda}{a+b}$, ehk

$$\lambda = (a + b) \sin \varphi.$$

Suurus $a + b$, — n.n võrekonstant mõõdetakse näiteks mikroskoobi abil üks kord iga võre juures. Et leida valguse lainepikkust λ, on siis ainult tarvis mõõta selle nurga 0Ae $= \varphi$ suurust, mille all meie esimest diffraktsioonjoont näeme.

Mida väiksem on $a + b$, seda suurem on φ ühe teatud lainepikkuse juures, seda kaugemal seisavad jooned spektrumil. Et saada pikka diffraktsioonspektrumi, peab võre võimalikult tihe olema.

4) Uuemal ajal tarvitatakse peegeldavaid diffraktsioonvõrresid, milles peegeldavasse metallpinnasse rida ülipeenikesi kriipse on lõigatud. Sile peegelpind kriipsude vahel mängib pilude osa, kuna kriipsud ise valgust ei peegelda ja nii pilu vahede asemel on. Valgus tuleb ekraanile ainult peegeldavatelt ribadelt, niisama nagu läbi piludegi. Niisugustel võredel on kunni 1700 kriipsu ühe millimeetri pikkusel.

5) Looduses näeme tihti värve, mille tekkimise põhjus peegeldava diffraktsioonvõrk sarnane kehapind on. Mõne siidiriide, putuka tiiva, pärlmutri jne. värviline hiilgamine on ainult diffraktsiooni nähtus. Kui pärlmutri pinnast täpipealne koopia võtta, — näiteks galvaanilisel teel või lihtsalt musta kirjalakiga, — siis hiilgab koopia pind pärlmutri sarnaselt, mis tõestab et selle värvi põhjuseks on ainult pinna struktuur.

Peatükk IX.

Spektrumid ja spektraalanalüüs.

§ 73. **Emissioon- ehk kiirgamisspektrumid.** 1) Elektrivooluga kuumendame plaatintraati kunni valgelt hõõgamiseni ja sünnitame tekkinud valguse spektrumi: viimases näeme kôiki spektraalvärve katketult üks-teise kôrval seisvat, nii et spektrum heledat paela kujutab, milles ühtegi musta triipu ei leidu. Samasuguse spektrumi annab sula ja hôôgav vedel metall, harilik tulileek, gaasilamp, elektri leeklamp jne.

Et ka tulileegis valguse kiirgajaks on nôgikübemed — nii siis kõvad kehad —, siis järgneb sellest üleüldine seadus: **Hõõgavad kõvad ja vedelad kehad annavad alati katketu spektrumi.**

2) Ka hôôgavad gaasid ja aurud kiirgavad valgust; viimase spektrumis näeme aga alati ainult üksikuid eraldi seisvaid spektrumivärve, tihti koguni ainult kitsaid üksikuid heledaid jooni. **Gaaside ja aurude spektrum on nii siis katkeline.**

Teatavasti annab harilik piirituslamp värvitu leegi, mis õige vähe valgust välja kiirgab. Kui aga selles leegis traadiotsal tükike keedusoola hoida siis aurub sool, ja sünnib viimases sisalduva naatriumi aur, mis kollaselt hôôgab. Saadud valguse spektrumis näeme ainult ühte heledat kollast joont (vaata spektrumite tabel), mis niivôrd iseloomulik on naatriumi jooks, et ta iga naatriumsoola aurumisel — olgu seda soola piiritusleegis nii vähe kui tahes — alati ilmsiks tuleb, ja nimelt ikka spektrumi ühes ja samas kohas. Ka teiste keemiliste elementide aurul on omad iseloomulikud spektraaljooned. Näiteks annab hôôgav kaaliumi aur kaks punast ja ühe violett joone, liitium annab punase ja oranzh joone jne. Selle vastu näeme aga baariumi auru spektrumis suure hulga jooni pea igas spektraalvärvis, raua aur annab koguni 4000 — 5000 spektraaljoont.

Gaaside spektrumi tekitamiseks tarvitatakse hôreda gaasiga täidetud klaastoru, milles gaas elektrivoolu abil hôôgama pannakse (Geissleri torud). Nende spektrumid on täiesti sarnased aurude omaga: vesinik annab näiteks 3 heledat joont, punase, rohelise ja sinise, — hapnikul on joonte arv palju suurem, kuna lämmastikul üle terve spektrumi laiemad spektraalribad ilmuvad. Selle järele, kas spektrumil ainult üksikud jooned vôi terved ribad tekivad, hüütakse neid kas joon- või ribaspektrumiteks. Nii ühed kui teised on katkelised.

Kõik ülevalkirjeldatud spektrumid sünnivad mõnest kiirgavast kehast tulnud valguse dispergeerumisel, neid hüütakse sellepärast kiirgamis- ehk emissioonspektrumiteks.

§ 74. **Absorptsioon- ehk neelumisspektrumid.** Kui valget valgust läbi värvilise läbipaistva keha juhtida, siis neelub seal üks osa kiiri, nii et järele jäänud valguse spektrumis môned osad puuduvad. Sarnasel teel sündinud neelumis- ehk absorptsioonspektrum võib väga mitmesugune olla, selle järele, missuguses aines neelumine sündis. Sinine klaas neelab näiteks kõik oranzh kiired, mispärast vastaval neelumisspektrumil oranzh osa tume on ja teised värvid vähe nôrgendatud peale sinise, mis endiselt hele on.

Kuid mitte alati ei hävine neelumisel terve värv, vaid tihti on ühes vôi teises värvis ainult kitsamad tumedad ribad. Mangaanhapu kaaliumi sulatis annab näiteks iseäralise neelumisspektrumi, millel rohelises ja kollases osas ainult 6 tumedat neelumisriba seisab (v. spektrumite tabel). Klorofilli neelumisspektrumis näeme peale sinise ja violett värvi täielist puudumist veel tumeda neelumisriba punases spektraalvärvis jne.

Aurude ja gaaside neelumisspektrumis muutuvad nimetatud neelumisribad kitsasteks tumedateks joonteks, mis korraga mitmes spektraalvärvis ilmuda võivad. Läbi salpeetrishape gaasi tulnud valgus annab näiteks spektrumi, millel sinises, rohelises, kollases ja oranzh osas hulk tumedaid jooni seisab (v. spektrumite tabel).

§ 75. **Kirchhoffi seadused; elektroonteooria seletus.** 1) Uurides hôôgavate aurude valguseneelumist, leidsid Kirchhoff ja Bunsen (1860), et läbi hôôgava naatriumauru tulnud valguse spektrumil täpipealt samal kohal must neelumisjoon ilmub, kus seesama aur üksinda naatriumi kollase spektraaljoone andis.

Omal katsel juhtisid Busen ja Kirchhoff mingist hôôguvast kehast või leegist saadud tugeva valgusjoa läbi piirituslambi leegi, milles keedusoola abil naatriumi auru sünnitati: Naatriumi aur üksinda andis ekraanil võrdlemisi nõrga kollase spektraaljoone; valgusjuga üksinda sünnitas seal heleda katketu spektrumi; niipea aga kui valgus läbi naatriumi auru juhiti, ilmus spektrumi kollases osas, täpipealt samas kohas, kus enne naatriumi kollane joon seisis, tume neelumisjoon.

Naatriumi aur peab nii siis läbi tema juhitud valgusest just neid kiiri neelama, mida ta ise — kuigi nõrgemalt — välja kiirgab. Muidugi saadab ta kirjeldatud katsel ka omi kiiri spektrumile, viimased aga on niivõrd nôrgad, et nad spektrumi küllalt valgustada ei suuda, nii et neelatud kiirtele vastav joon spektrumil ikkagi tumedana paistab.

Katsed teiste aurudega näitavad, et analoogiline nähtus üleüldine on kôigi aurude ja gaaside juures. Selle põhjal lõi Kirchhoff järgmise seaduse:

Antud temperatuuri juures neelavad gaasid ja aurud neid kiiri, mida nad ise sellelsamal temperatuuril välja kiirgavad. Gaasi neelumisspektrum kujutab tema „ümberpöördud“ kiirgamisspektrumi, sest et esimesel nendes kohtades tumedad jooned asuvad, kus teisel gaasile iseloomulikud heledad spektraaljooned seisavad.

2) Kirchhoffi seadus ei ole mitte ainult valgus-, vaid on ka soojuskiirte jaoks maksev. Ta määrab ôieti ainult ära vahekorra keha kiirgamis- ja neelamisvõime vahel: **Keha neelamisvõime antud temperatuuri ja teatud kiirte jooks on proportsionaalne tema kiirgamisvõimega nendesamade kiirte suhtes ja sama temperatuuri juures.**

Sellest seadusest järgneb, et keha, mis kôvasti kiirgab, ka kõvasti neelama peab, ja ümberpöördult. Tõepoolest leiame, et näiteks nôgi, mis kôiki kiiri neelab ,ühtlasi ka kõiki kiiri kiirgab, annavad ju tulileegis olevad nõgikübemed katketu spektrumi. Külm klaas ei kiirga valgust, — ta ei neela teda ka; kuumendatult aga hakkab ta kiirgama ja muutub ühtlasi vähem läbipaistvaks, mis näitab et läbi tema tulevad kiired neeluvad.

Kui valge portsellaani peale must plekk värvida, siis neelab must koht valgust, kuna portsellaani pind teda a i n u l t hajutab. Niisuguse portsellaani kuumendamisel kakkab must koht heledanalt hõõgama kui portsellaani pind, nii et meie heledat plekki tumedamal põhjal näeme: must värv neelab rohkem valgust kui valge portsellaani pind — kuumendatult kiirgab ta ka rohkem valgust kui viimane; nii tema kiirgamis- kui neelamisvõime on suurem kui portsellaanil.

3) E l e k t r o o n t e o o r i a seletab tüübiliste spektrumite tekkimist järgmiselt: esimesel silmapilgul peale aatomite kokkupôrkumist (§ 58.) põruvad nendes olevad elektroonid korratult vibreerima, missugune liikumine aga ainult lühikest aega kestab, sest pikemalt jäävad elektroonid õõtsuma ainult oma kindla eneseôôtse perioodiga. K õ v a d e s k e h a d e s k u i k a v e d e l i k k u d e s seisavad aatomid ligistikku koos, — nad tõuklevad sellepärast järjest üks-teise vastu, nii et korralik elektroonide ôôtsumine nende eneseõõtse perioodi järele alatasa takistub. Pealegi môjuvad niisugustes kehades elektrooni peale molekulaarjõud, mille suurus naabermoleekulite kaugenemisel ja lähenemisel vahetpidamata muutub; ühes nendega muutub ka side elektooni ja aatomi keskkoha vahel ja sellest olenev elektrooni eneseõõtse periood. Kogu kõvas või vedelas kehas õõtsuvad sellepärast elektroonid korratult i g a s u g u s e p e r i o o d i g a, — temast tulevas lainetamises leidub laineid igas pikkuses. Et igale lainepikkusele spektrumis teatud kindel spektraaljoon vastab, siis seisab praegusel juhusel üks joon katketult teise kôval ja terve spektrum on k a t k e t u.

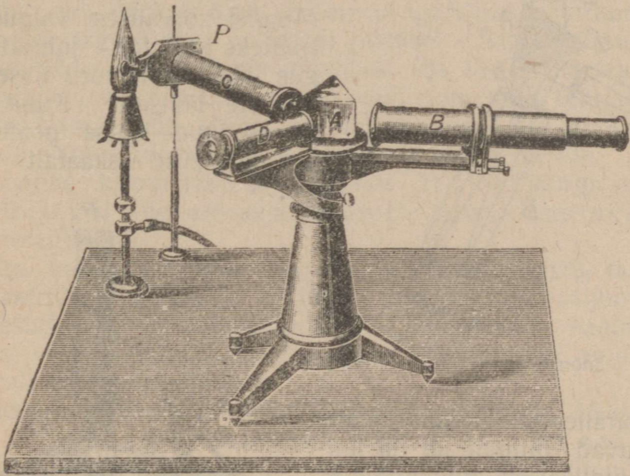
G a a s i d e s j a a u r u d e s seisavad moleekulid kaugel üks-teisest. Peale iga kokkupõrke jookseb moleekul võrdlemisi pika aja vabalt edasi, ilma et muutlikud molekulaarjõud tema elektroonide eneseõôtsearvu muudeksid. Elektroonid õõtsuvad gaasis sellepärast korralikult, igaüks oma perioodiga. Et eleklroonide arv piiratud on, siis on tekkivas lainetamises ainult teatud perioodiga lained olemas, mis spektrumi ühes või teises kohas heledaid jooni sünnitavad. Elektroonide eneseõõtse periood oleneb nende arvust aatomis, nende kaugusest aatomi keskkohast jne. nii siis ainult a i n e o m a d u s t e s t. Sellepärast sünnitab iga aine auruna alati ühed ja samad iseloomulikud spektraaljooned, oleneb ju joone seis spektrumis valguse lainepikkusest, s. t. elektrooni õõtsearvust.

Kui auru või gaasi moleekulid lihtsad aatomid on, siis asuvad elektroonid kõigis aatomites ühesugustes tingimustes, nii et nende eneseõõtseperioodid igas aatomis ühesugused on. Sarnasel puhul õõtsuvad vastavad elektoonid kõigis aatomites ühekiirelt, nii et iga aatomielektroon ainult ühe kitsa joone spektrumil sünnitab. Saisab aga moleekul koos mitmest aatomist, siis on moleekuli keskkohas asuvas aatomis elektroonid teistsuguste jõudude mõju all, kui äärmistes aatomites, kus naaberaatomid ainult ühelt poolt mõjuvad. Sellapärast lähevad moleekuli mitmesuguste aatomite vastavate elektroonide eneseõõtsearvud vähe lahku. Nendelt tulnud lained ei ole seega enam täpipealt ühepikkused, mille tagajärjel nad spektrumil kitsa ioone asemel laiema vôi kitsama r i b a esile kutsuvad.

Viimast oletust kinnitab nähtus, et madala temperatuuri juures, kus moleekulites harilikult suurem hulk aatome on, kõik spektraaljooned l a i e m a d on kui kõrgetel temperatuuridel, kus moleekulid vähem aatome sisaldavad.

A b s o r p t s i o o n s p e k t r u m i t e tekkimine on arusaadav ülevalkirjeldatud pildi põhjal: kuna kõvades ja vedelates kehades elektroonid alati oma eneseõõtse perioodiga õõtsuda ei saa, siis absorbeerib niisugune keha kõige rohkem kõiki neid kiiri, mille periood ainult lähedal seisab elektroonide eneseõõtse perioodile. Sellepärast ilmuvad vastavates neelumisspektumites alati enam-või-vähem laiad neelumisribad. Gaasides, iseäranis kõrge temperatuuri juures seisavad aatomite elektroonid resonansis ainult ühe teatud lainepikkusega. Ainult need valguslained annavad oma energia vastavatele elektroonidele ja neeluvad selle tõttu läbiminnes läbi gaasi. Neelumisjooned on siis kitsad ja ilmuvad spektrumil samas kohas, kus elektroonide eneste lained valgust sünnitaksid.

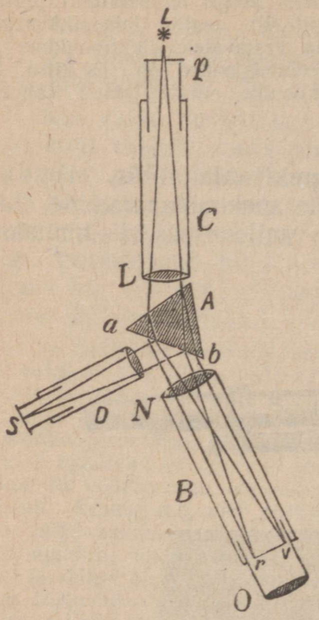
§ 76. **Spektraalaparaadid ja spektraalanalüüs.** 1) Valguse spektrume vaadeldakse sellekohaste spektraalaparaatide abil. On aparaat määratud ainult spektrumi vaatlemiseks, siis hüütakse



Joon. 171.

teda spektroskoobiks; võib temas aga sellekohase skaala abil ka iga spektraalvärvi seisu äramäärata, siis nimetatakse teda spektromeetriks.

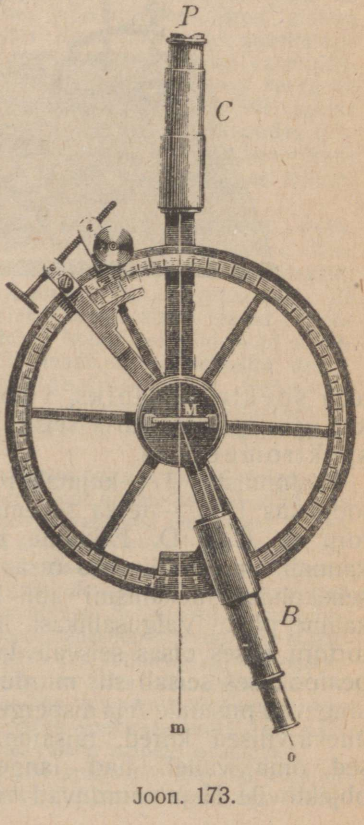
Joonistus 171 kujutab Kirchhoffi spektromeetri välist pilti, joonistus 172 — tema skeemi. Peaosad on prisma A ja kolm toru B, C ja D. Esimene toru C — n. n. kollimaatortoru, kannab omas välimises otsas metallplaati P, mille keskkohas on sellekohase mekanismi abil laiemaks ja kitsamaks seatav vertikaalne pilu. Valgusallikast langevad kiired läbi pilu kollimaatortoru teises otsas seisvale kumerläätsale L. Et pilu selle läätsa peafookuses seisab siis murduvad kiired läätsa taga paralleelseteks, langevad prismale A ja dispergeeruvad. Välja tulles prismast on kõik ühevärvilised kiired, niisama nagu langevad kiiredki, paralleelsed oma vahel, nad langevad järgmise toru, pikksilma B objektiivile N ja murduvad viimases kokku objektiivi peafookusse, sünnitades seal pilu kujutuse. Kuna prisma taga igal värvil oma siht on, siis annab iga värv pilukujutuse ise kohas. Kôik kujutused seisavad üksteise kõrval reas,—vastavalt nende värvi lainepikkusele, ja sünnitavad vaadeldud valguse spektrumi rv. Pikksilma okulaari O läbi paistab vaatlejale spektrumi rv suurendatud kujutus.



Joon. 172.

Värvide seisukoha täpipealseks äramääramiseks on skaalatoru D, mille välimises otsas S klaasil asuv pikkusskaala seisab. Mingist kôrvalisest valgusallikast (näiteks küünlast) juhitakse valgus läbi skaala toru teises otsas seisvale läätsale. Kuna skaala on asetatud läätsa peafookusse, siis langevad skaalalt tulevad kiired paralleelselt prisma peale, peegelduvad pinnalt ab ja langevad paralleelselt objektiivile N. Selle tôttu ilmub ka skaala kujutus pikksilma peafookuses, s. t. samal pinnal kus spektrumgi. Vaatlejale paistab nagu lasuks skaala otse spektrumi peal, nii et ta täpipealt ära vôib määrata, missuguse skaalajaotuse kohal teatud spektrumi värv või joon seisab.

2) Täpipealseteks môôtmisteks peavad üksikud spektraaljooned võimalikult kaugel üks-teisest seisma. Sellepärast on soovitav võimalikult pikka spektrumi saada. Valgus juhitakse selleks järjestikku läbi mitme prisma. Iga prisma hajutab värve kaugemale üksteisest, nii et spektruum seda pikemaks muutub, mida suurem on prismade arv.
Uuemad spektromeetrid on niiviisi ehitatud, et pikksilm B horitson-



Joon. 173.

taalsel pinnal pööratav on ümber vertikaalse, läbi prisma mineva telje M (joon. 173, kus punktis M asuv prisma kujutatud ei ole). Kiired langevad prismasse sihis PM; peale murdumist kaldub näiteks punane kiir mõnda sihti Mo; pikksilma B peab siis nurga mMo võrra sihist Mm paremale poole pöörama, et punane valgus pikksilma optilisel teljel ilmuks. Nurk mMo, mida pikksilma all seisvalt nurgaskaalalt otsekohe ära lugeda võib, kujutab punase valguse kaldumisnurka. Kui tuntud on kiirte langemisnurk prismale, siis vôib nurga mMo abil välja arvata prisma aine murdumiseksponendi punase valguse jaoks (§ 29_3).

Samasuguse konstruktsiooniga on ka diffraktsioonspektromeeter. Diffraktsioonvõre asetatakse lauakesele, punkti M, perpendikulaarselt kollimaatortoru teljele PM, (joon. 173). § 72_1 järele vôrdub siis nurk mMo, mille all vaatleja üht teatud värvi näeb, nurgaga φ (joon. 169). Kui tuntud on vôrekonstant, siis määrab see nurk vaadeldud värvi lainepikkuse (§ 72_3).

3) Kui naatriumi spektrumi mõnes spektraalaparaadis vaadelda, siis näeme ühes ja samas aparaadis naatriumi kollast joont alati skaala ühel ja samal jaotusel. Samuti ilmub ka iga teise keemilise elemendi spektraaljoon iga kord ühel teatud kindlal skaalajaotusel. On meil teada kôigi elementide (aurude) joonte seis spektrumil, siis võime spektrumil ilmuvate joonte järele otsustada valgustkiirgava aine keemilise koosseisu üle.

Ainete keemilise koosseisu ära-määramist nende kiirgamis- või neelumisspektrumite kaudu hüütakse spektraalanalüüsiks.

Kui mõne tundmata aine aur spektrumi annab, milles näiteks naatriumi kollane ja kaaliumi punane spektraaljoon seisab, siis tôestab see, et vaadeldud aines naatrium ja kaalium peab leiduma, vôivad ju kõigist keemilistest elementidest ainult nemad nimetatud jooni sünnitada.

Neelumisspektrumid sellevastu näitavad meile, läbi missuguste ainete valguskiired on tulnud, enne kui nad prismani jõudsid. Leiame mõnest hôõgavast kôvast kehast tulnud valguse katketus spektrumis üksikuid muste neelumisjooni, — näiteks vesiniku 3 iseloomuliku spektraaljoone kohas—, siis peame oletama, et keskkonnas, mille läbi valguskiired on tulnud, vesinikku leidub.

Spektraalanalüüs on palju tundlikum, kui harilik keemiline analüüs. Seal, kus teatud ainet nii vähe on, et ükski keemiline analüseerimisviis tema olemasolu enam tôestada ei suuda, — vôib spektraalanalüüs seda kindlasti veel teha. Kui näiteks, ainult 3 mg keedusoola toas ära aurutada, siis näeme selles toas igast, näiteks pôleva lambi valgusest saadud spektrumil naatriumi iseloomulikku neelumisjoont, mis tôestab, et toas naatriumi auru peab olema. Keemiline analüüs ei suudaks iialgi nii väikse naatriumihulga olemasolu tõestada.

4) Spektraalanalüüsi tarvitatakse peaasjalikult järgmisteks otstarveteks;

a) Ei tôestada mõne tuntud keemilise elemendi olemas-olu; selleks on tarvis ainult $^1/_{3000000}$ mg naatriumi, $^1/_{60000}$ mg liitiumi jne.

6) Uute, senni tundmata elementide ülesleidmiseks: rubiidium, tallium, indium, heelium jne. on ülesleitud selle tõttu, et päikse- vôi teistes spektrumites ilmsiks tulid spektraaljooned, mis ühegi tuntud elemendi omad ei olnud.

c) Arstirohtude, värviainete jne. analüseerimiseks: selleks juhitakse valge valgus läbi analüseeritava aine sulatise ja vaadeldakse saadut neelumisspektruumi.

d) Taevakehade keemilise koosseisu uurimiseks (v. järgmine §).

e) Mõnes tööstusharus keemiliste protsesside järelevalvamiseks, näiteks erasevalmistamisel jne.

§ 77. **Päikse spektrum, Fraunhoferi jooned.** 1) Päikse valgusest saadud katketus spektrumis seisavad kõigis värvides kitsad tumedad jooned, — nende ülesleidja J. Fraunhoferi järele nimetatud Fraunhoferi jooned. Palja silmaga ja võrdlemisi lühikesel spektrumil näeme ainult vähe jooni; Fraunhofer nimetas neid tähtsamaid tähtedega A — H (v. spektrumite tabel). Pikal spektrumil kasvab aga joonte arv kunni 10 000-ni. Need tumedad jooned ei vôi muud olla, kui harilikud neelumisjooned. Võrreldes üksikute Fraunhoferi joonte seisu tuttavate aurude ja gaaside spektraaljoonte seisuga, selgub, et näiteks Fraunhoferi joone D seis vastab naatriumi kollase spektraaljoone seisule, F ja H — vesiniku ja kaltsiumi spektraaljoonte seisule j. n. e. Sellest peame järeldama, et päikse valgus Fraunhoferi joontele vastavad kiired kaotanud on, läbitulles läbi naatriumi, vesiniku, kaltsiumi j. n. e. auru.

Et päikse spektrum ise katketu on, siis peab päike valgelt hôôgav (vedel) keha olema. Selle keha, — n. n. fotosfääri temperatuur on kôrgem kui ühegi maapealse soojusallika oma; selletõttu aurub alatasa üks osa tema ainest ja sünnitab fotosfääri ümber auruatmosfääri, mida kromosfääriks nimetatakse. Kuigi kromosfääri temperatuur madalam on, kui fotosfääri oma, — on ta siiski veel niivõrd kuum, et kõik tuntud elemendid temas auruna viibivad.

Kromosfääri aurudes neeluvadki need päiksekiired, mille puudumist tõestavad Fraunhoferi jooned. Sellepärast näitavad meile viimased, missugused ained kromosfääris ja järjelikult ka päikses eneses leiduvad. Selgub, et päikses pea kôik maapealsed keemilised elemendid olemas on, peale üksikute, nagu kuld, väävel, lämmastik ja mõni teine, mille olemasolu Fraunhoferi jooned ei tõesta.

Kromosfäär kui hõõgav aur, peab ka ise kiiri välja saatma. Päiksevarjutuste ajal, kus kuu kogu päikseketta kinni katab, jättes vabaks ainult kromosfääri ääre, saame viimase spektrumi. Seal ilmuvad tõepoolest tumedate Fraunhoferi joonte asemel heledad spektraaljooned tumedal põhjal. See tõestab ainult ülevalkirjeldatud oletust päikse koosseisu üle.

Peale kromosfääri neelab päikse kiiri ka veel maakera atmosfäär, nii et viimane põhjuseks on mône Fraunhoferi joone tekkimiseks. Et maakera tiirlemisel päikse kiired kord pikemat, kord lühemat teed läbi atmosfääri tulevad, siis on atmosfääri neelumisel tekkinud jooned, n. n. telluurjóoned, kord tumedamad, kord heledamad, selle järele, kas päike seisab madalal vôi kôrgel. Sellega eralduvadki telluurjooned teistest Fraunhoferi joontest.

2) Et Fraunhoferi jooned alati spektrumi kindlatel kohtadel ilmuvad, siis on nad kohased üksikute spektrumiosade täpipealseks äramääramiseks. Rääkides näiteks mônest spektraalvärvist, tähendatakse alati ära, missuguse Fraunhoferi joone ümbruses see värv ilmub. Igale joonele vastav lainepikkus on täpipealt tuntud, nii et Fraunhoferi jooned spektrumil nagu lainepikkuste skaala osa etendavad. Allpool on antud tähtsamate Fraunhoferi joonte lainepikkused, ühes nende keemiliste elementide nimetustega, mille aurus vastavad kiired neeluvad:

A, tumepunane	$\lambda = 759,3$	$\mu\mu$,	hapnik O.
B, punane	$\lambda = 686,7$	„	„ O.
C, oranzh-punane	$\lambda = 656,2$	„	vesinik H.
D, kollane	$\lambda = 589$	„	naatrium Na.
E, roheline	$\lambda = 527$	„	raud Fe.
F. helesinine	$\lambda = 486$	„	vesinik H.
G, tumesinine	$\lambda = 430$	„	
H, violett	$\lambda = 396,8$	„	kaltsium Ca.

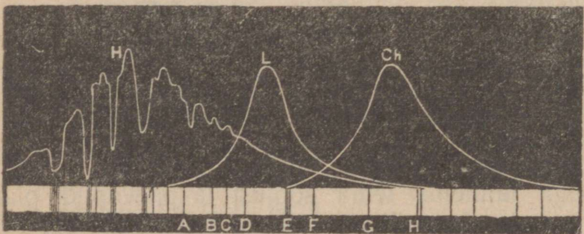
§ 78. **Absorbeeritud valguse mõju.** 1) Silmaga näeme päiksevalgust, käega tunneme tema soojust ja päevapildi plaat tunnistab, et valgus ka keemiliselt võib mõjuda. Et selgusele jõuda, missugused kiired ühte või teist môju tekitavad, peame mõôtma päikse valguse spektrumist saadud homogeensete kiirte võimet ühe või teise mõju avaldamiseks.

Juba palja silmaga näeme, et mitte kõik spektrumiosad üheheledad ei ole. Fotomeetrilised mõõtmised kinnitavad, et kõige heledam (kollane) osa asub Fraunhoferi joonte D ja E vahel ($\lambda = 550$ $\mu\mu$). Kui valguse intensiivsust kõrgusena üle vastava spektrumikoha kujutada, siis saame kõverjoone L (joonistus 174), mis graafiliselt valguse intensiivsuse jagunemist piki spektrumi kujutab. Selgub, **et silmaga ainult need kiired nähtavad on, mille lainepikkused umbes 760 ja 400 $\mu\mu$ vahel asuvad.** (Äärmised Fraunhoferi jooned A ja H).

2) Kiirte soendamisvôimet võime môôta, kui tahmaseks tehtud termomeetrikuulikest järgimööda spektrumi üksikutes osades hoida ja temperatuuri tõusu igas osas môôta. Selgub, et sinised kiired peaaegu sugugi ei soenda, kollased ja punased aga kaunis tugevasti, kuna kôige tugevam soendamismôju seal avaldub, kus punased kiired lôpevad, s. t. kus meie enam mingit valgust ei näe. Sellest järgneb, et spektrum punaste kiirtega koguni ei alga, vaid et ka viimaste ees veel kiiri leidub, millel iseäranis tugev soendamisvõime. Neid punase eelseid kiiri hüütakse infrapunasteks kiirteks. Seisu järele spektrumis peab nende lainepikkus suurem olema kui kôigi nähtavate kiirte oma. Praegusel ajal tuntakse infrapunaseid kiiri, mille lainepikkus kunni 300 000 $\mu\mu = 0,3$ mm ulatab (Rubensi kiired), olgugi et päikse spektrumis nii pikki laineid ei leidu

Spektrumi kiirte soendamisvõimet kujutab kôverjoon H (joon. 174), millest selgub, et kõige tugevamini soendavad infrapunased kiired punase värvi läheduses.

Kiirte soendamisvõimet peame nendes peituva üleüldise energia môõduks pidama, sest must termomeetrikerake absorbeerib mitte ainult infrapunaseid, vaid ka harilikka valguskiiri, muutes kõike kiirtes sisalduvat liikumisenergiat soojuseks. Joonistusel 174 kujutatud diagramm H on maksev ainult prisma abil saadud spektrumi jaoks, milles § 72_3 järele punased kiired rohkem on koondatud kui violett kiired, ja mitte tôttu punases osas termomeetrikerakesele rohkem kiiri langeb kui spektrumi violett osas. Diffraktsioonspektrum, kus värvide kaugus üks-teisest on proportsionaalne nende lainepikkustega, — annab õigema pildi kiirte energia jaotusest piki spektrumi. Kõverjoone H kõige kõrgem koht langeb päikse spektrumis sel puhul punkti L lähedusse, millest järgneb, et päikse kiirtest kõige suurema energiaga on kollased kiired ($\lambda = 550 \mu\mu$).



Joonistus 174.

3) Kiirte keemilise mõju suurust näitab meile päevapildipaberi tumenemine. Kui üle terve spektrumi asetada riba päevapildi kloorhôbepaberit, siis ei tumene ta mitte igas kohas ühteviisi: punases valguses olev osa jääb üsna valgeks; lähenedes sinisele, muutub paber ikka tumedamaks, on kõige mustem violett valguses ($\lambda = 400 \mu\mu$) ja läheb siis järk-järgult heledamaks. Kui paberi tumenemist kiirte keemilise môju môõduks vôtta, siis kujutab kôverjoon Ch (joonistus 174) selle môju tugevust piki spektrumi. Meie näeme, et veel kaugel spektrumi violeti osa taga mingisugune keemiline môju avaldub, mille pôhjuseks vôivad olla ainult nägematud kiired. Neid violeti-taguseid kiiri hüütakse ultraviolett kiirteks. Nad on lühema lainepikkusega kui äärmised nähtavad violett kiired (400 $\mu\mu$) ja ulatavad viimaste taha kunni umbes 100 $\mu\mu$ lainepikkuseni (Schumanni kiired).

4) Korraldades kõik kiired nende lainepikkuse järele, saaksime pika spektrumi, milles infrapunased kiired ulatavad 300 000 $\mu\mu$ — 760 $\mu\mu$ lainepikkuseni, nähtavad valguskiired 760 $\mu\mu$ — 400 $\mu\mu$ ja ultraviolett kiired 400 $\mu\mu$ — 100 $\mu\mu$. Kui akustikas kirjeldatud intervallide mõisteid (IV § 19_1) valguslainete kohta tarvitada, siis moodustaksid nähtavad valguskiired vaevalt ühe oktaavi $\left(\frac{760}{400} \backsimeq 2:1\right)$; all pool seda oktaavi seisaks ligi $8\,^1|_2$ oktaavi infrapunaseid, ja ülevalpool veel 2 oktaavi ultraviolett kiiri.

§ 79. **Ultraviolett kiired; fluorestsents ja fosforestsents.** 1) Paljudel kiirtel on omadus ultraviolett kiirte môjul valgust kiirgama hakata. Niisugust nähtust hüütakse fluorestsents'iks vôi fosforestsents'iks, selle järele, kas kestab nähtus ainult nii kaua, kunni ultraviolett kiired kehale langevad, vôi ka peale selle veel edasi.

Väävelhapu hiniini sulatis hakkab näiteks ultraviolett kiirte mõjul helesiniselt hiilgama, klorofilli sulatis punaselt, joodi aur — rohekalt j. n. e., see hiilgus kaob, niipea kui ultraviolett kiirte môju kõrvaldada.

Väävlisbaarium, väävliskaltsium ja môned teised soolad kiirgavad teatud aeg peale ultraviolett kiirte kustumist edasi: nad fosforestseerivad. Nii fluorestsentsi kui ka fosforestsentsi jaoks on maksev seadus: **kehalt tulevad kiired on alati suurema lainepikkusega kui nähtust sünnitavad ultraviolett kiired** (Stokes'i seadus).

Fosforestseerida vôivad ainult kôvad kehad, kuna fluorestsents kôikides kehades ilmuda võib. Nii üks kui teine nähtus oleneb keha temperatuurist: soojuses hävineb ta kôigi kehade juures, väga madalatel temperatuuridel (— 180^0) hakkavad fosforestseerima koguni niisugused kehad nagu paraffiin, tärklis, paber j. n. e.

Fluorestseerivate ainete üleüldine omadus on, et nad pealt vaadates teist värvi paistavad kui läbivaadates. Puhas petrooleum näiteks, mis sinikalt fluorestseerib, on läbivaadates täiesti läbipaistev (valge), pealt vaadates aga sinikas.

Fosforestseerivatest kehadest valmistatakse n. n. helendavat värvi (Balmaini värv); sellega kaetud pind hiilgab pimedas pikemat aega, peale selle kui teda päiksevalguses hoiti. Fluorestseeriva baarium-plaatin-tsianüüriga kaetud paber hiilgab nii heledalt ultraviolett kiirtes, et tema paremaks abinôuks on nende kiirte olemasolu tôestamiseks. Kui niisngusele paberile päiksespektrum heita, siis näeme temal ka spektrumi ultraviolett osa.

2) Fluorestseerival ekraanil nähtavas päiksespektrumi ultraviolett osas ilmuvad ka Fraunhoferi jooned, mis näitab, et ka nende kiirte jaoks maksvad on harilikud neelumisseadused. Et ultraviolett kiired spektrumi teataval pikkusel laiali on laotatud, näitab, et ka nemad prismas või diffraktsioonvôres dispergeeruvad, samuti nagu harilik valguski. Kui ultraviolett kiirte teel länguseisvat klaasplaati hoida, siis peegeldub üks osa kiiri klaasilt. Peegeldatud kiirte sihti võime ülesotsida fluorestseeriva ekraani abil: selgub, et ka peegeldusseadused maksvad on ultraviolett kiirte jaoks. Ühtlasi näitab see katse, et valge klaas ultraviolett kiirte jaoks mitte üsna läbipaistev ei ole, sest fluorestseerival ekraanil ilmub klaasi taga vari. Lähemad uurimised näitavad, et iseäranis lühikesed kiired klaasis absorbeeruvad, nii et nende jaoks klaas „läbipaistmatu“ on. Sellepärast tarvitatakse ultraviolett spektrumi saamiseks kvartsist valmistatuid prismasid ja läätse, mis nende kiirte jaoks on läbipaistvad.

Kui kvartsläätsa pinda väga õhukese hôbekihiga katta, siis ei pääse harilikud valguskiired muidugi mitte läbi läätsa; küll aga ultraviolett kiired, mille jaoks õhuke hôbekiht kaunis läbipaistev on. Paljas silm ei näe niisuguse läätsa läbi mingit valgust, fluorestseeriv ekraan aga hiilgab läätsa taga heledalt. Nii näeme, et keha läbipaistvus ainult kiirte lainepikkusest oleneb; — see mis ühe kiire jaoks läbipaistev on, võib teise jaoks läbipaistmatu olla, ja ümberpöördult.

Vastavate katsetega vôib tõestada, et ultraviolett kiired ka interfereeruvad. Nad on siis igas suhtes sarnased valguskiirtega ja peavad järjelikult samasuguse loomuga lainetamised olema kui harilik valguski. Nad ei lähe näiteks violett valguskiirtest rohkem lahku kui kollased kiired punastest, või rohelised kollastest.

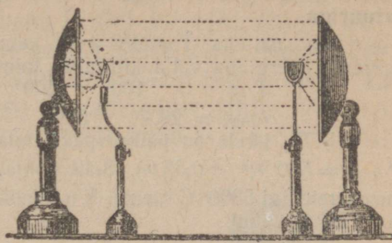
Ultraviolett kiirtel on omad eriomadused, mis peaasjalikult mitmesuguste keemiliste protsesside tekitamises avalduvad. Peale nimetatud kloorhõbeda tumenemise, mis on keemiline lahutamisprotsess, võivad nad ka keemilist ühinemist edendada. Kui näiteks kloorgaasi ja vesinikku segada, siis püsib see segu pimedas, ilma et ta keemilist ühendust — soolahapet — annaks. Juhime aga niisuguse segu peale nähtavast valgusest eraldatud ultraviolett kiiri, siis ühinevad mõlemad gaasid silmapilkselt, tekitades tugeva plahvatuse. Needsamad kiired sünnitavad atmosfäärilises õhus olevast hapnikust uut gaasi — osooni, tekitavad iseäralisi elektrilisi nähtusi ja on veel mitme teise nähtuse põhjuseks.

§ 80. **Infrapunased kiired ja kiirgamine.** 1) Infrapunaseid kiiri hüütakse tihti ka soojuskiirteks,—nimetus, mis mitte üsna täpipealne ei ole, soendavad ju ka harilikud valguskiired. Peab nimelt tähendama, et kiir iseenesest soe ega külm ei vôi olla, kujutab ta ju kui lainetamine ainult liikumist. Alles siis, kui laine mõnes aines absorbeerub, võib ta seal oma liikumisenergia soojuseks muuta.

Infrapunased kiired soendavad ainult sellepärast tugevasti, et nendes rohkem liikumisenergiat peitub kui teistes kiirtes. Ka nemad soendavad ainult sarnaseid kehi, milles nad absorbeeruvad, s. t. mis nende jaoks läbipaistmatud on. Näiteks klaasi, vôi veel parem kivisoolaplaadi ahju suu ette asendamisel jääb plaat ise võrdlemisi külmaks, kuna tema taga seisvad tumedad asjad, nagu riie, paber j. n. e. väga kuumaks lähevad.

2) Kui infrapunaseid kiiri järgemööda läbi mitmesuguste ainete juhtida ja tahmase termomeetrikerakesega läbi aine läinud kiirte soendamis-võimet mõõta, siis selgub, et kivisool kiirte mõju põrmugi ei vähenda, et õhuke must eboniitplaat seda ainult vähe teeb, klaasplaat juba rohkem, ja et veekiht nende mõju peaaegu täiesti hävitab. Järjelikult on kivisool ja eboniitplaat infrapunaste kiirte jaoks läbipaistev, klaas ainult osalt ja vesi täesti läbipaistmatu. Katsetel nende kiirtega tarvitatakse sellepärast harilikult kivisoolast valmistatud läätse ja prismaid.

3). Infrapunased kiired peegelduvad harilikkude peegeldusseaduste järele. Kui joonistusel 175 kujutatud metall-õõnespeegli peafookusse mingi nôrgalt hôõgav keha, näiteks kuum raud või söed asetada, siis peegelduvad kehast väljatulevad infrapunased kiired paralleelseteks ja koonduvad teise ôõnespeegli peafookuses. Seal võib kiirte abil kergesti süütuvaid aineid põlema süüdata.



Joon. 175.

Kivisoolast läätsaga võime infrapunaseid kiiri läätsa fookusse koondada, samast ainest prismaga neid kõrvale murda ja hajutada (mille juures tahmane termomeetrikerake kiirte näitajaks on); päikse spektrumi infrapunases osas leiame Fraunhoferi jooni jne.

Kõik see tõestab, et ka infrapunased kiired sama loomuga lainetamine on kui valgus. Nad eralduvad valguskiirtest ainult oma suure lainepikkusega.

4) Nii nagu meie käsi kuma ahju lähedal sooja tunneb, niisama tunneme jäätüki läheduses külma. Ahjult tuleb soojus infrapunaste soojuskiirtena käe juure,—võiks siis arvta, et jäätükilt mingid külmad kiired käele langevad. Tõepoolest ei ole see aga nii: ,,külm" on ainult relatiivne môiste ja ei tähenda muud kui ,,vähem soe". Kõik kehad, mille temperatuur kõrgem on kui absoluutne null (-273^0), saadavad soojuskiiri enesest välja; külmemates on lained pikemad ja kiirgamine nõrgem kui soemates kehades. Et kiirtes nagu igas liikumises teatud energia peitub, siis kaotab iga keha kiirgamisel energiat, mis tema temperatuuri langemises avaldub.

Ühes kiirgamisega aga absorbeerib ka iga keha neid kiiri, mis teistelt kehadelt tema peale langevad. Jäätükk kiirgab näiteks võrdlemisi nôrgalt soojuskiiri, absorbeerib aga alatasa soematest naaberkehadest tulevaid intensiivsemaid soojuskiiri. Selle tõttu neelab ta rohkem energiat kui ta teda välja kiirgab, ja tema temperatuur peab tõusma (kui seda mitte ei takistaks jää sulanemine). Jäätüki lähedal hoitud soe käsi aga saab jäätükilt vähem energiat kui ta ise välja kiirgab; käsi kaotab selle juures energiat, mille tagajärjel ta jahtub.

Selgub, et kiirte kaudu kõik kehad alatasa vastamisi energiat vahetavad: soemad kehad annavad rohkem energiat kui nad saavad, külmemad kehad aga ümberpöördult. Selle tõttu jahtuvad esimesed ja soenevad teised, kunni mõlemate temperaatuur ühesuguseks muutub. Viimasel puhu neelab iga keha just niipalju kiirgamisenergiat, kui palju ta teda ise välja saadab. Meie ütleme sarnasel puhul, et kehade kiirgamine on tasakaalus.

5) Keha järk-järgulisel kuumendamisel sünnib kiirgamine järgmiselt: toa temperatuuri juures saadab keha ainult pikki infrapunaseid kiiri välja, millest kôige intensiivsemad (s. t. kõige suurema energiaga) on kiired $\lambda \cong 10000$ μμ; 300° C juures kiirgab keha küll juba lühemaid kiiri, kuid ikkagi veel ainult infrapunaseid, kõige tugevamad on kiired $\lambda = 5000$ μμ. 500^0 C hakkab must keha ka äärmisi punaseid kiiri välja saatma (punane hõõgamine), siiski on kõige tugevamad kiired ($\lambda \cong 4000$ μμ) veel infrapunase spektrumi osas. Üks-teise järele hakkab keha nüüd ka kollaseid, rohelisi ja siniseid kiiri välja saatma. Kõige viimaks ilmuvad endiste kiirte juurde ka veel violett ja ultraviolett kiired, siis hõõgab keha valgelt, sest et tema valguses kõik spektraalvärvid olemas on. Mitte kunagi ei või keha roheliselt või siniselt hõõgada, sest et ühes roheliste ja sinistega alati ka tugevamad punased ja kollased kiired peavad ilmuma, mis kõik kokku valge või punaka valguse võivad sünnitada. Ka kõige heledamal valgel hôõgamisel, näiteks 2700^0 C juures, kus pea kõik kõvad kehad vedelaks muutuvad, on kõige tugevamate kiirte lainepikkus ikkagi veel 1000 μμ, — nii siis infrapunases piirkonnas.

W. Wien leidis musta pinnaga keha jaoks seaduse, mis katsetega on heas kokkukôlas ja mille järele **kehalt kõige intensiivsemalt väljakiirgatud lainete pikkus on ümberpöördult proportsionaalne keha absoluutse temperatuuriga.**

On näiteks $T = 273 + t^0$ keha absoluutne temperatuur, λ_{max} kõige suurema energiaga välja kiirgatud lainete pikkus, siis on:

$T =$	100^0	500^0	1000^0	1500^0	2000^0
$\lambda_{max} =$	29,4	5,88	2,94	1,96	1,47 μ

§ 78_2 järele on päiksespektrumis kõige suurema energiaga kollased kiired ($\lambda_{max} = 550\ \mu\mu = 0{,}55\ \mu$). Selle põhjal peab päikse temperatuur Wieni seaduse järele ligi 5800^0 C olema. Kuu jaoks leiame samasugusel teel temparatuuri 0^0 ja -20^0 C vahel.

Peatükk X.

Valguse polarisatsioon ja kaksimurdumine.

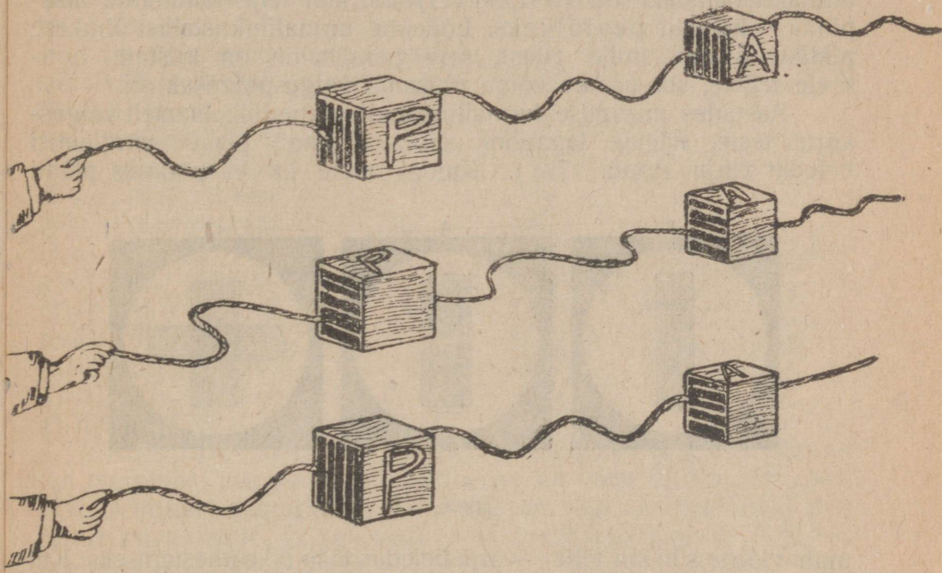
§ 81. **Polarisatsiooni mõiste ja mudelid.** 1) Laineôpetuses käsitasime ainult niisuguseid põiklaineid, milles ôõtsumised alati ühel ja samal läbi kiire tômmatud tasapinnal sünnivad. Arusaadavalt ei muutu lainetamises midagi, kui meie nimetatud pinda — n. n. laine ôõtsumispinda ühele vôi teisele poole ümber kiire kui telje pöörame. Vôib juhtuda, et perpendikulaarselt kiirele ôõtsuvate lainejaokeste siht alatasa muutub, nii et iga ôõtse ise ôõtsumispinnal sünnib. Üles-alla ôõtsuv jaoke võib näiteks järgmist õõtset pahemalt paremale poole korrata, siis mônes vahepealses sihis õõtsuda j. n. e. Sarnasel puhul tekib ka pôiklainetamine, kuid sellel lainetamisel ei ole kindlat ôõtsumispinda: viimane pöördub vahetpidamata ühest seisust teise, kus juures pöördumisteljeks ikka laine kiir jääb.

Niisuguse loomuga ongi hôôgavast kehast tulev valguslainetamine. Et valguse tekkimisel aine moleekulid miljonid korda sekundis kokkupôrkuvad, siis muutub niisama tihti valguslainetamist tekitavate jaokeste (elekroonide) ôõtsumise siht, vôib ju iga uue kokkupõrke järele jaoke teises sihis ôõtsuma hakata. Kui veel silmas pidada et igas kehas valguse tekitamisest ühel ajal osa vôtavad miljonid jaokesed, siis on arusaadav, kui kiirelt sarnase n. n. loomuliku valguslainetamise ôõtsete siht muutuma peab.

Vastandina loomulikule valgusele nimetame sirgjooneliselt polariseeritud valguseks niisugust lainetamist, mille juures kõigi jaokeste ôõtsumine ühel, läbi kiire tõmmatud tasapinnal sünnib.

2) Polariseeritud valguse tekkimise ja tema iseäralduste üle annavad selgema ülevaate polarisatsiooni mudelid. Joonistusel 176 on kujutatud kaks lahtise otsaga kastikest A ja P, milles on paralleelsed vaheseinad. Kui läbi kastide jäme kumminöör tõmmata, ja teda ühest otsast mingis sihis ôõtsutada, siis tekivad nööril lained, mille ôõtsumissiht kunni kastini P vastab

käe liigutuste sihile. Et aga kasti püsti seisvad vaheseinad köie küljeti liikumist takistavad, siis ôôtsub ta kasti P taga ainult üles-alla: nööri lained saavad niiviisi kasti P abil vertikaalselt polariseeritud. (joon. 176ª). Pöörame kasti P teise külje peale (176ᵇ), siis tekivad tema taga horitsontaalselt polariseeritud lained. Lainete ôôtsumissiht vastab alati kasti P vaheseinte sihile. Abinõu, millega lainetamise õõtsetele ühte teatud sihti vôib anda, hüütakse polarisaatoriks.



Joon. 176.

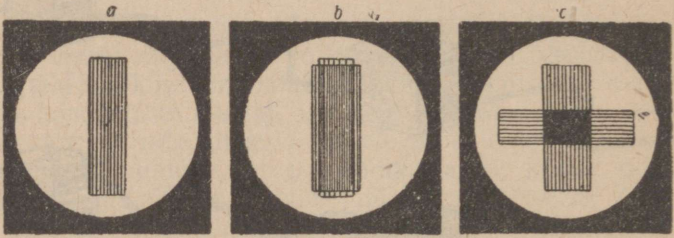
Kui polarisaatori P (joon. 176ª) taha teine samasugune kast A asetada, siis pääsevad vertikaalselt polariseeritud lained takistamata läbi viimase kui tema vaheseinad ka vertikalsed on. Niisama laseb A horisontaalseid lained vabalt läbi kui tema vaheseinad horitsontaalsed, s. t. paralleelsed polariseeritud lainetamise ôôtsumispinnale on (176ᵇ). Pöörame aga P vertikaalseks ja A horisontaalseks (176ᶜ), siis näeme et A kogu lainetamise hävitab, nii et nöör A taga paigal seisab.

Kasti A abil võime nii siis polariseeritud nöörilainete ôôtsumispinda ära määrata, teda hüütakse sellepärast analüsaatoriks: Kui analüsaator paralleelselt seisab polariseeritud lainete õõtsumispinnale, siis läheb lainetamine temast läbi, seisab ta aga perpendikulaarselt õõtsumispinnale, siis hävineb temas lainetamine. Lühidalt: **seisavad polarisaator (P) ja analüsaator (A) paralleelselt, siis läheb „loomulik“ lainetamine läbi mõlemate, muutudes polariseerituks, seisavad nad aga ristimisi, siis hävineb neis iga põiklainetamine.**

Selgub, et polarisatsioonist jutt võib olla ainult põiklainetamise juures, sest pikilainetamine pääseks igal juhusel läbi polarisaatori ja analüsaatori, ei või ju mõni küljeti-takistus pikiliikumist hävitada.

§ 82. **Valguse polariseerumine turmaliinis.** 1) Turmaliin on läbipaistev rohekas või pruun kalliskivi, mis kristalliseerub korralikkudes kuuetahksetes prismades. Prisma teljele paralleelset sihti hüütakse kristalli optiliseks teljeks, läbi telje tõmmatud tasapinda — kristalli pealõikeks. Lõikame turmaliinkristallist õhukese pikliku plaadi, mille pikem serv paralleelne on kristalli optilisele teljele, siis saame kõige lihtsama valguspolarisaatori.

Asetades niisuguse turmaliinplaadi perpendikulaarselt valguskiirte teele, näeme tagapool seisval ekraanil plaadi võrdlemisi heledat varju (joon. 177[a]). Kuidas meie ka ei pööraks plaati



Joon. 177.

ümber kiirte sihi kui telje,—varju heledus jääb ikka ühesuguseks. Kui esimese plaadi peale veel teine samasugune plaat paigutada, siis oleneb nende ühise varju heledus plaatide vastatikust seisust. On plaatide optilised teljed paralleelsed (joon. 177[b]), siis on ühine vari ainult vähe tumedam kui üheainsa plaadi oma. Pöörame aga teise plaadi ristamisi esimesele, siis muutub ühine vari täiesti tumedaks (joon. 177[c]), mis tõestab, et valgus läbi risti seisvate turmaliiniplaatide ei pääse. Pöörates teist plaati veel edasi, muutub ühine vari jällegi heledamaks, kunni ta paralleelsete plaatide juures esialgse heleduseni jõuab.

Analoogiline nähtus ilmub, kui läbi kahe turmaliinplaadi vastu valgust vaadata: paralleelsete plaatide juures näeme läbi nende valgust, ristimisi asetatud plaadid aga on läbipaistmatud.

2) Kirjeldatud katsest järgneb, et:

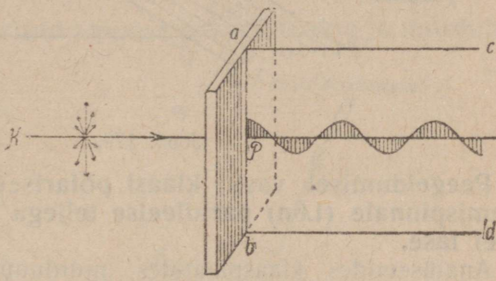
a) **Valgus peab põiklainetamine olema,** sest pikilainetamine pääseks igal juhusel läbi plaatide (§ 81_2).

b) **Valguslaine õõtsumine peab perpendikulaarselt kiire sihile sündima;** õõtsuks lainejaokased kuidagi längu kiire sihile, siis võikseme iga õõtset komponentõõtseteks lahutada, millest üks oleks perpendikulaarne, teine aga paralleelne kiire sihile. Viimane komponentõõtse moodustaks pikilainetamise, mis läbi turmaliinplaatide läheks, nii et plaadid kunagi üsna läbipaistmatuks ei võiks muutuda.

c) **Turmaliinplaat polariseerib loomulikku valgust sirgjooneliselt,** nii et kogu kiire õõtsumised ühel tasapinnal sünnivad. Ainult niisuguse oletusega on seletatav, et valguslainetamine risti seisvates plaatides hävineb (vôrdle joon. 176c).

d) **Loomulikus valguslainetamises õõtsuvad eeterjaokesed ühevõrra igal õõtsumispinnal,** sest läbi ühe turmaliinplaadi tulnud valguse heledus ei muutu plaadi pööramisel ümber kiire kui telje.

3) Missugusel pinnal polariseritud valguskiire õõtsumised sünnivad, selle üle ei anna meile kirjeldatud katse veel selgust. Mõned teised katsed, mille juures meie siin peatada ei saa, lubavad oletada, et läbi turmaliini tulnud valguskiire ôôtsumispind (a b c d) peab olema paralleelne plaadi optilisele teljele ab (joon. 178).



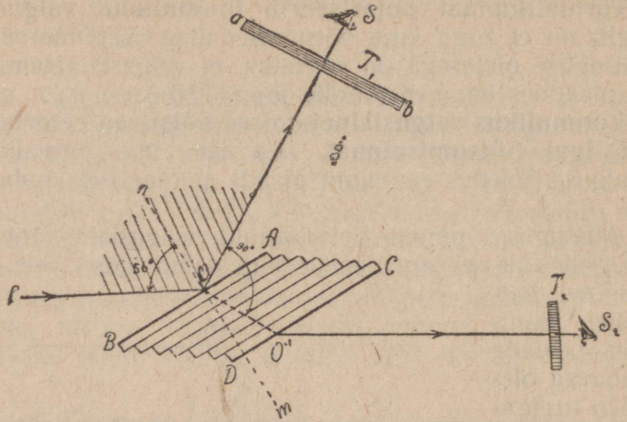
Joon. 178.

Kiire polarisatsioonpinnaks nimetatakse läbi kiire tõmmatud tasapinda, mis perpendikulaarne on õõtsumispinnale abcd. Polariseeritud valguskiires ôôtsuvad nii siis eeterjaokesed perpendikulaarselt kiire polarisatsioonpinnale, s. t. paralleelselt tema ôôtsumispinnale.

4) Elektromagnetiline laine seisab koos kahest lainest: elektrilisest ja magnetilisest; mõlemad lained on perpendikulaarsed kiire sihile, kuid seisavad ristimisi üks-teise vastu. Kui elektrilise laine õõtsumispind näiteks ülevalt alla on, siis õõtsub vastav magnetiline laine pahemalt paremale poole. Oletatakse, et polariseeritud kiires nimelt **elektriline laine perpendikulaarselt polarisatsioonpinnale óótsub.**

Turmaliini iseäralise struktuuri tõttu pääsevad läbi tema ainult need elektrilised ôôtsumised, mis paralleelsed on kristalli optilisele teljele. Perpendikulaarselt õõtsuvad elektrilised lained hävinevad turmaliinis nagu nöörilained perpendikulaarselt seisvas analüsaatoris (joon. 176c).

§ 83. **Valguse polariseerumine peegeldumisel ja murdumisel.** 1) Olgu joonistusel 179 ABCD rida paralleelseid, üks-teise küljes seisvaid klaasplaate. Sihis LO juhime ühevärvilise paralleelse valgusjoa klaasipinnale AB nii et kiirte langemisnurk L0n umbes 56° vôrdub. Üks osa valgust (0S) peegeldub pinnalt AB, teine osa ($00'S_2$) aga murdub läbiminnes läbi klaasplaatide kihi. Kui läbi turmaliinplaadi T_1 vaadelda peegeldatud kiirtejuga, siis näeme valgust ainult sel juhusel, kui turmaliinplaadi optiline telg (ab) perpendikulaarne on langemispinnale L0n. Pöörates plaati T_1 ümber 0S kui telje, väheneb valguse heledus ja ta kustub täiesti, kui plaadi telg ab pinnal L0n asub:



Joon. 179.

Peegeldumisel vastu klaasi polariseerub valgus nii, et langemispinnale (L0n) paralleelse teljega turmaliinplaat teda läbi ei lase.

Analüseerides klaasplaatides murdunud valgust turmaliinplaadi T_2 abil, leiame, et **murdumisel polariseerub valgus nii, et langemispinnale (L0n) perpendikulaarse teljega turmaliinplaat teda läbi ei lase.**

Sellest järgneb, et peegeldatud ja murtud kiirte ôôtsumispinnad vastamisi perpendikulaarsed peavad olema. Peegeldatud kiires ôôtsuvad eeterjaokesed perpendikulaarselt langemispinnale (praegusel juhusel joonistuspinnale), murtud kiires sünnivad aga kõik õõtsumised paralleelselt langemispinnale, nii siis käsitatud juhusel otse joonistuse pinnal.

2) Kui valgusjo alangemisnurk suurem või väiksem on kui 56°, sils näaeme, et peegeldatud ja murtud valgus turmaliinplaadi ühe seisu juures ainult nõrgem on kui teise juures, ja et ta kunagi täesti ei kustu. Sellest peame järeldama, et niisugusel puhul polarisatsioon mitte täielik ei ole, vaid ainult osaline: ainult üks osa valgusôôtsumisi on koondatud ühele pinnale, leidub aga ka õõtsumisi, mis teisiti on sihitud. Mõned viimastest pääsevad läbi ristiseisva analüsaatori ja sünnitavad täelise pimeduse asemel nõrga valguse.

Katsed näitavad, et klaasi juures nii murtud kui peegeldatud kiir seda täielisemalt on polariseeritud, mida lähem on langemisnurk L0n 56 kraadile. See n. n. täielise polarisatsiooni nurk on iga aine jaoks isesuurune. Brewster leidis, et tema selle langemisnurgaga (L0n) vôrdub, mille juures peegeldatud kiir (0S) perpendikulaarne on murtud kiirele (00').

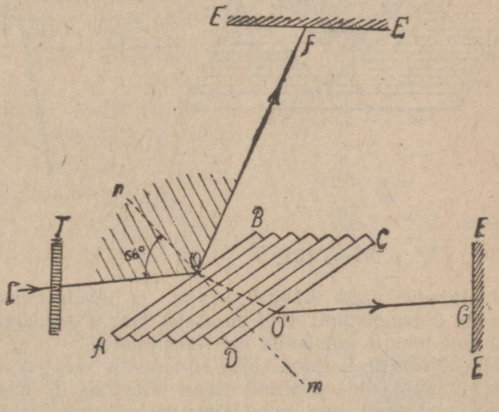
Et täielise polarisatsiooni nurga α juures ($=$ L0n) nurk $0'0S = 90^0$, siis on murdumisnurk m00 $= \beta = 180^0 - 0'0S - S0n = 180^0 - 90^0 - \alpha = 90^0 - \alpha$. Aine murdumiseksponent $n = \frac{\sin \alpha}{\sin \beta} = \frac{\sin \alpha}{\sin(90^0 - \alpha)} = \operatorname{tg} \alpha$. **Seega vórdub täielise polarisatsiooni nurga tangens aine murdumiseksponendiga** (Brewsteri seadus). Klaasi jaoks on $\cong 1{,}5$, nii et $\operatorname{tg}\alpha = 1{,}5$ millest järgneb, et $\alpha = 57^0$; vee jaoks on $\alpha \cong 52{,}5^0$, teemandi jaoks $- 68^0$.

3) Murdunud kiires oleneb polariseerimise täielikkus klaasplaatide arvust. Igal üksikul murdumisel poraliseerub kiir osaliselt. Mida suurem on sellepärast plaatide arv, seda täielisemalt saab kiir polariseeritud.

Kiir polariseerub ainult peegeldumisel vastu klaasi ja teisi mittemetalliseid pindu. Sellepärast ei tekita näiteks harilik hôbekihiga kaetud peegel polarisatsiooni nähtusi.

§ 84. Polariseeritud valguse peegeldumine ja murdumine.

1) Eelmises § kirjeldatud klaasplaatide kihile ABCD (joon. 180) juhime läbi turmaliinplaadi T tulnud valgusjoa LO nurga L0n $= 56^0$ all. Turmaliinis polariseeritud valgus peegeldub pinnalt AB ja sünnitab lael (EE) valgustäpi F. Teine osa valgusest murdub klaasis ja annab seinal valgustäpi G. Kui turmaliinplaadi optiline telg asub langemispinnal (L0n) (praegusel juhusel joonistuspinnal), siis näeme peegeldatud täppi kustuvat, murtud kiirte täppi aga helenevat. Pöörates plaati T ümber Lo kui telje, heleneb F ja tumeneb G. Seisab plaadi optiline telg perpendikulaarselt pinnale Lon, siis kustub G ja heleneb kõige tugevamini F.



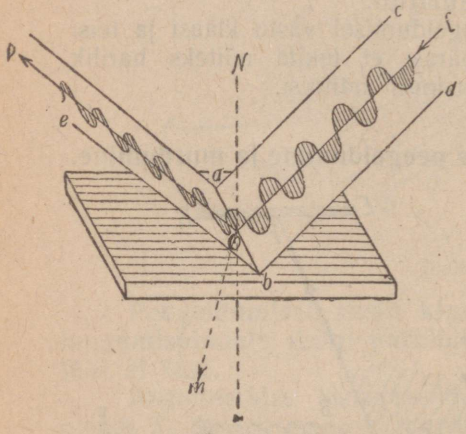
Joon. 180.

2) Katsest järgneb, et **polarisatsiooni nurga (56^0) all langev polariseeritud valgus peegeldub ainult siis täieliselt kui kiire õõtsumispind perpendikulaarne on tema langemispinnale** (kui T $\perp$ L o n); **sünnib aga õõtsumine langemispinnal** (T $\parallel$ L o n), **siis hävineb valgus peegeldumisel.**

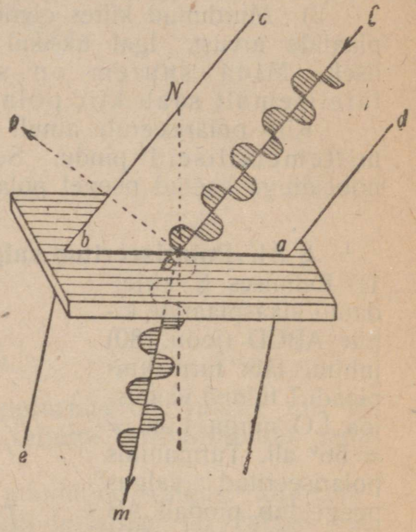
Murdumisel on nähtused ümberpöördud: **kui kiire õõtsumispind on perpendikulaarne langemispinnale Lon** (T $\perp$ L on) **siis hävineb valgus klaasis; on aga õõtsumispind paralleelne langemispinnale Lon** (T $\parallel$ L on) **siis pääseb murtud kiir vabalt läbi klaasi.**

3) Joonistused 181, 182 kujutavad piltlikult polariseeritud kiire murdumist ja peegeldumist.

Kui langeva kiire L õõtsumispind abcd (joon. 181) on perpendikulaarne langemispinnale (L0N), siis õõtsub punktis 0 peegelduspinna osake sihis ab, mille tagajärjel peegeldatud kiire õõtsumised ka pinnal abef tekivad. On aga langeva kiire õõtsumispind abcd (joon. 182) paralleelne pinnale L0N, siis tungib



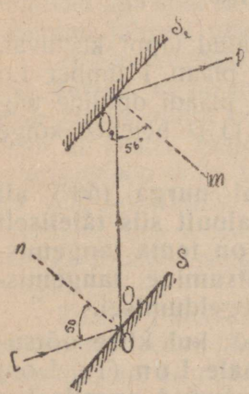
Joon. 181.



Joon. 182,

lainetamine nagu k l a a s i s i s s e, ja läheb edasi murtud kiire m0 sihis, kusjuures õõtsumispind abef endiseks jääb. Peegeldatud kiire sihis p ei teki sarnasel juhusel mingit õõtsumist ega lainetamist.

Kui kiir L (joon. 181) l o o m u l i k v a l g u s k i i r o n, siis kanduvad edasi peegeldatud sihis p ainult need õõtsumised, mis ab sihis sünnivad, murtud kiire sihis m0 aga need õõtsumised, mis perpendikulaarselt ab-le sünnivad; selle tugajärjel on peegeldatud kiire õõtsumispind abef, murtud kiire oma aga perpendikulaarne viimasele.



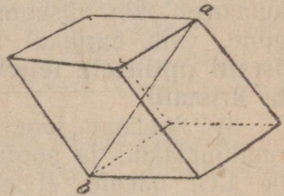
Joon. 183.

4) Polariseeritud valguse peegeldumise iseäraldusi võib hõlpsasti vaadelda n. n. N ö r r e n b e r g'i p o l a r i s a t s i o o n a p a r a a d i s, mille printsiipi kujutab joonistus 183. S_1 ja S_2 on kaks klaasplaati, mida joonistuspinnale perpendikulaarsete telgede O_1 ja O_2 ümber võib pöörata. Peale selle võib tervet klaasi S_2 püsttelje O_1 O_2 ümber pöörda. Kui klaasplaate niisugusse seisu pöörda, et valguskiir Lo alumise peale umbes 56^0 all langeb, ja nii edasi peegeldub nagu joonistusel näidatud, siis näeme sihis p ülemiselt klaasilt peegeldatud valgust. Pöörame aga plaadi S_2 90^0 võrra ümber telje O_1 O_2, siis kaob peegeldatud valgus: alumine peegel polariseerib valgust nii, et peegeldatud kiires O_1 O_2 õõtsumised

perpendikulaarselt joonistuspinnale sünnivad; niisugust valgust peegeldab ülemine peegel täieliselt ainult siis, kui ka langemispind O_1 O_2 m joonistuspinnal asub. Seisab aga pind O_1 O_2 m perpendikulaarselt joonistuspinnale, siis ei peegeldu valgus ülemiselt peeglilt.

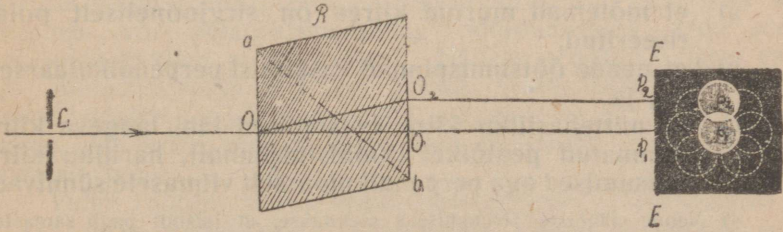
§ 85. **Kaksimurdumine kristallides.** 1) Mônedes kristallides murdub valguskiir kaheks iseseisvaks kiireks, mille tôttu meie läbi niisuguse kristalli iga asja kahekordselt näeme. Seda nähtust hüütakse valguse kaksimurdumiseks.

Harilikult tarvitatakse kaksimurdumise vaatlemiseks n. n. Islandi pagu — läbipaistvat värvitut mineraali, mis süsihapu kaltsiumist koos seisab. Ta lôhkub kergesti kolmes sihis, nii et hõlbus on talle joonistusel 184 kujutatud romboeedri kuju anda. Nürinurke a ja b ühendav sirgjoon moodustab kristalli peatelje ab, peateljele paralleelset sihti hüütakse kristalli optiliseks teljeks, läbi optilise telje minevat tasapinda aga kristalli pealõikeks.



Joon. 184.

2) Langegu paralleelne kiirtejuga L O (joon. 185) perpendikulaarselt romboeedri R pinnale. Ekraanil EE ilmub kôrvuti kaks valgustäppi p_1 ja p_2. Esimene nendest seisab sirgjoonel Lo_1 p_1, nii siis samal kohal, kus ilmuks läbi hariliku klaasplaadi R juhitud valgustäpp; teise



Joon. 185.

täpi p_2 seis oleneb aga kristalli R seisust: pöördes viimast ümber telje LO_1 p_1, seisab p_1 paigal, kuna p_2 selle telje ümber ringjoont mööda tiirleb. Selle juures jääb täpi p_2 keskkoht, nii siis ka kiir O_2p_2, alati läbi langeva kiire LO ja kristalli peatelje ab tõmmatud tasapinnale (pealõikele).

Asuvad näiteks ab ja L0 joonistuspinnal, siis kujutab viimane läbi L0 tõmmatud kristalli pealõiget. Sarnasel puhul seisab ka kiir 0_2p_2 joonistuspinnal ja täpp p_2 seisab kas üleval või allpool täppi p_1. Pöörame aga kristalli R ümber L0 nii, et läbi ab ja L0 tõmmatud tasapind perpendikulaarne on joonistuspinnale, siis asub p_2 kas pahemal või paremal pool täppi p_1.

Kiir 00_1p_1 murdub igasuguse langemisnurga juures hariliku murdumisseaduse järele, — teda hüütakse sellepärast harilikuks kiireks. Teine kiir 00_2p_2 ei paindu murdumisseaduste alla, —

ta ei lähe näiteks perpendikulaarse langemise juures sirgjooneliselt läbi kristalli, — teda hüütakse sellepärast mitteharilikuks kiireks.

Kas paigutame ekraani EE (joon. 185) lähemale või kaugemale kristallist R, valgus-täpid p_1 ja p_2 jäävad ikka teine-teisest ühekaugele. Järjelikult on harilik kiir O_1 p_1 paralleelne mitteharilikule kiirele O_2 p_2.

Kui kiir L0 mitte perpendikulaarselt, vaid längu kristalli pinnale langeb, siis murdub harilik kiir Snelliuse seaduse järele, jäädes alati langemispinnale, kuna mitteharilik kiir läbi L0 tõmmatud pealõikepinnal asub. Kristalli pööramisel ümber L0 satub ta langemispinnale ainult kristalli nende seisude juures, kus nimetatud pealõikepind ühte langeb langemispinnaga.

Kui joonistusel 184 kujutatud kristalli perpendikulaarselt teljele ab läbi saagida, siis saame plaadi, mille optiline telg perpendikulaarne on tema külgpindadele. Juhtides valgust perpendikulaarselt läbi niisuguse plaadi, näeme, et kiir mitte kaheks ei jagune, vaid harilikul kombel temast läbi läheb: **paralleelselt kristalli optilisele teljele langev kiir läheb kaksimurdumata läbi kristalli.**

3) Asetame joonistusel 185 kujutatud murtud kiirte teele turmaliinplaadi, ja pöörame kristalli R või turmaliinplaati ümber telje LO: näeme, et ekraanil vaheldamisi ikka üks täpp heledaks muutub, kuna teine samal ajal kustub. Seisab turmaliinplaadi telg paralleelselt läbi kiire tõmmatud kristalli pealõikele (00_1 ab), siis kustub harilik kiir 0_1 p_1, seisab ta aga perpendikulaarselt nimetatud pinnale, siis kustub mitteharilik kiir o_2p_2. Sellest j rgneb

a) **et mõlemad murtud kiired on sirgjooneliselt polariseeritud,**
b) **et nende õõtsumispinnad vastamisi perpendikulaarsed on, ja**
c) **et mitteharilikku kiire õõtsumised läbi langeva kiire tõmmatud pealõikel (joonistuspinnal), hariliku kiire õõtsumised aga perpendikulaarselt viimasele sünnivad.**

4) Nende nähtuste seletamiseks oletatakse, et Islandi pagu sarnastes kristallides eeterjaokesed ainult kahel üks-teisele perpendikulaarsel pinnal õõtsuda võivad. Esimene pind on läbi kiire tõmmatud pealõige, — teine sellele perpendikulaarne pind. Peale selle oletatakse, et valguslainetamise kiirus kristalli peatelje sihis suurem (mõnes aines ka väiksem) on kui igas teises sihis. Nagu lähemad matemaatilised juurdlused näitavad, jaguneb siis kristallile langev loomulik valguskiir kahte jakku, milles õõtsumised vastamisi perpendikulaarsetel pindadel sünnivad ja mille laialilagunemise kiirused ühesugused ei ole. Selle tõttu murdub iga kiir ise viisi, nii et nad igaüks ise kohas kristallist välja tulevad.

5) Peale Islandi pagu avaldavad veel paljud teised kristallid kaksimurdumise nähtusi. Kõigi niisuguste kristallide ühine omadus on, et nad valgust ainult ühes teatud sihis (optiline telg) ilma kaksimurdmiseta läbi lasevad. Niisuguseid kristalle hüütakse ühetelgseteks. Nende hulka kuulub ka eelpool kirjeldatud turmaliin. Viimases ei näe meie kahte kiirt ainult selle-

pärast mitte, et temas need ôôtsumised, mis perpendikulaarselt pealôikele sünnivad (harilik kiir), juba üsna õhukeses plaadis neeluvad, nii et läbi plaadi ainult pealõikele paralleelsed ôôtsumised (mitteharilik kiir) pääsevad.

Leidub aga ka niisuguseid mineraale (topaas, pôllupagu jne.), mille kristallid valguskiirt kahes teatud sihis ilma kaksimurdumata läbi lasevad. Nendes n. n. kahetelgsetes kristallides ei paendu ei üks ega teine murtud kiir hariliku murdumisseaduse alla, mille tôttu murdumine nendes palju keerulisema iseloomu omandab.

§ 86. **Polarisatsiooni pinna pöördumine.** 1) Kvartsist vôib õhukese plaadi valmistada, mille külgpinnad perpendikulaarsed kristalli peateljele. Kui niisugune kvartsplaat ristimisi seisva polarisaatori ja analüsaatori vahele, näiteks kahe perpendikulaarse teljega turmaliinplaadi vahele asetada, siis pääseb valgus läbi analüsaatori. Ühevärvilise valguse juures muutub analüsator jällegi läbipaistmatuks, kui teda ümber valgusjoa kui telje teatud nurga võrra pöörata.

Katsest järgneb, et läbi kvartsplaadi tulnud polariseeritud valgus polariseerituks jääb, kuid et **valguskiirte ôôtsumispind kvartsis teatud nurga võrra pöördub.** Pöördumisnurga suurus vôrdub arusaadavalt selle nurgaga, mille vôrra analüsaatori peame pöörama, et kvartsplaadi mõjul tekkinud valgus temas jällegi kustuks. Katsed näitavad, et ühe ja sama plaadi juures pöördumisnurk seda suurem on, mida lühem on läbi aparaadi juhitud värvilise valguse lainepikkus. Ühevärvilises valguses aga on ôôtsumis- vôi polarisatsioonpinna pöördumisnurk seda suurem, mida paksem on kvartsplaat. Näiteks pöördub punase valguse polarisatsioonpind 1 mm paksus kvartsplaadis 13^{0} võrra, kollase valguse oma 22^{0} ja violett valguse oma 51^{0} võrra. Mõni kvartsi sort pöörab polarisatsioonpinda pahemale, teine sort aga paremale poole.

Valge valguse juures, milles mitmesugused kiired segatud— ei saa meie analüsaatori pööramisega kunagi pimedust, sest analüsaatori selle seisu juures, kus ühte värvi kiired temas hävinevad, tulevad kõik teised kiired läbi analüsaatori, sünnitades silmas hävinenud kiirte täiendusvärvi. Pöörates järk-järgult analüsaatori, jääb pea üks, pea teine värv temast läbi tulemata, nii et nähtav valgus ainult alatasa oma värvi muudab, kuid kunagi ei kustu.

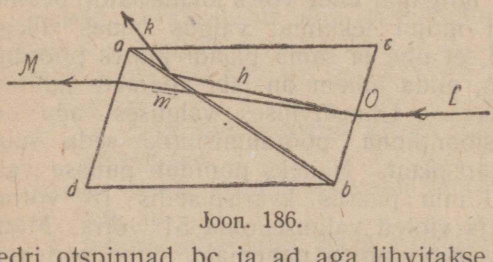
Peale kvartsi pööravad polarisatsioonpinda veel mitmed teised kõvad kehad, — näiteks tsinnoober ja ametist, niisama ka vedelikud ja sulatised nagu pilliroosuhkru, dekstriini ja hiniini sulatised, terpentiin, sidruniõli jne.

2) Sulatiste juures oleneb polarisatsioonpinna pöördumisnurk sulatatud aine moleekulite arvust sulatises, s. t. sulatise kontsentratsioonist. Selle peal põhjeneb sulatises oleva suhkru % äramääramiseks tarvitatava aparaadi — n. n.

sakkarimeetri printsiip: Uuritav sulatis kallatakse alati ühte ja samasse paralleelsete seintega klaasnôusse ja vaadeldakse teda polariseeritud valguses läbi mingi analüsaatori. Valguse polarisatsioonpinna pöördumisnurga suuruse põhjal võib välja arvata suhkru $^0/_0$ sulatises.

§ 87. **Polarisatsiooni aparaadid.** 1) Kõik polarisatsiooni aparaadid seisavad koos kahest osast: polarisaatorist ja analüsaatorist. Mõlemad on ühesuguse ehitusviisiga ja eralduvad üksteisest ainult oma otstarbe poolest. Polarisaatori ja analüsaatori vahele paigutatakse uuritavad läbipaistvad ained, tekkivate valgusnähtuste iseloomu järele vôib nende ainete struktuuri üle otsustada: kui aine täieste homogeen on, näiteks harilik klaas, siis ei muuda ta üleüldse polarisatsiooni nähtust, on ainel aga kristalline või mingi teine mittehomogeen struktuur, siis näeme läbi analüsaatori mitmesuguseid värvilisi või geomeetrilisi valguspilte. Sarnasel teel vôib näiteks vahet teha loomuliku ja kunstliku kalliskivi vahel, võib ära tunda, mis liiki vaadeldud kristall kuulub, vôib näha kas harilik klaas peale valamist ühtlaselt on jahtunud, sest vastasel korral tekivad klaasis mônes sihis pingutused ja ta muutub mittehomogeenseks aineks, jne.

2) Üks käepäralisematest polarisaatoritest on n.n. Nicoli prisma. Teda valmistatakse Islandi pagu romboeedrist, mille pealõiget kujutab joonistus 186. Kristall saetakse perpendikulaarselt pealõike pinnale sihis ab pooleks. Môlemad pooled kititakse Kanaada balsamiga peale siledaks poleerimist jällegi endiselt kokku: romboeedri otspinnad bc ja ad aga lihvitakse paralleelseteks niisuguse nurga all külgpindade bd ja ac vastu, et kiir LO peale murdumist kristallis sarnaselt kaheks jaguneks nagu joonistusel 186 näidatud: harilik kiir h kaldub niivôrd kôrvale omast esialgsest sihist, et ta vastu Kanaada balsami kihti ab sisemiselt peegeldub ja selle tagajärjel läbi prisma tahu ac välja tuleb. Mitteharilik kiir m murdub vähem ja pääseb sellepärast läbi Kanaada balsami kihi ja prisma otstahu ad. Niiviisi muutub läbiminnes läbi Nicoli prisma loomulik valguskiir LO polariseeritud kiireks mM, mille ôôtsumispind ühte langeb joonistusel kujutatud kristalli pealôikega (§ 85_3).

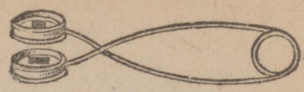


Joon. 186.

Terve prisma asetatakse sellekohase silindrilise torukese sisse, mille mustal seinal küljepealt väljatulev harilik kiir k absorbeerub.

Nicoli prismat vôib nii polarisaatoriks kui analüsaatoriks tarvitada. Kaks Nicoli prismat moodustavad sellepärast käepärase polarisatsiooni aparaadi, — n.n. polariskoobi.

Väikeste asjade vaatlemiseks polariseeritud valguses tarvitatakse tihti n.n. turmaliin pihtisid (joon. 187), milles polarisaatori ja analüsaatori osa kaks paralleelset optilisele teljele väljalôigatud turmaliinplaadikest etendavad. Môlemad seisavad vedru otsade külge kinnitatud ringvõrede sees, nii et neid hôlpsasti üks-teise peale vôib paenutada, kus juures vaadeldav asi turmaliinplaatide vahele asetatakse. Ülemist vôre vôib tema telje ümber pöörata, andes sellega turmaliinplaatidele kas vastamisi paralleelse vôi perpendikulaarse seisu.



Joon. 187.

Teise köite sisu.

Neljas jagu: Lainetamine ja heli.

Peatükk I: Lainetamine.

Peatükk II: Helilainete üleüldised omadused.

Peatükk III: Toonid.

Viies jagu: Valgus.

Peatükk I: Üleüldised mõisted.

Peatükk II: Peegeldumine.

Peatükk III: Valguse murdumine.

Peatükk IV: Silm ja nägemine.

Peatükk V: Optilised aparaadid.

Peatükk VI: Valgus kui lainetamine.

Peatükk VII: Värvide hajumine (dispersioon) ja värvid.

Peatükk VIII: Valguse interferents ja diffraktsioon.

Peatükk IX: Spektrumid ja spektraalanalüüs.

Peatükk X: Valguse polarisatsioon ja kaksimurdumine.

Tähtsamad trükivead.

Lehek.	11	6	rida	ülevalt	on	$^3/_4$	peab	olema	$^1/_4$
„	17	3	„	„	„	joon. 12	„	„	joon. 10
„	29	7	„	„	„	Callodon ja Sturm ja môõtsid	„	„	Callodon ja Sturm mõõtsid
„	39	2	„	alt	„	sekt	„	„	sekst
„	53	17	„	ülevalt	„	$(2^3_2 N_1)$	„	„	$(2^3_2 N_2)$
„	61	26	„	„	„	arva	„	„	karva
„	73	5	„	„	„	ja	„	„	ju
„	74	5	„	„	„	90_5	„	„	90^0
„	81	3	„	„	„	$=\frac{f(d-f)}{d(d-f)}=\frac{f}{d}$	„	„	$\frac{-f(d-f)}{d(-f)}=-\frac{f}{d}$
„	86		joon. 83.			nurk i	„	„	α
						„ r	„	„	β
„	86	5	„	alt	„	ga	„	„	iga
„	90	4	„	ülevalt	„	on	„	„	On
„	91	7	„	„	„	$n1 \cong 1{,}5$	„	„	$n \cong 1{,}5.$
„	120	4	„	„	„	ülekand	„	„	ülekandma
„	122	7	„	alt	„	$\frac{A^{I}B}{AB}$	„	„	$\frac{A^{I}B^{I}}{AB}$
„	124	5	„	alt	„	kangust	„	„	kaugust
„	131	9	„	ülevalt	„	Ab	„	„	AB.
„	145	9	„	alt	„	$C^{I}c''$	„	„	$C^{I}C''$
„	154	6	„	ülevalt	„	§ 66	„	„	§ 66a

Spektrumite tabel.