

A-17916

15. VII 45

I. SOKOLOV

FÜÜSIKA

11.

KLASSILE

RK

PEDAGOOGILINE KIRJANDUS

ARH A-17918

I. SOKOLOV

1102

FÜÜSIKA

XI KLASSILE

OPTIKA

RK

„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“

TALLINN 1949



Eesti NSV Haridusministeeriumi poolt kinnitatud.

A 17916

ARHIIVKOGU

Sissejuhatus.

Valgus on meie elukogemustest tuntud kiirgusenergia liik. On kerge mõista, et valgus on energia liik, sest valgustatavad kehad soojenevad — tekib soojusenergia. Energia eriliigina erineb kiirgusenergia aga tunduvalt teistest varem käsiteldud energia liikidest.

Kiirgusenergia, näiteks päikese valgus, läbib maakerale jõudmiseks ruumi, mis sisaldab kaduvalt väikesi aine jälgi. Laboratoorsetel katsetel võib juhtida valgust läbi vaakumtorude milles gaas on kõrgeima astmeni hõrendatud, seejuures selgub, et aine puudumine ei takista kiirgusenergia levimist, vaid koguni soodustab seda.

Valgusnähtuste uurimisel põhjeneb kunstliku valgustuse korraldamine eluruumides, tööstus- ja avalikes hoonetes, värvimistehnika ja eriti optiliste riistade tehnika, millel on riigikaitseks määratu suur tähtsus.

Metallurgias kasutatakse optilisi meetodeid sulatatavate kehade temperatuuri määramiseks.

Kiirgusenergiat kasutatakse ka röntgenitehnikas eriliiki kiirte näol, mida nimetatakse röntgenikiirteks ja millede abil arstiteaduses uuritakse elava organismi siseelundite seisukorda ja metallurgias metalltoodete seesmist ehitust.

Agrotehnika on seotud Päikeselt Maa peale langeva kiirgusenergia kasutamisega.

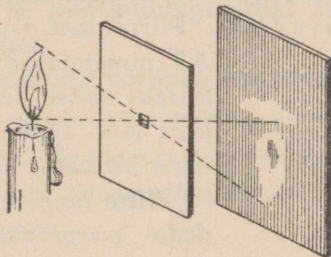
Nägemisorgani — silma — arenemise tõttu on valguskiir muutunud inimesele maailma tunnetamise vahendiks.

Mikroskoobi, teleskoobi ja muude optiliste riistade leiutamise­ga on inimene tohutul­tu laiendanud oma teadmiste valdkonda: tal võimaldus uurida elu aluse, raku ehitust, ta võis jõuda selgusele aatomite asetuse kohta molekulis, võis luua teooria aatomi ehituse kohta. Teiselt poolt, ta õppis tundma maakerast kujutlematult kaugel asetsevate taevakehade liikumist, massi ja koostist ning nende muundumise protsesse.

I. Valguse levimine.

1. Valguse levimine ühtlases keskkonnas.

Füüsika algkursuses käsitletud katsed, mille juures saadi valguse läbimisel läbi väikese ava läbipaistmatute kehade kujutised koos varjude ja poolvarjudega (joon. 1, 2 ja 3),



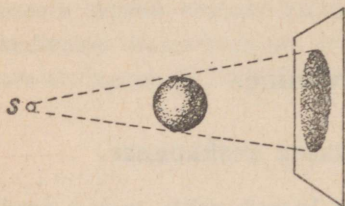
Joon. 1. Valguskiirte tungimine läbi väikese ava.

võimaldavad järeldada, et *ühtlases keskkonnas levib valgus helendavast punktist sirgjooneliselt.*

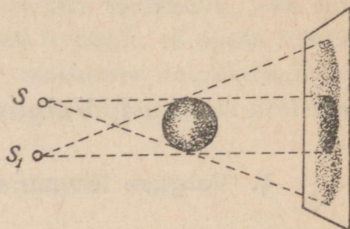
2. Valguse nähtused kahe keskkonna piiril.

Kui valguskiir langeb kahe keskkonna piirile, siis jaguneb kiirega kantav energia kahte ossa (joon. 4): osa energiat jääb samasse keskkonda, muudab aga seejuures levimise suunda, moodustab peegeldunud kiirguse; teine osa läheb üle teise keskkonda ja, muutes levimise suunda, moodustab murdunud kiirguse.

Kui valguskiir muudab kahe keskkonna piiril oma sihti ja jääb samasse keskkonda, siis nimetatakse seda nähtust valguse peegeldumiseks.



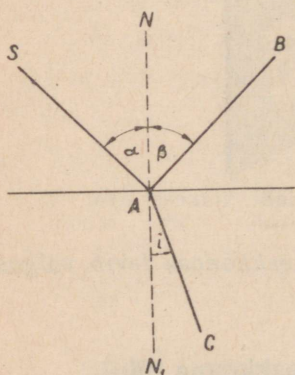
Joon. 2. Varju tekkimine.



Joon. 3. Poolvarju tekkimine.

Kui valguskiir muudab kahe keskkonna piiril suunda ja läheb üle teise keskkonda, siis nimetatakse seda nähtust valguse murdumiseks.

Piirpinnalt tagasipörganud kiirt AB nimetatakse peegeldunud kiireks; teise keskkonda üleläänud kiirt AC nimetatakse murdunud kiireks.



Joon. 4. Langev, peegeldunud ja murdunud kiir.

Kiire langemispunktis keskkondade piirpinnale tõmmatud ristsirge ja langeva kiire vahelist nurka nimetatakse langemisnurgaks; nurka ristsirge ja peegeldunud kiire vahel nimetatakse peegeldumisenurgaks; nurka ristsirge ja murdunud kiire vahel nimetatakse murdumisenurgaks.

Siledaks lihvitud pinda, mis kiiri peegeldab, nimetatakse peegliks. Selleks on metallide poleeritud pind, samuti ka puhta elavhõbeda pind.

Langemisnurga suurenemisel suureneb peegeldunud valguse hulk ja väheneb murdunud valguse hulk; langemis-

nurga vähenemisel on valguse hulga jaotuse käik vastupidine. Nii peegelduvad tiigivee vaikselt pinnalt kaugemad esemed selgemini kui lähedased; tiigi põhja¹ näeb aga paadi lähedusest paremini kui kaugemalt. Peegeldusseadustega tutvuti 7. klassi kursuses. Nende abil lahendatakse küsimus, kuidas antud langemiskiire järgi leida peegeldunud kiirt. Esimene seadus määrab, millises tasapinnas asub peegeldunud kiir, teine määrab kiire nurga selles tasapinnas. Peegeldumisseadused leiti katseliselt².

Kui langemisnurka tähistada tähega α ja peegeldumisnurka tähega β , siis $\alpha = \beta$.

1. Peegeldunud kiir asub ühes tasapinnas langeva kiirega ja peegelduspunktiist tõmmatud piirpinna ristsirgega.

2. Peegeldusnurk võrdub langemisnurgaga.

Mõlema seaduse järelduseks on kiire tagasipööratavus: *kui peegeldunud kiir samas sihis tagasi suunata, peegeldub ta langeva kiire sihis.*

3. Kujutis tasapeeglis.

Peegeldusseaduste alusel leitakse valguspunkti kujutis tasapeeglis ja kõverpeeglites.

Et leida punkti kujutist tasapeeglis (joon. 5), vaatleme punkti väljuvatest kiirtest kahte kiirt: ühte, mis langeb risti peegli pinnale, ja teist, mis langeb kaldu.

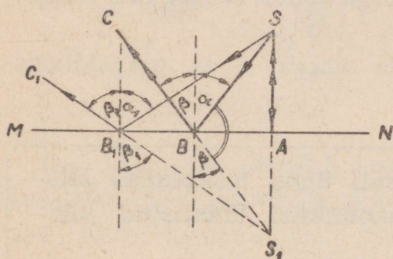
Peeglile MN risti langev kiir SA (joon. 5) peegeldub sa-

¹ Põhi on nähtav nende valguskiirte abil, mis on õhust vette tunginud ja põhjast tagasi peegeldunud.

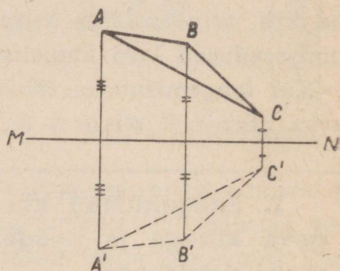
² Peegeldusseadusi tundis juba Eukleides — 305. a. enne meie aja-arvamist.

mas sihis, kuid vastassuunas. Kaldu langev kiir SB peegeldub BC sihis.

Kui peegeldunud kiired satuvad silma, näivad nad mõlemad väljuvat ühest kujuteldavast punktist, mis asetseb peegeldunud kiirte pikenduste lõikepunktis, s. o. punktis S_1 . Kolmnurkade SAB ja S_1AB ühtivusest järeldame, et $S_1A = SA$.



Joon. 5. Valguspunkti kujutise ehitamine tasapeeglis.



Joon. 6. Eseme kujutise ehitamine tasapeeglis.

Iga teise kaldu langeva kiire (näit. SB_1) kohta võib sama võttega tõestada, et, jätkates peegeldunud kiire sihti, see läbib punkti S_1 . Seega S_1 osutub valguspunkti S kujutiseks tasapeeglis. Seda kujutist nimetame näiliseks, sest tegelikult kiired ei lõiku selles, vaid ainult peegelduvad selliselt, et näivad sealt väljuvat. Punkt S_1 on punktile S sümmeetriline peegli pinna suhtes; teatavasti on kaks punkti tasapinna suhtes sümmeetrilised, kui nad asetsevad selle pinna ristsirgel võrdsetel kaugustel tasapinnast.

Seega on valguspunkti kujutis tasapeeglis näilik ja valguspunktile sümmeetriline.

Et saada tasapeeglis kogu eseme kujutist, tuleb ehitada iga eseme punktile sümmeetriline punkt.

Joonis 6 näitab eseme kujutise ehituskäiku tasapeeglis.

Eseme kujutis tasapeeglis on näilik ja esemele sümmeetriline.

4. Laboratoorne töö nr. 1.

Valguse murdumise seaduste tundmaõppimine.

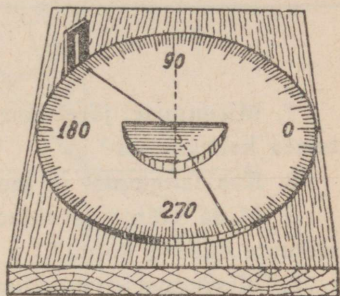
Riistad: 1) Riist optiliste katsete jaoks (joon. 7); 2) klaasist poolsilinder; 3) poolsilindrikujuline klaasanum; 4) vesi ja teisi läbipaistvaid vedelikke; 5) kõigile töötajatele ühine tugevajõuline valgusallikas.

Töö käik: 1. Asetage klaasist poolsilinder vineerist¹ ketta pinnale selliselt, et klaasist poolsilindri diameeter ja tsepter ühtiksid ringi diameetri ja tsentriga.

2. Suunake pilu päikese või mõne muu valgusallika poole ja nihutage alust seni, kuni pilust läbitulnud kiirte kimp satub poolsilindri tasapinnalisele tahule keskele; asetage ring selliselt, et langev kiir ja murdunud kiir valgustavad ringi pinda heledate joontega.

3. Mõõtke ringil langemisnurk α ja murdumisnurk i ; määrake tabelite abil nurkadele vastavad siinused ja arvutage nende suhe $\frac{\sin \alpha}{\sin i}$.

4. Muutke alusplaadi ümberasetamisega 5—6 korda langemisnurga suurust ja toimetage eeltoodud vaatlusi ja arvutusi iga juhu kohta. Lõpuks suunake langev kiirtekimp risti poolsilindri tasapinnale.



Joon. 7. Riist valguse murdumise seaduste uurimiseks.

¹ Vineerist kettale on liimitud paberist ring kraadiliste ja poolekraadiliste jaotustega; sellele on joonestatud kaks vastamisi risti asetsevat diameetrit. Ringjoonel saab liikuda vertikaalse piluga plekist plaadike. Poolsilindrid paigutatakse ringi tsesse (V. N. Bakušinski riist).

5. Asendage massiivne klaas tühja anumaga; täitke see algul veega, siis mõne muu vedelikuga; toimetage endisi mõõtmisi ja arvutusi.

6. Iga aine kohta saadud andmed kandke tabelisse:

Mõõtmise jrk. nr.	Langemis- nurk α	Murdumis- nurk i	$\sin \alpha$	$\sin i$	$\frac{\sin \alpha}{\sin i} = n$

7. Missuguse järelduse võime teha kiirte käigu kohta teises keskkonnas?

8. Kas langemis- ja murdumisnurgad on võrdelised?

9. Mida võime järeldada langemis- ja murdumisnurkade siinuste suhete kohta?

10. Missuguseid murdumise seadusi võib tuletada eeltä-
hendatud katsetest?¹

5. Valguse murdumise seadused.

Kui juhtida rida kiiri kahe keskkonna piirile, siis näeme, et teise keskkonda sisse tungides muudab iga kiir oma sihti, ta murdub.

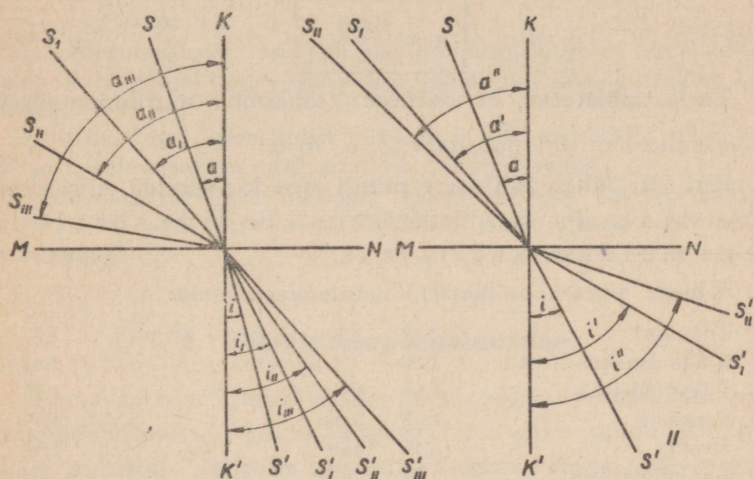
Katsed näitavad, et valguse üleminekul ühest keskkonnast teise keskkonda on ühtedel juhtudel murdumisnurk langemisnurgast väiksem ja kiir läheneb ristsirgele (joon. 8, I); teistel juhtudel on aga murdumisnurk langemisnurgast suurem ja kiir eemaldub ristjoonest (joon. 8, II).

Esimesel juhul öeldakse, et teine keskkond on optiliselt tihedam, teisel juhul — et ta on optiliselt hõredam kui esimene keskkond.

¹ Sellesama katseriistaga võib uurida valguse peegeldusseadusi. Selleks tuleb teistele vahenditele lisaks kasutada väikest tasapinnalist peeglit, mis paigutatakse ringi tsentrisse.

Uurimised näitavad, et langemis- ja murdumisnurkade siinused on omavahel võrreldised.

Kuna murdumisreedused on suhteliselt keerukad, avastati nad kaks aastatuhat hiljem kui peegeldusreedused¹.



Joon. 8. Valguskiirte üleminek ühest keskkonnast teise keskkonda.

1. Murdunud kiir on ühes tasapinnas langeva kiiriga ja murdumispunktiist tõmmatud piirpinna rist-sirgega.

2. Langemis- ja murdumisnurkade siinuste suhe on kahe antud keskkonna kohta jääv suurus; seda jäävat suurust nimetatakse teise keskkonna murdumisnäitajaks esimese keskkonna suhtes.

¹ Ptolemaios püüdis leida valguse murdumise seadusi 110. aastal; need avastas aga alles Snellius 1620. a.; praeguse kuju andis neile seadustele R. Descartes 1637. a.

Mõlema seaduse järelduseks on kiire tagasipööratavus: kui murdunud kiir samas sihis tagasi suunata, siis läheb uus murdunud kiir endise langeva kiire sihis.

Tähistades teise keskkonna murdumisnäitajat n -ga, saame

$$n = \frac{\sin \alpha}{\sin i} \quad (I)$$

Endastmõistetav, et esimese keskkonna murdumisnäitaja teise suhtes on n -i pöördarv, s. o. $n_1 = \frac{1}{n}$.

Kui kiir läheb tühjusest mingi aine keskkonda, siis nime-tame vastava aine murdumisnäitajat selle aine absoluut-seks murdumisnäitajaks.

Mõnede ainete absoluutseid murdumisnäitajaid:

Teemant	2,42	Klaas (kerge, kroon-)	1,57
Klaas (raske, flint-)	1,80	Tärpentin	1,41
Väävelsüsinik	1,65	Piiritus	1,36
Kivisool	1,55	Vesi	1,33
Kvarts	1,55	Jää	1,31
Kanadabalsam	1,54	Ohk	1,00029

Harjutusi (1).

1. Kuidas peegeldub ja murdub piirpinnale risti langev kiir?
2. Ehitage valguspunkti kujutis tasapeeglis.
3. Ehitage tasapinnalise eseme kujutis tasapeeglis.
4. Ehitage horisontaalselt asuva eseme kujutis tasapeeglis, mis seisab kaldu horisontaaltasapinnaga 45° nurga all; tehke sedasama vertikaalselt seisva esemega.
5. Joonestage kaevikuperiskoobi skeem ja selgitage kiirte käiku selles ja riista ülesannet. Seletage periskoobi kasutamist allveepaadis.
6. Kiir langeb peeglisse risti. Kui palju muutub nurk peegeldunud ja langeva kiire vahel, kui peegel pöördus a° võrra?
7. Päikesekiir langeb horisontaaltasapinnale 24° all. Kui suure nurga alla horisontaaltasapinnaga tuleb asetada tasapeegel, et peegeldunud kiir oleks horisontaalne?

Vastused: 78° või 12° .

8. Kui suured on langemis- ja murdumisnurgad lihvitud teemandi pinnal, kui kiir langeb tühjusest ja langemisnurk on 60° ?

Vastus: 21° .

9. Murdumisnurk kvartsis on 24° . Kui suur on langemisnurk?

10. Kiire langemisnurk on 50° , murdumisnurk on 28° . Kui suur on murdumisnäitaja?

Vastus: 1,6.

11. Peegeldusnurk on 40° , murdumisnurk 46° . Mida võiks öelda selle põhjal teise keskkonna tiheduse kohta, võrreldes esimesega?

12. Kiir läheb teemandist tühjusesse ja kujundab seejuures 90° -se murdumisnurga. Kui suur on langemisnurk?

Lahendage seesama ülesanne klaasi (kroon-) ja vee suhtes.

13. Miks näib pulk vees murtuna? Kuhu poole on sihitud murdumine?

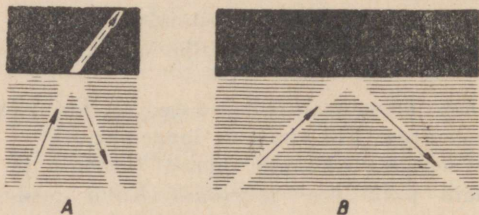
6. Täielik sisepeegeldumine.

Asetades murdumise seadeldises (joon. 7) vastavale paigale poolsilindri, juhime langeva kiire pilu kaudu silindrilisele pinnale. Jälgides murdunud kiire käiku aines, märkame, et saabudes poolsilindri seest selle tasapinnalisele tahule, mis eraldab ainet õhust, jaguneb kiir sellel piiril kaheks: üks osa valgusest peegeldub kehasse tagasi peegeldusseaduste järgi, teine osa murdub ja väljub õhku, eemaldudes ristsirgest, s. t. moodustades langemisnurgast suurema murdumisnurga. Pöörame poolsilindrit nii, et langemisnurk kiire tasapinnalisele tahule suureneks. Siis märkame esiteks, et silindri ainest õhku väljuv kiir eemaldub ristsirgest järjest enam; teiseks märkame, et väljuv kiir muutub järjest kahvatumaks, tagasipeegeldunud kiir aga muutub heledamaks. Lõpuks, kui langemisnurk jõuab teatava suuruseni, kiir ei välju üldse teise keskkonda ja peegeldub tervikuna tagasi esimesse keskkonda.

Niisugune nähtus esineb ainult siis, kui kiir tuleb tihedamast keskkonnast hõredama keskkonna piirile.

Ainult sel juhul, kui murdumisnurk on langemisnurgast suurem, jõuab ta juba siis täisnurgani, kui langemisnurk on veel terav.

Langemisnurka, millele vastav murdumisnurk võrdub 90° -ga, nimetatakse piirnurgaks.



Joon. 9. Osaline (A) ja täielik (B) sisepeegeldumine.

Nende kiirte peegeldumist, mis tulevad hõredama keskkonna piirile piirnurgast suurema langemisnurga all, nimetatakse täielikuks sisepeegeldumiseks.

Täielikult sisepeegeldunud kiirte käik on kujutatud joonisel 9.

Tähistame A -ga täieliku sisepeegeldumise piirnurga, kui kiir läheb aimest tühjuse piirile, ja peame meeles, et murdumisnäitaja kiire üleminekul aimest tühjusesse on tühjusest ainesse mineva kiire murdumisnäitaja pöördarv. Siis saame arvutada piirnurga valemist:

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

$$\sin A = \frac{1}{n}. \quad (II)$$

Mõne aine piirnurgad aine ja õhu piiril peegeldumisel on:

Teemant	24°	Klaas, vastavalt sordile	$30\text{—}42^\circ$
Väävelvesinik	38°	Vesi	49°

Täielik sisepeegeldumine esineb looduses üsna sagedasti. Õhumullid vees ja klaasis, veeämblikud vees näivad läikivatenäna valguse täieliku sisepeegelduse tõttu vee või klaasi ja õhu piiril. Samad veeämblikud on veest välja võetuna hallid.

Miraaži nähtust saab seletada täieliku sisepeegeldumisega kiirte üleminekul tihedamast õhukihist hõredamasse.

Tehnikas kasutatakse täielikku sisepeegeldumist klaasi ja õhu piiril kiirte käigu muutmiseks horisontaalsete esemete ekraanile projitseerimisel, keldriruumide valgustamisel ja mujal. Kuidas toimub sel puhul kiirte käigu muutumine, selgub alljärgneva harjutuse nr. 4. juures.

Harjutusi (2).

1. Arvutada kvartsi, tärpentini ja jää täieliku sisepeegeldumise piirnurgad.

2. Kiire langemisnurk vee ja õhu piiril on 55° . Kas see kiir väljub õhku?

3. Missuguse nurga piirides asuvad kiired, mis langevad kivi-soolas ühte punkti tema ja tühjuse piiril ja väljuvad soolast tühjusesse?

4. Valguse kiir langeb risti niisuguse klaasist prisma tahule (kaatetile), mille ristlõige on võrdhaarne täisnurkne kolmnurk. Joonestada kiire edasine käik.

5. Klaasprisma ristlõige on võrdkülgne kolmnurk. Valguskiir langeb õhust ühele tahule risti $1/3$ külje kaugusel ühest tipust. Joonestada kiire edasine käik.

6. Missuguse nurga all raadiusega peab kiir langema õhust kerakujulisele vihmatilgale, et tilga sisepiiril tekiks täielik sisepeegeldus?

7. Kiire käik läbi tasaparalleelse plaadi.

Kui paralleelsete tahkudega klaasplaadile langeb paralleelsete kiirte kimp SA (joon. 10), siis jaguneb klaasi piiril valgus kaheks osaks: üks osa peegeldub, teine osa aga murdub klaasis AB sihis. Teisel piiril kiirte kimp AB jällegi osalt peegeldub ja osalt murdub õhku üleminekul BS suunas. Jälgime ainult klaasist väljuva kiire käiku.

Esimesel piiril on seos langemis- ja murdumisnurkade vahel:

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

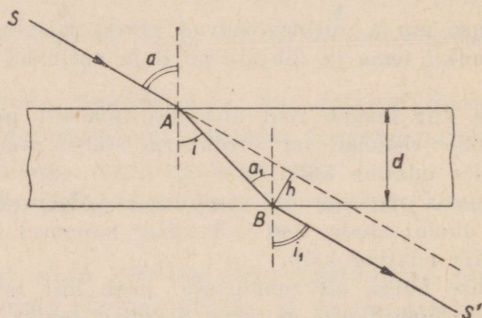
Teisel piiril kiire ülemineku klaasist õhku on seos lange-
mis- ja murdumisnurkade vahel:

$$\frac{\sin \alpha_1}{\sin i_1} = \frac{1}{n}$$

Korrutamisel saame:

$$\frac{\sin \alpha \cdot \sin \alpha_1}{\sin i \cdot \sin i_1} = 1.$$

Tahkude paralleelsuse põhjal $\angle \alpha_1 = \angle i$. Sellest järg-
neb, et $\sin i_1 = \sin a$ ja $\angle i_1 = \angle a$. Viimasest järgneb, et
 BS' on paralleelne AS -ga.



Joon. 10. Kiire käik läbi tasaparalleelse plaadi.

Siit järeldus: kui kiir tungib läbi tasaparalleelse plaadi,
siis plaadist väljuv kiir on paralleelne plaadile langeva kii-
rega, nihkub aga tema sihist teatavas ulatuses kõrvale.

Vaadeldes eset läbi tasaparalleelse plaadi, näeme teda
väljatuleva kiire sihis ja ta näib oma tegeliku asendi suhtes
nihutatuna.

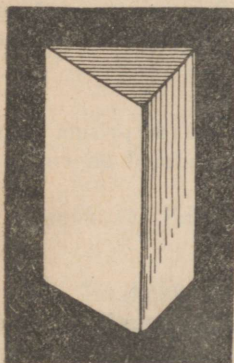
Nihkumise suurus h suureneb langemisnurga a , plaadi
paksuse d ja murdumisnäitaja n suurenedes.

On soovitatav teostada nihkumise suuruse arvutus järgne-
vate ülesannete nr. 1—3 lahendamisel.

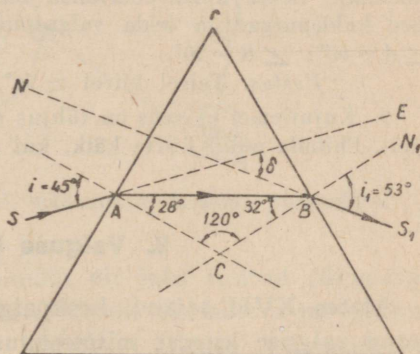
Ka harilik aknakraas nihutab läbitungivaid kiiri. See nihe on vaevalt märgatav, sest klaas on õhuke; kui aga klaasi paksus pole ühesugune, paistab see puudus kohe silma.

8. Kiire käik läbi prisma.

Võtame kolmnurkse alusega klaasprisma. Kahte tahku, mida läbib kiir, nimetatakse murdvateks tahkudeks. Nende lõikejoon kannab murdva serva nime; tahkudevahelist lineaarset nurka nimetatakse optilise prisma murdvaks nurgaks.



Joon. 11. Optiline prisma.



Joon. 12. Kiire käik läbi prisma.

Kiire käik õhust läbi klaasprisma on kujutatud joonisel 12. Joonisest nähtub, et kui prisma on tihedamast ainekst kui teda ümbritsev keskkond, siis kaldub läbiminev kiir aluse poole. Läbi prisma vaadeldav ese näib kaldununa murdva nurga tipu poole.

Prisma kaudu saadud valguspunkti ja igasuguse eseme kujutised on näilised. Selles võib veenduda, kui ehitada ühest punktist väljuva kahe kiire käik läbi prisma.

Prismale langeva ja prismast väljuva kiire sihtide vahelist nurka δ nimetatakse kaldenurgaks.

Harjutusi (3).

1. Kiir SA langeb tasaparalleelsele kroon-klaasist plaadile (joon. 10) 60° -se nurga all normaali suhtes. Kui suure nurga all väljub ta plaadist? Määrata väljuva kiire nihkumine, kui plaadi paksus $d = 5$ cm ja kui $d = 0,5$ cm?

Vastused: ≈ 1 cm; ≈ 1 mm.

2. Lahendada eelnev ülesanne, kui langemisnurk on 60° .

Vastus: 1,9 cm.

3. Lahendada harjutused 1 ja 2, kui plaat on flintklaasist.

4. Ühest punktist langeb flintklaasist prisma tahule AB kaks kiirt langemisnurgaga 30° ja 40° (esimene kiirtest on tipule A lähemal). Leida konstrueerimise teel ja malliga mõõtes mõlema kiire kaldenurgad ja leida valguspunkti kujutis. Prisma nurgad: $\angle A = 60^\circ$; $\angle B = 50^\circ$.

Vastus: Teisel kiirel $\approx 51^\circ$.

5. Kujutleme, et vees on tühjus eelmise ülesande prisma kujuliselt. Ehitada nüüd kiirte käik, kui arvulised andmed on endised.

9. Valguse kiirus.

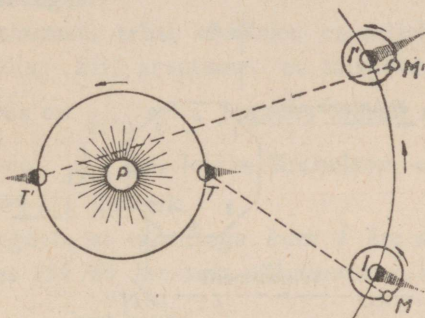
Alates XVII sajandi keskpaigast kuni tänaseni on mõõdetud valguse kiirust mitmesuguste astronoomiliste ja füüsikaliste võtetega. Peatume kõige esimese ja kõige viimase meetodi juures.

Enne XVII sajandi keskpaika äpardusid kõik valguse kiiruse mõõtmise katsed ja valitses arvamine, et valgus jõuab valgusallikalt vaatleja juurde silmapilkselt.

I. Rõmeri meetod. 1675. a. vaatles taani õpetlane Rõmer planeet Jupiteri ühe kaaslane varjutust ja temal läks korda täpselt määrata ajavahemikku selle planeedi kaaslane varju mineku ja sellest väljumise vahel (joon. 13).

Rõmer tegi oma vaatlusi kui Maakera oli Jupiterile kõige lähemal (TI) ja arvutas nende põhjal momendi, mil kaaslane väljub planeedi varjust pool aastat hiljem, kui Maakera on Jupiterist kõige kaugemal ($T'J'$).

Vaatlusel poole aasta pärast märkas Römer, et kaaslane ilmus Jupiteri varjust nähtavale ligi 1000 sekundit hiljem, kui oli arvatatud. Seda lahkuminekut seletas Römer sellega, et, võrreldes esimese asendiga, oli teises asendis valgusel tarvis läbida lisakaugus, mis võrdub ligikaudu Maakera orbiidi diameetriga.



Joon. 13. Valguse kiiruse määramine Römeri meetodiga.

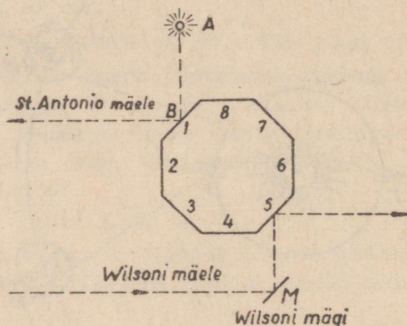
Et Maakera orbiidi läbimõõt oli juba tuntud (ümmarguselt 300 000 000 km), siis võis Römer teadaoleva tee pikkuse ja aja kaudu arvutada valguse kiiruse (ümmarguselt $300\,000 \frac{\text{km}}{\text{sek}}$).

II. *Michelsoni meetod* (loe *maikelson*). Füüsika meetodid on rajatud ajavahemiku mõõtmisele, mille vältel valgus jõuab ühest punktist maapinnal teise punkti, mille kaugus esimesest on teada. Selle ajavahemiku mõõtmist takistab liiga suur valguse kiirus, sest et ühe sekundi jooksul läbib valgus kauguse, mis on maakera ümbermõõdust $7\frac{1}{2}$ korda pikem.

Seepärast kulub valgusel kahe maapealse punkti vahemaa katmiseks tühine osa sekundist. Füüsika meetodite teostamise pearaskus on selles, kuidas mõõta kaduvalt lühikesi ajavahemikke.

Allpool kirjeldatakse, kuidas see raskus ületati viimasel valguse kiiruse mõõtmisel, mida teostas 1928. aastal ameerika füüsik Michelson.

Valguskiirel tuli läbida edasi-tagasi vahekaugus kahe mäe vahel (Wilsoni ja St. Antonio mägi, milledevaheline kaugus on 35 km). Ühel mäel asus tugev valgusallikas *A* (joon. 14).



Joon. 14. Seadmete paigutus valguse kiiruse mõõtmiseks Michelsoni meetodi järgi.

Üks valguskiirte vihk peegeldus kaheksatahulise peegli ühelt tahult (näiteks 1. tahult) ja suundus teise mäe poole. Teiselt mäelt peegeldus kiir tagasi esimesele mäele ja peegeldati peegli *M* abil sama kaheksatahulise peegli sellele tahule, mis oli 1. tahuga paralleelne (5. tahk). Sellelt peegeldus kiir vaatleja silma suunas. Kui selle katse teostamisel panna mitmetahuline peegel pöörlema, võib kujuneda kaks võimalust. Esiteks, selle ajaga, kui valgus käib mägede vahel edasi-tagasi, on peegel pöördunud täisringi $\frac{1}{8}$ osa võrra nii, et 5-nda tahu kohale on täpselt asetunud 6. tahk; siis viimane peegeldab kiire samas sihis kui paigalolev peegel: valgusallikas on vaatlejale nähtav. Teisel juhul võib osutada, et vaatleja valgusallikat ei näe, sest 5-ndale tahule järgnev tahk ei jõudnud täpselt asetuda 5-nda kohale ja kiir muutis lõpul sihi, möödudes vaatleja silmast.

Vaatlus teostatakse järgmiselt: vaatleja püüab tabada valgusallika nähtavust peegli paigalseisul; siis pannakse see mitmetahuline peegel pöörlema ja valgusallikas pole enam nähtav; pöörlemise kiirust suurendatakse seni, kui valgusallikas on jälle nähtav. Selle ilmumine tõendab, et nüüd peegel tegi $\frac{1}{8}$ täispöörde selle ajaga, kui valgus läbis mägede vahemaa edasi-tagasi.¹

Katse teostamisel tehti kindlaks, et selleks oli vaja 530 pööret sekundis. Siit arvutame, et täispöörde ühe kahekordse kestvus on $\frac{1}{4240}$ sek. Jagades täpselt mõõdetud kahekordse vahemaa $\frac{1}{4240}$ -ga, leidis Michelson, et õhus on valguse kiirus 299 711 km/sek.

Sellest järgneb, et täpsusega kuni 1 km/sek. on valguse kiirus tühjuses 299 796 km/sek. või ümmarguselt $c = 300\,000$ km/sek. *299 774 km/sek 2885 mõõtmise keskmine*

Otsese mõõtmise teel määrasid Foucault Prantsusmaal ja Michelson Ameerikas valguse kiirust vees ja leidsid, et see on $\frac{3}{4}$ kiirusest tühjuses.

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Kuidas mõõdetakse valguse kiirust õhus? Kui suur on valguse kiirus tühjuses?
2. Mis on langemisnurk? peegeldusnurk? murdumisnurk?
3. Mis on valguse peegeldumine ja missugused on tema seadused?
4. Mis on valguse murdumine ja missugused on tema seadused?
5. Mis on murdumisnäitaja ja millega ta võrdub?
6. Mis on täielik sisepeegeldumine?
7. Missugused on eeltingimused täielikuks sisepeegeldumiseks?
8. Mis on täieliku sisepeegeldumise piirnurk ja kuidas arvutatakse selle suurust?

¹ Kiirust suurendades võib see juhtuda veel $\frac{2}{8}$, $\frac{3}{8}$ jne. täispöörde osa juures.

9. Tuua peegeldumise, murdumise ja täieliku sisepeegeldumise näiteid loodusest ja tehnikast.

10. Kuidas läbib kiir tasaparalleelset plaati?

11. Millest sõltub tasaparalleelset plaati läbinud kiire nihkumise ulatus?

12. Mida nimetatakse kiire kaldenurgaks, kui kiir läbib prisma?

13. Kuhu poole kaldub läbi prisma vaadeldava eseme kujutis?

10. Valgusallikad.

Looduslikeks valgusallikateks on isehelendavad kehad päikesega eesotsas. Muudelt helendavatelt taevakehadelt maa-kerale sattuv valgusenergia hulk on kaduvalt väike, võrreldes päikeselt tuleva energiaga. Teiseks looduslikuks valgusallikaks on hõrendatud gaaside kiirgamine, kui neid läbib elekter (näit. virmalised).

Valguse kiirgamine tekib ka paljude keemiliste reaktsioonide kaasnähtena, mille juures eraldub soojus. Seda nimetatakse kemoluminestsentsiks. Selle näitena võib tuua tahke fosfori kiirgamist oksüdeerimisel, paljude vedelikkude kiirgamist, kui nad oksüdeeruvad vesinikülhipendi toimel, gaaside kiirgamine (leek), kui neis puuduvad tahked osakesed.

Kemoluminestsentsi erijuhtumiks on mõnede elusolevuste — kalade, putukate, ussikeste kiirgamine, s. o. bioluminestsents. Tähelepanu väärib, et nende organismide kiirgamise kasutegur on väga kõrge, keemilisest energiast muudavad nad ligi 50% valgusenergiaks. Kiirgamine tekib ka kristalliseerumisel ja kristalsete kehade, näit. suhkru purustamisel, samuti aga ka hõõrumisel (näiteks isoleerpaela lahtihaarutamisel).

Kaasaegsed praktilise tähtsusega kunstlikud valgusallikad on rajatud põlemisele, tahkete kehade kuumutamisele elektri-vooluga ja gaaside kiirgamisele neist läbijuhitava elektri toimel.

Kirjandus. Kunstlike valgusallikate loomise ajalooga saab tutvuda raamatuist: Пресман и Фентиклюз, „От лучины к электричеству“, Сахаров, „Борьба за свет“.

11. Rahvusvaheline küünal. Luumen.

Valgusallikad erinevad üksteisest kvalitatiivselt ja kvantitatiivselt. Põlev tuletikk on valgusallikana midagi muud kui elektri hõõglamp ja viimane ei sarnane kaarleegiga.

Et valgusallikaid omavahel võrrelda, tuleb üks neist võtta etalooniks, valgusallika tugevuse ühikuks.

Rahvusvahelise kokkuleppe kohaselt alguses kolme maa vahel (Inglismaa, USA ja Prantsusmaa), kellega hiljem liitusid ka NSV Liit ja teised maad, on praegu selleks valgusallika tugevuse etalooniks rahvusvaheline küünal.¹

Realse näitena läheneb rahvusvahelisele küünlale (lühidalt „r. k.“) ühe 2 cm läbimõõduga steariinküünla leek.

Valgusallika kvaliteedi üle võib otsustada temast välja kiirguva energia järgi. Valgusenergia hulka, mis läbib pinnaosa ühes ajaühikus, nimetatakse valgusvooks läbi selle pinnaosa.

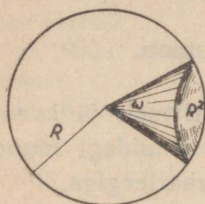
Valgusvoog on seotud ühe kindla ruumilise erisuuru-

¹ Igal kokkuleppega ühinenud riigil on mitu (NSV Liidul — 24) omavahel täpselt võrreldud elektri hõõglampi, mis teatava pinge juures kiirgavad igaüks kindlaksmääratud arvu rahvusvahelisi küünlaid.

Tuleb silmas pidada, et ei ole etaloonina olemas hõõglampi valgustugevusega 1 rahvusvaheline küünal. Kõigi maade etaloonid sisaldavad mitmekordse arvu rahvusvahelisi küünlaid ja on sellisena etaloonideks. Nii siis pole rahvusvahelist küünalt üksikult olemas, ta on aga kindel murdosa eeskujulampide kiirgusest.

1940. a. seati sisse uus valgusallika tugevuse ühik, nimelt küünal, mis omab $\frac{1}{60}$ valguse tugevusest, mida kiirgab risti pinnale 1 cm² absoluutselt musta keha pinda 2046,6° K juures (viimane on plaatina tahkumise temperatuur).

sega — ruuminurga ühikuga, mida nimetatakse steradiaaniks.



Joon. 15.
Steradiaan.

Ruuminurga ühikuks loetakse ruumi osa, mida piirab niisuguse koonuse külgpind, mille aluseks on koonuse tipu ümber kujundatud kera pinna osa, mille suurus võrdub raadiuse ruuduga (joon. 15).

Kui kera raadius on 1 m, siis ruuminurga ühik toetub kera pinna 1 m^2 suurusele osale. Et kera pindala on $4\pi R^2 = 4\pi \text{ m}^2$, siis ühe punkti ümber on 4π ruuminurga ühikut ehk steradiaani.

Valgusvoo ühikut nimetatakse luumeniks¹.

Lumen on valgusvoog, mida ruuminurga tipus asetsev punkt kujuline valgusallikas kiirgab ruuminurga ühikusse, kui valgusallika tugevus on üks rahvusvaheline küünal.

Tavalised valgusallikad — petrooleumilambid, hõõglambid jne. — kiirgavad eri suundades eri tugevusega valgusvooge. Seepärast antakse valgusallika andmetes kas ta keskmine valgusvoog või ta valgusvood eri sihtides (püstsihis, rõhtsihis jne.).

12. Pinnavalgustuse tugevus.

Pinnavalgustuse tugevuse mõiste on vajalik selleks, et isoleomustada kehade valgustatuse astet.

Pinnavalgustuse tugevust mõõdetakse keha pinnaühikule langeva valgusvooga.

Tähistades valgusvoogu tähega Φ , pindala, millele voog langeb, tähega S ja pinnavalgustuse tugevust tähega E , saame:

$$E = \frac{\Phi}{S}.$$

¹ Lumen tähendab ladina keeles valgust.

Valgustustehnika on rajatud kahele pinnavalgustuse seadusele. Esimene, Joh. Lamberti (1728—1777) poolt avastatud seadus määrab pinnavalgustuse sõltuvuse valgusallika kaugusest, kui langevad kiired on risti pinnaga.

Selleks kujutleme, et punktiline valgusallikas saadab igasse suunda ühtlase valgusvoo Φ .

Kui punktilise allika keskpunkti ümber kujundada kaks kerapinda raadiustega R_1 ja R_2 (joon. 16), siis on kerade pindalad: $S_1 = 4\pi R_1^2$ ja $S_2 = 4\pi R_2^2$; nende pinnavalgustuse tugevused on:

$$E_1 = \frac{\Phi}{4\pi R_1^2}; \quad E_2 = \frac{\Phi}{4\pi R_2^2}.$$

Sellest järeldame, et

$$\frac{E_2}{E_1} = \frac{\Phi \cdot 4\pi R_1^2}{\Phi \cdot 4\pi R_2^2} \text{ ehk}$$

$$\boxed{\frac{E_2}{E_1} = \frac{R_1^2}{R_2^2}} \quad (\text{III a})$$

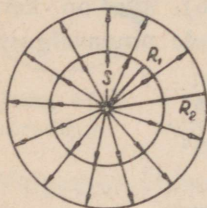
Seega pinnavalgustuse esimene seadus on:

Punktilise valgusallikaga valgustamisel on pinnavalgustuse tugevus pöördvõrdeline valgusallika ja selle pinna vahelise kauguse ruuduga.

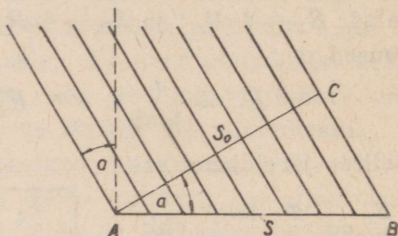
Kui, näiteks, viime pinna 3 korda endisest kaugemale, siis väheneb pinnavalgustuse tugevus seega üheksa korda, kui aga teha vahemaa kaks korda lühemaks, siis suureneb pinnavalgustuse tugevus neli korda.

Kui pinda valgustada paralleelkiirtega, siis ei sõltu pinnavalgustuse tugevus valgusallika kaugusest. On kerge veenduda, et sel juhul, kui pinda nihutada teise asendisse, mis on algasendiga paralleelne, pinnale risti langev energia hulk jääb endiseks. Endastmõistetav, et selle juures ei ole arvestatud seda võimalust, et ka keskkond võib neelata energiat.

Pinnavalgustuse tugevus muutub aga kohe, kui muutub kiirte langemisnurk. Kujutleme selleks ristkülikut (joon. 17), mille pind on joonisega risti; ristküliku alus AB on joonisel, kõrgus, suurusega üks cm, on joonisega risti ja pole seepärast sellele kujutatud, samuti puudub joonisel AB -ga paralleelne vastaskülge.



Joon. 16. Pinna-
valgustuse esime-
se seaduse tuletamise juurde.



Joon. 17. Pinnavalgustuse teise seaduse tuletamise juurde.

Siis on selle ristküliku pind $S = 1 \times AB = AB$ cm² ja tema valgustuse tugevus $E = \frac{\Phi}{AB}$.

Seesama valgusvoog Φ langeks ka teise ristküliku pinnale S_0 , mis erineb pinnast S sellega, et ta on risti langevate kiirtega. Pind $S_0 = 1 \times AC = AC$ cm² ja tema valgustuse tugevus $E_0 = \frac{\Phi}{AC}$.

Võrreldes mõlema pinna pinna valgustuse tugevust, saame:

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\Phi}{\Phi} \cdot \frac{AC}{AB} \text{ ja } \frac{E}{E_0} = \frac{AC}{AB}$$

Kolmnurgas ACB on $\frac{AC}{AB} = \cos \alpha$. Sellest järgneb, et

$$\frac{E}{E_0} = \cos \alpha \text{ või}$$

$$\boxed{E = E_0 \cdot \cos \alpha.} \quad (\text{III b})$$

Siit pinnavalgustuse teine seadus:

Pinna valgustamisel paralleelsete kiirtega on pinnavalgustuse tugevus võrdeline kiirte langemisnurga koosinusega.

Maakera pinda valgustatakse alati kaldu langevate kiirtega; päikese asendi muutumisel muutub seejuures pidevalt maapinna pinnavalgustuse tugevus.

13. Pinnavalgustuse tugevuse ühik ja valem.

Pinnavalgustuse tugevuse ühik „luks“ määratakse valgusallika tugevuse ühiku abil.¹

Pinnavalgustuse tugevus on üks luks, kui pinda valgustab ühe meetri kauguselt üks rahvusvaheline küünal ja pind on kiirtega risti.

Sama ühikut võib defineerida ka teiste sõnadega: pinnavalgustuse tugevus on üks luks, kui selle pinna 1 m²-le langeb ühtlaselt valgusvoog 1 luumen.²

Näiteid. 1 meetri kaugusel annab 1 küünal pinnavalgustuse tugevuse üks luks. Samal kaugusel annab 10 küünalt 10 luksit ja 36 küünalt 36 luksit. Aga 2 m kaugusel on 36 küünla pinnavalgustuse tugevus 4 korda väiksem (§ 12), s. o. 9 luksit, 4 m kaugusel — 16 korda väiksem, s. o. 2,25 luksit; 10 m kaugusel — 100 korda väiksem, s. o. 0,36 luksit; ½ m kaugusel — 4 korda suurem, s. o. 144 luksit.

¹ Ladina keeles: *lux* — valgus.

² OST-4891 annab veel teise ühiku, „fott“i. Pinnavalgustuse tugevus on üks fott, kui selle pinna 1 cm²-le langeb ühtlaselt valgusvoog 1 luumen; üks fott võrdub 10 000 luksiga.

Üldiselt, kui tähistada valgusallika küünalde arvu J -ga, siis on R m kaugusel allikast pinnavalgustuse tugevus:

$$E = \frac{J}{R^2} \text{ luksi.} \quad (IV)$$

Tervishoid näeb ette iga tegevuse jaoks oma pinnavalgustuse tugevuse normid. Nii loetakse lugemise juures normaalseks valgustuse tugevuseks 50 luksit.

Suurim pinnavalgustuse tugevus, mille juures silm on veel suuteline eraldama esemeid valgel foonil, on 2 000 000 luksit, pisim — umbes 0,00003 luksit; parim pinnavalgustuse tugevus on 10 ja 10 000 luksit piirides. Mida peenem töö (kellasepad, graveerijad, joonestajad), seda suurem peab olema pinnavalgustuse tugevus. Seejuures tuleb hoolitseda, et pinnavalgustuse tugevus oleks ühtlane (valgusallikad olgu võimalikult tugevajõulised ja kõrgele üles riputatud, tuleb otsustavalt kasutada reflektoreid)¹; tugevalt valgusallikalt otse teed silma sattunud kiired, samuti valguse ja varju liig järsk vaheldumine, kahjustavad nägemist.

Silm ei talu vahetult vaatamisel valgusallika kiirgamise

eredust¹ üle $0,75 \frac{\text{küünla}}{\text{cm}^2}$ (0,75 küünalt valgusallika kiirgamispinna iga 1 cm^2 kohta).

Steariinküünal annab $0,5 \frac{\text{küünalt}}{\text{cm}^2}$, petrooleumilamp — $1,5 \frac{\text{küünalt}}{\text{cm}^2}$, vaakumlamp volframniidiga — $200 \frac{\text{küünalt}}{\text{cm}^2}$, gaasitäitega 100-vatiline lamp — $500 \frac{\text{küünalt}}{\text{cm}^2}$, päike — $200\,000 \frac{\text{küünalt}}{\text{cm}^2}$.

¹ Valgusallika kiirgamise eredust mõõdetakse küünalde arvuga, mida kiirgab 1 cm^2 valgusallika pinda, kui silma sattuvad kiired on pinnaga risti.

Pinnavalgustuse tugevuse normid tööliikide järgi.

Töö liigid ja ruumid	Pinnavalgustuse tugevus luksides
1. Peentööd (kellasepa-, graveerija-, tumedate kangaste kudumine, peenkudumine, joonestamine jms.)	100
2. Väikeste teravate lõikeriistade (terade, puuride, freeside jms.) kasutamise seotud tööd	100
3. Peened täpsustööd tööpinkidel; tööd õmblusmasinal; kantseleitöö ja kirjatööd	75
4. Lugemine, vaatlused mõõteriistadelt; heegeldamine	50
5. Rietusruumid	25
6. Vaheruumid, läbikäigud	10
7. Trepikojad	8
8. Hoovid, läbisõidud	2

Valgustustehnikas on välja töötatud valgustusnormid tööliikide ja ruumide otstarbe järgi. Nõukogude Liidus kehtivad normid on avaldatud pealkirja all: „Ajutised normid vabrikute ja tehaste valgustamise kohta“, „Вопросы труда“ väljaandes. Eeltoodud tabel on väljavõte sellest.

Majanduslikult otstarbeka valgustuse ja ühtlase pinnavalgustuse tugevuse jaotuse korraldamisel siseruumide pindadel tuleb arvestada seinte ja lagede värvkatte suurt tähtsust.

Pealelangevast valgusenergiast peegeldab barüütvalge 99%, tsinkvalge 94%, seatinavalge 93%, kriit 84%; valge paber peegeldab 82%, kollane — kuni 40%, sinine — kuni 25%, must kalev 1,2%, must samet 0,2%.

Harjutusi (4).

1. Kui suur on pinnavalgustuse tugevus ühest 25-küünlalisest lambist, mis asub lauast 76 cm kõrgusel?

Vastus: 43 luksi.

2. Kas on 1,5 m kõrgusele asetatud 100-küünlalise lambi valgustus lugemiseks normaalne?

3. Kui kõrgele tuleb paigutada 32-küünlaline lamp, et laual oleks normaalne valgustus?

Vastus: 80 cm.

4. Millal on suurem pinnavalgustuse tugevus: 200-küünlalisest lambist 4 m kaugusel, või 25-küünlalisest lambist 1,2 m kaugusel?

5. Kui suur osa päikese kiirgusest ekvaatoril langeb Moskvas horisontaalpinnale kevadise pööripäeva keskpäeval? Geograafiline laius Moskvas $\varphi = 55^\circ 45'$.

Vastus: 0,56.

6. Mitu korda on Moskvas päikese kiirgus horisontaalpinnal suvise (talvise) pööripäeva keskpäeval suurem (vähem) kui keskpäeval ekvaatoril?

14. Valgusallika tugevuse mõõtmine.

Kahe valgusallika tugevuse võrdlemiseks on vaja neid asetada selliselt, et nad valgustaksid pinda ühetugevuselt. Kui esimene allikas annab pinnavalgustuse tugevuse E luksi R_1 m kaugusel, on tema tugevus IV valemi põhjal $J_1 = ER_1^2$ küünalt; kui samasuur pinnavalgustuse tugevus E tuleb teiselt allikalt R_2 m kauguselt, on tema tugevus $J_2 = ER_2^2$ küünalt. Võrreldes allika tugevusi, saame:

$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{E \cdot R_2^2}{E \cdot R_1^2}, \quad \frac{J_2}{J_1} = \frac{R_2^2}{R_1^2}$$

Kui kaks valgusallikat valgustavad mingit pinda ühe ja sama tugevusega, siis on nende valgusallikate tugevused võrreldised nende kauguste ruutudega sellest pinnast.

Siit järeleb, et valgusallikate tugevuse võrdlemiseks on vaja neid nii paigutada, et nad valgustaksid mingit pinda ühetugevuselt.

Ühe allika tugevuse mõõtmiseks peab teise tugevus teada olema (vastasel korral tuleb teise tugevust pidada ühikuks).

Mõõteriista, millega määratakse valgusallika tugevust, nimetatakse fotomeetriks ¹.

¹ Kreeka keeles *foss* — valgus, *metreo* — mõõdan.

15. Fotomeeter.

Tarvitatavamaid fotomeetri tüüpe on parafiinplaatidega fotomeeter (Jolly). See koosneb ekraanist, mille keskel on täisnurkse väljalõikega ava (joon. 18).

Ava taha pannakse tihedalt kõrvuti kaks ühesugust parafiinplaati, mis on õhukese stanniollehekese teineteisest eraldatud. Plaadid katavad ava täielikult kinni, nende eralduspind on ava keskel. Fotomeeter asetatakse mõõtjoontega varustatud joonlauale; sellele on fotomeetrist mõlemale poole asetatud parafiinplaatide kõrgusele ka võrreldavad valgusallikad. Siis langeb ühele plaadile valgus ainult ühest allikast ja teisele teisest. Liigutades allikaid mööda joonlauda, võib tabada asendi, mil mõlemad plaadid on valgustatud ühetugevuselt. Kui see on saavutatud, mõõdetakse allikate kaugused eralduspinnast. Valgusallikate tugevusi J_1 ja J_2 võib seejärgi võrrelda eelmise (14) peatüki andmetel ja kui $J_1 = 1$ küünlaga, siis arvutada J_2 küünaldes:

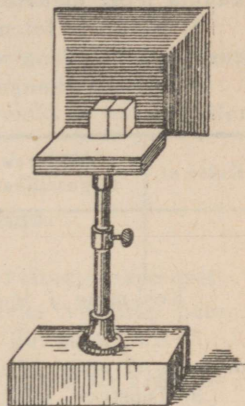
$$\frac{J_2}{J_1} = \frac{R_2^2}{R_1^2}; \quad J_2 = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2 \text{ küünalt.}$$

16. Laboratoorne töö nr. 2.

Kahe valgusallika tugevuse võrdlemine.

Riistad: 1) fotomeeter; 2) mõõtelint või mõõtjoontega joonlaud; 3) kaks liikutavat alust valgusallikaile; 4) steariinküünal, petrooleumilamp, mitmesuguse valgustugevusega elektrilampe.

Töö käik: 1) Asetage mõõtlauale fotomeeter, põlev küünal ja lamp nii, et fotomeeter on valgusallikate vahel.



Joon. 18. Jolly fotomeeter.

2) Nihutage fotomeetrit mõõtelindil seni, kuni mõlema plaadi valgustuse tugevus näib ühesugune.

3) Mõõtke kaugused R_1 ja R_2 fotomeetri keskelt valgusallikateni.

4) Arvutage lambi leegi tugevus $J = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$ küünaldes, pidades küünla leegi tugevust üheküünlaliseks.

5) Nihutage fotomeeter paigast ja otsige uuesti asend, kus valgustustugevused on võrdsed.

6) Mõõtke kaugused iga juhu kohta ja märkige andmed tabelisse:

Katse nr.	Mõõdetav valgusallikas	R_2	R_1	$J = \left(\frac{R_2}{R_1}\right)^2$	Allika paigutusviis

Keskmine J iga valgusallika kohta eraldi

7) Kui lamp oli seni fotomeetri poole leegi laiema küljega, pöörake ta nüüd kitsama küljega ja toimetage mõõtmisi uuesti.

8) Teostage mõõtmisi, asendades petrooleumlambi elektrilambiga vertikaal- ja horisontaalasendis.

9) Pange küünla leegi asemele mitmesuguseid elektrilampe ja võrrelge tulemusi eelmistega.

Harjutusi (5).

1. Üheküünlalise valgusallika kaugus fotomeetrist $R_1 = 10$ cm, uuritava allika kaugus $R_2 = 25$ cm. Kui tugev on viimane?

Vastus: 6,25 ühikut.

2. Viieküünlaline lamp kaugusel $R_1 = 16$ cm ja teine lamp kaugusel $R_2 = 60$ cm annavad ühesuuruse pinnavalgustuse. Leida teise tugevus.

Vastus: ≈ 70 küünalt.

3. Kui kõrgele tuleb riputada lauast 100-küünlaline lamp, et pinnavalgustuse tugevus oleks sama suur, kui 25 k. lambist 80 cm kaugusel?

Vastus: 1,6 m.

4. 32-küünlaline lamp ripub laua kohal 1,2 m kõrgusel; teine lamp annab sama suure pinnavalgustuse tugevuse 2 m kõrguselt. Määrata teise lambi tugevus.

Vastus: ≈ 90 küünalt.

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Kuidas mõõdetakse pinnavalgustuse tugevust?
2. Mis on pinnavalgustuse esimese seaduse sisuks?
3. Mis on pinnavalgustuse teise seaduse sisuks?
4. Mis on luks?
5. Kirjutage pinnavalgustuse tugevuse mõõtmise valem.
6. Mis on rahvusvaheline küünal?
7. Missugusele seosele on rajatud valgusallikate tugevuse võrdlemine?
8. Kuidas nimetatakse riista, millega võrreldakse valgusallikate tugevust, ja kuidas on ta ehitatud?

17. Valguskiirte käigu juhtimine.

Valguskiirte loomuliku käigu muutmist toimetatakse mitmesuguste vajaduste juures, kasutades selleks valguse peegeldumist ja murdumist.

Kiire teele pandud tasapeegel muudab kiirte sihti (Harjuti (1), ülesanded 4, 5, 6). Horisontaalsele kiirele 45° kaldenurga all ettesetatud peegel pöörab tema vertikaalseks.

Kus ei piirduta sihi muutmisega, vaid vajatakse sama valgusvoo juures pinnavalgustuse tugevuse muutust, kasutatakse selleks valguse peegeldumist sfäärilises (üldiselt kõveras) peeglis või valguse murdumist sfäärilises (üldiselt — kõverpindadega piiratud) klaasis või mõnes muus läbipaistvas aines.

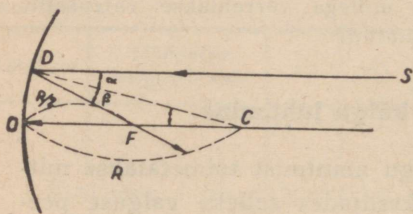
Füüsika algkursusest on juba tuttavad periskoobi ehitus, optiline signaliseerimine jms. Et uuendada teadmisi valgustehnika kasutamisest sõjaasjanduses, lugege V n u k o v i raamatust „Физика и оборона страны“, 1935. a., II osa küsimusi 49, 50, 53—57.

18. Sfäärilise peegli valem.

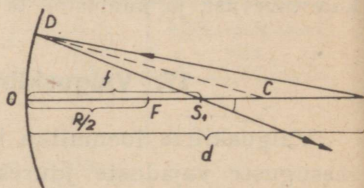
Sfääriliseks peegliks on harilikult õige suure raadiusega kera pinna osa. Kui peegli pinnaks on kera sisepind, siis nimetame teda nõguspeegliks; on aga peegli pinnaks välispind, siis on see kumerpeegel.

Peegli optiliseks peateljeks nimetame sirget, mis läbib peegli keskpunkti O ja kera tsentrit C .

Laseme langeda peegli pinnale peateljega paralleelse kiire SD (joon. 19) langemisnurgaga α ; see kiir peegeldub nurga β all, mis on α -ga võrdne. Kuna keral on iga raadius tema pinnaga risti, siis ka antud juhul on raadius CD ühtlasi langemispunkti D tõmmatud ristsirge. Nurgad α ja DCO on võrdsed kui põiknurgad paralleeljoonte SD ja CO vahel; sel-



Joon. 19. Sfäärilise nõguspeegli fookus F .



Joon. 20. Kaaspunktid sfäärilises nõguspeeglis.

lest järgneb, et $DF = FC$. Kui kiir SD on peateljele väga lähedal (tsentraalne kiirte kimp), siis eksime väga vähe, oletades, et $DF = OF$. Täheks F asub raadiuse keskel.

Samal viisil võib tõestada igasuguse peateljega paralleelse tsentraalkimbu kiire kohta, et peale peegeldumist ta lõikab peatelge raadiuse keskpunktis.

Siit saame järelduse: *optilise peateljega paralleelne kiirtekimp lõikab pärast peegeldumist nõguspeeglis peatelge ühes punktis, mida nimetatakse peafookuseks ja mis asub raadiuse keskpunktis.*

Peafookuse kaugust peegli keskpunktist OF märgitakse harilikult tähega F ja see on võrdne poole raadiusega:

$$F = \frac{R}{2}$$

Olgu valguspunkt S asukohaga peateljel, tema kiir SD (joon. 20), kujundades peegeldumisel langemisnurgaga võrdse peegeldusnurga, lõikab peatelge punktis S_1 .

Kolmnurga SDS_1 on joon CD nurgapoolitajaks ja seetõttu jagab vastaskülje lõikudeks, mis on võrdelised kolmnurga vastavate lähiskülgedega:

$$SC : CS_1 = SD : S_1D.$$

Kui kiir on peateljele väga lähedal, siis pole märgatavat valguse oletusel, et $SD = SO$ ja $S_1D = S_1O$.

Tähistame valguspunkti kauguse peeglist SO tähega d , kauguse S_1O — tähega f .

Siis $SC = d - R$; $CS_1 = R - f$ ja eelmine võrrand võtab kuju:

$$\frac{d - R}{R - f} = \frac{d}{f}$$

Järgnevate teisenduste otstarve on anda võrrandile hõlpsasti meelespeetav kuju.

$$df - Rf = Rd - df; \quad 2df = Rd + Rf;$$

$$\frac{2df}{Rdf} = \frac{Rd}{Rdf} + \frac{Rf}{Rdf}; \quad \frac{2}{R} = \frac{1}{f} + \frac{1}{d};$$

$$\boxed{\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}} \quad (V)$$

Kui samast punktist S langeb peeglisse mingi teine kiir, siis võib endisel viisil tuletada tema suhtes täpselt sama suguse võrduse. Kuna teise kiire suhtes on d ja F väärtused endised, siis ei muutu ka f väärtus.

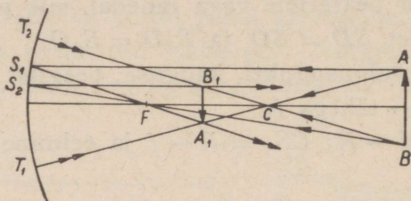
Sellest järeldame, et kiired, mis tulevad peeglisse väikese langemisnurga all ühest tsentrist kaugemal asuvast peatelje punktist, lõikuvad peale peegeldumist ühes punktis, mis asub peateljel tsentri ja fookuse vahel. Punkt S_1 on valguspunkti S kujutis. Kui valgusallikas asuks punktis S_1 , siis kiirte tagasipööratavuse tõttu tekib tema kujutis punktis S . Seepärast nimetatakse neid punkte ka a s p u n k t i d e k s.

Eeltoodud võrrand (V) on nõguspeegli valem.

¹ Seda valemit analüüsitakse samuti kui läätse valemit (§ 23).

19. Kujutise ehitamine sfäärilises peeglis.

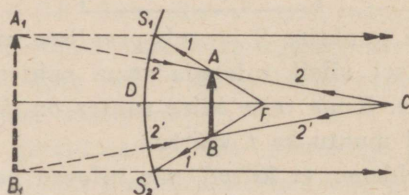
Eseme kujutise ehitamiseks tuleb ehitada tema üksikute punktide kujutisi. Punkti kujutise saamiseks jätkub sellest, kui leiame punktist väljunud kahe kiire sihid pärast peegel-



Joon. 21. Kujutise ehitamine sfäärilises nõguspeeglis, kui ese on tsentrist kaugemal.

dumist. Kõige lihtsam on joonestada kolme allnimetatud kiire käiku:

1) kui langev kiir on peateljega paralleelne, läheb peegeldunud kiir läbi peafookuse; 2) kui langev kiir läbib peafookuse, läheb peegeldunud kiir rööbiti peateljega; 3) läbib

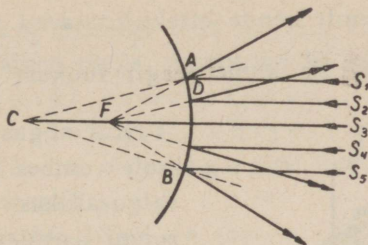


Joon. 22. Kujutise ehitamine sfäärilises nõguspeeglis, kui ese on lähemal kui fookus.

langev kiir peegli kõverustsentri, peegeldub ta samal joonel tagasi.

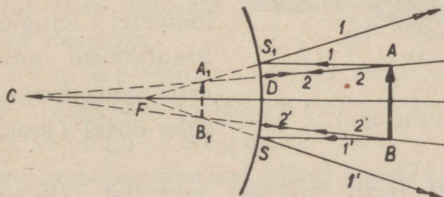
Punkti kujutise saamiseks jätkub kahest kiirest loeteldud kolme hulga. Joonisel 21 on näidatud kiirte käik joonlõigu AB kujutise ehitamisel.

Punktist A väljuvaist kiirtest valime peateljega paralleelse kiire AS_1 ; see peegeldub joonel S_1F läbi peafookuse. Teise kiire võtame A -st läbi tsentri C ; ta langeb peeglisse punkti T_1 ja peegeldub tagasi samas sihis. Punkti A kujutis on punktis



Joon. 23. Sfäärilise kumerpeegli näilik fookus.

A_1 — mõlema peegeldunud kiire lõikepunktis. Samal viisil leiame punkti B kujutise. Valime ühe kiire B -st läbi peafookuse, see langeb peeglisse punktis S_2 ja peegeldub paralleelselt peateljega. Teisena võtame tsentraalkiire BT_2 , mis peegeldub vastassuunaliselt. Peegeldunud kiirte lõikepunktis B_1 on punkti B kujutis. Joonlõik A_1B_1 on AB kujutiseks.



Joon. 24. Kujutise ehitamine sfäärilises kumerpeeglis.

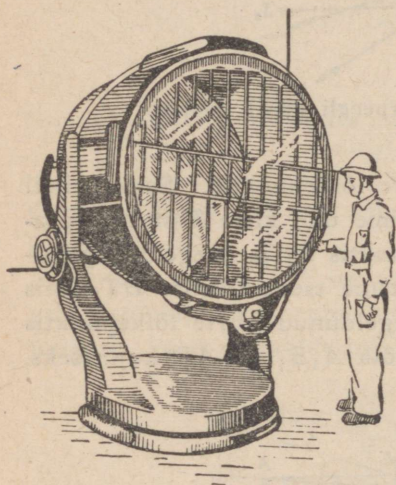
Seega: kui ese on tsentri taga, asub kujutis tsentri ja peafookuse vahel, on tõeline, ümberpööratud ja vähendatud.

Joonis 22 annab võimaluse jälgida kujutise tekkimist sel juhul, kui ese on peegli ja peafookuse vahel. Joonis 23 näi-

tab peateljega paralleelsete kiirte käiku sfäärilises kumerpeeglis; joonis 24 näitab kujutise ehituskäiku kumerpeeglis.

Kõigil viimastel juhtudel (joon. 22—24) ühest punktist väljunud kiired peale peegeldumist enam ei löiku. Joonisel võivad lõikuda ainult nende ettekujutatavad pikendused.

Saadud kujutisi ja kumerpeegli fookust tuleb seepärast pidada näilikeks.



Joon. 25. Prožektor.

Kui nõguspeegli fookuses asub umbes 1000-küünlane valgusallikas, saadab peegel ruumi paralleelkiirte kimbu, mille valgustuse tugevus tema teele asetatud pinnal kahaneb kaugenemisel väga aeglaselt. Kahanemine on seletatav õhu puuduliku läbipaistvusega. Seda riista nimetatakse helgiheitjaks (prožektor). Ta annab märkimisväärse valgustugevuse isegi mitme kilomeetri kaugusel ja teda kasutatakse sõjas vaenlase, eriti tema lennukite otsimiseks öösel (joon. 25).

Kõverpeegel leiab laialdast tehnilist rakendamist. Peatume siin kõverpeegli kasutamisel päikesemootoris, mis muudab päikese energia mehaaniliseks energiaks.

Nõukogude Liidus on Taškendi lähedal ja mitmes kohas mujal püstitatud ehitisi, mis koosnevad paljudest poleeritud plaatidest. Ehitise laiulatuslikule kogupinnale langenud kiired peegelduvad ja koonduvad veega täidetud torule

ehitise keskel. Koondatud päikese energia paneb vee keema ja sellest saadav aur läheb aurumasinasse.

Kirjandus. Орлов, В., Разящие лучи (jutustusi prožektoritest).

20. Sfäärilised klaasid.

Nii nagu prisma muudab teda läbivate kiirte sihti, kallutades neid oma aluse poole, muudavad ka sfäärilised klaasid kiirte käiku. Klaasi nimetatakse sfääriliseks, kui ta on mõlemast küljest piiratud lihvitud kerapinna osadega (või ühelt poolt kera osa, teiselt — tasapinnaga).

Sfääriliste klaaside liigid on toodud joonisel 26, esimene neist on kaksikkumer, neljas on kaksiknõgus; sfäärilisi klaase tuntakse ka läätsede nime all.¹

Sirget, mis läheb läbi läätses kõverustsentrite, nimetatakse läätses optiliseks peateljeks.

Igas läätses on üks punkt, millest läbiminevad kiired väljuvad läätsesest oma algsihti muutmata. See punkt asub optilisel peateljel ja teda nimetatakse läätses optiliseks tsentriks.

Optiliseks kõrvalteljeks on iga sirge, mis läbib optilist tsentrit, kujundades peateljega mingi nurga.

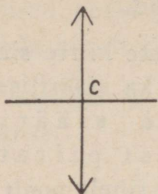
Joonistel kujutatakse õhukesi läätsi sageli optilisest tsentrist läbitõmmatud sirglõikudena, kusjuures kumeraid märgitakse nii, nagu on näidatud joonisel 27a ja nõgusaid nii nagu joonisel 27b.

¹ Üldiselt nimetatakse optiliseks läätses läbipaistvat keha, mis on piiratud kahe korrapärase pinnaga (enamasti sfääriliselega), mille ülesandeks on muuta neist läbimineva kiirte kimbu koonduvust.

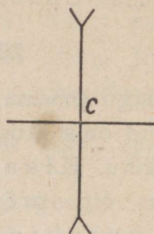


Joon. 26. Sfääriliste klaaside liigid.

Kõik kiired, mis langevad kumerläätsle paralleelselt peateljega, koonduvad pärast murdumist ühte punkti peateljel.

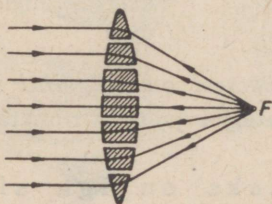


Joon. 27a. Kumerläätsse skemaatiline märkimine.

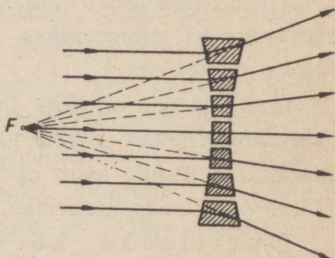


Joon. 27b. Nõgusläätsse skemaatiline märkimine.

Seda punkti peateljel, kuhu kumerlääts koondab kõiki peateljega paralleelseid kiiri, nimetatakse läätsse peafookuseks (joon. 28a).



Joon. 28a. Kumerläätsse peafookus F .



Joon. 28b. Nõgusläätsse peafookus F (näilik).

Kui korraldada samasugune katse nõgusläätssega, siis peateljega paralleelselt langenud kiired väljuvad läätsesest hajuva kimbuna. Katse näitab, et kiired hajuvad nii, nagu väljuksid nad kõik ühest punktist, mis on nende sihtide pikenduste lõikepunktiks.

Seda punkti nõgusläätsse peateljel, kus lõikuvad nende murdunud kiirte pikendused, mis langevad läätsle paral-

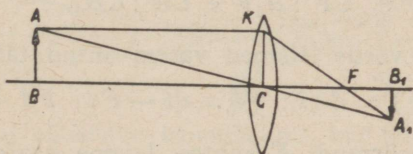
leelselt peateljega, nimetatakse nõgusläätsse näilikuks peafookuseks (joon. 28b).

Nagu joonistest nähtub, võib kumerläätsse võrrelda prismade koguga, millede alused on pööratud peateljele; kuna prismad kallutavad kiiri aluse poole, siis koonduvad kiired keskele. Nõgusläätsse võib võrrelda prismade koguga, millede alused on peateljest ära pööratud; neid prismasid läbides kalduvad kiired samuti aluste, s. o. läätsse äärte poole.

Igal läätsel on kaks fookust, mis asuvad teine teisel pool läätsse.

21. Läätsse valem.

Eseme kujutise ehitamiseks tuleb ehitada tema üksikute punktide kujutisi. Punkti kujutise määramiseks piisab kahe kiire langemise ja murdumise sihtide väljajoonestamisest.



Joon. 29. Läätsse valemi tuletamise juurde.

Need kaks kiirt valitakse harilikult kolme kiire hulgast, millede murdumise sihi joonestamiseks pole tarvis nurkade mõõtmist ega arvutusi trigonomeetriliste tabelite abil: 1) kui kiir langeb paralleelselt optilise peateljega, siis murdub tema läbi peafookuse; kui kiir langeb läbi peafookuse, murdub tema paralleelselt optilise peateljega; 2) kui kiir läbib optilist tsentrit, väljub tema läätsesest sihti muutmata.

Läätsse valemi tuletamiseks kujutleme (joon. 29) punkti A kusagil läätsesest vasakul, pealpool peateljega. Peateljel mõõdame punkti A kauguse läätsesest (optilisest tsentrist) ja tähistame d -ga ($CB = d$).

Tõmmanud punktist A kaks langevat kiirt, ühe paralleelselt peateljega ja teise mööda optilist kõrvaltelge, saame A kujutise punktis A_1 , kus need kaks kiirt peale läätsest läbiminekut lõikuvad. Märgime kujutispunkti A_1 kauguse läätsest peateljel tähega f ($CB_1 = f$). Et peafookuse kaugust läätsest CF tähistatakse F -ga ($CF = F$), siis $B_1F = f - F$.

Kolmnurkade ACB ja A_1CB_1 sarnasusest järeldame, et

$$AB : A_1B_1 = CB : CB_1.$$

Kolmnurkade A_1FB_1 ja CFK sarnasusest järgneb:

$$KC : A_1B_1 = CF : B_1F.$$

Et joonlõik $KC = AB$ (risküliku $CKAB$ vastasküljed), siis on mõlema võrduse vasakud pooled võrdsed ja sellest järeldame, et ka paremad pooled peavad olema võrdsed:

$$CF : B_1F = CB : CB_1.$$

Asendades võrde liikmed varem antud tähistega, saame:

$$F : (f - F) = d : f; Ff = df - Fd; Fd + Ff = df.$$

Ilmutades võrrandi F suhtes, leiame peafookuse kauguse läätsest:

$$F = \frac{df}{d+f}.$$

Kui eelviimases võrrandis jagada kõiki liikmeid korrutisega dfF , saame läätse valemi:

$$\boxed{\frac{1}{d} + \frac{1}{f} = \frac{1}{F}} \quad (\text{VI})$$

Valemi (VI) sõnastus:

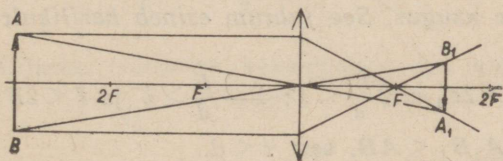
Kaaspunktide kauguste pöördarvude summa läätse optilisest tsestrist võrdub peafookuse kauguse pöördarvuga.

Valguspunkti A ja tema kujutist A_1 nimetatakse kaaspunktideks. Kui paigutada valguspunkt punkti A_1 , saame kujutise punktis A . Selles võib veenduda joonise 29 vaatlusel, seda võis eeldada kiire tagasipööratavuse seaduse põhjal murdumise juures (§ 5) ja seda on näha ka läätse valemist, milles d ja f asetsevad ühesuguselt. Sellepärast nimetatakse valguspunkti A ja tema kujutist A_1 kaaspunktideks. Eeltoodud võrrandit nimetatakse kumerläätsse valemiks.

22. Kujutise suurendus.

Kui oletada, et joonlõik AB joonisel 29 on ese, siis on joonlõik A_1B_1 tema kujutis.

Kujutise suurenduseks nimetatakse kujutise joonsuuruse suhet eseme joonsuurusega.



Joon. 30. Kujutise ehitamine kumerläätses, kui ese on kaugemal kui fookuse kahekordne kaugus.

Eelmise § esimesest võrdusest nähtub, et suurendus

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{f}{d}$$

Läätsse suurendus võrdub optilisest tsentrist mõõdetud kujutise kauguse ja eseme kauguse suhtega.

23. Kujutis läätses eseme mitmesuguste kauguste puhul.

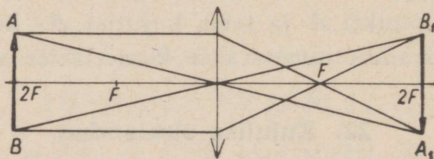
Kujutise asukoht ja suurus leitakse kas joonestamise teel või arvutustega läätse valemi (VI) abil, millest

$$f = \frac{Fd}{d-F} \quad \text{või} \quad f = \frac{f}{1 - \frac{F}{d}}$$

Esimene juhtum. Ese asub peateljel määratud kaugusel („lõpmatutes“).

Kui $d = \infty$, siis $\frac{F}{d} = 0$ ja $f = F$.

Sellisel esemelt tulevad kiired paralleelselt peateljega ja koonduvad peafookusesse.



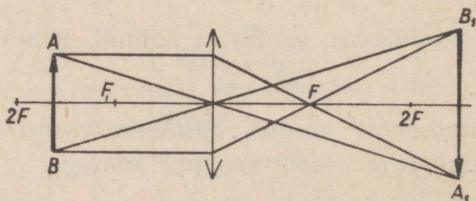
Joon. 31. Kujutise ehitamine kumerläätses, kui ese asub peafookuse kahekordsel kaugusel.

Teine juhtum. Ese on kaugemal kui peafookuse kahekordne kaugus. See juhtum esineb harilikult fotograferimisel.

Kui $d > 2F$, siis $\frac{F}{d} < \frac{1}{2}$; $1 - \frac{F}{d} > \frac{1}{2}$ ja $f < 2F$;

$A_1B_1 < AB$, sest $f < d$.

Vastava kujutise ehitust käsitleb joonis 30.



Joon. 32. Kujutise ehitamine kumerläätses, kui ese on kaugemal kui fookus ja lähemal kui kahekordne fookuse kaugus.

Kui ese asub fookuse kahekordsest kaugusest kaugemal, on tema kujutis tõeline, ümberpööratud, vähendatud ja asub peafookuse ja fookuse kahekordse kauguse vahel.

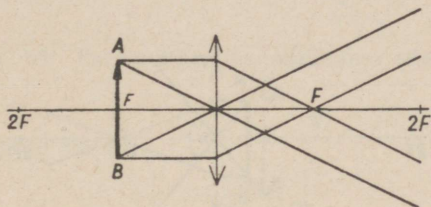
Kolmas juhtum. Ese asub täpselt peafookuse kahekordsel kaugusel.

$$\text{Kui } d = 2F, \text{ siis } \frac{F}{d} = \frac{1}{2}; 1 - \frac{F}{d} = \frac{1}{2}; f = 2F;$$

$$A_1B_1 = AB, \text{ sest } d = f.$$

Kujutise ehitust käsitleb joonis 31.

Kui ese asub fookuse kahekordsel kaugusel, on kujutis tõeline, ümberpööratud, sama suur kui ese ja asub ka fookuse kahekordse kaugusel.



Joon. 33. Kujutise ehitamine kumerläätses, kui ese asub peafookuses.

Neljas juhtum. Ese asub fookuse ja fookuse kahekordse kauguse vahel. See juhtum esineb projektsiooni-aparaadiga projitseerimisel.

$$\text{Kui } F < d < 2F, \text{ siis } \frac{F}{d} > \frac{1}{2}; 1 - \frac{F}{d} < \frac{1}{2}; f > 2F;$$

$$A_1B_1 > AB, \text{ sest } f > d.$$

Vastav juhtum on kujutatud joonisel 32.

Kui ese asub kahekordse fookuse kauguse ja fookuse vahel, on kujutis tõeline, ümberpööratud, suurendatud ja asub kaugemal kui fookuse kahekordne kaugus.

Viies juhtum. Ese asub peafookuses.

$$\text{Kui } d = F, \text{ siis } \frac{F}{d} = 1; 1 - \frac{F}{d} = 0; f = \infty,$$

s. t. f on suurem igast mistahes suurest arvust. Nagu näha kiirte käigust joonisel 33, on mõlemad kiired, mis peaksid

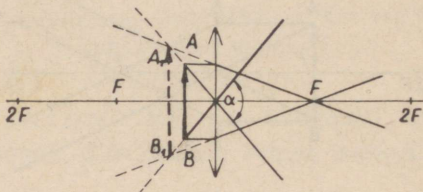
lõikudes andma punkti kujutise, paralleelsed ja ei lõiku (matemaatikas öeldakse, et nad lõikuvad lõpmatuses).

Kui ese asub peafookuses, siis kujutist ei ole (kaugeneb lõpmatusse).

K u u e s j u h t u m. Ese asub peafookuse ja läätse vahel.

Kui $d < F$, siis $\frac{F}{d} > 1$; $1 - \frac{F}{d}$ on negatiivne, s. t. f on suunatud läätsest samale poole, kus on ese.

Kiirte käik selle juhu kujutise ehitamisel on toodud joonisel 34.

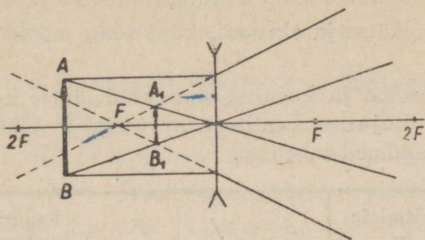


Joon. 34. Kujutise ehitamine kumerläätses, kui ese asub lähemal kui peafookus.

Kui ese on läätse ja peafookuse vahel, on kujutis näilik, päripidine ja suurendatud. Kujutis väheneb eseme lähenedes läätsele ja peaks olema läätse juures sama suur kui ese.

K o k k u v õ t e. Kui ese läheneb lõpmatuses fookuse kahekordse kauguseni, nihkub tema kujutis palju väiksema kiirusega peafookusest fookuse kahekordse kauguseni teisel pool läätse; kujutise mõõted kasvavad nihkumisel kuni objekti mõõdeteni. Eseme jätkuval lähenemisel fookuse kahekordsest kaugusest fookuseni nihkub kujutis fookuse kahekordse kauguse taha, eemaldudes läätsest järjest kasvava kiirusega, mis on suurem kui eseme kiirus. Eseme nihkumisel peafookusest läätsele lähemale, ilmub kujutis esemega ühel pool, on näilik, päripidine, suurendatud ja liigub eseme järel suurema kiirusega kui ese ise.

Kujutise ehituskäiku nõgusläätses näitab joonis 35. Kujutis nõgusläätses on alati näilik, päripidine ja vähen-
datud.



Joon. 35. Eseme kujutise ehitamine nõgusläätses.

Nõgusläätsse valem:

$$\frac{1}{f} - \frac{1}{d} = \frac{1}{F}$$

Lõpetades seega kiirte käigu uurimise tasapinnalistes ja sfäärilistes peeglites, prismades ja läätsedes, näeme kokkuvõttes, et inimkond õppis juhtima nende abil valguskiirte käiku.

Seda oskust kasutatakse igasuguste optiliste aparaatide ehitamiseks ja paralleelsete ning nõrgalt hajuvate kiirte kimpude saamiseks autolaternais, tuletornides ja prožektorites, millel on suur tähtsus riigikaitses.

24. Laboratoorne töö nr. 3.

Läätsede omaduste katseline tundmaõppimine.

Vahendid: 1) kaks kumerlääts, neist üks suure fookuse kaugusega, teine väikese fookuse kaugusega, läätsede alused; 2) nõguslääts; 3) optiline pink või joonlaud mõõtudega või pikk riba millimeeterpaberit; 4) ekraan alusel; 5) ekraan noolekujulise väljalõikega; 6) valgusallikas.

Töö käik:

1. Asetage noolekujulise väljalõikega ekraan pingi, joonlaua või mõõdulindi otsale ja valgustage teda tagant valgusallikaga; paigutage samale mõõtelauale alused kumerläätsesega ja ekraaniga.

2. Nihutage läätses ja ekraani, kuni saate noole kujutise selgelt ekraanile.

3. Mõõtke eseme ja kujutise kaugused läätses keskpaignast (d ja f), märkige ära kujutise kvaliteet, arvutage F läätses valemi järgi ja kandke kõik andmed tabelisse.

Mõõtmiste nr.	d	f	F	Kujutise kvaliteet
1				
2				
3				
	keskmine			

4. Nihutades läätses ja ekraani, otsige kujutisele uusi asendeid 7—8 juhul; arvutage kõigi katsete F väärtuste keskmine.

5. Korraldage samasuguseid mõõtmisi teise läätsesega.

6. Kasutage neid arvutusi § 22 tulemuste kontrollimiseks. Püüdke tabada seisu, kus d võrdub ühe eelmise katse f -ga ja võrrelge, kui suur on sel korral f .

7. Suunake läätses päikese poole, mõõtke päikese kiirte fookuse kaugust; pöörake läätses teine külg päikese poole ja korraldage mõõtmist; arvutage fookuse keskmine väärtus ja võrrelge seda varem saadud F väärtusega.

8. Asendage kumerläätses nõgusläätsesega ja püüdke saada kujutist sellega.

25. Läätses optiline jõud.

Läätses optiliste omaduste võrdlemisel kasutatakse fookuse kauguse F asemel selle pöördväärtust $\frac{1}{F}$, mida nimetatakse läätses optiliseks jõuks. Selle suuruse

kasutamine põhineb järgmisel kaalutlusel: mida suurem on peafookuse kaugus, seda väiksem on murd $\frac{1}{F}$ ja seda nõrgem on läätse murdmisvõime. Kui fookuse kaugus väheneb, siis murru $\frac{1}{F}$ väärtus kasvab ja murdumine suureneb. Seega iseloomustab murd $\frac{1}{F}$ otseselt läätse murdmisvõimet.

Läätse optilise jõu ühikuks on võetud *niisuguse läätse murdmisvõime, mille peafookuse kaugus on 1 m*; seda ühikut nimetatakse dioptriaks. Iga läätse optiline jõud võrdub ühega, jagatud fookuse kaugusega meetrites, kusjuures kumerläätses väljendub see positiivsete ja nõgusläätses — negatiivsete arvudega.

Kui näiteks $F = 20$ cm, siis optiline jõud on $\frac{1}{0,2} = 5$ dioptriad; kui optiline jõud on 2 dioptriad, siis $\frac{1}{F} = 2$; $F = \frac{1}{2}$ m = 50 cm.

Optilistes aparaatides kasutatavaid läätsi iseloomustatakse veel ühe suurusega, mida nimetatakse läätse valgusjõuks. Nii sõltub fotoaparaadi läätse kvaliteet tunduvalt sellest valgustuse tugevusest, mida lääts on suuteline andma fotoplaadi pinnal. Kiirte hulk, mis tekitab pinnavalgustuse tugevuse, on aga seda suurem, mida suurem on läätse ava (diameeter) ja mida rohkem murduvad kiired, s. t. mida väiksem on fookuse kaugus. Sellepärast *mõõdetakse läätse valgusjõudu tema diameetri ja fookuse kauguse suhtega.*

Harjutusi (6).

1. Mitu dioptriad on niisuguse kumerläätsel optiline jõud, mille $F = 16$ cm? 7,5 cm? 1,5 m? nõgusläätsel, mille $F = 1$ m? 60 cm? 2 m?
2. Arvutage läätsede peafookuse kaugus F , kui nende optiline jõud on dioptriatel $+13\frac{1}{3}$; $-16,2$; $+2$; $-0,5$; $+0,75$; $+0,4$.
3. Miks kujutise suurenemisel tema pinnavalgustuse tugevus kahaneb?

4. Mitu korda on kujutise valgustuse tugevus ekraanil väiksem kui diapositiivi valgustuse tugevus, kui kujutise joonmõõted on diapositiivi mõõdetest 4 korda suuremad (eeldame, et kõik diapositiivi valgustavad kiired satuvad ekraanile).

5. Määrata kumerläätse peafookuse kaugus, kui eseme kaugus läätsest $d = 24$ cm ja kujutise kaugus $f = 40$ cm.

6. Leida kumerläätse optiline jõud, kui $d = 25$ cm ja $f = 1$ m.
Vastus: 5 dioptriati.

7. Läätse peafookuse kaugus $F = 16$ cm, $d = 36$ cm. Leida f ja läätse suurendus.

Vastus: 28,8 cm.

8. Läätse optiline jõud on $16^{2/3}$ dioptriati, $d = 100$ cm. Leida f ja läätse suurendus.

Vastus: $\approx 6,4$ cm.

9. $F = 12$ cm, $d = 10$ cm. Leida f ja läätse suurendus.

Vastus: -60 cm.

10. Läätse optiline jõud on $13^{1/3}$ dioptriati. Kuhu asetada ese, et saada näilik kujutis 25 cm kaugusel?

Vastus: $\approx 5,8$ cm.

11. Nõgusläätse peafookuse kaugus on 10 cm, $d = 12$ cm. Leida f .

Vastus: $-5,5$ cm.

12. Läätse optiline jõud on 4 dioptriati, $d = 20$ cm. Leida f .

Vastus: -1 m.

13. Harjutuste nr. 7–10 ja 12 andmetel joonestada kujutis, võttes esemeks peateljega perpendikulaarse joonlõigu.

26. Projektsiooniaparaat.

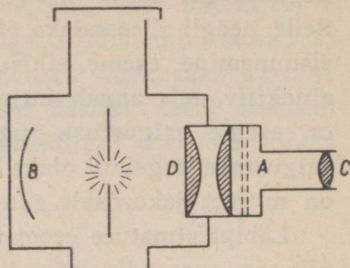
Läätsi kasutatakse projektsiooniaparaadis.

Projektsiooniaparaadi ülesandeks on anda ekraanil pildi või eseme tõelist ja suurendatud kujutist. See kujutis peab olema küllalt suur selleks, et olla nähtav paljudele inimestele ühtaegu, tähendab, peab olema nähtav ka võrdlemisi kaugelt.

Joonisel 36 on antud aparaadi skeem, joonisel 37 on aparaadi üldkuju; joonis 32 näitas kiirte käiku aparaadis.

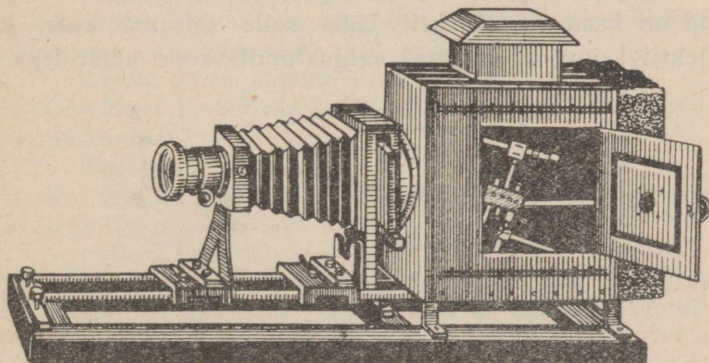
Aparaadi tähtsaim osa on objektiiv C ; see on kumerlääts, mille kaudu tekib kujutis. Et kujutis oleks tõeline

ja suurendatud, peab ese objektiivi suhtes asetsema fookusest kaugemal, kuid fookuse kahekordsest kaugusest lähemal. Kujutis peab olema tugevasti suurendatud; kui joonmõõted suurenevad näiteks 20-kordselt, siis pind suureneb $20^2 = 400$ korda ja vastavalt sellele kahaneb kujutise valgustuse tugevus 400-kordselt. Et kujutis oleks ka tugeva suurenduse juures hästi nähtav, peab projitseeritava eseme valgustuse tugevust kõigiti tõstma. Selles ongi kõigi ülejäänud aparaadiosade ülesanne.



Joon. 36. Projektsiooniaparaadi skeem.

Iga valgusallikas saadab kiiri kõigis suundades ja eseme valgustamiseks kulub neist ainult väike osa, kuna ülejäänud



Joon. 37. Projektsiooniaparaadi üldkuju

Ex Bibl. univ. Ta

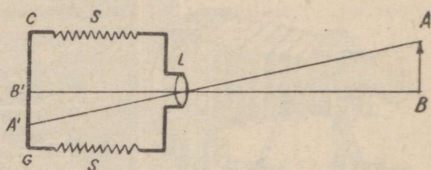
kiired hajuvad kasutult. Et hajuvat energiat osaliselt ära kasutada, pannakse valgusallika ja eseme vahele kumerläätsede kogu — „kondensor“, mis juhhib kiiri esemele koonduva kimbuna.

Kondensori — kiirte tihendaja — ehitus on kujutatud joonisel 36, D. Mõnikord paigutatakse aparadi tagaseina nõguspeegel selliselt, et valgusallikas oleks tema tsentris. Selle peegli ülesandeks on tagaseinale langevate kiirte tagasisuunamine eseme sihis. Nii siis on aparadi peaosaks objektiiv, mis annab kujutise; kõigi teiste osade otstarve on eseme valgustuse tugevuse suurendamine, et kujutise valgustuse tugevus oleks küllaldane ka siis, kui tema pind on mitmesajakordselt suurenenud.

Läbipaistmatute esemete kujutise projitseerimiseks ekraanile on aparadis mõned osad teisiti asetatud. Seda tüüpi aparaat on tuntud epidiaskoobi nime all.

27. Fotoaparaat.

Fotoaparaadiga toimetatakse päevapildistamist. Tema põhi-osad on kaamera, objektiiv-lääts selle esiseina avas, katik objektiivi juures, kassetid valgustundlikkude plaatidega.



Joon. 38.

Kujutis on harilikult vähendatud ja ese asub seetõttu läätest kaugemal kui fookuse kahekordne kaugus. Joonis 38 kujutab aparadi skeemi, kiirte käik oli antud joonisel 30.

Päevapildistamise eel nihutatakse objektiivi seni, kuni tagaseina mattklaasil tekib selge kujutis. Nihutamine toimub kruvi abil; objektiiv on liikuv harilikult seetõttu, et kaamera valguskindlad külgsseinad on lõõtsakujulised. Kui ette-

valmistused on lõppenud — soovitatav kujutis on mattklaasil, asendatakse mattklaas täpselt kassetiga. See on valguskindel õhuke kastike valgustundliku plaadiga. Objektiiv poole pööratud kasseti esikülge avatakse ainult siis, kui objektiiv on kinni kaetud mütsikesega või katikuga. Pildistamine seisab selles, et ettemääratud, valgustustugevusest olenevaks ajavahe- mikuks kate kõrvaldatakse (mütsike käsitsi, katik mehaaniliselt), ja eseme kujutis langeb plaadile. Ülesvõtte lõpetatud, suletakse kasseti esikülge.

Harjutusi (7).

1. Projektsiooniaparaadi objektiiv $F = 15$ cm, objektiiv kaugus ekraanist $f = 1,6$ m; leida eseme kaugus (d) objektiivist ja kujutise suurendus.

Vastus: $d = 16,5$ cm, suurendus ligikaudu 10-kordne.

2. Objektiiv $F = 18$ cm, eseme kaugus objektiivist $d = 20$ cm. Leida ekraani kaugus ja kujutise suurendus.

Vastused: $f = 1,8$ m; 9-kordne.

3. Objektiiv $f = 30$ cm, kujutise $d = 8,65$ m. Kuhupoole nihutada eset, et kujutis oleks 12,25 m kaugusel?

Vastus: 0,3 cm objektiivile lähemale.

4. Objektiiv $F = 40$ cm. Leida eseme kaugus, kui joonsuurendus on 20-kordne.

Vastus: 42 cm.

5. Kui suur on objektiiv F , et 18 cm kaugusel asuvast esemest saaks 10-kordse suurendusega kujutise.

Vastus: 16,4 cm.

6. Projektsiooniaparaadi läätse $F = 16$ cm. Kui kaugel peab olema diapositiiv läätsest, et kujutis langeks 2,16 m kaugusel olevale ekraanile? Missugune on kujutise suurendus?

Vastus: 17,5 cm.

7. Eelmises ülesandes pandi ekraan 1,6 m kaugusele. Kuhupoole ja kui palju tuleb nüüd nihutada diapositiivi läätse suhtes, et kujutis oleks selge?

Vastus: 0,5 cm.

8. Ohuluures pildistatakse 3000 m kõrguses maastikku mõõtkavas 1:5000. Kui suur on seejuures objektiiv F ?

Vastus: 60 cm.

28. Päevapildi saamise käik.

Valgustundliku plaadi valmistamiseks lahustatakse vees želatiini ja broomkaaliumi ning lisatakse lahusele punase valguse juures hõbenitraati; seejuures tekib broomhõbe, mis jaguneb želatiinis äärmiselt pihustatud emulsioonina. Selle järele soojendatakse emulsiooni, et suurendada tema valgustundlikkust.

Jahtumisel tahkunud emulsioon peenestatakse, pestakse läbi, et kõrvaldada igasuguste soolade jälgi; nüüd sulatatakse emulsioon soojendamise teel uuesti ja kaetakse saadud vedelikuga klaasplaadi pind.

Ilmutamine. Kui ülesvõte on tehtud, võetakse plaat kassetist pimedas või punase valguse juures välja ja pannakse ilmutit sisaldavasse vanni (ilmuteid on mitmesuguse keemilise koostisega). Ilmuti sees eraldub neis želatiinikihi osades, mis on saanud valgust, metalne hõbe peenima pulbrina; seejuures on eraldumise tihedus neis osades suurem, mis on saanud rohkem valgust, kusjuures eraldumise tihedus vastab vastavale pinnavalgustuse tugevusele.

Laialdaselt on tarvitusel metoolhüdriinon-ilmuti. Üks tema retsept: vett 1 liiter, metooli 5 g, naatriumsulfitit 100 g, hüdriinooni 7 g, potast (kaaliumkarbonaati) 100 g, kaaliumbromiidi 2,5 g. Kõik osad tulevad lahustada toodud järjekorras üksikult. Ilmutamisel lahjendatakse ilmutivedelik kolme kuni neljakordse veehulgaga.

Kinnitamine. Neis plaadi osades, mis pole valgust saanud, on veel broomhõbedat ja selle lagunemine võiks hiljem valguse käes jätkuda. Et seda vältida, tuleb kõrvaldada plaadilt kõik allesjäänud broomhõbe. Seda tehakse kinnitist, kuhu plaat pannakse pärast ilmutamist. Kinnitiks on harilikult naatriumhüposulfit (*natrium hüposulfurosum*), mis annab broomhõbedaga kergesti lahustuva ühendi, mis želatiinikihist veega välja pestakse. Kinnitist võetud plaadil on tumedad metalse hõbeda kihid eseme valgustatud osadel, kuna valgustamata osad on läbipaistvad. Lühidalt öeldud, eseme heledad osad kujunesid tumedateks ja tumedad heledateks. Seesuguse vastupidisuse tõttu esemega nimetatakse plaadil saadud kujutist negatiiviks (joon. 39).

Pesemine. Kinnitamisele järgneb plaadi põhjalik pesemine puhtas vees, et välja pesta igasugused ilmuti, kinniti

ja tekkinud soolade jäljed. Plaat kuivatatakse ja negatiiv on valmis.

Positiiv. Et saada pilti loomulikes heleduse varjundeis, asetatakse negatiivile tema emulsioonikihi vastu valgustundlik paber ja valgustatakse seda mõnda aega läbi negatiivi. Paberil tekib negatiivi suhtes negatiivne pilt, seega on temal valgus ja varjud samas vahekorras nagu pildistatud esemel. Saadud pilti nimetatakse positiiviks.



Negatiiv



Positiiv

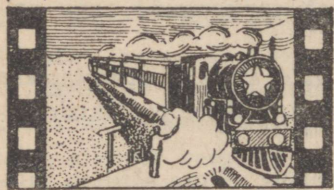
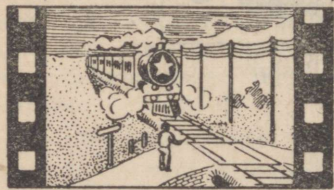
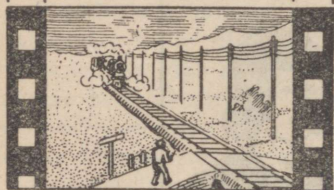
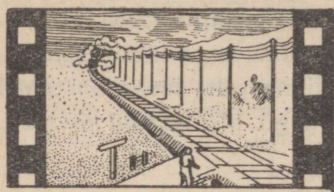
Joon. 39.

Valgustundliku paberi valmistamine ja tema läbitöötamine pärast valgustamist on üldiselt samasugune nagu valgustundliku plaadigi puhul.

Kui positiivi ei võeta paberile, vaid klaasile, nimetatakse teda diapositiiviks. Diapositiive kasutatakse projektsiooniaparaadis.

Fotografeerimise kultuuriline tähtsus. Foto säilitab tulevastele põlvedele mineviku kaduvaid mälestusi, jäädvustab isikuid ja sündmusi. Veel hinnatavam on foto tähtsus teaduses. Päikesevarjutused vältavad ainult mõne minuti, neid fotografeeritakse ja uuritakse hiljem pikemat aega. Pildil jäädvustatakse ka teisi haruldasi, vahel kordumatuidki loodusnähtusi.

Lenduril on võimatu teha ülelennatava maastiku mõõtmisi, kuid lennul tehtud fotod võimaldavad hiljem põhjalikult arvutada kõike vajalikku.



Joon. 40. Filmiproov (vahepealsete väljalõigetega).

Fotografeerida võib ka esemeid, mida silm ei näe nende liiga nõrga kiirgamise tõttu. Fotoaparaat, mis on kinnitatud teleskoobi otsa, mida mehhanism paneb liikuma nii, et teleskoop on kogu öö suunatud ühte kohta taevalaotuses, võib fikseerida plaadile silmale nägematu taevakeha kujutise.

Palju võib tabada fotoplaadiga sellest, mis on meist eraldatud pika aja ja suure kaugusega, ja teha piiramatu paljunduse teel kättesaadavaks massidele igas paigas Maakeral.

29. Kino.

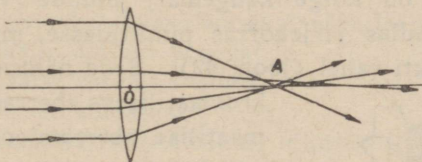
Kinoaparaat on erisugune projektsiooniaparaat, mille diapositiiviks on liikuv tselluloidlint, millel asuvad ülesvõtted (joon. 40). Läbipaistvale tselluloidlindile tehakse ülesvõtteid mingist sündmustikust, s. o. liikumiste reast, kusjuures võtete sageduseks on 24 võtet sekundis.

Kinoaparaadi mootor paneb lindi nii liikuma, et 24 korda sekundis toimub pildi vahetus ja iga pildi hetkeline peatus.

Selle juures kujuneb ka ekraanil igas sekundis vastav arv kujutisi. Et silmas vältab mulje ühest pildist kuni 0,1 sek., siis meie näeme kujutist ka siis, kui teda ekraanil enam pole; selle tõttu sulavad kujutised ühte tervikusse ja vaatleja näeb sündmustikku kõigi liikumistega, mis tegelikult toimusid ülesvõtete tegemisel. Selles on kinopiltide paremus, võrreldes hariliku diapositiivi ekraanikujutisega. Käesoleval ajal ei pildistata mitte ainult kujutisi, vaid ka heli (helikino).

30. Sfääriline aberratsioon.

Sfääriline klaas kogub ühte punkti ainult kitsa kimbu neid kiiri, mis langevad piki optilist telge. Mida kaugemal peateljest langeb kiir sfäärilisele klaasile, seda lähemal klaasile



Joon. 41. Sfääriline aberratsioon.

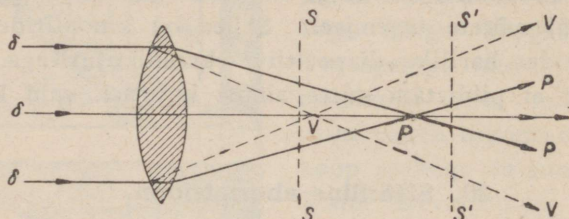
sile löikab ta seda telge pärast murdumist (joon. 41). Läätses murdunud kiirte optilise teljega löikumist mitmes punktis nimetatakse sfääriliseks aberratsiooniks.¹

Sfäärilise aberratsiooni tõttu annavad suure läbimõõduga kiirte kimbud segaseid kujutisi. Kui on vajalik saada selgepiirdelist kujutist kas või kujutise heleduse arvel, siis asetatakse objektiivi ette diafragma — läbipaistmatu ekraan ümmarguse avaga keskel, mis eraldab soovitava diameetriga kiirte kimbu.

¹ Sfääriline aberratsioon esineb ka nõguspeegli juures: peateljega paralleelsed äärkiired löikavad peatelge peale peegeldumist erinevates punktides, peafookuse ja peegli vahel.

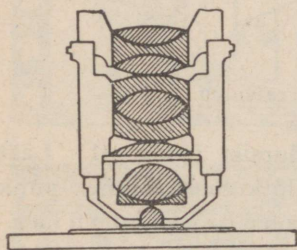
31. Kromaatileine aberratsioon.

Kui kimp peateljega paralleelseid valge valguse¹ kiiri läbistab lääts, siis violetseid kiired murduvad kõige enam ja koonduvad peateljel ühte punkti, mis on läätsel lähemal;



Joon. 42. Kromaatileine aberratsioon.

punased kiired murduvad kõigest teistest vähem ja nende koonduspunkt on kõige kaugemal; muude värvide kiired koonduvad kindlas järjekorras punktidesse, mis on violetse ja punase punkti vahel (joon. 42). Seda nähtust nimetatakse



Joon. 43. Mikroskoobi liitobjektiiv.

kromaatiliseks aberratsiooniks. Kromaatilise aberratsiooni tulemusena on kujutise äärosad vikerkaarevärvilised. Tõepoolest, kui asetada ekraan risti peateljega violetsest fookusest läätsel poole, siis kõik kiired, välja arvatud välised punased, segunevad ekraanil valgeks valguseks; kui lükata seesama ekraan punaste kiirte fookusest kaugemale, siis annavad violetseid

kiired välise värvilise rõnga. Kromaatileine aberratsioon on kujutise suureks puuduseks. Ta on välditav, kui kasutada

¹ Füüsika algkursusest on teada, et valgus on värvvalgustest koosnev liitvalgus, kusjuures eri värvusega kiirtel on ka erinevad murdumisnäitajad.

ühe lätse asemel erinevate murdumisnäitajatega koondavate ja hajutavate läätsede kogu, mille üksikud läätsed on valitud teistele vastavalt nii, et üks teise puudusi kõrvaldab. Seejärest ajakohaste optiliste riistade objektiivid ja okulaarid kujutavad endist väga keerulisi läätsede süsteeme (joon. 43).

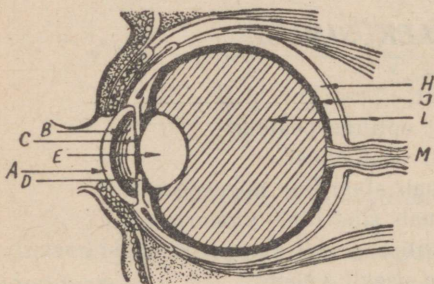
KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Mis on sfääriline peegel?
2. Mis on sfäärilise peegli optiline peatelg?
3. Mis on sfäärilise peegli peafookus?
4. Missuguse kujutise annab sfääriline nõguspeegel?
5. Missuguse kujutise annab sfääriline kumerpeegel?
6. Mida nimetatakse sfäärilise peegli kaaspunktideks?
7. Missugune on sfäärilise peegli valem?
8. Mida nimetatakse kumerläätses? nõgusläätses?
9. Mis on lätse optiline peatelg?
10. Mis on lätse optiline tšenter?
11. Mis on lätse kõrvaltalg?
12. Mis on kumerläätses peafookus? nõgusläätses peafookus?
13. Mis on peafookuse kaugus?
14. Missuguseid punkte nimetatakse lätse kaaspunktideks?
15. Missugune on kumerläätses valem? nõgusläätses valem?
16. Mitu kiirt on tarvis valguspunkti kujutise ehitamiseks läätses?
17. Missuguste kiirte abil on punkti kujutise ehitamine kõige lihtsam?
18. Ehitada kujutisi kumerläätses ja määrata kujutiste kvaliteet juhtude kohta: $d > 2F$; $d = 2F$; $F < d < 2F$; $d = F$; $d < F$.
19. Missugune on suurendus kõigil eelmise ülesande eri juhtudel?
20. Jälgida kujutise nihkumist ja suuruse muutust, kui eseme kaugus muutub $d = \infty$ kuni $d = 0$.
21. Missuguseid võtteid on olemas kumerläätses peafookuse kauguse määramiseks?
22. Millega mõõdetakse lätse optilist jõudu?
23. Mis on dioptria?

32. Silm kui optiline aparaat.

Igal loomorganismil on valguse vastuvõtmiseks eriorgan — silm. Inimese silma peaosadega tutvume joonisel 44.

Silma väline kate on kõhrjas läbipaistmatu silmavalge (*H*), tema esikülg



Joon. 44. Silmamuna vertikaalne lõige.

muutub kumeramaks ja läbinähtavaks sarvkestaks (*A*). Silmavalgest järgmine on soonkest (*J*), milles hargnevad silma toitvad peenikesed veresooned. Soonkest muutub silma esiküljel vikerkestaks (*D*), mis on igal inimesel isevärvi; vikerkesta on silmaava (*C*).

Vikerkesta taga asub kaksikkumer silmaläätis (*E*). Lätse ümber on lihased, mis teda üleval hoiavad ja vajaduse korral suruvad.

Ruum sarv- ja vikerkesta vahel on täidetud silmavedelikuga (*B*), lätsetagune silmakoobas on täidetud läbipaistva klaaskehaga (*L*).

Silma ja peaaju ühendab nägemiserk, mis tuleb silma tema tagaseinas, läbides kõiki kesti. Nägemiserk hargneb silmas kiudude koeks, mis katab silma kogu tagaseina ja nimetatakse võrkkestaks. Selles paigas, kus nägemiserk silma tuleb, puudub võrkkestal valgustundlikkus ja seda nimetatakse pimetähniks. Mitte kaugel sellest, meelekohta poole, asub võrkkesta kõige valgustundlikum osa — kollane tähn.

Silma peafookus on sarvkestast 13,75 mm kaugusel.¹

Silma optiline tsenter asub läätse sees tema tagapinna läheduses. Optilist tsentrit kollase tähni keskkohaga ühendavat sirget nimetatakse silma optiliseks teljeks ehk silma teljeks. Kuna silma peafookuse kaugus on väga lühike, siis ese asub silmast alati kaugemal kui fookuse kahekordne kaugus. *Silmavedeliku ja läätse, iseäranis viimase kumeruse tõttu koonduvad esemelt tulnud hajuvad kiired ja silmas tekib eseme tõeline, ümberpööratud, vähendatud kujutis asukohaga sisemise peafookuse ja fookuse kahekordse kauguse vahel. Ese on selgesti nähtav sel juhul, kui kujutis satub täpselt võrkkestale.*

Läätse omadusi selgitades leidsime eespool, et eseme liikumisel lõpmatuses fookuse kahekordse kauguseni, nihkub kujutis peafookusest fookuse kahekordse kauguseni. Silmanägemise selgus nõuab aga, et kujutis langeks igasuguselt kauguselt ikka ühte ja samasse paika — võrkkestale. See on teostatav silmas nii, et kogu optiline süsteem, läbipaistvate osade pinnakõverused ja seega ka peafookuse asupaik on muutuvad. Kui kujutis on näiteks parajasti võrkkestal, siis muutumatu optilise süsteemi juures peaks eseme lähenemisel kujutis nihkuma võrkkesta taha. Et seda kujutist endisesse paika tagasi tuua, on vaja fookuse kaugust lühendada, mis on teostatav silmaläätse pinnakumeruse suurendamisega. Läätse pinnakumerust muudavad temasse kinnitatud lihased. Kuni lihased on lõdvad, on läätse kumerus kõige väiksem. Lihaste igasugusel pingutusel lähevad üksteisele lihaste otsad, mis on kinnitatud läätse külge. Läätis lüheneb silma teljega ristsihis ja sellega ühenduses

¹ Sarvkesta, silmavedeliku ja klaaskeha murdumisnäitaja on spektri keskosa kohta (§ 56) 1,336; mitmest kihist koosneva silmaläätse murdumisnäitaja keskmine väärtus on 1,437.

läheb keskelt paksemaks, pinnakõverus kasvab ja peafookuse kaugus väheneb.

Kui eseme kaugus muutub, siis muutub meie teadvusest sõltumatult silma lihase pingutus, koos sellega muutub läätse kõverus, nii et kujutis satub ikka võrkkestale.

Silma omadust muuta läätse kõverust sel määral, et eseme kujutis langeks alati võrkkestale, nimetatakse akommodatsiooniks.

Silma kohanemisvõimel on oma piirid. Igal silmal on olemas kaugeim punkt, s. o. kaugus, mille juures ta näeb eset silmalihase tegevuseta olekus, ja niinimetatud lähim punkt, mille kaugusel ese on veel nähtav lihase suurima pingutusega. Ühte vahepealset kaugust nimetatakse parima nägemise kauguseks, mille juures silm näeb kõige rohkem detaile lihase kõige väiksema väsivuse juures.

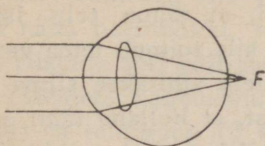
Arvestades kõigi eelnimetatud kauguste arvvärtusi, liigitatakse silmi kolme põhigruppi: normaalseteks, lühinägevateks ja kaugnägevateks.

33. Lühinägevus ja kaugnägevus.

Silmanägemist peetakse normaalseks, kui silmalihase tegevuseta olekus inimene selgelt näeb lõpmata kaugeid esemeid. Teiste sõnadega — silm murrab paralleelsed kiired võrkkestale. Kaugeim nähtav punkt asub lõpmatuses. Kui vaadelda eset, mis läheneb lõpmatuses, peab lihase pingutus pidevalt kasvama, et kujutis jääks ikka selgeks; lähima punkti kaugus on noores eas 10 cm ja parima nägemise kaugus — 25 cm.

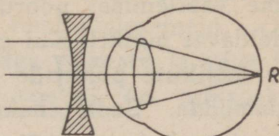
Lühinägev on see silm, mille peafookus on lihase tegevuseta olukorras võrkkestast seespool (joon. 45). Kaugemaid asju see silm selgesti ei näe, sest et silmalihase pingutus võib fookuse kaugust ainult lühendada.

Kaugeim punkt ei asu nüüd enam lõpmatuses, vaid kindlal, iga silma kohta erineval kaugusel. Parima nägemise kaugus ja lähima punkti kaugus on üldiselt ikka väiksemad



Joon. 45. Lühinägev silm.

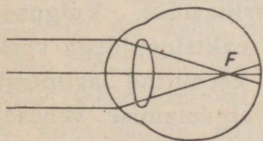
Kaugnägev



Joon. 46. Lühinägev silm prillidega.

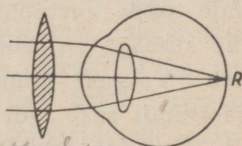
Kaugnägev

kui normaalsel silmal (sõltuvalt lühinägevuse astmest). Et saada kaugemate esemete kujutist võrkkestale, tuleb silmäläätsele lisada vastavalt valitud klaasist nõgusläätis (prillid, joon. 46) kiirte hajutamiseks.



Joon. 47. Kaugnägev silm.

Lühinägev



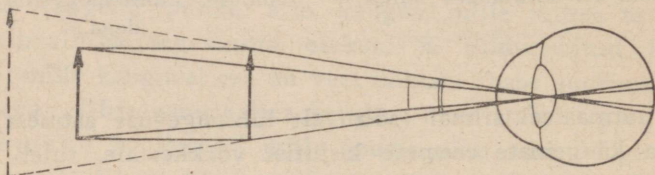
Joon. 48. Kaugnägev silm prillidega.

Lühinägev

Kaugnägev on silm, mille peafookus on lihase tegevuseta oleku juures silma võrkkesta taga (joon. 47). Kaugeimat punkti sellel silmal ei ole, lähim punkt on 30 cm läheduses; parima nägemise kaugus on suurem kui normaalsel silmal. Kaugnägev silm murrab kiiri vähem kui normaalne; et lihase tegevuseta olekus saada kujutist võrkkestale, tuleb lisada silmale vastava kõverusega kumerläätis kiirte koondamiseks (prillid, joon. 48).

34. Selge nägemise tingimused. Nägemisnurk.

Selge nägemise esimene tingimus: kujutis peab langema kollasele tähnile, kõige valgustundlikumale võrkkesta osale. Esemee vaatlemisel pöörduv silm nii, et silma telg läbiks vaadeldavat punkti. Kui ese on suur, siis toimub tema vaatlemine üksikute punktide viisi, milledele sihitakse silma telg kordamööda. Seda tehakse sellepärast, et kollane tähn, mida läbib silma telg, on kõige valgustundlikum koht silmas.



Joon. 49. Nägemisnurk.

Võrkkesta üksikosade erinev valgustundlikkus põhineb nende osade anotoomilise ehituse erinevusel. Valguse tajumine silmaga on seoses keemiliste reaktsioonidega võrkkesta aines. Valguse toimel tekib selles keemiline lagunemine ja algseisundi saab võrkkest tagasi valgustamise vaheaegadel, s. o. pimedas, verest saadavate toitainete abil.

Seepärast on teiseks selge nägemise tingimuseks, et *valgustugevus võrkkestal oleks küllaldane* vastava keemilise reaktsiooni tekkimiseks.

Kolmas parema nägemise tingimus: *eseme nägemisnurk ei või olla teatavast piirnergast väiksem. Nägemisnurk on nurk kahe sirge vahel, mis on tõmmatud silma optilisest tsentrist eseme äärtele* (joon. 49).

Kaks eseme punkti on eraldatavad, kui nende kujutiste kaugus kollasel tähnil pole väiksem kui 0,004 mm. Vastasel korral mõlemad kujutised sulavad üheks. Sellele kauguse piirile vastab üheminutiline nurk, mida nimetatakse nägemise

piirnurgaks. See on nurk, mille all nähtub 1 cm pikkune ese 34 m kaugusel. Eseme lähenemisel vaatenurk kasvab, kuni saabub lähima punkti kaugus; et see kaugus on lühinägitel väiksem, siis just lühinägijad võivad teistest paremini näha peentrukki, jooniseid ja teisi pisiesemeid. Optiliste riistade abil võib suurendada väga väikeste ja väga kaugete esemete nägemisnurka. Need riistad on mikroskoop (§ 44) ja teleskoop (§ 45).

Kuigi selgemini nähtav on see kujutis, mis langeb kollasele tähnile, on nähtavad ka esemed, mille kujutis langeb teistele võrkkesta osadele kollase tähni lähedal. Kui kõik nägemise võimalused kokku võtta, on silma vaatlusväli väiksem kui kaks täisnurka (ligi 150°).

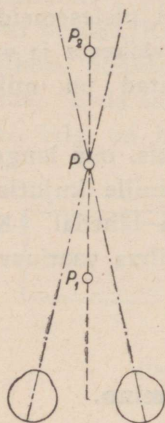
35. Kahe silmaga nägemine.

Eseme vaatlemisel tekib kujutis kummaski silmas. Kuigi neid kujutisi on kaks, näeme eset harilikult ühekordselt ainult sel juhul, kui mõlemad kujutised asuvad (telje suhtes) võrkkestade vastavates punktides. Ese, mille kujutised satuvad võrkkestade mittevastavatesse punktidesse, näivad kahekordsetena.

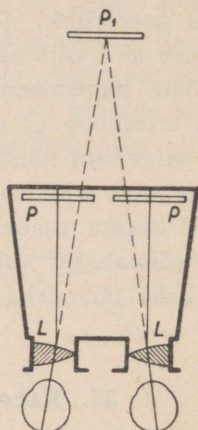
Selles võib veenduda katseliselt: vaadeldge kahte pliiatsit, kui üks on silmale lähemal, teine kaugemal. Kui vaadelda teravalt esimest pliiatsit, näib teine kahekordsena; kui vaadelda teravalt teist pliiatsit, siis näib esimene kahekordsena (joon. 50).

Eseme vaatlemisel saame kujutised kummaski silmas teineteisest veidi erinevatena, sest et kumbki silm on eri paigas. Sulgeme näiteks ühe silma ja seame teise ette kaks sõrme nii, et esimene varjaks teist. Kui nüüd, pea ja sõrmede asendit muutmata, avada esimene silm ja sulgeda teine, siis on mõlemad sõrmed nähtavad.

Vaadeldes mitmesuguses kauguses asuvaid asju kord ainult ühe, kord teise silmaga, on kerge märgata vahet nende suhtelises asetuses.



Joon. 50. Nägemine kahe silmaga. Kui vaadelda teravalt eset P , siis P_1 ja P_2 näivad kahekordsetena.



Joon. 51. Stereoskoobi skeem.

Ruumiline, reljeefne esemete tajumine on võimalik ainult siis, kui kujutised esemeist on kummaski silmas erisugused. Kui teha kaks päevapilti ühest asjast nii, et üks pilt näitab, kuidas nägi eset vasak silm ja teine pilt näitab, kuidas nägi parem silm, ja paigutada mõlemad pildid stereoskoopi, mis pöörab mõlemad kujutised ühte paika (joon. 51), siis kaks tasapinnalist kujutist sulavad vaateleja nägemises üheks ruumiliseks kujutiseks.

Vastupidi, kui kujutised muutuvad mõlemas silmas ühesugusteks, siis näib, nagu asuksid ruumis olevad esemed ühes tasapinnas, ühesugusel kaugusel. Sellepärast näeme iga kaugemal kui pool kilomeetrit asuvat maastikku sügavuseta tasa-

pinnana. See silma omadus takistab kaugemate esemete suhtelise kauguse hindamist. Sõjaasjanduses tarvitataivate kaugusmõõtjatega võib tutvuda V n u k o v i raamatus („Физика и оборона страны“, II osa, lk. 54 „Стереотрубы“).

36. Esemete suuruse ja kauguse hindamisest.

Eseme suuruse ja kauguse hindamine põhineb silmis saadud kujutistel ja nendel lihaste aistingutel, mis tekivad lihaste töötamisel, kui nad pööravad silmi või muudavad läätsede kõverust.

Hindamise täpsus paraneb kogemuste suurenedes.

Kui esemed on ühesugusel kaugusel, siis nende suhtelise suuruse üle otsustame lihaste aistingute põhjal, mida saame, suunates silma telge eseme mitmesugustele punktidele. Kui kaks ühesuurust eset on eri kaugustel, siis on otsustavaiks lihaste akommodatsiooni pingutused.

Vaadeldes mitmesuguseid esemeid erinevatel kaugustel, on otsustav tähtsus kahe silmaga nägemisel: kui vaatlust lähemalt esemelt kaugemale esemele üle kanda, tuleb selleks, et peateljed lõikuksid ühises vaatluspunktis, silmamuna erisuguselt pöörata. Erinevad pingutused, mida teevad seejuures lihased, on esemete suuruse ja kauguse hindamise aluseks.

37. Nägemismulje kestus.

Ärritus, mida tekitab võrkkestal temale langenud kujutis, jätkub ka siis, kui kujutist enam pole. Keskmise valgustus-tugevuse juures vältab ärritus võrkkestal, ja seega ka nägemismulje, ligi 0,1 sekundit, tugevama valgustuse juures kuni 1 sekund. Seda nägemise iseärasust silmame sageli: pimeduses kiiresti liikuv hõõguv süsi näib heleda joonena, jalgratta ratta kiirel pöörlemisel ei ole näha kodaraid, kõik sulab silmis üheks täispinnaks; kui vaadelda põleva elektrilambi

hõõgniiti, siis säilib silmis pilt ka peale silmade sulgemist või vaate ülekandmisel tumedale pinnale.

38. Silma väsivus.

Kui kujutis langeb pikemat aega ühele kohale võrkkestal, siis selle paiga valgustundlikkus tuimeneb. Pöörates silma vähemvalgustatud pinnale, näiteks valgele seinale, väsinud koht enam ei reageeri ja silm näeb valge seina kujutise heledal taustal eseme tumedat varju. Kui näiteks enne vaatlesime põlevat hõõglampi, näeme nüüd seinal sama lambi tumedat kujutist.

39. Värvide tajumine.

Helmholtzi teooria järgi on võrkkesta ergukiudude otsad kolmesugused: ühed on valgustundlikud ainult punastele kiirtele, teised ainult rohelistele, kolmandad — ainult violetsetele.

Kui silma satub ainult ühe eelnimetatud värvusega valgust, paneb see tegevusse vaid vastavat liiki kiudude otsi. Kui silma langeb mingisugune vahepealne kiir, ärritab tema kahesuguseid ergukiute otsi erisugusel määral. Nii ärritavad kõik värvid, mis asuvad spektris punase ja rohelise vahel, punasele ja rohelisele reageerivad ergukiute otsi, seejuures igal eri juhul erisugusel määral.

Kui silma satuvad liitvalguse kiired, reageerivad sellele üht-aegu kõik kolm liiki erguotsi, aga seejuures iga liik eri tugevusega, olenevalt liitvalguse koostisest.

40. Silma värvitundlikkus.

Silma värvitundlikkus on mitmesugune. Kõige tundlikum on silm kollase-rohelise piirkonna kiirtele; seevastu mõjuvad spektri äärosade kiired ligi 1000 korda nõrgemalt.

Sellepärast erineb objektiivselt mõõdetud (mõõteriistaga) valgusenergia jaotus spektris¹ subjektiivselt, palja silmaga hindamisest.

¹ Vt. § 52.

Kui võrrelda otsese vaatluse muljet samade asjade päevapildiga, on siingi suur erinevus tumedate ja heledate kohtade ja nende intensiivsuse jaotuses, sest fotoplaat on iseäranis tundlik sinistele ja violetsetele kiirtele; silmale aga tundub kõige heledam spektri keskosa.

41. Värviväsimum.

Kui võrkkestale mõjuvad ühe mingi värvusega kiired, kahaneb vastavas kesta osas valgustundlikkus selle värvi suhtes, tekib värviväsimum. Kui nii tuimenenud silma vaade juhtida nõrgemalt valgustatud valgele pinnale, siis võrkkesta väsinud osad ei reageeri valge valguse hulgest nendele kiirtele, mis väsimuse esile tõid, küll aga ärrituvad kõigist teistest valge valguse värvikiirtest. Seinal on siis näha varemolnud kujutis täiendusvärvuses.

42. Irradiatsioon.

Kui vaadelda heledalt valgustatud eset tumedal taustal, näib ta suurem, kui ta tegelikult on; nii näib noorkuu hele sirp olevat suurema raadiusega, kui ülejäänud kuu pind, mis on nõrka tuhkjat värvi; elektrilambi metallniit näib hõõguvas olekus jämedam kui külmalt; valge ruut mustal pinnal näib suurem kui must ruut valgel (joon. 52). Heledate esemete mõõdete näilikku suurenemist tumeda tausta arvel nimetatakse irradiatsiooniks.

Seletada võib irradiatsiooni sellega, et heledate kujutisosade ärritav mõju võrkkestale levib füsioloogiliselt ka kesta naaberosadele tumedamate osade piirkonnas.



Joon. 52. Irradiatsioon.

43. Optiliste riistade otstarve.

Kui inimene kasutaks vaatlemisel ainult silmi, oleks vaatluse piirkonnas olevate esemete hulk väga piiratud: kõik väikesed ja kõik kauged asjad, millede puhul nägemisnurk on piirnurgast väiksem, oleksid nägemiseks kättesaamatud.

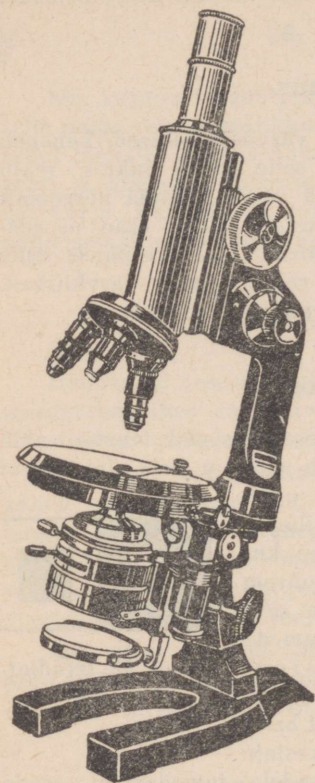
Inimene on osanud ära kasutada klaaside murdumis- ja pindade peegeldumisomadusi selleks, et ehitada optilisi riistu, millede ülesandeks on nägemisnurga suurendamine; sellega suureneb ka esemete hulk, mida saab vaadelda ja uurida.

Mikroskoop on optiline riist, mille läbi vaadeldakse lähedaid kaduvalt väikesi esemeid; teleskoop on riist suurte, kuid väga kaugel asuvate esemete vaatlemiseks.¹

Lihtsaimaks mikroskoobiks on harilik kumerlääts. Ese asetatakse peafookuse ja läätse vahele; nagu teada, on sel juhul kujutis näilik ja suurendatud. Kumerlääts nimetatakse sel juhtumil luubiks.

Kui luup asetada vaadeldava asja ette nii, et näilik kujutis tekib parima nägemise kaugusel d , mis on normaalsel silmal 25 cm, siis luubi suurendus võrdub $\frac{25}{F}$.

44. Mikroskoop.

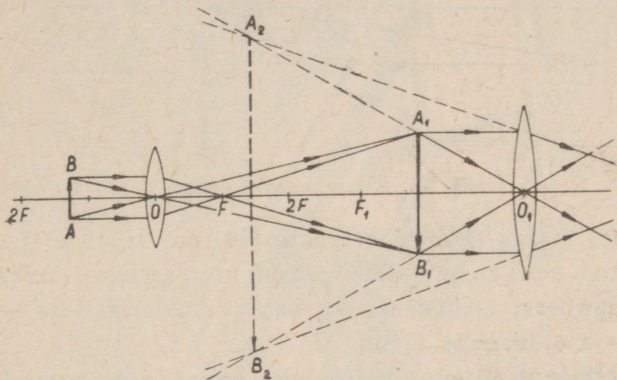


Joon. 53. Mikroskoop.

Mikroskoobi optiline süsteem koosneb kahest läätsest ühises torustikus (joon. 53). Üks neist on eseme poole pööratud ja teda nimetatakse objektiiviks, teine on silma poole pööratud ja kannab nime okulaar.

¹ Kreeka keeles tähendab *skopo* — vaatlen, *mikros* — väike, *tele* — kaugel.

Objektiiv on lühikese fookuse kaugusega kumerlääts, okulaaril on suur peafookuse kaugus. Objektiiv peab andma esemest tõelise suurendatud kujutise ja selleks asetseb ese temast ainult vähe kaugemal fookuse kaugusest. Kujutis ehitatakse § 23 antud reegli põhjal (joon. 54). Objektiivis saadud kujutis on esemeks okulaarile. Et saada sellest veel kord suurendatud kujutist, peab esimene kujutis A_1B_1 asuma okulaari suhtes peafookuse ja okulaari vahel.



Joon. 54. Kiirte käik mikroskoobis.

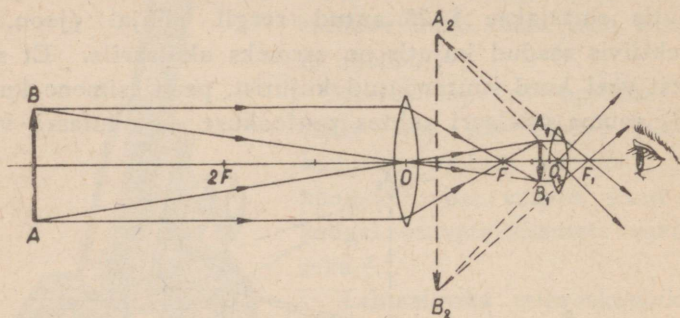
Kui joonestada esimese kujutise A_1B_1 mõlemast otspunktist kaks kiirt (§-s 24 loetletud kolme kiire hulgast), võime saada samade reeglite põhjal teise kujutise A_2B_2 . See on näilik ja eseme suhtes ümber pööratud ja suurendatud. Toru nihutatakse kruvi abil seni, kui näilik kujutis asub parima nägemise, s. o. 25 cm kaugusel normaalse silma jaoks. Mikroskoobiga võib saada kuni 3000-kordset suurendust.¹

¹ Mikroskoobi kasulik suurendus pole mitte üle ühe tuhande; suuremail suurendustel läheb kujutis difraktsiooni tõttu segaseks.

Kui vaadeldavale esemele juhtida kõrvalt väga tugevajõuline kiirte kimp, siis võivad mõned neist kiirtest sattuda objektiivi,

45. Teleskoop.

Teleskoopi, milles suurendus saavutatakse läätsede abil, nimetatakse vahel ka refraktoriiks (refraktsioon — mur-



Joon. 55. Kiirte käik Kepleri torus.

dumine). Üks esimesi refraktoreid on 1611. a. J. Kepleri leiutatud teleskoop. Selle skeem on sarnane mikroskoobi skeemiga, sest ta koosneb ka kahest kumerläätses — objektiivist ja okulaarist (joon. 55).

Objektiivil on suur peafookuse kaugus, okulaaril — väike. Et ese asetseb kaugel, siis võib lugeda, et igast eseme punktist saabuvad kiired on omavahel paralleelsed. Eseme ülemisest äärest B väljuv paralleelkiirte kimp annab pärast mur-

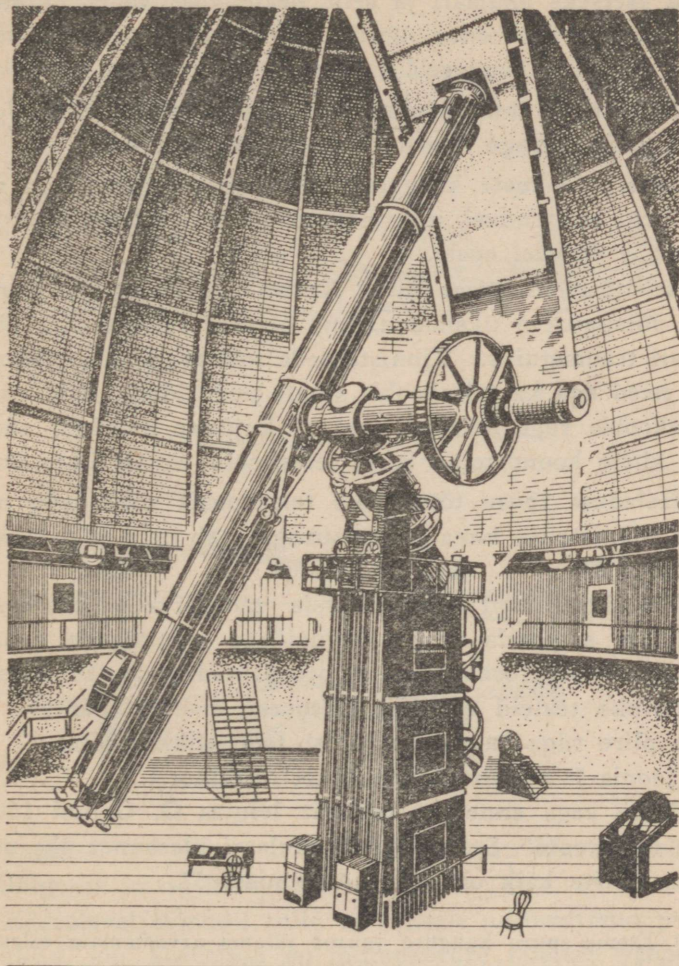
peegeldudes tohtu väikeste osakeste pinnalt ja lubavad avastada sellega nende osakeste olemasolu.

Analoogiliselt saavad nähtavaks külje poolt vaadates väikesed toas hõljuvad tolmukübemekesed, kui neid valgustab külje poolt langev päikesekiirte kimp.

Nende kübemete suuruse üle võib otsustada selle põhjal, kui suur on nende valgustustugevus. Sel viisil võib tõestada osakeste olemasolu ja määrata nende mõõteid isegi siis, kui nende diameeter on ainult 0,000 005 mm; tabamatuiks jäävad osakeste kuju ja ehitus.

Sellel põhimõttel koostatud vaatlusriista nimetatakse ultramikroskoobiks.

dumist kujutise optilisel kõrvaltjel punktis B_1 , peafookuse läheduses. Samal viisil tekib eseme teise ääre A kujutis peafookuse läheduses punktis A_1 .



Joon. 56. Refraktor.

Kogu eseme esimene kujutis asub vähe kaugemal kui peafookus ja on tõeline, ümberpööratud ja tugevasti vähendatud. Saadud tõeline kujutis A_1B_1 seatakse nii okulaari ette, et ta asetseks okulaari ja selle peafookuse vahel. Okulaari abil saadav teistkordne näilik kujutis A_2B_2 nihutatakse parima nägemise kaugusele silmast.

Teleskoobi abil nähakse eset nägemisnurga $A_2O_1B_2$ all, kuna palja silmaga vaadeldes oleks see nurk AOB .¹

Läätse fookuste kaugusest sõltuvalt on saavutatud nägemisnurga suuren-dusi, mis vastavad eseme 1000-kordsele lähemisele ja veel enam.

Selletõttu tuntakse nüüd Kuust, Päikesest ja planeetidest niisuguseid üksikasju, mis oleksid teleskoobita jäänud täiesti teadmatuiks. Kinnistähtede tohutu kauguse tõttu jäävad need aga ka teleskoobis ainult punktideks, kuid nad on teleskoobis väga heledad, sest et kujutise heledust suurendab kiirte koondamine laialt teleskoobi väljalt ühte punkti.

Heleduse tõusu tõttu võib teleskoobis näha sadu miljooneid kinnistähti, kuna palja silmaga saab neid lugeda ainult umbes 5000.

Teleskoobi abil saab eraldada täheparvede üksikosi ja püütakse selgitada nõrga valgusjõuga udukogude loomust. Koostöös spektroskoobiga ja fotoaparaadiga annab teleskoop rikkalikke teateid maailma ehitusest, avardab nähtava maailma piire väga kaugele, rikastab teaduslikku mõtet.

Joonis 56 näitab üht ajakohast refraktorit.²

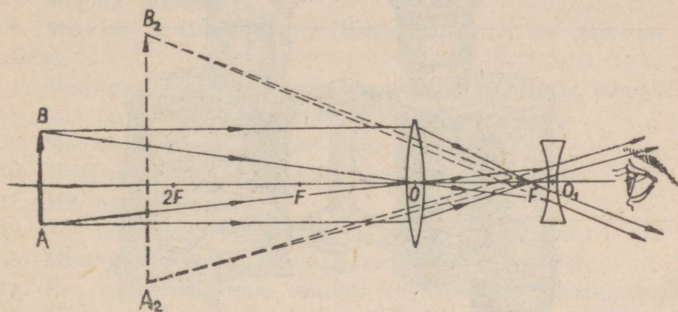
Vähe aega enne J. Keplerit leiutas G. Galilei 1609. a. oma teleskoobi. Selles täidab okulaari ülesannet üks nõguslääts; kiirte käik on esitatud joonisel 57.

¹ Eseme suure kauguse juures jätame arvestamata teleskoobi toru pikkuse ja eeldame, et silm asub O-s.

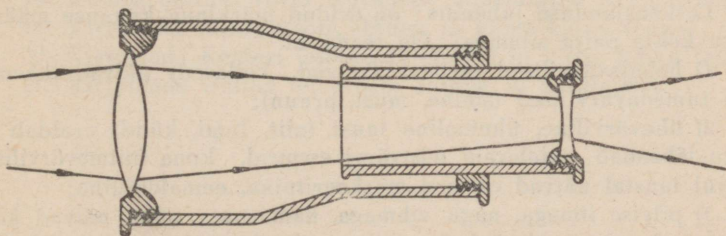
² Teleskoopi, kus esimese läätse objektiivil asemel on sfääri-line peegel, nimetatakse reflektoriks.

Tema paremus, võrreldes Kepleri teleskoobiga, seisab selles, et kujutised on päripidised, mis on olulise tähtsusega maapealsete esemete vaatlemisel; viimaseid on ebamugav vaadelda ümberpööratud kujul.

Ühendades kaks Galilei teleskoopi, saame binokli, millega vaadatakse mõlema silmaga korraga.



Joon. 57. Kiirte käik Galilei torus.

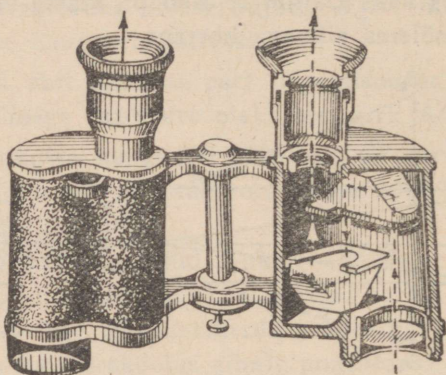


Joon. 58. Teatribinokli läbilõige.

Joonisel 58 on esitatud tavalise teatribinokli teljeline läbilõige ja kiirte käik selles.

Käesoleval sajandil tulid tarvitusele niinimetatud prisma-binoklid, kus kujutised on mitmekordse täielise sisepeegelduse abil prismades pööratud päripidisteks. Joonisel 59 on toodud selle binokli väliskuju ja kiirte käik.

Selle binokli paremuseks, võrreldes Galilei binokliga, on laiem vaateväli ja sama suurenduse juures väiksem kogu. Nende paremuse tõttu on prismabinokkel laialt levinud sõjaväelise välibinoklina.



Joon. 59. Prismabinokkel.

Harjutusi (7a).

Laskeasjanduse juhendis¹ on öeldud märklaua kauguse määramise kohta palja silmaga: „On teada, et

1) heledavärvilised esemed (valged, kollased) näivad lähemal kui tumedavärvilised (sinine, must, pruun);

2) ühevärviline, ühetaoline taust (niit, lumi, künd) eraldab ja nagu lähendab sealolevaid teistvärvi esemeid, kuna mitmevärvilisel, kirjul taustal näivad esemed maskeerituina, eemaldatuina;

3) pilvise ilmaga, nagu vihmaga, hämaruses, udus, näivad kõik kaugused suuremad; heleda, päikesepaistelise ilmaga näivad aga kõik kaugused väiksemad;

4) mägimaastiku puhtas õhus näivad kõik esemed olevat lähemal.“

Seletage neid nähtusi, kasutades pinnavalgustuse tugevuse esimest seadust (seletusel kinni pidada sellest, et kauguse muutus on vaid näilik).

¹ „Наставление по стрелковому делу РККА. Оружие стрелкового взвода“. Госвоениздат, Москва, 1943.

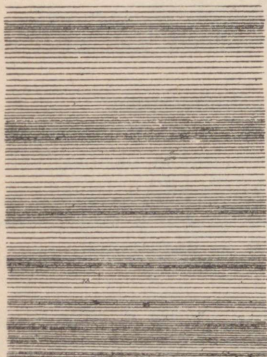
KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Kirjeldada silma peaosi.
2. Missugused silma osad mõjutavad peamiselt kiirte käiku?
3. Mis on silma lääts? Kuidas on tema silma kinnitatud? Millest ja kuidas muutub silmaläätse vorm?
4. Mis on võrkkest?
5. Mis on pimetähn?
6. Mis on kollane tähn? Kus see asub ja mis on tema ülesandeks?
7. Missugused on vaatlemisel tekkivad kujutised silmas?
8. Mis on akommodatsioon? Kuidas ta teostub?
9. Mis on kaugeim punkt? lähim punkt?
10. Mida nimetatakse parima nägemise kauguseks?
11. Mis on nägemisnurk?
12. Mis on nägemise piirnurk? Millest ta sõltub?
13. Missugused on selge nägemise kolm tingimust?
14. Kas mõlemas silmas saadud kujutised on ühesugused?
15. Missugusel tingimusel näeme kahe silmaga vaatamisel eset ühekordselt?
16. Mis on mikroskoobi ja teleskoobi põhiülesanded?
17. Kumba optilise riista läätsedest nimetatakse objektiiviks?
18. Kumba optilise riista läätsedest nimetatakse okulaariks?
19. Kirjeldada mikroskoobi ehitust ja kiirte käiku temas.
20. Kirjeldada Kepleri teleskoobi ehitust ja kiirte käiku temas.
21. Kirjeldada Galilei teleskoobi ehitust ja kasutamist.

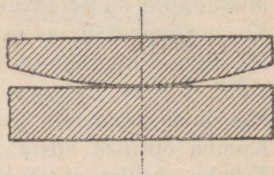
II. Valguse loomus.

46. Valguse interferents.

Kui paneme gaasi- või piirituslambi leeki keedusoola lahuses immutatud asbesti tüki, siis saame ühtlase kollase valguse. Vaatleme selle leegi peegeldumist kahelt tugevasti teineteise



Joon. 60. Interferentstriibud seebi kile tasapinnalise kelme valgustamisel ühevärvilise valgusega.



Joon. 61. Katseriist Newtoni rõngaste saamiseks.

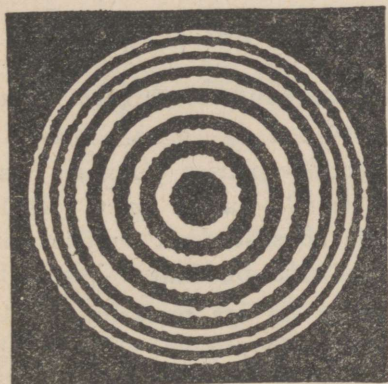
vastu surutud klaasplaadilt (jätkub suuruselt $60 \times 30 \times 2$ mm). Näeme, et leegi peegeldunud kujutis sisaldab terve rea vaheldumisi kollaseid ja tumedaid triipe. Katsetulemus on üllatav: on paiku, kus valgus lämmatab valgust (joon. 62).

See nähtus tuletab meelde heli kustutamist heli poolt interferentsi katsetel ja ongi tegelikult interferentsi avaldus valguses. Kuna interferentsi nähtus esineb ainult lainelises liikumises ja laseb end lainetuse abil seletada, siis tuleb eel-

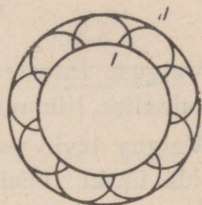
toodud katsest järeldada, et valguse põhjuseks on mingisugune laineline liikumine.

Ka teisel teel võib saada valguse interferentsi:

Kui peegliklaasist tasaplaadi külge sobitada väga suure raadiusega (väikese kõverusega) kumerlääts ja mõlemad läbi valgustada punase või mingi teise ühevärvilise klaasiga kaetud kaarleegiga, siis saame ekraanil projektsiooni, mis koosneb keskel asuvast värvilisest laigust, mille ümber on vahelduv rida tumedaid ja värvilisi rõngaid.



Joon. 62. Newtoni interferentsrõngad peegeldunud valguses.



Joon. 65. Elementaarsete lainete piirdepind ristlõikes (Huygensi printsiibi järgi — § 51).

Kui korraldada samasugune katse peegeldunud valguses, näeme keskel tumedat laiku, mille ümber asub vahelduv rida värvilisi ja tumedaid rõngaid (joon. 61 ja 62) (nn. Newtoni rõngad).

Korrates seda katset kordamööda mitut värvi valgusega, võib näha, et rohelised rõngad on kitsamad kui punased ja violetsed rõngad on kitsamad kui rohelised. Sellest järeldame, et spektraalvärvid on lained, mis üksteisest kuidagi erinevad.

Nagu edaspidi lähemalt selgitame, tuleneb see lahkuminek lainepikkuse erinevusest. Kergesti võib ette näha, et kui katseriista valgustada valge valgusega, tekivad rõngad kõiki-dest spektri värvustest, mida kinnitab ka katse.

Samasuguseid valguse interferentsi värvilisi laike näeme, kui valgustame valge valgusega üliõhukesi petrooleumi või õli kihte vee peal või seebilahuse kesti (seebivaht, seebi-mullid).

47. Valguskiired. Kiir.

Valguse interferents on kinnitanud, et valguse nähtused on lainelise liikumise avaldused.

Valgus levib vabalt planeetidevahelises ruumis, mis ei sisalda ühtki füüsikale ja keemiale tuntud ainet. Ka levib valgus vabalt läbi klaastorude õõnsuse, kust on õhk võimalikult suure hõrenduse astmeni välja pumbatud.

Valguse lainetusteooria järgi on iga punktiline valgusallikas, näit. elektrilambi lühike hõõgniit või väike kaarleek, keskuseks, millest levivad ruumi sfäärilised (kerakujulised) lained (joon. 63). Iga sfääri kõik punktid on ühesuguses võnkefaasis.

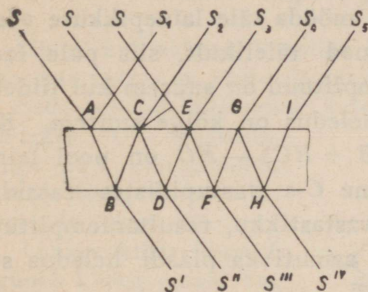
Kui kujutada kontsentrilised sfäärid läbi kõigi ruumi-punktide, mis on ühesuguses võnkefaasis, siis kahe kõrvuti-asuva sfäärilise pinna kaugust teineteisest, mõõdetud raadiust mööda, nimetatakse laine pikkuseks. Ristjoont (normaali) sfäärilisele pinnale nimetatakse kiireks.¹ Kui valgusallikas on väga kaugel, siis on sfääri pinna väikene osa väga vähe erinev tasapinnast ja lainet nimetatakse tasapinnaliseks. Kõik tasapinnalise laine kiired on paralleelsed.

¹ Kui keskkond on isotroopne, s. o. kõigis sihtides ühesuguste omadustega.

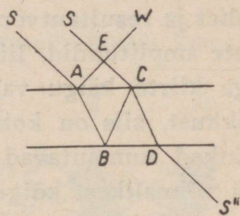
48. Valguse interferentsi selgitamine.

Pärast seda, kui oleme kindlaks teinud, et valgus on lainetus ja selgitanud selle juurde kuuluvaid mõisteid, püüame põhjendada valguse interferentsi nähtusi.¹

Kui valgustada ühevärvilise valguse paralleelkiirtega väga õhukest tasaparalleelset klaasplaati, siis näeme nii peegeldunud kui ka läbitunginud valguses, et kiirte langemisnurga muutmisel näib plaat kord heledam, kord tumedam.



Joon. 64. Õhukese plaadi valguse interferentsi seletus.



Joon. 65.

Plaadile langevaid ja plaadist läbitungivaid paralleelsetel kiirtel on väga mitmesugune käik, kuna nad tahkudel osaliselt ja vahest mitmekordselt peegelduvad; sellepärast võib joonisel 64 näidatud kiirte väljatuleku sihtidele juhtuda korraga mitu või vähemalt kaks kiirt. Nii võib SD suunas välja tulla üks kiir, mis langeb plaadile SC -joonel ja murdus CD -joont mööda ja teine kiir, mis langeb SA suunas, murdus AB -joont mööda ja peegeldus plaadi sees punktides B ja C .

Kuna kiired langevad paralleelselt, siis laine front on tasapinnaline, on kiirtega risti ja on sihiga AW (joon. 65).

Selleks ajaks, kui punkti A langenud laine jõuab punkti

¹ Th. Young'i poolt 1807. a. antud seletus

C , käies ära tee pikkuse $AB+BC$, läbib punkti C langev laine ainult lõigu EC . Siinjuures on vaja märkida, et laine levib õhus kiirusega v , klaasis aga kiirusega $v_1 = \frac{v}{n}$, kus n on klaasi murdumisnäitaja (§§ 9, 51). Sellepärast teekonnale $AB+BC$ klaasis vastab õhus teekond $n \times (AB+BC)$.

Kuna punktides A ja E , mis asuvad mõlemad frondil AW , on ühesugune võnkefaas, siis kohtumisel punktis C võivad lainete faasid teede erinevuse tõttu olla erinevad.

Kui lainetus jääb ühte teed mööda täie lainepikkuse võrra teisest maha, siis ühtivad lained täielikult, siis pole faasi vahet ja resultantvõnkumise amplituud on suurem kui liideta-
vate amplituudid, liitvalguse heledus on kõige suurem. Kui aga kiirte käigu vahe $n \cdot (AB+BC) - EC$ on pool lainepikkust, siis on kokkusattumine C -s vastupidistes faasides, võnked summutavad üksteist vastastikku, resultantamplituud on võimalikest kõige väiksem, samuti ka plaadi heledus selles punktis.

Kiirte käigu vahet saab muuta, muutes kiirte langemisnurka või plaadi paksust.¹

Interferents katses Newtoni rõngastega ja meie esialgses katses on samal viisil seletatavad, ta sõltub klaasidevahelise õhukihi paksusest.²

Kui õhukesele plaadile või sfäärilisele klaasile langeb valge valgus, tekivad mitmevärvilised triibud või rõngad (seebimullide või vee peal ujuva õhukese õlikihi värvsus).

¹ Õhukeste plaatide abil märgati valguse interferentsi esmakordselt 1665. aastal.

² Interferentsi peegeldunud valguses seletatakse samuti; seejuures tuleb aga tee pikkuste ja kiiruste vahest üngitud kiirte käigu vahele lisada ka poole lainepikkuse kadu peegeldumisel tihedama keskkonna, s. o. klaasi pinnalt. Interferentsi uurimine peegeldunud valguses on isegi parem, kuna läbiminevas valguses on üks interfereeruvaist kiirtest pärast kahekordset peegeldumist tunduvalt nõrgenenud.

See seletub eri värvi valguste lainepikkuste ja levimiskii-
ruste erinevusega antud aines. Igas paigas interfereeruvad
eri värvused erisuguselt. Kui ühes paigas satuvad teatava pikku-
suga lained kokku ühesugustes faasides, teises paigas juhtub
aga seesama teise pikkusega lainega, siis on need paigad ka
värvuselt erinevad.

49. Valguse polarisatsioon.

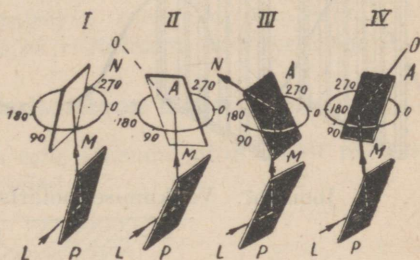
Nüüd, kus valguse laineline loomus on tõestatud, tekib küsi-
mus, kas valgus on risti- või pikilainetus.

Seda selgitab alljärgnev katsete rida. Paralleelkiirte kimp L
juhatakse 55° langemis-
nurga all¹ klaasplaadile
 P , mille tagapind on läbi-
paistmatu (joon. 66).

Langev kiirte kimp L
jaguneb klaasi pinnal ka-
heks, üks osa — kimp M —
peegeldub, kuna teine osa
murdub ning neelatakse
musta värvi poolt klaasi
tagapinnal.

Katse näitab, et pee-
geldunud kiirte kimp M
erineb langevate kiirte

kimbust L ühe uue omaduse poolest. Kuna otse valgusallikast
väljaläinud kiirtel on omadus peegelduda ettejuhtuvast pinnast
igasuguse langemisnurga juures, siis kiired M peegelduvad teisest
peeglist A märgatavalt ainult siis, kui langemispinnad mõlemas
peeglis ühtivad (asendid I ja III joonisel 66), ja on kõige rohkem
nõrgenenud sel juhul, kui langemiskiirte pinnad on teineteisega
risti².



Joon. 66. Valguse polarisatsioon
klaasplaadilt peegeldumisel.

¹ Kasutades mõnda teistsugust langemisnurka, on katsete tule-
mused samasugused, kuid vähem selged.

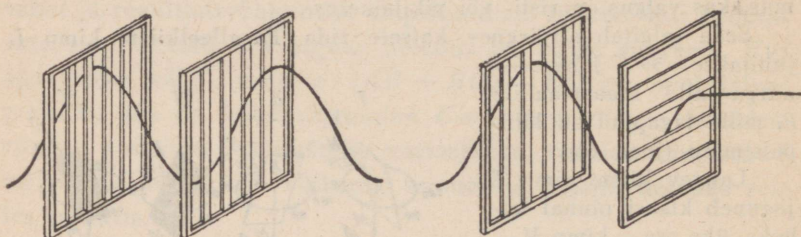
² Peegli te vahepealsetes asendites on teistkordselt peegeldunud
valgus osaliselt nõrgenenud.

Kirjeldatud katse näitab, et kiirte kimbus M on tekkinud mingisugune ühekülgsus, mille tõttu kimbu M ühe küljega teise peeg-
lisse langemisel toimub teistkordne peegelduse nähtus, teise kül-
jega langemisel peegeldumist ei saa olla.

Selline kiire ühekülgsus avastati 1808. aastal Malus'e (1775—
1812) poolt ja nimetatakse valguse polarisatsiooniks.

Polarisatsiooni esinemine valguses tõendab, et valgus on risti-
lainetus. Kui oleks tegemist pikivõnkumisega, s. o. kui võngete
siht ühtlasi kiirte sihiga, siis ei saaks polarisatsiooni kujutella.

Seda on kerge mõista mõne lihtsama elastse ristivõnke, näit.
kumminööri võngete uurimisel. Olgu liistudest valmistatud kaks
võret pikuti piludega, mis on nii laiad, et kumminöör neist vabalt



Joon. 67. Võnkumise polariseerimise mudel.

läbi mahub. Kui mõlemad võred on asetatud piludega vertikaalselt,
siis lähevad vertikaalsed ristivõnked piludest läbitõmmatud nõõri
mööda takistamatult läbi mõlema võre (joon. 67). Kui aga teise
võre pöörame nii, et pilud oleksid horisontaalsed, siis esimesest
võrest läbitulnud võnked summutatakse teises võres. Kui aga teki-
tada kumminöõris pikilainetus, levib see läbi mõlema võre nende
vastastikusest paigutusest olenemata.

Valguse lainetusteooria järgi toimub võnkumine loomulikus
valguses igasugustes suhtides. Täheendab kõik sihid, mis on risti val-
guse kiirega, on optilises mõttes täielikult üheväärsed. Esimesel
peegeldusel, s. o. klaasi eespinnal peegeldunud valguskiires, on
kõigist võimalikest ristivõngetest alles jäänud ainult võnked ühes
kindlas sihis.

Valguse polariseerimiseks nimetatakse ühe
kindla sihiga võngete väljaeraldamist kõigi või-
malike suhtidega ristivõngetest. Valgust, milles

võnkumine toimub ühes kindlas sihis, nimetatakse polariseeritud valguseks.

Valguse lainetusteooria järgi on esimesel peegeldumisel polariseeritud valguslainete võnkepind perpendikulaarne langemistasapinnaga; sellise polariseerimise kohta öeldakse, et valgus on polariseeritud langemistasapinnas.

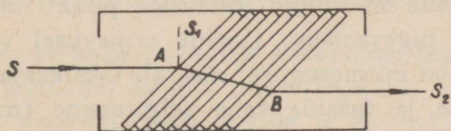
Kui polariseeritud kiir langeb teise peeglisse, peegeldub ta selles, kui tema võnked on risti teise peegli langemistasapinnaga; kui aga võnked on selle pinnaga paralleelsed, siis valgus kustub.

Peegli abil võib määrata, kas langev valgus on polariseeritud või ei ole. Kui kiir peegeldub temal igasuguse langemisnurga juures, siis langev valgus oli polariseerimata; kui aga peegeldumine esineb ainult üksikute kiirte suhtes võetud peegli asendite juures ja teistes asendites esineb valguse kustumine, siis oli langev kiir polariseeritud. Sel juhul täitis peegel analüsaatori ülesannet.

Kokkuvõttes andis polarisatsiooni esinemine ülesseatud küsimusele kindla vastuse: *valgus on ristivõngete laineline levimine.*

50. Valguse polarisatsioon murdumisel.

Kiire polarisatsiooni saab esile kutsuda mitte ainult peegeldumisel, vaid ka valguse murdumisel.



Joon. 68. Õhukeste klaasplaatide pakett polarisaatorina.

Kui 55° -se langemisnurga juures klaasplaadi pinnalt peegeldumine eraldab peegeldunud kimpu ainult langemispinnas polariseeritud kiiri, siis klaasis murdunud kiirte kimp, mis on kaotanud kas või osaltki ülalnimetatud võnkumisi, osutub samuti polariseerituks, kuigi mitte nii täielikult kui peegeldunud kimp. Täielikuma polarisatsiooni saamiseks tuleb kiirte kimbul lasta korduvalt murduda 10—20 klaasplaadist koosnevas pakettis. Sellest klaaside pakettist läbitunginud kiired on kõik polariseeritud langemistasapinnaga risti asuvas pinnas, seega toimub võnkumine langemistasapinnas (joon. 66). Seda klaaside paketti võib kasutada polarisaatorina ja ka analüsaatorina (joon. 68).

51. Huygeni printsiip.

Tutvunud nähtustega, mis viisid meid valguse lainetus-teooria kujundamiseni, püüame nüüd selle teooria abil seletada ka mõnda varem tundud valguse avaldusist. Nende seletamine toimub Huygeni poolt antud võtte abil.

Joonisel 63 hõlmab sfääriline pind *I* kõiki punkte, mis antud momendil on ühes ja samas võngete faasis. Ajavahemiku *t* järel hõlmab laine pind samas faasis olevaid uusi punkte uues asendis *II*. Huygens soovitas laine pinna üleminekut ühest asendist teise käsitleda teisiti. Kui laine pind on ühe momendi kohta teada, siis võib pidada kõiki selle pinna punkte uuteks võnkumise tsentriteks, mis ajavahemiku *t* jooksul saadavad välja sfäärilisi laineid raadiusega *ct*, kus *c* on lainetuse levimise kiirus.

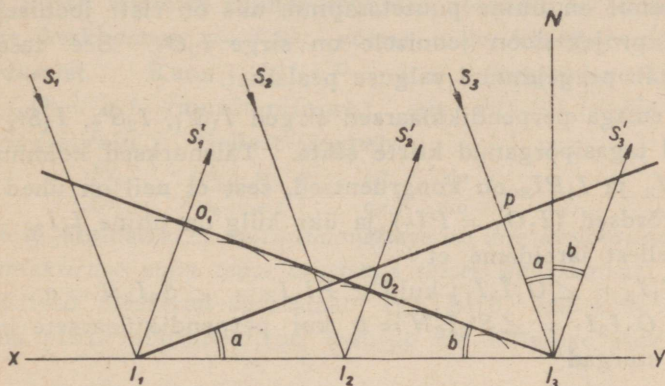
Neid laineid nimetatakse elementaarlaineks. Saabudes mitmesugustelt endise lainepinna punktidele igasugustesse ruumi punktidesse, need elementaarlained interfereeruvad. Võnked, mis on tulnud teatavasse punkti ühes ja samas faasis, lähevad tugevamaks; faaside erinevusel võnked nõrgendavad üksteist mitmesugusel määral. Üksikasjaline lainete käigu ehitamine ja faaside vahe selgitamine (mille jätame kõrvale) näitavad, et interferentsi kaudu kujunenud uus pealaine (laine front), millel kõik võnked on ühesugustes faasides, on kujuteldavate elementaarlainete ühisel puutepinnal. Huygeni poolt antud võtet uue pealaine leidmiseks nimetatakse Huygeni printsiibiks.

Huygeni printsiip koos interferentsiga loovad võimaluse mõista valguse sirgjoonelist levimist ka lainelise liikumise kujutluse alusel.

Selgitame, kuidas Huygeni printsiibi ja valguse lainetus-teooria abil tõestatakse valguse peegeldumise ja murdumise seadusi.

52. Valguse peegeldumise ja murdumise seletamine lainetusteooria põhjal.

Valguspunkt saadab ruumi ristivõngetega sfäärilise laine. Kui valguspunkt asub lõpmata kaugel, siis iga väike lainepinna osa on tasapind. Iga laine levimissuht on antud hetkel risti (normaalne) laine pinnaga.



Joon. 69. Valguse peegeldumise seletamine lainetusteooria põhjal.

Oletame, et kahe erisuguse keskkonna tasapinnalisele piirile XY (joon. 69) langeb laine lõpmata kaugest allikast; selle laine pind on tasapinnaline ja kujundub joonisel sirgjoonena I_1P . Kõik piirpinna punktid, kuhu laine on jõudnud, hakkavad võnkuma ja kujunevad sfääriliste lainete tsentriteks. Need lained levivad osalt selles keskkonnas, kust nad tulid piirile, osalt tungivad teise keskkonda.

Jälgime esijoonel elementaarlainete kujunemist esimeses keskkonnas (joon. 69). Langev tasapinnaline laine pinnaga I_1P (lõikes), nihkudes edasi endaga paralleelselt, riivab järkjärgult punkte I_1, I_2, I_3 pinnal XY. Kui lainetus jõuab P -st punkti I_3 , on risti joonise pinnaga kujutatud sirgel, mille projektsiooniks on punkt I_1 , muutunud kõik punktid elementaarlainete tsentriteks. Ühe niisuguse sfäärilise laine

lõige on joonisel näidatud; tema raadius on I_1O_1 ; see on võrdne kaugusega PI_3 ($I_1O_1 = PI_3$).

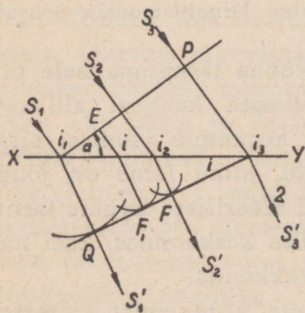
Punktid I_2 (I_1I_3 keskel) annavad laineid kaks korda väiksema raadiusega ($I_2O_2 = \frac{1}{2}PI_3$) jne. Punktis I_3 pole elementaarne sfääriline laine veel jõudnud tekkida (raadius on null).

Joonisel on näha, et kujunenud elementaarsete lainete süsteemil on ühine puutetasapind, mis on risti joonisega ja mille projektsioon joonisele on sirge I_3O_1 . See tasapind kujutab peegeldunud valguse pealainet.

Temaga perpendikulaarsed sirged $I_1S'_1$, $I_2S'_2$, $I_3S'_3$ osutavad tagasipörganud kiirte sihte. Täisnurksed kolmnurgad $I_1O_1I_3$ ja I_1PI_3 on kongruentsed, sest et neil on ühed küljed võrdsed ($I_1O_1 = PI_3$) ja üks külg on ühine I_1I_3 .

Sellest järeldame, et

$\angle PI_1I_3 = \angle O_1I_3I_1$; kuid $\angle PI_1I_3 = \angle S_3I_3N = a$
ja $\angle O_1I_3I_1 = \angle S'_3I_3N = b$ kui perpendikulaarsete haaradega nurgad.



Joon. 70. Murdumise selektamine lainetusteooria põhjal.

Nurk a on kiirte langemisnurk ja nurk b on kiirte peegeldusnurk. Kuna leidsime, et $b = a$, siis on sellega tõestatud teine peegeldumise seadus.

Nüüd pöördume murdumisnähtuse juurde (joon. 70). Teises keskkonnas levib lainetus kiirusega c_2 , mis erineb kiirusest c_1 esimeses keskkonnas (näiteks $c_2 < c_1$). Sel momendil, kui laine jõudis i_1 -ni, väljus sellest punktist uus sfääriline elementaarlaine teise keskkonda; ajavahemikus t , mille jook-

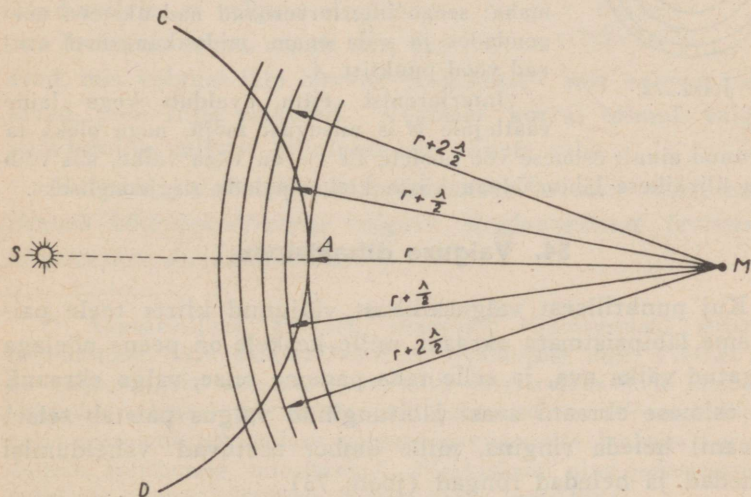
sul langev tasapinnaline laine i_1P läbis teekonna $PI_3 = c_1t$, jõudis i_1 -st väljunud elementaarlaine kaugusele $i_1Q = c_2t$.

Kõik punktid pinnal i_1i_3 hakkavad üksteise järel elementaarlainete tsentriteks, kusjuures nende lainete raadiused, võetud ühe momendi kohta, kahanevad võrdeliselt vastava tsentri kaugusega punktist i_1 . Nende sfääriliste lainete lõpmatu suurel hulgal on ühine puutetasapind Qi_3 , mis ongi teise keskkonda murdunud pealaine frondiks. Võrreldes lainete kiirte levimise suundi esimeses keskkonnas — S_1i_1 ja teises keskkonnas — $i_1S'_1$, võime näha kiirega toimunud murdumist. Kuna $\angle i_3i_1P = \angle a$ (langemisnurk) ja $\angle i_1i_3Q = \angle i$ (murdumisnurk), siis $Pi_3 = i_1i_3 \cdot \sin a$ ja $Qi_1 = i_1i_3 \cdot \sin i$. Sellest järgneb:

$$\frac{Pi_3}{Qi_1} = \frac{i_1i_3 \cdot \sin a}{i_1i_3 \cdot \sin i} = \frac{c_1 t}{c_2 t}; \quad \frac{\sin a}{\sin i} = \frac{c_1}{c_2}.$$

Siit järeldame, et murdumisnäitaja on ühe keskkonna laine levimiskiiruse suhe tema kiirusega teises keskkonnas.

Katsed tõestavad sedasama. Iga kord, kui kahe keskkonna piiril muutub kiirus, muutub ka liikumise siht.



Joon. 71. Ühevärvilise valguse sirgjoonelise levimise seletamine lainetusteooria põhjal.

53. Valguse sirgjoonelise levimise seletamine lainetus- teooria põhjal.

Kuidas sobitada kujutlust valguse levimisest punktilisest allikast sfäärilise lainena võimalusega kirjeldada valguse nähtusi nii, nagu leviks valgus allikast sirgjooneliselt?

Valguse sirgjoonelise levimise kohta andis A. Fresnel alljärgneva seletuse, kasutades Huygeni printsiipi ja interferentsi.

Oletame, et valgusallikast S väljunud laine on teataval momendil jõudnud asendisse DC (joon. 71). Küsitakse, kuidas jõuab see valgus vaatleja M juurde. Märgime r -ga punkti M kauguse lähemast laine punktist A . Kujundame M ümber rea sfäärilisi pindu raadiusega r , $r + \frac{\lambda}{2}$, $r + 2\frac{\lambda}{2}$ jne., kus λ on monokromaatilise (ühevärvilise) valguse laine pikkus. Need sfäärid teevad laine pinnal terve rea vöökujulisi väljalõikeid (joon. 72). Kuna λ on r -ga võrreldes üliväike, siis saab tõestada, et kõik need vööd on pindvõrdsed. Iga vöö saadab kõigi oma osakeste poolt elementaarained punkti M . Iga järgmise vöö lained jäävad eelmise vöö laineist poole lainepikkuse võrra maha; seega interfereeruvad nad üksteist nõrgendades ja seda enam, mida kaugemal asuvad vööd punktist A .



Joon. 72.

Interferentsi tõttu avaldub kogu laine vaatlejale M -is niisugust mõju, nagu oleks ta lähtunud ainult esimese vöö poolelt. Et λ on väga väike, siis võib seda üliväikese läbimõõduga kiirte kimpu pidada sirgjooneliseks.

54. Valguse difraktsioon.

Kui punktilisest valgusallikast väljunud kiirte teele paigutame läbipaistmatu ekraani, mille keskele on peene nõelaga torgatud väike ava, ja selle taha paneme teise, valge ekraani, siis esimese ekraani avast läbitunginud valgus paistab teisel ekraanil heleda ringina, mille ümber asetuvad vaheldumisi tumedad ja heledad rõngad (joon. 73).

Kui läbi kiilukujulise pilu juhtida ühtvärvi valgust paarikümne meetri kaugusel asuvale ekraanile, siis tekib ekraanil

kummaliselt valgustatud kujund (joon. 74) värviliste triipudega, kusjuures valgustus ulatub kaugele üle geomeetriliste piiride, mis vastaksid kujutlusele valguse sirgjoonelisest levimisest (joonisel on need piirid märgitud kriipsjoontega).

Kui piluks on kitsas riskülik, nähakse ekraanil keskmise riskülikulise triibu kõrval mõlemal poolel vaheldumisi tumedaid ja heledaid triipe.

Kui vaadelda valgusallikat, hoides õige lähedal silma ees peenikest traati (läbimõõt ligikaudu 0,2 mm), näeme traadi kõrval temaga rööbiti mitut tumedat ja heledat joont. Sedasama võib saada ka varjuna ekraanil, mis asub umbes 2 m kaugusel traadist (joon.75).

Kõik esiletoodud nähtused osutavad sellele, et valguse sirgjooneline levimine esineb ainult siis, kui avad, mis valgust läbi lasevad ja esemed², mis valgust takistavad, pole liiga väikesed. Vastasel korral toimub valguse paindumine valgust kinnipidavate tőkete taha.

*Valguse paindumist läbipaistmatute esemete taha, milles ilmneb kõrvalekaldumine valguse sirgjoonelisest levimisest, nimetatakse difraktsiooniks.*³



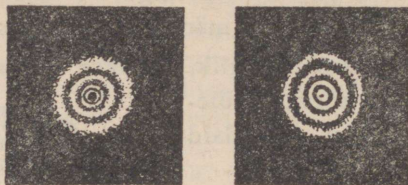
A. Fresnel¹
(1788—1827).

¹ Augustin-Jean Fresnel, sündinud Prantsusmaal Broglies, teedeinsener, 1825. aastast Prantsuse akadeemia liige. Fresnel töötas välja valguse lainetusteooria, mille järgi valgus levib lainetena. Lähtudes valgusest kui lainetavast nähtusest, on Fresnel täpselt välja töötanud põhjenduse valguse sirgjoonelise levimise, peegeldumise, murdumise, interferentsi, difraktsiooni ning polarisatsiooni kohta ja valguse kaksikmurdumise kohta kristallides.

² Nähtus esineb igasuguste esemete piiril.

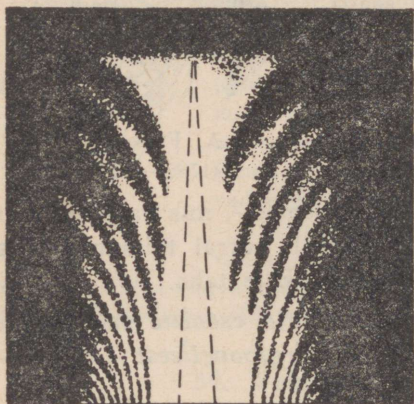
³ Valguse difraktsioon avastati 1665. aastal. Difraktsiooni võib

Kui tekitada heli väga pika ja väga kõrge müüri ees, siis see põrkab müürist tagasi ja teisel pool müüri pole midagi

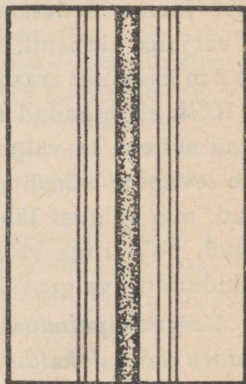


Joon. 73. Väikese ava difraktsiooniline toime.

kuulda. Kui aga helisid takistavate esemete suurus on ühismõõtne helilainete pikkusega (piirides 1 kuni 20 m), siis



Joon. 74. Kiilutaolise ava difraktsiooniline toime.

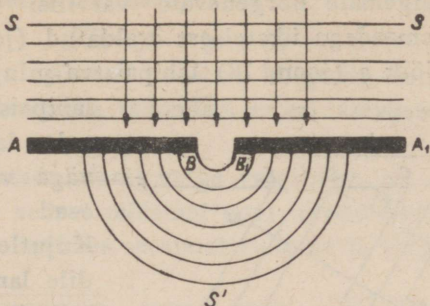


Joon. 75. Peene traadi difraktsiooniline toime.

heliid painduvad ümber takistuse. On hästi teada kõne kuuldavus hoone nurga taga, kuhu heli kiired sirgjooneliselt ei

näha, vaadeldes laterna valgust läbi kaste või härmatisega kaetud klaasi, läbi ripsmete, kui silm on pilukil, läbi linnu sulgede ja läbi õhukese riide.

pääse. Samasugune paindumine ümber takistuse toimub ka veepinna lainete levimisel (joon. 76).

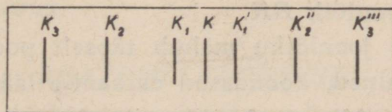


Joon. 76. Lainete difraktsioon veepinnal. SS' — langev tasapinnaline laine, BB_1 — kitsas vahekäik, S' — vahekäigus tekkinud sfääriline laine.

Niisiis on difraktsioon lähedalt seotud lainetusega ja tema esinemist võib pidada tõenduseks, et on tegemist lainelise liikumisega.

55. Valguse lainepikkuse mõõtmine difraktsiooni abil.

Vaguse lainepikkust võib mõõta difraktsiooni abil. Selleks võetakse klaasplaat, mille pind on tihedalt kaetud terariistaga kraabitud ühekauguste paralleeljoontega; need jooned

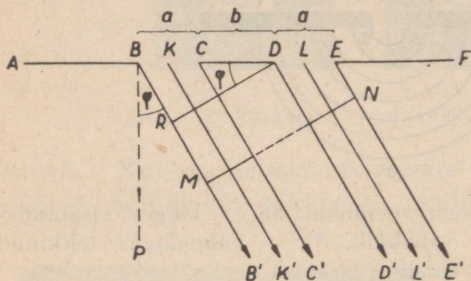


Joon. 77. Ühtvärvi valgusest läbi võre saadud difraktsiooniribad.

ei ole läbipaistvad, kuna aga joonte vahele jäetud puutumata klaaspinna ribad on läbipaistvad. Kui plaadi pinnale risti juhtida kimp paralleelseid ühtvärvi (näit. punaseid) kiiri ja koondada neid läätse abil fookusesse ekraani pinnal, siis tekib sellel tugev värviline riba K just selles kohas, mis vastab

kiirte sirgjoonelise käigu põhimõttel ehitatud kujutise asendile. Peale selle aga on mõlemal pool keskmist riba näha veel terve rida kaugemale nõrgenevaid värvilisi triipe, mis on tumedate vahemaadega üksteisest eraldatud (joon. 77).

Olgu joonlõik a (joon. 78) läbipaistva pilu laius ja b —



Joon. 78. Valguse lainepikkuse mõõtmine difraktsiooniribade abil.

läbipaistmatu piludevahe laius, mõlemad väga väikesed murdosad millimeetrist. Kujutleme, et plaadile langeb kimp paralleelseid kiiri, teisiti öeldes — tasapinnaline laine, ja võtame kasutusele Huygeni printsiibi, kus tasapinnalise laine iga

punkt on uue laine tsentriks.

Nii võib pidada ka punkte B ja D uute elementaarlainete tsentriteks. BP sihis lähevad mõlema tsentri elementaarained ühesugustes faasides; igas teises sihis tekib faaside erinevus. Joonisel on näha, et lainetel, mis väljuvad samadest punktidest, moodustades sihiga BP nurga φ , tekib käiguvahet — joonlõik BR .

Kui sellesse joonlõiku mahub täpselt pool lainepikkust, siis mõlemad lained, koondatud ekraanile läätse abil, saavad sinna vastupidistes faasides ja kustutavad teineteist. Kui aga sama joonlõik võrdub laine täispikkusega, siis lained satuvad ekraanil kokku ühesugustes faasides, tugevdavad teineteist ja annavad ekraanil värvilise triibu.

Lainepikkuse arvutamiseks piisab sellest, et mõõdetakse esimese värvilise kõrvaltriibu kaugus keskmisest triibust ja määratakse selle põhjal nurga φ suurus; joonlõik $(a + b)$ on

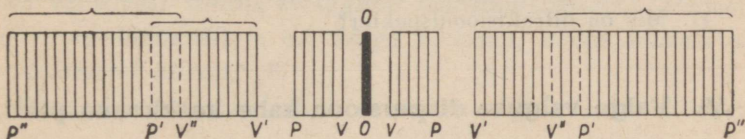
võre valmistaja poolt juba alguses kindlaks määratud. Antud juhul vastab BR ühe laine pikkusele.

Kolmnurgast BDR saame:

$$BR = \lambda = (a + b) \sin \varphi.$$

Spektri iga värvuse esimene külgtriip asub keskelt erisugusel kaugusel; see tähendab, et eri värvustel on erinevad lainepikkused.

Kui valgustada plaati valge valgusega, on ekraani keskel valge triip ja sellest mõlemal pool mitmekordselt mitmevärvilised triibud, igapähes seespool violetne ja väljaspool punane.



Joon. 79. Normaalne difraktsioonispekter.

Seda mitut värvi triipude pidevat rida, mille saame ekraanil, kui sinna läätse abil koondada läbi difraktsioonivõre juhitud valge valguse paralleelkiirte kimp, nimetatakse difraktsioonispektriiks (joon. 79).

Kui spektri värvuste lainepikkused on määratud, võib arvutada ka igale lainele vastavad võnkesagedused $N = \frac{c}{\lambda}$, kus c on valguse kiirus.

KONTROLLKÜSIMUSI.

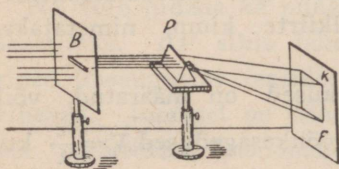
1. Milles avaldub valguse interferents?
2. Missuguseid järeltusi võib interferentsi põhjal teha valgusnähtuste tekkimise ja levimise kohta?
3. Kuidas seletada valguse interferentsi õhukeste plaatide juures?
4. Mida nimetatakse valguse polarisatsiooniks?
5. Milles avaldub valguse polarisatsioon?
6. Mida nimetatakse polariseeritud kiireks?
7. Missuguseid valguse polariseerimise võtteid tunnete?

8. Mis on analüsaator?
9. Mida võib valguse polarisatsiooni põhjal otsustada valguslainete võnkumiste sihi kohta?
10. Milles seisneb Huygensi printsiip ja kuidas teda kasutatakse?
11. Kuidas seletab lainetusteooria valguse sirgjoonelist levimist?
12. Kuidas tuletatakse lainetusteooria järgi peegeldumise ja murdumise seadusi?
13. Kuidas väljendada aine murdumisnäitajat valguse levimise kiiruste kaudu tühjuses ja aines?
14. Mis on valguse difraktsioon?
15. Missuguseid difraktsiooni nähtusi tunnete?
16. Kuidas mõõta difraktsiooni põhjal valguse lainepikkust?
17. Mis on difraktsioonispekter?

56. Valge valguse dispersioon kahe keskkonna piiril.

Varem jälgisime, kuidas ühevärviline valgus tungib ühest keskkonnast teise. Koguni uuele nähtusele satume siis,

kui kahe läbinähtava keskkonna piirile langeb valge valgus. Et katse tulemus oleks selgepiiriline, paigutame pimedasse tuppa valge valguse allika (hõõgniidiga elektrilambi, petrooleumlambi vms.); varjame seda allikat ekraaniga, milles on kitsas horisontaalne pilu *B* (joon. 80); pilu taha paneme prisma *P* nii, et tema servad oleksid piluga



Joon. 80. Valge valguse dispersioon.

paralleelsed. Pilust läbitulnud ja prismast läbitunginud valge valguse kimp annab ekraanil pilu kujutise kaldega prisma aluse poole; see kujutis on laienenud ja koosneb paljudest värvustest, mis lähevad pidevalt ja märkamatult üle ühelt värvuselt teisele, alates kõige vähem kaldunud punasest ja lõpetades kõige enam kaldunud violetsega; värvuste ja nende

varjundite hulgast eralduvad selgemini järjekorras — punane, oranž, kollane, roheline, helesinine, violetne.

Valge valguse lahutamist teda kujundavateks värvilisteks valgusteks nimetakse valguse dispersiooniks.

Üksteisest eraldatud värviliste valguste kogu moodustab spektri.

Kõik värvilised kiired, kuuludes algul valge valguse koosseisu, langesid prismale ühesuguse nurga all, kuid väljusid erisuguste nurkade all. Sellest tuleb järeldada, et igal värvusel on klaasi suhtes erisugune murdumisnäitaja. Punaste kiirte murdumisnäitaja on kõige väiksem, kõige suurem on ta violetsetel kiirtel.

Kuna aine murdumisnäitaja võrdub valguse levimiskiiruste suhtega tühjuses ja aines — $n = \frac{c_0}{c}$, siis murdumisnäitajate erinevusest eri värvuste kohta tuleb järeldada, et igal eri värvi lainel on aines erisugune levimiskiirus.

Järgnevas tabelis on antud üksikute värviliste kiirte murdumisnäitajad vees, klaasis ja väävelsüsinikus, kusjuures kiir *A* asub spektri punases osas, *D* — kollases, *F* — helesinises ja *H* — violetses osas.

Aine	<i>A</i>	<i>D</i>	<i>F</i>	<i>H</i>
Vesi	1,329	1,333	1,337	1,344
Klaas (kroon-) . .	1,510	1,515	1,521	1,531
Väävelsüsinik . . .	1,610	1,629	1,654	1,702

Seni kui kõik kiired lähevad ühes sihis, tekitavad nad silmis üheskoos valge valguse mulje. Prismast väljuvad kiired eri suundades ja tekitavad nägemisergu kaudu peajus igauks erineva värviaistingu. Silm pole suuteline iseseisvalt eraldama liitvalgust tema liiteosadeks. Nurkade suurused, mille võrra värvilised kiired, läbides prisma, üksteisest

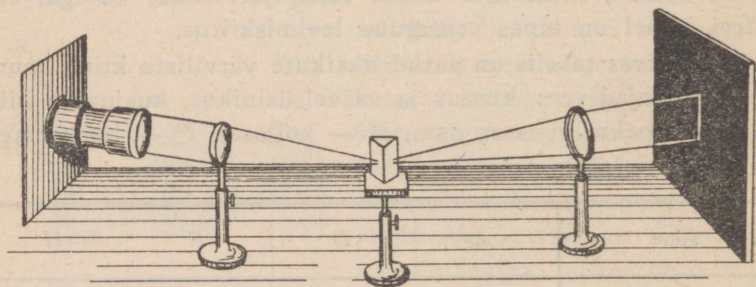
eralduvad, olenevad prisma murdmise omadusist; erinevatest ainetest prismades saadakse spektri osad erinevas suuruses.

57. Iga spektri kiir on lihtvalguse kiir.

Kui eraldada kõik teised spektriosad ja lasta läbi teise ekraani kitsa pilu ainult ühtvärvi kiirte kimp ning juhtida see läbi teise prisma, siis tekib ainult kujutise kaldumine, kuna üksikud värvilised kiired, läbides teist prisma, ei lagune enam teistsugust värvi kiirteks. Selle põhjal peetakse spektri iga üksikut värvilist kiirt lihtkiireks; vastavat värvilist valgust nimetatakse sisult ühtlaseks, monokromaatiliseks.

58. Valge valguse süntees.

Kui prismast tulnud spektri kiirte teele (§ 56) asetada suur koondläätis või silindriline¹ kumerklaas nii, et silindri



Joon. 81. Valge valguse süntees.

moodustajad oleksid piluga paralleelsed (joon. 81), siis koon-
dab klaas kõik värvilised kiired ekraanile ühte paika ja seal
näeme uuesti valget triipu. See tähendab, et *kõigi spektri
värvuste liitmisel taastub valge valgus.*

¹ Silindriliseks nimetatakse klaasi, millel on kaks silindriliselt
lihvitud pinda.

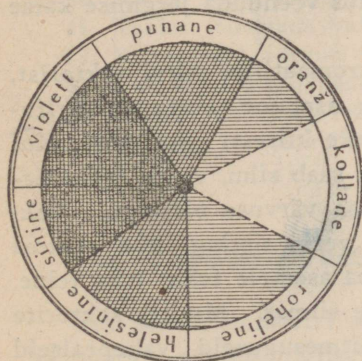
Valge valguse kujunemist kõigi spektri värvide liitmise teel nimetatakse valge valguse sünteesiks.

Kuna eelmine katse näitas valguse sünteesi objektiivselt, võib sedasama korraldada ka teisiti, subjektiivsete muljete alusel, mis tekivad silmis, kui vaadelda kiiresti pöörlevat ringi, mille sektorid on kaetud värvidega, vastavalt üksteisele järgnevatele spektri värvustele.

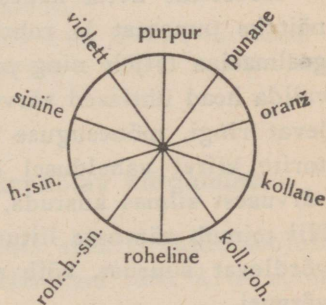
Valge valguse lahutamist värvilisteks kiirteks ja spektri värvuste liitmist valgeks valguseks toimetas esmakordselt Newton a. 1666—1667.

59. Täiendvärvused.

Kui eelnevas valge valguse sünteesi katses (joon. 81) eraldada punased kiired, kattes vastava spektri osa musta paber-



Joon. 82. Ring subjektiivseks värvuste liitmiseks pöörlemiseks.



Joon. 83. Täiendvärvuste diagramm.

ribaga, siis näeme ekraanil valge triibu asemel rohekassinist. Paberriba kõrvaldades saame uuesti valge valguse.

Järelikult punane ja rohekas-sinine annavad koos valge valguse.

Kahte värvust, mis liitudes annavad valge valguse, nimetatakse täiendvärvusteks.

Kui katta kordamööda spektri iga värvust üksikult, saadakse eelkirjeldatud viisil igale värvusele tema täiendvärvus. Katsete tulemused on antud diagrammis (joon. 83), kus täiendvärvused on asetatud vastamisi ühe diameetri otstesse.

60. Spektri värvuste koostamine.

Katsed näitavad, et punase ja rohelise liitmisel saab kõiki vahepealseid värvusi, näit. oranži, kollast, kollakas-rohelist ja muud, kui punase valguse hulka järjest vähendada ja rohelise hulka suurendada. Liites rohelist ja violetset mitmesuguses vahekorras, saab kõiki nende vahel olevaid värvusi: rohekas-sinist, helesinist, tumesinist.

Kõige lihtsamalt võime eeltoodus veenduda järgmise katse abil.

Koostame ketta kahest monokromaatilist värvi sektorist, näiteks punasest ja rohelisest, ja asetame ketta tsentrifugaalmasina teljele ning paneme selle kiiresti pöörlema. Kui valida head ühtlased värvused, siis saab silm, vaadeldes pöörlevat ringi, mõnesuguse vahepealse värvuse aistingut. Sektorite kiirel vaheldusel ei jõua veel aisting ühe sektori värvusest silmas kustuda, kui sinna asemele tekib juba teine. Nii toimub värvuste liitumine otse silmas. Muutes sektorite võrdlevat suurust, võib saada mitmesuguseid vahepealseid värvusi.

Harjutusi (8).

1. Miks kasutatakse valge valguse lahutamise katses nimelt kitsast pilu?
2. Miks, vaadeldes esemeid läbi prisma ilma piluta, pole näha spektrit, vaid ainult kujutise ümber mitmevärvilist äärist?
3. Missuguse värvuse saame, kui kiiresti pöörata ketast, mille üks pool on punane ja teine rohekas-sinine?

4. Missuguse värvuse saame, kui kiiresti pöörleva ketta pooled on täiendvärvilised (proovida katseliselt)?

5. Missuguseid värvusi võib näha, kui kiiresti pöörata ketast, mille üks osa on roheline ja teine violetne, kusjuures värviliste pindade suurust võib muuta (proovida katseliselt)?

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Mis on valge valguse dispersioon?
2. Kuidas seletub valge valguse lahutamine värvilisteks?
3. Millest koosneb valge valgus?
4. Mis on spekter?
5. Kuidas lahutada valge valgus värvilisteks?
6. Mis ülesanne on prisma valguse lahutamisel?
7. Kuidas tuleb asetada prisma pilu suhtes?
8. Missugune on spektri värvuste järjekord?
9. Kuidas muutuvad kiirte murdumisnäitajad ühest spektri äärest teiseni?
10. Mis on valge valguse süntees?
11. Kuidas toimetada valge valguse sünteesi?
12. Missuguseid värvusi nimetatakse täiendvärvusteks?
13. Kuidas leida üht paari täiendvärvusi?
14. Mitmest värvusest võib koostada kõik spektri värvused?
15. Kuidas koostada kahest värvusest kõiki vahepealseid värvusi?

61. Kuumutatud kehade mitternähtav kiirgamine.

Uurides termomeetri abil üksikute spektri osade soojuselist toimet, avastas inglise füüsik Herschel 1800. a., et soojenemine ilmneb ka väljaspool nähtavat spektrit, punaste kiirte taga. See soojenemine selgitas, et spektris on ka silmaga mittetajutavaid kiiri, mis kannavad energiat nagu nähtavadki kiired. Nende asukoha järgi punaste kiirte taga nimetati neid *infrapunasteks* kiirteks.

Nüüd uuritakse infrapunaseid kiiri elektritermomeetrite (bolomeetrite) abil. Infrapunaste kiirte piirkonna moodustavad lained pikkusega 770 kuni 342 000 millimikronit

(0,3 mm)¹. Nende lainete võnkesagedused on piirides $390 \cdot 10^{12}$ kuni $0,9 \cdot 10^{12}$ võnget sekundis. Kui valguse dispersiooni katses juhtida spekter baariumtsüanoplatinaadiga kaetud ekraanile, siis hakkab see sool siniste ja violetsete kiirte mõjul rohekalt kiirgama. See kiirgus ei piirdu nähtavate violetsete kiirte asukohaga, vaid ulatub ka kaugele spektri violetse otsa taha.

Ka spektri fotografeerimisel osutab fotoplaat muutusi kaugele üle nähtava violetse otsa.² Need katsed tõendavad, et valge valguse allikas kiirgab muu hulgas laineid, mis on lühemad kui violetse valguse lained.

Kiired, mis asuvad nähtava spektri violetse ääre taga, avastati 1801. a. J. Ritteri poolt ja nimetati ultraviolettkiirteks.

Nüüd on ultravioletsed kiired läbi uuritud fotografeerimise teel lainete piirkonnas violetse valguse äärest alates, pikkusega 393 millimikronist kuni 10 millimikronini.

Lainepikkuste ja võnkesageduste tabel.

Spektri piirkond	Lainepikkus millimikronites	Võngete arv sekundis
Infrapunase piir	342 000	$0,9 \cdot 10^{12}$
Punase piir	770	$390 \cdot 10^{12}$
Joon A punases osas ³	759	$395 \cdot 10^{12}$
„ C oranžis „	656	$457 \cdot 10^{12}$
„ D kollases „	589	$509 \cdot 10^{12}$
„ E rohelises „	527	$570 \cdot 10^{12}$
„ F helesinises „	486	$617 \cdot 10^{12}$
„ G sinises „	431	$697 \cdot 10^{12}$
„ H violetses „	397	$756 \cdot 10^{12}$
Violetse osa piir	393	$763 \cdot 10^{12}$
Ultravioletse osa piir	10	$30\,000 \cdot 10^{12}$

¹ Mikron (μ) = 0,001 mm; millimikron ($m\mu$) = 0,001 μ .

² Selle katse juures peavad vajalikud prismad ja läätsed olema kvartsist (§ 66) või tuleb kasutada difraktsioonispektrit.

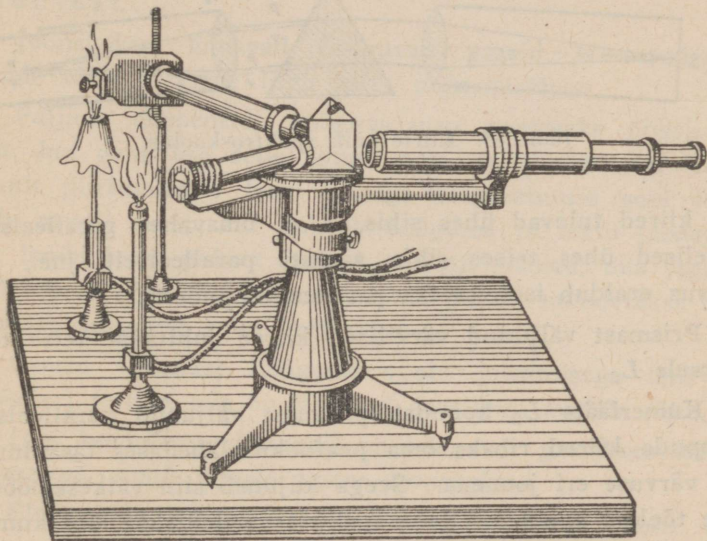
³ Tähtedega A, B, ... märgitakse kindlaid spektraaljooni, mille asendit selgitab § 71.

Vastavad sagedused on $763 \cdot 10^{12}$ kuni $30\,000 \cdot 10^{12}$ võnget sekundis.

See tabel ei hõlma kõiki tuntud võnkumisi. Teist liiki võnkumisi tekitatakse ainult teisel viisil kui seni vaadelduid.

62. Kiirgusspektrite liigid.

Samade vahenditega, mis andsid volta kaarleegi või hõõglambi spektri, võib saada spektri igasuguselt hõõguvalt kehalt.



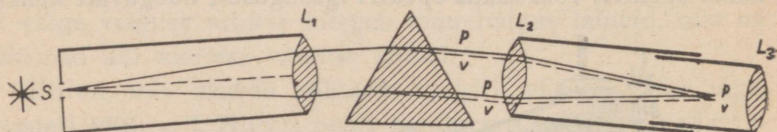
Joon. 84. Spektroskoobi väline kuju. Lähema vasakpoolse toru ülesandeks on skaalale projitseerimine.

Kõige hõlpsam on uurida spektreid niinimetatud spektroskoobi abil.

Spektroskoobi väline kuju on antud joonisel 84; kiirte käiku näitab joonis 85.

Spektroskoobi peaosadeks on kaks toru läätsedega ja prisma. Esimeses torus on lääts L_1 , mille peafookuses asub pilu S .

Uuritava valgusallika kiired valgustavad pilu S ja langevad selle kaudu hajuva kimbuna läätsle L_1 , mis koondab nad paralleelkiirte kimbuks. Edasi minnes tungib see kimp läbi prisma ja jaguneb värvilisteks kimpudeks. Kõik puna-



Joon. 85. Kiirte käik spektroskoobis.

sed kiired tulevad ühes sihis, s. o. omavahel paralleelselt, rohelised ühes teises sihis samuti paralleelselt jne., iga värvus eraldub iseseisvaiks paralleelkimpudeks.

Prismast väljunud värvilised kiired juhitakse teise toru läätsle L_2 .

Kumerlääts L_2 koondab prismast väljunud paralleelsete kimpude kiired ribaks oma peafookuselähedases tasapinnas, iga värvuse eri joonena. Seega kujuneb siin väikesemõõduline tõeline spekter. Seda spektrit vaadeldakse läbi kumerläätsle L_3 sama toru teises otsas. Lääts L_2 asetatakse nii, et spekter asub läätsle L_3 lähemal kui tema peafookus. Siis näeme läbi läätsle L_3 spektri näilikku suurendatud kujutist. Lisatoru ülesandeks joonisel 84 on mõõteskaala projitseerimine.

Spektrit, mida annavad hõõguvad kehad, nimetatakse kiirgusspektriks. Uurimustega on kindlaks tehtud järgmised kiirgusspektrite tüübid.

1. Pidev spekter, lünkadeta, sisaldab kõiki värvilisi kiiri.

Pideva spektri annavad hõõguvad tahked kehad ja vedelikud¹, näiteks hõõguv süsi, hõõguvad ja sulatatud metallid.

Pidev spekter on kõigil hõõguvatel tahketel ja vedelatel ainetel ühesugune, vaatamata keemilisele koostisele.

2. Joonspekter koosneb tumedate lünkadega eraldatud üksikutest värvilistest joontest.

Joonspektri annavad hõõguvad gaasid ja aurud, kui nende rõhk ei erine liiga palju normaalrõhust.

Paljude elementide hõõguva auru saamiseks piisab sellest, kui pannakse selle aine soola teri gaasitule, vahel ainult piirituslambi leeki. Leegi temperatuuris sool laguneb, metall aurab, aur hakkab hõõguma ja tekib joonspekter lambi leegi pideva spektri taustal. Ained, mis lagunevad ainult väga kõrge temperatuuri juures, muudetakse hõõguvaiks aurudeks volta kaarleegis.

Gaasid pannakse hõõguma voolu juhtimisega läbi nn. Geissleri torude, mis on täidetud gaasidega madala rõhu all.

Igal keemilisel elemendil on hõõguvas gaasilises olekus erisugune, ainult temale omane joonspekter.

Elementide joonspektrid erinevad üksteisest joonte värvuselt (asukohalt), arvult ja joonte tugevuselt niihästi nähtavas kui ka nägematus spektri osas.

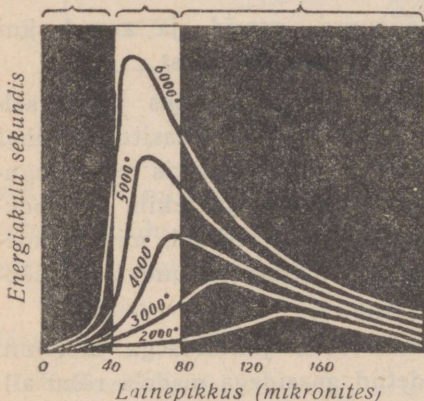
On olemas ühe- ja mitmejoonelisi spekterid, nagu näit. raua aurul.

¹ Gaasi, küünla ja õlilambi leegi pideva spektri annavad leegis hõljuvad hõõguvad söeterakesed (tahm).

63. Kiirguse sõltuvus temperatuurist.

Et määrata kiirgusenergia hulga sõltuvust temperatuurist, pannakse spektrisse bolomeetri (elektritermomeetri) mustapinnaline metall-lint, millele langev kiirgamine muundub soojuseks. Asetades lindi serviti kõigisse spektri osadesse, võib mõõta energiat pideval lainepikkuse muutusel, sest lindi paksus on ainult 0,01 mm.

Näh-
Ultraviolet- tav sed kiired ala Infrapunased kiired



Joon. 86. Energia jaotus absoluutselt musta keha spektris.

lab täielikult kehale väljast langenud kiirgusenergia.

Praktikas võib pidada absoluutselt mustaks kehaks tahket õõneskeha, millel on väike avaus ja tahmane sisepind. Väikese ava kaudu kehasse tunginud kiirgus peegeldub sise-pinnal mitmekordselt ja tegelikult enam midagi välja ei pääse. (Absoluutselt musta keha näiteks on silma võrkkest silmaavaga).

Kui valmistada absoluutselt must keha pika asbestist silindri kujul väikese avausega aluses ja mähkida teda tra-

Mõõtmise tulemused on kantud graafikule joonisel 86. Abstsissid on võetud võrdeliselt lainete pikkustega, ordinaadid on võrdelised energiahulgaga, mida annavad vastava pikkusega lained.

Joonise 86 andmed kehtivad absoluutselt musta keha kohta.

Absoluutselt mustaks kehaks nimetakse keha, mis nee-

diga, siis saab seda keha soojendada elektrivooluga mitmesuguste temperatuurideni. Teoreetilised uurimused energia jaotuse kohta mitmesuguste temperatuuride juures hõõguvate absoluutselt mustade kehade spektris andsid tulemusi, mis on esitatud joonisel 86.

Vastavalt valgusallika mitmesugusele temperatuurile on joonisel viis graafikut. Nende vaatlusest selgub:

1) kehasst väljakiirgava energia üldhulk¹ kasvab temperatuuri tõusuga;

2) erineva pikkusega lained kannavad energiat erineval hulgal;

3) energia maksimum, mis on teatava temperatuuri juures ühe lainepikkuse piirkonnas, nihkub temperatuuri tõustes lühemate lainete poole;

4) peaaegu kõigi maiste kiirgamisallikate energia maksimum on infrapunaste kiirte piirkonnas; ainult kõrgeima temperatuuriga — 4000°-se volta kaarleegi energia maksimum on punastes kiirtes².

Igale temperatuurile vastab kindla pikkusega laine, mille kiirgamise osatähtsus on teistest suurem.

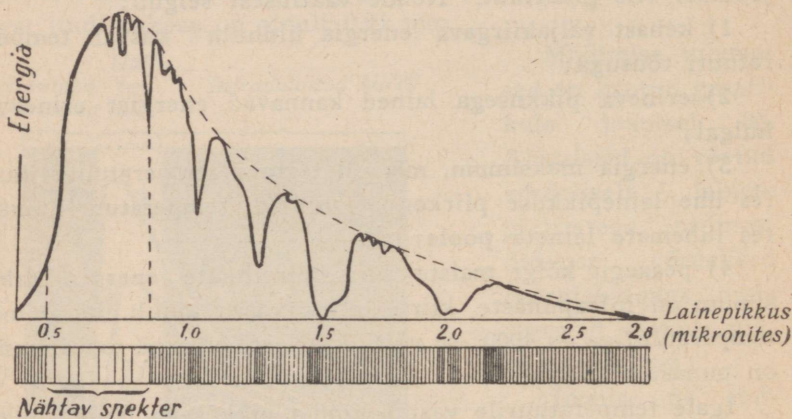
Niisugune energia jaotus lainete järgi kujuneb ainult absoluutselt musta keha kiirgamisel. Kehad, mis pole absoluutselt mustad, annavad teistsuguseid graafikuid; siiski on needki üldiselt samalaadilised.

Joonise 87 kõverjoon näitab energia jaotust Päikese spektris. Joonisest nähtub, et: 1) kõige enam energiat kan-

¹ See on võrdeline pinnaga, mis on piiratud graafikuga, abstsissteljega ja äärmiste ordinaatidega.

² Erandiks on O. Lummeri 1915. a. katse volta kaarleegiga 20-atmosfäärilise rõhumise all; selle leegi temperatuur oli 7500° ja tema spektri energia maksimum oli helesinises osas; teiseks erandiks on volfram, mida on pandud hõõguma äkilise väga tugeva vooluga 28000°-selt. Neid valgusallikaid ei ole seni veel tehniliselt kasutatud.

navad kollased kiired; 2) kollastelt kiirtelt infrapunaste poole langeb energia hulk aeglaselt, ultravioletsete kiirte poole on langemine kiire; 3) mittenähtavate kiirte energia üldhulk on väga suur; 4) graafiku järsud vajumised nähtava ja nägematu spektri üksikuis osades tuleb panna neeldumiskoorte arvele (§ 66).



Joon. 87. Energia jaotus Päikese spektris.

Päikese konstandiks nimetatakse energiahulka, mis langeb Päikeselt ühe minuti jooksul kiirtele risti asetatud 1 cm^2 pinnale Maakera atmosfääri piiril. Tema suurus on 1,94 kalorit.

Maapinnale jõuab ligikaudu pool sellest energiast; üksikuhtumeil sõltub maapinnale jõudnud energia hulk atmosfääri seisukorrast.

Selle põhjal, et Päikese kiirgusenergia maksimum on kollastes kiirtes, võib teha ligikaudseid oletusi Päikese fotosfääri pinna temperatuuri kohta. Arvestused annavad 6000° absoluutskaala järgi.

64. Kiirguse muutumine temperatuuri muutumisel.

Uurimused spektri energia jaotuse kohta mitmesuguse temperatuuri juures annavad võimaluse luua üldist kujutlust kehade energia kiirgusest.

Kehad kiirgavad energiat igasuguse temperatuuri juures. Madalate temperatuuride juures kiirgavad kehad infrapuna-seid kiiri, mis vastavad pikkadele lainetele ja energia üldine hulk on väike. Temperatuuri tõusul lisandub endistele kiir-tele uusi, lühemalainelisi; energia üldhulk kasvab ja energia maksimum nihkub lühemate lainete poole.

Ainult temperatuuri tõusul üle 500° lähevad nähtava spektri esimesed, s. o. punased kiired energia üldhulga kasvades niivõrd intensiivseks, et hakkavad mõjutama silma. Lõpuks, kui temperatuur on üle 1000° , on ilmunud ka violetsed kiired, tekib kogu nähtav spekter, algab valge hõõgu-mine ja selle järel ilmuvad ka ultravioletsed kiired.

Kehad vahetavad omavahel alaliselt kiirgust. Kõrgema temperatuuriga keha kiirgab aga ajaühikus rohkem ener-giat, kui ta saab seda teistelt kehadelt; tema energia üld-hulk kahaneb, keha jahtub. Madalama temperatuuriga keha neelab aga energiat rohkem, kui ta välja kiirgab, ta soojeneb.

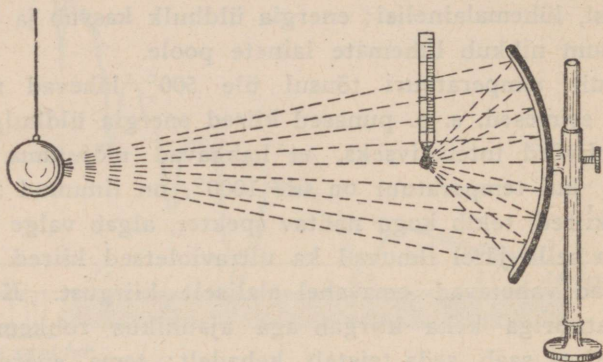
Kõigest eelnenust järgneb, et valgusenergia on ainult väike murdosa sellest energiast, mida hõõgub keha välja kiir-gab. Kõige suurem osa — ligi 40% kiirgust tuleb kehalt valguse kujul, kui keha temperatuur on 6700° absoluutskaala järgi. Järgneval temperatuuri tõusul kasvab ultravioletsete kiirte intensiivsus tunduvalt ja nähtava kiirguse osatähtsus hakkab uuesti langema.

65. Mittenähtava kiirguse levimine keskkondades.

See asjaolu, et mittenähtavad kiired on avastatud nor-maal- ehk prisma-spektrites, tähendab, et mittenähtav kiirgus levib nähtavate kiirtega ühiste reeglite järgi: ühtlases kesk-

konnas lähevad nad sirgjooneliselt; kohates tõkkeid ja avasid, mille mõõted on lähedased nende lainete pikkusele, alluvad difraktsioonile, kusjuures lained interfereeruvad; kahe eri keskkonna piire ületavad lained murdumisega.

Joonisel 88 on näidatud infrapunaste kiirte peegeldumise katse Picté peegli. Nõgusa metallpeegli ette pannakse soojendatud keha, mis levitab infrapunaseid kiiri. Kui peegli vastavas fookuses on tükike püroksiliinvatti või termomeeter,



Joon. 88. Mittenähtavate kiirte peegeldumine.

siis vatt süttib, termomeeter aga näitab temperatuuri tõusu. Fookusesse asetatud kehade soojenemine tõendab, et mittenähtavad kiired peegeldusid ja koondusid peegli fookusesse, kus tekitasid temperatuuri tõusu.

Kõik katsed kinnitavad, et temperatuurse kiirguse mittenähtavad kiired levivad ja tungivad läbi keskkondade piiride, alludes samadele seadustele, mis on kehtivad nähtavate kiirte kohta.

66. Kehade läbipaistvus.

Igasugused kiired, sattudes keha pinnale, osalt peegelduvad, osalt tungivad kehasse. Hästi poleeritud keha pinda nimetatakse peegelpinnaks. Kui pind pole sile ja hajutab

temale langeva valge valguse kõiki värvilisi kiiri samas vahekorras, siis nimetatakse seda pinda valgeks.

Kui pind peegeldab temale langeva valguse värvilistest kiirtest ainult ühe osa, lastes ülejääva tungida kehasse, siis osutub pind värviliseks. See värvus vastab nende värviliste kiirte segule, mida pind peegeldab kiirte üldkogusest ja mis kuuluvad pinnale langenud valge valguse koostisse. Nii seletub lillede, loomade ja anorgaaniliste kehade värvus. Sellest oleneb värviliste kudede ja igasuguste värviliste mitteläbipaistvate kehade värvus. Tuleb märkida, et kui keha on suuteline peegeldama ainult mingi kindla lainepikkusega kiirgust, oleneb tema värvus ka pealelangeva valguse koostisest. Tükk punast kalevit on spektri punases osas eredavärviline, kollases osas nõrgavärviline, kõigis teistes spektri osades must.

Keha, mis neelab kogu pealelangenukiirguse, nimetatakse absoluutselt mustaks kehaks. Temale kõige lähem on tahm. Keha on läbipaistev, kui kiired saavad temast läbi tungida. Seda tavalist kujutlust läbipaistvast kehast tuleb nüüd märgatavalt piirata. Nimetatakse ju läbipaistvaiks harilikult ainult neid kehi, mis valguse kiiri läbi lasevad. Täiesti läbipaistvaid kehi pole olemas. Keha läbipaistvus on kehtiv ainult teatavate lainepikkuste kohta. Üks ja sama keha on teatavate kiirte jaoks läbipaistev ja ei ole seda teiste kiirte suhtes. Lainepikkuse muutudes muutub ka valguse omadus tungida läbi keha neeldumiseta või üldse mitte läbi tungida. Ei ole ühtki lainepikkust, mille suhtes oleks mõni keha täiesti läbipaistev: vähemal või suuremal määral neelab iga keha tema poolt läbilastavaid kiiri.

Kui tugevalt hõõguva valgusallika ette panna mitmesuguseid aineid ja vaadelda läbitunginud valguse difraktsioonispektreid ning kõrvutada neid hariliku pideva spektriga, siis võib märgata, missuguse pikkusega lained on selle aine poolt neelatud ja missuguste suhtes on ta läbipaistev.

Seesugused katsed näitavad, et nähtava valguse suhtes läbipaistvad ained — vesi, jää, maarjas ja klaas — on mitte-nähtavate kiirte enamusele läbipaistmatud. Keedusool, väävel-süsinik ja osoon on nähtavatele ja infrapunastele kiirtele läbipaistvad, kuid ultravioletsetele läbipaistmatud. Kvarts on ka ultravioletsete kiirte suhtes läbipaistev.

Joodi lahus väävelsüsinikus ja eboniit lasevad läbi ainult infrapunaseid kiiri, olles teiste suhtes läbipaistmatud.

Sellest järeldame, et klaasprisma ei sobi prismaatilise spektri tekitamiseks, kui on tarvilik, et spekter sisaldaks ka nägematut osa. Sääraste elektrilampide (elavhõbeda-) kestad, millelt tahetakse saada ultravioletseid kiiri, peab tegema kvartsist.

Aine võib olla ka erisuguselt läbipaistev üksikute nähtavate mitmesuguse pikkusega lainete suhtes. Sellest oleneb kehade värvus, kui neid vaadelda läbivas valguses, nagu see on nn. värvilistel vedelikkudel, mitut liiki klaasidel, kristallidel jne.

Kui läbi pilu juhitud valge valguse kiirte teele asetada enne prisma hea punane klaas, siis näeme ekraanil ainult punast triipu vastavas spektri osas, kuna kõik teised värvused puuduvad.

Korrates sedasama roheline klaasiga, näeme ekraanil endise spektri keskosas kollast, rohelist ja rohekassinist värvust üksikute triipudena. Läbi violetse klaasi jääb järele spektri violetne osa ja kitsas triip punases osas.

Et vaadelda vedelikkude värvusi, valatakse vedelik risttahukakujulisse kitsasse klaasanumasse ja asetatakse see valgete kiirte teele. Läbi vasevitrioli lahuse (sinine) pääseb spektri sinine osa, neeldumine on ühekülgne. Läbi kloorvase lahuse (roheline) lähevad spektri keskosad, neeldumine on kahekülgne. Klorofüllil lahus neelab ribadena kõrvutiseisvad osad punaste ja oranž-kiirte piirkonnas, piiratud osa oranž-

kollaste kiirte piirkonnas, üksikuid kiirte kimpe kollase lõpul ja roheline algul; kogu sini-violetne piirkond on nõrge-
nenud.

Järeldus katsetest: *läbipaistvad värvilised kehad neelavad ühe osa pealelangevast valgest valgusest, teise osa lasevad läbi; läbitulnud värviliste kiirte segu kujundab keha värvuse.*

Tumedate ribadega spektrit, mis on saadud keha läbinud valgest valgusest, nimetatakse neeldumis- ehk absorptsiooni-
spektriiks.

Õhukeste kihtidena näivad õhk, vesi, jää, klaas, eeter ja palju teisi läbipaistvaid kehi värvitutena. Paksudes kihtides ilmneb, et need ained neelavad kiiri teatava valiku järgi ja nad osutuvad värvilisteks. Tuletagem meelde jääpankade sinakat värvust ja vee värvust. Ja edasi võib tähele panna: läbipaistmatuna tuntud keha osutub väga õhukeses kihis läbipaistvaks. Isegi metallid muutuvad väga õhukese lehe kujul teatava pikkusega lainetele, ka valguslainetele, läbipaistvaks, nagu näit. kullast leht, mis on vastu valgust vaatamisel roheline.

Valgusele läbipaistev keha kaotab osa sellest omadusest, kui temas hõljuvad teiste ainete, teise murdumisnäitajaga osakesed. Nende piiridel tekivad hulgalised peegeldumised ja valguse kiired ei jõua paksust kihist läbi tungida. Nii kahaneb õhu läbipaistvus, kui temas on kujunenud palju vee auru või hõljub palju tolmu. Et varjata vaenlase eest kolonide ja laevade liikumisi ja kahurväe asukohti, kasutatakse sõjas „suitskatteid“, vähendades sihilikult õhu läbipaistvust.

Selle üle võib lugeda V n u k o v i raamatust „Физика и оборона страны“ 2. osa § 48.

67. Värvide segamine.

Eelnenud arutlused loovad füüsikalise aluse tehnikas ülitähtsale värvide segamisele. Värvide segamine erineb spektri värvuste

liitmisest. Et määrata kahe või mitme värvi segu värvust läbiminevas valguses, tuleb algul igat värvi senisel viisil üksikult analüüsida. Kuna näiteks kollane värv laseb läbi oranže, kollaseid ja rohelist kiiri, sinine värv aga rohelist, helesiniseid ja siniseid kiiri, siis segu läbivad takistamatult ainult rohelised kiired, kuna kõik teised on kinni peetud ühe või teise aine poolt. Segu värvus osutub roheliseks.

Mitme värvi segamisel kujuneb niisugune segu värvus, mida kõik segatavad värvid ühtaegu läbi lasevad.

Samal viisil määratakse ka segavärvus värvilt peegeldumise puhul, sest peegeldumine ei toimu aine geomeetrilisel pinnal, vaid väga õhukeses pindkihi piirkonnas, mille sees tekib jällegi valikneeldumine, s. o. üksikute värvide erisugune kinnipidamine.

Harjutusi (9).

1. Missuguseid kiiri lasevad läbi kaks kokkupandud klaasplaati, üks sinine, teine roheline (vaata § 56)? roheline ja violetne? punane ja violetne?

2. Missuguse värvusega on kloorhõbeda ja vasevitrioli lahused, kui neid valgustada läbi punase klaasi? roheline? violetse?

3. Mis värvusega on punane rätik sinises valguses?

4. Üks värv laseb läbi kollaseid, rohelisti ja helesiniseid kiiri, teine — punaseid, kollaseid ja rohelisti kiiri, kolmas — rohelisti, helesiniseid ja siniseid kiiri. Missugused kiired tungivad läbi nende värvide segu?

5. Missuguses järjekorras paistaksid värvilised kiired päikese loojamineku lõpphetkedel ja tõusu esimesel momendil, kui poleks valguse hajumist atmosfääris?

6. Miks näib kuu olevat kuuvarjutuse ajal tumeda kirsspunase värvusega?

68. Hõõguvate aurude neeldumisspektrid.

Kiirte neeldumisahtuste hulgas väärrib erilist tähelepanu valge valguse neeldumine hõõguvates aurudes ja gaasides, mis annavad erisuguseid kiirguse joonspektreid.

Kui dispersiooni katses (joon. 80) oleksid valge valguse allika ja pilu vahel hõõguvad naatriumi aurud, siis endisest

pidevast spektrist puuduksid ekraanil kaks kollast joont samas paigas, kus hõõguva naatriumi auru kiirgusspektris oleks olnud heledad jooned. Nende kohal on nüüd tumedad jooned.

Kui aga valge valguse kiirte teel asub leek hõõgivate kaaliumi aurudega, siis ilmuvad pidevas spektris tumedad jooned just seal, kus oleks hõõguva kaaliumi auru kiirgusspektri värvilised jooned.

Täpselt samuti on lugu, kui valge valgus lasta läbi hõõguva raua auru: siis on endises pidevas spektris mitusada tumedat joont, vastavalt sama suurele heledate joonte arvule raua auru kiirgusspektris.

Kui valge valgus tungib läbi hõõgivate aurude, siis pidev spekter on lõhestatud tumedate joontega ja triipudega, kujundades nn. neeldumis- ehk absorptsioonispektri.

Iga elemendi kiirgus- ja neeldumisspekter on omavahel ümberpööratavad: neeldumisspektri tumedatele joontele vastavad täpselt kiirgusspektri värvilised jooned.

Kui kaks allikat — valge valguse allikas ja selle valguse teel asuv hõõguv aur — kiirgavad ühises sihis võrdse valguse hulga, jääb spekter pidevaks. Kui aga neelava allika valgusjõud on suurem kui kiirgaval allikal, siis tulevad pideva spektri taustal auru kiirguse värvjooned tugevamalt esile.

69. Kirchhoffi seadus neeldumise ja kiirguse kohta.

Et hõõguva auru kiirgusspekter on sama auru neeldumisspektri suhtes ümber pööratud, võib seletada ainult sellega, et hõõguv aur neelab temale langeva valge valguse energiast neid värvi kiiri, mida ta ise kiirgab. See on seesama resonantsi nähe, mida kohtasime pendlite võnkumisel ja heliavalduis. Hõõguv aur neelab nende lainete energia, mida ta ise antud momendil välja saadab.

Uurides neid ja selletaolisi nähtusi, jõudis R. Kirchhoff 1859. a. järgmise üldseaduse juurde. Iga keha neelab neid kiiri, mida ta ise samades tingimustes kiirgab.

Keha neelamisvõime mõõtmiseks on järgmine menetlus kõige enam tarvitata: jääva tugevusega allika valgus heidetakse metallist kettale, mille pind on uuritava ainega kaetud. Teades ketta massi ja erisoojust ning mõõtes tema temperatuuri tõusu ühe sekundi kohta, võib arvutada, kui palju soojust neelas pind ühes sekundis. Harilikult ei väljendata aine neelamisvõimet absoluutsetes mõõtühikutes, vaid võrdlevalt tahmaga, mille neelamisvõime märgitakse 100-ga.

Valgustades mitmeid aineid ühesuguselt, võib neid seada järjekorda neelamisvõime suhtes. Kui valgustamisel hõõguva plaatinaga hinnata tahma neelamisvõimet 100-ga, siis tušil on see 95, tinavalgel 56, metallidel 13.

Üldiselt, mida valkjama on pinna värvus ja mida paremini ta on poleeritud, seda väiksem on tema neelamisvõime.

Kirchhoffi seadus on leidnud täielikku kinnitust ainete võrdleva kiirgusvõime mõõtmisel tahma suhtes.

Igal ainel on sama temperatuuri ja samade kiirte puhul neelamise ja kiirgamise võime teineteisega võrdelised.

Nii kiirgab läikiv (poleeritud) ja valge pind kõige vähem ja must matt pind kõige rohkem.

1859. aastal töötasid Kirchhoff ja Bunsen välja spektraalanalüüsi võtted, kasutades selleks keemiliste elementide omadust anda hõõguva auruna neile omaseid joonspektreid.

70. Spektraalanalüüs.

Spektraalanalüüsiks nimetatakse keha keemilise koostise määramist spektrite põhjal. Selleks pannakse terake uuritavat ainet plaatinast silmuse abil gaasilambi leeki. Lambi leegis tekivad aine

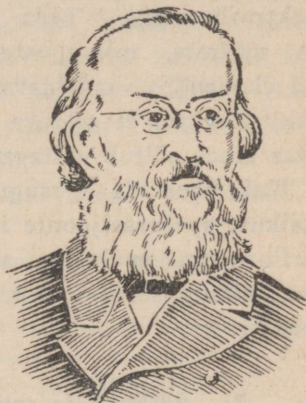
koostisesse kuuluvate elementide hõõguvad aurud; nendele sihitakse spektroskoobi pilu ja võrreldakse saadud spektrit kõigi tuntud elementide joonspektri tabelitega.

Kui näiteks uuritava aine spektris leidub värvilisi jooni, mis arvult ja asetuselt vastavad täpselt kaltsiumi hõõguva auru spektri joontele, tuleb järeldada, et uuritava keha koostises on kaltsiumi. Edasi kaltsiumi joonestikku enam ei arvestata ja võrreldakse ülejäänud joonestikku tabelitega. Kui leitakse ülejäägis kõik baariumi jooned, siis on kehas ka baariumi jne., kuni kõik uuritava spektri jooned on tabelitega võrreldud.

Leidub aga uuritavas spektris niisuguseid jooni, mis ei kuulu ühegi tuntud elemendi joonspektri koosseisu, siis järeldatakse sellest, et aines leidub senitundmatu element, mida siis püütakse keemilisel teel välja eraldada.

Nii avastati juba spektraalanalüüsi leiutamise algaastail elemendid rubiidium ja tseesium — 1860. a., tallium 1895. a., heelium leiti maa peal 1895. a., kuna päikese spektris avastati ta juba 1868. aastal.

Spektraalanalüüsi võib teostada nii kiirgamis- kui ka neeldumisspektrite uurimise kaudu.



Robert Kirchoff
(1824—1887).

¹ Robert Kirchoff sündis Kaliningradis; 1850. a. peale oli professoriks Breslaus ja 1874. a. professor Berliinis. R. Kirchoff töötas välja spektraalanalüüsi meetodi, andis valemi heli kiiruse määramiseks torus, arendas välja elektrivoolude hargnemise teooria.

Võrreldes harilikku keemilise analüüsiga, on spektraalanalüüsil suured paremused: esiteks on spektraalanalüüs erakordselt tundlik — resultaadi saamiseks jätkub aine ühe milligrammi miljondikust; teiseks saab tema abil määrata mistahes kaugustel asuvate hõõgivate kehade keemilist koostist, nagu päikese, tähtede, komeetide ja udukogude atmosfääril.

Viimastel aastakümnetel on välja arenenud kvantitatiivne spektraalanalüüs. Tema ülesandeks on spektri uurimisega ära määrata, missugustes arvulistes vahekordades esinevad elemendid vaadeldavas aines. See analüüsi võte põhineb tähelepanekul, et teatava elemendi kontsentratsioonist uuritavas aines sõltub vastavate spektraaljoonte intensiivsus.

Kui koostada igasuguste kontsentraatide jaoks tabelid üksikute spektraaljoonte intensiivsuse kohta ja võrrelda neid uuritava aine spektriga, siis saab selle võrdluse põhjal määrata, missugusel hulgal esineb elemente aines kui keemilises ühendis.

71. Päikese ja muude taevakehade spektrid.

Päikese pideva spektri nähtavas ja mittenähtavas osas on kokku ligi 20 000 neeldumisjoont. Pideva spektri valgust kiirgab päikese helendav pind, fotosfäär. Tema pidevus tähendab, et fotosfääris on hõõguvad ained kas vedelad või tohutu rõhu all olevad aurud. Kakskümmend tuhat neeldumisjoont on seletatavad sellega, et fotosfääri valge valgus läbib päikese atmosfääri, mis koosneb fotosfääri temperatuurist madalama temperatuuri juures olevatest hõõguvatest aurudest ja gaasidest. Päikese atmosfääri paksus kihis neelab iga gaas ja aur neid kiiri, mida ta ise kiirgab (Kirchhoffi seaduse kohaselt). Sellepärast on meieni jõudev päikese spekter neeldumisspekter.

Tehes selle neeldumisspektri analüüsi, võib päikese atmosfääri keemilise koostise kindlaks määrata.

Maa peal sagedamini esinevaist elementidest on päikese atmosfääris leitud vesinikku, heeliumi, hapnikku, kaltsiumi, naatriumi, kaaliumi, rauda, vaske, niklit, koobaltit, strontsi-umi, magneesiumi, kroomi jt.

J. Fraunhofer vaatles 1817. a. esimesena päikese spektri neeldumisjooni ja sellepärast nimetatakse neid fraunhoferi joonteks. Tema poolt avastatud kaheksa kõige selgemat joont on märgitud tähestiku suurte tähtedega (vaata § 61 tabel).

Planeedid ja nende kaaslased on tumedad kehad ja kiirgavad nende pinnalt peegeldunud päikese valgust; nende spekter on päikese spekter ja sellepärast nende koostist spektri põhjal määrata pole võimalik.

Kinnistähed on omapäraste spektritega isehelendavad kehad.

Spektrite järgi jagatakse tähti kolme suurde rühma¹:

Esimesse rühma kuuluvad säärase pideva spektriga tähed, milles on ainult vesiniku ja heeliumi neeldumisjooni. Seega koosneb nende atmosfäär vesinikust ja heeliumist. Nende värvus on valge või helesinakas; temperatuur on $12\,000^{\circ}$ — $20\,000^{\circ}$ piirides².

Teise tähtederühma spekter sarnaneb päikese spektriga, seega on nende atmosfääri koostis ka sarnane Päikese omaga. Need on kollakad tähed temperatuuriga 5000° kuni 7000° ³.

Kolmanda rühma spektrites on laialdased neeldumise piirkonnad. See osutab keeruliste keemiliste ühendite olemasolule nende atmosfääris. Nende värvus on punakas ja temperatuur 3000° — 3500° . Sellesse rühma kuulub enamik väikese heledusega kinnistähti.

Udukogude spektrid näitavad, et ühed nendest koosnevad gaasidest, peaaugulikult vesinikust ja heeliumist, teised aga annavad samasuguseid spektreid nagu kinnistähedki.

Komeetide sabasid on spektraalanalüüsi järgi koostiselt kolmesuguseid: ühed koosnevad lämmastikust ja süsinik-

¹ Astronoomias tarvitatakse detailsemat jaotust.

² Niisugused on Veega, Siirius, Altair.

³ Siia kuuluvad Päike, Kapella, Arktuur, Aldebaran.

oksüüdist, teised — kosmilisest tolmust, rasketest gaasidest ja metallide aurudest, kolmandate sabas on raskete metallide suuremaid osi.

72. Röntgenikiired.

Saksa õpetlane V. Röntgen avastas 1895. aastal, et elektronide vool, sattudes Crookes'i toru klaaspinna või mõne muu takistuse vastu, olles järsku pidurdatud, tekitab omapärase kiirguse. Neid kiiri tuntakse nüüd tema nime järgi röntgenikiirte nime all.

Röntgenikiirtel on järgmised omadused:

1. Nad ei kaldu magnet- ja elektriväljades, seega pole nad laetud kehakeste vool, vaid on kiired, mis sarnanevad valguskiirtele.

2. Nad *ioniseerivad* gaase, muutes neid elektrit juhtivaiks. Nende mõjul kaotab laetud elektroskoop oma laengu.

3. Nad panevad mitmed ained *kiirgama*. Seda võib näha baariumtsüanooplatinaadiga kaetud ekraanil.

4. Nad *mõjuvad fotoplaadile* nagu ultravioletsed kiired. Kolm viimast omadust võimaldavad nende vaatlust ja uurimist.

5. Paremini kui kõik varem tuntud kiirgused, *tungivad* nad läbi paksu ainekihi; sissetungimine on üldiselt seda sügavam, mida väiksem on aine tihedus. Metallidest läbitavad need kiired alumiiniumi kõige rohkem, seatina kõige vähem. Mitmesuguses astmes tungivad nad läbi taimedest, puidust, luudest, riidest.

Sellel põhineb röntgenikiirte laialdane kasutamine tehnikas ja arstiteaduses. Röntgenikiirte erineva läbitungivuse tõttu nahast, lihastest ja luudest on võimalik võtta ekraanile või fotoplaadile inimese luukere ja siseelundite kujutisi.

Võimalus vaadelda elava olevuse organismi sisemust on arstiteadusele äärmiselt kasulik; tabatakse tõve pesad inimese

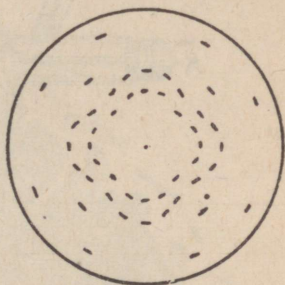
kehas, leitakse kasvajakad, organismi sattunud võõrkehad, luumurded; lihtsal viisil, kuid kindlalt selgitatakse, kas ja misugune kirurgiline abi on vajalik. Samal röntgenikiirte omadusel põhineb metallivalu kvaliteedi uurimine; kiirte abil selgitatakse, kas valatud esemes on tühimikke või teisi korrapäratusi.

6. Röntgenikiired on *polariseeritavad*. Nad *peegelduvad* ka peegli pinnalt, aga see peegeldus on diffuusne, hajuv. mitte peegli-pärane, sest et röntgenikiirte lained on nii lühikesed, et nende suhtes on ka hästi poleeritud pind ebasile; röntgenikiired alluvad murdumisele ja täielikule sisepeegeldumisele, 1912. a. avastati röntgenikiirte difraktsioon, kusjuures difraktsioonivõre aset täitis „ruumvõre“, s. o. kristall, sest tavaline difraktsioonivõre on nende kiirte jaoks liiga jämedatoimeline.

Joonisel 89 on fotoülesvõtte, nn. röntgenogramm kitsast valguskimbust, mis on tunginud läbi keedusoola (kloornaatriumi) kristalli. Keskmise laiku on tekkinud kiirte sirgjoonelisel levimisel, muud täpid põhinevad difraktsioonil. Kristallidest läbitunginud röntgenikiirte ülesvõtted on võimaldanud luua teooria kristallide ehituse kohta.

7. Peale selle on röntgenikiirte tugev *füsioloogiline toime*, — nad lõhuvad organismi rakke. Sellele omadusele on rajatud röntgeniravi. Suunates kiiri kasvajakale või mõnele teisele haiguspesale, lõhutakse haigusttekitavaid kudesid.

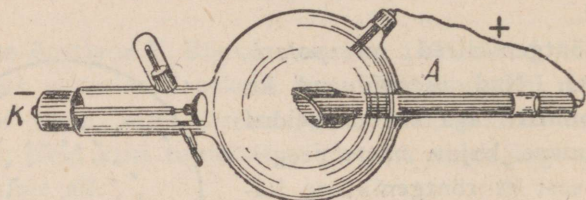
Aga seesama füsioloogiline mõju võib liialdatud kasutamisel kahjustada ka terveid kudesid.



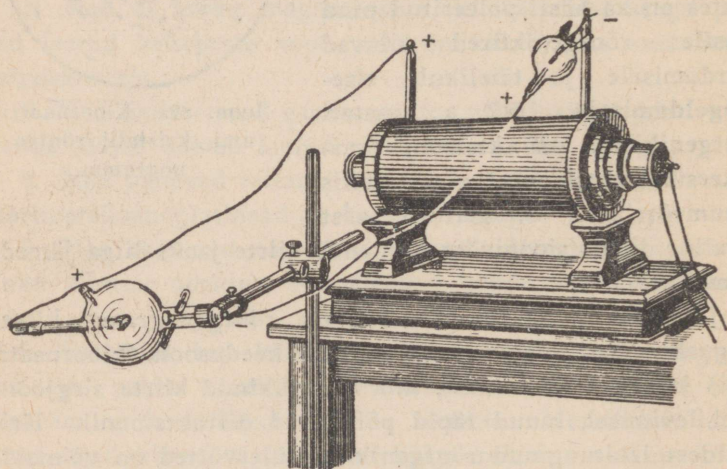
Joon. 89. Kloornaatriumi kristalli röntgenogramm.

73. Röntgenitoru ehitus.

Lihtsaim röntgenitoru on kerakujuline sissejoodetud elektroodidega õhutühi toru (joon. 90). See toru lülitakse sädeindukti sekundaarmähise vooluringi. Kuna voolu läbi-



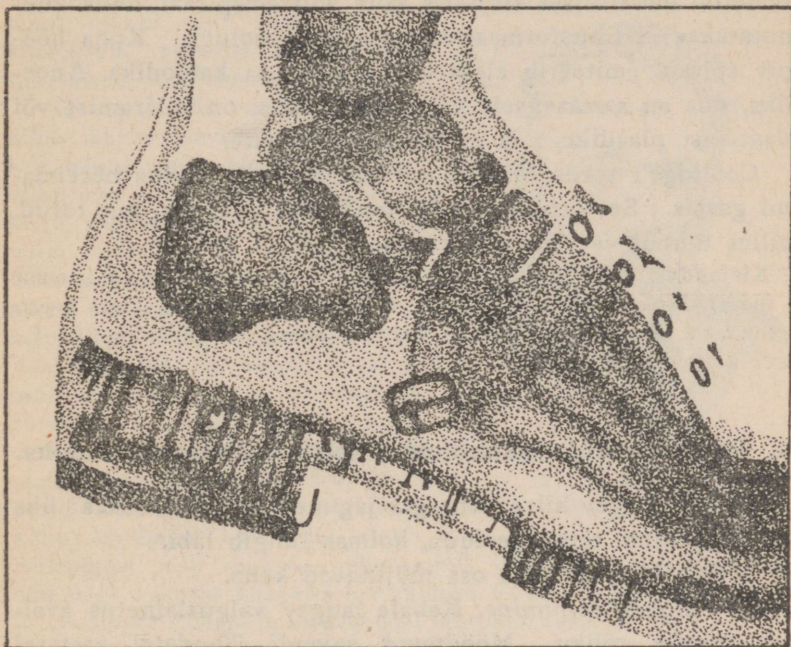
Joon. 90. Röntgenitoru.



Joon. 91. Seadis röntgeniülesvõtete tegemiseks.

des hõendusruumi katoodplaat kulub, sest et koos elektroni-
dega lendab plaadilt katoodi aineosakesi, siis on katood alu-
miiniumist, selle suhtes kõige vastupidavamast ainek-
st. Katoodkiirte, s. o. elektronide teele on pandud kiirtele kaldu
antikatood. See on platinast plaadike, mille vastu elektronid
põrkavad. Elektronide äkilise pidurduse mõjul hakkab

antikatood kiirgama röntgenikiiri. Et antikatoodele pörkavaid elektrone neutraliseerida, ühendatakse antikatood anoodiga juhtme kaudu. Elektronide põrgetest kuumeneb antikatood tugevasti ja teda jahutatakse veejoga.



Joon. 92. Röntgeniülesvõte.

Kuna röntgeni ülesvõtted ja vaatlused nõuavad ühesuunalist voolu ja induktoris indutseeritud vool on vahelduv, siis lisatakse vooluringi voolualdaja. Joonisel 91 on näha üks alaldaja tüüpe, mis on täiesti sarnane röntgenitoruga, kui selles puudub antikatood. Alaldaja toru sees on elektrodide vahemaad reguleeritud nii pikaks, et vool pääseb läbi ainult selles suunas, millises on suurem induksiooni elektromotoorne jõud (tähendab suund, mis tekib induktoris katkestamisel).

Joon. 92 kujutab röntgenikiirtega saadud fotoülesvõtet.

Uuemal ajal kasutatakse röntgenikiirte saamiseks enamasti Coolidge'i toru. See on kinnine klaastoru, milles luuakse õhu hõredus kuni 10^{-6} mm elavh. s. Temasse on joodetud metallilises silindris asuv volframspiraal, mida kuumutatakse eritransformaatorilt saadava vooluga. Kuna hõõguv spiraal emiteerib elektrone, siis on ta katoodiks. Anoodiks, mis on samaaegselt ka antikatooniks, on volframist või platinast plaadike, mis on joodetud torusse.

Coolidge'i torus toimub mitteiseseisev lahendus hõrendatud gaasis. Seetõttu töötab ta madalama pingega, kui torud, milles toimub iseseisev lahendus.

Kirjandus. Вавилов, С. И., акад. Глаз и солнце (о зрении и свете). Брегг, В., Мир света. Тумерман, Л. А., Свет и его источники. Хаустен, Р. А., Свет и цвета. Майзель, С. Р., Свет и зрение.

74. Kiirgusenergia muundumine teisteks energia liikideks.

Kehale langev kiirgusenergia jaguneb kolmeks osaks: üks osa peegeldub, teine neeldub, kolmas tungib läbi.

Ainult kaks esimest osa mõjutavad keha.

1. *Valguse rõhumine.* Kehale langev valguslainetus avaldab temale rõhku. Möödunud sajandi 70-ndatel aastatel ennustas Maxwell selle rõhu esinemise paratamatust. Kuulus vene füüsik P. N. Lebedev tõestas seda katseliselt ja mõõtis rõhu suurust tahkete ainete kohta 1900. a. ja gaaside kohta 1910. a.

P. N. Lebedevi¹ katsed kinnitasid otsustavalt Maxwelli elektro-

¹ Kuulus vene füüsik Pjotr Nikolajevitš Lebedev oli Moskva ülikooli professor. Tema teadusliku töö suursaavutuseks on valguse rõhu mõõtmiskatsed tahkete ainete ja gaaside juures. Neid katseid iseloomustab erakordne peensus ja täpsus ning neid peetakse füüsika katsetehnika kunsti eeskujuks. P. N. Lebedevi katsed avalda-

magnetilise valguse teooria õigsust ja moodustavad seega aluse moodsale kujutlusele elektromagnetismist ja valgusest.

Katsete teostamine nõudis erakordset leidlikkust, sest et valguse rõhumine väljendub pisiarvudes. Nii osutus, et päikese kiirte rõhumine risti asuvale pinnale on $0,26 \text{ mG/m}^2$.

Sellepärast on kiirte rõhumisel tohtu suur mõju mikrokoobiliselt väikeste aineosakeste liikumisele maailmaruumis.

Iga aineosake maailmaruumis allub lähima taevakeha kahesugusele mõjule: teda tõmmatakse gravitatsiooni tõttu ligi ja tõugatakse kiirte rõhumisega eemale. Esimene neist suurusist on võrdeline osakese massiga, tähendab ka ruumalaga või raadiuse kolmanda astmega, kui osake on kerakujuline. Äratõukamine on võrdeline aineosakese pinnaga, s. o. raadiuse ruuduga. Kui kujutella, et aineosakese raadius väheneb, kahaneb tõmbetung rohkem kui tõuketung (arvu vähenedes kahaneb tema kuup kiiremini kui tema ruut).

Sellepärast võib osakese pihustamisel jõuda nii väikeste mõõdeteni, et teataval kaugusel taevakehast tõukejõud ületab tõmbejõu ja aineosake eemaldub taevakehast maailmaruumi.



P. N. Lebedev
(1866—1912).

sid sügavat mõju kogu teadusmaailmale. Alles nende katsete põhjal muutus Maxwelli elektromagnetiline teooria üldtunnustatuks ja teaduses pääsis lõplikult võidule moodne vaade elektri ja magnetismi kohta. Lebedevi valguse rõhumise katsed olid lähtekohaks tähtsamate küsimuste selgitamiseks astronoomias, eriti komeetide teooria alal. P. N. Lebedev oli viljakas eksperimentaalsetes töodes ka teistel füüsika aladel, muu hulgas maamagnetismi ja elektromagnetiliste lühilainete alal. Veel on P. N. Lebedev tuntud silmapaistva organisaatorina kollektiivse uurimistöo korraldamisel. Tema rajatud on esimene suur füüsikute koolkond, millest on võrsunud paljud kaasaegsed nõukogude füüsikud. Tema kavade järgi ehitati NSVL Teaduste Akadeemia füüsika-instituut, mis kannab tema nime.

Päikesevalguse rõhk avaldab pidevalt tõukemõju komeedile kuuluvatele osakestele. Lähenemisel päikesele paiskab komeet enesest välja saba, s. o. komeedi kehast väljuvate osakeste voo. Komeetide sabad on alati Päikeselt ära pöördunud.

See seaduspärasus komeetide saba kujunemises kinnitab Lebedevi laboratoorseid katseid.

2. Kiirgusenergia kõige üldisemaks neeldumisega ühenduses olevaks nähtuseks on *soojusenergia tekkimine — kehade soojenemine*; näit. maapind soojeneb päikesepaistel.

3. *Kiirgusenergia muutub* väga sagedasti *keemiliseks*. Suureulatuslikult toimub see taimedes, kus süsihappugaas ja vesi annavad kiirte mõjul orgaanilisi vähem hapnikku sisaldavaid ühendeid. Nii muudavad taimed päikese energia toitainete ja kütuste keemiliseks energiaks. Sageli esineb ka vastupidine protsess — oksüdeerumine: vaigud muudavad värvust, orgaanilised ained kaotavad värvi (riided pleegivad, pesukangast pleegitatakse).

Valgustusel ühineb kloori ja vesiniku segu kloorvesinikuks; vesinikülihapend laguneb veeks ja hapnikuks.

4. *Kiirgava energia toimel tekivad molekulaarsed muutused*: valget fosforit valgustades muutub see punaseks fosforiks, amorfsest seleenist kujuneb kristalne seleen ja koos sellega muutub seleeni elektrijuhtivus.

Hõbeda halogeensoolad, saanud valgust, võivad mõne aine mõjutusel laguneda, eraldades metalset hõbedat. Sellel hõbeda soolade omadusel põhineb fototehnika (§ 28).

5. *Kiirgamisenergia tekitab luminestsentsi*, s. o. kehade kiirgust temperatuuri tõusuta. Nii kiirgab valge valguse paistel petrooleum sinakalt; orgaaniline värvaine fluorestseini — roheliselt; klorofüllil piirituslahus — punaselt.

Väävelkaltsium ja mõnede metallide vääveli soolad kiirgavad ka siis, kui nende valgustamine päikesest või kunstliku valgusega on lõppenud.

Kui keha kiirgab valgustamise ajal teistsuguseid kiiri kui on pealelangeval valgusel, siis nimetatakse seda fluorestsentsiks; kui kiirgamine toimub pärast valgustamist, siis nimetatakse seda fosforestsentsiks.¹

Kõigil luminesentsi juhtudel kiirgab keha energiat neelatud energia arvel, kusjuures *luminesentsil väljakiirguvad lained on enamasti pikemad kui neelatud lained, mis luminesentsi tekitasid.*²

Fluorestsentsi võib kasutada ultravioletsete kiirte nähtavaks tegemiseks, sest ka need kiired tekitavad fluorestsentsi.

Fosforestseeriva keha soojendamine suurendab algul kiirgamise eredust, kuid hiljem kiirendab nende kadumist; soojendamisel sai seega energia varu kiiremini ära kasutatud.

Seda omadust kasutatakse infrapunaste kiirte olemasolu kindlakstegemiseks. Fosforestseerivale ekraanile lastakse mõneks ajaks paista pidevat spektrit. Kui valgustamine lõpetatud, on märgata tugevnenud kiirgamist väljaspool nähtavat spektrit punaste kiirte taga. Kui pidev spekter oli päikeselt, siis võib tabada ka infrapunase osa neeldumisjooni: nende kohtadel jätkub kiirgamine ka siis, kui fosforestsents on teistes spektri osades lõppenud.

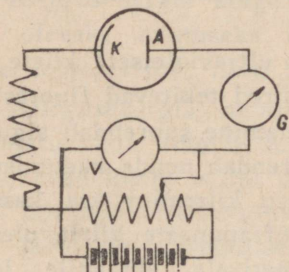
6. *Fotoelektriline efekt.* Kehale langevad valguskiired löövad kehas välja elektrone. Seda nähtust nimetatakse fotoefektiks. Väljalöödud elektronide arv sõltub kehale langevast kiirgusenergia hulgast, elektronide kiirus aga sõltub

¹ Nimetus „fluorestsents“ tuleneb fluoriidist; see on mineraal, mille juures seda nähtust esmakordselt tähele pandi.

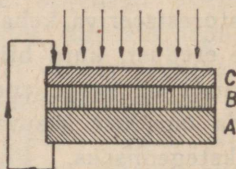
„Fosforestsents“ tuleneb fosforist, millel on kiirgamise omadus, kuigi see ei põhine fosforestsentsil.

² Luminesents leiab kasutamist ühe uuetüübilise lambi juures, mis on välja töötatud ühe nõukogude füüsikute grupi poolt akadeemik S. I. Vavilovi juhatusel. Uut tüüpi lamp hakkab elektrihõõglampi välja tõrjuma. Tema ehitusega tutvustab erikirjandus, mille nimistu on selle peatüki lõpul.

kiirte omadusest (energia kvaliteedist, lainete pikkusest). Sellisele valguse toimele alluvad kõik kehad sõltumata nende keemilisest loomusest ja füüsilisest olekust. Selle tagajärjel kaotab negatiivselt laetud metallplaat valgustamisel oma laengu ja laenguta plaat, kaotades valgustamisel elektrone, omandab positiivse laengu.



Joon. 93. Fotoelement leelis-
metalliga.



Joon. 94. Fotoelement pärssiva
kihiga.

Fotoelektrilisel efektil põhineb fotoelement, s. o. seadeldis, mis muundab valgusenergia elektrienergiaks. Tema ehitus on toodud joonisel 93. Õhutühjas balloonis on metallplaat *K* (peamiselt leelismetallist) ja metallvõre *A*. Kui lülida *A* ja *K* vooluringi ja valgustada plaati *K*, siis lendavad temast elektronid võrele *A* ja vooluringis tekib vool, mida märgib galvanomeeter *G*. Voolutugevus sõltub katodi *K* valgustuse tugevusest.

Kui elektroodidel on nii suur potentsiaalide vahe, et maksimaalse valgusvoo juures tekib küllastusvool, siis joonisel näidatud seadmes on fotovoolu tugevus võrdeline katodi pinnale langeva valgusvooga.

Laialt levinud on nn. kuprokselement või element pärssiva kihiga. Ta koosneb kolmest üksteisele asetatud plaadist (joon. 94). Vaskplaat *A* kaetakse vaskoksüüdi kihiga *B* ja selle peal on üliõhuke kiht *C* vasest, kullast või platinast.

Kui viimast valgustada, tekib vool keskmiselt oksüdeeritud plaadilt välisele plaadile, kusjuures pole vajadust eri energiaallika järgi.

Fotoelement võimaldab muundada valgusenergiat elektrienergiaks. Ühenduses elektrokõvendajatega on fotoelement oluliseks osaks mitmesugustes tundlikes automaatides, millete ülesandeks on reageerida kiirgamise intensiivsuse muutusele: valgustuse sisse- ja väljalülitamine, valgussignaali juhtimine, kehade läbipaistvust mõjutavate lisaainete analüüsimine ja sorteerimine.

Fotoelemente kasutatakse pildiraadios (kaugnägemine) ja heli reprodutseerimisel (heli-kino).

Maailmas esimese fotoelementi valmistas vene füüsik A. G. Stoletov.¹

7. *Füsioloogiline mõju.* Füsioloogiliselt eriti mõjuvad on ultravioletsed kiired. Kauasel päikesepaistel viibimisel tekivad nahal põletikud, sest et



A. G. Stoletov
(1839—1896).

¹ Aleksander Grigorjevitš Stoletov (1839—1896) — kuulus vene füüsik, Moskva ülikooli professor. Tema teaduslik tegevus hõlmas mitut füüsika ala, iseäranis silmapaistvad on tema tööd fotofekti ja ferromagnetiliste ainete magnetiseerimise uurimistes. Neil aladel ei piirdunud ta põhifaktide ja seaduspärasuse kindlakstegevamisega, vaid on loonud ka katselise uurimise uusi meetodeid füüsikas. Uurides valguse toimet elekterlahendustele gaasides, ehitas Stoletov esimesena fotoelementi ja avastas elektriliste lahenduste seaduse gaaside kohta, mis on tuntud kui „Stoletovi seadus“ ja

ultravioletsed kiired on purustanud elava organismi rakke¹. Samal alusel hävitavad ultravioletsed kiired ka baktereid ja peatavad haiguspesade arenemist organismis. Sellega on nad kasutoivad tervishoius ja arstimisel.

Harjutusi (10).

1. Kuidas saame teada neeldumisjoonte esinemist spektri mitternähtavates osades?

2. Mis juhtub Päikese spektri neeldumisjoontega täieliku varjutuse ajal, kui Kuu varjab kõiki fotosfäärist tulevaid kiiri ja ainult Päikese atmosfääri kiirgus jõuab Maa peale?

3. Missugused on Päikese kiirgusenergia toimed Maal?

4. Mitme hobujõuga võrdub Päikese kiirguse võimsus ühel maapinna ruutmeetril?

„Stoletovi konstandid.“ A. G. Stoletov avastas valguse mõjul tekkinud elektrilahenduse küllastusvoolu. See võimaldas uurida laengu lahenduse mikroskoobilist mehhanismi.

Esimesena rakendas ta voolu gaasidest läbimise uurimiseks galvanomeetrit. Gaase läbiiva elektrivoolu uurimistel kasutatakse nüüd igalpool Stoletovi meetodit.

A. G. Stoletov uuris katseliselt aine magnetilisi omadusi iseloomustavat tähtsaimat suurust — magnetilist vastuvõtlikkust. Ta määras raua magnetiseerumise võime muutuvuse seaduse olenevalt magnetiseeriva jõu muutusist. Ta leidis, et ferromagnetiliste ainete magnetiseerumise võime magnetiseeriva jõu suurenedes esialgu kasvab, aga hakkab maksimumi jõudmise järel kahanema. Nende tööde juures on Stoletov loonud uue meetodi aine magnetiliste omaduste uurimiseks, nn. ballistilise galvanomeetriga ja toroidiga (suletud rõngaga).

Stoletovi tööd magnetismi alal on nüüd aluseks elektrimasinate tehnikale, sest nende põhjal on kujunenud elektrimootorite ja dünamote arvutuse ratsionaalne teooria.

A. G. Stoletov asutas esimese füüsikalaboratooriumi Moskva ülikoolis.

¹ Kaitstes end nende vastu, kogub inimese organism pruuni pigmentainet naha alla, mis peatab kiiri pindkihis; sellest on päevitus mõõdukate kliimavööde elanikel ja tume nahavärv ekvatoriaalmaades.

5. Mitu džauli energiat saadab Päike ühele maapinna ruutmeetrile ühes tunnis, kui kiired langevad risti?
6. Missugune peaks olema kõige kasulikuma kunstliku valgusallika ligikaudne temperatuur?
7. Miks talvisel päikesepaistel lumi ei sula?
8. Miks peab fotoplaadi ilmutamisel olema punane valgustus?
9. Kas punased kiired võivad tekitada luminesentsi?

KONTROLLKÜSIMUSI.

1. Missuguseid kiiri nimetatakse infrapunaseiks? Missuguse omaduse tõttu neid avastati? Kus on nende asukoht spektris? Missugused on nende lainepikkused, võrreldes nähtavate kiirtega?
2. Vastata samadele küsimustele ultravioletsete kiirte kohta.
3. Missugused on kiirgusspektrite tüübid?
4. Mida nimetatakse pidevaks spektriks? Kuidas teda saada?
5. Mida nimetatakse joonspektriks ja kuidas teda saada?
6. Kuidas uurida energia jaotust spektris?
7. Missugune on energia jaotus Päikese spektris?
8. Missugune on energia jaotus kunstlikkudes valgusallikates?
9. Kuidas muutub kiirgus temperatuuri tõusul?
10. Kuidas nimetatakse keha, mis neelab kõiki temale langevaid kiiri?
11. Kuidas nimetatakse keha, mis kõik temale langevad kiired läbi laseb?
12. Kas kehad on iga liiki kiirte suhtes ühteviisi läbipaistvad? Tuua näiteid erineva läbipaistvuse kohta.
13. Millest sõltub läbipaistvate kehade värvus? Kuidas seda seletada?
14. Millest oleneb mitteläbipaistvate kehade värvus? Kuidas seda seletada?
15. Millest sõltub mitme värvi segu värvus?
16. Mille poolest erineb värvainete segamine spektri värvuste segamisest?
17. Mis on neeldumisspekter? Kuidas teda saada?
18. Missugune seos on aine kiirgus- ja sama aine neeldumisspektri vahel?
19. Mis on spektraalanalüüs?
20. Missuguste spektrite abil võib korraldada spektraalanalüüsi?

21. Missuguse riistaga toimetatakse spektraalanalüüsi?
22. Missugused on spektroskoobi tähtsamad osad?
23. Mis tähtsus on spektraalanalüüsil?
24. Milles seisab Kirchhoffi seadus neeldumise ja kiirgamise kohta?
25. Missugune on päikese spekter?
26. Mis on fraunhoferi jooned?
27. Kuidas põhjendada fraunhoferi jooni?
28. Mida saab teada fraunhoferi joonte abil?
29. Milleks muutub keha poolt neelatud energia?
30. Esitada näiteid kiirgusenergia muundumise kohta soojuseks.
31. Tuua näiteid kiirgusenergia muundumise kohta keemiliseks energiaks.
32. Tuua näiteid kiirgusenergia füsioloogilise toime kohta.
33. Mis on luminesents?
34. Kuidas olenevad luminesentsil tema lainepikkused neelatud energia lainete pikkusest?
35. Missugustel päikesevalguse kiirtel on peamiselt soojuslik toime? keemiline? füsioloogiline?
36. Mis on fotoefekt ja kuidas teda kasutatakse tehnikas?
37. Kui suur on valguse rõhk ja mis tähendus on temal looduses?

Kirjandus. Вавилов, С. И., акад., Холодный свет. Лёвшин, В. Л., Холодный свет. Лёвшин, В. Л., Светящиеся составы. Жиров, Н. Ф., Люминофоры. Зворыкин, В. К. и Вильсон, Е. Д., Фотоэлементы и их применение. Ланге, Б., Фотоэлементы в науке и технике. Симон, Г. и Зурман Р., Фотоэлементы и их применение. Шипалов, М. Г. и Налимов, В. В., Фотоэлементы.

75. Valguse kvantidest.

Üks laiaulatuslikum nähtus, mida valguse lainetusteooriaga ei saa seletada, on eelpool kirjeldatud fotoefekt. Katseliselt on kindlaks määratud järgmised fotoefekti seadused: 1) fotovoolu tugevus, s. o. *elektronide hulk, mis vabaneb valgustamisel monokromaatilise valgusega, on võrdeline neelatud valgusenergia hulgaga*; 2) *vabanevate elektronide suurim lennu-*

kiirus ei sõltu valguse jõust ja sõltub ainult valguslainepikkusest. Ultravioletsete kiirte mõjul metallist väljuvad elektronid on kiiremad kui violetsete kiirte mõjutatud elektronid; röntgenikiired tekitavad veel kiiremaid elektrone. Üldse on valgustamisel vabanevate elektronide kiirus seda suurem, mida lühemad on neid tekitanud lained, teisisi öeldes, mida suurem on vastavate lainete võnkumise sagedus.

Teine seadus pole valguse lainetusteooriaga seletatav, sest loomulik oleks eeldada: mida rohkem energiat langeb valgustatavale pinnale, seda suurem on väljalöödud elektronide energia, järelikult seda suurem peaks olema nende kiirus.

See lahendamatu vastuolu teooria ja praktika vahel on sundinud, nagu see on teaduses tavaline, muutma teooriat.

Valguse lainetusteooria manab esile kujutluse pidevast energiahoovusest kiirgamisallikalt. Seda pidevust ei saa sobitada elektronide lennukiiruse sõltumatuslega valguse tugevusest. Uus teooria toob sisse energia katkelise kiirgamise üksikute kindlamõõduliste annustena.

Seda energia hulka, mida aatom võib kiirata teatava lainepikkusega, nimetatakse energia kvandiks.

Igal lainepikkusel on erisuurune energia kvant. Katsetele rajatud teoreetilised uurimused tõendavad, et energia kvant on igas lainete liigis võrdeline vastava võnkesagedusega.

Kui ν on võnkesagedus, E on sellele sagedusele vastav energia kvant ja h on võrdetegur, siis iga lainete liigi kohta väljendub energia kvant sageduse kaudu järgmiselt: $E = h\nu$.

Seega on väljakiirgav kvant, mida saadab võnkumise tekitaja, punastel kiirtel väiksem kui violetsetel kiirtel ja violetsetel kiirtel väiksem kui ultravioletsetel, ultravioletsetel väiksem kui röntgenikiirtel. Kui temperatuurse kiirgusenergia üldhulk on punaste kiirte juures suurem kui ultravioletsetel kiirtel (§ 63), siis seletatakse seda punase värvusega

kiirgajate suurearvulise ülekaaluga violetselt kiirgavate arvust.

Kõik ühesuguse sageduse kvandid on omavahel võrdsed, erinevate sageduste kvandid on erinevad.

Prof. O. H v o l s o n andis piltliku võrdluse mitmesuguse pikkusega lainete kvantide kohta: punaste kiirte kvandid — peenikeste haavlite lend; violetsete kiirte kvandid — püssikuulide lend; röntgenikiirtel — kasvava kaliibriga kahurikuulide lend, γ -kiirte kvandid — raskesuurtükiväe mürsud. Kvantide teooria põhjal saab fotoefekti teist seadust üsna lihtsalt seletada: kui kvandi energia sõltub lainepikkusest, siis kvantide energia muutumisel elektronide kineetiliselt energiaks peab ka elektronide kiirus sõltuma lainepikkusest.

Peale fotoefekti nõudsid ka mõned muud nähtused kvandi mõiste tarvituselevõtmist. Näiteks ei saa lainetusteooria põhjal seletada kiirgusenergia sõltuvust temperatuurist (§ 64). Nurjusid kõik püüded anda energia pideva kiirgamise alusel katsetega kinnitatud valemit. Saksa õpetlane Max Planck lahendas 1900. a. selle küsimuse, luues kujutluse energia kvandist.

Kvantide teooria on tugevasti mõjutanud teaduslikku maailmavaadet. XIX sajandil arenes evolutsiooniteooria, kujutleti kõigi nähtuste, näit. kiirguse järk-järgulist arengut, pidevat voolu.

XX sajandil tekib idee kvantidest, pursetest protsessi arenemisel, hüppelisest kvaliteedi muutusest.

Tuntud vene füüsik S. I. Vavilov on välja töötanud uurimismeetodi selle kohta, kuidas kindlaks teha üksikute valguskvantide mõju silmale. See andis väga veenva tõenduse valguse kvantide olemasolu kohta.

76. Kokkuvõte valguse teooriatest.

Lõpetades optika kursust, heidame pilgu valguse teooriate vaheldumise käigule.

Muinaskreeka filosoofid õpetasid, et valgus väljub vaatleja silmast. I. Newtonist alates valitses XIX sajandi teise aastakümneni emissiooniteooria. Selle teooria järgi tekivad valguse nähtused erisuguse kaaluta aine osakeste liikumisest. Need üliväikesed osakesed, „korpuskulid“, lähevad helendavast kehast lendu sirgjooneliselt kõigis sihtides. Sattudes silma võrkkestale, tekitavad need osakesed nägemisaistingu.

Peegeldumist kahe keskkonna piiril, mis sarnaneb elastsete kerade tagasipõrkele, seletati tõukejõududega, mida pind rakendab temale sattunud osakestesse. Murdumise tekitajaiks on tõmbejõud, mis rakenduvad osakestesse väga õhukeses kihis kahe keskkonna piiril. Et kiir murdumisel väiksema optilise tihedusega keskkonnast suurema tihedusega keskkonda läheb ristsirgele, seletati sellega, et osakeste liikumise kiirus olevat tihedamas keskkonnas suurem kui hõredamas.

Juba ühtaegu emissiooniteooriaga tekkis ja püsis Chr. Huygensi loodud laineteooria. Laineteooriat toetas ja arendas M. V. Lomonossov. Huygensi teooria seletas valguse nähteid laineliselt levivate pikivõnkumistega mingis elastses aines.

Valguse laineteooria jäi teaduslikust mõttest esialgu kõrvale, sest ta oli alles viimistlemata ja emissiooniteooriaga seotud Newton oli kõrge teaduslik autoriteet.

Aja jooksul tõid katsed uusi andmeid, mis ei mahtunud emissiooniteooria raamidesse ja see pidi lõpuks langema, hoolimata oma pooldajate ägedast kaitsest. Otsustava hoobi andsid seejuures kaks sündmust: Young leidis laineteooria põhjal lihtsa seletuse interferentsile ja Foucault mõõtis valguse kiirust vees ja leidis, et see on vastandina emissiooniteooria oletusele ainult $\frac{3}{4}$ valguse kiirusest tühjuses.

Young ja eriti Fresnel uuendasid lainetusteooriat ja seletasid selle alusel hoolikalt valguse sirgjoonelist levimist, peegeldumist, murdumist, interferentsi, difraktsiooni ja polarisatsiooni. Fresneli teooria järgi on valgus elastse keskkonna-eetri ristivõnkumised, mis levivad valguspunktist sfääriliste lainetena.

Aga kujutlus elastse keskkonna omadustest kui valguse kandjast oli algusest peale seesmises vastuolus. Et seletada valguslaine tohtu suurt võnkesagedust (näit. $675 \cdot 10^{12} \frac{\text{võnget}}{\text{sek.}}$ ühel violetse valguse lainel), tuli kujutella valgust kandva keskkonna elastsust suuremana, kui see on terasel. Et samal ajal taevakehad liiguvad selles elastses keskkonnas jääva kiirusega, s. o. takistuseeta, tuleb oletada selle elastse keskkonna kaduvalt väikest tihedust.

Ühe aine kohta pole kuidagi võimalik sobitada kujutlust väga suurest elastsusest kujutlusega ääretu väikesest tihedusest.

Selle vastuolu kõrvaldas Maxwelli teooria. Maxwell tõestas möödunud sajandi 60-ndatel aastatel teoreetiliselt, et võnkumised elektri- ja magnetväljade pinevuses peavad levima vibraatorist laineliselt. Elektri- ja magnetilised lained levivad valguse kiirusega, peegelduvad, murduvad, interfereeruvad, alluvad difraktsioonile ja polariseeruvad samuti kui valguslained. Enam kui 20 aastat pärast Maxwelli teooria tekkimist kinnitasid H. Hertz ja P. N. Lebedev Maxwelli ennustusi katseliselt. Pealeselle leidis Maxwell seose aine murdumisnäitaja ja dielektrilise konstandi vahel. Nii see kui ka mitmete muude¹ elektriliste, magnetiliste ja valguse

¹ Mõnel läbipaistval kehal ilmneb magnetväljas omadus pöörata teatava nurga võrra valguse ristivõnkumiste tasapinda. Samal viisil pöördub võnkumiste tasapind valguskiirte peegeldumisel magneeditud keha pinnalt.

konstantide vaheline seos andsid Maxwellile aluse *valguse elektromagnetilise teooria* loomiseks.

Selle teooria järgi ei peeta valguse võnkumist enam lihtsaks mehaaniliseks võnkumiseks mingisuguses elastses keskkonnas.

Valgusnähtused tekivad elektrivälja pinevuse vektori muutusest, kusjuures elektriväljal on võnkuv iseloom ja ta levib ruumis laineliselt.

Valguse võnkumised erinevad teistest elektromagnetilistest võnkumistest ainult äärmiselt suure sagedusega, piirkonnas $390 \cdot 10^{12}$ kuni $793 \cdot 10^{12}$ $\frac{\text{võnget}}{\text{sekundis}}$ ja tajutakse vahenditult inimese eriorgani — silma abil, kuna teiste elektromagnetiliste võngete vastuvõtmine toimub eriaparaatide kaudu.

Kui asetada valgusallikas tugevasse magnetvälja, lõhenevad spektraaljooned kaheks või kolmeks; see osutab ühise lainepikkusega kiirtekimbu laine pikkuse muutusile. Samas lahutab elektrivälja spektraaljoone mitmeks jooneks. Teiselt poolt me nägime, et valgusenergia langemine metalli pinnale kutsub esile elektronide väljumise metallist.

Kõik eeltoodud andmed osutavad tihedale sidemele valguse ja elektromagnetiliste nähtuste vahel ja kinnitavad valguse elektromagnetilist teooriat.

Fotoefekt omalt poolt äratav ellu õpetuse sellest, et helen-dav keha kiirgab osakesi — footone ja nõuab lainetusteooria kõrval ka valguse kvantide teooriat.

Teaduslik mõttelend on läbinud valgusnähtuste seletamisel huvitava dialektilise arenemise protsessi. Emissiooniteooria jäeti kõrvale, kui ta pörkas kokku interferentsnähtusega ja kui ta ei suutnud seletada seda fakti, miks valguse kiirus aines on väiksem kui tühjuses. Tekkinud vastuolud kõrvaldati lainetusteooria loomise-ga. Hiljem saadud andmed, mis olid lainetusteooriaga vastuolus, viisid kasutuselevõetud teooria teistkordsele eitamisele ja tõid füü-sikud tagasi emissiooniteooria juurde, kuid mitte tema esialgse kuju, vaid ümbertöötatud ja kõrgemale astmele tõstetud kuju juurde.

Et kvantide teooria ei suuda ikkagi interferentsi nähtusi seletada, siis peab valguse teooriast saama lainetus- ja kvantide teooria süntees.

77. Ülevaade elektromagnetilistest võngetest.

Kõigest eelnevast saadakse üldine järeldus: igasugused kiirgusnähtused on elektromagnetiliste võnkumiste eriliigid.

See teaduslik avastus ilmutab meile looduse dialektilise arengu ülitähtsa printsiibi: materia liikumise ühtsus nähtuste mitmekesisuses. Seejuures kvantitatiivne lainepikkuse muutus on lahutamatult seotud uue kvaliteedi omandamisega — teistsuguse mõjuga kehale.

Elektromagnetilised lained erinevad üksteisest selle poolest, kuidas neid loomulikul või kunstlikul teel tekitatakse ja nende vahendite poolest, mille abil neid kõige lihtsamalt saab ilmutada. Kõiki eespoolkäsiteldud võnkumisi võib korraldada ritta nende lainepikkuste järgi, alates kõige pikematega ja lõpetades kõige lühemate senituntud lainetega, koostades seega niinimetatud elektromagnetiliste võnkumiste „skaala“.

Väljavõttena sellest skaalast toome juuresoleva tabeli, mis sisaldab täiuslikkuse huvides ka gammakiiri, mida meie kursuses pole käsiteldud.

Lainete skaala piirkond	Lainepikkus	Sagedus hertsides
1. Madalsageduse lained	∞ — 15 km	0 — $2 \cdot 10^4$
2. Raadiolained	15 km — 1 dm	$2 \cdot 10^4$ — $3 \cdot 10^9$
3. Ultraraadiolained . .	10 cm — 0,1 mm	$3 \cdot 10^9$ — $3 \cdot 10^{12}$
4. Infrapunased lained .	100 μ — 0,76 μ	$3 \cdot 10^{12}$ — $400 \cdot 10^{12}$
5. Valguse lained . . .	0,76 μ — 0,38 μ	$4 \cdot 10^{14}$ — $8 \cdot 10^{14}$
6. Ultravioletsed lained	0,38 μ — 5 m μ	$8 \cdot 10^{14}$ — $6 \cdot 10^{16}$
7. Röntgenilained . . .	5 m μ — 0,004 m μ	$6 \cdot 10^{16}$ — $7,5 \cdot 10^{19}$
8. Gamma-lained . . .	0,1 X — 1 X ¹	$7,5 \cdot 10^{19}$ — $3 \cdot 10^{21}$

¹ X — pikkuse ühik, üks kümnetuhandik millimikronit.

Kirjandus. Шпольский, Э. В., проф., Атомная энергия; Аглинцев, К. К., проф., Очерки по физике атомного ядра; Брэгг, В., О природе вещей; Гинзбург, В. Л., Атомное ядро и его энергия; Зайдель, А. Н., Загадка атома; Иоффе, А. Ф., акад., Электрический заряд (Серия: Ученые школьникам).

Sisukord.

OPTIKA.

Sissejuhatus	3
I. Valguse levimine.	
1. Valguse levimine ühtlases keskkonnas	5
2. Valguse nähtused kahe keskkonna piiril	5
3. Kujutis tasapeeglis	7
4. <i>Laboratoorne töö nr. 1.</i> Valguse murdumise seaduste tule- tamine	9
5. Valguse murdumise seadused	10
6. Täielik sisepeegeldumine	13
7. Kiire käik läbi tasaparalleelse plaadi	15
8. Kiire käik läbi prisma	17
9. Valguse kiirus	18
10. Valgusallikad	22
11. Rahvusvaheline küünal. Luumen	23
12. Pinnavalgustuse tugevus	24
13. Pinnavalgustuse tugevuse ühik ja valem	27
14. Valgusallika tugevuse mõõtmine	30
15. Fotomeeter	31
16. <i>Laboratoorne töö nr. 2.</i> Kahe valgusallika tugevuse võrd- lemine	31
17. Valguskiirte käigu juhtimine	33
18. Sfäärilise peegli valem	33
19. Kujutise ehitamine sfäärilises peeglis	36
20. Sfäärilised klaasid	39
21. Läätsede valem	41
22. Kujutise suurendus	43
23. Kujutis läätses eseme mitmesuguste kauguste puhul	43
24. <i>Laboratoorne töö nr. 3.</i> Läätsede omaduste katseline tund- maõppimine	47

25. Läätse optiline jõud	48
26. Projektsiooniaparaat	50
27. Fotoaparaat	52
28. Päevapildi saamise käik	54
29. Kino	56
30. Sfääriline aberratsioon	57
31. Kromaatileine aberratsioon	58
32. Silm kui optiline aparaat	60
33. Lühinägevus ja kaugnägevus	62
34. Selge nägemise tingimused. Nägemisnurk	64
35. Kahe silmaga nägemine	65
36. Esemete suuruse ja kauguse hindamisest	67
37. Nägemismulje kestus	67
38. Silma väsvus	68
39. Värvide tajumine	68
40. Silma värvitundlikkus	68
41. Värviväsimus	69
42. Irradiatsioon	69
43. Optiliste riistade otstarve	69
44. Mikroskoop	70
45. Teleskoop	72

II. Valguse loomus.

46. Valguse interferents	78
47. Valguskiired. Kiir	80
48. Valguse interferentsi selgitamine	81
49. Valguse polarisatsioon	83
50. Valguse polarisatsioon murdumisel	85
51. Huygeni printsiip	86
52. Valguse peegeldumise ja murdumise seletamine laineteo- teooria põhjal	87
53. Valguse sirgjoonelise levimise seletamine lainetusteooria põhjal	89
54. Valguse difraktsioon	90
55. Valguse lainepikkuse mõõtmine difraktsiooni abil	93
56. Valge valguse dispersioon kahe keskkonna piiril	96
57. Iga spektri kiir on lihtvalguse kiir	98
58. Valge valguse süntees	98
59. Täiendvärvid	99
60. Spektri värvuste koostamine	100

61. Kuumutatud kehade mitterahtav kiirgamine	101
62. Kiirgusspektrite liigid	105
63. Kiirguse sõltuvus temperatuurist	106
64. Kiirguse muutumine temperatuuri muutusel	109
65. Mitterahtava kiirguse levimine keskkondades	109
66. Kehade läbipaistvus	110
67. Värvide segamine	113
68. Hõõgivate aurude neeldumisspektrid	114
69. Kirchhoffi seadus neeldumise ja kiirguse kohta	115
70. Spektraalanalüüs	116
71. Päikese ja muude taevakehade spektrid	118
72. Röntgenikiired	120
73. Röntgenitoru ehitus	122
74. Kiirgusenergia muundumine teisteks energia liikideks	124
75. Valguse kvantidest	132
76. Kokkuvõtte valguse teooriatest	135
77. Ülevaade elektromagnetilistest võngetest	138

Tõlkinud E. Nurmiste.

Vastutav toimetaja M. Usai.

Keeleline toimetaja H. Kuldma.

Ladumisele antud 5. V 1949. Trükkimisele antud 22. VI 1949. Trüki-
arv 5000. Paber 56×79,1/16. Trükipoognaid 9. Trükitähti trükipoog-
nas 55 832. Arvutuspoognaid 8,1. MB-03556. Trükikoda „Tartu
Kommunist“, Tartu, Ülikooli 21/23. Tellimise nr. 1070.

На эстонском языке.

И. И. Соколов. Физика для XI класса.

Rbl. 4.—

A-17916

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00495208 3