

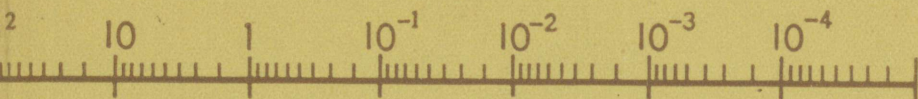
G. MJAKIŠEV

B. BUHHOVTSEV

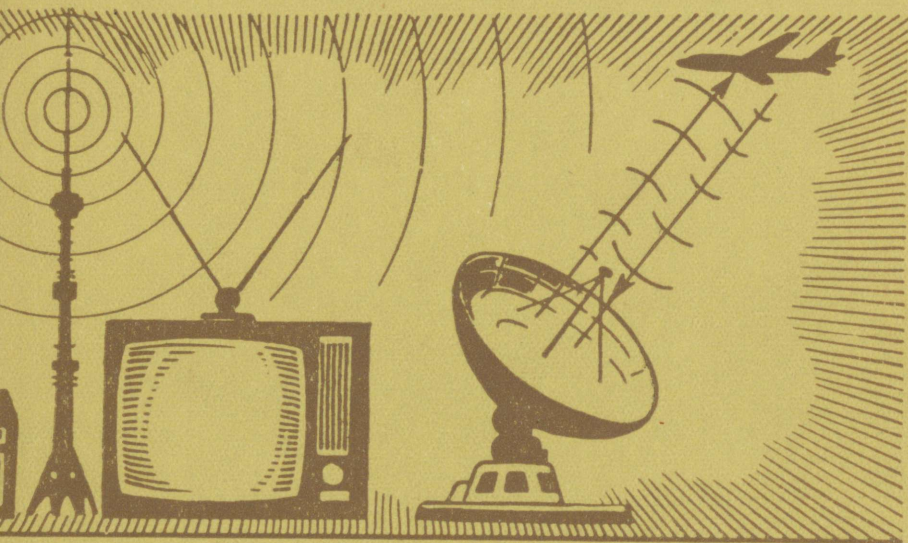
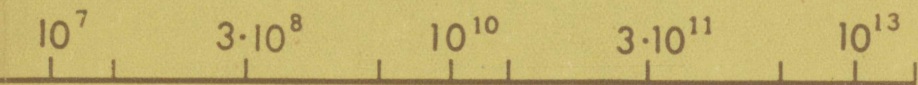


XI KLASSILE

LA



1 cm 1 mm



RAADIOLAINED

G. MJAŠEV, B. BUHOVTSEV

FÜÜSIKA

XI KLASSILE

«VALGUS» * TALLINN 1973

Originaali tiitel:

Г. Я. Мякишев, Б. Б. Буховцев

ФИЗИКА

Учебное пособие для 10 класса средней школы
Издание второе
Утверждено Министерством просвещения СССР
Москва «Просвещение» 1973

Vene keelest tõlkinud *A. Lang*

Kaane kujundanud *R. Tungla*

2

Tartu Riikliku Olikeoli
Raamatukogu

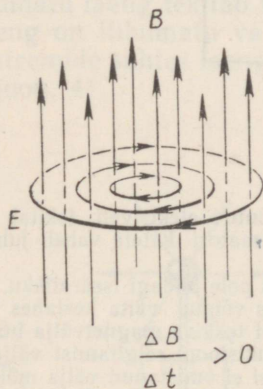
87187

I. ELEKTROMAGNETLAINED

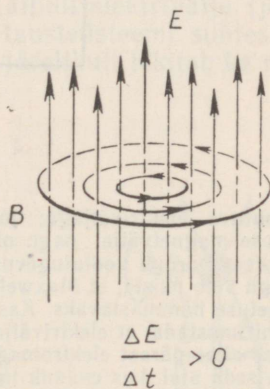
1. MUUTUVA ELEKTRI- JA MAGNETVÄLJA VAHELINE SEOS

Elektromagnetvõnkumiste uurimisel kasutasime elektrodünaamika seadusi, mis olid meile juba tuntud. Mingeid uusi andmeid elektromagnetvälja põhiomaduste kohta selleks tarvis polnud. Elektromagnetlainetega on asi teisiti. Elektromagnetlained on olemas ainult seetõttu, et elektromagnetväljal on veel üks tähtis omadus, millest senini pole räägitud. Selle omaduse avastas inglise füüsik James Clerk Maxwell.

Me juba teame, et elektromagnetilise induktsiooni nähtuses nägi Maxwell elektrivälja tekitamist muutuva magnetvälja poolt. Edasi tegi Maxwell elektromagnetvälja põhiomaduste avastamisel



Joon. 1a



Joon. 1b

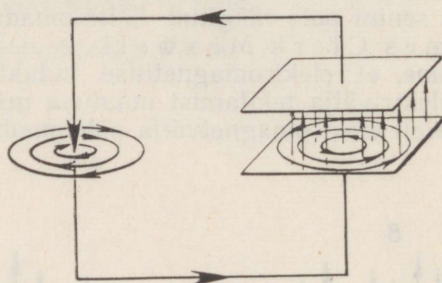
järgmise ja juba viimase sammu. Ta püstitas küsimuse: kui muutuv magnetväli tekitab elektrivälja (joon. 1a), kas ei eksisteeri siis looduses pöördprotsessi, kus muutuv elektriväli tekitab omakorda magnetvälja?

Maxwell oletas, et selline protsess on looduses reaalselt olemas. Ta väitis, et kõikidel juhtudel, kui elektriväli muutub, tekitab

ta magnetvälja (joon. 1 b).¹ Tõlkal polnud ühtki otsesest eksperimentaalsest faktist, mis oleks rääkinud selle hüpoteesi kasuks. Hiljem tõestas selle hüpoteesi õigsust elektromagnetlainete avastamine, sest taoliste lainete olemasolu järeldus otseselt Maxwelli hüpoteesist ja elektromagnetilise induktsiooni nähtusest.

Vaakumis või dielektrikus muutuvat elektrivälja nimetas Maxwell nihkevooluks. Vooluks sellepärast, et muutuv elektriväli tekitab magnetvälja täpselt samuti nagu tavaline vool. Täiend «nihke» ütleb meile ühelt poolt seda, et see vool pole tavaline, vaid mingi iseäralik vool, teiselt poolt tuleb ta meelde neid kaugeid aegu, mil elektrivälja muutumist vaakumis seoti hüpoteetilise keskkonna, eetri osakeste nihkega.

Pärast nihkevoolu mõiste sissetoomist tekkis võimalus käsitleda mistahes elektrivoolu kinnise vooluna. Näiteks võnkeringi pooli juhtivusvool (elektronide korrapärane liikumine) asendatakse kondensaatori katete vahelise nihkevooluga



Joon. 2

(ajas muutuva elektriväljaga; joon. 2). Muutuv elektriväli tekitab seejuures samasuguse magnetvälja, nagu oleks kondensaatori katete vahel juhtivusvool, mille tugevus võrdub voolutugevusega poolis.

Praegu võib paista, et Maxwelli hüpoteesis pole midagi iseäralikku, mis teeks taolise oletuse hämmastavaks. Kas seda poleks võinud väita kehtestades teadlased? Ei! Ei tohi unustada, et elektrivälja muutumisel tekkiva magnetvälja hüpotees ise kerkis üles alles pärast elektromagnetilise induktsiooni selgitamist väljakujutluse alusel. Ja seda ajal, kus enamik tuntud teadlasi ei omistanud välja mõistele mingit tõsist tähtsust ja kus välja olemasolu eksperimentaalse tõestuseni jäi veel mõnikümme aastat.

Lisaks püstitatud hüpoteesile sõnastas Maxwell ka täpse kvantitatiivse seaduse, mis määrab magnetilise induktsiooni suuruse sõltuvuse elektrivälja tugevuse muutumise kiirusest (Maxwelli järgi on nihkevoolu tugevus võrdeline elektrivälja tugevuse muutumise kiirusega).

¹ Maxwell näitas, et muutuva elektrivälja poolt tekitatud magnetvälja induktsioonivektor \vec{B} moodustab elektrivälja tugevuse vektoriga \vec{E} «parema käe» süsteemi. Elektromagnetilise induktsiooni nähtuse korral moodustavad need vektorid aga «vasaku käe» süsteemi (joon. 1 a, 1 b).

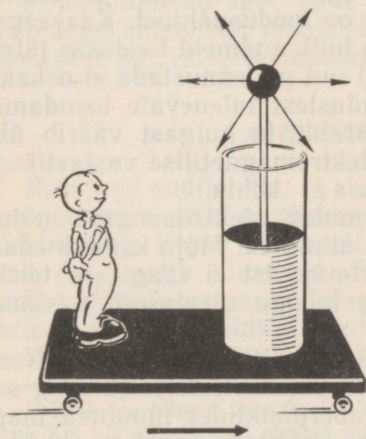
Hämmastav on see erakordne järjekindlus ja püsivus, see veendumus oma ideede õigsuses, mida Maxwell elektromagnetvälja seaduste formuleerimisel ilmutas. Juba algusest peale, mil Maxwell (pärast aine molekulaarkineetilise ehituse alal tehtud edukat tööd) hakkas tegelema elektrodünaamikaga, otsustas ta kohe, et loeb ainult eksperimentaalseid ja ei loe teoreetilisi töid. Seda selleks, et otsustustes elektromagnetiliste nähtuste seaduspärasustest ei oleks midagi ülevõetut. Selline teguviis osutus imeliselt viljakaks ja aitas Maxwellil välja töötada tervikliku seisukoha elektromagnetilistest protsessidest. Maxwell võttis julgelt oma teooria aluseks objekti (välja), mille olemasolu polnud eksperimentaalselt tõestatud. Minnes samm-sammult edasi ning toetudes seejuures katseliselt kindlaks tehtud seadustele (Coulomb'i, Ampère'i, Biot'-Savart'i-Laplace'i ja Faraday elektromagnetilise induktiooni seadustele), jõudis Maxwell lõppeesmärgini. Nihevoolu hüpotees oli viimaseks põhimõtteliseks lüliks, millega Maxwell omistas hüpoteetilisele objektile uue hüpoteetilise omaduse, mille olemasolu kohta, erinevalt eelmistest juhtudest, otseseid eksperimentaalseid fakte ei olnud.

2. ELEKTROMAGNETVÄLI

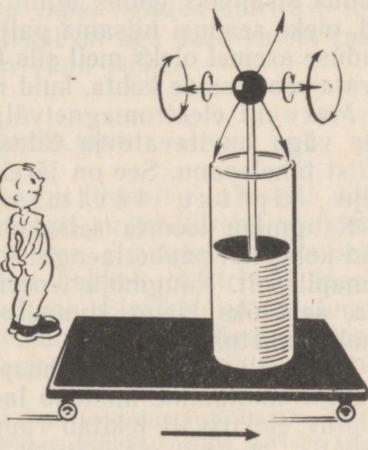
Pärast elektri- ja magnetvälja vastastikuse seose avastamist sai selgeks, et need väljad ei eksisteeri lahus, teineteisest sõltumata.

Muutuvat magnetvälja pole võimalik tekitada nii, et ruumis ei tekiks samaaegselt elektrivälja. Õige on ka vastupidine väide, et muutuv elektriväli ei eksisteeri magnetväljata.

Liikumatu laeng tekitab tõepoolest ainult elektrivälja (joon. 3), kuid laeng on liikumatu vaid kindla taustsüsteemi suhtes. Teiste taustsüsteemide suhtes laeng liigub ja järelikult tekitab ka magnetvälja (joon. 4).



Joon. 3



Joon. 4

Täpselt samuti tekitab Maal lebav magnet ainult magnetvälja, kuid tema suhtes liikuv vaateleja avastab ka elektrivälja olemasolu, mis on elektromagnetilise induktsiooni nähtusega täielikus vastavuses.

Seega on väide, et antud ruumpunktis eksisteerib ainult elektri- või magnetväli, mõttetu, kui ei näidata, missuguse taustsüsteemi suhtes neid välju vaadeldakse. Elektrivälja puudumine paigalseisvat magnetit sisaldavas taustsüsteemis ei tähenda veel seda, et elektrivälja pole üldse olemas. Mistahes magneti suhtes liikuvast taustsüsteemis võib olla elektriväli avastatud.

Nii nagu läbi värviliste klaaside (valgusfiltrite) vaadeldava maastiku värvus sõltub klaasi värvusest, nii muutub ühelt taustsüsteemilt teisele üleminekul ka väljade suurus ja jaotus ruumis. Me võime sobiva taustsüsteemi valikuga muuta näiteks magnetvälja mittejälgitavaks.

Elektri- ja magnetväli on ühtse terviku, nn. **elektromagnetvälja** erinevad avaldusvormid.

Sõltuvalt sellest, millises taustsüsteemis elektromagnetilisi protsesse vaadeldakse, ilmnevad selle ühtse terviku ühed või teised küljed.

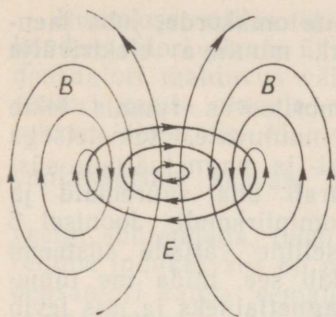
3. ELEKTROMAGNETILISE VASTASTIKUSE MÕJU LEVI

Fundamentaalsed looduseadused, mille hulka kuuluvad ka Maxwelli poolt leitud elektromagnetismi seadused, on märkimisväärsed ses suhtes, et nad võivad anda hulga rohkem, kui sisaldavad faktid, mille alusel need seadused tuletati. Kui iga seadus sisaldaks endas ainult neid fakte, millest nad on tuletatud, oleks seadusi niisama palju, kui on loodusnähtusi. Kaasaegse teaduse asemel oleks meil siis tohutu hulk andmeid looduses jälgitavate protsesside kohta, kuid midagi uut me ennustada ei oskaks.

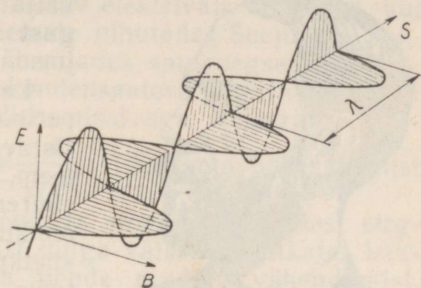
Maxwelli elektromagnetvälja seadustest tulenevate loendamata väga huvitavate ja tähtsate järelduste hulgast väärib üks erilist tähelepanu. See on järeldus elektromagnetilise vastastikuse mõju lõpliku levimiskiiruse kohta.

Kaugmõju teooria seisukohast muutub elektrilaengule mõjuv jõud kohe, kui naaberlaengut paigalt nihutada. Mõju kandub edasi silmapilkselt. Kaugmõju teooria vaatevinklist ei saagi see teisiti olla, sest üks laeng «tunneb» teise laengu olemasolu vaakumi kaudu vahetult.

Maxwelli järgi on asi hoopis teistsugune ja palju keerulisem. Laengu nihutamine muudab laengu lähedast elektrivälja ning see muutuv elektriväli tekitab ruumi naaberpunktides muutuva magnetvälja. Muutuv magnetväli tekitab omakorda muutuva elektrivälja jne. Tekkinud magnet- või elektrivälja pöörised kustutavad



Joon. 5



Joon. 6

välja neis piirkondades, kus väli oli olemas, ja haaravad üha uusi ruumipiirkondi (joon. 5).¹

Laengu nihkumine tekitab seega elektromagnetvälja häirituse, mis haarab levides järjest suuremaid ja suuremaid ümbritseva ruumi piirkondi ning korraldab oma teel ümber selle välja, mis oli enne laengu nihkumist olemas. Lõpuks jõuab see häiritus teise laenguni ning põhjustabki viimasele mõjuva jõu muutumise. Jõud aga ei muutu sel ajahetkel, mil toimus esimese laengu nihkumine. Elektromagnetiline häiritus, mille mehhanismi avastas Maxwell, levib väga suure, kuid siiski lõpliku kiirusega.

Maxwell tõestas puht matemaatilisel, et elektromagnetilise vastastikuse mõju levimiskiirus võrdub valguse levimiskiirusega vaakumis, s. t. $300\,000 \frac{\text{km}}{\text{s}}$. See ongi välja uus põhiomadus, mis teeb lõpuks välja tajutavaks reaalsuseks.

Põhimõtteliselt saab kahe laengu vahel mõjuva häirituse levimise aega katseliselt mõõta. Praktiliselt on aga seda katset raske teha, sest häirituse levimiskiirus on väga suur.

4. ELEKTROMAGNETLAINE

Kujutage endile ette, et elektrilaengut lihtsalt ei nihutata ühest punktist teise, vaid pannakse piki mingit sirget kiiresti võnkuma. Elektrilaeng liigub sarnaselt vedru otsa riputatud koormusega, kuid palju-palju kiiremini. Sel juhul hakkab elektriväli laengu vahetus läheduses perioodiliselt muutuma. Elektrivälja muutumise periood võrdub muidugi laengu võnkumise perioodiga. Perioodiliselt muutuv elektriväli tekitab perioodiliselt muutuva magnet-

¹ Kõik see toimub leheküljel 4 kirjeldatud väljade suuna määramise reeglite järgi. Kui väljade suunad oleksid teistsugused, ei kehtiks energia jäävuse seadus ja ruumis tekitatud magnetväli kasvaks ajas ning leviks samaaegselt kõikides suundades.



H. R. Hertz

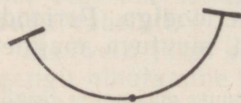
välja ja viimane omakorda, juba laengust kaugemal, muutuva elektrivälja jne.

Laengut ümbritsevas ruumis tekib perioodiliselt muutuvate, teineteisega ristuvate elektri- ja magnetväljade süsteem, mis haarab üha suuremaid ja suuremaid ruumipiirkondi. Joonisel 6 on kujutatud selline väljade süsteemi «hetkpilt». Tekib see, mida me nime-tame **elektromagnetlaineks** ja mis levib võnkuvast laengust kõikides suundades. Elektri- ja magnetväli muutuvad igas ruumipunktis perioodiliselt. Mida kaugemal ruumipunkt laengust asub, seda hiljem temani elektri- ja magnetvälja võnkumised jõuavad. Järelikult ei võngu elektri- ja magnetväli laengust erinevatel kaugustel sünkroonselt.

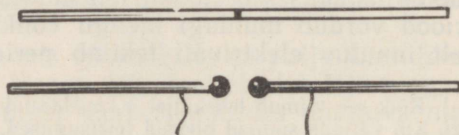
Maxwell oli elektromagnetlainete reaalsuses sügavalt veendunud, kuid nende eksperimentaalse avastamiseni ta ei elanud. Alles 10 aastat pärast Maxwelli surma suutis saksa füüsik Heinrich Rudolf Hertz elektromagnetlaineid eksperimentaalselt tekitada.

5. HERTZI VIBRAATOR

Hertz kasutas oma katsetes lihtsat riista, mida praegu nimetatakse **Hertzi vibraatoriks** ja mis kujutab endast avatud võnkeringi. Tavaline, nn. kinnine võnkering on elektromagnetlainete kiirgamiseks sobimatu. Asi on selles, et muutuv elektriväli on koondunud kondensaatori katete vahelisse väga väikesesse ruumiossa. Et elektromagnetlainete kiirgamine oleks küllalt intensiivne, peab elektriväli muutuma suures ruumipiirkonnas, mis ei tohi olla ümbritsetud metallplaadikestega. Siin avaldub sarnasus helilainete kiirgamisega. Resonaatorkastita võnkuv pillikeel või helihark peaaegu ei kiirga helilaineid, sest sel juhul tekitatakse õhuvõnkumisi väga väikeses, pillikeelega või helihargiga vahetult kokkupuutuvas ruumipiirkonnas.



Joon. 7



Joon. 8

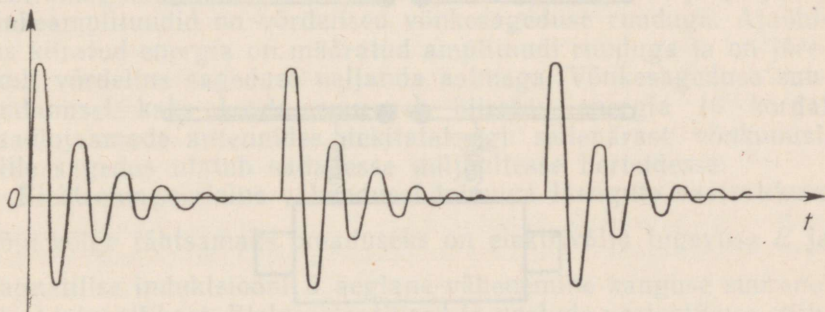
Ruumiosa, milles tekitatakse muutuv elektriväli, suureneb, kui kondensaatori plaate üksteisest eemale nihutada. Seejuures kondensaatori mahtuvus väheneb. Vähendades samaaegselt kondensaatori katete pindala, väheneb kondensaatori mahtuvus veelgi rohkem (joon. 7). Mahtuvuse vähenemisel aga võnkeringi omavõnkesagedus kasvab, sest $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Et omavõnkesagedust

veelgi suurendada, tuleb pool asendada sirgjuhtmega, sest sirgjuhtme induktiivsus on pooli omast hulga väiksem. Jätkates kondensaatori katete eemaldamist ja nende pindala vähendamist, saame lõpuks avatud võnkeringi, mis kujutab endast lihtsat sirgjuhet.

Et tekitada avatud võnkeringis võnkumisi, tuleb juhe keskelt pooleks lõigata ja jätta kummagi poole vahele väike vahemik, mida nimetatakse sädevahemikuks (joon. 8). Tänu sädevahemikule võib juhi mõlemat poolt laadida kõrge pingeni. Kui potentsiaalide vahe kasvab läbilöögipingest suuremaks, hüppab säde vahemikust üle, mille tulemusena vooluring sulgub ja avatud võnkeringis tekivad võnkumised (joon. 9). Võnkesagedus on väikese mahtuvuse ja induktiivsuse tõttu väga suur. Võnkumised on loomulikult sumbuvad ja seda kahel põhjusel: esiteks aktiivtakisuse tõttu, mis on eriti suur sädevahemikus, ja teiseks sellepärast, et vibraatori energia väheneb elektromagnetlainete kiirgamise tõttu. Pärast võnkumiste lakkamist laeb allikas juhtme mõlemaid pooli uuesti kuni sädevahemikus tekib läbilöökk ja kõik kordub otsast peale (joon. 10).



Joon. 9



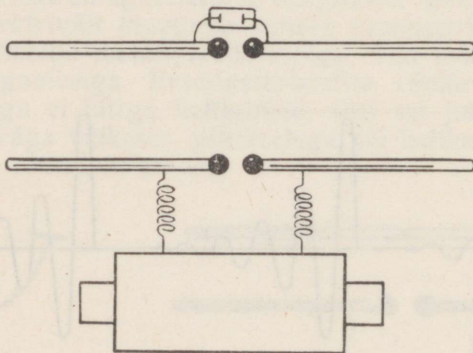
Joon. 10

6. HERTZI KATSED. ELEKTROMAGNETLAINETE LEVIMISKIIRUS

Hertz tekitas elektromagnetlaineid sel teel, et ergutas vibraatoris kõrgepingelaadega abil seeria kiiresti muutuvaid vooluimpulsse. Elektrilaengu võnkumine vibraatoris tekitab elektromagnetlainet. Vibraatoris võngub mitte üks laetud osake, vaid hiiglasuur hulk elektrone, mis kõik liiguvad koordineeritult. Vektorid \vec{E} ja \vec{B} on elektromagnetlaines teineteisega risti (vt. joon. 6), kusjuures \vec{E} asub vibraatorit läbivas tasandis, vektor \vec{B} on viimasega risti. Elektromagnetlainet levimise suund ühtib parema käe kruvi külgi liikumise suunaga, kui kruvi pead pöörata vektorilt \vec{E} vektorile \vec{B} . Vibraator kiirgab elektromagnetlaineid maksimaalselt vibraatori teljega ristiolevas sihis. Vibraatori telje sihis elektromagnetlaineid ei kiirgu.

Hertz registreeris elektromagnetlaineid vastuvõtuvibraatori abil, mille ehitus oli kiirgava vibraatoriga ühesugune. Elektromagnetvälja muutuv elektrivälja tekitab vastuvõtuvibraatoris vooluvõnkumisi. Kuna vastuvõtuvibraatori omavõnkesagedus võrdus elektromagnetlainet sagedusega, tekkis resonants ja võnkumised vastuvõtuvibraatoris tugevnesid. Võnkumiste olemasolu kindlaks tegemiseks jälgis Hertz vastuvõtuvibraatori väga väikeses sagedusvahemikus tekkivaid sädemekihi. Võnkumist võib kindlaks teha ka väikese gaaslahendustorukese helendumise järgi (joon. 11).

Hertz mitte ainult et tekitas elektromagnetlaineid, vaid ta tegi ka kindlaks, et elektromagnetlained käituvad niisama, nagu kõik teised lainet. Hertz jälgis muuhulgas ka elektromagnetlainet peegeldumist metall-lehelt ja interferentsi. Vibraatorist kiirgunud ja metall-lehelt peegeldunud lainet liitumisel tekkis seisulaine.



Joon. 11

Vastuvõtu vibraatori ümberpaigutamise saai leida seisulaine paisupunktide asukohad ja määrata elektromagnetlainete lainepikkust. Lainepikkus võrdub paisupunktide kahekordse kaugusega. Hertzi katsetes oli elektromagnetlainete lainepikkus umbes 66 cm. Lainepikkuse ja vibraatori teadaoleva võnkesageduse järgi oli kerge leida elektromagnetlainete levimiskiirust: $v = \lambda \nu$. Osutus, et elektromagnetlainete levimiskiirus võrdub valguse levimiskiirusega vaakumis $c = 300\,000$ km/s.

7. ELEKTROMAGNETILINE VASTASTIKUNE MÕJU

Elektromagnetlainete kaudu toimub elektrilaengute vahel täiesti uut tüüpi vastastikune mõju. Mis on selle vastastikuse mõju iseärasuseks?

Elektromagnetlaineid kiirgavad võnkuvad laengud. Oluline on seejuures see, et nende laengute kiirus ajas muutub, s. t. laengud liiguvad kiirendusega. **Kiirenduse olemasolu on elektromagnetlainete kiirgamise peamine tingimus.** Märkimisväärselt kiirgab elektromagnetvälja mitte ainult võnkuv laeng, vaid mistahes laeng, mille kiirus muutub kiiresti. Kiiratud elektromagnetlainete on seda intensiivsem, mida suurem on laengu liikumise kiirendus. Seepärast sõltub **elektromagnetvälja kaudu toimuva laengute vastastikuse mõjujõu suurus mitte ainult laetud osakeste vahelisest kaugusest ja kiirusest, vaid ka osakeste kiirendusest.** Kiirendusest sõltuvad seejuures ainult vektorite \vec{E} ja \vec{B} suurused. Elektromagnetvälja elektrivälja poolt laengule mõjuv jõud sõltub ainult väljatugevusest. Elektromagnetvälja magnetvälja poolt laengule mõjuv jõud sõltub veel laengu liikumise kiirusest.

Mida suurem on laengu võnkumise sagedus, seda suurema kiirendusega laeng liigub, sest kiirenduse amplituudväärtus on võrdeline sageduse ruuduga. Sageduse kasvades suureneb ka kiiratud elektromagnetlainete intensiivsus. Elektri- ja magnetvälja (\vec{E} ja \vec{B}) võnkeamplituudid on võrdelised võnkesageduse ruuduga. Ajaühikus kiiratud energia on määratud amplituudi ruuduga ja on järelikult võrdeline sageduse neljanda astmega. Võnkesageduse suurendamisel kaks korda suureneb kiiratud energia 16 korda! Raadiojaamade antennides tekitataksegi sellepärast võnkumisi, mille sagedus ulatub sadadesse miljonitesse hertsidesse.

Elektromagnetlainete vahendusel toimuva laengute vastastikuse mõju kõige tähtsamaks omaduseks on elektrivälja tugevuse \vec{E} ja magnetilise induktsiooni \vec{B} aeglane vähenemine kauguse suurendamisel laineallikast. Elektrostaatilisest ja voolude vastastikuse mõju jõud on pöördvõrdelised kauguse ruuduga. **Elektromagnetlainetes**

vähenevad vektorite \vec{E} ja \vec{B} moodulid pöörvõrdeliselt kauguse esimese astmega. See on väga aeglane vähenemine. Kõik teised jõud vähenevad kauguse suurenemisel kiiremini. Vaat miks saab isegi suhteliselt väikese võimsusega raadiojaamu teha kindlaks tuhandete kilomeetrite kauguselt, samal ajal kui staatilised väljad ei avalda sellistel kaugustel mingit mõju.

8. RAADIO LEIUTAMINE A. S. POPOVI POOLT

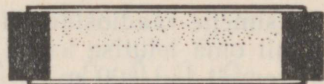


A. S. Popov

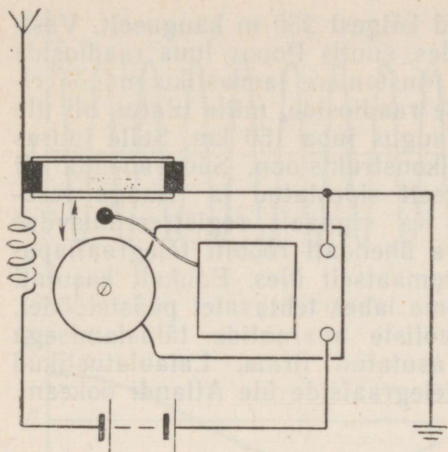
Hertzi katsetest, mille kirjeldus ilmus 1883. a., huvitusid kogu maailma füüsikud. Paljud teadlased hakkasid otsima elektromagnetlainete kiirguri ja vastuvõtja täiustamise teid.

Venemaal oli Kroonlinna kõrgema tehnikakooli õppejõud Aleksander Stepanovitš Popov üks esimesi, kes hakkas elektromagnetlainete kiirgamist uurima. Alustades Hertzi katsete reprodutseerimisest, leidis Popov hiljem palju kindlama ja tundlikuma elektromagnetlainete registreerimise viisi.

A. S. Popov kasutas elektromagnetlaineid vahetult «tunnetava» detailina koheererit. Koheerer on kahe elektroodiga klaastoru, mille sees on peenike metallipuru (joon. 12). Koheereri töötamise aluseks on elektrilahenduste mõju metallipurule, mille avastas prantsuse füüsik E. Branly. Tavalistel tingimustel on koheereri takistus metalliterakeste vahelise halva kontakti tõttu suur. Koheereri tungiv elektromagnetlaineline tekitab koheereriis muutuva kõrgsagedusvoolu. Metalliterakeste vahel tekivad väikesed sädemekesed, mille tõttu metalliosakesed paakuvad ja koheereri takistus väheneb järsult (A. S. Popovi katsetes vähenes koheereri takistus 100 000 oomilt 1000—500 oomini, s. t. 100—200 korda). Koheereri suur takistus taastub, kui koheereri raputada. Vastuvõtu automaatsuse tagamiseks kasutas A. S. Popov koheereri raputamiseks pärast signaali vastuvõttu elektrikõlistit. Elektromagnetlainete saabumise hetkel sulgus elektrikõlisti vooluahel läbi koheereri. Elektromagnetlaineline vastuvõtu lõppedes lakkas kell töötamast, sest vasarake lõi mitte ainult vastu kõlistit, vaid ka vastu koheereri.



Joon. 12



Joon. 13

A. S. Popovi vastuvõtja töötamispõhimõte saab mõistetavaks joonisel 13 toodud lihtsustatud skeemi põhjal.

Hiljem suurendas Popov oma aparadi tundlikkust sel teel, et maandas koheereri ühe väljundi ning teise väljundi ühendas kõrgele tõstetud traadiga, luues seega esimese vastuvõtuantenni. Maandus muudab Maa juhtiva pinna võnkeringi osaks ning suurendab vastuvõtu kaugust.

Kuigi kaasaegsed raadiovastuvõtjad meenutavad A. S. Popovi vastuvõtjat väga vähe, on nende töötamispõhimõte samasugune nagu Popovi aparadil. Tänapäeva raadiovastuvõtjal on samuti antenn, milles elektromagnetlained tekitavad väga nõrku elektrivõnkumisi. Nii nagu Popovi vastuvõtjaski, ei kasutata neid võnkumisi vastuvõtuks vahetult, vaid need nõrgad signaalid juhivad järgnevaid ahelaid toitvaid energiaallikaid. Tänapäeval juhitakse neid energiaallikaid elektronlampide ja pooljuhtseadiste abil.

Pärast tundliku vastuvõtja loomist suutis A. S. Popov vähendada saatja poolt kiiratavate elektromagnetlainete pikkust ja suurendada nende võimsust. Need tööd viisid selleni, et 7. mail (vana kalendri järgi 25. aprillil) 1895. a. demonstreeris Aleksander Stepanovitš Popov Peterburis Vene Füüsika-Keemia Seltsi koosolekul oma aparadi töötamist. A. S. Popovi aparaat oli tegelikult maailma esimene raadiovastuvõtja. Radio sünnipäevaks saigi 7. mai, mida meie riigis pühitsetakse igal aastal.

A. S. Popov jätkas sihikindlalt saate- ja vastuvõtuaparatuuri täiustamist, püstitades endale vahetuks ülesandeks ehitada aparaat, millega saaks signaale kauguste taha üle kanda. Detsembris 1897. a. demonstreeris A. S. Popov Vene Füüsika-Keemia Seltsi koosolekul maailma esimese radiogrammi saatmist ja vastuvõttu.

Esimene raadioside oli loodud kõigest 250 m kauguselt. Väsimatult oma leiutise kallal töötades, suutis Popov luua raadioside kaugemalt kui 600 m. Seejärel, Mustamere laevastiku manöövritel 1899. a., seadis teadlane sisse raadioside, mille ulatus oli üle 20 km. 1901. a. oli raadioside kaugus juba 150 km. Selle juures mängis tähtsat osa saatja uus konstruktsioon. Sädevahemik oli viidud saateantenniga induktiivselt sidestatud ja temaga resonantsi häälestatud võnkeringi. Ka signaali registreerimisviise muudeti oluliselt. Elektrikõlistiga ühendati rööbiti telegraafiaparaat, mis kirjutas signaalid automaatselt üles. Edukalt kasutati raadiosidet 1900. a. alguses Soome lahes tehtavatel päästetöödel.

Välismaal tegeles hiljem taoliste aparatuuride täiustamisega itaalia inseneri Marconi poolt asutatud firma. Laiaulatuslikud katsed võimaldasid luua raadiotelegraafside üle Atlandi ookeani.

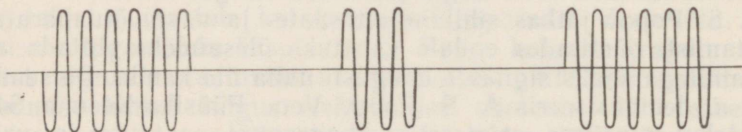
9. KAASAEGSE RAADIOSIDE PRINTSIIBID

Elektromagnetiliste protsesside teooria seisukohast on raadioside printsiip järgmine. Saateantennis tekitatud kõrgsageduslik vahelduvvool tekitab ümbritsevas ruumis kiirestimuutuva elektrija magnetvälja, mis levivad elektromagnetlainena. Jõudnud vastuvõtuantennini, tekitab elektromagnetlainne elektriväli selles saatja sagedusega vahelduvvoole.

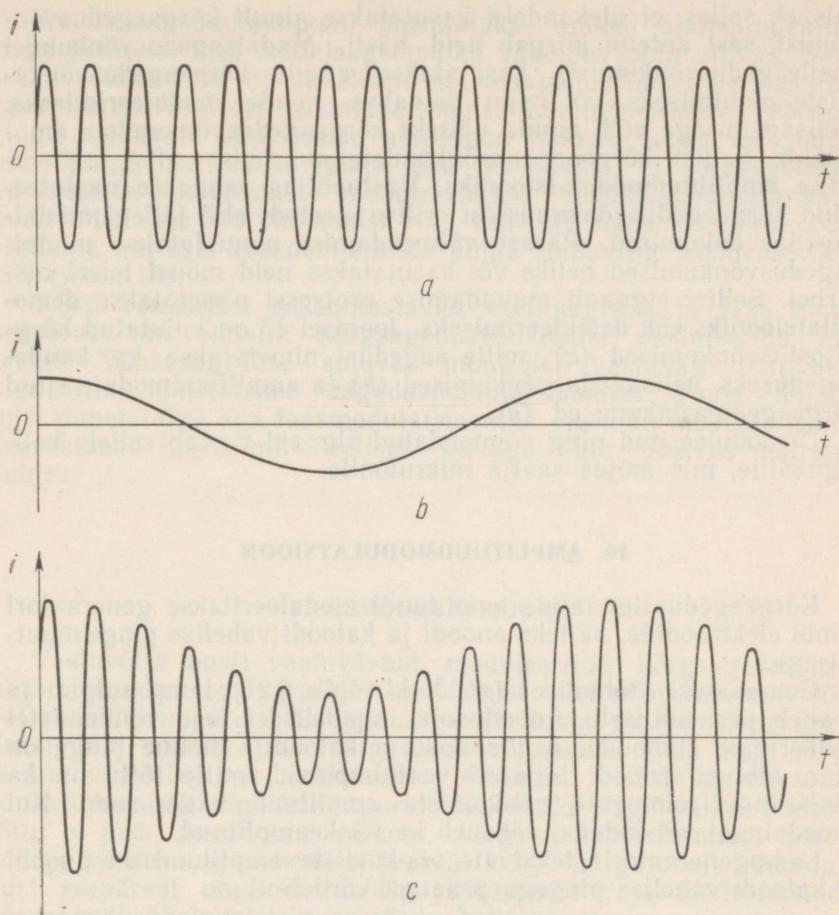
Tähtsaks etapiks raadioside arengus oli sumbumatute elektromagnetvõnkumiste lampgeneraatori loomine 1913. a. Kuni selle ajani kasutati raadiosides sumbuvate vabavõnkumiste seeriaid, nagu tegi seda Hertz oma esimestes katsetes. Pärast lampgeneraatori loomist sai radio teel edasi anda mitte ainult telegraafisignaale, mis koosnesid lühikestest ja pikematest elektromagnetlainete impulssidest (joon. 14), vaid ka kõnet ja muusikat. Sai teoks **radiotelefoniside**.

Radiotelefonisides muundatakse helivõnkumised mikrofoni abil elektrivõnkumisteks. Võib näida, et kui neid elektrivõnkumisi võimendada ja suunata antenni, võib kõnet ja muusikat elektromagnetlainete abil kauguste taha üle kanda. Tegelikuses pole selline ülekandeviis aga teostatav.

Kogu ülekandeprotsessi muudab keerukaks asjaolu, et heli-



Joon. 14



Joon. 15

sagedusvõnkumised on suhteliselt aeglased võnkumised. Ajaühikus kiiratud energia on aga võrdeline sageduse neljanda astmega (vt. § 7) ja seepärast ei kiirata madala (heli-) sagedusega elektromagnetlaineid peaaegu üldse.

Tekib järgmine vastuolu. Kõrgsageduslaine kiirgub hästi, kuid vastuvõtuantennis tekitab ta puhtalt harmoonilisi võnkumisi, mida vastu võttes saame informatsiooni ainult sellest, kas saatja töötab või mitte. Mikrofoniahelas tekkivad elektrivõnkumised sisaldavad vajalikku informatsiooni (kõnet või muusikat), kuid madalsageduslik laine ei kiirgu.

Sellest vastuolust leiti küllaltki teravmeelne väljapääs, mis

seisneb selles, et ülekandeks kasutatakse ainult kõrgsagedusvõnkumisi, sest antenn kiirgab neid hästi. Madalsagedusvõnkumisi (helisagedusvõnkumisi) kasutatakse ainult kõrgsagedusvõnkumiste muutmiseks, või nagu öeldakse, nende **moduleerimiseks**. Helisagedusega võib muuta näiteks kõrgsagedusvõnkumiste amplituudi. Sellist kõrgsagedusvõnkumiste muutmise viisi nimetatakse **amplituudmodulatsiooniks**. Vastuvõtjas saadakse moduleeritud kõrgsagedusvõnkumistest erilise meetodi abil jällegi madalsagedusvõnkumised. Pärast võimendamist muundatakse madalsagedusvõnkumised heliks või kasutatakse neid mõnel teisel otstarbel. Sellist signaali muundamise protsessi nimetatakse **demodulatsiooniks** ehk **detekteerimiseks**. Joonisel 15 on kujutatud kõrgsagedusvõnkumised (a), mille sagedust nimetatakse ka **kandesageduseks**, helisagedusvõnkumised (b) ja amplituudmoduleeritud kõrgsagedusvõnkumised (c).

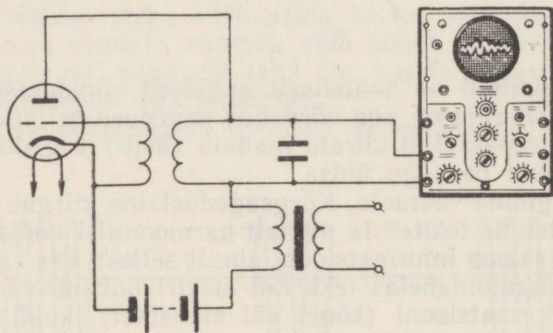
Demoduleeritud ning võimendatud signaal vastab sellele helisignaale, mis mõjus saatja mikrofonile.

10. AMPLITUUDMODULATSIOON

Kõrgsagedussignaali amplituudi moduleeritakse generaatori lambi elektroodide, näiteks anoodi ja katoodi vahelise pinge muutmise-ga.

Generaatori töötamisel (vt. X kl. õpik § 27) lamp sulgub ja avaneb perioodiliselt. Anoodvoolu impulsid ei lase võnkumistel võnkeringis sumbuda. Kui anoodi ja katoodi vaheline pinge on suur, läbivad trioodi tugevad vooluimpulsid, mille tõttu on ka võnkeringis toimuvate võnkumiste amplituud väga suur. Kui anoodpinget vähendada, väheneb ka võnkeamplituud.

Lampgeneraatoris tekkivate võnkumiste amplituud on anoodi ja katoodi vahelise pingega peaaegu võrdeline.



Joon. 16

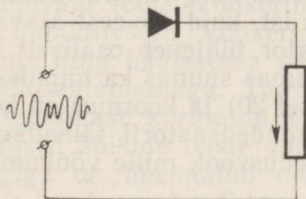
Amplituudmodulatsioonil ühendatakse anoodi alalispingeallikaga jädamisi veel madalsagedusliku vahelduvvoolu allikas. Selleks vooluallikaks on tavaliselt madalsagedusvõimendis kasutatava transformatori sekundaarmähis. Lampgeneraatori võnkeringis tekkivate võnkumiste amplituud hakkab seega muutuma anoodpinge muutumise taktis. See tähendabki, et kõrgsagedusvõnkumiste amplituudi moduleeritakse madalsagedussignaali poolt. Moduleeritud võnkumisi võib vahetult näha ostsiloskoobi ekraanil, kui ostsiloskoobile anda pinge võnkeringi kondensaatorilt (joon. 16).

Kõiki võnkumisi iseloomustavad veel sagedus ja faas ning seepärast on võimalik kõrgsagedusvõnkumisi moduleerida ka teisiti. Võnkesageduse sujuvat muutmist vastavalt juhtivale signaalile nimetatakse **sagedusmodulatsiooniks**. Faasi muutmist nimetatakse aga **faasmodulatsiooniks**. Need on modulatsiooni keerukamad liigid, mille eeliseks on aga suur püsivus häirete suhtes.

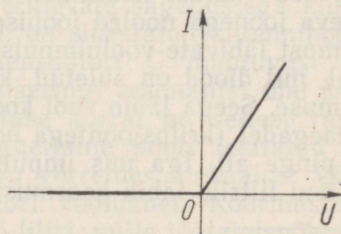
11. DEMODULATSIOON

Vastuvõtja poolt vastuvõetud moduleeritud kõrgsagedussignaali ei suuda isegi pärast võimendamist telefoni membraani või valjuhääldi ruuporit helisagedusega võnkuma panna. Kõrgsagedussignaali tekitab ainult kõrgsagedusvõnkumisi, mida meie kõrv ei kuule. Pealegi on mehhaanilise süsteemi, näiteks membraani sundvõnkumiste amplituud suurtel sagedustel väga väike. Inerti tõttu ei jõua membraan väikese, kõrgsagedusvõnkumiste perioodiga võrduva ajavahemiku jooksul kuigi märgatavalt nihkuda. Just seepärast ongi vastuvõtjas kõigepealt vaja moduleeritud kõrgsagedusvõnkumistest eraldada helisignaali.

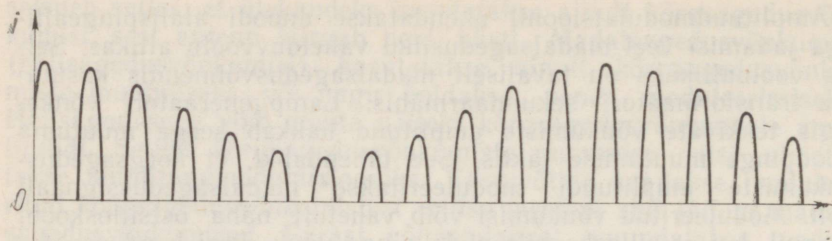
Kõrgsagedussignaali detekteeritakse seadega, milles on ühe-



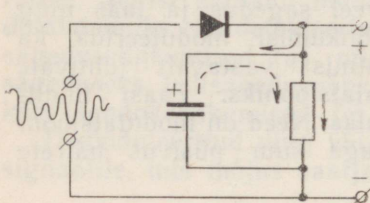
Joon. 17



Joon. 18



Joon. 19



Joon. 20

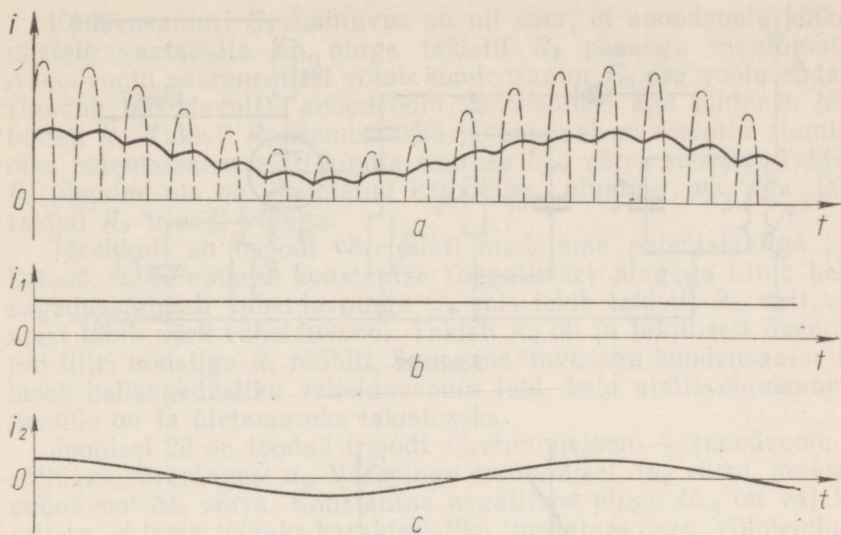
poolse juhtivusega element — **detektor**¹. Selleks elemendiks võib olla elektronlamp (diod, triood) või pooljuhtdiod.

Uurime pooljuhtdetektori töötamist. Olgu pooljuhtdetektor lülitatud moduleeritud võnkumiste allika ja koormusega jadamisi (joon. 17). Võnkeallikaks võib olla antenniga induktiivselt sidesetatud pool. Koormuseks on kas telefonipool või detektorile järgneva lampvõimendi sisendahel. Vool detektori vooluahelas voolab põhiliselt ühes, joonisel noolega tähistatud suunas, sest diodi päritakistus on vastutakistusest palju väiksem. Me võime vastuvoolu jätta üldse arvestamata ja eeldada, et kristalldiod omab ainult ühepoolset juhtivust. Diodi pingevoolu tunnusjoon on ligilähedaselt kahest sirglõigust koosnev murdjoon (joon. 18).

Vooluahelat (vt. joon. 17) läbib pulseeriv vool, mille graafik on antud joonisel 19 ja mida silutakse filtriga. Lihtsaimaks filtriks on koormusega rööbiti ühendatud kondensaator (joon. 20). Filter töötab järgmiselt. Ajavahemikel, mil diod laseb voolu läbi, läbib osa voolust koormust, teine osa aga laeb kondensaatori (pideva joonega nooled joonisel 20). Voolu hargnemine vähendab koormust läbivate vooluimpulsside suurust, kuid see-eest ajavahe-
mikel, mil diod on suletud, kondensaator tühjeneb osaliselt läbi koormuse. Seega läbib vool koormust samas suunas ka impulsside vaheaegadel (kriipsjoontega nool joonisel 20) ja koormus on kogu aeg pingel all. Iga uus impulss laeb kondensaatorit täiendavalt.

Tänu filtrile läbib koormust helisagedusvool, mille võnkumiste

¹ Üldiselt võib detektoriks olla mistahes mittelineaarse pingevoolu tunnusjoonega element.

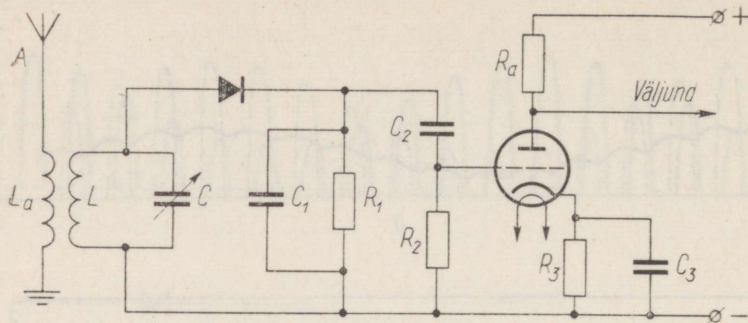


Joon. 21

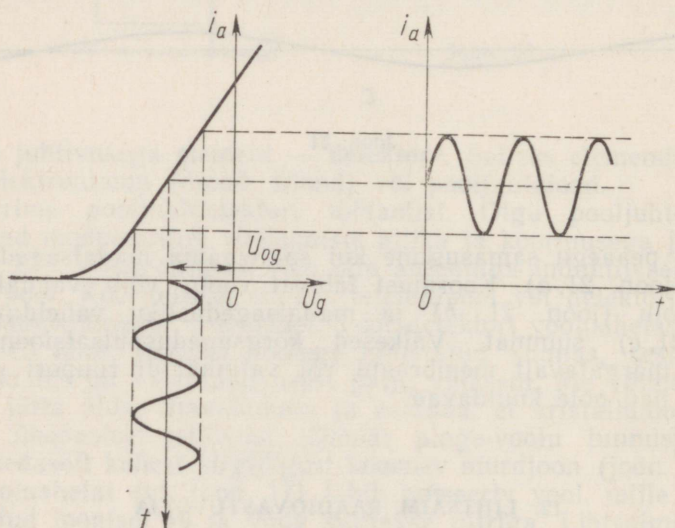
kuju on peaaegu samasugune kui saatejaama madalsagedussignaali (joon. 21, a). Koormust läbivat voolu võib vaadata kui alalisvoolu (joon. 21, b) ja madalsagedusliku vahelduvvoolu (joon. 21, c) summat. Väikesed kõrgsageduspulsatsioonid ei mõjuta märgatavalt membraani või valjuhääldi ruupori võnkumisi ja nad pole kuuldavad.

12. LIHTSAIM RAADIOVASTUVÕTJA

Lihtsaima madalsagedusvõimendiga raadiovastuvõtja skeem on toodud joonisel 22. Mitmetest raadiosaatejaamadest tulevad raadiolained tekitavad antennis A erinevate sagedustega kiiresti muutuvaid voole. Võnkeringi pool L on sidestatud antennipooliga L_a induktiivselt. Võnkeringi kondensaatori C mahtuvust saab muuta ning häälestada sel teel võnkeringi resonantsi ühe kindla raadiosaatejaamaga. Täpse häälestuse korral on sellest raadiosaatejaamast kiirgunud elektromagnetlaine poolt tekitatud võnkumised kõikide teiste võnkumistega võrreldes ülekaalus. Võnkeringiga on ühendatud dioddetektori vooluahel. Koormustakisti R_1 ja kondensaator C_1 moodustavad filtri, mille töötamis põhimõtet me juba tunneme. Pinge filtris pulseerib koormust läbiva vooluga samas taktis ja teda võib vaadata koosnevana alalis- ja madal-



Joon. 22



Joon. 23

sagedussignaali pingest. Kaugele saatejaamade vastuvõtul on pärast detekteerimist saadud madalsagedussignaal väga nõrk.

Madalsagedussignaali võimendamiseks kasutatakse võimendit. Kuna võimendi suurendab juba detekteeritud võnkumiste amplituudi, nimetatakse seda võimendit **madalsagedusvõimendiks**.

Võimendi peamiseks koostisosaks on kolmeelektroodiline elektronlamp — triood. Anoodvool kulgeb anoodpingeallika positiivselt pooluselt läbi anoodkoormuse (takisti R_a) anoodile, sealt trioodi katoodile ja läbi katoodringitakisti R_3 anoodpingeallika negatiivsele poolusele.

Kondensaatori C_3 mahtuvus on nii suur, et anoodvoolu kõikumistele vaatamata on pinge takistil R_3 peaaegu muutumatu. Anoodvoolu suurenemisel võtab kondensaator C_3 osa voolu endale (laadub täiendavalt), anoodvoolu vähenemisel aga tühjeneb läbi takisti R_3 . Takisti R_3 ülemise otsa potentsiaal on seetõttu alumise otsa potentsiaalst alati kindla suuruse U_{og} võrra suurem. Takisti R_3 ülemine ots on ühendatud katoodiga, alumine ots aga läbi takisti R_2 trioodi võrega.

Järelikult on trioodi võre alati madalama potentsiaaliga kui katood. Selle väikese konstantse (negatiivse) pingega liitub helisagedussignaali vahelduvpinge U_s , mis tekib takistil R_2 , sest viimast läbib nõrk vahelduvvool. Takisti R_2 on ju faktiliselt ühendatud filtri takistiga R_1 rööbiti. Suure mahtuvusega kondensaator C_2 laseb helisagedusliku vahelduvvoolu läbi, kuid alalisvoolukomponentidele on ta ületamatuks takistuseks.

Joonisel 23 on toodud trioodi võretunnusjoon — anoodvoolu i_a sõltuvus võrepingest u_g . Võrepinge muutumisel Δu_g võrra, muutub anoodvool Δi_a võrra. Konstantne negatiivne pinge U_{og} on vajalik selleks, et lamp töötaks karakteristiku lineaarses osas. Võimenduse olemus seisneb selles, et väikesed võrepinge kõikumised tekitavad anoodvoolu mõningast võnkumist, millele vastavad suured pinge-võnkumised anoodkoormustakistil, sest R_a on üpris suur:

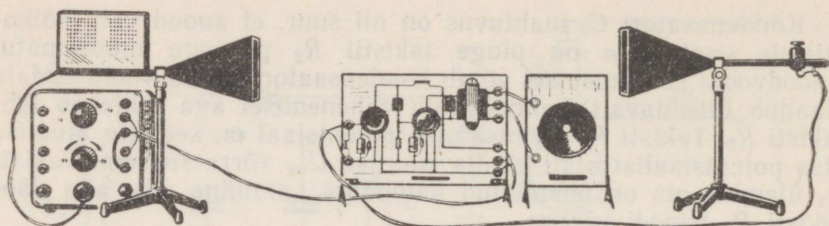
$$\Delta u_a = \Delta i_a R_a.$$

Võimendatud helisagedusvõnkumised panevad tööle valjuhääldi.

13. KATSED ELEKTROMAGNETLAINETEGA

Kaasaegsete raadiotehniliste seadmetega saab elektromagnetlainete omaduste uurimiseks teha väga näitlikke katseid. Katsetes on kõige parem kasutada ülikõrgsagedusgeneraatori (venekeelne lühend CBY) poolt kiiratavaid sentimeeterlaineid. Generaatori võnkumisi moduleeritakse helisagedusega, nii et vastuvõetava signaali võiks pärast detekteerimist suunata valjuhääldisse. Sentimeeterlaineala elektromagnetlained levivad hästi ristkülikukujulise ristlõikega juhtivas torus — **lainejuhhis**. Otsast avardub lainejuhe ruuporiks, mis kiirgab raadiolaineid kindlas suunas. Vastuvõtuantenniks on samasugune ruupor, mille abil saab vastu võtta ainult ruupori telje suhtes väikese nurga all levivaid elektromagnetlaineid. Vastuvõturuupor läheb üle lainejuhiks ja lõpeb detekteerimiseseadmega. Katseseadme ülevaade on antud joonisel 24.

Lainete neeldumise ja hajumise kindlakstegemiseks pannakse ruuporid teineteise vastu nii, et valjuhääldi heli oleks hästi kuuldav. Seejärel pannakse ruuporite vahele mitmesuguseid dielektrikuid. Dielektrikute kohaleasetamisel on selgesti märgatav, et heli



Joon. 24

tugevus väheneb. Kui dielektrik asendada metallplaadikesega, ei jõua lained peegeldumise tõttu üldse vastuvõtjani ja heli pole kuulda.

Elektromagnetlaine peegeldub selliselt, et peegeldumisnurk on langemisnurgaga võrdne. Et selles veenduda, tuleb ruuporid paigutada suure metall-lehe pinnanormaali suhtes võrdsete nurkade all. Kui metall-leht ära võtta või lehte pöörata, siis heli kaob.

Elektromagnetlained muudavad dielektriku pinnal oma levimissuunda (murduvad). Seda võib suure, parafiinist valmistatud kolmnurkse prisma abil kindlaks teha. Ruuporid tuleb paigutada teineteise suhtes samasuguste nurkade all nagu peegeldumise jälgimisel. Metall-leht asendatakse prismaga, mille väiksem tahk tuleb panna sellisesse asendisse, milles oli metall-leht. Prisma kõrvaldamisel või pööramisel täheldatakse heli kadumist.

Elektromagnetlained on ristlained — elektromagnetvälja vektorid \vec{E} ja \vec{B} on laine levimissuunaga risti. Katsetes ülikõrgsagedusgeneraatoriga võngub kumbki vektor kindlas tasandis. Selliseid elektromagnetlaineid nimetatakse **polariseerituteks**. Detektoriga vastuvõturuupor võtab samuti vastu ainult polariseeritud laineid, mida saab kindlaks teha sel teel, et saate- või vastuvõturuupori pööramisel 90° võrra heli kaob.

Elektromagnetlainete polarisatsiooni saab jälgida, kui panna generaatori ja vastuvõtja vahele metallvarrastest võre. Võre tuleb asetada nii, et metallvardad oleksid ükskord horisontaal-, teine kord vertikaalasendis. Metallvarraste ühe asendi korral on elektromagnetlaine elektrivälja vektor varrastega paralleelne ja tekitab viimastes voole, mille tulemusena võre peegeldab elektromagnetlaineid niisama nagu metallplaat. Metallvarraste teise asendi korral on elektromagnetlaine vektor \vec{E} varrastega risti ning viimastes voole ei tekita, mistõttu elektromagnetlaine tungib võrest läbi.

Ülikõrgsagedusgeneraatori abil saab jälgida ka selliseid tähtsaid elektromagnetlainete omadusi, nagu interferents ja difraktsioon.

14. RAADIOLAINETE LEVIMINE

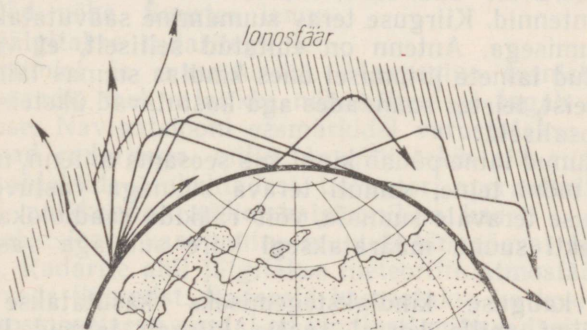
Elektromagnetlainete kasutamisel raadiosides asuvad nii raadiolainete allikas kui ka vastuvõtja kõige sagedamini maapinna lähedal. Maapinna kuju ja füüsikalised omadused, samuti ka atmosfääritingimused mõjutavad tugevasti raadiolainete levimist.

Atmosfääri ülemised, Maa pinnast 100—300 km kõrgusel asuvad ioniseeritud gaasi kihid mõjutavad raadiolainete levimist eriti tugevasti. Neid ioniseeritud gaasi kihte nimetatakse **ionosfääriks**. Atmosfääri ülemisi kihte ioniseerivad Päikese elektromagnetkiirgus ja Päikeselt kiirgunud osakeste voog.

Elektrivoolu juhtiv ionosfäär peegeldab raadiolaineid lainepikkusega $\lambda > 10-15$ m nii nagu metallplaatki. Ionosfääri raadiolainete peegeldamise võime muutub ööpäeva ja erinevate aastaegade jooksul tugevasti.¹

Püsiv raadioside maapinna kaugete, otsese nähtavuse alast väljaspool asuvate punktide vahel on võimalik tänu raadiolainete peegeldumisele ionosfäärilt ja paindumisele maakera pinna poole (s.t. difraktsioonile). Difraktsioon on seda tugevam, mida pikem on laine. Suurtel kaugustel on raadioside lainete paindumise tõttu võimalik ainult neil lainepikkustel, mis ületavad tunduvalt 100 m (**kesk- ja pikklained**).

Lühilained ($\lambda < 100$ m) levivad suurtele kaugustele ainult tänu mitmekordsele peegeldumisele ionosfäärilt ja Maa pinnalt (joon. 24). Just lühilainete abil ($\lambda = 100-10$ m) on võimalik luua raadioside Maal üksteisest kuitaheks kaugel asuvate radiojaamade vahel. Pikad raadiolained kõlbavad selleks vähem, sest nad neelduvad Maa pindmistes kihtides ja ionosfääris tugevasti. Piiratud kau-



Joon. 25

¹ Nimelt sellepärast ongi raadioside, eriti keskmistel lainealadel ($\lambda = 100-1000$ m), öösel ja talvel palju kindlam.

gustel ja küllalt võimsate raadiosaatejaamade korral tagatakse kõige kindlam raadioside siiski pikklainetel.

Ultralühilained ($\lambda < 10$ m) tungivad ionosfäärist läbi ja Maa poole peaaegu üldse ei paindu. Seepärast peetakse ultralühilainete vahendusel sidet kosmoselaevadega ja ka otsese nähtavuse piirkonnas asuvate punktidega.

15. RAADIOLOKATSIION

Katsed elektromagnetlainetega aitavad selgitada nähtust, mida pani tähele juba A. S. Popov, kui ta katsetas raadiosideaparatuuri Balti merel. A. S. Popov märkas, et kui laev asub saatja ja vastuvõtja vahel, siis raadioside katkeb. Laeva metallkerelt ja teistelt osadelt peegelduvad raadiolained hajusid kõikides suundades. A. S. Popov soovitas seda nähtust kasutada navigatsioonis. Tehistakistuste, nn. «radiovarju» loomisega saab määrata kiirgaja suuna.

Tänapäeva tehnikas kasutatakse raadiolainete peegeldumist mitmesugustelt takistustelt teisiti. Suure tundlikkusega vastuvõtjad püüavad peegeldunud signaali kinni ja võimendavad seda. Sel teel saab määrata kauguse esemeni, millelt raadiolaine peegeldus.

Objektide avastamist ja nende täpse asukoha kindlakstegemist raadiolainete abil nimetatakse **raadiolokatsiooniks**. Raadiolokatsiooniseade (**raadiolokaator**¹) koosneb saate- ja vastuvõtuseadest. Raadiolokatsioon kasutatakse ülikõrgsageduslikke (10^8 — 10^{11} Hz) elektromagnetvõnkumisi. Võimas ülikõrgsagedusgeneraator on sidestatud antenniga, mille poolt kiiratakse laine on teravalt suunatud. Lainepikkusel 10 cm ja vähem töötavates raadiolokaatorites tekitavad teravalt suunatud raadiolaine paraboolsete peeglite sarnased antennid. Kiirguse terav suunamine saavutatakse lainete interfereerumisega. Antenn on ehitatud selliselt, et vibraatorite poolt kiiratud lainete liitumisel ühes kindlas suunas lained tugevdavad üksteist, teistes suundades aga kustutavad üksteist kas täielikult või osaliselt.

Peegeldunud laine püüab kinni kas seesama antenn, mis kiirgab laine, või mõni teine, samuti terava suunaga vastuvõtuantenn. Tänu kiirguse teravale suunale, võib rääkida raadiolokaatori «kiirest». Objekti suund määrataksegi kiire suunaga vastuvõtumomendil.

Märgi kauguse kindlakstegemiseks kasutatakse kiirguse impulssrežiimi, mille korral saatja kiirgab laineid lühiaegsete impulssidena. Iga impulsi kestus on miljondikke sekundist ja impulsside vaheline aeg umbes 1000 korda pikem. Impulsside vaheajal võetakse vastu peegeldunud laineid.

¹ Raadiolokaatorit nimetatakse sageli ka **radariks**.

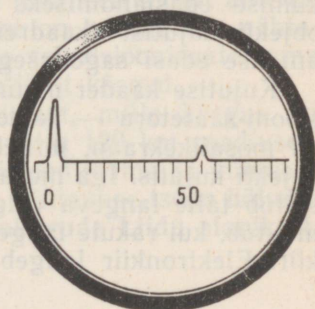
Kauguse R kindlakstegemiseks mõõdetakse raadiolaine määrgini ja vastuvõtjasse tagasi jõudmise koguaeg t . Kuna raadiolainete levimiskiirus $c=3 \cdot 10^8$ m/s, on õhus praktiliselt muutumatu, avaldub kaugus R kujul

$$R = \frac{ct}{2}.$$

Raadiolainete hajumise tõttu jõuab vastuvõtjani saatja poolt kiiratud energiast ainult tühine osa. Sellepärast võimendavadi raadiolokaatorite vastuvõtjad saabunud signaali 10^{12} (triljon) korda. Loomulikult peab sellise tundlikkusega vastuvõtja olema saatja töötamise ajaks välja lülitatud. Saatja hetkvõimsus on impulsi kiirgamise hetkel aga niivõrd suur (kümneid, sadu ja isegi tuhandeid kilovatte), et saateseadme mõju vastuvõtjale ei kao täielikult. Helendav punkt, mis liigub vastuvõtja elektronkiiretorus ühtlaselt, hälbib saate momendil ning kauguse skaala nulltäpi juures tekib kühm (joon. 26). Pärast impulsi kiirgamist liigub helendav punkt piki skaalat jällegi ühtlaselt ja hälbib uuesti nõrga peegeldunud signaali vastuvõtuhetkel. Kõhmukestevaheline kaugus ekraanil on võrdeline signaali levimise ajaga t ja järelikult ka märgi kaugusega R . See võimaldabki gradueerida skaala vahetult kilomeetrites.

Radiolokatsiooniseadmed avastavad laevu ja lennukeid kuni mõnesaja kilomeetri kauguselt. Ilmastikutingimused ja aastaajad mõjutavad radarite tööd vähe. Suurtes lennujaamades jälgitakse radaritega lennukite startimist ja maandumist. Maapealne teenistus annab pilootidele raadio teel vajalikke näpunäiteid ja tagab seega lendude ohutuse. Navigatsiooni eesmärkidel varustatakse ka lennukid ja laevad radaritega, mille ekraanil tekib pilt raadiolaineid hajutavate objektide asukohtadest. Lokaatori operaatoril on silme ees justkui paikkonna raadiolokatsiooniline kaart.

Raadiolokatsiooni kasutamine muutub tänapäeval üha mitmekesisemaks. Radarite abil jälgitakse meteoriite atmosfääri ülakihitides ja pilvede liikumist. Radareid kasutatakse ka kosmose uurimisel. Iga kosmoselaeva pardal on kindlasti mitu radarit. Ameerika Ühendriikides ja Ungaris katsetati 1946. aastal Kuu pinnalt peegeldunud signaali vastuvõtmist. 1961. aastal uurisid nõukogude teadlased raadiolokatsiooni abil planeet Veenust ning määrasid sel teel planeedi pöörlemisperioodi ning täpsustasid mõningaid astronoomilisi kaugusi.



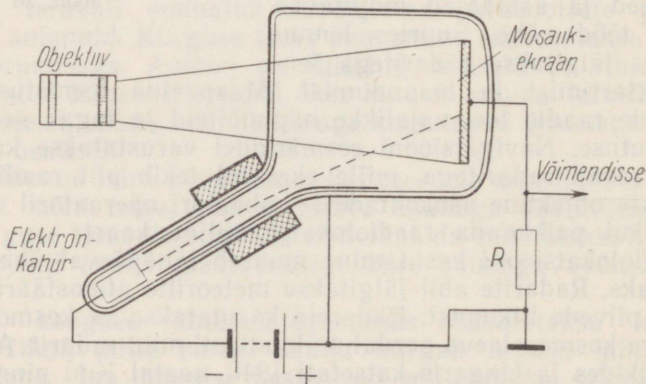
Joon. 26

16. TELEVISIOONI PÕHIMÖTE

Tänapäeval areneb tormiliselt raadioelektronika suhteliselt noor haru — televisioon. Tuhanded televisioonijaamad annavad pidevaid saateid, mida jälgivad miljonid vaatajad. Liikuvate kujutiste ülekandmine ei piirdu aga ainult telesaadetega, vaid televisiooni rakendatakse mitmekülgset ka erinevates rahvamajandusharudes ja teaduslikes uuringutes. Ligipääsmatutes, ebaumugavalt jälgitavates ja kaugetes kohtades toimuvate protsesside ning nähtuste jälgimisel on televisiooni osa eriti suur.

Kujutiste ülekandmine kauguste taha on seletatav järgmiselt. Televisioonisaatjas muundatakse kujutis elektrisignaali järgnevuseks, millega seejärel moduleeritakse kõrgsagedusgeneraatori võnkumisi. Moduleeritud elektromagnetlainet kannab informatsiooni suurte kauguste taha. Televisioonivastuvõtjas toimub vastupidine protsess, s. t. kõrgsageduslikud moduleeritud võnkumised detekteeritakse ja saadud signaal muundatakse nähtavaks kujutiseks. Liikumise edasiandmiseks kasutatakse kino põhimõtet — liikuva objekti kujutist (kaadreid), mis erinevad üksteisest hästi vähe, antakse edasi sagedusega mõnikümme kujutist sekundis.

Kujutise kaader muundatakse elektrisignaali seeriaks televisiooni-saatetoru — ikonoskoobi abil (joon. 27). Ikonoskoobi sees on mosaiikakraan, millele projekteeritakse optilise süsteemi abil objekti kujutis. Iga mosaiigirakk on laetud ja tema laengu suurus sõltub talle langeva valguse intensiivsusest.¹ Mosaiigiraku laeng muutub, kui rakule langeb elektronkahuri poolt tekitatud elektronkiir. Elektronkiir langeb järgemööda mosaiigi ühe rea kõikidele



Joon. 27

¹ Seda selgitatakse VI peatükis, kus on juttu fotoefektist.

rakkudele, seejärel teise rea kõikidele rakkudele jne. Takistit R läbiva vooluimpulsi suurus sõltub mosaiigiraku laengu suuruse muutumisest. Seega muutub pinge takistil R võrdeliselt valguse intensiivsuse muutumisega piki kaadri ridu.

Televisioonivastuvõtjas saadakse pärast detekteerimist täpselt samasugune signaal nagu tekkis ikonoskoobis. Pärast detekteerimist saadud signaali nimetatakse **videosignaaliks**. Videosignaali muudab ekraanil nähtavaks kujutiseks televisiooni-vastuvõtutoru — kineskoop. Kineskoobi elektronkahuril on elektrood, mis reguleerib elektronide hulka elektronkiires ja järelikult ka ekraani helendumist kohas, kuhu elektronkiir langeb. Horisontaal- ja vertikaalhälvituspoolide süsteemid sunnivad elektronkiirt jooksmata mööda ekraani täpselt nii nagu elektronkiir jookseb mööda televisiooni-saatetoru mosaiikekraani. Saate- ja vastuvõtutoru kiirte liikumist sünkroniseeritakse eriliste sünkroniseerimissignaalide abil.

Televisioonisignaale saab üle kanda ainult ultralühilainealal (meeterlainealal). Ultralühilained levivad tavaliselt ainult antenni otsese nähtavuse piirkonnas ja sellepärast on telesaadete nähtavuspiirkonna suurendamiseks vaja rajada televisioonisaaatejaamu tihedalt ja ehitada nende antennid võimalikult kõrged.

Moskvas asuv Ostankino televisioonimast, mille kõrgus on 533 m, võimaldab head telesaadete vastuvõttu 120 km raadiuses. Tänapäeval on meie riigis üle 1000 televisioonijaama ja kümneid miljoneid televiisoreid. Telesaadete kindla nähtavuse tsoon hõlmab territooriumi, millel elab umbes 70% Nõukogude Liidu elanikest.

17. SIDEVAHENDITE ARENEMINE NÕUKOGUDE LIIDUS

Tehnilisi sidevahendeid arendatakse ja täiustatakse pidevalt ning neid kasutatakse järjest utel aladel.

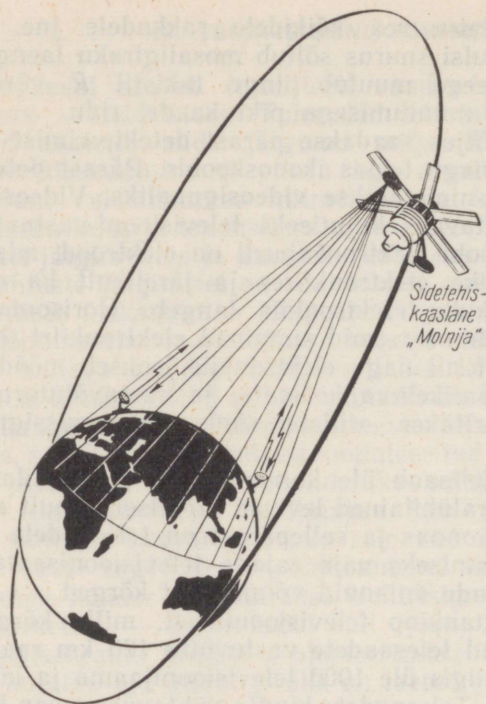
Veel hiljuti kasutati, näiteks linnadevahelises telefonisides, eranditult äikese ja jäite suhtes tundlikke õhuliine. Praegu kasutatakse üha laialdasemalt kaabel- ja raadioreleeliine.

Raadioreleesides kasutatakse ultralühilaineid (detsimeeter- ja sentimeeterlaineid), mis levivad ainult otsese nähtavuse piirkonnas. Sellepärast koosnevadki raadioreleeliinid väikese võimsusega raadiojaamade ahelast, milles iga jaam annab signaalid edasi oma naabrile. Raadioreleesjaamade mastid on 60—80 m kõrgused ja asuvad üksteisest 40—60 km kaugusel.

Millimeeterlaineala lainejuhtmete ja eriti optiliste kvantgeneraatorite, nõndanimetatud laserite¹ kasutamine linnadevahelistes sideliinides avab sides uusi võimalusi.

Valguskiire kasutamisel saab samaaegselt edasi anda tohtu

¹ Laserite kohta vt. § 99.



Joon. 28

hulga informatsiooni. Armeenias on juba ehitatud Jerevani ja Bjurakani vaheline 24-kanaliline telefoniside laserliin, mille pikkus on 28 km. Laserliin töötab püsivalt ja kindlalt.

Saavutused raadiorelee- ja kaabelliinide alal kõiki sideprobleeme muidugi ei lahenda. Näiteks, Moskva ja Vladivostoki vaheline raadioreleeliin nõuaks 150 maapealset raadiojaama, kaabelliin aga tuhandeid kilomeetreid kallihinnalist kaablit ja sadu võimenduspunkte.

Kosmoseraadioside edusammud võimaldasid luua uue sidesüsteemi «Orbita», milles televisiooniretranslaatorina kasutatakse sidetehiskaaslast «Molnija 1» (joon. 28), mis tiirleb ümber Maa tugevasti väljavenitatud orbiiti mööda ligikaudu 12-tunnise perioodiga. Sidetehiskaaslasele signaalide edasiandmiseks on loodud võimsad ja kindlad süsteemid. Sidetehiskaaslaselt signaalide vastuvõtuks aga kümneid translatsioonipunkte. Tänu sellisele sidesüsteemile saab Kesktelevisiooni saateid jälgida veel umbes 30 miljonit inimest.

Kosmoseraadioside edusammud on meie maal hiiglaslikud.

Selle kinnituseks on kas või kindla side loomine paljude tehiskaaslaste, kosmoselaevade ja planeetidevaheliste jaamadega.

Ka selliseid suhteliselt vanu sidevahendeid, nagu telegraaf ja fototelegraaf täiustatakse ja kasutatakse järjest uutel aladel.

Telegraafi kasutatakse praegu intensiivselt informatsiooni hankimisel seoses elektronarvutustehnika juurutamisega rahvamajandusse.

Liikumatu kujutiste edasiandmise ulatuse üle võib otsustada järgmiste arvude põhjal: aastas antakse fototelegraafi teel edasi kuni 70 tuhat ajaleheveergu, mille järgi trükitakse kohapeal üle 3 miljardi keskajalehe.

Harjutus 1

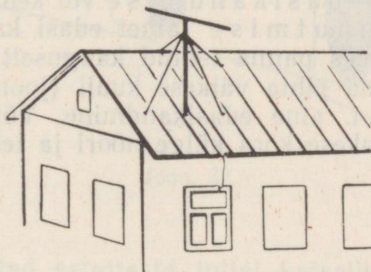
1. Kas on võimalik valida sellist taustsüsteemi, milles vooluga juhtme magnetiline induktsioon oleks null?

2. Saate- ja vastuvõtuvibraatorid on teineteisega risti. Kas vastuvõtuvibraatoris tekib võnkumisi?

3. Katsetes elektromagnetlainetega suleti saateruupor metallplaadikestega nii, et plaadikeste vahele jäi ainult väike pilu. Pärast seda oli heli kuuldav isegi siis, kui vastuvõturuupor moodustas saateruuporiga mingi nurga. Miks?

4. Miks ei saa radar töötada vee all?

5. Raadiolokaator töötab impulssrežiimis. Iga impulsi kestus on 10^{-6} s ja sekundis kiiratakse 1000 impulssi. Kui kaugel ja kui lähedasi märke saab selle radariga avastada?



Joon. 29

6. Joonisel 29 on kujutatud televiisori vastuvõtuantenn. Mida võib öelda televisioonikeskusest lähtuva elektromagnetlainelise magnetilise induktsiooni võnketasandi orientatsiooni kohta?

7. Kas raadiolainete levimistingimused Kuul ja Maal erinevad oluliselt või mitte?

SISSEJUHATUS

(Vaadete arenemine valguse olemuse kohta)

Antiikõpetlaste esimesed kujutlused valgusest olid küllaltki naiivsed. Arvati, et silmast lähtuvad erilised peenikesed kombitsad ja nägemismulje tekib esemete kompimisel nendega. Üksikasjalikult pole sellistel vaadetel praegu loomulikult vaja peatuda. Me jälgime vaid lühidalt teaduslike ettekujutuste arengut valguse olemusest.

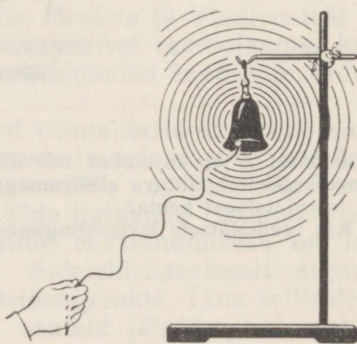
Mõju edasiandmise kaks viisi. Valgus levib valgusallikast, näiteks elektripirnist, kõikides suundades ja langeb ümbritsevatele kehadele ning muuhulgas ka soojendab neid. Silma langedes tekitab valgus nägemisaistingu — me näeme. Võib öelda, et valguse levimisel toimub ühe keha (valgusallika) mõju edasiandmine teisele kehale (vastuvõtjale).

Üldse võib üks keha mõjutada teist kahel viisil: kas allikast vastuvõtjani aine edasikandmise või kehadevahelise keskkonna oleku muutmise (ainet edasi kandmata) teel.

Kella võib näiteks panna teatud kauguselt helisema sel teel, et me viskame tema pihta väikese kuuli (joon. 30). See on esimene võimalus, s. t. aine edasikandmine. Võib toimida ka teisiti — siduda kellukese kõra külge nõõri ja tekitada nõõris kella



Joon. 30



Joon. 31

kõra kõigutavaid laineid (joon. 31). Viimasel juhul ainet edasi ei kanta, vaid piki nõõri kulgeb laine, s. t. muutub nõõri olek (kuju).

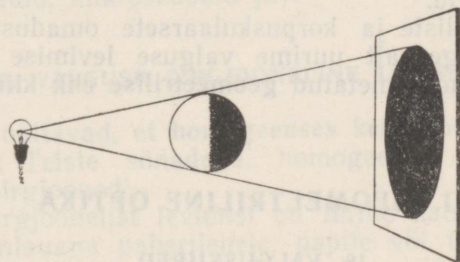
Ühe keha mõju edasiandmist teisele kehale mingi keskkonna oleku muutmise vahendusel nimetatakse laineprotsessiks.

Valguse korpuskulaar- ja laineteooria. Vastavalt mõju edasiandmise kahele viisile hakkasid arenema kaks täiesti erinevat teooriat selle kohta, mis on valgus, milline on valguse loomus. Need kaks teooriat tekkisid XVII sajandil peaaegu korraga. Üks teooria oli seotud Newtoni, teine aga Huygeni nimega.

Newton järgis niinimetatud valguse korpuskulaarteooriat, mille kohaselt valgus oli allikast igas suunas levivate osakeste voog (aine edasikandmine).

Huygeni ettekujutuse järgi oli valgus erilises, hüpoteetilises keskkonnas — eetris levivate lainete voog, kusjuures eeter täitis kogu ruumi ja tungis kõikidesse kehasse.

Pikka aega eksisteerisid mõlemad teooriad paralleelselt ja mitte kumbki neist ei saavutanud otsustavat võitu. Ainult tänu Newtoni autoriteedile eelistas enamik teadlasi korpuskulaarteooriat.



Joon. 32

Mõlemad teooriad selgitasid tollal katseliselt kindlakstehtud valguse levimise seadusi enam-vähem edukalt. Korpuskulaarteooriaga oli raske põhjendada, miks ruumis lõikuvad valguskimbud üksteist üldse ei mõjuta. Valgusosakesed peaksid ju pörkuma ja hajuma. Laineteooria selgitas seda kergesti. Näiteks veepinnal lähevad lained üksteisest vabalt läbi, ilma et nad üksteist mõjutaksid. Ent valguse sirgjoonelist levimist, mille kinnituseks on teravate varjude tekkimine, oli laineteooriaga raske põhjendada (joon. 32). Korpuskulaarteooria alusel järeldub valguse sirgjooneline levimine lihtsalt inertsiseadusest.

Selline määramatu seisukoht valguse olemusest kestis XIX sajandi alguseni, mil avastati valguse difraktsioon (valguse paindumine tõkete taha) ja interferents (valgustatuse suurenemine või vähenemine valguskiirte kimpude liitumisel). Difraktsioon ja

interferents on eranditult omased lainelisele liikumisele ja korpuskulaarteooriaga neid nähtusi selgitada ei saa. Seepärast näis, et laineteooria sai lõpliku ja täieliku võidu. Veendumus võidus tugevnes eriti veel pärast seda, kui Maxwell XIX sajandi teisel poolel tõestas, et valgus on elektromagnetlainete erijuhus. Maxwelli töödega pandi alus valguse elektromagnetteooriale. Ei jäänud mingit kahtlust, et **levimisel käitub valgus lainena**. Kahtlusi pole ka praegu. Ettekujutused valguse olemusest hakkasid aga XX saj. algul osaliselt muutuma. Ootamatult selgus, et kõrvaleheidetud korpuskulaarteooria on tegelikkusega ikkagi seotud. **Kiirgumisel ja neeldumisel käitub valgus osakeste voona**. Avastati valguse diskreetsed, või nagu räägitakse, kvantomadused. Tekkis ebatavaline olukord: interferentsi- ja difraktsiooninähtuse selgitamisel tuli valgust vaadata endiselt lainena, kiirgumise ja neeldumise korral aga osakeste voona. Need kaks teineteisega kokkusobimatutena näivat kujutlust valguse olemusest õnnestus vasturääkivusteta ühendada XX sajandi 30-ndatel aastatel uues silmapaistvas füüsikateoorias — **kvantelektrodünaamikas**. Hiljem selgus, et kahesuguste omadustega pole ainult valgus, vaid ka mistahes teise materiaali liigid.

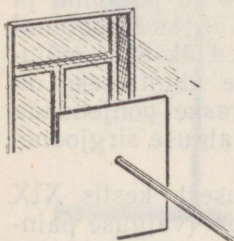
Valguse laineliste ja korpuskulaarsete omadustega tutvume pärastpoole. Kõigepealt uurime valguse levimise seadusi, mis moodustavad nõndanimetatud **geomeetrilise** ehk **kiirteoptika** sisu.

II. GEOMEETRILINE OPTIKA

18. VALGUSKIIRD

Kõikide lainete, sealhulgas ka valguslainete suund määratakse kiirtega — lainepinna normaalidega (vt. X kl. õpik § 42). Kiired näitavad laine energia levimise suunda ruumis.

Valguse, s. t. valgusenergia levimise suuna mistahes ruumpunktis saab leida katseliselt. Selleks tuleb valguse teele panna väikese avausega (näiteks millimeetrilise läbimõõduga; joon. 33) läbipaistmatu ekraan. Lastes eelnevalt tuppa sigaretsuitsu, näeme nüüd valguse teed kitsa sirgjoonelise kanalina — valguskiirte kimbuna. Võib näida, et avause vähendamisega saab valguse levimissuunda kuitahes täpselt kindlaks teha. Tegelikuses aheneb kiirtekimp avause vähendamisel ainult senikaua, kuni avause diameeter on valguse lainepikkusest tunduvalt suurem. Kui avause diameetri suurusjärg saab valguse lainepikkusega võr-



Joon. 33

reldavaks, hakkab valguskiirte kimp difraktsiooni tõttu laienema, paindudes ekraani äärte taha täpselt samuti nagu see sünnib lainetega veepinnal. Seepärast pole võimalik kuitahes peenikest valguskiirte kimpu saada.

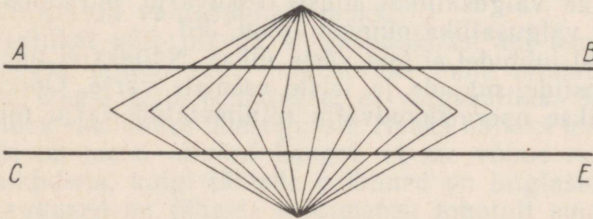
Valguskiir on geomeetiline mõiste. Valguskiire all mõistetakse mitte peenikest valguskiirte kimpu, vaid joont, mida mööda valgusenergia levib. Valguskiire levimissuuna katseliseks määramiseks eraldame kitsa valguskiirte kimbu, mille diameeter peab siiski olema lainepikkusest suurem. Seejärel asendame valguskiirte kimbud joontega, mis on justkui valguskiirte kimpude telgedeks. Need jooned ongi valguskiired. Valguskiire mõiste sissetoomise peamine kasu on selles, et valguskiirte suund ruumis on määratud lihtsate seadustega, geomeetrilise optika seadustega, mis olid ammu enne valguse olemuse väljaselgitamist eksperimentaalselt kindlaks tehtud. Valguse laineteooria seisukohalt on need seadused ligikaudselt õiged ja kehtivad siis, kui valguse lainepikkus on tõkete mõõtmetest palju kordi väiksem.

Selles peatükis me tutvume geomeetrilise optika seadustega ja nende seaduste laialdase rakendamisega optikariistades (prillid, fotoaparaadid, mikroskoobid jt.).

19. VALGUSE SIRGJOONELINE LEVIMINE

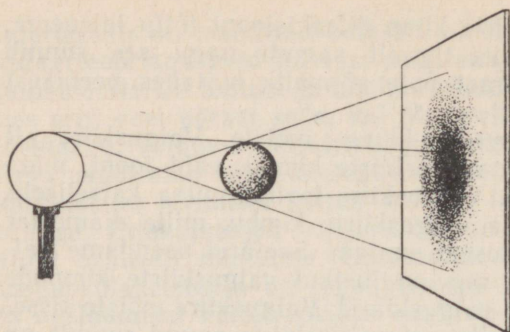
Vaatlused näitavad, et **homogeenses keskkonnas levib valgus sirgjooneliselt**. Teiste sõnadega, homogeenses keskkonnas on valguskiired sirgjooned¹.

Valguse sirgjoonelist levimist on lihtne katsega kontrollida. Tõmbame joonlauaga paberilehele, papile või tahvlile sirglõigu ja torkame selle otstesse ning keskaika nõõpnõela. Vaatame tõmmatud joont ühest otsast. Kui joon on sirge, siis varjab meie silmale lähim nõõpnõel kõiki teisi. See tähendab, et kaugematelt

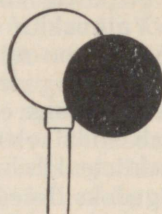


Joon. 34

¹ Geomeetrias tekkisid mõisted *kiir* ja *sirgjoon* kui ettekujutused valguskiirtest.



Joon. 35



Joon. 36

nööpnõeltelt kui valgusallikatest sirgjoont mööda kulgevad valguskiired meie silma ei jõua, sest nende teel on läbipaistmatu tõke. Vaadates piki joont, saab kontrollida selle sirgust. (Tehke kindlaks, et joonisel 34 on AB ja CE sirglõigud.) Täpselt samal viisil kontrollitakse joonlaua enese või mistahes teise toote sirgust.

Valguse sirgjoonelise levimisega seletub ka **varju** tekkimine. Väikeste mõõtmetega valgusallikas (valguspunkt) tekitab teravate piirjoontega varju, mille kaju sarnaneb eseme kujuga (vt. joon. 32)¹. Kindlate mõõtmetega valgusallikad tekitavad ebatasava varju (joon. 149). Asi seisab selles, et valgusallika igast punkti levib valgus sirgjooneliselt ja juba kaks helendavat punkti tekitab kaks mittekattuvat varju, millede liitumisel tekib mitteühtlase valgustusega vari. Lõplike mõõtmetega valgusallika korral tekib täisvari ainult neis ekraani osades, kuhu valgust üldse ei lange. Täisvarju äärtel asub heledam piirkond, mida nimetatakse **poolvarjuks**. Täisvarju piirkonnast eemaldudes muutub poolvari ikka heledamaks ja heledamaks. Täisvarju piirkonnast ei näe valgusallikat üldse. Poolvarju piirkonnast paistab ainult osa valgusallika pinnast (joon. 36).

Paljudel juhtudel ei teki varju üldse. Näiteks ei näe me pilves ilmaga postide, majade ja teiste esemete varje. Operatsioonidel valgustatakse operatsioonivälja niinimetatud varju mittetekitava lambiga.

¹ Täpsem oleks öelda, et vari sarnaneb eseme mingi lõikega, mis on ekraani tasapinnaga paralleelne.

Valgus avaldab kehadele mõju, sest ta kannab edasi energiat. Maxwelli elektromagnetteooria järgi on valgusenergia elektromagnetlainete energia. Valgusenergia mõõtmine moodustab optika osa, mida nimetatakse **fotomeetriaks**. Fotomeetrias õpitavate seaduspärasuste abil tehakse kindlaks normaalseks tööks vajaliku valgustatuse aste, selleks tarvilik valgusallikate paigutus, valguse kontsentratsioon antud suunas jne.

Rida suurusi iseloomustab valgust edasikantava energia aspektist. Tähtsaim nendest suurustest on **valgusvoog**.

Valgusenergia tajumisel on loomulikult erilise tähtsusega silmad. Seepärast huvitab meid ennekõike mitte elektromagnetlainest poolt edasikantav kogusenergia, vaid ainult see energia osa, mida silm vahetult tajub. Meie silm ei taju üldse väga pikki elektromagnetlaineid (raadiolaineid) ja väga lühikesi elektromagnetlaineid (näiteks γ -kiiri, mida mainiti VIII kl. kursuses).

Kõige tundlikum on silm roheliste valguskiirte suhtes. Praktikas on seepärast tähtis teada mitte lihtsalt valgusenergia hulka, mida mõõdetakse vastavate mõõteriistadega, vaid selle energia suurust, mida meie silm vahetult hindab. Selle valgusenergia hindamiseks on füüsikas eriline suurus — valgusvoog.

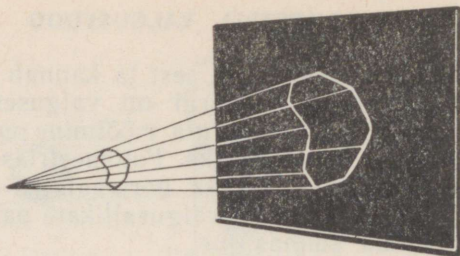
Valgusvooks nimetatakse ajaühikus mingit pinda läbiva kiirgusenergia hulka, mida hinnatakse nägemisaistingu põhjal. Teiste sõnadega, valgusvoog on vahetult silmaga hinnatav valguskiirguse võimsus.

21. VALGUSTUGEVSUS

Valgusvoo tekitab valgusallikas ja see valgusvoog mõjub ümbritsevatele esemetele. Sellepärast on võetud füüsikas kasutusse veel kaks suurus — valgusallika **valgustugevus**, mis iseloomustab valgusallikat ja **valgustatus**, mis iseloomustab valguse mõju kehade pinnale. Valgustugevuse mõistet on kõige lihtsam anda niinimetatud **valguspunkti** jaoks.

Valgusallikat võib lugeda valguspunktiks, kui tema mõõtmed on kaugustest, millelt selle valgusallika mõju hinnatakse, palju väiksemad. Peale selle eeldatakse, et valgusallikas kiirgab valgust kõikides suundades ühesuguselt. Heaks näiteks on siin taevatähed, mis on meist niivõrd kaugel, et me võime neid vaadata valguspunktidenä, kuigi tähtede mõõtmed on hiiglasuured. Kuna tähtede kaugused on tähtede mõõtmetest tohutult suuremad, siis ongi tähed kõige sobivamaks valguspunkti mudeliks.

Mistahes reaalsel valgusallikal võib vaadata kui valguspunktide kogu. Nagu juba märgiti, kiirgab valguspunkt valgust kõikides suundades ühtlaselt. Valgusvoo levimissuund määratakse **ruuminurgaga**.



Joon. 37

Joonistame suvalise kujuga pinna ja tõmbame mõttes mingist punktist selle pinna piirjoone kõikidesse punktidesse sirged (joon. 37). Need jooned eraldavad ruumist koonilise ruumiosa, mida nimetataksegi ruuminurgaks.

Ruuminurk «lõikab» kerapinnast, mille keskpunkt asub ruuminurga tipus, välja segmenti pindalaga ΔS . Ruuminurga suurus $\Delta\Omega$ võrdub selle segmenti pindala ΔS ja kera raadiuse R ruudu suhtega:

$$\Delta\Omega = \frac{\Delta S}{R^2}. \quad (2.1)$$

Toodud ruuminurga definitsioonil on mõte, sest antud juhul ei sõltu ruuminurk kera raadiusest. On ju teada, et ruuminurga poolt kera pinnast väljalõigatud pindala ΔS on võrdeline kera raadiuse ruuduga. Ruuminurga ühikut nimetatakse **steradianiks**. Ühe steradiaani suurune ruuminurk lõikab kerapinnast välja pinnatüki, mille pindala võrdub raadiuse ruuduga. Kogu ruuminurk, mis haarab punkti ümbritsevat ruumi on

$$\Omega = \frac{S}{R^2} = \frac{4\pi R^2}{R^2} = 4\pi.$$

Valgusallika valgustugevus võrdub valgusallikast ühikuliselt ruuminurka kiiratud valgusvooga. Kui valgusallikas kiirgab ruuminurka $\Delta\Omega$ valgusvoo $\Delta\Phi$, on valgusallika valgustugevus

$$I = \frac{\Delta\Phi}{\Delta\Omega}. \quad (2.2)$$

Rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis (SI-süsteemis) on fotomeetriliste suuruste põhiühikuks valgustugevuse mõõtühik **kandela** (tähis cd). Põhjus on siin selles, et kõige lihtsam on valmistada just valgustugevuse etaloni. Kõik teised fotomeetrilised mõõtühikud, nende hulgas ka valgusvoo mõõtühik, on tuletatud mõõtühikud. Valgustugevuse mõõtühiku (1 cd) etaloniks on eriline kiirgur, mis kujutab endast plaatina taidetud anum.

Avaust anumas vaadatakse kui pinda, mis omab normaali sihis kindlat valgustugevust. Etaloni valgustugevust mõõdetakse kauguselt, millelt võib etalooni vaadata valguspunktina.

Valgusvoo mõõtühik. Valgusvoo mõõtühikuks on **luumen** (tähis lm). Üks luumen (1 lm) on valgusvoog, mida valguspunkt valgustugevusega 1 kandela kiirgab ruuminurka 1 steradiaan.

22. VALGUSTATUS

Valgusallikas valgustab pinda peaaegu alati mitteühtlaselt. Laua kohal rippuv lamp valgustab kõige paremini laua keskohta, laua ääri aga palju halvemini. Põhjus pole ainult selles, et elektripirni valgustugevus on erinevates suundades erinev. Isegi valguspunkti korral langeb laua keskmisele pinnaosale suurem valgusvõimsus (valgusvoog), kui niisama suurele pinnale laua äärel.

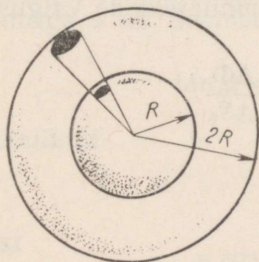
Valgustatuse E all mõistetakse pinnale ΔS langeva valgusvoo $\Delta\Phi$ ja selle pinna suuruse suhet:

$$E = \frac{\Delta\Phi}{\Delta S}. \quad (2.3)$$

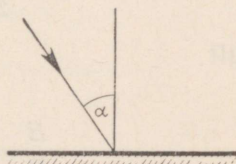
Fotomeetrilistes arvutustes on tähtis teada, kuidas mingi pinna valgustatus E sõltub pinna asendist langevate kiirte suhtes, pinna kaugusest r valgusallikast ja valgusallika valgustugevusest I .

Kõikide teiste tingimuste muutumatuse korral on valgustatus ilmselt valgusallika valgustugevusega võrdeline. Tõepoolest, kaks kõrvutiasuvat valgusallikat kiirgavad ajaühikus antud suunas kaks korda suurema valgusenergia, kui üks valgusallikas. Kaks sellist valgusallikat võib aga asendada ühega, mille valgustugevus on kaks korda suurem.

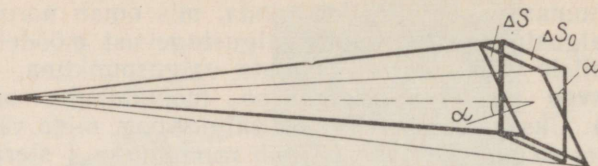
Valgustatuse sõltuvust valgusallika kaugusest saab leida järgmiselt. Pannes mõttes kera keskpunkti valguspunkti, langeb ajaühikus kera sisepinnale kindel hulk valgusenergiat. Kogu



Joon. 38



Joon. 39



Joon. 40

valgusvõimsus sõltub ainult valgusallika valgustugevusest ja ei sõltu kera raadiusest. Kuid pinnaühikule langev valgusvõimsus (valgustatus) kerapinna, s.t. kera raadiuse suurenemisel muidugi väheneb. Kuna kera pindala on võrdeline kera raadiuse ruuduga (joon. 38), siis on pinna valgustatus pöördvõrdeline kauguse ruuduga valgusallikast.

Vaadeldaval juhul langesid kiired kera pinnale risti, mida ei juhtu aga alati. Pinnale langevate kiirte suunda iseloomustatakse kiirte langemisnurgaga. Kiire langemisnurgaks nimetatakse langeva kiire ja kiire langemispunkti pinnale tõmmatud normaali vahelist nurka (joon. 39). Kera keskpunktis asuva valgusallika kiired langevad kera pinnale risti.

Uurime nüüd, kuidas muutub pinna valgustatus, kui kiirte langemisnurk pole null (kiired ei lange pinnale risti).

Vaatame kera sisepinna väga väikest pinnatükki. Kui pinnatüki mõõtmed on kera raadiusest palju kordi väiksemad, võib pinnatüki lugeda tasandiks. Olgu selle pinnatüki pindala ΔS_0 (joon. 40). Vaatame teist pinnatükki, millele langeb pinnatükile ΔS_0 langeva valgusvooga võrdne valgusvoog. Kui teine pinnatükk moodustab esimesega nurga α , siis on ka kera keskpunktis asuva valgusallika kiirte langemisnurk pinnatükile samuti α . Teise pinnatüki pindala olgu ΔS . Jooniselt 40 on selgesti näha, et

$$\frac{\Delta S_0}{\Delta S} = \cos \alpha.$$

Ühe ja sama valgusvoo $\Delta \Phi$ korral pole pinnatükkide valgustatus ühesugune:

$$E = \frac{\Delta \Phi}{\Delta S} \quad \text{ja} \quad E_0 = \frac{\Delta \Phi}{\Delta S_0}.$$

Järelikult

$$\frac{E}{E_0} = \frac{\frac{\Delta \Phi}{\Delta S}}{\frac{\Delta \Phi}{\Delta S_0}} = \frac{\Delta S_0}{\Delta S} = \cos \alpha.$$

Seega on kiirte suhtes kaldu oleva pinnatüki valgustatus seotud kiirtega risti oleva pinnatüki valgustatusega järgmiselt:

$$E = E_0 \cos \alpha.$$

See tähendab, et pinna valgustatus on võrdeline kiirte langemisnurga koosinusega.

Ühendame kõik kolm leitud sõltuvust. Pinna valgustatus on võrdeline valgusallika valgustugevusega ja kiirte langemisnurga koosinusega ning pöördvõrdeline pinna kauguse ruuduga valgusallikast:

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha. \quad (2.4)$$

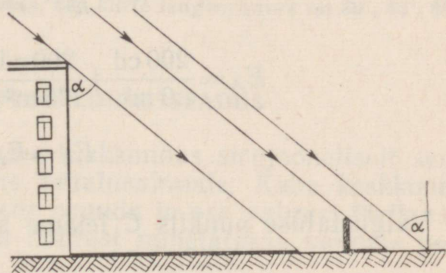
Valgustatuse mõõtühikuks on luks (tähis lx). Pinna valgustatus on 1 lx, kui pind asub valgusallikast valgustugevusega 1 cd 1 m kaugusel ja valguskiired langevad pinnale risti.

Mitme valgusallika korral võrdub pinna koguvalgustatus iga üksiku valgusallika poolt tekitatud valgustatuse summaga.

23. NÄIDISÜLESANDEID

1. Päikesekiirtega valgustatud hoone varju pikkus $L=36$ m. Vertikaalne post kõrgusega $h=2,5$ m tekitab varju pikkusega $l=3$ m. Leida hoone kõrgus H .

Joon. 41



L a h e n d u s. Päikesekiired langevad horisontaalsele maapinnale nurga α all. Jooniselt 41 on näha, et

$$\tan \alpha = \frac{L}{H} \quad \text{ehk} \quad \tan \alpha = \frac{l}{h}.$$

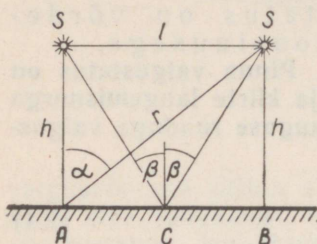
Järelikult

$$\frac{L}{H} = \frac{l}{h},$$

millest

$$H = \frac{L}{l} h; \quad H = \frac{36 \text{ m}}{3 \text{ m}} \cdot 2,5 \text{ m} = 30 \text{ m}.$$

2. Tuba valgustavad kaks lampi, mis asuvad põrandast kõrgusel $h=3$ m ja teineteisest kaugusel $l=4$ m. Eeldades, et lambid on valguspunktid valgustigevustega $I=200$ cd, leida põranda valgustus kummagi lambi all ja lampide keskkohas.



Joon. 42

Lahendus. Arusaadavalt piisab põranda valgustatuse leidmisest ühe lambi all, näiteks punktis A (joon. 42), sest teise lambi all asuva punkti B valgustus on samasugune. Punkt A asub ühest lambist kaugusel h ja kiired langevad põrandale risti. Teine lamp asub punktist A kaugusel $r=\sqrt{h^2+l^2}$ ja kiirte langemispurga α koosinuse saab leida kolmnurgast ABS :

$$\cos \alpha = \frac{h}{r} = \frac{h}{\sqrt{h^2+l^2}}; \quad \cos \alpha = \frac{3 \text{ m}}{\sqrt{9 \text{ m}^2+16 \text{ m}^2}} = \frac{3}{5}.$$

Valgustus E_A võrdub kummagi valgusallika poolt tekitatud valgustatuse summaga.

Järelikult

$$E_A = \frac{I}{h^2} + \frac{I}{r^2} \cos \alpha;$$

$$E_A = \frac{200 \text{ cd}}{9 \text{ m}^2} + \frac{200 \text{ cd}}{25 \text{ m}^2} \cdot \frac{3}{5} \approx 27 \text{ lx};$$

$$E_B = E_A.$$

Valgustatuse punktis C leiame analoogiliselt:

$$E_C = 2 \frac{I}{r_1^2} \cos \beta = 2 \frac{I}{h^2 + \frac{l^2}{4}} \cdot \frac{h}{\sqrt{h^2 + \frac{l^2}{4}}};$$

$$E_C = 2 \cdot \frac{200 \text{ cd}}{9 \text{ m}^2 + \frac{16 \text{ m}^2}{4}} \cdot \frac{3 \text{ m}}{\sqrt{9 \text{ m}^2 + \frac{16 \text{ m}^2}{4}}} \approx 25,6 \text{ lx}.$$

Harjutus 2

1. Kitsas valguskiirte kimp tungib läbi karbi külgeina tehtud augu karpi ja väljub sealt vastasseina tehtud augu kaudu. Kas valguskiir on nähtav karbi otsaseina tehtud avast, kui karbis on puhas õhk?

2. Kuidas näeb vaatleja päikesevarjutust, kui Maa jääb Kuu poolvarju sisse?

3. «Tuba, kuhu Ivan Ivanovitš sisse astus, oli täiesti pime, sest aknaesriided olid ette tõmmatud, ja eesriidesse tehtud august sissetungiv päikesekiir oli vikerkaarevärviline, ning langedes vastasseinale, joonistas sellele kirju maalilise pildi katustest, puudest ja õue riputatud pesust, kõigist ainult ümberpööratud kujul.» (N. V. Gogol. «Jutustus sellest, kuidas Ivan Ivanovitš läks tülli Ivan Nikiforovitšiga».)

Selgitage kirjeldatud nähtuse tekkimist.

4. Miks tekitab tänavavalgustuslamp maapinnale jalgadest terava, kuid peast hägusa varju?

5. Inimene möödub mingil kõrgusel rippuvast lambist. Kas inimese pea vari liigub ühtlaselt, kui inimene ise kõnnib ühtlaselt sirgjooneliselt?

6. Kerakujuline mattipirn, mille diameeter on 6 cm, valgustab 26 cm läbimõõduga gloobust. Leida seinale tekkinud gloobuse täisvarju diameeter, kui elektripirni keskpunkti kaugus gloobuse keskpunktist on 1 m ja gloobuse keskpunkti kaugus seinast on 2 m.

7. Tööpingi kohal 1,1 m kõrgusel rippuv lamp tekitab töökoha valgustatuse 50 lx. Normide järgi ei tohi töökoha valgustatus erineda 50 luksist rohkem kui ± 10 luksi võrra. Kui kõrgel tööpingist võib lamp rippuda?

8. Kaks valguspunkti valgustugevustega $I_1=80$ cd ja $I_2=125$ cd asuvad teineteisest kaugusel $l=3,6$ m. Missugusesse valgusallikaid ühendava sirge punkti tuleb väike tasapinnaline ekraan panna, et ekraani mõlemad pooled oleksid valgustatud ühesuguselt? Kas ekraani asukohta tuleb muuta, kui ekraan pole valgusallikaid ühendava sirgega risti?

9. Valguspunktile lähima tasapinna punkti valgustatus on 100 lx. Kui suur on nende tasapinna punktide valgustatus, kus kiirte langemisnurk on 30° , 45° , 60° ?

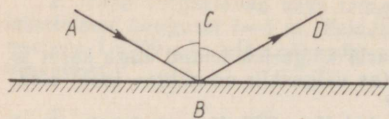
24. VALGUSE PEEGELDUMISSEADUS

Valguskiir levib homogeenses keskkonnas sirgjooneliselt seni, kuni ta jõuab teise keskkonna lahutuspinnale. Kahe keskkonna lahutuspinnal muudab valguskiir suunda ja osa valgust levib esimesse keskkonda tagasi. Seda nähtust nimetatakse **valguse peegeldumiseks**.

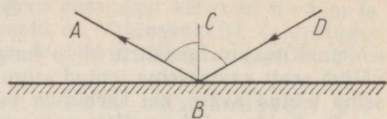
Kahe keskkonna lahutuspinna omadustest sõltuvalt võib peegeldumine olla erineva iseloomuga. Kui lahutuspinna konaruste mõõtmel on valguse lainepikkusest väiksemad, nimetatakse pinda **peegelpinnaks**.

Peegelpindadeks võiksime lugeda näiteks elavhõbedatilga, sileda klaasi või hästi poleeritud metalli pinna. Sellisele pinnale kitsa paralleelsete kiirte kimbuna langev valgus levib pärast peegeldumist samuti lähedastes suundades (paralleelselt).

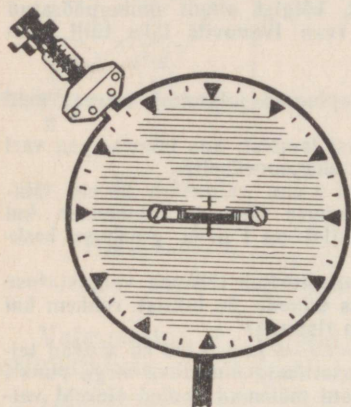
Kui pinnakonaruste mõõtmel on valguse lainepikkusest suuremad, siis kitsas kiirtekimp hajub lahutuspinnal, s. t. valguskiired levivad pärast peegeldumist kõikvõimalikes suundades. Sellist peegeldumist nimetatakse **hajuvaks** ehk **difuusseks peegeldumiseks**. Tänu valguse difuussele peegeldumisele me näemegi ese-



Joon. 43



Joon. 44



Joon. 45

meid, mis ise valgust ei kiirga. Vähesel määral hajub valgus isegi kõige siledamalt pinnalt, näiteks peegli, peegeldumisel, sest muidu me peegli pinda ei näeks.

Valguskiired alluvad peegeldumisel lihtsale seadusele, mis määrab siledale pinnale langenud ja pinnalt peegeldunud kiire ning valguskiire langemispunkti pinnale tõmmatud normaali vastastikuse asendi (joon. 43).

Mehaaniliste lainete peegeldumise käsitlemisel me nägime, et lainete peegeldumisel on peegeldumisnurk võrdne langemisnurgaga. See seadus kehtib mistahes lainete puhul. Valguse peegeldumisseadus sõnastatakse järgmiselt: **langev kiir, peegeldunud kiir ja kiire langemispunkti kahe keskkonna lahtuspinnale tõmmatud normaal asuvad ühes tasapinnas. Peegeldumisnurk võrdub langemisnurgaga.**

On arusaadav, et peegeldumisseadus kehtib ka siis, kui valgus levib vastupidises suunas (joon. 44). Valguskiirte pööratavus on nende tähtis omadus.

Peegeldumisseadust saab katseliselt kontrollida. Selleks kinnitatakse ketta keskohta tasapeegel või tasase servaga klaasitükk nii, et peegeldav pind ühtiks ketta horisontaalse diameetriga (joon. 45). Erilisest valgustist, mida saab mööda ketta serva liigutada, langeb peegeldavale pinnale kitsas valguskiirte kimp —

valguskiir. Langev ja peegeldunud kiir on ketta valgelpinnal nähtavad. Muutes valguskiire langemisnurka 0° kuni 90° , saab määrata vastava peegeldumisnurka suuruse. Valguskiire langemispunkti peegli tasapinnale tõmmatud pinnanormaal ühtib ketta vertikaalse diameetriga. Vaatlused kinnitavad peegeldumiseaduse õigsust ja valguskiirte pööratavust peegeldumisel.

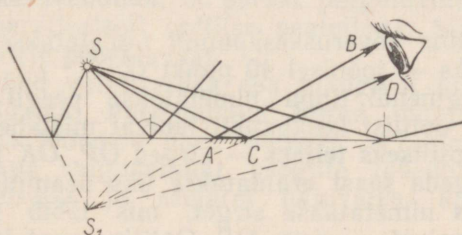
25. KUJUTIS TASAPEEGLIS

Asetage helenduv punkt S valgust peegeldava tasandi, s. t. tasapeegli ees. Püstitame küsimuse: kus me näeme peeglist vaadates selle punkti kujutist? Sellele küsimusele vastamiseks konstrueerime vähemalt kahe punktist S välja kiire käigu. Joonisel 46 on näha, et pärast peegilt peegeldumist langevad valguskiired vaatlejale silma. Inimesele näib nagu lähtuksid kiired punktist S_1 . Punkt S_1 asub peegli taga kiirte pikenduste lõikepunktis ja on seepärast punkti S kujutiseks tasapeeglis. Seda kujutist nimetatakse **ebakujutiseks**, sest punktist S_1 ei läiku peegeldunud kiired ise, vaid nende pikendused — valgusenergia punkti S_1 ei pääse.

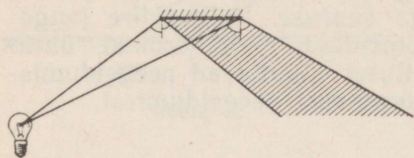
Punkti S_1 asukoha leidmiseks piisab hajuva kiirtekimbu mistahes kahe kiire vaatlemisest. Tavaliselt võetakse vaatluse alla silma langeva kiirtekimbu äärmised kiired — joonisel 46 kiired AB ja CD . Kolmnurkadel SAC ja S_1AC on külg AC ühine. Peegeldumiseaduse põhjal saab tõestada, et kolmnurkade selle ühise külje lähisnurgad on vastavalt võrdsed. See tähendab, et punkt S_1 asub punktiga S samal peegli ristsirgel ja on peeglist sama kaugel kui punkt S peegli ees. Punkti kujutise leidmiseks tasapeeglis piisab seega sellest, kui tõmmata antud punktist peeglile ristsirge ja pikendada seda ristsirget peegli taha niisama kaugemale, kui antud punkt asub peegli ees.

Kujutise nägemiseks on oluline ainult peegli see osa AC , millelt kiired peegelduvad otse silma. Kõogu ülejäänud peegli pind võib olla kinni kaetud või isegi ära lõigatud. Ülmärgitud lihtsat kujutise konstrueerimist see aga ei sega, kuid nüüd tuleb ristsirge tõmmata mitte peeglile, vaid peegli tasandile.

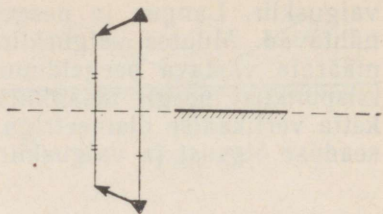
Peegli mõõtmete vähendamisel aga väheneb see ruumi piir-



Joon. 46



Joon. 47



Joon. 48

kond, kus kujutis S_1 on nähtav (nõndanimetatud nähtavuspiirkond). Väikese peegli ja lambikese võib teineteise suhtes paigutada nii, et lampi näevad ainult osa õpilasi klassist. Muutes lambikese ja peegli asendit, muudame sellega kujutise nähtavuspiirkonda (joonisel 47 viirutatud piirkond).

Kujutise suurus tasapeeglis võrdub eseme enda suurusega, milles võib igaüks veenduda, vaadates ennast peeglist. Kujutise konstrueerimine annab muidugi sama tulemuse (joon. 48).

26. SFÄÄRILINE PEEGEL

Sile kõverpind peegeldab samuti valguskiiri ja peegeldunud kiired võivad tekitada kujutise. Peegelkerad, mis ehivad näärikuuski, kumerpeeglid, mis pannakse mõnedele ristteedele, sfäärilised peeglid teleskoopides ja, lõpuks, kõverpeeglid «naerutoas» on näited kõverpindade kohta, mis tekitavad kujutisi. Kõverpeeglitest tekkinud kujutised ei ole alati niisama suured kui vastavad esemed (tasapeeglis on kujutis alati niisama suur kui esegi). Ka kujutise asend pole enam selline, nagu oli tasapeeglis tekkinud kujutisel.

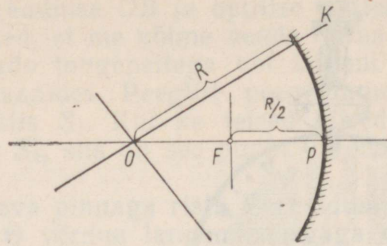
Kõikvõimalike kujudega kõverpeeglitest piirdume me ainult sfääriliste peeglite uurimisega. Sfäärilisi peegleid on lihtsam valmistada ja kõige sagedamini kasutatakse just neid (näiteks teleskoopides).

Sfääriliseks peegliks nimetatakse sfäärilist pinda, mis peegeldab valgust.

Sfäärilise pinna kõveruskeskpunkti nimetatakse **peegli optiliseks keskpunktiks** — joonisel 49 punkt O .

Sfäärilise segmendi tippu nimetatakse peegli **pooluseks** — punkt P . Peegli optilist keskpunkti läbivat sirget nimetatakse peegli **optiliseks teljeks** — sirged OP , OK jt.

Optiliste telgede seast eraldatakse üks peamine. Peegli **optiliseks peateljeks** nimetatakse sirget, mis läbib peegli optilist keskpunkti ja poolust — sirge OP . Optiline peatelj erineb kõikidest teistest peegli optilistest telgedest, nn. **optilistest kõrvalt-**



Joon. 49

gedest ainult selle poolest, et ta asend on peegli ärte suhtes sümmeetriline.

Kui kiired peegelduvad sfäärilise pinna sisepinnalt, nimetatakse peeglit **nõguspeegliks**, kui aga välispinnalt — siis **kumerpeegliks**.

Peegeldumist sfäärilistelt peeglitelt võib jälgida sama katseriistaga, millega me uurisime peegeldumist tasapeeglit. Selleks tuleb ketta keskele kinnitada nõguspeegel ja suunata talle valgustist mitu paralleelset kiirt nii, et keskmise kiire suund muutuks pärast peegeldumist vastupidiseks (180° võrra). Külgmised kiired lõikuvad pärast peegeldumist ühes punktis (joon. 50).

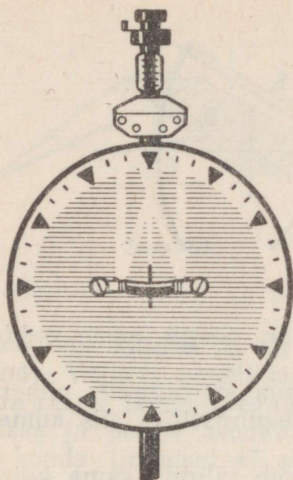
Optilise peatelje punkti, milles optilise peateljega paralleelsed kiired pärast peegeldumist lõikuvad, nimetatakse peegli **fookuseks**.¹

Lügitame valgustit veidike ketta serva mööda. Nüüd langeb kiirtekimp peeglile paralleelselt optilise kõrvalteljega. Kuna kõik sfäärilise peegli optilised teljed olid võrdväärsed, lõikuvad peegeldunud kiired nüüd kõrvalteljel ühes punktis, mis asub peeglist fookuse kaugusel. Kõikide selliste punktide hulk moodustab teatud pinna. Võttes vaatluse alla ainult need optilised kõrvalteljed, mis moodustavad optilise peateljega väikesi nurki, võime väita, et see pind on tasand, mis on optilise peateljega risti. Seda tasandit nimetatakse peegli **fokaaltasandiks** (vt. joon. 49).

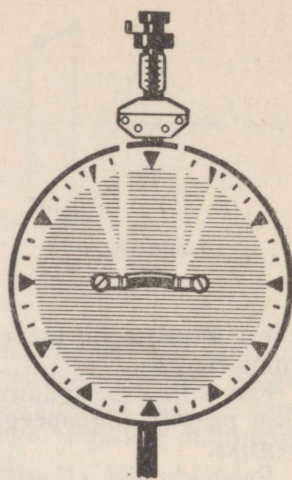
Suuname nüüd valgusti külgmised kiired peeglile selliselt, et nad lõikuvad fookuses. Läbides fookuse, langevad kiired peeglile hajuva kimbuna. Punkt, kus kiired lõikusid, mängib valguspunkti rolli. Pole raske veenduda, et pärast peegeldumist peeglit kulgavad kiired paralleelselt optilise peateljega. Siin kohtame me jällegi valguskiirte pööratavust.

Hakkame nüüd valgusallika osa mängivat kiirte lõikepunkti peeglist eemaldama. Peegeldunud kiired muutuvad seejuures koonduvateks ja lõikuvad ühes punktis, s.t. tekitavad tõelise kujutise. Kui aga valgusallikat peeglile lähendada, muutuvad kiired paralleelseiks ja seejärel hajuvaiks, kusjuures nende

¹ Ühes punktis lõikuvad tegelikult ainult sellised kiired, mille kaugus optilisest teljest, võrreldes peegli raadiusega, on väike.



Joon. 50.



Joon. 51

pikendused lõikuvad ühes punktis, tekitades seega ebakujutise.¹

Samasuguseid katseid võib teha ka kumerpeegliga. Kinnitades kumerpeegli ketta tsesntrisse ja suunates talle optilise peateljega paralleelseid kiiri, näeme, et pärast peegeldumist kiired hajuvad (joon. 51). Nende kiirte pikendused lõikuvad ühes punktis, mis asub peegli taga. Seda punkti nimetatakse kumerpeegli fookuseks. Kumerpeegli korral ei lõiku fookuses peegeldunud kiired ise, vaid nende pikendused. See tähendab, et kumerpeegli fookus on **ebafookus**.

27. SFÄÄRILISE PEEGLI VALEM

Leiame, kuidas on sfäärilise peegli juures omavahel seotud valguspunkti kaugus a , valguspunkti kujutise k ja peegli kõverusraadius R .

Asugu valguspunkt S nõguspeegli optilisel peateljel. Selle peegli lõige APC on kujutatud joonisel 52. Valguspunktist S langeb peeglile palju kiiri, kusjuures üks — SP kulgeb pärast peegeldumist piki optilist peatelge. Leiame mingi meelevaldse, punkti S lähtuva ja punktis B peegelduva kiire SB käigu. Vaatleme ainult kitsaid ja teljelähedasi kiirtekimpe, sest siis on punkti B kaugus h optilisest peateljest väike ($h \ll R$). Kui see tingimus on täidetud, on langeva kiire SB , peegeldunud kiire BS_1 , samuti kiire

¹ Kiired või nende pikendused lõikuvad tegelikult ühes punktis ainult siis, kui kiirte ja optilise peatelje vahelised nurgad on väikesed.

langemispunkti tõmmatud raadiuse OB ja optilise peatelje vahelised nurgad niivõrd väikesed, et me võime nende nurkade siinused asendada nende nurkade tangensitega või koguni nurkade enestega mõõdetutena radiaanides. Peegliilt peegeldunud kiired BS_1 ja PS_1 lõikuvad punktis S_1 . Kui ka teised kiired läbivad pärast peegeldumist punkti S_1 , siis on see punkt valguspunkti S tõeliseks kujutiseks

Raadius OB on peegeldava pinnaga risti. Peegeldumisest järele on peegeldumisenurk Θ võrdne langemisnurgaga φ . Kolmnurga välisnurga teoreemi põhjal saame kolmnurgast SBO , et

$$\beta = \alpha + \varphi;$$

kolmnurgast OBS_1 , et

$$\gamma = \beta + \Theta.$$

Arvestades, et $\varphi = \Theta$, saame:

$$\alpha + \gamma = 2\beta. \quad (2.5)$$

Kuna kõik vaadeldavad nurgad on väikesed, võime kirja panna ligikaudsed võrdused:

$$\alpha \approx \tan \alpha \approx \frac{h}{a},$$

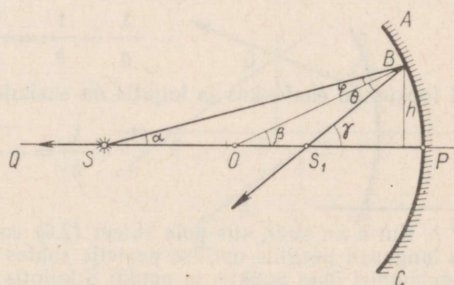
$$\beta \approx \tan \beta \approx \frac{h}{R},$$

$$\gamma \approx \tan \gamma \approx \frac{h}{k}.$$

Asendades need nurkade avaldised võrrandisse (2.5) ja jagades viimase h -ga läbi, saame:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{2}{R}. \quad (2.6)$$

Tähelepanuväärne on see, et kui nurgad α , β ja γ on väikesed ($h \ll a$, $h \ll R$, $h \ll k$), siis kõrgust h ja väikesi nurki α , β , γ



endid valemis (2.6) ei esine. See tähendab, et mistahes, peeglist kaugusel a asuvast punktist S lähtuv teljelähedane kiir läbib pärast peegeldumist punkti S_1 , mille kaugus peeglist on k ¹. Järelikult, punkt S_1 ongi punkti S kujutis.

Kasutame valemit (2.6) peegli fookuse leidmiseks. Fookuses F lõikuvad pärast peegeldumist need kiired, mis langesid peeglile paralleelselt optilise peateljega. Paralleelse kiirte kimbu saamiseks tuleb valguspunkt S viia peeglist lõpmatult kaugele. Kaugus a peab olema niivõrd suur, et suhte $\frac{1}{a}$ võib valemis (2.6) ära jätta. Valem (2.6) omandab siis kuju:

$$\frac{1}{k} = \frac{2}{R},$$

millest leiame, et kujutise kaugus

$$k = \frac{R}{2}.$$

Kuna kujutis tekkis antud juhul peegli fookuses, siis on leitud kaugus fookuse kauguseks peeglist ja seda nimetatakse sfäärilise peegli **fookuskauguseks** ning tähistatakse tähega f .

Niisiis, sfäärilise peegli fookuskaugus f võrdub poolega kera raadiusest, mille osa peegel on.

Valemi (2.6) võib nüüd kirja panna järgmiselt:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}. \quad (2.7)$$

Suurust $\frac{1}{f} = \frac{2}{R}$ nimetatakse **peegli optiliseks tugevuseks**.

Kui fookuskaugust f ja raadiust R mõõdetakse meetrites, on optilise tugevuse mõõtühikuks m^{-1} . Seda ühikut nimetatakse dioptriaks (tähis *dp*tr).

Valemi (2.7) tuletasime juhu jaoks, kui kujutis ja peegli fookus on tõelised. Samal viisil võib tuletada valemi ka teiste juhtude jaoks. Näiteks, kui peegli fookus on tõeline, kujutis aga ebakujutis, on peegli valem järgmine:

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

Kui fookus on ebafookus ja kujutis on ebakujutis, saab peegli valem kuju

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

¹ Kui h on suur, siis pole valem (2.6) enam õige. See tähendab, et kiired, mis langevad peeglile optilise peatelje suhtes suurte nurkade all, ei lõiku pärast peegeldumist ühes punktis ja punkti S kujutis on hägune.

Kõik need valemid erinevad üksteisest ainult liikmete ees olevate märkide poolest. Kui kujutis on tõeline, on liikme $\frac{1}{k}$ ees märk pluss, kui ebakujutis, siis miinus. Liikme $\frac{1}{f}$ ette tuleb panna plussmärk siis, kui peegli fookus on tõeline. Kumerpeegli puhul on tegemist ebafookusega ja vastavas valemis on liikme $\frac{1}{f}$ ees miinusmärk.

Suurused k ja f ise on valemites positiivsed.

Kui ülesande andmetest ei selgu, kas kujutis või fookus on tõelised või mitte, võetakse vastav liige peegli valemis plussmärgiga. Tundmata suuruse arvutamisel saame kas positiivse või negatiivse väärtuse. Miinusmärk näitab, et kujutis või fookus pole tõeline.

28. KUJUTIS SFÄÄRILISES PEEGLIS

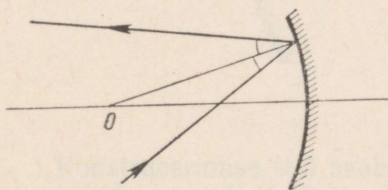
Teades eseme asukohta peegli ees, võib joonlaua ja sirkli abil leida kujutise tekkekoha graafiliselt.

Mistahes kujutise leidmise ülesanne taandub lõppkokkuvõttes meelevaldse peegilt peegeldunud kiire levimissuuna kindlakstege-misele. Põhimõtteliselt võib seda ülesannet lahendada langemis-nurgaga võrdse peegeldumisnurga konstrueerimise teel (joon. 53). Tunduvalt sagedamini kasutatakse aga teist moodust, mis põhi-neb sfäärilise peegli omaduste teadmisel.

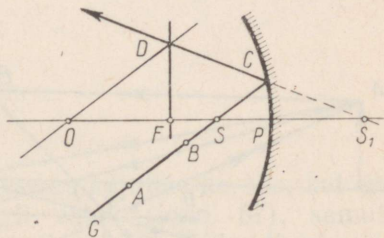
Pegeldunud kiire käigu konstrueerimine toimub järgmiselt. Tõmbame langeva kiirega AC paralleelse optilise kõrvalteltje (joon. 54). See optiline kõrvalteltg lõikab peegli fokaaltasandit punktis D , mida peab läbima ka peegeldunud kiir CD . Punktide A, B, S ja teiste sirge GC punktide kujutised asuvad sirgel CD . Näiteks optilisel peateljel OP asuva punkti S kujutis S_1 asub samuti optilisel peateljel (kujutis on ebakujutis).

Sellist konstrueerimisviisi on kerge põhjendada.

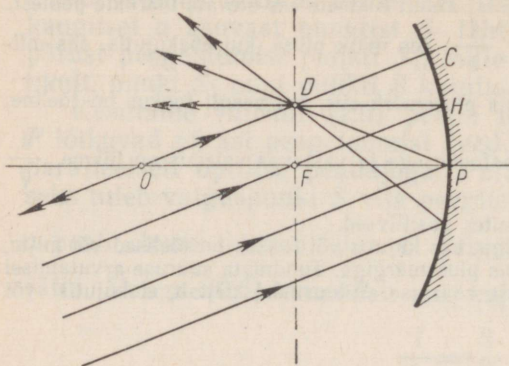
Optilise kõrvalteltjega paralleelsete kiirte kimp koondub pärast peegeldumist fokaaltasandis asuvas punktis (joon. 55). Kuna kõik peegeldunud kiired läbivad seda punkti, piisab selle punkti asu-



Joon. 53



Joon. 54



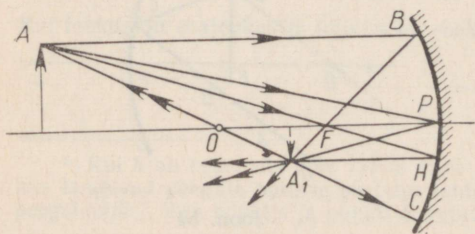
Joon. 55

koha määramiseks ainult ühe kiire käigu uurimisest. Selleks võib võtta kiire, mis läheb läbi optilise keskpunkti O , s. t. ühtib optilise kõrvalteljega. Pärast peegeldumist kulgeb kiir piki sama optilist kõrvaltelge ja läbib otsitava punkti D . Järelikult, punkt D asub nii fokaaltasandil kui ka optilisel kõrvalteljel, s. t. on fokaaltasandi ja optilise kõrvaltelje lõikepunkt.

Peegeldunud kiirt on kerge leida mitte ainult sel juhul, kui langev kiir levib piki kera raadiust. Ka peegli fookust läbiva kiire käik on teada. Pärast peegeldumist kulgeb selline kiir paralleelselt optilise peateljega. Kasutada võib ka peegli pooluselt peegelduvat kiirt AP , mis peegeldub optilise peateljete suhtes sümmeetriliselt (joon. 56).

Teades sfääriliselt peeglit peegeldunud suvalise kiire käiku, on võimalik konstrueerida mistahes eseme kujutist. Eseme kujutise konstrueerimisel leitakse eseme äärmiste punktide kujutised. Eseme äärmistest punktidest lähtuvatest kiirtest on sobiv valida sellised, mille käik on kõige lihtsam. Mingi eseme suvalise punkti A (joon. 56) kujutise leidmiseks on kõige sobivamad järgmised kiired:

1. Peegli optilist keskpunkti O läbiv kiir AOC , mis pärast peegeldumist (kiir COA) kulgeb samas sihis tagasi.



Joon. 56

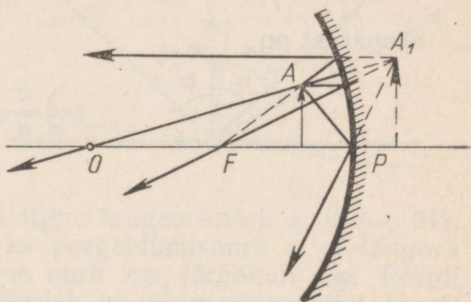
2. Peegli fookust F läbiv kiir AFH , mis on pärast peegeldumist paralleelne optilise peateljega.

3. Peegli lagipunktile P langev kiir AP , mis peegeldub optilise peatelje suhtes sümmeetriliselt.

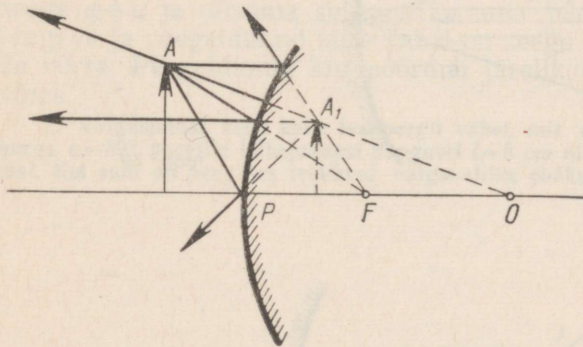
4. Optilise peateljega paralleelne kiir AB , mis läbib pärast peegeldumist (kiir BFA_1) peegli fookust.

Kõik peegeldunud kiired läbivad punkti A_1 , mis on punkti A kujutiseks. Punkti A_1 leidmiseks piisab kui konstrueerida kahe kiire käik, sest ka kõik teised peeglile langevad kiired läbivad pärast peegeldumist punkti A_1 . Mõnda ülalootletud kiirt ei pruugi üldse ollagi. Näiteks nõguspeeglit, mida kasutavad arstid, on keskkohas auk ja seepärast pole peegli pooluselt peegeldunud kiiri üldse olemas. Kujutise tekitavad sel korral need kiired, mis peegelduvad peegli olemasolevalt osalt.

Joon. 57



Joon. 58



Konstrueerimise teel saab leida eseme kujutise ka siis, kui esem asub nõguspeegli fookuse ja peegli vahel (joon. 57), samuti leitakse kumerpeeglis tekkiv kujutis (joon. 58). Viimati nimetatud juhtudel tekivad ebakujutised.

29. SUURENDUS

Sfäärilises peeglis tekkinud kujutis pole peaaegu kunagi niisama suur kui ese ise. Selles on kerge veenduda, kui vaadata kumer- või nõguspeeglisse. Liigutades eset või peeglit, märkame, et kujutise suurus muutub. Kujutise suurus muutub ka siis, kui üks peegel asendada teisega.

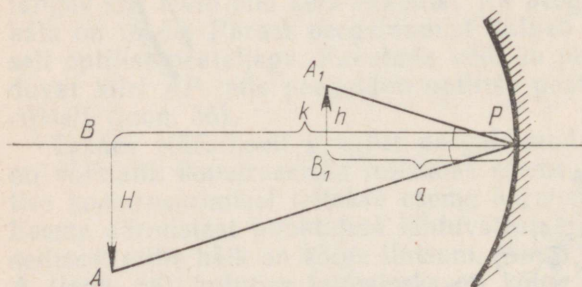
Kujutise joonsuuruse H ja eseme joonsuuruse h suhet nimetatakse **joonsuurenduseks**.

Joonsuurendus $s = \frac{H}{h}$ võib olla ühest suurem kui ka väiksem. Sarnastest kolmnurkadest ABP ja A_1B_1P (joon. 59) järeldub, et

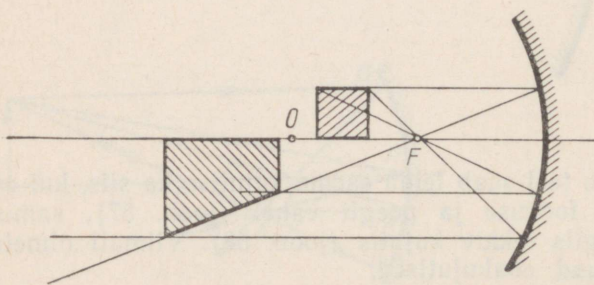
$$\frac{H}{h} = \frac{k}{a}.$$

Seepärast on

$$s = \frac{k}{a}.$$



Joon. 59



Joon. 60

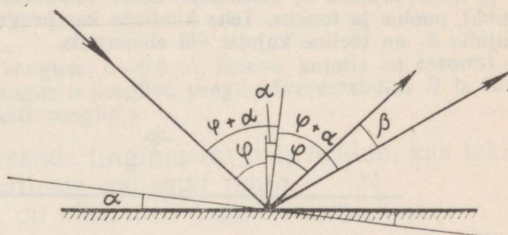
Saadud valem kehtib ka kumerpeegli jaoks.

Kui ese ei asu tervikuna optilise peateljega ristiolevas tasandis, on kujutise erinevate osade suuredus erinev. Jooniselt 60 on näha, et joonise tasandis asuva ruudu kujutis pole üldse ruut. See näide aitab mõista, miks sfääriline peegel tekitab esemest (näiteks näost) moonutatud kujutise.

30. NÄIDISÜLESANDEID

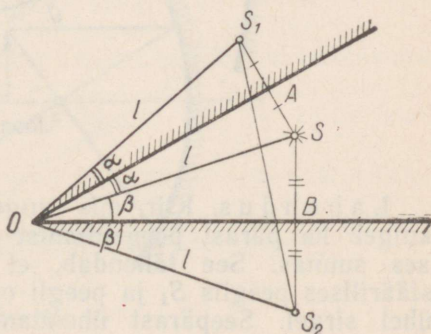
1. Tasapeeglit pöörati peegli tasapinnas asuva telje ümber nurga $\alpha = 17^\circ$ võrra. Kui suure nurga β võrra pöördus peegeldunud kiir, kui langev kiir jäi samaks?

Joon. 61



Lahendus. Olgu kiire esialgne langemisnurk φ (joon. 61). Peegeldumisseaduse järgi on ka peegeldumisnurk φ ja langeva ning peegeldunud kiire vaheline nurk on järelikult 2φ . Peegli pööramisel nurga α võrra, pöördub ka langemispunkti peegli pinnale tõmmatud normaal nurga α võrra. Uus langemisnurk on seega $\varphi + \alpha$ ja niisama suur on ka uus peegeldumisnurk. Nurk langeva ja peegeldunud kiire vahel on seega $2(\varphi + \alpha)$, s. t. muutus 2α võrra. Peegeldunud kiir pöördub järelikult nurga $\beta = 2\alpha = 34^\circ$ võrra.

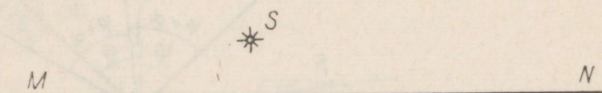
2. Valguspunkt asub kahe tasapeegli vahel, mis moodustavad teineteisega nurga $\alpha = 30^\circ$, peeglite lõikejoonest kaugusel $l = 8$ cm ning on ühele peeglile lähemal. Kui suur on peeglites tekkinud valgusallika ebakujutiste vaheline kaugus?



Joon. 62

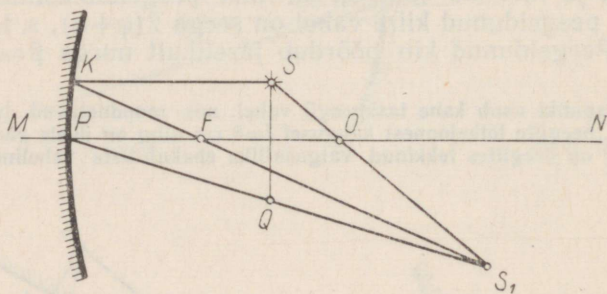
Lahendus. Konstrueerime peeglites OA ja OB tekkinud valguspunkti ebakujutised S_1 ja S_2 (joon. 62). Selleks tõmbame kummalegi peeglile punktist S ristsirged SA ja SB ning pikendame neid lõikude SA ja SB pikkustega võrdsete pikkuste AS_1 ja BS_2 võrra. Täisnurksete kolmnurkade AOS ja AOS_1 võrdsusest järeldub, et $S_1O=SO=l$, $S_2O=SO=l$ ja $\angle AOS=\angle AOS_1=\alpha$. Täisnurksete kolmnurkade BOS ja BOS_2 võrdsusest järeldub, et $\angle BOS=\angle BOS_2=\beta$. Ülesande tingimuste põhjal on $\alpha+\beta=30^\circ$. Seega $\angle S_1OS_2=2\alpha+2\beta=2(\alpha+\beta)=60^\circ$. Võrdhaarse kolmnurga S_1OS_2 tipunurk on seega 60° ja järelikult on kolmnurk S_1OS_2 võrdkülgne ning $S_1S_2=l=8$ cm.

3. Joonisel 63 on antud sfäärilise peegli optilise peatelje MN , valguspunkti S ja tema kujutise S_1 asukohad. Leida konstrueerimise teel peegli optiline keskpunkt, poolus ja fookus. Teha kindlaks kas peegel on nõgus või kumer ja kas kujutis S_1 on tõeline kujutis või ebakujutis.



$\circ S_1$

Joon. 63



Joon. 64

Lahendus. Kiir, mis langeb peeglile piki peegli raadiust, kulgeb ka pärast peegeldumist piki sama raadiust vastupidises suunas. See tähendab, et valguspunkt S , tema kujutis sfäärilises peeglis S_1 ja peegli optiline keskpunkt peavad asuma ühel sirgel. Seepärast ühendamegi punktid S ja S_1 sirgega

(joon. 64). Selle sirge lõikepunkt O optilise peateljega ongi peegli optiline keskpunkt. Peegli poolusele langeva kiire langemispunktiist tõmmatud peegli pinnanormaaliks on optiline peatelg. Pooluse leidmiseks kasutamegi seda tingimust. Kõigepealt konstrueerime punkti Q , mida läbib peegli poolusele langev kiir. Punkt Q on optilise peatelje MN suhtes punktiga S sümmeetriline ja asub järelikult optilise peatelje ristsirgel SQ . Punktis S ja Q kaugused optilisest peateljest on sümmeetrilise tõttu võrdsed. Tõmmates läbi punktide Q ja S_1 sirge lõikumiseni optilise peateljega MN , saamegi punkti P , mis on peegli pooluseks. Peegel on nõguspeegel ja kujutis on tõeline. Peegli fookuse F leidmiseks tõmbame optilise peateljega paralleelse kiire SK . Pärast peegeldumist läbib see kiir KS_1 fookust. Kiire KS_1 ja optilise peatelje MN lõikepunktis F asubki peegli fookus.

4. Ese asub nõguspeeglist kaugusel $a=0,3$ m. Eseme kujutis on esemest 2 korda suurem. Leida kujutise kaugus k peeglist, peegli kõverusraadius R ja fookuskaugus f . Joonestada kiirte käik peeglis.

L a h e n d u s. Kuna ülesande tingimustes pole öeldud, kas tekib tõeline või ebakujutis, vaatleme mõlemat juhtu.

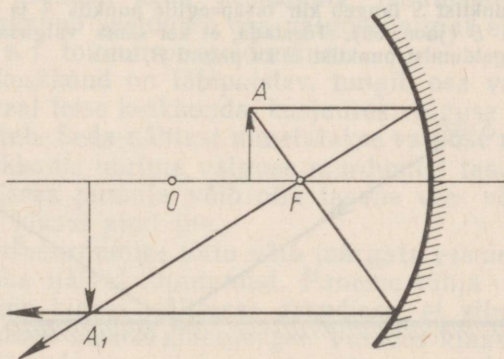
Kui kujutis on tõeline, on sfäärilise peegli valemi kuju:

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

Arvestades, et $k=sa$ (joonsuurenduse valemi põhjal) saame:

$$f = \frac{sa}{s+1}; \quad f = \frac{2 \cdot 0,3 \text{ m}}{2+1} = 0,2 \text{ m}.$$

Peegli kõverusraadiuse leiame seosest $R=2f$; $R=0,4$ m. Kiirte käik tõelise kujutise tekkimisel on antud joonisel 65.



Joon. 65

Ebakujutise korral on

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

Arvestades jällegi, et $k=sa$, saame:

$$f = \frac{sa}{s-1}; \quad f = \frac{2 \cdot 0,3 \text{ m}}{2-1} = 0,6 \text{ m}; \quad R = 2f; \quad R = 1,2 \text{ m}.$$

Kiirte käik on antud joonisel 57.

Harjutus 3

1. Väikese peegli abil tekitatakse päikesekiirte laik toa ja seejärel eemal asuva maja seinale. Miks on toa seinale tekitatud laik peeglikujuline, maja seinale tekitatud laik aga mitte?

2. Valgusallikas ja tema kaks kujutist tasapeeglites, mis moodustavad kahe tahulise nurga, asuvad ühel ringjoonel. Kus asub selle ringjoone keskpunkt?

3. Miks ei saa tasapeeglit kasutada kinoekraanina?

4. Väikese veekogu ühel kaldal on post, mille otsas on elektrivalgusti, ja teisel kaldal seisab inimene. Leida kiire käigu konstrueerimisega koht veepinnal, kust valgusti kiired langevad pärast peegeldumist inimesele silma.

5. Väike ese asub võrdsetel kaugustel kahest tasapeeglist, mis moodustavad 120-kraadise kahe tahulise nurga. Leida konstrueerimise teel piirkond, kust näeb mõlemaid kujutisi korraga. Vaadelda juhtu, kui eseme kaugus peeglite lõikejoonest on peeglite mõõtmetest suurem.

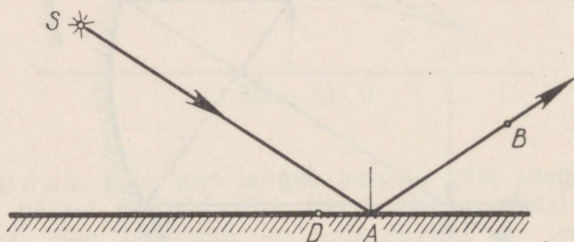
6. Taskulambi liikuva metallpeeglikesega (reflektoriga) saab reguleerida valguskiirte kimpu. Milline peab olema peeglikesse asend pinnikesse suhtes, et valguskiirte kimp oleks paralleelne? hajuv? koonduv? Joonestage kiirte käik.

7. Kui kaugele sfäärilise peegli ette tuleb asetada ese, et tema tõeline kujutis ja ese oleksid võrdse suurusega?

8. Mingis kumerpeegli taga optilisel peateljel asuvas punktis A koonduvate kiirte kimp muutub pärast peegeldumist hajuvaks. Kas punkt A asub peeglile lähemal või kaugemal kui fookus?

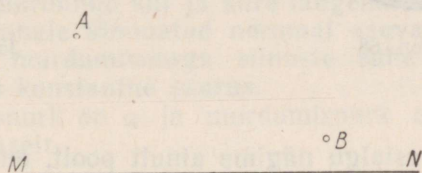
9. Projektsiooniaparaadist kiirgub horisontaalne paralleelsete kiirte kimp. Kui suure nurga all horisontaaltasandiga tuleb tasapeegel asetada, et kiirtekimp oleks pärast peegeldumist vertikaalne? Kas kiired jäävad seejuures paralleelseiks?

10. Valguspunkti S langeb kiir tasapeeglile punktis A ja pärast peegeldumist läbib punkti B (joon. 66). Tõestada, et kui sama valgusallika mingi kiir läbib pärast peegeldumist punktist D ka punkti B , siis:



Joon. 66

- 1) peegeldusseadus ei kehtiks;
- 2) valgus läbiks lõigu *SDB* kiiremini kui lõigu *SAB*.
11. Inimene, kes hoiab paremas käes portfelli, seisab kahe teineteisega ristioleval vertikaalse tasapeegli ees. Mitu enda kujutist inimene näeb? Mitu «teiskut» hoiab portfelli paremas, mitu vasemas käes?
12. Kui kõrge peab olema vertikaalne tasapeegel, et inimene, kelle pikkus on H , näeks ennast peeglis täies pikkuses? Kui kõrgel peab olema peegli alumine ja ülemine äär?
13. Sfäärilise peegliga tekitati ekraanile põleva küünla vähendatud kujutis. Kuidas muutub kujutis, kui peegli alumine pool kaasa arvatud poolus, värvida mustaks?



Joon. 67

14. Joonisel 67 on antud sfäärilise peegli optilise peatelje MN , valgusallika ja tema kujutise asukohad. Leida graafiliselt peegli optiline keskpunkt, poolus ja fookus. Teha kindlaks, kas peegel on nõgus või kumer, kas kujutis on tõeline või ebakujutis. Vaadelda juhte kui:

- 1) A on valgusallikas ja B tema kujutis;
- 2) B on valgusallikas ja A tema kujutis.

15. Valguspunkt asub nõguspeegli optilisest peateljest kaugusel $h=0,2$ m, valguspunkti ebakujutis aga kaugusel $H=0,5$ m. Mitu korda on peegli fookuskaugus valguspunkti ja fokaaltasandi vahelisest kaugusest suurem?

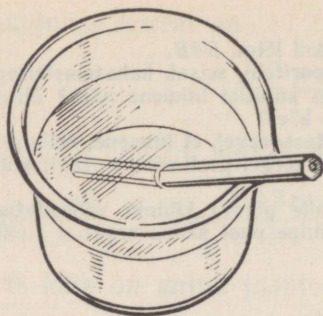
31. VALGUSE MURDUMISSEADUS

Valguskiir muudab kahe keskkonna lahutuspinna suunda. Nagu teame, saabub seejuures osa valgusenergiat esimesse keskkonda tagasi, s. t. toimub peegeldumine.

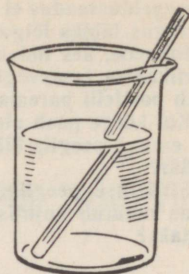
Kui teine keskkond on läbipaistev, tungib osa valgust teatud tingimuste korral teise keskkonda, kusjuures valguse levimissuund tavaliselt muutub. Seda nähtust nimetatakse **valguse murdumiseks**.

Esialgul hakkame uurima valguse murdumist tasastel lahutuspindadel. Selliseks pinnaks võib olla tasane vee- või mõne teise vedeliku pind, klaasi pind jne.

Valguskiirte murdumise tõttu võib märgata esemete mõõtmete, kuju ja asukoha näivat muutumist. Paneme tühja klaasi põhja kopika ja seame klaasi sellisesse asendisse, et silm, klaasi äär ja kopika keskkohad oleksid ühel sirgel. Valades klaasi vett ja hoides pea asendi valamise ajal muutumatuna, märkame, et veetaseme tõusmisel nagu tõuseks ka klaasi põhi koos kopikaga.



Joon. 68



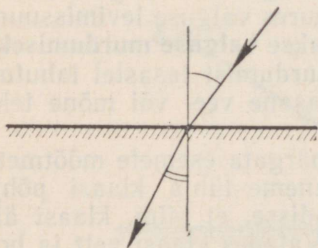
Joon. 69

Kopikas, millest esialgu nägime ainult poolt, on nüüd tervenisti nähtav.

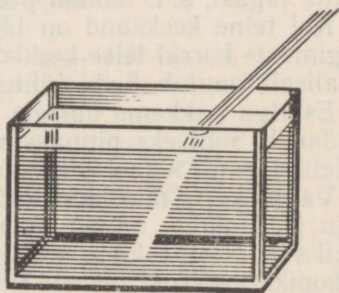
Paneme samasse veeklaasi kaldu pliatsi. Vaadates pliatsile ülalt alla, paistab pliatsi veepinna juurest murdununa. Pliatsi veelune ots näib ülespoole tõstetuna (joon. 68).

Vaadates klaasile küljelt, näib pliatsi veelune osa kõrvale nihutatuna ja jämedamana (joon. 69).

Ülaltoodud ja nendega sarnased nähtused seletuvad sellega, et valguskiired muudavad kahe keskkonna lahutuspinnast läbi tungides oma levimissuunda. Kiirt, mis levib esimeses keskkonnas ja langeb keskkondade lahutuspinnale, nimetatakse **langevaks kiireks**. Langev kiir moodustab langemispunkti keskkondade lahutuspinnale tõmmatud normaaliga **langemisnurga**. Teise keskkonda tunginud kiirt nimetatakse **murdunud kiireks** ja nurka, mille ta moodustab langemispunkti keskkondade lahutuspinnale tõmmatud normaaliga — **murdumisnurgaks** (joon. 70).



Joon. 70



Joon. 71

Langeva, peegeldunud ja murdunud kiire vastastikuseid asendeid on kerge kindlaks teha, kui muuta kitsas valguskiirte kimp nähtavaks. Kitsa valguskiirte kimbu kulgu saab õhus jälgida siis, kui lasta õhku veidi suitsu või panna kiirtekimbu teele ekraan nii, et ta on kiirtekimbu suhtes pisut kaldu. Murdunud kiir on nähtav vees, millele on lisatud fluorestseini (joon.71).

Vaatlused näitavad, et langemisnurga suurenemisel suureneb ka murdumisnurk, kuid ta ei suurene langemisnurgaga võrdeliselt. Juba XVII sajandil kindlaks tehtud murdumisseadus sõnastatakse järgmiselt:

langev kiir, murdunud kiir ja kiire langemispunktis kahe keskkonna lahtuspinnale tõmmatud normaal asuvad ühes tasandis; langemis- ja murdumisnurga siinuste suhe on antud kahe keskkonna jaoks konstantne suurus.

Kui langemisnurk on α ja murdumisnurk on γ , siis murdumisseaduse kohaselt

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n. \quad (2.8)$$

Konstantset suurust n nimetatakse **keskkonna suhteliseks murdumisnäitajaks** ehk teise keskkonna murdumisnäitajaks esimese keskkonna suhtes.

Keskkonna murdumisnäitajat vaakumi suhtes nimetatakse keskkonna **absoluutseks murdumisnäitajaks**. Absoluutne murdumisnäitaja võrdub langemis- ja murdumisnurga siinuste suhtega, kui valguskiir langeb vaakumist antud keskkonda. Keskkondade suhteline murdumisnäitaja n võrdub teise keskkonna absoluutse murdumisnäitaja n_2 ja esimese keskkonna absoluutse murdumisnäitaja n_1 ja suhtega:

$$n = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.9)$$

Seepärast võib murdumisseaduse kirja panna kujul:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1}. \quad (2.10)$$

Väiksema absoluutse murdumisnäitajaga keskkonda nimetatakse **optiliselt hõredamaks keskkonnaks**.

Absoluutsel murdumisnäitajal on sügav füüsikaline mõte — ta on seotud valguse levimiskiirusega antud keskkonnas. Valguse levimiskiirus sõltub omakorda selle keskkonna füüsikalisest olekust, s. t. keskkonna aine temperatuurist, tihedusest, elastsete pingete olemasolust aines. Murdumisnäitaja sõltub ka valguse enda omadustest — punase valguse murdumisnäitaja on rohelise valguse murdumisnäitajast väiksem, rohelise valguse murdumis-

näitaja on aga omakorda väiksem violetse valguse murdumisnäitajast.

Murdumisnäitajate tabelites märgitaksegi tavaliselt missuguse valguse ja millise keskkonna oleku jaoks antud n väärtus kehtib. Kui selliseid viiteid pole tehtud, tähendab see, et murdumisnäitaja n sõltuvuse nimetatud faktoritest võib jätta arvestamata.

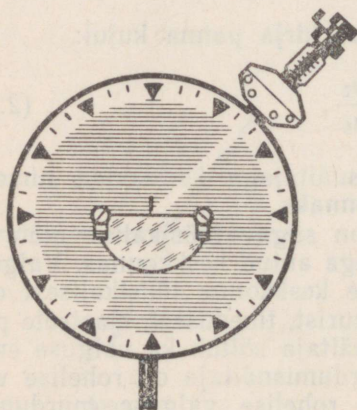
Enamikul juhtudel läheb valgus õhust tahkesse kehasse või õhust vedelikku, mitte aga vaakumist mingisse keskkonda. Tahke või vedela aine absoluutne murdumisnäitaja n_2 erineb sama aine murdumisnäitajast õhu suhtes väga vähe. Tõepoolest, õhu absoluutne murdumisnäitaja (kollase valguse ja normaaltingimuste juures) erineb ühest väga vähe ($n_1 \approx 1,000292$).

Järelkult on keskkonna murdumisnäitaja õhu suhtes peaaegu võrdne selle keskkonna absoluutse murdumisnäitajaga:

$$n = \frac{n_2}{n_1} \approx n_2.$$

Anname järgmises tabelis mõnede ainete murdumisnäitajad õhu suhtes (murdumisnäitajad on mõõdetud kollases valguses).

Aine	Murdumisnäitaja õhu suhtes
Vesi (20° C juures)	1,333
Seedriõli (20° C juures)	1,516
Süsinikdisulfiid (20° C juures)	1,63
Haliit (kivisool)	1,544
Kvarts	1,54
Rubiin	1,76
Teemant	2,417
Mitmesugused klaasisordid	1,47 kuni 2,04



Joon. 72

Murdumisseeduse õigsust saab kontrollida klaasist poolsilindri abil, mille esipind on matt. Kinnitame poolsilindri kettale nii, et keha tasase pinna keskoht ühtib ketta keskpunktiga (joon. 72). Valgustist langev kiir kulgeb piki ketta raadiust ja murdub klaasist keha tasasel pinnal. Kiire kulg klaasi on läbi keha mattseina hästi nähtav. Valgustit liigutades saame muuta kiirte langemisnurka. Langemis- ja murdumisnurkade suurusi saab lugeda ketta äärel olevalt skaalalt. Leides trigonomeetristest tabelitest vastavate langemis- ja murdumisnurkade siinuste väärtused, pole raske näha, et nende siinuste suhe on konstantne. Samas võib veenduda ka langeva ja murdunud kiire pööratavuses. Selleks tuleb valguskiir suunata klaaskehale altpoolt. Kui nüüd langev kiir kulgeb piki seda raadiust, kus enne kulges murdunud kiir, siis on näha, et klaasist väljuva kiire teekond ühtib täpselt endise langeva kiire teekonnaga.

32. TÄIELIK PEEGELDUS

Tuleme uuesti tagasi nende katsete juurde, kus vaatlesime valguse murdumist õhu ja vee või õhu ja klaasi lahutuspinna pealt. Seekord pöörame aga tähelepanu sellele, et murdunud kiir ei kannu endaga kogu seda energiat, mida omab langev kiir. Osa valgust peegeldub lahutuspinna pealt ja pöörduvad esimesse keskkonda (õhku) tagasi. Muudame langemisnurka 0° (risti langev kiir) kuni 90° (libisev kiir). Peegeldumisseeduse kohaselt muutub ka peegeldumisnurk 0° kuni 90° . Kui valguskiirte kimpe tähelepanelikult jälgida, võib märgata, et langemisnurga suurenemisel muutub peegeldunud valgus intensiivsemaks. Libisevale kiirtekimbule lähedane valguskiirte kimp peegeldub veelt või klaasilt peaaegu täielikult.

Murdumisseeduse (2.8) kohaselt on

$$\sin \gamma = \frac{1}{n} \sin \alpha. \quad (2.11)$$

Klaasi ja vee murdumisnäitajad õhu suhtes on ühest suuremad. Järelikult, $\frac{1}{n} < 1$ ja $\sin \gamma \leq \sin \alpha$.

Siinused on võrdsed ainult siis, kui $\alpha = \gamma = 0$, s. t. kui langev ja murdunud kiir levivad piki keskkondade lahutuspinna normaali (kiir langeb keskkondade lahutuspinna pealt risti). Kõikidel teistel juhtudel on murdumisnurk langemisnurgast väiksem ($\gamma < \alpha$). See tähendab, et minnes optiliselt tihedamasse keskkonda, murdub valguskiir kahe keskkonna lahutuspinna normaali poole. Valemist (2.11) järeldub, et langemisnurga lähenemisel oma maksimaalsele väärtusele $\alpha = 90^\circ$, suureneb murdumisnurk nii, et $\sin \gamma \rightarrow \frac{1}{n}$.

Võrdusega $\sin \gamma = \frac{1}{n}$ määratud nurga γ väärtus on murdumisnurga piirväärtuseks. Mistahes langeva kiire suuna korral ei saa murdunud kiire ja keskkondade lahtuspinna normaali vaheline nurk olla piirnurgast suurem.

Erilist huvi pakub nähtus, mis ilmneb valguse levimisel optiliselt tihedamast keskkonnast optiliselt hõredamasse keskkonda. Kiirte käiguga taolisel üleminekul me juba tutvusime paragrahvis 31, kus vaatlesime valguse murdumist vee ja õhu ning klaasi ja õhu lahtuspinnal. Uurime nüüd seda juhtu üksikasjalikumalt. Paigutame klaasist poolsilindriga katses valgusti ketta alumisse ossa. Langev kiir levib nüüd klaasis, murdunud kiir aga õhus.

Peale langeva kiire levib klaasis veel peegeldunud kiir, mille jälg on läbi klaaskeha esiseina nähtav. Peegeldumine toimub peegeldumisseaduse kohaselt, s. t. peegeldumisenurk võrdub langemisnurgaga. Kui n on klaasi murdumisnäitaja õhu suhtes ($n > 1$), siis õhu murdumisnäitaja klaasi suhtes on $\frac{1}{n}$. Antud juhul on klaas esimeseks, õhk aga teiseks keskkonnaks. Murdumisseadus avaldub seega kujul:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{1}{n}, \quad (2.12)$$

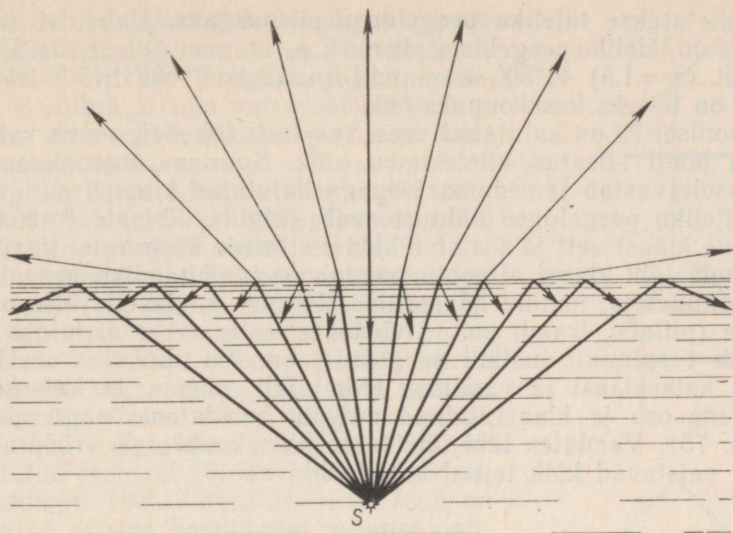
millest

$$\sin \gamma = n \sin \alpha.$$

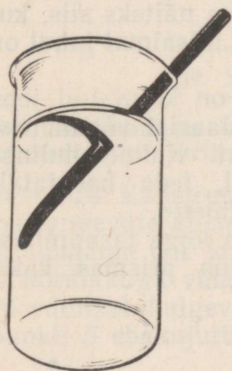
Hakkame valgusti nihutamiseiga suurendama langemisnurka α . Langemisnurgaga koos suureneb ka peegeldumisenurk, sest ta võrdub langemisnurgaga. Valem (2.12) näitab, et ka murdumisenurk suureneb. Kuna antud juhul on $n > 1$, siis on $\sin \gamma > \sin \alpha$ ja järelikult on murdumisenurk γ langemisnurgast α suurem ($\gamma > \alpha$). Teiste sõnadega, optiliselt tihedamast keskkonnast optiliselt hõredamasse üleminekul murdub kiir kahe keskkonna lahtuspinna poole, s. t. lahtuspinna normaalist eemale.

Tähelepanelikul vaatlusel võib märgata, et langemisnurga kasvamisel peegeldunud kiire heledus (ka tema energia) suureneb, samal ajal aga murdunud kiire heledus (energia) väheneb. Murdunud kiire energia väheneb eriti kiiresti siis, kui murdumisenurk läheneb 90° -le. Lõpuks, kui langemisnurk saab nii suureks, et murdunud kiir peaaegu libiseb piki keskkondade lahtuspinda, peegeldub energia peaaegu 100%-liselt. Suurimale võimalikule murdumisnurgale $\gamma = 90^\circ$ vastab langemisnurk α_0 , mille suuruse saab lihtsalt arvutada. Kui $\sin \gamma = 1$, omandab valem (2.12) kuju

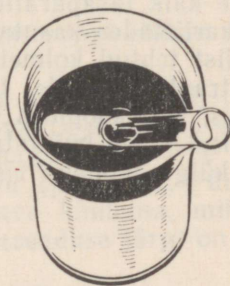
$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}. \quad (2.13)$$



Joon. 73



Joon. 74



Joon. 75

Sellest võrdusest saab leida α_0 suuruse. Pöörates valgustit nii, et nurk α saab nurgast α_0 suuremaks, näeme, et murdunud kiirte kimp kadus ja kogu valgus peegeldub keskkondade lahtuspinnalt esimesse keskkonda (klaasi) tagasi, s. t. tekkis **täielik peegeldus**. Valguse täielik peegeldus tekib optiliselt tihedamat keskkonda optiliselt hõredamast keskkonnast lahtetavalt pinnalt siis, kui kiire langemisnurk α on nurgaga α_0 võrdne või sellest suurem. Nurka

α_0 nimetatakse täieliku peegelduse piirnurgaks. Valemist (2.13) arvatud täieliku peegelduse piirnurk α_0 on veel ($n=1,33$) $48^\circ 35'$, klaasil ($n=1,5$) $41^\circ 50'$, teemandil ($n=2,4$) $24^\circ 40'$. Kõikidel juhtudel on teiseks keskkonnaks õhk.

Joonisel 73 on kujutatud vees, veepinna lähedal, asuva valgusallika poolt kiiratud kiirtekimbu käik. Suurema intensiivsusega valgusele vastab jämedama joonega kujutatud kiir.

Täieliku peegelduse nähtust saab jälgida lihtsate katsetega. Valame klaasi vett ja tõstame klaasi silmade kõrgusele. Vaadates veepinda läbi klaasi altpoolt, paistab veepind täieliku peegelduse tõttu läikivana, justkui hõbetatuna. Pannes aeglaselt vette mingi eseme (pliiatsi, traadi jms.), näeme, et eseme vees asuv osa peegeldub veepinnalt justkui peeglit (joon. 74). Lükates veeklaasi tühja katseklaasi ja vaadates teda ülalt, näeme, et katseklaasi veealune osa ja klaasi seinad näivad heledatena nagu peegel (joon. 75). Vaadates läbi ühe tahu klaaskuubi või -rööptahuka sisse, paistavad kõik teised tahud läikivatena.

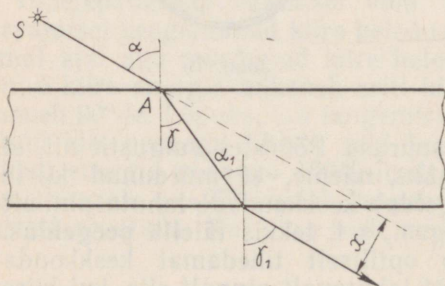
33. KIIRTE KÄIK TASAPARALLEELSE PLAADIS JA KOLMETAHULISES PRISMAS

Valguskiirte kimp läbib paljudel juhtudel erinevate keskkondade lahutuspinde mitu korda. Nii on see näiteks siis, kui valgus läheb mingist läbipaistvast kehast läbi. Lihtsaimal juhul on kehaks tasaparalleelne plaat.

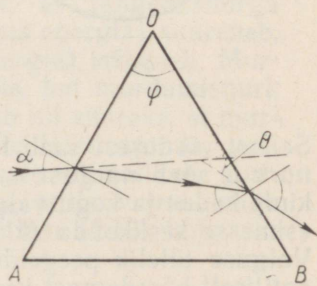
Kiirte käik tasaparalleelses plaadis on kujutatud joonisel 76.

Optikariistades kasutatakse sageli klaasist või mõnest teisest materjalist tehtud kolmetahulist prisma. Kolmetahuline prisma on spektraalaparaatide tähtsaim detail, teda kasutatakse veel binoklites, periskoopides ja teistes seadmetes.

Joonisel 77 on kujutatud klaasprisma lõige tasapinnas, mis on prisma külgtahukudega risti. Kiir murdub prisma kaks korda:



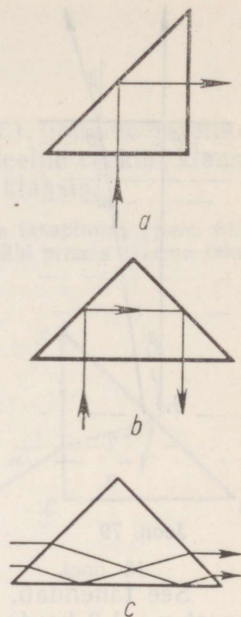
Joon. 76



Joon. 77

tahul OA ja tahul OB . Nende murdvate tahkude vahelist nurka φ nimetatakse **prisma murdvaks nurgaks**. Kiire kalde-nurk θ sõltub prisma murdvast nurgast φ , prisma aine murdumisnäitajast n ja kiire langemisnurgast α .

Optikariistades kasutatakse sageli võrd-külgsel täisnurkset klaasprismat, mille kasutamine põhineb sellel, et klaasi täie-liku peegelduse piirnurk on väiksem kui 45° . Seepärast tekibki joonisel 78 kujuta-tud juhtudel täielik sisepeegeldus. Jooni-sel 78, *a* kujutatud prisma pöörab kiirte-kimpu 90° võrra, mida on tarvis näiteks periskoobis. Teine kiirte käigu võimalik viis, mida kasutatakse prismabinoklis, on kujutatud joonisel 78, *b* — prisma pöörab kiirtekimpu 180° võrra. Joonisel 78, *c* on näidatud prisma kasutamist mingist opti-kariistast lähtuvate kiirte überpöörami-seks. Ülemised kiired muutuvad prismast väljudes alumisteks ja vastupidi.



Joon. 78

34. NÄIDISÜLESANDEID

1. Leida, mitu korda on veekogu tõeline sügavus tema näilisest sügavusest suurem, kui vaadata vette vertikaalselt alla.

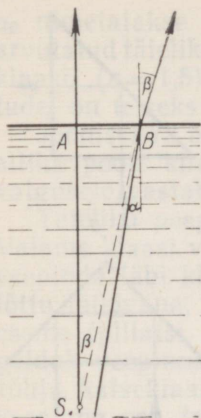
L a h e n d u s. Konstrueerime veepinna põhjast punktist S vaatleja silma langevate kiirte käigu. Kuna vaatleja vaatab vertikaalselt alla, suuname ühe kiire SA veepinnaga risti, teise SB aga veepinna normaaliga väikese nurga α all (joon. 79). Pärast veepinnal murdumist kulgevad kiired hajuva kimbuna, mille tipus asubki punkti S ebakujutis S_1 . Murdumiseaduse järgi on

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

kus n on vee murdumisnäitaja. Kuna nurgad α ja β on väikesed, võib nende siinuste suhted asendada nurkade eneste suhtega:

$$\frac{\alpha}{\beta} \approx \frac{1}{n}. \quad (2.14)$$

Nurk ASB võrdub langemisnurgaga α (kui seesmised põiknurgad), nurk AS_1B aga murdumisnurgaga β (kui kaasnurgad). Täisnurksetel kolmnurkadel ASB ja AS_1B on ühine kaatet AB ,



Joon. 79

mida saab avaldada nii veekogu tõelise sügavuse $SA=H$, kui ka näiva sügavuse $S_1A=h$ kaudu:

$$AB=H \tan \alpha = h \tan \beta.$$

Siit

$$\frac{H}{h} = \frac{\tan \beta}{\tan \alpha}.$$

Kui nurgad α ja β on väikesed, võib nende tangensid asendada nurkade eneste väärtustega:

$$\frac{H}{h} \approx \frac{\beta}{\alpha}. \quad (2.15)$$

Arvestades seost (2.14), saame:

$$\frac{H}{h} = n.$$

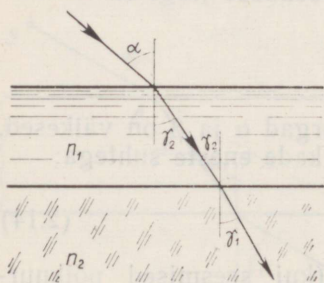
See tähendab, et veekogu tõeline sügavus on näivast sügavusest $n=1,3$ korda suurem.

Lõpptulemuses ei esinenud nurki α ja β ning lõiku AB . See tähendab seda, et kõikide pinnanormaali suhtes väikeste nurkade all murduvate kiirte pikendused lõikuvad ühes punktis.

2. Kitsas valguskiirte kimp langeb õhust paksule horisontaalsele klaasplaadile. Valguskiire murdumisnurk $\gamma=30^\circ$. Kui klaasplaadile panna ümber ääred ja valada peale veekiht, levib valguskiir klaasplaadis plaadi normaali suhtes nurga γ_1 all. Leida uue murdumisnurga γ_1 suurus.

Lahendus. Olgu nurk α kiire langemisnurk klaasile ja klaasi murdumisnäitaja n_2 . Murdumisseeduse järgi on

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n_2. \quad (2.16)$$



Joon. 80

Veekihile, mille murdumisnäitaja on n_1 , langeb kiir sama nurga α all. Tähistame uue murdumisnurga tähega γ_2 (joon. 80). Kuna veekiht on ühtlase paksusega, langeb kiir ka vee ja klaasi lahtuspinnale nurga γ_2 all. Murdumisseeduse järgi on

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma_2} = n_1 \quad \text{ja} \quad \frac{\sin \gamma_2}{\sin \gamma_1} = \frac{n_2}{n_1}.$$

Korrutades mõlemad viimased

võrdused omavahel läbi, saame:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma_1} = n_2.$$

Võrreldes saadud tulemust võrdusega (2.16), jõuame järeldusele, et $\gamma_1 = \gamma = 30^\circ$. See tähendab, et tasaparalleelne veekiht klaasplaadil ei muuda valguskiire murdumisnurka klaasis.

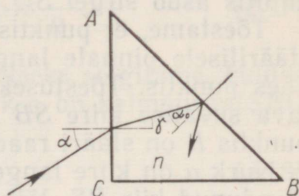
3. Valguskiir langeb prisma lühemale tahule joonise tasapinnas (joon. 81). Kui suure langemisnurga α korral ei välju kiir prismast läbi prisma pikema tahu, kui prisma aine murdumisnäitaja $n=2$?

L a h e n d u s. Määrame kõigepealt täieliku peegelduse piirnurga α :

$$\sin \alpha_0 = \frac{1}{n}; \quad \sin \alpha_0 = 0,5; \quad \alpha_0 = 30^\circ.$$

Prisma pikemale tahule nurga α_0 all langev kiir aga murdub prisma lühemal tahul nurga $\gamma = 45^\circ - \alpha_0 = 15^\circ$ all. Teades murdumisnurka γ , leiame murdumisnäitaja abil prisma lühemale tahule langeva kiire langemisnurga α :

$$\sin \alpha = n \sin \gamma; \quad \sin \alpha = 2 \cdot 0,2588 = 0,5176; \\ \alpha \approx 31^\circ 10'.$$



Joon. 81

Harjutus 4

1. Vaadates mingit eset läbi kolmetahulise prisma, näib kujutis eseme suhtes nihutatuna. Kuhu poole on kujutis nihkunud?

2. Kinoprojektorisse pandi filmilint kogemata sisse nii, et ekraanil oli kujutis pea peale pööratud. Kuidas saaks viga filmilinti ümber pöörata ja ekraani kaugust muutmata parandada?

3. Võrdkülgne täisnurkne klaasprisma on pandud vette. Kas saab prisma kasutada vees selliselt, nagu on näidatud joonisel 78?

4. Võrdhaarne täisnurkne prisma asub laual ajalehe peal, ühe tahuga vastu teksti. Kas ajalehetekst on nähtav läbi teise tahu? läbi hüpotenuustahu?

5. Arvutage vee murdumisnäitaja teemandi ja süsinikdisulfiidi murdumisnäitaja jää suhtes.

6. Joonisel 78, b kujutatud kiir väljub prismast langeva kiirega paralleelselt. Kas kiir väljub prismast langeva kiirega paralleelselt ka siis, kui prismale langeva kiire langemisnurk on nullist erinev?

7. Kiired langevad tasaparalleelsele klaasplaadile nurga $\alpha = 60^\circ$ all. Leida kahe paralleelse kiire klaasplaadist väljumise punktide vaheline kaugus l , kui kiirtevaheline kaugus $x = 0,7$ cm.

8. Leida kiirtekimbu kaldenurk Θ väga õhukeses prismas, mille aine murdumisnäitaja on n . Kiirte langemisnurk α ja prisma murdev nurk φ on nii väikesed, et nende siinused võib asendada nurkade eneste suurustega.

9. Veest tulev valguskiir peegeldub täieliku peegelduse tõttu veepinnalt vette tagasi. Kas valguskiir tungib õhku, kui valada veepinnale seedriõli kiht?

10. Prisma ristlõikeks on võrdkülgne kolmnurk. Kiir läbib prisma nii, et murdub punktides, mis asuvad prisma tipust võrdsetel kaugustel. Kui suur võib olla prisma aine maksimaalne murdumisnäitaja n ?

35. VALGUSE MURDUMINE SFÄÄRILISEL PINNAL

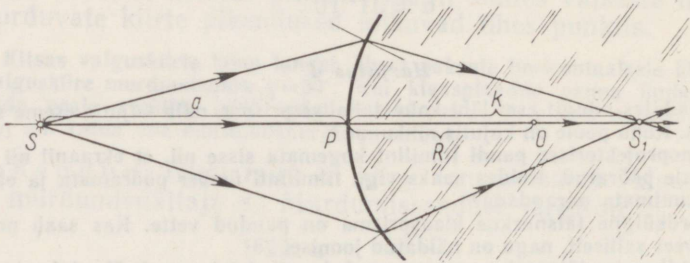
Siiani vaatlesime valguse murdumist kahe keskkonna tasasel lahutuspinnaal.

Praktikas on aga suure tähtsusega läbipaistvad kehad, mis on piiratud sfääriliste pindadega. Sfääriliste pindadega läbipaistvaid kehi on kõige lihtsam valmistada.

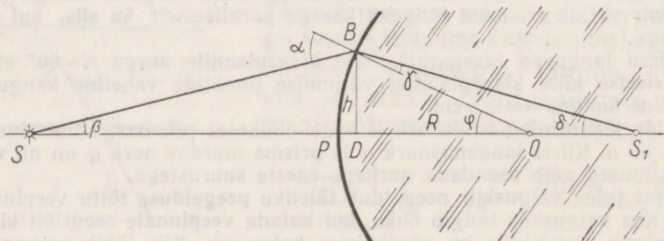
Kõigepealt vaatleme valguse murdumist sfääriliselt klaaspinnalt, mille raadius on R . Asugu väike ese (valguspunkt S) õhus kumerast klaaspinnast kaugusel a (joon. 82). Punkt O on sfääri keskpunkt. Sümmeetriakaalutlustest on silmanähtav, et punkti S kujutis asub sirgel SO , mis on antud juhul optiliseks peateljeks.

Tõestame, et punktist S sirge SO suhtes väikeste nurkade all sfäärilisele pinnale langevad kiired lõikuvad pärast murdumist ühes punktis. Tõestuseks vaatleme teljega SO nurga β moodustava suvalise kiire SB murdumist (joon. 83). Pinna normaaliks punktis B on sfääri raadius OB , mis moodustab teljega SO nurga φ . Nurk α on kiire langemisnurk, nurk γ aga kiire murdumisnurk. Murdunud kiir BS_1 lõikab telge SO punktis S_1 ja moodustab viimasega nurga δ .

Leiame seose kauguste $SP=a$, $S_1P=k$ ja $OP=R$ vahel. Võtame



Joon. 82



Joon. 83

arvesse, et väga väikese nurga β korral on lõik PD samuti väike ja teda võib kaugustega SP , S_1P ja OP võrreldes mitte arvestada. Sel juhul on $a \approx SD$, $k \approx S_1D$ ja $R \approx OD$. Kolmnurkadest SBD , S_1BD ja OBD saame ligikaudsed võrdused:

$$\tan \beta \approx \frac{h}{a}, \quad \tan \delta \approx \frac{h}{k} \quad \text{ja} \quad \tan \varphi \approx \frac{h}{R}.$$

Kui nurk β on väike, on ka nurgad δ ja φ väikesed, ning nende tangensite väärtused võib asendada nurkade eneste suurustega:

$$\beta \approx \frac{h}{a}, \quad \delta \approx \frac{h}{k} \quad \text{ja} \quad \varphi \approx \frac{h}{R}. \quad (2.17)$$

Suuruste a , k ja R vahelise seose leidmiseks selgitame, kuidas on omavahel seotud nurgad β , δ ja φ . Nurk α on kolmnurga SBO välisnurk ja seepärast on

$$\alpha = \beta + \varphi. \quad (2.18)$$

Nurk φ on kolmnurga OBS_1 välisnurk ja järelikult

$$\varphi = \gamma + \delta. \quad (2.19)$$

Kirjutame välja ka murdumiseaduse:

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

Kuna nurgad α ja γ on väikesed, asendame nende siinused nurkade endi väärtustega:

$$\frac{\alpha}{\gamma} = n,$$

millest

$$\alpha = \gamma n. \quad (2.20)$$

Elimineerides võrranditest (2.18), (2.19) ja (2.20) nurgad α ja γ , saame

$$\varphi(n-1) = n\delta + \beta.$$

Asendades saadud võrrandisse nurkade φ , δ ja β väärtused seostest (2.17), saame

$$\frac{h}{R}(n-1) = n \frac{h}{k} + \frac{h}{a}$$

ehk pärast tähega h jagamist:

$$\frac{1}{a} + \frac{n}{k} = (n-1) \frac{1}{R}. \quad (2.21)$$

Seos (2.21) ei sisalda suurust h , kuid h väiksus on väga oluline. Seos (2.21) näitab, et kõik teljelähedased kiired lõikuvad pärast murdumist punktis S_1 , mis on valguspunkti S kujutiseks.

36. LÄÄTS

Elmises paragrahvis vaatlesime kujutisi, mis tekkisid pärast kiirte ühekordset murdumist sfäärilisel pinnal. Sagedasti on tegemist aga läbipaistvate kehadega, mis on ka teiselt poolt sfäärilise pinnaga piiratud.

Kahe sfäärilise pinnaga piiratud läbipaistvat keha nimetatakse **läätseks**.¹

Sfääriliste pindade keskpunkte läbivat sirget nimetatakse **läätses optiliseks peateljeks** (joon. 84).

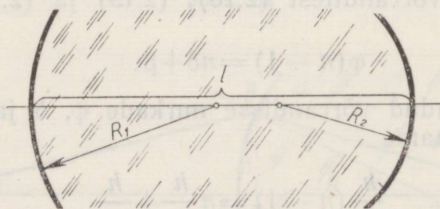
Leiame kujutise asukohta, kui valguspunkti asukoht on teada. Kui valguspunktist S lähtuvad kiired on teljelähedased, siis nad koonduvad pärast murdumist ühes punktis. Valguspunkt peab seepärast asuma telje lähedal. Lihtsuse mõttes paneme valguspunkti optilise peatelje punkti S , mille kaugus läätses on a .

Kiirte käik sellises läätses on kujutatud joonisel 85. Kiired tekitavad läätses esipinnal murdudes kujutise punkti S_1 , mille kaugus esipinnast on k_1 . Kauguse k_1 võib leida valemist (2.21):

$$\frac{1}{a} + \frac{n}{k_1} = (n-1) \frac{1}{R_1}, \quad (2.22)$$

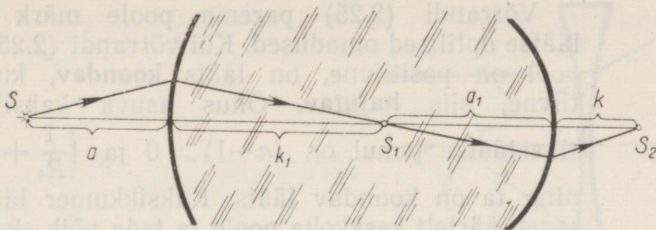
kus R_1 on läätses esipinna kõverusraadius.

Pärast punkti S_1 läbimist muutuvad kiired hajuvaiks ja langevad läätses teisele pinnale. Punkt S_1 on seega teise pinna suhtes valguspunktiks, mis asub pinnast kaugusel a_1 .



Joon. 84

¹ Üheks piiravaks pinnaks võib loomulikult olla ka tasand, sest tasandit võib vaadelda sfäärilise pinnana, mille raadius on lõpmatu suur.



Joon. 85

Kaugus

$$a_1 = l - k_1, \quad (2.23)$$

kus l on läätsede sfääriliste pindade vaheline kaugus ehk läätsede paksus. Läätsede teine pind tekitab saadud vahepealse «valgusallika» S_1 kujutise punktis S_2 , mille kaugus läätsede tagapinnast on k . Punkti S_2 asukohta saab leida valemist (2.22), kui pidada silmas kiirte pööratavust:

$$\frac{n}{a_1} + \frac{1}{k} = (n-1) \frac{1}{R_2}, \quad (2.24)$$

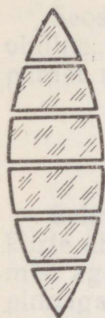
kus R_2 on läätsede tagumise pinna kõverusraadius. Võrranditest (2.22), (2.23) ja (2.24) saab teadaoleva a ja läätsede iseloomustavate suuruste n , l , R_1 ja R_2 kaudu leida suuruse k .

Suuremat huvi pakub lihtne erijuht, kui läätsede paksus l on läätsede pindade kõverusraadiuste ja eseme kaugusega võrreldes lõpmatult väike. Sellist läätsede nimetatakse **õhukeseks läätsedeks**. Kui edaspidi räägime läätsedest, siis mõtleme selle all alati õhukesest läätsedest. Leiame k ja a vahelise seose õhukesel läätsedel korral. Võttes $l=0$ ja elimineerides võrranditest (2.22), (2.23) ja (2.24) suurused k_1 ja a_1 , saame võrduse

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right). \quad (2.25)$$

Saadud valem on **õhukesel läätsedel valem** ja me tuletasime ta juhul, kui läbipaistev keha oli piiratud kahe kumerpinnaga. Kahe kumerpinnaga piiratud läbipaistvat keha nimetatakse **kaksik-kumeraks läätsedeks**.

Samasugust arutluskäiku võib korrata ka tasa- ja nõguspindade korral. Tasapinna kõverusraadius on lõpmatult suur ning üks liikmetest $\frac{1}{R}$ valemis (2.25) on null. Nõguspinnale vastav liige $\frac{1}{R}$ tuleb panna valemisse (2.25) miinusmärgiga.



Joon. 86

Võrrandi (2.25) parema poole märk määrab läätselise optilised omadused. Kui võrrandi (2.25) parem pool on positiivne, on lääts **koondav**, kui negatiivne, siis **hajutav**. Õhus asuva kaksikkumera klaasläätselise puhul on $(n-1) > 0$ ja $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) > 0$ ning ta on koondav lääts. Kaksikkumer lääts paksub äärtelt keskkoha poole ja teda võib skemaatiliselt kujutada klaasprismade kogumina (joon. 86). Iga prisma murrab kiirt aluse poole ja seepärast murduvad kõik läätselise läbivad kiired läätselise optilise peatelje poole. Lääts koondab paralleelsete või vähe hajuvate kiirte kimbu ühte punkti.

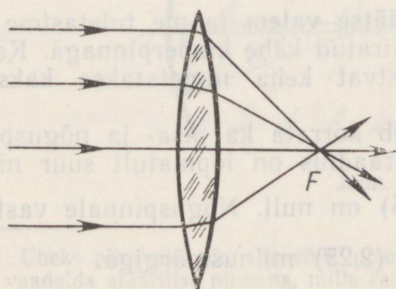
Klaasis asuva kaksikkumera õhkläätselise puhul on $(n-1) < 0$, kuid $\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right) > 0$ ning seepärast on lääts hajutav. Lääts murrab paralleelsete kiirte kimbu optilisest peateljest eemale («hajutab» kimbu).

37. ÕHUKESE LÄÄTSE FOOKUSKAUGUS

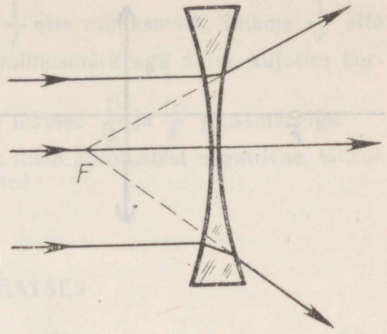
Valemist (2.25) järeldub, et valgusallika kaugenemisel läätselt tema kujutis läheneb läätselisele. Kui valgusallikas eemaldub nii kaugemale, et temast läätselisele langevaid kiiri võib lugeda paralleelseteks ($a \rightarrow \infty$, ehk $\frac{1}{a} \rightarrow 0$), tekib kujutis punktis, mille kauguse läätselt saab leida valemist

$$\frac{1}{k} = (n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Seda punkti nimetatakse läätselise **fookuseks** ja tähistatakse



Joon. 87



Joon. 88

tähega F (joon. 87).¹ Fookuse ja läätsse vahelist kaugust nimetatakse **fookuskaukuseks** ja seda märgitakse harilikult tähega f . Seega on fookuskaukus

$$f = \frac{1}{(n-1) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right)}. \quad (2.26)$$

Kui fookuskaukus f on negatiivne (hajutav lääts), siis tähendab see seda, et fookus on ebafookus, s. t. läätsse langev optilise teljega paralleelsete kiirte kimp muutub pärast läätses murdumist hajuvaks kiirtekimbuks. Ebafookuses koonduvad mitte kiired ise, vaid nende pikendused (joon. 88).

Optilise peateljega paralleelsete kiirte kimpu võib läätsse suunata ka teiselt poolt läätsse. Sel teel saab leida läätsse teise fookuse. Teine fookus asub läätsse optilisel peateljel teisel pool läätsse samuti kaugusel f .

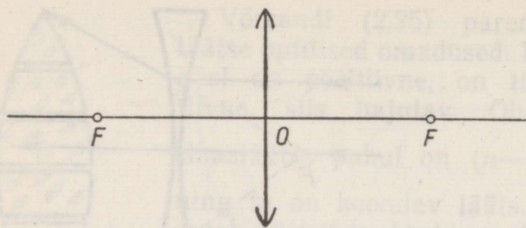
Fookuskauguse pöördväärtust nimetatakse **läätsse optiliseks tugevuseks** ja teda tähistatakse tähega D :

$$D = \frac{1}{f}. \quad (2.27)$$

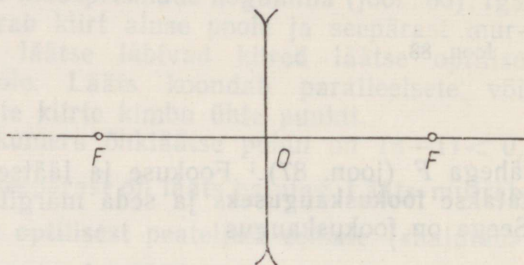
Mida lähemal fookus läätssele on, seda tugevamini lääts kiiri murrab, s. t. koondab või hajutab, ja seda suurem on läätsse optilise tugevuse absoluutväärtus.

Läätsede optilist tugevust mõõdetakse, nagu sfääriliste peeglite optilist tugevustki, dioptriates (tähis dptr). Läätsse optiline tugevus on 1 dptr , kui läätsse fookuskaukus on 1 m.

¹ Kuna valguskiirte käik on pööratav, levivad fookuses asuva valgusallika kiired pärast läätses murdumist paralleelseina.



Joon. 89



Joon. 90

Kasutades läätse fookuskauguse või optilise tugevuse mõistet, saab õhukese läätse valemite oluliselt lihtsustada:

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

või

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = D. \quad (2.28)$$

Niisiis, teades valguspunkti kaugust läätsest ja läätse fookuskaugust (fookuste asukohti), saab leida kujutise kauguse kiirte käiku läätse välja joonistamata. Seepärast pole joonisel vaja anda ka läätse pindade täpset kuju. Koondavat läätse kujutatakse joonisel 89 ja hajutavat läätse joonisel 90 toodud tähisega.

Punkti O nimetatakse **läätse optiliseks keskpunktiks**, sest selles punktis justkui ühineksid kahe sfäärilise segmendi, läätse pindade tipud.

Mistahes läätse optilist keskpunkti läbivat sirget nimetatakse **läätse optiliseks teljeks**. Läätse optilise peateljega oleme juba tuttavad. Kõiki teisi läätse optilisi telgi nimetatakse **optilisteks kõrvalteljedeks**.

Valemi (2.28) rakendamisel pannakse liikmete ette märk samal põhimõttel nagu sfäärilise peegli valemiski. Kui lääts on koondav, pannakse liikme $\frac{1}{f}$ ette plussmärk, sest läätse fookus on tõeline.

Hajutava läätse korral pannakse liikme $\frac{1}{f}$ ette miinusmärk. Liikme $\frac{1}{k}$ ette pannakse plussmärk, kui kujutis on tõeline, miinusmärk aga näiva kujutise korral.

Juhul, kui f ja k on tundmatud, võetakse liikmed $\frac{1}{f}$ ja $\frac{1}{k}$ plussmärgiga.

Kui fookuskaugus f või kujutise kaugus k tuleb arvutustest negatiivne, tähendab see seda, et fookus või kujutis pole tõeline.¹

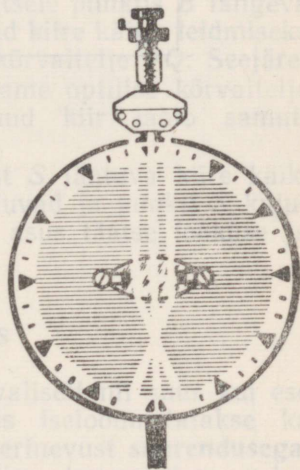
38. KUJUTIS LÄÄTSES

Kiirte murdumist läätses saab jälgida katseliselt (joon. 91). Lääts kinnitatakse ketta keskohta horisontaalselt ja muutes valgusti asendit, suunatakse läätsesele vertikaalne kiir, mis kulgeb piki optilist peatelge. Seejärel suunatakse läätsesele kiir mingit optilist kõrvaltelge mööda ja jälgitakse murdunud kiire väikest paralleelset nihkumist langeva kiire suhtes.

Kui suunata läätsesele vertikaalselt kolm paralleelset kiirt, lõikuvad need kiired pärast murdumist läätsese fookuses. Suunates need kolm paralleelset kiirt läätsese erinevate nurkade all, ei lõiku need kiired enam fookuses, vaid mingil pinnal asuvates punktides. Samuti nagu sfäärilise peegli korral, võib seda pinda lugeda ligilähedaselt tasandiks, mis on optilise peateljega risti. Seda tasandit nimetatakse **fokaaltasandiks**.

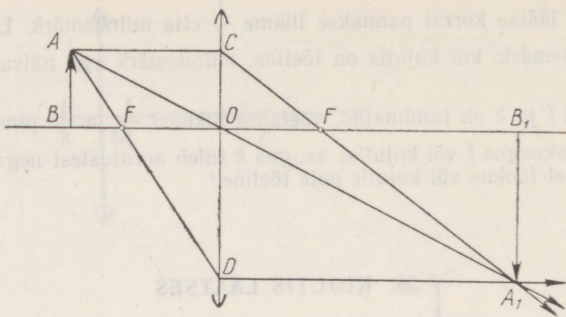
Reguleerides kolme valgustist väljuva kiire suunda nii, et nad lõikuvad ühes punktis, saab samal katseriistal imiteerida valguspunkti, milleks ongi kiirte lõikepunkt. Kui saadud valguspunkt panna läätsese fookusesse, on kiired pärast läätsese murdumist paralleelsed. Valgusallika viimisel läätsesest kaugemale koonduvad kiired läätsese taga ja tekitavad tõelise kujutise. Kui valgusallikas asub läätsese ja fookuse vahel, on kiired pärast murdumist hajuvad ja tekitavad ebakujutise.

Teades kiirte käiku läätses, saab konstrueerida mistahes eseme kujutise (joon. 92). Konstrueerime näiteks eseme

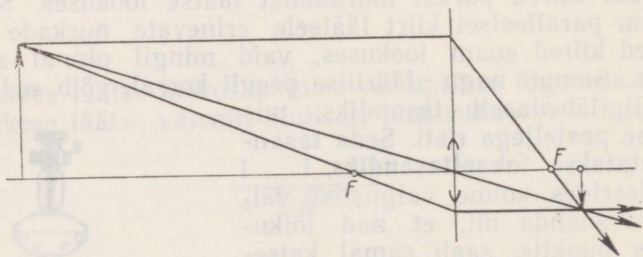


Joon. 91

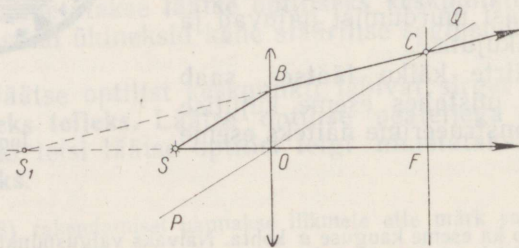
¹ Õeldu käib ka eseme kauguse a kohta. Näivaks valguspunktiks nimetatakse punkti, milles lõikuvad läätsesele hajuva kimbuna langevate kiirte pikendused. Näiva valguspunkti korral on $a < 0$.



Joon. 92



Joon. 93



Joon. 94

AB kujutise, mille tekitab koondav lääts, kui on teada lääts fookus ja optiline keskpunkt. Konstrueerimisel kasutame meile juba tuntud «mugavaid» kiiri. Ühe kiire AC suuname läätsel paralleelselt optilise peateljega. Pärast murdumist läbib see kiir fookust. Teise kiire AO tõmbame läbi optilise keskpunkti. Selle kiire suund läätses ei muutu. Kolmanda kiire AD võib suunata läätsel läbi fookuse. Pärast murdumist kulgeb see kiir paralleelselt optilise peateljega. Nende kiirte lõikepunktis asubki punkti A kujutis A_1 . Samal viisil võib konstrueerida ka kõikide teiste punktide kujutised. Ei maksa aga arvata, et kujutise tekitavad ainult kaks või kolm kiirt: kujutise tekitavad loendamatu hulk punktist A väljuvaid ja punktis A_1 koonduvaid kiiri. Kiirte AC , AO ja AD käigu järgi on ainult mugav määrata kujutise tekkekohta.

Mida aga siis teha, kui ese on läätses suurem ja fookust läbiv kiir läheb läätses mööda (joon. 93)? Ka optilise peateljega paralleelne kiir läheb sel juhul läätses mööda. Antud juhul tuleb kujutise konstrueerimisel arvestada seda, et väike lääts töötab täpselt samuti nagu sama fookuskaugusega suur lääts. See võimaldab mõttes pikendada läätses mõlemale poole nii kaugele, et kujutise saab konstrueerida «sobivate» kiirte abil.

Käsitleda jääb veel juht, kus on tarvis konstrueerida optilisel peateljel asuva punkti kujutis. Raskus seisab siin selles, et kõik kolm «sobivat» kiirt langevad kokku ja ühtivad optilise peateljega. Seepärast tekib vajadus määrata läätsel punktis B langeva suvalise kiire SB käik (joon. 94). Murdunud kiire käigu leidmiseks tõmbame kiirega SB paralleelse optilise kõrvalteltje PQ . Seejärel joonistame välja fokaaltasandi FC ja leiame optilise kõrvalteltje lõikepunkti C fokaaltasandiga. Murdunud kiir läbib samuti punkti C .

Seega on konstrueeritud kahe punktist S lähtuva kiire käik. Pärast läätses murdumist need kiired hajuvad ja punkti S kujutis S_1 on ebakujutis, sest valguspunkt S asus läätses fookuse ja läätses vahel.

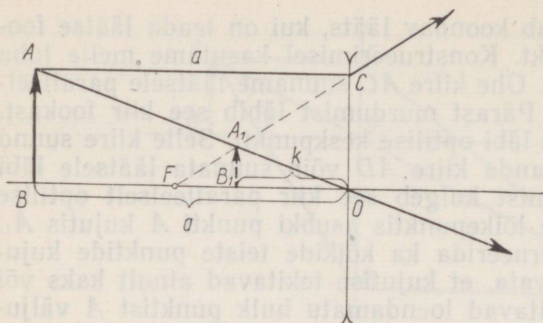
39. JOONSUURENDUS

Läätses poolt tekitatud kujutis pole tavaliselt nii suur kui ese ise. Nii nagu sfääriliste peeglite juures iseloomustatakse ka läätses puhul eseme ja kujutise mõõtmete erinevust **suurendusega**.

Joonsuurenduseks nimetatakse kujutise joonmõõtme suhet eseme joonmõõtmesse.

Vaatleme eseme joonmõõtmete suurendust joonise 92 põhjal. Kui eseme AB kõrgus on h , kujutise A_1B_1 kõrgus aga H , siis joonsuurendus

$$s = \frac{H}{h}.$$



Joon. 95

Sarnastest kolmnurkadest ABO ja A_1B_1O järeldub, et

$$\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{OB_1}{OB}.$$

Seega on

$$s = \frac{H}{h} = \frac{k}{a}. \quad (2.29)$$

Läätsede joonsuurenduse valem (2.29) on sama kujuga kui sfääriliste peeglite joonsuurenduse valem (vt. § 29).

Vaatame joonsuurenduse mõistet kasutades näidet, mis illustreerib märke läätse valemi liikmete ees. Joonisel 95 on näidatud eseme AB kujutise A_1B_1 tekkimine hajutatvas läätstes. Joonsuurenduse s võib leida kolmnurkadest AOB ja A_1OB_1 ning samuti ka kolmnurkadest FCO ja FA_1B_1 :

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

millest

$$kf = af - ak.$$

Jagades viimase võrrandi liikmeid suurusega afk , saame

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

Miinusmärgid liikmete $\frac{1}{k}$ ja $\frac{1}{f}$ ees näitavad, et kujutis ja läätse fookus pole tõelised (tegemist on ebafookuse ja ebakuju-tisega).

40. FOTOAPARAAT

Mitmesuguste optikariistade ehitus ja töötamine põhineb geomeetrilise optika seadustel.

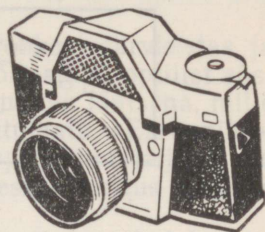
Kõigepealt vaatame neid optikariistu, mis tekitavad tõelise kujutise. Tekkinud kujutise (foto) fikseerimiseks ja säilitamiseks võib kasutada valguse keemilist toimet.

Fotoaparaadi üks võimalikest väliskujudest on toodud joonisel 96. Fotoaparaadi põhiosadeks on valguskindel kamber ja läätsede süsteem, mida nimetatakse **objektiiviks**. Lihtsaimaks objektiiviks on üks koondav lääts.

Objektiiv tekitab kambri tagaseina lähedale pildistatava objekti tõelise ja ümberpööratud kujutise. Enamikul juhtudel asub ese aparaadist kaugemal kui objektiivi kaks fookuskaugust, mille tõttu tekib vähendatud kujutis. Kohta, kus kujutis tekib, pannakse valgustundliku aine kihiga, nn. fotoemulsiooniga kaetud fotoplaat või -film.

Pildistatav ese võib asuda aparaadist erinevatel kaugustel. Sellepärast tuleb ka objektiivi ja filmi vahelist kaugust muuta, mida saab teha kas kambri väljavenitamise või kokkusurumise (kambri seinad tehakse «lõõtsakujulised»), ehk objektiivi pööramise teel.

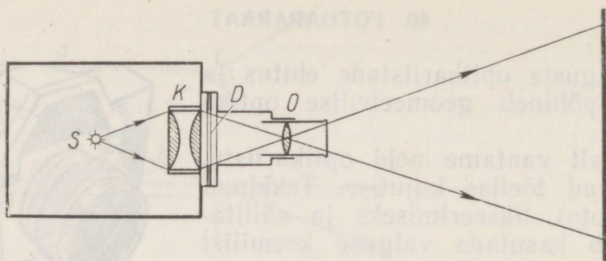
Valgustundlikule kihile langevat valgusenergiat doseeritakse katiku abil, mis avab valguse sissepääsu kambrisse ainult kindlaks ajavahemikuks — **säritusajaks**. Säritusaeg sõltub fotoemulsiooni tundlikkusest ja filmi valgustatusest. Kerge on mõista, et filmi valgustatakse seda rohkem, mida suuremad on objektiivi läätsed ja mida lähemal on valgustundlik kiht objektiivile. Need näitajad on antud objektiivi peal numbritena, mis näitavad objektiivi fookuskauguse suhet objektiivi läätsede tegevdiameetritesse. Objektiivi tegevdiameetrit saab muuta diafragma abil.



Joon. 96

41. PROJEKTSIOONIAPARAAT

Projektsiooniaparaadi ülesandeks on tekitada ekraanil eseme tõeline ja suurendatud kujutis. Esemeks võib olla läbipaistvale alusele tehtud joonis või foto, nn. diaposiitiv, mida valgustatakse tagant. Projektsiooniaparaadi ehitus on kujutatud joonisel 97. Diaposiitivi *D* kujutise tekitab ekraanil objektiiv *O*. **Kondensoriks** nimetatav läätsede süsteem *K* tagab, et valgusallikast läbi diaposiitivi tunginud kogu valgus läbiks ka objektiivi. Sellepärast paigaldataksegi kondensor nii, et ta tekitab valgusallika kujutise



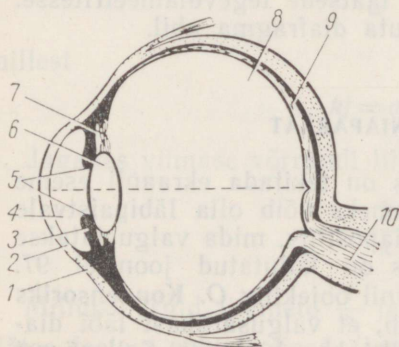
Joon. 97

objektiivi optilisse keskpunkti. Sel juhul tekib ekraanil diapositiivi selge kujutis. Lähendades või eemaldades objektiivi diapositiivist ja muutes samaaegselt ka projektsiooniaparaadi kaugust ekraanini, saab muuta projektsiooniaparaadi suurendust.

Mõnede projektsiooniaparaatidega saab ekraanile projekteerida nii läbipaistvate kui ka läbipaistmatute esemete kujutisi. Viimasel juhul valgustatakse eset (raamatut, joonist) tugeva valgusallikaga ja tekkinud kujutis projekteeritakse ekraanile. Sellist kombineeritud riista nimetatakse **epidiaskoobiks**.

42. SILM

Inimese silm on peaaegu kerakujuline. Silma diameeter on umbes 2,5 cm. Pealt on silm kaetud valget värvi kaitsekestaga, skleeraga 1, mille eesmist läbipaistvat osa 2 nimetatakse sarvkestaks. Joonisel 98 kujutatud silma skeemilt on näha, et sarvkesta taga, viimasest veidi eemal asub mingit värvi vikerkest 3. Sarv- ja vikerkesta vahel on värvitu vedelik 4. Vikerkesta sees on silmatera 5. Sõltuvalt silma langevast valgusvoost, muutub silmatera diameeter reflektorselt 2-st kuni 8 millimeetrini. Silmatera



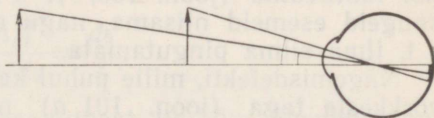
Joon. 98

diameetri muutumine sarnaneb fotoaparaadi diafragma muutmisega. Silmatera taga asub läätsetaoline läbipaistev kihiline keha — silmalääts 6. Erilised silmalihased 7 saavad mõningal määral muuta silmaläätse kuju — lähedaste esemete vaatamisel muudavad nad silmaläätse kumeramaks. Ülejäänud silma osa kuni silma tagaseinani (silma põhjani) täidab poolvedel klaaskeha 8. Silma põhi on kaetud keerulise võrkkestaga 9, mis kujutab endast

nägemisnärvil 10 harusid koos närvilõpmetega kepikeste ja kolvikeste näol. Kolvid ja kepikesed ongi silma valgustundlikud elemendid.

Silma langevad kiired murduvad kõige rohkem sarvkestas ja seejärel väheke ka silmaläätses. Tervikuna võib silma optilist süsteemi vaadata muutuva fookuskaugusega koondava läätsena, mille «sügavus» (läätses kaugus ekraanist) on muutumatu. «Ekraaniks», millel tekib vaadatava eseme tõeline ümberpööratud kujutis, on võrkkest. Närvilõpmete (kepikeste ja kolvikeste) ärritus valguse toimel tekitab valgusaistingut.

Kui ese on väga kaugel, tekib normaalse silma puhul kujutis võrkkestal silmaläätses lihaste vähimagi pingeta. Eseme lähene-misel silmale suruvad silmalihased silmaläätses kokku ja silmaläätses fookuskaugus väheneb nii palju, et kujutis tekib jällegi võrkkestal. Silmaläätses kuhu muutvate lihaste pinge tekib reflektoor-selt. Silma kohanimist eri kaugustel asuvate esemete teravaks nägemiseks nimetatakse **silma akommodatsiooniks**. Eseme lähene-

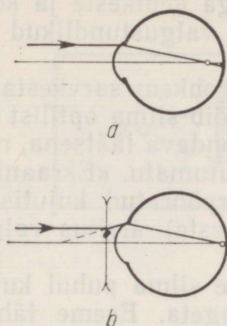


Joon. 99

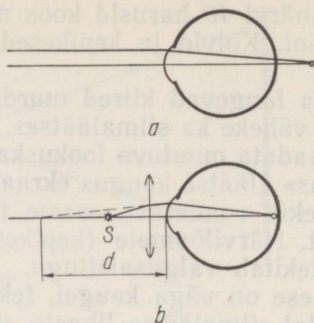
misel suureneb vaatenurk, mille all me näeme eseme kaht lähedast punkti (joon. 99). Kui vaatenurk saab suuremaks ühest nurgaminutist, tekivad kahe punkti kujutised erinevatel närvilõpmetel ja me näeme neid punkte eraldi. Väikeste detailide vaatamiseks pole aga mõtet eset silmale väga lähedale tuua, sest silma akommodatsioonil on piir. Akommodatsiooni piirkaugusele vastavat eseme kaugust silmast nimetatakse **parima nägemise kauguseks** ja sellel kaugusel asuvat punkti lähimaks akommodatsiooni punktiks. Normaalse silma parima nägemise kauguseks loetakse 25 cm ja akommodatsiooni kaugeimaks punktiks lõpmata kaugel punkt. Lõpmata kaugel punkti näeme silmalihaseid pingutamata.

43. PRILLID

Eelmises paragrahvis räägiti normaalse silma ehitusest ja töötamisest. Paljudel inimestel ei teki pingutamata silmalihaste korral kaugel eseme kujutis võrkkestal, vaid selle ees (joon. 100, a). Sellist viga nimetatakse **lühinägevuseks**. Lühinägelik näeb eset selgelt ainult teatud kauguselt alates, sest tema silma akommodatsiooni kaugeim punkt ei asu lõpmata kaugel. Sel juhul on



Joon. 100



Joon. 101

väiksem ka parima nägemise kaugus. Lühinägevust parandab hajutavate läätsedega prillide kandmine, sest nõguslääts läbi-
vad kiired paistavad silmale akommodatsiooni kaugeimast punk-
tist lähtuvaina (joon. 100, *b*). Prille kandev lühinägelik näeb
kaugeid esemeid niisama, nagu normaalse nägemisega inimene,
s. t. ilma silma pingutamata.

Nägemisdefekti, mille puhul kaugete esemete kujutised tekivad
võrkkesta taga (joon. 101, *a*) nimetatakse **kaugelenägevuseks**.
Kaugelenägelik peab isegi kaugete esemete vaatamisel silmi pin-
gutama. Lähedaste esemete vaatamisel lõpeb silma akommodat-
sioon juba kaugustel $d > 25$ cm.

Kaugelenägevuse parandamiseks tuleb kanda koondavate läät-
sedega prille (joon. 101, *b*).

Esemelt, mis asub 25 cm kaugusel, lähtuvad kiired on pärast
lääts läbimist vähem hajuvad ja paistavad lähtuvat punktist,
mille kaugus d silmast vastab akommodatsiooni piirkaugusele.
Järelikult, prille kandes on kaugelenägeva inimese parima näge-
mise kaugus sama, mis normaalse nägemise korral.

44. LUUP

Vaadeldava eseme väikeste detailide eristamiseks peab vaate-
nurk olema küllalt suur. Kui akommodatsioonil poleks piiri, saaks
vaatenurka suurendada eseme lähendamisega silmale.

Silmi pingutamata suurendatakse vaatenurka optikariistade
abil. Jooniselt 99 on näha, et suurema vaatenurga puhul on ka
eseme kujutis võrkkestal suurem. Väikeste vaatenurkade korral on
kujutiste suhe ligikaudu võrdne vastavate vaatenurkade suhtega.
Optikariistas nähtavale esemele vastava vaatenurga suhet vaate-
nurka, mille all ese paistab palja silmaga vaatamisel, nimetatakse
optikariista suurenduseks.

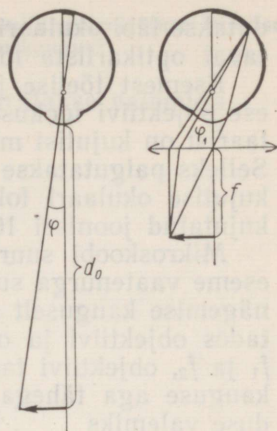
Lihtsaimaks vaatenurga suurendamise vahendiks väikeste esemete vaatlemisel on **luup**. Luubiks nimetatakse koondavat läätsed või läätsede süsteemi, mille fookuskaugus f pole suurem kui 10 cm. Luup pannakse tavaliselt silma lähedale, ese aga luubi fokaaltasandisse, sest siis on mistahes eseme punktist lähtuvad kiired pärast luubi läbimist paralleelsed. Seega tekib eseme punktide terav kujutis võrkkestal silma pingutamata.

Luubi suurendus võrdub vaatenurga $\varphi_1 \approx \frac{h}{f}$, mille all on ese nähtav luubis, ja vaatenurga $\varphi \approx \frac{h}{d}$, mille all ese

paistab parima nägemise kauguselt $d_0 = 25$ cm palja silmaga vaadatuna, suhtega (joon. 102):

$$s = \frac{\varphi_1}{\varphi} \approx \frac{h/f}{h/d_0} = \frac{d_0}{f}.$$

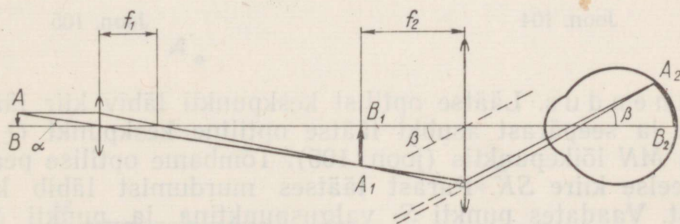
Pannes eseme luubi fokaaltasapinnast luubile lähemale, on suurendus veidi suurem, kuid siis tuleb eseme vaatlemisel silmi pingutada.



Joon. 102

45. MIKROSKOOP

Luubi suurendust piirab see, et väike fookuskaugus on ainult väikese diameetriga läätsel, mida on aga raske kasutada. Suurema suurenduse saab, kui lisaks luubina töötavale läätsel kasutada veel ühte läätsed, mida nimetatakse **objektiiviks**. Objektiiv tekitab esemest tõelise suurendatud kujutise, mida seejärel vaa-



Joon. 103

datakse läbi **okulaariks** nimetatava luubi. Sellise skeemi järgi töötavat optikariista nimetatakse **mikroskoobiks**.

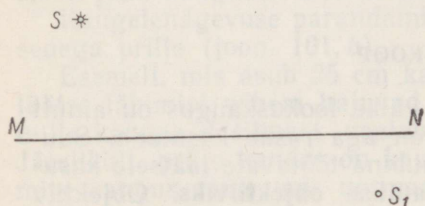
Esemest tõelise ja suurendatud kujutise saamiseks pannakse ese objektiivi fookuse ja kahekordse fookuskauguse vahele. Okulaarist on kujutist mugav vaadata, kui pole vaja pingutada silmi. Selleks paigutatakse okulaar mikroskoopi nii, et objektiiv tekitab kujutise okulaari fokaaltasandile. Kiirte käik mikroskoobis on kujutatud joonisel 103.

Mikroskoobi suurenduseks nimetatakse mikroskoobis nähtava eseme vaatenurga suhet vaatenurka, mille all ese paistab parima nägemise kauguselt $d_0 = 25$ cm palja silmaga vaadatuna. Tähistades objektiivi ja okulaari fookuskaugused vastavalt tähtedega f_1 ja f_2 , objektiivi tagumise ja okulaari eesmise fookuse vahelise kauguse aga tähega δ , annavad arvutused mikroskoobi suurenduse valemiks

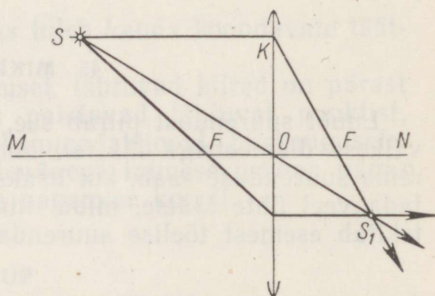
$$s = \frac{\delta}{f_1} \cdot \frac{d_0}{f_2}.$$

46. NÄIDISÜLESANDEID

1. Joonisel 104 on antud läätses optilise peatelje MN , valguspunkti S ja tema kujutise S_1 asukohad. Leida kiirte käigu abil läätses optiline keskpunkt ja fookused. Taha kindlaks, kas lääts on koondav või hajuv ja kas kujutis on tõeline või näiv.



Joon. 104



Joon. 105

L a h e n d u s. Läätses optilist keskpunkti läbiv kiir läätses ei murdu ja seepärast asubki läätses optiline keskpunkt O sirgete SS_1 ja MN lõikepunktis (joon. 105). Tõmbame optilise peateljega paralleelse kiire SK . Pärast läätses murdumist läbib kiir KS_1 fookust. Vaadates punkti S_1 valguspunktina ja punkti S tema kujutisena, leiame analoogiliselt ka teise fookuse asukoha. Lääts on koondav ja kujutis tõeline.

2. Läätest kaugusel $a=12,5$ cm asuva skaala millimeeterjaotuse kujutise pikkus ekraanil on $L=2,4$ cm. Kui suur on läätle fookuskaugus?

L a h e n d u s. Läätle joonsuurendus määratakse valemiga

$$s = \frac{L}{l} = \frac{k}{a},$$

kus $l = 1$ mm. Kasutades läätle valemit

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

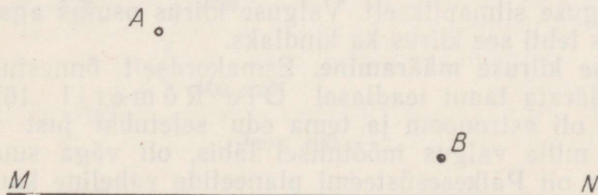
saame:

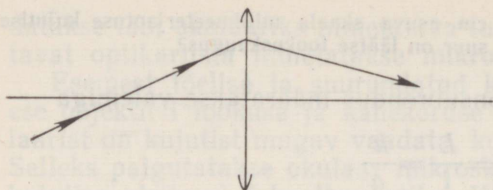
$$f = \frac{ka}{k+a} = \frac{sa}{s+1} = \frac{La}{L+l};$$

$$f = \frac{2,4 \text{ cm} \cdot 12,4 \text{ cm}}{2,4 \text{ cm} + 0,1 \text{ cm}} = 12 \text{ cm}.$$

Harjutus 5

1. Kas kaksiknõgus «õhklääts» on vees hajutav või koondav?
2. Kuidas muutub hajutava klaasläätle fookuskaugus, kui lääts panna vette?
3. Läätle abil tekitati ekraanile elektripirni tõeline kujutis. Kuidas muutub elektripirni kujutis, kui läätle parem pool kinni katta?
4. Fotoaparaat tekitab filmile inimese näo kujutise. Selgitada joonise abil, miks tekib inimese taga eemal asuvast metsast hägune kujutis? Kuhu poole tuleb objektiivi nihutada, et metsast tekiks selge kujutis? Kas sel juhul on terav ka inimese näo kujutis?
5. Miks maskita sukelduja eraldab vees esemeid halvasti?
6. Arvutada õhukese tasakumera läätle optiline tugevus ja fookuskaugus, kui läätle kumerpinna kõverusraadius $R=1$ m ja lääts on tehtud klaasist, mille murdumisnäitaja $n=1,5$.
7. Ese asub koondavast läätest kaugusel $a=1,8$ m. Leida läätle fookuskaugus, kui kujutis on esemest 5 korda väiksem.
8. Joonisel 106 on kujutatud läätle optiline peatelg MN , valguspunkt ja tema kujutis. Leida kiirte käigu konstrueerimisega läätle optilise keskpunkti ja fookuse asukohad. Kas lääts on koondav või hajutav? Kas kujutis on tõeline või ebakujutis? Vaadelda järgmisi juhte: a) A on valguspunkt ja B tema kujutis ning 2) B on valguspunkt ja A tema kujutis.





Joon. 107

9. Joonisel 107 on antud ühe kiire käik läätstes. Leida konstrueerimise teel läätte fookuse asukoht.

10. Projektsiooniaparaadi objektiivil fookuskaugus $f=0,25$ m. Palju kordi suurendab projektsiooniaparaat diaposiitivi, kui ekraani kaugus objektiivist on $k=2$ m?

11. Valguspunkt asub hajutava läätte fookuses. Kui kaugel läätsest tekib kujutis? Konstrueerida kiirte käik.

12. Määrata kaugelenägijale sobivate prillide optiline tugevus, kui tema parima nägemise kaugus $d=1$ m. Normaalse silma parima nägemise kauguseks võtta $d_0=0,25$ m.

13. Kaks koondavat läätte optiliste tugevustega $D_1=2$ dptr ja $D_2=3$ dptr on pandud tihedalt teineteise vastu. Kui suur on sellise süsteemi optiline tugevus D ?

III. VALGUSLAINED

47. VALGUSE KIIRUS

Geomeetrilises optikas uuritakse ainult valguskiirte käiku, näiteks murdumisel, peegeldumisel jne. Küsimus valguse levimisprotsessist ajas jääb väljapoole geomeetrilise optika piire. Valguse omadusi ja tema vastastikust mõju ainega uuritakse sügavamini ja detailsemalt nõndanimetatud **füüsikalises optikas**. Seda uut füüsika osa alustame jutustusega sellest, kuidas mõõdeti valguse levimiskiirust.

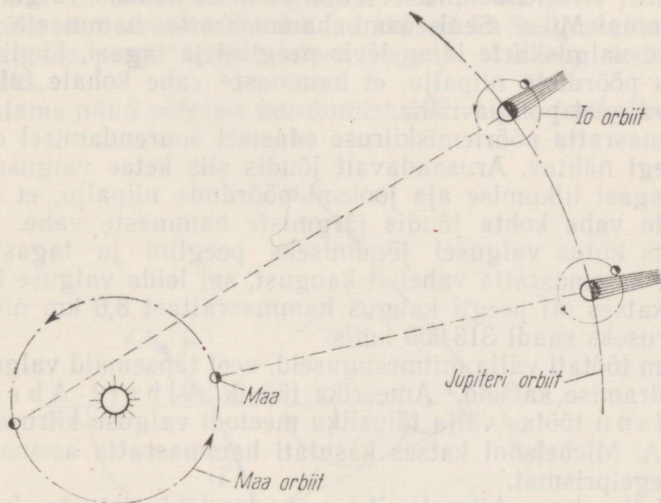
Pöörates lülitit, täitub kogu tuba valgusega kohe. Näib, et seinteni jõudmiseks ei kulu valgusel üldse aega. Valguse kiiruse leidmiseks tehti palju katseid, kus täpsete kelladega taheti määrata aeg, mis kulub valgusel pika maa (mõne kilomeetri) läbimiseks. Need katsed aga ei andnud tulemusi ja seepärast hakati arvama, et valguse levimiseks ei kulu üldse aega ja ta läbib mistahes kauguse silmapilkselt. Valguse kiirus osutus aga lõplikuks ja viimaks tehti see kiirus ka kindlaks.

Valguse kiiruse määramine. Esmakordselt õnnestus valguse kiirust määrata taani teadlasel Ole Römeril 1676. aastal. O. Römer oli astronoom ja tema edu seletubki just sellega, et vahemaa, mille valgus möötmisel läbis, oli väga suur. Selleks vahemaaks oli Päikesesüsteemi planeetide vaheline kaugus.

Römer jälgis Päikesesüsteemi kõige suurema planeedi, Jupiteri kaaslaste varjutust. Erinevalt Maast on Jupiteril tervelt kaksteist

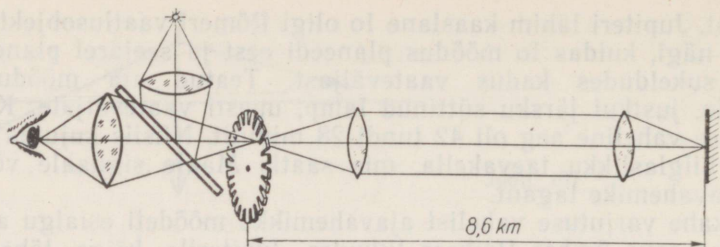
kaaslast, Jupiteri lähim kaaslane Io oligi Rõmeri vaatlusobjektiks. Rõmer nägi, kuidas Io möödus planeedi eest ja seejärel planeedi varju sukeldudes kadus vaateväljast. Teatud aja möödudes ilmus Io, justkui järsku süttinud lamp, uuesti vaateväljale. Kahe süttimise vaheline aeg oli 42 tundi 28 minutit. Niisiis kujutas see «kuu» hiiglaslikku taevakella, mis saatis Maale signaale võrdsete ajavahemike tagant.

Io kahe varjutuse vahelist ajavahemikku mõõdeti esialgu ajal, mil Maa asus ümber Päikese liikudes Jupiterile kõige lähemal (joon. 108). Kuus kuud hiljem, mil Maa oli Jupiterist eemaldunud oma orbiidi diameetri võrra, tehtud samasugused mõõtmised aga näitasid ootamatult, et Io väljus varjust tema teadaoleva tiirlemisperioodi põhjal ettearvutatud ajast tervelt 15 minutit hiljem. Rõmer selgitas seda järgmiselt: «Kui ma oleksin saanud jääda Maa orbiidi vastasküljele, ilmuks Io varjust iga kord ettenähtud ajal välja; seal asuv vaatleja näeks Iot 15 minutit varem. Hilinemine praegusel juhul on tingitud sellest, et valgusel kulub minu esimesest vaatluskohast minu praeguse asukohani levimiseks 15 minutit.» Teades Io «hilinemise» aega ja kaugust, mis seda hilinemist põhjustab, saab leida valguse kiiruse, kui jagada kaugus (Maa orbiidi diameeter) hilinemise ajaga. Valguse kiirus osutus erakordselt suureks, umbes 300 000 km/s.¹ Valguse suure levimis-



Joon. 108

¹ Mõõtmiste väikese täpsuse tõttu sai Rõmer ise valguse kiiruseks 215 000 km/s.



Joon. 109

kiiruse tõttu ongi raske märgata aega, mis kulub valgusel Maal kahe kauge punkti vahelise kauguse läbimiseks. Läbib ju valgus ühe sekundiga vahemaa, mis on Maa ekvaatorist 8 korda pikem.

Esmakordselt õnnestus valguse kiirust maapealsetes tingimustes mõõta prantsuse füüsikul Armand Hippolyte Louis Fizeau' l 1849. aastal. Fizeau suunas valguskiirte kimbu hambulise äärega kettale. Ketta hammaste vahelt läbitunginud valguskiirte kimp langes kettast mõne kilomeetri kaugusel asuvalle tasapeeglile (joon. 109). Peeglit peegeldunud valguskiirte kimp pidi enne silma langemist jällegi ketta hammaste vahelt läbi pääsema. Kui ketas pandi aeglaselt pöörlema, oli peeglit peegeldunud valgus nähtav. Pöörlemiskiiruse suurendamisel hakkas valgus aegapidi kaduma. Miks? Seni, kuni hammasratta hammaste vahelt läbiläinud valguskiirte kimp levis peegli ja tagasi, jõudis hammasrattas pöörduda niipalju, et hammaste vahe kohale tuli hammas ja valgust polnud näha.

Hammasratta pöörlemiskiiruse edasisel suurendamisel oli valgus jällegi nähtav. Arusaadavalt jõudis siis ketas valguse peegli ja tagasi liikumise aja jooksul pöörduda niipalju, et endiste hammaste vahe kohta jõudis järgmiste hammaste vahe. Teades aega, mis kulus valgusel jõudmiseks peegli ja tagasi ning peegli ja hammasratta vahelist kaugust, sai leida valguse kiiruse. Fizeau' katses oli peegli kaugus hammasrattast 8,6 km ning valguse kiiruseks saadi 313 000 km/s.

Hiljem töötati välja mitmesuguseid, veel täpsemaid valguse kiiruse määramise katseid.¹ Ameerika füüsik Albert Abraham Michelson töötas välja täiusliku meetodi valguse kiiruse mõõtmiseks. A. Michelsoni katses kasutati hammasratta asemel pöörlevat peegelprismat.

Mõõdeti valguse kiirust mitmesugustes läbipaistvates keskkondades. 1856. aastal mõõdeti valguse kiirust vees ja see osutus $\frac{4}{3}$

¹ 1862. a. määras valguse kiiruse laboratooriumi seinte vahel prantsuse füüsik L. Foucault. (Tõlk.)

korda väiksemaks valguse kiirusest vaakumis. Kõikides teistes ainetes on valguse kiirus samuti väiksem kui vaakumis.

Kaasaegsete andmete põhjal on valguse kiirus vaakumis 299 792,5 km/s, kusjuures ta on mõõdetud täpsusega $\pm 0,4$ km/s.

Valguse kiiruse kindlakstegemine mängis teaduses väga tähtsat rolli. Teatud määral aitas valguse kiiruse leidmine selgitada valguse olemust. Veelgi enam, mitte ükski keha maailmas ei saa liikuda valgusest kiiremini.

48. VALGUSE PEEGELDUMIS- JA MURDUMISSEADUSTE TULETAMINE

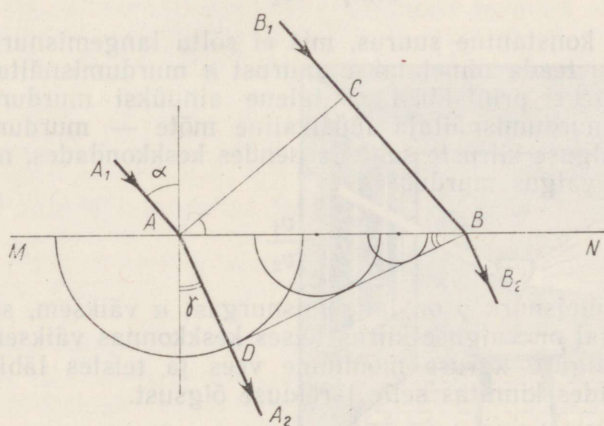
Geomeetrilise optika põhimõisteks on valguskiir. Valguskiirte sirgjooneline levimine homogeenses keskkonnas ning nende peegeldumis- ja murdumisreedused avastati katseliselt. Teoreetiliselt tuletati valguse peegeldumis- ja murdumisreedused esmakordselt valguse laineteooria abil, mille lõi Huygens. Huygens vaatas valgust kogu maailmaruumi täitvas hüpoteetilises keskkonnas — eetris — levivate elastsuslainetena.

Huygensi printsiip, millest räägiti mehhaanilisi laineid käsitlevas peatükis, oli algselt sõnastatud just valguslainete kohta.

Huygensi printsiip, samuti nagu kõik teised lainelise liikumise seadused, kehtib mistahes lainete jaoks, nende olemusest sõltumata.

Mehhaaniliste lainete peegeldumisreedus on meile juba tuttav. Kuna kõik need arutlused kehtivad täpselt ka valguslainete jaoks, võib valguse peegeldumisreedust lugeda otsekohe teoreetiliselt tõestatuks.

Vaatame nüüd valguse murdumist, kui valgus levib ühest kesk-



Joon. 110

konnast teise. Langegu kahe keskkonna, näiteks õhu ja vee lahuspinnale tasapinnaline valguslaine (joon. 110). Selle laine front AC on kiirtega A_1A ja B_1B risti. Murdunud laine frondiks on teise keskkonna elementaarlainete mähispind. Pinnani MN jõuab kõigepealt kiir A_1A . Kui valguse kiirus esimeses keskkonnas on v_1 , jõuab kiir B_1B pinnani MN aja

$$\Delta t = \frac{CB}{v_1}$$

võrra hiljem.

Seega ajahetkel, mil punktis B hakkab elementaarlaine alles tekkima, on laine punktist A jõudnud levida sfääriliselt kaugusele

$$AD = v_2 \Delta t,$$

kus v_2 on valguse kiirus teises keskkonnas.

Murdunud laine frondiks DB on sfäärile keskpunktiga punktis A punktist B tõmmatud puutuja. Kiire langemisnurk α võrdub kolmnurga ABC nurgaga CAB (kui ristiseisvate haaradega nurgad). Järelikult on

$$BC = v_1 \Delta t = AB \sin \alpha. \quad (3.1)$$

Murdumisnurk γ võrdub kolmnurga ABD nurgaga ABD ja seepärast on

$$AD = v_2 \Delta t = AB \sin \gamma. \quad (3.2)$$

Jagades võrduse (2.1) võrdusega (2.2), saame murdumis-
seaduse

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{v_1}{v_2} = n, \quad (3.3)$$

kus n on konstantne suurus, mis ei sõltu langemisnurga suurus-
est. Nagu teada nimetatakse suurust n murdumisnäitajaks. Nii-
siis, Huygensi printsibiist ei tulene ainuüksi murdumis-
seadus, vaid ka murdumisnäitaja füüsikaline mõte — murdumisnäitaja
võrdub valguse kiiruste suhtega nendes keskkondades, mille lahu-
tuspinnal valgus murdub:

$$n = \frac{v_1}{v_2}. \quad (3.4)$$

Kui murdumisnurk γ on langemisnurgast α väiksem, siis valemi
(3.3) põhjal on valguse kiirus teises keskkonnas väiksem kui esi-
meses. Valguse kiiruse mõõtmine vees ja teistes läbipaistvates
keskkondades kinnitas selle järelduse õigsust.

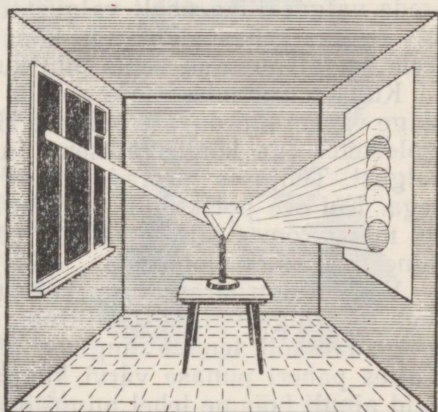
Keskkonna murdumisnäitaja ei sõltu valguskiirte kimbu langesmismurgast, kuid sõltub valguse värvusest. Selle nähtuse avastas I. Newton.

Tegeldes teleskoopide täiustamisega, pani Newton tähele, et objektiiv poolt tekitatud kujutise servad on värvilised. Newton huvitus sellest nähtusest ja oli esimene, kes «uuris valguskiirte mitmekesisust ning sellest tulenevaid värvuste erinevusi, mida keegi tolle ajani isegi ei aimanud» (sõnad Newtoni hauakivilt Londonis Westminster Abbey's).

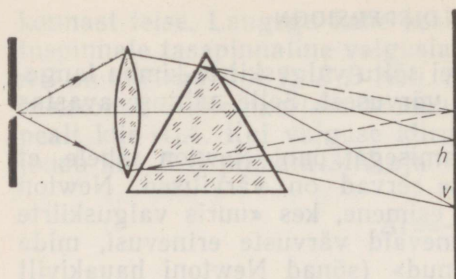
Läätses tekkinud kujutise vikerkaarevärvilisust pandi loomulikult tähele juba enne Newtonit. Samuti märgiti, et läbi prisma vaadates paistavad eseme servad mitmevärvilistena. Prismat läbiva valguskiirte kimbu ääred on samuti värvilised.

Newtoni põhikatses oli geniaalselt lihtne. Newton taipas prismale suunata väikese ristlõikega kiirtekimbu. Päikesekiir tungis pimendatud tuppa läbi väikese augu aknaeesriides. Klaasprismale langev valguskiir murdus ja vastasseinale tekkis augu pikaksveninud kujutis, milles vaheldusid eredad vikerkaarevärvid (joon. 111). Järgides sajandeid kestnud traditsiooni, mille kohaselt vikerkaare põhivärvusi pidi olema seitse, eraldas ka Newton violetse, sinise, helesinise, roheline, kollase, oranži ja punase värvuse. Vikerkaarevärvilist riba ennast nimetas Newton **spektri**ks (ladina keeles *spectrum* — nägemus).

Pannes augu ette punase klaasi, tekkis seinale ainult punane laik, pannes augu ette sinise klaasi, tekkis seinale ainult sinine laik jne. Newton tegi sellest järelduse, et prisma ei värvi valget kiirt, ei muuda valguse kvaliteeti, nagu arvati varem, vaid ainult lahutab valge valguse koostisosadeks (värviline kleebis joon. I).



Joon. 111



Joon. 112

Valge kiir on keeruka struktuuriga ja temast saab eraldada eri värvusega kiiri, mis ainult koos mõjudes tekitavad meis valge valguse mulje. Tõepoolest, kui teise, esimese suhtes 180° võrra pööratud prismaga koondada kõik spektri kiired, tekib jälle valge valgus (värviline kleebis joon. II). Eraldades spektrist mingi osa, näiteks roheline, ja lastes selle veel ühest prismast läbi, valguse värvus enam ei muutu.

Teise tähtsa järelduse, mille Newton tegi, sõnastas ta oma traktaadis «Optika» järgmiselt: «**Värvuselt erinevad kiired murduvad erinevalt**» (neil on erinevad murdumisnäitajad).

Kõige rohkem murduvad violetsed ja kõige vähem punased kiired.

Valguse murdumisnäitaja sõltuvust valguse värvusest nimetatakse **dispersiooniks** (ladina keeles *dispersus* — hajunud, laiali-puistatud).

Puhaste spektrivärvuste eraldamise eesmärgil täiustas Newton hiljem oma spektri vaatluste katseid, sest ainult prisma läbinud valguskiirte kimbust tekkinud värvilised laigud katsid üksteist osaliselt (vt. joon. 111). Newton kasutas ümmarguse ava asemel ereda valgusallika poolt valgustatavat pilu. Pilu taga asus lääts, mis tekitas sellest ekraanile kitsa valge riba kujutise. Kui kiirte tee asetati prisma, venis pilu kujutis spektriks (joon. 112).

Kuna murdumisnäitaja sõltub valguse kiirusest aines, siis on kõige vähem murduvate punaste kiirte levimiskiirus kõige suurem, violetsetel aga kõige väiksem. Just sellepärast prisma lahutabki valgust. Tühjuses levivad kõik eri värvi kiired ühesuguse kiirusega. Kui see poleks nii, siis paistnuks näiteks Jupiteri kaaslane Io, mida Römer jälgis, varjust väljumise hetkel punasena, varju mineku eel aga violetsenä.

Värvide imepärasest mitmekesisusest looduses saabki seletada sellega, et valge valgus on liitvalgus. Kui ese, näiteks paberileht, peegeldab kõik temale langevad kiired tagasi, paistab ta valgena. Kattes paberi punase värvi kihiga, ei loo me uut värvi valgust, vaid ainult hoiame lehel mingi osa olemasolevast valgusest kinni.

Nüüd peegelduvad ainult punased kiired, kuna ülejäänud kiired neelduvad värvikihis. Rohi ja puude lehed näivad meile rohelisena sellepärast, et kõikidest nendele langevatest päikesekiirtest peegeldavad nad ainult rohelisi kiiri ja neelavad kõiki teisi. Läbi punase klaasi vaadates ei paista rohi enam rohelisena.

50. VALGUSE INTERFERENTS

Füüsikalise optikaga tutvumise alul uurisime valguse kiiruse määramise meetodeid ja tõestust selle kohta, et valgus levib keskkonnas aeglasemalt kui vaakumis. See kinnitab valguse laineteooria aluseks oleva Huygensi printsiibi õigsust. Edasi näidati, et valguse levimiskiirus keskkonnas sõltub valguse värvusest.

Nüüd seisab järjekorras kaks järgmist küsimust.

Esiteks on tarvis kaalukamaid tõestusi selle kohta, et valgus kujutab endast lainet. Nagu varem rääkisime, on mistahes lainelise liikumisele omased interferents ja difraktsioon. Selleks et valguse lainelistes omadustes poleks vaja kahelda, tuleb valguse interferentsi ja difraktsiooni kohta leida eksperimentaalset kinnitust.

Teiseks tuleb selgitada, milliste valguse füüsikaliste karakteristikutega on seotud valguse värvuse erinevus.

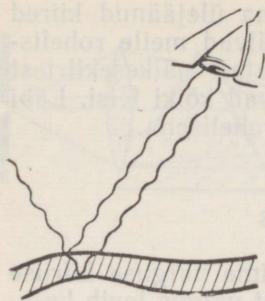
Alustame valguse interferentsist — nähtusest, mille kaudu saab mõõta valguse lainepikkust. Sellega on ühtlasi lahendatud ka teine küsimus.

Kurioosne on see, et valguse interferentsinähtusi pandi tähele juba väga ammu, kuid ei mõistetud, et tegemist on valguse interferentsiga. Ka teie olete näinud interferentsipilti palju kordi, kui te lapsena tegite seebimulle või vaatlesite õhukese petrooleumi- või naftakihi vikerkaarvärve veepinnal. «Õhus hõljuv seebimull . . . süttib kõigis ümbritsevatele kehadele omastes värvitoonides. Seebimull on vististi küll kõige võluvam, kõige peenem loodusime» (Mark Twain). Just valguse interferents teebki seebimulli nii imetlusväärseks.

Inglise teadlane Thomas Young tuli esimesena geniaalsele mõttele selgitada õhukeste kelmete värvust kahe laine liitumisega, millest üks peegeldub kelme välimiselt, teine sisemiselt pinnalt (joon. 113). Liitumisel need lained interfereeruvad teineteisega, tugevdades või nõrgendades valgust sõltuvalt



T. Young



Joon. 113

valge valgusega tekkima interferentsi tõttu eri värvusega piirkonnad.

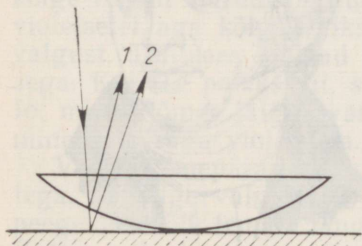
Lihtne interferentsipilt tekib klaasplaadi ja temale pandud suure kõverusraadiusega tasakumera läätsede vahele jäävas õhukises õhukihis. Interferentsipilt koosneb kontsentrilistest valgusringidest, mida hakati nimetama Newtoni rõngasteks.

51. NEWTONI RÕNGAD

Võtke suure fookuskaugusega (järelilikult väikese pinnakõverusega) lääts ja pange ta klaasplaadile. Vaadates tähelepanelikult läätsede pinda (soovitav läbi luubi), märkate läätsede ja klaasplaadi kokkupuute kohas musta täppi ja selle ümber väikesi vikerkaarevärvilisi rõngaid. Rõngaste raadiuse suurenedes naaber rõngastevaheline kaugus väheneb kiiresti. Need ongi Newtoni rõngad, mida Newton jälgis ja uuris väga tähelepanelikult. Ta leidis, et rõngaste raadiused kasvavad võrdeliselt ruutjuurega rõnga järjenumbriga (värviline kleebis joon. III, 1.) Newton vaatles neid rõngaid mitte ainult valges valguses, vaid ta valgustas läätsede ka ühevärviliste (monokromaatiliste) kiirte kimbuga. Ühe ja sama järjekorranumbri rõnga raadius suureneb spektri violetilt otsalt punase poole

minnes. Punased rõngad on kõige suurema raadiusega. Kõike seda võite ise katseliselt kontrollida.

Newtoni poolt leitud seaduspärasused olid täiesti õiged, kuid selgitada, miks rõngad üldse tekkivad, Newton ei suutnud. Esmaordselt õnnestus see Youngil. Jälgime Youngi arutlusi, mille aluseks on eeldus, et valgus on laine. Vaatleme juhtu, kui mingi kindla lainepikkusega laine langeb tasa-



Joon. 114

kumerale läätsele risti (joon. 114). Lained 1 ja 2 tekivad valguse peegeldumisel läätse kumerpinnalt (lahutuspiind klaas — õhk) ning klaasplaadilt (lahutuspiind õhk — klaas). Peegeldunud kiired on koherentsed — nad on ühesuguse lainepikkuse ja muutumatu faaside vahega, mis tekib sellest, et laine 2 läbib pikema tee kui laine 1. Käiguvahe võrdub läätse ja klaasplaadi vahelise õhukihi kahekordse paksusega kohas, kuhu langeb valgusallikast kiiratud laine. Kui teine laine jääb esimesest maha täisarv lainepikkuse võrra, siis liitudes need lained tugevdavad teineteist — lainete poolt tekitatud võnkumised toimuvad samas faasis. Vastupidi, kui teine laine jääb esimesest paaritu arvu poollaine võrra maha, on lainete poolt tekitatud võnkumised vastandfaasis ja lained kustutavad teineteist.

52. VALGUSLAINE PIKKUS

Kui läätse kõverusraadius R on teada, saab arvutada kaugused läätse ja klaasplaadi puutepunktist, kus lainete käiguvahe on selline, et kindla lainepikkusega λ lained kustutavad teineteise. Need kaugused ongi tumedate Newtoni rõngaste raadiused, sest õhukihi samapaksusjooned on ringjooned.

Mõõtes rõngaste raadiused, saab läätse kõverusraadiuse kaudu leida valguse lainepikkuse.

Mõõtmised näitavad, et punase valguse lainepikkus $\lambda_p \approx 8 \cdot 10^{-5}$ cm ja violetse valguse lainepikkus $\lambda_v \approx 4 \cdot 10^{-5}$ cm. Teistele spektrivärvustele vastavate valguslainete pikkused on punaste ja violetsete vahepealsed. Rõngaste raadiuse sõltuvust lainepikkusest on kerge kindlaks teha, kui panna läätsele langeva valguse ette valgusfiltreid.

Mistahes värvi valguse lainepikkus on väga väike. Mingi piltliku ettekujutuse valguse lainepikkusest võib saada järgmisest võrdlusest: kui merelaine pikkus (mõni meeter) suureneks sama arv kordi, nagu tuleks suurendada valguslaine, et ta pikkus võrduks käesoleva füüsikaõpiku laiusega, mahuks Atlandi ookeanile (New Yorgist kuni Lissabonini) ainult üks laine. Aatomi läbimõõdust (10^{-8} cm) on aga valguse lainepikkus umbes tuhat korda suurem.

Niisiis, interferents ei tõesta ainult valguse lainelisi omadusi, vaid interferentsipildi kaudu saab määrata ka valguslaine pikkust. Eri värvi valguse lainepikkuste võrdlemisest selgub, et nii nagu heli kõrguse määrab heli võnkesagedus, määrab valguse värvuse valguse võnkesagedus.

$$\lambda = \frac{v}{\nu}$$

Looduses, väljaspool meid, pole mingeid värve, vaid on ainult erineva lainepikkusega lained. Silm, see keerukas optikariist, suudab eristada õige väikest (umbes 10^{-6}) lainepikkuse erinevust. Huvitav on märkida, et paljud loomad ei erista värve, vaid ainult valgustugevust ja nad näevad alati must-valget pilti nagu meie tavalist must-valget filmi.

Kui läätse ja klaasplaadi vaheline õhupilu täita veega või mõne muu läbi-
paistva ainega, mille murdamisnäitaja on n , siis rõngaste raadiused vähenevad.

Põhjendada võib seda järgmiselt. Me teame, et vaakumist mingisse keskkonda üleminekul muutub valguse kiirus n korda. Kuna $v = \lambda\nu$, peab seejuures muutuma ka sagedus või lainepikkus n korda. Rõngaste raadius sõltub aga lainepikkusest. Järelikult muutub valguse tungimisel mingisse keskkonda n korda just valguse lainepikkus, mitte aga sagedus.



A. J. Fresnel

Young selgitas õhukeste kelmete värvust, lähtudes interferentsi ideest. Et täielikult veenda kõiki teooria õigsuses, on tähtis mitte ainult vaadeldavate nähtuste selgitamine, vaid antud teooria põhjal ka uute nähtuste ennustamine.

Selle ülesande lahendas kuuluis prantsuse teadlane Augustin Jean Fresnel, kes mõtles interferentsi jälgimiseks välja terve rea uusi katseadiseid.

Et lainete liitumisel tekkiv interferentsipilt oleks püsiv, peavad lained olema koherentsed, s. t. ühesuguse lainepikkuse ja konstantse faaside vahega.

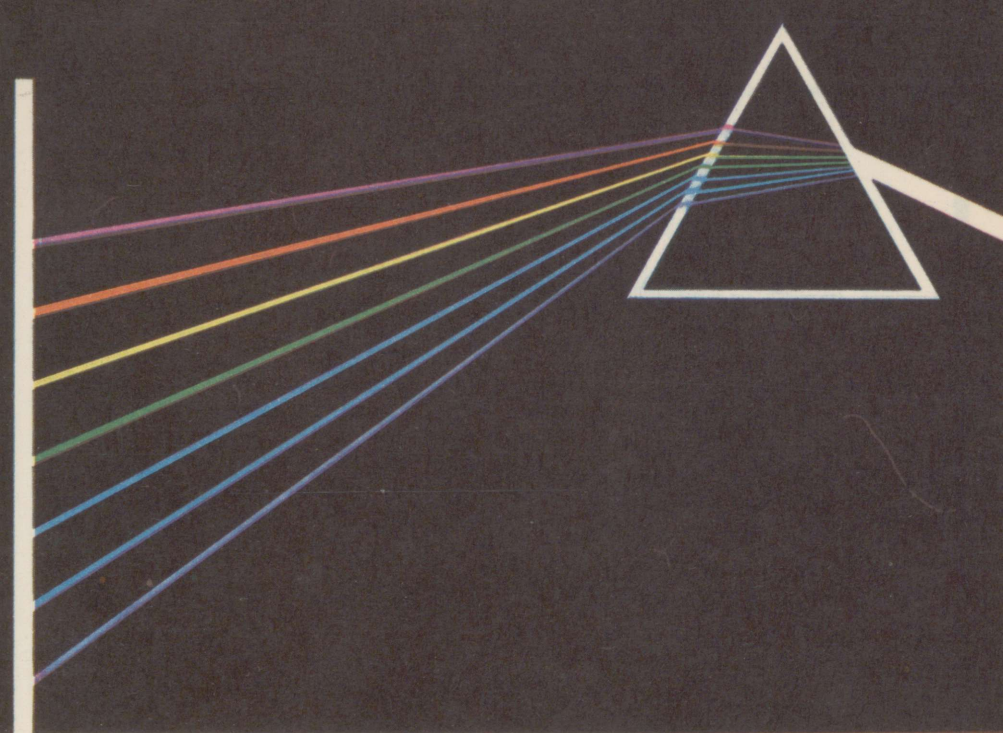
Ühesuguse, täpsemalt, õige lähedase lainepikkusega laineid võib saada kahest erinevast valgusallikast valgusfiltrite kasutamisel. Tegelikult aga selgus, et erinevate sõltumatute valgusallikate poolt kiiratud valguslainete faaside vahet ei saa hoida konstantsena.

Koherentsete valgusallikate saamiseks tegutses Fresnel lihtsalt ja teravmeelselt: ta lahutas ühest valgusallikast kiirgunud valguse kaheks kimbuks ja sundides viimaseid läbima erinevaid teepikkusi, juhtis valguskiirte kimbud uuesti kokku. On täiesti selge, et mõlemad lained on koherentsed. Fresneli ideel põhinevaid koherentsete lainete tekitamise viise on palju.

Meie peatume viisil, kus kasutatakse nõndanimetatud **Fresneli biprismat**. Biprisma koosneb kahest väikeste murdvate nurkadega prismast, mis on kokku pandud vastavalt joonisele 115. Valgus langeb valgusallikast S biprisma ülemistele (joonise järgi ülemistele) tahkudele ja pärast prismas murdumist tekib kaks valguskiirte kimpu.

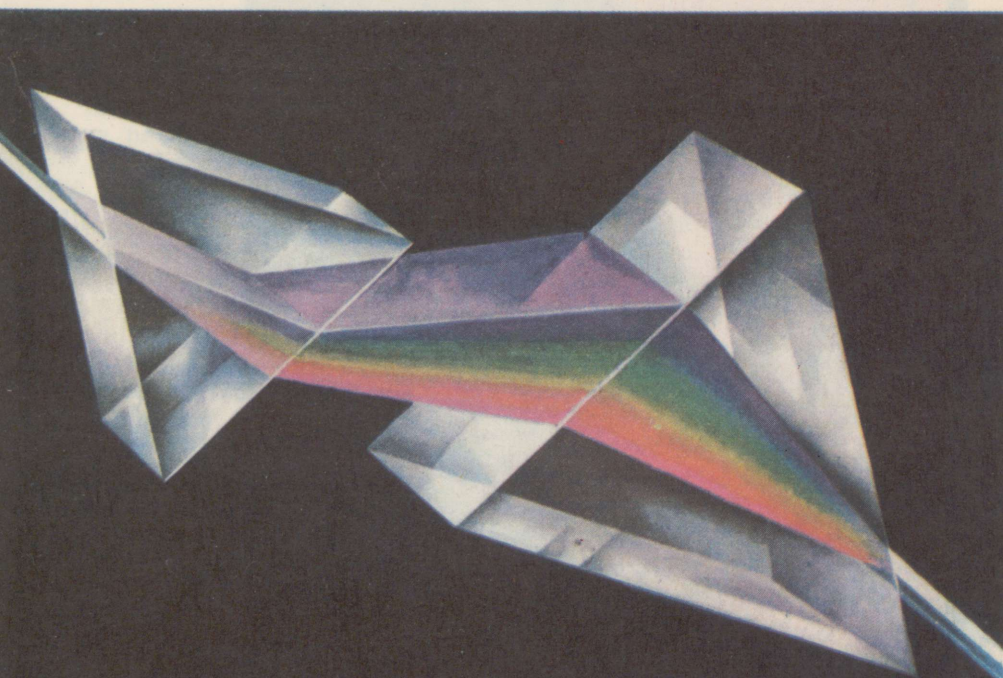
Parem- ja vasakpoolses prismas murdunud kiirte pikendused lõikuvad punktides S_1 ja S_2 , mis on valgusallika S ebakujutisteks. Mõlema kiirtekimbu lained on koherentsed, sest neid kiirgab üks ja sama valgusallikas.

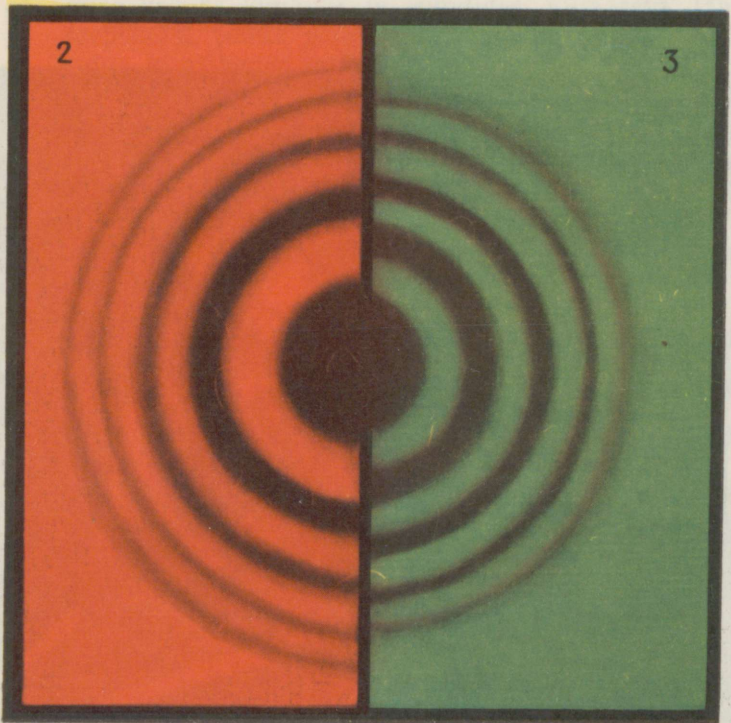
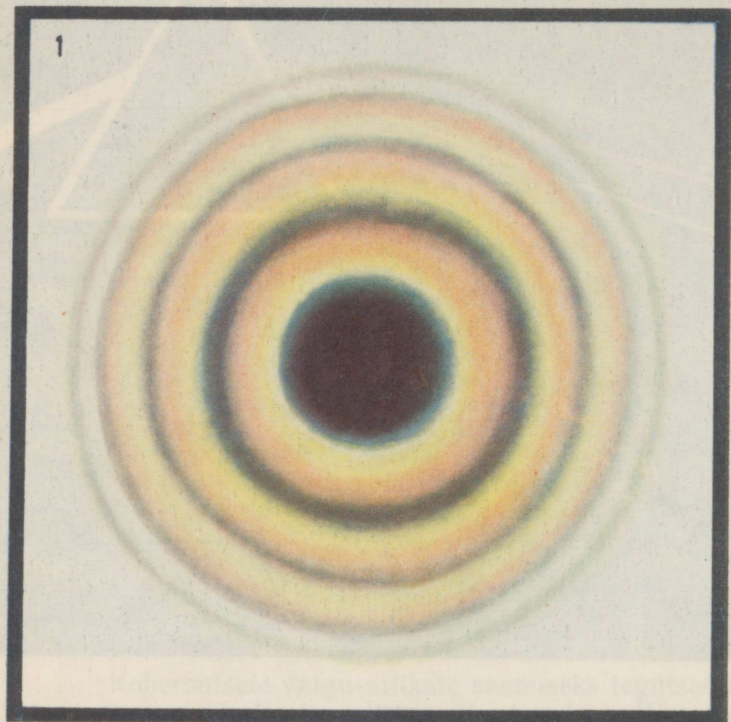
Mõlemad kiirtekimbud liituvad ja tekib interferentsipilt. Lained liituvad nii, nagu kiirgaksid valguslaineid koherentsed valgusallikad S_1 ja S_2 . Kui panna biprisma taha ükskõik millisesse kohta ekraan, tekivad ekraanil vaheldumisi heledad ja tumedad ribad. Kui valgusallikatest S_1 ja S_2 kiirgunud valguslainete käiguvahe ekraani mingis punktis võrdub täisarvu poollainepikkusega, siis valgus selles punktis tugevneb, kui käiguvahe võrdub paaritu arvu



Joon. I. Valge valguse lahutamine spektriks prisma abil.

Joon. II. Valge valguse lahutamine spektriks ja spektrivärvuste liitmine prisma abil.



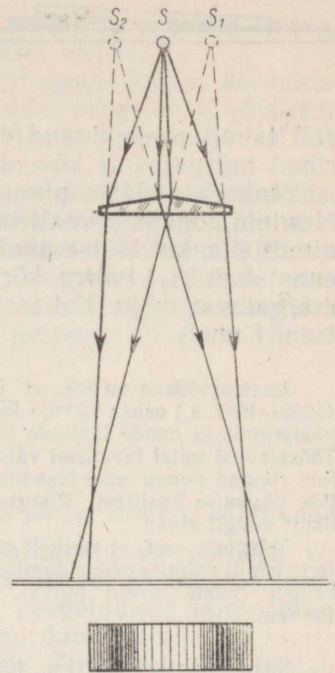


Joon. III. Newtoni
rõngad peegeldu-
nud valguses:
1. Valges valguses.
2. Punases valguses.
3. Rohelises valgu-
ses.

poollainepikkusega, siis pole see ekraani punkt valgustatud (lained kustutavad teineteise).

Põhimõtteliselt toimub kõik täpselt samuti nagu kahe koherentse valgusallika poolt tekitatud veelaine interfereerumisel. Interferentsipildi keskel on näha valge riba. Kui valgusallikas kiirgab monokromaatilist valgust, saab kahe tumeda või heleda naaberriba kauguse kaudu leida valguslaine pikkuse. Lainepikkuse leidmiseks on vaja teada biprisma murdva nurga suurust, prisma aine murdumisnäitajat, biprisma kaugust valgusallikast S ja ekraanist. Biprisma valgustamisel valge valgusega on keskmine maksimum valge, teised maksimumid aga vikerkaarevärvilised.

Seda, et kirjeldatud katses on tegemist just interferentsiga, saab lihtsalt ja piltlikult tõestada järgmiselt: kui katta biprisma üks pool läbipaistmatu ekraaniga kinni, siis interferentsipilt kaob, sest lainete liitumist ei teki.



Joon. 115

54. INTERFERENTSI KASUTAMINE

Interferents on suure praktilise tähtsusega ja teda kasutatakse väga palju.

On olemas spetsiaalsed aparaadid — **interferomeetrid**, mille töö põhineb interferentsinähtusel. Interferomeetrite ülesanne võib olla mitmesugune: valguse lainepikkuse täpne mõõtmine, gaaside murdumisnäitaja määramine jt. On olemas ka eriülesandelisi interferomeetreid. Ühest neist, mille Michelson konstrueeris valguse kiiruse väikeste muutuste fikseerimiseks, räägitakse peatükis «Relatiivsusteooria alused».

Meie peatume ainult kahel interferentsi rakendusosal.

Pindade töötlemise kvaliteedi kontrollimine. Interferentsi abil saab hinnata toote pinna lihvimise kvaliteeti täpsusega kuni $\frac{1}{10}$ valguse lainepikkust, s. t. kuni 10^{-6} cm. Pinna sileduse kontrollimiseks tuleb toote pinna ja väga sileda etaloonplaadi vahele tekitada õhuke õhukiht (joon. 116), sest siis on kontrollitava pinna üle 10^{-6} cm suurustelt pinnakonarustelt ja etaloonplaadi alumi-

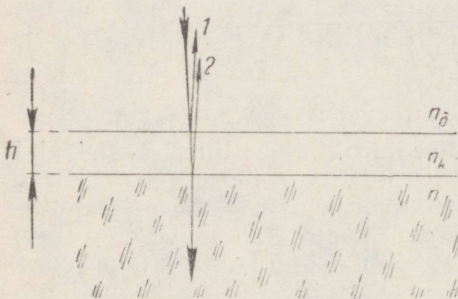
selt tahult peegeldunud valguse liitumisel tekkivad interferentsi-ribad märgatavalt kõverdunud.

Muuseas, läätse pinna lihvimise kvaliteeti saab kontrollida Newtoni rõngaste vaatlemisega. Rõngad on täiesti ringikujulised ainult siis, kui läätse pind on rangelt sfääriline. Iga sfäärilisusest enam kui $\frac{1}{10} \lambda$ võrra kõrvalekaldumine avaldab rõngaste kujule märgatavat mõju. Kohas, kus läätsel on muhk, painduvad rõngad tsentri poole.

Imestusväärne on see, et itaalia füüsik Evangelista Torricelli (1608—1647. a.) oskas lihvida läätsi täpsusega kuni 10^{-6} cm. Tema läätsi hoitakse muuseumis ja nende läätsede kvaliteeti on kontrollitud kaasaegsete meetoditega. Töösaladusi tollal tavaliselt välja ei räägitud. Arvatavasti avastas Torricelli Newtoni rõngad ammu enne Newtonit ja taipas, et nende rõngaste abil saab kontrollida lihvimise kvaliteeti. Rõngaste tekkimise põhjustest polnud Torricellil loomulikult mingit aimu.

Märgime veel, et rangelt monokromaatilise valguse kasutamisel tekib interferentsipilt valguse peegeldumisel ka neilt pindadelt, mis on teineteisest küllalt kaugel (mõne meetri piires). See võimaldab mõõta kaugusi täpsusega kuni 10^{-6} cm.

Selgendatud optika. Kaasaegsete fotoaparaatide ja kinoprojektorite objektiiivid, allveelaevade periskoobid ja muud optikariistad koosnevad suurest arvust optilistest klaasidest — läätsedest, prismadest jm. Valgus peegeldub nendest optikariistadest läbiminekul paljudelt pindadelt. Peegeldavaid pindu on fotoobjektiivides üle kümne, allveelaevade periskoopides aga kuni 40. Kui valgus langeb optilise klaasi pinnale risti, peegeldub igalt pinnalt 5—9% pinnale langevast energiast. Seepärast läbib optikariista sageli ainult 10—20% riistale langenud valgusest, mistõttu tekkinud kujutis on väikese valgustatuse ja ka halva kvaliteediga. Pärast mitmekordset sisepindadelt peegeldumist osa kiiri küll



Joon. 117

läbib optikariista, kuid need kiired on hajuvad ja ei tekita teravat kujutist. Fotodel näiteks tekib sel põhjusel «loor».

Optiliste klaaside pindadelt soovimatu peegeldumise kõrvaldamiseks tuleb vähendada optiliste klaaside peegelduskoefitsienti, sest siis annab optikariist teravam, «läbipaistvama» kujutise. Siit tulenebki termin **optika selgendamine**.

Optiliste klaaside selgendamine põhineb interferentsil. Optilise klaasi, näiteks läätse pinnale kantakse õhukene kelme, mille murdumisnäitaja n_h on klaasi murdumisnäitajast n väiksem. Lihtsuse mõttes vaatleme juhtu, kus kiired langevad kelmele risti (joon. 117). Tingimus, mille korral kelme ülemiselt ja alumiselt pinnalt peegeldunud lained kustutavad üksteist, on (kelme minimaalse paksuse korral) järgmine:

$$2h = \frac{\lambda}{2n_h}, \quad (3.5)$$

kus $\frac{\lambda}{n_h}$ on valguse lainepikkus kelmes ja $2h$ on lainete käiguvahe.

Kui mõlema peegeldunud laine amplituudid on võrdsed või väga lähedased, kustub valgus täielikult. Seepärast kasutataksegi sobiva murdumisnäitajaga kelmet, sest peegeldunud laine intensiivsus sõltub piirnevate keskkondade murdumisnäitajatest.

Tavaliselt langeb läätsele valge valgus. Tingimus (3.5) näitab, et kelme vajalik paksus sõltub lainepikkusest, mistõttu kõigi peegeldunud lainete kustutamine pole võimalik. Kelme valitakse sellise paksusega, et valguse langemisel kelmele risti kustuvad täielikult spektri keskmised lainepikkused (roheline valgus $\lambda_r = 5,5 \cdot 10^{-5}$ cm). Kelme paksus peab olema neljandik lainepikkust kelmes¹:

$$h = \frac{\lambda_r}{4n_h}.$$

Spektri äärte, punase ja violetse valguse peegeldumine nõrgeb tühiselt vähe. Selgendatud klaasidega objektiiv paistabki seepärast peegeldunud valguses sinakana. Tänapäeval tehakse isegi lihtsate fotoaparaatide objektiivid selgendatud klaasist.

Lõpetuseks rõhutame, et valguse kustutamine valguse poolt ei tähenda valgusenergia muundumist mingiks teiseks energialiigiks. Samuti nagu mehhaaniliste lainete interferentsil, tähendab ka valguslainete üksteise kustutamine antud ruumiosas seda, et sellesse ruumiosas valgusenergiat lihtsalt ei kandu. Peegeldunud lainete kustumine tähendab järelikult seda, et valgusenergia ei peegeldu, vaid läbib objektiivi täielikult.

¹ Praktikaks kantakse optilisele klaasile kelme, mille paksus on täisarvkorde lainepikkuse võrra suurem.

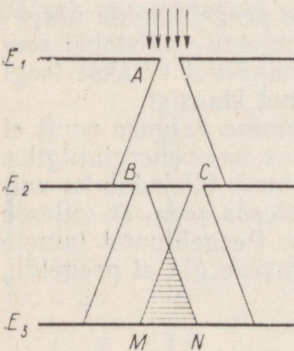
Kui valgus on tõepoolest laineprotsess, mida interferents veenvalt kinnitab, siis peab esinema ka valguse difraktsioon. Difraktsioon — lainete paindumine tõkete taha — on omane mistahes lainelisele liikumisele. Ent valguse difraktsiooni on raske jälgida, sest valguslained painduvad märgatavalt ainult nende tõkete taha, mille mõõtmed on valguslainete pikkusega võrreldavad. Valguse lainepikkus on aga väga väike.

Valguse difraktsiooni jälgis esmakordselt itaalia teadlane Francesco Maria Grimaldi XVII sajandi keskel. Grimaldi pani kitsasse kiirtekimpu mitmesuguseid esemeid, sealhulgas ka väga peenikesi niite. Viimased tekitasid ekraanile laiema varju, kui see geomeetrilise optika seaduste järgi oleks pidanud olema. Peale selle tekkisid mõlemale poole varju värvilised ribad. Lastes kitsa valguskiirte kimbu väikesest avast läbi, märkas Grimaldi jällegi valguse sirgjoonelise levimise seadusest kõrvalekaldumist. Valge laik ava vastas oli suurem, kui võis valguse sirgjoonelise levimise seadusest järeldada.

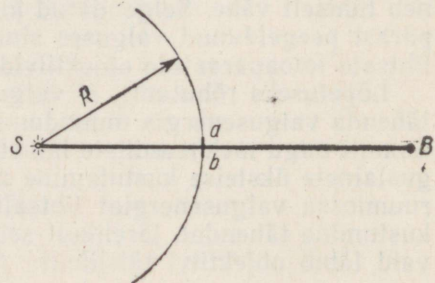
Neid katseid võib korrata igauks, kuid nad nõuavad väga hoolikat ettevalmistust.

Difraktsiooni katseid tegi ka Newton. Kui Grimaldi tõlgendas oma katseid õigesti, s. t. kui järeldust valguse lainelisest olemusest (Grimaldi võttis esimesena kasutusele ka termini «difraktsioon»), siis Newton selgitas neid valgusosakeste tõmbumisega valguse ees oleva tõkke äärte poole.

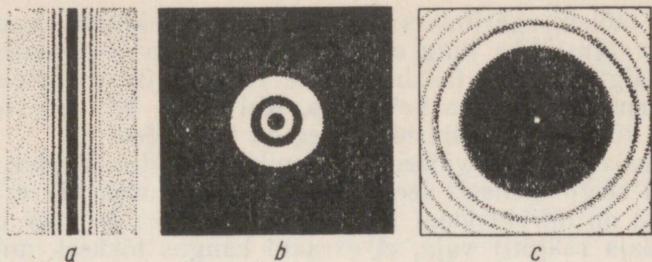
Valguse interferentsi avastaja Young tegi 1802. a. klassikalise difraktsiooni katse. Young tegi nõõpnõelaga ekraani E_2 teineteise lähedale kaks auku, mida valgustati läbi ekraanis E_1 oleva väikese augu tungiva kitsa valguskiirte kimbuga (joon. 118). Difraktsiooni tõttu väljub aukudest B ja C kaks valguskiirte koonust, mis



Joon. 118



Joon. 119



Joon. 120

osaliselt kattuvad. Valguslainete interferentsi tõttu tekivad ekraanil E_3 samasugused vahelduvad heledad ja tumedad ribad nagu Fresneli biprisma katseski. Youngi katses esinevad koherentsete valgusallikadena augud ekraanis ja valguskiirte kimp laieneb difraktsiooni tõttu. Kattes ühe augu ekraanis kinni, nägi Young, et interferentsiribad kadusid. Just nimelt selle katse abil mõõtis Young esmakordselt erinevat värvi valguskiirte lainepikkust, kusjuures ta tegi seda küllaltki täpselt.

Fresnel uuris katseliselt erinevaid difraktsioonijuhte väga üksikasjalikult ja lõi kvantitatiivse difraktsiooniteooria, mille abil saab põhimõtteliselt arvutada valguse difraktsioonipildi mistahes tõkke korral. Fresnel oli ka see, kes esimesena andis valguse sirgjoonelisele levimisele homogeenses keskkonnas täiesti arusaadava selgituse lähtudes laineteooriast.

Fresnel saavutas edu sellega, et ta ühendas Huygensi printsiibi elementaarlainete interfereerimise ideega. Sellest ideest oli lühidalt juttu juba helilainete juures. Fresneli järgi tuleb mistahes ruumpunktis asuva valguslaine amplituudi arvutamiseks vaadata elementaarlainete interfereerumist, kusjuures need elementaarlainete allikad paiknevad valgusallikat ümbritseval suvalisel pinnal.

Fresneli poolt tehtud arvutused aitasid mõista, mil viisil levib valguspunktist S kiirgunud valgus mistahes ruumpunkti B (joon. 119). Asetsegu elementaarlainete allikad kerapinnal, mille raadius on R , siis interfereeruvad neist allikaist kiirgunud elementaarlained punktis B selliselt, nagu kiirgaksid punkti B valgust ainult väikesel kera segmendil ab asuvad elementaarlainete allikad. Ülejäänud kerapinnal asuvatest elementaarlainete allikaist kiirgunud lained kustutavad liitudes üksteise. Seepärast toimubki kõik nii, nagu leviks valgus piki sirget SB , s. t. sirgjooneliselt.

Fresnel uuris mitmesugustel tõketel toimuvat difraktsiooni ka kvantitatiivsest küljest. Huvitav lugu juhtus Prantsuse Teaduste Akadeemia koosolekul 1818. a. Üks koosolekust osavõttev teadlane juhtis tähelepanu sellele, et Fresneli teooriast järeldub fakt, mis

on terve mõistusega ilmses vastuolus. Teatud kindla avause suuruse ja valgusallika ning ekraani kauguse korral avausest peab heleda laigu keskele tekkima tume täpp, väikese läbipaistmatu ketta varju keskele aga hele täpp. Kui suur oli aga teadlaste imestus, kui katsed näitasid, et see on tõepoolest nii.

Valguslaine väga väikese lainepikkuse tõttu kaldub valgus levimisel sirgjoonelisest teest väga väikese nurga võrra kõrvale. Seepärast on difraktsiooni jälgimiseks (ka kõikidel neil juhtudel, millest äsja räägiti) vaja, et ekraani kaugus tõkkest, mille taha lained painduvad, oleks väga suur. Seepärast on difraktsiooni jälgimiseks vaja küllalt võimsaid valgusallikaid.

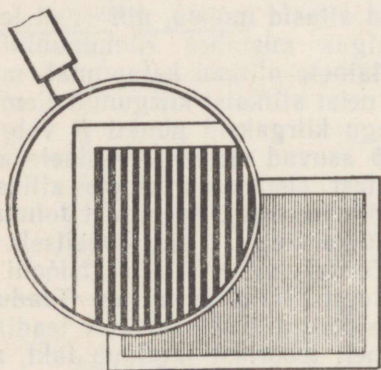
Joonisel 120 on toodud difraktsioonipildid mitmesugustel tõketel: a) peenike traat, b) ringikujuline ava, c) ringikujuline ekraan.

56. DIFRAKTSIOONIVÕRE

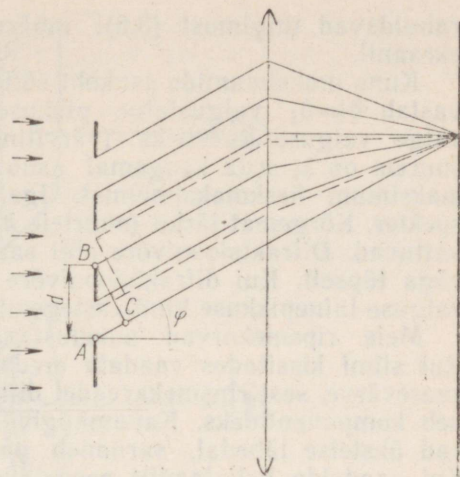
Difraktsiooninähtusel põhineb tähtsa optikariista — **difraktsioonivõre** ehitus. Difraktsioonivõre kujutab endast suurt arvu väga kitsaid, üksteisest läbipaistmatute tõketega eraldatud avasid (joon. 121). Hea difraktsioonivõre valmistatakse erilise masinaga, mis tõmbab klaasplaadile paralleelseid jooni. Joonte arv ulatub mõne tuhandeni 1 mm kohta, joonte koguarv aga üle 100 000. Oдав võred on hea võre želatiintõmmised, mis on tihedalt surutud kahe klaasplaadi vahele. Kõige paremate omadustega on niinimetatud **peegeldavad võred**, milles valgust peegeldavad ja hajutavad osad üksteisega vahelduvad. Valgust hajutavad jooned tõmmatakse lihvitud metallplaadile lõikenoaga.

Kui läbipaistvate avade (või peegeldavate ribade) laius on a , läbipaistmatute tõkete (või valgust hajutavate ribade) laius on aga b , siis nimetatakse suurust $d = a + b$ **difraktsioonivõre konstantiks**.

Difraktsioonivõre kui optikariista väärtust hinnatakse tema



Joon. 121



Joon. 122

abil saadava difraktsioonipildi iseloomu järgi. Uurime difraktsioonivõre elementaarteooria põhimomente. Langegu difraktsioonivõrele monokromaatiline valgus, mille lainepikkus on λ (joon. 122).

Avadest kui elementaarlainete allikaist tekkivad valguslained levivad kõikides suundades. Leiame tingimuse, mille korral avadest levivad lained tugevdavad üksteist. Vaatame lainet, mis levib nurgaga φ määratud suunas. Naaberavade servadelt kiirgunud lainete käiguvähe võrdub lõigu AC pikkusega. Kui sellele lõigule mahub täisarv poollainet, siis kõikidest avadest kiirgunud lained liitumisel tugevdavad üksteist. Kolmnurgast ABC saab leida kaateti AC :

$$AC = AB \sin \varphi = d \sin \varphi.$$

Maksimumid tekivad nende nurkade φ korral, mis rahuldavad tingimust:

$$d \sin \varphi = k\lambda, \quad (3.6)$$

kus $k=0, 1, 2, \dots$. Neid maksimume nimetatakse **peamaksimumideks**.

Tuleb pidada silmas, et kui tingimus (3.6) on täidetud, tugevdavad vastastikku üksteist mitte ainult avade alumistest (joonise järgi) punktidest, vaid avade kõikidest punktidest kiirguvad lained. Iga esimese ava punktile vastab punkt teises avas kaugusel d . Neist punktidest kiirgunud elementaarlainete käiguvähe on $k\lambda$ ja need lained tugevdavad teineteist.

Difraktsioonivõre taha pannakse koondav lääts ja selle fokaaltasandisse ekraan. Lääts koondab paralleelsed kiired ühte punkti, milles lained liituvad ja tugevdavad üksteist. Nurgad φ , mis

rahuldavad tingimust (3.6), määravad maksimumide asukohad ekraanil.

Kuna maksimumide asukoht sõltub (peale keskmaksimumi, mis vastab $k=0$) valguslaine pikkusest, lahutab difraktsioonivõre valge valguse spektri (värviline kleebis joon. IV, 1). Mida suurem on λ , seda kaugemal asub antud lainepikkusele vastav maksimum keskmaksimumist. Igale k väärtusele vastab oma spekter. Kõrgemat järku (suurtele k väärtusele vastavad) spektrid kattuvad. Difraktsioonivõre abil saab mõõta valguse lainepikkust väga täpselt. Kui difraktsioonivõre periood d on teada, taandub valguse lainepikkuse kindlakstegemine nurga φ mõõtmisele.

Meie ripsmekarvad moodustavad jämeda difraktsioonivõre. Kui silmi kissitades vaadata eredat valgusallikat, näeme vikerkaarevärve, sest ripsmekarvadel difrageerunud valge valgus laguneb komponentideks. Kauamängiv heliplaat, mille helivaod asuvad üksteise lähedal, sarnaneb peegeldava difraktsioonivõrega. Kui vaadelda heliplaadilt peegeldunud elektrivalgust, on näha mitu, erinevatele k väärtustele vastavat spektrijärku. Difraktsioonipilt on eriti selge siis, kui valgus langeb heliplaadile suure nurga all.

57. VALGUSLAINED KUI RISTLAINED. VALGUSE POLARISATSIION

Interferentsi- ja difraktsiooninähtused kinnitavad, et valgusel on lainelised omadused. Milliste lainete omadused valgusel on? Kas piki- või ristlainete omadused?

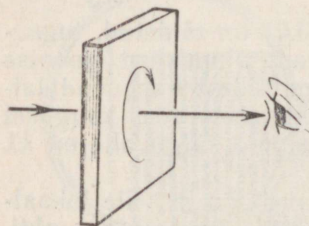
Laineoptika rajajad Young ja Fresnel pidasid pikka aega valgust, niisama nagu heligi, pikilaineteks. Tollal vaadati valgust ruumi täitvas ja kehade sisse tungivas eetris levivate elastsuslainetena. Ristlained saavad tekkida ainult tahketes kehades. Kuidas saavad aga kehad tahkes eetris takistuseta liikuda, sest eeter ei tohi kehade liikumist takistada. Kui eeter takistaks kehade liikumist, siis ei kehtiks inertsiseadus.

Aegapidi kogunes üha rohkem ja rohkem fakte, mida ei suudetud valguse pikilainelisusega selgitada. Nende faktide mõjul oli

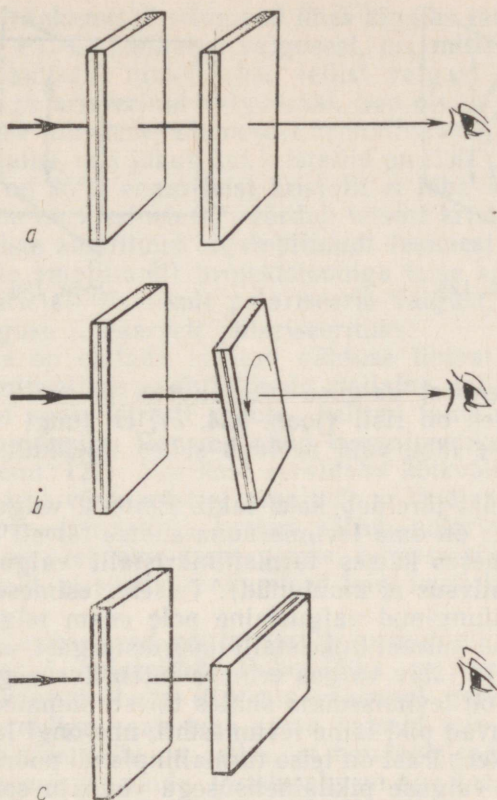
Fresnel lõppude lõpuks sunnitud tunnistama valguse ristlainelisust, kuigi see tundus mehhaanilise eetri kui valguslainete kandja teooria seisukohast väga imelikuna.

Valguse ristlainelisust tõestavad paljud katsed. Vaatame neist katsetest ainult ühte, väga lihtsat ja erakordselt efektset — katset roheka läbipaistva turmaliinikristalliga.

Turmaliinikristallil on sümmeetria-



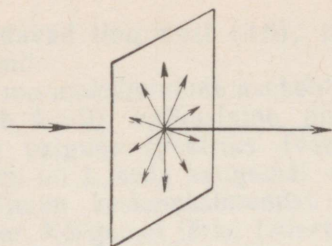
Joon. 123



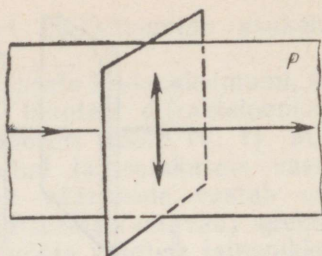
Joon. 124

telg ja ta on nõندانimetatud üheteljeline kristall. Võtame ristkülikukujulise turmaliinplaadi, mis on välja lõigatud nii, et plaadi üks külg ühtib kristalli teljega. Kui selliselt väljalõigatud turmaliinplaadile lasta elektrilambi või Päikese valguskiirte kimp risti plaadiga, siis plaadi pööramisel valguskiirte kimbu kui telje ümber (joon. 123) plaati läbiva valguse intensiivsus ei muutu. Võiks arvata, et valgus plaadis osaliselt neeldub ja omandab roheka värvuse. Nii see aga pole. Valguslaine omandab hoopis uued omadused.

Neid uusi omadusi saab avastada siis, kui lasta valguskiir läbi veel teisest samasugusest, esimesega paralleelsest turmaliinikristallist (joon. 124, a). Kui kristallide teljed on paralleelsed, ei juhtu ikkagi midagi huvitavat — neeldumise tõttu teises kristallis muutub valguskiirte kimp lihtsalt nõrgemaks. Jättes esimese turmaliinikristalli paigale ja hakates teist pöörama (joon. 124, b), ilmneb huvitav valguse kustumine. Kristallide telgede vahelise



Joon. 125



Joon. 126

nurga suurenemisel valguse intensiivsus pidevalt väheneb. Kui kristallide teljed on risti (joon. 124, c), ei tungi valgus teisest kristallist üldse läbi, vaid neeldub selles täielikult. Kuidas seda selgitada?

Neist katseist järeljub kaks fakti. Esiteks, valgusallikast lähtuv valguslaine on oma levimissuuna suhtes täiesti sümmeetriline (pöörates esimeses katses turmaliinikristalli valguskiire ümber, valguse intensiivsus ei muutunud). Teiseks, esimesest turmaliinikristallist läbitunginud valguslaine pole enam telgsümmeetriline (sõltuvalt teise turmaliinikristalli pöördenurgast esimese suhtes on teist kristalli läbiv valgus erineva intensiivsusega).

Pikilained on levimissuuna suhtes täiesti sümmeetrilised (võnkumised toimuvad piki laine levimissuuna, mis ongi laine sümmeetriateljeks) ja seepärast on teise turmaliiniplaadi pööramisega kaasnevad nähtused valguse pikilainelisusega võimatu selgitada.

Katses ilmnenu nähtust saab täielikult selgitada, kui teha kaks oletust.

Esimene oletus käib valguskiire enese kohta: **valgus on ristlaine**. Tavalisest valgusallikast lähtuvas valguskiires toimuvad võnkumised kõikvõimalikes suundades, mis on laine levimissuunaga risti (joon. 125).

Toodud oletuse järgi on valgus telgsümmeetriline ja samal ajal ka ristlainetus. Veepinna lainetel näiteks sellist sümmeetriat pole, sest veosakesed võnguvad ainult vertikaaltasandis.

Valguslainet, milles võnkumised toimuvad kõikvõimalikes, laine levimissuunaga ristuvates suundades, nimetatakse **loomulikuks valguslaine**ks. Selline nimetus on õigustatud, sest valgusallikad kiirgavad tavalistes tingimustes just selliseid laineid. Toodud oletus selgitab esimese katse tulemust. Turmaliinikristalli pööramine ei muuda kristalli läbiva valguse intensiivsust sellepärast, et kristallile langev valguslaine on (valguse ristlainelisusele vaatamata) telgsümmeetriline.

Teine vajalik oletus käib kristalli kohta. **Turmaliinikristall, mis on anisotroopne nagu kõik kristallid, laseb läbi valgus-**

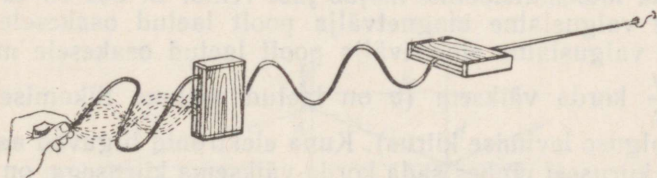
laineid, milles võnkumised toimuvad ühes kindlas tasandis (joonisel 126 tasand *P*). Loomulikust valgusest, nn. **mittepolariseeritud valgusest** eristamiseks nimetatakse sellist valgust **polariseeritud** või **lineaarselt polariseeritud valguseks**¹. See oletus selgitab täielikult teise katse tulemuse. Esimesest kristallist väljub lineaarselt polariseeritud laine, mis juhul, kui kristallid on risti (nende telgede vaheline nurk on 90°), enam teist kristalli ei läbi. Kui kristallide telgede vaheline nurk erineb 90° , võrdub teisest kristallist läbitunginud võnkumiste amplituud algamplituudi (esimest kristalli läbinud võnkumiste amplituudi) projektsiooniga teise kristalli teljele.

Turmaliinikristall järelikult polariseerib valgust, s. t. muudab loomuliku valguse lineaarselt polariseerituks.

Üpris kerge on ehitada uuritud nähtuse lihtsat mehhaanilist mudelit. Kummivoolikus saab tekitada ristlaine, mille võnkumiste suunda ruumis saab kiiresti muuta. Selline laine on loomuliku valguslaine analoogiks. Paneme nüüd kummivooliku kitsast puukastist läbi (joon. 127). See kast «eraldab» kõikvõimalikes suundades toimuvatest võnkumistest ainult ühes kindlas tasandis toimuvad võnkumised, mistõttu kastist väljub polariseeritud laine. Kui laine teel on veel teine samasugune, esimese suhtes 90° võrra pööratud puukast, ei suuda võnkumised teist kasti läbida ja laine kustub täielikult.

Valgust polariseerivad mitte ainult turmaliinikristallid, vaid kõik niinimetatud **polaroidid**. Polaroidiks on tselluloidile või klaasplaadile kantud õhuke (0,1 mm paksune) gerapatiidikristallide kiht. Polaroidiga saab teha samu katseid mis turmaliinikristalliga. Polaroidide eelis on selles, et nendega saab katta suuri valgust polariseerivaid pindu. Puuduseks on aga see, et polaroidid annavad valgele valgusele violetse värvitooni.

Juba ammu arutatakse polaroidide kasutamist autode laterna- ja tuuleklaasides, sest siis ei pimesta vastusõitvate autode tuled autojuhti. Pimestamise vältimiseks peavad polaroidid auto laternates ja tuuleklaasides laskma läbi horisondiga 45° nurga all toimuvaid valgusvõnkumisi. Sel juhul on vastutulevate autode later-



Joon. 127

¹ Täpsemad uuringud näitasid, et turmaliin laseb läbi valguslained, milles võnkumised toimuvad piki turmaliini sümmeetriatelge. Sümmeetriateljega risti toimuvad võnkumised neelduvad täielikult juba 1 mm paksuses turmaliinikristallis.

nast lähtuvad valgusvõnkumised risti selle tasandiga, milles polaroid laseb valgust läbi, ning valgus ei tungi tuuleklaasist läbi. Auto enda laternatest kiirgunud valgus aga läbib pärast teelt peegeldumist tuuleklaasi. Polaroidide kasutamisel on ainult siis mõtet, kui nad pannakse kõikidele autodele.

58. VALGUSLAINED KUI RISTLAINED JA ELEKTROMAGNETTEOORIA

Valguse ristlainelisus järeldub vahetult Maxwelli teooriast. Juba enne, kui Maxwell tegi järelduse elektromagnetlainete olemasolu kohta, oli valguslainete ristlainelisus eksperimentaalselt tõestatud. Sellepärast Maxwell pidaski elektromagnetlainete ristlainelisust üheks valguse elektromagnetiteooria õigsuse tähtsaimaks kinnituseks.

Valguse elektromagnetilise teooria tunnustamisega hajusid kõik hüpoteetilise eetri sissetoomisega seotud raskused. Valguslained pole erilises, kõikjale tungivas keskkonnas — eetris — levivad mehhaanilised lained, vaid on elektromagnetlained. Elektromagnetilised protsessid alluvad oma, mitte aga mehhaanika seadustele.

Vektorid \vec{E} ja \vec{B} on elektromagnetlained teineteisega risti (vt. I peatükk). Loomulikus valguses võnguvad elektrivälja vektor \vec{E} ja magnetilise induktsiooni vektor \vec{B} kõikvõimalikes, laine levimissuunaga ristuvates tasandites. Polariseeritud valguse korral võnguvad vektorid \vec{E} ja \vec{B} ainult kahes kindlas tasandis. Joonisel 6 on kujutatud polariseeritud elektromagnetlaine.

Kerkib täiesti loomulik küsimus: kui räägiti võnkumiste sihiti valguslained, siis missuguse vektori, kas \vec{E} või \vec{B} , võnkumist silmas peeti? Spetsiaalselt tehtud katsed näitasid, et silma võrkkestale ja ka fotoemulsioonile mõjub just vektor \vec{E} . See on ka loomulik, sest valguslaine magnetvälja poolt laetud osakesele mõjuv jõud on valguslaine elektrivälja poolt laetud osakesele mõjuvast jõust $\frac{v}{c}$ korda väiksem (v on laetud osakese liikumise kiirus, c aga valguse levimise kiirus). Kuna elektronid liiguvad aatomites valguse kiirusest umbes sada korda väiksema kiirusega, on elektrivälja poolt elektronidele mõjuv jõud magnetvälja poolt mõjuvast jõust palju suurem.

1. Kaksikkumerale läätsele, mille pindade kõverusraadiused $R_1=R_2=40$ cm, langeb läätse optilisel teljel, läätsest kaugusel $a=50$ cm asuvast valguspunkti valge valgus. Läätse ette, tihedalt vastu läätse on pandud valguskiirte kimbu ristlõiget piirav diafragma, mille avause diameeter $D=1$ cm. Nähtava valguse äärmiste kiirte murdumisnäitajad on $n_p=1,74$ (punastel kiirtel) ja $n_v=1,8$ (violetsetel kiirtel). Missugune pilt tekib läätsest kaugusel $l=50$ cm asuval ekraanil, kui ekraan on läätse optilise peateljega risti?

L a h e n d u s. Punaste kiirte puhul on läätse fookuskaugus

$$f_p = \frac{R}{2(n_p - 1)}; \quad f_p = \frac{40 \text{ cm}}{2(1,74 - 1)} \approx 27 \text{ cm.}$$

Violetsete kiirte puhul on läätse fookuskaugus

$$f_v = \frac{40 \text{ cm}}{2(1,8 - 1)} = 25 \text{ cm.}$$

Läätse valemi abil leiame, et punaste kiirte poolt tekitatud kujutis asub läätsest kaugusel

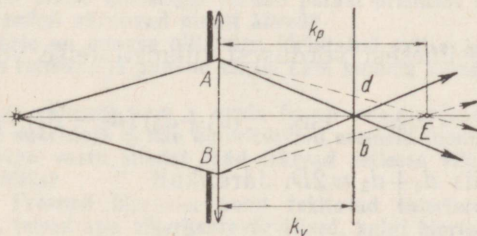
$$k_p = \frac{af_p}{a - f_p}; \quad k_p \approx \frac{50 \text{ cm} \cdot 27 \text{ cm}}{50 \text{ cm} - 27 \text{ cm}} \approx 58,7 \text{ cm.}$$

Violetsete kiirte poolt tekitatud kujutis asub läätsest kaugusel

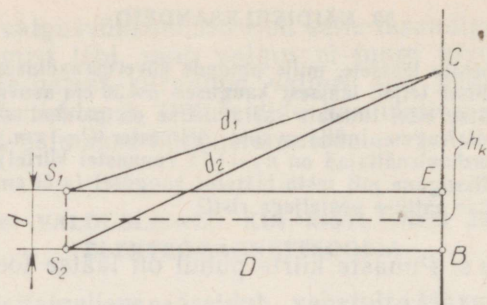
$$k_v = \frac{af_v}{a - f_v}; \quad k_v = \frac{50 \text{ cm} \cdot 25 \text{ cm}}{50 \text{ cm} - 25 \text{ cm}} = 50 \text{ cm.}$$

Ekraanil (joon. 128) tekib seega äärtest punaseks värvunud laigutaoline valgusallika kujutis. Laigu diameetri db saab leida sarnastest kolmnurkadest ABE ja dbE :

$$\frac{k_p - k_v}{k_p} = \frac{db}{AB},$$



Joon. 128



Joon. 129

millest

$$db = D \frac{k_p - k_v}{k_p}; \quad db \approx 1 \text{ cm} \frac{58,7 \text{ cm} - 50 \text{ cm}}{8,7 \text{ cm}} \approx 0,15 \text{ cm}.$$

2. Yuongi poolt tehtud difraktsioonikatses oli avauste vaheline kaugus $d = 0,07 \text{ mm}$ ja nende kaugus ekraanist $D = 2 \text{ m}$. Katseseade valgustamisel rohelise valgusega oli kahe heleda naaberriba vaheline kaugus $\Delta h = 16 \text{ mm}$. Leida nende andmete järgi rohelise valguse lainepikkus.

L a h e n d u s. Ekraani mingi punkti C valgustatus on maksimaalne, kui on täidetud tingimus

$$d_2 - d_1 \approx k\lambda,$$

kus k võrdub täisarvudega $k = 0, 1, 2, \dots$ (joon. 129).

Kasutame kolmnurkade S_1CE ja S_2CB jaoks Phytagorase teoreemi:

$$d_2^2 = D^2 + \left(h_k + \frac{d}{2} \right)^2,$$

$$d_1^2 = D^2 + \left(h_k - \frac{d}{2} \right)^2.$$

Lahutades esimesest võrdusest liikmeti teise võrduse, saame:

$$d_2^2 - d_1^2 = 2h_k d, \quad \text{ehk} \quad (d_1 + d_2)(d_2 - d_1) = 2h_k d.$$

Kuna $d \ll D$, siis $d_1 + d_2 \approx 2D$. Järelikult

$$d_2 - d_1 \approx \frac{h_k d}{D}.$$

Arvestades, et $d_2 - d_1 = k\lambda$, võime kirjutada:

$$k\lambda \approx \frac{h_h d}{D}.$$

Leiame k -nda heleda riba kauguse ekraani keskkohast:

$$h_h \approx \frac{k\lambda D}{d}.$$

Naaberribadevaheline kaugus

$$\Delta h = h_{h+1} - h_h \approx \frac{\lambda D}{d}.$$

Siit

$$\lambda \approx \frac{d\Delta h}{D}; \quad \lambda \approx \frac{7 \cdot 10^{-3} \text{ cm} \cdot 1,6 \text{ cm}}{200 \text{ cm}} = 5,6 \cdot 10^{-5} \text{ cm}.$$

3. Monokromaatiline tasalaine ($\lambda = 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}$) langeb difraktsioonivõrele, mille ühel millimeetril on 500 joont. Kui suur on kõrgeimat järku spekter, mida see difraktsioonivõre annab, kui kiired langevad võrele risti?

Lahendus. Maksimaalsele k -ndat järku spektrile vastab $\sin \varphi = 1$ (vt. valem 3.6). Järelikult

$$k = \frac{d}{\lambda}; \quad k = \frac{0,01 \text{ cm}}{500 \cdot 5 \cdot 10^{-5} \text{ cm}} = 4.$$

Harjutus 6

1. Miks ainult kitsas kiirtekimp tekitab pärast prismast läbiminekut spektri, kuna laial kiirtekimbul värvuvad ainult ääred?

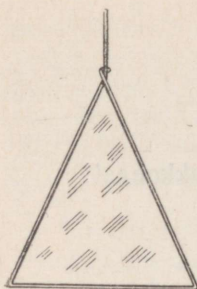
2. Vihiku lehele on punase pliitsiga kirjutatud «viis» ja roheline pliitsiga «neli». On olemas roheline ja punane klaas. Läbi kumma klaasi vaadates on näha «viis»?

3. Lainepikkus väheneb vees n korda (n on vee murdumisnäitaja). Kas see tähendab seda, et sukelduja ei näe ümbritsevaid esemeid loomulikus valguses?

4. Lüües kiviga vastu siledat jääd tekivad sellesse vikerkaarevärvides silerdavad mõrad. Miks?

5. Miks on Fresneli biprisma poolt tekitatud interferentsipildi keskmine maksimum valge, teised aga vikerkaarevärvilised, kuigi biprismat valgustati valge värvusega?

6. Kuidas saab kahe peegli abil tekitada interferentsipildi?



Joon. 130

7. Joonestage kolmnurkse raami sees asuvas seebikiles tekkivate interferentsiribade ligikaudne pilt. Raam seebikilega on vertikaalne (joon. 130).

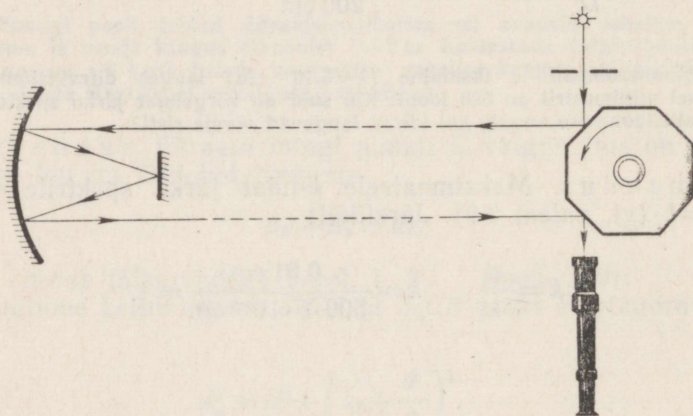
8. Miks Youngi katses (vt. joon. 118) ei teki interferentsi, kui valgus pole eelnevalt läbinud väikest avaust A ?

9. Ekraanis oleva avause suurendamisel võib valguse kiirtekimbu teljel väheneda. Kuidas seda saab energia jäävuse seadusega kooskõlastada, kuna avause suurendamisel ekraani taha tungiv koguvalgusvoog suureneb?

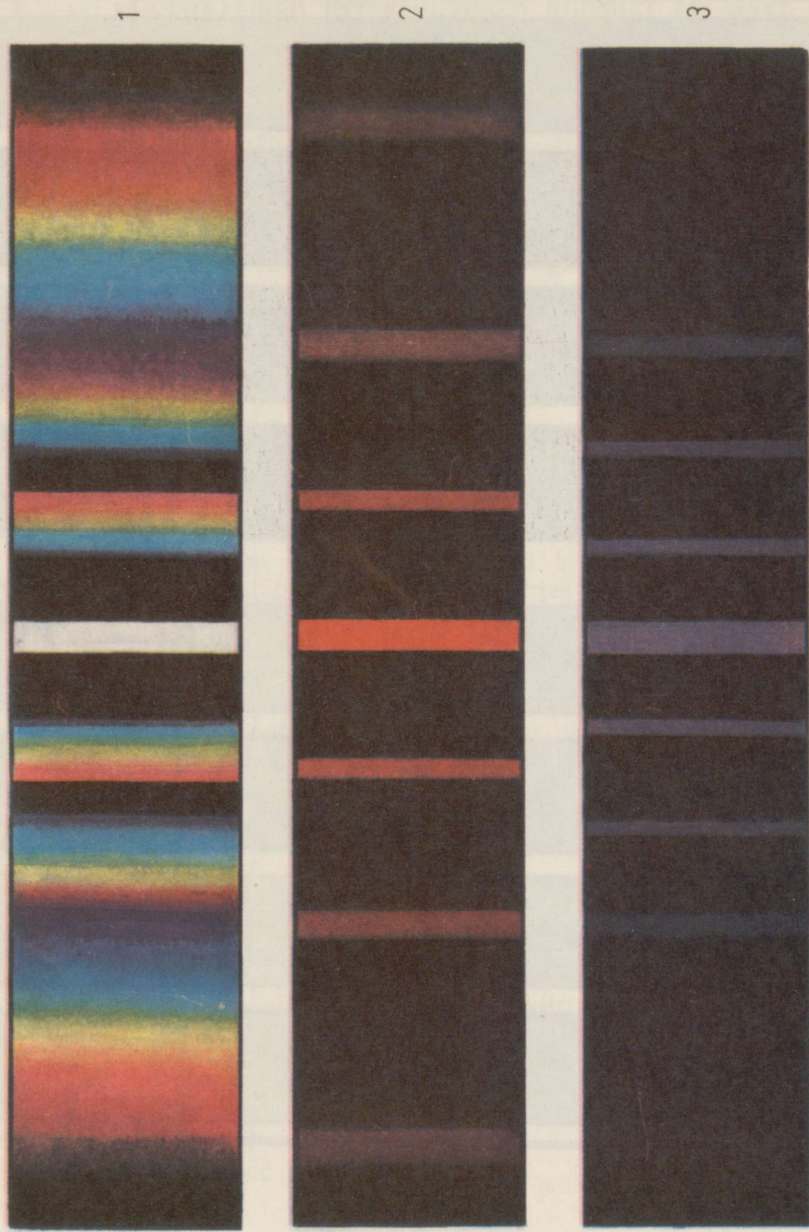
10. Joonisel 131 on kujutatud Michelsoni poolt valguse kiiruse määramisel kasutatud katseseadme skeem. Kui suur peab olema kaheksatahulise peegelprisma pöörde arv sekundis, et valgusallikas oleks pikksilmas pidevalt nähtav, kui valguskiir läbib umbes 71 km pikkuse vahemaa?

11. Teemantplaati valgustatakse violetse valgusega (võnkesagedus $\nu = 0,75 \cdot 10^{15} \text{ s}^{-1}$). Leida violetsete kiirte lainepikkused vaakumis ja teemandis, kui teemandi murdumisnäitaja violetsete kiirte jaoks on $n = 2,465$.

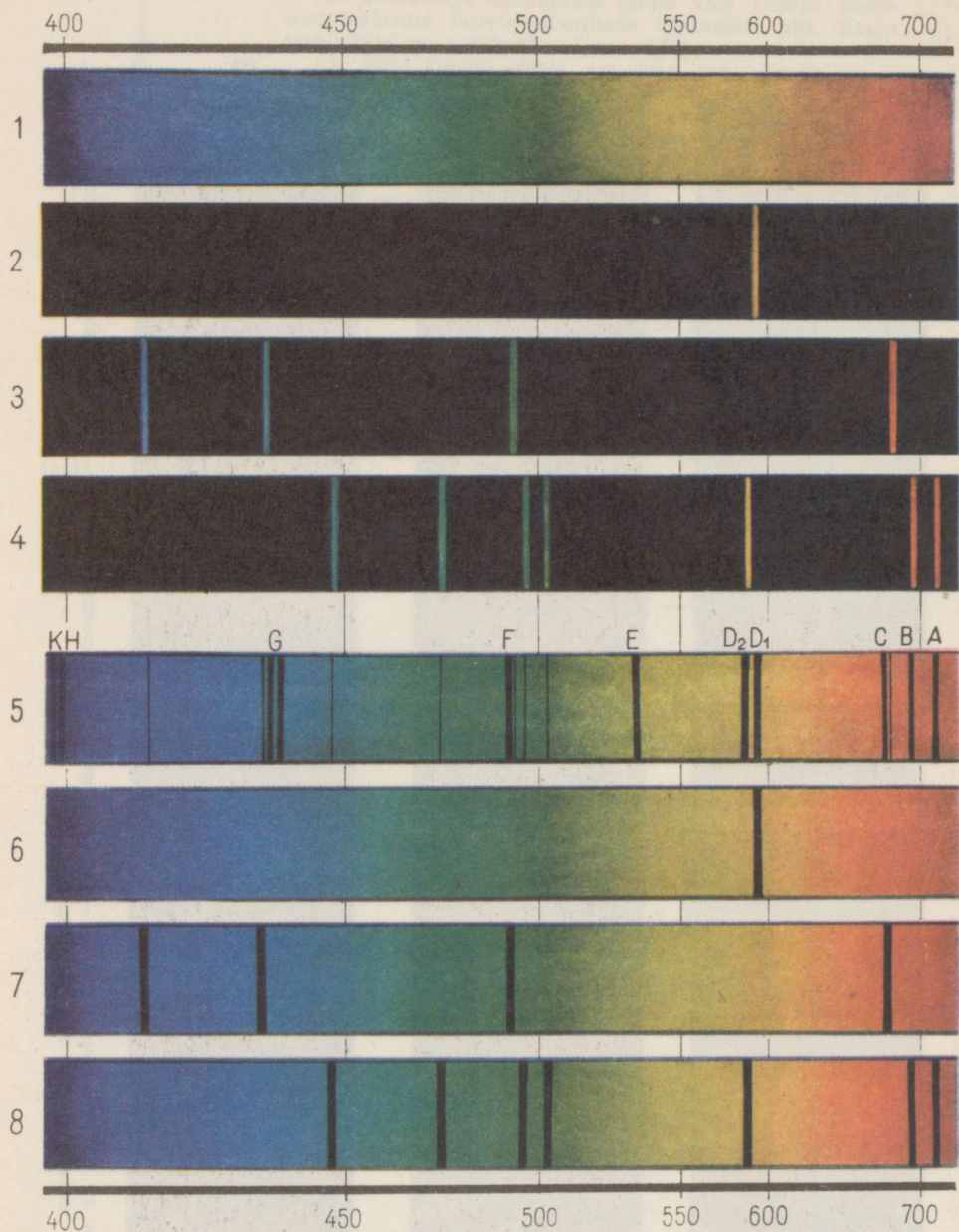
12. Difraktsioonivõrele, mille konstant $d = 4 \cdot 10^{-4} \text{ cm}$, langeb risti monokromaatiline lain. Kui suur on valguse lainepikkus λ , kui teist ja kolmandat järku spektrite vaheline nurk $\alpha = 2^\circ 30'$?



Joon. 131



Joon. IV. Difraktsioonispektrid: 1 — valge valguse difraktsioonispekter, 2 — punase valguse difraktsioonispekter, 3 — violetse valguse difraktsioonispekter.



Joon. V. Kiirgusspektrid: 1 — pidevspekter, 2 — naatriumi spekter, 3 — vesiniku spekter, 4 — heeliumi spekter. Neeldumisspektrid: 5 — Päikese spektri neeldumisjooned. 6 — naatriumi neeldumisspekter, 7 — vesiniku neeldumisspekter, 8 — heeliumi neeldumisspekter.

IV. RELATIIVSUSTEORIA ALUSED

60. KLASSIKALISED ETTEKIJUTUSED RUUMIST JA AJAST

Einsteini erirelatiivsusteooria on uus õpetus ruumist ja ajast, mis asus vanade (klassikaliste) ettekujutuste asemele.

Sajandeid vankumatuks peetud klassikaliste ettekujutuste kohaselt ei avalda liikumine aja kulgemisele mingit mõju (aeg on absoluutne) ja mistahes varda pikkus ei sõltu sellest, kas varras seisab paigal või liigub mingi kiirusega (pikkus on absoluutne).

Ruumi ja aja klassikaliste ettekujutuste kohaselt liituvad kiirused geometriliselt. Kui keha liigub mingi taustsüsteemi suhtes

kiirusega \vec{v}_1 , see taustsüsteem ise aga teise taustsüsteemi suhtes kiirusega \vec{v} , on keha kiirus teise taustsüsteemi suhtes

$$\vec{v}_2 = \vec{v}_1 + \vec{v}. \quad (4.1)$$

Kui reisija kõnnib vagunis rongi liikumise suunas vaguni suhtes kiirusega 5 km/h, rongi kiirus Maa suhtes on 40 km/h, siis on reisija kiirus Maa suhtes 45 km/h.

Kaugust ja aega mõõdetakse teatud kindlas taustsüsteemis. Nimelt selles taustsüsteemis, mille suhtes joonlaud või teised kauguse mõõtmise vahendid ning kellad seisavad paigal. Erilise tähtsusega on seejuures inertsiaalsüsteemid, s. t. taustsüsteemid, mille suhtes vaba keha (keha, millele ei mõju jõude) liigub ühtlaselt sirgjooneliselt (Newtoni esimene seadus). Päikesega ja liikumatute tähtedega seotud taustsüsteem on inertsiaalsüsteem. Newtoni mehhaanika seadused kehtivad ainult siis, kui liikumist vaadatakse inertsiaalsüsteemide suhtes.

Kui mingi taustsüsteem on inertsiaalne, siis on ka mistahes teine, esimese suhtes ühtlaselt sirgjooneliselt liikuv taustsüsteem samuti inertsiaalne.

Erinevates inertsiaalsüsteemides on ühe ja sama keha kiirus erinev. Keha kiirendus, erinevalt kiirusest, on aga kõikides inertsiaalsüsteemides ühesugune. Kui taustsüsteemid liiguvad teineteise suhtes ühtlaselt sirgjooneliselt kiirusega $\vec{v} = \text{const}$, siis

valemi (4.1) põhjal muutuvad kiirused \vec{v}_1 ja \vec{v}_2 väikeses ajavahe-
mikus ühesuguselt. Järelikult on ka kiirendused võrdsed:

$$\vec{a}_2 = \vec{a}_1. \quad (4.2)$$

Galilei püstitas esmakordselt relatiivsusprintsiiibi ammu enne seda, kui nägi päevavalgust Einsteini teooria.

Galilei relatiivsusprintsiiibi järgi kulgevad kõik mehhaanilised nähtused ühtede ja samade algtingimuste korral kõikides inertsiaalsüsteemides ühesuguselt. Teisiti öeldes tähendab see, et ühtlane sirglikumine ei mõjuta mehhaanilisi protsesse mitte millejagi. Näiteks, kiirusega 1000 km/h lendava reaktiivlennuki kabiinis kulgevad kõik protsessid täpselt samuti nagu siis, kui lennuk seisaks Maal. Lennuki suur kiirus pole lennuki sees üldse tajutav ja kõik esemed käituvad seal tavalisel viisil. Sellele vastavalt peavad ka Newtoni seadused, mis kirjeldavad mehhaanilist liikumist, olema kõikides inertsiaalsüsteemides ühesuguse kujuga. See tähendab, et Newtoni seadused, mis kirjeldavad liikumist ühes taustsüsteemis, ei muutu, kui kirjeldada liikumist mõnes teises taustsüsteemis.

Newtoni teine seadus, mehhaanika põhiseadus omab kuju:

$$\vec{m}\vec{a} = \vec{F}. \quad (4.3)$$

Mass on Newtoni mehhaanikas muutumatu suurus. Ühest inertsiaalsüsteemist teise üleminekul ei muutu ka kiirendus. Jääb tõestada, et ühest taustsüsteemist teise üleminekul jääb muutumatuks ka jõud.

Jõud mehhaanikas sõltub kas kaugusest (gravitatsiooni- ja elastsusjõud) või kehade suhtelise liikumise kiirusest (hõõrdejõud). Kehadevaheline kaugus on ruumi ja aja klassikalise ettekujutuse kohaselt kõikides taustsüsteemides ühesugune. Ühest taustsüsteemist teise üleminekul kehade kiirused küll muutuvad, kuid kehade suhtelised kiirused jäävad muutumatuks. Tõepoolest, kui kehade A ja B kiirused taustsüsteemis k_1 on \vec{v}_{1A} ja \vec{v}_{1B} , siis valemi (4.1) järgi on nende kehade kiirused taustsüsteemis k_2

$$\vec{v}_{2A} = \vec{v}_{1A} + \vec{v}, \quad \vec{v}_{2B} = \vec{v}_{1B} + \vec{v}. \quad (4.4)$$

Lahutades esimesest võrdusest liikmeti teise, saame:

$$\vec{v}_{2A} - \vec{v}_{2B} = (\vec{v}_{1A} + \vec{v}) - (\vec{v}_{1B} + \vec{v}) = \vec{v}_{1A} - \vec{v}_{1B}. \quad (4.5)$$

Niisiis, kehade A ja B suhteline kiirus on mõlemas taustsüsteemis üks ja sama.

Kuna jõud sõltuvad ainult kaugustest ja suhtelistest kiirustest, siis on nad kõikides inertsiaalsüsteemides ühesuurused. Seepärast mehhaanika põhiseadus (4.3) ühest taustsüsteemist teise üleminekul ei muutugi.

Pärast seda, kui Maxwell XIX sajandi teisel poolel sõnastas elektrodünaamika põhiseadused, kerkis küsimus, kas relatiivsuspriintiip laieneb ka elektromagnetilistele nähtustele. Teiste sõnades, kas ka elektromagnetilised protsessid (laengute ja voolude vastastikune mõju, elektromagnetilise induktsiooni nähtus, elektromagnetlainete levimine jne.) kulgevad kõikides inertsiaalsüsteemides ühesuguselt? Võib-olla ühtlane sirgliikumine, mis ei mõjuta mehhaanilisi nähtusi, avaldab mingit mõju elektromagnetilistele protsessidele?

Sellele küsimusele vastuse andmiseks oli tarvis selgitada, kas elektrodünaamika põhiseadused ühest inertsiaalsüsteemist teise üleminekul muutuvad või jäävad muutumatuteks nagu Newtoni seadused? Ainult viimasel juhul võib kõhkluseta väita, et relatiivsuspriintiip on rakendatav ka elektromagnetilistele nähtustele ja vaadata relatiivsuspriintiipi looduse üldise seadusena.

Elektrodünaamika seadused on keerulised ja sellepärast pole püstitatud ülesande lahendamine kerge asi. Näib aga, et juba lihtsate arutlustega saab leida õige vastuse. Elektrodünaamika seaduste põhjal on elektromagnetlainete levimise kiirus vaakumis kõikides suundades ühesugune ja võrdub $c = 3 \cdot 10^8$ m/s. Kiiruste liitmise seaduse (4.1) järgi saab elektromagnetlainete kiirus olla c ainult ühes valitud taustsüsteemis. Mistahes teises, valitud taustsüsteemi suhtes kiirusega \vec{u} liikuvast taustsüsteemis levib valgus kiirusega $\vec{c} + \vec{u}$. See tähendab, et ühest taustsüsteemist teise üleminekul elektrodünaamika seadused muutuvad. Õeldu on õige muidugi siis, kui kehtib kiiruste liitmise seadus, mis tuleneb ruumi ja aja klassikalisesest ettekujutusest.

Seea ilmnesid elektrodünaamika ja Newtoni mehhaanika vahel teatud vastuolud. Seejuures on viimase seadused relatiivsuspriintiibiga kooskõlas. Tekkinud raskustest võib põhimõtteliselt jagu saada kolmel erineval viisil.

Esimene võimalus seisib selles, et kuulutada relatiivsuspriintiibi rakendamine elektromagnetilistele nähtustele paikapidamatuks. Sellele seisukohale asus elektronteooria rajaja, hollandi füüsik Hendrik Antoon Lorentz. Juba Faraday eluajast peale vaadati elektromagnetilisi nähtusi kui erilises, kõikjaletungivas keskkonnas — «maailmaeetris» toimuvaid protsesse. Lorentzi järgi on eetri suhtes paigalseisev taustsüsteem eriline, eelistatud taustsüsteem. Selles taustsüsteemis kehtivad Maxwelli elektrodünaamika seadused ja nad on kõige lihtsama kujuga. Ainult niisuguses taustsüsteemis on valguse kiirus vaakumis kõigis suundades ühesugune.

Teiseks võimaluseks on lugeda kehtetuks Maxwelli võrrandid

ja püüda neid muuta nii, et nad ühest taustsüsteemist teise üleminekul (vastavalt ruumi ja aja klassikalisele ettekujutusele) ei muutuks. Sellise katse võttis ette H. Hertz, kelle arvates tõmbavad liikuvad kehad eetri täielikult kaasa ja seepärast kulgevadki eetris toimuvad elektromagnetilised nähtused ühtemoodi, sõltumata sellest, kas keha seisab paigal või liigub. Järelikult relatiivsuspriintiip kehtib.

Lõpuks, kolmas märgitud raskuste ületamise võimalus seisab ruumi ja aja klassikalise ettekujutusest loobumises eesmärgil, et säilitada nii relatiivsuspriintiip kui ka Maxwelli võrrandid. See on kõige revolutsioonilisem tee, sest ta tähendab loobumist kõige sügavamatest ja kõige põhilisematest füüsika ettekujutustest, mida palju sajandeid peeti täiesti endastmõistetavaiks. Sellest seisukohast osutuvad ebatäpseteks mitte elektromagnetvälja võrrandid, vaid kehade liikumise võrrandid Newtoni mehhaanikas, mis on kooskõlas vana ettekujutusega ruumist ja ajast. Muuta tuleb just mehhaanika seadusi, mitte aga Maxwelli võrrandeid.

Ainuõigeks osutus just nimelt kolmas võimalus, mida järjekindlalt edasi arendades lõi Einstein hoopis uue ettekujutuse ruumist ja ajast. Osutus, et eksperiment lükkab kaks esimest võimalust ümber.

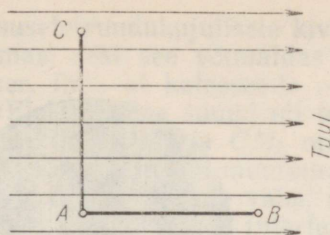
Hertzi püüdlused Maxwelli võrrandite muutmisel näitasid, et uute võrranditega pole võimalik selgitada paljusid jälgitavaid fakte. Näiteks, Hertzi teooria järgi peab liikuv vesi kiskuma endaga kaasa vees leviva valguse, sest vesi kisub kaasa eetri, milles valgus levib. Katse aga näitas, et tegelikkuses see pole nii.

Otsesed katsed lükkasid ümber ka Lorentzi seisukoha, mille aluseks oli absoluutselt paigalseisva maailmaeetriga seotud taustsüsteemi olemasolu.

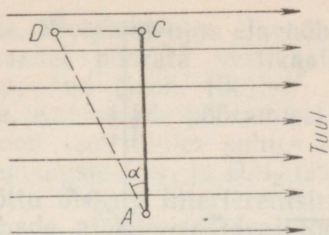
63. MICHELSONI-MORLEY' KATSE

Kui valguse kiirus oleks 300 000 km/s ainult eetriga seotud taustsüsteemis, siis, mõõtes valguse kiiruse suvalises taustsüsteemis, oleks võimalik avastada teise taustsüsteemi liikumist eetri suhtes ja määrata selle liikumise kiirus. Nii nagu õhu suhtes liikuvast taustsüsteemis tekib tuul, peab ka eetri (loomulikult, kui eeter on olemas) suhtes liikumisel tekkima «eetrituul», mida saab kindlaks teha. «Elektrituule» kindlakstegemise katse korraldasid 1887. aastal ameerika teadlased Albert Abraham Michelson ja Edward William Morley Maxwelli poolt 12 aastat varem väljendatud idee järgi.

Selle katse sisu saab mõistetavaks järgmise näite varal. Lennuk kurseerib linnast A linnadesse B ja C (joon. 132). Linnad B ja C asuvad linnast A kaugusel $l=300$ km. Lennutrass AB on lennutrassiga AC risti. Lennuki kiirus õhu suhtes $c=200$ km/h.



Joon. 132



Joon. 133

Puhugu suunas AB tuul kiirusega $v=10$ km/h. Küsitakse, kummal reisil, kas linnast A linna B ja tagasi või linnast A linna C ja tagasi, kulub rohkem aega.

Lennuaeg linnast A linna B ja tagasi on:

$$t_1 = \frac{l}{c+v} + \frac{l}{c-v}; \quad (4.6)$$

$$t_1 \approx 1,481 \text{ h.}$$

Lennul linnast A linna C peab lennuk hoidma kurssi mitte linnale C , vaid mingile vastu tuult asuvale punktile D (joon. 133). Lennuk katab õhu suhtes vahemaa AD ja õhuvool kannab lennukiit kauguse DC võrra. Nende kauguste suhe võrdub kiiruste suhtega:

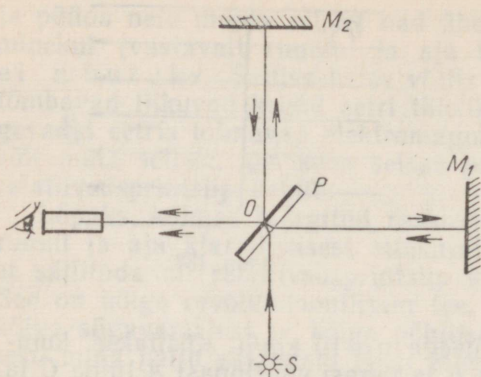
$$\frac{AD}{CD} = \frac{c}{v}.$$

Maa suhtes katab lennuk vahemaa AC . Siit võib leida, et lennuaeg linnast A linna C ja tagasi $t_2 \approx 1,473$ h.¹ On selge, et ajad on erinevad. Teades aegade vahet, kaugust AC ja kiirust c , saab leida tuule kiiruse Maa suhtes.

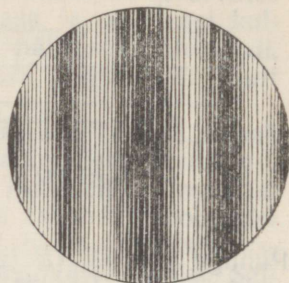
Michelsoni-Morley' katses oli lennuki osas valguslaine, mis liikus eetri suhtes kiirusega 300 000 km/s. (Mingeid kahtlusi eetri

¹ Kuna $\frac{AD}{DC} = \frac{c}{v}$, siis $\sin \alpha = \frac{v}{c}$ (vt. joon. 133). Kuid $AD = \frac{AC}{\cos \alpha} = \frac{AC}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$. Järelikult kulub selle vahemaa edasi-tagasi katmiseks kiiru-

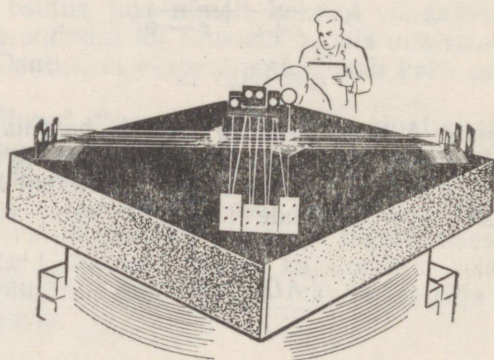
$$\text{sega } c \text{ aega } t_2 = \frac{2AC}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \frac{2AC}{\sqrt{c^2 - v^2}}; \quad t_2 \approx 1,473 \text{ h.}$$



Joon. 134



Joon. 135



Joon. 136

olemasolu kohta tollal polnud.) Tuule osas esines maakerast möödatuhisev eetriituul. Maakera ei saa eetri suhtes seista kogu aeg paigal, sest Maa tiirleb ümber Päikese kiirusega ca 30 km/s ja selle kiiruse suund muutub pidevalt. Linna A rollis esines poollähbipaistev plaat P (joon. 134), mis jagas valgusallikast S kiirgunud valgusvoo kaheks teineteisega ristiolevaks kiirtekimbuks. Linnad B ja C olid asendatud peeglitega M_1 ja M_2 .

Punktist O vasakule levides kiirtekimbud ühinesid ja lange-sid pikksilma objektiivi. Kiirtekimpude ühinemisel tekkis vahelduvatest heledatest ja tumedatest ribadest koosnev interferentsipilt (joon. 135). Interferentsiribade asukoht sõltus aegade vahest, mis kulus valgusel ühe ja teise teepikkuse läbimiseks.

Katseseade oli monteeritud 0,5 m küljepikkusega ja üle 30 cm

paksusele ruudukujulisele kiviplaadile. Kiviplaat ujus elavhõbedanumas, sest see võimaldas katseseadet pöörata vertikaaltelje ümber, ilma et katseseade oleks rappunud (joon. 136).

«Elektrituule» suund oli teadmata. Katseseade pööramisel pidi valguskiirte OM_1 ja OM_2 orientatsioon «eetrituule» suhtes muutuma. Järelikult pidi muutuma ka teepikkuste OM_1 ja OM_2 läbimiseks kuluvate aegade vahe, mille tõttu oleksid interferentsiribad piksilmas nihkunud. Interferentsiribade nihkumise järgi loodeti kindlaks teha «eetrituule» kiirus ja suund.

Teadlaste üllatuseks selgus katsest, et mingit interferentsiribade nihkumist katseseade pööramisel üldse ei tekkinud. Katseid tehti erinevatel kella- ja aastaegadel, kuid tulemus oli alati negatiivne, s. t. Maa liikumist eetri suhtes ei õnnestunud kindlaks teha. Viimased katsed olid nii täpsed, et nende abil võis teha kindlaks valguse levimiskiiruse muutust (interferomeetri pööramisel) isegi 2 m/s võrra.

Kõik see sarnanes sellega, et kui te pistaksite kiirusega 100 km/h kihutava auto aknast pea välja, siis te ei tunneks tuult.

Eelistatud taustsüsteemi olemasolu idee ei pidanud katselisele kontrollile vastu. See aga tähendas, et mingit erilist keskkonda, «valguseetrit», millega oleks saanud siduda taustsüsteemi, pole olemas.

64. RELATIIVSUSTEORIA POSTULAADID¹

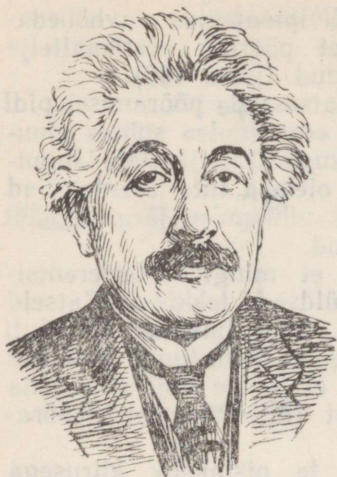
Michelsoni-Morley' ja teiste, eetri suhtes Maa liikumise avastamiseks tehtud katsete negatiivsete tulemuste selgitamiseks püstitati mitmeid hüpoteese (arvati, et selline taustsüstem on tege-likkuses ikkagi olemas). Michelsoni-Morley' katse selgitamiseks väideti näiteks, et kõikide, eetri suhtes kiirusega v liikuvate kehade

joonmõõtmed lühenevad $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-\frac{1}{2}}$ korda.

Hoopis teisiti lähenes probleemile Albert Einstein: kõikide inertsiaalsüsteemide erinevuste avastamise katsete negatiivsete tulemuste selgitamiseks pole vaja leiutada mitmesuguseid hüpoteese. Looduse seaduseks on kõikide inertsiaalsüsteemide võrdväarsus mitte ainult mehhaaniliste, vaid ka elektromagnetiliste protsesside suhtes.

Relatiivsusprintsip on Einsteini teooria põhiprintsiip ja teda võib sõnastada järgmiselt: looduses kulgevad kõik protsessid mistahes inertsiaalsüsteemis ühesuguselt. See tähendab, et füüsika-

¹ Postulaat mängib füüsikas samasugust rolli, nagu aksiom matemaatikas. Postulaat on põhiseisukoht, mida ei saa loogiliselt tõestada. Füüsikas on postulaat katseandmete üldistuse tulemus.



A. Einstein

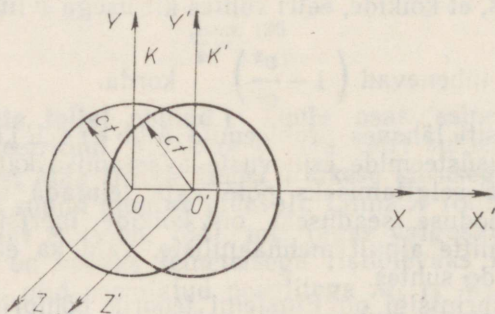
seadused on ühesuguse kujuga kõikides inertsiaalsüsteemides. Klassikalise mehhaanika relatiivsuspriintsiipi üldistatakse seega kõikidele, sealhulgas ka elektromagnetilistele protsessidele.

Relatiivsusteooria ei tugine üksnes relatiivsuspriintsiibile, vaid ka teisele postulaadile: valguse kiirus vaakumis ei sõltu valgusallika kiirusest ja on kõikides suundades ühesugune. Omaette pole see väide midagi ebaharilikku, sest ta väljendab lainelise liikumise üldist omadust ja järeldeb Maxwelli poolt loodud valguse elektromagnetteooriast. Helilainete kiirus õhu suhtes ei sõltu samuti heliallika liikumise kiirusest.

Inertsiaalsüsteemide võrdväärusest (esimene postulaat) järeldeb siiski ebatavaline fakt: valguse kiirus vaakumis on kõikides inertsiaalsüsteemides ühesugune.¹

Relatiivsusteooria postulaadid tunduvad esimesel pilgul väga lihtsaina ja katseandmetest loomulikult järelduvaina. Seda enam oli aga vaja suurt teaduslikku julgust, et neid sõnastada. Asi on selles, et need postulaadid on ilmses vastuolus senini vastuvaidlematult õigeks peetud klassikalise ettekujutusega ruumist ja ajast.

Tõepoolest, oletame, et momendil, mil teineteise suhtes kiiru-



Joon. 137

¹ Helikiiruse kohta see ei käi, sest helikiirus sõltub õhu liikumise kiirusest ja on seepärast erinevates taustsüsteemides isesugune.

sega v liikuvate inertsiaalsüsteemide K ja K' (joon. 137) alguspunktid langevad kokku, sähvatas inertsiaalsüsteemide alguspunktis valgus.

Aja t jooksul nihkuvad inertsiaalsüsteemid teineteise suhtes kauguse vt võrra ja kerakujulise valguslaine frondi raadius on ct . Süsteemid K ja K' on võrdväärised ning valguse kiirus on mõlemas süsteemis ühesugune. Järelikult asub lainefrondi kese süsteemis K asuva vaatleja seisukohast punktis O , süsteemis K' asuva vaatleja seisukohast aga punktis O' . Ühel ja samal kerakujulisel frondil ei saa aga olla kahte keset O ja O' . See relatiivsusteooria postulaatidel tuginev arutlus on terve mõistusega ilmses vastuolus. Vaat miks oli postulaate nende lihtsusele vaatamata raske välja öelda.

Vastuolu on siin tõesti olemas, kuid see pole relatiivsusteooria seesmine vastuolu, vaid vastuolu klassikalise ettekujutusega ruumist ja ajast. Suurte kiiruste korral aga pole need ettekujutused enam õiged.

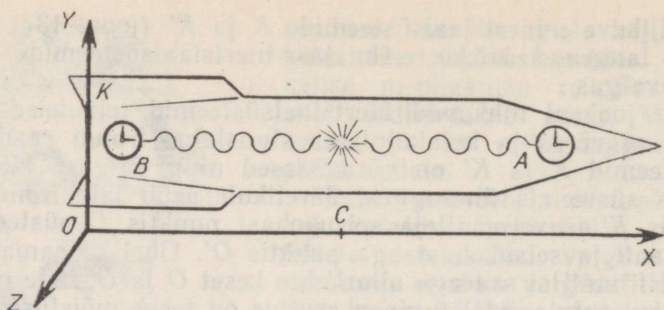
65. SAMAAEGSUSE RELATIIVSUS

Peamiseks põhjuseks, miks klassikaline ettekujutus ruumist ja ajast ei pea alati paika, on vastasmõju levimiskiiruse lõplikkus. See fakt viibki selleni, et ettekujutus absoluutsest ajast, mis kulgeb nüüd ja alati kindlas tempos ning ei sõltu üldse materiasst ja tema liikumisest, osutus vääraks.

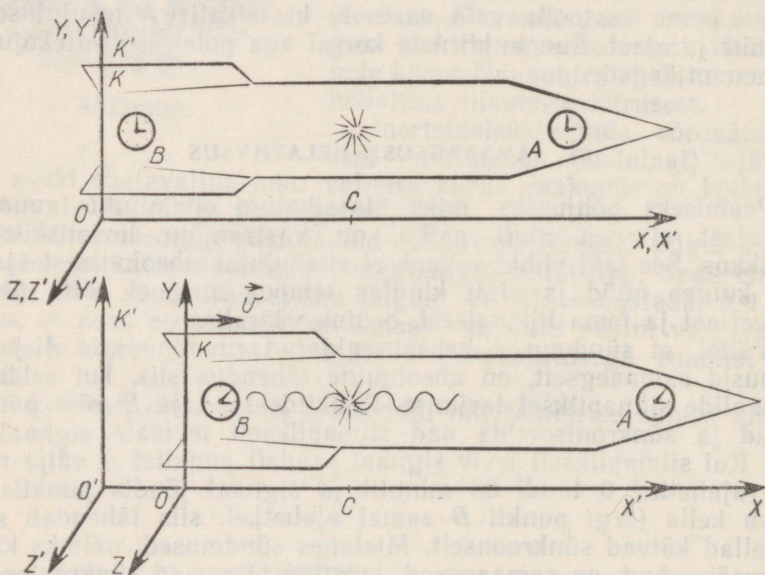
Väitel, et sündmused kahes eraldatud ruumipunktis A ja B toimusid samaaegselt, on absoluutne tähendus siis, kui eeldada signaalide silmapilkselt levimist. Punktidesse A ja B võib panna kellad ja sünkroniseerida nad silmapilkselt levivate signaalide abil. Kui silmapilkselt leviv signaal saadeti punktist A välja näiteks ajahetkel 0 tundi 05 minutit ja signaal jõudis punktis B asuva kella järgi punkti B samal ajahetkel, siis tähendab see, et kellad käivad sünkroonselt. Mistahes sündmused, näiteks kaks välgusähvatust, on samaaegsed, kui nad toimuvad sünkroniseeritud kellade ühesuguste näitude hetkel.

Kahe sündmuse samaaegsuse kindlakstegemise ülesanne maakera erinevates punktides kerkis üles seoses laeva asukoha geograafilise pikkuse määramisega merel. Nagu teada, tuleb geograafilise pikkuse määramiseks võrrelda kohalikku aega, mida määratakse Päikese järgi, nullmeridiaani (Greenwich'i) ajaga. Raadio leiutamiseni võeti sel eesmärgil laeva kaasa väga täpne kell (kronomeeter), mis seati enne merereisi nullmeridiaani ajale. Eeldati, et kella liikumine kella näitu ei mõjuta. Klassikalise ettekujutuse järgi peab see nii olema, kuid esialgu pole teada, kas see tõepoolest nii on.

Ainult siis, kui punktides A ja B asuvad sünkroniseeritud kellad, saab otsustada, kas kaks mingit sündmust toimusid punktides A ja B samaaegselt või mitte. Kuidas aga saab teineteisest



Joon. 138



Joon. 139 ja 140

teatud kaugusel asuvaid kelli sünkroniseerida siis, kui signaalid ei levi lõpmatult suure kiirusega?

Kellade sünkroniseerimisel kasutatakse loomulikult valgus- ehk üldiselt elektromagnetilisi signaale, sest nende kiirus vaakumis on rangelt kindel ja muutumatu.

Just seda moodust kasutatakse kellade kontrollimisel raadio järgi. Ajasignaali «pi, pi, pi» järgi saate oma kella täpse etalonkellaga sünkrooni viia. Teades radiojaama kaugust oma kodust, võib arvutada paranduse, mille tingis signaali hiline mine.

Vaatame üksikasjalikumalt lihtsat kellade sünkroniseerimise meetodit, mis ei nõua arvutuste tegemist. Oletame, et kosmonaut tahab teada, kas kosmoselaeva vastasotstes asuvad kellad A ja B (joon. 138) käivad sünkroonselt või mitte. Selleks tekitab kosmonaut täpselt kosmoselaeva keskel valgussähvatus, mis jõuab seega mõlema kellani üheaegselt. Kui kellade näidud on sel hetkel ühesugused, käivad kellad sünkroonselt.

Nii on see ainult kosmoselaevaga seotud taustsüsteemi K suhtes. Taustsüsteemis K' , mille suhtes kosmoselaev liigub, on olukord teistsugune. Kosmoselaeva ninas asuv kell A eemaldub valgusallikast ja punkti A jõudmiseks peab valgussignaali läbima pikema tee kui pool kosmoselaeva pikkust (joon. 139 ja 140). Laeva sabas asuv kell B läheneb valgusallikale ja valgussignaali punkti B jõudmise tee on lühem kui pool kosmoselaeva pikkust. Taustsüsteemis K' asuv vaatleja teebki seepärast järelduse, et signaalid ei jõua kelladeni samaaegselt ja järelikult ei käi kellad A ja B ühesuguselt. Sellepärast on punktides A ja B toimuvad sündmused taustsüsteemis K asuva vaatleja seisukohast samaaegsed, taustsüsteemis K' asuva vaatleja seisukohast aga mitte. Tegelikult on taustsüsteemid K ja K' relatiivsuspriintiibi järgi täiesti samaväärsed ja mitte kumbagi neist ei saa eelistada. Seepärast peamegi järeldama, et **ruumiliselt eraldatud sündmuste samaaegsus on relatiivne**. Nagu edaspidi näeme, on samaaegsuse relatiivsuse põhjuseks signaalide levimiskiiruse lõplikkus.

Eespool mainitud kerakujuliste valguslainete paradoksi lahendus peitubki just samaaegsuse relatiivsuses.

Keskpunkti O omava kera pinna punktideni jõuab valgus samaaegselt ainult süsteemi K suhtes paigalseisva vaatleja seisukohast. Süsteemiga K' seotud vaatleja seisukohast jõuab valgus kerapinna eri punktideni erinevatel ajamomentidel.

Arusaadavalt on õige ka vastupidine: süsteemis K jõuab valgus kera O' eri punktideni erinevatel ajahetkedel, mitte aga samaaegselt, nagu see paistab süsteemis K' asuvalle vaatlejale.

Õeldust on selge, et tegelikult pole mingit paradoksi olemas.

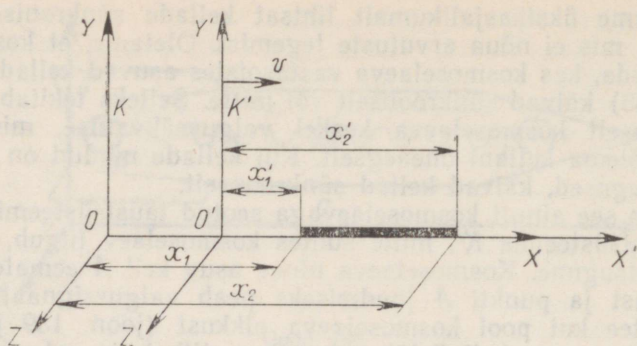
66. PIKKUSE RELATIIVSUS

Seisku kõva varras taustsüsteemi K suhtes kiirusega v liikuvast taustsüsteemis K' paigal (joon. 141). Kui varras asub X -teljel, siis on ta pikkus taustsüsteemis K'

$$l_0 = x'_2 - x'_1. \quad (4.7)$$

See on paigalseisva varda pikkus.

Pole aga sugugi selge, mida mõista liikuva varda pikkuse all, sest liikuvat varrast ei saa mõõta joonlauaga nagu saab mõõta paigalseisvat varrast.



Joon. 141

Liikuva varda pikkust on loomulik määratleda järgmiselt. Süsteemi K eksperimentaator määrab samaaegselt (oma kella järgi) varda otste asukohad oma taustsüsteemis. Varda pikkuseks süsteemis K (liikuva varda pikkuseks) on varda otste koordinaatide vahe

$$l = x_2 - x_1.$$

Varda pikkus l ei võrdu sel juhul varda pikkusega l_0 . Asi on selles, et vaateleja seisukohast, kelle suhtes varras pagal seisab, ei märgi süsteemis K asuv vaateleja varda otspunkte samaaegselt! Samaaegsus on ju suhteline ja see, mis on samaaegne ühes taustsüsteemis, on mittesamaaegne teises. Nagu arvutused näitavad, on liikuva varda pikkus l paigalseisva varda pikkusest l_0 väiksem:

$$l = l_0 \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}. \quad (4.9)$$

Suurus $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} < 1$, sest $\frac{v^2}{c^2} > 0$.

Pikkus pole absoluutne suurus, nagu arvati varem, vaid ta sõltub keha liikumise kiirusest antud taustsüsteemi suhtes. Absoluutne on ainult väide, et paigalseisev varras on liikuvast vardast pikem. Kui seesama varras on taustsüsteemis K paigal, siis on tema pikkus selles süsteemis l_0 , kuid süsteemi K' suhtes on varras valem (4.9) kohaselt lühem. Nii see relatiivsusprintsipi kohaselt olema peabki. Mõõtmete lühenemise imepäraseks omaduseks on mõlemapoolsus. Inglise astronoomi Arthur Stanley Eddingtoni sõnade järgi läheb pikkuse lühenemise vastuolu «terve mõistusega» kaugemale kui kirjanikul J. Swiftil. Lilliputid

paistsid Gulliverile kääbustena, Gulliver lilliputtidele aga hiiglasena. See on ka loomulik. Kas oleks aga võinud olla ka nii, et lilliputid näsid Gulliverile kääbustena, Gulliver aga kääbusena lilliputtidele? «Ei, hüüab Eddington, see on liiga totter isegi muinasjutus; selliseid asju võib leida ainult tõsisest teaduslikust tööst.»

Liikuva varda lühenemist pole praegu võimalik vahetu katsega kindlaks teha, sest lühenemine muutub märgatavaks ainult siis, kui varras liigub valguse kiirusele lähedase kiirusega. Selleks et kosmonaudi keha lennusuunaline mõõde lüheneks näiteks 100 korda, peab raketi kiirus olema kõigest 90 km/s võrra valguse kiirusest väiksem (299 702 km/s, kui valguse kiirus $c=299\,792$ km/s).¹ Praegu on raketile valguse kiirusele lähedast kiirust võimatu anda. Ainult elementaarosakesi võib kiirendada valguse kiirusele lähedaste kiirusteni, kuid elementaarosakeste mõõtmestest kui mingist täiesti kindlast asjast ei saa üldse juttu olla.

Pikkuse lühenemist liikumisel ei saa aga mingil juhul näivaks lugeda. Pikkuse sõltuvus taustsüsteemi valikust on niisama reaalne nagu näiteks keha liikumise kiiruse sõltuvus taustsüsteemi valikust või eseme nurkmõõtmete sõltuvus eseme kaugusest.

67. AJAVAHEMIKE RELATIIVSUS

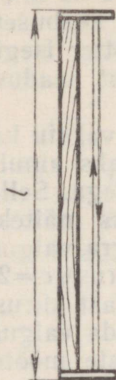
Relatiivsusteooria järgi pole ka ajavahemikud absoluutsed. Toimugu taustsüsteemi K suhtes liikuva taustsüsteemi K' ühes ja samas punktis kaks sündmust, mida eraldab ajavahemik τ_0 . Sündmusteks võivad näiteks olla kaks metronoomilööki, mis järgnevad teineteisele 1 sekundi tagant. Taustsüsteem K' on antud sündmuste jaoks «paigalseisev taustsüsteem», s. t. taustsüsteem, mille suhtes sündmused on paigal (toimuvad ühes punktis).

Ajavahemik τ nende sündmuste vahel, mõõdetuna süsteemis K , mille suhtes sündmused «liiguvad», s. t. toimuvad erinevates punktides, on relatiivsusteooria põhjal ajavahemikust τ_0 suurem:

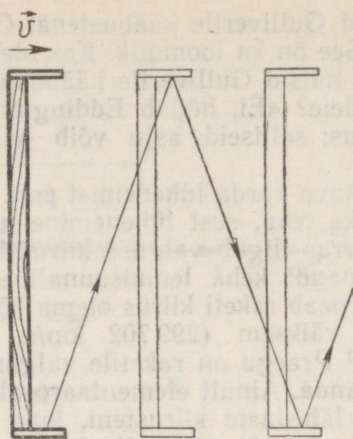
$$\tau = \frac{\tau_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (4.10)$$

Selle järelduse õigsust saab selgitada lihtsa «valguskella» abil, mis töötab järgmiselt. Varda pikkus on l ja tema otsesse on kinnitatud kaks omavahel paralleelset peeglit, mille vahel liigub üles-alla valgusimpulss (joon. 142). Valgusimpulsi iga pee-

¹ Kosmonaut ise ei saaks enda mõõtmete muutumist mitte kuidagi kindlaks teha. Kosmonaudile paistaksid aga kõik esemed ja inimesed Maal kokkusurutuina, nende mõõtmed liikumise suunas on vähenenud 100 korda.



Joon. 142



Joon. 143

geldumine alumiselt peeglit paneb erilise mehhanismi abil kella järjekordselt «tiksuma». Kella suhtes liikumatu vaatleja teeb kindlaks, et kella «tikside» vaheline ajavahemik

$$\tau_0 = \frac{2l}{c}.$$

Vaatleja, kelle suhtes kell liigub kiirusega v , seisukohast osutub ajavahemik teistsuguseks. Lihtsuse mõttes eeldame, et varras on kiirusega v risti, sest siis varda pikkus liikumisel ei muutu. Liikuvast kellas levib valgus mööda murdjoont (joon. 143) ja läbib kella «tikside» vahelise aja τ jooksul teepikkuse

$$2\sqrt{l^2 + \left(\frac{v\tau}{2}\right)^2}.$$

Järelikult,

$$\tau = \frac{2\sqrt{l^2 + \left(\frac{v\tau}{2}\right)^2}}{c}.$$

Lähendades saadud võrduse τ suhtes ja arvestades, et $\frac{2l}{c} = \tau_0$, saame võrduse (4.10).

Aega, mida mõõdetakse sündmuste suhtes paigalseisva taustsüsteemi kella, nimetatakse **omaajaks**. Omaaeg on minimaalne

aeg ja see fakt on niisama absoluutne nagu see, et paigalseisva varda pikkus on maksimaalne. Kui omaaeg on näiteks 5 sekundit, siis kõik liikuvad vaatlejad saavad oma kellade järgi pikema ajavahemiku: taustsüsteemi suhtelisest kiirusest sõltuvalt kas 6, 10 jne. sekundit. Ajavahemiku pikenemise efekti nimetatakse aja dilatatsiooniks. Relatiivsusprintsipiiga nõutav taustsüsteemide K ja K' samaväärsus seisab selles, et kui sündmused toimuvad taustsüsteemi K ühes ja samas punktis, siis ajavahemik nende sündmuste vahel on selle sama taustsüsteemi kella järgi mõõdetuna kõige lühem.¹

Aja dilatatsioon avastati katseliselt lühikese elueaga elementaarosakeste lagunemise vaatlemisel. Laetud piimesoni² eluiga, s. t. tema tekkimise ja lagunemise vaheline ajavahemik, on paigalseisvas taustsüsteemis keskmiselt $\tau_0 = 2,6 \cdot 10^{-8}$ s. Mida kiiremini piimeson laboratooriumi suhtes liigub, seda pikem on tema eluiga laboratooriumi suhtes paigalseisva kella järgi. Kuna elementaarosakesed võivad liikuda valguse kiirusele väga lähedase kiirusega, saab valemiga (4.10) määratavat eluea pikenemist katseliselt kindlaks teha. Kiiresti liikuva elementaarosakese eluiga võib olla paigalseisva või aeglaselt liikuva osakese elueast mitu korda pikem, kusjuures mesoni eluea pikenemise sõltuvus mesoni liikumiskiirusest v laboratooriumi suhtes vastab täpselt valemile (4.10). Kiirusel $v < c$ võib tegur $\left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$ võrduda näi-

teks 10, ja meson läbib enne lagunemist mitte $\tau_0 c = 7,8$ m pikkuse, vaid kümme korda pikema tee. Tähelepanuvääriv on asjaolu, et seda fakti saab relatiivsusteooria põhjal ennustada, vaatamata sellele, et me ei tunne mesoni seismist ehitust ega ka seda, miks meson üldse laguneb. Just selles seisnebki relatiivsusteooria hiigelsuur väärtus.

Kui õnnestuks nii suurele makroskoopilisele kehale nagu rakett anda valguse kiirusele lähedane kiirus, siis oleks Maalt startinud kosmonaut, kes viibis kosmoses raketi kella järgi näiteks 1 aasta, aja relativistliku³ aeglustumise tõttu viibinud Maa asukate kella järgi kosmoses palju kauem, näiteks 10 aastat. Samal ajal kui Maal möödub 10 aastat ja inimesed vananevad 10 aasta võrra, möödub raketis kõigest 1 aasta ja Maale naasnud kosmonaut on vananenud ainult ühe aasta võrra.

Aja dilatatsioonil põhineb tänapäeval ettekujutus, mille kohaselt

¹ Kui kell liigub kiirusega $v \ll c$, siis liikumine kella käiku märkimisväärselt ei mõjuta. Seepärast oligi kronomeetrite kasutamine geograafilise pikkuse määramiseks enne raadio leiutamist täiesti seaduspärane.

² Piimesonid (pioonid) on elementaarosakesed, mille massi väärtus asub prootoni ja elektroni massi m_e vahepeal. Positiivse ja negatiivse piimesoni mass on $273 m_e$, neutraalse piimesoni mass $264 m_e$.

³ Kõiki relatiivsusteooriast järelduvaid efekte nimetatakse sageli relativistlikeks.

inimene võib põhimõtteliselt teha kosmoserännakuid selliste kaugustele, mille läbimiseks kulub isegi valguskiirel Maa aja järgi sadu ja tuhandeid aastaid.

Relatiivsusteooriast tulenevad järeldused, et sündmuste samaaegsus, esemete mõõtmed ja ajavahemikud pole absoluutsed, vaid sõltuvad liikumiskiirusest, paistavad olevat «terve mõistusega», s. t. igapäevase kogemusega vastuolus. Nii see tegelikult ka on. Igapäevases elus puutume harilikult kokku ainult nende kehadega, mille liikumiskiirused on valguse kiirusest palju-palju väiksemad ja seega kõik relativistlikud efektid praktiliselt tähelepandamatud. Me oleme harjunud aeglase liikumisega ja seepärast pole meil võimalik valguse kiirusele lähedaste kiiruste juures toimuvaid protsesse täiel määral piltlikult ette kujutada. Sellised protsessid ei mõjuta ei meie meeleorganeid ega ka ettekujutust vahetult. Ainult teaduse kaudu, mis tugineb meie mõistuse jõule ja kasutab kaasaegseid katseseadmeid, õnnestus tundma õppida suurte liikumiskiirustel kehtivaid seadusi.

68. KIIRUSTE LIITMISE RELATIVISTLIK SEADUS

Uutele relativistlikele ettekujutustele ruumist ja ajast vastab ka uus kiiruste liitmise seadus. Vana kiiruste liitmise seadus (4.1) ei saa olla õige, sest ta on vastuolus väitega, et valguse kiirus vaakumis on konstantne.

Kui rong liigub kiirusega v ja vagunis levib rongi liikumise suunas valguslaine, siis peab valguslaine kiirus Maa suhtes olema ikkagi c , mitte aga $v+c$, nagu järeldub valemist (4.1). Uus kiiruste liitmise seadus peab andma nõutava tulemuse.

Paneme kirja (tõestuseta)¹ kiiruste liitmise seaduse juhuks, kui keha liigub taustsüsteemi K' X' -telje sihis ja taustsüsteem K' liigub omakorda kiirusega v taustsüsteemi K suhtes. Liikumise ajal langevad koordinaatteljed X ja X' ühte, Y ja Y' ning Z ja Z' aga jäävad paralleelseiks (joon. 144).

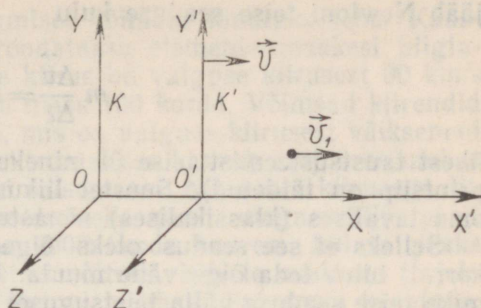
Tähistame keha kiiruse taustsüsteemi K' suhtes tähega v_1 ja sama keha kiiruse taustsüsteemi K suhtes tähega v_2 . Kiiruste liitmise relativistliku seaduse järgi

$$v_2 = \frac{v_1 + v}{1 + \frac{v_1 v}{c^2}}. \quad (4.11)$$

Kui $v \ll c$ ja $v_1 \ll c$, võib jätta liikme $\frac{v_1 v}{c^2}$ nimetajas arves-

¹ Kiiruste liitmise relativistlik seadus tuleneb samuti relatiivsusteooria postulaatidest nagu pikkuste ja ajavahemike relatiivsus.

Joon. 144



tamata ning seaduse (4.11) asemel saame siis klassikalise kiiruste liitmise seaduse:

$$v_2 = v_1 + v.$$

Kiirusel $v_1 = c$ võrdub kiirus v_2 samuti c , nagu nõuab relatiivsusteooria teine postulaat. Tõepoolest,

$$v_2 = \frac{c+v}{1+\frac{cv}{c^2}} = c \frac{c+v}{c+v} = c.$$

Kiiruste liitmise relativistliku seaduse tähelepanuväärseks omaduseks on see, et mistahes kiiruste v_1 ja v_2 (loomulikult väiksemate kui c) korral ei ületa resultantkiirus valguse kiirust c . Piirjuhul, $v_1 = v_2 = c$, saame

$$v_2 = \frac{2c}{c} = c.$$

Kiirus $v > c$ pole võimalik. Kiirusel $v > c$ kaotavad valemid (4.9) ja (4.10) mõtte, sest pikkus ja aeg muutuvad ebatõelisteks.

69. MASSI SÕLTUVUS KIIRUSEST. RELATIVISTLIK DÜNAAMIKA

Uus ettekujutus ruumist ja ajast puudutab vahetult ruumilisel ajaliste intervallide relatiivsust ja kiiruste liitmise seadust. Kuid sellega pole küsimus veel ammendatud ja pealegi ei ole see ka kõige tähtsam. Kehade mistahes vastasmõju, mis põhjustab kehade liikumiskiiruse muutumist, ei toimu suurtel kiirustel nii, nagu arvati klassikalises mehhaanikas.

Suurtel liikumiskiirustel pole Newtoni mehhaanika seadused ruumi ja aja uue ettekujutusega enam kooskõlas. Ainult väikestel kiirustel, mil kehtib klassikaline ettekujutus ruumist ja ajast,

jääb Newtoni teise seaduse kuju

$$m \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{F} \quad (4.12)$$

ühest taustsüsteemist teise üleminekul muutumatuks (relatiivsuspriintiip on täidetud). Suurtel liikumiskiirustel pole see seadus oma tavalises (klassikalises) sõnastuses enam õige.

Selleks et see seadus oleks õige ka suurte liikumiskiiruste korral, tuleb teda õige vähe muuta. Kõigepealt kirjutame dünaamika teise seaduse välja teistsugusel kujul, mida kasutas Newton ise:

$$\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}, \quad (4.13)$$

kus $\vec{p} = m\vec{v}$ on keha impulss. Selles võrrandis loeti keha mass liikumiskiirusest sõltumatuks.

Hämmastav on see, et suurtel, valguse kiirusele lähedastel liikumiskiirustel võrrandi (4.13) kuju ei muutu. Muutused puudutavad ainult massi. Suurtel liikumiskiirustel ei jää mass muutumatuks, vaid hakkab suurenema seda enam, mida rohkem keha kiirus läheneb valguse kiirusele c . Mass, mida Newtoni eluajast peale peeti kaks ja pool sajandit muutumatuks, sõltub tegelikult keha liikumiskiirusest.

Eeldades, et impulsi jäävuse seadus kehtib ka uute ruumi ja aja ettekujutuste puhul, saab leida massi sõltuvuse kiirusest. Arvutused on siin liiga keerulised ja nendel me ei peatu, vaid anname kohe lõpptulemuse.

Kui tähistada paigalseisva keha mass (keha seisumass) tähega m_0 , on kiirusega v liikuva keha mass määratav valemiga

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (4.14)$$

Valguse kiirusest palju väiksemate kiirustega liikumisel erineb avaldis $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$ väga vähe ühest. Tänapäeva kosmoseraketi kiirusel ($v = 10$ km/s) on

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0,99999999944.$$

Seepärast polegi midagi imestada, et massi muutumist on suhte-

liselt väikeste kiiruste kasvamisel võimatu kindlaks teha. Kaas-
aegsetes kiirendites aga kiirendatakse elementaarosakesi hiigla-
suurte kiirusteni. Kui osakese kiirus on valguse kiirusest 90 km/s
võrra väiksem, suureneb tema mass 100 korda. Võimsad kiirendid
annavad elektronidele kiiruse, mis on valguse kiirusest väiksemad
kõigest 35—40 m/s võrra. Elektroni mass kasvab seejuures umbes
2000 korda ja ületab prootoni seisumassi. Nii suure kiirusega lii-
kuva elektroni ringorbiidil hoidmiseks peab magnetvälja poolt
elektronile mõjuv jõud olema 2000 korda suurem, kui ta peaks
olema siis, kui mass kiirusest ei sõltuks. Kiirete osakeste trajek-
toiride arvutamisel ei saa Newtoni mehhaanikat enam kasutada.

Pidades silmas valemit (4.14), on keha impulss

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (4.15)$$

Relativistliku dünaamika põhiseadus, mis asendab Newtoni
võrrandit $\frac{\Delta \vec{p}}{\Delta t} = \vec{F}$, avaldub kujul:

$$\frac{\Delta \left(\frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)}{\Delta t} = \vec{F}. \quad (4.16)$$

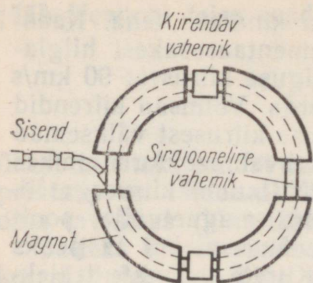
Mitte ükski keha ei saa liikuda valgusest kiiremini, sest kiiruse
suurenedes suureneb keha mass, mis määrab keha inertsioomadus-
ed, s. t. keha võime omandada antud jõu mõjul kindla kiirenduse.
Kui $v \rightarrow c$, siis valemi (4.14) kohaselt $m \rightarrow \infty$, seetõttu läheneb
kiirendus nullile ja ükskõik kui kaua kehale jõud ka mõjuks, keha
kiirus praktiliselt ei suurene.

Võrrandi (4.16) kasutamise vajadus laetud osakeste (elektro-
nide, prootonite jt.) kiirendite ehitamisel tähendab seda, et rela-
tiivsusteooria on tänapäeval saanud inseneriteaduseks.

70. SÜNKROFASOTRON

Kümnendas klassis tutvusite ühe elementaarosakeste kiirendiga — tsüklotro-
niga. Tsüklotroni töötamine põhineb sellel, et magnetväljas ringikujulisel orbiidil
liikuva laetud osakese tiirlemisperiood ei sõltu orbiidi raadiusest R ega ka osa-
kese liikumise kiirusest v , vaid osakese massist ja laengust ning magnetvälja
induktsioonist.

See on õige ainult siis kui $v \ll c$. Suurtel kiirustel sõltub osakese mass osa-



Joon. 145

võtavad suure osa enda alla elektroodid, mille vahel tekitatakse kiirendav elektriväli. Teistes sirgjoonelistes osakestes paiknevad laetud osakeste kiirendisse sisse- ja väljajuhtimise seaded.

Kuna igal kiirendava vahemiku läbimisel osakese, näiteks prootoni kiirus (järelkult ka mass) suureneb, ei saa osakese trajektoori kõverdav magnetväli jääda muutumatuks. Osakese trajektoori kõverusraadiuse muutumatu säilitamiseks peab magnetvälja tugevus osakese kiiruse kasvamisel suurenema.

Uheaegselt (sünkroonselt) magnetvälja muutusega peab rangelt määratud viisil muutuma ka kiirendava vahemiku elektriväli. Et üha suurema ja suurema kiirusega liikuv prooton jõuaks kiirendavasse vahemikku hetkel, mil elektrivälja suund ühtib prootoni kiiruse suunaga, peab elektrivälja muutumise sagedus prootoni kiiruse kasvamisel samuti suurenema. Magnetvälja tugevuse kasvu ja sageduse suurenemise vajalik kooskõla leitakse relativistliku dünaamika abil. Sünkrofasotron on relativistlik seade.

Tänapäeval on meie riigis suurim kiirendi Serpuhhovi linna lähedale ehitatud sünkrofasotron, mille magnetite kogumass on 20 000 tonni. Kiirendatavad prootonid läbivad ühe tiiru (umbes 1,5 km) jooksul summaarse potentsiaalide vahe 350 000 V ja omandavad seega 350 000 eV suuruse energia. Kogu kiirendustsükli jooksul omandavad prootonid 70 miljardit eV ületava energia.

71. MASSI JA ENERGIA SEOS

Siirdume nüüd relatiivsusteooria tähtsaima, tuuma- ja elementaarosakeste füüsikas üht peamist rolli mängiva järelduse juurde. Jutt on **energia ja massi universaalsest seosest**.

Energia ja massi seos järeldub otseselt sellest, et mass sõltub kiirusest. Massi ja energia seost on kõige lihtsam leida juhul, kui keha liigub väikese kiirusega ($v \ll c$).

Teisendame valemi

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

nimetajat järgmiselt:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = \sqrt{\left(1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}\right)^2 - \frac{1}{4} \frac{v^4}{c^4}}.$$

Jättes väikese suuruse $\frac{1}{4} \frac{v^4}{c^4}$ arvestamata, saame:

$$\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} \approx 1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}.$$

Seega

$$m \approx \frac{m_0}{1 - \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}}.$$

Korrutades lugejat ja nimetajat suurusega $1 + \frac{1}{2} \frac{v^2}{c^2}$ ja jättes jälle liikme $\frac{1}{4} \frac{v^4}{c^4}$ arvestamata, saame ligikaudse valemi:

$$m \approx m_0 + \frac{1}{2} m_0 v^2 \frac{1}{c^2}. \quad (4.17)$$

Summa teine liige näitab massi juurdekasvu Δm kiiruse arvel:

$$\Delta m = m - m_0 = \frac{\frac{1}{2} m_0 v^2}{c^2}.$$

See tähendab, et keha massi juurdekasvu keha liikumiskiiruse kasvamisel võrdub kehale antud kineetilise energia ja valguse kiiruse ruudu jagatisega.

Gaasi kuumutamisel anumas suureneb gaasi molekulide kineetiline energia ja, vastavalt tuletatud valemile, suureneb ka gaasi mass.

Massi juurdekasvu ja energia vaheline seos viib mõttele, mille esimesena väljendas Einstein: **keha mass võrdub kõikidel juhtudel keha energia ja valguse kiiruse ruudu jagatisega**. Hiljem tõestati rangelt, et impulsi ja energia jäävuse seadused on ruumi ja aja relativistlike ettekujutustega kooskõlas ainult sel juhul, kui keha energia

$$E = mc^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}. \quad (4.18)$$

Juhul kui $v \ll c$, võib selle lihtsuse ja üleüldisuse poolest ime-

pärase valemi kirjutada kujul¹:

$$E = m_0c^2 + \frac{m_0v^2}{2} + \dots \quad (4.19)$$

Teine liige selles valemis kujutab endast keha kineetilist energiat klassikalises mehhaanikas. Kõrgemat järku liikmed määravad energia suuruse paranduse, mida tingib massi suurenemine keha liikumiskiiruse kasvamisel.

Suurimat huvi ja uudust pakub valem (4.19) esimene liige, mis väljendab keha paigalseisu energiat, nõndanimetatud **seisuenergia** E_0

$$E = m_0c^2. \quad (4.20)$$

See on juba omaette tähelepanuväärne tulemus. **Iga keha omab energiat juba ainult tänu oma olemasolule, ja see energia on võrdeline keha seisumassiga m_0 .** Seisuenergia võib vaadata keha siseenergiana. Seisuenergia olemasolu kõige otsesemaks eksperimentaalseks tõestuseks on seisumassi omavate elementaarosakeste lagunemine osakesteks, mille seisumass $m_0=0$. Seisuenergia muutub seejuures täielikult uute moodustunud elementaarosakeste kineetiliseks energiaks.

Niisiis, relatiivsusteooriast järeldub massi ja energia lahutamatu seos: **keha või kehade süsteemi koguenergia (seisu- ja kineetilise energia summa) võrdub keha massi ja valguse kiiruse ruudu korrutisega.**² Kui muutub süsteemi energia, siis muutub ka süsteemi mass:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}. \quad (4.21)$$

Kuna aga tegur $\frac{1}{c^2}$ on väga väike, muutub mass märgatavalt ainult väga suurte energia muutuste korral. Keemilistel reaktsioonidel või keha kuumutamisel tavalistes tingimustes on energia muutused niivõrd väikesed, et neid ei saa katseliselt kindlaks teha. Nii on kuuma teekannu mass külma teekannu massist suurem, kuid nende masside erinevust ei saa kindlaks teha ka isegi kõige täpsemate kaaludega. Ainult aatomituumade ja elementaarosakeste muundumisel on energia muutused niivõrd suured, et nende seotud massi muutus on juba märgatav.

Aatomipommi plahvatusel on lagunemisproduktide mass esi-

¹ Me kasutame siin massi ligikaudset avaldist (4.17).

² Rõhutame, et energia $E=mc^2$ on vaba keha koguenergia. Kui keha asub mingis jõuväljas, tuleb sellele energiale vastastikuse mõju potentsiaalne energia juurde liita.

algse lõhustusmaterjali massist ühe või isegi mitme grammi võrra väiksem. See mass kantakse plahvatusel tekkinud energiaga ära. Massi muutusele 1 g võrra vastav energia muutus

$$\Delta E = \Delta mc^2 = 1 \text{ g} \cdot (3 \cdot 10^{10})^2 \frac{\text{cm}^2}{\text{s}^2} \approx 10^{21} \text{ ergi} = 10^{14} \text{ J}.$$

Valemitega (4.14), (4.18) ja (4.21) puutume me tuuma- ja elementaarosakeste füüsikas veel tihti kokku.

Harjutus 7

1. Klassikalise mehhaanika seadused on kõikides inertsiaalsüsteemides ühesuguse kujuga. Keha liikumise trajektor on aga erinevates taustsüsteemides erineva kujuga. Näiteks, vaguni suhtes vertikaalselt langev kivi liigub Maa suhtes mõõda parabooli. Kuidas seda seletada?

2. Miks Michelsoni katseseades (joon. 136) ei kasutatud kahte, vaid mitut peeglit?

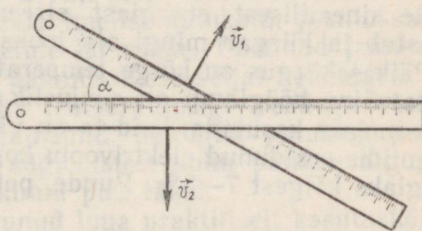
3. Liikivas rongis viibiva vaatleja suhtes toimusid pikselöögid punktides A (rongi ees) ja B (rongi taga) samaaegselt. Kumb pikselöök tungis Maal asuva vaatleja suhtes Maasse varem?

4. Kui $\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}} = 0,1$, siis läbib meson Maa suhtes 78 m, mitte aga 7,8 m.

Kuidas seda mesoniga seotud taustsüsteemi seisukohast selgitada?

5. Kas relatiivsusteooria seisukohast võib eksisteerida absoluutselt kõvu kehi?

6. Pärast suure kiirusega toimunud kosmoselendu Maale naasnud kosmonaut osutus oma eakaaslastest nooremaks. Kui aga arutleda mitte Maal asuvate vaatlejate, vaid raketis viibiva kosmonaudi vaatekohast, osutuvad nooremateks maa elanikud, mitte aga kosmonaut. Kuidas seda seletada?



Joon. 146

7. Kaks teineteisega väikese nurga α moodustavat joonlauda (joon. 146) liiguvad valguse kiirusele lähedaste kiirustega v_1 ja v_2 . Lihtsad arvutused näitavad, et väikese nurga korral liigub joonlaudade lõikepunkt valguse kiirusest suurema kiirusega. Kas see pole relatiivsusteooriaga vastuolus?

8. Kas saab elektron liikuda mingis keskkonnas kiiremini, kui levib selles keskkonnas valgus?

9. Miks ei või elektrivälja sünkrofotoni kiirendavais vahemikes olla muutumatu?

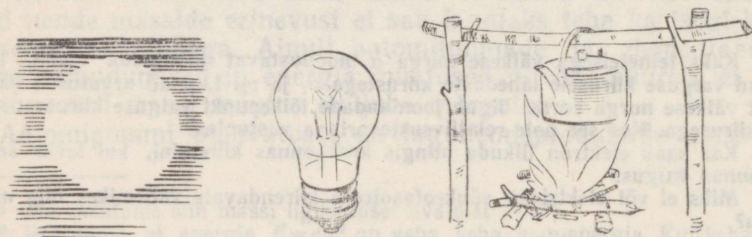
Senini käsitlesime valguslainete levimist. Nüüd on aeg minna küsimuse juurde, kuidas valguslained tekivad ja kuidas sõltuvad valguslainete omadused valguslaineid kiirgavate kehade omadustest.

Valgus — see on suure sagedusega elektromagnetlainetus. Elektromagnetlaineid, nagu on teada, kiirgavad aga kiirendusega liikuvad laetud osakesed. Aine koosneb aatomitest ja valgust kiirgavad just nimelt aatomis kiiresti liikuvad laetud osakesed. Kuni aatomi ehitus pole täpselt teada, ei saa ka kiirgusmehhanismi kohta midagi kindlat väita. Kuid juba sellest faktist, et aatomi koosseisu kuuluvad kerged ja järelikult ka väga liikuvad laetud osakesed, elektronid, võib oletada, et valguslaineid kiirgavad just elektronid.

Nii nagu klaveri sees pole heli, nii pole ka aatomi sees valgust. Sarnaselt pillikeelega, mis hakkab võnkuma alles pärast vasarakese lööki, sünnitavad aatomid valguse ainult pärast aatomi ergastamist. **Et aatom hakkaks kiirgama, tuleb talle anda mingi hulk energiat.** Kiirates annab aatom juurdesaadud energia ära. Aine pidevaks helendumiseks on tarvis energia juurdevoolu aatomisse väljastpoolt.

Soojuskiirgus. Lihtsaim ja levinuim kiirguse liik on soojuskiirgus, mille puhul valguse kiirgamisega kaasnevat energiakadu kompenseeritakse soojuse juurdevooluga kiirgavasse kehasse. Mida kõrgem on keha temperatuur, seda kiiremini aatomid kehas liiguvad. Kiiresti liikuvate aatomite pörkumisel muundub osa nende kineetilisest energiast siseenergiaks, mille tõttu aatom ergastub ja kiirgab mingi aja jooksul valgust.

Päikesekiirgus on kõrge temperatuuriga plasma soojuskiirgus. Ka tavaline hõõglamp on soojuslik valgusallikas. Hõõglampi on väga mugav kasutada, kuid ta on väikese ökonoomsusega. Lambi hõõgniidis eraldunud elektrivoolu koguenegiast muundub valgusenergiaks kõigest 7—8%. Puude, petrooleumi või gaasi põlemisel



Joon. 147

eralduv soojus paneb hõõguma tahmatükikesed, s. t. kütuseosakesed, mis pole jõudnud ära põleda, ja need osakesed kiirgavadki valgust (joon. 147).

Elektroluminestsents. Aatomid võivad valguse kiirgamiseks vajamineva energia omastada ka mitteesoojuslikelt energiaallikailt. Elektrivälja poolt suurte kiirusteni kiirendatud elektronide põrked aatomitega on mitteelastsed. Põrkel kulub osa elektronide kineetilise energiast aatomite ergastamiseks. Ergastatud aatomid annavad selle energia valgusenergia kujul tagasi. Just nimelt sellepärast kaasnebki gaaslahendusega gaasi helendumine. Kiirete osakeste poolt tekitatud helendus kannab **elektroluminestsentsi** nime.



S. I. Vavilov

Virmalised on samuti elektroluminestsentsi ilming. Päikeselt lähtuvad laetud osakeste vood ergastavad atmosfääri ülakihtides aatomeid ja põhjustavad nende kihtide helendumist. Elektroluminestsentsi kasutatakse valgusreklaamis.

Kemoluminestsents. Mõnedel eksotermilistel keemilistel reaktsioonidel muundub osa eralduvast energiast vahetult valgusenergiaks. Valgusallikas ise jääb seejuures külmaks (valgusallika temperatuur võrdub ümbritseva keskkonna temperatuuriga). Seda nähtust nimetatakse **kemoluminestsentsiks**.

Peaaegu igaüks teist on arvatavasti kemoluminestsentsiga tuttav. Suvel võib metsas kohata imelisi putukaid, jaaniussikesi, kelle kehal «põleb» väike roheline laternake. Püüdnud jaaniussikesi kinni, ei põleta te sõrmi. Jaaniussikesel seljal helendava täpi temperatuur on ümbritseva õhu temperatuuriga peaaegu võrdne. Helenduvad ka teised elusorganismid: bakterid, putukad, paljud põhjakalad, kes elavad mere sügavustes, kuhu päikesevalgus ei tungi. Sageli helendavad pehkinud puu tükid.

Senini pole kahjuks õnnestunud luua praktiliselt kasutuskõlblikke valgusallikaid, mille toime põhineks kemoluminestsentsil.

Fotoluminestsents. Ainele langev valgus osaliselt peegeldub, osaliselt aga neeldub selles aines. Enamikul juhtudel põhjustab neeldunud energia ainult kehade soojenemist. Mõned kehad aga hakkavad kiirituse mõjul ise helendama. See ongi **fotoluminestsents**. Valgus ergastab aine aatomeid (suurendab aatomite siseenergiat) ja pärast seda helendavad kehad ise. Näiteks kaetakse paljud nääriehted värvidega, mis pärast eelnevat valgustamist hakkavad ise valgust kiirgama.

Fotoluminestsentsi nähtust kasutatakse laialdaselt päevaval-

guslampides. Nõukogude füüsik Sergei Ivanovitš Vavilov soovitas gaaslahendustoru sisepinna katta ainetega, mis hakkavad gaaslahenduse lühilainekiirguse mõjul eredalt helen-dama. Päevavalguslambid on tavalistest hõõglampidest peaaegu kaks korda ökonoomsemad.

73. ENERGIA JAOTUS SPEKTRIS

Mitte ükski valgusallikas ei kiirga monokromaatilist valgust, s. t. ühe kindla lainepikkusega valgust. Selles veenavad meid prisma abil valguse spektriaks lahutamine, samuti interfeerentsi ja difraktsiooni katsed.

Energia, mille valgus valgusallikast ära kannab, on jaotunud kõikide valguskiirte kimpu kuuluvate lainepikkuste või sageduste järgi, sest lainepikkus ja sagedus on omavahel lihtsalt seotud:

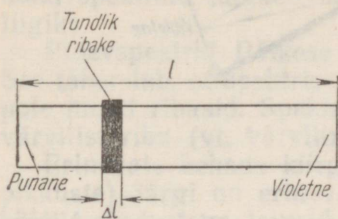
$$\lambda\nu = c.$$

Igat valgusallikat iseloomustatakse koguenergiaga, mida valgusallikas kiirgab ühes sekundis kas tervikuna või pinna iga ruutsentimeetri kohta. Reeglina ei jagune kiiratud energia erineva pikkusega valguslainete vahel ühtlaselt. **Energia jaotus lainepikkuste või sageduste järgi ongi kiirguse tähtsaimaks karakteristikuks.**

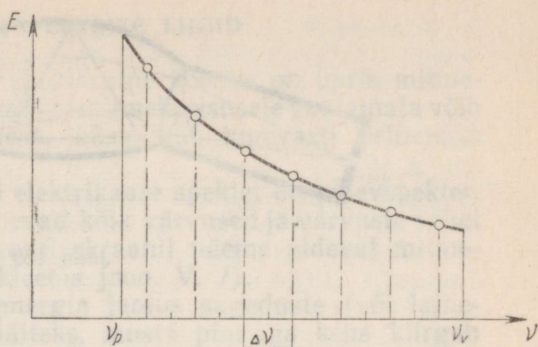
Energia jaotuse kiirguses võib katseliselt kindlaks teha. Selleks tuleb valgus prisma abil spektriaks lahutada ja mõõta väikeste sagedusvahemike $\Delta\nu$ kohta tulev valgusenergia. Silmaga energia jaotust hinnata (isegi ligikaudu) ei saa, sest silmal on valguse suhtes valiv tundlikkus (silma suurim tundlikkus langeb spektri rohelis-kollasele osale). Kõige parem on kasutada valguse neeldumise nähtust. Teatavasti neelab must keha peaaegu kõikide lainepikkustega valgust täielikult, kusjuures kogu valgusenergia kulub keha soojendamiseks. Sel juhul piisab ainult musta keha temperatuuri mõõtmisest, sest temperatuuri tõusu järgi võib otsustada neeldunud energia hulga üle.

Tavalise termomeetri väikese tundlikkuse tõttu ei saa seda neis katsetes kasutada. Sel puhul on temperatuuri mõõtmiseks vaja väga tundlikke aparate. Kasutada võib kas termogeneraatorit või bolomeetrit. Bolomeetri metalliribake või termogeneraatori ribakujuline tundlik element tuleb katta õhukese tahmakihiga. Tahm neelab mistahes lainepikkusega valguskiiri peaaegu täielikult.

Lahutame elektriikaare valguse prisma abil spektriaks, mille erinevatesse osadesse võime paigutada soojenemisele tundliku ribakese (joon. 148). Kõgu nähtava spektri, punastest kiirtest violetseteni, pikkusele l vastab sagedusvahemik ν_p kuni ν_v . Musta ribakese laiusele Δl vastab väike sagedusvahemik $\Delta\nu$. Aparaaadi musta ribakese neelava pinna soojenemise põhjal saab otsustada,



Joon. 148



Joon. 149

kui suur energiahulk tuleb sagedusvahemiku $\Delta\nu$ kohta. Liigutades ribakest piki spektrit, avastame, et kõige suurem osa energiat langeb spektri punasesse ossa, mitte aga rohelis-kollasesse, nagu paistab silmale.

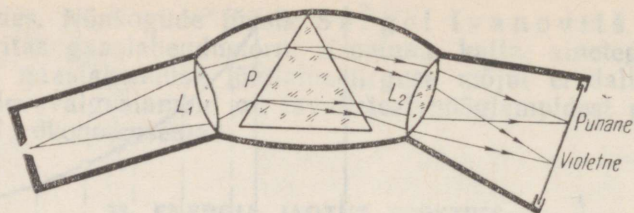
Kirjeldataud katsete tulemuste põhjal saab ehitada energia ja sageduse vahelise sõltuvuse kõvera. Kiirgusenergia hulk määratakse ribakese mõõdetava temperatuuri põhjal. Sagedust on aga lihtne leida, kui valguse spektriks lahutamise riist on gradueeritud, s. t. kui on teada, millisele sagedusele üks või teine spektri-osa vastab.¹

Kandes abstsissiteljele vahemike $\Delta\nu$ keskohtadele vastavad sagedused, ordinaatteljele aga aparraadi ribakeses neeldunud energia, saame rea punkte, mida saab ühendada sujuva kõveraga (joon. 149). Saadud kõver annab piltliku ettekujutuse energia jaotusest elektrikaare nähtava spektri osas. Samal viisil uuritakse ka teiste valgusallikate kiirgust.

74. SPEKTRAALAPARAADID

Selliste lihtsate vahenditega, nagu valguskiirte kimpu piirav kitsas pilu ja prisma, ei saa spektreid täpselt uurida. Veidi täiuslikum, prismast ja läätsest koosnev seade, mida kasutas Newton (vt. joon. 112), pole samuti spektrite uurimiseks kõige sobivam. Selleks on vaja aparraate, mis annavad selge spektri, s. t. aparraate, mis hästi eraldavad erineva lainepikkusega lained ja mille tekita-

¹ Kiirgusenergia kvalitatiivset sõltuvust sagedusest näitava kõvera ehitamiseks pole ilmtingimata vaja teada energia ja sageduse absoluutseid väärtusi. Piisab, kui jälgida ribakese temperatuuri muutumist sõltuvalt ribakese kaugusest spektri äärest.



Joon. 150

tud spektri üksikud osad ei kattu (või peaaegu ei kattu). Niisuguseid aparate nimetatakse **spektraalaparatuurideks**. Spektraalaparatuuride põhiosaks on kõige sagedamini suure dispersiooniga¹ prisma või difraktsioonivõre.

Joonisel 150 on toodud prisma spektraalaparatuuride ehituse skeem. Uuritav kiirgus langeb kõigepealt aparatuuride ossa, mida nimetatakse **kollimaatoriks**. Kollimaator on toru, mille ühes otsas on kitsas piluga kate ja teises otsas koondav lääts L_1 . Pilu asub lääts fokaaltasandis, mistõttu pilust läätsel langev hajuv valguskiirte kimp on pärast läätsel läbimist paralleelne. Läätsel väljunud paralleelsete kiirte kimp langeb prismale P .

Kuna prisma aine murdumisnäitajad on erineva sagedusega kiirte jaoks erinevad, väljuvad prismast erinevate suundadega paralleelsete kiirte kimbud, mis langevad läätsel L_2 . Läätsel L_2 fokaaltasandisse pannakse ekraan — mattklaas või fotoplaat. Läätsel L_2 fokuseerib paralleelsete kiirte kimbud ja pilu ühe kujutise asemel tekib ekraanil terve rida pilu kujutisi. Igale sagedusele (täpsemalt, kitsale spektraalvahemikule) vastab oma kujutis. Kõik need kujutised koos moodustavadki spektri.

Kirjeldatud aparatuuride nimetatakse **spektrograafiks**. Kui teise läätsel ja ekraani asemel kasutatakse spektri visuaalseks vaatlemiseks vastavat pikksilma, siis nimetatakse aparatuuride **spektroskoobiks**.

Spektraalaparatuuride prismad ei pruugi olla tingimata klaasist. Klaasi asemel kasutatakse ka teisi läbipaistvaid aineid: kvartsi, haliiti jt. Põhjus on selles, et klaas, mis on läbipaistev nähtava spektri elektromagnetlainetele, neelab tugevasti teiste lainepikkustega laineid.

¹ Kui aine on suure dispersiooniga, sõltub tema murdumisnäitaja lainepikkuse muutumisest õige tugevasti.

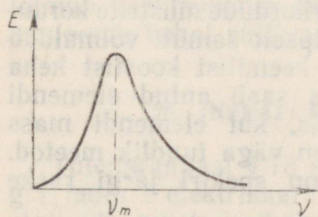
Erinevate ainete kiirguse spektraalne koostis on üpris mitmekesine. Kogemused aga näitavad, et mitmekesisusele vaatamata võib kõiki spektreid jaotada kolmeks, üksteisest tugevasti erinevaks liigiks.

Pidevspektrid. Päikese või elektriikaare spekter on pidevspekter. See tähendab, et spektris esinevad kõik värvused ja värvuste vahel pole musti ribasid. Spektrograafi ekraanil näeme pidevat mitmevärvilist riba (vt. värviline kleebis joon. V, 1).

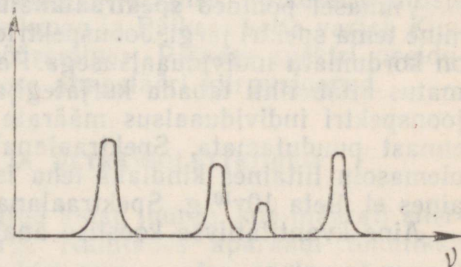
Erinevate kehade kiirgusenergia jaotus sageduste (või lainepikkuste) järgi on erinev. Näiteks, musta pinnaga keha kiirgab kõigi sagedustega laineid, kuid kiirgusenergia maksimum langeb teatud kindlale sagedusele ν_m (joon. 151).

Katse näitab, et pidevspektreid annavad ainult tahked kehad ja vedelikud. See viitab kahtlematult sellele, et pidevspektri iseloom ja tema olemasolu on määratud mitte ainult üksikute kiirgavate aatomite omadustega, vaid sõltuvad tugevasti ka aatomite vastasmõjust. Gaaside spekter ei ole ju pidevspekter. Vedelikud ja tahked kehad aga erinevad gaasidest eelkõige just selle poolest, et nende aatomid on omavahel tugevasti seotud.

Joonspektrid. Kui viia gaasileeki tavalise keedusoola lahuses niisutatud asbestitükike, on spektroskoobis näha, et vaevumärgatava pideva spektri foonil süttib ere kollane joon (vt. värviline kleebis joon. V, 2). Kollase joone (ka teisi jooni, kui neid on näha) annavad naatriumi aurud, mis tekkisid keedusoola lagunemisel gaasileegis. Värvilisel kleebisel on antud veel vesiniku ja heeliumi spektrid. Igaüks nendest spektritest on justkui erineva heledusega värvilistest joontest koosnev varbtara, milles jooned on üksteisest eraldatud tumedate ribadega (vt. näiteks joon. V, 4 värvilistel kleebistel). Selliseid spektreid nimetatakse **joonspektriteks**. Joonspektri tekkimine tähendab seda, et aine kiirgab ainult kindla lainepikkusega valgust (täpsemalt, väga kitsa kindla spektraalvahemiku lainepikkusi). Joonisel 152 näete energia ligikaudset jaotust joonspektris. Iga spektrijoon on kindla laiusega.



Joon. 151



Joon. 152

Joonspektri annavad ained atomaarses (mitte aga molekulaarses) gaasilises olekus. Järelikult kiirgavad selles olekus valgust aatomid, mis praktiliselt üksteisega vastastikku ei mõju.¹ Joonspektrid on spektrite kõige fundamentaalsem, põhilisem liik. Keemilise elemendi isoleeritud aatomid kiirgavad kindla lainepikkusega valgust.

Atomaarse gaasi tiheduse suurendamisel on märgata (koolikatse tingimustes mitte), et üksikud spektrijooned laienevad ja väga suure tiheduse juures, kui aatomite vastasmõju muutub tugevaks, hakkavad need jooned üksteist katma, moodustades seega pideva spektri. Aine lakkab olemast gaas.

Ribaspektrid. Ribaspekter koosneb üksteisest tumedate vahedega eraldatud ribadest. Väga hea spektraalaparaadiga saab kindlaks teha, et iga riba koosneb suurest hulgast tihedalt üksteise vastas asuvast joonest.

Ribaspektri, nagu joonspektrigi, annavad ained gaasilises olekus, kuid seejuures peab gaas koosnema molekulidest, mitte aatomitest. **Ribaspektri annavad molekulid.**

76. SPEKTRAALANALÜÜS

Joonspektrid on eriti tähtsad sellepärast, et nende iseloom on otseselt seotud aatomi ehitusega — elektronide liikumisega aatomis. Joonspektri tekitavad ju aatomid, mis pole teiste aatomitega vastastikuses mõjustuses. Joonspektritega tutvudes, teeme me ka esimese sammu aatomite ehituse uurimises. Joonspektrite uurimisel said teadlased uusi andmeid aatomi sisemusest. Siin puutub optika tihedalt kokku aatomifüüsikaga.

Joonspektrite põhiliseks omaduseks on see, et **mingi aine joonspektri joonte lainepikkused (või sagedused) sõltuvad ainult selle aine aatomitest ja ei sõltu üldse aatomite ergastamise viisist.** Mistahes keemilise elemendi aatomid annavad joonspektri, mis ei sarnane ühegi teise elemendi joonspektriga. Seega annavad ühe ja sama keemilise elemendi aatomid alati täpselt ühesuguse joonspektri (spektraalpildi).

Viimasel põhineb **spektraalanalüüs** — aine koostise määramine tema spektri järgi. Joonspektrid, nagu inimeste sõrmejäljedki, on kordumatu individuaalsusega. Papillaarkurdude mustrite kordumatus aitab tihti tabada kurjategijaid. Täpselt samuti võimaldab joonspektri individuaalsus määrata keha keemilist koostist keha ennast puudutamata. Spektraalanalüüsiga saab antud elemendi olemasolu liitaines kindlaks teha isegi siis, kui elemendi mass aines ei ületa 10^{-10} g. Spektraalanalüüs on väga tundlik meetod.

Aine kvantitatiivse koostise analüüsi on spektri järgi raske

¹ Joonspektri tekitamiseks peab gaas olema küllalt hõre.

teha, sest spektrijoonte heledus sõltub mitte ainult aine massist, vaid ka aatomite ergastamise viisist. Väga kõrgetel temperatuuridel pole paljusid spektrijooni üldse näha. Siiski kasutatakse kvantitatiivset spektraalanalüüsi küllalt palju.

Tänaseni on kindlaks tehtud kõikide aatomite spektrid ja koostatud spektrite tabelid. Spektraalanalüüsiga avastati paljud elemendid: rubiidium, tseesium jt. Avastatud elemente nimetati sageli nende kõige intensiivsemate spektrijoonte värvuse järgi. Rubiidium annab intensiivse tumepunase, rubiinpunase joone. Sõna «tseesium» tähendab «taevassinist» — tseesiumi spektri intensiivsemate joonte värvust.

Just spektraalanalüüsiga saadi teada Päikese ja tähtede keemiline koostis, sest teisi meetodeid polnud neil juhtudel võimalik kasutada. Spektraalanalüüsist selgus, et tähed koosnevad samadest keemilistest elementidest, mida leidub Maal. Huvitav on see, et heelium avastati esmalt Päikesel ja alles seejärel Maal. Heeliumi nimetus tuletab meelde tema avastamislugu, sest sõna «heelium» tähendab tõlkes «päikeseline».

77. NEELDUMISSPEKTRID

Teame, et mistahes ainet iseloomustab ainult temale omane kiirgusspekter. Peale selle aga neelab iga aine üksnes kindla lainepikkusega elektromagnetlaineid.

Lastes valge valguse külmast, mittehelenduvast gaasist läbi, ilmuvad pidevasse spektrisse tumedad jooned (vt. värviline kleebis joon. V, 5—8). Gaas neelab kõige intensiivsemalt just nimelt neid lainepikkusi, mida ta tugevasti kuumutatuna kiirgab. Tumedad jooned pidevas spektris on neeldumisjooned, mis kõik kokku moodustavad **neeldumisspektri**.

Just neeldumisjoonte järgi Päikese ja tähtede spektris saab uurida taevakehade keemilist koostist. Päikese eredalt helenduva pinna, fotosfääri spekter on pidevspekter. Päikese atmosfäär neelab fotosfääri valgust valikuliselt, mis tingibki neeldumisjoonte tekkimise fotosfääri pidevspektris.

Ka Päikese atmosfäär ise kiirgab valgust. Päikesevarjutuste ajal, mil paistab ainult Päikese kroon ja Päikese ketta varjab Kuu, toimub spektrijoonte «ümberpööramine». Päikese spektri neeldumisjoonte kohal süttivad Päikese atmosfääri kiirgusjooned.

78. INFRAPUNASED JA ULTRAVIOLETTKIHRED

Tuleme tagasi § 73 kirjeldatud katse juurde, kus määrati energia jaotust elektrikaare spektris. Nihutades aparaadi tundlikku elementi, musta «ribakest» spektri punase otsa poole, näeme, et temperatuur tõuseb. Kui nihutada «ribake» spektri punase otsa

taha, kus silm enam valgust ei näe, tõuseb «ribakese» temperatuur veelgi. Neid «ribakese» soojenemist põhjustavaid elektromagnetlaineid nimetatakse **infrapunasteks kiirteks**. Infrapunaseid kiiri kiirgab mistahes soojendatud keha ka siis, kui ta ei helendu. Näiteks köetud ahi või keskkütteradiaator kiirgab infrapunaseid kiiri, mis soojendavad ümbritsevaid kehi märgatavalt. Sellepärast nimetataksegi infrapunast kiirgust sageli **soojuskiirguseks**.

Silmale nähtamatud infrapunased kiired on punasest valgusest suurema lainepikkusega. Elektriikaare kiirgusenergia maksimum langebki infrapunaste kiirte ossa.

Ka spektri violetse otsa taga registreerib aparaat ümbritseva keskkonna temperatuurist veidi kõrgemat temperatuuri. Järelikult on olemas ka violetse valguse lainepikkusest väiksema lainepikkusega elektromagnetlaineid. Neid elektromagnetlaineid nimetatakse **ultraviolettkiirteks**.

Ultraviolettkiired on suure keemilise aktiivsusega. Fotoemulsiooni tundlikkus on ultraviolettkiirte suhtes suurem kui teiste kiirte suhtes. Selles võib veenduda, kui projekteerida spekter «päevasele» fotopaberile, mis tumeneb valguse toimel ilma ilmutamata. Spektri violetse otsa taha jääv fotopaberi koht tumeneb kiiremini kui nähtavas spektriosas asuvad kohad.

Ultraviolettkiired ei tekita nägemisaistingut — nad on nähtamatud, kuid nende mõju silma võrkkestale ja nahale on suur ja purustav. Atmosfääri ülemised kihid ei neela Päikese ultraviolettkiirgust täielikult, mistõttu kõrgmägedes ei tohi tumedate klaasprillideta ja riieteta jääda lumele kauaks ajaks. Klaas neelab ultraviolettkiiri tugevasti ja seepärast kaitsevadki klaasprillid, isegi läbipaistvad, inimese silmi küllalt hästi.

Väikestes annustes on ultraviolettkiirtel raviv toime. Seepärast ongi mõõdukas päevitamine kasulik — seda eriti noores eas, sest ultraviolettkiired soodustavad kasvu ja tugevdavad organismi. Peale otsese mõju nahakudedele (kaitsva päevituspigmenti ja D_2 vitamiini tekkimine) mõjuvad ultraviolettkiired kesknärvisüsteemile, stimuleerides rea eluliselt tähtsate protsesside kulgu organismis.

Ultraviolettkiirtel on ka bakteriitsidne toime — nad tapavad haigusttekitavaid baktereid ja sel eesmärgil kasutatakse neid ka meditsiinis.

79. RÖNTGENIKIRED

Võib-olla kõik pole infrapunastest ja ultraviolettkiirtest kuulnud, kuid **röntgenikiirte** olemasolust teavad loomulikult kõik. Need imepärased kiired tungivad tavalisele valgusele läbipaistmatutest kehadest läbi. Röntgenikiirte neeldumine on võrdeline aine tihedusega. Röntgenikiirte selle omaduse tõttu ongi võimalik

inimese siseelundeid pildistada. Neil fotodel on inimese luustik, süda ja teised elundid hästi eraldatavad. Kõik meie riigi kodanikud peavad kord aastas käima niinimetatud fluoroograafilisel läbivalgustusel. Seal tehakse röntgenikiirte abil rindkerest ülesvõte, et avastada võimalik haigestumine juba algstaadiumis.

Röntgenikiirte avastamine. Röntgenikiired avastas 1895. a. saksa füüsik Wilhelm Konrad Röntgen. Röntgen oskas vaadata ja märgata uut seal, kus paljud teadlased enne teda ei avastanud midagi tähelepanuväärset. See eriline anne aitas Röntgenil teha tähelepanuväärse avastuse.



W. K. Röntgen

XIX sajandi lõpus köitis füüsikute üldist tähelepanu väikesel rõhul kulgev gaaslahendus. Väikesel rõhul tekkisid gaaslahendustorus väga kiirete elektronide vood. Tollal nimetati neid katoodkiirteks, sest nende kiirte olemus polnud veel usaldusväärselt kindlaks tehtud ja teada oli vaid see, et need kiired lähtuvad gaaslahendustoru katoodilt.

Katoodkiirte uurimisel pani Röntgen tähele, et fotoplaat gaaslahendustoru lähedal tumeneb isegi siis, kui ta on keeratud musta paberi sisse. Peale selle õnnestus Röntgenil jälgida veel ühte hämmastamapanevat nähtust. Baariumtetratsüanoplatinaadi lahuses niisutatud paberekraan hakkas gaaslahendustoru ümber keeratult helendama. Kui Röntgen hoidis kätt gaaslahendustoru ja ekraani vahel, oli ekraanil näha käelaba hele vari ja luude tumedad varjud selle sees.

Teadlane mõistis, et gaaslahendustoru töötamisel tekib mingi suure läbitungivusega tundmatu kiirgus ja nimetas neid kiiri x -kiirteks. Hiljem hakati seda kiirgust nimetama «röntgenikiirguseks».

Röntgen tegi kindlaks, et uus kiirgus tekib kohas, kus katoodkiired (kiirete elektronide vood) pörkuvad vastu klaastoru. Toru see koht helendas rohekalt. Hilisemad katsed näitasid, et x -kiired tekivad kiirete elektronide pidurdumisel mistahes tōketel, eriti metallektroodidel.

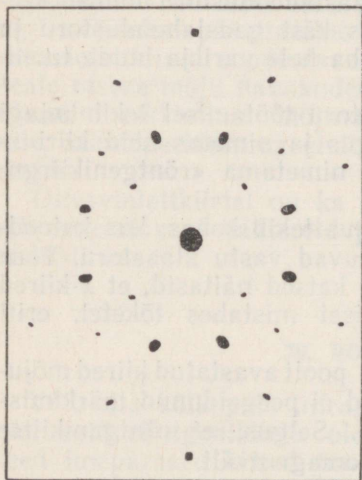
Röntgenikiirte omadused. Röntgeni poolt avastatud kiired mõjusid fotoplaadile, ioniseerisid õhku, kuid ei peegeldunud märkimisväärselt üheltki ainelt ega murdunud. Selgus, et röntgenikiirte levimissuunda ei mõjutanud ka elektromagnetväli.

Kohe tekkis oletus, et röntgenikiired on elektromagnetlained, mis kiirguvad elektronide järsul pidurdumisel. Röntgenikiirte

lainepikkus on nähtava valguse ja ultraviolettkiirte lainepikkusest palju väiksem. Nende suurt läbitungimisvõimet ja muid iseärasusi seostati just nende väikese lainepikkusega. See hüpotees aga nõudis veel tõestamist, ja tõestuse sai ta alles 15 aastat hiljem.

Röntgenikiirte difraktsioon. Kui röntgenikiirgus kujutab endast elektromagnetlaineid, siis peab ta ka difrageruma, mis on omane kõigile laineliikidele. Esialgu asetati röntgenikiirte teele väga väikeste avadega pliiplaate, kuid mingit difraktsiooninähtust avastada ei õnnestunud. Siis tuli saksa füüsik *Max von Laue* mõttele, et röntgenikiired võivad olla nii väikese lainepikkusega, et inimese valmistatud tõkkel difraktsiooni lihtsalt ei teki. Ei saa ju teha avausi mõõtmetega 10^{-8} cm, sest sellises suurusjärgus on aatomite eneste mõõtmed. Kui aga röntgenikiirte lainepikkused on samuti selles suurusjärgus? Sel juhul jääb ainsaks võimaluseks kasutada kristalle, sest nende korrapärane struktuur, kus üksikute aatomite vahelised kaugused on aatomi eneste mõõtmetega, s. t. 10^{-8} cm samas suurusjärgus. Kristall oma perioodilise struktuuriga ongi see looduslik seade, millest aatomite mõõtmetega samat suurusjärku omavate lainete läbiminekul peab tekkima difraktsioonipilt.

Nii suunatigi kitsas röntgenikiirte kimp kristallile, mille taga asus fotoplaat. Katsetulemus langes ootustega täiesti ühte. Kristalli sirgjooneliselt läbivad röntgenikiired tekitasid suure tsentraalse laigu, selle kõrvale aga tekkis terve hulk väikesi, mis asusid sümmeetriliselt ümber suure (joon. 153). Nende laigukeste tekkimist võis selgitada ainult röntgenikiirte difraktsiooniga kristallis.



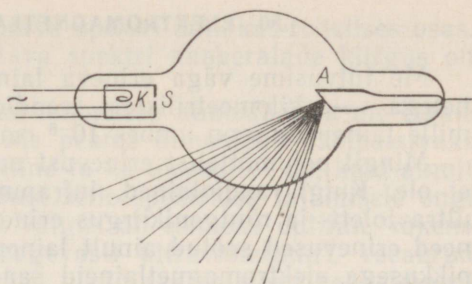
Joon. 153

Difraktsioonipildi uurimine võimaldas määrata röntgenikiirte lainepikkuse. Röntgenikiirte lainepikkus osutus ultraviolettkiirte omast lühemaks ja oli aatomi mõõtmetega (10^{-8} cm) samas suurusjärgus.

Röntgenikiirte kasutamine. Röntgenikiirte kasutamisel on palju väga tähtsaid kasutusalasid.

Esiteks, röntgenikiiri kasutatakse arstiteaduses, mida mainiti juba paragrahvi alguses. Keegi ei tea öelda inimeste arvu, kelle elu on päästetud tänu röntgenikiirte abil õigeaegselt määratud diagnoosile. Selge on ainult see, et nende inimeste arv on väga suur.

Teiseks, difraktsioonipilt, mis tekib röntgenikiirte läbiminekul



Joon. 154

kristallidest, annab meile ettekujutuse aatomite paigutusest ruumis, s. t. kristalli struktuurist. Anorgaaniliste ainete kristallstruktuuri kindlakstegemine osutus üpris lihtsaks. Röntgenstruktuuranalüüsiga õnnestub dešifreerida ka keeruliste orgaaniliste ühendite, sealhulgas ka valkude ehitust. Röntgenikiirte abil määrati kümneid tuhandeid aatomeid sisaldava hemoglobiinimolekuli struktuur. Röntgenstruktuuranalüüsi tõeliseks triumfiks oli kõikide elusorganismide rakutuumade kromosoomide koostisse kuuluva DNH (desoksüribonukleiinhappe) molekuli ehituse kindlakstegemine. DNH molekulid on pärilikkuse koodi kandjad, s. t. nad kannavad pärijatele edasiantavat informatsiooni elusorganismi ehitusest.

Kõik need saavutused said võimalikuks tänu röntgenikiirte väikesele lainepikkusele, mille tõttu võib röntgenikiirte abil põhimõtteliselt «näha» molekulide struktuuri. Muidugi ei saa me siin midagi näha selle sõna otseses tähenduses, vaid jutt on difraktsioonipildi saamisest. Pärast difraktsioonipildi dešifreerimist, mis on küllalt töömahukas operatsioon, saab kindlaks teha aatomite ruumilise paigutuse.

Röntgenitoru ehitus. Tänapäeval on röntgenikiirte tekitamiseks loodud täiuslikud seadmed, mida nimetatakse **röntgenitorudeks**.

Joonisel 154 on kujutatud nõndanimetatud elektronröntgenitoru skeem. Katoodiks *K* on volframspiraal, mis termoelektronemissiooni tõttu emiteerib elektrone. Silinder *S* fokuseerib elektronide voo, mis seejärel pörkub vastu metallelektroodi (anoodi) *A*. Elektronide pörkumisel vastu anoodi tekivadki röntgenikiired. (Anoodi ja katoodi vaheline pinge ulatub sadade kilovoltideni.) Röntgenitoru sees tekitatakse kõrgvaakum — gaasi rõhk torus ei ületa 10^{-5} mm Hg.

Võimsate röntgenitorude anoodi jahutatakse voolava veega, sest elektronide pidurdumisel eraldub palju soojust.

Me tutvusime väga erineva lainepikkusega elektromagnetlainetega — kilomeetritelistest raadiolainetest röntgenikiirguseni, mille lainepikkus on umbes 10^{-8} cm.

Mingit põhimõttelist erinevust nende lainete vahel loomulikult ei ole. Kuigi raadiolained, infrapunane kiirgus, nähtav valgus, ultraviolet- ja röntgenikiirgus erinevad üksteisest omadustelt, on need erinevused seotud ainult lainepikkuste erinevusega. Erineva pikkusega elektromagnetlaineid saadakse erineval viisil — kiirgumine antennist, soojuskiirgus, kiirete elektronide pidurdumisel tekkiv kiirgus jne.

On olemas ka röntgenikiirtest lühema lainepikkusega elektromagnetlaineid. Need on niinimetatud gammakiired (γ -kiired), mida kiirgavad radioaktiivsete elementide tuumad.

Õpiku ees- ja tagalehel näete elektromagnetkiirguste täielikku skaalat. Toodud skaala pole piiratud ei väga pikkade, ega ka väga lühikeste lainete otstest — elektromagnetlained võivad olla piiramatult pikad ja kuitahes lühikesed.

Peatume nüüd väga huviärataval küsimusel. Miks kujunesid meie (samuti loomade) silmad tundlikeks suhteliselt kitsa elektromagnetlainete vahemiku — $4 \cdot 10^{-5}$ kuni $8 \cdot 10^{-5}$ cm suhtes? Nähtav valgus haarab elektromagnetlainete skaalast tibatillukese, infrapunaste ja ultraviolettkiirte vahele jääva ribakese. See ribake on justkui kitsas pilu, mille kaudu me näeme maailma. Nähtavast valgusest ühele poole laiuvad raadiolainete, teisele poole gammakiirte alad. Kõik need lained kannavad energiat ja võiks, nagu näib, teha meie jaoks täiseduga sedasama, mida teeb valgus. Silm võiks olla tundlik ka nende elektromagnetlainete suhtes.

Tuleb aga kohe öelda, et kõik lained pole loomulikult sobivad. Gamma- ja röntgenikiiri tekitatakse erilistes tingimustes ning meie ümber neid peaaegu ei ole. See on ka väga hea, sest röntgeni-, eriti aga gammakiired tekitavad niinimetatud kiiritustõbe ja inimkond poleks suutnud sellistes tingimustes kaua elada.

Pikad raadiolained oleksid nägemise juures samuti ääretult ebamugavad, sest nad kalduvad meetrisuuruste tõkete taha ning me ei näeks meile eluliselt vajalikke esemeid.

On aga veel infrapunased kiired, mis võivad küll keha soojendada, kuid on meile siiski nähtamatud. Paistab, et infrapunased kiired võiksid edukalt asendada nende lainepikkustega kiiri, mida me näeme. Lõpuks oleks võinud silm kohanduda ju ka ultraviolettkiirte tajumisele.

Kas on siis kitsas lainepikkuste ribake, mida me nimetame nähtavaks valguseks, valitud suurest elektromagnetlainete skaalast täiesti juhuslikult?

Ei! See pole kaugeltki juhus. Kõigepealt tuleb märkida, et Päikese elektromagnetkiirguse energia maksimum asub täpselt

nähtava spektri keskel — nähtava spektri kollakas-rohelises osas. Kuid see pole peamine! Nähtava spektri naaberalade kiirgus on samuti küllalt intensiivne.

Kogu asi on selles, et Maad ümbritseb atmosfäär ja me elame selle õhukooleani sügavuses. Me peame atmosfääri läbipaistvaks või peaaegu läbipaistvaks. Selline ta ka tõepoolest on, kuid ainult väga kitsa spektriosa jaoks. Just selle spektriosa tajumisele ongi meie silm kohanenud. Nähtav valgus on esimene optiline «aken» atmosfääris. Hapnik neelab tugevasti ultraviolettkiiri, veeaurud peavad kinni infrapunaseid kiiri, pikad raadiolained peegelduvad ionosfäärilt kosmilisse ruumi tagasi.

On olemas veel ainult üks, 0,25 cm kuni 30 m pikkustele lainetele läbipaistev «raadioaken». Nagu juba ütlesin, ei kõlba need lained teravate kujutiste tekitamiseks. Peale selle on nende intensiivsus Päikese spektris väike. Ülalmärgitud lainepikkustega raadiolainete kindlaks kinnipüüdmiseks oli vaja raadiotehnikas suurt hüpēt, mida tingis raadiolokaatorite täiustamise hädavajalikkus Teise maailmasõja ajal.

Niisiis, elusorganismid omandasid loodusliku valiku protsessis organi, mis on tundlik just kõige suurema intensiivsusega ja oma ülesandeks kõige sobivama kiirguse suhtes.

Seda, et päikesekiirguse energia maksimum langeb optilise «akna» keskkoha, tuleb arvatavasti lugeda looduse täiendavaks kingiks. Läbi oleks võinud saada ka päikesekiirguse energia maksimumi ja atmosfääri läbipaistvuse maksimumi hämmastava kokkulangemiseta. Varem või hiljem oleksid päikesekiired sünnitanud elu ja suutnud seda ka alal hoida.

Harjutus 8

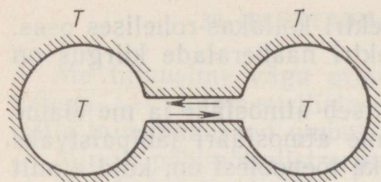
1. Loetlege valgusallikaid, millega teil on tulnud kokku puutuda.
2. Kas hõõglambi spekter on pidevspekter?
3. Kirjeldage spektraalparaadi ehitust, milles prisma asemel kasutatakse difraktsioonivõret.
4. Mida tuleb ainega teha, et spektraalanalüüsiga määrata tema keemilist koostist?
5. Miks aknaklaasist läbitungivate päikesekiirte käes nahk ei päevitu?

VI. VALGUSKVANDID. VALGUSE TOIMED

81. TASAKAALULINE SOOJUSKIIRGUS

Eelmises paragrahvis käsitletud mitmesugust liiki kiirgustest on eriline koht soojuskiirgusel. Selle põhjuseks on asjaolu, et soojuskiirgus võib olla **tasakaaluline**. See tähendab, et keha ja tema poolt tekitatud kiirgus võivad olla **soojuslikus (termodünaamilises) tasakaalus**.

Tasakaaluline kiirgus võib tekkida püsiva temperatuuriga keha õõnsuses. Tasakaalu korral võrdub keha poolt ajaühikus õõnsusesse kiiratud energia keha poolt sama aja jooksul õõnsusest neelatava energiaga, kusjuures keha temperatuur ei muutu. Tasakaalulisele kiirgusele omistatakse kindel temperatuur ja nimelt



Joon. 155

tehtud seintega õõnsuste ühendamist energia voolamise ühest õõnsusest teise siis, kui õõnsused on sama temperatuuriga (joon. 155). Energia voolamise tõttu hakkas üks õõnsus jahtuma, teine aga soojenema, s. t. soojuslik tasakaal oleks iseenesest rikutud. Termodünaamika seaduste järgi pole see aga võimalik.

Kui soojuskiirguse energia ei sõltu ainest, millest on valmistatud õõnsuse seinad, siis võib järelikult valida mistahes aine ehituse lihtsaima mudeli ja püüda tema abil leida soojuskiirguse energia tiheduse sõltuvust temperatuurist ning sagedusest. (Tähtis on vaid see, et mudel tagaks kõikide sagedustega lainete kiirgumise ja neeldumise.) Tänu sellele osutus võimalikuks hakata soojuskiirgust uurima teoreetiliselt juba siis, kui ei tuntud veel aatomite ehitust.

82. «ULTRAVIOLETNE KATASTROOF»

Elektromagnetlaineid kiirgava ja neelava aine kõige lihtsaima mudeli pakkus välja silmapaistev saksa füüsik $M a x P l a n c k$. Tollal (XIX saj. lõpul) juba teati Hertzi vibraatorist, mis kiirgab elektromagnetlaineid. Hertzi vibraatoris võnguvad elektronid peaaegu harmooniliselt, mistõttu seda vibraatorit nimetatakse ka elektromagnetiliseks ostsillaatoriks. Valguskiirguse modelleerimisel oli loomulik oletada, et aatomid kujutavad endist samuti elektromagnetilisi ostsillaatoreid, täpsemalt, lineaarseid harmoonilisi ostsillaatoreid. Lineaarne harmooniline ostsillaator on lihtsalt selline süsteem, mis võib võnkuda tasakaaluasendi ümber piki sirget vabalt ja harmooniliselt. Vedru otsa riputatud koormus on samuti harmooniline ostsillaator. Mingi sagedusega võnkuv laetud keha on võimeline märgatavalt kiirgama ja neelama ühe ning sama sagedusega elektromagnetlaineid. Kui õõnsuse sein koosneb kõikvõimalike võnkesagedustega ostsillaatoritest, on sein võimeline neelama ja kiirgama mistahes lainepikkusega laineid.

Molekulaarkineetilisel teoorial järeldub, et soojusliku tasakaalu olekus ei sõltu ühegi ostsillaatori keskmine energia sagedusest ja võrdub kT , kus k on Boltzmanni konstant ja T absoluutne temperatuur. Kasulik on meelde tuletada, et üheaatomilise gaasi «molekuli» keskmine energia võrdub peaaegu sama suurusga ja ta on $3/2 kT$ (vt. IX—X klassi füüsikaõpikust).

Ostsillaatori poolt ajaühikus kiiratud elektromagnetenergia on võrdeline ostsillaatori keskmise energiaga kT . Kuna kõikvõimalike võnkesagedustega ostsillaatorite arv võib olla lõpmata suur, peab ka nende poolt kiiratud energia olema tohtu.

Tehtud järeldus on mõttetu, sest ta eitab aine ja kiirguse vahelise tasakaalu võimalikkust. Keha peab mistahes temperatuuri juures kiirgama ja andma ära energiat seni, kuni ta temperatuur langeb absoluutse nullini. Igapäevane kogemus aga näitab, et midagi taolist tegelikkuses ei toimu — keha ei kaota kogu oma energiat elektromagnetlainete kiirgamiseks silmapilkselt.

Kuna kogu kiirgusenergia pidi saama lõpmata suureks selle tõttu, et kiiratakse kõiki sagedusi kuitahes suurte sagedusteni välja, siis hakatigi tekkinud vastuolu nimetama «ultravioletseks katastroofiks». Selle «katastroofiga» puututi

keha temperatuur. Kui keha temperatuur on näiteks 300 K, siis räägitakse et kiirguse temperatuur õõnsuses on samuti 300 K.

Soojuskiirguse tasakaalulise iseloomu tõttu võib tema uurimisel kasutada termodünaamika seadusi. Tänu sellele võib kindlaks teha rea üldisi seaduspärasusi. Nii võib veendunudult väita, et kiirgusenergia tihedus ja kiirgusenergia jaotus sageduste järgi ei sõltu õõnsuse seinte aineomadustest. Kui see nii ei oleks, avastaksime me pärast kahest erinevast ainest

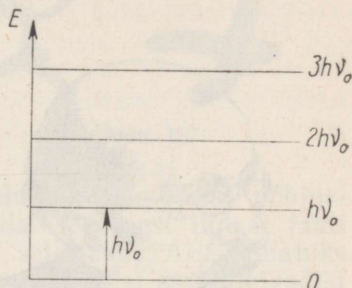
kokku alles XIX saj. lõpus. Paljukordselt järeleproovitud elektrodünaamika seadused hakkasid ootamatult «streikima», kui neid prooviti rakendada lühilainelise elektromagnetkiirguse probleemi uurimisel. See kõik oli seda imelikum, et elektrodünaamika kirjeldas antenni poolt kiiratud raadiolaineid suurepäraselt ning omal ajal ennustati selle teooria põhjal ka elektromagnetlainete eneste olemasolu.

83. PLANCKI HÜPOTEES

Planck mõistis esimesena, et hästi läbi-proovitud Maxwelli elektrodünaamika ja Newtoni mehhaanika seadustega tasakaalu-lise soojuskiirguse olemasolu selgitada ei saa.

Raskustest on võimalik üle saada ühe küllalt lihtsa, kuid tuntud loodusseaduste vasturääkiva oletusega. Lihtsaima mikroskoopilise süsteemi — harmoonilise ostsillaatori — energia väärtused ei saa olla suvalised. Omavõnkesagedusel ν_0 omab energia ainult diskreetseid (katkevaid) väärtusi:

$$E_n = h\nu_0 n, \quad (6.1)$$



Joon. 156

kus $n=0, 1, 2, 3, \dots$ — võrdub täisarvudega ja h on võrdetegur, mida hakati hiljem nimetama Plancki konstandiks¹.

Plancki hüpotees aitab mõista, miks kiirgusenergia suurtel sagedustel pole mitte ainult lõpmatu, vaid hoopis vastupidi, on praktiliselt null. Joonisel 156 on kujutatud ostsillaatori energia võimalikud väärtused, mis on Plancki hüpoteesiga vastavuses. Ostsillaatori võnkumapanemiseks tuleb ostsillaatorile anda energiat, mis ei tohi olla väiksem kui $h\nu_0$. Mida suurem on sagedus, seda suurem see energia peab olema. Ostsillaator saab energiat soojusliikumise arvel. Soojusenergia (ühe osakese kohta) on suurusjärgus kT . Juhul, kui $h\nu_0 \gg kT$, ostsillaator ei ergasta ja järelikult ka ei kiirga. Seepärast ei võrdu Plancki ostsillaatorite keskmine energia \bar{E} suurusega kT , vaid sõltub kiirguse sagedusest. Kui $\nu_0 \rightarrow \infty$, siis $E \rightarrow 0$.

Kui kiirgava süsteemi energia omab ainult diskreetseid väärtusi, võib sellest järeldada, et ostsillaator kiirgab elektromagnetenergiat mitte pidevalt, vaid üksikute portsjonite, kvantide kaupa.² Ostsillaatori energia võib ju muutada ainult suuruste $h\nu_0$ kaupa hüppeliselt. Elektromagnetkiirguse energia portsjon ongi seepärast

$$E = h\nu_0. \quad (6.2)$$

Planck rajas tasakaalulise soojuskiirguse teooria, mis oli eksperimendiga täielikult kooskõlas. Katsesest teadaolevast energia jaotusest sageduste vahel määrati Plancki konstandi väärtus, mis osutus väga väikeseks:

$$h = 6,62 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}. \quad (6.3)$$

Hiljem vaatleme teist Plancki konstandi määramise meetodit üksikasjalikult.

¹ Võrdeteguri h ühikuks on energia ja aja korrutis. Mehhaanikas nimetatakse sellist suurust mõjuks ja seepärast nimetatakse Plancki konstanti ka **mõjukvandi**.

² Muuseas, Planck ise ei sõandanud seda Maxwelli klassikalisele elektrodünaamikale vasturääkivat järeldust teha.

Planck näitas seega väljapääsu raskustest, millega teooria kokku puutus. Raskustest osutus võimalikuks üle saada ainult sel teel, et mikroskoopiliste süsteemide — ostsillaatorite puhul tuli loobuda klassikalise füüsika seaduste kehtivusest.

Selgusetuks jäi aga see, miks võnkuv keha ei või omada mistahes energiat ja mil viisil saab pidevaid elektromagnetlaineid kiirata üksikute portsjonite kaupa?

Kogu edasine füüsika areng aga kinnitas täielikult Plancki oletuse õigsust. Mõjukvandi sissetootmine tähistas täiesti uue füüsikateooria, **kvantteooria**, arengu algust. Kvantteooria pole veel tänapäevalgi lõplikult välja kujunenud.



M. Planck



A. G. Stoletov

84. FOTOEFEKT

Tähtis koht valguse kvantolemuse arenguloos oli omapärasel nähtusel, mille avastas H. Hertz ja mida põhjalikult uuris vene füüsik Aleksander Grigorjevitš Stoletov. Seda nähtust hakati nimetama **fotoefektiks**.

Kõik valgust neelavad kehad soojenevad, kuid valgusel on veel teisi, ebatavalisemaid toimeid. Viimaste hulka kuulub ka fotoefekt. Fotoefekti olemus seisneb selles, et valgus lööb ainst (näiteks metallist) välja elektrone.

Fotoefekti avastamiseks võib kasutada elektroskoopi, mille külge on kinnitatud hästi puhas tsinkplaat (joon. 157). Valgusallikana on sobiv kasutada elektrikaart. Kui elektroskoop laadida positiivselt, ei avalda tsinkplaadi valgustamine elektroskoobi tühjenemisele mingit mõju. Laadides aga elektroskoobi negatiivselt, tühjendab elektrikaare valguskiirte kimp elektroskoobi väga kiiresti.

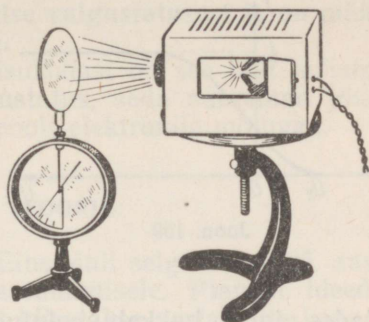
Selgitada saab seda nähtust ainult ühel viisil. Valgus lööb

plaadi pinnast välja elektrone ja kui plaat on laetud negatiivselt, tõukuvad elektronid plaadist eemale, mille tulemusena elektroskoop tühjeneb. Plaadi positiivse laengu korral tõmmatakse plaadi pinnast väljalöödud elektronid plaadile uuesti tagasi ja seepärast elektroskoobi laeng ei muutu.

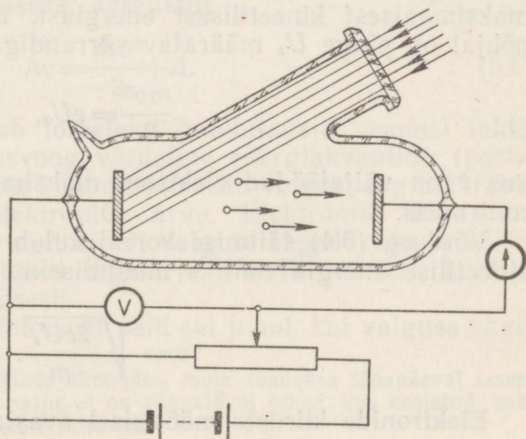
Kui valgusvoo teele panna ette tavaline klaas, siis tsinkplaadi negatiivne laeng enam ei kao ükskõik kui intensiivne valgusvoog ka oleks. Teades, et klaas neelab ultraviolettkiiri, võib sellest katsest järeldada, et fotoefekti põhjustab just spektri ultraviolettkiirgus. Seda iseenesest lihtsat fakti pole valguse laineteooriaga võimalik selgitada. Arusaamatuks jääb see, miks väikese sagedusega valguslained ei suuda plaadist elektrone välja lüüa isegi siis, kui võnkumiste amplituud valguslaines on hiiglasuur.

Fotoefekti seadused. Fotoefektist täielikuma pildi saamiseks tuleb välja selgitada, millest sõltuvad aine pinnast väljalöödud elektronide arv ja nende kiirus.

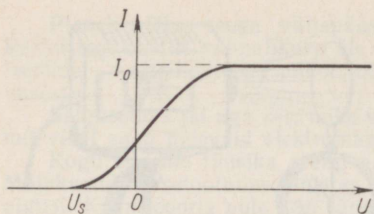
Lihtsast, elektroskoobist ja metallplaadist koosnevast katseseadmest nendeks uuringuteks ei piisa. Katse tuleb teha vaakumis ja selleks on sobiv kasutada kahe elektroodiga klaasanumat, millest on õhk välja pumbatud (joon. 158). Valgus pääseb anumasse «kvartsaknakese» kaudu, mis on (erinevalt tavalisest klaasist) läbipaistev mitte ainult nähtavale valgusele, vaid ka



Joon. 157



Joon. 158



Joon. 159

ultraviolettkiirgusele. Elektroodidele antakse pinge, mida saab potentsiomeetriga muuta ja voltmeetriga mõõta.

Patarei negatiivse poolusega (joonise 158 järgi vasakpoolne) ühendatud elektroodi valgustamisel hakkab see emiteerima elektrone, mis elektriväljas liikudes tekitavad elektrivoolu. Jättes valgusvoo muutumatuks ja suurendades pinget, hakkab voolutugevus kasvama. Mingil pingel saavutab vool maksimaalväärtuse ja edasisel pinge suurendamisel enam ei kasva (joon 159). Voolutugevuse maksimaalväärtust nimetatakse **küllastusvooluks**. Küllastusvoolu tugevuse määrab ilmselt sekundi jooksul elektroodilt emiteerunud elektronide arv. Väiksel pingel ei jõua kõik valguse poolt väljalöödud elektronid teisele elektroodile.

Muutes selles katses valgusvoo suurust, õnnestus kindlaks teha lihtne sõltuvus: **valguse poolt metalli pinnast ühes sekundis väljalöödud elektronide arv on võrdeline valgusvooga**. Selles pole midagi ootamatut — mida suurem on metallile langeva valguskiirte kimbu energia, seda efektiivsem on valguse toime.

Nüüd peatume elektronide kiiruste (või nende kineetilise energia) mõõtmisel. Joonisel 159 toodud graafikust on näha, et fotovoolu tugevus on nullist erinev ka siis, kui pinge on null. Voolutugevus pole null sellepärast, et osa lahtilöödud elektrone jõuab parempoolsele elektroodile (vt. joonis 158). Muutes patarei polaarsust, hakkab voolutugevus vähenema ja muutub mingil pingel U_s nulliks. See tähendab, et kõik elektronid lähevad tagasi elektroodile, millest nad välja löödi.

Pinge U_s suurus sõltub valguse poolt väljalöödud elektronide maksimaalsest kineetilisest energiast. Energia jäävuse seaduse põhjal on pinge U_s määratav võrrandiga

$$\frac{mv^2}{2} = eU_s, \quad (6.4)$$

kus v on väljalöödud elektroni maksimaalne kiirus ja m elektroni mass.

Võrduse (6.4) täitmise korral kulub elektrivälja töö elektroni kineetilise energia nulliks muutmiseks. Järelikult,

$$v = \sqrt{\frac{2eU_s}{m}}. \quad (6.5)$$

Elektronide kiiruste mõõtmisel avastati täiesti ootamatu tõi-

asi: fotoelektronide kiirus ei sõltu üldse valgustatusest ja on määratud ainult valguslaine sagedusega.

Valguse elektromagnetteooria seisukohast on see fakt mõistetamatu, sest mida suurem on valgustatus, seda suuremad jõud valguslaine elektri- ja magnetvälja poolt elektronile mõjuvad.

85. FOTOEFEKTI TEOORIA

Fotoefekti seadused õnnestus A. Einsteinil selgitada 1905. aastal tänu M. Plancki ideede edasiarendamisele. Plancki ideede põhjal võis teha järelduse, et valgust kiiratakse portsjonite kaupa. Iga sellise portsjoni energia E määratakse valemiga

$$E = hv,$$

kus v on võnkumiste võnkesagedus valguslaines ja h on võrdetegur, mida nimetatakse Plancki konstandiks. Plancki konstandi arvuline väärtus on väga väike: $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s.

Faktist, et valgust kiiratakse portsjonite kaupa, ei järeldu veel valguskiirte kimbu enda pidetu struktuur. Vihm langeb maale piiskadena, kuid see ei tähenda seda, et tekkinud niredes voolav vesi koosneb jagamatutest osakestest — piiskadest. Üksnes katseiliselt kindlakstehtud fotoefekti seadustes nägi A. Einstein veenvat tõestust selle kohta, et valgust ainult ei kiirata, vaid ka neelatakse portsjonite kaupa.

Niisiis, kiiratud valgusenergia portsjon $E = hv$ säilitab oma individuaalsuse ka valguse levimise protsessis. Neelduda võib ainult kogu portsjon tervikuna. Seepärast saabki fotoelektroni energiat leida energia jäävuse seaduse põhjal. Valgusportsjoni energia hv kulub niinimetatud väljumistöö A (töö, mida tuleb teha elektroni eemaldamiseks metallist) tegemiseks ja elektronile kineetilise energia andmiseks. Järelikult

$$hv = \frac{mv^2}{2} + A. \quad (6.6)$$

Võrrand (6.6) selgitab fotoefekti puudutavaid peamisi fakte. Einstein järgi on valgusvoog võrdeline energiakvantide (portsjonite) arvuga valguskiirte kimbus, mistõttu valgusvoog määrabki metallist väljalöödud elektronide arvu. Elektronide kiirus on valemi (6.6) põhjal määratud ainult valguse sagedusega ja väljumistööga, mis sõltub metalli liigist ja metalli pinnast, kuid ei sõltu valguse intensiivsusest¹.

Iga aine puhul tekib fotoefekt vaid sel juhul, kui valguse sage-

¹ Väga võimsates valguskiirte kimpudes, mida saadakse tänapäeval laseritega, on valguskvante niivõrd palju, et on võimalikud juhud, kus neelatud kahe kvandi energia antakse üle ühele elektronile.

dus v on mingist minimaalsest sagedusest v_m suurem. Kui $v \leq v_m$, siis fotoefekti ei teki. Elektroni väljarebimiseks metallist tuleb isegi elektronile kineetilist energiat andmata teha väljumistöö A . Valguskvandi energia peab olema väljumistööst suurem või vähemalt võrdne sellega:

$$h\nu \geq A. \quad (6.7)$$

Siit järeldub, et

$$v_m = \frac{A}{h}. \quad (6.8)$$

Fotoefektil, nagu räägitakse, on iga aine jaoks olemas **pikalaine** ehk **punane piir**. Just sellega seletubki fotoefekti kustumine katses, kus valguskiirte kimbu teele pandi ette klaasplaat. Klaas ei lase ultraviolettkiiri läbi, kuid tsingi korral asub fotoefekti punane piir ultraviolettkiirguse piirkonnas.

Einsteini võrrandist (6.6) saab määrata Plancki konstandi h väärtuse. Selleks on vaja teada valguse sagedust ν , väljumistööd A ja ära mõõta fotoelektronide kineetiline energia. Tehtud mõõtmised ja arvutused andsid sama tulemuse, $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J·s, mille sai Planck hoopis teistsuguse nähtuse, soojuskiirguse uurimisel. Erinevate meetoditega leitud Plancki konstandi väärtuste kokkulangemine on tugev argument oletuse kasuks, et aine kiirgus ja neelab valgust portsjonite kaupa.

86. FOOTONID

Soojuskiirgus ja fotoefekt annavad tunnistust sellest, et kiirgumisel ja neeldumisel käitub valgus osakeste voona, kusjuures osakeste energia $E = h\nu$ sõltub sagedusest. Valguskvant (-portsjon) osutus ootamatult väga sarnaseks sellele, mida tavaliselt nimetatakse osakeseks. Kiirgumisel ja neeldumisel avastatud valguse omadusi nimetatakse **korpuskulaarseteks** (korpuskul tähendab «aineosakest»). Valgusosakesele endale pandi nimeks **footon** ehk **valguskvant**.

Footon, niisama nagu osakesedki, omab kindlat energiat $h\nu$. Veelgi enam, footoni mass ja impulss on samuti diskreetsed nagu mistahes teistel osakestelgi.

Relatiivsusteooria järgi on energia alati seotud massiga — $E = mc^2$. Kuna footoni energia on $h\nu$, siis on footoni mass

$$m = \frac{h\nu}{c^2}. \quad (6.9)$$

Footonil pole seisumassi m_0 , s. t. footon ei eksisteeri paigal-

olekus. Tekkimisel aga omandab footon kohe kiiruse c . Valemiga (6.9) määratud footoni mass on kiirusega c liikuva footoni mass.¹

Footoni teadaoleva massi ja kiiruse saab leida footoni impulsi

$$p = mc = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda}. \quad (6.10)$$

Footoni impulsi suund ühtib valguskiire levimissuunaga.

Mida suurem on sagedus, seda suurem on footoni energia ja impulss ning seda selgemalt avalduvad valguse korpuskulaarsed omadused. Plancki konstandi väiksuse tõttu on nähtava valguse footonite energia ääretult tühine. Rohelisele valgusele vastavate footonite energia on kõigest $4 \cdot 10^{-12}$ ergi.

Nõukogude füüsik Sergei Ivanovitš Vavilov tegi aga oma hämmastavate katsetega kindlaks, et inimese silm, see kõige peenem «aparaat» on võimeline reageerima üksikute kvantidega mõõdetavale valgustatuse erinevusele.

Teadlased olid seega sunnitud sisse tooma kujutluse valgusest kui osakeste voost. See võib paista Newtoni korpuskulaarteooria juurde tagasipöördumisena. Ei tohi aga unustada, et valguse interferents, difraktsioon ja polarisatsioon räägivad kindlalt valguse laineliste omaduste olemasolust. Valgusel on omapärased dualistlikud (kahesugused) omadused. Valguse levimisel ilmnevad tema lainelised, vastastikusel mõjus ainega (kiirgumisel ja neeldumisel) aga korpuskulaarsed omadused. Kõik see on esialgu imelik ja harjumatu. Me ei suuda seda endile piltlikult ette kujutada, kuid ometi on see fakt. Meil puudub võimalus kujutada täiel määral ette mikromaailmas toimuvaid protsesse, sest need protsessid erinevad täiesti makroskoopilistest nähtustest, mida on inimkond miljonite aastate jooksul jälginud ja mille põhiseadused formuleeriti täielikult XIX sajandi lõpuks.

Aja jooksul avastati omaduste dualism elektronidel ja teistel elementaarosakestel. Elektronil on korpuskulaarsete omaduste kõrval ka lainelised omadused, sest elektronide difraktsioon on katseiliselt kindlaks tehtud.

Mikroobjektide ebatavalisi omadusi kirjeldatakse kvantmehhaanika, mikroosakeste liikumise tänapäeva teooria abil. Newtoni mehhaanika osutub siin vastuvõetamatuks. Kvantmehhaanika uurimine jääb aga koolifüüsika programmi raamest välja.

¹ Valemiga (6.9) määratud footoni lõplik mass pole relativistliku valemiga

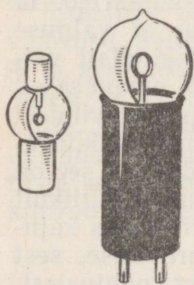
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

vastuolus, sest footoni korral muutuvad nii lugeja ($m_0=0$) kui ka nimetaja ($\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}=0$, kui $v=c$) üheaegselt nulliks.

Fotoefekti avastamine oli valguse olemuse sügavama mõistmise seisukohalt väga suure tähtsusega. Teaduse väärtus ei seisa ainult meid ümbritseva maailma keerulise ja mitmekülgse ehituse selgitamises, vaid ka selles, et teadus annab meie kätte vahendid, mida kasutades saab täiustada tootmist ja parandada ühiskonna materiaalseid ja kultuurilisi elutingimusi.

Fotoefekti kaasabil asendus tummfilm helifilmiga. Tänu fotoefektile saame nüüd edasi anda liikuvaid kujutisi. Fotoelektron-aparaatide kasutamine võimaldas luua tööpinke, mis teevad detaili etteantud jooniste järgi valmis inimese vähimagi osavõtuta. Fotoefektil põhinevad aparaadid kontrollivad toodete mõõtmeid paremini kui inimene, nad lülitavad õigeaegselt sisse ja välja majakaid, tänavavalgustust jne.

Fotoefekti kasutamine sai teoks tänu üpris täiuslike seadiste — fotoelementide — leiutamisele.



Joon. 160

Kaasaegne fotoelement kujutab endast klaaskolbi, mille sisepind on osaliselt kaetud metallikihiga, mille elektronide väljumistöö on väike (joon. 160).¹ Metallikiht on katoodiks. Valgus pääseb kolbi läbipaistva «aknakese» kaudu. Kolvi keskel asub fotoelektrone püüdev traatsilmus või metallkettake, anood, mis ühendatakse vooluallika positiivse poolusega. Tänapäeval kasutatavad fotoelemendid on võimelised reageerima nähtavale valgusele ja isegi infra-punastele kiirtele.

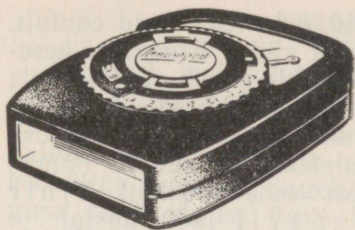
Valguse langemisel fotoelemendi katoodile tekib ahelas elektrivool, mis käitab ühe või teise rele. Fotoelemendi kombinatsioon releega võimaldab konstrueerida palju mitmesuguseid «nägevaid» automaate, millest lihtsaim on metroo automaat. Viimane hakkab tööle (sulgeb läbipääsu) valguskiirte kimbu katkestamisel, kui enne valguskiirte katkestamist ei lastud automaati viiekopikalist raha.

Taalised automaadid võivad ära hoida avarisiid. Fotoelement peatab tehases võimsa pressi peaaegu silmapilkselt, kui inimese käsi libiseb ohtlikku tsooni.

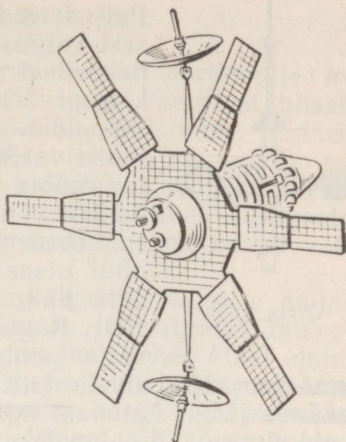
Televisiooni saatetoru muundab keerulisi valgussignaale elektrisignaale. Pärast võimendamist antakse need signaalid televisioonisaatjasse. Kõiki fotoelementide kasutusalasid on võimatu üles lugeda.

Peale selles peatükis käsitletud fotoefekti, mida nimetatakse välisfotoefektiks, kasutatakse veel laialt pooljuhtides esinevat sise-

¹ Tavaliselt kantakse klaasile kõigepealt õhuke hõbedakiht (aluskiht) ja sellele valgustundlik kiht (näiteks tseesiumiühendite kiht).



Joon. 161



Joon. 162

fotoefekti. Sisefotoefekti kasutatakse fototakististes — seadistes, mille takistus sõltub valgustatusest. Peale nimetatute on veel konstrueeritud pooljuhtfotoelemente, mis muundavad valgusenergia vahetult elektrienergiaks ja võivad seetõttu olla vooluallikateks. Neid fotoelemente saab kasutada valgustatuse mõõtmiseks. Mainitud põhimõttel töötavad näiteks ekspanomeetrid (joon. 161) ja ka kõikidele kosmoselaevadele paigaldatavad päikesepatareid (joon. 162).

88. VALGUSE RÕHK

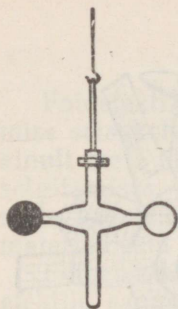
Maxwelli rajatud valguse elektromagnetiteooria ennustas, et kõikide teiste toimete kõrval peab valgus avaldama tema teele jäävatele takistustele ka rõhku.

Valguslaine elektrivälja mõjul hakkavad elektronid kehases võnkuma. Korrapäraselt liikuvaile elektronidele, nagu voolule, mõjub valguslaine magnetväli jõuga, mille suund ühtib laine levimise suunaga. See jõud põhjustabki valguse rõhku.

Maxwelli teooria õigsuse tõestamiseks oli tähtis mõõta valguse rõhku.



P. N. Lebedev



Joon. 163

Paljud teadlased püüdsid seda teha, kuid edutult, sest valguse rõhk on väga väike. Eredal päikesepaistelisel päeval mõjub ühele pinna ruutmeetrile kõigest $4 \cdot 10^{-6} \text{N}$ suurune jõud. Kehale langeses soojendab valgus keha, mistõttu tekib rida valguse rõhku varjutavaid kõrvalefekte. Esimesena õnnestus mõõta valguse rõhku vene füüsikul Pjotr Nikolajevitš Lebedevil 1900. aastal.

Lebedevi katseseade koosnes peenikese klaasniidi otsas rippuvast väga kergest vardakesest, mille külge oli kleebitud kerged tiivakesed (joon. 163). Kogu seade asus klaasnõus, millest oli õhk välja pumbatud. Valgus langes ühel pool vardakesest asuvatele tiivakestele. Rõhu suurust sai määrata klaasniidi väände järgi. Anumast aga ei saa ju kogu õhku välja pumbata, vaid sinna jääb õhumolekule, mis tiivakeste ja anuma seinte ebaühtlasest soojenemisest tingitud liikumise tõttu väänavad samuti klaasniiti. Peale selle mõjutab niidi väänet ka tiivakeste erinevate pindade ebaühtlane soojenemine (valguse poole pööratud pind soojeneb vastaspinna rohkem).

Tolleaegse katsetehnika madalale tasemele vaatamata suutis Lebedev ületada kõik need raskused. Ta võttis väga suure anuma ja tegi tiivakesed väga õhukesteks. Valguse poolt tahketele kehadele avaldatava rõhu olemasolu oli lõppeks tõestatud ja selle rõhu suurus mõõdetud. Rõhu suurus langes ühte Maxwelli poolt ennustatuga. Pärast kolmeaastast tööd õnnestus Lebedevil teha veel keerukam katse — mõõta valguse poolt gaasidele avaldatavat rõhku.

Valguse kvantiteooria loomisega sai valguse rõhku selgitada üsna lihtsalt. Footonid omavad impulssi ja kui aine neid neelab, lakkavad footonid olemast. Impulsi jäävuse seaduse põhjal aga annavad footonid oma impulsi neid neelavale kehale, mistõttu liikumatu keha hakkab liikuma. Keha impulsi muutumine tähendab mehhaanika seaduste järgi seda, et kehale mõjub jõud.

Kuigi valguse rõhk on tavalistes tingimustes väga väike, võib ta siiski osutada oluliseks. Huvitav lugu juhtus Ameerika tehiskaaslasega «Echo 1». Pärast tehiskaaslase orbiidile jõudmist täideti tema suur polüetüleenist kest suruõhuga. Tekkis umbes 30 m läbimõõduga kerge kera. Ootamatult selgus, et päikesekiirte rõhu mõjul nihkus selle kera orbiit ühe tiiruga 5 m võrra, mille tulemusena tehiskaaslane püsis orbiidil alla 8 aasta, kuigi arvutuste järgi pidi tehiskaaslane tiirlema orbiidil 20 aastat.

Tähtede sisemuses, kus temperatuur küünib mõnekümne miljoni kraadini, peab elektromagnetkiirguse rõhk olema hiiglasuur. Koos gravitatsioonijõududega mängib see rõhk tähesisestes protsessides olulist rolli.

Tulevikus võib-olla luuakse niinimetatud footonraketid, mille mootorite reaktiivveojõu tekitab ülivõimsa valguskiirte kimbu rõhk.

Üksikud molekulid neelavad valgusenergiat portsjonite *hν* kaupa. Nähtava valguse ja ultraviolettkiirguse energiast piisab paljude molekulide lõhkumiseks. Molekulide lõhkumises ilmneb **valguse keemiline toime**, sest molekulide mistahes muutumine on keemiline protsess. Sageli saab pärast molekulide lõhkumist valguse poolt alguse terve keemiliste muutumiste ahel. Kangaste pleegitamise päikese käes ja päevituse tekkimine on näited valguse keemilisest toimest.

Tähtsaimad keemilised reaktsioonid kulgevad valguse mõjul puude lehtedes ja rohus, okaspuude okastes ja paljudes mikroorganismides. Päikese mõjul kulgevad rohelises lehes Maal eluks hädavajalikud protsessid, mis annavad meile toitu ja hingamiseks vajalikku hapnikku. Meie organism, samuti kõrgemate loomade organismid, ei suuda puhtaid keemilisi elemente ühendada keerukaks aatomite ahelaks — orgaanilise aine molekuliks. Meie hingamine mürgitab pidevalt atmosfääri. Tarvitades eluks vajalikku hapnikku, hingame me välja süsihappegaasi (CO_2) — some hapniku ja muudame õhu hingamiseks kõlbmatuks. Õhku on tarvis pidevalt puhastada. Seda teevad meie eest taimed maismaal ja mikroorganismid ookeanides.

Lehed neelavad õhust süsihappegaasi ja lagundavad selle molekule süsinikuks ja hapnikuks. Nagu vene bioloog K. A. Timirjazev kindlaks tegi, toimub see klorofüllimolekulis Päikese spektri punaste kiirte toimel.¹ Liites süsinikahelasse teiste, juurtega maa seest võetud elementide aatomeid, valmistavad taimed valkude, rasvade ja süsivesikute molekule — toitu meile ja loomadele.

Kõik see toimub päikesekiirte energia arvel, kusjuures eriti tähtis on siin mitte energia ise, vaid energia juurdevoolu vorm. **Fotosüntees** (nii seda protsessi nimetatakse) kulgeb ainult kindla spektrivahemiku valguse toimel.

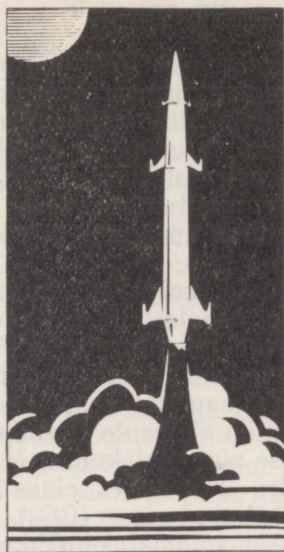
Fotosünteesi mehhanism on veel lõplikult välja selgitamata. Kui see mehhanism aga täielikult selgeks saab, algab inimkonnale arvatavasti uus ajastu. Siis võime valke ja teisi orgaanilisi aineid valmistada helesinise taevaalaotuse all otse retortides.

90. FOTOGRAAFIA

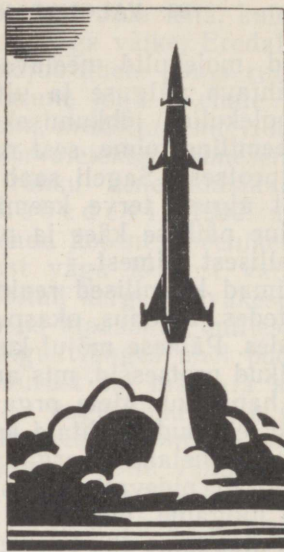
Valguse keemiline toime on ka **fotograafia** aluseks.

Fotoplaadi valgustundlik kiht koosneb hõbebromiidi (AgBr) väikestest kristallikestest. Valguskvandi langemisel hõbebromiidi molekulile viimane laguneb ja eraldub hõbeda aatom. Sellel protsessil eraldunud metallilise hõbeda hulk on aga väike.

¹ Taimede roheline värvus on tingitud nende klorofüllisisaldusest.



a



b

Joon. 164

Tõepoolest, võib panna tähele, et valguse kätte jäetud fotoplaad (või film) aja jooksul tumeneb, kuid tumeneb vähe. Tumene-
mist põhjustab metallilise hõbeda tekkimine. Valguse toimel
fotoplaadil tekkinud kujutist nimetataksegi seepärast **varjatud
kujutiseks**.

Fotoplaadi töötlemise esimeseks operatsiooniks on **ilmutamine**.
Fotoplaadit pannakse hüdrokinooni, metooli ja teiste ainete lahuse-
sesse, mille toimel eraldub hõbe kõikidest hõbebromiidi kristalli-
kestest, mille üksikud molekulid valguse toimel lagunesid. Foto-
plaadil saadakse objekti **negatiivkujutis**, milles objekti heledad
kohad on tumedad ja vastupidi (joon. 164, a).

Järgmine operatsioon, **kinnistamine**, seisneb selles, et järele-
jäänud hõbebromiidi kristallikesed lahustatakse ja pestakse foto-
plaadilt maha, tänu millele fotoplaadit lakkab olemast valgustundlik.
Kinnistamiseks pannakse fotoplaadit naatriumtiosulfaadi lahusesse.
Pärast pesemist on negatiiv valmis.

Pannes negatiivi fotopaberile, s.t. paberile, mille peale on
kantud õhuke valgustundlik kiht, saame pärast valgustamist ja
negatiiviga analoogilist keemilist töötlemist **positiivkujutise** (joon.
164, b). Positiivil antakse objekti heledad ja tumedad toonid edasi
juba õigesti.

Fotograafiliselt on võimalik küllaltki täpselt ja pikaks ajaks

fikseerida sündmusi, mis lähevad tagasipöördumatult ikka kaugemasse ja kaugemasse minevikku. Suure tähtsusega on fotograafia teaduse jaoks, sest kiireid protsesse (näiteks pikselööki) võib jäädvustada fotol ja neid siis hiljem detailselt uurida.

Objekte, mis annavad nii nõrka valgust, et nad pole silmaga eraldatavad, saab fikseerida fotoplaadil pika säritusaja jooksul, s. t. fotoplaadi pikaajalisel valgustamisel. Just sellepärast uuritaksegi meist väga kaugel asuvaid objekte nagu galaktika, fotode põhjal.

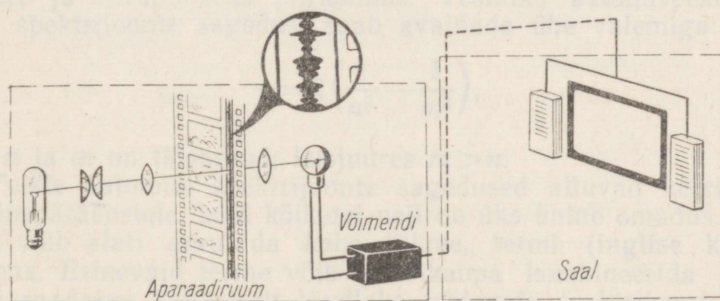
Kaasaegne tehnika võimaldab pildistada mitte ainult päevalguses, vaid ka infrapunastes kiirtes, s. t. pimedas.

91. HELI SALVESTAMINE JA TAASESITAMINE KINOS

Kõigest nelikümmend aastat tagasi oli kinol suur puudus — inimesed liikusid ekraanil, liigutasid huuli, kuid elava inimkõne asemel tuli vaatajail rahulduda selgitava teksti lugemisega. Kino võitis palju, kui samaaegselt filmi näitamisega oli kuulda kangelaste vestlust, tuule undamist, lahingukära jne. Kõik see sai võimalikuks tänu heli salvestamisele optilisel meetodil ja heli taasesitamisele fotoelementide abil.

Kui te vaatate filmilindi tükki, siis näete tema ühel äärel niinimetatud **helirada**. Heli on salvestatud filmilindile muutuva laiusega tumeda ribana. See on heli «foto». Helisalvestusseadmed on üsna keerulised, kuid nende töötamis põhimõte taandub sellele, et helivõnkumised, s. t. õhu rõhu võnkumised muundatakse elektri-voolu võnkumisteks, mille vahendusel kantakse filmilindile helirada.

Fotoelement muundab heli «pildi» uuesti heliks. Seda tehakse järgmiselt. Kinoprojektoris liigub filmilindi helirada läbipaistmatus trumli oleva väikese ava ees. Trumli sees asub fotoelement.



Joon. 165

Helirada valgustatakse kitsa valguskiirte kimbuga. Helirajast läbitunginud valgus langeb trumlis oleva ava kaudu fotoelemendile (joon. 165). Fotoelemendile langev valgusvoog muutub pidevalt, mistõttu muutub ka voolutugevus fotoelemendi ahelas. Vooluvõnkumised võimendatakse kõigepealt vajaliku võimsuseni ja suunatakse seejärel valjuhäälditesse. Valjuhääldites muunduvad elektrivoolu võnkumised uuesti heliks.

Harjutus 9

1. Kas keemilistel reaktsioonidel tekkinud kiirgus võib olla tasakaaluline?
2. Maa pinnale langevad päikesekiired peavad tekitama fotoefekti. Kas see tähendab, et maakera laeng on positiivne?
3. Joonistage fotoelektronide kineetilise energia valguse sagedusest sõltuvuse ligikaudne graafik. Kuidas saab selle graafiku abil määrata Plancki konstanti suurust?
4. Joonistage automaadi skeem, mis peatab elekriajami, kui inimese käsi satub ohtlikku tsooni.
5. Plaati valgustatakse ereda valguskiirte kimbuga. Kas valguse rõhk plaadi valgustatud ja varjulise küljele on ühesuurune?
6. Kas valguse rõhk on suurem siis, kui valgus langeb peegelpinnale või mustale pinnale?
7. Mingis keskkonnas on valguslaine pikkusele $\lambda = 3 \cdot 10^{-5}$ cm vastava footoni energia $E = 4,4 \cdot 10^{-12}$ ergi. Leida selle keskkonna absoluutne murdumisnäitaja n .
8. Leida lainepikkusele $\lambda = 5 \cdot 10^{-7}$ m vastava energiakvandi suurus E .
9. Kui suur on metallipinda valgustava valguse lainepikkus λ , kui fotoelektronide kineetilise energia $E_k = 4,5 \cdot 10^{-20}$ J ja elektronide väljumistöö metallist $A = 7,6 \cdot 10^{-19}$ J?
10. Leida fotoefekti punase piiri sagedus ν_m , kui elektroni väljumistöö metallist $A = 3,3 \cdot 10^{-19}$ J.

VII. AATOMIFÜÜSIKA

92. SPEKTRITE SEADUSPÄRASUSED

Aatomid, nagu teate, kiirgavad rangelt kindlate lainepikkustega elektromagnetkiirgust. Missugused need lainepikkused siis on?

Osutub, et aatomi joonspektri lainepikkuste vahel valitsevad kindlad seaduspärasused. Esimese lihtsa empiirilise valemi, mille abil sai arvutada lihtsaima, vesiniku aatomi poolt kiiratava valguse lainepikkusi või sagedusi, andis šveitsi õpetaja **Johann Jakob Balmer** juba 1885. aastal. Kõik vesinikuaatomi kiirgusspektri nähtavate joonte (vt. värviline kleebis joon. V, 3) sagedused rahuldavad väga lihtsat seost:

$$\nu = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (7.1)$$

kus $m = 3, 4, 5, \dots$ (täisarvud) ja R on konstant. See valem vastab tegelikkusele väga täpselt, mistõttu võib arvata, et valem (7.1) väljendab spektrijooni kiirgavate aatomite mingit seestmist seaduspärasust. Kõige huvitavam ja üllatavam on see, et vesiniku aatomispektri nähtavatele joontele vastavate valgusvõnkumiste sagedused on määratud järjestikuste täisarvudega m .

Kõik vesiniku aatomispektri nähtavad jooned moodustavad seeria, mille erinevad jooned vastavad erinevatele m väärtustele. Seda seeriat hakati nimetama **Balmeri seeriaks**.

Hiljem leiti analoogilised vesiniku aatomispektri seeriad ultraviolet- ja infrapunases piirkonnas. Vesiniku aatomispektri kõikide spektrijoonte sagedusi saab avaldada ühe valemiga:

$$\nu = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (7.2)$$

kus n ja m on täisarvud, kusjuures $m > n$.

Teiste aatomite spektrijoonte sagedused alluvad keerukatele seaduspärasustele, kuid kõikidel neil on üks ühine omadus. Sage- dust võib alati arvutada kahe liikme, **termi** (inglise keelest) vahena. Erinevaid terme võib paarikaupa kombineerida ja iga kord saadakse katseliselt kindlaks tehtavate spektrijoonte sagedused.

Kohe kerkib küsimus — missugune on elektronide liikumise

mehhanism aatomis, mis põhjustab ülalmärgitud lihtsaid seaduspärasusi spektris.

Arvatavasti peab spektrijoonte seeria tekitama üks üldine mehhanism. Maxwelli teooria järgi peab kiiratud lainete võnkesagedus ühtima elektroni võnkesagedusega aatomis. Kuidas aga seletada väga suure arvu spektrijoonte tekkimist? Kuidas saab ühel elektronil olla palju omavõnkesagedusi? Makroskoopilistel kehal on, tõsi küll, terve hulk omavõnkesagedusi, kuid neil on põhisageduse kõrval terve rida ülemtoone, mille sagedused on põhisageduse kordsed (vt. X kl. õpik § 41). Valguse puhul midagi taolist aga ei esine.

Kiirguse joonspektrit saab selgitada ainult siis, kui tunneme aatomi ehitust.

93. AATOMI EHITUS

Aatomi ehitusest olete juba mitu korda kuulnud. Kaheksanda klassi füüsika- ja keemiatundides räägiti, et aatomi keskel asub positiivselt laetud tuum, mille ümber tiirlevad elektronid, nagu planeedid Päikese ümber. Elektronide arv võrdub antud keemilise elemendi järjenumbriga Mendelejevi tabelis.

Aatomi keeruka ehituse avastamine oli kaasaja füüsika tekkimise tähtsaim etapp. See etapp vajutas jälje kogu füüsika edasisele arenemisele. Nüüd seisab meil ees tutvumine aatomi ehituse kvantitatiivse teooriaga, mis selgitab aatomite spektrite seaduspärasusi. Aatomi ehituse teooria arengus avastati uued mikroosakeste liikumisseadused — **kvantmehhaanika seadused**.

Pärast seda, kui teadlased taipasid, et aatom pole jaotamatu tervik, vaid omab keerukat seesmist struktuuri, ei suutnud nad kohe luua aatomi ehitusest õiget ettekujutust. Esimese aatomimudeli lõi kuulus inglise füüsik, elektroni avastaja Joseph John Thomson. Thomsoni arvates täidab positiivne laeng ühtlase tihedusega kogu aatomi ruumala. Lihtsaim aatom, vesiniku aatom, kujutab endast positiivselt laetud kera raadiusega umbes 10^{-8} cm (aatomi mõõde), mille sees asub elektron (joon. 166). Ergastamata aatomis asub elektron kera keskmes.

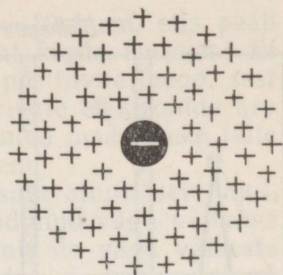
Keerukamates aatomites on positiivselt laetud kera mitu elektroni, mille tõttu need aatomid sarnanevad rosinakeeksiga, kusjuures rosinate osas esinevad elektronid.

Thomsoni aatomimudeli abil sai selgitada kindla sagedusega elektromagnetlainete kiirgamist aatomi poolt. Kindla sagedusega elektromagnetlaineid kiirgavad tasakaaluolekust väljaviidud võnkuvad elektronid. Kirjeldatud aatomimudeli põhjal aga ei saanud selgitada ei aatomi poolt kiiratud spektrijoonte suurt arvu ega empiiriliselt leitud spektrite seaduspärasusi. Vähem tähtis pole

ka see, et Thomsoni aatomimudelist ei selgu, millega on määratud aatomi mõõtmed.

Peamine fakt, mis sundis Thomsoni aatomimudelist loobuma, oli see, et positiivse laengu jaotus Thomsoni aatomimudelisis osutus katseandmetele vasturääkivaks.

Aatomi positiivse laengu jaotuse kindlaksmääramise katsed, mida esimesena tegi kuulus inglise füüsik Ernest Rutherford, olid aatomi ehituse mõistmisel niivõrd suure tähtsusega, et nendele tuleb peatuda üksikasjalikumalt, kui seda tehti VIII klassi füüsikakursuses. Nüüd saate te nende katsete mõttest ja tähtsusest ka paremini aru.



Joon. 166

94. RUTHERFORDI KATSED

Elektronide kogumass on aatomi massist tuhandeid kordi väiksem. Kuna aatom on tervikuna neutraalne, langeb aatomi mass järelikult aatomi positiivselt laetud osale.

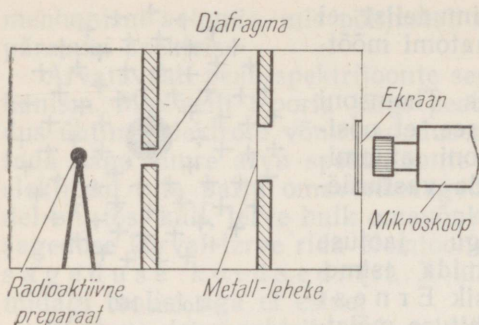
1906. aastal soovitas Rutherford aatomi laengu, järelikult ka aatomi massi jaotuse uurimiseks kasutada α -osakesi. Nagu te VIII klassi füüsikakursusest mäletate, kiirgavad α -osakesi radium ja mitmed teised elemendid. α -osakeste mass on elektroni massist umbes 8000 ja laengu absoluutväärtus elektroni omast kaks korda suurem. α -osakesed on täielikult ioniseeritud heeliumi aatomid, mis liiguvad väga suure kiirusega — nende kiirus küünib $1/15$ valguse kiirusest.

Rutherford pommitas α -osakesetega raskete elementide aatomeid. Väikese massi tõttu ei saa elektronid α -osakeste trajektoori märgatavalt muuta. Siin esineb analoogia mõnekümne grammise kivikesega, mis vastu autot põrgates ei suuda muuta auto kiirust.

Rutherfordi katseseade skeem on kujutatud joonisel 167. Radioaktiivse preparaadi poolt kiiratud α -osakesed läbisid diafragma ja tungisid seejärel uuritavast metallist (kuld, vask jt.) valmistatud õhukesest lehekesest läbi. Pärast metall-lehekesest läbitungimist



E. Rutherford



Joon. 167

langesid hajunud α -osakesed tsinksulfiidiga kaetud ekraanile. α -osakeste pörkumisel vastu ekraani tekkisid sähvatused (stsintillatsioonid), mida sai jälgida läbi mikroskoobi.

Kui katseseades tekitati kõrge vaakum ja α -osakeste ees polnud metall-lehekest, tekitas kitsas α -kiirte kimp ekraanil stsintillatsioonidest tingituna valgusriba. Pannes α -kiirte teele ette metall-lehe, langesid α -osakesed hajumise tõttu ekraani suuremale pinnale.

Nende katsetega avastati ootamatult, et väike arv α -osakesi (kahetuhandest umbes üks) hajus suuremate kui 90° nurkade all. Hiljem Rutherford tunnistas, et soovitades oma õpilastel teha α -osakeste hajumise katset, ei uskunud ta ka ise katsete positiivsesse tulemusse. «See oli kõige uskumatum sündmus minu elus,» rääkis Rutherford. «See oli peaaegu niisama uskumatu, kui te oleksite tulistanud 15-tollisest kahurist õhukest paberilehte, ning mürsk oleks pörkunud paberilehelt teie poole tagasi.»

Tõepoolest, Thomsoni mudeli põhjal sellist tulemust ennustada ei saanud. Kogu aatomi ruumalal ühtlaselt jaotunud positiivne laeng ei saa tekitada nii tugevat elektrivälja, mis suudaks α -osakest tagasi paisata. Maksimaalne kuloniline tõeke jõud

$$F_m = \frac{q_\alpha q_a}{R_a^2},$$

kus q_α on α -osakese laeng, q_a — aatomi positiivne laeng ja R_a — aatomi raadius. Ühtlaselt laetud kera elektrivälja on maksimaalne kera pinnal ja väheneb nullini kera keskpunktis. Sellest järeldub, et mida väiksem on aatomi raadius R_a , seda suurem tõeke jõud α -osakesele mõjub.

Selleks, et aatomi positiivne laeng suudaks α -osakest tagasi paisata, peab kulonilise elektrivälja potentsiaalne energia aatomi pinnal võrduma α -osakese kineetilise energiaga:

$$\frac{q_\alpha q_a}{R_a} = \frac{m_\alpha v_\alpha^2}{2}.$$

Viimasest võrdusest järeldub, et kui $R_a = 10^{-8}$ cm, siis peab q_a olema elektroni laengust umbes sadatuhat korda suurem.¹ Ei saa aga oletada, et aatomi sees on nii suur positiivne laeng, sest siis peaks ka positiivset laengut neutraliseerivate elektronide arv olema niisama suur. Nii suure hulga elektronide mass oleks jälle kogu aatomi massist tuhandeid kordi suurem.

Ilmselt saab aatom α -osakest tagasi paisata ainult sel juhul, kui aatomi positiivne laeng ja mass on koondunud väga väikesse ruumiossa. Rutherford tuligi ideele, et aatomis on väga väikeste mõõtmetega **aatomituum**, millesse on koondunud kogu aatomi positiivne laeng ja peaaegu kogu aatomi mass. Lugeses ära erinevate nurkade all hajutatud α -osakeste arvu, sai Rutherford hinnata aatomituumade mõõtmeid. Osutus, et aatomituumade diameeter on suurusjärgus 10^{-12} – 10^{-13} cm (erinevate elementide tuumade läbimõõdud on erinevad). Hiljem õnnestus määrata ka tuuma laeng. Mõõtes tuuma laengut elektroni laengu absoluutväärtustes, selgus, et **tuuma laeng võrdub täpselt antud keemilise elemendi järjenumbriga Mendelejevi tabelis.**

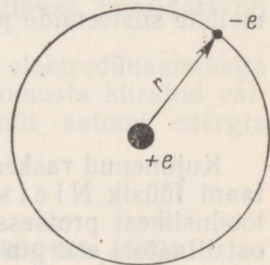
95. PLANETAARNE AATOMIMUDEL

Rutherfordi katsetest järeldub vahetult niinimetatud **planeetaarne aatomimudel**. Aatomi keskel asub positiivselt laetud aatomituum, millesse on koondunud peaaegu kogu aatomi mass. Kuna aatom on tervikuna neutraalne, peab aatomisiseste elektronide arv võrduma elemendi järjenumbriga Mendelejevi tabelis, sest tuuma positiivne laeng võrdus elemendi järjenumbriga.

Elektrostaatikast on selge, et elektronid ei saa aatomis paigal seista, sest siis nad langeksid tuumale. Elektronid tiirlevad aatomis kindlatel orbiitidel ümber tuuma nagu planeedid ümber Päikese. Elektronid tiirlevad ümber tuuma kuloniliste jõudude mõjul.

Lihtsaimaks aatomiks on vesiniku aatom, mille tuuma ümber tiirleb ainult üks elektron. Vesiniku aatomi tuuma laeng võrdub elektroni laengu absoluutväärtusega ja tuuma mass on elektroni massist umbes 1836,1 korda suurem. Vesiniku aatomi tuuma hakati nimetama **prootoniks** ja teda vaadeldi kui elementaarosakest. Aatomi mõõtmeteks on elektroni orbiidi raadius (joon. 168).

Kuivõrd tuuma mõõtmed on aatomi



Joon. 168

¹ Arvutage q_a suurus ise välja. Suuruste q_a , R_a , m_a ja v_a väärtused on teile tekstist teada.

mõõtmetest (elektroni mõõtmel on kaduvväikesed) mõnikümmend tuhat korda väiksemad, on aatom seest erakordselt tühi, kui mitte arvestada teda täitvat elektromagnetvälja. Aatom on tühjem kui meie päikesesüsteem, mille mõõtmel on Päikese mõõtmetest sadu ja planeetide mõõtmetest mõnikümmend tuhat korda suuremad. Kui aatomi raadius suureneks järsku maa orbiidi raadiuseni, siis oleks aatomiga võrdselt suureneva tuuma raadius Päikese raadiusest tuhat korda väiksem. (Kui meie Päike väheneks tuhat korda, näeksime me särava ketta asemel helendavat täppi.)

Niisiis, lihtne ja näitlik planetaarne aatomimudel toetub otsesetele katseandmetele. Planetaarne aatomimudel on α -osakeste hajutamise katsete selgitamisel täiesti hädavajalik, kuid ta ei selgita spektrite teadaolevaid seaduspärasusi. Veelgi enam, planetaarse aatomimudeliga pole võimalik ära seletada aatomi enese olemasolu ja aatomi püsivust. Elektronid liiguvad ju orbiitidel kiirendusega, kusjuures kiirendus on küllaltki suur. Maxwelli elektrodünaamika seaduste kohaselt peab kiirendusega liikuv laeng kiirgama elektromagnetlaineid, mille sagedus võrdub elektroni poolt sekundis ümber tuuma tehtud tiirude arvuga. Kiirgusega kaasneb energia vähenemine. Energiat ära andes peaksid elektronid läheneda tuumale niisama nagu läheneb tehiskaaslane atmosfääri ülakihtides pidurdumisel Maale. Newtoni mehhaanika ja Maxwelli elektrodünaamika seadustele tuginevad ranged arvutused näitavad, et elektrone peab sattuma tuuma tühise aja, umbes 10^{-8} sekundi jooksul ja aatom peaks seega hävima.

Tegelikult on aga aatomid väga püsivad ja võivad ergastamata olekus eksisteerida lõpmata kaua, ilma et nad kiirgaksid elektromagnetlaineid.

Katsele vasturääkiv järeldus, et kiirgusena äraantav energia põhjustab lõpuks aatomi paratamatu hävimise, tuleneb klassikalise füüsika seaduste rakendamisest aatomisisestele protsessidele. Siit järeldub, et klassikalise füüsika seadused pole aatomimõõtmeliste süsteemide puhul kasutatavad.

96. BOHRI POSTULAADID

Kujunenud raskest olukorrast leidis 1913. a. väljapääsu kuulus taani füüsik Niels Bohr, kes arendas edasi kvantettekujutisi looduslikest protsessidest. Bohr toetus Plancki poolt väljendatud ostsillaatori energia diskreetsuse ja Einsteini valguskvantide olemasolu ideele.

Einstein hindas Bohri poolt tehtut kui «kõrgeimat musikaalsust mõtlemises», mis Einsteini alati hämmastas. Toetudes üksikutele katseandmetele, tabas Bohr geniaalse intuitsiooni abil asja tuuma.

Järjekindlat aatomiteooriat Bohr aga ei loonud, vaid ainult sõnastas postulaatidena uue teooria põhialused. Seejuures ei heit-

nud Bohr klassikalise füüsika seadusi täielikult kõrvale — tema postulaadid pigem ainult piirasid teatud määral klassikalist liikumisteooriat.

Bohri teooria edu oli siiski hämmastav ja kõigile füüsikutele sai selgeks, et Bohr leidis teooria arendamiseks õige tee. Hiljem viis see tee mikroosakeste liikumise järjekindla teooria, kvantmehhaanika loomiseni.

Bohri esimene postulaat kõlab järgmiselt: aatom võib püsivalt viibida ainult kindlate energiatega E_n erilistes statsionaarsetes ehk kvantolekutes. Statsionaarsetes olekutes aatom energiat ei kiirga.

See postulaat on ilmses vastuolus klassikalise mehhaanikaga, mille kohaselt liikuv elektron võib omada mistahes energiat. Vasturääkiv on postulaat ka Maxwelli elektrodünaamikale, sest postulaat eeldab, et elektron võib liikuda kiirendusega, ilma et ta kiirgaks elektromagnetlaineid.

Bohri teise postulaadi kohaselt aatom kiirgab valgust ühest statsionaarsest olekust teise üleminekul. Kiiratud footoni energia võrdub statsionaarsetele olekutele vastavate energiatega:

$$h\nu_{mn} = E_m - E_n. \quad (7.3)$$

Võrdusest (7.3) järeldub, et kiirguse sagedus võrdub alati kahe

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h} = \frac{E_m}{h} - \frac{E_n}{h} \quad (7.4)$$

liikme (termi) vahega. Selline sageduse sõltuvus termidest oli varem katseliselt kindlaks tehtud.

Ka Bohri teine postulaat on Maxwelli elektrodünaamikaga vastuolus, sest teise postulaadi järgi ei iseloomusta kiiratud valguse sagedus elektronide liikumist, vaid ainult aatomi energia muutust.

97. VESINIKU AATOMI MUDEL BOHRI TEOORIA JÄRGI

Bohr rakendas oma postulaate kõige lihtsamale aatomile, s. o. vesiniku aatomile.

Põhiülesanne seisnes vesiniku poolt kiiratud elektromagnetlainete sageduse leidmises. Neid sagedusi saab leida teise postulaadi põhjal, kui on teada aatomi statsionaarsete energiatega



N. Bohr

määramise meetod. Nagu räägitakse, on vaja teada energia kvantimise tingimust. See tingimus tuli Bohril jällegi postuleerida.

Bohr vaatles elektroni liikumist ringorbiitidel. Nagu te X klassi füüsikakursusest teate, on elektroni ja tuuma vastastikuse mõju potentsiaalne energia absoluutses elektrostaatilises mõõtühikute süsteemis

$$\Pi = -\frac{e^2}{r};$$

kus e on elektroni laeng ja r — elektroni kaugus tuumast. Suvaline konstant, mille täpsusega on potentsiaalne energia määratud, on siin võetud nulliks. Potentsiaalne energia on negatiivne, sest vastastikku mõjustavad osakesed on vastandmargiliste laengutega.

Newtoni mehhaanika järgi võrdub aatomi koguenergia E aatomi kineetilise ja potentsiaalse energia summaga:

$$E = \frac{mv^2}{2} - \frac{e^2}{r}. \quad (7.5)$$

Elektroni kiiruse ja orbiidi raadiuse vaheline seos on leitav Newtoni teise seaduse põhjal. Ringorbiidil tiirlevale elektronile mõjuvaks kesktõmbejõuks on tuuma poolt elektronile mõjuv kulooniline jõud. Seepärast on

$$\frac{mv^2}{r} = \frac{e^2}{r^2},$$

ehk

$$mv^2 = e^2. \quad (7.6)$$

Asendades seosest (7.6) leitud kiiruse v väärtuse valemisse (7.5), saame:

$$E = -\frac{e^2}{2r}. \quad (7.7)$$

Klassikalise mehhaanika järgi võib elektroni orbiidi raadius olla mistahes pikkusega, ja järelikult võib ka energia omada mistahes väärtusi.

Bohri esimese postulaadi põhjal saab aga aatom omada kindlate suurustega E_n energiad. Valemi (7.7) põhjal võib seega väita, et elektroni orbiidi raadiused vesiniku aatomis ei saa olla mistahes pikkusega. Bohri kvanttingimus määrab elektronide võimalikkude orbiitide raadiused vesiniku aatomis. Peatumata üksikasjalikult neil arutlustel, mille kaudu Bohr jõudis kvanttin-

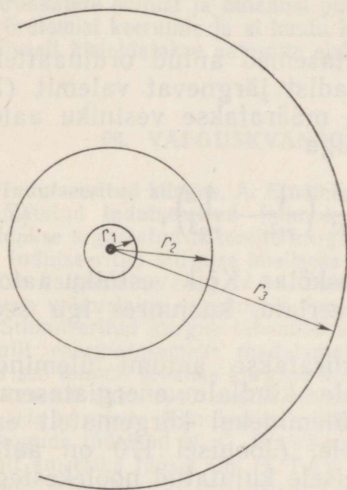
gimusele, anname lõpptulemuse¹:

$$r_n = \frac{\hbar^2 n^2}{me^2}, \quad (7.8)$$

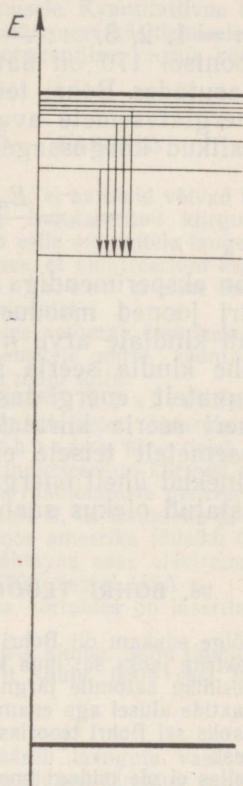
kus $n = 1, 2, 3, \dots$.

Valemis (7.8) on mugavuse mõttes tähega \hbar (loetakse h kriip-suga) tähistatud suurus $\frac{h}{2\pi} = 1,02 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$.

Valemist (7.8) saab arvutada elektronide **lubatud** või niinime-tatud Bohri **orbiitide raadiused**, mis arvu n muutudes muutuvad. Elektroni lubatud orbiidid on kujutatud joonisel 169.



Joon. 169



Joon. 170

¹ Elektroni orbiidi raadius peab sõltuma elektroni omadustest — elektroni laengust e ja massist m . Peale selle mängib Bohri ideede kohaselt aatomi ehitises olulist osa konstant \hbar . Neist kolmest konstandist saab kombineerida ainult ühe, pikkuse dimensiooniga konstandi: $\frac{\hbar^2}{me^2}$.

Elektroni väikseima orbiidi raadius

$$r_1 = \frac{\hbar}{me^2}; \quad r_1 \approx 0,5 \cdot 10^{-8} \text{ cm.} \quad (7.9)$$

See ongi aatomi raadius. Tähelepanuvääriv on see, et Bohri teooria annab katsega kooskõlas oleva tulemuse.

Asendades elektroni orbiitide raadiuste avaldise (7.8) valemisse (7.7), saame määrata aatomi stacionaarsete olekute energiad (energiatasemed):

$$E_n = -\frac{me^4}{2\hbar^2 n^2}, \quad (7.10)$$

kus $n = 1, 2, 3, \dots$

Joonisel 170 on aatomi energiatasemed antud ordinaatteljel.

Kasutades Bohri teisest postulaadist järgnevat valemit (7.4) ja energiatasemete avaldist (7.10), määratakse vesiniku aatomi võimalikud kiirgussagedused valemiga

$$\nu_{mn} = \frac{E_m - E_n}{h} = \frac{me^4}{4\pi\hbar^3} \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right), \quad (7.11)$$

mis on eksperimendiga täielikus kooskõlas. Kõik vesiniku aatomi-spektri jooned moodustavad rea seeriaid, kusjuures iga seeria vastab kindlale arvu n väärtusele.

Uhe kindla seeria sagedused kiiratakse aatomi üleminekul kõrgematelt energiatasemetelt ühele kindlale energiatasemele. Balmeri seeria kiiratakse aatomi üleminekul kõrgematelt energiatasemetelt teisele energiatasemele. (Joonisel 170 on aatomi üleminekud ühelt energiatasemelt teisele kujutatud noolekestega.) Ergastatud olekus saab aatom viibida umbes 10^{-8} sekundit.

98. BOHRI TEOORIA RASKUSED. KVANTMEHHAANIKA

Kõige edukam oli Bohri teooria rakendamine vesiniku aatomile¹, mille kiirgusspektrite jaoks sai luua kvantitatiivse teooria.

Vesiniku aatomile järgneva heeliumi aatomi kvantitatiivset teooriat Bohri postulaatide alusel aga enam luua ei õnnestunud. Heeliumi ja keerukamate aatomite jaoks sai Bohri teooriast teha üksnes kvantitatiivseid (kuigi väga tähtsaid) järeldusi.

Selles ei ole midagi imestamisväärset, sest Bohri teooria on poolik ja seesmiselt vastuoluline. Ühelt poolt, nagu vesiniku aatomi teooria loomisel nägime, kasutatakse Newtoni mehhaanika seadusi ja ammu tuntud Coulombi seadust. Teiselt poolt aga tuuakse sisse kvantpostulaadid, mis pole Newtoni mehhaanikaga vähemalgi määral seotud. Kvantettekujutuste sissetoomine füüsikasse nõudis

¹ Bohri teooria on rakendatav ka niinimetatud vesinikusarnastele aatomitele — ioniseeritud aatomitele, mille elektronkattesse on alles jäänud ainult üks elektron.

mehhaanika ja elektrodünaamika radikaalset ümberkujundamist ja seda tehtigi käesoleva sajandi teisel veerandil, mil loodi uued teooriad — kvantmehhaanika ja kvantelektrodünaamika.¹ Bohri postulaadid osutusid küll õigeteks, kuid nad polnud enam postulaadid, vaid nende teooriate põhiprintsiipide järeldused. Bohri kvanttingimus osutus ligikaudseks järelduseks, mida ei saanud kaugeltki alati kasutada.

Ettekujutus kindlatest orbiitidest, millele liigub elektron Bohri aatomimudelis, osutus tinglikuks. Tegelikult on elektronide liikumisel aatomis planeetide liikumisega kindlail orbiitidel väga vähe ühist. Kui vesiniku aatomit oleks tema madalamal energiatasemel võimalik suure säritusajaga pildistada, näeksime fotol pilve, mille tiheduse maksimum on tuumast kindlal kaugusel. Seda kaugust võibki jämedas tähenduses lugeda elektroni orbiidi raadiuseks, sest kvantmehhaanilise arvutuse põhjal langeb ta kokku Bohri orbiidi raadiusega (7.9). Aatomi foto ei meenuta seega millegagi päikesesüsteemi joonist, vaid meenutab pigem hägust laiku, mis tekib lambi ümber korrapäratult lendleva liblika pildistamisel pika säritusaja jooksul.² Praegu võib kvantmehhaanika alusel vastata mistahes aatomi elektronkatete ehitust ja omadusi puudutavale küsimusele. Kvantitatiivne teooria on võrdlemisi keeruline ja ei kuulu keskkooli füüsikakursuses käsitlemisele. Kvalitatiivselt kirjeldatakse aatomite elektronkatteid anorgaanilise keemia kursuses.

99. VALGUSKVANTGENERAATORID — LASERID

Indutseeritud kiirgus. A. Einstein ennustas 1917. a., et aatomid võivad kiirata niinimetatud **indutseeritud** (stimuleeritud) kiirgust. Indutseeritud kiirguse all mõeldakse ergastatud aatomite kiirgust, mille kutsub esile aatomitele langev valgus. Indutseeritud kiirguse imeliseks omapäraks on see, et indutseeritud kiirgusel tekkiva valguslaine sagedus, faas ja polarisatsioon ei erine aatomile langeva valguslaine sagedusest, faasist ja polarisatsioonist.

Stimuleeritud kiirgus tähendab kvantteooria keeles aatomite üleminekut kõrgemaile energiatasemetele madalamatele energiatasemetele mitte spontaanselt, nagu see toimub tavalise kiirguse korral, vaid välise mõju tõttu.

Laserid. Juba 1940. aastal vihjas nõukogude füüsik V. A. Fabrikant võimalusele kasutada stimuleeritud kiirgust elektromagnetlainete võimendamiseks. Nõukogude füüsikud N. G. Bassov ja A. M. Prohhorov ning neist sõltumatult ameerika füüsik Ch. H. Townes kasutasid indutseeritud kiirgust mikro-raadiolainete ($\lambda=1,27$ cm) generaatori loomisel. Uue raadiolainete genereerimise ja võimendamise põhimõtte väljatöötamise eest omistati N. G. Bassovile ja A. M. Prohhorovile 1959. a. Lenini preemia, 1964. aastal koos ameerika füüsiku Ch. H. Townesiga aga Nobeli preemia. Esimene spektri nähtavas osas elektromagnetlaineid genereeriv kvantgeneraator — **laser**³ loodi 1960. aastal USA-s.

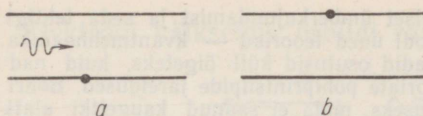
Laserikiirguse omadused. Teiste valgusallikatega võrreldes on laseritel rida eeliseid.

1. Laseritega saab tekitada väga kitsa valguskiirte kimbu, mille tipunurk on umbes 10^{-5} rad. Kui selline kiirtekimp suunata Maalt Kuule, tekib seal kõigest 3 km läbimõelduga valguslaik.

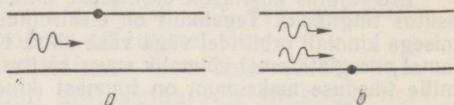
¹ Tuleb märkida, et Coulombi seadus, mis määrab laengute vastastikuse mõjujõu, kaotas kvantmehhaanikas mõtte. Coulombi seadusest järelduv punktlaengute vastastikuse mõju potentsiaalse energia avaldis osutus aga endiselt paikapidavaks.

² Tuleb silmas pidada, et piltide sarnasus on väga ligikaudne. Elektroni liikumist ei saa kuidagi samastada ei liblika lendlemisega ega ka mistahes teise makroskoopilise keha liikumisega.

³ **Laser** — lühend ingliskeelsetest sõnadest *light amplification by stimulated emission of radiation*, mis tõlkes tähendab valguse võimendamist stimuleeritud kiirguse abil.



Joon. 171



Joon. 172

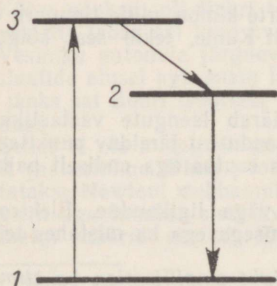
2. Laseri poolt kiiratud valgus on absoluutselt monokromaatiline. Erinevalt tavalistest valgusallikatest, mille aatomid kiirgavad valgust üksteisest sõltumalt, kiirgavad laseris aatomid valgust kooskõlastatult ning seepärast ei esine valguslaines ebaregulaarseid faaseid muutumisi.

3. Laserid on kõige võimsamad valgusallikad. Kiirgusvõimsus spektri kitsas vahemikus künib lühiaegselt kuni 10^6 W ühelt ruutsentimeetrilt. Päikesekiirguse võimsus kogu spektri kohta on $7 \cdot 10^3$ W ühelt ruutsentimeetrilt. Kitsa lainepikkuste vahemiku $\Delta\lambda = 10^{-16}$ cm (laseri spektrijoonete laius) kohta tuleb päikesekiirguse energia on kõigest 0,2 W/cm². Laseri poolt kiiratud elektromagnetlainete elektrivälja tugevus on 10^6 – 10^8 V/cm, mis on lähedane juba aatomisise elektrivälja tugevusele.

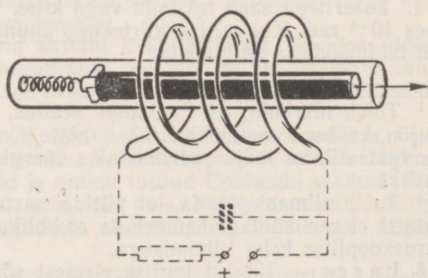
Laserite töö põhimõte. Enamik aine aatomeist on tavaliselt madalaimas energiaolekus ja sellepärast ained madalal temperatuuril ei helendugi.

Kui ainet läbib elektromagnetlainete, neelab aine elektronagnetenergia. Elektromagnetenergia mõjul osa aatomeid ergastub, s. t. siirdub kõrgemale energiaolekule. Kõrgemale energiaolekule üleminekuks vajalik energia $h\nu = E_2 - E_1$, mis võrdub energiatasemet E_2 ja E_1 energiatega vahega, võetakse elektromagnetlainelt. Joonisel 171, a on skemaatiliselt kujutatud ergastamata aatomi kaks energiataset ja sinusoidilõiguga elektromagnetlainete. Ergastamata aatomi elektron asub alumisel energiatasemel. Joonisel 171, b on kujutatud energiat neelanud, s. o. ergastatud aatom. Ergastatud aatom võib pörkumisel anda oma energia naaberaatomitele või kiirata footoni mistahes suunas.

Nüüd kujutame ette, et me ergastasime mingil viisil enamiku keskkonna aatomitest. Kui elektromagnetlainete sagedusega $\nu = \frac{E_2 - E_1}{h}$ läbib nüüd keskkonda, siis ta ei nõrgene, vaid, vastupidi, tugevneb indutseeritud kiirguse arvel. Indutseeritud kiirguse mõjul lähevad aatomid madalamasse energiaolekusse, kii-



Joon. 173



Joon. 174

rates seejuures aatomile langeva lainega sama sagedusega ja samas faasis olevat kiirgust. Joonisel 172, *a* on kujutatud ergastatud aatom ja aatomile langev elektromagnetlaineline. Joonisel 172, *b* on aga näidatud, et aatom tuli põhiolekusse tagasi ja laine tugevnes.

Kolmetasemeline süsteem. Keskkonna aatomite ergastamise viise on mitmesuguseid. Rubiinlaseris kasutatakse selleks erilist võimsat lampi. Keskkonna aatomid ergastuvad seetõttu, et nad neelavad valgust.

Kahest energiatasemest laseri töötamiseks aga ei piisa. Ükskõik kui suur ka lambi valgusenergia oleks, pole ergastatud aatomite arv ergastamata aatomite arvust suurem, sest samaaegselt aatomite ergastamisega põhjustab valgus indutseeritud üleminekuid kõrgemalt energiatasemelt madalamale energiatasemele.

Väljapääs leiti kolme energiataseme kasutamise (energiatasemete üldarv on alati suur, kuid antud juhul on juttu «töötavatest» energiatasemetest). Joonisel 173 on kujutatud kolm energiataset. Oluline on see, et välise mõju puudumisel on süsteemi «eluga» erinevatel energiatasemetel väga erinev. Energiatasemel 3 saab süsteem olla vähe aega, umbes 10^{-8} sekundit, pärast seda aga läheb spontaanselt energiat kiirgamata energiatasemele 2. Olekus 2 võib süsteem viibida 100 000 korda kauem, s. t. umbes 10^{-3} sekundit. Välise elektromagnetvälja mõjul olekust 2 olekusse 1 üleminekul kiirgab süsteem elektromagnetlaineid, mida laserites kasutataksegi. Süsteem läheb pärast võimsa lambi sähvatust olekusse 3 ja umbes 10^{-8} s möödudes olekusse 2, milles «elab» suhteliselt kaua. Seega luuakse ergastatud olekus 2 ergastamata oleku 1 suhtes «üleasustus». Laseri tööks vajalikud energiatasemed on olemas rubiinikristallidel. Rubiin on erepunane kroomilisandiga (umbes 0,05%) alumiiniumoksiidi Al_2O_3 kristall. Rubiinikristalli kroomioonidel ongi just vajalikud omadused.

Rubiinlaseri ehitus. Rubiinikristallist valmistatakse tasaparalleelsete otsatahkudega varras. Spiraalikujuuline gaaslahenduslamp annab sinakasrohelist valgust (joon. 174). Mõnetuhande mikrofaradise mahtuvusega kondensaatoripatarei lühiajaline impulss tekitab gaaslahenduslambi ereda valgusesähvatuse. Väikese aja möödudes on energiatase 2 «üle asutatud».

Spontaansete üleminekute $2 \rightarrow 1$ tõttu kiiratakse laineid kõikvõimalikes suundades. Rubiinikristalli telje suhtes nurkade all levivad lained väljuvad kristallist ja ei mängi edasistes protsessides mingit rolli. Piki kristalli telge leviv laine aga peegeldub kristalli otsatahkudelt palju kordi ja, põhjustades ergastatud kroomioonide stimuleeritud kiirgust, muutub kiiresti väga intensiivseks. Rubiinikristalli üks otsatahk tehakse peegelpinnaks, teine poolläbipaistvaks. Läbi poolläbilaskva otsatahu väljub laserist võimas lühiajaline (kestab umbes sadakond mikrosekundit) punase valguse impulss, millel on paragrahvi alguses märgitud fenomenaalsed omadused. Laine on koherentne, sest kõik aatomid kiirgavad valgust kooskõlastatult, ja väga võimas, sest kogu neeldunud energia eraldub stimuleeritud kiirgusel väga lühikese aja jooksul.

Teisi laseritüüpe. Rubiinlaser, millega me tutvusime, töötab impulssrežiimis. On olemas ka pideva töörežiimiga lasereid.

Pideva töörežiimiga gaaslaserites on töötavaks kehaks gaas, mille aatomeid ergastatakse elektrilahendusega. Kasutatakse ka esmakordselt meie maal loodud pideva töörežiimiga pooljuhtlaserid. Pooljuhtlaserites võetakse kiirguseks kuluv energia elektrivoolult.

On loodud ka kemolaserid, milles aatomeid ergastatakse keemiliste reaktsioonide energia arvel.

Laserite kasutamine. Väga perspektiivikas on laserikiire kasutamine sides, eriti kosmosesides, sest kosmoses pole valgust neelavaid pilvi.

Laserikiire suurt võimsust kasutatakse ainete aurustamisel vaakumis, keevitamisel jne. Laserikiirega võib teha kirurgilisi operatsioone, näiteks silmapõhja küljest lahti tulnud võrkkesta silmapõhja külge tagasi «kinnitada».

Kasutades laserikiire koherentsust, saadakse esemeist ruumilisi kujundeid (holograafia). Rõngakujulisi lasereid kasutatakse geograafilise laiuse täpseks määramiseks, sest Maa pöörlemine mõjutab kiirguse omadusi.

Juba praegu on võimatu loetleda laseri kõiki kasutusalasid.

1. Mitu spektrijoont võib esineda maksimaalselt vesiniku aatomispektris?
2. Joonistage aatomituumalt hajunud α -osakeste (ligilähedased) trajektoid.
3. Kas elektroni kiirus orbiidil väheneb või suureneb, kui elektron kulutab kiirguseks energiat ja klassikaline planetaarne aatomimudel oleks paikapidav?
4. Kujutage graafiliselt vesinikuaatomi üleminekud ühtedelt energiatasemeilt teistele, millega kaasneb kõige lühemate lainete kiirgamine.
5. Kuidas saab graafiliselt kujutada valguse neelamist aatomi poolt?
6. Vesinikuaatomi minimaalseim energia (põhioleku energia)

$$E_1 = -\frac{me^4}{2\hbar^2}; \quad E_1 = -13,53 \text{ eV.}$$

Kui palju tööd tuleb vesinikuaatomi ioniseerimiseks teha?

7. Kui lähedale tina-aatomi tuumale tuleb α -osake tsentraalse pörke korral? α -osakese kiirus on 10^9 m/s ja tina-aatom lugeda paigalseivaks.
8. Leidke esimesel orbiidil tiirleva elektroni kiirus v ja kiirendus a Bohri teooria järgi?
9. Arvutage vesinikuaatomi poolt kiiratud elektromagnetlainepikkus λ , kui aatom läheb statsionaarselt olekult $m=4$ statsionaarsele olekule $n=2$.
10. Arvutage heeliumiooni poolt kiiratud elektromagnetlainepikkus λ , kui heeliumioon läheb statsionaarselt olekult $m=4$ statsionaarsele olekule $n=2$.
11. Missugused spektrijooned tekivad, kui vesinikuaatomeid ergastada elektronidega, mille energia on 12,5 eV?
12. Leidke lühima lainepikkusega kiirgus, mis kuulub Balmeri seeriasse.

VIII. TUUMAFÜÜSIKA

100. AATOMITUUM JA ELEMENTAAROSAKESED

Sõnu «aatomituum» ja «elementaarosakesed» on füüsikakursuses juba palju kordi nimetatud. Kogu aatomifüüsika tegeleb tegelikult tuumade ja elektronide vastastikuse mõju uurimisega.

Elementaarosakeste probleem kerkis päevakorda pärast aatomi keeruka ehituse avastamist. Momendist, mil Rutherford tõestas tuuma olemasolu aatomis, hakkas arenema tuumafüüsika — teadus aatomituumade ehitusest, omadustest ja vastastikustest muundumistest. Tõsi küll, esialgu oli tähelepanu koondunud lihtsamale ja XX sajandi alguse kõige aktuaalsemale probleemile — aatomi elektronkatte ehituse uurimisele. Elementaarosakeste teooria ja tuumafüüsika hakkasid arenema alles siis, kui aatomiteooria oli kvantmehaanika alusel juba loodud.

Esialgul uuriti elementaarosakeste teooriat tuumafüüsikaga koos. Elementaarosakeste mitmekesisusega puutusid füüsikud kokku tuumaprotsesside uurimisel. Iseseisvaks uurimispiirkonnaks kujunes elementaarosakeste füüsika suhteliselt hiljuti — umbes kakskümmend aastat tagasi. Praegu on füüsikas kaks iseseisvat uurimisharu, millest üks tegeleb aatomituumade ehituse ja muundumiste, teine aga elementaarosakeste olemuse, omaduste ja vastastikuste muundumiste uurimisega. Mõlema uurimisharu ühtivus nii probleemide kui ka uurimismeetodite osas on aga säilinud.

Kui paljud elementaarosakesed (neutron, neutriino jt.) avastati tuumaprotsesside uurimisel, siis elementaarosakeste vastastikuse mõju ja vastastikuste muundumiste uurimine heitis omakorda valgust paljudele tuumaprotsessidele, nagu näiteks tuumade β -kiirgusele (elektronide väljalendamisele tuumast).

Võib arvata, et nimetatud kahe füüsikaharu praegune suhteline iseseisvus on ajutine, sest praegu pole veel rahuldavat elementaarosakeste kvantitatiivset teooriat. Edaspidi ehitatakse kogu tuumafüüsika üles elementaarosakeste teooriale, nagu aatomifüüsika põhineb juba praegu kvantmehhaanikal.

Me alustame tutvumist aatomituumaga ning pühendame sellele suurema osa ajast. Alles pärast seda siirdume elementaarosakeste käsitlemise juurde.

Praegu teatakse aatomituuma kohta järgmist: 1) tuuma mõõtmed (10^{-12} — 10^{-13} cm) on aatomi mõõtmetest (10^{-8} cm) kümneid või sadu tuhandeid kordi väiksemad; 2) elemendi aatomituuma laeng võrdub elemendi järjenumbri Z ja elementaarlaengu e korrutisega; 3) kogu aatomi mass on praktiliselt koondunud tema tuuma.

Nüüd on meil vaja leida vastused järgmistele põhiküsimustele: millistest osakestest koosneb aatomituum? Missugused jõud hoiavad tuuma koostisosakesi koos? Missugused tuumade muundumised saavad toimuda?

Peale nende on loomulikult veel terve hulk tähtsaid küsimusi, näiteks järgmised: milline on aatomituuma ehitus, missugused on tuumade tähtsaimad omadused jne. Neid küsimusi me ei puuduta.

Kõigepealt tutvume seadmetega, tänu millele tuuma- ja elementaarosakeste füüsika üldse tekkis ja arenes. Nende seadmete abil saab registreerida ja uurida üksikuid mikromaailmas toimuvaid nähtusi — tuumade ja elementaarosakeste pörkamisi ning vastastikuseid muundumisi. Just need seadmed annavad informatsiooni mikromaailmas toimuvatest reaalsest sündmustest.

101. ELEMENTAAROSAKESTE JÄLGIMISE JA REGISTREERIMISE MEETODID

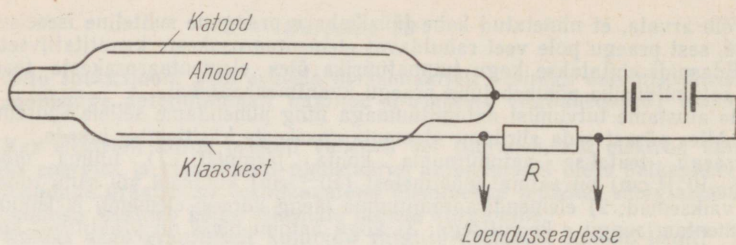
Iga elementaarosakesi või liikuvaid aatomituumi registreeriv seade sarnaneb laetud ja vinnastatud püssiga. Piisab vaid nõrgast vajutusest päästikule, kui toimub efekt — lask, millega lasul tehtud pingutus pole üldse võrreldav.

Registreeriv seade on keerukas makroskoopiline süsteem, mis võib olla ebapüsivas olekus. Aparaatil lendava osakese poolt põhjustatud väikese häirituse tõttu läheb süsteem viivitamatult uude, püsivamasse olekusse. Uude olekusse üleminek võimaldabki osakest registreerida.

Osakeste registreerimiseks on mitmesuguseid meetodeid, mis enamikul juhtudel, eriti suure energiaga osakeste registreerimisel, torkavad silma oma keerukuse ja kalliduse poolest. Elementaarosakeste kiirendites kasutatava registreeriva aparatuuri kompleks maksab peaaegu niisama palju kui kiirendi ise.

Sõltuvalt eksperimendi eesmärkidest ja tingimustest, milles eksperiment korraldatakse, kasutatakse ühtesid või teisi registreerimiseseadeid, mis erinevad üksteisest põhikarakteristikute poolest. Registreerimiseseade põhikarakteristikuks on efektiivsus (registreeritud osakeste ja aparaatil tunginud osakeste arvu suhe), minimaalne registreerimisaeg (aeg, mille jooksul aparatuur naaseb pärast järjekordse osakese loendamist uuesti alg-, s. t. tööolekusse), energia mõõtmise täpsus, mass, registreeritavate osakeste laeng jne.

Meie piirdume nende aparatuuride kirjeldamisega, mida kasuta-



Joon. 175

takse elementarosakeste ja aatomituuma uurimisel kõige laialdasemalt. Lihtsaima osakeste registreerimise viisiga — stsintillatsioonide loendamisega olete te juba tuttavad.

Geiger-Mülleri loendur. Geiger-Mülleri loendur on üks põhilisem aparaat, mida kasutatakse osakeste automaatseks loendamiseks. Hea loendur registreerib sekundis eraldi kuni 10 000 ja rohkem osakest. Loendur koosneb torukujulisest klaaskestast, mille sisepind on kaetud metallikihiga (katood). Klaastoru telge mööda on toru sisse tõmmatud peenikene metalltraat (anood) (joon. 175). Toru on täidetud gaasiga — tavaliselt argooniga. Geiger-Mülleri loenduri töö põhineb pörkeionisatsioonil. Gaasi tunginud laetud osake (elektron, α -osake jt.) kisub gaasi aatomeilt ära elektrone ja tekitab seega positiivseid ioone ja vabu elektrone. Anoodi ja katoodi vaheline elektriväli (anood ja katood ühendatakse kõrgepingeallikaga) kiirendab elektrone pörkeionisatsiooni tekkimiseks vajaliku kiiruseni (energiani). Tekib laetud osakeste laviin, mis suurendab loendurit läbivat voolu järsult. Koormustakistuse R pingepulss juhitakse loendusseadese (loendusseade koosneb tavaliselt võimendist ja mehhaanilisest loendurist).

Loenduri registreerimisvõime taastamiseks tuleb laviinlahendus kustutada. Selleks on kõige sobivam ühendada loenduri vooluahelasse suur takistus. Vooluimpulsi tekkimine loenduris põhjustab koormustakistusel suurt pingelangu, mis vähendab anoodi ja katoodi vahelist pinget sedavõrd, et gaaslahendus loenduris katkeb ning loendur on jälle valmis uut osakest loendada.

Geiger-Mülleri loendurit kasutatakse põhiliselt elektronide ja γ -kvantide (suure energiaga footonite) loendamiseks. Gamma kvante ei loenda loendur aga vahetult, sest γ -kvantide ioniseerimisvõime on väike. γ -kvantide kindlakstegemiseks kaetakse loenduri klaastoru sisepind ainega, millest γ -kvandid suudavad elektrone välja lüüa. Elektronide loendamisel on loenduri efektiivsus peaaegu 100%, γ -kvantide registreerimisel aga ligikaudu 1%.

Raskeid osakesi (näiteks α -osakesi) ei saa loenduriga hästi

registreerida, sest raske on teha loendurisse küllalt väikest «aknakst», mis neid osakesi läbi laseks.

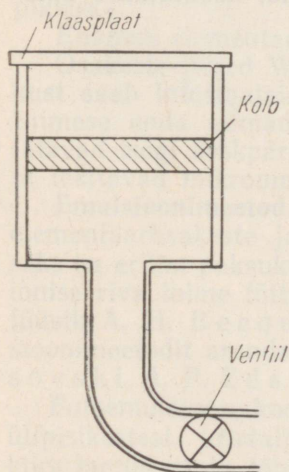
Kui osakesi on palju, ei jõua mehhaaniline loendur neid inertsitõttu loendada (loendur «jookseb kinni»). Suure osakeste arvu loendamiseks kasutatakse raadiotehnilisi ümberloendusseadeid, mis registreerivad kõikidest impulssidest ainult ühe osa (neljast impulsi ühe või kuueteistkümnest impulsi ühe jne.).

Tänapäeval on loodud loendurid, mille tööprintsip on teistsugune kui Geiger-Mülleri loenduril.

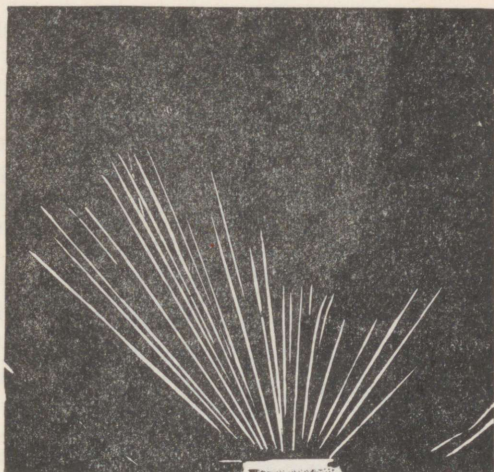
Wilsoni kamber¹. Loenduritega saab registreerida osakese läbiminekut kindlast ruumpiirkonnast ja fikseerida osakese mõningaid karakteristikuid. Wilsoni kambrisse jätab kiire laetud osake aga nähtava ja seega ka pildistatava jälje. Wilsoni kambrist võib nimetada tõeliseks «aknaks mikromaailma».

1912. aastal loodud Wilsoni kambrist töö põhineb üleküllastunud auru kondenseerumisel ioonidel, mida tekitab laetud osake oma trajektooriga kambrist tööruumis. Üleküllastunud auruks nimetatakse auru, mille temperatuur on tavalistes tingimustes õhku küllastava auru temperatuurist madalam. Auru üleküllastunud olek on ebapüsiv ja ta saab tekkida ainult tolmu- või ioonidest puhtas ruumis.

Wilsoni kamber on hermeetiliselt suletav anum, mis on täidetud küllastusolekule lähedase vee- või piirituseauruga (joon. 176).



Joon. 176



Joon. 177

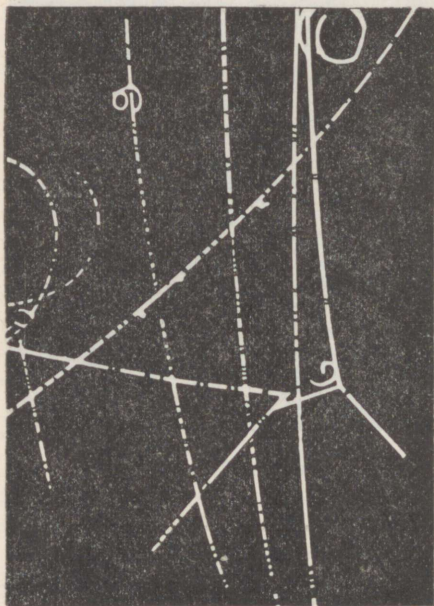
¹ Kambrist nimetatakse tema looja, šoti füüsiku Charles Thomson Rees Wilsoni nime järgi Wilsoni kambriks. (Tõlk.)

Kolvi kiirel allaliikumisel hakkab gaas rõhu vähenemise tõttu kambris adiabaatilisel paisuma ning jahtub ja kambris olev aur muutub üleküllastavaks. Kui osake tungib kambrisse vahetult enne või pärast gaasi paisumist, on osakese poolt tekitatud ioonid kondensatsioonituumadeks ning nendel kondenseeruvad veepiisakesed muudavadki kambrisse tunginud osakese jälje nähtavaks (joon. 177). Pärast seda viiakse kamber uuesti lähteolekusse ja eriline «puhastav» elektriväli puhastab kambril olevad ioonidest. Enne gaasi järjekordset paisumist lülitatakse see «puhastav» elektriväli muidugi välja. Sõltuvalt Wilsoni kambril mõõtmistest kulub kambril tööolekusse viimiseks aega mõnest sekundist kuni kümnete minutiteni.

Informatsioon, mida saadakse Wilsoni kambril tekkinud osakese jälje kaudu, on loendurite abil saadavast informatsioonist palju täiuslikum. Jälje pikkuse järgi saab määrata osakese energia ja jälje ühel sentimeetril tekkinud ioonide (veepiisakeste) arvu järgi osakese kiiruse.

Kui paigutada Wilsoni kambril homogeenesse magnetvälja, saab osakese liikumissuuna muutumise ja trajektoori kõverusraadiuse järgi määrata osakese laengu märgi ning laengu ja massi suhte (kui osakese laeng on teada, saab leida osakese impulsi). Kirjeldatud meetodi töötasid välja nõukogude füüsikud P. L. Kapitsa ja D. M. Skobeltsõn.

Et kambril mitte asjatult tööle rakendada, kasutatakse auto-



Joon. 178

maatjuhtimist — kamber hakkab tööle ainult siis, kui loendur registreerib osakese, mis kindlasti tungib kambrisse.

Mullikamber. Osakese jälje nähtavakstegemiseks leiutas ameerika füüsik D. A. Glaser 1952. aastal niinimetatud mullikambri. Mullikambris kasutatakse ülekuumendatud vedelikku, milles kiirestiliikuva osakese poolt tekitatud ioonidel moodustuvad aurumullikesed «tähistavad» osakese teed mullikambris.

Kambri lähteolekus on vedelik suure rõhu all ja ta ei saa hakata keema, kuigi vedeliku temperatuur on atmosfäärirõhule vastavast keemistemperatuurist kõrgem. Vedeliku rõhu järsul vähendamisel jääb vedelik lühikeseks ajaks ülekuumendatud ja seega ka ebapüsivasse olekusse. Kui laetud osake lendab mullikambrisse just ajavahemikul, mil vedelik on ebapüsivas olekus, tekib kambrisse aurumullikeste ahela näol osakese jälg (joon. 178). Vedelikuna kasutatakse peamiselt vedelat vesinikku ja propani. Mullikambri töötsükkel kestab umbes 0,1 sekundit.

Mullikambri eeliseks Wilsoni kambri ees on töötava aine suur tihedus, mille tõttu isegi suure energiaga osakesed läbivad kambri lühikeses teepikkuses. Kuna osakese jälg mullikambris on lühike, saab mullikambri abil jälgida osakese järjestikuseid muundumisi ja osakese poolt esilekutsutud reaktsioone. Eriti suure tähtsuse omandasid mullikambriid pärast hiiglaslike kiirendite loomist, sest taolistest kiirendeist väljuvatel osakestel on suur vaba tee pikkus.

Enamus elementaarosakesi avastati just mullikambri abil.

Osakeste jäljed Wilsoni ja mullikambris on peamised allikad, kust saab informatsiooni osakeste käitumise ja omaduste kohta. Inimese enda silmade all tekkivad elementaarosakeste jäljed jätavad isegi keskpärase kujutusvõimega inimesele sügava mulje ja tekitavad mikromaailmaga eriti lähedase kokkupuute tunde.

Emulsioonimeetod. Peale Wilsoni ja mullikambrite kasutatakse elementaarosakeste ja nendega toimivate protsesside avastamiseks ka erilist paksukihilist fotoemulsiooni. Kiirete laetud osakeste ioniseeriva toime tõttu fotoplaadi emulsioonile avastas prantsuse füüsik A. H. Becquerel 1886. aastal radioaktiivsuse. Emulsioonimeetodit arendasid edasi nõukogude füüsikud L. V. Mõsoovski, A. P. Ždanov jt.

Fotoemulsioon koosneb suurest arvust hõbebromiidi ($AgBr$) ülipisikestest kristallidest. Hõbebromiidi kristallidesse tungiv kiire laetud osake lõhub üksikuid hõbebromiidi molekule. Lõhutud hõbebromiidi molekulide ahel moodustab varjatud kujutise. Ilmutamisel taastatakse nendes kristallides metalliline hõbe ja mustad hõbeda täpikesed moodustavadki osakese jälje (joon. 179). Jälje pikkuse ja tiheduse järgi on võimalik määrata osakese massi ja energiat.

Fotoemulsiooni suure tiheduse tõttu on osakese jälg väga lühike (radioaktiivsete elementide poolt kiiratud α -osakeste jälje

pikkus on suurusjärgus 10^{-3} cm), kuid jälge saab pildistada ja saadud fotot suurendada.

Emulsioonimeetodi eeliseks on kõigepealt tema pidevus, tänu millele saab avastada haruldasi nähtusi. Teiseks eeliseks on see, et fotoemulsiooni suure tiheduse tõttu toimub hulk huvitavaid elementaarosakeste ja tuumade vahelisi reaktsioone emulsioonikihis, ning on seega jälgitavad.

102. LOODUSLIKU RADIOAKTIIVSUSE AVASTAMINE

Looduslik radioaktiivsus, aatomituuma keerukat ehitust tõestav nähtus avastati õnneliku juhuse tõttu.

Röntgenikiired, nagu mäletate, avastati suure kiirusega liikuvate elektronide pörkumist vastu gaaslahendustoru seinu. Röntgenikiirtega kaasnes gaaslahendustoru seinte helendumine. Becquerel uuris pikka aega gaaslahendustoru helendumisega sarnast nähtust — päikesevalgusega valgustatud ainete järelhelendumist. Ainete hulgas, millega Becquerel katseid tegi, olid ka uraanisoolad.



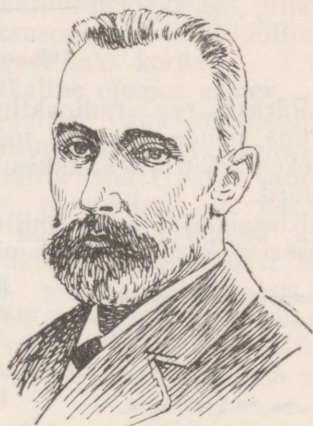
A. H. Becquerel

Becquerelil tärkas mõte uurida, kas uraanisoola järelhelendus ei sisalda nähtava valguse kõrval ka röntgenikiiri. Becquerel keeras fotoplaadi tihedasse musta paberisse, pani selle peale uraanisoola tüki ja jättis need ereda päikesevalguse kätte. Pärast ilmutamist tumenesid fotoplaadil need kohad, mille peal asusid uraanitükikesed. Uraan kiirgab järelikult mingit kiirgust, mis nagu röntgenikiiredki tungib läbi paistmatuist kehast läbi ja

mõjub fotoplaadile. Becquerel arvas, et uraani kiirgus tekib päikesekiirte mõjul. Ükskord 1896. a. veebruaris ei õnnestunud pilvise ilma tõttu katset teha ning Becquerel pani fotoplaadi, millelebas uraanisoolaga kaetud vaskrist, laualaekasse. Paar päeva hiljem ilmutas ta igaks juhuks ka selle fotoplaadi ja nägi, et plaadile oli tekkinud tume risti kujutis. See tähendas, et **uraanisoolad kiirgavad mingit kiirgust iseeneslikult, ilma igasuguse välismõjuta**. Algasid intensiivsed uuringud. Radioaktiivsus oleks avastatud loomulikult ka ilma selle õnneliku juhuseta, kuid arvata-vasti palju hiljem.



M. Curie-Sklodowska



P. Curie

Õige pea avastas Becquerel, et uraanisoolade kiirgus ioniseerib õhku niisama nagu röntgenikiirguski, sest uraanisoolade kiirguse mõjul kaotas elektrokoop laengu. Korrates katset mitmesuguste uraanisooladega, tegi Becquerel kindlaks väga tähtsa fakti — uraani kiirguse intensiivsus sõltub ainult preparaadis sisalduvast uraani hulgast ja ei sõltu üldse sellest, missuguste ühendite koostisesse uraan kuulub. Järelikult pole kiirgus omane keemilistele ühenditele, vaid uraanile, uraani a a t o m e i l e.

Pärast uraani kiirguse avastamist oli loomupärane hakata uurima, kas ka teised keemilised elemendid kiirgavad spontaanselt. 1898. aastal avastas Prantsusmaal Marie Curie-Sklodowska tooriumi kiirguse. Abielupaar Marie ja Pierre Curie' peamised jõupingutused olid edaspidi suunatud uute ele-

mentide avastamisele. Uraani ja tooriumi sisaldava maagi süsteemilise keemilise analüüsi tulemusena õnnestus Curie'del eraldada varem tundmatu keemiline element, mille nad nimetasid Marie Curie-Sklodowska kodumaa, Poola auks polooniumiks.

Lõpuks avastati veel üks väga intensiivselt kiirgav element, millele pandi nimeks raadium (ladina keeles *radius* — kiir). Iseeneslikku kiirgumist nimetasid Curie'd **radioaktiivsuseks**.

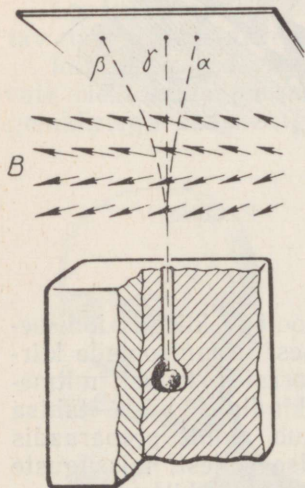
Raadiumi aatommass on 266 ja järjenumbrer Mendelejevi tabelis 88. Enne raadiumi avastamist Curie'de poolt oli 88. ruut Mendelejevi tabelis tühi. Keemilistelt omadustelt kuulub raadium leelismuldmetallide rühma.

Hiljem tehti kindlaks, et 83-st suurema järjenumbriga keemilised elemendid on kõik radioaktiivsed.

103. α -, β - JA γ -KIIRGUS¹

Pärast rea radioaktiivsete elementide avastamist hakati uurima nende kiirguse füüsikalist olemust. Peale Becquereli ja perekond Curie'de hakkas selle küsimusega tegelema ka Rutherford.

Klassikaline katse, millega sai radioaktiivse kiirguse keerulist koosseisu kindlaks teha, oli järgmine. Radioaktiivne preparaat pandi pliitükki tehtud peenikese augu põhja, augu kohale pandi aga fotoplaat. August väljuvale kiirgusele mõjus rist-suunas tugev magnetväli (joon. 180). Katse tehti vaakumis.



Joon. 180

Kui magnetvälja polnud, tekkis fotoplaadile täpselt augu kohale tume täpp. Magnetväljas lõhestus kiirgus kolmeks kimbuks. Kaks kimpu kaldusid magnetväljas kõrvale erinevates suundades, mis näitas kindlalt, et kimpudel on vastandmargilised elektrilaengud. Negatiivse laenguga kiirguse komponent kaldus magnetväljas positiivse laenguga kiirgusest palju rohkem kõrvale. Kiirguse kolmas komponent magnetväljas ei kaldunud. Radioaktiivse kiirguse positiivset komponenti nimetati α -kiirguseks, negatiivselt laetud kompo-

¹ Teaduslikus ja õppekirjanduses kasutatakse tavaliselt sellist kirjutusviisi. Populaarteaduslikus, ilukirjanduses jm. kirjutatakse vastavalt alfa-, beeta- ja gammakiirgus. (Tõlk.)

neni β -kiirguseks ja neutraalset komponenti γ -kiirguseks (ka α -kiired, β -kiired ja γ -kiired).

Nimetatud kolm kiirgust erinevad üksteisest tugevasti läbitungimisvõime poolest, s. t. selle poolest, kui intensiivselt nad erinevates ainetes neelduvad. Väikseima läbitungimisvõimega on α -kiired. Paberileht paksusega umbes 0,1 mm on α -osakestele läbitungimatuks tõkkeks. Kui auk pliiüks katta paberilehega kinni, ei teki fotoplaadil α -osakestele vastavat täppi.

β -osakesed neelduvad aines α -osakestest tunduvalt vähem. Alumiiniumplaat peab β -osakesi täielikult kinni ainult siis, kui ta on mõne millimeetri paksune.

Kõige suurema läbitungimisvõimega on γ -kiired. Sarnaselt röntgenikiirtega suureneb ka γ -kiirte neeldumine neid neelava aine järjenumbri suurenemisel. Isegi sentimeetripaksuses pliiüks ei neeldu γ -kiired täielikult. Sellise paksusega pliiühis läbitungimisel väheneb γ -kiirte intensiivsus kõigest kaks korda.

Ilmselt on α -, β - ja γ -kiirguse füüsikaline olemus erinev.

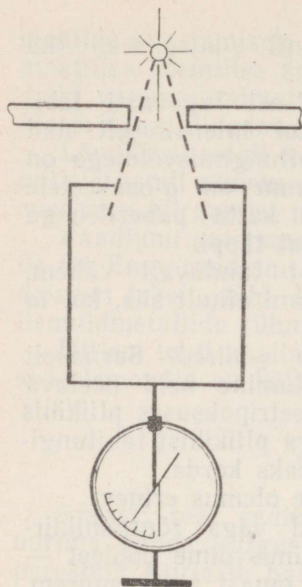
γ -kiired. Omadustelt sarnanevad γ -kiired väga röntgenikiirtega ja erinevad viimastest ainult läbitungimisvõime poolest — γ -kiirte läbitungimisvõime on röntgenikiirte omast palju suurem. Sarnasus röntgenikiirtega viib mõttele, et γ -kiired on elektromagnetlained. Kõik kahtlused selles küsimuses kadusid alles pärast seda, kui avastati γ -kiirte difraktsioon kristallidest läbiminekul ja määrati nende lainepikkus. γ -kiirte lainepikkus on väga väike — 10^{-8} kuni 10^{-11} cm. Elektromagnetlainete skaalal järgnevad γ -kiired vahetult röntgenikiirtele. γ -kiirte levimiskiirus võrdub kõikide elektromagnetlainete levimiskiirusega, mis on vaakumis umbes 300 000 km/s.

β -kiired. Juba avastamisest peale peeti α - ja β -kiiri laetud osakeste vooks. Kõige lihtsam oli teha katseid β -kiirtega, sest β -kiired kalduvad nii magnet- kui ka elektriväljas tugevasti kõrvale.

Põhiülesanne seisib osakeste laengu ja massi määramises. β -osakeste trajektoori kuju muutumisest elektri- ja magnetväljas tehti kindlaks, et β -osakesed pole midagi muud, kui väga kiiresti, valguse kiirusele lähedaste kiirustega liikuvad elektronid. Väga oluline on fakt, et antud radioaktiivne element kiirgab kõige erinevamate kiirustega β -osakesi.

α -kiired. Kõige raskem oli kindlaks teha α -osakeste olemust, sest magnet- ja elektrivälja kallutavad α -osakesi vähe. Nende kiirte olemuse tegi lõplikult kindlaks Rutherford, kes määras α -osakese laengu q ja massi m suhte osakeste kalde järgi elektri- ja magnetväljas. α -osakese laengu ja massi suhe oli umbes kaks korda väiksem kui prootoni, s. o. vesinikuaatomi tuuma laengu ja massi suhe. Massi leidmiseks oli vaja määrata veel α -osakese laeng.

α -osakese laeng leiti pärast Geiger-Mülleri loenduri leiutamist. Geiger-Mülleri loenduri abil loendati ajaühikus elektromeetriga ühendatud metallsilindrisse tunginud α -osakeste arv (joon. 181).



Joon. 181

(α -osakesed tungivad loendurisse läbi väga õhukese akna ja loendur registreerib neid.) Elektromeetri abil saab mõõta kindla ajavahemiku jooksul kii-
ratud α -osakeste summaarse laengu. Tehtud katsed näitasid, et α -osakeste laeng võrdub kahekordse elementaarlaenguga. Järelikult on α -osakese mass vesinikuaatomi massist neli korda suurem, s. t. võrdub heeliumiaatomi massiga. Seega osutus α -osake heeliumiaatomi tuumaks¹.

Rutherford ei jäänud saavutatuga rahule, vaid tõestas seejärel otseste katsetega, et radioaktiivsel α -lagunemisel tekib heelium. Ta kogus mitu päeva erilisse nõusse α -osakesi ja tegi siis spektraalanalüüsiga kindlaks, et anumas on kogunenud heelium (iga α -osake haaras kaks elektroni ja muutus heeliumi aatomiks).

104. RADIOAKTIIVSED MUUNDUMISED

Mis toimub ainega radioaktiivsel lagunemisel? XX sajandi algul polnud sellele küsimusele lihtne vastata. Juba algusest peale pakkus radioaktiivsuse uurimine palju imelikku ja ebata-
valist.

Esiteks oli hämmastav radioaktiivsete elementide, nagu uraani, tooriumi ja raadiumi kiirguse muutumatus. Nende kiirguse intensiivsus ei muutunud märgatavalt ööpäevade, kuude ja isegi aastate jooksul. Kiirguse intensiivsust ei mõjutanud ka sellised tavalised tegurid nagu kuumutamine ja rõhu suurendamine. Üllatav oli, et radioaktiivsete ainetega toimuvad keemilised reaktsioonid ei mõjutanud vähimalgi määral nende radioaktiivset lagunemist.

Teiseks selgus varsti pärast radioaktiivsuse avastamist, et radioaktiivsel lagunemisel eraldub tohtu energia. Pannes raadiumkloriidi ampulli kalorimeetrise, milles α -, β - ja γ -kiirte energia muundus neeldumisel soojuseks, leidis Pierre Curie, et 1 g raadiumi lagunemisel eraldub tunnis 25,5 cal soojust. Niisugune energiahulk eraldub radioaktiivsel lagunemisel terve rea aastate jooksul pidevalt.

¹ Tollal (XX sajandi esimesel kümnendikul) polnud aatomituum veel avastatud ja seepärast rääkis Rutherford heeliumioonist.

Kust võetakse see energia, mille eraldumist mingid tuntud tegurid ei mõjuta? Radioaktiivsel lagunemisel toimuvad ainega nähtavasti mingid olulised, keemilistest muundumistest täiesti erinevad muutused. **Muunduvad elemendi aatomid!**

Tänapäeval ei tekita see mõte erilist imestust, sest sellest võib laps kuulda veel enne, kui ta õpib lugema. XX sajandi alguses näis see mõte fantastilisena ja selle väljaütlemiseks oli vaja suurt julgust, sest alles äsja oli saadud vaieldamatuid tõestusi aatomite olemasolu kohta. Sajanditevanune Demokritose aine atomistliku ehituse idee pääses siis lõpuks võidule ja kohe pärast seda pandi ka aatomite muutumatus kahtluse alla.

Me ei hakka üksikasjalikult rääkima nendest katsetest, mis veensid lõppude lõpuks teadlasi selles, et radioaktiivse lagunemisega on sageli seotud aatomite järjestikuste muundumiste ahel. Peatume ainult kõige esimestel katsetel, mida alustas Rutherford ükski ja mida ta jätkas koos inglise füüsiku F. S o d d y g a.

Rutherford avastas, et kinnises ampullis jääb tooriumi radioaktiivsus muutumatuks. Kui tooriumipreparaati puhuda isegi väga nõrga õhuvooluga, väheneb tema radioaktiivsus tugevasti. Rutherford oletas, et α -osakeste kiirgumise kõrval eraldub tooriumist mingi gaas, mis on samuti radioaktiivne.

Seda gaasi nimetas Rutherford **emanatsiooniks**. Rutherford pumpas tooriumi sisaldavast ampullist õhu välja, eraldas radioaktiivse gaasi ja uuris selle ioniseerimisvõimet. Osutus, et gaasi ioniseerimisvõime kahanes kiiresti — iga minutiga vähenes gaasi aktiivsus (lagunemiste arv ajaühikus) kaks korda, kümne minuti pärast aga kadus gaasi aktiivsus täielikult. Soddy uuris avastatud gaasi keemilisi omadusi ja leidis, et gaas ei astu ühessegi keemilisse reaktsiooni, s. t. on inertgaas. Hiljem nimetati see gaas radooniks ja paigutati Mendelejevi tabelis 86. ruutu.

Muundumiste ahel ilmnas ka teistel radioaktiivsetel elementidel: uraanil, aktiiniumil, raadiumil. Oma tööde põhjal jõudsid teadlased üldise järelduseni, mille täpselt sõnastas Rutherford: «Radioaktiivse aine aatomid on allutatud spontaansetele¹ muutustele. Igal ajamomendil muutub väike osa aatomeid ebapüsivaks ja laguneb plahvatuslikult. Enamikul juhtudel paisatakse aatomist välja hiiglasuure kiirusega aatomi kild — α -osake. Mõnel teisel juhul saadab plahvatust kiire elektroni väljapaiskumine ja suure läbitungimisvõimega elektromagnetkiirguse, nn. γ -kiirguse tekkimine. Kiirgus kaasneb aatomite muundumisega ja on seega aatomite lagunemise mõõduks.

Avastati, et aatomite muundumisel tekib täiesti uut liiki aine, mille füüsikalised ja keemilised omadused erinevad täiesti lähteaine füüsikalistest ja keemilistest omadustest. Tekkinud uus aine

¹ Spontaanne tähendab «iseeneslik».

on sageli samuti ebapüsiv ja muundub, kusjuures sellega kaasneb jällegi iseloomulik radioaktiivne kiirgus.

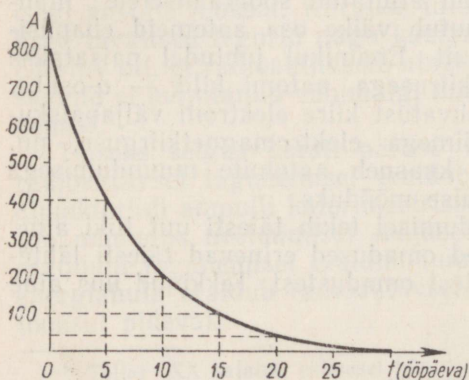
Seega on täpselt kindlaks tehtud, et mõnede elementide aatomid lagunevad spontaanselt, millega kaasneb tavalistel molekulaarsetel muundumistel vabaneva energiaga võrreldes hiiglasuure energia kiirgamine.»

Pärast aatomi tuuma avastamist sai kohe selgeks, et **radioaktiivsel muundumisel muutub just aatomi tuum**. Pole ju aatomi elektronkattes olemas α -osakesi ning elektronkatte elektronide arvu vähenemine ühe võrra muudab aatomi iooniks, mitte aga uueks keemiliseks elemendiks. Elektroni väljapaiskamine tuumast muudab aga tuuma laengut (suurendab seda) ühe elementaarlaengu võrra. Tuumalaeng määrab elemendi järjenumbriga Mendelejevi tabelis ja seega ka kõik elemendi keemilised omadused.

105. RADIOAKTIIVSE LAGUNEMISE SEADUS. POOLESTUSAEG

Eespool mainiti, et radioaktiivse lagunemise uurimisel tegi Rutherford katseliselt kindlaks radioaktiivsete ainete aktiivsuse ajast sõltuvuse iseloomu — radioaktiivse lagunemise põhiseaduse. Osutus, et iga radioaktiivse aine jaoks on olemas kindel ajavahemik, mille jooksul aine aktiivsus väheneb kaks korda. Seda ajavahemikku nimetatakse **poolestusajaks**. Poolestusaeg T on ilmselt see ajavahemik, mille jooksul laguneb pool olemasolevatest radioaktiivse elemendi aatomeist, sest preparaadi aktiivsus väheneb kaks korda ka siis, kui preparaat jaotada lihtsalt pooleks.

Ühe radioaktiivse aine (niinimetatud raadium E , mis on raadiumi üheks lagunemisproduktiks) aktiivsuse, s. t. sekundis toimuvate lagunemiste arvu vähenemise sõltuvust ajast on kujutatud joonisel 182. Jooniselt näeme, et raadium E poolestusaeg on 5 ööpäeva.



Joon. 182

Leiame nüüd radioaktiivse lagunemise seaduse matemaatilise kuju. Olgu ajamomendil $t=0$ olemas N_0 radioaktiivset aatomit. Poolestusaja möödudes on siis alles $\frac{N_0}{2}$ radioaktiivset aatomit.

Järgmise poolestusaja möödudes on alles $\frac{1}{2} \cdot \frac{N_0}{2} = \frac{N_0}{4} = \frac{N_0}{2^2}$ radioaktiivset aatomit. Aja $t = nT$, s. t. n poolestusaja T möödudes on allesjäänud radioaktiivsete aatomite arv

$$N = N_0 \frac{1}{2^n}.$$

Kuna $n = \frac{t}{T}$, siis

$$N = N_0 2^{-\frac{t}{T}}. \quad (8.1)$$

See ongi radioaktiivse lagunemise põhiseadus.

Poolestusaeg on põhiline suurus, mis iseloomustab radioaktiivse lagunemise kiirust. Erinevate radioaktiivsete ainete poolestusajad on väga erinevad. Uraani poolestusaeg $T \approx 4,5$ miljardit aastat. Just suure poolestusaja tõttu ei vähene uraani aktiivsus mõne aasta jooksul märgatavalt. Raadiumi poolestusaeg $T \approx 1600$ aastat. Mida lühem on poolestusaeg, seda intensiivsemalt element laguneb. On olemas radioaktiivseid elemente, mille poolestusaeg on miljondikke sekundeid.

Poolestusaja võib määrata valemi (8.1) abil, kui saab ära lugeda mingi ajavahemiku jooksul lagunevate aatomite arvu ning on teada aatomite arv lugemise algmomendil.

Radioaktiivse lagunemise seadus ise on küllalt lihtne, kuid tema füüsikalist sisu pole endale sugugi kerge ette kujutada. Tõepoolest, radioaktiivse lagunemise seadusest järeldub, et mistahes ajavahemiku jooksul laguneb olemasolevatest aatomitest üks ja seesama osa (poolestusaja jooksul lagunevad pooled aatomid). See tähendab, et lagunemise kiirus aja jooksul üldse ei muutu. **Radioaktiivsed aatomid ei «vanane».** Nii on raadiumi lagunemisel tekkinud radooni aatomil võrdsed võimalused laguneda kohe pärast tekkimist või alles poole tunni pärast. Mistahes aatomi tuuma lagunemine pole nii-öelda «tuuma vanadussurm», vaid «õnnetu juhus» tuuma elus.

Radioaktiivsetel aatomitel (täpsemalt tuumadel) pole vanust, vaid ainult **keskmine eluiga** τ .

Üksikute aatomite eksisteerimine võib kõikuda mõnest sekundist miljardite aastateni. Pole kahtlust, et uraani aatomid tekkisid kunagi Universumi evolutsiooni käigus. Pärast seda võib uraaniaatom lebada maapõues rahulikult miljardeid aastaid ja siis järsku plahvatuda, samal ajal aga jäävad tema naabrid

täiesti endisesse olekusse. Keskmise eluiga on seega suure arvu ühte liiki aatomite eluea aritmeetiline keskmine. Keskmine eluiga on võrdeline poolestusajaga ja võib tõestada, et

$$\tau \approx 1,44T.$$

(8.2)

Antud aatomi lagunemismomendi ette ennustada ei saa. Mõtet omab ainult suure hulga aatomite keskmise käitumise kohta tehtud väide. Radioaktiivse lagunemise seadus määrab just nimelt antud ajavahemiku jooksul keskmiselt lagunevate aatomite arvu. Keskväärtusest esineb aga alati kõrvalekaldumisi ja mida vähem on radioaktiivse preparaadi aatomeid, seda suuremad on kõrvalekaldumised. Radioaktiivse lagunemise seadus on **statistiline seadus**. Samuti nagu molekulide käitumise seadused molekulaarkineetilises teoorias, on ka radioaktiivse lagunemise seadus keskmiselt õige ainult suure arvu osakeste jaoks.

106. ISOTOOBID

Radioaktiivsus viis tuumade olemust puudutavale tähtsale avastusele.

Hiiglasuure arvu radioaktiivsete muundumiste jälgimise tulemusena selgus aegapidi, et on olemas täiesti erinevate radioaktiivsete omadustega (s. t. erineval viisil lagunevaid), kuid täiesti ühesuguste keemiliste omadustega aineid, mida ei õnnestunud mitte ühelgi keemilisel viisil eristada. Siit järeldas Soddy 1911. aastal, et on olemas täiesti ühesuguste keemiliste omadustega, kuid muus suhtes, eriti radiaktiivsuse poolest, erinevaid elemente. Ühesuguste keemiliste omadustega elemendid tuleb paigutada Mendelejevi tabeli ühte ja samasse ruutu. Seepärast nimetaski Soddy neid elemente **isotoopideks** (s. t. perioodilisuse süsteemi ühes ruudus seisvateks).

Soddy oletus sai hiilgava kinnituse ja sügava tõlgenduse aasta hiljem, mil Thomson määras neonioonide täpse massi nende kõrvalekaldumise järgi elektri- ja magnetväljas. Thomson avastas, et neon koosneb kahte sorti aatomitest. Suurema osa neoniaatomite aatommass on 20, kuid peale nende sisaldab neon veel vähesel määral aatomeid, mille aatommass on 22. Mõlemat sorti aatomite sisalduse tõttu on segu aatommass 20,2, mis oli teada juba enne Thomsoni katseid. Selgus, et ühesuguste keemiliste omadustega aatomid erinesid massi poolest. Mõlemat sorti neoniaatomid asuvad Mendelejevi tabelis loomulikult ühes ja samas kohas ning on järelikult isotoobid. Niisiis, isotoobid erinevad mitte ainult radioaktiivsete omaduste, vaid ka massi poolest. Just viimane erinevus osutuski peamiseks. Tuumade laeng, mis määrab elektronide arvu elektronkattes ja järelikult ka aatomite keemilised omadused, on kõikidel isotoopidel ühesuurune,

tuumade massid aga erinevad. Isotoopide tuumad võivad olla nii radioaktiivsed kui ka mitteradioaktiivsed. Radioaktiivsed isotoobid on erinevate omadustega sellepärast, et nende tuumade massid on erinevad.

Tänapäeval on kindlaks tehtud, et isotoobid on olemas kõikidel keemilistel elementidel, kuid kõikide elementide isotoobid pole stabiilsed. Isotoope omab nii looduses leiduv kõige raskem element — uraan (aatommassid 238, 235 jt.) kui ka kõige kergem element — vesinik (aatommassid 1, 2 ja 3).

Kõige tähelepanuväärsemad on vesiniku isotoobid, sest nende massid erinevad üksteisest kaks või kolm korda. Isotoopi aatommassiga 2 nimetatakse **deuteeriumiks**. Deuteerium on stabiilne ja teda leidub looduses tavalisest vesinikust 4500 korda vähem. Deuteeriumi ühinemisel hapnikuga tekib niinimetatud **raske vesi**, mille füüsikalised omadused on tavalise vee omadustest hoopis erinevad. Normaalingimustel keeb raske vesi 101,2°C ja jäätub 3,8°C juures.

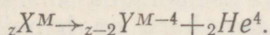
Vesiniku isotoopi aatommassiga 3 nimetatakse **tritiumiks**. Tritium on β -aktiivne poolestusajaga umbes 12 aastat.

Isotoopide olemasolu näitab, et aatomituuma laeng ja järelikult aatomi elektronkatte ehitus ei määra veel aatomi kõiki omadusi, vaid ainult aatomi keemilised omadused ja need füüsikalised omadused, mis sõltuvad elektronkatte väliskihist. Väline elektronkiht määrab näiteks aatomi mõõtmed. Järjenumber Mendeleejevi tabelis ei määra aga aatomi massi ja radioaktiivsust.

Oluline on isotoopide masside täpsest mõõtmisest selgunud tõsiasi, et isotoopide aatommassid on väga lähedased täisarvudele. Mõnede keemiliste elementide aatommasside suur erinevus täisarvust (kloori aatommass on näiteks 35,5) seletub sellega, et tavalises olekus on keemiliselt puhas aine isotoopide segu ning sisaldab isotoope erinevates hulkades. Isotoopide aatommasside täisarvulisus (ligikaudne) on aatomituuma ehituse selgitamisel väga tähtis. Seda küsimust käsitleme veel edaspidi.

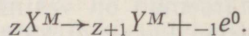
107. NIHKEREegel

Alles pärast isotoopide avastamist õnnestus mõista elementide järjestikust radioaktiivsete muundumiste ahelat. Radioaktiivsed muundumised alluvad niinimetatud **nihkereeglile**, mille esmakordselt sõnastas Soddy: α -lagunemisel väheneb elemendi mass nelja aatommassiühiku ja laeng $2e$ võrra, mille tõttu element nihkub perioodilisuse süsteemis kahe koha võrra ettepoole. Sümbolitega võib seda kirjutada järgmiselt



Elementi tähistatakse siin keemias üldkasutatavate sümbo-
litega. Tuuma laeng märgitakse vasakpoolse alumise ja aatom-
mass parempoolse ülemise indeksiga elemendi sümboli juurde.
Näiteks vesiniku tavalist isotoopi tähistatakse sümboliga ${}_1\text{H}^1$,
deuteeriumi ${}_1\text{H}^2$. α -osakest, heeliumiaatomi tuuma tähistatakse
 ${}_2\text{He}^4$ jne.

β -lagunemisel lendab tuumast välja elektron, mille tõttu tuuma
laeng suureneb ühe elementaarlaengu võrra, kuid tuuma mass
jääb peaaegu muutumatuks:



Viimases valemis tähistab ${}_{-1} e^0$ elektroni: ülemine indeks «0»
tähendab, et elektroni mass on aatommassiühikuga võrreldes
väga väike. β -lagunemisel nihkub element perioodilisuse süsteemis
ühe koha võrra tahapoole. γ -kiirgusel tuuma laeng ei muutu ja
tuuma mass muutub lõpmatult vähe.

Radioaktiivsel lagunemisel tekkinud tuumad on tavaliselt ka
ise radioaktiivsed.

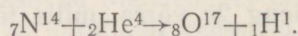
108. AATOMITUUMADE MUUNDUMINE α -OSAKESTE TOIMEL

Esmakordselt inimkonna ajaloos sundis tuuma muunduma
1920. aastal Ernest Rutherford. See avastus polnud enam juhuslik.

Rutherford teadis, et kõrge temperatuur, suur rõhk ning tugev
elektromagnetväli ei lõhusta tuuma ega mõjuta ka radioaktiivse
lagunemise kiirust. Sellest järeldas ta, et tuum on väga püsiv
ning selle lõhkumiseks või muundamiseks on vaja väga suurt
energiat. Kõige kontsentreeritumaks energiaallikaks olid tollal
radioaktiivsel lagunemisel tuumadest väljuvad α -osakesed.

Esimeseks tuumaks, mida sunniti muunduma, oli lämmastiku
tuum ${}_7\text{N}^{14}$. Lämmastiku pommitamisel suurt energiat omavate
 α -osakestega avastas Rutherford prootonite, vesinikuaatomi tuu-
made tekkimise.

Esimestes katsetes registreeriti prootoneid stsintillatsiooni-
meetodil, mille tõttu katsetulemused polnud küllalt usutavad.
Mõne aasta pärast õnnestus lämmastiku muundumist jälgida
Wilsoni kambris. Radioaktiivsest preparaadist kambrisse tunginud
50 000 α -osakese seast haaratakse lämmastiku tuuma poolt umbes
üks α -osake ja sellega kaasneb prootoni tekkimine. Prootoni tek-
kimisel muundub lämmastiku tuum hapniku isotoobi tuumaks:



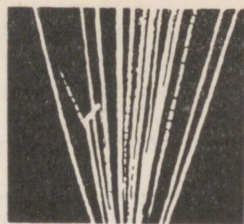
Joonisel 183 on toodud seda protsessi kujutav foto Wilsoni
kambrist. Vasakul on näha iseloomulik «hark» — osakese jälje-
kahestumine. Hargi jämedam haru on hapniku tuuma, peenem

aga prootoni jälg. Teised α -osakesed lämmastiku tuumadega ei pörkunud ja nende jäljed on sirgjoonelised.

Teised uurijad avastasid fluori, naatriumi, alumiiniumi jt. elementide tuumade muundumise α -osakeste toimel. Perioodilisuse süsteemi lõpus asuvad rasked elemendid α -osakeste toimel ei muundunud. Nende elementide tuumade suur laeng ei lase arvavastavasti α -osakesi tuumale kuigi lähedale.

Ouline on siin see, et α -osakese kineetiline energia ei võrdu prootoni ja muundumisel tekkinud tuuma kineetiliste energiatega summaga. See tähendab, et reaktsioon kulgeb energia neeldumisega. α -osakese kineetiline energia (umbes $1,2 \cdot 10^6$ eV) arvel suureneb ka tuuma siseenergia.

Alumiiniumiaatomi analoogilisel muundumisel aga eraldub energia — reaktsiooni produktide kineetiline energia on alumiiniumi tuuma pommitava α -osakese kineetilisest energiast $4 \cdot 10^5$ eV võrra suurem. See on hiiglaslik energia, kuid seda ei saa kasutada, sest enamik α -osakesi reaktsiooni ei tekita ja nende kineetiline energia läheb kasutult kaduma. Need katsed näitasid, et aatomituumade energiavarud on tohutult suured ja tuleb ainult osata neid kätte saada.



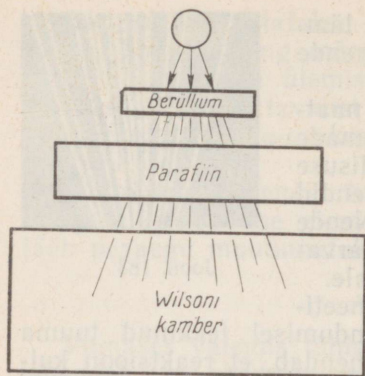
Joon. 183

109. NEUTRONI AVASTAMINE

1932. a. oli tuumafüüsikas tähtsaimaks sündmuseks **neutroni** avastamine.

Berülliumi pommitamisel α -osakestega prootoneid ei tekkinud, kuid tekkis mingi väga suure läbitungimisvõimega kiirus. Tekkinud kiirus tungis läbi isegi 10—20 cm paksusest pliiplaadist. Oletati, et tekkinud kiirus on suure energiaga γ -kiirus. Irène Joliot-Curie (Marie ja Pierre Curie tütar) ja tema mees Frédéric Joliot-Curie (sai hiljem maailmakuulsaks füüsikuks) avastasid, et parafiinplaadist läbitungimisel berülliumi kiirguse ioniseerimisvõime suureneb järsult. Nad oletasid õigesti, et berülliumi kiirus lööb parafiinist välja prootoneid, sest parafiin sisaldab suurel hulgal vesinikku. Abielupaar Joliot-Curie tegi Wilsoni kambri abil (katseseade skeem on antud joonisel 184) kindlaks, et parafiinist väljuvad tõesti prootonid ning hindasid prootonite jälje pikkuse järgi tekkinud prootonite energia. Kui oletada, et prootonid tekivad ja omandavad energia γ -kvantidega pörkumisel, peab γ -kvantide energia olema hiiglasuur — umbes 55 MeV.

1932. aastal jälgis inglise füüsik J. Chadwick (Rutherfordi õpilane) lämmastiku tuuma pörkumist berülliumi kiirgusega

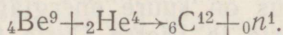


Joon. 184

α -osakeste mõjul välja mingid küllalt rasked osakesed, sest ainult raskete osakestega põrkumisel võisid prootonid ja lämmastiku- ning argooniaatomi tuumad omandada sellise energia, mis järeldus nende poolt Wilsoni kambrisse jäetud jälgedest. Kuna need osakesed olid suure läbitungimisvõimega ja ei ioniseerinud gaasi vahetult, pidid nad järelikult olema elektriliselt neutraalsed. Laetud osake on ju ainega tugevas vastasmõjus ja kaotab seepärast oma energia kiiresti.

Uuele osakesele pandi nimeks **neutron**. Rutherford ennustas neutroni olemasolu juba 10 aastat enne Chadwicki katseid. Neutronitega põrkuvate tuumade energia ja impulsi järgi leiti neutroni mass, mis osutus prootoni massist väheke suuremaks. Neutroni mass on 1838,6 elektroni massi, prootoni mass aga 1836,1 elektroni massi.

Kui α -osake tungis berülliumi tuuma, tekkis järgmine reaktsioon:



Valemis on neutroni sümboliks ${}_0n^1$, sest neutroni laeng on null ja mass ligikaudu üks aatommassiühik.

Eelmisega sarnane reaktsioon toimus ka boori, perioodilisuse süsteemi viienda elemendi pommitamisel α -osakestega.

110. AATOMITUUMA EHITUS. TUUMAJÕUD

Kohe pärast neutroni avastamist Chadwicki poolt löid nõukogude füüsik D. D. I v a n e n k o ja saksa füüsik W. Heisenberg mudeli, mille järgi **tuum koosneb prootonitest ja neutronitest**. Tuumade muundumiste uuringud kinnitasid selle mudeli õigsust ja tänapäeval on see mudel vaieldamatult õige.

Wilsoni kambris. Chadwicki arvates pidi γ -kvantide energia, mis oleks suutnud anda lämmastiku-aatomi tuumadele tekkinud jälje pikkuse järgi määratud kiiruse, olema ligikaudu 90 MeV. Argooni tuumade jälgede uurimine andis aga veelgi suurema arvu — 150 MeV. Oletus, et tuumad hakkavad liikuma seisumassi mitteomavate osakestega põrkumise tulemusel, viis ilmsele vastuolule.

Peagi selgus, et oletus, mille kohaselt berüllium kiirgab seisumassi mitteomavaid γ -kvante, ei pea paika. Berülliumist lendavad

Prootonite arv tuumas võrdub elektronide arvuga aatomi elektronkattes, sest tervikuna on aatom neutraalne. Prootonite arv tuumas võrdub järelikult elemendi järjenumbriga Z Mendelejevi tabelis.

Massiarvuks A nimetatakse prootonite arvu Z ja neutronite arvu N summat tuumas:

$$A = Z + N. \quad (8.3)$$

Kuna prootoni ja neutroni massid on ligikaudu võrdsed, võrdub massiarv elemendi täisarvuks ümardatud aatommassiga. Massiarvu määramiseks võib tuumade massi mõõta mitte eriti täpsete aparaatidega.

Isotoopide tuumades on prootonite arv Z ühesugune, neutronite arv N aga mitte, s. t. isotoopide massiarvud A on erinevad.

Kuna tuumad on väga püsivad, siis hoiavad neutroneid ja prootoneid tuumas koos mingid väga suured jõud. Mis jõud need on? Võib kindlalt väita, et gravitatsioonijõud need küll ei ole, sest gravitatsioonijõud on selleks liiga nõrgad. Tuuma püsivust ei saa seletada ka elektromagnetjõududega, sest ühenimeliselt laetud prootonite vahel mõjuvad elektrilised tõukejõud, neutronite vahel aga elektrilisi jõude ei mõju, sest neutronid on laenguta osakesed.

Tuumaosakeste, prootonite ja neutronite (sageli nimetatakse neid **nukleonideks**) vahel peavad järelikult mõjuma erilised jõud. Neid jõude hakati nimetama **tuumajõududeks**. Mis on siis tuumajõudude põhilisteks omadusteks?

Tuumajõud on elektromagnetjõududest umbes sada korda suuremad ja looduses esinevatest jõududest üldse kõige tugevamad jõud. Tuumaosakeste vastastikust mõju nimetatakse seepärast sageli ka tugevaks vastasmõjuks¹. **Tugev vastasmõju** ei taandu aga ainult nukleonide vastasmõjule tuumas, vaid ta on eriline vastasmõju liik, mis on elektromagnetilise vastasmõju kõrval omane paljudele elementaarosakestele.

Tuumajõudude teiseks tähtsaks omapäraks on nende väike mõjuraadius. Elektromagnetjõud on suure mõjuraadiusega, sest nad vähenevad kauguse suurenedes suhteliselt aeglaselt. Tuumajõud, nagu näitasid juba Rutherfordi katsed α -osakeste hajutamisest tuumade poolt, avaldavad märgatavat mõju ainult tuuma mõõtmetega (10^{-12} — 10^{-13} cm) samas suurusjärgus olevatel kaugustel. Piltlikult võib öelda, et tuum on «väga lühikeste kätega hiiglane». Tuumajõudude kvantitatiivset teooriat pole senini veel loodud.

¹ Elementaarosakeste vastasmõju nimetatakse ka interaktsiooniks. (Tõlk.)

Tuuma seoseenergia all mõistetakse energiat, mida on vaja tuuma täielikuks lõhkumiseks üksikuteks koostisosadeks. Energia jäävuse seaduse põhjal võib öelda, et seoseenergia võrdub energiaga, mis vabaneb tuuma moodustumisel nukleonidest. Tuuma seoseenergia on hiiglasuur. Kuidas saab seoseenergia suurust leida?

Kuni puudub tuumajõudude kvantitatiivne teooria, ei saa seoseenergiat teoreetiliselt arvutada, nii nagu seda tehakse elektronide seoseenergia puhul aatomis. Mistahes tuuma seoseenergia saab siiski määrata ja seda tänu just tuuma massi täpsele mõõtmisele. Seoseenergia arvutamisel tuuma massi kaudu tuleb kasutada Einsteini poolt tuletatud massi ja energia vahelist seost:

$$E = mc^2. \quad (8.4)$$

Tuumade masside väga täpsed mõõtmised näitavad, et **tuuma seisumass M_t on teda moodustavate prootonite ja neutronite seisumasside summast alati väiksem:**

$$M_t < Zm_p + Nm_n. \quad (8.5)$$

Nagu öeldakse, esineb massidefekt. Masside vahe

$$\Delta M = Zm_p + Nm_n - M_t$$

on alati positiivne.

Heeliumi aatomituuma mass on näiteks kahe prootoni ja kahe neutroni masside summast ühe protsendi võrra väiksem. Gramm-aatomi heeliumi massidefekt $\Delta M = 0,286$ g. Massi vähenemine tuuma moodustamisel nukleonidest tähendab seda, et osakeste energia väheneb tuuma moodustumisel seoseenergia ΔE_s võrra:

$$\Delta E_s = \Delta M c^2 = (Zm_p + Nm_n - M_t) c^2. \quad (8.6)$$

Kuhu siis energia ΔE_s ja mass ΔM kaovad.

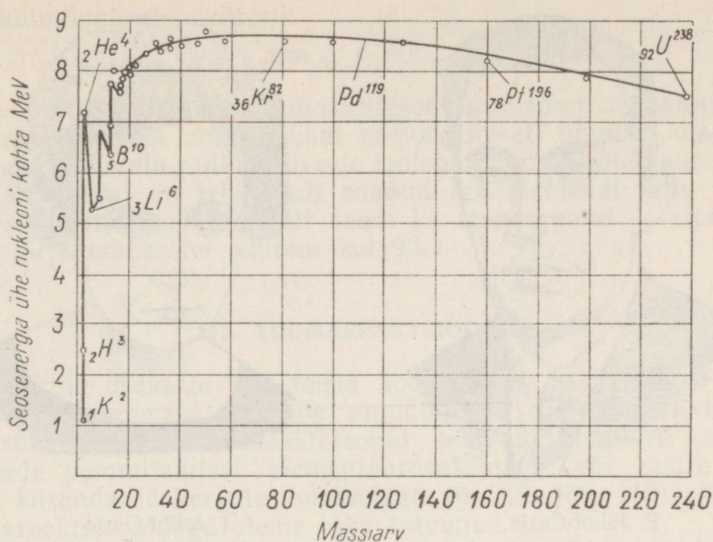
Ligilähedaselt võib seda selgitada järgmiselt. Tuumamoodustumisel liiguvad osakesed väikestel kaugustel mõjuvate tuumajõudude toimel hiiglasuure kiirendusega üksteise poole, mille tõttu kiiratakse γ -kvante energiaga ΔE_s ja massiga

$$\Delta M = \frac{\Delta E_s}{c^2}.$$

Seoseenergia suurusest võib saada piltliku ettekujutuse järgmise näite põhjal: 4 g heeliumi moodustumisel eralduv energia võrdub 5—6 vagunitäie kivisöe põlemisel eralduva energiaga.

Tähtsat informatsiooni tuumade omadustest annab nukleoni kohta tuleva seoseenergia¹ sõltuvus tuuma massiarvust A . Seda

¹ Nukleoni kohta tulevat seoseenergiat nimetatakse ka eriseoseenergiaks. (Tõlk.)



Joon. 185

sõltuvust saab leida katseliselt. Jättes kerged tuumad kõrvale, on jooniselt 185 hästi näha, et seoseenergia nukleoni kohta on peaaegu konstantne ja võrdub 8 MeV nukleoni kohta. Kõvera nõrk maksimum 8,6 MeV nukleoni kohta langeb massiarvude $A \approx 50-60$, s. t. raua ja temale lähedaste järjenumbritega elementide kohta. Nende elementide tuumad on kõige püsivamad.

Kergete elementide tuumade nukleoni kohta tuleva seoseenergia vähenemine seletub pinnaefektidega. Tuuma pinnal asuvad nukleonid on naaberosakestega nõrgemini seotud kui tuuma sees asuvad osakesed. Mida väiksem on tuum, seda suurem on pinnaefektide mõju ruumiefektidega võrreldes.

Raskete aatomite tuumade seoseenergia nukleoni kohta väheneb sellepärast, et Z kasvades suureneb protonite kuloniline tõukeenergia.

112. TEHISRADIOAKTIIVSUS

Nüüd, pärast aatomituuma ehituse alustega tutvumist läheme jällegi aatomituumade sunnitud muundumiste juurde tagasi.

Võib arvata, et aatomituumade sunnitud muundumistel tekiavad looduses mitteleiduvad radioaktiivsed tuumad. Teiste sõnadega, võivad tekkida looduslikes tingimustes stabiilsete elementide mittestabiilsed isotoobid. Niisuguse nähtuse avastasidki



F. Joliot-Curie

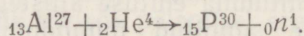


I. Joliot-Curie

1934. a. Irène ja Frédéric Joliot-Curie ning nimetasid selle tehisradioaktiivsuseks.

Irène ja Frédéric Joliot-Curie jätkasid α -osakeste mõjul toimivate tuumade muundumiste uurimist. Alumiiniumi ja mõne teise elemendi pommitamisel α -osakestega avastasid Curie'd uue muundumiste liigi. Tuumad kiirgasid α -osakestega pommitamisel positrone, mitte aga elektrone, nagu see toimus paljudel teistel juhtudel. **Positron**, osake mis erineb elektronist ainult elektrilaengu märgi poolest, avastati vähe aega enne Curie'de poolt tehtud katseid. Nähtusest huvitunud teadlased otsustasid hakata nähtust põhjalikult uurima. Alumiiniumleheke pandi α -osakeste allika lähedale ja teda kiiritati mõne minuti jooksul. Pärast kiiritamist radioaktiivne preparaat eemaldati ja tehti Geiger-Mülleri loenduri abil kindlaks, et alumiiniumleht oli muutunud radioaktiivseks ning kiirgas teatud aja jooksul positrone. See oli täiesti uus, senitundmatu nähtus, kus tuumad muundusid veel pärast α -osakeste mõju lakkamist.

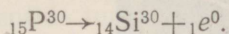
Kirjeldatud nähtust selgitati järgmiselt. Alumiiniumituumad haaravad α -osakesi ja kiirgavad pärast seda neutroni, muundudes ise fosfori isotoobi ${}_{15}\text{P}^{30}$ tuumadeks:



Tekkinud fosfori tehisisotoop ${}_{15}\text{P}^{30}$ on radioaktiivne ning kiir-

¹ Fosfori looduslik isotoop ${}_{15}\text{P}^{31}$ on stabiilne.

gab muundumisel positroni:



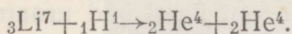
See on üks näide tehisradioaktiivsete tuumade moodustumisest. Hiljem saadi veel umbes tuhat radioaktiivset tuuma, kusjuures looduses leiduvate radioaktiivsete isotoopide arv ei ole suurem kui 40. Tänapäeval on tehislikult saadud iga elemendi mitu radioaktiivset isotoopi. Tehislikult saadi ka **transuraane** — elemente, mille järjenumbr on suurem kui 92.

113. TUUMAREAKTSIOONID

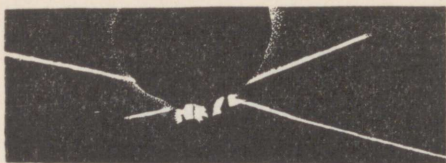
Üksikute osakeste või teiste tuumadega vastastikuse mõju protsessis toimuvaid tuumade muundumisi nimetatakse **tuumareaktsioonideks**. Tuumareaktsioonid tekivad tavaliselt raskete tuumade pommitamisel elementaarosakestega või suure energiani kiirendatud kergete tuumadega (§ 108, 109, 112). Mõnede tuumareaktsioonidega oleme juba tutvunud.

Kaasajal kiirendatakse prootoneid, deutroneid, α -osakesi ja raskemaid tuumi suurte energiatega elementaarosakeste ja ioonide kiirendites. Tuumareaktsioonide tekitamiseks on kiirendatud osakesed ja tuumad looduslike radioaktiivsete elementide α -kiirgusest palju efektiivsemad. Esiteks võib kiirendatavaile osakestele ja tuumadele anda tunduvalt suurema energia (üle 70 miljardi eV) kui on α -osakestel (maksimaalselt 8 MeV). Teiseks võib tuumareaktsioone tekitada prootonitega, mis tavaliselt radioaktiivsel lagunemisel ei teki. Prootoneid on otstarbekas kasutada ka sellepärast, et nende laeng on α -osakeste laengust kaks korda väiksem ja järelikult on tuuma poolt prootonile mõjuv jõud α -osakesele mõjuvast jõust samuti kaks korda väiksem. Lõpuks on oluline veel see, et kiirendis saab kiirendada heeliumi tuumast raskemaid tuumi.

Esimese, kiirendis suure energiani kiirendatud prootonite poolt tekitatud tuuma muundumise said 1932. aastal Rutherfordi õpilased J. Cockcroft ja E. Walton, kel õnnestus lõhestada liitiumituum kaheks α -osakeseks:



Nagu Wilsoni kambris tekkinud jälgedest näha (joon. 186), lendavad heelumiaatomi tuumad piki sirgeid kahele poole laiali — lendavad laiali just nii, nagu seda nõuab impulsi jäävuse seadus (protoni impulss on tekkinud α -osakeste impulsist palju kordi väiksem). Reaktsioonil eraldub hiiglasuur energia — umbes 17,6 MeV. Enam me ei too näiteid laetud osakeste poolt põhjustatud tuumareaktsioonidest, vaid peatume ainult neil tuumareaktsioonidel, mida põhjustavad neutronid.



Joon. 186

Neutroni avastamine oli tuumareaktsioonide uurimisel pöördepunktiks. Kuna neutronid on laenguta osakesed, siis tungivad nad aatomituumadesse takistamatult ja põhjustavad tuumade muundumisi. Kuulus itaalia füüsik Enrico Fermi, kes hakkas esimesena uurima neutronite poolt esilekutsutud tuumareaktsioone, avastas, et tuumade muundumist põhjustavad isegi aeglased, s. t. soojusliikumise kiirusega liikuvad neutronid. Enamikul juhtudel on aeglased neutronid kiiretest neutronitest palju efektiivsemad, mistõttu kiireid neutroneid oli otstarbekas aeglustada. Kiireid neutroneid aeglustas soojusliikumise kiiruseni tavaline vesi. Vee aeglustav toime seletub sellega, et vesi sisaldab palju vesinikaatomite tuumi, prootoneid. Protoni mass on neutroni massiga peaaegu võrdne. Tuletame meelde, et kahe ühesuuruse massiga kera põrkumisel on kineetilise energia ülekandumine kõige intensiivsem. Tsentraalsel põrkel paigalseisva prootoniga annab neutron kogu oma kineetilise energia prootonile, s. t. jääb ise seisma.

114. URAANITUUMA LÕHUSTUMINE

Aatomituumade lõhustumine on tuumareaktsioonide eriliik, mille puhul raske elemendi tuum jaguneb kaheks, harvemini kolmeks või neljaks kildtuumaks. Tuumade lõhustumisel kiirguvad kaks või kolm neutronit, γ -kiired ning eraldub palju energiat.

Tuumade lõhustumise avastamine. Uraanituumade lõhustumise avastasid tegelikult 1938. a. saksa teadlased O. Hahn ja F. Strassmann, kellel õnnestus kindlaks teha, et uraani pommitamisel neutronitega tekivad perioodilisuse süsteemi keskpäigas asuvad elemendid — baarium, krüpton jt. Seda fakti tõlgendasid aga õigesti, s. t. kui neutroni haaranud uraanituuma lõhustumist, teised teadlased 1939. a. algul.

Lõhustumise võimalikkust selgitatakse sellega, et raske tuuma seisumass on lõhustumisel tekkinud kildtuumade masside summast suurem, mistõttu lõhustumisel eraldubki palju energiat, sest eralduv energia on ekvivalentne seisumassi vähenemisega. Kogumass jääb aga muutumatuks, sest suure kiirusega laialipaiskuvate kildtuumade massid on nende seisumassidest suuremad.

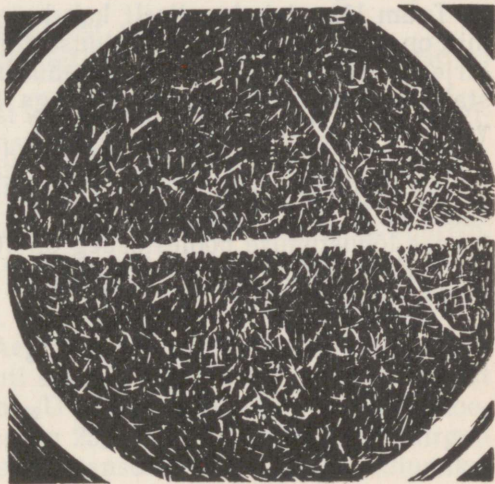
Rasketest tuumade lõhustumist võib selgitada ka nukleoni kohta tuleva seoseenergia ja massiarvu A vahelist sõltuvust näitava

kõvera põhjal (vt. joon. 185). Perioodilisuse süsteemi lõpus ($A \approx 200$) asuvate elementide tuumade seoseenergia nukleoni kohta on perioodilisuse süsteemi keskmiste elementide ($A \approx 100$) tuumade seoseenergiast nukleoni kohta peaaegu 1 MeV võrra väiksem. Raskete tuumade lõhustumine on seepärast «energeetiliselt kasulik», sest pärast lõhustumist läheb süsteem minimaalsele siseenergiale vastavasse olekusse. Mida suurem on tuuma seoseenergia, seda rohkem energiat peab tuuma tekkimisel eralduma ja seda väiksem on tekkinud süsteemi siseenergia.

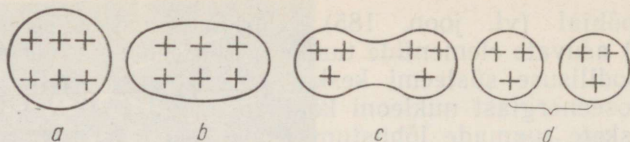
Tuuma lõhustumisel suureneb ühe nukleoni kohta tulev seoseenergia 1 MeV võrra, mistõttu tuuma lõhustumisel eralduv kogueenergia on hiiglasuur — umbes 200 MeV. Mitte ühelgi teisel tuumareaktsioonil (mis pole seotud tuuma lõhustumisega) ei eraldu nii palju energiat.

Uraanituuma ${}_{92}\text{U}^{235}$ lõhustumisel eraldunud energia mõõtmised kinnitasid ülaltoodud arutlusi ja andsid tulemuseks 200 MeV. Suurem osa eraldunud energiast (168 MeV) langeb kildtuumade kineetilise energia arvele. Wilsoni kambris tekkinud lõhustunud uraanituuma kildtuumade jälgede pilt on toodud joonisel 187.

Tuuma lõhustumise mehhanism. Aatomituuma lõhustumist võib selgitada Niels Bohri poolt loodud **tuuma tilgamudeli** põhjal. Tuuma tilgamudeli kohaselt meenutab nukleonide kogum laetud vedelikutilka (joon. 188, *a*). Nukleonide vahelised tuumajõud on nagu vedeliku molekulide vahelised jõudki väikese mõjuraadiusega. Kui tuuma tungib neutron, hakkab tuum deformeeruma ja muutub ovaalseks (joon. 188, *b*). Tuuma ruumala aga ei muutu, sest «tuumavedelik» on praktiliselt kokkusurumatu, kuid tuuma pindala ja järelikult ka pinnaenergia suurenevad. Kuloniline ener-



Joon. 187



Joon. 188

gia väheneb, sest protonite keskmine kaugus suureneb. Kui pinnenergia suurenemine ΔU_p ületab kulonilise energia vähenemise ΔU_c , tuleb tuum lõhustumata algolekusse tagasi, sest sel juhul on tuuma endist kuju taastada püüdvad pinnajõud kulonilistest tõukejõududest suuremad. Tuuma tugeval deformeerumisel, kui tuum muutub hantlikujuliseks (joon. 188, c), muutub pinnenergia vähem kui kuloniline energia ja pinnajõud ei suuda tuuma esialgset kuju taastada. Sel juhul tuum lõhustubki (joon. 188, d).

Neutronite kiirgamine tuuma lõhustumisel. Tuumade lõhustumise fundamentaalseks omaduseks on kahe või kolme neutroni kiirgamine lõhustumisel. Just tänu neutronite kiirgumisele on võimalik tuumasisest energiat praktiliselt kasutada.

Miks lõhustumisel kiirguvad vabad neutronid, saab mõistatavaks järgmisest arutlusest. On teada, et stabiilsete elementide järjenumbriga kasvamisega suureneb protonite arvuga võrreldes neutronite arv tuumas. Lõhustumisel tekkinud kildtuumades on neutroneid rohkem, kui neid on Mendelejevi perioodilisuse süsteemi keskkohas asuvate aatomite tuumade moodustumiseks tarvis, mistõttu mõned neutronid vabanevadki. Vabanenud neutronid on väga erinevate kineetiliste energiatega — mõnest megaelektronvoldist kuni peaaegu nullini.

Tuum lõhustub tavaliselt kaheks erineva massiga kildtuumaks, mis on neutronite liigse sisalduse tõttu väga radioaktiivsed. Rea järjestikuste β -lagunemiste tulemusena tekivad lõppude lõpuks stabiilsed isotoobid. β -lagunemisega kaasneb ka suure energiaga γ -kvantide tekkimine.

Lõpuks märgime, et uraanituumad lõhustuvad ka spontaanselt. Uraanituumade spontaanse lõhustumise avastasid nõukogude füüsikud G. N. Fljorov ja K. A. Petržak. Uraanituuma spontaanse lõhustumise poolestusaeg on 10^{16} aastat, mis on α -osakeste kiirgamisega toimunud muundumise poolestusajast kaks miljonit korda pikem.

Uraanituuma lõhustumisel vabaneva kahe või kolme neutroni tõttu on võimalik tekitada juhitavat tuumade lõhustumise ahelreaktsiooni.

Lõhustumisel tuumast väljalendav mistahes neutron võib omakorda lõhustada naabertuuma, mille tulemusena eralduvad uued, lõhustamisvõimelised neutronid. Sel põhjusel hakkab lõhustuvate tuumade arv kiiresti suurenema ja tekib **ahelreaktsioon**. Aeglased neutronid lõhustavad ainult uraani isotoobi ${}_{92}\text{U}^{235}$ tuumi, mida looduslik uraan sisaldab levinuma isotoobi ${}_{92}\text{U}^{238}$ kõrval ainult $1/140$ osa. Aeglase neutroni haaramisel uraani isotoop ${}_{92}\text{U}^{238}$ ei lõhustu. Isotoopi ${}_{92}\text{U}^{238}$ võivad lõhustada ainult väga kiired neutronid, kuid viimaseid tekib uraanituumade lõhustumisel vähe.

Ahelreaktsioonil eraldub hiiglasuur energia. Iga tuuma lõhustumisel eraldub umbes 200 MeV energiat. Ühes grammis uraanis sisalduvate kõikide tuumade täielikul lõhustumisel eraldub $2,3 \cdot 10^4$ kWh energiat, mis on ekvivalentne 3 tonni kivisöe või 3000 liitri nafta põlemisel tekkiva energiaga.

Neutronite paljunemistegur. Ahelreaktsiooni kulgemiseks pole vaja, et iga vabanev neutron lõhustaks tuuma, vaid vaja on ainult seda, et tuumadesse tungiks ahelreaktsiooni kulgemiseks vajalik arv neutroneid. Ahelreaktsioon kulgeb siis, kui niinimetatud **neutronite paljunemistegur** k , mis võrdub mingi «põlvkonna» neutronite arvu suhtega eelneva «põlvkonna» neutronite arvusse, oleks ühest suurem.

Neutronite paljunemistegur sõltub järgmisest neljast faktorist:

1. Aeglase neutronite haaramisest ${}_{92}\text{U}^{235}$ tuumade poolt, millele järgneb nende tuumade lõhustumine. Kiirete neutronite haaramisest ${}_{92}\text{U}^{238}$ tuumade poolt, millele järgneb samuti ${}_{92}\text{U}^{238}$ tuumade lõhustumine.

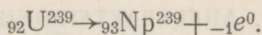
2. Neutronite lõhustuvast ainest väljalendamisest.

3. Neutronite haaramisest ${}_{92}\text{U}^{238}$ tuumade poolt, millele ei järgne ${}_{92}\text{U}^{238}$ lõhustumist.

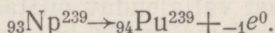
4. Neutronite haaramisest kildtuumade, aeglusti (sellest räägitakse edaspidi) ja seade konstruktsioonielementide poolt.

Ainult esimene faktor suurendab, kolm viimast aga vähendavad neutronite arvu. Nagu juba öeldud, on ahelreaktsiooni kulgemiseks vaja, et neutronite paljunemistegur k oleks ühest suurem. Neutronite paljunemistegur k peab aga olema ühest ainult veidi suurem, sest muidu kulgeb ahelreaktsioon nii kiiresti, et kaotab juhitavuse ja tekib plahvatus.

Plutooniumi tekkimine. Aeglase neutronite haaramine uraani isotoobi ${}_{92}\text{U}^{238}$ poolt on samuti suure praktilise tähtsusega. Pärast neutroni haaramist muundub ${}_{92}\text{U}^{238}$ radioaktiivseks uraani isotoobiks ${}_{92}\text{U}^{239}$, mille poolestusaeg on 23,5 minutit. ${}_{92}\text{U}^{239}$ tuum kiirgab elektroni ja muundub esimeseks transuraaniks — neptuuniumiks:



Neptuunium on samuti β -aktiivne poolestusajaga umbes 2,3 ööpäeva. Neptuuniumi muundumisel tekib järgmine transuraan — plutoonium:



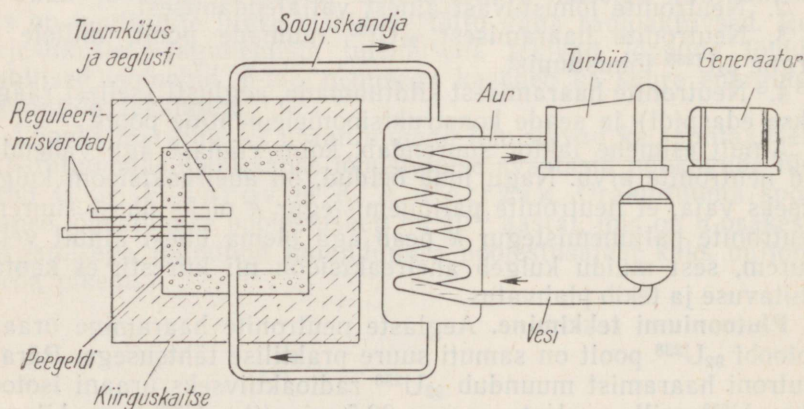
Plutoonium on suhteliselt stabiilne, sest tema poolestusaeg on umbes 24 000 aastat. Plutooniumi tähtsaks omaduseks on see, et ta lõhustub aeglase neutronite toimel samuti nagu uraani isotoop ${}_{92}\text{U}^{235}$. Seega võib ka plutooniumis tekitada ahelreaktsiooni, millega kaasneb tohutu energia eraldumine.

116. TUUMAREAKTOR

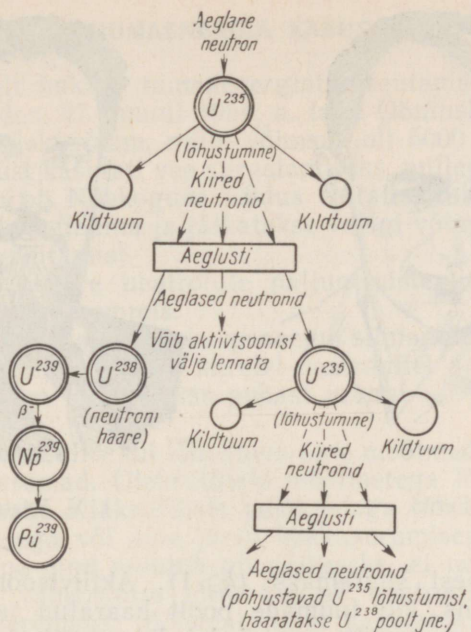
Seadet, milles kulgeb juhitud ahelreaktsioon, nimetatakse **tuumareaktoriks (aatomireaktoriks)**. Joonisel 189 on toodud tuumaelektrijaama põhimõtteskeem.

Tuumareaktori peamised elemendid on: tuumkütus (${}_{92}\text{U}^{235}$, ${}_{92}\text{U}^{238}$, ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ jt.), neutronite aeglusti (vesi, raske vesi, grafiit jt.), soojuskandja reaktorist soojuse väljaviimiseks (vesi, vedel naatrium jt.) ja ahelreaktsiooni kiiruse reguleerimise seade (reaktori aktiivsooni viidavad vardad, mis sisaldavad kaadmiumi või boori, s. t. aineid, mis neelavad hästi neutroneid).

Neutronite aeglustamine (neutronite kiirus väheneb põrkumisel aeglusti tuumadega) on kasulik seepärast, et aeglase neutronite haaramise tõenäosus uraani tuumade poolt on kiirete neutronite haaramise tõenäosusest sadu kordi suurem. Parimaks aeglustiks



Joon. 189



Joon. 190

on raske vesi. Ka tavaline vesi ise haarab teatud hulga neutroneid ja muundub raskeks veeks. Hea aeglusti on veel grafiit, sest grafiidi tuumad ei neela neutroneid. Reaktoris kulgevaid protsesse on skemaatiliselt kujutatud joonisel 190.

Võimalik on luua ka kiiretel neutronitel, s. t. aeglustita töötavaid reaktoreid. Kiiretel neutronitel töötavad reaktorid on aeglastel neutronitel töötavatest reaktoritest kompaktsemad, mis on eriti oluline reaktorite kasutamisel energiaallikatena laevadel ja allveelaevadel. Kiiretel neutronitel töötavates reaktorites ei saa tuumkütusena kasutada looduslikku uraani, vaid viimast tuleb rikastada isotoobiga ${}_{92}U^{235}$. Aeglastel neutronitel töötavates reaktorites saab aga tuumkütusena kasutada looduslikku uraani.

Kriitiline mass. Neutronite paljunemistegur saab olla ühest suurem ainult sel tingimusel, kui reaktori mõõtmed ja sellele vastavalt ka uraani mass on mingitest kriitilistest väärtustest suuremad. Kui reaktor on väikeste mõõtmetega, tungib reaktori aktiivsoonist, kus asuvad uraanivardad, liiga palju neutroneid välja.

Süsteemi mõõtmete suurendamisel suureneb lõhustuvate tuumade arv võrdeliselt aktiivsooni ruumalaga, aktiivsoonist väljatungivate neutronite arv aga võrdeliselt aktiivsooni pindalaga. Reaktori aktiivsooni suurendamisega saab neutronite paljunemis-



E. Fermi



I. V. Kurtšatov

teguri viia ühest suuremaks ($k > 1$). Aktiivsoon on kriitiliste mõõtmega siis, kui tuumade poolt haaratud ja aktiivsoonist väljalendavate neutronite arv võrdub lõhustumisel tekkivate neutronite arvuga, s. t. $k = 1$. Aktiivsooni kriitilised mõõtmised sõltuvad tuumkütuse liigist, aeglustist ja reaktori konstruktiivsetest iseärasustest.

Kerakujulise uraanitüki ${}_{92}\text{U}^{235}$ kriitiline mass on umbes 60 kg, kusjuures selle uraanist kera raadius on kõigest 9 cm (uraan on väga suure tihedusega aine).

Tuumareaktorit juhitakse kaadmiumi või boori sisaldavate varraste abil. Kui juhtimisvardad on aktiivsoonist välja tõmmatud, on $k > 1$. Kui juhtimisvardad on täielikult aktiivsooni lükatud, siis on $k < 1$. Ahelreaktsiooni peatamiseks mistahes ajahetkel tuleb lükata juhtimisvardad reaktori aktiivsooni.

Tuumade lõhustumine ahelreaktsioonina kuulub nende väga haruldaste protsesside hulka, mis pole looduses arvatavasti kunagi toimunud. Tuumareaktori loomine sarnaneb ses mõttes ratta leiutamiselega, sest ka viimast polnud võimalik loodusest «maha kirjutada».

Esimese ahelreaktsiooni pani Enrico Fermi juhtimisel töötanud teadlaste kollektiiv käima USA-s 2. detsembril 1942. a.

Nõukogude Liidus laskis esimese tuumareaktori käiku meie väljapaistva teadlase I. V. Kurtšatovi juhtimisel töötanud füüsikute kollektiiv 25. detsembril 1946. a.

Kaasajal on loodud mitmesugust tüüpi üksteisest nii võimsu- selt kui ülesannetelt erinevaid reaktoreid.

Esmakordselt hakati tuumaenergiat kasutama rahuotstarbel Nõukogude Liidus. 27. juunil 1954. a. lasti Obninski linnas käiku esimene tuumaelektriijaam, mille võimsus oli 5000 kW. Reaktoris eraldunud soojust kasutati vee aurustamiseks, millega käitati auru-turbiin. Praegu on Nõukogude Liidus ehitatud mitu suure võimsusega tuumaelektriijaama ja jätkatakse veelgi võimsamate tuumaelektriijaamade ehitamist.

Mittejuhitav, suure neutronite paljunemisteguriga ahelreaktsioon kulgeb aatomipommis.

Selleks et energia eralduks peaaegu silmapilkselt (plahvatusena), toimub ahelreaktsioon kiiretel neutronitel aeglustit kasutamata. Lõhkeainena kasutatakse puhast uraani ${}_{92}\text{U}^{235}$ või plutooniumi ${}_{94}\text{Pu}^{239}$.

Plahvatus tekib siis, kui lõhustuva aine mõõtmed on kriitilistest mõõtmetest suuremad. Ülekriitiliste mõõtmetega lõhustuvat ainet saadakse kas kahe allakriitiliste mõõtmetega lõhustuva aine tüki kiire ühendamisega või aine järsu kokkusurumisega mõõtmeteni, mille korral aine pind muutub nii väikeseks, et neutronite ainest väljalendamise vähenemise tõttu kasvab neutronite paljunemistegur ühest suuremaks. Mõlemal juhul kasutatakse ülekriitiliste mõõtmetega lõhustuva ainetüki saamiseks tavalist lõhkeainet.

Aatomipommi plahvatusel tõuseb temperatuur kümnete miljone kraadideni, mis põhjustab hiiglasuurt rõhu kasvu ja tekitab võimsa lööklaine. Plahvatusmomentil tekib ka võimas kiirgus. Plahvatusel tekkinud ahelreaktsiooni produktid on radioaktiivsed. Selle kõige tõttu on tuumaplahvatus elusorganismidele väga ohtlik.

USA kasutas aatomipomme Teise maailmasõja lõpus Jaapani vastu. 1945. a. augustis heideti aatomipommid Jaapani linnadele Hiroshimale ja Nagasakile. Neid inimeste massilise hävitamise akte ei tinginud sõjalised vajadused, sest Jaapani kapituleerimine oli tollal juba ette määratud.

Nõukogude Liit, kelle käsutuses on igat liiki tuumarelvad, võitleb rahvusvahelisel areenil järjekindlalt massihävitusrelvade keelustamise eest.

118. RADIOAKTIIVSETE ISOTOOPIDE KASUTAMINE TEADUSES JA TEHNIKAS

Tehiselemendid. Nagu räägiti, saadakse tuumareaktsioonidel kõikide keemiliste elementide isotoope. Elementidel järjenumbriga 43 ja 61 ning 83-st edasi pole üldse stabiilseid isotoope. Näiteks järjenumbriga $Z=43$ elemendi, tehneetsiumi kõige pikema elueaga isotoobi poolestusaeg on umbes $2,6 \cdot 10^6$ aastat.

Tuumareaktsioonide ja tehisradioaktiivsuse abil saadi ka transuraane. Neptuuniumi ja plutooniumi tekkimisega aga tutvusite juba eespool. Peale nende kahe saadi veel järgmisi elemente: ameriitsium ($Z=95$), kuurium ($Z=96$), berkeelium ($Z=97$), kalifornium ($Z=98$), einsteinium ($Z=99$), fermium ($Z=100$), mendelevium ($Z=101$), nobeelium ($Z=102$), laurentsium ($Z=103$), kurtšatoovium ($Z=104$, sünteesiti esmakordselt NSV Liidus, Dubnas), ($Z=105$, senini veel nimeta).

Märgitud aatomid. Mitmete keemiliste elementide radioaktiivsete isotoopide kasutamine omandab tänapäeval nii teaduses kui ka tootmises üha suurema tähtsuse. Väga levinud on märgitud aatomite meetod, mis põhineb sellel, et elementide radioaktiivsete isotoopide keemilised omadused ei erine nende elementide mitte-radioaktiivsete isotoopide keemilistest omadustest.

Radioaktiivseid isotoope saab nende kiirguse järgi väga lihtsalt kindlaks teha. Radioaktiivsus on omapäraseks märgiks, mille abil saab jälgida, kuidas element käitub mitmesugustes keemilistes reaktsioonides ja mehhaanilistes muundumistes. Märgitud aatomite meetod muutus paljude bioloogiliste, füsioloogiliste, meditsiiniliste jne. probleemide lahendamise kõige tõhusamaks meetodiks. Märgitud aatomite abil lahendati terve rida selliseid probleeme, mida teiste meetoditega vaevalt oleks õnnestunud lahendada.

Organismis toimuva ainevahetuse uurimine oli üks kõige väljapaistvam märgitud aatomite abil tehtud uurimus, millega tõestati, et organism uueneb, s.t. organismi lagunevad aatomid asendatakse uutega suhteliselt lühikese aja jooksul.

Uuringud näitasid, et ülalmärgitud reeglist moodustab erandi ainult raud. Raud kuulub punaste vereliblede hemoglobiini koostisse. Radioaktiivse raua $^{26}\text{Fe}^{59}$ aatomite lisamisel toidusse selgitati, et raua aatomid verre peaaegu üldse ei tungi. Organism hakkab seda elementi omandama alles siis, kui organismi rauavarud on otsa lõppenud.

Märgitud aatomeid kasutatakse laialt agrotehnikas. Et selgitada, missugust fosforvæetist taimed paremini omandavad, märgistatakse erinevad fosforvæetised radioaktiivse fosforiga $^{15}\text{P}^{32}$. Määrates hiljem taimede radioaktiivsust, saab leida taimede poolt erinevatest fosforvæetistest omandatud fosfori koguse¹.

Meditsiinis kasutatakse radioaktiivseid preparaate nii haiguste diagnoosimisel kui ka ravimisel.

Vereringe uurimiseks viiakse verre väike kogus radioaktiivset naatriumi.

¹ Kui mingil elemendil (näiteks hapnikul ja lämmastikul) pole küllalt pika elueaga radioaktiivset isotoopi, muudetakse stabiilsete elementide isotoobilist koostist. Hapniku rikastamisel isotoobiga ^{18}O tehti kindlaks, et fotosünteesil eralduv vaba hapnik kuulus algselt vee, mitte aga süsihappegaasi koostisse.

Jood koguneb kilpnäärmesse eriti intensiivselt Basedow' tõve korral. Jälgides loenduri abil radioaktiivse joodi kogunemist kilpnäärmesse, saab kiiresti määrata diagnoosi. Suured radioaktiivse joodi annused purustavad osaliselt mITTenormaalset arenenud kudesid ja seepärast võib radioaktiivset joodi kasutada ka Basedow' tõve ravimiseks.

Radioaktiivse koobalti $^{27}\text{Co}^{60}$ intensiivset γ -kiirgust kasutatakse mitmesuguste kasvajate ravimiseks (koobaltkahur):

Radioaktiivsed isotoobid tehnikas. Tehnikas kasutatakse radioaktiivseid isotoope samuti laialt. Toome selle kohta ainult mõne näite. Kiiritades kolvirõngaid neutronitega, muutuvad kolvirõngad radioaktiivseteks. Määrates mootori teatud tööaja järel määardeõli radioaktiivsuse, saab kindlaks teha kolvirõngaste kulumise.

Radioaktiivsete isotoopide abil saab uurida metallide difusiooni, kõrgahjudes toimuvaid protsesse jms. Radioaktiivsete preparaate võimsat γ -kiirgust kasutatakse metallivalu struktuuri uurimisel, s. t. metallivalu defektide kindlakstegemiseks.

Radioaktiivsete isotoopide saamine. Radioaktiivsed isotoobid tekivad tuumareaktorites ja võimsates kiirendites. Tänapäeval toodab isotoope suur tööstusharu. Kogu aatomitööstuse peamiseks väärtuseks inimkonnale ongi nähtavasti radioaktiivsete isotoopide valmistamine ja kasutamine.

Radioaktiivsed isotoobid arheoloogias. Orgaanilise päritoluga iidsete esemete (puidu, puusõe, kudede jne.) vanuse määramisel kasutatakse radioaktiivse süsiniku meetodit. Seda võimaldab asjaolu, et taimedes leidub alati β -aktiivset süsiniku radioaktiivset isotoopi ^{14}C , mille poolestusaeg $T=5700$ aastat. Süsiniku isotoop ^{14}C tekib lämmastikust neutronite mõjul vähesel hulgal Maa atmosfääris. Lämmastiku muundumist põhjustavad neutronid ise tekivad kosmosest Maa atmosfääri tunginud kiirete osakeste (kosmiliste kiirte) poolt tekitatud tuumareaktsioonidel. Kui süsiniku isotoop ^{14}C ühineb hapnikuga, tekib süsihappegaas, mida taimed neelavad. Taimede kaudu pääseb radioaktiivne süsinik ka loomsetesse organismidesse. Üks gramm noore metsa puudest eraldatud süsinikku kiirgab umbes viisteist β -osakest sekundis.

Peale organismi surma organismi radioaktiivse süsiniku varud enam ei täiene, vaid tema olemasolev hulk hakkab radioaktiivsuse tõttu vähenema. Tehes kindlaks orgaaniliste jääkide süsinikusisalduse protsentides, saab leida nende jääkide vanuse, kui vanus on 1000 kuni 50 000 või isegi kuni 100 000 aastat. Radioaktiivse süsiniku meetodiga tehti kindlaks egiptuse muumiate, eelajalooliste lõkete (süte järgi) jne. vanus.

Uraanituuma seisumass on tema lõhustumisel tekkinud kildtuumade masside summast suurem. Kergete aatomitega on asi hoopis vastupidine. Heeliumituuma seisumass on kahe raske vesiniku tuuma seisumassist tunduvalt väiksem.

See aga tähendab, et kergete tuumade liitumisel seisumass väheneb ja järelikult peab kergete tuumade liitumisel eralduma suur hulk energiat. Kergete tuumade liitumisreaktsioone nimetatakse **termotuumareaktsioonideks**, sest nad saavad toimuda ainult väga kõrgel temperatuuril.

Liitumiseks peavad tuumad lähenema üksteisele umbes 10^{-12} cm kaugusel, s. t. nad peavad sattuma tuumajõudude mõjusfääri. Tuumade lähenemist takistab kuloniline tõukumine, mille ületamiseks peab tuumade soojusliikumise energia olema väga suur.

Termotuumareaktsioonidel vabaneb ühe nukleoni kohta rohkem energiat kui tuumade ahelreaktsioonil. Raske vesiniku, deuteeriumi tuuma ühinemisel üliraske vesiniku, triitiumi tuumaga eraldub iga nukleoni kohta 3,5 MeV, kuna uraanituuma lõhustumisel eraldub ühe nukleoni kohta umbes 1 MeV energiat.

Kui ahelreaktsioonid pole looduses arvatavasti kunagi toimunud, siis termotuumareaktsioonidel on universumi evolutsioonis tähtis osa. Päikese ja tähtede kiirgusenergia on vaieldamatult termotuumuse päritoluga.

Kaasaegsete ettekujutluste kohaselt koosnevad tähed varasel arengustaadiumil vesinikust. Tähe sisemuses on nii kõrge temperatuur, et tähe sees toimub prootonite liitumisreaktsioon, mille tulemusena tekib heelium. Heeliumituumade liitumisel tekivad seejärel raskemad elemendid. Kõikide nende tuumade liitumisel eraldub energia, mille arvel tähed kiirgavad valgust miljardeid aastaid.

Juhitavate termotuumareaktsioonide saamine Maal töötab anda inimkonnale uue ja praktiliselt ammendamatu energiaallika. Juhitavuse seisukohalt on kõige perspektiivikamad deuteeriumi ühinemisreaktsioon triitiumiga ja liitiumi ühinemisreaktsioon deuteeriumiga.

Termotuumareaktsioonid hakkavad kulgema märgatava kiirusega siis, kui liituvaid tuumi kuumutada mõnesaja miljoni kraadini. Nii kõrget temperatuuri võib põhimõtteliselt saada ainult võimsate elektrilahenduste tekitamisega plasmal. Peamine raskus seisneb siin selles, kuidas hoida nii kõrge temperatuuriga plasmad seadme sees.

Tänapäeval kasutatakse kõrgetemperatuurilise plasma alalhoidmiseks võimsaid magnetvälju. Magnetvälja poolt tugevasti kokkusurutud plasmalint on aga erakordselt ebapüsiv ja katkeb juba miljardiku sekundi jooksul. Meetodit, millega saaks tugevasti kokkusurutud kõrgtemperatuurilist plasmad pika aja jooksul

alal hoida, pole senini veel õnnestunud leida. Võib ainult loota, et aja jooksul see raskus ületatakse. Juhitavate termotuumareaktsoonide loomisel on suurimat edu saavutanud nõukogude füüsikud töödes, mida alustati L. A. Artsimovitši ja M. A. Leontovitši juhtimisel.

Seni on õnnestunud tekitada ainult mittejuhitavat, plahvatuslikku termotuumareaktsiooni vesinikupommis (termotuumapommis). Tuumade sünteesiks vajalik kõrge temperatuur tekib termotuumapommi sisse pandud uraani- või plutooniumilaenguga aatompommi plahvatusel. Termotuumapommi võimsuse suurendamine pole millegagi piiratud.

120. RADIOAKTIIVSE KIIRGUSE BIOLOOGILINE TOIME

Radioaktiivsete ainete kiirgus avaldab kõigile elusorganismidele tugevat mõju. Isegi suhteliselt nõrk kiirgus, mille energia täielikul neeldumisel tõuseks keha temperatuur kõigest $0,001^{\circ}\text{C}$ võrra, häirib organismi rakkude elutegevust.

Elav rakk on nii keeruline mehhanism, et ta ei suuda jätkata normaalset tegevust, kui tema üksikud osad on kasvõi õige vähe vigastatud. Isegi väikese intensiivsusega kiirgus vigastab rakke. Suure kiirgusdoosi korral hukuvad kõik elusorganismid. Kiirguse ohtlikkust suurendab veel see, et kiirgus, isegi surmavates doosides, ei tekita valuaistinguid.

Kiirguse bioloogilisel kahjustavat toimet pole veel küllaldaselt uuritud. Selge on aga see, et kiirguse toime taandub aatomite ja molekulide ioniseerimisele, mille tõttu viimaste keemiline aktiivsus muutub. Rakkude, eriti aga kiiresti poolduvate rakkude tuumad on kiirguse suhtes kõige tundlikumad. Seepärast kahjustabki kiirgus kõigepealt luuüdi, mis põhjustab vere koostise muutumist. Luuüdi kahjustusele järgneb seedetrakti ja teiste organite kudede kahjustamine.

Kiirgus mõjutab tugevasti pärilikkust ja enamikul juhtudel just ebasoovitavas suunas.

Elusorganismide kiiritamine võib aga olla ka kasulik. Kiiresti paljunevad rakud ja pahaloomulised kasvavad on kiirituse suhtes tundlikumad kui normaalsed rakud. Viimasel põhinebki vähkkasvaja hävitamine radioaktiivsete preparaatide γ -kiirgusega, sest γ -kiirgus on varem kasutatud röntgenikiirtest palju efektiivsem.

Kiiritusest tekkinud mutatsioonid võivad põhjustada taimede ja loomade omaduste muutumisi ka soovitud suunas. Sellele on rajatud taimede ja mikroorganismide selektsiooni uus suund — kiiritusselektsioon. Kiiritusselektsiooni meetodil on aretatud põllumajanduslikult hinnatud suvinisu, kaera, odra, herne ja teiste kultuuride sorte.

1. Kas Wilsoni kambriga saab registreerida laenguta osakesi?
2. Loendur loendab väga väikese intensiivsusega radioaktiivse preparaadi β -kiirgust. Kas loenduri mehhanism hakkab tööle võrdsete ajavahemike järel?
3. Kas on olemas baariumi isotoopi, mille mass on 137,34 aatommassiühikut?
4. Mis toimub booriaatomi tuumadega, kui neid pommitada α -osakestega?
5. Selgitage, miks annab neutron tsentraalsel pörkel prootoniga kogu oma energia viimasele, kuid tsentraalsel pörkel lämmastikutuumaga annab sellele ainult osa oma energiast.
6. Miks viis oletus, et berüllium kiirgab α -osakeste mõjul γ -kiiri, nende kiirte energia määramisel vastuolulistele tulemustele: prootonite jäljed andsid γ -kiirte energiaks 55 MeV, lämmastikutuumade jäljed 90 MeV ja argooniaatomite jäljed 150 MeV?
7. Selgitage, miks liitiumituuma lõhustumisel prootonitega lendasid kildtuumad vastassuunas laiali.
8. Kas saab panna plahvatama kerakujulise uraanitüki ${}_{92}\text{U}^{235}$, kui selle tüki mass on 10 kg?

IX. ELEMENTAAROSAKESED

121. MIS ON ELEMENTAAROSAKE?

Füüsikakursuses räägiti palju kordi looduses eksisteerivatest osakestest, mida nimetatakse elementaarosakesteks. Te olete tutvunud elektroniga, fotoniga, prootoniga ja neutroniga, Mainiti ka positroni ja π -mesonit (piimesonit). Mida aga elementaarosake endast kujutab?

Kui kreeka filosoof Demokritos nimetas lihtsaimaid, jagamatuid osakesi aatomiteks (tähendab ju sõna *aatom* jagamatut), siis tõenäoliselt ei paistnud see kõik talle põhimõtteliselt nii keeruliseks. Erinevad esemed, taimed ja loomad on «ehitatud» jagamatutest ja muutumatutest osakestest. Looduses toimuvad muutused kujutavad lihtsat aatomite ümberpaiknemist ruumis. Kõik maailmas voolab ja kõik muutub peale aatomite eneste, mille olemus jääb kõigutamatuks.

XIX sajandi lõpus aga avastati aatomite keerukas ehitus ja eraldati elektron kui aatomi koostisosa. Seejärel, juba XX sajandil, avastati prooton ja neutron — aatomituuma koostisosad. Esialgu suhtuti neisse osakestesse täpselt samuti, nagu Demokritos suhtus aatomitesse — neid peeti jagamatuteks ja muutumatuteks algosakesteks, maailma algtellisteks.

Veetleva lihtsusega olukord ei kestnud aga kaua. Kõik osutus palju keerulisemaks. Selgus, et muutumatuid osakesi pole üldse olemas. Praegu pole lihtsalt teada, missuguseid osakesi võiks nimetada tõeliselt elementaarseteks, sest pole olemas kriteeriume, mille järgi võiks selle või teise osakese arvata elementaarosakeste hulka. Ühelt poolt tähendab *elementaarne* endastmõistetavalt lihtsaimat. Teiselt poolt mõistetakse elementaarse all midagi funda-

mentaalset, asjade aluseks olevat (just selles mõttes nimetataksegi aatomisiseid osakesi elementaarosakesteks).

Tänaseni tuntud elementaarosakesi Demokritose aatomite sarnaselt muutumatuteks pidamast segab meid lihtne tõsiasi, et mitte ükski osake pole igavene. Suurem osa praegu elementaarosakesteks nimetatavatest osakestest ei eksisteeri üle kahe miljõndiku sekundi isegi siis, kui välismõjud täielikult puuduvad. Vaba neutron (neutron väljaspool aatomituuma) elab keskmiselt 17 minutit.¹ Kõigest neli osakest: foton, elektron, prooton ja neutriino saaksid säilitada oma muutumatuse, kui igaüks neist eksisteeriks kogu maailmas üksinda.

Elektronidel ja prootonitel on ohtlikud kaksikvennad — positronid ja antiprootonid, millega põrkudes need osakesed hävivad ja tekivad uued. Laualambist kiirgunud foton ei ela üle 10^{-8} sekundi. See on aeg, mille jooksul foton jõuab raamatu leheküljeni ja neeldub paberis. Peaaegu surematud on ainult neutriinod, sest nende vastastikune mõju teiste osakestega on nõrk. Teiste osakestega põrkumisel hävivad ka neutriinod, kuid tavaliselt põrkuvad nad nendega haruharva.

Niisiis, püüdes leida meie muutuvast maailmas muutumatut, toetusid teadlased mitte «graniitalusele», vaid «sõredale liivale». **Kõik elementaarosakesed muunduvad vastastikku ja need vastastikused muundumised on elementaarosakeste eksisteerimise peamiseks faktiks.**

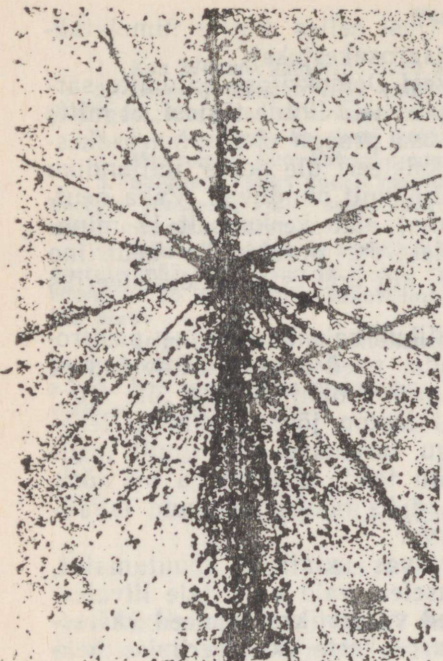
122. KAS ELEMENTAAROSAKESTE SEES ON OSAKESI?

Võib-olla see kõik ei erinegi nii väga sellest, mis on juba olnud? Võib-olla on tänapäeval elementaarseks peetavad osakesed mingiks tunnetuse etapiks, milleni on inimesel õnnestunud jõuda? Hiljem õnnestub tungida sügavamale ja siis paistavad tänapäeva elementaarosakesed inimestele täpselt nii, nagu praegu aatomid. Varem või hiljem leitakse lõppude lõpuks ikka mingid muutumatud osakesed, millest moodustub aine.

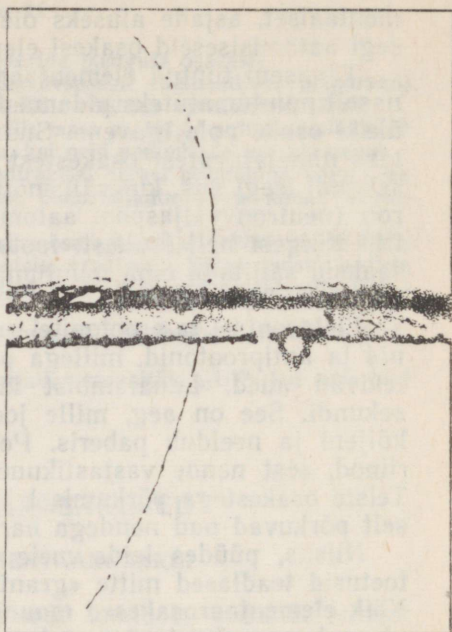
Või on loodus hoopis teistsuguse ehitusega — materia on lõputult jaotatav ja teadlased hakkavad avastama järjest väiksemaid ja väiksemaid osakesi, millel lõppu ei tulegi? Midagi kindlat praegu väita ei saa, kuid nii see vist siiski pole.

Meie praeguste teadmiste juures on tõe lähemal järgmine võimalus. Me jõudsime juba materia ehituse vundamendini, kuid see vundament osutus üldse mitte igavesse muutumatusesse tardunuks, vaid pidevalt oma ilmet muutvaks ja väga keeruliseks. Fundamentaalsed osakesed on jagamatud, kuid animendamatute

¹ Neutroni lagunemisest, neutriinost, positronist ja antiprootonist räägitakse järgmistes paragrahvides.



Joon. 191



Joon. 192

omadustega. Elektroni omaduste ammendamatu märkis juba V. I. L e n i n kohe pärast elektroni avastamist.

Kirjeldatud mõtlemisviisi sunnib meile peale järgmine arutelu. Tekkigu meil näiteks tõeline soov uurida, kas elektron koosneb mingitest veel pisematest osakestest. Mida tuleb teha, et jaotada elektron osadeks? Siin võib välja mõelda ainult ühe mooduse, ja nimelt selle, mida kasutab laps, kui ta tahab teada, mis on plastmassist mänguasja sees. Selleks mooduseks on tugev löök.

Elektroni pihta ei saa loomulikult lüüa vasaraga, vaid selleks tuleb kasutada kas hiiglasuure kiirusega liikuvat teist elektroni või mõnda teist suure kiirusega liikuvat elementaarosakest. Kaasagedsed kiirendid kiirendavad laetud osakesi valguse kiirusele lähedaste kiirusteni.

Mis toimub ülisuure energiaga osakeste põrkumisel? Kas osakesed ei lagune nüüd millekski selliseks, mida võiks osakeste koostisosadeks nimetada. Ei, osakesed sünnitavad neid osakesi, mis figureerivad elementaarosakeste nimistus. Mida suurem on põrkuvate osakeste energia, seda suurem hulk ja seda raskemad osakesed tekivad. See on võimalik sellepärast, et osakeste kiiruse

suurenedes suureneb ka osakeste mass. Kõigest kahe mistahes osakesega, mille mass on kiiruse arvel kasvanud, võib põhimõtteliselt tekitada kõiki tänaseni tuntud osakesi. Joonisel 191 näete kosmosest tuleva erakordselt suure energiaga rauatuuma (ülemine jäme jälg) põrkumist fotoemulsiooni tuumaga. Tuum puruneb kil-dudeks ja killud lendavad igale poole laiali. Koos tuuma purune-misega sünnib umbes 40 elementaarosakest (π -mesonit). Jooni-sel 191 on nende osakeste «voog» suunatud tuumade põrkekohast allapoole.

Võib endale ette kujutada tõeliselt fantastilist, kuid tuntud looduseadustega täiesti kooskõlas olevat pilti, et kaks ülisuure energiaga osakest sünnitavad põrkumisel terveid maailmu, millest võivad hiljem tekkida tähed ja galaktikad. Tegelikuses juhtub ju, et üks kosmosest tulev osake tekitab terve osakeste laviini, milles on sadu miljoneid osakesi ja laviini pindala hõlmab maapinna lähedal mõne ruutkilomeetri suuruse pindala?

Seni saavutamata energiatega osakeste põrkumisel võivad loo-mulikult tekkida ka uued, seni veel tundmatud osakesed, kuid asja sisu see ei muuda. Põrkumisel sündinud uusi osakesi ei saa käsitleda põrkuvate osakeste, «vanemate» koostisosadena, sest pärast kiirendamist, mille tõttu muutub (suureneb) osakeste mass, mitte aga olemus, võivad «tütarosakesed» endi «vanematega» põrkumisel tekitada täpselt samasuguseid ja peale selle veel palju teisi osakesi.

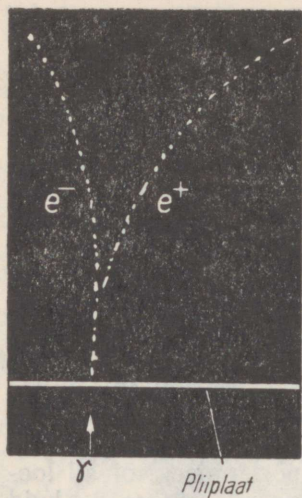
Järgnevalt räägime elementaarosakeste muundumiste avas-tamisest.

123. POSITRONI AVASTAMINE. ANTIOSAKESED

Elektroni teisiku, positroni olemasolu ennustas 1930. a. teoree-tiliselt ette inglise füüsik P. D i r a c. Dirac väitis kohe ka seda, et positroni põrkumisel elektroniga mõlemad osakesed hävivad (annihileeruvad) ja tekivad suure energiaga footonid. Toimuda võib ka vastupidine protsess — elektron-positronpaari tekkimine. Elektron-positronpaar võib tekkida näiteks küllalt suure energiaga footoni (footoni mass peab olema tekkivate osakeste seisumasside summast suurem) põrkumisel tuumaga.

Kaks aastat hiljem avastati positron magnetvälja paigutatud Wilsoni kambri abil. Osakese jälje kõverdumise suund näitas osa-kese laengu märki. Jälje kõverusraadiuse ja osakese energia kaudu leiti osakese laengu ja massi suhe, mis osutus suuruselt elektroni laengu ja massi suhtega võrdseks. Joonisel 192 näete esimest fotot, mis tõestas positroni olemasolu. Positron liikus alt üles ja pliip-laadist läbitungimisel kaotas osa oma energiast, mistõttu trajek-toori kõverus suurenes.

Vastupidist protsessi, γ -kvandi poolt pliiplaadis tekitatud



Joon. 193

elektron-positronpaari fotot näete joonisel 193. Magnetväljas asuvasse Wilsoni kambrisse jätab elektron-positronpaar kaheharulise jälje.

Seda, et elementaarosakeste vahelises reaktsioonides on ühtede osakeste kadumine ja teiste osakeste tekkimine just nimelt osakeste muundumine. mitte aga vanade osakeste koostisosade uue kombinatsiooni tekkimine, näitab eriti ilmekalt elektron-positronpaari annihilatsioon. Elektronil ja positronil on mõlemal kindel seisumass ja laeng. Footonitel, mis elektron-positronpaari annihileerumisel tekivad, pole ei laengut ega seisumassi, sest footonid ei saa paigalolekus eksisteerida.

Elektron-positronpaari annihilatsiooni avastamine põhjustas tollal teaduses tõelist sensatsiooni. Enne seda ei tulnud kellelegi pähe, et elektron, see vanim osake ja aatomite tähtsaim «ehituskivi», pole igavene. Hiljem leiti kõikide osakeste teisikud — antiosakesed. **Antiosakesel** on osakesega võrdne mass, kuid vastandmärgilised laengud¹.

Antiprooton ja antineutron avastati suhteliselt hiljuti. Antiprooton on negatiivse elektrilaenguga. Praegu on teada, et osakese-antiosakese paari tekkimine ja hävimine pole elektronide ja positronide monopol.

Aatomid, mille tuumad koosnevad antinukleonidest ja mille tuuma ümber liiguvad positronid, moodustavad antiaine. Antiheeliumi saadi esmakordselt Nõukogude Liidus 1971. aastal.

Osakesele vastavat antiosakest pole olemas ainult erandjuhtudel. Antiosakeseta on näiteks foton. Selle põhjuseks on asjaolu, et fotonil pole mitte mingisugust laengut ja seega on antiosake osakesega täiesti identne.

Aine ja antiaine annihileerumisel muundub kogu seisuenergia² peaaegu täielikult kineetiliseks energiaks. Seisuenergia on kõige võimsam ja kontsentreeritum energiareervuuar universumis, mis muundub täielikult teisteks energialiikideks ainult annihilatsioonil. Sellepärast ongi antiaine kõige kaasaegsemaks energiaallikaks ja kõige suurema kütteväärtusega kütuseks. Kas inimkond on võimeline seda kütust millalgi kasutama, on praegu raske öelda.

¹ Sõna *laeng* kasutatakse mitmuses sellepärast, et peale elektrilaengu on osakesel ka veel teisi laenguid. Mõnel osakesel on mitu laengut.

² Vt. § 71.

β -lagunemise olemus. β -lagunemisel lendavad tuumast välja elektronid, kuid tuumas neid ju pole. Kust need elektronid siis tekiavad? Pärast elektroni väljalendamist tuumast suureneb tuuma laeng ja järelikult ka prootonite arv tuumas ühe võrra. Tuuma massiarv aga ei muutu, mis tähendab, et neutronite arv peab ühe võrra vähenema. Järelikult võib β -aktiivsete tuumade sees asuv neutron laguneda prootoniks ja elektroniks. Tekkinud prooton jääb tuuma, elektron lendab aga tuumast välja. Ainult stabiilsetes tuumades on neutronid püsivad.

Imelik on aga see, et täiesti ühesugused tuumad kiirgavad erinevate energiatega elektrone. Elektroni kiirgumisel tekkinud tuumad on aga kiiratud elektroni energiast sõltumata täiesti ühesugused. See on energia jäävuse, füüsika kõige fundamentaalsema seadusega ilmses vastuolus! Lähtetuuma energia ei võrdu tekkinud tuuma ja elektroni kineetiliste energiatega summaga.

Pauli hüpotees. Šveitsi füüsik W. Pauli oletas, et neutroni lagunemisel tekib peale prootoni ja elektroni veel mingi «nähtamatu» osake, mis viib ära arvutustes puudujäänud energia. Aparaadid seda osakest ei registreeri, sest osakesel pole laengut ega seisumassi, mistõttu osake ei suuda ei aatomeid ioniseerida ega ka tuumi lõhkuda. See tähendab, et osake ei tekita neid efekte, mille kaudu saab osakese ilmumist kindlaks teha.

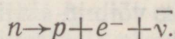
Rumal oleks muidugi oletada, et osake, ükskõik kui ebatavaline ta ka poleks, ei ole mitte millegagi vastastikusel mõjustuses, sest selline oletus tähendaks energia jäävuse seadusest maskeeritud lahtiütlemist ja tema põhjal järelduks, et energia kaob koos osakesega tagasipöördumatult ja igaveseks. Sellepärast Pauli oletaski, et tema poolt füüsikasse toodud hüpoteetiline osake on ainega väga nõrgalt vastastikusel mõjus ja võib seepärast paksum ainekihist läbi tungida, ilma et ennast ilmutaks.

Fermi nimetas selle osakese **neutriinoks**, mis tähendab «neutronikest». Neutriino seisumass osutus nulliks, nagu seda oli ennustanud Pauli. Nende sõnade taga peitub lihtne mõte — paigalseisvat neutriinot pole olemas. Jõudnud vaevalt päevavalgust näha, kihutavad neutriinod juba kiirusega 300 000 km/s. Arvutati välja ka neutriino vastastikune mõju ainega teatud kindla paksusega ainekihi läbimisel ning tulemus osutus neutriino katselise avastamise võimaluse seisukohalt kaugeltki mitte lohutavaks. Maakera on neutriinole veel läbipaistvam kui kõige parem klaasvalgusele.

Vaba neutroni lagunemine. Neutriino osa ei taandu ainult tuumade β -lagunemise selgitamiseks. Neutriino kiiratakse veel väga paljude vabade elementaarosakeste spontaansel lagunemisel. Seliselt just neutron lagunebki. Stabiilne on neutron ainult tuumas tänu vastastikule mõjule teiste nukleonidega. Vaba neutron eksis-

teerib keskmiselt 17 minutit. Vaba neutroni lagunemine tehti katseliselt kindlaks pärast tuumareaktorite ehitamist, sest tuumareaktoris tekivad võimsad neutronite vood.

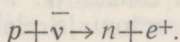
Samuti nagu teistel osakestel, nii on antiosake olemas ka neutriinol (sümbol ν) ja teda nimetatakse antineutriinoks (sümbol $\bar{\nu}$)¹. Neutroni lagunemisel prootoniks ja elektroniks kiirataksegi antineutriino:



Laguneva neutroni energia on prootoni ja elektroni energiatega summa alati suurem. Energia «üle jäägi» viib ära neutriino.

Neutriino katseline avastamine. Vaatamata kogu oma tabamatusele ja ligikaudu 26 aastasele «viirastuslikule eksisteerimisele» teaduslike ajakirjade lehekülgedel, avastati neutriino (täpsemalt antineutriino) katseliselt.

Teooria ennustas, et antineutriino tungimisel prootonisse teki- vad neutron ja positron:



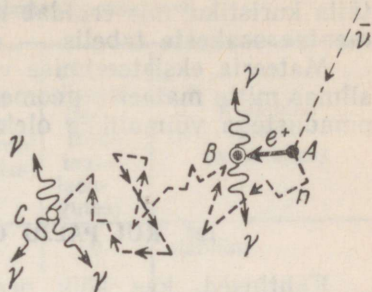
Kirjapandud reaktsiooni tõenäosus on antineutriino hiiglasliku läbitungimisvõime tõttu väga väike. Kui aga antineutriinosid on väga palju, võib loota, et neid saab ka avastada. Hiiglapalju antineutriinosid tekib tuumareaktori töötamisel. Tuumareaktori (katse tehti USA-s 1956. a.) kõrvale kaevati maasse pliist ja parafiinist seintega kast 500 l vedela stsintillaatoriga, milles valgussähvatused tekkisid γ -kvantide toimele.

Positron, mis tekib antineutriino poolt põhjustatud veemolekuli ühe prootoni lagunemisel, annihileerub kohe ühe elektroniga, mistõttu kiirgub kaks γ -kvanti. Tekkinud γ -kvandid tekitasid stsintillaatoris sähvatusi, mida registreerisid erilised aparaadid. Reaktsioonil tekkinud neutron haaratakse pärast teatud ringihulkumist kaadmiumituuma poolt. Neutronite kinnipüüdmiseks on stsintillaatorile lisatud kaadmiumi. Pärast neutroni haaramist kiirgab kaadmiumituum mõne γ -kvandi ja signaliseerib sel viisil neutroni tekkimisest (joon. 194). Algul kahe erinevas suunas laialilendava ja vähe aja pärast veel mõne γ -kvandi tekkimise järgi tehti antineutriino olemasolu kindlaks selle tõenäosusega, mis on elementaarosakeste maailmas üldse võimalik. Neutriino kindlakstegemine pole, tõsi küll, kuigi näitlik, kuid see-eest täiesti vaieldamatu.

Elementaarosakeste lagunemise olemus. Lõpuks märgime veelkord seda, et neutroni ja teiste osakeste lagunemine on elementaarosakeste muundumine, mitte aga keerulise süsteemi koostisosa- deks lagunemine.

¹ Antineutriino erineb neutronist neutriino eriliste (loomulikult mitte elektri- laengute) «laengute» märkide poolest. Erinevus ilmneb selles, et ν ja $\bar{\nu}$ vastasti- kune mõju teiste osakestega on erinev.

Tekkinud osakeste ja lagunemise osakeste vahel pole midagi sellist, mis meenutaks potikildude seost potiga. Näiteks neutroni lagunemisel on see täiesti ilmne, kuna antineutriino eksisteerib ainult valguse kiirusega sirgjoonelises liikumises, siis teda neutroni sees valmis kujul olla ei saa. Neutroni lagunemisel tekkinud prooton ja elektron võivad moodustada püsiva süsteemi, kuid see süsteem pole neutron, vaid hästi tuntud ja põhjalikult läbi uuritud vesiniku aatom.



Joon. 194

Nii on see ka teiste osakeste puhul, mis «elavad» ainult teatud kindla ajavahemiku. Osakese lagunemine pole osakese mitteelementaarsuse tunnuseks. Neutronit peetakse tema ebapüsivusele vaatamata elementaarosakeseks, kuna aga raske vesiniku aatomi tuum — deutron koosneb kahtlemata neutronist ja prootonist, kuigi ta on stabiilne.

125. MATEERIA VÕIMALIKUD EKSISTEERIMISVORMID

Faktide hulk kõneleb sellest, et osakeste pörkumisel pole loota osakeste, s. t. selliste osakeste, nagu näiteks elektron, mingisuguste koostisosade tekkimist. Ka mittestabiilse osakese lagunemisprodukte ei saa osakese koostisosadeks lugeda. Otsesed katsed näitavad vaid seda, et kõik osakesed võivad üksteiseks muunduda. **Osakeste üleüldine muundumine näitab osakeste ühtsust.**

Võib arvata, et kõik osakesed on «ehitatud» mingist ühesugusest substantsist. Päril õige see aga pole. Elementaarosakesed on materiaalsed, s. t. «koosnevad» materiaast, kuid mitte ses mõttes nagu tellised «koosnevad» savist.

Savitükk võib olla nii tellise kui ka teistsuguse geomeetrilise kujuga, mis on täiesti endastmõistetav. Palju raskem on aga selgitada seda, et väljaspool kindlat vormi pole savi kui sellist, s. t. «savi üldse» looduses olemas. Täpselt samuti ei saa olla «materiat üldse», s. t. materiat konkreetsete omadusteta.

Kui savi võib eksisteerida väga erinevates vormides ja ühelt vormilt teisele üleminek võib olla sujuv, siis materia, nii palju kui meile praegu teada on, ei saa olla meelevaldses olekus. Elementaarosakesed on nähtavasti materia ainsad võimalikud eksisteerimisvormid.

Elementaarosakeste vahel pole mingit sujuvat üleminekut. Neutriino omadusi näiteks ei saa muuta sujuvalt nii, et saaks

täita kuristikku, mis eraldab neutriinot tema lähimast naabrist elementaarosakeste tabelis — elektronist.

Materia eksisteerimise vormidest rääkides peame loomulikult silmas mitte materia geomeetrilist kuju, vaid tema mitmesuguste omadustega võimalikke olekuid.

126. KUI PALJU ON ELEMENTAAROSAKESI?

Kahtlused, kas kõik praegu elementaarosakesteks peetavad osakesed oma nime tõepoolest õigustavad, on väga suured. Osa, võib-olla isegi suurem osa, kannab seda nime küll teenimatult. Kahtlusi tekitab lihtsalt see, et elementaarosakesi on liiga palju.

Iga uue elementaarosakese avastamine oli alati ja on ka praegu teaduse silmapaistev võit, kuid juba ammu lisandus järjekordsele võidule ka rahutus. Üks võit järgnes vahetult teisele. Juba praegu on avastatud 35 stabiilset või metastabiilset¹ osakest. Lühikese elueaga (eluiga 10^{-22} sekundit või vähem) osakeste (neid nimetatakse resonantsosakesteks) arv ületab kahesaja piiri.

Tänapäeval on nimetatud 35 elementaarosakest jaotatud nelja rühma ja kantud seisumassi suurenemise järjekorras elementaarosakeste tabelisse.

Tabeli avab **footon**, mis üksi moodustabki esimese rühma.

Teise rühma moodustavad kerged osakesed — **leptonid**. Rühma kuulub kaheksa osakest: kahte sorti neutriinod — elektronneutriino (tekivad koos elektronidega) ja müöonneutriino (tekivad koos müöonidega), elektron, müöonid (müömesoni mass on elektroni massist umbes 207 korda suurem) ja nende antiosakesed.

Kolmas rühm koosneb kaheksast **mesonist**. Kõige kergemad on selles rühmas π -mesonid (pioonid π^0 , π^+ ja π^-), mille mass on 264 (π^0) ja 273 (π^+ ja π^-) elektroni massi. Pioonid on tuumavälja kvandid, nii nagu footonid on elektromagnetvälja kvandid. Peale pionide kuulub rühma veel neli K -mesonit (kaamesonit ehk kaooni) ja η^0 -meson (eetameson).

Viimane, **barüonide** rühm on kõige arvukam, sest siia kuulub 35 osakesest 18 osakest. Kõige kergemad barüonidest on prootonid ja neutronid, millele järgnevad niinimetatud **hüperonid**. Tabel lõpeb oomega-hüperoniga (Ω^-), mis avastati 1964. a. ja mille seisumass on elektroni massist 3272 korda suurem.

Suure arvu elementaarosakeste olemasolu sunnib arvama, et kõik elementaarosakesed pole võrdsel määral elementaarsed, vaid paljud neist koosnevad arvatavasti mingitest teistest osakestest. Millised neist on aga liitosakesed, pole senini kindlalt teada. Igal juhul on juba praegu olemas hüpotees, et kõik elementaarosakesed koosnevad kõigest kuuest osakesest — **kvarkidest** ja **antikvarkidest**.

¹ Metastabiilseiks nimetatakse elementaarosakesi, mille keskmine eluiga on pikem kui 10^{-22} sekundit. (*Tõlk.*)

Stabiilsed ja metastabiilsed elementaarosakesed

	Osake	Sümbol		Seisumass (elektroni massides)	Elekt- rilaeng (ele- men- taar- laen- gutes)	Keskmine eluga (sekundites)
		osake	anti- osake			
	footon (gamma)	γ	γ	0	0	stabiilne
Leptonid	elektronneutriino	ν_e	$\bar{\nu}_e$	0	0	stabiilne
	müoonneutriino	ν_μ	$\bar{\nu}_\mu$	0	0	stabiilne
	elektron	e^-	e^+	1	-1	stabiilne
	müoon	μ^-	μ^+	206,8	-1	$2,2 \cdot 10^{-6}$
Mesonid	piimesonid (pioonid)	π^0	π^0	264,1	0	$0,8 \cdot 10^{-16}$
		π^+	π^-	273,1	1	$2,6 \cdot 10^{-8}$
	kaamesonid (kaoonid)	K^+	K^-	966,4	1	$1,24 \cdot 10^{-8}$
		K^0	\bar{K}^0	974,1	0	$K_1^0 - 0,87 \cdot 10^{-10}$ $K_1^2 - 5,73 \cdot 10^{-8}$
	eetameson	η^0	η^0	1074	0	$< 10^{-21}$
Barüonid	prooton	p	\bar{p}	1836,1	1	stabiilne
	neutron	n	\bar{n}	1838,6	0	$1,01 \cdot 10^3$
	lambdahüperon	λ^0	$\bar{\lambda}^0$	2182,9	0	$2,5 \cdot 10^{-10}$
	sigmahüperonid	Σ^+	$\bar{\Sigma}^+$	2327,7	1	$0,8 \cdot 10^{-10}$
		Σ^0	$\bar{\Sigma}^0$	2333,7	0	$< 10^{-14}$
		Σ^-	$\bar{\Sigma}^-$	2343,2	-1	$1,65 \cdot 10^{-10}$
	ksiihüperonid	Ξ^0	$\bar{\Xi}^0$	2573,2	0	$3,0 \cdot 10^{-10}$
		Ξ^-	$\bar{\Xi}^-$	2585,7	-1	$1,74 \cdot 10^{-10}$
omegahüperon	Ω^-	$\bar{\Omega}^-$	3272	-1	$1,5 \cdot 10^{-10}$	

1. Elektron on kõige kergem elementaarosake. Missuguse seaduse põhjal võib väita, et elektron ei saa muunduda footoniks?
2. Väikese kiirusega liikuva elektroni ja positroni annihileerumisel tekkis kaks γ -kvanti. Kui suure nurga all lendavad γ -kvandid laiali?
3. Kui suur on eelmise ülesande tingimustel tekkinud γ -kvantide sagedus?
4. Miks vaba neutron laguneb prootoniks, elektroniks ja antineutriinoks, kuid vaba prooton ei saa neutroniks, positroniks ja neutriinoks laguneda?
5. Kas osake, mille eluiga on 10^{-23} sekundit, jätab Wilsoni kambrisse jälje?

X. KOKKUVÕTE

127. ÜHTNE FÜSIKALINE MAAILMAPILT

Füüsika koolikursuse õppimine on seega siis lõppenud. Igaüks teist omandas suuremal või vähemal määral selle hiiglasuure töö tulemusi, mida tegid materia erinevate liikumisvormide ja materiaalsete kehade ehituse ja omaduste uurimisel kogu maailma teadlased paljude sajandite jooksul.

Füüsika tutvustas teile kõige üldisemaid looduseadusi, millele alluvad meid ümbritsevas maailmas ja kogu universumis kulgevad protsessid.

Füüsika ülesanne seisnebki just selliste üldiste looduseaduste kindlakstegemises ja nende põhjal juba konkreetsete protsesside selgitamises. Selle eesmärgi poole püüeldes kujunes teadlastel aegamööda välja looduse ühtsuse ülev ja keerukas pilt. Loodus ei kujuta endast üksikute, omavahel sõltumatute sündmuste kogumit, vaid ühtse terviku mitmepalgelisust ja mitmekülgset ilmingut.

Mehhaaniline maailmapilt. Paljude põlvkondade teadlasi on häämestanud ja häämastab ka edaspidi see veetlev ja ühtne maailmapilt, mis loodi Newtoni mehhaanika põhjal. Newtoni järgi koosneb maailm «kõvadest, kaalu omavatest, läbitungimatutest, liikuvatest osakestest». Need «algosakesed on absoluutselt kõvad — nad on neist osakestest koosnevatest kehadest võrratult kõvemad. Nad on nii kõvad, et ei kulu ega purune iialgi». Osakesed erinevad üksteisest peamiselt kvantitatiivselt — massi poolest. Looduse kogu rikkus ja kvalitatiivne mitmekesisus on nende osakeste liikumise erinevuste tagajärg. Osakeste seesmine olemus jäeti tahaplaanile.

Ühtse mehhaanilise maailmapildi aluseks oli Newtoni poolt avastatud kehade liikumiseaduste kõikehaarav iseloom. Newtoni liikumiseadustele alluvad häämastava täpsusega nii hiiglaslike taevakehade kui ka liivakübemete liikumine. Ka tuul, s. t. silmaga nähtamatute õhuosakeste liikumine allub Newtoni seadustele. Teadlased olid väga pikka aega veendunud, et Newtoni seadused on ainsad põhiseadused. Nii arvas prantsuse teadlane Lagrange,

et «Newtonist õnnelikumat inimest pole olemas, sest maailmapilti saab luua ainult üks kord».

Lihtne mehhaaniline maailmapilt osutus aga paikapidamatuks. Elektromagnetiliste protsesside uurimisel selgus, et need protsessid ei allu Newtoni mehhaanikale.

Maxwell avastas looduse uut tüüpi põhiseadused — elektromagnetvälja põhiseadused, mis ei taandu Newtoni mehhaanikale.

Elektromagnetiline maailmapilt. Newtoni mehhaanikas eeldati, et kehad mõjutavad üksteist tühjuse kaudu vahetult ja selline kehade vastastikune mõju toimub silmapilkselt (kaugmõju teooria). Pärast elektrodünaamika loomist muutusid ettekujutused jõududest väga oluliselt. Iga vastastikku mõjuv keha tekitab elektromagnetvälja, mis levib ruumis lõpliku kiirusega. Vastastikune mõju toimub elektromagnetvälja kaudu (lähimõju teooria).

Elektromagnetjõud on looduses kõige suurema ulatusega. Elektromagnetjõud mõjuvad aatomituumas, aatomis, molekulis, makroskoopiliste kehade molekulide vahel, nad mõjuvad sellepärast, et kõikide aatomite koostisse kuulub elektriliselt laetud osakesi. Elektromagnetjõudude mõju ilmneb nii õige väikestel (aatomituum) kui ka kosmilistel (tähtede elektromagnetkiirgus) kaugustel.

Elektrodünaamika areng viis ühtse elektromagnetilise maailmapildi loomise katsetele. Elektromagnetilise maailmapildi järgi peavad kõik looduses toimuvad sündmused alluma elektromagnetilise vastastikuse mõju seadustele.

Elektromagnetiline maailmapilt saavutas oma kulminatsioonipunkti pärast erirelatiivsusteooria loomist, sest siis sai mõisteta-vaks elektromagnetilise vastastikuse mõju levimise kiiruse lõplik-kuse fundamentaalne tähtsus, loodi uus ettekujutus ruumist ja ajast, leiti suurteil kiirustel Newtoni võrrandeid asendavad liikumise relativistlikud võrrandid.

Kui mehhaanilise maailmapildi õitsengu ajal püüti elektromagnetilisi nähtusi taandada erilises keskkonnas (maailmaetris) toimuvatele mehhaanilistele protsessidele, siis nüüd, vastupidi, püüti osakeste liikumisseadusi tuletada elektromagnetvälja teooriast. Aineosakesi püüti käsitleda elektromagnetvälja «tombukestena».

Kõiki looduses toimuvaid protsesse elektromagnetilistele protsessidele taandada siiski ei õnnestunud. Osakeste liikumisvõrrandeid ja gravitatsiooniseadust ei saa elektromagnetvälja teooriast tuletada. Loodus osutus seega keerulisemaks kui algul arvati — mitte ükski liikumisseadus ja mitte ükski üksik jõud ei suuda haarata looduses toimuvate protsesside mitmekesisust.

Materia ehituse ühtsus. Maailm on niivõrd mitmekesine, et teda pole isegi püütud ette kujutada ainult üht sorti osakestest koosnevana.

XX sajandi alguses hakkas aga pikkamööda selguma, et kõik

kehad koosnevad elementaarosakestest, kusjuures erinevaid elementaarosakesi on vähe. Elektronidest, prootonitest ja neutronitest moodustuvad aatomid. Footonite ja pionide vahendusel toimuvad elektromagnetilised ja tugevad vastasmõjud. Neutroni lagunemisel tekib antineutriino¹. Kõik need elementaarosakesed võivad vastastikku muunduda.

Pärast elementaarosakeste ja nende muundumise avastamist hakati füüsika vaatekohast nägema looduse ühtsust ennekõike materia ehituse ühtsuses, mis järeldeb elementaarosakeste ühtsusest olemusest, nende materiaalsusest. Erinevad elementaarosakesed on materia eksisteerimise erinevad konkreetset vormid. Maailma ühtsus ei piirdu aga materia ühtse ehitusega, vaid ilmneb ka osakeste liikumise ning osakeste vastastikuse mõju seadustes. Osakeste vastastikune mõju ei taandu ainult elektromagnetilisele vastasmõjule, osakeste liikumisseadused aga pole nende omadustest sõltumatud, nagu seda eeldas Newtoni mehaanika.

Kaasaegne füüsikaline maailmapilt. Tugevaima löögi klassikalisele füüsikale andis kvantide avastamine, mis lõppes kvantmehaanika, mikroosakeste uue liikumisteooria rajamisega XX sajandi esimesel poolel. Kvantmehaanika tekkimisega hakkasid kujunema uued maailma ühtsuse elemendid.

Materia jaotamine diskreetseks aineks ja pidevaks väljaks kaotas absoluutse mõtte. Igal väljal on omad kvandid: elektromagnetväljal footonid, tuumaväljal pionid jne. Igal osakesel on jällegi lainelised omadused. Korpuskulaarne ja laineline dualism on omane kõikidele materia vormidele.

Suure kiirusega liikuvate osakeste kvantmehaanika (relativistliku kvantmehaanika) rajamisel ilmnnes, et igal erinevat liiki osakesel on oma liikumisvõrrand. Kõiki liiki osakeste ühtset liikumisvõrrandit pole olemas. Liikumisevõrrandite ühtsus kadus, kuid seejuures tehti esmakordselt kindlaks seos materia ehituse ja materia liikumise seaduste vahel.

Tänapäeva ettekujutuste kohaselt võib iga osake omada peale massi (gravitatsioonilaengu, mis määrab ka osakese inertsiomadused) ka teisi laenguid ehk vastastikuse mõju konstante. Neid konstante on tuntud loodusjõudude (gravitatsiooni-, elektromagnet-, tuuma- ja nõrgad jõud) arvu järgi kõigest neli. Üht liiki osakestel on üks liikumisvõrrand, teist liiki osakestel aga teistsugune liikumisvõrrand.

Looduses pole seega mitte ainult üht sorti osakesi, mitte ainult üks liik jõude ja mitte üks liikumisseadus. Lisaks sellele pole ka osakesed ise muutumatud. Tänapäeval ilmneb üha eredamalt ja eredamalt seos materia ehituse, vastastikuse mõju seaduste ja materiaalsete objektide liikumisseaduste vahel, mida möödunud

¹ Hiljem, tõi küll, avastati suur hulk teisi elementaarosakesi, kuid nende osa looduses on tänapäeval valitsevate kujutluste kohaselt väike.

sajandil veel keegi isegi ei aimanudki. Praegu see seos alles visandub, sest vastuoludest vaba elementaariosakeste liikumise ja vastastikuse mõju teooriat pole õnnestunud veel luua.

«Siin peituvad niivõrd sügavad saladused ja niivõrd ülevad mõtted, et vaatamata sadade teravmeelsete, tuhande aasta jooksul vaeva näinud mõtlejate püüdlustele, pole õnnestunud neisse tungida, ja loominguliste otsingute ning avastuste rõõm eksisteerib edasi.» Need Galilei poolt kolme ja poole aastasaja eest öeldud sõnad pole sugugi vananenud.

128. FÜÜSIKA JA TEHNILINE PROGRESS

Praegu me elame *teaduse ja tehnika revolutsiooni* ajastul, mis algas ligikaudu veerandsaja aasta eest. See revolutsioon seisneb uue, kõrge tootlikkusega tehnika kiires rakendamises tööstusse, transporti, põllumajandusse ja igapäevasesse ellu. Luuakse terveid uusi tööstusharusid, nagu näiteks sünteetiliste kiudude, radioaktiivsete isotoopide, elektronarvutite jne. tööstus. Moderniseeritud transpordivahendid kiirendasid inimeste ja kaupade vedu mitu korda. Suure hüppe tegi informatsioonitehnika — televisioon, kosmoseside jne. Kodusesse majapidamisse on ilmunud palju uusi seadmeid: külmutuskapid, tolmuimejad, pesupesemismasinad jne. Mugavaid elamuid, milles on soe vesi ja gaas, ehitatakse mitte ainult linnadesse, vaid ka maale. Teaduse ja tehnika revolutsiooni üheks kulminatsioonipunktiks oli maalähedase kosmoseruumi vallutamine, seejärel aga inimeste ja automaatjagamaade kuundumine.

Teaduse ja tehnika revolutsioon põhjustas tehnika osatähtsuse suurt kasvu, s. t. inimtöö laiaulatuslikku asendamist masinatööga. Märkimisväärne on see, et elektronarvutite loomisel hakkasid tehnilised seadmed üha rohkem ja rohkem asendada mitte ainult käte, vaid ka aju tööd.

Füüsikakursuses räägiti palju kordi mitmetest tehnika saavutustest, mis said võimalikuks tänu füüsika arengule. Mõnel juhul räägiti vanade tehniliste ülesannete uutest lahendamisvõimalustest ja uute tehnikaharude tekkimisest. Me ei hakka seda kõike kordama, vaid ainult süstematiseerime lühidalt neid kaasaja tehnika põhisaavutusi ja -probleeme, mis toetuvad füüsika edusamudele.

Energeetika. Inimkond tarbib oma vajaduste rahuldamiseks hiiglasuure ja järjest kasvava hulga elektrienergiat¹. Peamisteks

¹ Energia ise seejuures loomulikult ei kao. Energeetika ülesandeks on saada kasutamiseks kõige mugavat energiat, nimelt elektrienergiat. Energia «tarbimise» protsessis muundub elektrienergia peamiselt siseenergiaks (soojuseks).

elektrienergia allikateks on praegu soojuselektrijaamad. Kütusevarud (sõe-, nafta- ja gaasivarud) on aga piiratud ja neid ei piisa enam kauemaks kui üheks aastasajaks. Seetõttu omandab suure tähtsuse tuumaenergeetika. Tuumaelektrijaamade võrk hakkab pidevalt kasvama. Juhitavate termotuumareaktsioonide saamine vabastab inimkonna energiamuredest igaveseks.

Elektrienergia ülekanne. Elektrienergiat ei saa suures koguses konserveerida ja seetõttu tuleb teda kasutada peaaegu kohe pärast saamist. Kuna suurima kasuteguriga töötavad võimsad elektri- jaamad, kerkib üles elektrienergia suurtele kaugustele ülekandmise probleem. Elektrienergia ülekandmisel kulub aga osa energiat juhtmete soojendamiseks. Neid kadusid ei esineks, kui ülekandeliin oleks valmistatud ülijuhtidest. Kõik tuntud materjalid lähevad kahjuks ülijuhtivusolekusse heeliumi keemistemperatuurist madalamal temperatuuril. Kui õnnestuks luua kõrgemal temperatuuril ülijuhte, oleks elektrienergiat võimalik üle kanda kadudeta. Praegu töötavadki füüsikud selle probleemi kallal.

Informatsiooni edasiandmine (side). Raadiosides toimus teaduse ja tehnika revolutsioon ennekõike tänu just elektronlampide asendamisele pooljuhtseadistega. Raadiotehnilised seadmed ja elektronarvutid muutusid töökindlamateks ja mõõtmelt palju väiksemateks. Tänapäeva transistorraadio on raamatu või isegi tikukarbi suurune. See pole aga veel viimane piir.

Tavalise, isoleeritud detailidest ja ühendusjuhtmetest koosneva skeemi asemel õnnestus hakata kasutama niinimetatud «tahkeid skeeme» — pooljuhtkristalli sisse või tema pinnale kantud teatud molekulide õhukesti. Tahkeid skeeme kasutades saab valmistada tikuotsasuuruse raadiovastuvõtja.

Laserite kasutamine (vt. § 99) avab informatsiooni edasiandmises täiesti uusi võimalusi. Sidetehiskaaslaste abil saab pidada raadiosidet mitte ainult maakera mistahes kahe punkti vahel, vaid anda edasi telesaateid ka üle mandrite ja ookeanide.

Vajalike omadustega materjalid. Kaasaegsed tehnikaseadmed, näiteks kosmoseraketide mootorid, esitavad materjalidele, millest neid valmistatakse, väga suuri nõudmisi. Materjal peab olema erakordselt tugev, kuumuskindel, peab vastu pidama pikaajalisele suure koormuse all töötamisele jne. «Pimesi» tegutseda, s. t. proovida läbi lähteainete mitmesuguseid suvalisi kombinatsioone ja siis kontrollida, mis välja tuleb, praegu enam ei saa. Aine füüsikalise struktuuri teadmine võimaldab tegutseda sihipäraselt ja juba ette öelda, millised on lõpp-produkti omadused. Nii saab luua nõutavate magnetiliste, elektriliste, optiliste ja teiste omadustega materjale.

Tootmise automatiseerimine ja juhtimine. Elektronarvutid. Tööviljakuse suur kasv saavutatakse tootmisprotsesside automatiseerimise arvel. Automaattööpingid, automaatvooluliinid ja lõpuks automaattehased võivad eksisteerida tänu elektronarvutitele. Esi-

algu suutsid elektronarvutid ainult tohutult kiiresti arvutada. Seejärel «sunniti» arvuteid tegema keerulisi loogilisi operatsioone, mida varem suutsid teha ainult inimesed.

«Elektronaju» juhib juba praegu edukalt kõrgahju tööd, vältimispinki, elektrijaama jne. Ta võib juhtida ka terve tehase tööd.

Rahvamajanduse järjest suuremal hargnemisel muutub ka tema juhtimine keerukamaks.

Informatsiooni hulk, mida tuleb kasutada ja läbi töötada, on nii suur, et sellega tulevad toime ainult elektronarvutid või elektronarvutite grupid.

Elektronarvutite täiustamine (töökiiruse, mälu mahu suurendamine jne.) toetub füüsika saavutustele.

* * *

Põgusalt loetletud tehnikaprobleemidest, mis on kas juba lahendatud või alles äsja püstitatud ja lahendatakse tulevikus, saab teile mõistetavaks, kui suur on füüsika tähtsus tänapäeva ühiskonnas. Palju võiks rääkida ka füüsika osast bioloogias, arstiteaduses, põllumajanduses jne.

Kommunismi printsiipi «igauhelt tema võimete järgi ja igaühele tema vajaduste järgi» saab teostada ainult teaduse ja tehnika edasise progressi alusel, mis toetub fundamentaalseile looduseadustele — füüsika seadustele.

Elektromagnetlained

1. Elektromagnetlained levivad mingis keskkonnas kiirusega $v=2 \cdot 10^8$ m/s. Kui suur on elektromagnetlainete lainepikkus selles keskkonnas, kui võnkesagedus $\nu=1$ MHz?

2. Raadio võnkering on häälestatud saatejaamale, mille kandesagedus $\nu=9$ MHz. Mitu korda tuleb võnkeringi kondensaatori mahtuvust muuta, et häälestada võnkering lainepikkusele $\lambda=50$ m?

3. Mitu korda tuleb suurendada kosmoselaevaga sidet pidava raadiosaatejaama võimsust, et raadioside kaugus suureneks kaks korda? Energia neeldumist keskkonnas mitte arvestada.

Optika

4. Paberileht, mille pind on seinaga paralleelne, asub seinast 2 m kaugusel. Kui suur on seinale tekkinud varju pindala, kui paberilehte valgustav valguspunkt asub lehe keskristsirge kõrgusel ja seinast 3 m kaugusel? Paberilehe pindala on $0,06$ m².

5. Arvutage valguspunkti kogu valgusvoog, kui tema valgustugevus on 100 cd.

6. Leidke valguspunkti 2 m kaugusel asuvale 16 cm² suurusele pinnale langev valgusvoog, kui valguspunkti kogu valgusvoog on 250 lm.

7. Raamatulehe mõõtmed on 21×14 cm ja lehe valgustatus on 50 lx. Kui suur valgusvoog langeb raamatulehele?

8. Kui suur on pinnast 15 m kõrgusel rippuva lambi valgustugevus, kui valgustatus otse lambi all on 4 lx?

9. Valguskiired langevad plaadile risti. Kui suure nurga võrra tuleb plaati kallutada, et tema valgustatus väheneks kaks korda? Kui palju kordi muutub plaadile langev valgusvoog?

10. Kui kõrgele joonestuslaua kohale tuleb 250 cd valgustugevusega lamp riputada, et joonestuslaua valgustatus lambi all oleks 50 lx? Joonestuslaua kalie horisondi suhtes on 30° .

11. Umarat lauda diameetriga 1 m valgustab laua keskkohast $h=1$ m kõrgusel ripuv lamp. Kui suur on laua ääre valgustatus, kui lambi poolt kiiratud kogu valgusvoog on 600 lm?

12. Lamp valgustugevusega 100 cd ripub 8 m kõrgusel maapinnast. Leida maapinnal pindala, mille valgustatus pole väiksem kui 1 lx.

13. Kui suur peab olema valguskiire langemisnurk tasapeeglile, et peegeldunud kiir moodustaks langeva kiirega nurga 30° ?

14. Kaks tasapeeglit moodustavad 60° kahetahulise nurga. Esimeselt peeglit peegeldunud kiir langeb teisele peeglile risti. Kui suure nurga all langeb valguskiir esimesele peeglile?

15. Peegelgalvanomeetri skaala asub peeglist 4 m kaugusel. Kui suure nurga võrra peegel pöördus, kui valguslaik kaldus skaala keskelt 10 cm võrra kõrvale?

16. Päikesekiired koondusid pärast nõguspeeglit peegeldumist ühte punkti, mille kaugus peeglist oli 60 cm ja optilisest peateljest 3 cm. Kui suur on peegli kõverusraadius? Kui suure nurga moodustavad päikesekiired optilise peateljega?

17. Nõguspeegli fookuskaugus on 12 cm ja tema optilisele peateljele peeglist 18 cm kaugusele on pandud väike lambike. Kui kaugele peeglist tuleb panna ekraan, et sellele tekiks lambikese terav kujutis?

18. Nõguspeegli abil saadi esemest viis korda suurendatud tõeline kujutis peeglist 1,8 m kaugusel. Leidke peegli kõverusraadius ja konstrueerige kiirte käik peeglis.

19. Põlev küünal asub nõguspeegli fookusest ja poolusest võrdsetel kaugustel. Mitu korda on leegi kujutise kõrgus suurem leegi tõelisest kõrgusest?

20. Esemekujutis kõverpeeglis on esemest 3 korda väiksem. Peegli kõverusraadius on 47 cm. Kui kaugel peeglist asub ese?

21. Leidke tärpentini murdumisnäitaja, kui on teada, et langemisnurgale 45° vastab murdumisnurk 30° .

22. Kahe keskkonna tasandilisele lahutuspinna langed valguskiir osaliselt peegeldub, osaliselt aga murdub. Kui suure langemisnurga korral on peegeldunud kiir murdunud kiirega risti, kui keskkondade murdumisnäitajad on n_1 ja n_2 ?

23. Kui palju nihkub valguskiir 1 cm paksusest tasaparalleelsest klaasplaadist läbiminekul, kui kiire langemisnurk on 60° ja murdumisnurk 30° ?

24. Valguspunkt on pandud vette 1 m sügavusse. Vee murdumisnäitaja on 1,33. Kui suur on veepinna selle osa raadius, millest valguskiired saavad õhku tungida?

25. Leidke klaasi täieliku peegelduse piirnurk vee suhtes, kui klaasi murdumisnäitaja on 1,55 ja vee murdumisnäitaja 1,33.

26. Koondav lääts tekitab esemest viis korda suurendatud tõelise kujutise. Mitu korda muutub suurendus, kui lääts asetatakse jätta endiseks, kuid eseme ning ekraani asukohad vahetada?

27. Valgusallika ja ekraani vaheline kaugus on 0,5 m. Esemeterav kujutis tekib läätses kahe asukoha korral, mille vaheline kaugus on 0,1 m. Kui suur on läätses fookuskaugus?

28. Koondava läätses tekitatakse ekraanile algul küünlaleegi suurendatud ja seejärel vähendatud kujutis. Suurendatud kujutise kõrgus on 96 mm, vähendatud kujutise kõrgus 6 mm. Leidke küünlaleegi kõrgus, kui kujutise tekitamisel ekraanile küünla ja ekraani vahelist kaugust ei muudeta.

29. Ese asub koondava läätses fookusest 5 cm kaugusel, tema kujutis tekib läätses teisest fookusest 45 cm kaugusele. Leidke läätses fookuskaugus.

30. Valguspunkt asub koondavast läätses 4 cm ja optilisest peateljest 1 m kaugusel. Kui kaugel optilisest peateljest tekib kujutis, kui läätses fookuskaugus on 6 cm?

31. Esemekaugus kaksikkumerast läätses on 70 cm. Mitu korda on eseme kujutis esemest väiksem, kui läätses fookuskaugus on 35 cm?

32. Klaasist kaksikkumerast läätses pindade kõverusraadiused on 1,5 m ning klaasi murdumisnäitaja 1,5. Leidke läätses fookuskaugus õhus ja vees. Vee murdumisnäitaja on 1,33.

33. Kui kaugele teineteisest tuleb panna kaks ühesugust koondavat läätses optilise tugevusega 4 dioptriid, et läätsesüsteemile langed paralleelsete kiirte kimp jääks ka pärast läätsesüsteemi läbimist paralleelseks?

34. Koondava läätses kaugus nõgusast läätses on 30 cm. Läätsesüsteemile langed paralleelsete kiirte kimp on paralleelne ka pärast läätsesüsteemi läbimist. Leidke hajutava läätses fookuskaugus, kui koondava läätses fookuskaugus on 40 cm.

35. Tõestage, et kahe keskkonna lahutuspinna langed tasalaine on ka pärast murdumist tasalaine.

36. Teatakse niinimetatud tähesarnaseid objekte (kvasareid), mille valgus jõuab Maale umbes 8 miljardi aastaga. Kui kaugel Maast need objektid asuvad?

37. Kuidas muutuvad Fresneli biprisma abil saadud interferentsribade vahelised kaugused, kui biprisma murdvaid nurki suurendada?

38. Difraktsioonivõrele, mille $d=0,02$ mm, langed monokromaatiline tasalaine lainepikkusega $\lambda=5,5 \cdot 10^{-8}$ cm (roheline valgus). Leidke esimest järku difraktsioonispektri tekitavate kiirte ja võrele langede kiirte vaheline nurk, kui võrele langeda laine front on võre tasapinnaga paralleelne.

39. Mitu footonit on elektromagnetkiirguses, mille energia on 1 erg ja lainepikkus $6 \cdot 10^{-5}$ cm?

40. Leidke järgmistele lainepikkustele vastavate footonite energia ja mass: a) $\lambda_1=6 \cdot 10^{-5}$ cm (nähtav valgus), b) $\lambda_2=10^{-8}$ cm (röntgenikiirgus), c) $\lambda_3=0,1 \cdot 10^{-9}$ cm (γ -kiirgus).

41. Elektroni väljumistöö tseesiumi pinnast on 1,89 eV. Kui suur on fotoelektronide maksimaalne kiirus, kui tseesiumi pinda valgustatakse valgusega, mille lainepikkus on $5,89 \cdot 10^{-5}$ cm?

42. Leidke elektrivälja tugevus vesinikuaatomis, kui elektron tiirleb esimesel ja neljandal lubatud orbiidil.

43. Kui suur on elektroni ja prootoni vaheline kuloniline ja gravitatsiooni- jõud vesinikuaatomis, kui elektron tiirleb esimesel lubatud orbiidil?

44. Gaaslahendustoru on täidetud hõreda vesinikuga. Kui suurel elektroodide pingel vesinikuaatomid ergastuvad?

45. Elavhõbeaurud hakkavad gaaslahendustorus kiirgama elektromagnetkiirgust elektroodide pingel 4,9 V. Kui suur on kiirguse lainepikkus?

46. Leidke elektroni energia, kui elektroni jälje kõverusraadius magnetväljas induksiooniga 10 000 T asuvas Wilsoni kambris on 2 m.

47. Kalorimeetrisse, mille soojusmahtuvus on 1 cal/deg, pandud polooniumi-preparaat kiirgab sekundis $3,7 \cdot 10^9$ α -osakest energiaga 5,3 MeV igaüks. Mitme kraadi võrra tõuseb kalorimeetri temperatuur ühe tunni jooksul?

48. Polooniumi ${}_{84}\text{Po}^{210}$ poolestusaeg on 140 ööpäeva. α -osakeste kiirgamisel muundub poloonium plii stabiilseks isotoobiks. Kui palju pliid tekib ühes milligrammis polooniumis 100 ööpäeva jooksul?

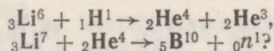
49. Kirjutage ${}_{13}\text{Al}^{27}$ α -osakestega pommitamisel tekkiva tuumareaktsiooni võrrand, kui on teada, et reaktsioonil kiiratakse footon.

50. Kirjutage booriisotoobi ${}_{5}\text{B}^{11}$ α -osakestega pommitamisel tekkiva tuumareaktsiooni võrrand, kui reaktsioonil kiiratakse neutron.

51. Paigalseisev kaadmiumituum neelab neutroni, mille energia on 10^{-17} J. Kui suure kiirusega hakkab tekkinud kaadmiumisotoobi aatom liikuma, kui kaadmiumituumade mass on neutroni massist 112,4 korda suurem? Neutroni mass $m_n = 1,67 \cdot 10^{-24}$ g.

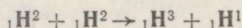
52. Kui suur on ühe aatommassiühiku suuruse massiga keha seisuenergia?

53. Kas järgmistel tuumareaktsioonidel eraldub või neeldub energiat:



Isotoopide ${}_{1}\text{H}^1$, ${}_{2}\text{He}^3$, ${}_{2}\text{He}^4$, ${}_{3}\text{Li}^6$, ${}_{3}\text{Li}^7$ ja ${}_{5}\text{B}^{10}$ aatomite massid on vastavalt 1,00783; 3,01602; 4,00260; 6,01513; 7,01601 ja 10,01294 aatommassiühikut. Neutroni mass on 1,00866 aatommassiühikut.

54. Kui suur on tuumareaktsioonil



eralduv energia, kui vesiniku isotoopide ${}_{1}\text{H}^1$, ${}_{1}\text{H}^2$ ja ${}_{1}\text{H}^3$ aatomite massid on vastavalt 1,00783; 2,01410 ja 3,01605 aatommassiühikut?

55. Millised argumendid kinnitavad teie arvates kõige veenvamalt, et tänapäeval tuntud elementaarosakesed ei koosne veelgi fundamentaalsematel osakesetest?

56. Missuguse kõige väiksema sagedusega elektromagnetkiirgus saab tekitada elektron-positronpaari?

57. Kui suur on väikseim energia, mida on proton-antiprotoni paari tekitamiseks vaja?

58. Leidke neutroni lagunemisel tekkiva elektroni maksimaalne energia, kui neutroni mass on 1,00866 ja prootoni mass 1,00728 aatommassiühikut.

1. Valguse peegeldumisseaduse uurimine

Töövahendid: alusele kinnitatud taskulambipirn, akumulaatoripatarei, lüliti, tasapeegel, piluga ekraan, joonlaud, mall, valge paberileht, ühendusjuhtmed. Töö käik.

1. Koosta taskulambipirnist, akumulaatoripatareist ja lülitist vooluahel.
2. Pane taskulambipirni ette piluga ekraan ja selle alla valge paberileht.
3. Sule vooluahel ja otsi taskulambipirnile selline asend, et paberilehele tekiks kitsas ere valgusriba (valguskiir).
4. Pane valguskiire teele tasapeegel.
5. Tõmba paberilehele tasapeegli alumist äärt mööda peegli esipinna asendit näitav joon ja märgi paberilehel peeglile langeva kiire langemispunkt, üks langeva kiire punkt pilu lähedal ja peegeldunud kiire mingi suvaline punkt.
6. Lülita vool välja ja võta peegel paberilehelt ära.
7. Joonesta joonlaua abil langev ja peegeldunud kiir ning malli ja joonlaua abil peegli pinnanormaal kiire langemispunktist.
8. Mõõda malliga valguskiire langemis- ja peegeldumisnurk.
9. Korda katset mitu korda, muutes peegli asendit.

Mõõtmistulemused kirjuta tabelisse.

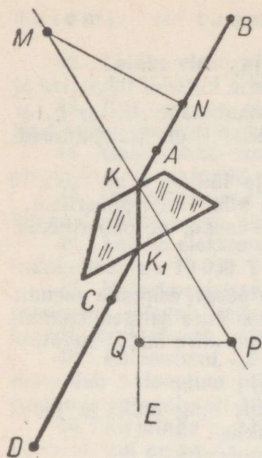
Katse	Kiire langemisnurk	Kiire peegeldumisnurk
1.		
2.		
3.		
4.		
5.		

10. Sõnasta katsetulemuste põhjal langemis- ja peegeldumisnurga vaheline seos.

2. Valguse murdamine tasaparalleelses klaasplaadis ja klaasi murdamisnäitaja määramine

Töövahendid: alusele kinnitatud taskulambipirn, akumulaatoripatarei, lüliti, tasaparalleelne klaasplaat, piluga ekraan, mõtejoonlaud, kolmnurk, mall, valged paberilehed, papitükk, nõõpnõelad (vähemalt 4), ühendusjuhtmed. Töö käik.

1. Koosta taskulambipirnist, akumulaatoripatareist ja lülitist vooluahel.
2. Pane taskulambipirni ette piluga ekraan ja selle alla valge paberileht.
3. Sule vooluahel ja otsi taskulambipirnile selline asend, et paberilehele tekiks kitsas ere valgusriba (valguskiir).
4. Pane valguskiire teele (kiirega kaldu) tasaparalleelne klaasplaat.
5. Tõmba paberilehele tasaparalleelse klaasplaadi murdvate tahkude asendit näitavad jooned, märgi langeva kiire pilulähedane punkt ja langemispunkt tasaparalleelsele plaadile. Märgi lehele tasaparalleelsest klaasplaadist väljuva kiire väljumispunkt ja veel teine punkt paberilehe äärel.
6. Lülita vool välja ja võta tasaparalleelne klaasplaat paberilehelt ära.



Joon. 195

7. Joonista välja langev kiir, murdunud kiir (klaasplaadis kulgenud kiir) ja tõmba langemispunkti pinnanormaal.
8. Mõõda malliga langemis- ja murdumisnurkade suurused ja kirjuta tulemused joonisele vastavate nurkade juurde.
9. Tee järeldus kiire käigu kohta kahe keskkonna lahtuspinnal ja tasaparalleelsest plaadist läbiminekul.
10. Pane valge paberilehe alla papitükk ja paberilehe keskele tasaparalleelne klaasplaat. Torka üks nõõpnõel klaasplaadi taha papi sisse (joon. 195, punkt A).
11. Kummarda laua ääres niipalju alla, et silm jääks laua tasandi kõrgusele ning pööra klaasplaati seni, kuni läbi klaasi paistev nõõpnõela osa nihkub tugevasti nõõpnõela ülemise osa suhtes.
12. Torka pappi teine nõõpnõel (B) nõõpnõelaga A samale poole klaasplaati, nõõpnõelad C ja D aga teisele poole klaasplaati nii, et kõigi nelja nõõpnõela alumised otsad paistaksid silmaga vaadatuna ühel ja samal sirgel.
13. Tõmba nõõpnõelad papist välja ja märgi nõõpnõela augud paberilehes tähtedega A, B, C ja D. Joonista paberilehele klaasplaadi kontuur ja võta plaat paberilehelt ära.
14. Tee järgmine geomeetriline konstruktsioon. Tõmba sirged BK, DK₁ ja K₁K ning pikenda viimast paberilehe servani. Tõmba punktist K klaasplaadi servadele ristsirge MP ning kanna sellele võrdse kuid suvalise pikkusega lõigud KM ja KP. Tõmba punktide M ja P sirgetele KB ja K₁E ristsirged MN ja PQ.
15. Mõõda lõikude MN ja PQ pikkused ja arvuta murdumisnäitaja n, kasutades selleks järgmist valemit:

$$n = \frac{MN}{PQ}$$

16. Korda katset, muutes kiire langemisnurka ja leia murdumisnäitaja keskmine väärtus.

Mõõtmis- ja arvutustulemused kirjuta tabelisse.

Katse	MN	PQ	Murdumisnäitaja n
1.			
2.			
3.			
4.			
5.		Keskmine	

17. Arvuta viga.

3. Nõguspeegli tekkinud kujutiste uurimine

Töövahendid: nõguspeegel, pabeririba, millele on joonistatud nool.
Töö käik.

1. Lähenda pabeririba peeglile ja hakka teda peeglist eemaldama. Jälgi noole näivkujutise suuruse muutumist.
2. Konstrueeri noole mingile asendile vastav kiirte käik peeglis, kui tekib ebakujutis.
3. Eemalda peegel väljasirutatud käe kaugusele nii, et peegli optiline peatelg asuks silmade kõrgusel.
4. Pigista üks silm kinni ja lähenda noolega pabeririba ülalt optilisele teljele ning tee kindlaks, millise noole asukoha puhul tekib tõeline kujutis.
5. Liiguta pabeririba piki optilist telge ja jälgi kujutise suuruse muutumist.
6. Konstrueeri kiirte käik nõguspeeglis, mille korral tekib eseme vähendatud, suurendatud ja esemega võrdne tõeline kujutis.

4. Läätsel poolt tekitatud tõeliste kujutiste uurimine

Töövahendid: pikafookuseline koondav lääts, klaasile joonestatud millimeetervõrk, mõõdulint, joonlaud, nõguspeegel, mille tagaküljele on kleebitud paberist täht, mattklaasist ekraan.

Töö käik.

1. Tekita läätsel abil mattklaasile mingi kauguse eseme kujutis.
2. Mõõda tekkinud kujutise kaugus läätsest. Seda kaugust võib lugeda läätse fookuskaugusega ligikaudu võrdseks.
3. Aseta nõguspeegli tahaküljele kleebitud täht läätsest kahekordse fookuse kaugusele.
4. Pane millimeetervõrguga klaas teisele poole läätsel. Kõik kolm eset pane ühele sirgele, milleks on joonlaua äär.
5. Leia parallaksimeetodil millimeeterjaotustega klaasile selline asukoht, et klaasile tekib terav tähe kujutis. Selleks sea silm klaasi taha läätsel optilise peatelje kõrgusele. Liigutades silma paremale-vasakule, üles-alla, märkad, et kujutis klaasil nihkub. Millimeetervõrguga klaasi teatud asukoha korral tähe kujutis silma asukoha muutmisel ei nihku, mis tähendabki seda, et klaasi ja kujutise asukohad langevad täpselt kokku.
6. Loe millimeetervõrgult tähe kujutise kõrgus ja laius ning mõõda tähe enda kõrgus ja laius.
7. Mõõda mõõdulindiga eseme ja kujutise kaugused läätsest.
8. Leia tähe ja tema kujutise joonmõõtmete ning eseme ja kujutise kauguste suhted. Võrdle mõlemat suhet ja sõnasta võrdlustulemus.
9. Korda katset, liigutades tähe läätsel lähemale.

Mõõtmis- ja arvutustulemused kirjuta tabelisse.

Katse	Eseme kõrgus h	Kujutise kõrgus h_1	Eseme kaugus a	Kujutise kaugus k	$\frac{h_1}{h}$	$\frac{k}{a}$
1.						
2.						
3.						
4.						

5. Kumerläätse fookuskauguse ja optilise tugevuse määramine

Töövahendid: alusele kinnitatud taskulambipirn, akumulaatoripatarei, lüliti, mõõdulint, pikafookuseline kumerlääts, ekraan, joonlaud, ühendusjuhtmed.
Töö kõik.

1. Koosta taskulambipirnist, akumulaatoripatareist ja lülitist vooluahel.
2. Pane taskulambipirn laua ühte, ekraan aga teise serva ning nende vahele lääts.
3. Sule vooluahel ja nihuta lääts piki joonlauda seni, kuni ekraanile tekib lambi hõõgniidi terav kujutis.
4. Mõõda lambi ja ekraani kaugused läätsest.
5. Arvuta läätse fookuskaugus

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

ja läätse optiline tugevus

$$D = \frac{1}{f}$$

6. Kui tekkis suurendatud kujutis, nihuta lääts ekraani poole, kuni ekraanile tekib jällegi lambi hõõgniidi terav kujutis. Kui kujutis oli vähendatud, nihuta lääts pirni poole, kuni ekraanile tekib lambi hõõgniidi terav kujutis.
7. Mõõda jällegi pirni ja ekraani kaugused läätsest ja arvuta läätse fookuskaugus ning optiline tugevus.
8. Nihuta taskulambipirn läätsest suvalisele kaugusele a_1 .
9. Arvuta mõõtmiste põhjal leitud läätse fookuskaugust kasutades kujutise kaugus läätsest k_1 :

$$k_1 = \frac{a_1 f}{a_1 - f}$$

10. Kontrolli arvutustulemust katseliselt.
11. Korda katset, pannes pirni läätsest kahekordsele fookuskaugusele $a_2 = 2f$.

Mõõtmis- ja arvutustulemused kanna tabelisse.

Katse	Eseme kaugus a	Kujutise kaugus k	Fookuskaugus f	Optiline tugevus D
1.				
2.				
3.				

6. Mikroskoobi koostamine

Katsevahendid: pikafookuseline koondav lääts, lühifookuseline koondav lääts, millimeetervõrguga klaas, joonlaud, nõguspeegel, mille tagaküljele on kleebitud paberist täht.

Töö kõik.

1. Pane joonlaua äärde pikafookuseline lääts (objektiiv) ja eredalt valgus-

- tatud täht nii, et täht asuks läätse fookuskaugusest (see peab olema teada) väheke kaugemal.
2. Leia parallaximeetodil (vt. töö 4) tähe suurendatud tõelise ja ümberpööratud kujutise asukoht.
 3. Pane lühifookuseline lääts (okulaar) joonlaua äärde tähe kujutise taha nii kaugele, et tähe kujutis asuks okulaari fookuses (okulaari fookuskaugus peab olema teada).
 4. Võta millimeetervõrguga klaas ära ja vaata tähe kujutist läbi okulaari, mis töötab luubina.

7. Valguse lahutamine prisma abil

Töövahendid: projektsiooniaparaat, vesinikuga, heeliumiga või neooniga täidetud spektraalitoru, sädeinduktor, akumulaatoripatarei, statiiv, ühendusjuhtmed (need vahendid on kogu klassile ühised), kaldtahkudega klaasplaadid (antakse igale õpilasele).

Töö käik.

1. Tõsta klaasplaat horisontaalselt silmade kõrgusele ja vaata läbi klaasplaadi 45° nurgaga tahu projektsiooniaparaadi ees asuvast pilust läbitunginud valguse püstriba ekraanil.
2. Vaatle tekkinud pidevspektri põhivärvusi ja kirjuta nad üles selles järjekorras, nagu neid spektris näed.
3. Vaata valgusriba läbi klaasplaadi 60° nurgaga tahu. Kirjelda spektri erinevust eelmise juhuga võrreldes.
4. Vaata läbi klaasplaadi kaldtahkude vesiniku, heeliumi või neooni poolt kiiratud valgust spektraalitorus. Kirjuta üles intensiivsemate spektrijoonte värvused.

8. Valguse interferentsi jälgimine

Töövahendid: kaks klaasplaati.

Töö käik.

1. Puhasta hoolikalt klaasplaatide pinnad, pane klaasplaadid teineteise peale ja suru nad näppude vahel teineteise vastu.
2. Vaata klaasplaatide peegeldunud valguses tumeda tagapõhja taustal (jälgi, et plaadi pinnale ei teki liiga heledaid peegeldusi seintelt ja aknailt). Plaatide üksikutes kokkupuutekohtades peavad tekkima rõnga või korrapäratu kujuga eredad vikerkaarevärvilised ribad.
3. Muuda survet klaasidele ja jälgi interferentsiribade nihkumist.
4. Katsu jälgida läbivas valguses tekkivat interferentsipilti.

9. Valguse difraktsiooni jälgimine

Töövahendid: sirge kütteniidiga pirn (üks kogu klassi jaoks), nihkkaliiber või kitsaste piludega must klaasplaat.

Töö käik.

1. Nihuta nihkkaliibri nokad teineteisest 0,5 mm kaugusele.
2. Suru nihkkaliibri nокkade vaheline pilu tihedalt vastu silma (pilu peab olema vertikaalne).
3. Vaata läbi pilu lambi vertikaalset hõõgniiti. Kummalegi poole hõõgniiti peaksid tekkima vikerkaarevärvilised ribad (difraktsioonispektrid).
4. Muuda nihkkaliibri nокkade vahelist kaugust 0,50-st millimeetrist 0,8 millimeetritni ja tee kindlaks, kuidas see mõjus difraktsioonispektrile¹.

¹ Kui nihkkaliibreid pole, võib difraktsiooni jälgimiseks kasutada musta emulsioonikihiga kaetud klaasplaati, mille emulsioonikihti on lõigatud erineva laisusega pilud.

Harjutus 2.

6. ≈ 67 cm. 7. 1,21 m kuni 1,0 m. 8. Valgusallikast I_1 kaugusel 1,6 cm. Ei muutu.
9. ≈ 65 lx; 35 lx; 12,5 lx.

Harjutus 3.

11. Kolme kujutist. 12. $\frac{H}{2}$. Peegli alumine äär peab asuma pörandast poole silmade ja pöranda vahelise kauguse kõrgusel. Peegli ülemine äär peab asuma kõrgusel, mis on inimese pikkusest väiksem inimese silmade ja pealae vahelise poole kauguse võrra.

13. Heledus väheneb, muud ei juhtu midagi. 14. 1) Nõgus, ebakujutis; 2) kumer, ebakujutis. 15. 2,5 korda.

Harjutus 4.

5. 0,552; 1,244. 6. Jääb küll. 7. 1,4 cm. 8. $\Theta = \varphi (n-1)$. 9. Kiir ei tungi õhku.
10. $n=2$.

Harjutus 5.

6. 0,5 dptr; 2 m. 7. 0,3 m. 10. 7 korda. 11. $\frac{r}{2}$ kaugusele. 12. 3 dptr. 13. 15 dptr.

Harjutus 6.

10. $n \approx 528k$ pööret/s, kus $k=1, 2, 3, \dots$ 11. $4 \cdot 10^{-7}$ m; $1,62 \cdot 10^{-7}$ m.
12. $1,7 \cdot 10^{-5}$ cm.

Harjutus 9.

7. 1,5 8. $4 \cdot 10^{-19}$ J. 9. $1,5 \cdot 10^{-7}$ m. 10. $5 \cdot 10^{14}$ Hz.

Harjutus 10.

7. $7,5 \cdot 10^{-12}$ cm. 8. $2,2 \cdot 10^8$ m/s; $9,7 \cdot 10^{24}$ cm/s². 9. $4,87 \cdot 10^{-5}$ cm. 10. $1,22 \cdot 10^{-5}$ cm.
11. $1,026 \cdot 10^{-5}$ cm; $1,216 \cdot 10^{-5}$ cm; $6,563 \cdot 10^{-5}$ cm. 12. $3,645 \cdot 10^{-5}$ cm.

Kordamisülesandeid

1. 200 m. 2. 2,25 korda. 3. 4 korda. 4. 0,54 m². 5. ≈ 1257 lm. 6. $\approx 0,8 \cdot 10^{-2}$ lm.
7. $\approx 1,5$ lm. 8. 900 cd. 9. 60°; väheneb 2 korda. 10. $\approx 1,6$ m. 11. ≈ 34 lx.
12. ≈ 1050 m². 13. 15°. 14. 60°. 15. $\approx 43'$. 16. 120 cm; umbes 3°. 17. 36 cm.
18. 0,6 m. 19. Kaks korda. 20. 94 cm. 21. $\approx 1,4$. 22. $\tan \alpha = \frac{n_2}{n_1}$. 23. $\approx 0,58$ cm.
24. $\approx 1,13$ m. 25. $\approx 63^\circ$. 26. 0,2 korda. 27. 12 cm. 28. 24 mm. 29. 15 cm.
30. 3 mm. 31. Kolm korda. 32. 1,5 m; 6 m. 33. 50 cm. 34. 10 cm. 36. $\approx 7,5 \cdot 10^{22}$ km.
37. Suurenevad. 38. $\approx 1^\circ 35'$. 39. $\approx 5 \cdot 10^{11}$. 40. a) 2,07 eV, $3,68 \cdot 10^{-32}$ g; b) 12,4 keV, $2,21 \cdot 10^{-28}$ g; c) 1,24 MeV, $2,21 \cdot 10^{-23}$ g. 41. $\approx 2,72 \cdot 10^7$ cm/s. 42. $\approx 5,1 \cdot 10^{11}$ V/m; $\approx 2 \cdot 10^9$ V/m. 43. $\approx 9 \cdot 10^8$ N; $\approx 4 \cdot 10^{-47}$ N. 44. $\approx 10,15$ eV.
45. $\approx 0,25$ μ m. 46. ≈ 600 MeV. 47. $\approx 2,7$ °C võrra. 48. $\approx 0,38$ mg. 51. $\approx 10^4$ m/s.
52. 930 MeV. 53. Eraldub; neeldub. 54. ≈ 4 MeV. 56. $\approx 2,5 \cdot 10^{20}$ Hz. 57. ≈ 1870 MeV. 58. $\approx 0,8$ MeV.

AINEREGISTER

- Aatomituum 169
 absoluutne murdumisnäitaja 59, 60
 ahelreaktsioon 205, 206
 aja dilatatsioon 127
 ajavahemike relatiivsus 125—128
 alfakiired 187
 amplituudmodulatsioon 16
 antikvark 222
 antiosake 217, 218
 Artsimovitš, L. A. 213
- Balmer, J. J. 165
 Balmeri seeria 165
 barüonid 222, 223
 Bassov, N. G. 175
 beetakiired 187
 Becquerel, A. H. 183, 184
 Bohr, N. 170—172
 Bohri postulaadid 170, 171
- Chadwick, J. 195
 Cockcroft, J. 201
 Curie, P. 185
 Curie-Skladowska, M. 185, 186
- Demodulatsioon 16, 17
 detekteerimine 16
 detektor 18
 deuterium 193
 deutron 221
 difraktsioonivõre 102
 difraktsioonivõre konstant 102
 dioptria 48
 Dirac, P. 217
 dispersioon 92
- Ebafookus 46
 Eddington, A. S. 124
 Einstein, A. 119, 120
 elektroluminestsents 137
 elektromagnetlaine 7, 8
 elektromagnetväli 5, 6
 elementaarosake 214
 emulsioonimeetod 183
- epidiaskoop 80
- Faasmodulatsioon 17
 Fabrikant, V. A. 175
 Fermi, E. 202, 208
 Fizeau, A. 88
 Fljorov, G. N. 204
 footon e. valguskvant 156, 222
 fotoaparaat 79
 fotoefekt 152, 153
 fotoelement 158
 fotograafia 161
 fotoluminestsents 137
 fotomeetria 35
 fotosüntees 161
 Fresnel, A. J. 96
 Fresneli biprisma 96, 97
 füüsikaline optika 86
- Gaaslaser 177
 gammakiired 186, 187
 Geiger-Mülleri loendur 180, 181
 geomeetriline e. kiirteoptika 32
 Glaser, D. A. 183
 Grimaldi, F. M. 100
- Hahn, O. 202
 hajutav lääts 72
 hajuv e. difuusne peegeldumine 41
 Heisenberg, W. 196
 helirada 163
 heli salvestamine 163
 — taasesitamine 163
 Hertz, H. R. 8, 10, 116
 hüperonid 222
- Ikonoskoop 26
 ilmutamine 162
 infrapunased kiired 143, 144
 interferomeetrid 97
 ionosfäär 23
 isotoobid 192, 193
 Ivanenko, D. D. 196
 Joliot-Curie, F. 195, 200
 Joliot-Curie, I. 195, 200

joonspekter 141
joonsuurendus 52

Kandela (cd) 36
kandesagedus 16
kaksikkumer lääts 71
Kapitsa, P. L. 182
kaugelenägevus 82
kemolaser 177
kemoluminestsents 137
kesklained 23
kineskoop 27
kinnistamine 162
kollimaator 140
kondensor 79
koondav lääts 72
kriitiline mass 207
Kurtšatov, I. V. 208
kvantelektrodünaamika 32
kvantteooria 152
kvark 222
küllastusvool 154

Lainejuht 21
langemisnurk 58
langev kiir 58
laser 175
Laue, M. 146
Lebedev, P. N. 159, 160
Leontovitš, M. A. 213
leptonid 222, 223
loomulik valguslaine 106
Lorentz, H. A. 115
luks 39
luumen (lm) 37
luup 82, 83
luubi suurendus 83
lääts 70, 71
läätse fookus 72
— fokaaltasand 75
— fookuskaugus 73
— joonsuurendus 77, 78
— optiline keskpunkt 74
— — telg 74
— — kõrvaltelg 74
— — peatelg 70
— — tugevus 73
lühilained 23
lühinägevus 81

Madalsagedusvõimendi 20
massiarv 197
Maxwell, J. C. 3—5, 7, 108, 116, 159
meson 222, 223
Michelson, A. A. 88, 116
mikroskoop 83, 84
mikroskoobi suurendus 84
moduleerimine 16

monokromaatiline valgus 138
Morley, E. W. 116
mullikamber 183
murdumisnurk 58
murdunud kiir 58
mõjukvant 151
Mösovski, L. V. 183
märgitud aatomid 210

Neeldumisspektrid 143
negatiivkujutis 162
neutriino 219, 220
neutron 195, 196
neutronite paljunemistegur 205
Newtoni rõngad 94
nukleon 197
nõguspeegel 45

Objektiiv 79, 83
okulaar 84
omaageg 126
optikariista suurendus 82
optiliselt hõredam keskkond 59

Parima nägemise kaugus 81
Pauli, W. 219
peamaksimumid 103
peegelpind 41
peegeldav difraktsioonivõre 102
peegli fokaaltasand 45
— fookus 45
— fookuskaugus 48
— optiline keskpunkt 44
— — telg 44
— — kõrvaltelg 44
— — peatelg 44
— — tugevus 48
Petržak, K. A. 204
pidevspekter 141
pikklained 23
pikkuse relatiivsus 123—125
Planck, M. 150—152
planetaarne aatomimudel 169, 170
polaroidid 107
polariseeritud elektromagnetlained 22
— valgus 104
poolestusaeg 190
pooljuhtlaser 177
poolvari 34
Popov, A. S. 12, 13
positiivkujutis 162
positron 200
prillid 81
prisma murdev nurk 65
Prohhorov, A. M. 175
projektsiooniaparaat 79, 80

Raadiolokaator e. radar 24
raadiolokatsioon 24

raadiotelefoniside 14
radioaktiivsus 186
radioaktiivse nihke reegel 193, 194
relatiivsusprintsip 114
ribaspespekt 142
rubiinlaser 177
Rutherford, E. 167, 168, 194
ruuminurk 35
Röntgen, W. K. 145
röntgenikiired 144, 145
röntgenitoru 147
Römer, O. 86

Sagedusmodulatsioon 17
samaaegsuse relatiivsus 121—123
sfääriline peegel 44
silm 80, 81
silma akomodatsioon 81
sisefotoefekt 158, 159
Skobeltsõn, D. V. 182
Soddy, F. 189
soojuskiirgus 136, 144
spektraalanalüüs 142, 143
spektraalaparaat 139, 140
spekter 91
spektrograaf 140
spektroskoop 140
steradiaan 36
Stoletov, A. G. 152
Strassmann, F. 202
suhteline murdumisnäitaja 59
säritusaeg 79
sünkrofasotron 131, 132
sünkroniseeritud kellad 121

Zdanov, A. P. 183

Tasakaaluline soojuskiirgus 149
tasapeegel 43
tehiselemendid 209
tehisradioaktiivsus 199, 200
termotuumareaktsioonid 212
Thomson, J. J. 166—168

Torricelli, E. 98
Townes, Ch. H. 175
transuraanid 201
triitium 193
tuumajõud 197
tuumareaktor 206, 207
tuumareaktsioon 201, 202
tuuma lõhustumine 202, 203
— seoseenergia 198
— tilgamudel 203
täielik peegeldus 61—63
täieliku peegelduse piirnurk 64

Ultralühilained 24
ultraviolettkiired 144

Valguskiir 33
valguskvant e. footon 156
valguspunkt 35
valgustatus 35, 37—39
valgustugevus 35, 36
valgusvoog 35, 37
valguse difraktsioon 100
— murdumine 57, 59
— peegeldumine 41
— rõhk 159, 160
valguse keemiline toime 161
vari 34
varjatud kujutis 162
vastuvõtuantenn 13
Vavilov, S. I. 137, 138, 157
videosignaali 27
välisfotoefekt 158
väljumistöö 155

Walton, E. 201
Wilson, Ch. 181
Wilsoni kamber 181, 182

Õhukene lääts 71
õhukese läätse valem 71

Young, T. 93

I. Elektromagnetlained	
1. Muutuva elektri- ja magnetvälja vaheline seos	3
2. Elektromagnetväli	5
3. Elektromagnetilise vastastikuse mõju levi	6
4. Elektromagnetlaine	6
5. Hertzi vibraator	8
6. Hertzi katsed. Elektromagnetlainete levimiskiirus	10
7. Elektromagnetiline vastastikune mõju	11
8. Raadio leiutamine A. S. Popovi poolt	12
9. Kaasaegse raadioside printsiibid	14
10. Amplituudmodulatsioon	16
11. Demodulatsioon	17
12. Lihtsaim raadiovastuvõtja	19
13. Katsed elektromagnetlainetega	21
14. Raadiolainete levimine	23
15. Raadiolokatsioon	24
16. Televisiooni põhimõte	26
17. Sidevahendite arenemine Nõukogude Liidus	27

OPTIKA

Sissejuhatus	30
II. Geomeetriline optika	
18. Valguskiired	32
19. Valguse sirgjooneline levimine	33
20. Fotomeetria. Valgusvoog	35
21. Valgustugevus	35
22. Valgustatus	37
23. Näidisülesandeid	39
24. Valguse peegeldumisseadus	41
25. Kujutis tasapeeglis	43
26. Sfääriline peegel	44
27. Sfäärilise peegli valem	46
28. Kujutis sfäärilises peeglis	49
29. Suurendus	52
30. Näidisülesandeid	53
31. Valguse murdumisseadus	57
32. Täielik peegeldus	61
33. Kiirte kõik tasaparalleelses plaadis ja kolmetahulises prisma	64
34. Näidisülesandeid	65
35. Valguse murdumine sfäärilisel pinnal	68
36. Lääts	70
37. Õhukese lääts fookuskaugus	72
38. Kujutis läätses	75
39. Joon suurendus	77
40. Fotoaparaat	79
41. Projektsiooniaparaat	79
42. Silm	80
43. Prillid	81
44. Luup	82
45. Mikroskoop	83
46. Näidisülesandeid	84
III. Valguslaine	
47. Valguse kiirus	86
48. Valguse peegeldumis- ja murdumisseaduste tuleamine	89

49. Valguse dispersioon	91
50. Valguse interferents	93
51. Newtoni rõngad	94
52. Valguslaine pikkus	95
53. Katse Fresneli biprismaga	96
54. Interferentsi kasutamine	97
55. Valguse difraktsioon	100
56. Difraktsioonivõre	102
57. Valguslained kui ristlained. Valguse polarisatsioon	104
58. Valguslained kui ristlained ja elektromagnetiteooria	108
59. Näidisülesandeid	109
IV. Relatiivsusteooria alused	
60. Klassikalised ettekujutused ruumist ja ajast	113
61. Relatiivsuspriintiip mehhaanikas	114
62. Elektrodünaamika seadused ja relatiivsuspriintiip	115
63. Michelsoni-Morley' katse	116
64. Relatiivsusteooria postulaadid	119
65. Samaaegsuse relatiivsus	121
66. Pikkuse relatiivsus	123
67. Ajavaheemike relatiivsus	125
68. Kiiruste liitmise relativistlik seadus	128
69. Massi sõltuvus kiirusest. Relativistlik dünaamika	129
70. Sünkrofasotron	131
71. Massi ja energia seos	132
V. Kiirgus ja spektrid	
72. Kiirguse liigid. Valgusallikad	136
73. Energia jaotus spektris	138
74. Spektraalaparaadid	139
75. Kiirgusspektrite liigid	141
76. Spektraalanalüüs	142
77. Neeldumisspektrid	143
78. Infrapunased ja ultraviolettkiired	143
79. Röntgenikiired	144
80. Elektromagnetlainete skaala	148
VI. Valguskvandid. Valguse toimed	
81. Tasakaaluline soojuskiirgus	149
82. «Ultravioletne katastroof»	150
83. Plancki hüpotees	151
84. Fotoefekt	152
85. Fotoefekti teooria	155
86. Footonid	156
87. Fotoefekti kasutamine	158
88. Valguse rõhk	159
89. Valguse keemiline toime	161
90. Fotograafia	161
91. Heli salvestamine ja taasesitamine kinos	163
AATOMI- JA TUUMAFUUSIKA	
VII. Aatomifüüsika	
92. Spektrite seaduspärasused	165
93. Aatomi ehitus	166

94. Rutherfordi katsed	167
95. Planetaarne aatomimudel	169
96. Bohri postulaadid	170
97. Vesiniku aatomi mudel Bohri teooria järgi	171
98. Bohri teooria raskused. Kvantmehhaanika	174
99. Valguskvantgeneraatorid — laserid	175

VIII. Tuumafüüsika

100. Aatomituum ja elementaarosakesed	178
101. Elementaarosakeste jälgimise ja registreerimise meetodid	179
102. Loodusliku radioaktiivsuse avastamine	184
103. α -, β - ja γ -kiirgus	186
104. Radioaktiivsed muundumised	188
105. Radioaktiivse lagunemise seadus. Poolestusaeg	190
106. Isotoobid	192
107. Nihkereegel	193
108. Aatomituumade muundumine α -osakeste toimel	194
109. Neutroni avastamine	195
110. Aatomituuma ehitus. Tuumajõud	196
111. Aatomituumade seoseenergia	198
112. Tehisradioaktiivsus	199
113. Tuumareaktsioonid	201
114. Uraanituuma lõhustumine	202
115. Ahelreaktsioonid	205
116. Tuumareaktor	206
117. Tuumaenergia kasutamine	209
118. Radioaktiivsete isotoopide kasutamine teaduses ja tehnikas	209
119. Termotuumareaktsioonid	212
120. Radioaktiivse kiirguse bioloogiline toime	213

IX. Elementaarosakesed

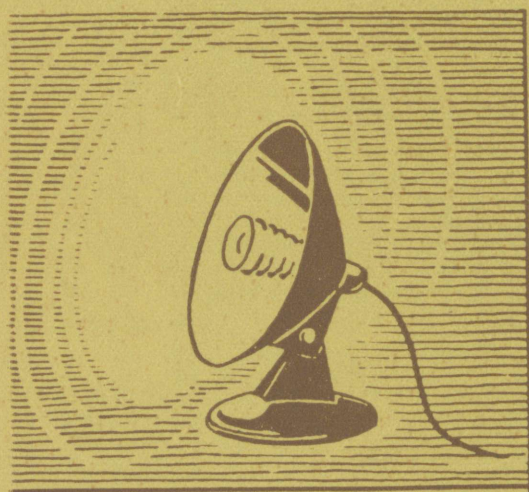
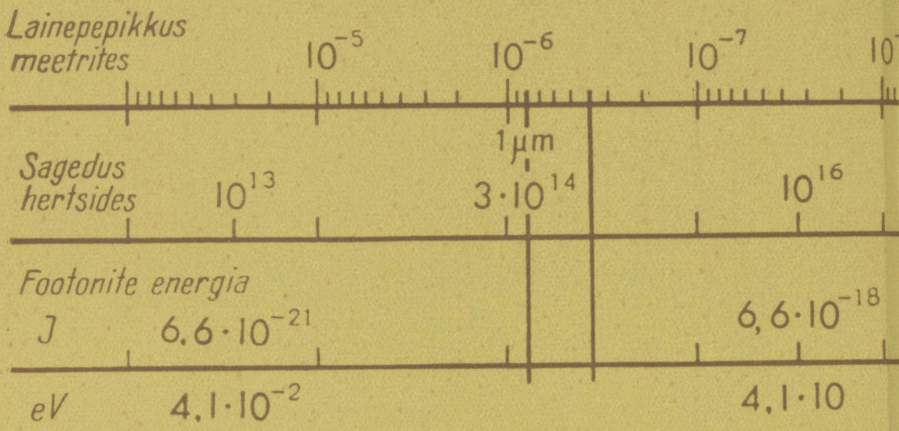
121. Mis on elementaarosake?	214
122. Kas elementaarosakeste sees on osakesi?	215
123. Positroni avastamine. Antiosakesed	217
124. Neutroni lagunemine. Neutriino avastamine	219
125. Mateeria võimalikud eksisteerimisvormid	221
126. Kui palju on elementaarosakesi?	222

X. Kokkuvõte

127. Uhtne füüsikaline maailmapilt	224
128. Füüsika ja tehniline progress	227
Kordamisülesanded	230
Laboratoorsed tööd	233
Ulesannete vastused	238
Aineregister	239

Геннадий Яковлевич Мякишев, Борис Борисович Буховцев. ФИЗИКА ДЛЯ 11-ГО КЛАССА. На эстонском языке. Перевел с русского А. Ланг. Обложка Р. Тунгла. Издательство «Валгус». Таллин. Тоimetaja E. Randma. Kunstiline toimetaja H. Keigo. Tehniline toimetaja M. Pall. Korrektor S. Hiie. Laduda antud 27. II 1973. Trükkida antud 11. V 1973. Kohila Paberivabriku trükipaber nr. 2, 60×90/16. Trükipoognaid 15,25+0,25 (kleebis). Arvestuspoognaid 16,42. Trükiarv 9000. Tellimuse nr. 1365. Kirjastus «Valgus». Tallinn, Pärnu mnt. 10. H. Heidemanni nim. Trükkikoda, Tartu, Ülikooli 17/19. I. Hind 34 kop.

ELEKTROMAGNETLAINETE SKAALA



INFRAPUNANE KIIRGUS



NÄHTAV VALGUS

ULTRAVIOLETTKIIRGUS

ALA

10^{-8} 10^{-9} 10^{-10} 10^{-11} 10^{-12} 10^{-13}

1 nm

1 pm

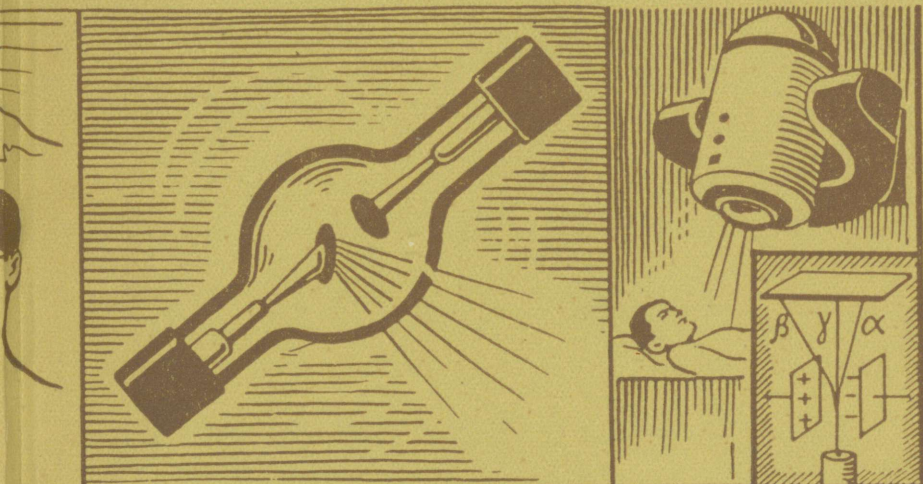
$3 \cdot 10^{17}$

10^{19}

$3 \cdot 10^{20}$

$6,6 \cdot 10^{-15}$

$4,1 \cdot 10^4$



RGUS

RÖNTGENKIIRGUS

GAMMAKIIRGUS

34 kop

A

33 264

87 187

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00455 191 9