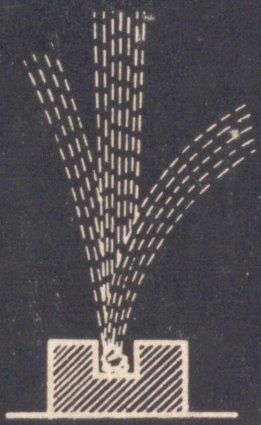
A. Pjorõškin

FÜÜSIKA

KESKKOOLILE

II



Arh. ek

ARH

A. PJORÕŠKIN

FÜÜSIKA

KESKKOOLILE

II

ELEKTER, OPTIKA
JA AATOMI EHITUS

KIRJASTUS «EESTI RAAMAT»
TALLINN 1965

53
P 57

Originaali tiitel:

А. В. Пёрышкин. Курс физики. Часть третья. Электричество, оптика и строение атома. Учебник средней школы. Издание двенадцатое.
Утвержден Министерством просвещения РСФСР.
Издательство «Просвещение»
Москва 1965

Tõlkinud K. Allik, V. Paju ja M. Jaagus.

Kaanekujundus P. Reeveer.

Tõlge kinnitatud Eesti NSV Haridusministeeriumi poolt.

ARHIIVKOGU

2

Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
62164

I OSA

ELEKTER

1. Õpetus elektrinähtustest ja selle tähtsus tänapäeva teaduses ja tehnikas. Tänapäeval on elektrienergial väga suur tähtsus.

Elektrivalgustus, elektri-soojendusriistad, telegraaf, telefon ja raadio on kindlalt juurdunud nõukogude inimese igapäevasesse ellu. Vabrikutes, tehastes ja kaevandustes panevad elektrimootorid liikuma tööpinke ja mitmesuguseid mehhanisme. Metallurgias saadakse elektriahjude abil kõrgeväärtuslikku terast ja paljusid teisi väärtuslikke metalle. Elektrivoolu kasutatakse laialdaselt keemiatööstuses ja raudteetranspordis.

Eriti suur tähtsus on elektrienergia kasutamisel põllumajanduses. Elektrienergiat ei kasutata põllumajanduses mitte ainult mitmesuguste masinate käimapanemiseks ja valgustamiseks, vaid seda kasutatakse ka elektrilüpsiks, lammaste pügamiseks, vee soojendamiseks, piima pastöriseerimiseks jne.

Elektrit kasutatakse laialdaselt linnukasvatusfarmides, siidiussikasvatuses, mesilastepidamises, võitluses putukatega jne.

Elektrienergia praktiline kasutamine lõi rea uusi tehnikaharusid — elektrotehnika, elektrokeemia, raadiotehnika, televisiooni, telemehhaanika ja automaatika. Elektrimootorid, mis teenindavad üksikuid tööpinke ja isegi nende osi, on täielikult asendanud kohmaka transmissioonülekandega soojusjõumasinad.

On ehitatud uut liiki masinad, milles kasutatakse üheaegselt paljusid elektrimootoreid. On tekkinud keerulised automaattööpingid, mis vabastavad paljudes tööstusharudes töölisi raskest füüsilisest tööst.

Millised elektrienergia iseärasused põhjustavad tema nii laialdast kasutamist?

Elektrienergiat on kerge muundada teisteks energialiikideks, ja mis on eriti tähtis, need muundamised toimuvad väikeste kadudega.

Ilma suurte kadudeta saab elektrienergiat juhtmete kaudu üle kanda suurtele kaugustele ja jaotada tarbijate vahel. See annab võimaluse paigutada tehaseid ja vabrikuid tooraineallikate lähedusse, elektrijaamu aga kütuselademete (söe, turba, põlevkivi) juurde või jõgede kallastele.

Elektrienergia jaotatavus ja elektrimasinate ning -aparaatide kõrge kasutegur tagab nende erakordselt laialdase kasutamise

kõige mitmesugusematel aladel. Tänapäeva kõige võimsam elektrimasin on 200 tuhande kilovatine generaator. On olemas ka väike elektrimootor kellamehhanismile, mille võimsus on ainult 3 millivatti.

Õpetusel elektrinähtustest on suur teaduslik tähtsus. Ta võimaldas süvendada meie teadmisi aine ehitusest ja leida ühiseid põhjusi paljudele loodusnähtustele, mis seni näisid üksteisest sõltumatuina.

Kõik see teeb eriti vajalikuks elektrotehnika aluste õppimise keskkoolis. Iga nõukogude keskkooli lõpetanud noor peab omama põhiteadmisi elektrinähtustest, elektrijaamadest, elektrienergia kasutamisest tööstuses ja põllumajanduses, peab tundma maa elektrifitseerimise plaani.

Tänapäeva õpetus elektrinähtustest on mitmesuguste maade ja rahvaste teadlaste paljude põlvkondade pikaajalise ja visa töö tulemus. Suure panuse sellesse õpetusse andsid meie kodumaa teadlased M. V. Lomonossov, V. V Petrov, E. H. Lenz, B. S. Jacobi, A. G. Stoletov, A. S. Popov, P. N. Lebedev, L. I. Mandelstam, N. D. Papaleksi jt.

Nende teaduse ja tehnika korüfeede kuulsusrikkaid traditsioone jätkavad tuhanded nõukogude teadlased.

I PEATÜKK

ELEKTRILAENGUD JA ELEKTRIVÄLI

2. Kehade elektrifitseerimine. Elektrilaeng. Sõnad: elekter, elektrivool, elektrienergia on tänapäeval tuntud kõigile.

Kuid mis on elekter? Milline on tema olemus? Ei ole kerge vastata nendele küsimustele. Selleks on vaja tutvuda väga paljude nähtustega, mida me nimetame elektrilisteks. Vaatleme esiteks termini «elekter» päritolu.

Mitu sajandit enne meie ajaarvamist märkasid vana-kreeka teadlased, et merevaigust esemed nende hõõrumise tagajärjel tõmbavad külge kergeid kehi. Kreeka keeles on merevaik e l e k t r o n, sellest sõnast tekkiski nimetus «elekter».

XVI sajandi lõpul avastas inglise teadlane G i l b e r t (l. džilbert), et peale merevaigu omandavad hõõrumisega võimet külge tõmmata kergeid kehi veel rida teisi aineid, näiteks klaas, väävel, vaik ja teised. Nende uute omaduste tekitamist kehadel nimetati e l e k t r i s e e r i m i s e k s. Merevaiku või iga teist ainet, kui ta hõõrumise tagajärjel omandas võime kergeid kehi külge tõmmata, hakati nimetama e l e k t r i s e e r i t u k s.

Kehade elektriseerumist seletati e l e k t r i ehk e l e k t r i l a e n g u ilmumisega kehal.

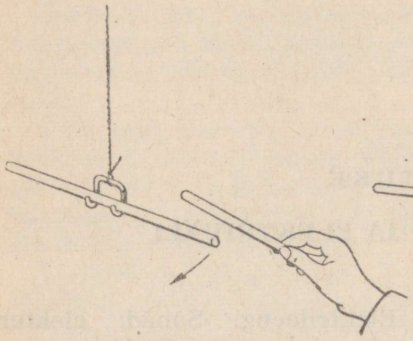
Et elektriseerida mingit keha, pole alati vaja seda hõõruda mõne teise kehaga; võib näiteks puudutada teda mingi varem elektriseeritud kehaga. Näiteks puudutades siidriidega hõõrutud klaaspulgaga siidniidi otsas rippuvat kerget leedripuust kuulikest, elektriseerime selle.

Katsed näitavad, et elektriseeritud kehad kas tõmbuvad teineteise poole või tõukuvad teineteisest eemale.

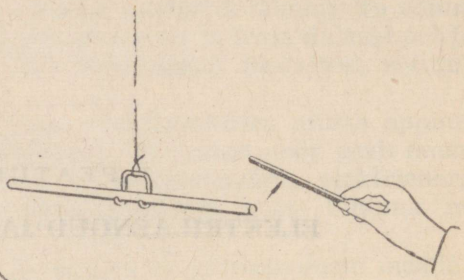
Nii näiteks siidiga hõõrutud elektriseeritud klaaspulk tõukub eemale teisest samasugusest pulgast (joon. 1) ja tõmbub karusnahaga hõõrutud elektriseeritud eboniitpulga külge (joon. 2).

Taoliste katsete alusel tuldi järeldusele, et on olemas kaht liiki elektrilaenguid. Need laengud on teineteisele vastandlikud ses mõttes, et elektriseeritud keha tõmbub neist ühe poole ja tõukub teisest eemale.

Kokkuleppel nimetati ühtesid neist elektrilaenguist positiivseiks ja teisi — negatiivseiks. Positiivseks loetakse elektrilaengut, mis tekib klaaspulga elektriseerimisel siidiga hõõrumise teel.



Joon. 1. Laetud klaaspulk tõukub teisest elektriseeritud klaaspulgast eemale.



Joon. 2. Laetud klaaspulk tõmbub elektriseeritud eboniitpulga poole.

Elektrilaengut, mis tekkis vaigust (või eboniidist) pulga hõõrumisel karusnahaga, nimetatakse negatiivseks.

Elektrilaengute vastastikuse mõju vaatlused võimaldasid kindlaks teha, et samanimelised laengud tõukuvad, erinimelised aga tõmbuvad.

Joon. 3. Lihtsaim elektroskoop.

Elektriseeritud kehade vastastikuse mõju nähtusel põhineb kehade elektriseerituse kindlakstegemise riista — elektroskoobi (joon. 3) ehitus.

Elektriseeritud keha puutumisel vastu elektroskoobi varrast tõukuvad varda külge kinnitatud kerged alumiiniumlehekesed teineteisest eemale, kuna need laetakse samanimeliste laengutega.

3. Elektriväli. Iga elektrilaengu ümber on alati tema elektriväli. Elektrivälja olemasolu on tõestatud paljude katsetega. Vaatleme järgmist katset.

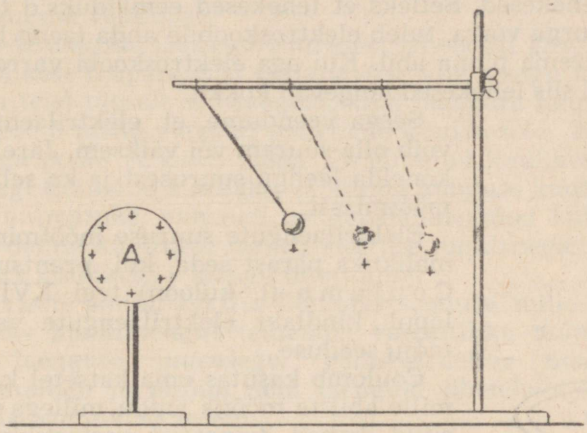
Riputame siidniidi otsa kerge leedripuust kuulikese ja anname talle elektrilaengu. Anname samanimelise laengu ka mingile kehale *A*, mis on asetatud isolaatorist alusele (joon. 4).

Leedripuust kuulikese abil uurime laetud keha ümbritsevat ruumi.

Paigutades leedripuust kuulikese selle ruumi erinevaisse punktidesse, näeme iga kord, et kuulikesele mõjub jõud. Seejuures märkame, et mida ligemal asub kuulike laetud kehale *A*, seda tugevamini tõukub ta eemale ja järelikult seda suurem on temale mõjuv jõud (joon. 4).

Selle katse abil jõuame järeldusele, et laetud keha *A* ümbritseva ruumi igas punktis mõjub meie kuulikesele jõud.

Kui laetud keha *A* eemaldada, siis lakkab jõud leedripuust kuulikesele mõjumast.



Joon. 4. Leedripuust kuulike tõukub seda rohkem eemale, mida lähemal ta on laetud kehale.

Me teame, et ühe keha mõju teisele toimub kas vahetu kokkupuute teel või teiste seda mõju edasiandvate kehade, näiteks õhu, vee jne. vahendusel. Kuid ülalkirjeldatud katses teineteist vastastikku mõjutavad elektriseeritud kehad ei puutunud teineteisega kokku; katse näitab, et täpselt samasugune vastastikune mõju esineb ka õhuta ruumis.

Kuidas siis toimub elektriseeritud kehade vastastikune mõjutamine?

Pikaajaliste uurimiste tulemusena tulid teadlased järeldusele, et **ühe laetud keha mõju teisele toimub erilise materiaalse keskkonna kaudu, mida nimetatakse elektriväljaks.**

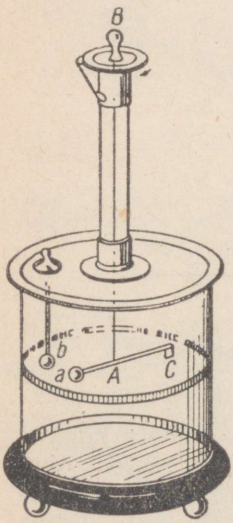
Laetud keha ümbritseb ruumis elektriväli. Vaadeldav laetud kehade vastastikune mõju seletub seetõttu järgmiselt: ühele laetud kehale (meie katsel leedripuust kuulikesele) mõjuv jõud on tingitud teist laetud keha (meie katsel keha *A*) ümbritseva elektrivälja mõjust temale.

Jõudusid, millega elektriväli mõjutab elektriseeritud kehi, nimetatakse elektrijõududeks.

Elektrivälja võib uurida, asetades sinna väikesi laetud kehi. Neid kehi nimetatakse «proovilaenguteks». Näiteks meie katses oli proovilaenguks laetud leedripuust kuulike. Temale mõjus laetud keha *A* poolt tekitatud elektrivälja jõud. Järelikult, *elektrivälja olemasolu tehakse kindlaks tema mõju järgi proovilaengutele.*

4. Coulombi seadus. Andes elektroskoobile ühe- või teisenimelise elektrilaengu, selgub, et elektroskoobi lehekesed eemalduvad teineteisest suurema või väiksema nurga all.

Puudutame elektroskoobi varrast elektriseeritud pulgakesega ja paneme tähele, millise nurga võrra eemalduvad teineteisest elektroskoobi lehekesed. Selleks et lehekesed eemaldukski teineteisest suurema nurga võrra, tuleb elektroskoobile anda laeng laetud pulgakese suurema pinna abil. Kui aga elektroskoobi varrast puudutada käega, siis lehekesed langevad kokku.



Joon. 5. Riist, mille abil tehakse kindlaks elektriseeritud kehade vastastikuse mõju suurus.

Seega veendume, et elektrilaeng kehadel võib olla suurem või väiksem. Järelikult võib kõnelda laengu suurusest ja ka selle suuruse mõõtmisest.

Elektrilaengute suuruse mõõtmine sai võimalikuks pärast seda, kui prantsuse füüsik Coulomb (l. kuloon) tegi XVIII sajandi lõpul kindlaks elektrilaengute vastastikuse mõju seaduse.

Coulomb kasutas oma katsetel keerdkaalu, mille abil ta mõõtis jõudu, millega elektriseeritud kehad teineteist vastastikku mõjutavad.

Keerdkaal (joon. 5) koosneb kergest elektrit mitte juhtivast kaalukangist *A*, mis on riputatud väga peenikese metalltraadi otsa ja asetseb silindrilises klaasanumas. Kangi ühte otsa on kinnitatud kullatud leedripuust kuulike *a*, teise — vastukaal *C*. Kandetraadi ülemine ots on kinnitatud nupu *B* keskkohta. Nupp on varustatud osutiga ja võib pöörduda mööda gradueeritud skaalat, mille abil saab määrata kinnitatud traadi väändenurka.

Anuma kaanes on avaus, mille kaudu saab elektroskoobisse asetada isolaatorile kinnitatud kuulikese *b*, mis oma mõõtmeilt on võrdne kuulikesega *a*. Pöördenurk kuulikese *a* ja *b* vahel on mõõdetav jaotuste järgi anuma seinal, kusjuures keerdkaalu nupu pööramisega saab seda nurka muuta.

Andnud kummalegi kuulikesele laengu ja asetanud nad mingisugusele kaugusele teineteisest, määras Coulomb selle teostamiseks vajalikuks osutunud traadi väändenurga järgi jõu, millega kuulikesed teineteist vastastikku mõjutavad.[1]

Kui riist on varemalt gradueeritud, siis saab nupu pöördenurga

[1] Traadi elastsuse tõttu väändel tekkiva jõu moment võrdub kuulikesele rakendatud jõu momendiga. See on jõud, millega kuulikesed teineteist vastastikku mõjutavad. Selle jõu pöördemoment aga on muutumatu õlapikkuse *Aa* korral võrdeline jõuga.

järgi määrata jõu, millega elektriseeritud kuulikesed teineteist vastastikku mõjutavad.

Muutes kuulikestevahelist kaugust, tegi Coulomb kindlaks, et kui laengud neil ei muutu, siis jõud, millega nad vastastikku teineteist mõjutavad, on pöördvõrdeline kuulikeste keskpunktide vahelise kauguse ruuduga.

Küsimus kuulikeste laengute suurusest lahendati järgmisel viisil. Võttes kuulikese *b* aparaadist välja, andes talle laengu ja puudutades temaga teist täpselt samasugust, kuid laenguta kuulikest, jaotub kuulikese *b* laeng võrdselt mõlemale kuulikesele. Kuulikesele *b* jääb seega poole väiksem laeng. Paigutanud kuulikese *b* tagasi aparaati, tegi Coulomb kindlaks, et jätnud kauguse kuulikeste *a* ja *b* vahel muutmatuks, väheneb nendevaheline jõud kahekordselt, s. t. on võrdeline kuulikese laengu suuruse muutusega. Samal viisil toimus ka kuulikese *a* laengu muutmine.

Nende katsete põhjal avastas Coulomb seaduse, mille järgi **jõud, millega kaks punktlaengut teineteist vastastikku mõjutavad, on võrdeline laengute suurusega, pöördvõrdeline nendevahelise kauguse ruuduga ja mõjub neid laenguid ühendava sirge sihis.** Seda seadust väljendab valem

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

kus q_1 ja q_2 on teineteist vastastikku mõjutavate punktlaengute suurused, r — nendevaheline kaugus ja k — võrdetegur, mis sõltub mõõtühikute valikust.

Punktlaenguiks nimetatakse laenguid, mis asuvad mistahes kujuga kehades, millede joonmõõtmed on väga väikesed võrreldes nendevahelise kaugusega.

Uurimused näitasid, et ümbritsev keskkond mõjub jõu F suurusele ja et Coulombi seadus on rangelt kasutatav ainult laetud kehade vastastikuse mõju kohta õhuta ruumis (vaakuumis).

5. Elektrilaengu ühikud. Coulombi seadus võimaldab määrata elektrilaengu ühikut.

Kasutades kauguse ja jõu mõõtmiseks *CGS*-süsteemi ühikuid ja oletades, et $r = 1$ cm, $F = 1$ düün ja $q_1 = q_2 = q$, $k = 1$, leiame valemi $F = \frac{q^2}{r^2}$ abil, et neil tingimustel $q = \pm 1$ laenguühikut. Sellest järeldub: *elektrilaengu ühikuks nimetatakse niisugust laengut, mis mõjub vaakuumis ühe sentimeetri kaugusel olevale temaga võrdsele laengule jõuga 1 düün.*

Sel viisil defineeritud laenguühikut nimetatakse absoluutseks elektrostaatiliseks laenguühikuks (LÜ).

Elektriliste suuruste mõõduühikute süsteemi, milles laenguühikuks võetakse elektrostaatiline laenguühik, nimetatakse absoluutseks elektrostaatiliseks süsteemiks ja tähistatakse *CGSE*.

Rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis, mida nimetatakse ka *SI*-süsteemiks,[1] on laenguühikuks 1 kulon (lühendatult 1 C). 1 kulon $= 3 \cdot 10^9$ elektrostaatilist laenguühikut ehk 1 C $= 3 \cdot 10^9$ LÜ.

Harjutus 1.

1. Kuidas sai Coulomb, omades kuulikesel mingit laengut, 2, 3, 4 jne korda väiksemaid laenguid?
2. Kirjutada elektrilaengu ühiku dimensioon *CGSE*-süsteemis, s. o. väljendada elektrilaengu ühiku dimensioon süsteemi põhiühikute cm, g, s kaudu.
3. Kaks võrdse laenguga väikest kuulikest asuvad vaakuumis 10 cm kaugusel teineteisest ja tõukuvad teineteisest eemale jõuga $F = 1$ düün. Leida laengute suurus.
4. Leida jõud, millega mõjuvad teineteisele kaks vaakuumis asuvat väikest kuulikest, kui neil mõlemal on samanimelised laengud, suurusega 20 LÜ, ning mis asuvad teineteisest 10 cm kaugusel.
5. Kaks väikest keha, samanimeliste laengutega $q_1 = 15$ LÜ ja $q_2 = 45$ LÜ, asuvad teineteisest 30 cm kaugusel. Kui kaugele esimesest tuleb paigutada kolmas keha, laenguga q_3, et ta oleks tasakaalus? Kas see kaugus oleneb laengu q_3 suurusest?
6. Kahel väikesel kuulikesel *a* ja *c* on laengud vastavalt 1 ja 4 LÜ. Millisesse punkti tuleb asetada laetud kuulike *b* kuulikeste *a* ja *c* vahele, et ta oleks tasakaalus? Näidake, kus veel on selline punkt, kus kuulike ühesuguselt tõukub eemale kahest teisest kuulikesest.
7. Kahe samanimeliselt laetud kuulikese massid on vastavalt 10 g ja 1 g. Milline peab olema esimese kuulikese laeng, et kuulikestevaheline gravitatsioonijõud tasakaalustuks elektrilise jõuga, kui teise kuulikese laeng on 10^{-5} LÜ?

6. Laengu jaotumine juhi pinnal. Asetame õõnsa metallkera, mille ülalosas on avaus, isolaatorile ja anname sellele elektrilaengu. Puudutades väikese metallkuuliga, nn. proovikuulikesega laetud kera pinna eri osi ja andes proovikuulikese laengu üle elektroskoobile, võime teha kindlaks, millise laengu sai proovikuulikene.

Me märkame, et puudutades proovikuulikesega laetud kera välispinda, läheb osa selle laengust üle proovikuulikesele (joon. 6, *a*). Kuid puudutades proovikuulikesega laetud kera sisepinda, ei saa proovikuulike üldse laengut (joon. 6, *b*). Tehes analoogilisi katseid mitmesugust kuju omavate juhtidega, saame alati sama tulemuse: *laengud juhil asuvad ta välispinnal.*

Olenevalt juhi kujust võib laengu jaotumine tema pinnal olla väga mitmesugune.

Laengute jaotuvuse iseloomustamiseks juhi pinnal kasutatakse suurust σ, mida nimetatakse laengu pindtiheduseks. See kujutab endast juhi pinnal asuva laengu suuruse ja selle pindala suhet: $\sigma = \frac{q}{S}$, kus q on juhi laeng ja S juhi pindala.

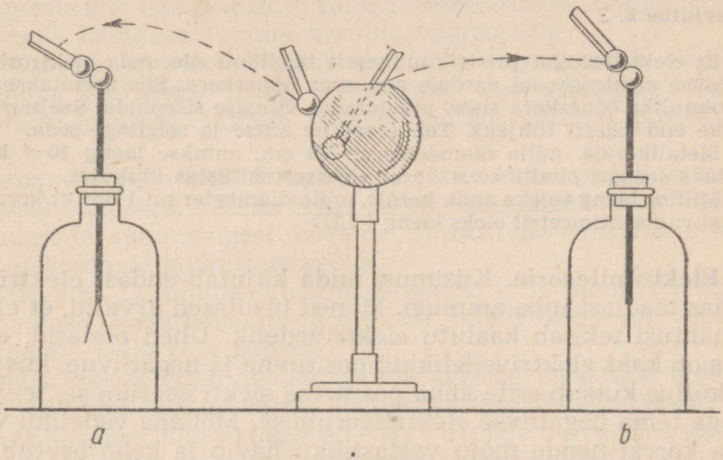
---

[1] Alates 1. jaan. 1963. a. eelistatakse kõikidele süsteemidele uut rahvusvahelist mõõtühikute süsteemi (lühendatult *SI*), milles põhiühikuteks on:

pikkus	meeter (m)
mass	kilogramm (kg)
aeg	sekund (s)
elektrivoolu tugevus	amper (A)
termodünaamiline temperatuur	Kelvini kraad (°K)
valgustugevus	kandela (cd)

(Toim.)

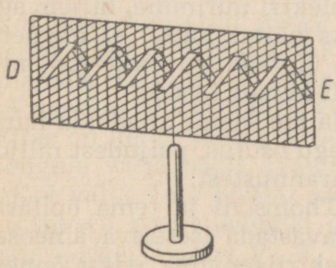
Katse näitab, et laengu pindtihedus sõltub pinna kumerusest. Keral, mille pinna kumerus on ühtlane, on elektrilaengud jaotatud ühtlaselt. Samasugune ühtlane laengute jaotus esineb elektrit



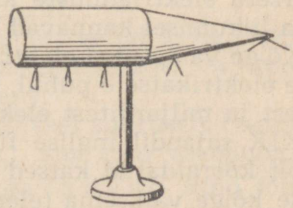
Joon. 6. Katse, mis näitab, et elektrilaeng koondub juhi välispinnale.

juhtiva tasapinna elektriseerimisel, milles on kerge veenduda järgmise katse abil.

Kinnitame metallvõrgu *DE* pinnale rea paberiribakesi (joon. 7) ja anname võrgule tugeva laengu. Näeme, et kõik paberiribakesed



Joon. 7. Katse, mis näitab, et tasapinnal jaotub laeng ühtlaselt.



Joon. 8. Laengu ebaühtlane jaotumine keha pinnal. Laengu tihedus on suurim teravikul.

kalduvad kõrvale ühesuguse nurga all. Tähendab, elektrilaeng jaotub tasapinnal ühesuguse tihedusega.

Kui aga laetud juhi pinna kumerus pole igal pool ühesugune, siis jaotub laeng sellel juhil ebaühtlaselt. Laengute pindtihedus on suurem seal, kus pinna kumerus on suurem (joon. 8).

Laengu tihedust juhi pinna mitmesugustes osades võib katse abil kindlaks määrata, puudutades juhti ühe ja sellesama väikese katseplaadikesega. Laeng, mille saab see plaadike, on võrdeline laengu tihedusega pinna antud punktis.

Harjutus 2.

1. Et elektrilaengut proovikuulikeselt täielikult üle anda elektroskoobile, asetatakse elektroskoobi vardale avausega õõneskera. Siis asetatakse laetud proovikuulike õõneskera sisse, puudutades viimase sisepinda. Seejuures laeb kuulike end täiesti tühjaks. Tehke selline katse ja selgitage seda.
2. Metallkerale, mille diameeter on 70 cm, antakse laeng 10^{-6} kulonit. Arvutada laengu pindtihedus keral elektrostaatilistes ühikutes.
3. Milline laeng tuleks anda kerale, mille diameeter on 1 dm, et kera pindala igal ruutsentimeetril oleks laeng 1 LÜ?

7. Elektroniteooria. Küsimus, mida kujutab endast elektrilaeng, huvitas teadlasi juba ammugi. Mõned teadlased arvasid, et elektrilisi nähtusi tekitab kaalutu elektrivedelik. Ühed oletasid, et igas kehas on kaks elektrivedelikku: positiivne ja negatiivne, kusjuures ühe küllus kutsub esile keha positiivse elektriseerumise, teise küllus aga tema negatiivse elektriseerumise. Mõlema vedeliku võrdse hulga korral nende mõju vastastikku hävib ja keha osutub laenguta. Teised arvasid, et on olemas vaid üks elektrivedelik ja et seda leidub teatud koguses igas laadimata kehas. Selle küllus kehas põhjustab positiivse, puudus aga negatiivse elektriseerumise. Kuid ikka uute ja uute katsete tulemuste analüüs sundis järkjärgult loobuma elektrivedeliku olemasolu ettekujutusest.

Kõigepealt avastati, et elektril on aatomiline struktuur, s. t. ta on võimeline jagunema võrdseteks annusteks, niinimetatud elementaarseteks elektrilaenguteks. Selleni viis ühest küljest happe- ja soolalahuseid läbiva elektri uurimine, hiljem aga elektrivoolu uurimine gaasides. Lõpuks näitas katse, et elementaarsete elektriannuste kandjateks on üliväikesed osakesed, mis oma liikumisel kannavad laenguid ühelt kehalt teisele.

Kõige väiksemad elektrilaengud, mida me saame vaadelda harilike elektrikatsete puhul, koosnevad, nagu osutus, paljudest miljonitest ja miljarditest elektri elementaarannustest.

XIX sajandil inglise füüsiku J. J. Thomsoni ja tema õpilaste poolt korraldatud katsed võimaldasid avastada iseseisva aineosakese kõige väiksema (elementaarse) elektrilaenguga, edasi õnnestus ka mõõta selle elementaarlaengu suurust.

Väikseimat negatiivse elementaarlaenguga aineosakest nimetatakse elektroniks.

Elektrilaeng on elektroni üheks põhiliseks omaduseks ja on temast lahutamatu.

Elektroni mass $m = 9 \cdot 10^{-28}$ g.

Elektroni laeng $e = -4{,}8 \cdot 10^{-10}$ LÜ.

Elektron on osake, mis kuulub iga aine koosseisu. Iga aine koosneb aatomitest. Aatom omakorda koosneb positiivselt laetud tuu-

mast ja tema ümber tiirlevaist elektronidest. Eri ainete aatomite koosseisu kuuluvad elektronid on täiesti ühesugused, kuid nende arv ja jaotus tuuma ümber on erinev. (Üksikasjalisemalt räägitakse sellest raamatu viimases peatükis.)

Kui aatom on neutraalses olukorras (tal ei ole laengut), siis tuuma positiivne laeng võrdub tuuma ümber tiirlevate elektronide negatiivsete laengute summa absoluutväärtusega.

Võib juhtuda, et aatom kaotab ühe või mitu elektroni; sel juhul jääb tuuma positiivne laeng suuremaks kui aatomisse jäänud elektronide laengute summa ja kogu aatom osutub positiivselt laetuks.

Kui kogu keha on laetud negatiivselt, siis vastab see elektronide ülikküllusele temas, s. t. keha kõigi elektronide ühine laeng on suurem tuumade summaarsest laengust. Positiivne elektriseerimine vastab elektronide puudusele kehas.

Elektronide liikumine kutsub kehades esile elektrilaengute ümberjaotuse, negatiivse ja positiivse elektriseerimise, elektrivoolu metallides ja teisi nähtusi.

Teooriat, mis selgitab kehade mitmesuguseid elektrilisi omadusi ja paljusid muid nähtusi seoses elementaarsete laetud osakeste olemasoluga kehades, nimetatakse e l e k t r o n i t e o o r i a k s. Elektronteooria seisukohast lähtudes lähevad elektronid kahe laadimata keha kokkupuutumisel ja nende järgneval lahutamisel ühelt kehalt üle teisele. See keha, millel tekib elektronide puudujääk, muutub positiivselt laetuks, teine keha aga, millel tekib elektronide küllus, muutub negatiivselt laetuks. Kuna seejuures on mõlemanimelisi laenguid võrdsel hulgal, siis on loomulik oletada, et üks keha kaotab niisama palju elektrone, kui palju teine saab neid juurde.

8. Elektrivälja tugevus. Leheküljel 6 kirjeldatud katsel me viisime positiivselt laetud keha elektriväljasse proovilaengu — siidniidi otsa riputatud kerge kuulikese (kuulikesel oli positiivne laeng). Elektrivälja mõjul kaldus kuulike seda enam kõrvale, mida lähemale me ta antud kehale viisime (joon. 4).

Proovilaengu ümberpaigutamisel mistahes laetud keha elektriväljas on kerge näha, et välja mitmesugustes kohtades on proovilaengule välja poolt avaldatav jõud erinev.

Kui välja ühte punkti asetada üksteise järel suuruselt erinevad positiivsed proovilaengud q_1, q_2, $q_3 \ldots q_n$, siis võib veenduda, et neile mõjuvad jõud F_1, F_2, $F_3 \ldots F_n$ on e r i n e v a d, kuid jõu ja vastava laengu suuruse suhe välja antud punkti kohta on konstantne suurus:

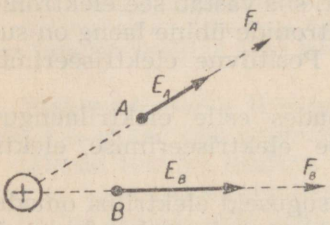
$$\frac{F_1}{q_1} = \frac{F_2}{q_2} = \frac{F_3}{q_3} = \ldots = \frac{F_n}{q_n}.$$

Kui me sellisel viisil uurime välja eri punkte, siis tuleme järeldusele, et *elektrivälja igas punktis on proovilaengule mõjuva jõu ja tema laengu suuruse suhe konstantne ega sõltu proovilaengu suurusest.*

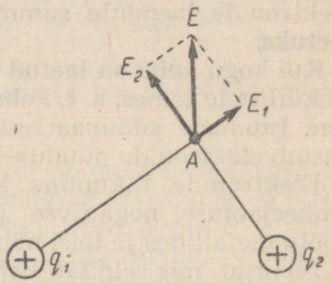
Järelikult võib seda suhet kasutada elektrivälja iseloomustamiseks igas tema punktis. *Suurust, mida mõõdetakse välja antud punkti paigutatud laengule mõjuva jõu ja selle laengu suuruse suhtega, nimetatakse elektrivälja tugevuseks antud punktis.*

$$E = \frac{F}{q}.$$

Nagu definitsioonist nähtub, võrdub väljatugevus arvuliselt välja antud punkti paigutatud positiivsele laenguühikule mõjuva jõu suurusega.



Joon. 9. Elektrivälja tugevuse mõiste selgitamiseks.



Joon. 10. Kahe laengu väljatugevus.

Elektrivälja tugevuse ühikuks võetakse sellise välja tugevus, mis mõjub laengule suurusega 1 LÜ jõuga 1 düün. Sellist ühikut nimetatakse väljatugevuse absoluutseks elektrostaatiliseks ühikuks.

Üksiku punktlaengu väljatugevuse arvutamiseks elektrivälja mingis vabalt võetud punktis A (joon. 9), mis asub laengust q kaugusel r, asetame sellesse punkti proovilaengu q_1 ja arvutame temale selles punktis mõjuva jõu F (vaakuumis).

Coulombi seaduse järgi: $F = \frac{q_1 q}{r^2}$.

Jagades jõu suuruse proovilaenguga q_1, saame väljatugevuse arvulise väärtuse punktis A:

$$E_A = \frac{q}{r^2}.$$

Samuti võib leida väljatugevuse punktis B (joon. 9), mis võrdub:

$$E_B = \frac{q}{r_1^2}.$$

Siit näeme, et punktlaengu elektrivälja tugevus välja antud punktis (vaakuumis) on võrdeline selle laengu suurusega ja pöördvõrdeline selle punkti kauguse ruuduga laengust.

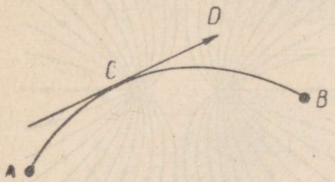
Väljatugevus on jõud, mis iseloomustab välja. Teades väljatugevust E välja mingis punktis, on kerge arvutada jõudu F, millega väli mõjub sellesse punkti asetatud laengule q:

$$F = qE.$$

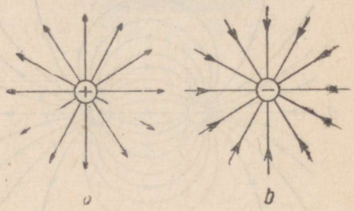
Väljatugevus on vektoriaalne suurus. *Väljatugevuse suund välja igas antud punktis ühtib sellesse punkti paigutatud positiivsele proovilaengule mõjuva jõu suunaga.*

Kui väli on tekitatud mitme, näiteks kahe laengu q_1 ja q_2 poolt (joon. 10), siis selle välja tugevus E mingis punktis A on võrdne laengute q_1 ja q_2 poolt eraldi tekitatud väljatugevuste E_1 ja E_2 geomeetrilise summaga.

9. Elektriväljade graafiline kujutamine. Elektrivälja graafiliseks kujutamiseks võiks välja igasse punkti paigutada vektori, mis



Joon. 11. Väljatugevuse suund ühtib jõujoonte puutuja suunaga.



Joon. 12. Punktlaengu jõujooned: a) positiivse, b) negatiivse laengu puhul.

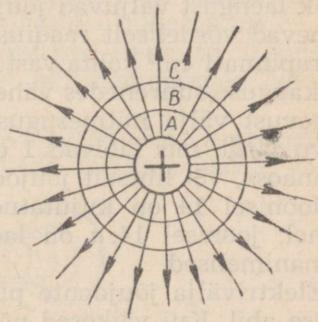
näitab elektrivälja tugevuse suurust ja suunda antud punktis. Kuid selline välja kujutamise viis oleks äärmiselt ebamugav, kuna üksteisega kokkulangevad vektorid looksid äärmiselt segase pildi.

Inglise teadlane Faraday töötas välja mugavama elektrivälja kujutamise viisi, mida praegugi laialdaselt kasutatakse mitmesugustes füüsika harudes.

Faraday tegi ettepaneku kujutada välja joonte abil, mille puutujad igas punktis ühtivad väljatugevuse suunaga samas punktis. Niisuguseid jooni nimetatakse v ä l j a j õ u j o o n t e k s.

Näiteks, kui AB on elektrivälja jõujoon (joon. 11), siis väljatugevuse suund mingis punktis C langeb ühte jõujoonele selles punktis tõmmatud puutujaga CD.

Kahest puutujaga määratud vastandsuunast on kokku lepitud valida suund, mis ühtib positiivsele laengule mõjuva jõu suunaga. See suund märgitakse joonisel noolekestega.

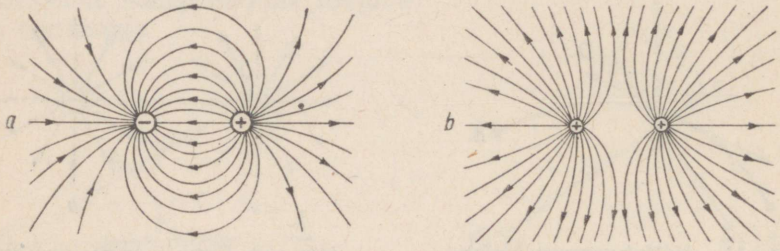


Joon. 13. Punktlaengu elektrivälja tugevus kahaneb pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga.

Kokkuleppe kohaselt jõujooned algavad positiivsetelt laengutelt ja lõpevad negatiivsetel laengutel või lõpmatuses. Joonisel 12, *a* on kujutatud jõujoonte abil positiivse punktlaengu väli, joonisel 12, *b*

aga samasuguse, kuid negatiivse punktlaengu väli. Nende väljade jõujooned on sirged.

Kuna elektriväli eksisteerib kõikides ruumi punktides, siis võib läbi iga punkti tõmmata jõujoone. Kuna aga väljatugevus mingis punktis on täiesti kindla suuruse ja suunaga, siis võib läbi selle punkti tõmmata ainult ühe jõujoone. Sellest järeldub, et *jõujooned kuskil ei lõiku*. Nad ainult koonduvad sellesse punkti, kus asub laeng.



Joon. 14. Väljapilt kahe ühesuguse isenimeliselt (*a*) ja samanimeliselt (*b*) laetud keha vahel.

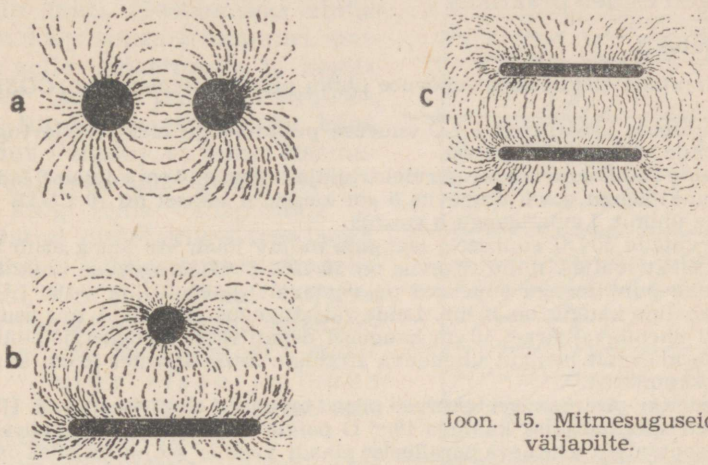
Jõujoonte paiknemise järgi väljas saab otsustada väljatugevuse suuruse üle.

Vaatleme näitena positiivse punktlaengu välja. Selle välja jõujooned on laengust väljuvad radiaalsed sirged. Kujundame ümber positiivse punktlaengu rea kerapindu. Joonisel 13 on näidatud nende pindade lõiked *A*, *B*, *C* lehe tasapinnaga. Neid pindu läbivad kõik laengust väljuvad jõujooned. Kuna aga kerade pindalad suurenevad võrdeliselt raadiuse ruuduga, siis väheneb jõujoonte arv kerapinna 1 cm^2 kohta vastavalt kauguse ruuduga. Kuid me teame, et kauguse suurenedes väheneb ka väljatugevus, mille tõttu väljatugevust välja mitmesugustes punktides võib määrata jõujoonte arvu järgi, mis läbivad 1 cm^2 suurust jõujoontega risti asetsevat pinnaosa, või lihtsalt jõujoonte tiheduse järgi.

Joonisel 14 on kujutatud väli kahe võrdse suurusega laengu vahel, joonisel 14, *a* on laengud isenimelised, joonisel 14, *b* aga samanimelised.

Elektrivälja jõujoonte pildist võib saada ettekujutuse järgmise katse abil. Kui väikesed nõelataolised kipsi-, hiniini-, asbesti- või mõne muu aine kristallikesed puistata mõnda vedelikku (petrooleumi, kastoorõlisse, vaseliini vms.) ja tekitada selles elektriväli, siis asetuvad kristallikesed, mis antud juhul etendavad proovikehade osa, elektrijõudude toimel mingisse ahelakesse. Nende ahelakeste kuju annab ettekujutuse välja jõujoontest. Joonisel 15 (*a* ja *b*) on näidatud väljade pildid, mis on saadud kipsikristallikeste abil. Mustad ringikesed ja ribakesed kujutavad isenimeliselt laetud juhte, millede ümber eksisteerib elektriväli.

10. Homogeenne väli. Kasutades § 9 kirjeldatud võtet, saame jõujoonte pildi kahe paralleelse metallplaadi vahel, millede laengud on võrdsed ja isenimelised. Joonisel 15, c on kujutatud sel-



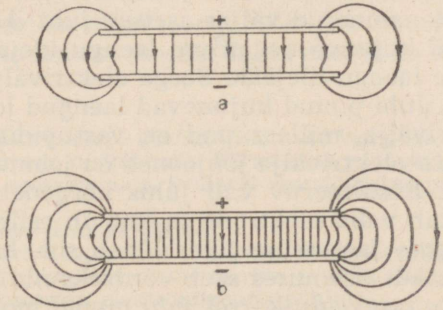
Joon. 15. Mitmesuguseid väljapilte.

line väli, mida nimetatakse homogeenseks. Näeme, et kipsikristallikesed asetuvad plaatidevahelises väljas piki paralleelseid sirgeid, mis on risti plaatide tasapinnaga. Ainult plaatide servadel pole seda paralleelsust: kipsikristallikesed asetuvad siin piki kõverjooni.

Välja, mille tugevus igas punktis on ühesuguse suuruse ja suunaga, nimetatakse homogeenseks. Homogeense välja jõujooned on paralleelsed sirged, millede tihedus on igal pool ühesugune.

Homogeensete väljade graafilised kujutused erinevad üksteisest ainult jõujoonte jaotuse tiheduse poolest, mis, nagu eespool öeldud, määrab väljatugevuse suuruse.

Joonisel 16 on kujutatud kahe erineva tugevusega homogeense välja pildid, mis on tekkinud isenimeliselt laetud plaatide vahel



Joon. 16. Erineva tugevusega homogeensete väljade pildid.

(väli on ainult plaatide vahel homogeenne, servadel mitte). Neid joonseid vaadeldes on kerge otsustada, millise välja tugevus on suurem.

Homogeenne väli on lihtsaim, kuid väga tähtis elektrivälja liik, mis sageli esineb praktikas.

Harjutus 3.

1. Kirjutada elektrivälja tugevuse ühiku nimetus (dimensioon) *CGSE*-süsteemis.
2. Kujutada graafiliselt 1 LÜ suuruse punktlaengu elektrivälja tugevuse muutumine sõltuvalt kaugusest.
3. Leida 20 LÜ suuruse laengu elektrivälja tugevus 10 cm kaugusel laengust.
4. Punktlaengu q väljatugevus 5 cm kaugusel temast on 10 *CGSE* väljatugevuse ühikut. Leida laengu q suurus.
5. Arvutada 50 LÜ suurusele laengule mõjuv jõud, kui laeng asub homogeenses elektriväljas, mille tugevus on 20 *CGSE* väljatugevuse ühikut.
6. Kahe punktlaengu suurused on vastavalt $+100$ LÜ ja -100 LÜ ning nendevaheline kaugus on 10 cm. Leida väljatugevus punktis A, mis asub neid laenguid ühendaval sirgel 10 cm kaugusel negatiivsest laengust, ja punktis B, mis asub mõlemat laengut ühendava sirglõigu keskristsirgel 10 cm kaugusel lõigu keskpunktist.
7. Vedeliku piserdamisel tekkivad piisad tavaliselt elektriseeruvad. Üks selline elektriseeritud piisk kaaluga 10^{-6} G paigutatakse kahe erinimeliselt laetud horisontaalselt paikneva paralleelse plaadi vahele; seejuures piisk on tasakaalus. Milline on piisa laeng, kui väljatugevus on 0,54 *CGSE* väljatugevuse ühikut?

11. Juhid elektriväljas. Mitmesugused kehad, nagu teada, jaotatakse oma elektriliste omaduste poolest juhtideks ja mittejuhtideks (dielektrikuteks).

Laengute tasakaalu korral juhtide pinnal puudub elektriväli juhtide sees.

Asi seisab selles, et juhtides on vabu elektrilaenguid. Näiteks metallides on nende laengute kandjaiks elektronid, mis on kaotanud sideme oma aatomitega. Neid nimetatakse v a b a d e k s e l e k t r o n i d e k s.

Kui metallist juht paigutada elektrivälja, siis asetuvad temas leiduvad vabad elektronid väljas mõjuvate jõudude toimel ümber suunas, mis on vastupidine välja suunaga.

Seda on skemaatiliselt näidatud joonisel 17, kus on kujutatud vasakult paremale suunatud väljas asetsev juht *ABCD*.

Juhi pinnal *AC* kujuneb negatiivse laengu ülejääk, juhi pinnal *BD* aga positiivse laengu ülejääk. Seega elektriväljas asetsev juht elektriseeritakse. Juhi pinnal kujunevad laengud loovad juhi sisemuses lisa-elektrivälja, mille suund on vastupidine põhi-elektrivälja suunale. Lisa-elektrivälja jõujooned on joonisel 18 kujutatud punktiirjoontega. Resulteeruv väli juhis nõrgeneb, s. t. väheneb jõud, mis mõjustab vabu elektrone ja kutsub esile nende ümberasetumise. Laengute jaotumine juhis lõpeb siis, kui resulteeruva välja tugevus metalli sisemuses saab võrdseks nulliga.

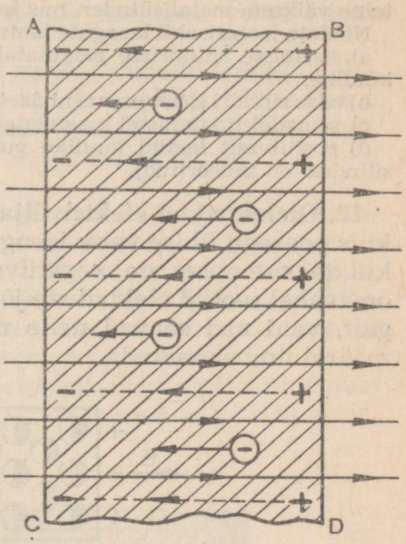
Niisiis, *laengute tasakaalu korral juhi pinnal puudub elektriväli juhi sees.*

Välja puudumist juhi sees võib kasutada kehade kaitseks elektrivälja mõju eest. Täielikuks kaitseks välise elektrivälja mõju eest piisab, kui antud keha ümbritseda kas või õhukese juhtiva kihiga, näiteks paigutada ta metallkasti.

Selle fakti tõestamiseks ehitas Faraday suure traatpuuri, paigutas selle isolaatoreile ja laadis. Asudes selle puuri sisemuses, väga tundlik elektroskoop käes, veendus Faraday, et puuri sisemuses puuduvad igasugused elektrijõud, kuigi tema välispinnale oli koondatud nimetamisväärne laeng.

Füüsika algkursuses vaadeldi nähtust, kus juhi pinnal kujunes elektrilaeng laetud keha lähendamisel temale. Seda nähtust nimetatakse elektriseerimiseks mõju abil. Nüüd andsime sellele nähtusele selgituse.

Elektriseerimisega mõju abil võib selgitada elektriseeritud ja elektriseerimata kehade vastastikust tõmbumist, samuti aga ka elektrilaengu ülekandumist nende kehade kokkupuutumisel.



Joon. 17. Välja nõrgenemine juhis.

Elektriseeritud keha lähendamisel kergele juhile, näiteks niidi otsa riputatud leedripuust kuulikesele, tekivad sellel mõlemamärgilised indutseeritud laengud. Vastasmärgiline laeng tõmbub keha poole, samanimeline aga tõukub eemale. Kuna viimane neist asub kuulikese pinna sellel poolel, mis on kehast kaugemal, siis nende jõudude resultandiks on tõmbejõud. Selle jõu mõjul tõmbub kuulike keha poole. Nende kokkupuutumisel neutraliseerib isenimelise indutseeritud laengu indutseeriva laengu selline osa, mis on eelmisega suuruselt võrdne. Kuulikesele aga jääb kehaga samanimeline laeng.

Kuna kuulikesel on nüüd laeng, mille märk on sama mis kehalgi, tõukub kuulikene temast eemale, mida näeme ka katsel.

Harjutus 4.

1. Selleks et elektroskoopi laadida positiivse laenguga, lähendatakse tema kuulikesele negatiivselt laetud pulk. Pärast seda puudutatakse kuulikest hetkeks käega, pulka eemaldamata. Seejärel eemaldatakse pulk ja elektroskoop on laetud.

Teostada see katse ja anda selgitus.

2. Laadida elektroskoop samal viisil negatiivse laenguga. Millise laenguga ja millist pulka tuleb selleks elektriseerida ja elektroskoobile lähendada?

Selgitada seda protsessi elektroniteooria põhjal.

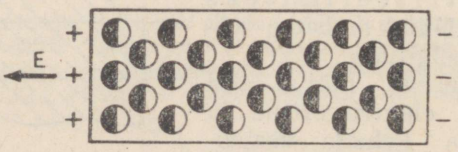
3. Elektroskoobiga on ühendatud isoleeritud metallsilinder. Milliste laengute olemasolu näitab elektroskoop järgmistel juhtudel:

a) silindrisse paigutatakse positiivselt laetud kuulike, mis ei puuduta teda;
b) laetud kuulikesega puudutatakse silindri sisepinda;
c) kuulike paigutatakse silindrisse (teda puudutamata), seejärel puudutatakse silindrit käega ja siis eemaldatakse käsi ning kuulike silindrist.

4. Isoleeritud alusele on paigutatud metallsilinder. Tema sisse asetatakse teine väiksem metallsilinder, mis isoleeritakse esimesest.

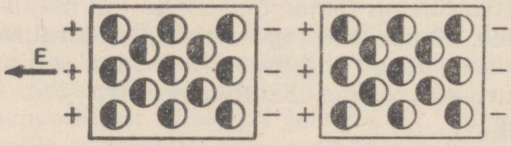
Näidata joonise abil laengute jaotumine silindrite pinnal järgmistel juhtudel:
a) sisemisse silindrisse paigutatakse teda puudutamata positiivselt laetud kuulike;
b) teise silindri sisemuses asub laetud kuulike ja väline silinder maandatakse;
c) samadel tingimustel maandatakse sisemine silinder;
d) positiivselt laetud kuulike puudutab sisemise silindri seina (mõlemad silindrid on isoleeritud).

12. Dielektrikud elektriväljas. Erinevalt juhtidest pole dielektrikuis peaaegu üldse vabu laenguid. Dielektrikute aatomite ja molekulide sisemuses on negatiivselt ja positiivselt laetud osakesed omavahel seotud elektriliste jõududega, kuid mitte absoluutselt jäigalt, vaid nad saavad neile rakendatud jõudude toimel teataval määral ümber asetuda.



Joon. 18. Dielektriku polariseerumise pilt.

Iga molekuli negatiivsed ja positiivsed laengud on võrdsed, mille tõttu iga molekul tervikuna on laenguta. Elektrivälja puudumisel asetsevad molekulid dielektrikus täiesti kaootiliselt. Igas dielektriku osas on üldine positiivne laeng võrdne negatiivse laenguga ja nende laengute resulteeruv mõju võrdne nulliga.



Joon. 19. Dielektriku poolitamisel säilivad tema otstel isenimelised laengud.

Kui dielektrik paigutada elektrivälja, hakkavad tema molekulide positiivsetele ja negatiivsetele laengutele mõjuma vastassuunalised jõud. Nende jõudude toimel nihkuvad iga molekuli laengud, kusjuures see nihe toimub välja sihis. Välja mõjul venivad molekulid pikemaks ja asetuvad suunaga piki jõujooni. Selle tulemusena asetsevad molekulid nüüd korrastatult (joon. 18). Seetõttu tekivad dielektriku pinnale laengud: ühel pool positiivne, teisel — negatiivne.

Elektrivälja paigutatud dielektriku laengute nihkumist nimetatakse polarisatsiooniks, dielektrikut ennast aga nimetatakse selles olukorras polariseerituks.

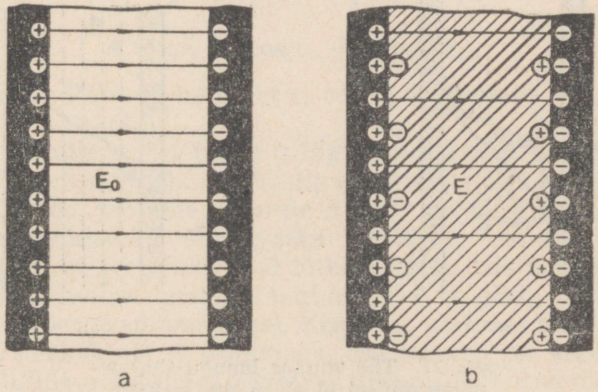
Dielektriku polarisatsioon meenutab veidi juhi elektriseerumist mõjuelektri toimel. Ometi valitseb nende nähtuste vahel sügav erinevus.

Juhtide elektriseerumist põhjustab nendes vabade laengute olemasolu. Kui jagada mõjuelektriga laetud juht elektriväljas kahte ossa, siis osutuvad mõlemad juhi osad laetuks vastasnimeliselt. Laengud jäävad juhtidele ka pärast välja eemaldamist.

Teisiti on lugu dielektrikutega.

Kui jagada dielektrik elektriväljas kahte ossa, kujunevad kummagi osa murdepinnale vastasnimelised laengud — ühele poole positiivne, teisele negatiivne (joon. 19). Polariseeritud dielektriku pinnal tekkinud laenguid nimetatakse seotud laenguiks. Asjaolu, et juhtides esinevad vabad, dielektrikuis aga seotud laengud, põhjustab elektrivälja erinevat mõju nendele.

13. Elektriline läbitavus. Aine polariseeritavuse astet iseloomustab suurus, mida nimetatakse elektriliseks läbitavuseks. Vaatleme, mis suurus see on.



Joon. 20 *a, b*. Plaatkondensaatori täitmine dielektrikuga põhjustab väljatugevuse nõrgenemist plaatide vahel.

Oletame, et homogeense välja tugevus vaakuumis kahe laetud plaadi vahel on E_0 (joon. 20). Täidame nende plaatide vahe mingi dielektrikuga. Elektrilaengud, mis tekivad dielektriku puutepinnal plaatidega tema polarisatsiooni tõttu, neutraliseerivad osa plaatidel olevate laengute mõju. Selle tagajärjel nõrgeneb plaatidevaheline väli (väli on seda tugevam, mida suurem on laeng). Katsed näitavad, et kui plaatide vahele asetada kordamööda mitmesuguseid dielektrikuid, siis väljatugevus on iga kord erineva suurusega. Seetõttu võib suhte järgi — plaatidevaheline väljatugevus ilma

dielektrikuta E_0 ja dielektrikuga E — määrata dielektriku polariseeritavust, s. o. tema elektrilist läbitavust. Seda suurust tähistatakse kreeka tähega ε (epsilon). Järelikult võib kirjutada, et

$$\varepsilon = \frac{E_0}{E}.$$

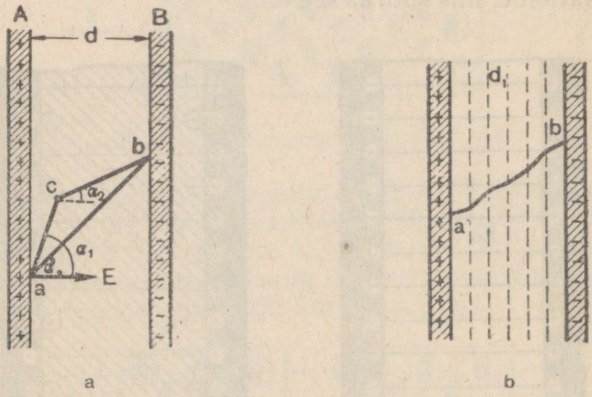
Elektriline läbitavus näitab, mitu korda on antud laengute väljatugevus dielektrikus (homogeenses) väiksem kui vaakuumis.

Elektrilise läbitavuse ühe mõõtmisviisiga me tutvume edaspidi kondensaatori käsitlemisel.

Allpool toodud tabelis on mitmesuguste ainete elektrilised läbitavused vaakuumi suhtes, kusjuures vaakuumi enda elektrilist läbitavust loetakse võrdseks ühega.

Mõnede ainete elektriliste läbitavuste tabel.

Õhk	1,0006	Klaas	4—7
Parafiin	2	Vilgukivi	4—5
Pleksiklaas (orgaaniline klaas)	3—4	Merevaik	12,8
Eboniit	4	Vesi	81
Portselan	7		



a b

Joon. 21. Töö suurus laengu ümberpaigutamisel ei sõltu tee kujust.

Praktikas loetakse õhu elektriline läbitavus võrdseks ühega.

Kui dielektrikus on kaks punktlaengut, väheneb kummagi laengu poolt tekitatav väljatugevus punktis, kus asub teine laeng, ε korda.

Tähendab, jõud, millega need laengud teineteist vastastikku mõjutavad, on samuti ε korda väiksem. Seega avaldub dielektrikuisse paigutatud laengute kohta kehtiv Coulombi seadus järgmisel kujul:

$$F = \frac{q_1 q_2}{\varepsilon r^2}.$$

14. Töö elektriväljas. Igale elektriväljas asetsevale laengule mõjub mingi jõud ja seetõttu tehakse väljas iga laengu liikumisel teatav hulk tööd. Kuidas seda tööd arvutada?

Vaatleme laengu ümberasetumist homogeenses väljas, mis on kujunenud kahe isenimeliselt laetud paralleelse plaadi A ja B vahel (joon. 21, *a*). Selles väljas on kõik jõujooned kogu oma ulatuses risti nende plaatidega, ja kui plaat A on laetud positiivselt, siis väljatugevuse E suund on plaadilt A plaadi B poole.

Oletame, et positiivne laeng q asetus ümber punktist a punkti b mööda mingit teed $ab = s$.

Kuna elektriväljas asuvale laengule mõjuv jõud

$$F = qE,$$

siis laengu ümberpaiknemisel elektriväljas tehtud töö on määratud võrdusega:

$$A = Fs \cos \alpha, \text{ ehk } A = qEs \cos \alpha.$$

Kuid $s \cos \alpha = d$, kus d on plaatidevaheline kaugus. Järelikult

$$A = qEd.$$

Liikugu nüüd laeng q punktist a punkti b mööda teed acb. Liikumisel tehtud töö võrdub teekonna üksikuil lõikudel tehtud tööde summaga: $ac = s_1$, $cb = s_2$, seega

$$A = qEs_1 \cos \alpha_1 + qEs_2 \cos \alpha_2$$

ehk

$$A = qE (s_1 \cos \alpha_1 + s_2 \cos \alpha_2).$$

Kuid jooniselt 21, *a* on näha, et $s_1 \cos \alpha_1 + s_2 \cos \alpha_2 = d$, järelikult ka sel juhul $A = qEd$.

Lõpuks kujutleme, et laeng q liigub punktist a punkti b mööda mingit kõverjoont (joon. 21, *b*). Et arvutada sellel kõverjoonelisel teel tehtud tööd, jaotame plaatide A ja B vahelise välja terve rea paralleeltasapindadega õhukesteks kihtideks, millede paksus on niivõrd väike, et tee s üksikuid lõike võib lugeda sirgeteks.

Siis on igal sellisel teelõigul tehtud töö $A_1 = qEd_1$, kus d_1 on kaugus kahe naabertasapinna vahel. Kogu tee ulatuses tehtud töö võrdub qE ja teelõikude d_1 summaga, see summa on võrdne jällegi d-ga. Järelikult on ka kõverjoonelisel liikumisel tehtud töö $A = qEd$.

Seega tõestavad meie poolt vaadeldud näited, et *töö laengute ümberasetumisel elektrivälja ühest punktist teise ei sõltu liikumise teest, vaid ainult nende punktide vahelisest kaugusest, mõõdetuna piki välja suunda.*

Me teame, et raskusjõu poolt tehtav töö keha liikumisel mööda kaldpinda, mille pikkus on l, võrdub keha langemisel kõrguselt h tehtava tööga, kusjuures h võrdub kaldpinna kõrgusega. Seega raskusjõu töö, või teisiti öeldud, keha raskusväljas ümberasetumisel tehtav töö samuti ei sõltu tee kujust, vaid ainult tee alg- ja lõpp-punkti kõrguste vahest.

Võib tõestada, et see äärmiselt tähtis omadus on mitte ainult homogeensel, vaid ka igasugusel elektriväljal. Sama omadus on raskusjõu väljal.

15. Potentsiaal ja potentsiaalide vahe. Olgu meil mingi positiivselt laetud keha. Selle keha ümber on elektriväli. Paigutame selles väljas ümber mingi positiivse laengu; selle juures tehakse teatud hulk tööd A. Selle töö suurus on võrdeline ümberpaigutatava laengu suurusega ja sõltub sellest, millisesse välja punkti laeng üle kanti. Kui võtta tehtud töö A ja ümberpaigutatava laengu q suuruste suhe, siis suhte $\frac{A}{q}$ suurus ei olene ümberpaigutatava laengu suurusest, vaid ainult laengu ümberpaigutamise algus- ja lõpp-punkti valikust selles väljas, kusjuures, nagu teada, tee kujul ei ole mingit tähtsust.

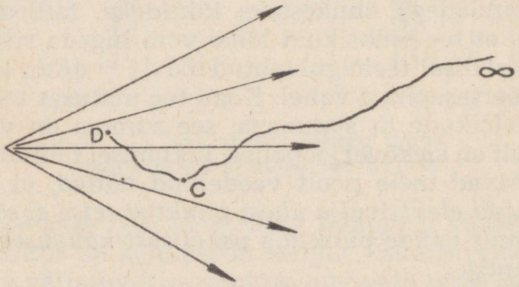
Lepime kokku, et laeng tuuakse elektriväljasse tema lõpmata kaugest punktist, s. t. sellisest ruumi punktist, kus väljatugevus võrdub nulliga. Elektrivälja jõudude ületamiseks sooritatava töö ja ümberpaigutatava laengu suuruse suhe sõltub sellise ümberpaigutamise alguspunkti valiku puhul ainult selle lõpp-punkti asukohast ja on seetõttu kasutatav välja selle punkti iseloomustamiseks.

Suurust, mida mõõdetakse positiivse laengu ümberpaigutamisel lõpmatusest välja antud punkti tehtava töö ja ümberpaigutatava laengu suuruse suhtega, nimetatakse välja potentsiaaliks antud punktis.

Potentsiaali suurust tähistatakse tähega φ.

$$\varphi = \frac{A}{q}. \tag{1}$$

Potentsiaal kujutab endast skalaarset suurust. Positiivselt laetud keha elektrivälja punktide potentsiaalid on positiivsed, negatiivselt laetud keha elektrivälja potentsiaalid aga negatiivsed.



Joon. 22. Potentsiaalide vahe mõiste selgitamiseks.

Tõestame, et positiivse laengu ümberpaigutamisel tehtud töö ja ümberpaigutatava laengu suuruse suhe võrdub ümberpaigutamise algus- ja lõpp-punkti potentsiaalide vahega. Et seda tõestada, valime elektriväljas kaks mingisugust punkti, näiteks punktid C ja D (joon. 22). Olgu punkti D potentsiaal φ_D ja punkti C potent-

siaal φ_C. Toome positiivse laengu q lõpmatusest punkti D nii, et tee läbiks punkti C. Sellel ümberpaigutamisel tehtud töö A ja laengu q suuruse suhe on vastavalt definitsioonile võrdne välja potentsiaaliga punktis D. Kuid laengu ümberpaigutamisel lõpmatusest punkti D tehtud tööd võib vaadelda tööde summana: töö, mis tehti vahemikus lõpmatusest kuni punktini C, ja töö vahemikus punktist C kuni punktini D.

Vahemikus lõpmata kaugest punktist kuni punktini C tehtud töö ja ümberpaigutatava laengu q suuruse suhe võrdub välja potentsiaaliga punktis C. Järelikult võib kirjutada

$$A_{\infty D} = A_{\infty C} + A_{CD} \text{ ja } \frac{A_{\infty D}}{q} = \frac{A_{\infty C}}{q} + \frac{A_{CD}}{q} \text{ või } \varphi_D = \varphi_C + \frac{A_{CD}}{q},$$

$$\text{millest } \varphi_D - \varphi_C = \frac{A_{CD}}{q}. \qquad (2)$$

Välja kahe punkti potentsiaalide vahet nimetatakse välja p i n g e k s nende punktide vahel.

Kui pinge tähistada tähega U, siis võrduse (2) võib kirjutada järgmisel kujul: $\varphi_D - \varphi_C = U$.

Meie poolt antud potentsiaali mõiste definitsiooni kohaselt võrdub lõpmata kauge punkti potentsiaal ilmselt nulliga. Sel juhul kõneldakse, et potentsiaali nullpunktiks on võetud lõpmata kauge punkt.

Elektrivälja antud punkti potentsiaali suurusel on ainult suhteline tähendus, kuna potentsiaali nullpunktiks võib võtta välja mistahes punkti, tema valik on täiesti kokkuleppeline.

Kui valida välja mingi teine punkt potentsiaali nullpunktiks, siis kõikide punktide potentsiaalide väärtused muutuvad ühe ja sellesama suuruse võrra ning seetõttu välja mistahes kahe punkti potentsiaalide vahe jääb muutumatuks. Järelikult ei sõltu välja kahe punkti potentsiaalide vahe väärtus potentsiaali nullpunkti valikust ja on absoluutse suurusega.

Teoreetilistes töödes võetakse potentsiaali nullpunktiks harilikult lõpmata kauge punkt. Praktilises elektrotehnikas võetakse aga potentsiaali nullpunktiks Maa pinna mistahes punkt.

Edaspidi hakkame määrama elektrivälja potentsiaale Maa pinna suhtes. Vastavalt sellele anname elektrivälja potentsiaali definitsiooni järgmiselt.

Elektrivälja potentsiaaliks antud punktis nimetatakse suurust, mida mõõdetakse positiivse laengu ümberpaigutamisel Maa pinnalt välja antud punkti tehtava töö ja laengu suuruse suhtega.

Nii nagu väljatugevus on välja jõu-karakteristikaks ja võimaldab määrata elektriväljas asuvatele laengutele mõjuvate jõudude suurust, on potentsiaal välja energeetiliseks karakteristikaks ja potentsiaali väärtuste tundmine välja mitmesugustes punktides võimaldab määrata töö suurust, mis tehakse laengu ümberpaigutamisel välja ühest punktist teise, järgmiste valemite abil:

$$A = qU \text{ või } A = q(\varphi_1 - \varphi_2),$$

kus q — ümberpaigutatava laengu suurus,

U — pinge välja punktide vahel ja

φ_1 ja φ_2 — ümberpaigutamise algus- ja lõpp-punkti potentsiaalid.

Potentsiaali mõiste on kasutatav kõikide väljade puhul, milledel on omadus, et ümberpaigutamisel tehtav töö neis ei sõltu tee kujust. Nii näiteks võib ka raskusjõu välja punkte iseloomustada potentsiaali suurusega nendes. Kõiki välju, kus ümberpaigutamisel tehtav töö ei sõltu tee kujust, nimetatakse potentsiaalseteks väljadeks.

16. Potentsiaali- ja potentsiaalide vahe ühikud. Potentsiaali- ja potentsiaalide vahe ühikud defineeritakse lähtudes neid suurusi määravaist valemeist.

Kui valemis $\varphi = \frac{A}{q}$ võtta $A = 1$ tööühik ja $q = 1$ laenguühik, siis φ võrdub 1 potentsiaaliühikuga. See tähendab, et potentsiaaliühikuks võetakse välja niisuguse punkti potentsiaal, millesse positiivse ühiklaengu toomine Maa pinnalt nõuab tööd ühe ühiku suuruses.

Samuti kui valemis $\varphi_1 - \varphi_2 = \frac{A}{q}$ võtta A võrdseks tööühikuga ja q laenguühikuga, siis $\varphi_1 - \varphi_2$ võrdub potentsiaalide vahe ühikuga. Järelikult, potentsiaalide vahe ühikuks võetakse välja kahe niisuguse punkti potentsiaalide vahe, millede suhtes ühiklaengu ümberpaigutamine ühest punktist teise nõuab tööd ühe ühiku suuruses.

Potentsiaali ja potentsiaalide vahe mõõtmiseks kasutatakse ühesuguseid ühikuid.

CGSE-süsteemis on tööühikuks 1 erg ja laenguühikuks 1 LÜ (elektrihulga elektrostaatiline laenguühik). Seega saame potentsiaali- ja potentsiaalide vahe ühikuks antud süsteemis 1 $\frac{erg}{LÜ}$. Seda ühikut nimetatakse absoluutseks elektrostaatiliseks potentsiaali- või potentsiaalide vahe ühikuks (lühemalt 1 PÜ).

SI-süsteemis on tööühikuks 1 džaul, laenguühikuks 1 kulon. Potentsiaalide vahe ühikuks selles süsteemis on

$$1 \frac{\text{džaul}}{\text{kulon}}.$$

Seda ühikut nimetatakse voldiks (lühendatult V).

Kuna 1 džaul $= 10^7$ ergi, 1 kulon $= 3 \cdot 10^9$ LÜ, siis

$$1 \text{ volt} = \frac{10^7 \text{ erg}}{3 \cdot 10^9 \text{ LÜ}} = \frac{1}{300} \text{ PÜ},$$

või teisiti öeldes, 1 PÜ on 300 korda suurem kui 1 volt või 1 PÜ = 300 volti.

17. Potentsiaalide vahe seos väljatugevusega. Vaatleme uuesti homogeenset elektrivälja. Väljatugevus E on selle välja kõigis punktides ühesugune, see aga tähendab, et ühiklaengule mõjuv jõud F on kogu väljas ühesugune ja võrdub arvuliselt E-ga. Selles väljas laengule q mõjuv jõud võrdub siis $F = qE$.

Kui kaugus välja mingi kahe punkti vahel on d, siis laengu ümberpaigutamisel ühest punktist teise tehakse tööd:

$$A = Fd = qEd = q\,(\varphi_1 - \varphi_2),$$

kus $\varphi_1 - \varphi_2$ on välja nende punktide potentsiaalide vahe.

Siit:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}, \qquad (1)$$

s. t. homogeense elektrivälja tugevus võrdub arvuliselt potentsiaalide vahega piki välja jõujoont võetud pikkusühiku kohta.

Väikeste kauguste d puhul on seos (1) kasutatav ka igasuguse mittehomogeense välja puhul, kuna välja kahe teineteisele ligidal asetseva punkti vahel võib vaadelda homogeensena.

18. Laengute tasakaalu tingimus juhtides. Nägime, et laengute tasakaalu korral juhi pinnal puudub väli juhi sees, see aga tähendab, et väljatugevus juhi sees võrdub nulliga.

Kuid väljatugevus E on seotud potentsiaalide vahega ja see seos, nagu eelmises paragrahvis selgus, on väljendatav võrdusega:

$$E = \frac{\varphi_1 - \varphi_2}{d}.$$

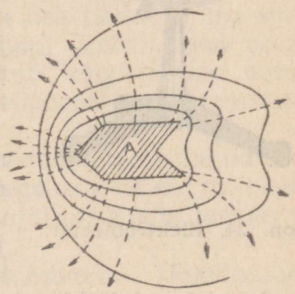
Kui $E = 0$, siis ka $\varphi_1 - \varphi_2 = 0$, ja seega *laengute tasakaalu korral juhis on juhi mistahes kahe punkti potentsiaalide vahe võrdne nulliga,* või teisiti öeldes, *potentsiaal juhi kõigis punktides, nii pinnal kui ka sisemuses, on ühe ja sama suurusega.*

Pinda, mille kõikide punktide potentsiaalid on ühesuurused, nimetatakse ekvipotentsiaalpinnaks.

Järelikult on juhi pind laengute tasakaalu korral ekvipotentsiaalpinnaks.

Ekvipotentsiaalpinna definitsioonist järeldub, et laengu ümberpaigutamisel mööda seda pinda elektrijõud tööd ei tee.

Kuid see võib esineda ainult siis, kui laengu ümberasetumise suund on kogu aeg risti mõjuva jõuga. See aga tähendab, et jõujooned on risti ekvipotentsiaalpindadega (joon. 23).



Joon. 23. Laetud keha A jõujooned ja ekvipotentsiaalpinnad.

Harjutus 5.

1. Avaldada potentsiaalide vahe ühik *CGSE*-süsteemi põhiühikute kaudu.
2. Arvutada töö, mis tehakse elektrijõudude poolt 100 LÜ suuruse laengu

ümberpaigutamisel välja kahe punkti vahel, mille potentsiaalide vahe on 1200 V.

3. Määrata välja kahe punkti potentsiaalide vahe, kui 200 LÜ suuruse laengu ümberpaigutamisel ühest punktist teise tehakse tööd 20 ergi.

4. Määrata laengu suurus, kui selle laengu ümberpaigutamisel välja ühest punktist teise, millede potentsiaalide vahe on 300 V, tehti tööd 500 ergi.

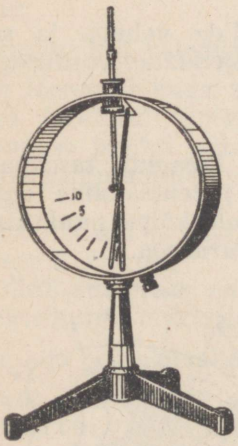
5. Laengu ümberpaigutamisel elektriväljas tehakse tööd 1 J. Määrata laengu suurus, kui ta ümberasetumine toimus potentsiaalide vahe juures 3000 V.

6. Elektrihulga, suurusega 1 kulon, ümberpaigutamisel kahe punkti vahel tehti tööd 1 kGm. Määrata nende punktide potentsiaalide vahe.

7. Kahe horisontaalse paralleelse laetud plaadi vahel asetseb tasakaaluseisundis piisk, mis kaalub $3 \cdot 10^{-12}$ G. Tilga laeng on $9{,}6 \cdot 10^{-10}$ LÜ. Määrata plaatide potentsiaalide vahe, kui plaatidevaheline kaugus on 15 mm.

8. Aatomifüüsikas väljendatakse energiat elektronvoltides. Elektronvolt võrdub energiaga, mille saab elektron, läbides elektriväljas tee, mille alg- ja lõpp-punkti potentsiaalide vahe on 1 V. Avaldada elektronvolt ergides. Milline kiirus on elektronil, kui ta energia on 1 elektronvolt? Elektroni mass $m = 9{,}1 \cdot 10^{-28}$ g.

19. Elektromeeter. Potentsiaalide vahet mõõdetakse elektromeetriga. Elektromeeter kujutab endast tavalist lehekeste või liikuva osutiga elektroskoopi (joon. 24), mille kere on tingimata metallist. Mõõtmiste ajal ühendatakse elektromeetri kere maaga. Seda tehakse selleks, et kaitsta elektromeetrit väliste elektriväljade mõju eest.



Joon. 24. Elektromeeter.

Kui elektromeetri varrast puudutada mingi laetud kehaga, läheb osa keha laengust üle vardale ja osuti kaldub vardast mingi nurga võrra eemale. Millest sõltub selle nurga suurus?

Varda laadimisel tekib elektromeetri sisemuses elektriväli. Elektromeetri kere ja varras koos osutiga kujutavad kaht erinevat ekvipotentsiaalpinda, milledel on teatav potentsiaalide vahe.

Elektromeetri osuti kõrvaldekaldumise nurk on seda suurem, mida suurema jõuga mõjutab teda väli, s. t. mida suurem on väljatugevus elektromeetri sees. Kuid väljatugevus on võrdeline kere ja osuti potentsiaalide vahega. Järelikult võib osuti vardast kõrvalekaldumise nurga suuruse järgi mõõta elektromeetri kere ja varda potentsiaalide vahet.

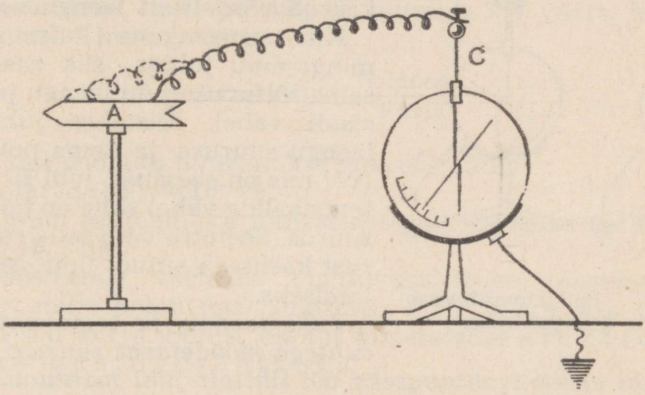
Kui enne elektromeetri kasutamist märkida tema skaalale potentsiaalide vahed, millele vastab osuti kõrvalekaldumine, s. t. elektromeeter gradueerida voltides, siis saab osuti kõrvalekaldumise järgi määrata kohe mõõdetavat potentsiaalide vahet voltides.

Seega *elektromeetriga mõõdame alati osuti ja kere potentsiaalide vahet.*

Mingi laetud juhi ja maa potentsiaalide vahe mõõtmiseks toimi-

takse järgmiselt: juht ühendatakse elektromeetri vardaga, elektromeetri kere aga maaga. Seejuures saab varda ja osuti potentsiaal praktiliselt võrdseks uuritava juhi potentsiaal'ga, kere potentsiaal aga maa potentsiaaliga. Varda ja kesta potentsiaalide vahe võrdub uuritava juhi ja maa potentsiaalide vahega.

Ühendame laetud juhi *A* (joon. 25) traadi abil elektromeetri vardaga ja liigutame traati mööda juhi pinda. Jälgides elektromeetrit,



Joon. 25. Katse, mis näitab, et juhi pind on ekvipotentsiaalpinnaks.

märkame, et selle näit ei muutu, nagu oligi oodata, kuna juhi pind on ekvipotentsiaalpind.

Lõpuks vaatleme, milles seisab erinevus elektromeetri ja elektroskoobi vahel.

Elektroskoobil pole metallkeret. Selle osa täidavad toa seinad, lagi ja mitmesugused muud elektroskoopi ümbritsevad esemed. Tema lehekeste laialimineku nurk sõltub kõigi nende esemete juhuslikust asetusest. Seetõttu ei kõlba elektroskoop potentsiaalide vahe täpse suuruse määramiseks.

Kuna elektromeetri varda ja kere potentsiaalide vahe on seotud riista vardale ülekantava laengu suurusega, siis võime nii elektromeetri kui ka elektroskoobi näitude põhjal otsustada laengu suuruse üle.

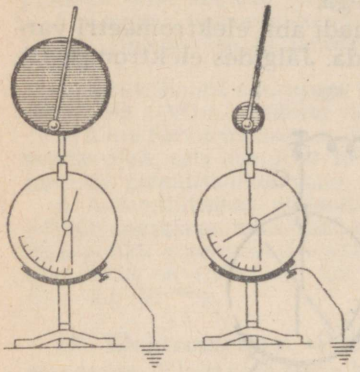
20. Elektrimahtuvus. Mõistega «kondensaator», «kondensaatori mahtuvus», «farad», «mikrofarad» jne. tuleb kokku puutuda igaühel, kellel on tegemist raadioga. Et neid mõisteid teadlikult ja edukalt kasutada, tuleb ennekõike selgesti aru saada, mis on elektrimahtuvus.

Selle mõiste selgitamiseks teostame katse. Asetame elektromeetri vardale õõnsa metallkera, mille ülaosas on avaus. Elektromeetri kere maandame.

Seni kui kera pole laetud ja kõik teda ümbritsevad esemed on maandatud, ei kaldu elektromeetri osuti kõrvale, mis näitab, et

kera ja maa potentsiaalide vahe võrdub nulliga, või teisiti öeldes, kera potentsiaal maa suhtes on võrdne nulliga.

Puudutades laetud proovikuulikesega korduvalt kera sisepinda (joon. 26), anname sellele iga kord üle laengu q. Paneme tähele, et vastavalt laengu suurenemisele kera pinnal kasvab tema potentsiaal maa suhtes. Seejuures laengute q, $2q$, $3q$ jne. puhul on kera potentsiaali väärtus φ, 2φ, 3φ jne., s. t. potentsiaal kasvab võrdeliselt laengu suurusega.



Joon. 26. Elektrimahtuvuse mõiste selgitamiseks.

Kui samasugune katse teostada mingi muu juhiga, siis saame jälle sama sõltuvuse juhi laengu ja potentsiaali vahel. Mistahes juhil oleva laengu suuruse ja tema potentsiaali (või mis on seesama, juhi ja maa potentsiaalide vahe) suhe on konstantne suurus. Seetõttu võib selle suhte suurust kasutada antud juhi iseloomustamiseks.

Juhi laengu ja tema potentsiaali suhtega mõõdetavat suurust nimetatakse juhi elektrimahtuvuseks või lihtsalt juhi mahtuvuseks.

Tähistades seda tähega C, võib kirjutada:

$$C = \frac{q}{\varphi}.$$

Kui anda võrdne laeng erinevatele juhtidele, mis asuvad ühesugustes tingimustes, siis nende potentsiaal maa suhtes on erineva suurusega. Näiteks, kui anda võrdsed laengud kahele erineva raadiusega isoleeritud metallkerale ja mõõta elektromeetriga nende potentsiaale, siis selgub, et väiksema raadiusega kera potentsiaal on suurema raadiusega kera potentsiaalist suurem (joon. 26). Järelikult sõltub juhi mahtuvus tema mõõtmeist.

XVII—XVIII sajanditel kujutleti elektrit kui mingisugust kaalutut elektrivedelikku, mis võib voolata juhisse või temast välja. Sellest selgub juhi «elektrimahtuvuse» sõna tekkimine.

Juhi mahtuvusele avaldavad olulist mõju teda ümbritsevad kehad.

Kui laetud kera ümbritseda peopesadega, kera puudutamata, siis näitab keraga ühendatud elektromeeter potentsiaali vähenemist. Niisugune potentsiaali vähenemine, kusjuures kera laeng jääb muutumatuks, näitab kera elektrimahtuvuse suurenemist. See kehtib iga juhi kohta.

Juhi elektrimahtuvus mingisuguste teiste kehade suhtes sõltub tema paigutusest nende kehade suhtes. Juhi ümberpaigutamisel nende kehade keskel muutub tema mahtuvus. Kui ümbritsevad

kehad viia juhist küllalt kaugele, siis ei avalda nad praktiliselt enam mõju juhi mahtuvusele. Sellise «eraldatud» juhi mahtuvus sõltub ainult tema kujust ja mõõtmeist. Mahtuvus ei sõltu juhi materjalist.

21. Elektrimahtuvuse ühikud. Selleks et saada elektrimahtuvuse ühikut, tuleb seoses $C = \frac{q}{\varphi}$ võtta $q = 1$ laenguühik, $\varphi = 1$ potentsiaaliühik; siis $C = 1$ mahtuvusühik.

Mahtuvusühikuks on *SI*-süsteemis võetud 1 farad (F). See on juhi mahtuvus, mille potentsiaal muutub 1 V võrra, kui tema laeng muutub 1 kuloni võrra.

$$1 \text{ farad (F)} = \frac{1 \text{ kulon}}{1 \text{ volt}}.$$

Faradi miljondikku nimetatakse mikrofaradiks.

1 mikrofarad (μF) $= 10^{-6}$ F.

Mikrofaradi miljondikku nimetatakse pikofaradiks (pF).

1 pF $= 10^{-6}$ μF.

CGSE-süsteemis võetakse mahtuvusühikuks niisuguse juhi mahtuvus, mille potentsiaal suureneb 1 PÜ võrra, kui ta laeng muutub 1 LÜ võrra. Sellist ühikut nimetatakse elektrostaatiliseks mahtuvusühikuks.

$$1 \text{ } CGSE\text{-süsteemi mahtuvusühik} = \frac{1 \text{ LÜ}}{1 \text{ PÜ}}.$$

Pannes ülaltoodud võrduse paremasse poolde elektrihulga ja potentsiaaliühiku dimensioonid *CGSE*-süsteemis, saame elektrostaatilise mahtuvusühiku dimensiooni.

Teostades näidatud tehte (mida soovitame teha õpilastel endil), näeme, et mahtuvusühiku dimensiooniks *CGSE*-süsteemis on sentimeeter. Tähendab, *CGSE*-süsteemis mõõdetakse mahtuvust sentimeetrites.

Vaatleme, milline mõte on mahtuvuse suuruse hindamisel sentimeetrites. Võib tõestada, et eraldatud laetud kera potentsiaal vaakuumis on arvutatav valemiga:

$$\varphi = \frac{q}{r}.$$

Pannes selle potentsiaali väärtuse kera mahtuvuse avaldisse

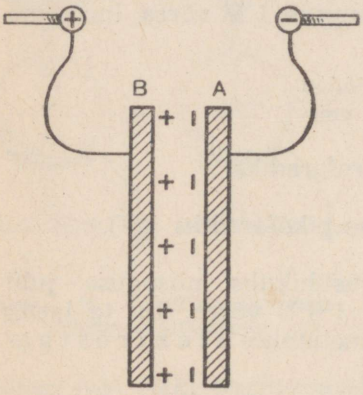
$$C = \frac{q}{\varphi}, \text{ saame, et } C = r.$$

Järelikult võrdub kerakujulise juhi mahtuvus vaakuumis tema raadiusega, mõõdetuna sentimeetreis. Seega, kõneldes, et antud juhi mahtuvus võrdub nii ja nii mitme sentimeetriga, tähendab, et antud juhil on niisama suur mahtuvus kui kerakujulisel eraldatud juhil, mille raadiuse pikkus väljendub sama sentimeetrite arvuga.

$1\ F = \frac{3 \cdot 10^9 \cdot LÜ}{\frac{1}{300}\ PÜ} = 9 \cdot 10^{11}$ *CGSE*-süsteemi mahtuvusühikut või $F = 9 \cdot 10^{11}$ cm; $1\ \mu F = 9 \cdot 10^5$ cm; $1\ pF = 0{,}9$ cm.

22. Kondensaator. Nagu nägime, võib juhi mahtuvust suurendada, lähendades talle teist juhti, mis on maandatud.

Kaks teineteisest isoleeritud ja teineteise lähedale asetatud juhti moodustavad kondensaatori.



Joon. 27. Kondensaatori laadimine.

Kondensaatorit moodustavad juhid laetakse suuruselt võrdsete, kuid isenimeliste laengutega.

Laialdaselt kasutatakse praktikas plaatkondensaatorit, mis koosneb kahest paralleelsest tasapinnalisest dielektrikukihiga eraldatud metallplaadist. Plaatidevaheline kaugus on väike, võrreldes plaatide mõõtmetega. Kondensaatori plaate nimetatakse sageli ka kondensaatori kateteks.

Selleks et plaate laadida võrdsete isenimeliste laengutega, võib nad ühendada elektrimasina poolustega (joon. 27). Seejuures läheb ühele plaadile *A* negatiivne laeng, s. o. talle lisandub mingi arv üleliigseid elektrone, teisele plaadile *B* ilmub niisama suur positiivne laeng, s. t. temast eemaldatakse vastav arv elektrone.

Ühe plaatidest võib ühendada masina poolusega ja teise maandada; seejuures tekib teisel plaadil induktsiooni tõttu suuruselt võrdne ja isenimeline laeng. Kui plaat *A* laadida positiivselt (joon. 28, *a*), siis plaat *B* laetakse induktsiooni tõttu negatiivselt. Plaadi *B* positiivne laeng aga neutraliseerub maapinnast juurde voolanud elektronide mõjul, kuna maa on praktiliselt elektronide ammendamatuks allikaks. Plaadi *B* negatiivne laeng, tõmbudes plaadi *A* positiivse laengu poole, paikneb plaadi *A* pool asuvale siseküljele.

Juhul kui plaat *A* on laetud negatiivselt (joon. 28, *b*), tõukuvad elektronid plaadi *B* pinnalt ja lähevad maasse, ning plaadile *B* jääb positiivne laeng.

Mõlemal juhul koonduvad laengud ainult plaatide *A* ja *B* teineteise poole pööratud külgedele.

Laengute puudumine plaatide välisküljel võimaldab kondensaatorile täielikult üle anda laenguid üksteisele järgnevate võrdsete annustena plaatide väliskülgede kaudu. Seda me kasutame oma järgnevates katsetes.

Kondensaatori laeng määratakse ühe tema plaadi laengu järgi. Ühendame kondensaatori ühe plaadi elektromeetri vardaga, teise

plaadi ja elektromeetri kere aga maandame. Proovikuulikese abil anname kondensaatorile üle laengu id üksteisele järgnevate võrdsete annustena. Näeme, et laengu suurenemisel 2, 3, 4 jne. korda suureneb ka kondensaatori plaatide potentsiaalide vahe 2, 3, 4 jne. korda.

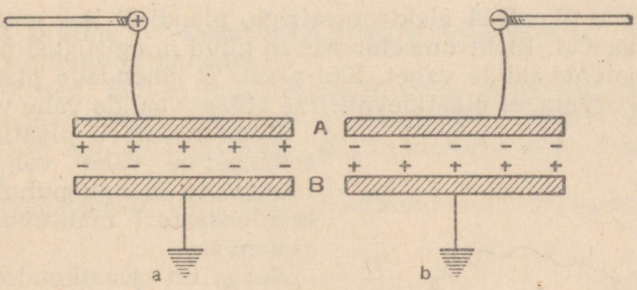
Kondensaatori laengu ja tema plaatide (katete) potentsiaalide vahe suhtega mõõdetav suurus on antud kondensaatori puhul konstantne suurus, mida nimetatakse kondensaatori mahtuvuseks.

Tähistades kondensaatori mahtuvuse tähega C, võib kirjutada

$$C = \frac{q}{U}.$$

Kondensaatori elektriväli on praktiliselt koondunud kondensaatori sisemusse plaatide vahele, seetõttu kondensaatorit ümbritsevad kehad ei mõjuta tema mahtuvust.

Paragrahvis 20 anti elektrimahtuvuse mõiste «eraldatud» juhi kohta. Praktiliselt on meil alati tegemist juhtide süsteemiga, s. t. kondensaatoriga. Tõepoolest, elektromeetri vardale asetatud kera (joon. 26), mida me kasutasime § 20 kirjeldatud katsete juures,



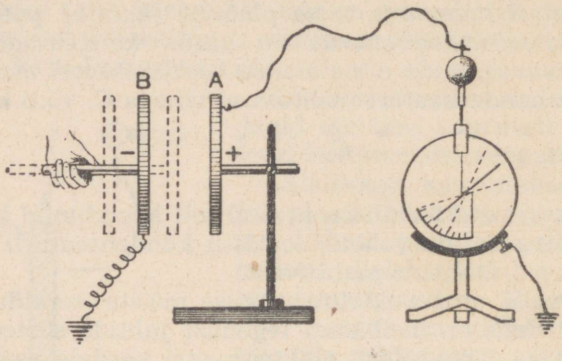
Joon. 28. Kondensaatori laadimisel üks plaatidest maandatakse.

kujutab endast koos elektromeetri varda ja osutiga üht kondensaatori katetest. Selle kondensaatori teiseks katteks on elektromeetri maandatud kere.

Elektromeeter ise on ka kondensaator, mille üheks katteks on varras koos osutiga ja teiseks kere, kusjuures elektromeetri mahtuvus on konstantne (osuti liikumine muudab vähe elektromeetri mahtuvust).

Muidugi võib ka elektroskoopi vaadelda kondensaatorina, kuid erinevalt elektromeetrist on tema teiseks katteks elektroskoopi ümbritsevad kehad. Kuna nende kehade asend võib muutuda, siis ei ole elektroskoobi mahtuvus konstantne suurus. Ühe ja sellesama laengu juures näitab elektroskoop erinevates tingimustes erinevat potentsiaalide vahe suurust.

23. Plaatkondensaatori elektrimahtuvuse sõltuvus tema mõõtmeist ja dielektrikute liigist. Joonisel 29-*a* on kujutatud kahest metallplaadist *A* ja *B* koosnev plaatkondensaator, mis on kinnitatud isolaatoreile.



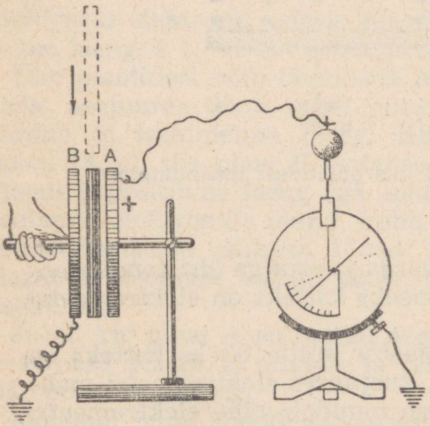
Joon. 29-*a*. Kondensaatori mahtuvus suureneb plaatidevahelise kauguse vähendamisega.

Ühendame plaadi *A* elektromeetriga, plaadi *B* aga maandame. Laeme plaadi *A*. Elektromeeter näitab nüüd mingisugust plaatidevahelist potentsiaalide vahet. Kui plaati *B* lähendada plaadile *A*, siis võib märgata, et plaatidevaheline potentsiaalide vahe väheneb.

Kondensaatori plaatide potentsiaalide vahe vähenemine muutmatu laengu puhul näitab kondensaatori mahtuvuse suurenemist.

Seega on plaatkondensaatori mahtuvus seda suurem, mida väiksem on kaugus plaatide vahel või mida õhem on plaatidevaheline dielektrikukiht (meie katsel õhukiht).

Liigutades plaati *B* plaadi *A* suhtes üles- ja allapoole, muudame kohakutiolevate plaatide pindala suurust. Jälgides seejuures elektromeetri näitusid, võib teha kindlaks, et mida suurem on kondensaatori kohakutiolevate plaatide pindala, seda suurem on ta mahtuvus. Mida suurem on kondensaatori plaatide pindala, seda suurema laengu võib neile koondada antud potentsiaalide vahe juures.



Joon. 29-*b*. Kondensaatori plaatide vahel asuv dielektrik suurendab tema mahtuvust.

Teostame veel ühe katse. Paigutame kondensaatori plaadid A ja B teatavale kaugusele teineteisest ja laeme plaadi A (joon. 29-b). Märgime potentsiaalide vahe suuruse juhul, kui plaatide vahel on õhk. Nüüd asetame plaatide vahele klaasplaadi või mõne muu dielektriku. Näeme, et plaatidevaheline potentsiaalide vahe väheneb. Selleks et tõsta potentsiaalide vahet endise suuruseni, tuleb plaadile A anda täiendav laeng. Järelikult plaatidevahelise õhukihi asendamine mõne muu dielektrikuga suurendab kondensaatori mahtuvust.

Selle nähtuse põhjus saab selgeks, kui tuletada meelde, et dielektriku polariseerumise tõttu on elektrivälja tugevus temas ε korda väiksem kui vaakuumis. Vastavalt väheneb ka katete potentsiaalide vahe ja suureneb kondensaatori mahtuvus ε korda.

Olgu C_0 kondensaatori mahtuvus juhul, kui ta katete vahel on vaakuum või õhk, aga C sama kondensaatori mahtuvus mingi (tahke või vedela) dielektrikuga.

Jagades C suurusega C_0, leiame dielektriku elektrilise läbitavuse ε:

$$\varepsilon = \frac{C}{C_0}.$$

Mida suurem on dielektriku elektriline läbitavus, seda suurem on kondensaatori mahtuvus.

Arvutused, mis ei kuulu meie kursuse piiridesse, näitavad, et plaatkondensaatori mahtuvus on võrdeline plaatide pindalaga ja elektrilise läbitavusega ning pöördvõrdeline dielektrikukihi paksusega.

Matemaatiliselt väljendub plaatkondensaatori mahtuvus valemiga:

$$C = \frac{\varepsilon S}{4\pi d}.$$

Selles valemis on S ühe plaadi pindala cm^2-tes; d on plaatidevaheline kaugus (dielektrikukihi paksus) cm-tes; ε on dielektriku elektriline läbitavus; $\pi = 3{,}14$.

Pole raske näha, et selle valemi abil arvutatuna avaldub mahtuvuse suurus sentimeetrites.

Vähendades plaatidevahelise dielektrikukihi paksust, võib saada suure mahtuvusega kondensaatori. Kuid dielektrikukihi paksust ei saa piiramatult vähendada. Dielektrikukihi paksuse vähendamisega muutmatu potentsiaalide vahe puhul kondensaatori plaatidel kondensaatori väljatugevus kasvab, mis teatava suuruse juures kutsub esile dielektriku läbilöögi.

Näiteks õhus tekib läbilöök väljatugevusel umbes $30\,000 \frac{V}{cm}$. Seetõttu märgitakse igale kondensaatorile peale tema mahtuvuse ka pinge ülemmäär, millist võib kondensaatorile rakendada.

Harjutus 6.

1. Kaks metallkera, milledest ühe raadius on suurem kui teisel, laetakse ühesuguste laengutega. Kas lähevad laengud ühelt keralt teisele, kui kerad ühendada juhiga?

2. Kaht metallkera, milledest ühe raadius on suurem kui teisel, laeti, kuni nende potentsiaalid maa suhtes said võrdseks. Kas laengud keradel on võrdsed? Kas lähevad laengud ühelt keralt teisele, kui nad juhtmega ühendada?

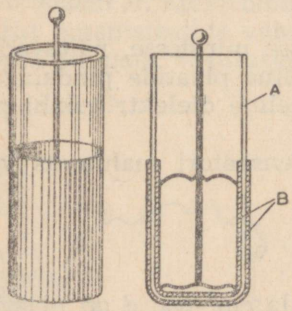
3. Kaks elektriseeritud kera, milledest ühe raadius on r_1 ja teise raadius r_2, ühendati väga peene traadiga. Tõestage, et pärast laengute ümberjaotumist on nende tihedus keradel pöördvõrdeline kerade raadiustega.

4. Kera diameetriga 40 cm laetakse potentsiaalini 1000 V ja ühendatakse siis juhtme abil leideni purgi sisekattega, mille väliskate on maandatud. Pärast seda on kera potentsiaal 100 V. Leida leideni purgi mahtuvus.

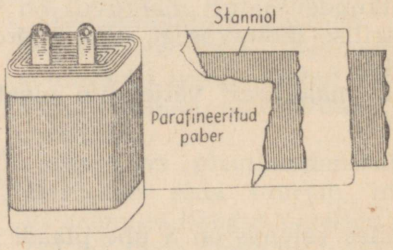
5. Elektromeetri mahtuvust saab määrata järgmisel viisil. Elektromeeter laetakse maa suhtes mingi potentsiaalini U ja pärast seda ühendatakse temaga küllalt kaugel asuv laadimata kera raadiusega r. Pärast elektromeetri laengu ümberjaotumist tema ja kera vahel näitas elektromeeter potentsiaali U_1. Väljendada elektromeetri mahtuvus C.

6. Potentsiaalide vaheni U laetud õhkdielektrikuga kondensaator ühendatakse paralleelselt samasuguste mõõtmetega kondensaatoriga, mille plaatide vahel on dielektrik dielektrilise konstandiga ε. Pärast ühendamist on potentsiaalide vahe U_1. Kui suur on dielektriline konstant ε?

7. Plaatkondensaatori plaadid ühendatakse 220 V-se patarei poolustega. Kondensaatori mahtuvus on $1{,}5 \cdot 10^{-4}$ µF. Kui suur on kondensaatori laeng, kui plaatidevahelist kaugust kahekordistada? Kas muutub laeng, kui üks plaatidest maandada?



Joon. 30. Leideni purk.



Joon. 31. Telefoni kondensaatori sisemine ehitus.

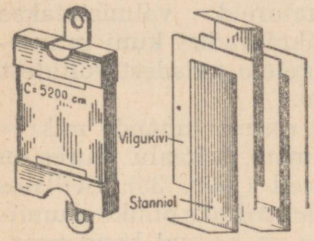
24. Kondensaatorite liike. Kondensaatoreid kasutatakse laialdaselt sidetehnikas, näiteks telefoni- ja raadiotehnikas, kuid samuti ka vahelduvvooluringides. Vastavalt oma otstarbele jaotatakse kondensaatorid püsiva ja muutuva mahtuvusega kondensaatoriteks.

Üheks kõige vanemaks kondensaatori tüübiks on leideni purk (joon. 30), mis leidub iga kooli füüsikakabinetis. Oma nimetuse sai see kondensaator Hollandi linna Leydeni järgi, kus ta esmakordselt XVII sajandi keskel valmistati.

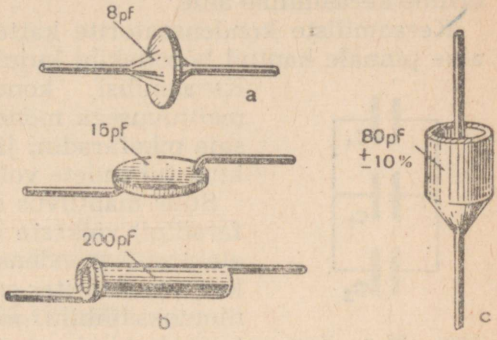
Leideni purk koosneb klaassilindrist A, mis on seest ja väljast kaetud stannioliga B. Sisekate ühendatakse metallvardaga, mille otsas on kuulike. Laadimisel ühendatakse kuulike elektrimasina

poolusega, väliskate aga maandatakse või ühendatakse masina vastaspoolusega.

Leideni purgi tühjendamiseks kasutatakse erilist tühjendajat. Purgi tühjendamine tema katete kätega puudutamise teel on elukardetav.



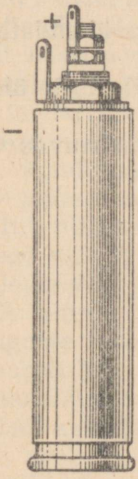
Joon. 32—33. Vilgukivikondensaatori väliskuju ja üksikosad.



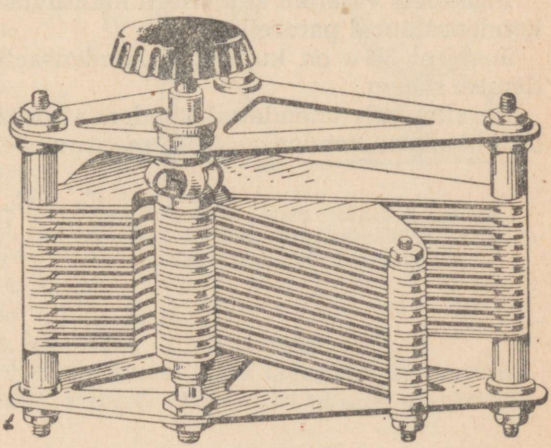
Joon. 34. Keraamilisi kondensaatoreid.

Joonisel 31 on kujutatud telefoni kondensaatori väliskuju ja sisemine ehitus. Sellised kondensaatorid valmistatakse tavaliselt stanniol- ja parafineeritud paberilehtedest, mis on tihedalt koos spiraali keeratud.

Raadiotehnikas kasutatakse vilgukivikondensaatoreid. Nende kondensaatorite katted valmistatakse seatina-, stanniol- või alumiiniumpaberist. Vilgukivikondensaatorite mahtuvus ulatub kümnetest pikofaraditest kuni kümnete tuhandete pikofaraditeni; nende



Joon. 35. Elektrolüütkondensaator.

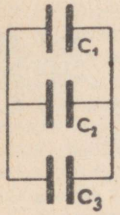


Joon. 36. Muutuva mahtuvusega kondensaator.

tööpinged on sadadest kuni tuhandete voltideni. Joonistel 32, 33 on näidatud niisuguse kondensaatori väliskuju ja üksikosad.

Viimasel ajal on vilgukivikondensaatoreid hakatud asendama keraamiliste kondensaatoritega (joon. 34). Nende dielektrikuks on eriline keraamiline aine.

Keraamiliste kondensaatorite katted valmistatakse keraamilise aine pinnale kantud hõbedakihi kujul, mis on kaitstud lakikihiga.



Joon. 36-*a*. Kondensaatorite paralleelselt ühendamine.

Keraamilisi kondensaatoreid valmistatakse mahtuvusega mõnest pikofaradist kuni mitmesaja pikofaradini ja pingetele sadadest voltidest kuni tuhandete voltideni.

Suur mahtuvus (kuni mitme tuhande mikrofaradini) väikeste mõõtmete ja kaalu juures on elektrolüütkondensaatoreil (joon. 35). Sellistes kondensaatorites on dielektrikuks õhuke alumiiniumoksiidikiht, millega on kaetud kondensaatori alumiiniumkatted. Elektrolüütkondensaatori sektsiooni valmistamiseks keeratakse spiraali kaks alumiiniumriba, mis on teineteisest eraldatud elektrolüüdilahusega immutatud kiulise paberi kihiga. Neid võib kasutada ainult nendes seadmetes, kus on tegemist alalispingega. Nende kondensaatorite väljavõtted on tähistatud plussi (+) ja miinusega (—).

Muutuva mahtuvusega kondensaatorid, mida samuti kasutatakse laialdaselt raadiotehnikas, on enamikus õhkdielektrikuga. Selline kondensaator (joon. 36) koosneb kahest teineteisest isoleeritud metallplaatide süsteemist. Üks plaatide süsteem on paigalseisev, teist saab pöörata ümber telje. Pöörates liikuvat süsteemi, muutub sujuvalt kondensaatori mahtuvus.

Praktikas vajaliku suurusega mahtuvuse saamiseks ühendatakse kondensaatorid patareiks.

Joonisel 36-*a* on kujutatud kondensaatorite paralleelselt ühendamise skeem.

Paralleelselt ühendatud kondensaatorite patarei mahtuvus võrdub üksikute kondensaatorite mahtuvuste summaga:

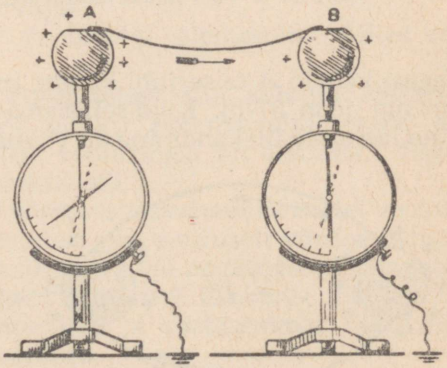
$$C = C_1 + C_2 + C_3.$$

II PEATÜKK

ALALISVOOL

25. Elektrivoolu tekkimise ja olemasolu tingimused. *Elektrivooluks nimetatakse elektrilaengute suunatud (korrapärast) liikumist.*

Elektrivoolu võib saada näiteks juhis, mis ühendab laetud keha *A* laadimata kehaga *B*. Kuid see vool katkeb, niipea kui kehade *A* ja *B* potentsiaalide vahe võrdub nulliga (joon. 37). Seejuures osa laengust, mis jääb kehasid ühendavasse juhti, jaotub ühtlaselt piki seda.



Joon. 37. Vool läheb kehalt *A* kehale *B*. Vool katkeb, kui kehade *A* ja *B* potentsiaalid võrdsustuvad.

Elektrilaengute korrapärane liikumine, s. t. elektrivool, esineb samuti ka laetud kondensaatori plaate ühendavas juhis. Sel juhul kaasub vooluga kondensaatori plaatidel leiduvate laengute neutralisatsioon, mis jätkub seni, kuni kondensaatori plaatide potentsiaalide vahe muutub nulliks.

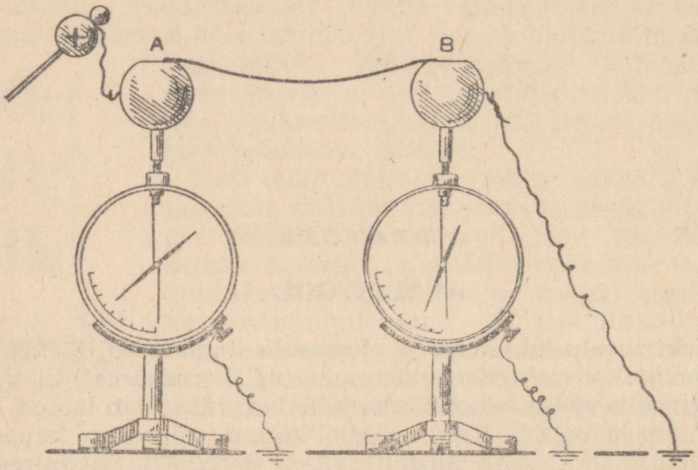
Need näited selgitavad, et elektrivool juhis on võimalik ainult juhi otstes erisuguste potentsiaalide olemasolu korral. s. t. siis, kui juhis on elektriväli.

Vaadeldud näidetes vool ei ole kestev, sest laengute ümberpaiknemisel kehade potentsiaalid kiiresti võrdsustuvad ning elektriväli juhis kaob.

Järelikult, voolu saamiseks juhis on vajalik juhi otstes säilitada erisugused potentsiaalid. Seda saab teostada mitmel viisil. Näiteks võiks pidevalt laadida keha *A* ja tühjendada keha *B*, või laadida

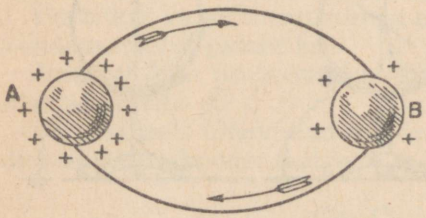
keha *A* positiivse, keha *B* aga negatiivse laenguga. Samuti võiks keha *A* laadida elektrimasinaga, keha *B* aga maandada (joon. 37-*a*).

Kestvat voolu juhis saab hoida, kui kanda laengud kehalt *B*



Joon. 37-*a*. Vool läheb laetud kehalt *A* maandatud kehale *B*.

tagasi kehale *A* teise juhi kaudu, moodustades selleks suletud vooluringi (joon. 37-*b*). Kuid sellesama elektrivälja jõudude toimel selline laengute ülekandmine on võimatu, kuna keha *B* potentsiaal on väiksem keha *A* potentsiaalist. Laengute ülekandmist kehalt *B* kehale *A* on võimalik teostada ainult mitteelektrilise päritoluga jõudude abil. Sellised jõud annab vooluringi lülitatav vooluallikas.



Joon. 37-*b*. Suletud vooluringi ülemises osas toimub laengute liikumine elektrivälja jõudude mõjul, vooluringi alumises osas toimub laengute liikumine vooluallika jõudude mõjul (joonisel vooluallikat pole näidatud).

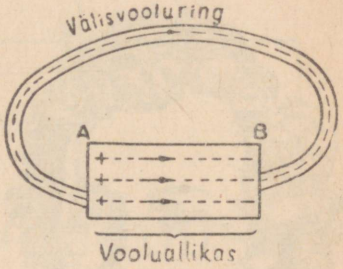
Vooluallikas mõjuvad jõud kannavad laengud väiksema potentsiaaliga kehalt suurema potentsiaaliga kehale ning teostavad seejuures tööd. Järelikult peab vooluallikas omama energiat.

Vooluallikateks kasutatakse elektrimasinaid, galvaani elemente, akumulaatoreid, generaatoreid jne.

Eeltoodust järeldub, et pideva elektrivoolu saamiseks on vajalik vooluallikas. Ühda omavahel ühendatud juhte koos vooluallikaga moodustavad suletud elektrivoolu ringi.

Joonisel 37-*c* on kujutatud vooluring, milles on vooluallikas. Selle vooluringi välisosas positiivsed laengud liiguvad elektrivälja jõudude mõjul (suurema potentsiaaliga punktidest väiksema potentsiaaliga punktidesse), vooluringi sisemises osas *BA* laengute liikumine *B*-st *A*-sse teostub aga vooluallikas mõjuvate jõudude toimel.

Suletud vooluringis toimuvate protsesside selgitamiseks kasutame järgmist mudelit. Kujutame endale ette kruvitaolist kaldpinda. Kui selle pinna ülemisele servale asetada kuulikesed, siis hakkavad need raskusjõu mõjul alla veerema.



Joon. 37-*c*. Suletud vooluring vooluallikaga.

Raskusjõu toime on siin analoogiline elektrivälja jõudude toimega suletud vooluringis. Kuulikeste pideva liikumise tekitamiseks kaldpinnal tuleb kuulikesed tõsta kaldpinna ülemisele servale. Selline ümberpaigutus on võimalik ainult teistsuguste jõudude abil, kui seda on raskusjõud. Viimaste jõudude toime on sarnane jõudude toimega suletud vooluringi vooluallika osas.

Niisiis, pideva voolu saamise vajalikuks tingimuseks on suletud vooluringi olemasolu, milles on vooluallikas.

26. Alalisvool. Voolu suund. Voolu toime. Kui suletud elektrivoolu ringis juhi kahe mistahes punkti potentsiaalide vahe ei muutu, siis vool, mis voolab selles vooluringis, on alalisvool. Seejuures on juhis olemas alaline elektriväli.

Kui juhti läbib alalisvool, siis võrdsete ajavahemike kestel voolab läbi juhi ristlõike vooluringi mistahes osas suuruselt võrdne laeng.

Elektrivool kujutab endast positiivsete või negatiivsete laengute (ka mõlemate laengute üheaegset) suunatud liikumist. Seejuures voolud, mis on tekitatud erinimeliste ja vastassuunas liikuvate laengute poolt, on teineteisega võrdsed.

Elektrivoolu suunaks loetakse kokkuleppeliselt positiivsete laengute liikumise suunda vooluringis elektrivälja jõudude toimel.

Voolu liikumisega juhis kaasub rida kergesti jälgitavaid nähtusi. Näiteks, kui vool läbib mõningaid vedelikke, siis on märgata ainete eraldumist vedelikku asetatud elektroodidel. Sageli paneb vool gaasi helendama. Kui vool läbib juhti, siis viimane soojeneb. Lõpuks, juhti ümbritsevas ruumis tekib magnetväli.

Seega saab elektrivoolu teha kindlaks tema keemilise, valgusliku, soojusliku või magnetilise mõju varal, kusjuures voolu magnetiline mõju esineb alati, kui elektrivool läbib juhti, milline see ka ei oleks — tahke, vedel või gaasitaoline.

Juhtides voolu läbi toru, mis sisaldab väävelhapet, võib märgata

üheaegselt gaaside eraldumist lahusest, lahuse soojenemist ja toru lähedale asetatud magnetnõela kõrvalekaldumist *N-S*-suunast.

27. Voolu tugevuse mõõtmine. Voolu tugevuse ühikud. Kui juhti läbib alalisvool, siis igas sekundis voolab läbi selle juhi mistahes ristlõike üks ja sama elektrilaeng.

Suurust, mida mõõdetakse mingis ajavahemikus juhi ristlõiget läbinud laengu ja selle ajavahemiku suhtega, nimetatakse voolu tugevuseks[1] *või lihtsalt vooluks.*

André Marie Ampère (1775—1836) oli väljapaistev prantsuse füüsik ja matemaatik. Ta lõi esimese teooria, mis väljendas sidet elektriliste ja magnetiliste nähtuste vahel. Ampère'ile kuulub elektromagnetiliste nähtuste uurimise arenemisel tähtsat osa etendanud hüpotees magnetismi olemusest: kehade magnetilisi omadusi põhjustavad molekulaarsed elektrivoolud kehades. Ampère tõi füüsikasse «elektrivoolu» mõiste. Tema nime järgi sai voolu tugevuse ühik nimetuse *amper*.

Kui t sekundi kestel läbib juhi ristlõiget laeng q, siis voolu tugevus I määratakse järgmise võrdusega:

$$I = \frac{q}{t}.$$

Kuna laenguühikud on kindlaks määratud, siis sellega on määratud ka voolu tugevuse ühiku valik.

Voolu tugevuse ühikuks võetakse 1 amper. *SI*-süsteemis on amper põhiühikuks ja defineeritakse voolu magnetilise toime järgi *(vt. Lisa).* Ampri tuhandikku nimetatakse milliampriks (mA). Ampri miljondikku nimetatakse mikroampriks (μA).

$$1\ \text{A} = 10^3\ \text{mA} = 10^6\ \mu\text{A}.$$

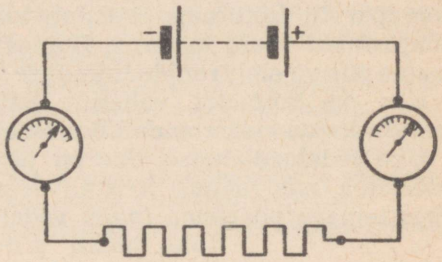
[1] Väljendus «voolu tugevus» on käesoleval ajal praktilises elektrotehnikas asendatud väljendusega «vool».

Juhti läbiva voolu tugevuse ja juhi ristlõike pindala S suhet nimetatakse voolu tiheduseks j:

$$j = \frac{I}{S}.$$

Voolu tugevuse mõõduriistu, nagu teada, nimetatakse ampermeetriteks.

Lülitades joonisel 38 kujundatud järjestikuse vooluringi mitmesugustesse kohtadesse ampermeetrid, näeme, et need näitavad ühesugust voolu tugevust. Järelikult, voolu tugevus järjestikku ühendatud ahela igas osas igal antud ajahetkel on üks ja seesama.



Joon. 38. Voolu tugevus on kõigis järjestikku ühendatud vooluringi osades ühesuurune.

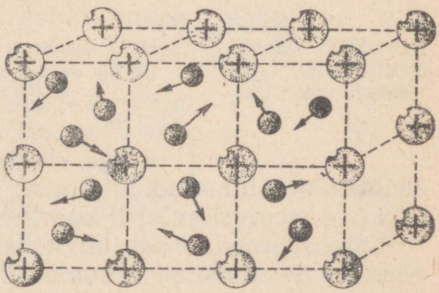
Juhti läbiva voolu tugevust määratakse laengut kandvate osakeste arvuga juhi ühes cm³ (vabade laetud osakeste kontsentratsiooniga juhis), juhtme ristlõikega ja osakeste suunatud liikumise kiirusega:

$$I = enSv,$$

kus I on voolu tugevus, e — osakese laeng, n — vabade laetud osakeste arv ühes cm³, S — juhi ristlõike pindala ja v — laetud osakeste suunatud liikumise kiirus.

28. Elektrivool metallides. Juhtides, nagu me teame (§ 11), leidub vabu laenguid. Nende laengute kandjaiks on mitmesugused osakesed. Metallides on näiteks vabade laengute kandjaiks elektronid.

Nagu teada, on metallidel tahkes olekus täiesti kindel kristalliline struktuur. Seepärast tuleb vaadelda iga metalli kui ruumilist kristallvõret, mille sõlmedes asetsevad vastava elemendi positiivselt laetud aatomid (ioonid). Nende ioonide vahelises ruumis asetsevad vabad, s. o. oma aatomitega mitte seotud elektronid. Nende elektronide kogu nimetatakse «elektrongaasiks» (joon. 39). Vabade elektronide laengu absoluutväärtus võrdub kristallvõre positiivse laenguga ja sellepärast on metall tavalistel tingimustel elektriliselt neutraalne.



Joon. 39. Metallistruktuuri mudel.

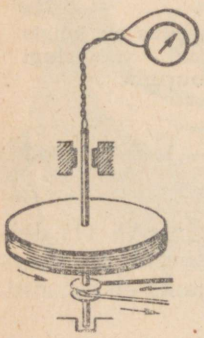
Ioonide soojuslik liikumine ruumvõres hariliku temperatuuri ja

rõhu tingimustel viib ainult nende enam või vähem intensiivsele võnkumisele tasakaaluasendi ümber. Kuid ioonide üldine asetus püsib.

Elektrivälja puudumisel on metalli vabad elektronid korrapäratus liikumises, kusjuures nende kiirused, samuti nagu ka molekulide kiirused, sõltuvad metalli temperatuurist. Elektronide korrapäratu liikumise tagajärjel ei toimu elektrilaengu edasikandmist mingisuguses eelistatud suunas. Kui aga metalli sees tekitada elektriväli, rakendades metallitüki otstele pinge, siis saavad kõik vabad elektronid elektrivälja toimel samasuunalise kiirenduse. Nende korrapäratu liikumine asendub kindlasuunalise liikumisega, mis põhjustabki voolu metallis. Hoides metalli otstel pinget püsivana, saame püsiva elektronide liikumise teatud suunas, s. o. alalisvoolu.

Kas on võimalik vahetult katseliselt näidata, et elektrivool metallides on elektronide liikumine?

Ühe sedalaadi katse idee on järgmine. Kui panna metallitükk pöörlema, siis metalli kristallvõres asetsev elektrongaas hakkab koos temaga pöörlema (nagu vedelik pöörlevas anumas). Metallitüki järsul pidurdamisel peaks elektrongaas inertsi mõjul teatud aeg edasi pöörlema sarnaselt sellega, nagu vedelik jätkab anumas pöörlemist pärast viimase seismajätmist. Ülesanne seisneb selles, et leida viis metallis oleva elektrongaasi inertsi mõjul toimuva liikumise avastamiseks.



Joon. 40. Katse, mis näitab vabade elektronide olemasolu metallis.

Pool, millele oli mähitud palju keerde peenikest traati, pandi oma telje ümber kiiresti pöörlema (joon. 40). Traadi otsad ühendati paindu-vate juhtmete kaudu tundliku galvanomeetriga. Pooli järsul seismajätmisel näitas galvanomeeter sekundi murdosa vältel voolu. Selle voolu suund näitas, et ta on põhjustatud negatiivselt laetud osakeste, s. o. elektronide liikumisest.

Selle meetodi abil on tehtud kindlaks mitte ainult vabade elektronide olemasolu, vaid avanes võimalus määrata ka nende massi.

Seega elektrivool metallides kujutab endast elektronide suunatud liikumist, vastupidiselt elektronide korrapäratule (soojuslikule) liikumisele, milline esineb metallis alati.

Pinge suurendamisel juhi kahe mingisuguse punkti vahel kasvab elektronide suunatud liikumise kiirus, see viib aga voolu suurenemisele juhis. Elektrivoolu tugevus metalljuhis on võrdeline pingega.

Võrdelisust voolu tugevuse ja pinge vahel kujutab graafiliselt sirge; sellepärast öeldakse, et metalljuhtides sõltub voolu tugevus pingest lineaarselt.

29. Elektronide liikumine metallis ja nende väljumistöö. Elektronide liikumise kiirus metallis elektrivälja toimel sõltub elektrivälja tugevusest. Näiteks

elektrivälja tugevuse puhul 1 $\frac{V}{cm}$ ei ole see kiirus kuigi suur — ligikaudu 0,5 $\frac{mm}{s}$. Elektrivälja levimise kiirus juhi sees on aga määratu suur, ta on võrdne valguse kiirusega 300 000 $\left(\frac{km}{s}\right)$. Niisugust kiirust peetaksegi silmas, kui räägitakse elektrivoolu levimise kiirusest.

Midagi analoogilist me näeme gaasi liikumisel gaasijuhtmetes.

Kui näiteks gaasijuhtme Saraatovi-poolses otsas tõstetakse survet, siis levib see hääle kiirusega gaasis $\left(\text{umbes } 500\frac{m}{s}\right)$ mööda toru edasi ja kandub peatselt üle Moskvasse. Sellest hetkest algab Saraatovi gaasi saabumine Moskvasse. Gaas, mis antud momendil asub Saraatovis, jõuab Moskvasse aga tunduvalt hiljem, kuna gaasi levimise kiirus torustikus on tunduvalt väiksem rõhu levimise kiirusest, s. o. hääle kiirusest gaasis.

Metalli sisemuses viibivatel vabadel elektronidel on märkimisväärne hulk energiat ja seepärast, kui nende kiirused oleksid suunatud metalli pinna poole, võiksid nad metallist välja lennata. Iseseisvat elektronide metallist väljumist tavalise temperatuuri juures ei ole siiski märgata. Järelikult on olemas jõud, mis seovad vabad elektronid kogu metallitükiga, ja seepärast on tarvis teha teatud hulk tööd, et eemaldada elektrone metallist.

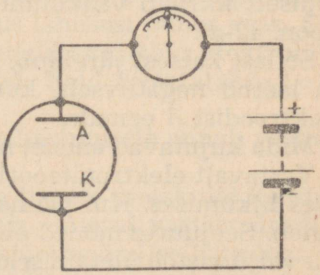
Milline on nende jõudude olemus, mis hoiavad kinni vabu elektrone metalli sees?

Asi seisneb selles, et elektronile, mis lendab välja metalli pinnast, mõjub intensiivselt lähedalasuvate kristallvõre positiivsete ioonide külgetõmbejõud ja elektron pöördub selle jõu mõjul tagasi metalli sisemusse. Metalli välispind näib olevat piiratud õige tiheda «elektronide atmosfääriga», mille moodustavad pidevalt väljalendavad ja tagasipöörduvad elektronid.

Elektroni eemaldamiseks metallist on tarvis teha teatud hulk tööd nende jõudude ületamiseks, mis tõmbavad elektroni metalli tagasi. Selle töö suurust nimetatakse *väljumistööks*.

Elektronile on võimalik anda energiat väljumiseks tehtavaks tööks mitmel viisil: metalli kuumutamisega, tema mõjutamisega valguse abil, metalli pommitamisega aatomite või positiivsete ioonidega jne.

30. Elektrivool vaakuumis. Parimaks isolaatoriks on vaakuum, s. o. ruum, millest õhk on välja pumbatud ja kus ei ole vedelikkude aurusid ega tahkete ainete osakesi.



Joon. 41. Katse, mis näitab, et laengukandjate puudumisel vooluringis voolu ei ole.

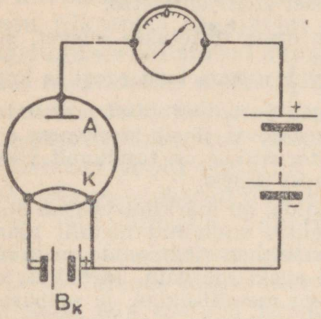
Kuid ka vaakuumis võib saada elektrivoolu, viies sinna laengukandjaid.

Joonisel 41 on kujutatud õhust tühjaks pumbatud anum. Sellesse anumasse on joodetud kaks metallist plaati — kaks elektroodi. Ühe neist (anoodi) ühendame vooluallika positiivse poolusega, teise (katoodi) aga negatiivsega. Anoodi ja katoodi vaheliseks pingeks on küllaldane rakendada 80—100 V.

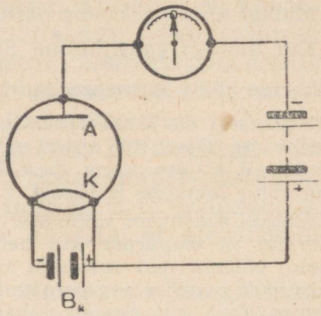
Ühendame tühjakspumbatud anuma elektroodid pingeallikaga ja lülitame vooluringi tundliku milliampermeetri. Mõõduriist ei näita

mingit voolu (joon. 41); see tähendab, et vaakuumis pole mingisuguseid laengukandjaid.

Muudame oma katset. Sulatame anumasse katoodiks traadikese, mille otsad toome välja. See traat jääb endiselt katoodiks. Teise vooluallika abil paneme selle hõõguma (joon. 42). Näeme, et nii-



Joon. 42. Hõõgniidist väljalendavad elektronid põhjustavad voolu tekkimist vooluringis.



Joon. 42-*a*. Hõõgniit on anoodiks, vooluringis voolu ei ole.

pea, kui traat hakkab hõõguma, näitab vooluringi lülitatud mõõduriist voolu, mis on seda suurem, mida heledamini hõõgub traat. Tähendab, hõõguv traat (hõõgniit) saadab vaakuumi elektrivoolu eksisteerimiseks vajalikke laengukandjaid, olles nende allikaks.

Missugune laeng on nendel laengukandjatel? Vastuse sellele küsimusele annab järgmine katse. Vahetame anumasse joodetud elektroodide poolused: teeme hõõgniidi anoodiks ja vastasasetseva elektroodi katoodiks. Olgugi et katood endiselt hõõgub ja et ta endiselt kiirgab vaakuumi laetud osakesi, pole vooluringis voolu (joon. 42-*a*).

Sellest katsest järeldub, et hõõguvast traadist väljuvad osakesed on laetud negatiivselt, kuna need tõukuvad negatiivselt laetud elektroodist *A* eemale.

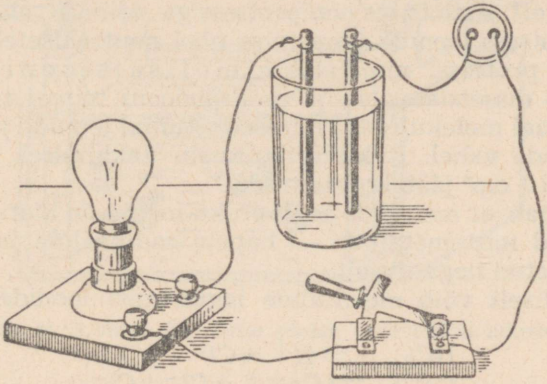
Mida kujutavad endast need osakesed?

Vastavalt elektroniteooriale on vabad elektronid metallis kaootilises liikumises. Kui panna traat hõõguma, siis see liikumine suureneb. Seejuures mõned elektronid, mis on saanud küllaldase energia väljumistöö ületamiseks, lendavad hõõgniidist välja, moodustades viimase ümber «elektronide pilve». Kui hõõgniidi ja anoodi vahel tekib elektriväli, siis suunduvad elektronid elektroodi *A* poole, kui see on ühendatud patarei positiivse poolusega, ja tõukuvad tagasi hõõgniidi poole, kui elektrood on ühendatud negatiivse poolusega, s. t. omab elektronidega samanimelise laengu.

Niisiis, *vool vaakuumis kujutab endast elektronide suunatud voogu.*

31. Elektrivoolu olemus elektrolüüdis. Võrreldes metallidega on soolade, hapete ja leeliste vedelates lahustes ehk nn. elektrolüütides elektrivoolul teine iseloom.

Teeme järgmise katse. Valame anumasse destilleeritud vett, vette asetame kaks puhast süsielektroodi, ja ühendades need järjestikku elektrilambi kesega, lülime terve meie seadme elektrivooluvõrku (joon. 43). Lambike ei hõõgu, tähendab, vooluringis puudub vool. Destilleeritud vesi on isolaator, temas puuduvad elektrilaengute



Joon. 43. Seadis vedelike elektrijuhtivuse kindlakstegemiseks.

kandjad. Muudame pisut oma katset. Laseme pipetiga mõne tilga väävelhapet vette ja segame selle veega. Lambike hakkab hõõguma, mis näitab voolu tekkimist. Saadud lahuses tekkisid laengukandjad. Mida nad endast kujutavad? Jätkame oma katseid.

Valame anumasse vasevitrioli lahust ja asetame sellesse kaks süsielektroodi, mis ühendame alalisvoolu allika poolustega. Mõne aja möödudes näeme, et katoodile eraldus lahusest puhas vask. See annab meile võimaluse järeldada, et laengukandjateks elektrolüütides on elektriliselt laetud aineosakesed. Neid nimetatakse ioonideks[1].

Kuidas tekivad lahuses ioonid? Sellele küsimusele annab vastuse elektrolüütilise dissotsiatsiooni teooria.

Selle teooria põhjal soolade, leeliste ja hapete molekulid koosnevad kahest osast, s. o. kahest ioonist, mis omavad vastasmärgilisi, kuid suuruselt võrdseid laenguid. Külgetõmbejõud selliste ioonide vahel kindlustab molekuli terviklikkuse. Kui neid molekule ümbritsevad vee molekulid (millede elektriline läbitavus on väga suur; $\varepsilon = 81$), siis nõrgeneb tunduvalt molekule moodustanud ioonide vaheline side. Selliste tingimuste juures molekulide kokkupõrked soojusliikumise tagajärjel põhjustavad molekulide lagunemise ioonideks.

[1] ioon — kreekakeelsest sõnast *ion* — rändav.

Positiivsed ioonid kujutavad endast aatomeid või molekule, mis on kaotanud ühe või mitu elektroni; negatiivsed ioonid aga — aatomeid või molekule, milledel on üks või rohkem liigset elektroni.

Iga aine dissotsiatsioon toimub täiesti seaduspäraselt. Nii näiteks soolhappe lahustumisel vees lagunevad soolhappe *HCl* molekulid kaheks iooniks: vesiniku ioon H^+ on laetud positiivselt, kloori ioon Cl^- on laetud negatiivselt. Mõnikord ei ole lahuses ioonideks mitte laetud aatomid, vaid suured laetud aatomite grupid (enamasti nimetatakse neid keemilisteks radikaalideks).

Samaaegselt dissotsiatsiooniprotsessiga toimub elektrolüütides ka pöördprotsess ioonide ühinemise näol neutraalseteks molekulideks. Seda protsessi nimetatakse molisatsiooniks. Mõlema protsessi — dissotsiatsiooni ja molisatsiooni toimel tekib lahuses liikuv tasakaal molekulides äsjamoodustunud ioonide ja uuesti ühinenud ioonide vahel. Liikuva tasakaalu tekkimisel ioonide arv elektrolüüdi 1 cm^3 jääb konstantseks.

Katse näitab, et metallide ja vesiniku ioonid on alati laetud positiivselt, kuid mittemetallide — hapete radikaalide ja *OH* rühma ioonid on laetud negatiivselt.

Skemaatiliselt võib molekulide lagunemist ioonideks kujutada järgmiselt:

$$HCl \rightarrow H^+ + Cl^-$$
$$CaCl_2 \rightarrow Ca^{++} + Cl^- + Cl^-$$
$$H_2SO_4 \rightarrow H^+ + H^+ + SO_4^{--}$$
$$CuSO_4 \rightarrow Cu^{++} + SO_4^{--}$$

Märgid (+ või —) näitavad iooni laengu märki. Märkide arv näitab iooni laengute arvu, kui ühevalentse iooni laeng lugeda ühikuks.

Nagu molekulid ja aatomid, nii on ka ioonid elektrolüüdis kaootilises liikumises. Kui me aga tekitame lahuses elektrivälja, rakendades elektroodidele pinge, siis peale kaootilise soojusliku liikumise tekib lahuses ioonide suunatud liikumine. Positiivsed ioonid suunduvad katoodile, negatiivsed — anoodile. Jõudes vastavatele elektroodidele, annavad ioonid seal ära oma laengu ja, muutudes harilikeks aatomiteks või molekulideks, eralduvad elektroodidel või astuvad keemilistesse reaktsioonidesse. Iooni liikumine $CuSO_4$ lahuses on skemaatiliselt kujutatud joonisel 44. Vase positiivsed ioonid on kujutatud mustade sakiliste ringidena kui elektrone kaotanud ioonid, SO_4 ioonid aga suurte ringidena kahe väikese lisaringikesega kui lisaelektrone saanud ioonid.

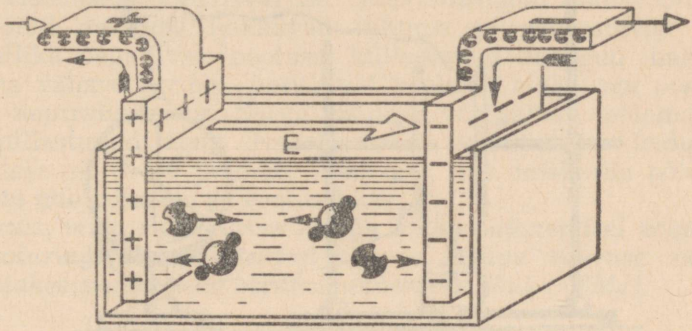
Sõltuvalt lahusest ja anoodi ning katoodi materjalist võivad esineda anoodil ja katoodil rohkem või vähem keerukamad keemilised nähtused, kuid asja tuum seisneb ikkagi elektri ja aine üheaegses ülekandmises ioonide kaudu.

Seega, *elektrivool elektrolüütides on ioonide suunatud liikumine.*

Mida enam on mõlema märgiga ioone 1 cm^3 elektrolüüdis ja mida suurem on nende liikumise kiirus, seda tugevam on vool.

Iooni liikumise kiirus elektrolüüdis elektrivälja toimel oleneb

iooni massist ja mõõtmetest, lahuse temperatuurist ning elektrivälja tugevusest. Need kiirused üldiselt ei ole suured. Kiireim kõikidest ioonidest, vesiniku ioon, läbib näiteks tunnis 11,7 cm pikkuse tee, kui väljatugevus on $1\frac{V}{cm}$. Elektrivälja levimise kiirus elektrolüüdis nagu ka metallides on ligikaudu $300\,000\frac{km}{s}$.



Joon. 44. Ioonide liikumise skeem vasevitrioli lahuses.

32. Elektrivoolu olemus gaasis. Vaatleme nüüd, milline on elektrivoolu olemus gaasis. Teeme järgmise katse. Võtame kondensaatori ja laeme selle, tekitades plaatide vahel pinge. Kondensaatori plaatidega ühendatud elektromeeter näitab kogu aeg üht ja sama pinget, tähendab, tavaliste tingimuste juures osutub õhk isolaatoriks, s. o. ei sisalda vabu laenguid.

Viies süüdatud tuletiku plaatide *A* ja *B* vahele, näeme, et plaatidevaheline pinge väheneb, s. t. kondensaator tühjeneb; järelikult tekib plaatide vahel elektrivool. Kõik see viitab sellele, et plaatide *A* ja *B* vahelises õhus tekkisid elektrilaengute kandjad. Mida need endast kujutavad?

On täiesti loomulik oletada, et laengukandjaiks olid õhu molekulid, mis leegi mõjul said elektrilaengu, ja muutunud ioonideks, hakkasid liikuma plaatide *A* ja *B* vahelises elektriväljas, tekitades sel viisil elektrivoolu, mis põhjustas pinge langemise kondensaatori plaatidel.

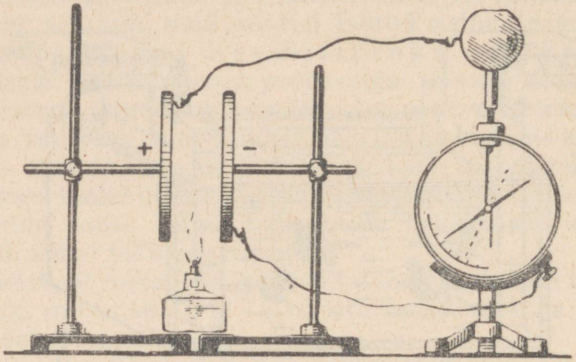
Hoolika uurimise teel tehti kindlaks, et elektrilaengute kandjaiks gaasides on ioonid ja elektronid, mis tekivad ionisaatori mõjumise tulemusena gaasile.

Ionisaatoriteks on leek, röntgenikiirgus, radioaktiivsete ainete kiirgus. Igal ionisaatoril on, sõltumata tema päritolust, kindel ioniseeriv võime, s. t. võime tekitada antud ruumalas mingi ajavahemiku vältel kindel hulk positiivseid ja negatiivseid ioone.

Ionisaatori toimel kaotavad gaasi molekulid elektrone ja muutuvad positiivselt laetud ioonideks. Vabanenud elektronid on ise elektrilaengute kandjaiks ja, ühinedes neutraalsete molekulide või

aatomitega, moodustavad negatiivselt laetud ioone. Seega võivad gaasis tekkida vabad laengud elektronidena ja mõlemamärgiliste ioonidena.

Ioniseeritud gaasis asetsev laetud keha tõmbab enda poole vastasmärgilised vabad laengud. Viimased neutraliseerivad seejuures laengud kehas, mistõttu keha kaotab oma laengu.



Joon. 45. Leek muudab õhu elektrit juhtivaks.

Gaasides ei toimu nende koostisosade eraldumist elektroodidel, nagu see leiab aset elektrolüütides, kuna gaasi ioniseerimisel tema molekulid ei lagune, vaid nad ainult kas kaotavad elektrone või saavad neid juurde.

Elektroodile saabudes annavad gaasi ioonid sellele oma laengud üle, muutuvad neutraalseiks molekulideks või aatomiteks ja difundeeruvad uuesti gaasiks. Elektrolüütides aga ioonid, mis on tulnud elektroodidele, kas sadestuvad elektroodide pinnale või tekitavad keemilisi reaktsioone.

Kui gaasis tekkinud ioonid või vabad elektronid satuvad elektrivälja, hakkavad nad liikuma kindlas suunas.

Positiivsete ioonide suunatud liikumine katoodi poole ja negatiivsete ioonide ning elektronide liikumine anoodi poole kujutab endast elektrivoolu gaasis.

Seega koosneb kogu vool gaasis kahest laetud osakeste voost: anoodile suunduvast voost ja katoodile suunduvast voost.

33. Vooluallika elektromotoorne jõud. Me nägime, et juhis voolu saamiseks on vaja juhis tekitada ja pidevalt hoida elektrivälja. Seda ülesannet täidabki vooluallikas.

Igas vooluallikas toimub positiivsete ja negatiivsete laengute jagunemine. Selle tulemusena saadav vooluallika energia tekib mõne teise energialiigi arvel, olenevalt vooluallika tüübist. Galvaani elemendis tekib elektrienergia näiteks keemilise energia arvel.

Vooluallika poolt tekitatavate jõudude toimel toimub elektrilaengute ümberpaiknemine vooluallika sees, küllastunud laengute moodustumine ning potentsiaalide vahe tekkimine aga poolustel.

Selle tulemusena kasvav elektriväli vooluallika sees pidurdab laengute jagunemist. Kui vooluring on katkestatud, siis koos poolustevahelise kindlaksmääratud potentsiaalide vahe saavutamisega lõpeb laengute jagunemine.

Ühendades vooluallika poolused (joon. 37-c) juhiga, mis kujutab endast välist vooluringi, me tekitame selles elektrivälja, mis oma suunalt (ringliikumisel mööda vooluringi) on vastupidine vooluallika sisemisele elektriväljale. Elektrilaengud välisvooluringis (elektronid metallis) hakkavad liikuma ja põhjustavad voolu. Vooluallika negatiivse pooluse küllastunud laengud hakkavad voolama välisvooluringi, positiivsel poolusel algab aga positiivse laengu neutralisatsioon. Seega väheneb vooluallika mõlemal poolusel küllastunud laeng. See aga rikub vooluallikas leiduvatele laengutele mõjuvate jõudude tasakaalu, mis omakorda põhjustab laengute uue jagunemise vooluallikas.

Suurust, mida mõõdetakse laengu ümberpaiknemisel kogu suletud vooluringi ulatuses tehtud töö ja laengu suuruse suhtega, nimetatakse vooluallika elektromotoorseks jõuks (EMJ).

$$E = \frac{A}{q}.$$

Arvuliselt on elektromotoorne jõud võrdne vooluallika pooluste potentsiaalide vahega avatud vooluringi korral.

34. Galvaani element. Suhteliselt tugeva elektrivoolu esimeseks allikaks oli galvaani element, mille avastas itaalia õpetlane V o l t a XIX saj. algul.

Galvaani elemendi ehitus põhineb metalli ja elektrolüüdi vastastikusel toimel, mis viib elektrivoolu tekkimisele suletud vooluringis. Selle nähtuse avastas XVII saj. lõpul itaalia teadlane G a l v a n i, kelle auks nimetatigi uusi vooluallikaid g a l v a a n i e l e m e n t i d e k s.

Galvaani elementide ehitus on väga lihtne: kõik nad koosnevad põhiliselt kahest keemiliselt erinevast elektroodist, mis on paigutatud mingisugusesse elektrolüüti.

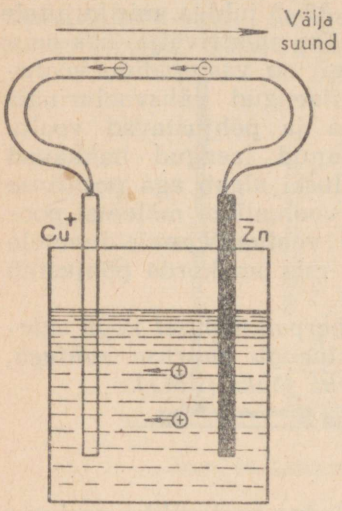
Vaatleme galvaani elemendi töötamisel toimuvaid protsesse.

Asetame väävelhappe lahusesse tsinkelektroodi. Reageerides väävelhappega annab tsinkelektrood lahusesse ära positiivsed tsingi ioonid, muutudes ise seejuures negatiivselt laetuks. Lahuses tekib aga positiivsete vesiniku ioonide küllus. Tsingi ja lahuse vahel tekib kindel potentsiaalide vahe suurus, mille juures tsingi edasine lahustumine katkeb, kuna positiivsed tsingi ioonid ei saa elektroodist liikuda positiivselt laetud lahusesse.[1]

[1] Ioonide soojuslik liikumine lahuses muudab kirjeldatud elemendi sees nähtused tunduvalt keerukamaks. Mingi potentsiaalide vahe puhul elektroodi ja lahuse vahel tekkiv tasakaal osutub mitte staatiliseks, vaid dünaamiliseks (liikuvaks). Kuipalju ioone läheb mingis ajavahemikus elektroodilt üle lahusesse, niipalju ilmub neid uuesti ka elektroodile.

TRÜ Raamatukogu

Tekkinud potentsiaalide vahe suurus ei olene lahusesse asetatud elektroodi mõõtmetest, sest eespool kirjeldatud tasakaal kehtib elektroodi igal pinnaosal, mis puutub kokku lahusega.



Joon. 46. Laetud osakeste liikumise skeem volta elemendi vooluringis.

Selleks et teha kindlaks ja kasutada seda potentsiaalide vahet, on vaja samasse lahusesse paigutada teine elektrood. Kuid kui teine elektrood võtta samuti tsingist, siis on nad mõlemad lahuses täiesti ühesugustes tingimustes ja nende vahel ei teki mingit potentsiaalide vahet. Kui aga teiseks elektroodiks võtta väävelhappe lahuses väga vähe lahustuv vaskplaat, siis tsink- ja vaskelektroodide vahel tekib potentsiaalide vahe ligikaudu 1,1 V.

Kui ühendada nüüd metalljuhtme abil tsinkelektrood vaskelektroodiga, siis nendevahelise potentsiaalide vahe tõttu hakkavad vabad elektronid juhtmes liikuma tsingilt vasele. Tulemusena tekib vasel elektronide ülejääk, kuna tsink aga kaotab osa elektrone. Seetõttu muutub tsink lahuse suhtes vähem negatiivseks, vask aga vähem positiivseks. Tasakaal elektroodide ja lahuse vahel rikutakse. Uued positiivsed tsingi ioonid hakkavad minema lahusesse, kuna tsingis tekivad uuesti vabad elektronid vasele läinute asemele. Vaskelektroodil aga hakkavad sadestuma uued positiivsed vesiniku ioonid, mis oma laengutega neutraliseerivad tsinkelektroodilt tulnud elektronide negatiivse laengu.

Niisiis toimub elemendi töötamisel tsingi lahustumise protsessis laengute jagunemine. Seejuures sooritatud töö toimub ainete vastastikuse keemilise mõju energia arvel.

Seega suletud vooluringis, mis koosneb elemendist ja juhtidest, esineb elektrivool. Välisvooluringis kujutab ta endast elektronide liikumist elektrivälja mõjul tsingilt vasele, sisevooluringis (lahuses) — ioonide liikumist. Laengute liikumise skeem niisuguses vooluringis on kujutatud joonisel 46.

Elemendi klemme, millede külge ühendatakse välisvooluringi juhtmed, nimetatakse e l e m e n d i p o o l u s t e k s. Positiivse potentsiaaliga poolust (volta elemendis — vaskelektroodi) nimetatakse vooluallika positiivseks pooluseks ehk a n o o d i k s, teist poolust — negatiivseks pooluseks ehk k a t o o d i k s.

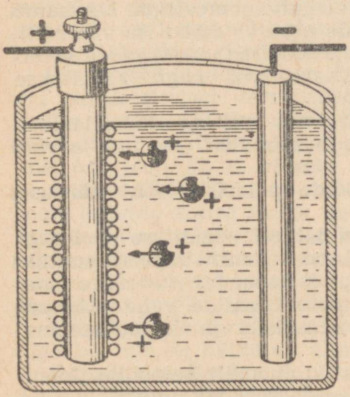
Volta elemendi *EMJ* on 1,1 V.

Alessandro Volta (1745—1827) oli silmapaistev itaalia füüsik. Tema avastas elektri tekkimise nähtuse erinevate metallide kokkupuutel ja lõi esimese alalisvoolu allika «volta samba», millega pani aluse elektrodünaamika arenemisele. Peale selle kuulub Voltale rida avastusi elektrostaatika alal. Volta nime järgi anti pinge mõõtühiku nimetuseks volt.

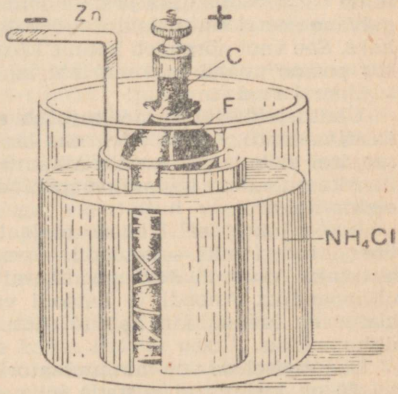
35. Elemendi polarisatsioon. Leklanšee element. Eespool kirjeldatud volta elemendi töös esineb oluline puudus. See seisneb selles, et vaskelektroodile sadestunud vesiniku aatomid katavad varsti peale töötamise algust elektroodi kinni ja katkestavad uute vesiniku ioonide juurdepääsu elektroodile (joon. 47). Selle tagajärjel potentsiaalide vahe elemendi poolustel langeb järsult. Niisugust nähtust nimetatakse *elemendi polarisatsiooniks*. Võitlus selle ebasoovitava nähtusega on lihtne: on küllaldane viia elementi mingit hapendajat. Viimane annab omahapniku ühinemiseks vesinikuga, tekitades vee, anood muutub puhtaks ja element hakkab normaalselt töötama. Niisuguseid elementi viidavaid hapendajaid nimetatakse *depolarisaatoriteks*. Depolarisaatoritena kasutatakse sageli mangaanülihapendit, kaaliumbikromaati jt.

On olemas suur arv erinevaid galvaani elementide tüüpe, kuid töötamise põhimõte on kõikidel üks ja sama.

Laboratoorses praktikas on kõige levinumaks *leklanšee element*

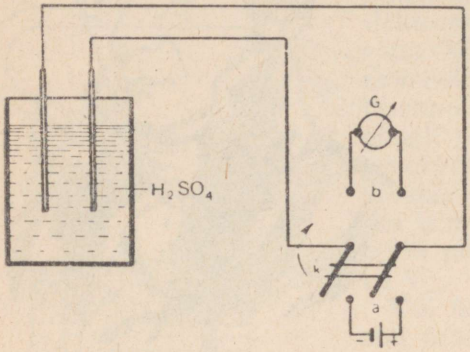


Joon. 47. Elemendi polarisatsioon.

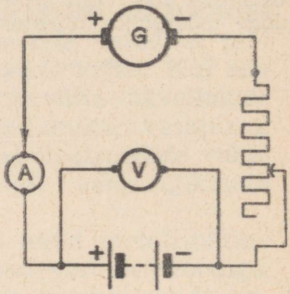


Joon. 48. Leklanšee element.

(joon. 49). Selles on negatiivseks pooluseks tsink Zn, positiivseks — süsi (koks) C. Mõlemad elektroodid asetsevad salmiaagi NH_4Cl lahuses; depolarisaatoriks on mangaanülihapend MnO_2, mis kotikeses (F) ümbritseb söeplaati. Elemendi töötamisel toimub temas keemiline reaktsioon. Reaktsiooni produktideks on tsinkkloriid $ZnCl_2$, ammoniaak NH_3 ja vesinik H_2. Viimane reageerib mangaanülihapendiga, kuid küllalt aeglaselt, seetõttu element kestval töötamisel siiski polariseerub. Leklanšee elemendi *EMJ* on 1,4 V.



Joon. 49. Seadme skeem akumulaatori töötamise põhimõtte demonstreerimiseks.



Joon. 50. Riistade lülitamise skeem akumulaatori laadimisel.

36. Akumulaator. 1. A k u m u l a a t o r i t ö ö t a m i s e p õ h i m õ t e. Galvaani elementide töötamisel kuluvad elektroodid ja lahus, mistõttu tuleb need teatud aja möödumisel asendada uutega. Keemilised protsessid galvaani elementides on mittepööratavad. On olemas vooluallikaid, mis töötavad keemiliste protsesside pööratavuse põhimõttel. Sellisteks vooluallikateks on a k u m u l a a t o r i d. Tutvume akumulaatorite töötamise printsiibiga.

Valame klaasi väävelhappe lahust ja pistame sinna kaks ühesugust seatinaelektroodi (seatinahapendist). Lülitame oma seadme vooluallika vooluringi, nagu on näidatud joonisel 49.

Pöörates ümberlülitit *k* asendisse *a*, juhime teatud aja vältel voolu läbi lahuse. Asetame nüüd ümberlüliti käepideme asendisse *b*. Sellega me lülitame välja vooluallika ja ühendame oma seadme galvanomeetriga. Märkame, galvanomeetri osuti kaldub kõrvale. Meie seade muutus nüüd ise vooluallikaks. See vool nõrgeneb kaunis kiirelt, ja kui me soovime uuesti saada voolu, siis peame uuesti juhtima läbi lahuse elektrivoolu, või nagu räägitakse, seadme l a a d i m a.

Ülalkirjeldatud seade kujutab endast lihtsaimat seatina-akumulaatorit (seatina-akut), s. o. seadet, mis laadimisel kogub keemilist energiat ja võib seejärel töötada alalisvoolu allikana.

Akumulaatori töötamine põhineb elektroodide polarisatsiooni nähtusel elektrolüüsil.

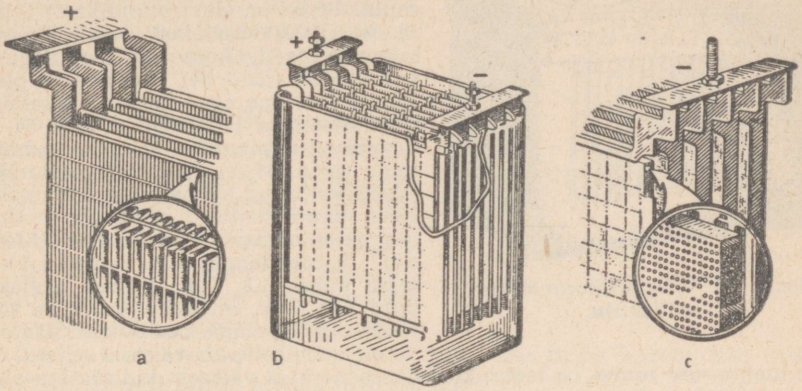
Voolu juhtimisel läbi akumulaatori eraldub patarei negatiivse poolusega ühendatud plaadil — katoodil — vesinik, mis taandab seatinahapendi puhtaks seatinaks. Akumulaatori anoodil eraldub hapnik, mis hapendab seatina seatinaülihapendiks. Anoodi ja katoodi vahel tekib potentsiaalide vahe. Akumulaator on laetud, kui katood osutub puhtaks seatinaks ja anood seatinaülihapendiks.

Laadimisel on vool akumulaatori sees suunatud anoodilt katoodile. Joonisel 50 on kujutatud riistade lülitusskeem akumulaatori laadimisel.

Ühendades akumulaatori plaadid juhiga, me saame voolu. Voolu suund akumulaatori tühjenemisel on vastupidine voolu suunaga laadimisel, ja

nimelt välisringis vool on suunatud seatina-ülihapendilt seatinale, siseringis — seatinalt seatina-ülihapendile.

Positiivsed ioonid liiguvad tühjenemisel seatina-ülihapendi poole, negatiivsed hapniku ioonid — seatina poole. Positiivne plaat taandatakse vesiniku poolt, negatiivne plaat aga hapendub hapniku mõjul.



Joon. 51—52. Happeakumulaatori sisemine ehitus.

Niipea kui mõlemad plaadid on muutunud ühesuguseks, lakkab akumulaator andmast voolu. Teda on vaja uuesti laadida. Uuel laadimisel positiivne plaat hapendub seatina-ülihapendiks, negatiivne taandub puhtaks seatinaks jne.

Iga akumulaatorit iseloomustab mahtuvus.[1] *Akumulaatori mahtuvust mõõdetakse laengu suurusega, mida võib anda laetud akumulaator tühjenemisel.* Akumulaatori mahtuvust ei avaldata mitte kulonites, vaid erilistes ühikutes, mida nimetatakse ampertundideks. Ampertund on elektrilaeng, mida annab 1-amprine vool ühe tunni vältel.

1 ampertund on 3600 kulonit.

2. Happeakumulaatori ehitus. Me kirjeldasime lihtsaima akumulaatori tegevust; niisuguse akumulaatori mahtuvus on väga väike. Akumulaatori mahtuvuse suurendamiseks valmistatakse tema positiivsed (anood-) ja negatiivsed (katood-) plaadid võrekujuliste seatinaplaatidena, mis on kaetud aktiivmassiga (PbO_2 ja urbse seatinaga).

Positiivsed plaadid (joon. 52, *a*) koosnevad tervest reast omavahel kinnitatud paralleelsetest vertikaalsetest seatina-ribidest (pinna suurendamiseks). Erilise elektrolüütilise töötlemise abil muundub ribide pindkiht seatina ülihapendiks. Positiivsed plaadid on mustjaspruuni värvusega. Negatiivsetel plaatidel on (joon. 52, *b*) aluseks seatinast võre, mille avad täidetakse seatinahapendiga PbO. Viimane on kaitstud väljalangemise vastu võret mõlemalt poolt katvate suure hulga peente aukudega varustatud seatina-lehtedega. Esimesel laadimisel taandatakse seatinahapend vesiniku ioonide poolt puhtaks poorse struktuuriga seatinaks, mida nimetatakse seetõttu urbseks seatinaks. Negatiivsed plaadid on halli värvusega. Joonisel 52, *b* on kujutatud akumulaatori plaatide ühendus.

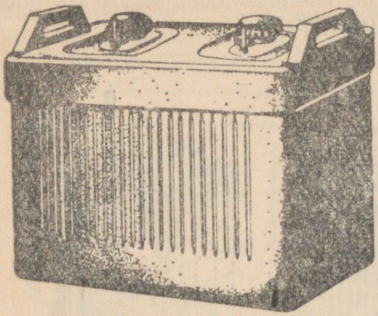
Iga akumulaatori jaoks on olemas laadimise ja tühjenemise piirvoolu tugevus, mis on näidatud akumulaatorile kaasa lisatud passil.

Happeakumulaatori *EMJ* on kohe peale laadimise lõpetamist umbes 2,7 V. Akumulaatori töötamise algul langeb see ruttu 2,1 V-ni ja seejärel aeglaselt

[1] Seda ei tohi segada juhi elektrimahtuvusega (ptk. I, § 20).

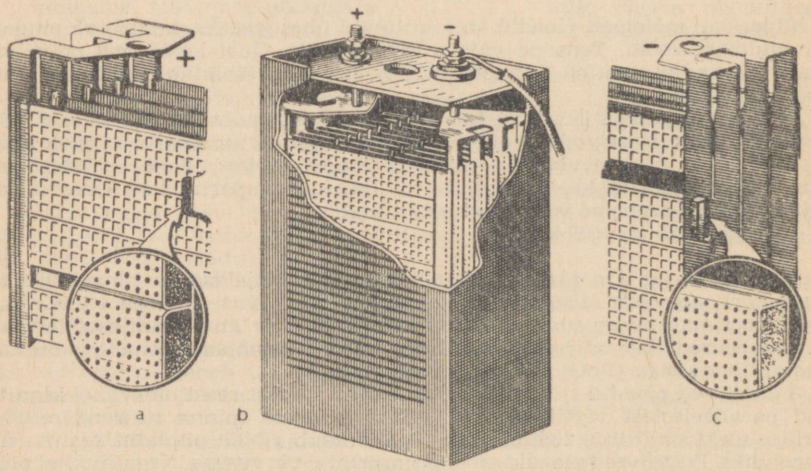
kuni 1,8 V. Pärast seda lõpetatakse akumulaatori kasutamine ja laaditakse uuesti.

Joonisel 53 on näidatud happeakumulaatori väliskuju.



Joon. 53. Happeakumulaatori väliskuju.

3. Leelisakumulaatori ehitus. Praegusel ajal on leidnud laialdast levikut leelisakumulaatorid. Nendes akumulaatorites on elektrolüüdiks 20%-line leelise (KOH) vesilahus. Nende akumulaatorite plaadid koosnevad taskutega terasvõredest (joon. 54). Positiivsetel plaatidel täidetakse need taskud nikkelhüdroksiidmassiga [$Ni(OH)_3$] (joon. 54, *a*), negatiivsetel plaatidel — urbse kadmiumiga (joon. 54, *c*). Plaadid asetatakse pealekeevitatud kaanega terasanumasse. Need akumulaatorid annavad seatina-akumulaatoritega võrreldes väiksema *EMJ*. Tühjendamisel *EMJ* langeb 1,4 V-lt algul kiirelt 1,3 V-ni, hiljem aeglaselt kuni 1,15 V-ni, mispuhul tuleb ka tühjendamine lõpetada. Leelisakumulaatoritel on aga tähelepanuväärsed eelised. Sama mahtuvuse juures on leelisakumulaatorite kaal väiksem kui seatina-akumulaatoritel, nad on suurema mehhaanilise tugevusega ja nende hooldamine on lihtsam. Joonisel 54, *b* on kujutatud plaatide ühendamine akumulaatoris.

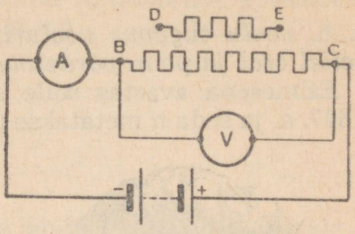


Joon. 54. Leelisakumulaatori sisemine ehitus.

Akumulaatorid leiavad kõige mitmekesisemat ja laialdast kasutamist. Nii näiteks toidavad akumulaatorite patareid vooluga allveelaevade mootoreid nende veealuste sõitude ajal. Akumulaatoreid kasutatakse autode valgustamiseks nende seisu ajal ja automootori käivitamiseks; laialdaselt kasutatakse akumulaatoreid mitmesugustel laboratoorsetel mõõtmistel.

37. Ohmi seadus vooluringi osa kohta. Kõik need elektrivoolu poolt tekitatavad nähtused (juhi soojenemine, magnetvälja tekki-

mine, keemiline toime), millega on seletatav tema suur praktiline tähtsus, muutuvad intensiivseks ainult küllalt tugevate voolude puhul. Nende protsesside intensiivsust saab reguleerida ainult voolu tugevuse muutmise abil. Kuid selleks, et osata reguleerida vooluringis voolu tugevust, peame teadma, millest ja kuidas ta sõltub.



Joon. 55. Katse skeem Ohmi seaduse kontrollimiseks vooluringi osas.

Läbigu vool juhti *BC* (joon. 55). Mõõdame juhti läbiva voolu tugevust ampermeetriga *A* ja juhi otstel olevat pinget voltmeetriga *V*.

Vahetades vooluringi lülitatud vooluallikaid, paneme tähele, et muutub nii vooluringi läbiva voolu tugevus kui ka pinge juhi otstel. Seejuures suureneb voolu tugevus juhis nii mitu korda, kui mitu korda suureneb pinge antud juhi otstel.

Kui võtta mingi teine juht *DE* ja korrata sellega samu katseid, siis näeme, et voolu tugevus jääb ka selles juhis rangelt võrdeliseks pingega juhi otstel.

Tähistades pinget juhi otstel tähega *U* ja voolu tähega *I*, võib voolu sõltuvust pingest väljendada järgmise valemiga:

$$I = kU. \qquad (1)$$

Selles valemis on tähega k tähistatud võrdetegur voolu ja pinge vahel. Nagu katsed näitavad, sõltub k suurus juhi omadustest: mida suurem on k, seda suurem on voolu tugevus juhis ühe ja sellesama pinge juures. Antud juhi puhul on k voolu tugevuse ja pinge kõigi väärtuste juures konstantne, kui ainult juhi temperatuur seejuures ei muutu. Seetõttu iseloomustab k antud juhi omadusi ja teda nimetatakse elektrijuhtivuseks ehk juhi juhtivuseks.

Valemiga (1) väljendatud sõltuvust voolu ja pinge vahel võib sõnastada järgmiselt:

voolu tugevus juhis on võrdeline juhi juhtivusega ja pingega selle otstel.

Voolu tugevuse ja pinge vaheline sõltuvus avaldub graafiliselt sirgjoone kujul; seepärast öeldakse tavaliselt, et metallilistes juhtides voolu tugevus muutub olenevalt pingest lineaarse seaduspärasuse järgi.

Juhtivuse pöördarvu

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

nimetatakse juhi takistuseks. Avaldades valemis (1) juhtivuse k takistuse R abil, saame:

$$I = \frac{U}{R},$$

s. o. *voolu tugevus vooluringi antud osas on võrdeline pingega sellel osal ja pöördvõrdeline selle osa takistusega.*

Esimesena avastas selle seaduspärasuse saksa teadlane Ohm 1827. a. ja seda nimetatakse Ohmi seaduseks.

Georg Ohm (1787—1854) oli saksa füüsik. Ta avastas teoreetiliselt ja tõestas katseliselt seaduse, mis väljendab seost vooluringis voolu tugevuse, elektromotoorse jõu ja vooluringi takistuse vahel. See seadus nimetati Ohmi seaduseks.

Vaatamata voolu erinevale olemusele metallides ja elektrolüütides on ka elektrolüütide voolu tugevuse ja pinge vaheline sõltuvus samasuguse lineaarse iseloomuga. Ainult gaasides ei väljendu voolu ja pinge vaheline sõltuvus Ohmi seaduse järgi. Gaaside puhul on see olenevus märksa keerulisem.

38. Pinge ja pingelangus. Teades pinge suurust juhi otstel ja voolu tugevust juhis, võib Ohmi seaduse järgi arvutada juhi takistuse:

$$R = \frac{U}{I}.$$

Suur praktiline tähtsus on järgmisel võrdusel, mis saadakse Ohmi seadusest:

$$U = IR.$$

Pinge U vooluringi antud osal on võrdeline vooluringi selle osa takistusega.

Suurust IR nimetatakse vooluringi antud osa pingelanguseks.

Tuleb märkida, et mõisted «pinge» ja «pingelangus» on üheväärsed ainult neil juhtudel, kui vooluringi antud osas kulgeva voolu töö tulemuseks on ainult juhi soojenemine.

Nii näiteks on lahtise vooluringi puhul vooluallika poolustel pinge, kuid pingelangusest siin rääkida ei saa.

39. Takistusühik. Võttes avaldises

$$R = \frac{U}{I}, \text{ kus}$$

$U = 1$ pingeühik, $I = 1$ voolu tugevuse ühik, saame $R = 1$ takistusühik.

Takistusühikuks loetakse niisuguse juhi takistust, mida läbib vool tugevusega 1 amper, kui juhi otstel on pinge 1 volt. Niisugust takistusühikut nimetatakse oomiks (Ω).

Juhtide takistuste mõõtmiseks on eelkõige vajalik valida ühik, ehk nagu öeldakse, takistuse etaloon.

Rahvusvaheline elektrikute kongress 1908. a. Londonis otsustas valida 1-oomise takistuse etalooniks 106,3 cm pikkuse ning kogu oma pikkusel ühtlase ristlõike pindalaga, mis võrdub 1 mm², elavhõbedasamba takistuse jää sulamistemperatuuril.

Sel viisil kindlaksmääratud takistuse etalooni nimetatakse rahvusvaheliseks oomiks.

Elavhõbeda valikul oomi etalooni kindlaksmääramiseks lähtuti peamiselt sellest, et võrreldes teiste ainetega on elavhõbedat kõige lihtsam saada keemiliselt puhtana, teda on kerge hoida püsival temperatuuril ja et elavhõbedal kui vedelikul ei esine elastseid sisemisi pingeid.

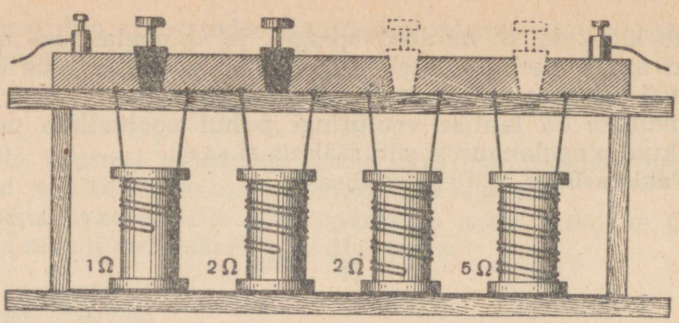
Praktikas kasutatakse peamiselt traat-etaloone, mis koosnevad ühest või mitmest poolist, milledele on keritud tuntud takistusega isoleeritud traat.

Takistuste täpsel mõõtmisel võrreldakse ja kontrollitakse hoolikalt traat-etaloone normaalse elavhõbe-etalooni abil.

40. Takistusmagasin. Kindla suurusega takistuste komplekti, mille abil saab võrrelda mõõdetavaid takistusi, nimetatakse takistusmagasiniks. Joonisel 56 on kujutatud niisuguse riista ehitus. Kasti kaanele on paigutatud rida metallplaadikesi, mida võib üksteisega ühendada nende vahele pistetavate metallpulgakeste abil.

Kasti sees on traatpoolid, millede otsad on ühendatud plaadikeste alla. Nagu jooniselt näha, on plaadid paarikaupa ühendatud tuntud takistustega.

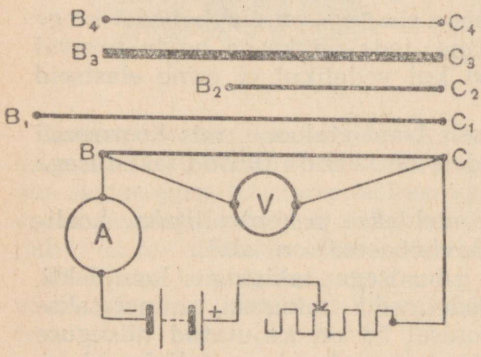
Kui riist on ühendatud vooluringi äärmiste klemmide kaudu ja metallpulgakesed on plaadikeste vahelt välja võetud, siis läbib vool järjestikku kõik takistused. Kui plaadikeste vahele on asetatud metallpulgakesed, siis peaaegu kogu vool läheb läbi paksude vaskplaatide ja -pulgakeste ja ainult tühine osa voolust, mida võib



Joon. 56. Takistusmagasin.

jätta arvestamata, hargneb ning läbib takistusi. Võttes ühe või teise metallpulgakese või mitu neist välja, võime magasini abil saada erinevaid takistusi sõltuvalt magasinis leiduvate takistuste suurusest.

41. Takistuse sõltuvus juhi materjalist ja mõõtmetest. Ühendades ühe ja sama vooluallikaga erinevatest materjalidest ja erineva pikkusega ning erineva jämedusega juhte, paneme tähele, et vooluringi läbivad erineva tugevusega voolud. Erinevad juhid avaldavad voolule erinevat takistust.



Joon. 57. Katse skeem takistuse sõltuvuse uurimiseks juhi mõõtmetest ja materjalist.

Lülitame vooluallika vooluringi mingisuguse juhi BC ja määrame ampermeetri A abil kindlaks vooluringi läbiva voolu tugevuse (joon. 57). Asendades selle juhi mingi teise pikema juhiga B_1C_1, mis on samast materjalist ja sama ristlõike pindalaga, paneme tähele, et vool nõrgeneb. Kui võtta aga juht B_2C_2, mis on esimesest lühem, siis vool muutub tugevamaks.

Täpselt samuti muutub ühepikkuste juhtide puhul voolu tugevus suuremaks, kui võtta samast materjalist, aga jämedam traat B_3C_3, väiksema ristlõike pindalaga traadi B_4C_4 puhul on aga vool nõrgem.

Seega oleneb juhi takistus tema mõõtmeist. Takistuste suurusi võib arvutada ampermeetri ja voltmeetri näitude kaudu.

Kui võtta kaks mõõtmetelt täiesti ühesugust traati, ühe rauast ja teise vasest, siis näeme, et ühe ja sama vooluallika puhul läbib raudtraati tunduvalt nõrgem vool kui vasktraati. Järelikult on

ühesuguste mõõtmetega, kuid erinevatest materjalidest valmistatud juhtidel erinevad takistused.

Mitmesuguste juhtide takistuste uurimine viis järgmisele järeldusele:

juhi takistus on võrdeline tema pikkusega, pöördvõrdeline ristlõike pindalaga ja sõltub materjalist, millest koosneb juht. Juhi takistus sõltub ka ta temperatuurist.

Kui tähistada juhi takistust teatud temperatuuril tähega R, siis võib kirjutada:

$$R = \varrho \frac{l}{S}, \qquad (1)$$

kus l on juhi pikkus ja S juhi ristlõike pindala. Kreekakeelse tähega ϱ (roo) tähistatud suurus iseloomustab juhtide elektrilisi omadusi. Seda suurust nimetatakse **eritakistuseks**. Eritakistuse arvuline suurus sõltub ühikutest, milledes on mõõdetud juhi pikkus ja ristlõike pindala.

Tehnikas mõõdetakse juhi pikkust meetrites, ristlõike pindala aga ruutmillimeetrites.

Võrdusest (1) saame 1 meetri pikkuse ja 1 mm²-se ristlõike pindalaga juhi jaoks $\varrho = R$. See tähendab, *et eritakistus on arvuliselt võrdne sellest materjalist 1 m pikkuse ja 1 mm² ristlõike pindalaga juhi takistusega.*

Kui valemis $R = \varrho \frac{l}{S}$ mõõta suurust l meetrites, S ruutmillimeetrites ja R oomides, siis saame ϱ jaoks dimensiooni: $\Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$.

Allpool toodud tabelis on antud mitmesuguste materjalide eritakistus 20° C temperatuuril.

Juhi materjal	Eritakistus $\Omega \frac{\text{mm}^2}{\text{m}}$
Hõbe	0,016
Vask	0,017
Alumiinium	0,029
Nikeliin (sulam) 62% Cu + 18% Ni + 20% Zn	0,40—0,44
Manganiin (sulam) 84% Cu + 4% Ni + 12% Mn	0,42
Konstantaan (sulam) 60% Cu + 40% Ni	0,40—0,51
Nikroom (sulam) 57% Ni + 16% Cr + 26% Fe + 1% Mn	1,1
Fekraal (sulam) 80% Fe + 14% Cu + 6% Al	1,2
Kromeel (sulam)	1,3
Kaar- ja hõõglampide süsi	40—50

Nagu tabelist näha, on väikseim eritakistus keemiliselt puhtal hõbedal ja vasel. Tehnilisteks eesmärkideks kasutatakse kõige sagedamini vaske.

Metallide eritakistust mõjutavad väga tunduvalt lisandid. Nii näiteks suurendab 0,05%-line süsiniku lisand keemiliselt puhta vase takistust 33% võrra, 0,13%-line fosfori lisand suurendab aga vase takistust 176% võrra. Sellega on täiesti selge, kui suur tähtsus on elektrotehnikas keemiliselt puhtal vasel.

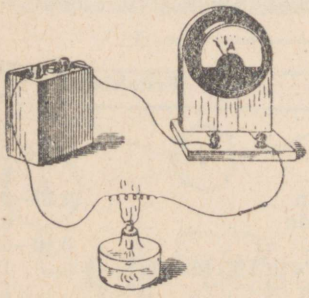
Metallilistel sulamitel on tunduvalt suurem eritakistus kui puhastel metallidel, millest need sulamid koosnevad.

Käesoleval ajal kasutatakse tehnikas laialdaselt tahkeid aineid, millede elektrijuhtivus on juhtide ja dielektrikute vahepealne. Neid aineid nimetatakse p o o l j u h t i d e k s. Pooljuhtideks on näiteks vaskoksiid, seleen, talliumsulfiid ja paljud teised ained.

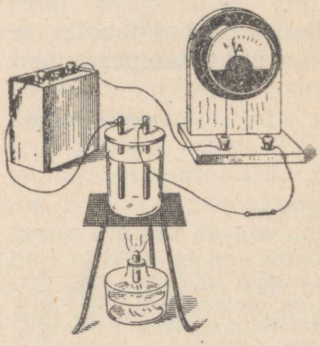
Harjutus 7. Lähtudes materjalide juhtivuse elektroniteooria alustest, selgitage juhi takistuse olenevust juhi pikkusest, ristlõike pindalast ja materjalist.

42. Juhi takistuse sõltuvus temperatuurist. Lülitame vooluringi järjestikku elektrilambi ja spiraali keeratud raudtraadi. Kuumutades spiraali põletil, näeme, et lambi helendumine muutub nõrgemaks. Kui lülitada vooluringi lambi asemele ampermeeter (joon. 58), siis näitab see, et raudtraadist spiraali kuumutamisel väheneb voolu tugevus vooluringis. Siit järgneb, et raudtraadi kuumutamisel suureneb selle takistus.

Asendades sellel katsel raudtraadi mistahes teisest metallist traadiga, näeme, et kõigi metallide puhul kuumutamisel takistus suureneb; ühtede juures rohkem, teiste juures vähem. Puhaste metallide puhul on takistuse muutumine temperatuuri toimel tunduv, sulamite puhul aga väiksem. On olemas erisulameid, millede puhul takistus peaaegu üldse ei muutu temperatuuri tõusmisel; niisugusteks sulamiteks on näiteks konstantaan, manganiin jt. Nendest sulamitest valmistatud traate kasutatakse mitmesuguste mõõduriistade valmistamisel.



Joon. 58. Seade, mille abil uuritakse metallist juhtide takistuse sõltuvust temperatuurist.



Joon. 59. Elektrolüüdi soojenemisel suureneb voolu tugevus vooluringis.

Teisiti on aga elektrolüütides. Kui lülitada vooluringi raudtraadi asemele mingi elektrolüüt (joon. 59), siis paneme tähele, et elektrolüüdi kuumutamisel voolu tugevus järjest suureneb. See tähendab, et elektrolüütide takistus väheneb temperatuuri tõusmisel.

Juhi takistuse muutumise suhet juhi esialgse takistusega 0° C juures, kui juht soojeneb 1° C võrra, nimetatakse takistuse temperatuuri-koefitsiendiks.

Kui juhi takistus 0° C juures on R_0, temperatuuril t aga R_t, siis takistuse temperatuuri-koefitsient määratakse valemist:

$$\alpha = \frac{R_t - R_0}{R_0 t}.$$

Mitmesuguste metalsete juhtide takistuse temperatuuri-koefitsiendid on toodud järgnevas tabelis:

Juht	α	Juht	α
Teras	0,0050	Plaatina	0,0025
Volfram	0,0046	Elavhõbe	0,0027
Alumiinium	0,0042	Nikeliin	0,0003
Hõbe	0,0040	Nikroom	0,00030
Vask	0,0040	Konstantaan	0,00005
Tsink	0,0039	Manganiin	0,000015
Seatina	0,0041		

Juhi takistuse sõltuvust temperatuurist kasutatakse temperatuuri mõõduriistade — takistustermomeetrite ehitamisel. Lihtsaim takistustermomeeter kujutab endast vilgukivist plaadil olevat peenest plaatinatraadist mähist (joon. 60), mille takistus erinevatel temperatuuridel on varem kindlaks määratud. Takistustermomeeter asetatakse selle keha sisse, mille temperatuuri tahetakse määrata (näiteks ahju). Mõõtes termomeetri traadi takistuse, võib määrata keha temperatuuri. Plaatinatermomeetrid on eriti sobivad kõrgete ja madalate temperatuuride mõõtmiseks, mida ei saa mõõta elavhõbetermomeetrite abil.

Joon. 60. Takistustermomeeter.

Plaatinatermomeetritega saab mõõta temperatuure —200° kuni +600° C piirides kuni 0,0001° C täpsusega.

Väga madalatel temperatuuridel pannakse paljude metallide puhul tähele huvitavat nähtust: alates mingist temperatuurist muutub nende metallide takistus järsku, väheneb hüppeliselt peaaegu nullini. Seda nähtust nimetatakse ülijuhtivuseks. Temperatuurid, mille juures metallid muutuvad ülijuhtivaiks, on väga madalad; nii näiteks elavhõbedal on see 4,12° K (absoluutse temperatuuri skaala järgi), inglistinal 3,7° K, seatinal 7,2° K.

Harjutus 8.

1. Kujutage graafiliselt vooluringi läbiva voolu tugevuse sõltuvus pingest.
2. Nikeliinjuhet, mille pikkus on 10 m ja ristlõike pindala 0,5 mm², läbib vool tugevusega 1 A. Kujutage graafikul pingelangus piki juhet, kandes horisontaalteljele juhtme pikkusühikud ja vertikaalteljele pinge.

3. Arvutada ümmarguse ristlõikega juhtme eritakistus, kui juhtme läbimõõt on 1 cm ja selle juhtme 2,5 m pikkuse tüki takistus on 0,00055 Ω.

4. Arvutada elavhõbeda eritakistus $0^\circ C$ juures.

5. Kahel raudtraadi tükil on sama kaal, kuid üks neist traatidest on teisest 10 korda pikem. Kummal tükil on suurem takistus? Mitu korda suurem?

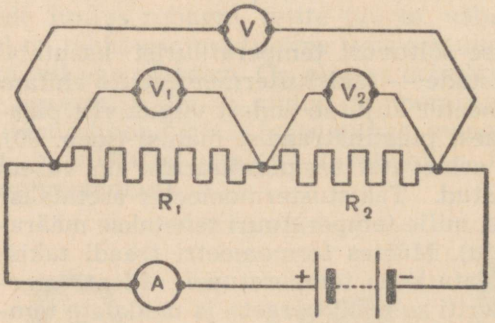
6. Kui palju tuleb võtta konstantaantraati, mille ristlõike pindala on 1 mm^2, etalooni valmistamiseks, mille takistus on 2 Ω?

7. Manganiintraadist valmistatud takistuse-etaloonil on $15^\circ C$ juures takistus 100 Ω. Kui suur on selle etalooni takistus $5^\circ C$ juures?

8. Kui palju vajatakse vaske 10 km pikkuseks juhtmeks, mille takistus peab olema 10 Ω? Vase tihedus $D = 8{,}5$ g/cm^3.

43. Juhtide järjestikune ühendus. Praktikas esinevad elektrivooluringid ei koosne tavaliselt mitte ühest juhist, vaid mitmesuguste juhtide süsteemist, mis võivad olla omavahel erinevalt ühendatud. Teades iga juhi takistust ja nende ühendamise viisi, võib alati arvutada vooluringi takistuse.

Vaatleme lihtsat vooluringi, mis koosneb vooluallikast ja kahest järjestikku ühendatud juhist (joon. 61). Voolu tugevus niisuguse



Joon. 61. Juhtide järjestikune ühendus.

vooluringi kõigis osades on ühesugune, nagu me teame §-st 27. Pinge iga juhi otstel on aga erinev.

Olgu I voolu tugevus vooluringis, R_1 ja R_2 juhtide takistused, pinged vastavalt nende juhtide otstel aga U_1 ja U_2, mida mõõdetakse voltmeetriga V_1 ja V_2.

Ohmi seaduse põhjal võib kirjutada:

$$U_1 = IR_1; \quad (1)$$

$$U_2 = IR_2. \quad (2)$$

Jagades võrduse (1) võrdusega (2), saame:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{R_1}{R_2}.$$

Juhtide järjestikusel ühendamisel pinged juhtidel on võrdelised nende takistustega.

Ainult pingete niisuguse jaotumise korral osutub võimalikuks ühesugune voolu tugevus vooluringi kõigis osades.

Üldine pinge U mõlemal juhil, mida mõõdetakse voltmeetri V abil, võrdub pingete summaga kummalgi juhil:

$$U = U_1 + U_2;$$

$$U = IR_1 + IR_2 = I(R_1 + R_2). \qquad (3)$$

See võrdus järeldub pinge definitsioonist, kuna pinge on elektrilaengu poolt tema liikumisel vooluringi antud osas tehtava töö ja selle laengu suuruse suhe. Tõepoolest, elektrilaengu poolt tehtav töö tema liikumisel mööda kogu järjestikust ühendust on võrdne selle üksikutes osades tehtavate tööde summaga.

Tähistame kogu vooluringi takistuse tähega R.

Ohmi seaduse põhjal võib kirjutada:

$$U = IR. \qquad (4)$$

Võrdustest (3) ja (4) järgneb, et

$$R = R_1 + R_2.$$

Täiesti analoogiliselt saab näidata, et n järjestikku ühendatud juhi puhul vooluringi üldtakistus

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \ldots + R_n .$$

Mitmest järjestikku ühendatud juhist koostatud vooluringi takistus võrdub üksikute juhtide takistuste summaga.

N ä i d e: Määrata vooluringi takistus, mis koosneb kahest juhist, kumbki 0,5 Ω, leeklambist, mille takistus on 1,5 Ω, ja reostaadist takistusega 2,3 Ω. Määrata samuti pinge igal takistusel, kui vooluringi läbib vool tugevusega 30 A.

Vooluringi üldtakistus $R = 0{,}5 + 0{,}5 + 1{,}5 + 2{,}3 = 4{,}8\ \Omega$.

Pinge kummalgi juhil: $0{,}5 \cdot 30 = 15$ V

ja leeklambil:

$$1{,}5 \cdot 30 = 45 \text{ V}.$$

Pinge reostaadil:

$$2{,}3 \cdot 30 = 69 \text{ V}.$$

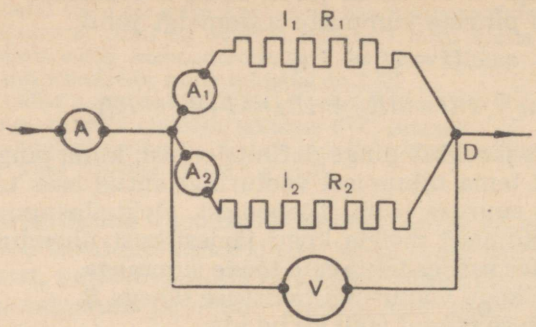
Üldine pinge kogu vooluringi otstel:

$$69 \text{ V} + 45 \text{ V} + 15 \cdot 2 \text{ V} = 144 \text{ V} = 30 \text{ A} \cdot 4{,}8\ \Omega.$$

44. Juhtide paralleelne ühendus. Vaatleme nüüd joonisel 62 kujutatud juhtide ühendust. Niisugust ühendust nimetatakse p a r a l l e e l s e k s.

Juhtide paralleelse ühenduse puhul jaguneb vool samuti nagu kahte paralleelsesse kanalisse jagunev veevool. Vee hulk, mis voolab igas sekundis läbi peakanali ristlõike, on võrdne veehulkade summaga, mis voolab ühe sekundi jooksul läbi kummagi harukanali ristlõike. Analoogiliseks osutub nähtus juhtide paralleelsel ühendu-

sel. Lülitades ampermeetrid vooluringi hargnemata ossa ja igasse üksikusse harusse, veendume, et voolu tugevus I vooluringi harg-



Joon. 62. Juhtide paralleelne ühendus.

nemata osas võrdub voolu tugevuste summaga üksikutes paralleelselt ühendatud juhtides:

$$I = I_1 + I_2. \tag{1}$$

See katse tõendab, et statsionaarse voolu puhul ei kuhju elektrilaenguid hargnemispunktidesse, vaid niipalju kui neid tuleb hargnemispunktidesse, niisama palju läheb sealt ka ära.

Kui tähistada vooluringi kummagi haru takistus R_1 ja R_2, pinge aga tähega U, siis võib Ohmi seaduse põhjal kirjutada:

$$I_1 = \frac{U}{R_1}; \qquad I_2 = \frac{U}{R_2} \tag{2}$$

ehk

$$U = I_1 R_1; \qquad U = I_2 R_2. \tag{3}$$

Võrduse (3) paremad pooled on võrdsed:

$$I_1 R_1 = I_2 R_2, \tag{4}$$

millest

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{R_2}{R_1},$$

s. t. *voolutugevused vooluringi hargnenud osa üksikutes harudes on pöördvõrdelised nende takistustega.*

Liites võrduse (2) paremad ja vasakud pooled, saame

$$I_1 + I_2 = \frac{U}{R_1} + \frac{U}{R_2} = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right).$$

Kuna

$$I_1 + I_2 = I,$$

siis

$$I = U\left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}\right). \qquad (5)$$

Tähistades hargmiku üldtakistuse tähega R, võib Ohmi seaduse põhjal kirjutada:

$$I = U\frac{1}{R}. \qquad (6)$$

Võrdustest (5) ja (6) järgneb, et

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}, \qquad (7)$$

s. t. *paralleelselt ühendatud juhtide üldtakistuse pöördarv võrdub üksikute juhtide takistuste pöördarvude summaga.*

Määrame seosest (7) üldtakistuse R ja võrdleme selle suurust vooluringi üksikute harude takistustega:

$$R = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}. \qquad (8)$$

Olgu $R_1 < R_2$.

Kuna $R_2 < (R_1 + R_2)$, siis $\frac{R_2}{R_1+R_2}$ osutub lihtmurruks ja järelikult $R < R_1$.

Hargmiku üldtakistus on väiksem vähima takistusega haru takistusest.

On lihtne näidata, et kui hargmikus on mitu juhti takistustega $R_1, R_2, R_3, \ldots R_n$, siis sel juhul:

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \ldots + \frac{1}{R_n}. \qquad (9)$$

Kui juhtide takistuse asemel kasutada nende juhtivust k, k_1, k_2, $\ldots$, k_n, siis võib seoses (9) kirjutada järgmisel kujul:

$$k = k_1 + k_2 + \ldots + k_n,$$

s. t. *mitmest paralleelsest osast koosneva vooluringi juhtivus võrdub tema osade juhtivuste summaga.*

Kui üksikute harude takistused on omavahel võrdsed:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \ldots = r,$$

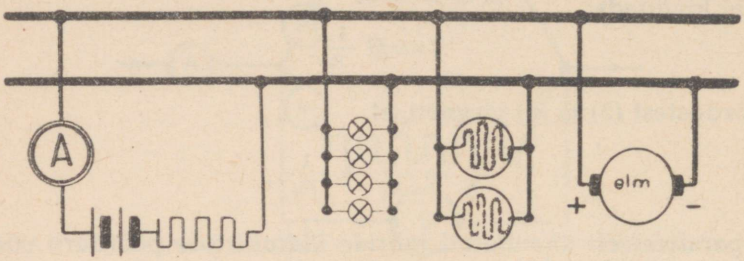
siis saame seosest (9)

$$\frac{1}{R} = n\frac{1}{r}, \text{ millest järeldub, et}$$

$$R = \frac{r}{n}.$$

Seega on paralleelselt ühendatud n võrdsest takistusest koosneva vooluringi üldtakistus n korda väiksem igast üksikust takistusest.

Juhtide paralleelne ühendus osutubki peamiseks lülitusviisiks paljude voolutarbijate korral. Mingisugust suurt asustatud punkti



Joon. 63. Mitmesuguste elektrienergia tarbijate paralleelne võrku ühendamine.

vooluga toitev vooluring kujutab endast paralleelühenduste süsteemi. Pealiin jaguneb paralleelseteks liinideks, mis lähevad üksikutesse rajoonidesse. Need rajooni toitvad liinid hargnevad omakorda väiksemateks liinideks, mis teenindavad üksikuid tänavaid, hooneid, ettevõtteid. Ja ka need hargnevad omakorda veelgi väiksemateks harudeks, kuni lõpuks viimastesse harudesse lülitatakse elektrienergia vahetud tarbijad: elektrimootorid tehaste tsehhides, elektrilambid hoonetes, elektrimootorid trammivagunites, trollibussides, metroovagunites jne.

Ühte ja samasse elektrivoolu ringi võib paralleelselt ühendada väga mitmesuguseid tarbijaid. Nii on joonisel 63 näidatud elektrilampidest, soojendusriistadest, elektrimootoritest ja laadima pandud akumulaatoritest koosnev paralleelne lülitus.

Tuleb aga silmas pidada, et antud vooluringi paralleelselt lülitatud vooluvastuvõtjad tuleb kõik ehitada ühele ja samale pingele, mis vastab pingele vooluringis.

45. Vooluringi arvutus. Vooluringi arvutuse peamine ülesanne seisab tema üksikutes harudes kulgeva voolu tugevuse määramises, arvestades antud pinget ja üksikute juhtide takistusi.

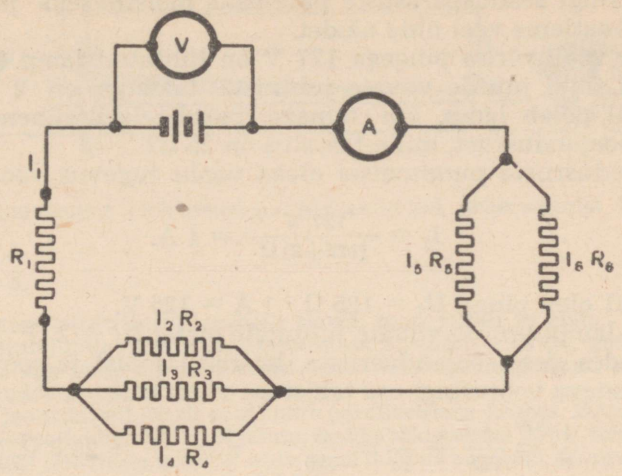
Vaatleme joonisel 64 kujutatud vooluringi.

Olgu meil teada vooluringi toitev üldpinge U ja vooluringi lülitatud takistused R_1, R_2, $R_3 \ldots R_6$. Ampermeetri takistust ei arvestata. Tarvis on leida voolu tugevused I_1, I_2, $I_3 \ldots I_6$.

Esmalt peame kindlaks tegema, mitmest järjestikku ühendatud osast koosneb meie vooluring. On kerge näha, et niisuguseid osasid on kolm, kusjuures teine ja kolmas osa kujutavad endast hargmikke. Tähistame oma vooluringi kolme järjestikku ühendatud osa takistusi vastavalt R_I, R_{II}, R_{III}. Sel korral on kogu vooluringi takistus R võrdne nende osade takistuste summaga:

$$R = R_I + R_{II} + R_{III}.$$

Vooluringi kogutakistust on tingimata tarvis teada, kuna antud üldpinge U on seotud ainult vooluringi üldtakistusega R. Kasuta-



Joon. 64. Vooluring arvutuseks.

des Ohmi seadust, leiame me vooluringis kulgeva voolu tugevuse I:

$$I = \frac{U}{R}.$$

On lihtne näha, et $I = I_1$.

Selleks et leida voolu tugevused üksikutes harudes, tuleb esmalt leida pinged vooluringi üksikutes järjestikustes osades.

Ohmi seaduse järgi on:

$$U_1 = IR_I\ ;\ U_2 = IR_{II}\ ;\ U_3 = IR_{III}.$$

Takistused R_I ja R_{II} on kergelt leitavad paralleelse ühenduse seaduse järgi.

Teades juba pingeid üksikutes järjestikustes osades, leiame voolu tugevused üksikuis harudes:

$$I_2 = \frac{U_2}{R_2}\ ;\ I_3 = \frac{U_2}{R_3}\ ;\ I_4 = \frac{U_2}{R_4}\ ;\ I_5 = \frac{U_3}{R_5}\ ;\ I_6 = \frac{U_3}{R_6}.$$

Meile antud ülesanne ongi seega täielikult lahendatud.

Teistel juhtudel võib vooluringi arvutus koosneda järgmistest ülesannetest:

a) vooluringi üksikute osade takistuste arvutamisest antud pinge, voolu tugevuste ja teiste osade takistuste järgi;

b) vajaliku pinge arvutamisest teadaolevate takistuste ja voolu tugevuse järgi. Kuid arvutuse meetod jääb ikka samaks: kõigil juhtudel on see rajatud Ohmi seadusele.

Vooluringi seaduspärasuste paremaks mõistmiseks ja omandamiseks vaatleme veel ühte näidet.

Linna vooluvõrku pingega 127 V on lülitatud lamp takistusega 125 Ω. Lambi juurde viivate juhtmete takistus on 2 Ω. Millise pinge all põleb lamp, kui temaga paralleelselt ühendada veel elektri soojendusriist, mille takistus on 25 Ω?

Soojendusriista puudumisel oleks voolu tugevus vooluringis:

$$I_1 = \frac{127\ \text{V}}{(125+2)\ \Omega} = 1\ \text{A}.$$

Lambil olev pinge $U_1 = 125\ \Omega \cdot 1\ \text{A} = 125\ \text{V}$.

Pinge lambi juurde viivate juhtmete otstel $U_1 = 2\ \Omega \cdot 1\ \text{A} = 2\ \text{V}$.

Lülitades sisse soojendusriista, leiame lambist ja soojendusriistast koosneva vooluringi osa takistuse võrdusest:

$$\frac{1}{r} = \frac{1}{125} + \frac{1}{25} = \frac{6}{125}; \qquad r = \frac{125}{6} \approx 20{,}8\ \Omega.$$

Kogu vooluringi takistus on aga sel juhul:

$$20{,}8\ \Omega + 2\ \Omega = 22{,}8\ \Omega.$$

Vooluringi läbiva voolu tugevus:

$$I_2 = \frac{127\ \text{V}}{22{,}8\ \Omega} \approx 5{,}6\ \text{A}.$$

Pinge toitejuhtmetes tõusis ja võrdub nüüd:

$$U_2 = 2\ \Omega \cdot 5{,}6\ \text{A} = 11{,}2\ \text{V}.$$

Lambil ja soojendusriistal aga vähenes pinge ning sai võrdseks vahega:

$$127\ \text{V} - 11{,}2\ \text{V} = 115{,}8\ \text{V}.$$

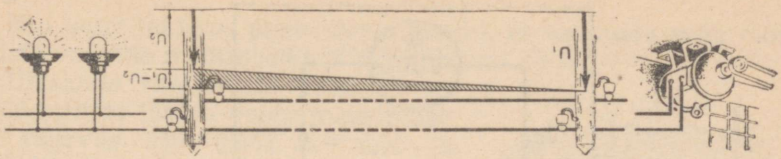
Sel viisil vähendab soojendusriista sisselülitamine lambil olevat pinget enam kui 9 voldi võrra. Selle juures väheneb lambi helendumine, mida on sageli ka tegelikkuses märgata.

Seega, mida enam pinget läheb juhtmetele, seda väiksemaks kujuneb pinge lambil ja soojendusriistal. Sellepärast nimetatakse pinget juhtmetel pingekaoks. See on seda suurem, mida suurem on juhtmete takistus ja mida tugevam vool neid läbib.

Eriti suured on pingekaod pikkades liinides, mis viivad voolu elektrijaamast kümnete ja sadade kilomeetrite kaugusele.

Joonisel 65 on näidatud pingelangus juhtmetes elektrienergia ülekandmisel generaatorist tarbijani.

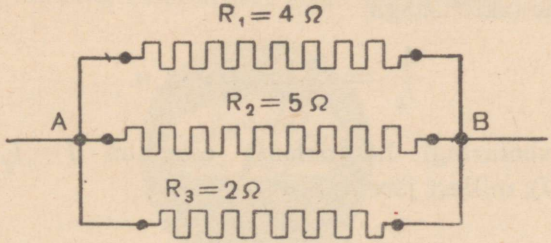
U_1 on pinge ülekandeliini alguses, joonisel näidatud tinglikult noolega, U_2 — pinge ülekandeliini lõpus ja $U_1—U_2$ — pingelangus liini juhtmetes.



Joon. 65. Pingelangus elektrienergia ülekandmisel generaatorist tarbijani.

Harjutus 9.

1. Joonistage elektriinstallatsiooni skeem toas, milles te elate.
2. Toa elektrijuhtmestikku on lülitatud paralleelselt 4 lampi, igaüks takistusega 330 Ω. Iga lamp tarvitab voolu 0,3 A. Määrata magistraali läbiv vool ja antud lampide grupi takistus.
3. Grupi jaotuskilbilt läheb vool kahte paralleelsesse gruppi. Esimeses grupis on paralleelselt ühendatud 10 lampi, igaüks takistusega 250 Ω, teises grupis 5 lampi, igaüks takistusega 300 Ω. Mitu amprit läbib kumbagi gruppi, kui jaotuskilbini tuleva voolu tugevus on 6,8 A?
4. Punktide *A* ja *B* vahele on lülitatud kolm takistust (joon. 66). Määrata vooluringi hargmiku kogutakistus ja pinge vooluringi hargmiku otstel, kui voolu tugevus vooluringi hargnemata osas on 5 A.



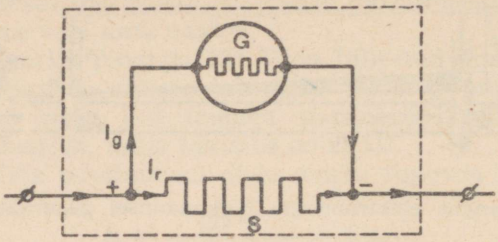
Joon. 66. Vooluring arvutuseks.

5. Vool tugevusega 1 A läbib kahte haru, millest ühel harul on takistus 4,5 Ω ja seda läbib üks kümnendik peavoolust. Määrata teise haru takistus ja vooluringi hargmiku üldtakistus.
6. Vooluallika pinge on 100 V. Tema magistraaljuhtme takistus on 100 oomi ja sellesse magistraali on lülitatud paralleelselt juhid takistusega 20 Ω, 40 Ω, 50 Ω ja 200 Ω. Kui suur on magistraali läbiva voolu tugevus?

46. Mõõduriistade šuntimine. Vooluringe läbivate voolude tugevusi mõõdetakse ampermeetritega. Nendel mõõduriistadel peab olema võimalikult väike takistus, kuna nad lülitatakse vooluringi järjestikku kõigi teiste takistustega, mida läbib mõõdetav vool.

Ampermeeter kujutab endast voolu suhtes väga tundlikku mõõduriista *G* (galvanomeeter), mis on varustatud temaga paralleelselt ühendatud juhiga *S* (joon. 67). Niisugust lisaharu nimetatakse

šundiks. Valides vastava takistusega šundi, võib valmistada väikese takistusega ampermeetri, mis sobib nõutava voolu tugevuse mõõtmiseks.



Joon. 67. Ampermeetri ehituse skeem.

Olgu galvanomeetri takistus R, galvanomeetrit läbiva voolu tugevus I_g, šundi takistus r ja voolu tugevus šundis I_r. Olgu veel galvanomeetri takistus n korda suurem šundi takistusest, s. o.

$$\frac{R}{r} = n.$$

Kahes paralleelselt ühendatud juhis on voolud pöördvõrdelised nende juhtide takistustega:

$$\frac{I_r}{I_g} = \frac{R}{r} \text{ ehk } I_r = I_g n.$$

Peavool vooluringi hargnemata osas on $I = I_g + I_r$, ehk $I = I_g\,(n + 1)$, millest järeldub, et

$$I_g = \frac{I}{n+1}.$$

Nii on galvanomeetrit läbiva voolu tugevus $(n + 1)$ korda väiksem kui voolu tugevus I peavooluringis.

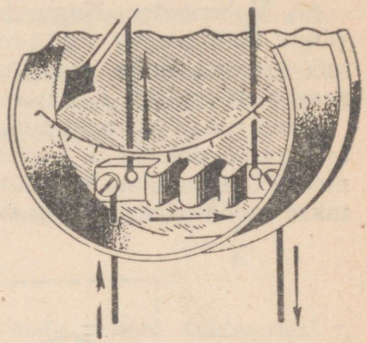
Järelikult võime tänu šundile mõõta oma mõõduriista abil $(n + 1)$ korda tugevamaid voolusid, kui see on arvestatud mõõduriista jaoks. Seejuures registreerib mõõduriist ainult $\frac{1}{n+1}$ suuruse osa mõõdetavast voolust. Seega suureneb skaala ühe jaotuse väärtus $n + 1$ korda.

Joonisel 68 on näidatud šunt, mis on monteeritud galvanomeetriga ühte ja samasse karpi. Sageli varustatakse ampermeetrid ka mitme šundiga, et võimaldada mõõtmisi mitmetes mõõdupiirkondades. Joonisel 69 on kujutatud šunt, mis on lülitatud suurte tugevuste mõõtmiseks (kuni 500 A) määratud mõõduriista külge.

Näide 1. Milliampermeetri skaalal on 150 jaotust: üks jaotus vastab 1 milliamprile (mA), s. o. 0,001 A, mõõduriista takistus on 1 Ω.

Kui suur takistus peab olema šundil, et kasutada seda mõõduriista voolude mõõtmiseks piirides 0 kuni 15 A?

Ülesande tingimuste kohaselt on mõõduriista läbiva voolu maksimaalne tugevus $150 \cdot 0{,}001\ \text{A} = 0{,}15\ \text{A}$. Järelikult peab šundi läbima kogu ülejäänud vool, s. o. $15\ \text{A} - 0{,}15\ \text{A} = 14{,}85\ \text{A}$.



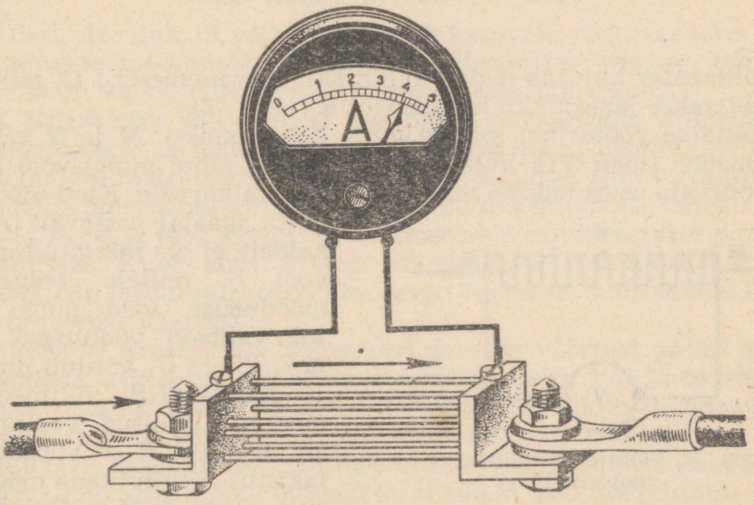
Joon. 68. Galvanomeetri šunt.

Voolu tugevused šundis ja mõõduriistas on pöördvõrdelised nende takistustega. Tähistades šundi otsitavat takistust tähega r, võime kirjutada:

$$\frac{0{,}15\ \text{A}}{14{,}85\ \text{A}} = \frac{r}{1\ \Omega},$$

millest $r = \frac{0{,}15}{14{,}85} = \frac{1}{99}\ \Omega$.

Kuna šundi takistus on väga väike, siis praktiliselt võrdub kogu mõõduriista takistus mõõduriista enda takistusega.



Joon. 69. Tugevate voolude mõõtmiseks määratud mõõduriista šunt.

Näide 2. Arvutada šundi takistus mõõduriista jaoks, mille takistus on 10 Ω ja suurim lubatav vool 5 mA, et oleks võimalik tema abil mõõta voolusid tugevusega kuni 5 A.

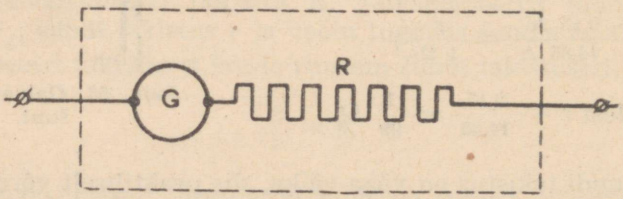
Kuna mõõdetav vool $I = 5$ A, ampermeetri poolile aga on luba-

tav vool $I_1 = 0{,}005$ A, siis šunti läbiv vool $I_2 = I - I_1$ peab olema 4,995 A ja järelikult peab šundi takistus olema

$$r = 10 \cdot \frac{0{,}005}{4{,}995} \approx 0{,}001\ \Omega.$$

47. Voltmeeter. Nagu teada, kasutatakse elektrivoolu ringis pinge mõõtmiseks voltmeetrit. Tuleb tähendada, et enamik mõõduriistu, mida kasutatakse mõõtmisel elektrivoolu ringides, reageerib voolule, s. t. nad on oma printsiibilt voolu mõõduriistad.

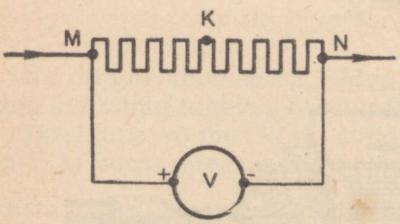
Kuid pinge ja voolu tugevus on vastavalt Ohmi seadusele teineteisega võrdelised ja seetõttu on võimalik mõlemaid neid suurusi mõõta ühe ja sama mõõduriistaga. Ühel juhul ainult gradueeritakse mõõduriista skaala voolu järgi, teisel juhul aga pinge järgi.



Joon. 70. Voltmeetri ehituse skeem.

Voltmeeter kujutab endast tundlikku galvanomeetrit G, millega ühendatakse järjestikku lisatakistus R (joon. 70).

Lülitame vooluringi mingisuguse kahe punkti M ja N vahele voltmeetri (joon. 71). Voltmeetrit läbib sel juhul mingi vool I_1 ja mõõduriista osuti kaldub mingi nurga võrra kõrvale. Kuid mõõduriista skaalal vastavalt osuti kaldele ei ole märgitud mitte vool I_1, millele reageerib mõõduriist, vaid pinge U_1, mis valitseb vooluringi osas MN. Pinge U_1 võrdub pingelangusega I_1R voltmeetris, mis on lülitatud vooluringi antud osale. R on voltmeetri takistus. Kui lülitada mõõduriist punktide M ja K vahele, kusjuures punkt K asub punktide M ja N vahel, siis läbib mõõduriista väiksem vool I_2, see aga tähendab, et ka pinge mõõduriista klemmidel $U_2 = I_2R$ muutub väiksemaks; see pinge märgitakse samuti skaalale. Sel viisil on võimalik mõõduriista skaala gradueerida pingeühikutes. Tavaliselt teostatakse voltmeetri gradueerimist tema näitude võrdlemise teel etaloon-voltmeetri näitudega.



Joon. 71. Voltmeetri lülitamine vooluringi.

Nagu teame, lülitatakse voltmeeter paralleelselt vooluringi selle osaga, millel me tahame pinget mõõta.

Voltmeetri lülimisel vooluringi punktide M ja N vahele (joon. 71) muutub ka nende punktide vaheline pinge, kuna voltmeeter ise moodustab seejuures vooluringis uue haru, mis on mõõdetava haruga paralleelne.

Kui suur peab aga olema voltmeetri takistus, et need pinge muutused vooluringis oleksid tühised?

Olgu juhi takistus punktide M ja N vahel r, voltmeetri takistus aga R. Punktide M ja N vahelise vooluringi osa takistuse R_x pärast voltmeetri sisselülitamist võime leida võrdusest (§ 44):

$$\frac{1}{R_x}=\frac{1}{r}+\frac{1}{R}\,;\quad R_x=\frac{Rr}{R+r},\quad \text{ehk } R_x=r\,\frac{1}{1+\frac{r}{R}},$$

millest on näha, et takistus R_x erineb seda vähem takistusest r, mida väiksem on murd $\frac{r}{R}$, s. o. mida suurem on voltmeetri takistus, võrreldes vooluringi osa takistusega, mille otstel valitsevat pinget mõõdetakse. Kui see tingimus on täidetud, siis erineb voltmeetri näit väga vähe sellest pingest (praktiliselt langeb ühte), mis valitses vooluringi antud osa otstel enne voltmeetri ühendamist.

Sellest järeldub, et voltmeetrit võib kasutada elektromeetri asemel pingete mõõtmiseks vooluringi niisugustes osades, millede takistus on väike, võrreldes voltmeetri enda takistusega.

48. Eeltakistus voltmeetrile. Igasuguse mõõduriista valmistamisel arvutatakse ta teatavale maksimaalsele voolu tugevusele. Seetõttu on igal mõõduriistal kindel voolu või pinge piirväärtus, mida saab tema abil mõõta. On ampermeetreid mõõdupiirkondadega 1 A, 5 A, 10 A, 50 A jne.; samuti on voltmeetreid mitmesuguste pingete mõõtmiseks. Kuid alati osutub võimalikuks suurendada antud mõõduriista mõõdupiirkonda ehk, nagu öeldakse, suurendada tema skaala jaotuse väärtust.

Selleks et suurendada voltmeetri jaotuse väärtust ja sel viisil kohandada teda suuremate pingete mõõtmiseks, kui ta tegelikult on ette nähtud, tuleb ühendada temaga järjestikku mingisugune eeltakistus. Selle eeltakistuse suurus on kergesti arvutatav.

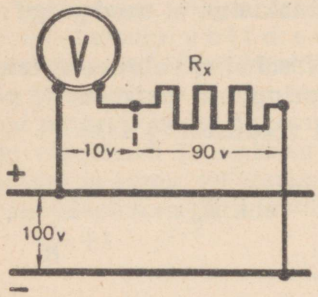
Olgu meil kasutamiseks voltmeeter mõõdupiirkonnaga kuni 10 V, kuid meil on vaja mõõta pingeid kuni 100 V. Kui me lülitame oma voltmeetri vooluringi, mille pinge on 100 V, siis mõõduriista mähis põleb läbi, kuna teda läbib 10 korda tugevam vool kui see, millele ta on arvestatud. Suurimaks mõõdetavaks pingeks võib olla 10 V, ülejäänud 90 V peab minema voltmeetriga järjestikku lülitatud takistuse R_x arvele (joon. 72).

Kuna takistuste järjestikusel ühendamisel on vooluringi üksi-

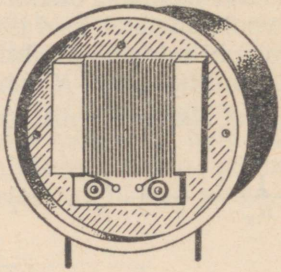
kute osade pinged võrdelised nende osade takistustega (§ 43), siis on eeltakistuse suurust võimalik leida võrde abil:

$$\frac{R_x}{R} = \frac{100-10}{10}\ ;\ R_x = 9R,$$

kus R on voltmeetri takistus.



Joon. 72. Skeem voltmeetri eeltakistuse suuruse arvutamiseks.

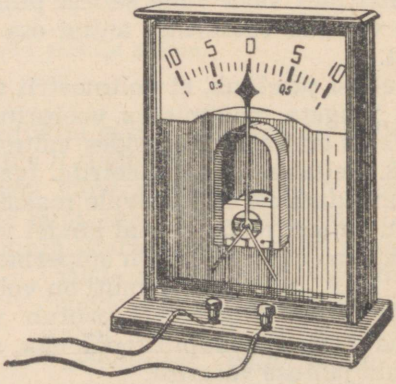


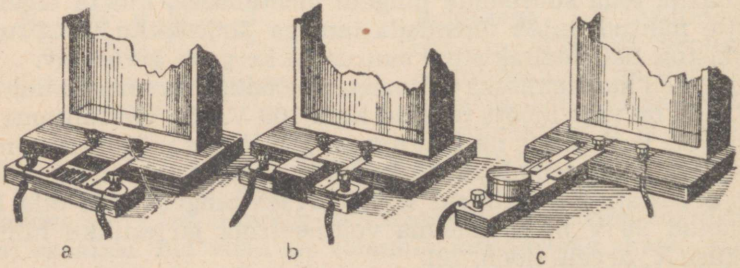
Joon. 73. Mõõduriista sees asuv eeltakistus.

Nii peab eeltakistus olema 9 korda suurem voltmeetri enda takistusest.

Voltmeetri skaala ühe jaotuse väärtus muutub niisuguse lisatakistuse puhul kümme korda suuremaks voltmeetri põhiskaala jaotuse väärtusest.

Joonisel 73 on kujutatud eeltakistus, mis asub mõõduriista sees.





Joon. 74. Kooii universaalgalvanomeeter šuntide ja eeltakistusega.

Tänapäeval valmistatakse peamiselt just laboratooriumide vajadusteks universaalmõõduriistu, mis on varustatud šuntide ja eeltakistuste komplektidega. Niisuguseid mõõduriistu kasutatakse nii voolu tugevuste kui ka pingete mõõtmiseks ja seejuures väga laialdastes piirides. Nii näiteks võib mõõta voolu tugevust alates 1 mA kuni 100 A. Niisama lai on mõõdetavate pingete diapasoon. Joonisel 74 on kujutatud kooli praktikas väga laialt levinud universaalne kooli-galvanomeeter: joonise all on näidatud šundid (*a*, *b*) ja eeltakistus (*c*), mis on ühendatud galvanomeetriga.

N ä i d e: Arvutada, kui suurt eeltakistust on vaja voltmeetrile, mille mõõdupiirkond on 3 V ja takistus 300 Ω, kui selle voltmeetri abil on vaja mõõta pingeid kuni 120 V.

300-oomise takistusega voltmeetri pooli mähist läbiva voolu I suurus 3-voldise pinge puhul on:

$$I = \frac{3\ \text{V}}{300\ \Omega} = 0{,}01\ \text{A}.$$

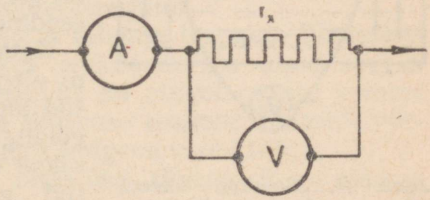
Seda mõõduriista võib läbida vool, mille maksimaalne tugevus on 0,01 A.

Selleks et pinge puhul 120 V läbiks mõõduriista vool tugevusega 0,01 A, peaks mõõduriista takistus olema

$$R = \frac{120}{0{,}01} = 12\,000\ \Omega.$$

Kuna voltmeetri pooli takistus on 300 Ω, siis tuleb pingete mõõtmisel kuni 120 V lülitada voltmeetriga järjestikku eeltakistus suurusega 12 000 — 300 = 11 700 Ω.

49. Juhtide takistuse määramine ampermeetri ja voltmeetri abil. Joonisel 75 on kujutatud mõõduriistade lülitusskeem juhi takistuse mõõtmiseks. Joonisel on järgmised tähistused: ampermeeter — *A*, tema poolt mõõdetava voolu tugevus *I*; voltmeeter — *V*, tema poolt mõõdetava pinge suurus *U* mõõdetava takistuse r_x otstel; mõõdetavat takistust läbiva voolu tugevus I_x ja voltmeetri takistus *R*.



Joon. 75. Katse skeem juhtide takistuse määramiseks amper- ja voltmeetri abil.

Ohmi seaduse järgi arvutatakse mõõdetavat takistust läbiva voolu tugevus võrdusest: $I_x = \frac{U}{r_x}$. Voltmeetrit läbiva voolu tugevus on aga $\frac{U}{R}$. Järelikult võib mõõdetavat takistust läbiva voolu tugevuse I_x määrata ka järgmisest võrdusest:

$$I_x = I - \frac{U}{R}.$$

Otsitava takistuse r_x suurus on seega:

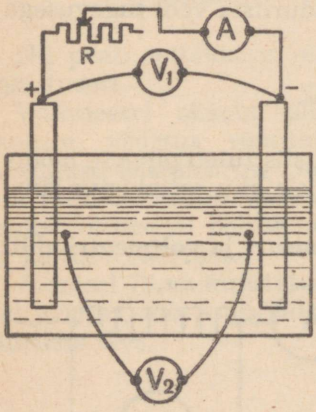
$$r_x = \frac{U}{I - \frac{U}{R}}.$$

Kui voltmeetri takistus on sedavõrd suur, et voltmeetrit läbiva voolu tugevus $\frac{U}{R}$ on väiksem kui lubatavad vead voolu tugevuse mõõtmisel antud ampermeetriga, siis võib suuruse $\frac{U}{R}$ jätta arvestamata ja seega

$$r_x = \frac{U}{I}.$$

Toodud näide tõendab veel kord, et voltmeetri takistus peab olema tunduvalt suurem mõõdetavast takistusest.

50. Ohmi seadus kogu vooluringi kohta. Igasugune täielik (suletud) elektrivoolu ring koosneb kahest osast: välisosast ja siseosast. Vooluringi välisosa moodustavad mitmesugused tarbijad ja elektrijuhtmed, vooluringi siseosaks on aga vooluallikas ise. Kuna ka vooluallikal on oma takistus, siis esineb pingelangus nii vooluringi välis- kui ka siseosas.



Joon. 76. Seadme skeem Ohmi seaduse kontrollimiseks kogu vooluringis.

Lülitame mingi galvaani elemendi vooluringi takistuse ja määrame katseliselt vooluringi välis- ja siseosas tekkivate pingelanguste summa. Joonisel 76 on kujutatud selleks katseks vajalike seadmete lülitusskeem.

Katseks vajalikus skeemis on galvaani elemendi vooluringi välisosa lülitatud ampermeeter A ja reostaat R. Pingelangust vooluringi välisosas mõõdetakse voltmeetriga V_1, mis on ühendatud galvaani elemendi klemmidega. Voltmeeter V_2 mõõdab aga pingelangust vastavalt elemendi sisetakistusele. Selleks lülitatakse voltmeeter V_2 elektrolüüdis kahe elektroodide vahetus läheduses asetseva punkti vahele. Niisugune voltmeetri lülitamine teostatakse kahe vardakese abil, mis on valmistatud sama keemilise koostisega metallist (näiteks elektrolüütilisest vasest), või kahe söepulga abil.

Reostaadi R abil saab muuta vooluringi läbiva voolu tugevust. Vastavalt sellele muutuvad ka voltmeetrite V_1 ja V_2 näidud, s. t. muutuvad vooluringi välis- ja siseosas esinevad pingelangused.

Alljärgnevas tabelis on toodud tulemused, mis on saadud volta elemendiga teostatud katsel.

Jrk. nr.	Voolu tugevus milliamprites	Pingelangus vooluringi välisosas voltides	Pingelangus vooluringi siseosas voltides	Välis- ja siseosa pingelanguste summa voltides
1	0	1,02	0	1,02
2	130	0,88	0,15	1,03
3	175	0,80	0,22	1,02
4	230	0,71	0,29	1,00
5	290	0,65	0,35	1,00
6	lühis	0,21	0,81	1,02

Tabelist on näha, et pingelanguste summa vooluringi välis- ja siseosades on katsevigade piirides konstantne suurus, keskmiselt 1,02 V.

Kui mõõta pinget galvaani elemendi klemmidel vooluringi välisosa katkestamise puhul, siis on see samuti 1,02 V.

Nii järeldub katsest, et suletud vooluringi kõigi osade pingelanguste summa on võrdne vooluallika klemmidel oleva pingega avatud vooluringi välisosa korral.

Kuid vooluallika klemmidel olev pinge vooluringi avatud välisosa puhul on vastavalt meie definitsioonile (§ 38) arvuliselt võrdne vooluallika elektromotoorse jõuga.

Järelikult, *vooluallika elektromotoorne jõud on arvuliselt võrdne suletud vooluringi kõigi osade pingelanguste summaga.*

See võrdus on vahetuks järelduseks energia jäävuse seaduse rakendamisest suletud elektrivoolu ringis. Tõepoolest, vooluallikas teeb tööd laengute jaotamise näol, mille tagajärjel tekib elektrienergia. Vooluallika selle töö mõõduks, mis on taandatud laenguühikule, ongi vooluallika elektromotoorne jõud.

Nii vooluringi välis- kui ka siseosas tehakse laengute liikumisel samuti tööd, mille tagajärjel tekib elektrienergia arvel soojus. Laenguühikule taandatud töö mõõduks on pingelanguste summa kogu suletud vooluringis. Energia säilivuse seaduse kohaselt võrdub vooluallika töö elektrivooluringis kulgeva voolu tööga.

Tähistame vooluringi välisosa takistuse tähega R ja siseosa takistuse tähega r.

Olgu vooluringi läbiva voolu tugevus I ja vooluallika elektromotoorne jõud E.

Vastavalt *EMJ* definitsioonile võib kirjutada:

$$E = IR + Ir \text{ ehk } E = I\,(R + r).$$

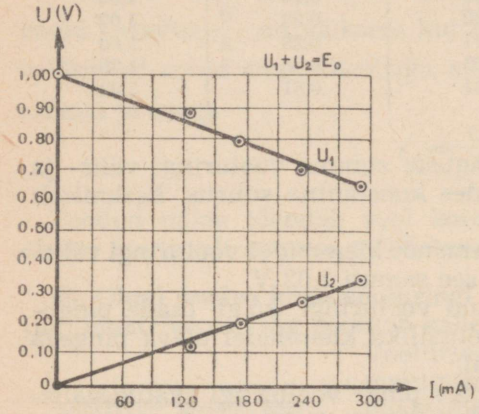
Siit järgneb, et

$$I = \frac{E}{R+r}. \qquad (1)$$

Võrdus (1) kujutab endast Ohmi seaduse matemaatilist väljendust kogu vooluringi kohta, mida võib sõnastada järgmiselt:

vooluringi läbiva voolu tugevus on võrdeline vooluallika elektromotoorse jõuga ja pöördvõrdeline vooluringi kogutakistusega.

51. Vooluallika elektromotoorne jõud ja klemmide pinge. Antud vooluallika elektromotoorne jõud on konstantne suurus ega olene selle vooluringi koosseisust, millesse vooluallikas on lülitatud. Kuid pingelangus vooluringi välisosas $U = IR$ ei ole antud vooluallika puhul konstantne suurus (mõnikord nimetatakse pingelangust vooluringi välisosas vooluallika klemmide pingeks).



Joon. 77. Graafik, mis näitab Ohmi seaduse kehtivust kogu vooluringis.

Joonisel 77 on esitatud eelmises paragrahvis (vt. tabel lk. 79) saadud mõõduandmed graafiku kujul.

Jooned kujutavad sellel graafikul pingelangust sõltuvalt ringi läbiva voolu tugevusest (vooluringi koormusest). Ülemine joon kuulub vooluringi välisosale, alumine aga vooluringi siseosale.

Graafikutest on kujukalt näha, et koormuse suurenemisel (vooluringi läbiva voolu tugevuse suurenemisel) langeb vooluallika klemmide pinge. Vooluringi siseosas aga pinge suureneb. Nii toimub vooluringi koormuse muutumisel vooluringi üksikutes osades pingete suuruste ümberjaotumine.

Katkestatud vooluringi puhul ($I = 0$) on pinge vooluallika klemmidel suurim ja võrdub tema elektromotoorse jõuga. Vooluringi lühise puhul (välisosa takistus on väike) on elemendi klemmidel olev pinge kõige väiksem ja sellele vastavalt vooluringi siseosas valitsev pinge suurim.

Samale tulemusele jõuame ka analüüsides Ohmi seadust kogu vooluringi kohta:

$$I = \frac{E}{R+r}, \qquad (1)$$

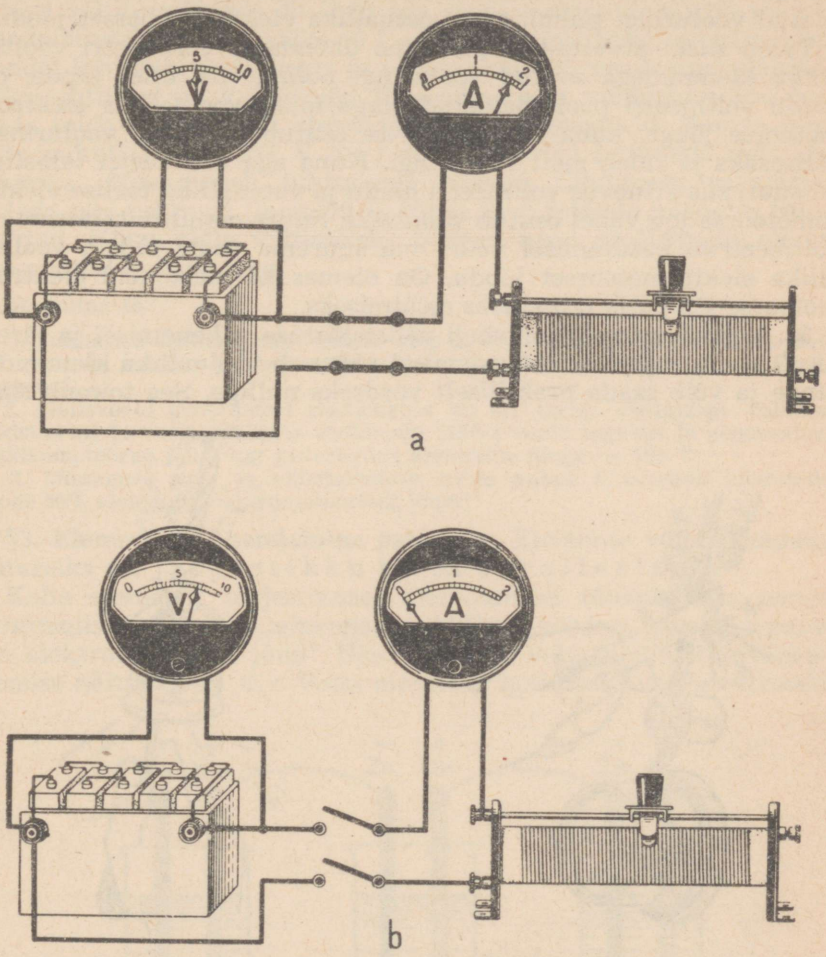
mida võib esitada ka kujul:

$$IR = E - Ir \text{ ehk } U = E - Ir. \qquad (2)$$

Asetades võrdusesse (2) voolu tugevuse väärtuse $I = \frac{E}{R+r}$, saame:

$$U = E\left(1 - \frac{r}{R+r}\right). \qquad (3)$$

Kuna antud vooluallika sisetakistust r võib lugeda peaaegu konstantseks suuruseks, siis on võrduse (3) paremal poolel ainult üks muutuv suurus — välistakistus R.



Joon. 78. Pinge vooluallika poolustel: a) suletud ja b) avatud vooluringi puhul.

Mida suurem on vooluringi välistakistus, seda väiksemaks muutub murd $\frac{r}{R+r}$.

Piirjuhtumil, s. o. avatud vooluringi korral $\frac{r}{R+r} = 0$, ja seega võrdub vooluallika klemmide pinge tema elektromotoorse jõuga.

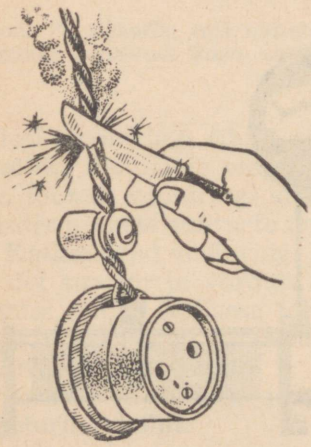
Järelikult on vooluallika klemmide pinge suurimaks väärtuseks tema elektromotoorne jõud. See esineb juhul, kui vooluringi

läbiva voolu tugevus on võrdne nulliga, s. o. kui vooluring on avatud. Joonisel 78, *a* näitab voltmeeter vooluallika poolustel olevat pinget suletud vooluringi puhul.

Joonisel 78, *b* näitab sama voltmeeter pinget vooluallika poolustel avatud vooluringi puhul, s. t. vooluallika elektromotoorset jõudu.

Tuleb siiski arvestada, et kui me ühendame voltmeetri vooluallika klemmidega avatud vooluringi puhul, siis, olles täpne, ei võrdu voltmeetri poolt näidatud pinge mitte vooluallika elektromotoorse jõuga, kuna voltmeeter ise osutub sel juhul vooluringi välisosaks ja suleb meil vooluringi. Kuna aga voltmeetri takistus on suur, siis erinevus voltmeetri näidu ja vooluallika tõelise elektromotoorse jõu vahel osutub väikeseks. Suure oomilise takistusega voltmeetrite kasutamisel võib ilma suurema veata mõõta vooluallika elektromotoorset jõudu. On olemas ka meetodeid elektromotoorse jõu palju täpsemaks mõõtmiseks.

52. Lühiühendus. Vooluringi välistakistuse vähenemisel ja järelikult voolu tugevuse suurenemisel väheneb vooluallika klemmide pinge ja võib saada praktiliselt võrdseks nulliga. See toimub siis,



Joon. 79. Pingestatud juhtmete isolatsiooni kõrvaldamine võib põhjustada lühise ja rikkuda võrgu.

Joon. 80. Lühisvool võib tekkida pingestatud lambipesa parandamisel.

kui vooluringi välisosa takistus muutub lähedaseks nullile. Niisugust juhtumit nimetatakse praktikas l ü h i ü h e n d u s e k s e. l ü h i s e k s. Lühise puhul annab vooluallikas oma maksimaalse voolu:

$$I_{max} = \frac{E}{r}, \text{ kuna } R \to 0.$$

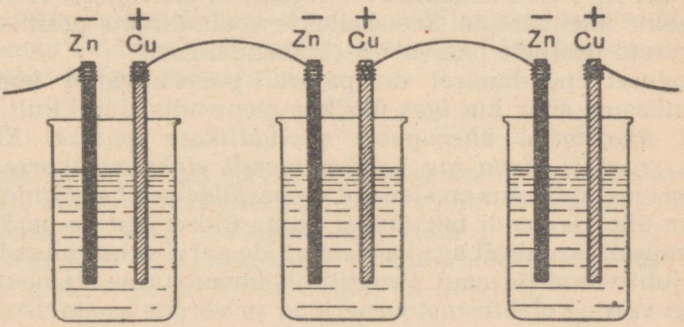
Nagu näha eeltoodud valemist, sõltub lühisvoolu tugevus mitte ainult vooluallika elektromotoorsest jõust, vaid ka vooluallika sisetakistusest. Galvaani elementide sisetakistus on suur ja seepärast on nende puhul lühisvool suhteliselt väikese tugevusega ja neile täiesti kahjutu. Teisiti on lugu aga seatina-akumulaatorite puhul: nende sisetakistus on väike (0,1—0,01 oomi piirides), seepärast on nendel lühisvool väga tugev ja võib rikkuda akumulaatori plaadid. Väga ohtlikud on ka lühised jõuseadmete ja valgustuse liinides, mida toidavad võimsad elektrijaamade generaatorid. Suurte pingete puhul (127 V, 220 V jne.) võib lühisvool kujuneda määratu suureks. Niisugustel juhtumitel võivad lühisvoolu tagajärjel põleda läbi juhtmed (joon. 79 ja 80) ja isegi tekkida hoonetes tulekahjud. Kõige selle vältimiseks peavad need vooluringid olema varustatud kaitsmetega.

Harjutus 10.

1. Leklanšee element, mille sisetakistus on 5 oomi ja elektromotoorne jõud 1,5 volti, on suletud juhiga, mille takistus on 20 oomi. Kui suur on voolu tugevus?
2. Alalisvoolu generaatori sisetakistus on 0,1 oomi, vooluringi välisosa takistus on 4,8 oomi. Määrata vooluringi läbiva voolu tugevus ja generaatori elektromotoorne jõud, kui generaatori klemmide pinge on 120 V.
3. Missuguse sise- ja välistakistuse suhte puhul moodustab klemmide pinge 50% elemendi elektromotoorsest jõust?

53. Elementide ühendamine patareiks. Elemente võib ühendada patareiks nii järjestikku kui ka paralleelselt.

Kahe elemendi järjestikusel ühendamisel ühendatakse nende erinimelised poolused teineteisega. Millega võrdub niisuguse patarei elektromotoorne jõud? Näitame seda volta elementide ühendamise näitel (joon. 81). Volta elemendi igal positiivsel elektroodil

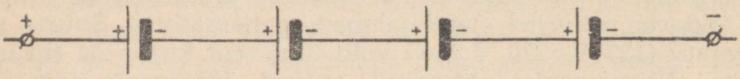


Joon. 81. Volta elementide järjestikune ühendamine.

on 1,1 V võrra kõrgem potentsiaal kui negatiivsel elektroodil. Kahe kõrvuti asuva elemendi positiivne ja negatiivne elektrood ühendatakse juhtide abil ja neil on järelikult ühesugune potentsiaal. Seetõttu on esimese elemendi negatiivse pooluse ja teise

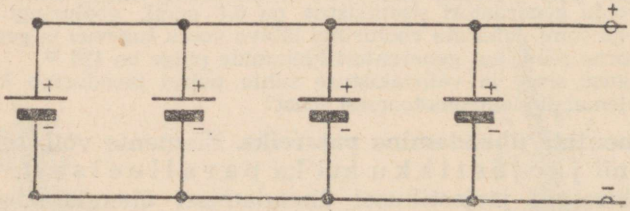
elemendi positiivse pooluse vahel potentsiaalide vahe juba 1,1 V + 1,1 V = 2,2 V jne. Kui üldse on *n* elementi, siis on nende äärmiste elektroodide vaheline pinge (s. o. patarei *EMJ*) *n* korda suurem ühe elemendi elektromotoorsest jõust.

Seega, *järjestikku ühendatud vooluallikate patarei EMJ on võrdne patareis olevate vooluallikate elektromotoorsete jõudude summaga.*



Joon. 82, *a*. Elementide järjestikuse ühendamise skeem.

Patarei kogutakistus võrdub tema üksikute elementide sisetakistuste summaga. Joonisel 82, *a* on kujutatud patarei skeem järjestikku ühendatud elementidest.



Joon. 82, *b*. Elementide paralleelse ühendamise skeem.

Joonisel 82, *b* on skemaatiliselt kujutatud ühesuguste elementide paralleelne ühendamine. See saadakse vooluallikate positiivsete ja negatiivsete pooluste omavahelisel ühendamisel.

Niisugusel ühendamisel on patarei pinge avatud vooluringi puhul niisama suur kui igas üksikus elemendis. Järelikult, *paralleelselt ühendatud ühesuguste vooluallikate patarei EMJ on võrdne patareis oleva iga üksikelemendi elektromotoorse jõuga.*

Patarei kogutakistus on elementide paralleelse ühendamise puhul väiksem ühe elemendi takistusest, kuna üldse juhtide paralleelsel ühendamisel, järelikult aga ka elementide paralleelsel ühendamisel, nende juhtivused liituvad. Praktiliselt ühendatakse elemente, milledel on võrdne elektromotoorne jõud ja võrdne sisetakistus.

Oletame, et vooluring koosneb *n* ühesugusest elemendist. Olgu *E* ja *r* vastavalt ühe elemendi elektromotoorne jõud ja sisetakistus. Olgu vooluringi välisosa takistus *R*. Väljendame niisuguse patarei vooluringi läbiva voolu tugevuse nii elementide järjestikusel kui ka paralleelsel ühendamisel.

Elementide järjestikusel ühendamisel on patarei *EMJ* võrdne nE, patarei sisetakistus nr ja vooluringi kogutakistus $R+nr$. Ohmi sea-

duse järgi arvutatakse niisugust vooluringi läbiva voolu tugevus seosest:

$$I = \frac{nE}{R+nr}.$$

Elementide paralleelse ühendamise puhul on patarei elektromotoorne jõud võrdne ühe elemendi elektromotoorse jõuga, sisetakistus on $\frac{r}{n}$ ja vooluringi kogutakistus on $R + \frac{r}{n}$. Niisugust vooluringi läbiva voolu tugevus määratakse seosest:

$$I = \frac{E}{R+\frac{r}{n}}.$$

Harjutus 11.

Kahest leklanšee elemendist koosnev patarei toidab välisvooluringi, mille takistus on 2 Ω. Kummagi elemendi *EMJ* on 1,45 V ja sisetakistus 0,5 Ω.

a) Arvutada voolu tugevus, mis läbib antud vooluringi nii elementide järjestikusel kui ka paralleelsel ühendamisel.

b) Selgitada, millise elemendi sisetakistuse ja vooluringi välistakistuse suhte puhul on õigem ühendada elemendid järjestikku ja missuguse suhte puhul paralleelselt, selleks et saada vooluringis suurimat voolu.

54. Alalisvoolu töö ja võimsus. Igas suletud vooluringis toimub tingimata kahesugune energia muundumine. Vooluallikas tekitatakse elektrienergia mingi teise energia arvel (generaatoris näiteks mehhaanilise energia arvel), vooluringis muutub aga see töö uuesti ekvivalentseks hulgaks, mingiks teist liiki energiaks. Niisuguse energia muundumise mõõduks on voolu töö.

Kuid me teame juba, et voolu töö on elektrivälja jõudude töö laengute ümberpaigutamisel, sellepärast on meil lihtne seda tööd arvutada.

Tööd elektrilaengu liikumisel elektriväljas määratakse liikuva elektrilaengu suuruse ja liikumise algus- ja lõpp-punkti potentsiaalide vahe või pinge korrutisega:

$$A = qU.$$

On selge, et seda seost võib kasutada ka voolu töö määramiseks. Vooluringi läbiva elektrienergia hulka võime määrata vooluringi läbiva voolu tugevuse ja kestuse abil, kuna $q = It$.

Kasutades seda seost, saame me valemi voolu töö suuruse avaldamiseks vooluringi osa kohta, millel on pinge U:

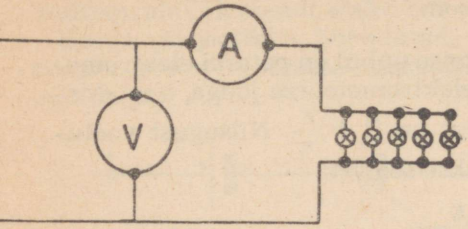
$$A = IUt. \qquad (1)$$

Mõõtes voolu tugevust amprites, pinget voltides ja aega sekundites, saame voolu töö džaulides (lühendatult J):

1 džaul = 1 amper × 1 volt × 1 sekund.

Voolu poolt vooluringi antud osas tehtava töö arvutamine ei ole

sugugi seotud sellega, milliseks energialiigiks muutub elektrienergia vooluringi antud osas. See töö osutub elektrienergia mõõduks vooluringi antud osas.



Joon. 83. Seadme skeem hõõglampide võimsuse mõõtmiseks.

Teades, et võimsus $N = \frac{A}{t}$, võib avaldada elektrivoolu võimsuse vooluringi osas järgmiselt:

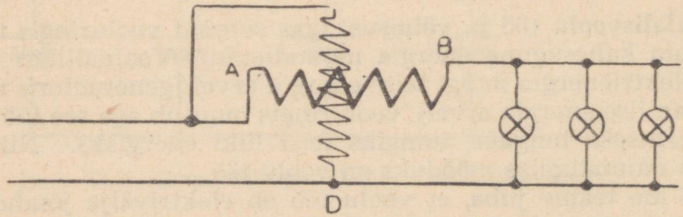
$$N = IU.$$

Võimsust mõõdetakse vattides (W).

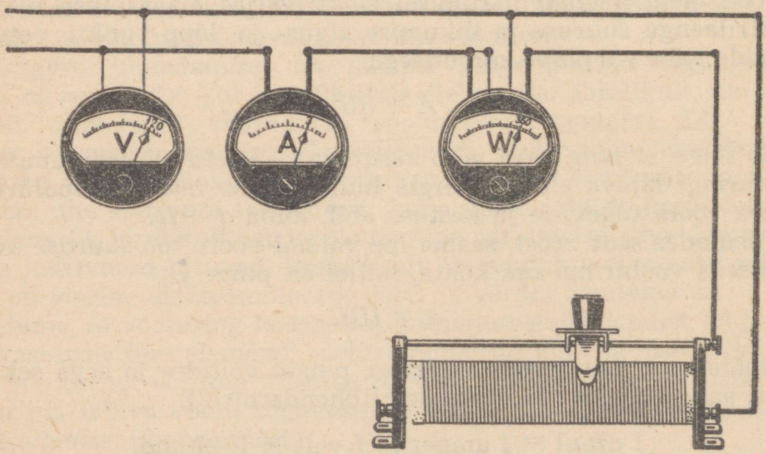
1 vatt = 1 amper $\times$ 1 volt.

Alalisvoolu vooluringides võib võimsust mõõta ampermeetri ja voltmeetri abil. Joonisel 83 on kujutatud ampermeetri ja voltmeetri lülitusskeem hõõglampide võimsuse mõõtmiseks.

Võimsust alalisvoolu ringis saab mõõta ka selleks ettenähtud erilise mõõduriista — v a t t m e e t r i abil. Selle mõõduriista ehi-



Joon. 84, *a*. Elektrodünaamilise vattmeetri lülitusskeem.



Joon. 84, *b*. Mõõduriistade lülitus vooluringi võimsuse mõõtmiseks.

tuses on ühendatud ampermeetri ja voltmeetri printsiip. Joonisel 84, *a* on toodud niinimetatud elektrodünaamilise vattmeetri lülitusskeem. Selles vattmeetris on liikumatu (voolu all olev) pool *AB* lülitatud koormusega (lampidega) järjestikku, liikuv pool *CD* (pinge pool) on lülitatud aga koormusega paralleelselt.

Joonisel 84, *b* on näidatud mõõduriista lülitamine võimsuse mõõtmiseks vooluringis.

Vattmeetri lugemeid võib kontrollida ampermeetri ja voltmeetri lugemite abil.

Voolu töö või sellega võrdse kulutatud energia mõõtmiseks kasutatakse erilisi mõõduriistu, mida nimetatakse arvestiteks (üht tüüpi arvesti väliskuju on toodud joonisel 85).

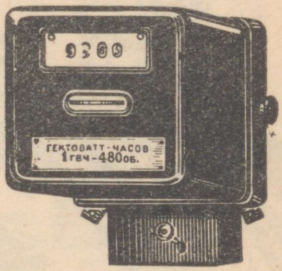
Arvestid mõõdavad voolu tööd hektovatt-tundides (hWh) või kilovatt-tundides (kWh), registreerides automaatselt voolu töö suurust.

Töö- ja energiaühikud

1 vatt-sekund	=	1 J
1 vatt-tund	=	3 600 J
1 hektovatt-tund	=	360 000 J
1 kilovatt-tund	=	3 600 000 J

Võimsuseühikud

1 voltamper	=	1 W
1 hektovatt	=	100 W
1 kilovatt	=	1000 W



Joon. 85. Arvesti.

55. Joule'i-Lenzi seadus. Juht, mida läbib vool, soojeneb.

Vene teadlane Lenz ja inglise teadlane Joule, uurides katsel voolu soojuslikku toimet, avastasid teineteisest sõltumatult seaduspärasuse, mille järgi *voolust läbitavas juhis on eralduv soojushulk võrdeline voolu tugevuse ruuduga, juhi takistusega ja ajaga, mille kestel muutumatu vool läbib juhti.*

Seda seadust, mida nimetatakse Joule'i-Lenzi seaduseks, võib avaldada seose abil:

$$Q = kI^2Rt, \qquad (1)$$

kus Q on eralduv soojushulk, I — voolu tugevus, R — juhi takistus, t — aeg ja k — suurus, mida nimetatakse töö soojuslikuks ekvivalendiks. Töö soojusliku ekvivalendi arvuline suurus sõltub seoses (1) esinevate ülejäänud suuruste mõõtmisel kasutatavate ühikute valikust.

Kui soojushulka mõõta kalorites, voolu tugevust amprites, juhi takistust oomides ja aega sekundites, siis k on arvuliselt võrdne 0,24. See tähendab, et *vool tugevusega 1 A eraldab 1-oomise takis-*

tusega juhti läbides 1 sekundi jooksul 0,24 cal soojust. Niiviisi võib juhis tekkiva soojushulga arvutada seose abil:

$$Q = 0{,}24I^2Rt. \qquad (1)$$

SI-süsteemis mõõdetakse tööd, energiat ja soojushulka samades ühikutes — džaulides.

Emil Hristianovitš Lenz (1804—1865) oli meie kuulus füüsik. Ta on üks elektrotehnika rajajaid. Tema nimega on seotud seadus, mis määrab induktsioonvoolu suuna, ja voolu soojuslikku toimet määrava seaduse avastamine.

Seepärast on võrdetegur k Joule'i-Lenzi seaduses võrdne ühega. Selles süsteemis (mida kasutame ka edaspidi) on Joule'i-Lenzi seadusel valemina järgmine kuju:

$$Q = I^2Rt. \qquad (2)$$

Joonisel 86 on näidatud seadme skeem, mille abil saab katseliselt kontrollida Joule'i-Lenzi seadust. Kalorimeetris olevasse vedelikku on asetatud traatspiraal C, mida läbib teatud aja jooksul vool. Seejärel leitakse soojushulk, mis selle aja jooksul on eraldunud kalorimeetris. Spiraali takistus on meil varem teada, voolu tugevust mõõdetakse ampermeetriga ja aega sekundimõõtjaga.

Muutes voolu tugevust vooluringis ja kasutades erinevaid spiraale, võib kontrollida Joule'i-Lenzi seaduse kehtivust.

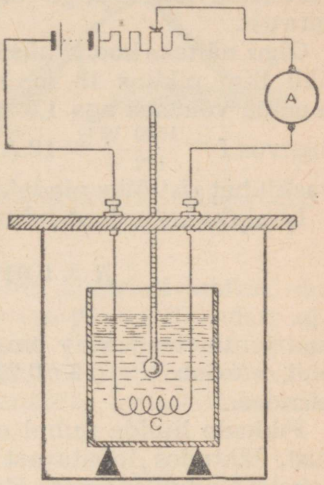
Ohmi seaduse järgi on

$$I = \frac{U}{R};$$

asendades voolu tugevuse väärtuse valemis (2), saame Joule'i-Lenzi seadusele teise kuju:

$$Q = \frac{U^2}{R}t. \qquad (3)$$

Seost $Q = I^2Rt$ on käepärane kasutada soojushulga arvutamiseks, mis eraldub juhtide järjestikuse ühendamise korral, kuna sel juhul on voolu tugevus kõigis juhtides võrdne. Seepärast eraldub mitme juhi järjestikusel ühendamisel igas neis soojushulk, mis on võrdeline selle juhi takistusega. Kui näiteks ühendada järjestikku kolm võrdse läbimõõduga traati — vask-, raud- ja nikeliintraat, siis tekib kõige rohkem soojust nikeliintraadis ja ta kuumeneb kõige rohkem. Selles võib kergesti veenduda katse abil.



Joon. 86. Seadme skeem Joule'i-Lenzi seaduse kontrollimiseks.

Juhtide paralleelse ühendamise puhul on voolu tugevusel neis erinevad, pinge aga nende juhtide otstel on sama. Soojushulka juhtide paralleelse ühendamise puhul on lihtsam arvutada valemi $Q = \frac{U^2}{R} t$ abil. Sellest seosest on näha, et juhtide paralleelse ühendamise puhul tekib igas neist soojushulk, mis on pöördvõrdeline juhi takistusega, ehk teisiti öeldes, võrdeline tema juhtivusega.

Kui ühendada kolm võrdse läbimõõduga traati — vask-, raud- ja nikeliintraat — omavahel paralleelselt ja lasta neist vool läbi, siis eraldub soojust kõige rohkem vasktraadis ja ta kuumeneb rohkem kui teised.

56. Elektriliini juhtmete ristlõike pindala valik. Vastavalt kehtestatud tehnilistele normidele tuleb siseliinide juhtmed, mis annavad voolu magistraalist elektriseadmetele, valida selliselt, et pingelan-

Lubatud (normitud) voolud juhtmetes.

Ristlõike pindala mm²	Voolu tugevus amprites (norm)		
	Vask	Alumiinium	Raud
1	6	6	—
1,5	10	8	—
2,5	15	10	6
4	20	15	8
6	25	20	10
10	31	25	15
16	43	35	25
25	75	60	—

gus nendes ei ületaks 2% valgustusvõrkudes ja 4% jõuseadmete võrkudes[1].

Selleks et juhtmed ei kuumeneks, piiratakse neid läbiva voolu tugevusi lubatud suurustega (normidega).

Väga lühikeste liinide jaoks valitakse juhtme ristlõike pindala eeltoodud tabeli järgi, seejärel kontrollitakse aga pingelanguse suurust.

Olgu näiteks kooli füüsikakabineti elektriga varustamiseks vajaliku liini pikkus 15 m, kabinetis kasutatavate seadmete maksimaalne võimsus aga 1,5 kW (pinge puhul 127 V). Vajalik voolu tugevus $I = \frac{1500\ \text{W}}{127\ \text{V}} = 12$ A, millise voolu puhul võib seega kasutada vaskjuhet ristlõike pindalaga 2,5 mm^2.

Liini (kahekordsed juhtmed) takistus on

$$R = 0{,}0175 \cdot \frac{2 \cdot 15}{2{,}5} = 0{,}21 \text{ oomi;}$$

aga juhtmetes tekkiv pingelangus, mida arvutame valemi $U = IR$ abil, võrdub $U = 12 \cdot 0{,}21 = 2{,}5$ V, mis on täielikult lubatavates piirides.

Pikkade liinide puhul on kõige parem teostada juhtmete arvutust, lähtudes lubatavast pingelangusest, ja seejärel kontrollida tabelis toodud andmete järgi voolu tugevust.

Vajatagu näiteks magistraalliinist 200 m kaugusel asetseva elamu valgustamiseks voolu tugevusega 10 A pinge juures 127 V. Lubatav pingelangus on 2%, s. o. 2,5 V. Juhtmete takistus

$$R = \frac{2{,}5\ \text{V}}{10\ \text{A}} = 0{,}25\ \Omega.$$

Valemist $R = \varrho \frac{l}{S}$ leiame juhtmete ristlõike pindala:

$$S = \frac{0{,}0175 \cdot 2 \cdot 200}{0{,}25} = 28 \text{ mm}^2.$$

Niisugust ristlõiget võib koormata vooluga üle 75 A; seega on antud ristlõike pindala käesoleval juhul täiesti sobiv.

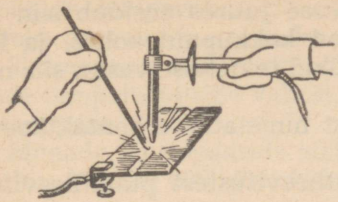
Kui aga valida juhtmete ristlõige voolu tugevuse järgi, nagu see toimus esimeses näites, siis oleks ristlõike pindala olnud 1,5 mm^2. Juhtmete kuumenemist ei oleks küll olnud, kuid sel juhul oleks olnud pingelangus liinis:

$$IR = \frac{10 \cdot 2 \cdot 200 \cdot 0{,}0175}{1{,}5} = 46{,}6\ \text{V},$$

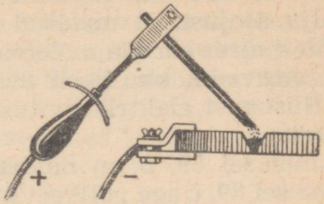
mis on aga täiesti lubamatu. Järelikult tuleb antud juhul vajalikkude uhtmete ristlõike pindala valida lubatava pingelanguse järgi.

[1] Jõuseadmete võrkudeks nimetatakse elektriliine, mis toidavad elektrimootoreid, võimsaid elektriahjusid ja teisi tööstuslikke seadmeid ja aparaate.

57. Metallide elektrikeevitus. 1882. a. leiutas vene insener N. N. Benardos meetodi metallide keevitamiseks kaarleegi abil. Benardose menetlusel teostatava kaarkeevituse skeem on kujuta-



Joon. 87. Benardose menetlusel teostatava kaarkeevituse skeem.



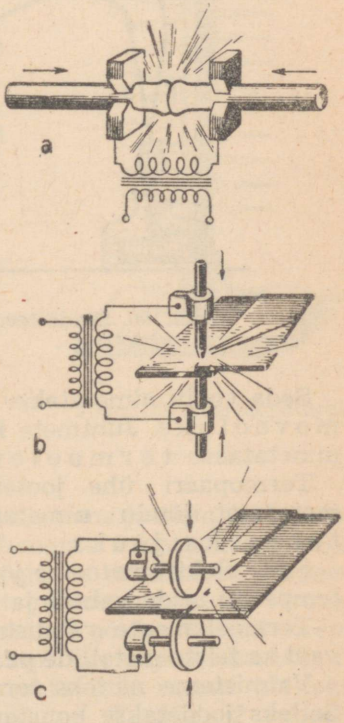
Joon. 88. Slavjanovi menetlusel teostatava keevituse skeem.

tud joonisel 87. Kokkukeevitatavad detailid ühendati juhtme abil vooluallika ühe poolusega. Vooluallika teine poolus ühendati aga juhtme abil süsielektroodiga. Süsielektroodi ja metallist detailide vahel tekkis kaarleek, mis sulatas metalli keevitatavate detailide ühenduskohal. Kaarleegi sisse asetas Benardos metallvarda otsa. Kaarleegis sulas see varras, hakkas tilkuma ja metallitilgad täitsid keevitatavate detailide liitekoha. Pärast metalli tahkumist olidki detailid kokku ühendatud.

Suure praktilise tähtsuse omandas vene insener N. G. Slavjanovi poolt 1891. a. leiutatud elektrilise valamise menetlus. See meetod seisneb elektrivoolu abil sulatatud metalli valamises keevitatava detaili pinnale, kusjuures see metall on anoodiks.

Slavjanovi menetlus on skemaatiliselt kujutatud joonisel 88. Benardose ja Slavjanovi avastused on leidnud väga laialdast kasutamist tööstuses, eriti just Nõukogude Liidu võimsas tööstuses. Kaarkeevituse menetlusi on tunduval määral täiustanud nõukogude insenerid ja teadlased. Nii näiteks on välja töötatud ja kasutatakse laialdaselt meie ehitustel elektrikeevitust vee all. Paljud elektrikeevituse protsessid on automatiseeritud.

Kaarkeevituse kõrval kasutatakse tehnikas laialdaselt ka kontaktkeevi-



Joon. 89. Kontaktkeevituse skeemid.

tuse menetlust. Sel menetlusel lastakse keevitatavatest metalldetailidest läbi tugev vool.

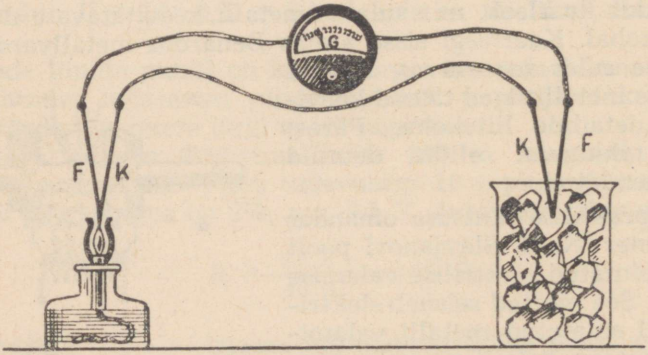
Keevitatavate detailide ühenduskohal on halva kontakti tõttu takistus suurem; vajaliku voolutugevuse juures eraldub siin nii palju soojust, et metallid pehmenevad kokkupuutekohas, ja kui selle juures suruda mõlemad metallitükid teineteise vastu, siis nad keevituvad kokku (joon. 89, *a*).

Niisugust elektrikeevituse menetlust nimetatakse kontaktkeevituseks.

Joonisel 89, *b* on näidatud kontaktkeevitustest punktkeevitus, joonisel 89, *c* aga rullkeevitus.

Kontaktkeevitamist kasutatakse laialdaselt suure eritakistusega metallide keevitamisel (nikkel, tantaal, molübdeen jt.).

58. Termoelektrivool. Kui joota kokku kahest erinevast metallist, näiteks vismutist ja vasest, traatide otsad ja soojendada seejuures üht jootekohta, teine aga jätta soojendamata, siis tekib niisuguses vooluringis elektrivool.



Joon. 90. Seade termoelektromotoorse jõu mõõtmiseks.

Seda voolu nimetatakse t e r m o e l e k t r i v o o l u k s ehk t e r m o v o o l u k s. Juhtmete kombinatsiooni, mis annab sellist voolu, nimetatakse t e r m o e l e m e n d i k s ehk t e r m o p a a r i k s.

Termopaari ühe jootekoha soojendamisel tekkivat elektromotoorset jõudu nimetatakse t e r m o p a a r i e l e k t r o m o t o o r s e k s j õ u k s.

Selle elektromotoorse jõu suurus sõltub termopaari jootekohtade temperatuuride vahest ja suureneb selle suurenemisega.

Termoelemente valmistatakse mitte ainult vismutist ja vasest, vaid ka teiste metallide paaridest.

Valmistame näiteks termopaari raud- ja konstantaantraadist. Selleks joodetakse konstantaantraadi *K* (joon. 90) üks ots raudtraadi *F* ühe otsaga. Vabad otsad ühendatakse aga tundliku galvanomeetriga *G*.

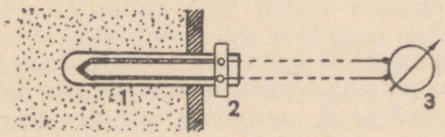
Kui soojendada termoelemendi üht ja sama jootekohta esmalt käega, siis sooja veega, tikuga ja põletiga ning seejuures hoida teine jootekoht konstantse temperatuuri juures, siis näeme, et jootekohtade temperatuuride suurema erinevuse puhul suureneb ka voolu tugevus ja seega ka termopaari elektromotoorne jõud.

Termopaari elektromotoorne jõud ei sõltu mitte ainult jootekohtade temperatuuride vahest, vaid ka metallidest, milledest koosneb termopaar.

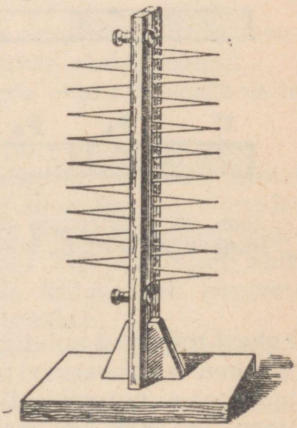
Mõnede termopaaride elektromotoorsed jõud temperatuurivahemikus 0° kuni 100° C vahel on järgmised:

Termopaar	EMJ voltides
Vismut — antimon	0,011
Konstantaan — raud	0,0053
Vask — raud	0,001
Vask — konstantaan	0,0047

Erinevate termopaaride elektromotoorseid jõudusid võib ligikaudselt lugeda võrdelisteks termopaari soojendatud ja külma jootekoha temperatuuride vahega. Kuid see on kehtiv vaid nende temperatuuride õige väikese erinevuse puhul. Sooja ja külma jootekoha temperatuuride suure erinevuse puhul on see sõltuvus palju keerukam.



Joon. 91. Termopaari kasutamine temperatuuride mõõtmiseks.



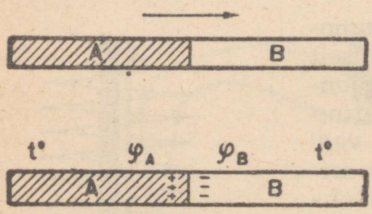
Joon. 92. Termopatarei.

Termopaari elektromotoorse jõu sõltuvus tema jootekohtade temperatuuride vahest võimaldab termoelemente kasutada nii väga madalate kui ka väga kõrgete temperatuuride mõõtmiseks ja seejuures väga suure täpsusega, sõltuvalt galvanomeetri ja termopaari tundlikkusest. Joonisel 91 on kujutatud põhimõtteline skeem temperatuuride mõõtmiseks termopaari abil. Termopaari kontakt *1*, mis on ümbritsetud kaitsva kestaga, asetatakse ruumi (näiteks ahju), mille temperatuuri soovitakse mõõta. Traatide *2* vabade otste vahele lülitatakse galvanomeeter *3*, mille skaala on gradueeritud kraadides.

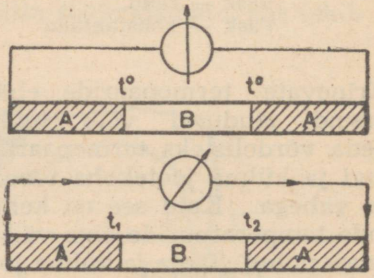
Termoelektromotoorse jõu suurendamiseks ühendatakse mitu termopaari patareiks (joon. 92). Niisuguseid termopatareisid, mis on koostatud kromeel-alumeel[1] või kromeel-kopeel[2] termopaaridest, kasutatakse praegusel ajal mõnel pool raadiovastuvõtjate toitmiseks vajalike vooluallikatena. Niisugust termopatareid võib kuumutada tavalise petrooleumilambi abil.

Termoelementide töö põhineb sellel, et vabade elektronide arv ruumalaühikus — niinimetatud elektrongaasi tihedus — on erinevate metallide puhul erinev. Kahe niisuguse metalli kokkupuutumisel liiguvad (difundeeruvad) elektronid sellest metallist *A* (joon. 93), milles elektrongaasi tihedus on suurem, metalli *B*, milles elektrongaasi tihedus on väiksem.

Niisugune elektronide liikumine katkeb metallide vahel mingi kindla potentsiaalide vahe tekkimisel (joon. 93). Kui koostada



Joon. 93. Elektronide difundeerumine kahe metalli kontaktkohal.



Joon. 94. Termoelektromotoorse jõu tekkimine.

kahest metallist suletud vooluring, siis metallide jootekohtade ühe ja sama temperatuuri puhul vooluringis voolu ei teki, kuna mõlema jootekoha potentsiaalid on võrdsed, erinevad ainult märgilt (joon. 94). Kui aga metallide jootekohtadel on erinevad temperatuurid, siis potentsiaalide erinevuste algebraline summa ei võrdu nulliga. Sel juhul tekib vooluringis elektromotoorne jõud, mida nimetatakse termoelektromotoorseks jõuks, ja mis tekitab vooluringis voolu (joon. 94).

Harjutus 12.

1. Miks tavaliselt ei keerutata juhtmete ühendamisel nende otsi kokku, vaid joodetakse?

---

[1] Kromeel — sulam, mis sisaldab umbes 90% Ni + 10% Cr. Alumeel — sulam, mis sisaldab 95% Ni ja ülejäänud osa Al, Mn ja Si.

[2] Kopeel — sulam: 43,5% Ni ja 56,5% Cu. Kromeel-alumeel termopaari *EMJ* 1000° juures on 42 mW. Kromeel-kopeel termopaar annab 800° juures *EMJ* 50 mW.

2. Kaks võrdse ristlõike pindalaga ja võrdse pikkusega nikeliin- ja alumiiniumtraati on ühendatud järjestikku ühte vooluringi. Kummas neist eraldub rohkem soojust? Mitu korda rohkem?

3. Kaks ühepikkust ja ühesuuruse ristlõike pindalaga traati — raud- ja vasktraat — on ühendatud vooluringi paralleelselt. Kummas neist eraldub rohkem soojust? Mitu korda rohkem?

4. Kaks traati, 1 m pikk ja ristlõike pindalaga 2 mm^2 nikeliintraat ja 2 m pikk ning ristlõike pindalaga 0,5 mm^2 raudtraat on ühendatud järjestikku ühte vooluringi. Kummas neist eraldub rohkem soojust? Mitu korda rohkem?

5. Millega seletada, et elektrilambi hõõgniit hakkab heledalt hõõguma, kui vool seda läbib, kuid samal ajal juhtmed peaaegu üldse ei soojenegi, kuigi hõõgniiti ja juhtmeid läbib sama tugevusega vool?

6. Miks ei põle elektriahju või elektritriikraua mähised kiiresti läbi, vaatamata sellele, et neis pidevalt eraldub soojust?

7. Kui elektriline veesoojendaja (elektrikeetja) võtta veest välja, jättes teda võrgust välja lülitamata, siis põleb ta mähis kiiresti läbi. Miks?

59. Elektrolüüs. Faraday esimene seadus. Me nägime, et elektrolüüdis on alati teatud hulk positiivseid ja negatiivseid ioone, mis tekivad lahustava aine ja lahustaja molekulide vastastikuse toime tagajärjel. Kui me tekitame elektrivälja, hakkavad elektrolüüdis olevad ioonid liikuma elektroodide poole. Positiivsed ioonid liiguvad katoodile, negatiivsed — anoodile.

Jõudes elektroodidele annavad ioonid ära oma laengu ja muutuvad neutraalseteks aatomiteks ning sadestuvad elektroodidel.

Mida enam ioone jõuab elektroodidele, seda enam sadestub neile ainet.

Sellele otsusele võime jõuda ka katse põhjal.

Juhime voolu läbi vasevitrioli lahuse ja jälgime vase eraldumist süsielektroodil. Me näeme, et algul kattub söest katood vaevaltmärgatava vasekihiga, hiljem aga, olenevalt voolu kestusest, pakseneb vasekiht katoodil. Kauaaegsel voolu läbijuhtimisel võib saada söepulgal õige paksu vasekihi, mille külge võib kergesti joota vaskjuhtme, mida praktikas sageli ka tehakse.

Aine eraldumise nähtust elektroodidel, kui vool läbib elektrolüüti, nimetatakse *elektrolüüsiks*.

Lastes läbi mitmesuguste elektrolüütide erineva tugevusega voole ja kaaludes täpselt elektroodidel eraldunud ainete massi, avastas inglise füüsik *Faraday* (loe: färödi) 1833.—1834. a. kaks elektrolüüsi seadust.

Faraday esimene seadus määrab kindlaks seose elektrolüüsil eraldunud aine massi ja elektrolüüti läbinud laengu suuruse vahel.

See seadus formuleeritakse järgmiselt: **elektrolüüsil eraldunud aine mass on võrdeline elektrolüüti läbinud laengu suurusega.**

$$m = kq, \qquad (1)$$

kus m on eraldunud aine hulk grammides ja q elektrihulk kulonites.

Suurust k nimetatakse *aine elektrokeemiliseks ekvivalendiks*. See suurus iseloomustab ainet, mis eraldub elektrolüüsil.

Kui valemis (1) võtta $q = 1$ C, siis $k = m$, s. t. aine elektrokeemiline ekvivalent võrdub arvuliselt aine massiga, mis eraldub elektrolüüdist, kui seda läbib 1 kuloni suurune laeng.

Väljendades valemis (1) elektrihulga voolu tugevuse I ja aja t kaudu, saame:

$$m = kIt. \qquad (2)$$

Faraday esimest seadust saab kontrollida katseliselt järgmiselt. Läbigu vool (joon. 95) elektrolüüte A, B ja C. Kui kõik need elektrolüüdid on ühesugused, siis elektrolüütidest A, B ja C eraldunud

Michael Faraday (1791—1867) oli suur inglise füüsik. Ta etendas tähtsat osa õpetuse arenemises elektromagnetilistest nähtustest. Ta avastas elektromagnetilise induktsiooni nähtuse ja elektrolüüsi seadused. Faraday lõi esimesena kujutluse elektri- ja magnetväljast. Temale kuuluvad esimesed mõtted elektriliste, magnetiliste ja valgusnähtuste omavahelisest seosest. Ta tegi rea avastusi ka teistel füüsika aladel; nende hulgas on eriti hästi tuntud gaaside veeldumise meetod.

ainete hulgad suhtuvad üksteisega nagu voolu tugevused I_1 ja I_2. Seejuures võrdub elektrolüüdist A eraldunud aine hulk elektrolüütidest B ja C eraldunud aine hulkade summaga, kuna

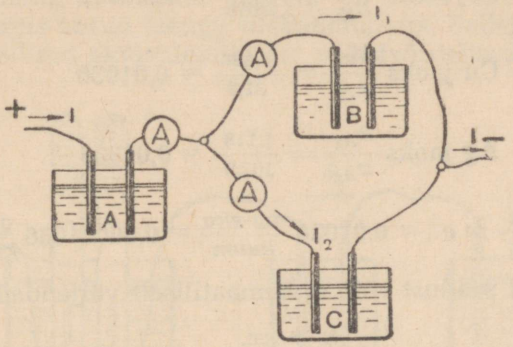
$$I = I_1 + I_2.$$

60. Faraday teine seadus. Faraday teine seadus määrab aine elektrokeemilise ekvivalendi, aatomkaalu ja valentsi vahelise seose ning formuleeritakse järgmiselt: *ainete elektrokeemilised ekvivalendid on võrdelised nende aatomkaaludega ning pöördvõrdelised nende valentsidega.*

Aatomkaalu ja valentsi suhet nimetatakse aine keemiliseks ekvivalendiks.

Rakendades seda suurust, võib Faraday teist seadust väljendada veel järgmiselt:

ainete elektrokeemilised ekvivalendid on võrdelised nende keemiliste ekvivalentidega.



Joon. 95. Seadme skeem Faraday esimese seaduse kontrollimiseks.

Olgu kahe erineva aine elektrokeemilised ekvivalendid vastavalt k_1 ja k_2, samade ainete keemilised ekvivalendid aga x_1 ja x_2, siis:

$$\frac{k_1}{k_2} = \frac{x_1}{x_2} \quad \text{ehk} \quad \frac{k_1}{x_1} = \frac{k_2}{x_2}. \tag{1}$$

Teisiti öeldes, *ainete elektrokeemiliste ekvivalentide ja samade ainete keemiliste ekvivalentide suhe on konstantne suurus.*

$$\frac{k}{x} = c. \tag{2}$$

Ainete elektrokeemiliste ja keemiliste ekvivalentide tabel.

Aine	Aatomkaal A	Valents n	Keemiline ekvivalent $x = \frac{A}{n}$	Elektrokeemiline ekvivalent $\frac{mg}{c}$
Hõbe	107,9	1	107,9	1,118
Vask	63,6	2	31,8	0,328
Kloor	35,5	1	35,5	0,367
Vesinik	1,008	1	1,008	0,0104
Hapnik	16	2	8	0,0828
Alumiinium	27,1	3	9,03	0,094
Nikkel	58,7	2	29,35	0,304

Selle suhte konstantsust on kerge kindlaks teha, kasutades tabeli andmeid.

Näiteks:

$$\text{Cl jaoks } \frac{k_{Cl}}{x_{Cl}} = \frac{0{,}367}{35{,}5} = 0{,}01036$$

$$\text{H jaoks } \frac{k_H}{x_H} = \frac{0{,}0104}{1{,}008} = 0{,}01036$$

$$\text{Cu jaoks } \frac{k_{Cu}}{x_{Cu}} = \frac{0{,}328}{31{,}8} = 0{,}01036$$

$$\text{Ag jaoks } \frac{k_{Ag}}{x_{Ag}} = \frac{1.118}{107{,}9} = 0{,}01036$$

Sel viisil on $\frac{k}{x} = c = 0{,}01036 \frac{mg\text{-}ekv}{kulon} = 0{,}00001036 \frac{g\text{-}ekv}{kulon}$.

Faraday teist seadust võib matemaatiliselt väljendada valemiga:

$$k = cx. \tag{3}$$

Asendades saadud k avalduse Faraday esimesse seadusse, võib mõlemaid seadusi väljendada ühe avaldisega

$$m = kq = cxg \tag{4}$$

ehk

$$m = cxIt, \tag{5}$$

kus c on universaalne konstant, mis on võrdne $0{,}00001036 \frac{g\text{-}ekv}{kulon}$.

Valem (5) näitab, et juhtides ühesuguse tugevusega voolu läbi kahe erineva elektrolüüdi ühe ja sama aja vältel, eralduvad elektrolüütidest ainete hulgad, mis suhtuvad teineteisega nii nagu nende ainete keemilised ekvivalendid.

Kuna $x = \frac{A}{n}$, siis võib kirjutada:

$$m = c\frac{A}{n}It,$$

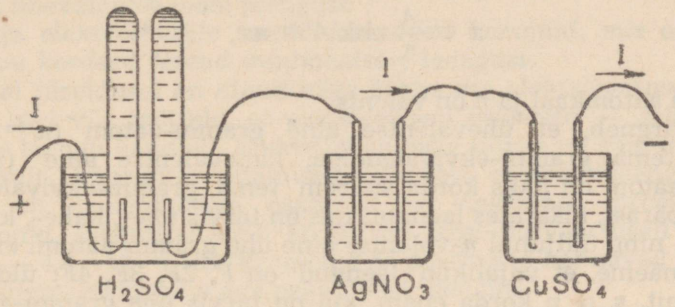
s. t. *elektrolüüsil elektroodidel eraldunud aine hulk on võrdeline aine aatomkaaluga, voolu tugevusega ja ajaga.*

Faraday teine seadus, samuti nagu esimenegi, järeldub vahetult voolu iioonilisest iseloomust elektrolüüdis.

Tõepoolest, oletame, et meil on tegemist kahe mingisuguse ühevalentse aine elektrolüüsiga, näiteks NaCl ja $AgNO_3$ lahusega.

Kui neid lahuseid läbib võrdne laeng, siis liigub vastavatele elektroodidele võrdne hulk ioone, kuna ioonide laengud mõlemas lahuses on ühesuurused. Vaatamata ioonide võrdsele arvule on sadestunud ainete (Na ja Ag) kaalulised hulgad erinevad, kuna ainete Na ja Ag aatomkaalud on erinevad. On selge, et hõbedat eraldub kaaluliselt naatriumist nii mitu korda rohkem, kui mitu korda on hõbeda aatom raskem naatriumi aatomist. Teiste sõna-

dega, eraldunud ainete hulgad on võrdelised nende ainete aatomkaaludega, mida väljendab ka Faraday teine seadus. Teisest küljest, laengute ülekandmisel võrdse valentsiga ioonide poolt on ioonide arv, mis kannavad üle võrdse laengu, erinev: mida suurem on iooni valents, s. o. mida suurem on iooni laeng, seda vähem ioone on tarvis antud laengu ülekandmiseks. Sellega seletubki, et elektrokeemilised ekvivalendid on pöördvõrdelised ainete valentsidega.



Joon. 96. Seadme skeem Faraday teise seaduse kontrollimiseks.

Joonisel 96 on kujutatud seade Faraday teise seaduse kontrollimiseks. Mitmesuguseid elektrolüüte läbib ühetugevune vool, kuid elektroodidel eraldunud ainete hulgad on võrdelised nende keemiliste ekvivalentidega.

Harjutus 13.

1. Millega seletada, et lahus, mis sisaldab ioone, jääb elektriliselt neutraalseks?
2. Mispärast ei ühine elektrolüüdis kõik erinimelised ioonid vastastikuse tõmbe toimel neutraalseteks molekulideks?

61. Faraday arv. Arvutame, kui suur elektrilaeng peab läbima elektrolüüti, et sellest eralduks aine hulk, mis vastaks selle aine gramm-ekvivalendile.[1]

Valemis $m = cxq$ asendame $m = x$, siis saame, et elektrolüüti läbiv laeng q võrdub $\frac{1}{c}$ ehk

$$\frac{1}{0{,}00001036\ \frac{g\text{-}ekv}{kulon}} = 96\,540\ \frac{kulon}{g\text{-}ekv}.$$

Nii näeme, et *mingi aine ühe gramm-ekvivalendi eraldamiseks lahusest on tarvis üks ja sama elektrilaeng ja nimelt 96 540 kulonit.*

[1] Lihtaine gramm-ekvivalent on selle aine hulk grammides, mis arvuliselt võrdub selle aine keemilise ekvivalendiga.

Seda elektrilaengut nimetatakse Faraday arvuks ja märgitakse tähega F.

$$F = 96\,540 \frac{\text{kulon}}{\text{g-ekv}}.$$

Lihtaine gramm-aatomiks nimetatakse aine hulka grammides, mis arvuliselt võrdub selle aine aatomkaaluga. Keemiline ekvivalent on seotud aatomkaaluga järgmiselt:

$$x = \frac{A}{n} \text{ ehk } A = nx,$$

kus A on aatomkaal ja n on valents.

Siit järgneb, et ühevalentse aine gramm-aatom ($n = 1$) on võrdne tema gramm-ekvivalendiga, kahevalentse aine ($n = 2$) gramm-aatom on kaks korda suurem tema gramm-ekvivalendist jne. Seepärast, määrates laengut, mis on tarvis ühe-, kahe-, kolme- ja nelja- ning üldjuhul n-valentse aine ühe gramm-aatomi eraldamiseks, näeme, et vajalikud laengud on F, $2F$, $3F$, $4F$: üldjuhul nF kulonit, s. o. n korda enam, kui on tarvis ühe gramm-aatomi ühevalentse aine eraldamiseks.

62. Iooni laeng. Faraday poolt avastatud elektrolüüsi seadused osutusid esimesteks katselisteks alusteks meie kujutlustele elektrilaengute diskreetsusest.[1]

Faraday seadustest järgneb, et ühe gramm-aatomi ühevalentse aine eraldamiseks elektrolüüdist on tarvis juhtida elektrolüüdist läbi 96 540 kuloni suurune laeng. See laeng kantakse üle kõikide ioonide poolt, mis leiduvad gramm-aatomis, kuna elektroodidel eraldunud aine oli algul lahuses ioonidena.

Teades aatomite arvu aine ühes gramm-aatomis, on võimalik leida ühevalentse aine iooni laengu suurust. Aatomite arv aine ühes gramm-aatomis on katseliselt kindlaks tehtud ja ta on ligikaudu $N = 6 \cdot 10^{23}$. Seda arvu nimetatakse Avogadro arvuks (N).

Faraday arvu ja Avogadro arvu jagatis võrdub laenguga q_0, mida kannab elektrolüüsil ühevalentse aine iga ioon:

$$q_0 = \frac{F}{N}; \quad q_0 = \frac{96\,540}{6 \cdot 10^{23}} \text{ kulonit.}$$

Väljendades ühevalentse iooni laengu LÜ-des, saame:

$$q_0 = \frac{96\,540 \cdot 3 \cdot 10^9}{6 \cdot 10^{23}}; \quad q_0 = \pm 4{,}8 \cdot 10^{-10} \text{ LÜ.}$$

See suurus q_0 kujutab endast minimaalset laengut, mida võib kanda ioon. Ta on võrdne ühevalentse iooni laenguga. Selgub, et

[1] Diskreetne (ladina keeles — *discretus*) — katkendlik, üksikutest osadest koosnev.

saadud negatiivse iooni minimaalne laeng on oma suuruselt ja märgilt võrdne elektroni laenguga. See tõsiasi on katseliselt kindlaks tehtud paljude uurijate poolt (§ 7).

Me nägime, et ühe gramm-aatomi kahe-, kolme- ja üldjuhul n-valentse aine eraldamiseks on tarvis $2F$, $3F$, üldjuhul nF kuloni suurune laeng. Järelikult on kahe-, kolme- ja üldjuhul n-valentse iooni laeng võrdne $2q_0$, $3q_0 \ldots nq_0$.

Mitmevalentsetel ioonidel on laengud, mis on täisarv kordi suuremad ühevalentse iooni laengust.

Seega *elektrolüütide ioonid kannavad laenguid, mis on mingi täisarvu kordsed teatud minimaalsest laengust.*

Sellel järeldusel on olnud väga tähtis osa elektriõpetuse arenemises; see viis mõttele, et eksisteerivad osakesed — selle minimaalse laengu kandjad. Elektrilahenduste uurimine gaasides viiski tegelikult elektroni avastamisele. Tõestati, et elektrilaengu kandjateks on elementaarsed osakesed — elektronid, prootonid ja positronid, kusjuures neil kõigil on absoluutväärtuselt võrdne laeng — $4{,}8 \cdot 10^{-10}$ LÜ. Prootonid ja positronid kannavad positiivset laengut, elektronid aga negatiivset laengut.

Kõik elektrilaengud on selle suuruse, $q = \pm 4{,}8 \cdot 10^{-10}$ LÜ, täisarvu kordsed. Elektriliselt laetud osakesi on kõikide ainete aatomite ja molekulide koosseisus; nii et neutraalsed (laengut mittekandvad) kehad esinevad vaid seetõttu, et nendes on ühepalju positiivseid ja negatiivseid laenguid.

63. Näiteid elektrolüüsi kasutamisest tehnikas. 1. Vase rafineerimine. Kaasaegses elektrotehnikas kasutatakse laialdaselt puhast vaske. Ta on parimaks materjaliks juhtmete valmistamisel. Isegi õige väheste lisandite olemasolu vases halvendab tunduvalt tema kui juhi omadusi. Vase puhastamist kõigist lisanditest nimetatakse vase rafineerimiseks. Vase rafineerimine toimub järgmiselt.

Määratu suured puust paagid või betoonist tõrred täidetakse vasevitrioli lahusega. Igasse neist asetatakse mitu üksteisega ühendatud vasest katoodi, mis on valmistatud õhukestest keemiliselt puhastest vaskplaatidest. Nende vahele asetatakse mitu anoodi (omavahel juhtmetega ühendatud paksud plaadid tavalisest puhastamata toorvasest). Voolu läbimisel eraldub vasevitrioli lahusest katoodile puhas vask, kuna anood samal ajal lahustub vasevitriolis ja muutub üha õhemaks. Vases olevad lisandid langevad sadestusena põhja. Kui katood on kasvanud vajaliku suuruseni, võetakse ta lahusest välja; selle asemele pannakse uus õhuke vaskplaat ja ka ärakulunud anood asendatakse uuega, seetõttu toimub protsess pidevalt.

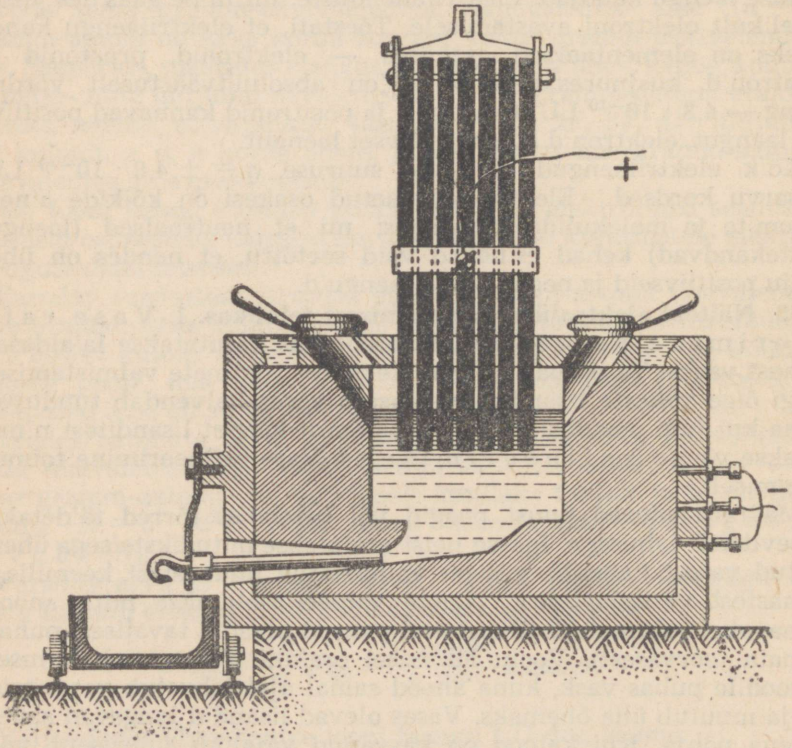
Katoodi kasvamise protsess toimub suhteliselt aeglaselt ja selleks, et saada katoodi kaaluga 80 kG, nagu see tavaliselt on meie tehastes, on vaja juhtida voolu läbi vanni kahekümne-kolmekümne päeva vältel. Asi seisab selles, et ainult väikese voolu tiheduse juures, 0,3 A elektroodi pinna ühe dm^2 kohta, eraldub katoo-

dil puhas vask ja kõrvalised lisandid kas lähevad üle lahusesse (sadestumata katoodile) või langevad sadestusena vanni põhja. On huvitav märkida, et anoodist tekkinud sade, nn. š l a m m, sisaldab rea väga hinnalisi ja haruldasi metalle, mille hulgas leidub kulda, plaatinat ja hõbedat.

Elektrolüüsi teel saadud vaske nimetatakse elektrolüütiliseks vaseks.

Nõukogude Liidu tormiliselt arenev elektrotehnikatööstus tarvitab määratul hulgal puhast vaske. Et rahuldada tööstuse nõudmisi vase järele, on Nõukogude Liidus viisaastakute vältel ehitatud palju võimsaid tehaseid.

2. A l u m i i n i u m i s a a m i n e. Vaatamata sellele, et alumiinium on üks levinumaid keemilisi elemente, mida leidub maa-



Joon. 97. Lõige elektrolüütahjust alumiiniumi tootmiseks.

koores (iga savi sisaldab alumiiniumi), leidis alumiinium praktilist kasutamist tunduvalt hiljem, võrreldes teiste elementidega. Alumiiniumi saadi 1881. a. laboratoorsel viisil, tema hind oli lähedane kulla hinnale. Praegu on alumiinium kõige levinum metall.

Alumiiniumi tööstuslik tootmine ja tema odavus sai alles siis

võimalikuks, kui hakati tema tootmiseks kasutama odavat elektrienergiat.

Alumiiniumi saadakse sulatatud alumiiniumimaagi elektrolüüsil (joon. 97). Elektrolüüdiks on siin boksiidi (alumiiniumhapendi) lahus sulatatud krüoliidis (alumiiniumfluoriidi ja naatriumfluoriidi kaksiksool).

Ülalloetletud ained puistatakse erilistesse tiiglitesse. Tiigel on seejuures katoodiks. Anoodideks on tiiglisse asetatud süsivarvad. Juhtides voolu läbi krüoliidi, sulatatakse see energia poolt, mida annab vool. Selleks lastakse algul süsivarvad alla, kuni nad puudutavad tiiglit. Pärast seda, kui krüoliit on sulanud, tõstetakse söed kõrgemale. Vool läbib nüüd sulanud massi ja katoodil (tiigli põhjal ja sentel) hakkab eralduma puhas alumiinium sulas olekus. Sula alumiinium, olles raskem kui tema maak, vajub põhja, kust ta lastakse välja erilise ava kaudu otse valuvormi.

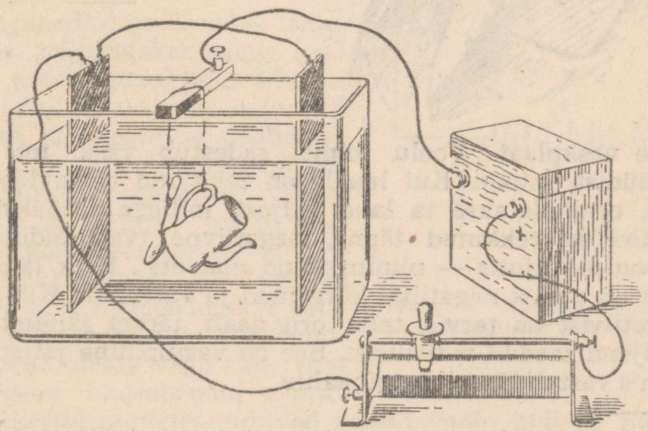
Alumiiniumi tootmiseks on seega tarvis odavat elektrienergiat ja head alumiiniumimaaki. Niisugused tingimused on olemas paljudes kohtades Nõukogude Liidus.

Juba praegu on Nõukogude Liit alumiiniumi tootmises maailmas esimeste hulgas.

Peale alumiiniumi ja vase saadakse tänapäeval elektrolüütilisel teel veel terve rida teisi metalle: magneesiumi, naatriumi, kaaliumi, kaltsiumi ja teisi. Keemiatööstuses saadakse elektrienergia abil soodat, kloorkaltsiumi ja teisi aineid.

3. Galvanosteegia. Metallesemete välispind, mis kergesti oksüdeerub, kaetakse tihti raskelt oksüdeeruvate metallidega: nikkeliga, hõbedaga, tsingiga ja teistega. Kõigile on tuntud nikeldatud esemed: samovarid, teekannud, uisud, noad, kahvlid jne.

Esemete katmine mitteoksüdeeruvate metallidega elektrilisel teel on kõige odavam, mugavam ja kiirem. Seda meetodit nimetatakse galvanosteegiaks.



Joon. 98. Seade esemete katmiseks metallikihiga elektrolüüsi teel.

Ese, mida soovitakse katta näiteks niklikihiga, puhastatakse hoolsasti mustusest ja rasvajälgedest ning asetatakse siis elektrolüüsivanni (joon. 98). Vannis on ammoniaaki sisaldav kaksiksoola $(NH_4)_2SO_4 \cdot NiSO_4 \cdot 6H_2O$ lahus. Anoodiks pannakse tükk niklit, katoodiks on aga ese, mida soovitakse nikliga katta. Juhtides voolu teatud aja vältel läbi vanni, saame esemel soovitava paksusega tiheda niklikihi.

Hõbetamise ja kuldamise juures tarvitatakse hõbeda ja kulla soolasid.

4. Galvanoplastika. Elektrivoolu abil võib saada reljeefseid jäljendeid mitmesugustest reljeefsetest mustritest ja esemetest. Seda tehakse järgmisel viisil. Oletame, et on tarvis teha jäljend puust lauale tehtud reljeefsest joonisest. See lauaosa, millel asub joonis, kaetakse väga õhukese grafiidikihiga, mille tagajärjel see lauapool muutub elektrivoolu juhiks. Sel viisil ettevalmistatud laud asetatakse vasevitrioli lahusesse ja ühendatakse temaga vooluallika negatiivne poolus. Anoodiks asetatakse vasevitrioli

Boriss Semjonovitš Jacobi (1801—1874) oli vene akadeemik, kes sai kuulsaks galvanoplastika leiutamisega. Jacobi andis suure panuse elektrimootorite loomise üritusse. Temale kuulub esimese praktiliselt kasutamiskõlbliku elektrimootori konstruktsiooni leiutamine ja rida teisi leiutusi: tähti trükkivad aparaadid, maa-aluse juhtme isoleerimise meetod jne.

lahusesse vaskplaat. Voolu toimel sadestub vask, mis eraldus elektrolüüdist, lauale. Kui lauale on tekkinud küllaldaselt paks vasekiht, eemaldatakse ta laua küljest, millega saadakse vasest leht, millel on tekkinud täpne, negatiivne (vastupidine) laual olnud joonise kujutis — niinimetatud matriits[1]. Kõik laual olnud süvendid on vasest negatiivil kõrgemad ja vastupidi. Kui niisugusest negatiivist on tarvis teha originaali täpset jäljendit, tuleb võtta jäljend saadud matriitsist. See on vastupidine jäljend negatiivist, mis vastab täpselt originaalile.

[1] Matriits — (ld. *mater* ema) süvendatud vorm kokkupandavate tähtede valamiseks, metallrahade, medalite, templite pressimiseks jne.

Sel menetlusel saadud jäljendid on niivõrd täpsed, et selle, niinimetatud galvanoplastilise meetodiga saadakse matriitse, mille abil valmistatakse grammofonplaate.

Galvanoplastika leiutas 1836. a. vene teadlane Jacobi.

Kirjas Peterburi Teaduste Akadeemiale 6. septembrist 1839. a. kirjutas Jacobi, esitades oma uut tööd galvanoplastikast: *«See leiutis kuulub Venemaale ja ei saa tekkida mingeid vaidlusi teistsuguste leiutistega väljaspool Venemaad.»*

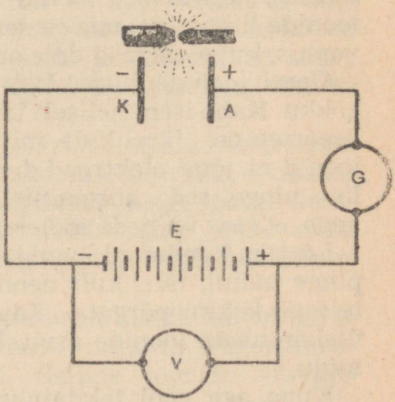
1840. a. osteti Jacobi avastus Vene valitsuse poolt *«üldiseks teatamiseks, et see leiutis läheb kogu impeeriumi heaks, ja kui seda soovitakse, siis kogu maailma hüvanguks»*.

Jacobi avastust hakati varsti laialdaselt tööstuslikult kasutama. Galvanoplastikat kasutatakse bareljeefidest ja kujudest jäljendite saamiseks, rahamärkide ja teiste dokumentide klišeede valmistamiseks jne.

Trükitööstuses kasutatakse galvanoplastikat jäljendite valmistamiseks tsinkograafilistest klišeedest jne. See võimaldab illustreeritud trükitoodete väljaandmist sadades tuhandetes eksemplarides.

Kui tähistati galvanoplastika viiekümnendat aastapäeva, avaldas Vene Tehniline Ühing teadaande, milles juhiti tähelepanu sellele, et *«kultuuri ajaloos tuleb galvanoplastika leiutamist lugeda tema tähtsuse poolest võrdseks raamatutrükkimise leiutamisega»*.

64. Elektrivool gaasis. Nagu teada, on metallist juhtide ja elektrolüütide puhul voolutugevuse olenevus pingest lineaarne, s. t. voolu tugevus kasvab võrdeliselt pingega. Tunduvalt keerulisemad on juhtivuse seadused gaasis. Vaatleme algul välise ionisaatori toimel tekkinud elektrivoolu gaasis.



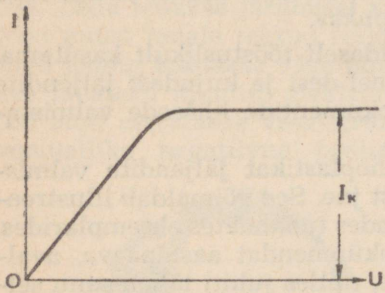
Joon. 99. Seadme skeem gaaside elektrijuhtivuse uurimiseks.

Kahe plaadi *A* ja *K* vahel leiduvat gaasi mõjutatakse mingi ionisaatori poolt (joon. 99). Plaadid ühendatakse elementide patarei *E* positiivse ja negatiivse poolusega. Patarei *E* pinget võib muuta, ühendades juurde lisaelemente. Voolu tugevust vooluringis mõõdetakse tundlikku galvanomeetriga *G*, pinget patarei poolustel, järelikult ka plaatidel *A* ja *K*, mõõdetakse voltmeetriga *V*. Galvanomeetri tundlikkus peab olema väga suur, sest isegi tugeva ionisatsiooni puhul, kuid väikestel pingetel, juhivad gaasid voolu üldiselt halvasti ja seetõttu voolu tugevus vooluringis on väike.

Rakendame plaatidele *A* ja *K* väikese pinge ja mõõdame voolu

tugevust. Järk-järgult suurendame pinget. Näeme, et algul voolu tugevus kasvab peaaegu proportsionaalselt pingega. Pinge suurendamisel voolu tugevus hakkab kasvama üha aeglasemalt ja lõpuks saabub moment, kus pinge edasisel tõstmisel voolu tugevus ei muutu.

Voolu tugevuse muutumine gaasis sõltuvalt pingest on näidatud joonisel 100. Voolu tugevust, mis ei sõltu enam pingest, nimetatakse **küllastusvooluks**. Joonisel 100 on küllastusvoolu suurus esitatud lõiguga I_k.



Joon. 100. Voolu tugevuse muutumine gaasis sõltuvalt pingest.

Kirjeldatud katse on väga tähtis, kuna selle tulemuste alusel võib luua endale ettekujutuse sellest, kuidas toimub ioonide liikumine gaasis ja millised nähtused kaasuvad selle liikumisega.

Teame, et laetud kondensaatori plaatide vahel on olemas elektriväli, ja kui õhk plaatide vahel ei sisaldaks ioone, siis kondensaator jääks laetuks määramata pikaks ajaks. Kuid ionisaatori mõju tõttu tekib õhkvahes igas sekundis kindel hulk positiivseid ja negatiivseid ioone. Mis juhtub nende ioonidega?

Positiivset laengut kandvad ioonid hakkavad liikuma katoodi suunas, negatiivsed ioonid suunduvad anoodile. Gaasis toimub ioonide liikumine, mis on sarnane ioonide liikumisega elektrolüüsivannis, kui elektroodidele on rakendatud pinge.

Gaasi ioonide liikumisel põrkavad nad mõnikord üksteisega kokku. Kahe isenimeliselt laetud iooni põrkel toimub nende neutraliseerumine. Järelikult mitte kõik ionisaatorite mõjul tekkinud ioonid ei jõua elektroodideni. Mida suurem on elektroodidevaheline pinge, seda kiiremini liiguvad ioonid ja seda vähem on neil aega, et taas ühineda molekulideks.

Lõpuks kanduvad ioonid, mingi kindla plaatide A ja B vahelise pinge puhul, täielikult nendele plaatidele, jõudmata kordagi üksteisega kokku põrgata. Edasine pinge suurendamine ei saa tõsta ülekantavate ioonide arvu, kuna selle määrab ainult ionisaatorite mõju.

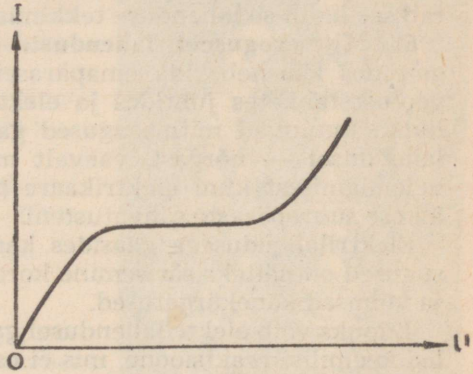
Kuna aga vool tekitatakse liikuvate ioonide poolt, siis pinge tõstmisel voolu tugevus ei kasva. Jõudsime küllastusvooluni.

Küllastusvoolu tugevus sõltub ainult antud ionisaatori ionisatsioonivõimest ja elektroodidevahelisest ioniseeritava gaasi ruumalast.

65. Gaaside tõukeionisatsioon. Nägime, et jõudnud küllastusvooluni, kondensaatori plaatide vahelise pinge tõstmisel voolu tugevus ei muutu. Kuid kui pinget tunduvalt suurendada, siis

voolu tugevus hakkab jälle kasvama. Graafiliselt kujutab kogu protsessi joonisel 101 toodud kõver.

Kui voolu tugevus suurenes, siis järelikult ioonide arv õhus muutus mingil põhjusel suuremaks. Kust tekkisid need uued ioonid? Elektronid ja ioonid võivad oma liikumisel põrgata kokku ka neutraalsete õhu molekulidega. Need kokkupõrked molekulidega ei oma suurt tähtsust seni, kui ioonide kiirus on väike. Pinge suurendamisel peab aga saabuma niisugune moment, kus kiirus, järelikult ka iooni kineetiline energia kasvab niivõrd, et löögil vastu molekuli ta võib sellest välja lüüa elektroni. See-juures molekul ioniseerub. Ioonide arv gaasiga täidetud elektroodidevahelises ruumis kasvab ja voolu tugevus suureneb.



Joon. 101. Tõukeionisatsioon põhjustab voolu tugevnemist gaasis.

Voolu tugevus võib tõukeionisatsioonil kasvada õige tunduvalt. Suhteliselt väikesel pinge suurendamisel, alates teatud piirist, kasvab voolu tugevus mitusada tuhat korda.

Eespool nägime, et küllalt kõrge elektroodide pinge juures antakse ioonidele niisugune kiirus, et nad hakkavad oma löökidega ioniseerima õhumolekule. Seejuures uued tekkivad ioonid hakkavad liikuma elektroodide poole ja omandavad suure kiiruse tõttu kineetilise energia, mis on küllaldane gaasi molekulide ioniseerimiseks kokkupõrkamise teel.

On kerge taibata, et sel juhul on hiigelarvu ioonide tekkimiseks küllaldane tühise ioonide alghulga olemasolu õhus. Kui eelmistes katsetes oleks gaasi ionisatsiooniks küllaldase pinge puhul ionisaator välja lülitatud, siis vool gaasis elektroodide vahel oleks kestnud edasi ka ilma ionisaatorita. Sel juhul tekib lahendusel i o o n i d e «l a v i i n».

Sageli väike lumetombuke, langedes lumiselt mäelt, kattub järkjärgult lumega ja, veeredes mäe jalamile, muutub hiigel-lumeveermeks, mis tekitab suuri purustusi. Selline ioonide «laviin» tekib ka elektrilahendusel õhus.

Oletame, et elektroodide vahel on alguses ainult üks ioon. Kõrge pinge rakendamisel see ioon oma liikumisel ioniseerib õhu molekuli. Saame juba kolm iooni, mis edasi liikudes ioniseerivad veel igaüks ühe õhu molekuli, moodustades veel 6 iooni; 9 iooni moodustavad nüüd oma liikumisel 18 iooni jne. See ioonide arvu suurenemise protsess gaasis tuletab meelde laviini tekkimist ja toimub väga kiiresti.

Seepärast kasvab laviinse lahenduse tekkimisel gaasis voolu tugevus järsku.

Tuleb märkida, et laviinsel lahendusel positiivsete ioonide ja elektronide osatähtsus pole kaugeltki ühesugune. Tunduvalt suurem ioniseeriv toime on elektronidel; positiivsete ioonide toimel on laviinse lahenduse tekitamisel teisejärguline tähtsus.

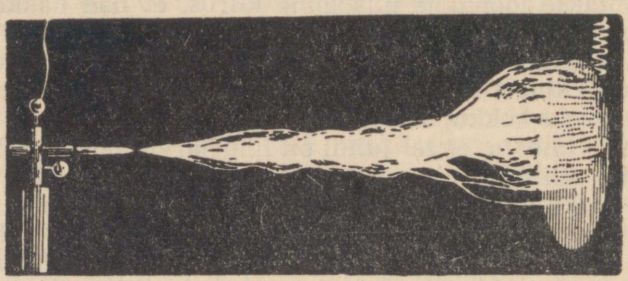
Tavalistes tingimustes sisaldab õhk alati teatud väikese hulga ioone. See ioonide hulk on niivõrd väike, et õhul märgatavat juhtimisvõimet ei ole, kuid küllalt suure väljatugevuse korral põhjustab see laviinse lahenduse tekkimist.

66. Mitmesuguseid lahenduste liike gaasides. Elektrivooluga gaasides kaasneb rida omapäraseid nähtusi, mis eraldavad teda voolust tahketes juhtides ja elektrolüütides. Niisuguste nähtuste hulka kuuluvad mitmesugused gaasi helendamise kujud elektrilahendusel — nõrgast, vaevalt märgatavast kõrgepingejuhtmete helendamisest kuni elektrikaare pimestavalt heleda valguseni ja äikese suurepäraste sähvatusteni.

Elektrilahendusega gaasides kaasnevad ka häälenähtused. Niisugused on näiteks särisemine koroona-lahendusel, sädemete ragin ja võimsad kõuekärgatused.

Lõpuks võib elektrilahendusel gaasides tähele panna ka spetsiifilisi keemilisi reaktsioone, mis ei esine tavalistes tingimustes: lämmastiku ja tsüaani hapendite tekkimine õhus, molekulide tekkimine üheaatomilistes gaasides jt.

Mitmesugustest harilikkudes tingimustes toimuvatest lahenduste liikidest gaasides vaatleme sädet ja elektrikaart.



Joon. 102. Sädelahendus.

1. S ä d e. Ühendame kaks isoleeritud elektroodi kõrgepingeallika poolustega.

Elektroodide teatud pinge juures märkame nende vahel sädet (joon. 102). Sädelahendusega kaasneb iseloomulik ragin ja silmipimestav valgus. Õhus tekib seejuures teatud hulk osooni.

Seda liiki lahendus tekib kõrgepingeliinide isolaatorite girlandi (kandeahela) juures (joon. 103).

Vaadeldes sädet, märkame, et see on muutuva kujuga ja koosneb sageli tervest sädemete kimbust. Kui sädelahendust uurida

pöörlevas peeglis või pildistada seda kiirelt liikuva fotoaparaadi abil, siis võib näha, et säde ei kujuta endast mitte pidevat voolu gaasis, vaid ta on katkendliku iseloomuga. Tekkiv säde kustub kiirelt, tema asemele tekib teine, mis jälle kiirelt kaob ja asendub uuega. Iga sädeme olemasolu kestus on väike.

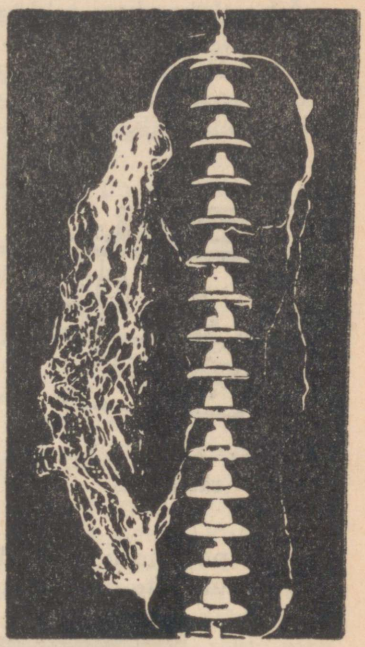
Peale sädelahenduse gaasis võib lahendus toimuda ka tahkete ja vedelate dielektrikute sees. Need lahendused kannavad läbilöögi nime. Läbilöök dielektrikus saabub siis, kui väljatugevus saavutab antud dielektrikule vastava suuruse.

See väljatugevuse suurus iseloomustab dielektriku läbilöögitugevust.

Tavalistes rõhu ja temperatuuri tingimustes toimub läbilöök õhus väljapinge puhul ligikaudu 30 000 $\frac{V}{cm}$ ehk 3000 $\frac{V}{mm}$.

Allpool on toodud mitmesuguste isoleerainete läbilöögitugevuste tabel kilovoltides millimeetri kohta.

Aine	Läbilöögitugevus $\frac{kV}{mm}$
Parafiin	15— 30
Eboniit	8— 10
Portselan	18— 25
Trafo-õli	5— 18
Bakeliit	10— 15
Klaas	10— 40
Vilgukivi	60—200



Joon. 103. Isolaatorite kandeahela ülelöök.

2. Välk. Looduses paneme tähele võimsaid sädelahendusi välgu kujul.

Välk kujutab endast elektrilahendust pilve ja maa või pilvede vahel. See nähtus, nagu õpetas M. V. Lomonossov, on seotud õhus leiduva niiskuse kondenseerumise protsessiga ja ülestõusvate õhuvooludega.

Ülestõusvate voolude korral õhus hõljuvad veetilgakesed jagunevad ja seejuures elektriseeruvad: väiksemad tilgakesed elektriseeruvad negatiivselt, suuremad positiivselt. Niisuguste tilkade suure kuhjumise korral võivad tekkida tugevad elektriväljad.

Kui elektrivälja tugevus saavutab läbilöögiks vajaliku suuruse, siis toimub sädelahendus välguna. Välgu pikkus võib ulatuda 50 km-ni ja lahendusvoolu tugevus 10—12 tuhande amprini. Orienteerivate arvutuste järgi ületab pinge, mille juures tekib lahendus välguna, mõnikord 150 miljonit volti.

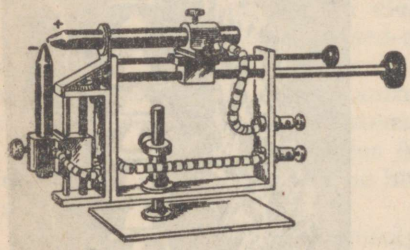
Nagu iga sädelahendus, nii ka välk katkeb, kui väljatugevus

langeb väiksema suuruseni kui see, mille puhul tekib õhus läbilöök. Välgu kestus kõigub 0,001-st kuni 0,02 sekundini. Vaatamata niivõrd tähtsusetule ajavahemikule on niisugustel lahendustel vabanev energia väga suur.

Välgu ja sädeme samasuse tõestas 1752. a. Franklin oma katsete abil tuulelohega.

Äikeselahenduse tekkimine ja iseloom kujutavad endast väga keerukat teaduslikku probleemi, mille tundmaõppimisele pühendatakse Nõukogude Liidus suurt tähelepanu.

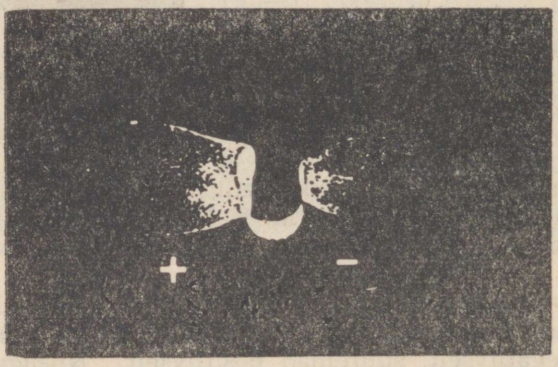
3. E l e k t r i k a a r. Elektrilahendustest on eriti suur praktiline tähtsus elektrikaarel.



Joon. 104. Seade elektrikaare saamiseks.

Elektrikaare saamiseks kasutatakse kahte söepulka, millede otsad asetatakse vastakuti teineteise lähedale (joon. 104). Rakendades sütele pinget 40—50 V, viiakse algul nende otsad kokkupuutesse ja eemaldatakse siis uuesti väikesele kaugusele. Seejuures pahvatab söepulkade otste vahel järsku silmipimestav helendus.

Vaadeldes seda helendust läbi tumeda klaasi, võib näha, et valgus lähtub peamiselt süte otstelt; nende vahel tekib päris «kaar», s. t. ere painutatud riba. Kaare enda valgus on nõrgem valgusest, mis lähtub süte otstelt. Anoodsöele tekib väike süvend — k r a a t e r (joon. 105). Süte temperatuur on väga kõrge. Kõige kõrgema temperatuuriga on positiivse söe kraater (kuni 3900° C); katoodi temperatuur on madalam (umbes 2500° C). Kõrge temperatuuri tõttu toimub süte põlemine, kusjuures anood põleb kiiremini.



Joon. 105. Elektrikaare foto.

Joonisel 104 on kujutatud seade (regulaator) elektrikaare saamiseks kahe söe vahel.

Elektrikaare avastas 1802. a. vene füüsik V. V. Petrov. Petrovi avastus omistati pika aja vältel ebaõiglaselt inglasele Davyle, kes pani tähele elektrikaart kümme aastat (1812. a.) pärast Petrovi avastust.

Elektrikaart rakendatakse väga erinevateks otstarveteks. Valgusallikana kasutatakse elektrikaart projektsiooniaparaatides, filmimisel, prožektorites, majakates ja mujal.

Kõrge temperatuuri tõttu toimuvad kaares mitmesugused keemilised reaktsioonid. Nii näiteks hapendub lämmastik, moodustades hapendid, milledest saadakse lämmastikhapet. Säärast kaarmenetlust lämmastikhapendi saamiseks otseselt õhust kasutatakse tehnikas laialdaselt.

Elektrikaare abil võib sulatada metalle ja saada mitmesuguseid sulameid. Seda näitas esmakordselt V. V. Petrov.

Kõrgekvaliteedilised terasesordid saadakse praegusel ajal tavalise terase töötlemisel erilistes elektriahjudes.

Võimalus ahju temperatuuri reguleerida täpselt ja lisada sulamisse mitmesuguseid aineid võimaldab saada terast mistahes koostisega. Nõukogude Liidus sai terase valmistamine elektrilisel menetlusel võimalikuks pärast seda, kui ehitati võimsad elektrijaamad ja hakati saama odavat elektrienergiat.

Elektrivoolu rakendamine terase sulatamiseks tegi selle tähtsaima materjali tootmise tunduvalt odavamaks ja tõstis metalli kvaliteeti.

Elektrikaar tekib sageli voolu katkestamisel. Linnades võib näiteks mõnikord näha silmipimestavat valgust trammiliini juhtme ja looga vahelise kontakti juhuslikel katkemistel. Kaare tekkimine on siin ebasoovitav nähtus. Elektrijaamades tuleb kaare tekkimise vältimiseks vooluringide katkestamisel kasutada spetsiaalseid õlilüliteid. Sellises lülitis katkestamise momendil tekkiv kaar kustutatakse õliga.

Sädemest erinevalt kujutab kaar endast pidevalt kestvat lahendust. Kuna see lahendus võib toimuda suhteliselt väikeste pingete (umbes 40—50 V) juures, voolu tugevus võib aga olla väga suur, siis on selge, et nimetatud vool ei ole tingitud ioonide laviinist, vaid on teise päritoluga.

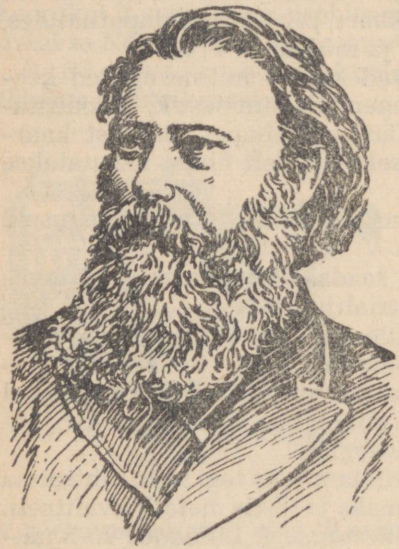
Nõukogude füüsiku V. F. Mitkevitši silmapaistvad tööd näitasid, et selles lahenduses mängib peaosa negatiivselt elektroodilt tulev elektronide vool. Tugevasti hõõguv negatiivse söe ots saadab välja hiigelhulga elektrone, mis, ioniseerides gaasi, moodustavad süte vahel voolu. See vool kestab, kui katoodi temperatuur on küllalt kõrge. Kui katoodi jahutada, siis kaar kustub.

67. Jablotškovi küünal. 1876. aastal leiutas andekas vene insener P. N. Jablotškov «elektriküünla», mille valgus sai nimeks «vene valgus».

Jablotškovi küünal koosnes kahest söepulgast *A* ja *B* (joon. 106), mis olid asetatud paralleelselt ja eraldatud kaoliinikihiga *E*. Süte

ülemised otsad olid ühendatud õhukese söe- ja metalliribakesega *C*. Vooluringi sulgemisel ribake põles ära ja süte otste vahele tekkis elektrikaar.

Kõrge temperatuuri tõttu isolatsioonikiht *E* aurustus ja söed põlesid järk-järgult ühtlaselt. Jablotškovi küünla asendas hiljem



Pavel Nikolajevitš Jablotškov (1847—1894) oli kuulus vene elektrotehnik, kes leiutas 1876. a. elektriküünla, mida nimetati «Jablotškovi küünlaks».

«Jablotškovi küünal» tõi tõelise pöörde elektrivalgustuse tehnikasse.

Samuti on P. N. Jablotškovil suured teened dünamomasinate konstruktsioonide väljatöötamises ja ka galvaani elementide ja akumulaatorite loomises. Ta ehitas ka elemendi, milles vooluallikana kasutati vahetult põlemise keemilist reaktsiooni.

täiuslikum elektrivalgustuse seade — hõõglamp, mille leiutas vene insener A. N. Lodõgin.

68. Elektrisädeme rakendamine metallide töötlemisel. Vaadeldes elektroodide pindu, millede vahel hüppasid üle sädemed, võib panna tähele, et anoodile on kujunenud süvend, katoodile aga sadestis (joon. 107). Seda nähtust nimetatakse elektrierosiooniks. Millest on see nähtus tingitud? Sädeme ülehüppamisel katoodi ja anoodi vahelises õhkvahes tekib «elektronide laviin», mis paiskub anoodile ja kuumendab väga kõrge temperatuurini seda osa pinnast, kuhu toimub paiskumine.

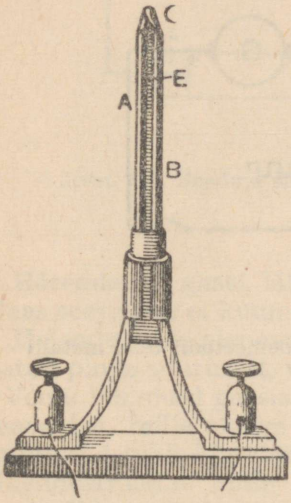
Sellel kohal sulab anoodi metall ja muutub osaliselt isegi auruks. See protsess toimub erakordselt kiiresti. Paisumisel metalli aurud viskavad anoodi pinnast sulanud metalli eemale. Viimane satub katoodile, sadestub sellele ja hangub. Selle protsessi tulemusena kujuneb anoodil süvend ja katoodil sadestis.

Anoodi ja katoodi erosioon toimub kõikidel neil juhtudel, kus tekib säde: vinnaklülitites, voolukatkestite ja mitmesuguste releede kontaktidel. Kõikidel sellistel juhtudel kujutab erosioon endast väga kahjulikku ja ohtlikku nähtust.

Nõukogude õpetlased B. R. Lazarenko ja N. I. Lazarenko

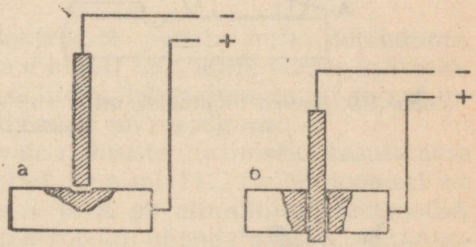
seadsid endile ülesande kasutada elektrierosiooni metallide töötlemiseks.

Kui detail, millesse on vaja teha avaus, võtta anoodiks ja lähendada temale katood nii, et nende vahel tekiksid sädemed, siis erosiooni tulemusena hakkab detailisse kujunema süvend (joon.



Joon. 106. Jablotškovi küünal.

Joon. 107. Elektrierosioon.



Joon. 108—109. Skeem metalli töötlemisest elektrisädeme abil.

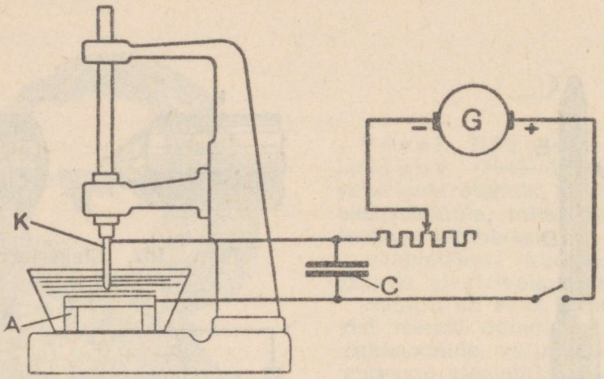
108), mis lõpuks muutub avauseks (joon. 109). Selline katse õigustas ennast täielikult. Selgus, et elektrisädemed teevad detailidesse auke mitte halvemini puurist. Ja tähelepandav on see, et metalli kõvadus ei oma elektrisädemetele mingit tähtsust. Elektrisädemete abil võib teha avasid igasse metalli, kui kõva see ka oleks.

Sädeme ülehüppamisel, nagu nägime, kujuneb katoodile sadestis. See on väga ebasoovitav nähtus, kuna ta moonutab katoodi kuju ja teeb võimatuks detailisse vajaliku kuju ja mõõtmetega augu saamise. B. R. ja N. I. Lazarenko lahendasid edukalt ka selle probleemi.

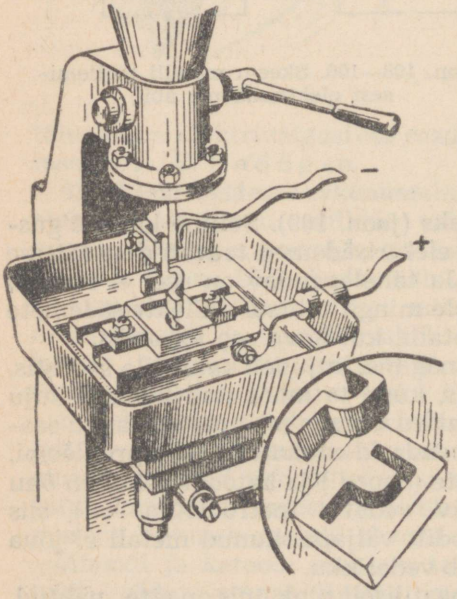
Nad tegid kindlaks, et kui toote (anoodi) ja katoodi vahel on õhu asemel mingi voolu mittejuhtiv vedelik (petrooleum, õli), siis katoodile sadestist ei teki. Anoodilt väljapaiskunud metall ei jõua sellisel juhul katoodile, vaid jääb vedelikku.

Joonisel 110 on näidatud skemaatiliselt pink, mis on ette nähtud aukude puurimiseks sädemeetodil. Anoodiks on siin toode *A*, varb *K* on katoodiks. Alalisvoolu all kaks on generaator *G*. Vooluringi lülitatud kondensaator *C* takistab sädeme muutumist kaareks.

Kui katood *K* lähendada tootele (teda veel puudutamata), tekib nende vahel säde, toimub toote erosioon. Katood tõuseb veidi, siis laskub uuesti ja uuesti tekib säde, süvend tootes suureneb jne. Nii kestab see seni, kuni tootesse tekib auk.



Joon. 110. Skeem tööpingist, mille abil saab sädemeetodil teha metalli avasid.



Joon. 111. Sädeme abil toodete töötlemise tööpingi peaosa. Paremal on kujutatud elektroodi profiil.

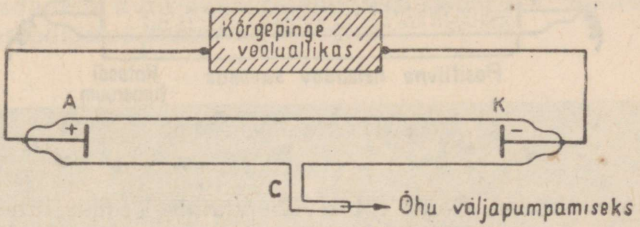
Katood pannakse ülesalla võnkuma erilise seadme abil, mida skeemil ei ole näidatud.

Elektroodil, millega töödeldakse detaili sädemeetodil, peab olema valmistatava avausega sarnane profiil (joon. 111).

Elektroodid valmistatakse messingist, s. o. küllalt pehmest materjalist. Niisuguste elektroodide abil võib aga teha avausi karastatud terasesse ja isegi kõvasulamisse.

Metalli töötlemist elektrisädemeetodil kasutatakse samuti mitmesuguste stantside valmistamiseks, metallide lõikamiseks ja tööriistade teritamiseks.

69. Vool hõrendatud gaasis. Elektrijuhtides elektrilaengu kandjate olemuse selgitamine võimaldas uurida nähtusi, mis kaasnevad elektrivooluga gaasides madalate rõhkude juures, s. o. hõrendatud gaasides. See uurimine algab XIX saj. teisel poolel.



Joon. 112. Seadme skeem voolu jälgimiseks hõrendatud gaasis.

Hõrendatud gaasi läbiv elektrivool paneb selle helenduma. Gaas seejuures ei kuumene, vaid ainult helendub, jäädes külmaks.

Helendumine, olenevalt gaasi liigist, hõrendusastmest ja rakendatud pinge suurusest, võib olla väga mitmesugune.

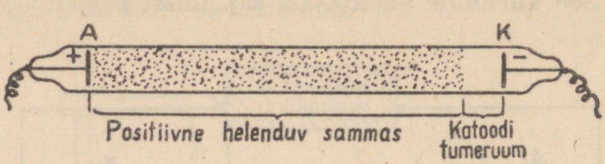
Voolu läbimisel gaasis tekkivate nähtuste uurimiseks kasutatakse seadeldisi, mille skeem on antud joonisel 112. Sellel joonisel on kujutatud pikk klaastoru, kus *A* ja *K* on alumiiniumelektroodid. Ühendustraadid, mille abil elektroodid ühendatakse kõrgepingevooluallikaga (mitu tuhat volti), on joodetud klaastorusse. Jätke *C* kaudu on võimalik õhku torust välja pumbata.

Seni kui õhu rõhk torus võrdub välisrõhuga, torus voolu ei ole. Õhku järk-järgult välja pumbates tekib varsti vool, mida märkame õhu helendumisest.

Väikesel õhu hõrendusel (100 mm elavhõbedasammast) tekib elektroodide vahel lahendus roosa helenduva lookleva riba näol. Edasisel õhu väljapumpamisel roosa riba pidevalt laieneb ja peagi täidab oma valgusega kogu toru ristlõike. Umbes 10 mm Hg rõhu piirides see riba eraldub katoodist. Lõpuks, gaasi rõhu puhul 1—2 mm Hg, lahendus saab tüüpilise, joonisel 113 skemaatiliselt kujutatud ilme. See koosneb põhiliselt kahest osast: 1) mittehelenduvast, vahetult katoodi läheduses olevast osast, mida nimetatakse *katoodi tumeruumiks*, ja 2) helenduvast gaasisambast, mis täidab toru ülejäänud osa kuni anoodini. Seda lahenduse osa nimetatakse *positiivseks helenduvaks sambaks*. Sageli see sammas on jaotatud tumedate vahedega kihtideks.

Vaadeldud lahendust nimetatakse *huumlahenduseks*. Huumlahendustorud leidsid praktilist kasutamist valgusallikatena, niinimetatud huumlampidena. Huumlampe kasutatakse tänapäeval laialdaselt kaupluste vitriinide, reklaamide jne. valgustamiseks. Erisuguseid huumlampe kasutatakse ka ruumide valgustamiseks.

Neid lampe käsitleme lähemalt edaspidi (§ 189). Valguse värvus oleneb gaasist. Neoon näiteks helendub oranžpunaselt, argoon — sinakasroheliselt jne.

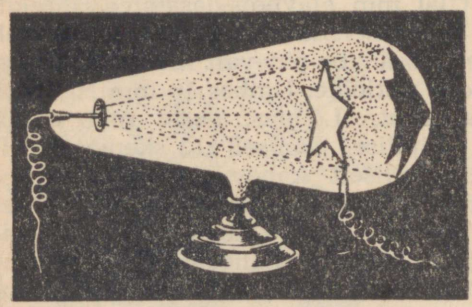


Joon. 113. Huumlahendus.

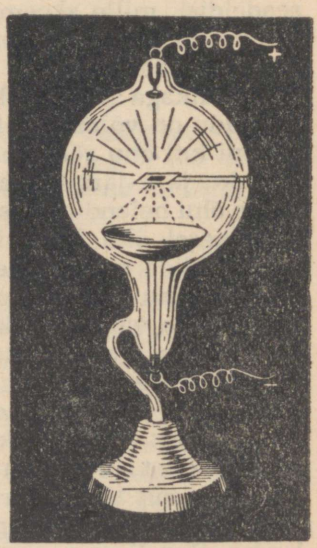
70. Katoodkiired. Gaasi rõhu vähendamisel torus lüheneb positiivne helenduv sammas, katoodi tumeruum aga pikeneb. Rõhul 0,001 mm Hg sammast muutub kogu toru peaaegu tumedaks, s. o. gaas lakkab helendumast, kuid nüüd hakkab toru klaassein, mis asub katoodi vastas, helenduma kollakasroheliselt.

Joonisel 114 on kujutatud toru, milles katoodi vastas asub tähekujuline metallist ekraanike. Ühendades elektroodid kõrgepingeallikaga, ilmub katoodi vastas asuvale toru seinale terav tähe vari ülejäänud toru pinna ereda kollakasrohelise helendumise foonil.

Vari kaob, kui vahetada elektroodidel poolused. Selle katse juures võib tähele panna seda, et juhul, kui katoodiks on ketas, siis sõltumata sellest, kas anood asub ekraanikese taga või kusagil toru küljel, annab täht-ekraanike ikkagi varju.



Joon. 114. Vari katoodkiirte torus.

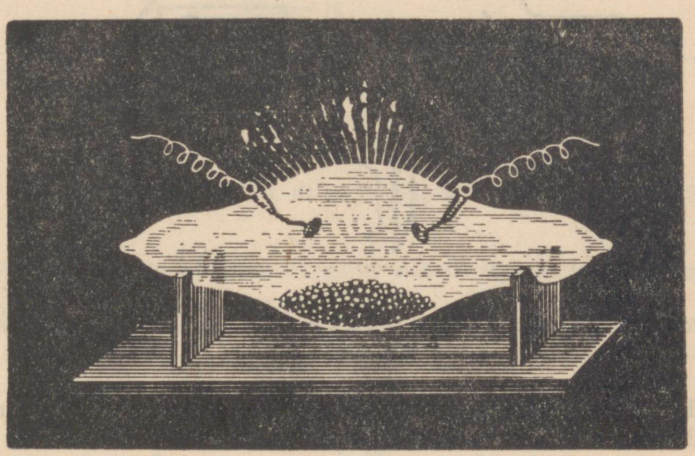


Joon. 115. Plaatinalehekese kuumenemine katoodkiirte mõjul.

Kirjeldatud katse näitab seda, et katoodi pinnalt väljuvad erilised kiired, mis levivad nagu valguskiiredki sirgjooneliselt. Omal ajal

arvati, et see kiirgus on oma olemuselt sarnane valguskiirgusega ja seepärast nimetatigi neid kiiri katoodkiirteks.

Andes katoodile nõgusa sfäärilise kuju, võime koondada neid kiiri ühte punkti. Kui sellesse punkti asetada õhuke metall-leht (näiteks plaatinast), siis võivad temale põrkuvad katoodkiired kuumendada teda kuni valge helenduseni (joon. 115). Sellest järeldub, et katoodkiired kannavad energiat.



Joon. 116. Mineraalide helendumine katoodkiirte mõjul.

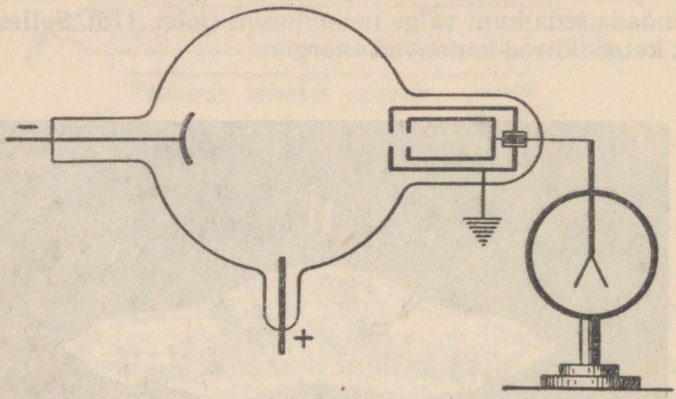
Katoodkiired, olles ise nähtamatud, panevad helenduma (luminestseeruma) paljusid aineid. Eelmises katses näiteks hakkas nende kiirte toimel luminestseeruma klaas, millest toru oli valmistatud. Asetades torusse katoodkiirte teele mitmesuguseid mineraale, näeme, et nad hakkavad eredalt helenduma, kusjuures helendumise värvus sõltub mineraali koostisest (joon. 116). See katoodkiirte omadus võimaldab meil jälgida nende teed, valmistades helenduvaid ekraane — õhukesi plaadikesi, mis on ühtlaselt kaetud väävlistsingi pulbriga või mõne teise luminestseeruva ainega. Kui niisugune ekraan asetada katoodkiirte teele, siis võib näha ekraanil intensiivset luminestsentsi kiirte toimel.

Katoodkiired võivad läbida väga õhukesi (d = 0,003—0,03 mm) metall-lehekesi. Nad mõjuvad fotoplaadile samuti nagu valguskiiredki. Peale selle nad ioniseerivad õhku.

71. Katoodkiirte olemus. Mida kujutavad endast katoodkiired? Missugune on nende olemus?

Prantsuse teadlane Perrin (loe: perään) tegi katoodkiirte olemuse selgitamiseks järgmise katse. Ta asetas katoodkiirte teele õõnsa metallsilindri, kuhu katoodkiired sattusid nagu püünisesse. Selle silindri ühendas ta elektromeetriga (joon. 117). Kui katood-

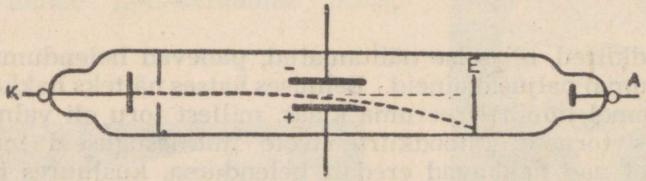
kiired kannaksid laengut, siis annaksid nad silindrisse sattudes oma laengu ära, mida võiks kohe elektromeetriga kindlaks teha. Sellel katsel ilmnes, et elektromeeter tõesti laadub ja seejuures negatiivselt.



Joon. 117. Katse, mis näitab, et katoodkiired on laetud osakeste voog.

Et lõplikult lahendada küsimus, millist laengut kannavad katoodkiired, tuli teha täiendavaid uurimisi.

Torusse joodeti kondensaator, mis koosnes kahest plaadist (joon. 118). Kui kondensaatori plaatidele rakendada pinge, siis kalduvad



Joon. 118. Katse, mille abil saab kindlaks teha katoodkiirte laengu märki.

negatiivselt laetud osakesed positiivse plaadi poole, positiivselt laetud osakesed aga negatiivse plaadi poole.

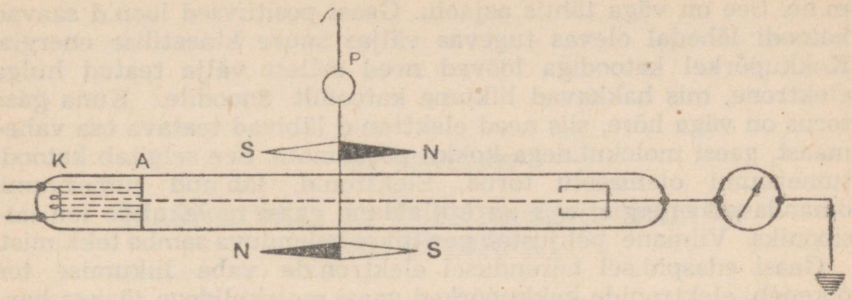
Tehes katoodkiirtega niisuguse katse, võib veenduda, et katoodkiirte kimp tõukub eemale negatiivselt laetud plaadist ja tõmbub positiivselt laetud plaadi poole. Selle katsega tõestati lõplikult, et *katoodkiired koosnevad ainult negatiivselt laetud osakestest.*

Peale selle avastati veel täiesti uus asjaolu. Katoodkiirte kimbu osakestel oli kõigil võrdne laeng ja mass, mis oli peaaegu 2000 korda väiksem vesinikuaatomi massist. Neid osakesi nimetatakse elektronideks.

Seega, *katoodkiired kujutavad endast metalsest katoodist väljalendavaid elektrone.*

Elektroni laeng $e = -4{,}8 \cdot 10^{-10}$ LÜ, elektroni mass $m = 9{,}1 \cdot 10^{-28}$g.

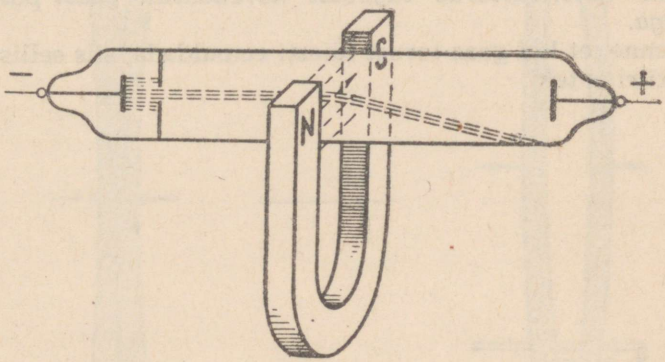
Elektronide kiirus katoodkiirtes on väga erinev, kuid ta on üldi-



Joon. 119. Katse, mis näitab, et katoodkiirte ümber on magnetväli.

selt väga suur, väga kõrgete pingete puhul ulatub see valguse kiiruseni vaakuumis $\left(c = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{s}}\right)$.

Oma olemuselt kujutab katoodkiirte kimp endast elektrivoolu.



Joon. 120. Katoodkiirte kõrvalekaldumine magnetväljas.

Nõukogude füüsik A. F. J o f f e näitas, et magnetnõelad, mis on asetatud katoodkiirte kimbu lähedale, kalduvad kõrvale nii, nagu nad kalduvad kõrvale vooluga juhi lähedal (joon. 119). Järelikult on katoodkiirte kimbu ümber magnetväli. Lähendades torule magneti, võib katoodkiiri kallutada kõrvale nende teelt (joon. 120), järelikult katoodkiired kalduvad magnetväljas kõrvale samuti nagu magnetväljas liikuvalt asetatud juht, mida läbib vool.

Vaatleme nüüd, mis põhjustab katoodkiirte tekkimist. Vastuse sellele küsimusele saame, kui oleme tutvunud huumlahenduse juures toimuvate nähtustega torus.

Kui mõõta elektrivälja tugevust huumlahendustorus, siis selgub, et katoodi läheduses, suhteliselt õhukeses gaaskihis on väljatugevus väga suur; siin, järelikult, on kõige suurem potentsiaali alanemine. See on väga tähtis asjaolu. Gaasi positiivsed ioonid saavad katoodi lähedal olevas tugevas väljas suure kineetilise energia. Kokkupõrkel katoodiga löövad need sellest välja teatud hulga elektrone, mis hakkavad liikuma katoodilt anoodile. Kuna gaas torus on väga hõre, siis need elektronid läbivad teatava osa vahemaast, gaasi molekulidega kokku põrkamata. See selgitab katoodi tumeruumi olemasolu torus. Elektronid, läbinud tumeruumi, omandavad energia, mis on küllaldane gaasi molekulide ionisatsiooniks. Viimane põhjustab positiivse helenduva samba tekkimist.

Gaasi edaspidisel hõrendusel elektronide vaba liikumise tee pikeneb, elektronide kokkupõrked gaasi molekulidega järjest harvenevad ja gaasi ionisatsiooniga seotud valgusnähted nõrgenevad. Positiivne sammas järk-järgult lüheneb, katoodi tume ala aga, vastupidi, laieneb. Rõhul ligikaudu 0,001 mm Hg sammast liigub enamik elektrone kogu toru ulatuses sirgjooneliselt, põrkamata kokku molekulidega. Elektronid, pommitades oma põrgetega toru seina, tekitavad klaasi rohelise luminestseerumise ja soojenemise.

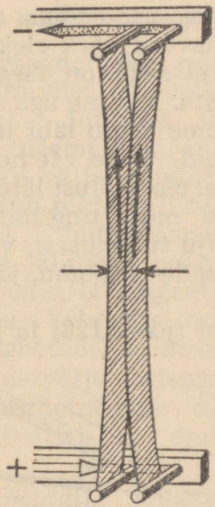
Seega, *katoodkiirte tekkimise põhjuseks on metallkatoodi pommitamine lahendustorus tugevalt hõrendatud gaasi positiivsete ioonidega.*

On ilmne, et kui gaas torust täiesti eemaldada, siis sellises torus katoodkiiri ei teki.

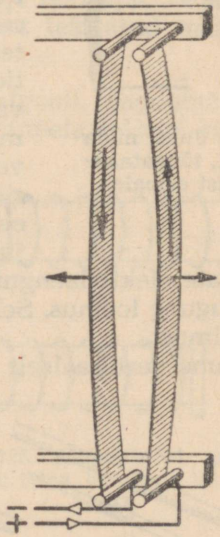
III PEATÜKK

MAGNETVÄLI JA ELEKTROMAGNETILINE INDUKTSIOON.

72. Magnetväli. Vaadeldes I peatükis elektriseeritud kehade vastastikust toimet, me näg.me, et elektrilaengute ümber on alati elektriväli. Kõ.kjal, kus on mingi elektrilaeng, on tema ümber ruumis ka elektriväli. Me teame samuti, et elektrivälja jõudude toi-



Joon. 121. Juhid tõmbuvad teineteise poole, kui neid läbivad samasuunalised voolud.



Joon. 122. Juhid tõukuvad teineteisest eemale, kui neid läbivad vastassuunalised voolud.

mel tekib laetud osakeste liikumine — elektronide vool metallides ja vaakuumis n ng ioonide vool vedelikes ja gaasides.

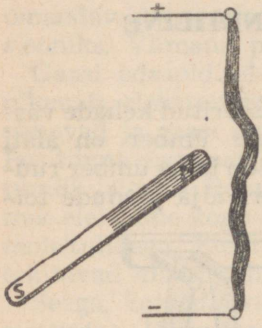
Nende nähtuste uurimisel, mis on seotud elektrivoolu tekkimisega juhtmetes, tutvume elektrilaengute selliste omadustega, mis leiavad aset ainult laengute liikumisel.

Liikuvate laengute üks tähtsamaid omadusi avaldub vooluga juhtide vastastikuses toimes. Tutvume selle nähtusega katse abil.

Riputame kaks painduvat sirget juhti teineteisega paralleelselt mingi toe külge. Juhtides neisse voolu, mõjuvad nad teineteisele — nad kas tõmbuvad ligi või tõukuvad eemale.

Juhid tõmbuvad siis, kui neid läbivad samasuunalised voolud (joon. 121), ja tõukuvad, kui neid läbivad vastassuunalised voolud (joon. 122).

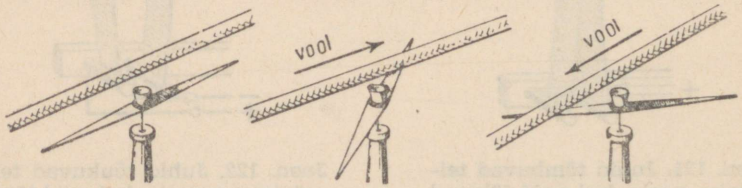
Kuidas tekib siis vooluga juhtide puhul nende vastastikune mõju? Milline on selle vastastikuse mõju mehhanism?



Joon. 123. Juht, mida läbib vool, tõugatakse magnetist eemale.

Vaatleme alguses, kas see nähtus võiks olla juhtides olevate elektrilaengute vastastikuse mõju tulemuseks, mida me näg'me tasakaalus olevate elektrilaengute puhul. Kontrollime oma oletust katse abil. Ühendame ühe juhtidest vooluallika positiivse poolusega, teise aga negatiivse poolusega. Vooluring olgu seejuures avatud. Juhtidesse kogunevad seejuures erinimelised elektrilaengud, millede ümber eksisteerib elektriväli. Meie näeme aga, et juhtide vahel tekib sedavõrd nõrk elektriline vastastikune mõju, et seda on isegi võimatu silmaga märgata. Kui me aga suleme vooluringi, s. o. laseme voolu läbi juhtide, siis tõukuvad juhid kohe teineteisest eemale. Järelikult ei ole voolust läbitavate juhtide vastastikune mõju tingitud mitte neil olevate elektrilaengute vastastikuse mõju tulemusest, vaid sel on teistsugune loomus. Selleks et selgitada selle iseloomu, jätkame oma uurimust.

Riputame vertikaalselt üles painduva juhi (joon. 123) ja juhime



Joon. 124. Elektrivool mõjutab magnetnõela.

temast läbi elektrivoolu, suunaga ülevalt alla. Lähendame juhile eestpoolt magneti põhjapooluse: juht kaldub paremale. Lähendades juhile aga magneti lõunapooluse, kaldub juht vasakule. Kui muuta voolu suunda nii, et see oleks alt üles, siis paindub ka juht magneti mõjul vastassuunaliselt.

Teeme veel ühe katse. Võtame teravikule asetatud magnetnõela ja paigutame piki selle telge juhi (joon. 124). Kui vool läbib juhti, siis kaldub magnetnõel oma esialgsest asendist kõrvale, tähendab, temale mõjub jõud.

Sellise katse, mis näitas elektriliste ja magnetiliste nähtuste vahel esinevat seost, tegi esimesena taani teadlane Oersted 1820. a.

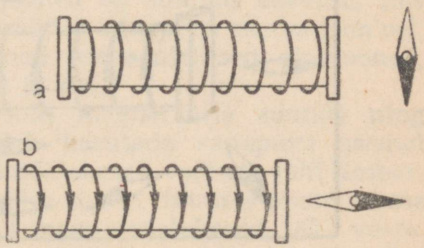
Kõik need katsed viivad meid järeldusele, et voolude vastastikuse mõju jõududel, magneti mõjul voolule ja voolu mõjul magnetile, on üks ja sama loomus. Neid nimetatakse magnetjõududeks. Magnetjõudude allikaks on magnetväli, mis tekib magneteid ja vooluga juhte ümbritsevas ruumis.

Seega mõjuvad liikuvate elektrilaengute vahel peale elektrijõudude ka veel magnetjõud.

Mitmesuguste magnetiliste nähtuste uurimine näitas, et *igal pool, kus on elektrivool, s. o. liikuvad elektrilaengud, esineb ka magnetväli.* Elektrivool ja magnetväli on teineteisest lahutamatud.

Kuna magnetväli tekib juhi ümber, kui seda läbib vool, siis vaadeldakse voolu sageli kui magnetvälja tekitajat. Selles tähenduses tulebki mõista väljendusi: «voolust tekitatud magnetväli», «voolu magnetväli» jne.

73. Magnetvälja suund. Asetame traatpooli magnetnõela lähedusse niiviisi, et pooli telg oleks magnetnõela teljega risti (joon. 125, *a*). Juhtides läbi pooli voolu, näeme, et magnetnõel pöördub välja jõudude toimel ja asetub piki pooli telge (joon. 125, *b*). Nihutades magnetnõela voolust läbitava pooli läheduses, näeme, et magnetvälja erinevates kohtades orienteerub ka magnetnõel erinevalt.



Joon. 125. Magnetnõel asetub piki pooli telge, kui pooli läbib vool.

Magnetvälja orienteeriv toime magnetnõelale näitab, et magnetväljal on oma kindel suund.

Magnetvälja suunaks antud punktis loetakse magnetnõela põhjapoolusele mõjuvate jõudude suunda.

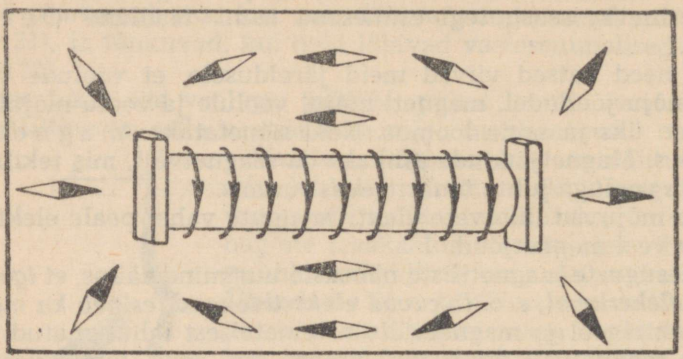
Vaatleme nüüd, kas magnetvälja suund sõltub voolu suunast juhis. Selleks korraldame jällegi katse.

Asetame vooluga pooli ümber erinevatesse kohtadesse mõned väikesed magnetnõelakesed.

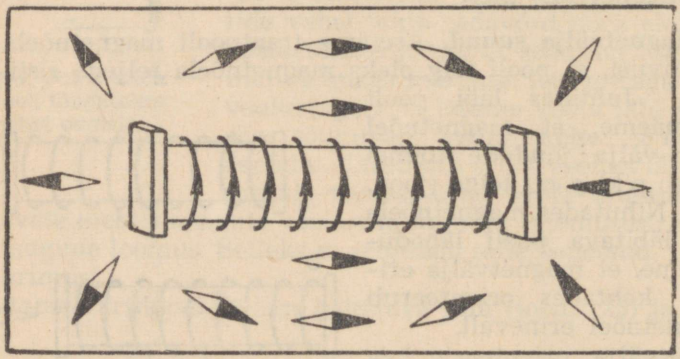
Nende magnetnõelakeste teljed näitavad nende asukohas magnetvälja suunda (joon. 126). Muudame pooli läbiva voolu suunda. Magnetnõelakesed muudavad samuti oma asendit — nad pöörduvad kõik 180° võrra, s. o. näitavad vastupidist suunda (joon. 127).

Tähendab, voolu suuna muutmisel juhis muutub ka magnetvälja suund vastupidiseks.

Järelikult sõltub magnetvälja suund elektrivoolu suunast, mille ümber see magnetväli tekib.



Joon. 126. Magnetnõelad asetuvad piki pooli magnetvälja jõujooni.



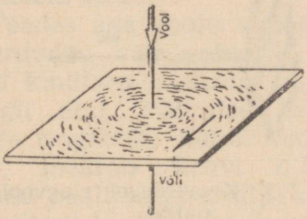
Joon. 127. Muutes poolis voolu suunda, pöörduvad magnetnõelad 180°.

74. Sirgvoolu magnetväli. Magnetvälja olemasolu vooluga juhi ümber võib kindlaks teha mitmel viisil. Üheks viisiks on magnetvälja nähtavaks tegemine rauapuru abil. Väikesed rauatükikesed, milledest koosneb rauapuru, muutuvad magnetväljas väikesteks magnetnõelakesteks. Igaüks neist magnetnõelakestest võtab magnetväljas niisuguse asendi, et tema telg ühtib magnetvälja suunaga vastavas punktis. Paljude niisuguste magnetnõelakeste abil võib näha, kuidas muutub magnetvälja suund tema erinevates punktides, s. o. saada pildi, mis vastab magnetvälja üldisele struktuurile, või nagu tavaliselt öeldakse, saada *magnetspektri*.

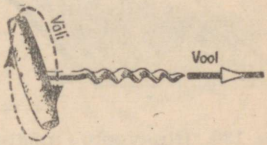
Kasutame rauapuru sirgvoolu magnetvälja struktuuri vaatlemiseks. Selleks asetame juhi läbi papitükis oleva avause nii, et juht

oleks papitükiga risti, ja raputame papitükile õhukese kihi rauapuru. Me näeme, et juhist voolu läbilaskmisel asetub rauapuru juhi ümber kontsentrilistе ringikestena (joon. 128).

Jooni magnetväljas, mille puutujate suunas on asetunud magnetnõelakeste teljed, nimetatakse magnetvälja jõujoonteks.



Joon. 128. Sirgvoolu magnetvälja jõujoonte pilt.



Joon. 129. Kruvireegel.

Jõujoonte abil on ülevaatlik kujutada magnetvälja graafiliselt. Magnetvälja jõujoon kulgeb niiviisi, et puutuja igas tema punktis näitab magnetvälja suunda selles punktis.

Ahelakesed, mida moodustab rauapuru magnetväljas, näitavad magnetvälja jõujoonte kuju.

Vooluga juhi magnetvälja jõujooned on suletud kõverad, mis ümbritsevad juhti. Erijuhul, nagu näitab rauapuru asetus joonisel, on sirgvoolu magnetvälja jõujooned kontsentrilised ringjooned, millede keskpunktid asuvad voolu joonel.

Selleks et määrata kindlaks voolu magnetvälja suunda ning selle sõltuvust voolu suunast, tuleb kasutada rauapuru asemel magnetnõelakesi. Asetades magnetnõelakesed vooluga juhi ümber, võime kindlaks määrata magnetvälja suuna. Muutes voolu suuna juhis vastupidiseks, pöörduvad ka magnetnõelakesed 180° võrra, mis näitab magnetvälja suuna vastupidiseks muutumist. Joonisel 128 on näidatud noole abil voolu magnetvälja suund.

Magnetvälja jõujoonte suund sõltuvalt voolu suunast juhis on väljendatav lihtsa reegliga, mis on antud inglise teadlase Maxwelli poolt.

Kui kruvi kulgev liikumine ühtib voolu suunaga juhis, siis kruvipea pöördumise suund ühtib magnetvälja jõujoonte suunaga juhi ümber olevas magnetväljas.

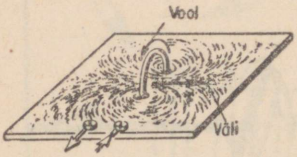
Seda reeglit nimetatakse sageli «kruvireegliks» (joon. 129).

75. Ringvoolu magnetväli. Võtame nüüd ringiks painutatud juhi (joon. 130), juhime temast läbi voolu ja vaatleme jälle rauapuru asetust papitükil, mis on asetatud risti ringjoone tasapinnaga ja läbib ringjoone keskpunkti. Me näeme, et magnetvälja jõujooned ei ole enam ringjooned, kuigi nad on kinnised kõverad, mis ümb-

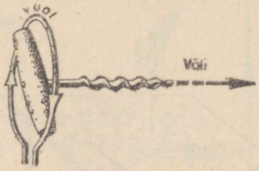
ritsevad vooluga juhti. Seega on ringvoolu, samuti nagu iga voolu, magnetvälja jõujooned juhti ümbritsevad kinnised kõverad.

Asetades selle välja erinevatesse punktidesse väikesed magnetnõelakesed, võib määrata kindlaks magnetvälja jõujoonte suunad.

Kruvireegel on samuti kasutatav ka ringvoolu puhul, kuid sel



Joon. 130. Ringvoolu magnetväli.

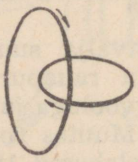


Joon. 131. Kruvireegel ringvoolu puhul.

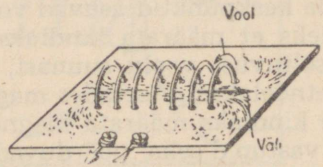
juhul on kasulik selles reeglis ümber vahetada magnetvälja suuna ja voolu suuna kohad (joon. 131). Tõepoolest, kui pöörata kruvipead voolu suunas, siis kruvi nihkumise suund näitab ringvoolu sees magnetvälja jõujoonte suunda.

Seega voolu ja selle magnetvälja suund on kaks teineteisega vastastikku seotud suunda.

Joonisel 132 on kujutatud kaks teineteist haaravat rõngast nooltega, mis näitavad suunda. Kumbki neist rõngastest võib kujutada kas voolu suunda või selle voolu magnetvälja jõujoonte suunda.



Joon. 132. Magnetvälja jõujoon ja suletud vool.



Joon. 133. Solenoidi magnetvälja jõujoonte pilt.

76. Vooluga pooli magnetväli. Juhime voolu läbi paljude traadikeerdudega pooli. Niisugust pooli nimetatakse solenoidiks[1]. Magnetvälja, mis tekib neid keerdusid läbiva elektrivoolu toimel, võib kujutada üksikute keerdude voolude poolt loodud magnetväljade summana. Kui pooli pikkus on tunduvalt suurem tema keerdude läbimõõdust, siis tekib niisuguse pooli sees magnetväli, mille jõujooned on üksteisega paralleelsed (joon. 133). Pooli otstel jõujooned lähevad laiali ja ühinevad uuesti väljaspool solenoidi. Magnetvälja suund on joonisel märgitud noolega.

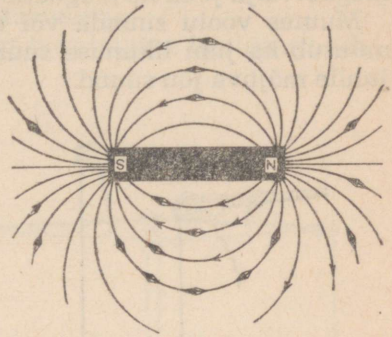
On kerge näha sarnasust solenoidi välise ja püsivmagneti mag-

[1] Solenoid (kreeka keeles — *solenoides*) — torukujuline.

netväljade vahel (joon. 134). Vastavalt kokkuleppele loetakse, et jõujooned väljuvad pooli ühest otsast ja sisenevad teise. See pooli ots, millest jõujooned väljuvad, on analoogiline magneti põhjapoolusega. Pooli teine ots, millesse jõujooned sisenevad, on aga analoogiline magneti lõunapoolusega.

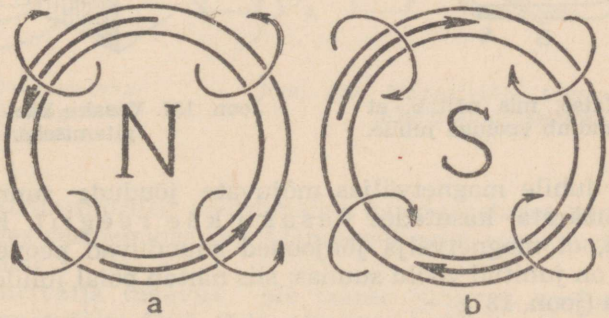
Solenoidi poolused on katseliselt lihtne kindlaks määrata magnetnõela abil.

Teades aga voolu suunda pooli keerdudes, võib solenoidi pooluseid kindlaks määrata ka kruvireegli abil. Pöörates kruvipead nagu ringvoolu puhul voolu suunas, määrab kruvi nihkumise suund pooli magnetvälja suuna ja järelikult ka tema poolused.



Joon. 134. Püsivmagneti magnetvälja pilt.

Solenoidi põhjapooluseks on tema see ots, kus vool solenoidi keerdudes liigub selle otsa vastas asuva vaatleja suhtes vastu kellaosuti liikumise suunda (joon. 135, *a*). Pooli teine ots osutub lõunapooluseks, kuna siin on väljastpoolt vaadates voolu suund keerdudes vastupidine — kellaosuti liikumise suunas (joon. 135, *b*). Pooli pooluste muutmiseks piisab teda läbiva voolu suuna muutmisest.



Joon. 135. Solenoidi põhja- ja lõunapoolus.

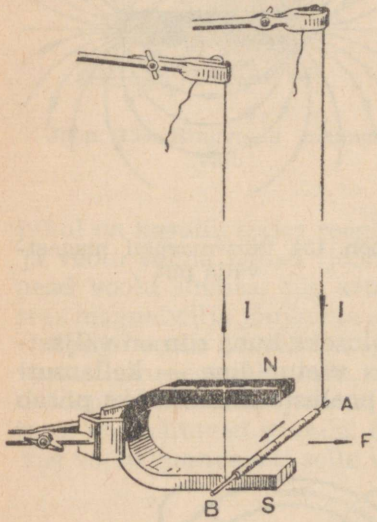
77. Magnetvälja mõju vooluga juhile. § 72 tegime kindlaks, et kaks vooluga juhti mõjutavad teineteist. Seda nähtust seletasime järgmisel viisil: jõud, mis avaldub kummalgi juhul, on põhjustatud teist juhti läbiva voolu poolt loodud magnetväljast.

Seetõttu tuleb arvata, et kui paigutada vooluga juht mistahes magnetvälja, näiteks püsivmagneti välja, siis sellele juhile mõjub jõud. Kontrollime seda katsega. Sulgedes vooluringi, juhime voolu läbi vabalt ülesriputatud juhi *AB*, mis asub hobuserauakujulise

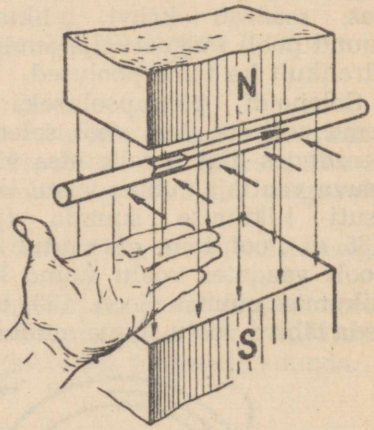
magneti magnetväljas. Me näeme, et juht hakkab liikuma (joon. 136.)

Kui magnet on eemaldatud, siis juht ei hakka liikuma. Tähendab, vooluga juhile mõjub magnetvälja jõud samuti, nagu mõjub magnetvälja jõud ka magnetnõelale.

Muutes voolu suunda või magnetvälja suunda, märkame, et muutub ka juhi likumise suund, see aga tähendab, et muutub ka juhile mõjuva jõu suund.



Joon. 136. Katse, mis näitab, et magnetväli mõjub vooluga juhile.



Joon. 137. Vasaku käe reegli selgitamiseks.

Vooluga juhile magnetväljas mõjuvate jõudude suunda võib kindlaks määrata, kasutades vasaku käe reeglit. Käsi asetatakse nii, et magnetvälja jõujooned suunduvad peopessa, neli sõrme aga on juhitud voolu suunas; siis näitab pöial juhile mõjuva jõu suunda (joon. 137).

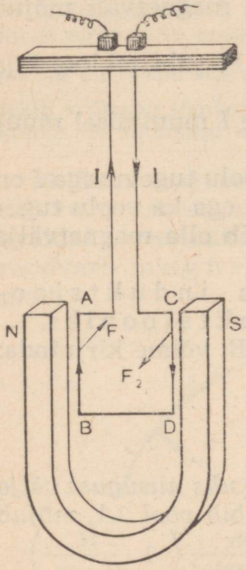
Praktiline tähtsus on ristküliku-kujulise raami liikumisel homogeenses magnetväljas. Joonisel 138 on raam *ABCD* asetatud paralleelselt magnetvälja jõujoontega. Voolu suund on näidatud nooltega.

Kasutades vasaku käe reeglit, leiame, et raami osale *AB* mõjub jõud F_1, mis on suunatud meist joonise taha. Kuid raami osale *CD* mõjub jõud F_2, mis on suunatud joonisest meie poole. Raami osadele *AC* ja *BD*, mis paigutuvad piki magnetvälja jõujooni, ei mõju aga mingit jõudu. Jõud F_1 ja F_2 on teineteisega võrdsed ja paralleelsed, kuna keeruosad *AB* ja *CD* on ühesugused ja teineteisega paralleelsed. Järelikult mõjub kogu raamile jõupaar, mille toimel

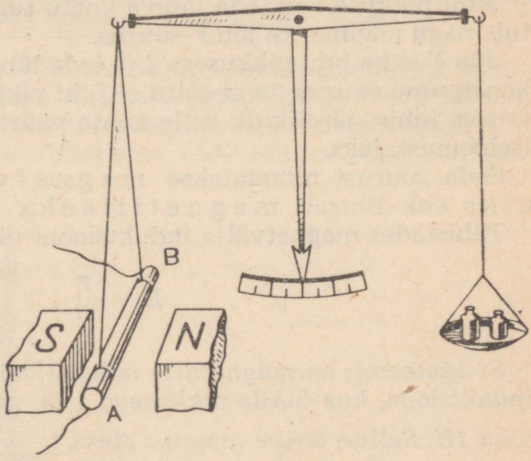
ta pöördub ja asetub niimoodi, et tema tasapind on magnetväljaga risti. Keeru niisuguses asendis on temale mõjuva jõupaari pöördemoment võrdne nulliga.

Kui katse algul oleks raami läbiva voolu suund olnud vastupidine, siis oleks raam pöördunud vastassuunas.

Vooluga juhi liikumist magnetväljas kasutatakse laialdaselt teh-



Joon. 138. Vooluga raamile mõjub magnetväljas jõupaar.



Joon. 139. Magnetvälja tugevuse määramise seadme skeem.

nikas: elektrimootorites, pöördpooliga mõõduriistades, reproduktorite mõnedes süsteemides jne. Mõningaid neist rakendustest vaatleme edaspidi.

78. Magnetvälja tugevus. Me teame juba, et vooluga juhile mõjub magnetväljas jõud. Selle jõu suund sõltub nii magnetvälja kui ka voolu suunast: kui need on teada, siis võib jõu suuna määrata vasaku käe reegli järgi.

Vaatleme nüüd, millest sõltub selle jõu suurus. Pöördume jällegi katse juurde.

Riputame kangkaalu vasakpoolse õla külge sirge juhi AB ja asetame ta elektromagneti pooluste N ja S vahele (joon. 139). Lülitame sama juhiga järjestikku ampermeetri ja reostaadi, viimasega saame muuta juhti läbiva voolu tugevust (joonisel 139 ei ole näidatud ampermeetrit ega reostaati). Tasakaalustame kaalud ja suleme seejärel vooluringi. Kaal ei jää enam tasakaalu; selleks et seda viia tasakaalu, tuleb parempoolsele kaalukausile asetada vihte, mille

kaal võrdub juhile mõjuva jõuga (mõjugu see jõud antud juhul vertikaalselt allapoole). Muutes nüüd sirges juhis voolu tugevust, näeme, et voolu tugevuse suurenemisega suureneb ka juhile mõjuv jõud. Mõõtmised näitavad, et jõud, millega magnetväli mõjub juhile, on võrdeline juhti läbiva voolu tugevusega.

Kas sõltub see jõud juhi AB pikkusest? Selle küsimuse lahendamiseks võtame erinevate pikkustega juhid sama voolu tugevuse puhul. Mõõtmised näitavad, et jõud, millega magnetväli mõjub juhile, on võrdeline juhi pikkusega.

Olgu magnetvälja poolt juhile mõjuv jõud F, juhi pikkus l ja voolu tugevus juhis I.

Juhi pikkuse l ja teda läbiva voolu tugevuse I muutmisel muutub, nagu nägime, ka jõu F suurus.

Jõu F suhe juhi pikkusega l ja teda läbiva voolu tugevusega I on konstantne suurus; ta ei sõltu ei juhi pikkusest ega ka voolu tugevusest juhis; järelikult, selle suhte väärtus võib olla magnetvälja iseloomustajaks.

Seda suurust nimetatakse magnetvälja induktsiooniks ehk lihtsalt magnetiliseks induktsiooniks.

Tähistades magnetvälja induktsiooni tähega B, võime kirjutada:

$$B = \frac{F}{Il}.$$

SI-süsteemis on magnetilise induktsiooni ühikuks niisuguse välja induktsioon, kus juhile pikkusega 1 m, mida läbib vool 1A, mõjub jõud 1N. Sellise ühiku nimetus oleks $1\ \frac{\text{njuuton}}{\text{amper} \cdot \text{meeter}}$ $\left(1\ \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}}\right)$.

Näitame, et $1\ \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1\ \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2}$.

$$1\ \frac{\text{N}}{\text{A} \cdot \text{m}} = 1\ \frac{\text{N} \cdot \text{m}}{\text{A} \cdot \text{m}^2} = 1\ \frac{\text{J}}{\text{A} \cdot \text{m}^2} = 1\ \frac{\text{V} \cdot \text{A} \cdot \text{s}}{\text{A} \cdot \text{m}^2} = 1\ \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{m}^2} = 1\ \text{T}\ \text{(tesla)}.$$

Ühikut $1\text{V} \cdot \text{s}$ nimetatakse veebriks (Wb). Järelikult on magnetilise induktsiooni ühikuks $1\ \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$.

Magnetvälja induktsioon on vektoriaalne suurus. Vektori suund antud punktis ühtib sama punkti läbiva jõujoone suunaga. Magnetiline induktsioon on magnetvälja jõukarakteristikuks, samuti nagu elektrivälja tugevus on elektrivälja jõukarakteristikuks (§ 8).

Teades magnetvälja induktsiooni, võib arvutada jõu, millega magnetväli mõjutab vooluga juhti, järgmise valemi abil:

$$F = BIl.$$

Üldjuhul $F = BIl \sin \alpha$, kus α on nurk voolu (I) suuna ja magnetilise induktsiooni vektori (B) vahel.

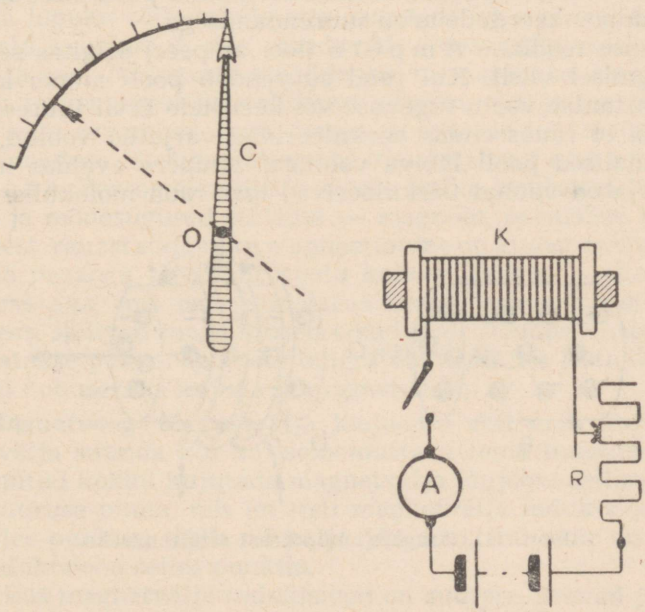
Harjutus 14.

1. Magnetvälja suunaga risti asuvale 40 cm pikkusele sirgele juhile mõjub jõud 15 dn. Määrata magnetvälja induktsioon, kui voolu tugevus juhis on 3 A.

2. Elektromagneti pooluste vahele on asetatud sirge juht risti magnetvälja suunaga. Magnetväljas asuv juhi osa on 50 cm pikk. Määrata jõud, millega magnetväli mõjub juhile, kui magnetvälja induktsioon on 4 $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$ ja voolu tugevus juhis on 2 A.

3. Elektromagneti pooluste vahele on riputatud kahe kerge spiraalvedru külge sirge juht «kiige» kujul (magnetväljaga risti). Juhi horisontaalse osa pikkus on 15 cm. Magnetvälja induktsioon on 0,2 $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$. Juhist voolu läbimisel tekib vedrudes tõmbejõud, mille suurus on 3 G. Kui tugev vool läbis juhti ja kuidas oli suunatud magnetväli elektromagneti pooluste vahel?

79. Raua magneetumine. Me teame, et vooluga pooli sisse asetatud raudvarb saab omaduse tõmmata enda külge raudesemeid, avaldada vastastikust toimet vooludega ja teiste magnetitega, s. o. raudvarb m a g n e e t u b. Vaatleme seda nähtust üksikasjalisemalt.



Joon. 140. Raua magneetumise uurimise skeem.

Asetame pooli *K* lähedusse vertikaalasendisse raudosuti *C*, mis võib pöörelda horisontaaltelje *O* ümber (joon. 140). Juhtides voolu läbi pooli, me näeme, et osuti kaldub mingi nurga võrra. Viime pooli osutist niisugusele kaugusele, et selle kaldumine on vaevalt märgatav.

Muutes vooluringi takistust reostaadi R abil, suurendame voolu tugevust poolis; osuti kaldub seejuures mingi nurga võrra. Suurendades pooli keerdude arvu, me võime saavutada osuti samasuguse kaldumise ka ilma voolu tugevust poolis suurendamata. Mõlemal juhul tugevneb pooli magnetväli ja seega suureneb ka magnetvälja tugevus osuti asukohas.

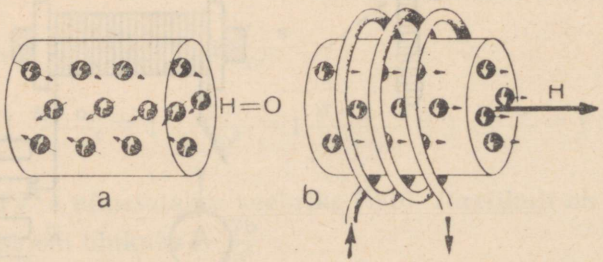
Kuid on võimalik saavutada pooli magnetvälja samasugust tugevnemist ka ilma voolu tugevust või pooli keerdude arvu suurendamata. Selleks piisab, kui asetame pooli sisse pehmest rauast südamiku.

Ükskõik kuhu me pooli läheduses osuti ka asetaksime, igal pool on sel juhul tema kaldumine suurem kui ilma raudsüdamikuta.

Sellest on näha, et pooli sisse asetatud raudsüdamik põhjustab samasugust magnetilist mõju nagu pooli läbiva voolu tugevuse või pooli keerdude arvu suurendamine või nii ühe kui ka teise samaaegne suurendamine.

Amprites väljendatud voolu tugevuse ja pooli keerdude arvu korrutist nimetatakse amper-keerdudeks. Kasutades seda väljendust, võib öelda, et raudsüdamiku asetamine pooli sisse on samaväärne amper-keerdude arvu suurendamisega.

Prantsuse teadlane A m p è r e (loe: ampeer) selgitas seda nähtust järgmisel viisil. Kui raud suurendab pooli amper-keerdude arvu konstantse voolu tugevuse või keerdude arvu juures, siis see tähendab, et rauas endas tsirkuleerivad varjatud voolud, mis on samasuunalised pooli läbiva vooluga. Ampère avaldas mõtte, et need varjatud voolud tsirkuleerivad igas raua molekulis.



Joon. 141. Ampère'i hüpoteesi selgitamiseks.

Mittemagneeditud rauas tsirkuleerivad «molekulaarsed ringvoolud» korrapäratult ruumis asuvates erinevates tasapindades (joon. 141, *a*). Nende poolt tekitatud magnetvälja induktsioon on keskmiselt võrdne nulliga. Kui aga raud asetada pooli sisse, siis molekulaarsete ringvoolude tasapinnad paigutuvad paralleelselt pooli keerdudega (joon. 141, *b*). Nende ringvoolude magnetväljad summeeruvad nii üksteisega kui ka solenoidi väljaga ja seepärast suurenebki nende magnetiline toime.

Raua molekulide soojuslik liikumine ajab mõnevõrra segamini molekulaarsete ringvoolude orientatsiooni, kuid mida tugevam on pooli magnetväli, seda rohkem molekulaarseid ringvoolusid asetub paralleelselt pooli keerdudega. See toimub kuni raua *magnetilise küllastuseni*. Selles olukorras on kõik molekulaarsed ringvoolud asetunud paralleelselt pooli keerdudega.

Voolu katkestamisel poolis ajab raua molekulide soojuslik liikumine molekulaarsete ringvoolude tasapindade korrapärase asetuse jälle segamini ja selle tagajärjel raudsüdamik demagneetub.

Ampère'i ajal ei teatud aatomi ehitusest midagi, mille tõttu molekulaarsete ringvoolude olemus jäi tundmatuks. Nüüd me teame aga, et igas aatomis on negatiivselt laetud elektronid, mis liiguvad positiivselt laetud tuuma väljas. Elektronide liikumine aatomis mööda kinnisi orbiite kujutab endast elektrivoolu, mis tekitab magnetvälja analoogiliselt juhtides kulgevate vooludega.

Aatomi kõigi elektronide liikumisel tekkivate magnetväljade koosmõju tekitab aatomi ümber mingi resulteeriva välja. Kui aatomid on ühinenud molekulideks, siis molekuli moodustavate aatomite magnetväljad moodustavad oma koosmõjus molekuli magnetvälja. Ja lõpuks võib endale ette kujutada ka molekulidest palju suuremaid moodustisi, mis etendavad aines väikeste iseseisvate magnetite osa. Niisuguste moodustiste olemasolu on tingitud aine ühe- või teistsugusest kristallilisest struktuurist ja see põhjustab, nagu praegu arvatakse, raua, terase ja mõnede teiste ainete magnetilisi omadusi. Niisuguseid aineid nimetatakse *ferromagnetilisteks*. Ferromagnetiliste ainete hulka kuuluvad ka nikkel, koobalt ja mõnesugused sulamid — magniko, permalloi jt.

Pehmest rauast südamiku magneetumine on ajutise iseloomuga — see kaob peaaegu täielikult voolu katkestamisega poolis. Nendes südamikes aga, mis on valmistatud terase erimarkidest või erisulamitest, säilivad magnetilised omadused. Nendest materjalidest valmistatakse püsivmagneteid ümara või kandilise ristlõikega varraste või hobuseraua kujuga ja magnetnõelu.

80. Magnetvoog. Magnetvälja jõujoonte abil saab kujutada nii magnetvälja suunda kui ka iseloomustada tema induktsiooni.

On lepitud kokku kujutada magnetvälja jõujooni selliselt, et läbi 1 cm^2 suuruse pinna, mis on risti magnetvälja induktsioonivektoriga selles punktis, läbib nii palju jõujooni, kui suur on magnetvälja induktsioon selles punktis.

Seal, kus magnetvälja induktsioon on suurem, asuvad jõujooned tihedamalt ja, vastupidi, kus magnetiline induktsioon on väiksem, seal on ka jõujooni vähem.

Sel viisil saab jõujoonte tiheduse järgi otsustada magnetvälja induktsioonivektori suuruse üle ja jõujoonte suuna järgi — vektori suuna üle.

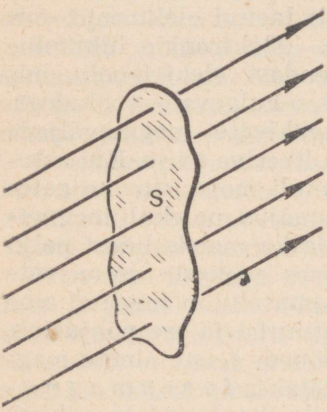
Pooli magnetspektri vaatlemine näitab, et poolist eemaldumisel magnetvälja induktsioon väheneb, ja seejuures väga kiiresti.

Magnetvälja, mille induktsioon erinevates punktides on erinev,

nimetatakse *mittehomogeenseks*. Mittehomogeensed väljad on sirg- ja ringvoolu magnetväljad, väli väljaspool solenoidi, püsivmagneti väli jne.

Magnetvälja, mille induktsioon kõigis punktides on ühesugune, nimetatakse *homogeenseks väljaks*. Homogeenset magnetvälja kujutatakse graafiliselt üksteisest võrdsetel kaugustel asetsevate paralleelsete sirgete abil.

Homogeense välja näiteks on väli pika solenoidi sees, samuti ka elektromagneti teineteisele lähedalasuvate paralleelsete tasapinnaliste pooluskingade vahel.



Joon. 142. Magnetvoo definitsiooni selgitamiseks.

Pinda läbiva magnetilise induktsiooni ja selle pinna suuruse korrutist nimetatakse magnetvooks (joon. 142).

Tähistades magnetvoo tähega Φ, pinna suuruse S-ga ja nurga magnetilise induktsiooni vektori ja pinna normaali vahel α-ga, võime kirjutada järgmise võrduse:

$$\Phi = BS \cdot \cos \alpha.$$

Magnetvoog on skalaarne suurus.

Kuna magnetvälja jõujoonte tihedus on võrdne välja magnetilise induktsiooniga, siis magnetvoog on võrdne kõigi jõujoonte arvuga, mis läbivad antud kontuuri.

Välja muutumisel muutub ka kontuuri läbiv magnetvoog: välja kasvamisel magnetvoog kasvab, nõrgenemisel kahaneb.

SI-süsteemis on magnetvoo ühikuks voog, mis läbib induktsioonivektoriga ristioleva 1 m^2 suuruse pinna homogeenses väljas, mille induktsioon on 1 $\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$.

Sellist ühikut nimetatakse veebriks.

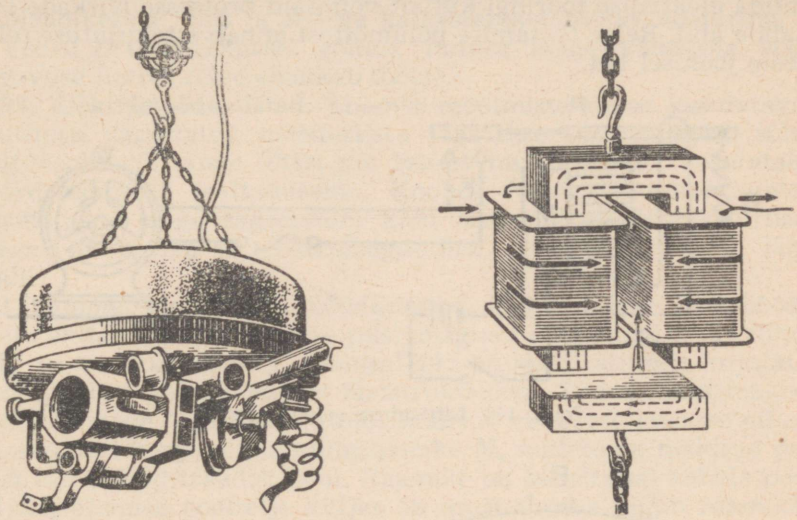
$$1\ \text{Wb} = 1\ \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2} \cdot 1\ \text{m}^2.$$

81. Elektromagnetid ja nende kasutamine. Poole, millesse on asetatud raudsüdamik, nimetatakse *elektromagnetiteks*. Olenevalt elektromagnetite kasutusalast valmistatakse neid väga erinevate mõõtmete ja kujuga.

Elektromagnetite kasutamist elektrikõlistis, telegraafis, elektrimootoris ja generaatoris käsitlesime juba füüsika algkursuses. Edaspidi tutvume mõnede teiste elektromagnetite kasutusaladega. Praegu aga juhime tähelepanu ühele tähtsale asjale, mis puutub elektromagnetite ehitusse.

Me nägime (§ 78), et raudsüdamikuga varustatud pooli mag-

netväli oli tunduvalt tugevam südamikuta pooli magnetväljast, kuna pooli sees asuv raud magneetub ja tema magnetväli liitub pooli magnetväljaga. Südamiku magnetväli tugevdab pooli magnetvälja. Kuid see väide kehtib ainult teatud piirides. Millest siis



Joon. 143. Tõstekraana elektromagnet.

see? Nagu katse näitab, on suhteliselt nõrkade voolude puhul raudsüdamiku magnetväli tunduvalt tugevam pooli magnetväljast. Voolu tugevuse suurenemisel poolis tugevnevad mõlemad väljad — nii pooli kui ka südamiku väli — ja järelikult ka nende summaarne väli. Kuid südamiku magnetilise küllastumise puhul, mis toimub antud pooli juures kindlal voolu tugevusel, tugevdab voolu tugevuse edasine suurendamine ainult pooli magnetvälja. Küllaldaselt suure amper-keerdude arvu puhul (mõnikümmend tuhat keerdu pooli pikkuse 1 cm kohta) võib pooli enda magnetväli osutuda tunduvalt tugevamaks küllastuseni magneetunud südamiku magnetväljast. Elektromagnetite valmistamisel tuleb endastmõistetavalt arvestada seda asjaolu.

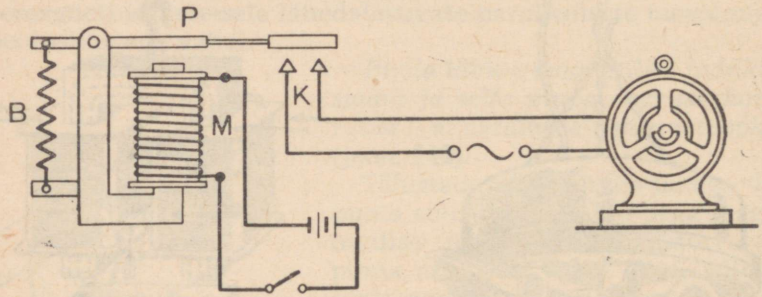
Paljudel praktikas kasutatavatel elektromagnetitel on mähised, mille amper-keerdude arv pooli pikkuse 1 cm kohta on mõnesaja piirides. See võimaldab kasutada mähisteks suhteliselt peeni traate ja toita neid nõrkade vooludega. Joonisel 143 on kujutatud tõstekraana elektromagnet.

82. Elektromagnetiline relee.[1] Relee kujutab endast elektromag-

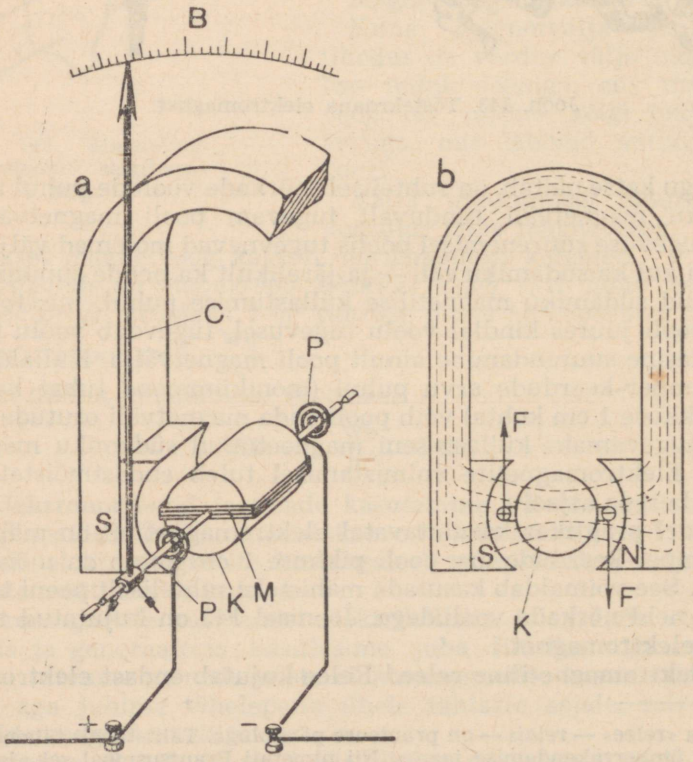
[1] Sõna «relee» — *relais* — on prantsuse päritoluga. Täht-tähelt tähendab ta «hobuste ümberrakendamise jaam». Nii nimetati Prantsusmaal sel ajal, kui veel ei olnud raudteid, postijaamu, kus vahetati ja rakendati ümber hobuseid.

netilist seadet, mis töötab nõrkade voolude toimel. Releed kasutatakse laialdaselt kõigis tehnika valdkondades — automaatsel reguleerimisel, tootmise automatiseerimisel jne.

Relee laialdane kasutamine on tingitud tema põhiomadusest — juhtida elektrilise tööringi küllalt võimsaid protsesse nõrkade signaalide abil. Relee töötamise põhimõttest annab ettekujutuse relee skeem joonisel 144.



Joon. 144. Lihtsaima relee skeem.



Joon. 145. Pöörleva pooliga galvanomeetri ehitus.

Kui elektromagneti *M* mähist läbib juhtiv (nõrk) vool, siis elektromagneti raudsüdamik tõmbab enda vastu raudplaadikese *P*, mis sulgeb töötava (juhtiva) vooluringi kontaktid *K*. Töötavasse vooluringi võivad olla lülitatud mootorid, mitmesugused aparaadid, elektrilambid jne. Juhtiva vooluringi katkestamisel tõmbab vedru *B* plaadikese *P* üles ja sellega katkestatakse töötav vooluring.

Vedru *B* tundlikkusest sõltub, millise kõige väiksema voolu tugevuse juures relee «hakkab tööle».

83. Elektrimõõduriistad. Enamik mõõtmistehnikas kasutatavaid osutitega varustatud mõõduriistu jagatakse süsteemideks, sõltuvalt voolu või pinge ühest või teisest toimest, mida kasutatakse pöördemomendi tekitamiseks. Koolide füüsikalaboratooriumides kasutatakse kõige sagedamini kaht süsteemi elektrimõõduriistu: magnet-elektrilisi ja elektromagnetilisi. Neid vaatlemegi lähemalt.

1. *Magnet-elektrilised mõõduriistad.* Magnet-elektrilise mõõduriista ehitamisel kasutatakse püsivmagneti magnetvälja ja vooluga juhi vastastikust toimet. Joonisel 145 on skemaatiliselt kujutatud pöördpooliga galvanomeetri konstruktsioon. Tugeva terasmagneti pooluskingade *N* ja *S* ning raudsilindri *K* vahelisse kitsasse pilusse on asetatud kerge alumiiniumraamike *M*, millele on mähitud peenest isoleeritud traadist pool. Raamike on kinnitatud kahele pooltelje, eesmise pooltelje küljes on osuti *C*, mis liigub raamikese pöördumisel piki skaalat *B*. Pooliga raamike hoitakse teatud asendis kahe spiraalvedru *P* abil (joon. 145, *a*). Mõõdetav vool juhitakse läbi vedrude *P* ja pooltelgede pooli. Kui pooli läbib vool, pöördub ta magnetväljas ja seejuures pingestuvad ka vedrud. Raamike pöördub seni, kuni teda pööravate jõudude *FF* paar (joon. 145, *b*) tasakaalustub vedrude elastsusest tingitud vastupidise momendiga. Mida tugevam on vool, seda suurem on raamikese pöördenurk.

Seda süsteemi galvanomeetrid on väga tundlikud, küllalt täpsed ja neil on ühtlase jaotusega skaala. Selleks et antud mõõduriistaga mõõta pingeid, ühendatakse galvanomeetri pooliga järjestikku suur takistus. Suure eeltakistusega galvanomeeter osutub nüüd voltmeetriks (vt. §§ 47, 48). Sündi kasutamisel saab aga galvanomeetrit kasutada tugevamate voolude mõõtmiseks — ta osutub sel juhul ampermeetriks.

Magnet-elektrilisi mõõduriistu kasutatakse alalisvooluringides laboratoorseteks, kontroll- ja tehnilisteks mõõtmisteks.

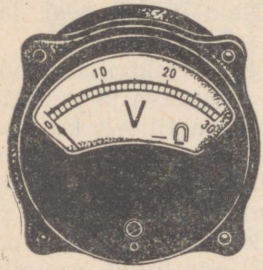
Joonisel 146 on kujutatud magnet-elektrilist süsteemi lülituskilbi voltmeeter.

Selle mõõduriista esiküljel, skaala all, on kujutatud mõõduriista tingmärk alalisvoolu puhul — sirglõik. Magnet-elektrilise süsteemi tinglikuks tähistamiseks kasutatakse hobuserauakujulist magnetit, mille pooluste vahel on väike ristkülik (pool).

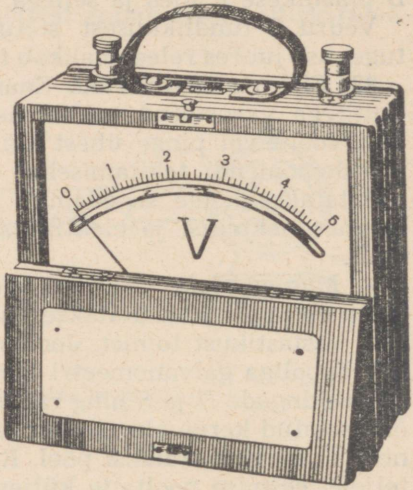
Joonisel 147 on näidatud magnet-elektrilist süsteemi laboratooriumi voltmeetri väline kuju. Eeltakistused asuvad kastis.

2. *Elektromagnetilised mõõduriistad.* Elektromagnetilise mõõduriista ehitus põhineb pooli magnetvälja ja tema poolt magneeditud rauatüki vastastikusel toimel.

Niisuguse mõõduriista ehituse skeem on näidatud joonisel 148. Raudplaadike *B* on asetatud pooli *A* lähedale. Poolist voolu läbimisel tõmmatakse plaadike pooli sisse, mille tõttu pöördub osuti *O*. Silinder *D*, milles liigub kolb *F*, on osuti võnkumiste summutamiseks.

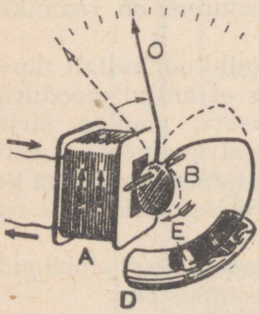


Joon 146. Lülituskilbi voltmeetri väline kuju.

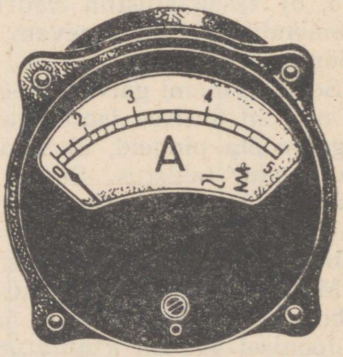


Joon. 147. Laboratooriumi voltmeeter.

Vedru, mis kõverdatakse osuti pöördumisel, tekitab vastassuunalise tasakaalustava momendi.



Joon. 148. Elektromagnetilise mõõduriista ehituse skeem.



Joon. 149. Lülituskilbi ampermeetri väline kuju.

Niisugust süsteemi lülituskilbi ampermeetri väline kuju on toodud joonisel 149.

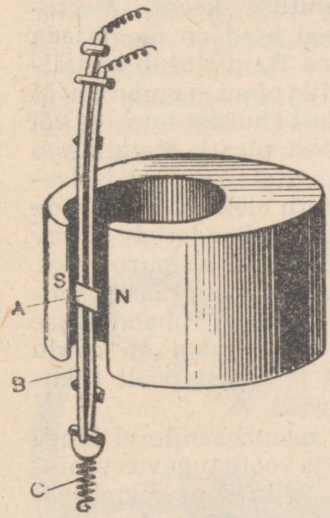
Elektromagnetilist süsteemi mõõduriistadel on ebaühtlaste jao-

tustega skaala ja neid võib kasutada mõõtmiseks alalis- ja vahelduvvooluringides.

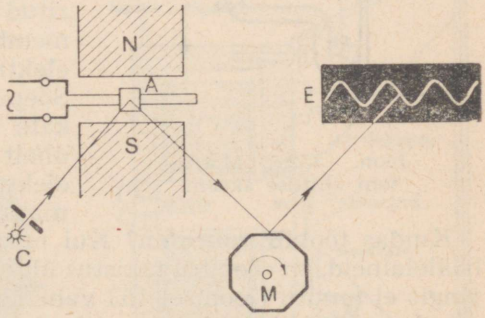
Selle mõõduriista esiküljel on kujutatud tingmärk — sirglõik ja sinusoid, mis näitab, et mõõduriist töötab nii alalis- kui ka vahelduvvoolul. Elektromagnetilise süsteemi tingmärk on sirge elektromagnet.

84. Elektromagnetiline ostsillograaf. Ostsillograafiks nimetatakse riista, mida kasutatakse elektrivoolu võnkumiste nähtavaks tegemiseks.

Ostsillograafi (vibraatori) põhilise osa ehitus on toodud joonisel 150. Püsiv- või elektromagneti väljas on vedru *C* abil pingule tõmmatud silmusetaoline õhuke metall-lint *B*, mida nimetatakse lehviks. Lehvi keskkohta on kinnitatud väike kerge peeglike *A*. Kui piki lehvi liigub vool, siis voolu ja magnetvälja vastastikuse mõju tõttu lehv pöördub, püüdes asetada risti magnetvälja suunaga. Vedru *C* tekitab vastassuunas mõjuva pöördemomendi, mis on võrdeline lehvi pöördenurgaga ta tasakaaluasendist. Lehvi väikse inertsi tõttu on peegli pöördenurk võrdeline voolu hetkväärtusega.



Joon. 150. Ostsillograafi ehituse skeem.



Joon. 151. Ostsillogrammide saamiseks vajalike riistade asetuse skeem.

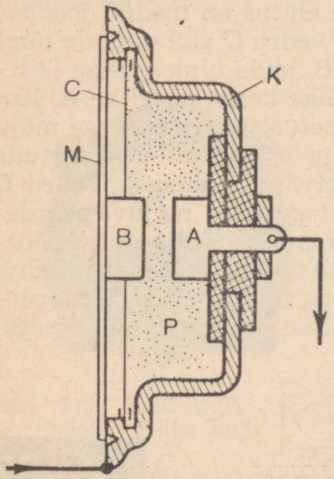
Joonisel 151 on toodud vahelduvvoolu ostsillogrammide saamiseks vajalike riistade skeem.

Peeglikesele *A* suunatakse valgusallikast *C* küllalt võimas valguskiirte kimp. Peegeldudes peeglikeselt mingisuguse nurga all, langeb kiirtekimp heleda punktina ekraanile või fotopaberile. Valguspunkti sagedased võnked tekitavad ekraanil heleda riba, mis on seda pikem, mida ulatuslikumad on peeglikese võnked. Selleks et välja selgitada nende võngete kuju, mis toimuvad ekraani vertikaaltasapinnal, suunatakse kiirtekimp peegeltahkudega hulktahukale *M* ja viimaselt ekraanile *E*. Peegeltahkudega hulktahukas pan-

nakse mootori abil teatava kiirusega pöörlema, mille tõttu ta «harutab» need võnked lahti horisontaalsuunas. Valguspunkt joonistab ekraanile üksteisele järgnevate perioodide vältel ühe ja sellesama voolukõvera.

Ostsillograafi abil võib saada ostsillogramme mistahes protsessidest, kui need mõjutavad voolu tugevust (näiteks registreerida mikrofoni poolt vastuvõetud helivõnkeid, muutlikku rõhku jm.).

85. Mikrofon ja telefon. Kõik tunnevad hästi telefonitoru. Selle toru ühte otsa on kinnitatud telefon, mis surutakse kõneldes vastu kõrva, teise otsa aga mikrofon, mis võtab vastu inimese hääle poolt tekitatud helid ja kutsub esile vastavad voolu tugevuse muudatused vooluringis.



Joon. 152. Mikrofoni ehituse skeem.

Joonisel 152 on eraldi kujutatud mikrofoni ehituse skeem. Mikrofoni peamised osad on membraan *M* ja söepuru *P*, mis asub metallkestas *K*. Mikrofoni membraan *M* kujutab endast õhukest terasest või pressitud söest plaati. Metallkesta põhja on kinnitatud sellest isoleeritud liikumatu elektrood *A*. Teine membraaniga ühendatud liikuv elektrood *B* asub söepuru sees. Söepuru eraldab membraanist siidkate *C*. Vooluringi ühendatakse ühelt poolt membraani *M* kaudu elektrood *B* ja teiselt poolt liikumatu elektrood *A*.

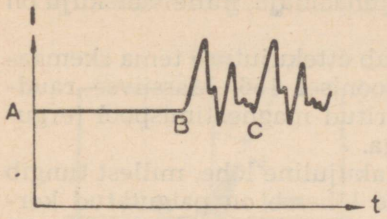
Kuidas töötab mikrofon? Kui mikrofoni membraanile ei lange häälelaineid, on söepuru takistus ühesugune ja voolu tugevus vooluringis ei muutu (joonisel 153 vahemik *AB*). Mikrofoni membraanile langevad häälelained panevad selle võnkuma. Mikrofoni võnkumine kutsub esile elektroodi *B* surve muutumise söepurule ja muudab sellega kontaktide tihedust söepuru üksikute terakeste vahel. Selle tagajärjel muutub mikrofoni vooluringi takistus. Vooluringi takistuse muutumine aga kutsub temas esile voolu tugevuse muutumise, kusjuures need muutused toimuvad vastavalt membraani võnkumistele. Vool mikrofoni vooluringis muutub pulseeruvaks (vahemik *BC* joonisel 153).

Niiviisi kutsuvad häälelained mikrofonis esile elektrivoolu muutumisi, mis antakse juhtmeid mööda edasi telefoni.

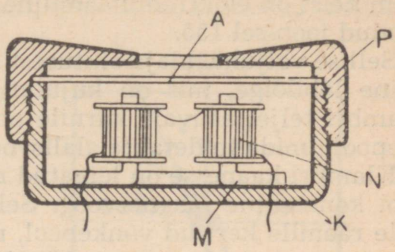
Telefoni ehituse skeem on kujutatud joonisel 154. Telefoni kestas *K* asub püsivmagnet *M* terasest pooluskingadega, milledele on paigutatud väga peenest juhtmest poolid *N*. Poolide mähised on ühendatud teineteisega järjestikku. Kesta *K* peal asub membraan *A*, mis kujutab endast ümmargust õhukest terasplaati. Membraani ja

pooluskingade vahel on väike õhupilu. Kaas *P* surub membraani *A* vastu kesta *K*.

Kui telefoni poolides pole voolu, tõmbub membraan mingi püsiva

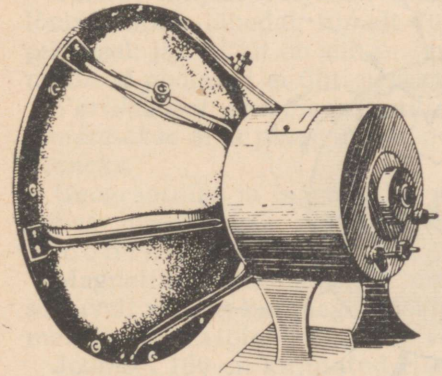


Joon. 153. Mikrofoni vooluringi voolu tugevuse graafik.

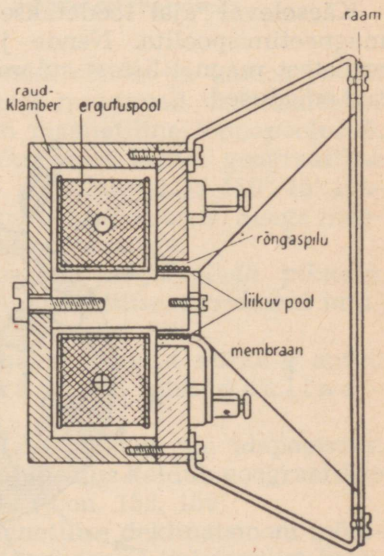


Joon. 154. Telefoni ehituse skeem.

jõuga magnetpooluste poole. Kui aga telefoni poole läbib muutliku tugevusega vool, siis tekitab see vastavad muutused poolide magnetväljades. Kui see vool muutub vastavalt häälevõngetele, siis ka nende poolt tekitatud lisamagnetväli muutub vastavalt nendele võngetele.



Joon. 155. Elektrodünaamiline valjuhääldaja.



Joon. 156. Dünaamilise valjuhääldaja ehitus.

Muutliku magnetvälja mõjul hakkab telefoni membraan võnkuma, pannes võnkuma ka temaga kokkupuutuvad õhukihid. Seetõttu kuuleb abonent telefonis neid sõnu ja lauseid, mida ütleb samal ajal mikrofoni temaga kõnelev isik.

86. Valjuhääldaja. Nagu telefon nii on ka valjuhääldaja häälelainete tekitamiseks voolu mõjul, mille tugevus muutub vastavalt

helisagedusele. Erinevalt telefonist võimaldab valjuhääldaja heliülekande jälgimist paljude kuulajate poolt.

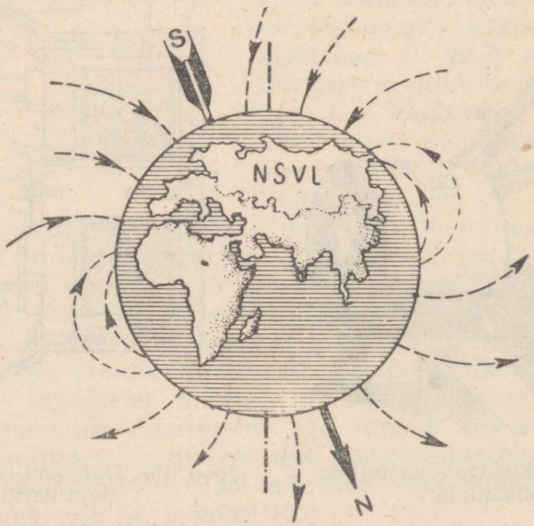
On olemas mitut erinevat liiki valjuhääldajaid. Kõige täiuslikum neist on elektrodünaamiline valjuhääldaja, mille väliskuju on toodud joonisel 155.

Sellise valjuhääldaja ehitusest annab ettekujutuse tema skemaatiline läbilõige, mis on kujutatud joonisel 156. Massiivse raudklambri teljel asuvale kärnile on keritud magneetimispool (ergutuspool), mida toidetakse alalisvooluga.

Klambri kaanesse on lõigatud rõngakujuline lõhe, millest tungib läbi konstantne magnetvoog. Sellesse lõhesse on paigutatud kergele raamile keritud võnkepool, mis on jäigalt ühendatud paberist koonusega (membraaniga). Membraan on kinnitatud raamile mingi pehme materjali (näiteks seemisnaha) abil.

Võnkepooli läbib helisagedusega vool. Selle voolu ja konstantse magnetvoo, milles asub pool, vastastikuse toime mõjul hakkab pool võnkuma ning need võnked kanduvad edasi temaga seotud membraanile. Võnkuv membraan tekitab teda ümbritsevas õhus häälelained.

Käesoleval ajal toodetakse dünaamilisi valjuhääldajaid ilma magneetimispoolita. Nende jaoks valmistatakse püsivmagneteid erilistest magnetilistest sulamitest, milledel on kõrged magnetilised omadused.

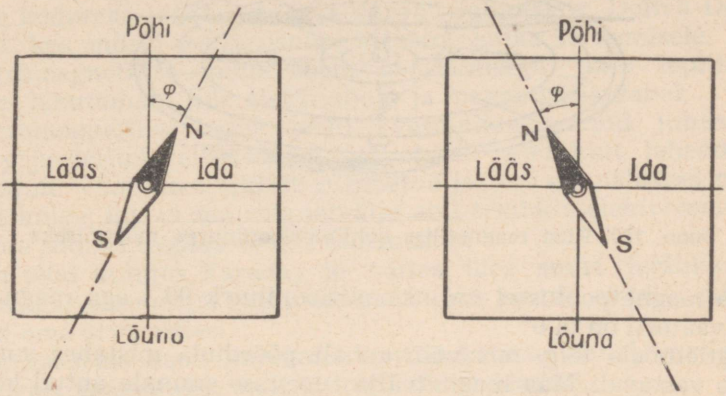


Joon. 157. Maa magnetjõujoonte pilt.

87. Maa magnetväli. Vertikaalsele teljele kinnitatud magnetnõel (kui ta läheduses pole magneteid ega elektrivooluga juhtmeid) võtab antud kohas alati kindla suuna: üks ots näitab põhja, teine lõunasse. See fakt tõestab, et meid ümbritseb Maa magnetväli.

Vaadeldes magnetnõela asendit, räägime, et nõela põhjapoolne ots näitab põhja. See pole päris õige. Magnetnõela suund ei ühti geograafilise meridiaani suunaga (joon. 157).

Liginedes Maa geograafilisele põhjapoolusele, kalduvad magnet-



Joon. 158—159. Deklinatsiooni mõiste selgitamiseks.

jõujooned üha enam ja enam horisondi suhtes ja umbes 70°50′ põhjalaiuse ja 90° läänepikkuse juures muutuvad vertikaalseiks, tungides Maasse. Järelikult asub siin magnetiline lõunapoolus *S*.

Teisest küljest väljuvad magnetjõujooned Maast geograafilise lõunapooluse lähedal, nimelt 70° 10′ lõunalaiusel ja 150° 45′ idapikkusel; järelikult on siin magnetiline põhjapoolus *N*. Seega magnetilised poolused ei ühti geograafiliste poolustega.

Vertikaalset tasapinda, milles asetseb magnetnõela pikitelg, nimetatakse Maa pinna antud punkti magnetilise meridiaani tasapinnaks.

Geograafilise ja magnetilise meridiaani vahelist nurka φ antud kohas nimetatakse magnetiliseks k ä ä n d e- ehk d e k l i n a t s i o o n i n u r g a k s.

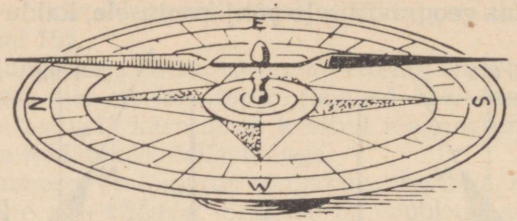
Magnetilist deklinatsiooni nimetatakse lääne- või idapoolseks, sõltuvalt sellest, kas magnetnõela põhjapoolus kaldub geograafilise meridiaani tasapinnast läände või itta (joon. 158, 159).

Joonisel 160 on kujutatud riist magnetilise deklinatsiooni mõõtmiseks. See riist ei kujuta endast midagi muud kui tavalist kompassi, mis on nii üles seatud, et temal tähistatud *N*—*S* suund asetseks antud koha geograafilise meridiaani tasapinnas.

Juba K o l u m b u s märkas, et magnetiline deklinatsioon on erinevates kohtades erineva suurusega. Peale selle on kindlaks tehtud, et isegi ühes ja samas kohas ei jää deklinatsiooninurk konstantseks, vaid muutub väga aeglaselt aastast aastasse.

Kasutades Maa magnetvälja uurimiseks magnetnõela, mis saab pöörduda ümber horisontaaltelje, selgub, et nõela suund moodustab horisontaalsuunaga nurga. Nurka α nõela telje ja horisontaal-

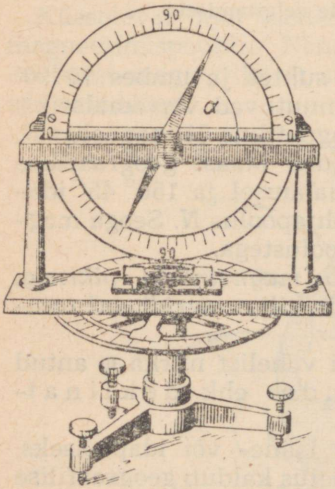
tasapinna vahel nimetatakse magnetiliseks inklinatsiooninurgaks (joon. 161). Kui nõel paikneb magnetilise meridiaani tasapinnas, on see nurk keskmistel laiustel umbes 70°.



Joon. 160. Riist magnetilise deklinatsiooninurga mõõtmiseks.

Maa magnetpoolustel on inklinatsiooninurk 90°, aga magnetilisel ekvaatoril on ta 0°.

Magnetnõela telg, mis võib vabalt pöörduda mistahes suunas, asetub vastavalt Maa magnetvälja tugevuse suunale antud kohas.



Joon. 161. Riist magnetilise inklinatsiooninurga mõõtmiseks.

Ühesuguse deklinatsiooniga punkte ühendavaid jooni maakaardil nimetatakse isogoonideks ja ühesuguse inklinatsiooniga punkte ühendavaid jooni — isokliinideks. Sellise kaardi järgi võib kompassi abil määrata geograafilist meridiaani mistahes punktis. Selliseid kaarte kasutavad merelaevade ja lennukite tüürimehed.

Kuid maakeral leidub alasid, kus magnetismi elemendid muutuvad väga järsult. Selliseid alasid nimetatakse magnetilise anomaalia aladeks.

Üheks suurimaks magnetiliseks anomaaliaks on Kurski anomaalia. Selliste anomaaliate põhjuseks on magnetrauamaagi lademed, mis asuvad võrdlemisi maapinna lähedal.

Maamagnetismi olemust pole veel selgitatud. Maa magnetvälja muutumises etendavad tähtsat osa mitmesugused elektrivoolud, mis eksisteerivad nii atmosfääris (eriti tema ülemistes kihtides) kui ka maakoores.

88. Elektromagnetiline induktsioon. 1831. a. Faraday poolt avastatud elektromagnetilise induktsiooni nähtus kuulub 19. sajandi esimese poole kõige suurepärasemate teaduslike avastuste hulka.

See avastus põhjustas elektro- ja raadiotehnika tekkimise ning tormilise arengu.

Elektromagnetilise induktsiooninähtuse põhjal loodi võimsad elektrienergia generaatorid, millede kujundamisest võtsid osa paljude maade ja rahvaste teadlased ja tehnikud. Nende hulgas olid ka meie kodumaa teadlased Lenz, Jacobi, Jablotškov, Dolivo-Dobrovolski, kes andsid suure panuse elektrotehnika arenemisele.

Elektromagnetilise induktsiooni avastamisega tehti lõplikult kindlaks lahutamatu side elektrivoolu ja magnetvälja vahel.

Elektromagnetilise induktsiooni avastamine polnud juhuslik. Faraday ja paljud teised teadlased otsisid teadlikult lahendust probleemile: «Kui vool tekitab magnetvälja, kas siis nähtusel pole ka teist külge, kas ei saa magnetvälja abil tekitada elektrivoolu?» See mõte suunas teadlasi nende uurimustes.

Palju tööd kulutas Faraday ja näitas üles suurt leidlikkust, enne kui galvanomeetri kaldunud osuti talle näitas, et ta ei olnud eksinud oma arvamistes.

Seitsmeaastase kooli kursusest tuntud katsete alusel vaatleme nüüd elektromagnetilise induktsiooni üldisi seadusi.

Kui galvanomeetriga ühendatud pooli pista magnet, siis seejuures kaldub galvanomeetri osuti kõrvale, näidates indutseeritud voolu tekkimist pooli vooluringis. Magneti poolist väljatõmbamisel märkame uuesti galvanomeetri osuti kõrvalekaldumist, kuid teisele poole, mis näitab vastassuunalise voolu tekkimist poolis (joon. 162, *a*).

Niipea kui magneti liikumine pooli suhtes lõpeb, lakkab ka vool. Järelikult läbib vool pooli vooluringi ainult sel ajal, kui magnet liigub pooli suhtes.

Katset võib teostada ka teisiti: liikumatule magnetile pista otsa pool ja võtta ta ära (joon. 162, *b*). Jällegi võib veenduda, et pooli liikumise ajal magneti suhtes tekib vooluringis uuesti vool.

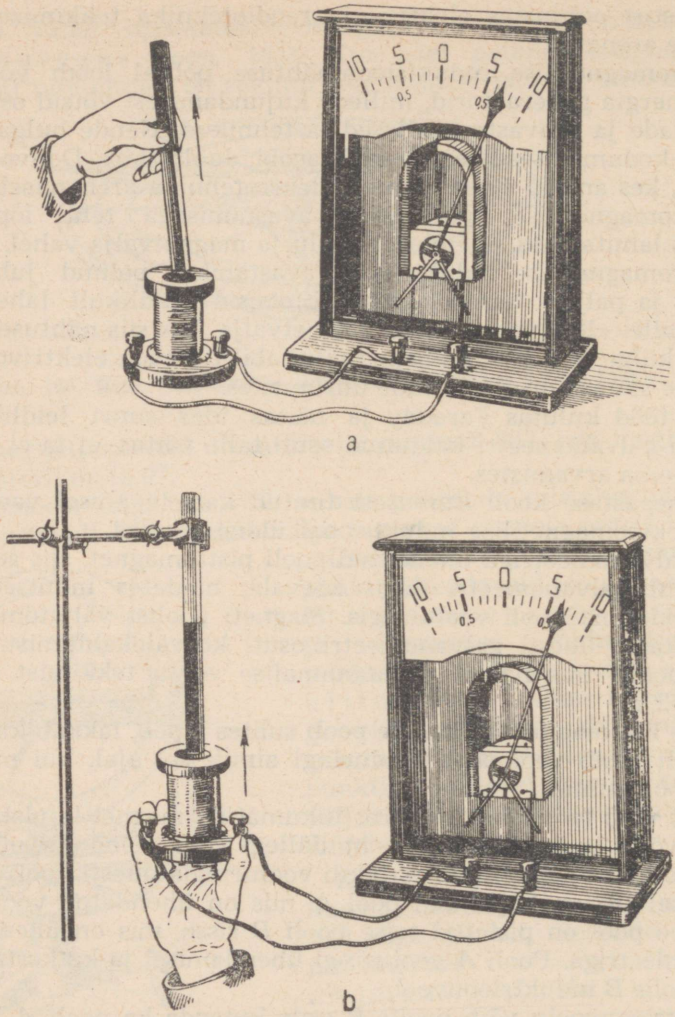
Joonisel 163 on kujutatud pool *A*, mis on ühendatud vooluallikaga. See pool on pistetud teise pooli *B* sisse, mis on ühendatud galvanomeetriga. Pooli *A* vooluringi ühendamisel ja katkestamisel tekib poolis *B* induktsioonvool.

Induktsioonvoolu võib poolis *B* esile kutsuda ka pooli *A* läbiva voolu tugevuse muutmise teel või nende poolide liigutamisega teineteise suhtes.

Teeme veel ühe katse. Paigutame hobuserauakujulise magneti magnetväljasse lameda pooli, mille otsad on ühendatud galvanomeetriga. Pooli pööramisel näitab galvanomeeter induktsioonvoolu tekkimist poolis.

Meie poolt käsitletud katsete põhjal võib kindlaks teha, et kõigil juhtudel, kui tekib induktsioonvool, toimub magnetvoo muutumine, mis tungib läbi juhtme poolt haaratud pindala.

Tõepoolest, magneti liigutamisel galvanomeetriga ühendatud pooli suhtes või pooli liigutamisel magneti suhtes (joon. 162) muutub pooli keerdudest läbitungiv magnetvoog: magneti liikumisel



Joon. 162. Katseid elektromagnetilise induktsiooni demonstreerimiseks.

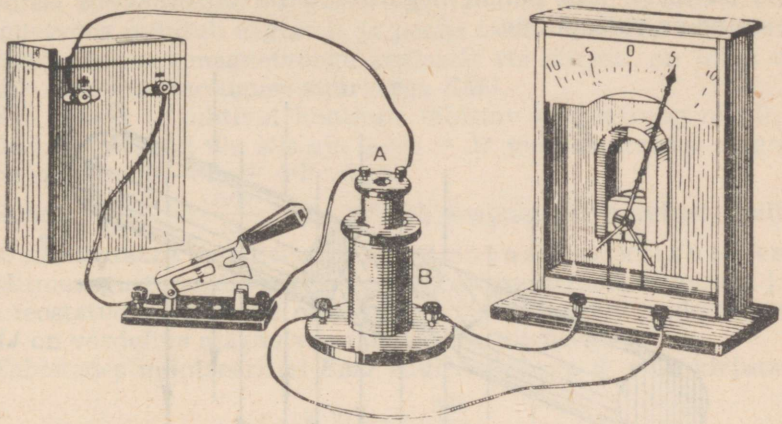
allapoole ta suureneb, aga liikumisel ülespoole väheneb. Mõlemal juhul tekib keerdudes vool.

Ka pooli *A* vooluringi ühendamisel ja katkestamisel (joon. 163) või teda läbiva voolu tugevuse muutmisel muutub magnetvoog, mis tungib läbi pooli *B* keerdude, ja kõigil neil juhtudel tekib selles poolis vool.

Täpselt samuti muutub magnetvoog, mis pooli pööramisel magnetväljas tungib läbi pooli keerdude poolt haaratud pindala, mille tagajärjel pooli keerdudes tekib induktsioonvool.

Kui aga suletud kontuurist läbitungiv magnetvoog ei muutu, ei

teki kontuuris ka induktsioonvoolu. Selles võib kergesti veenduda, liigutades suletud kontuuri piki homogeenset magnetvälja: seejuures kontuuris voolu ei teki.



Joon. 163. Elektromagnetilise induktsiooni demonstreerimise seade.

Seega *läbi suletud juhtiva kontuuri tungiva magnetvoo igasugusel muutumisel tekib juhis elektrivool, mis kestab seni, kuni toimub magnetvoo muutumine.*

Selles seisnebki üks tähtsamaid loodusseadusi — elektromagnetilise induktsiooni seadus.

Induktsioonil juhis tekkivat elektromotoorset jõudu nimetatakse indutseeritud elektromotoorseks jõuks.

Märgime siinjuures, et elektromagnetilist induktsiooni iseloomustavaks suuruseks on indutseeritud *EMJ*, mitte aga induktsioonvoolu tugevus, mis sõltub juhi takistusest. Kahes ühesuguste mõõtmete ja kujuga juhis tekib ühesugustes tingimustes ühesugune *EMJ*, kuid induktsioonvoolu tugevus on selles juhis suurem, mille takistus on väiksem.

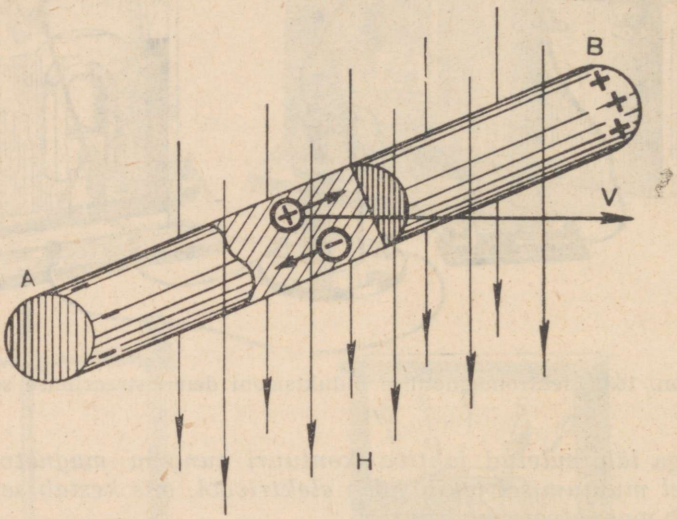
Kasutades indutseeritud *EMJ* mõistet, võib elektromagnetilise induktsiooni seadust väljendada üldisemal kujul.

Läbi juhtiva kontuuri tungiva magnetvoo igasugusel muutumisel tekib juhis indutseeritud EMJ.

Elektromagnetiline induktsioon esineb ka avatud kontuurides. Nende puhul tekib juhi lõikumisel magnetjõujoontega juhi otstel pinge, mille tekkimise põhjuseks on seesama indutseeritud *EMJ*.

89. Indutseeritud EMJ tekkimise selgitamine elektroniteooria põhjal. Indutseeritud *EMJ* tekkimist võib selgitada elektroniteooria abil. Oletame, et juht *AB* (joon. 164) liigub vasakult paremale mingisuguse kiirusega *v* homogeenses magnetväljas *H*, mille jõujooned suunduvad ülalt alla. Koos juhiga liiguvad vasakult paremale tema elektronid ja positiivselt laetud osakesed. Vastavalt

elektroniteooriale mõjub igale magnetväljas liikuvale laetud osakesele jõud. Kui osakese laeng on positiivne, siis võib temale mõjuva jõu suunda määrata vasaku käe reegli abil, samuti nagu voolu all oleva juhi puhul; negatiivselt laetud osakesele mõjuva jõu suund on vastupidine.



Joon. 164. Induktsioonvoolu ergutamise mehhanismi selgitamiseks.

Kasutades antud juhul vasaku käe reeglit, leiame, et juhi positiivselt laetud osakestele mõjub jõud juhi otsa *B* suunas, juhi vabadele elektronidele aga mõjub juhi otsa *A* poole suunatud jõud. Kuid metalli positiivselt laetud osakesed, mis moodustavad kristallvõre, välja mõjul kõrvale ei kaldu. Vabad elektronid aga paiknevad välja mõjul juhi otsa *A* juurde. Järelikult tekib juhi osas *A* elektronide küllus, osas *B* aga nende puudus. Juhi otste *A* ja *B* vahel tekib pinge, mis ongi indutseeritud *EMJ* mõõduks.

Niiviisi tekib indutseeritud *EMJ* ka avatud juhtivas kontuuris, kui see lõikab magnetjõujooni.

90. Indutseeritud elektromotoorse jõu suurus. Me tutvusime tingimustega, mille juures tekib juhis indutseeritud *EMJ*. Vaatleme nüüd, millest oleneb indutseeritud *EMJ* suurus. Indutseeritud *EMJ* suurust saab määrata suletud kontuuris tekkiva induktsioonvoolu järgi. Ohmi seaduse põhjal määratakse selle voolu tugevus elektromotoorse jõu suuruse ja vooluringi takistuse põhjal. Mida suurem on induktsioonvoolu tugevus antud juhis, seda suurem on temas indutseeritud *EMJ*.

Eelmistes paragrahvides kirjeldatud katsetes induktsiooni kohta tuleb alla kriipsutada järgmist väga tähtsat asjaolu: mida kiiremini muutub juhtivat kontuuri läbistav magnetvoog, seda tugevam vool läbib juhti ja järelikult seda suurem indutseeritud *EMJ* tekib temas.

Nii näiteks, mida kiiremini liigub magnet pooli suhtes (vaata joon. 162), seda suurem on nurk, mille võrra kaldub kõrvale galvanomeetri osuti, ja seda suurem on järelikult poolis tekkiv indutseeritud *EMJ*. Magneti aeglasel liigutamisel pooli keerde haarav magnetvoog muutub aeglaselt ja poolis tekkiv *EMJ* on väiksem.

Seega, muutes magnetvoogu aeglaselt või kiiresti, on juhis võimalik saada mitmesuguse suurusega *EMJ*.

Kui hetkel t_1 juhtivat kontuuri läbistav magnetvoog oli Φ_1 ja hetkel t_2 vastavalt Φ_2, siis aja $t_2 - t_1 = \Delta t$ jooksul muutus magnetvoog suuruse $\Phi_2 - \Phi_1 = \Delta\Phi$ võrra.[1]

Suhet $\frac{\Phi_2 - \Phi_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, mis näitab magnetvoo muutust ajaühikus, nimetatakse magnetvoo muutumise kiiruseks.

Mitmesuguste juhtidega magnetvoo mitmesuguste muutuste juures teostatud mõõtmised näitavad, et juhis tekkiv indutseeritud *EMJ* on võrdeline magnetvoo muutumise kiirusega.

Tähistades indutseeritud *EMJ* suurust tähega *E*, võib kirjutada:

$$E = -k\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (1)$$

Avaldises esineva võrdeteguri k arvuline väärtus oleneb sellest, millise süsteemi ühikutes mõõdetakse avaldises esinevaid suurusi. Miinusmärk valemis tähendab, et juhtme kontuuri läbiva magnetvoo kasvamisel $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} > 0\right)$ indutseeritud *EMJ* on negatiivne, s. t. ta tekitab induktsioonvoolu, mis takistab magnetvoo kasvamist (vt. § 91); magnetvoo kahanemisel $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} < 0\right)$ on *EMJ* positiivne ja vool püüab takistada magnetvoo kahanemist.

SI-süsteemis mõõdetakse *EMJ* voltides, magnetvoogu veebrites, aega sekundites; võrdetegur k (valemis 1) on aga võrdne ühega:

$$E = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}. \qquad (2)$$

Kui keerdude arv poolis on n ja igas keerus tekkiv *EMJ* on $-\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$, siis järjestikku ühendatud keerdudega poolis tekkiv kogu *EMJ* on n korda suurem, s. o.

$$E = -n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} \text{ volti.}$$

Indutseeritud *EMJ* tekkimisel avatud kontuuris määratakse tema suurus, nagu näitas Faraday, juhi poolt ajaühikus lõigatud jõujoonte arvuga.

Määrame indutseeritud *EMJ* suuruse, kui homogeenses magnetväljas, mille induktsioon on $B\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$, liigub juht pikkusega $AB = l$ m kiirusega $v\frac{\text{m}}{\text{s}}$, lugedes, et juhi liikumine toimub risti välja

[1] Märki Δ (kreeka täht «delta») kasutatakse mingi suuruse muutumise tähistamiseks.

induktsioonijoonte suunaga (joon. 164). Kiiruse $v\frac{m}{s}$ juures juht pikkusega l m katab sekundis pindala vl m^2.

Magnetilise induktsiooni B puhul on ajaühikus juhi poolt lõigatud magnetjõujoonte arv Bvl. Seetõttu on juhis tekkiv indutseeritud *EMJ*

$$E = Bvl \text{ volti.}$$

Kui juht liigub kaldu magnetvälja jõujoonte suhtes, siis lõigatud jõujoonte arv on väiksem. Sel juhul

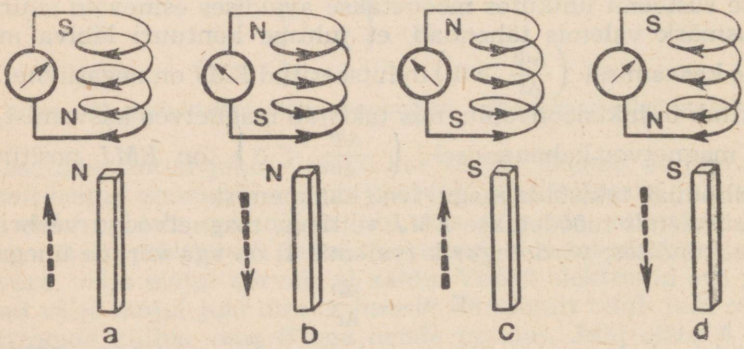
$$E = Bvl\sin\alpha,$$

kus α on nurk välja suuna ja juhi liikumise suuna vahel.

91. Induktsioonvoolu suund. Lenzi seadus. Induktsioonvoolul juhis on vastavalt oma tekkimistingimustele erinev suund. Selles me võisime veenduda galvanomeetri osuti kõrvalekaldumise järgi, mis mõnede § 88 kirjeldatud katsete juures toimub ühes, teiste katsete puhul aga teises suunas.

Induktsioonvoolu suuna küsimuse lahendas kõige üldisemal kujul Lenz.

Enne kui sõnastada Lenzi seadust, vaatleme induktsioonvoolu suunda mõnel induktsiooni erijuhul.



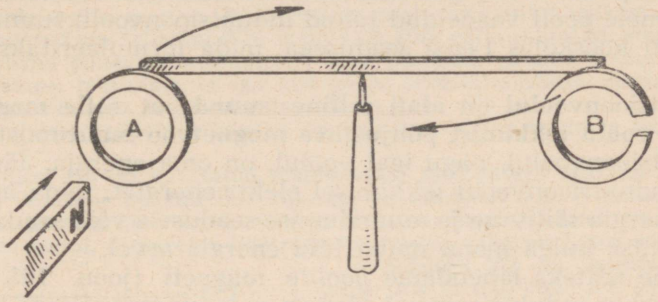
Joon. 165. Lenzi seaduse selgitamiseks.

Joonisel 165 on skemaatiliselt näidatud induktsioonvoolu tekkimine poolis magneti liikumisel tema suhtes. Vertikaalsed nooled näitavad siin magneti liikumise suunda pooli suhtes, nooled keerdudel aga seejuures poolis tekkiva induktsioonvoolu suunda. Joonisel 165, *a* näeme, et magneti põhjapooluse lähenemisel poolile tekib poolis induktsioonvool. Pool muutub elektromagnetiks, kusjuures magnetile lähemas pooli otsas tekib elektromagneti põhjapoolus (kui vaadelda põhjapooluse poolt, läbib induktsioonvool pooli keerde vastupäeva).

Kuid me teame, et samanimeliste poolustega teineteise poole pööratud magnetid tõukuvad eemale, isenimeliste pooluste puhul aga tõmbuvad ligi. Järelikult, kui poolis tekib induktsioonvool, siis vas-

tastikused jõud magneti ja induktsioonvoolu vahel tõukavad magnetit poolist eemale (joon. 165, *a*). Kui aga magnet kaugeneb poolist, siis tekivad pooli ja magneti vahel tõmbejõud (joon. 165, *b*).

Muudame seda katset. Võtame kaks kerget alumiiniumrõngast, mis asuvad aluse teravikul (joon. 166). Rõngas *A* on kogu ulatuses kinnine, rõngal *B* on läbilõige. Kui lähendada ja eemaldada magnetit läbilõikega rõngale, võib tähele panna, et magnet ei avalda temale mingit mõju, kuna rõngas ei teki induktsioonvoolu.



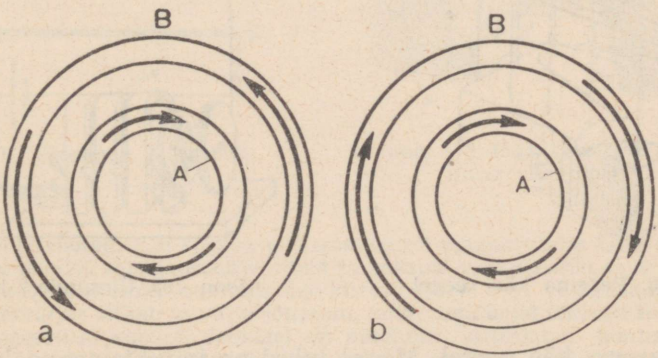
Joon. 166. Magneti lähendamisel kinnisele rõngale tõukub see eemale, eemaldamisel aga tõmbub tema poole. Läbilõikega rõngale magnet mõju ei avalda.

Liigutades aga magnetit kinnise rõnga suhtes, märkame, et magneti lähendamisel tõukub rõngas eemale, eemaldamisel aga tõmbub ligi.

Vaadeldud katsete põhjal võib teha järgmise järelduse: *juhis tekkiva induktsioonvoolu suund on selline, et ta oma magnetväljaga takistab magneti ja juhi liikumist teineteise suhtes.*

Vaatleme nüüd juhtu, kus poolis *B* tekib induktsioonvool voolu muutumise tõttu poolis *A*. See juhtum on skemaatiliselt toodud joonisel 167, kus mõlemad poolid *A* ja *B* on kujutatud ühe keeruna.

Katse näitab, et voolu suurenemisel poolis *A*, s. t. magnet-



Joon. 167. Lenzi seaduse selgitamiseks.

välja tugevnemisel, on poolis *B* tekkiva induktsioonvoolu suund vastupidine pooli *A* läbiva voolu suunaga (joon. 167, *a*). Voolu vähenemisel poolis *A*, s. t. magnetvälja nõrgenemisel, on aga induktsioonvool poolis *B* samasuunaline vooluga poolis *A* (joon. 167, *b*).

Esimesel juhul on pooli *B* induktsioonvoolu magnetväli suunatud vastupidiselt pooli *A* magnetväljale, takistades tema tugevnemist. Teisel juhul pooli *B* induktsioonvoolu magnetväli on samasuunaline pooli *A* väljaga, takistades tema nõrgenemist.

Kõik meie poolt vaadeldud juhud induktsioonvoolu suuna kohta on täiesti kooskõlas Lenzi seadusega, mida formuleeritakse järgmiselt:

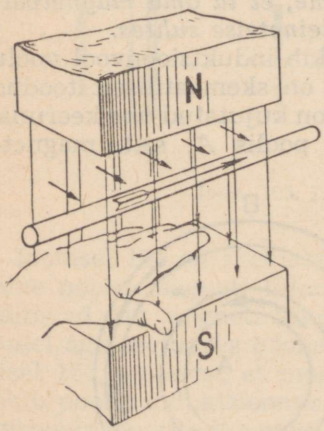
induktsioonvoolul on alati selline suund, et selle magnetväli takistab voolu tekkimist põhjustava magnetvoo muutumist.

Induktsioonvoolul, nagu igal voolul, on oma energia. Järelikult saame induktsioonvoolu tekkimisel elektrienergiat, mida aga vastavalt energia säilivuse ja muundumise seadusele võib saada ainult ekvivalentse hulga mõnd muud liiki energia arvel.

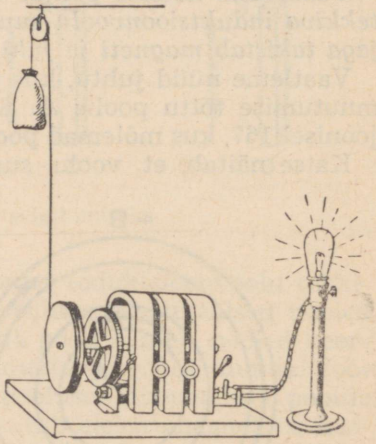
Kui me näiteks lähendame poolile magneti (joon. 165, *a*), siis poolis tekkiv induktsioonvool tõukab oma magnetväljaga magnetit eemale. Liigutades magnetit, me ületame neid tõukejõude, s. t. teeme tööd, mille arvel tekib induktsioonvoolu energia.

Magneti poolist väljatõmbamisel (joon. 165, *b*) me teeme tööd pooli tõmbejõudude ületamiseks. Selle juures poolis tekkiva induktsioonvoolu energia on ekvivalentne tehtud tööga.

Seega on Lenzi reegel täielikus vastavuses energia säilivuse ja muundumise seadusega.



Joon. 168. Parema käe reegel.



Joon. 169. Ülesande 2 juurde.

92. Parema käe reegel. Mõnel juhul on induktsioonvoolu suuna määramiseks juhis kasulik kasutada parema käe reeglit (joon. 168).

Kui parema käe peopesa asetada nii, et temasse suunduvad magnetjõujooned ja pöial näitab juhi liikumise suunda, siis sõrmed näitavad induktsioonvoolu suunda juhis.

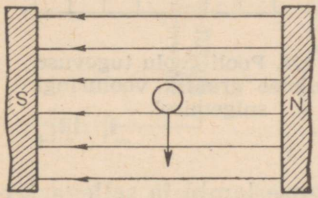
Harjutus 15.

1. Teatavast kõrgusest langeb vabalt magneeditud terasvarb. Liikumisel langeb ta läbi avause poolis, millele keritud mähise otsad on lühistatud. Väljudes poolist jätkab varb langemist. Kirjeldage magneti liikumise iseloomu.

2. Joonisel 169 on kujutatud seade, kus langev raskus paneb pöörlema elektrivoolu andva masina. Selle vooluga saab toita mitut väikest paralleelselt ühendatud elektrilampi. Kui lambid on kõik välja lülitatud, langeb masinat pöörlema panev raskus kiiresti alla. Lülitades masina vooluringi ükshaaval lampe, märkame, et iga uue lambi sisselülitamisega raskuse langemise kiirus väheneb. Seletage seda nähtust.

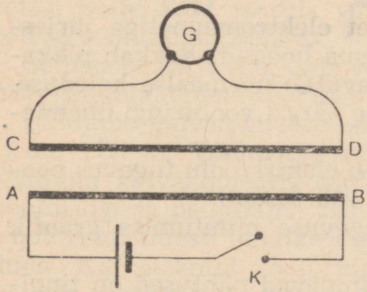
Kui koolis on selleks võimalus, koostage niisugune seade ja teostage see katse.

3. Joonisel 170 on kujutatud magnetvälja jõujoontega risti asetseva juhi läbilõige (kontuur on suletud). Noolega on näidatud juhi liikumise suund. Kasutades parema käe reeglit, määrake induktsioonvoolu suund temas ja tõestage sellel juhul, et parema käe reegel järeldub vahetult Lenzi seadusest.

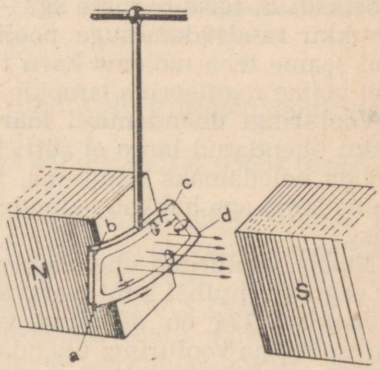


Joon. 170. Ülesande 3 juurde.

4. Joonisel 171 on kujutatud kaks juhti: *AB* ja *CD*. Juht *AB* on lülitatud vooluallika vooluringi, juhi *CD* otsad on ühendatud galvanomeetriga. Juhi *AB* vooluringi ühendamisel ja katkestamisel tekib juhis *CD* induktsioonvool. Kasutades Lenzi seadust, määrake kummalgi juhul induktsioonvoolu suund juhis *CD*.



Joon. 171. Ülesande 4 juurde.



Joon. 172. Pöörisvoolude tekkimine vaskplaadis.

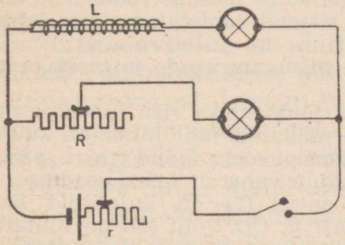
93. Pöörisvoolud. Kui tugeva elektromagneti magnetväljas lasta võnkuma massiivne pendel, mis koosneb vardast ja paksust vaskplaadist selle otsas, siis sellise pendli võnkumine sumbub õige kiiresti (joon. 172). Vaskplaadi liikumisel magnetväljas lõikab ta välja jõujooni, mille tagajärjel tekivad temas suletud indutseeritud voolud. Joonisel on näidatud kujutletud kontuur *abcd*. Plaadi liikumisel magnetitevahelises ruumis muutub seda kontuuri läbiv magnetvoog. Lenzi reeglite järgi tekib kontuuris induktsioonvool *I*, mis magnetvooga vastastikku mõjudes pidurdab pendli liikumist.

Massiivsetes metallkehades tekkivaid induktsioonvoole nimetatakse p ö ö r i s v o o l u d e k s. Pöörisvoolud tekivad kõigis voolu magnetväljas liikuvais juhtides kui ka nendes, mis asuvad vahelduvas magnetväljas.

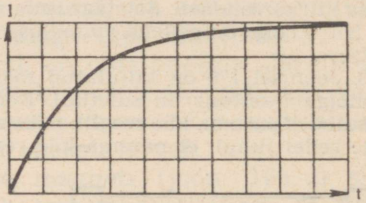
Kuna massiivse juhi takistus on väga väike, võivad tekkida väga tugevad pöörisvoolud ja juht soojeneb. Seetõttu ongi väga suur tähtsus vahenditel, mis nõrgendavad pöörisvoole.

94. Omainduktsioon. Suure praktilise tähtsusega on elektromagnetilise induktsiooni erijuht, mida nimetatakse o m a i n d u k t s i o o n i k s. Tutvume selle nähtusega katse varal.

Koostame vooluringi alalisvoolu allikast ja kahest paralleelharust (joon. 173). Ühte harusse lülitame järjestikku hõõglambi ja



Joon. 173. Seadme skeem omainduktsiooni nähtuse vaatlemiseks.



Joon. 174. Pooli voolu tugevuse muutumise graafik vooluringi sulgemisel.

reostaadi R, teise harusse aga — samasuguse lambi ja sellega järjestikku raudsüdamikuga pooli L (elektromagneti). Reostaadi R abil saame teha mõlema haru takistuse võrdseks, aga reostaadi r abil võime reguleerida lampide heledust.

Vooluringi ühendamisel märkame, et elektromagnetiga järjestikku ühendatud lamp ei sütti kohe, tema hõõgniit hakkab pikkamööda heledamaks muutuma, kuni saavutab normaalse heleduse. Teine lamp aga hakkab helendama kohe pärast vooluringi ühendamist.

Niisiis, vooluringi ühendamisel tõuseb elektrivoolu tugevus poolis aeglaselt nullist kuni teatava kindla väärtuseni.

Joonisel 174 on näidatud voolu tugevuse muutumise graafik alalispingega vooluringi ühendamisel.

Võib näidata, et selle katse juures ilmnevad nähtused on tingitud elektromagnetilisest induktsioonist.

Tõepoolest, kui poolis tekib vool, tekib sellega üheaegselt ka magnetvoog, mis kasvab koos voolu tugevnemisega. Magnetvoo muutumisega indutseeritakse aga poolis elektromotoorne jõud, mille suurus on võrdeline magnetvoo muutumise kiirusega:

$$E = -n\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}.$$

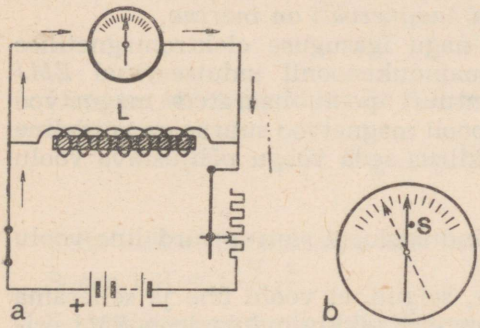
Poolis tema oma magnetvoo muutumise mõjul indutseeritud

elektromotoorset jõudu nimetatakse omainduktsiooni elektromotoorseks jõuks.

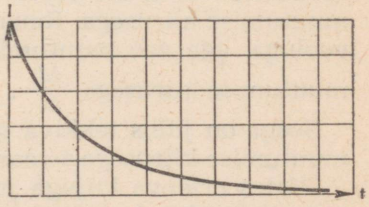
Vastavalt Lenzi seadusele on omainduktsiooni *EMJ* poolis magnetvoo kogu kasvamise aja kestel vastassuunaline antud vooluringi ühendatud vooluallika *EMJ*-le ja takistab voolu tugevuse kasvu vooluringis.

Kui voolu tugevus poolis saavutab püsiva väärtuse, lõpeb magnetvoo muutumine ja omainduktsiooni *EMJ* saab võrdseks nulliga.

Lülitame nüüd pooliga paralleelselt elektrilambi. Vooluallika väljalülitamisel märkame, et lamp enne kustumist hetkeks helendub. See helendumine on tingitud voolust, mis läbib lampi selle vooluallikast väljalülitamisel poolis tekkiva omainduktsiooni *EMJ*



Joon. 175. Katse skeem, mis selgitab omainduktsiooni *EMJ* suunda.



Joon. 176. Induktsioonvoolu muutumise graafik.

tõttu. Selle *EMJ* suurus võib olla tunduvalt suurem vooluringi toitva vooluallika *EMJ*-st.

Selleks et välja selgitada vooluringi katkestamisel poolis tekkiva *EMJ* suunda, teeme veel ühe katse.

Lülitame galvanomeetri alalisvooluringi paralleelselt pooliga *L* (joon. 175, *a*). Vooluringi sulgemisel läbib vool galvanomeetrit. Kaldugu galvanomeetri osuti seejuures paremale. Katkestame vooluringi ja paigutame osuti ligidusse tõkestaja *S* (joon. 175, *b*). Vooluringi uuesti sulgudes ei lase tõkestaja osutit paremale kalduda. Katkestanud vooluringi, märkame, et galvanomeetri osuti kaldub vasakule, näidates, et vooluringis on vool, mis ei kao kohe poolist, vaid aeglaselt, nii nagu on näidatud joonisel 176. Voolu poolist kadumise sujuvus on samuti seletatav temas omainduktsiooni *EMJ* tekkimisega. Vooluringi katkestamisel kaob koos vooluga ka tema magnetväli, mis vastavalt Lenzi seadusele kutsub poolis esile vooluga samasuunalise *EMJ*. Meie katsel on selleks tingimused olemas, kuna poolist *L* ja galvanomeetrist koosnev kontuur jääb suletuks ka pärast vooluringi katkestamist.

Galvanomeetri osuti kõrvalekaldumine vooluallika väljalülitamisel vastassuunas esialgse kõrvalekaldumisega näitab, et oma-

induktsiooni *EMJ* poolis on tõesti samasuunaline vooluga, mis läbis pooli enne vooluallika väljalülitamist.

Omainduktsiooni elektrivoolu ringides võib võrrelda inertsinähtusega mehhaanikas. Ei saa ju mingi keha kiirust silmapilkselt suurendada nullist kuni mingi antud suuruseni, võimatu on samuti silmapilkselt peatada liikuvat keha, s. o. hetkeliselt vähendada tema kiirust nullini.

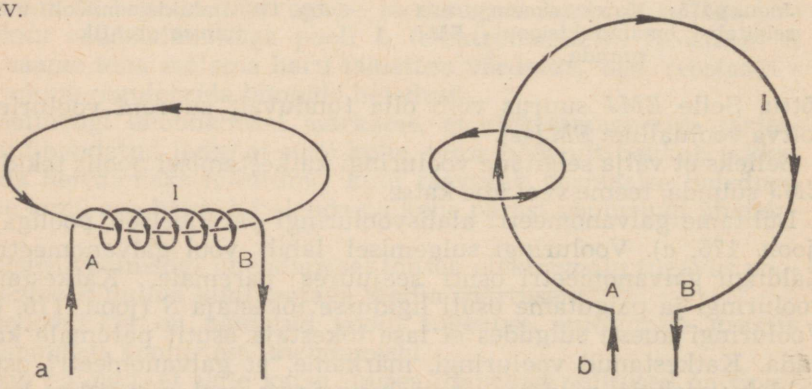
Analoogilised nähtused toimuvad ka elektrivoolu ringides. Voolu sisselülitamise hetkel ei saavuta vool kohe oma maksimaalset väärtust, vaid kasvab järk-järgult (joon. 174). Vooluringi katkestamisel aga ei lange vool kohe nullini (joon. 176).

Mis põhjustab neid nähtusi? Nad on tingitud sellest, et magnetväljal, mis alati tekib koos vooluga, on omadus säilitada oma suurust ja suunda, teiste sõnadega, *magnetväli on inertne*.

95. Pooli induktiivsus. Nii nagu igasuguse elektromagnetilise induktsiooni puhul, on ka omainduktsioonil indutseeritud *EMJ* võrdeline voolu all oleva kontuuri poolt haaratud magnetvoo muutumise kiirusega. Rauata pooli magnetvoo suurus on võrdeline vooluga, aga voo muutumise kiirus seda voogu põhjustava voolu muutumise kiirusega $\frac{\Delta I}{\Delta t}$.

Seega on juhis tekkiva omainduktsiooni suurus võrdeline voolu muutumise kiirusega temas.

Võttes erineva kujuga juhte, selgub, et voolu ühe ja sellesama muutumise kiiruse juures on nendes tekkiv induktsioon *EMJ* erinev.



Joon. 177. Poolil on tunduvalt suurem induktiivsus kui niisama pikal juhtmekeerul.

Nii näiteks, kui võtta spiraal *AB* (joon. 177, *a*), aga pärast sama spiraal venitada üheksainsaks ringiks (joon. 177, *b*), on voolu ühesuguse muutumise kiiruse juures spiraalis tekkiv omainduktsiooni *EMJ* suurem.

Vaadeldes joon'st võib selle nähtuse põhjuse kindlaks teha. Spi-

raali keerdudest läbitungiv iga jõujoon haarab spiraali rohkem arv kordi kui ringi. Seetõttu ühesuguse voolu muutumise kiiruse juures spiraalis ja ringis on haaratud magnetvoo muutumise kiirus spiraalis suurem kui ringis.

Suurust, mis iseloomustab seost vooluringis voolu muutumise kiiruse ja selle juures tekkiva omainduktsiooni *EMJ* vahel, nimetatakse vooluringi induktiivsuseks.

Tähistades induktiivsuse tähega L, võib omainduktsiooni *EMJ* suuruse sõltuvust voolu muutumise kiirusest väljendada järgmise valemiga:

$$E = -L \frac{\Delta I}{\Delta t}.$$

Siit

$$L = \frac{E \Delta t}{\Delta I}.$$

Lugedes selles avaldises $\Delta t = 1$ sek, $\Delta I = 1$ amper ja $E = 1$ volt, saame:

$$L = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{A}.$$

Seda ühikut nimetatakse henriks (H).

Seega $1\ \text{H} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s}}{\text{A}}$.

Seega *henri on pooli induktiivsus, milles voolu tugevuse muutumine 1 ampri võrra sekundis kutsub esile omainduktsiooni EMJ, mis võrdub 1 voldiga.*

Väikeste induktiivsuste mõõtmiseks kasutatakse henri tuhandikke — millihenrisid (mH) ja miljondikke — mikrohenrisid (μH).

Peale selle kasutatakse sageli ka teist ühikut — induktiivsuse sentimeetrit, kusjuures 1 μH = 1000 induktiivsuse cm.

Seega kehtib võrdsus:

$1\ \text{H} = 10^3\ \text{mH} = 10^6\ \mu\text{H} = 10^9$ cm.

Pooli induktiivsuse suurus sõltub ta mõõtmetest, kujust ja keerdude arvust. Mida suurem on keerdude arv omainduktsioonipoolis, seda suurem on pooli induktiivsus.

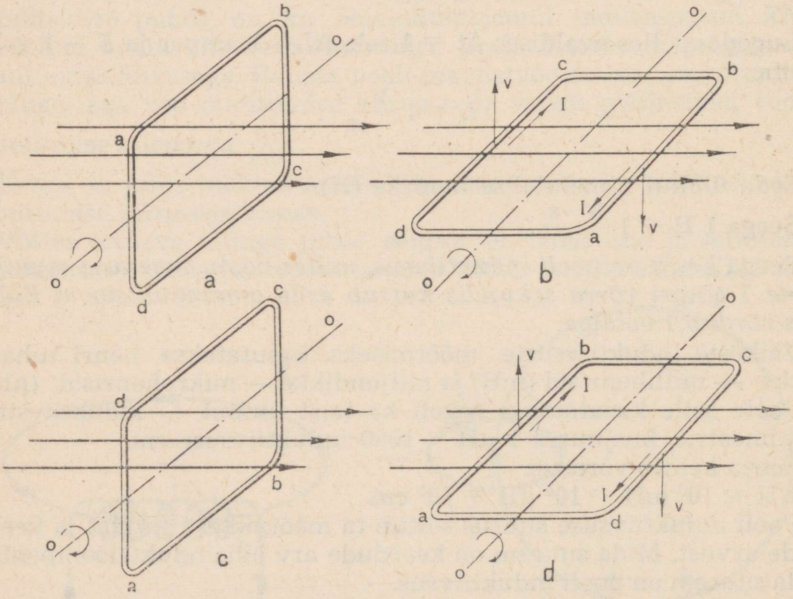
Pooli induktiivsus suureneb tugevasti, kui ta sisemusse paigutada rauast või mõnest muust magnetilisest materjalist südamik.

Generaatorite ja mootorite elektromagnetite mähistel on suur induktiivsus. Vooluringi ühendamise hetkel, kui voolu tugevuse muutumise kiirus $\frac{\Delta I}{\Delta t}$ on väga suur, tekib neis mähistes suur omainduktsiooni *EMJ*, mis võib läbi lüüa mähiste isolatsiooni, kui ei võeta kasutusele vastavaid abinõusid.

IV PEATÜKK

VAHELDUVVOOL

96. Vahelduvvoolu saamine. Paigutame homogeensesse püsivmagnetvälja juhtme keeru *abcd* (joon. 178).



Joon. 178. Skeem, mis selgitab vahelduvvoolu saamise printsiipi juhtme keerus, mis pöörleb homogeenses magnetväljas.

Selle keeru ühtlasel pöörlemisel ümber telje *oo* muutub tema pindalast läbitungiv magnetvoog pidevalt nii suuruselt kui ka suunalt. Selle tagajärjel, vastavalt elektromagnetilise induktsiooni seadusele, tekib keerus suuruse ja suuna poolest muutuv indutseeritud *EMJ*.

Kui pöörleva keeru tasapind on magnetvälja jõujoontega risti (joon. 178, *a*), siis on teda läbiv magnetvoog maksimaalne ($\Phi = \Phi_{max}$), kuid tema muutumise kiirus on null $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = 0 \right)$,

kuna selle asendi läbimisel libiseb keerd piki välja jõujooni neid lõikamata. Järelikult keerus tekkiv indutseeritud *EMJ*, mis on võrdeline voo muutumise kiirusega, on võrdne nulliga ($E = 0$).

Kui aga keeru tasapind on paralleelne välja jõujoontega (joon. 178, *b*), võrdub teda läbiv voog nulliga ($\Phi = 0$), kuid tema muutumise kiirus on selle asendi läbimisel maksimaalne $\left(\frac{\Delta\Phi}{\Delta t} = max\right)$, kuna keeru juhtmed liiguvad risti välja jõujoontega.

Sel juhul keerus tekkiv *EMJ* on maksimaalse väärtusega ($E = E_M$). Keeru osas *ab* on *EMJ* suunatud jooniselt vaatleja poole, aga osas *cd* vastupidiselt — vaatleja poolt joonise taha. Keeru edasisel pöördumisel väheneb *EMJ*, kuid säilitab endise suuna. Joonisel 178, *c* kujutatud asendis saab *EMJ* suurus jälle võrdseks nulliga ($E = 0$), kuna selles asendis on magnetvoog maksimaalne, kuid tema muutumise kiirus minimaalne.

Keeru edasisel pöörlemisel suureneb keerdu läbistava magnetvoo muutumise kiirus ja järelikult suureneb *EMJ* absoluutväärtus nullist E_M-ni (joon. 178, *d*). Kuna aga nüüd keerd pöörleb oma tasapinna teise küljega vastu magnetvoogu, siis muutub *EMJ* suund temas vastupidiseks: osas *ab* on *EMJ* suunatud vaatleja poolt joonise taha, aga osas *cd* vastupidiselt — joonise poolt vaatleja poole. See *EMJ* suund säilib ka keeru edasisel liikumisel, kusjuures tema absoluutväärtus väheneb kuni nullini (joon. 178, *a*).

Keeru järgmistel pööretel korduvad kõik need nähtused uuesti.

Seega muutub indutseeritud *EMJ* suurus pöörlevas keerus ühe tema pöörde jooksul — E_M-st kuni $+ E_M$-ni.

Katkestame keeru *abcd* ja ühendame ta otsad ostsillograafiga (joon. 179, *a*). Keeru pöörlemisel magnetväljas *B* kirjutab ostsillograaf üles kõik voolu muutused, mille järgi võib otsustada *EMJ* muutumise üle keerus. Joonisel 179, *b* on näidatud *EMJ* muutumise graafik keerus selle ühe pöörde vältel. Üleval on näidatud keeru üksteisele järgnevad asendid magnetväljas, kohakuti nende all — indutseeritud *EMJ*. Läbi keeru tungiva magnetvoo jõujoonte suund on näidatud nooltega. Ringikesed kujutavad keeru ristlõiget joonise tasapinnas koos voolu suuna näitamisega temas.

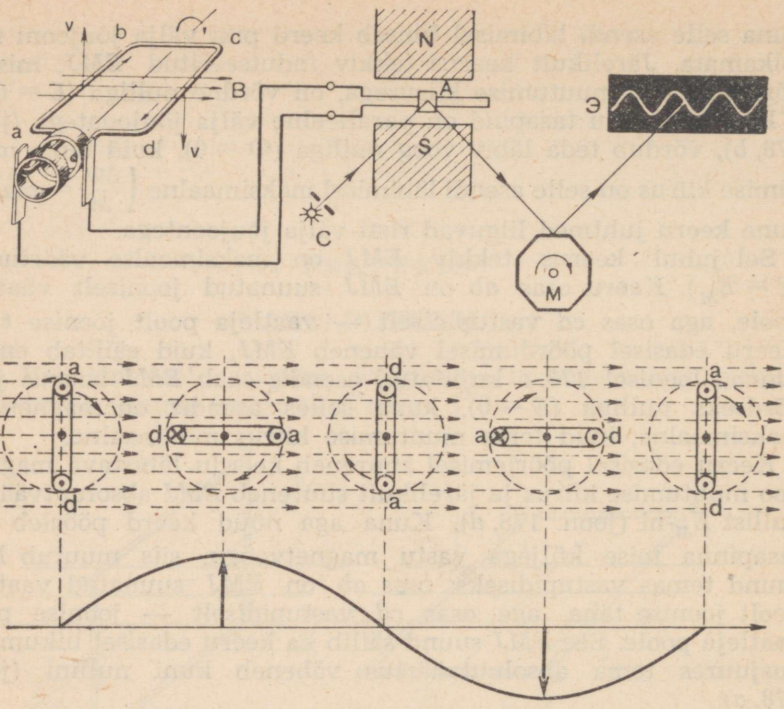
Nagu näitab joonisel 179, *b* kujutatud ostsillogramm, muutub keeru ühtlasel pöörlemisel homogeenses magnetväljas temas tekkiv vahelduvvool sinusoidaalselt. Niisugust voolu nimetatakse ka sinusoidaalseks.

Ajavahemikku, mille kestel EMJ sooritab täisvõnke ja mille lõpus ta omandab nii suuruselt kui ka märgilt endise väärtuse, nimetatakse vahelduvvoolu võnkeperioodiks.

Võnkeperioodi tähistatakse tähega *T*.

Võngete arvu 1 sekundis nimetatakse voolu sageduseks ja tähistatakse tähega f.

$$f = \frac{1}{T}$$



Joon. 179, *a* — vahelduvvoolu uurimise seadme skeem, *b* — *EMJ* muutumise graafik keerus selle ühe pöörde vältel.

või

$$T = \frac{1}{f}.$$

Kui *EMJ* väärtust mistahes vabalt võetud hetkel tähistada tähega e (*EMJ* hetkväärtus), tema maksimaalväärtust (amplituudi) tähega E_M, võib seadust, mis sinusoidaalse voolu puhul väljendab e sõltuvust ajast, kirjutada järgmise avaldisena:

$$e = E_M \sin \frac{2\pi}{T} t.$$

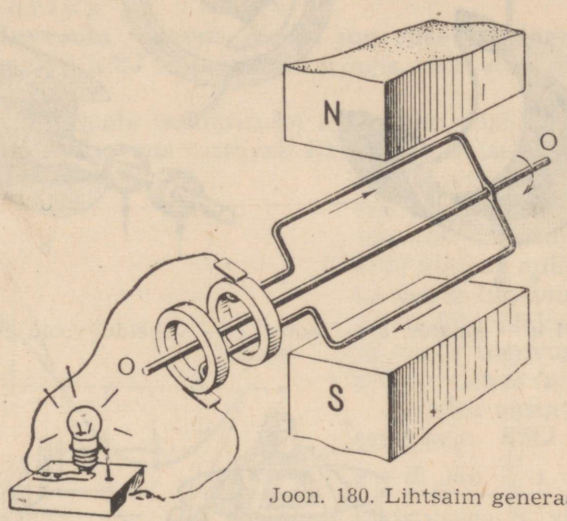
Nõukogude Liidus ja enamikus teistes maades kasutatakse tööstuses ja majapidamises voolu sagedusega 50 Hz; sellise voolu perioodi kestus on 0,02 sek.

97. Vahelduvvoolu generaator. Masinaid, mis muundavad mehhaanilist energiat elektrienergiaks, nimetatakse generaatoreiks. Nende töötamine põhineb elektromagnetilise induktsiooni nähtustel.

Generaatori lihtsaimaks skeemiks võib olla raamikujuline juht, mis pöörleb püsiv- või elektromagneti magnetväljas ümber telje (joon. 180). Raami pöörlemisel tekib temas vahelduv *EMJ*.

Kui raam ühendada välisvooluringiga, siis tekib vooluringis vahelduvvool. Raami ühendamiseks välisvooluringiga kasutatakse

pöörleva raamiga samale teljele kinnitatud rõngaid. Rõngaste külge kinnitatakse raami otsad, aga vastu kumbagi rõngast paigutatakse kontaktid, mida nimetatakse harjadeks. Raami pöörlemisel ühe pöörde võrra muutub harjade polaarsus kaks korda.



Joon. 180. Lihtsaim generaatori skeem.

Vaatlesime skeemil vahelduvvoolu generaatori töötamise põhimõtet. Tegelikult on vahelduvvoolu generaatori ehitus palju keerulisem. Generaatori klemmidelt tahetakse saada küllalt kõrget pinget, mistõttu ühe keeru asemel tuleb võtta neid suur hulk ja ühendada need omavahel järjestikku.

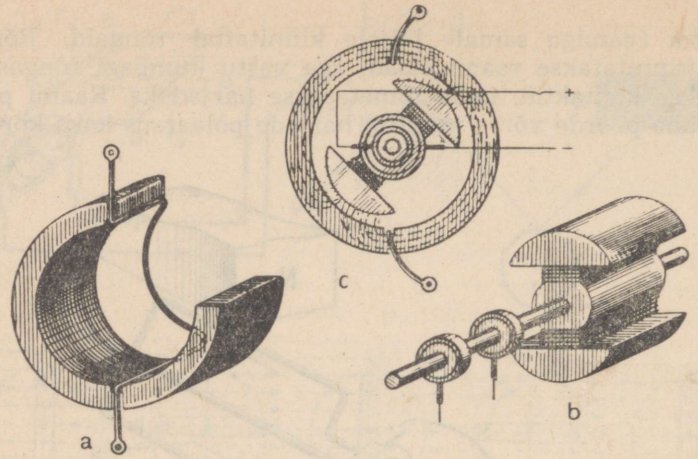
Kuid sedaliiki vahelduvvoolu generaatoreid, kus magnetsüsteem (induktor) on liikumatu ja pöörlevad keerud (ankur), milles indutseeritakse *EMJ*, ehitatakse suhteliselt harva. Selle põhjuseks on asjaolu, et liikuvate kontaktide abil on praktiliselt võimatu kõrgepingelist voolu generaatorilt ära juhtida liikuvate kontaktide juures tekkivate tugevate sädemete tõttu.

Seepärast tehakse peaaegu kõigis vahelduvvoolu generaatoreis mähis (a n k u r), milles indutseeritakse *EMJ*, liikumatuna ja pöörlema pannakse magnetsüsteem (i n d u k t o r).

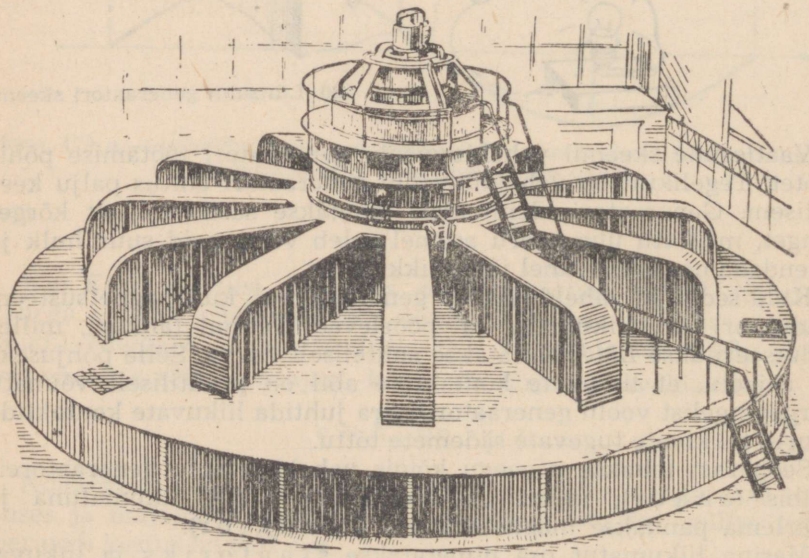
Masina liikumatut osa nimetatakse s t a a t o r i k s ja liikuvat osa r o o t o r i k s.

Vahelduvvoolu generaatori staator koostatakse raudplekkidest (keerisvoolude vastu võitlemise eesmärgil). Uurdeisse, mis on tehtud staatori sisemisele ümbermõõdule, paigutatakse mähis, milles indutseeritakse *EMJ* (joon. 181, *a*). Pöörleva elektromagnetilise süsteemi — rootori — väliskuju on näidatud joonisel 181, *b*. Rootori magnetpoolused on varustatud mähistega, kuhu harjade ja kontaktrõngaste kaudu juhitakse vool mingist alalisvoolu allikast.

Joonisel 181, *c* on näidatud vahelduvvoolu generaatori täielik



Joon. 181, *a* — staator, *b* — rootor, *c* — vahelduvvoolu generaatori skeem.



Joon. 182. Suure võimsusega hüdrogeneraatori väliskuju.

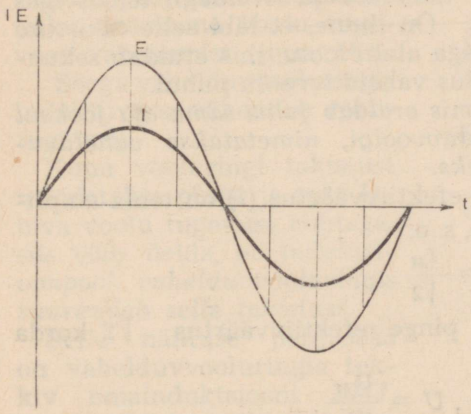
skeem. Skeemil on selgesti näha, et kui rootor panna mingi välise mehhaanilise jõu abil pöörlema, pöörleb koos rootoriga ka tema poolt tekitatav magnetväli. Seejuures lõikavad välja jõujooned staatori uurdeisse paigutatud mähise keerde ja indutseerivad neis *EMJ*. Generaatori summaarse *EMJ* suurus sõltub staatori mähise mõõtmetest ja tüübist, rootori magnetvälja tugevusest ja tema pöörlemise kiirusest.

Joonisel 182 on toodud V. I. Lenini nimelise Dnepri hüdroelektrijaama uue võimsa hüdrogeneraatori välisvaade. Generaatori rootorit toidetakse alalisvooluga, mida annab väike, generaatoriga ühel võllil asuv alalisvoolumasin.

Auruturbiiniga ühendatud generaatorit nimetatakse turbogeneraatoriks.

98. Vahelduvvoolu tugevus. Voolu tugevuse ja pinge efektiivväärtus. Vahelduv *EMJ* kutsub vooluringis esile vahelduva suuna ja tugevusega voolu.

Kui vooluringis pole induktiivset ega mahtuvuslikku takistust, siis muutub voolu tugevus vastavalt *EMJ* muutumisele. Suurimale *EMJ* väärtusele vastab suurim voolu tugevuse väärtus ja vastupidi — kui *EMJ* võrdub nulliga, siis on ka voolu tugevus null. Sel juhul kõneldakse, et *EMJ* ja voolu tugevuse muutused on samas faasis.



Joon. 183. Vahelduvvoolu *EMJ* ja voolu tugevuse muutumise graafik.

Jagades vastavalt Ohmi seadusele *EMJ* väärtuse $e = E_M \sin \frac{2\pi}{T} t$ vooluringi takistusega R, saame voolu tugevuse sõltuvuse ajast:

$$\frac{e}{R} = \frac{E_M}{R} \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

$$\text{või } i = I_M \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

kus $i = \frac{e}{R}$ on voolu tugevuse hetkväärtus ja $I_M = \frac{E_M}{R}$ tema amplituud (suurim väärtus).

Joonisel 183 on kujutatud kaks sinusoidi, milledest üks kujutab *EMJ*, teine voolu tugevuse muutumist. Mõlemad kõverad on samas faasis.

Niisuguse juhi takistust, milles voolutugevus ja pinge on samas faasis, nimetatakse aktiivtakistuseks. Aktiivtakistusega juhis muundub voolu energia teisteks energialiikideks (mehhaaniliseks energiaks, siseenergiaks jne.).

Vahelduvvoolu tugevuse hetkväärtus muutub pidevalt, kõikudes nulli ($i = 0$) ja tema suurima väärtuse ($i = I_M$) vahel. Sellele vaatamata väljendatakse vahelduvvoolu tugevust samuti nagu alalisvoolu tugevust amprites. Nii näiteks kõneleme, et elektrilampi läbib vool tugevusega 0,5 A, soojendusriista spiraali vool tugevusega 5 A jne. Millisest vahelduvvoolu tugevusest siin kõneldakse?

On ilmne, et voolu tugevuse keskmine väärtus täisperioodi vältel võrdub nulliga, sõltumata sellest, millised väärtused tal on erine-

vatel ajahetkedel. Järelikult ei saa seda suurust lugeda vahelduvvoolu tugevuseks. Võib-olla saab vahelduvvoolu tugevust iseloomustada tema suurima väärtusega (amplituudiga)? Põhimõtteliselt on see võimalik, kuid praktiliselt on raske ehitada riista, mis mõõdaks vahetult seda voolu tugevuse suurust.

Vahelduvvoolu tugevuse määratlemisel lähtutakse tavaliselt tema niisugustest toimetest, mis ei sõltu voolu suunast ja mida võib tekitada ka alalisvooluga. Siia kuuluvad näiteks voolu soojuslikud toimed. Tõepoolest, kui mõnd takistust läbib vool tugevusega I, siis juhtmes eralduv soojushulk on võrdeline I^2-ga, s. t. ei sõltu voolu suunast.

Läbigu vahelduvvool antud takistust ja eraldagu temas igas sekundis teatava hulga soojust. On ilmne, et läbi selle takistuse võib juhtida ka mingi tugevusega alalisvoolu, mis eraldab sekundis sama soojushulga, mis eraldus vahelduvvoolu puhul.

Sellist alalisvoolu tugevust, mis eraldab juhis sama aja jooksul sama soojushulga nagu vahelduvvoolgi, nimetatakse vahelduvvoolu tugevuse efektiivväärtuseks.

Sinusoidaalse vahelduvvoolu efektiivväärtus (I) on tema amplituudist (I_M) väiksem $\sqrt{2}$ korda, s. o.

$$I = \frac{I_M}{\sqrt{2}}.$$

Täpselt samuti on *EMJ* ja pinge efektiivväärtus $\sqrt{2}$ korda väiksem oma amplituudist:

$$E = \frac{E_M}{\sqrt{2}},\ U = \frac{U_M}{\sqrt{2}}.$$

§ 81 vaadeldud magnet-elektrilist süsteemi amper- ja voltmeetrid (joon. 145) ilmselt ei kõlba mõõtmisteks vahelduvvooluringides, kuna voolu suuna igakordsel muutumisel poolis muutub ka riista osutit mõjutava pöördemomendi suund. Pooli ja osuti suure inertsi tõttu ei reageeri see riist vahelduvvoolule.

Voolu tugevuse ja pinge mõõtmiseks vahelduvvooluringides kasutatakse riistu, mille näidud ei sõltu voolu suunast. Selleks sobivad näiteks kuumtraat-süsteemi mõõduriistad. Nendes kutsub osuti pöördumise esile voolu poolt soojendatava traadi pikenemine.

Tehnilise sagedusega ($f = 50$ Hz) vahelduvvooluringides kõlbavad mõõtmiste teostamiseks ka elektromagnetilised mõõduriistad (joon. 148). Selle mõõduriista liikuvaks osaks on väike raudketas, mis magnetiseerudes tõmbub vahelduvvooluga pooli sisse.

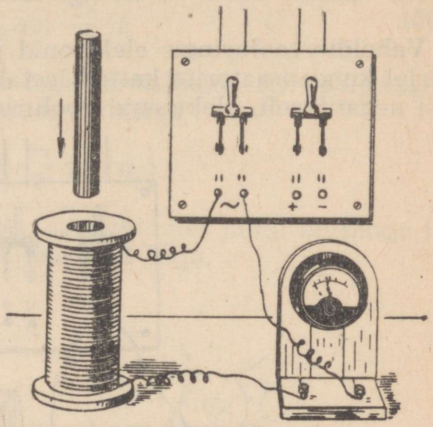
99. Vahelduvvooluringi induktiivsus ja mahtuvus. Eelmises paragrahvis vaatlesime vahelduvvoolu soojuslikku toimet, mis on samal määral ka alalisvoolul. Kuid voolu tugevuse ja suuna kiire muutumine põhjustab rea iseärasusi, mille poolest vahelduvvoolu toimed erinevad alalisvoolu toimetest.

Näiteks ei kõlba vahelduvvool akumulaatori laadimiseks, teda ei või kasutada elektrolüütilise vase saamiseks, ta on kõlbmatu galvanosteegias ja galvanoplastikas.

Vahelduvvoolu tugevus, erinevalt alalisvoolu tugevusest, ei sõltu ainult vooluringi pingest ja takistusest, vaid ka vooluringi ühendatud juhtide induktiivsusest. Selles võib veenduda järgmise katse põhjal. Ühendame alalisvooluringi suure keerdude arvuga vaskjuhtmest pooli ja ampermeetri.

Teeme ampermeetri abil kindlaks voolu tugevuse. Pistame nüüd pooli sisse raudsüdamiku. Selgub, et voolu tugevus ei muutu. Teisiti on lugu vahelduvvooluringis. Pannes pooli sisse raudsüdamiku, märkame voolu tugevuse vähenemist (joon. 184).

Seega vahelduvvooluringis induktiivsus vähendab voolu tugevust.



Joon. 184. Katse, mis näitab vahelduvvoolu tugevuse vähenemist vooluringi induktiivsuse suurenemisel.

Kuna vooluringi takistust mõõdetakse pinge ja teda läbiva voolu tugevuse suhtega, siis võib öelda, et *induktsioonpool vahelduvvooluringis suurendab selle takistust.*

Selle nähtuse põhjuseks on vahelduvvooluringis tekkiv omainduktsiooni *EMJ*, mis takistab voolu tugevuse kasvamist. Omainduktsiooni *EMJ* tõttu hetkel, kui pinge vooluringis saavutab maksimumi, ei jõua voolu tugevus tõusta selle suuruseni, milleni ta tõuseks omainduktsiooni puudumise korral.

Vaatleme järgmist näidet.

Transformaatoreil, mida tihti võib leida koolide füüsikakabinettides, on ühel mähisel umbes 600 keerdu vasktraati, mille läbimõõt on 1 mm. Sellele poolile kulus umbes 150 m vasktraati, mille takistus

$$R = 0{,}0175 \cdot \frac{150 \cdot 4}{3{,}14 \cdot 1} \approx 3{,}3\ \Omega.$$

Kui selle pooli takistust mõõta vooluringis, mida läbib 50-perioodiline vahelduvvool, selgub, et pooli takistus on umbes 20 Ω.

Niisiis, *induktiivsus vahelduvvooluringis mõjub voolu tugevusele samuti kui vooluringi takistuse suurenemine.*

Induktiivsuse suurenemisega kasvab ka vooluringi takistus.

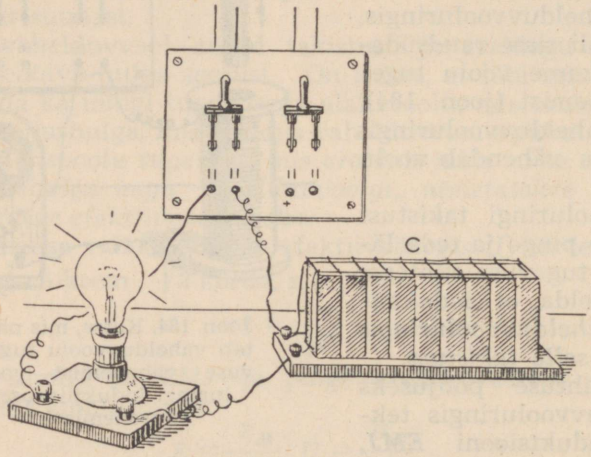
Takistust, mida vooluring omab induktiivsuse olemasolu tõttu, nimetatakse induktiivtakistuseks. Induktiivtakistus sõltub vooluringi induktiivsusest L ja voolu sagedusest f. Induktiivtakistust võib arvutada järgmisest valemist:

$$X_L = 2\pi f L \quad \text{ehk} \quad X_L = \omega L.$$

Kui alalisvooluringi ühendada kondensaatorite patarei, ei märka me mingit voolu, mis on täiesti arusaadav, kuna kondensaatori plaadid on üksteisest isoleeritud. *Kondensaator ei lase läbi alalisvoolu.*

Kui aga kondensaatorite patarei ühendada vahelduvvooluringi, läbib viimast vool; vooluringi lülitatud elektrilamp põleb (joon. 185).

Vahelduvvooluringis elektronid pidevalt võnguvad, mille tagajärjel kondensaatorite katted laetakse vahelduvalt kas positiivselt või negatiivselt, elektronid vooluringi juhtmeis liiguvad aga kord



Joon. 185. Vahelduvvool läbib vooluringi, millesse on lülitatud kondensaator. Lambike põleb seda heledamalt, mida suurem on kondensaatorite patarei C mahtuvus.

ühes, kord teises suunas. Kui kondensaator lahutada vooluringist, siis hakkab lamp heledamalt põlema. Järelikult suurendab mahtuvus vahelduvvooluringis selle takistust.

Katsed näitavad, et mida suurem on vooluringi ühendatud kondensaatori mahtuvus, seda väiksemaks takistuseks on ta vahelduvvoolule.

Takistust, mida vooluring omab mahtuvuse olemasolu tõttu, nimetatakse mahtuvuslikuks takistuseks. Mahtuvuslik takistus sõltub vooluringi mahtuvusest. Mahtuvuslik takistus arvutatakse järgmisest valemist:

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC}$$

ehk

$$X_C = \frac{1}{\omega C}.$$

Induktiivsuse või mahtuvuse olemasolu vahelduvvooluringis põhjustab faasinihke pinge ja voolu vahel. Kui vooluring omab

induktiivtakistust, siis omainduktsiooni *EMJ* tekkimise tõttu jääb vool oma faasilt pingest maha. Mahtuvusliku takistuse korral jõuab vool oma faasilt pingest ette.

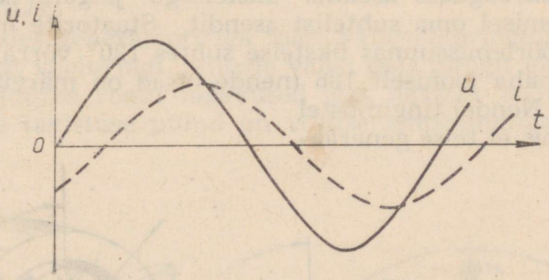
Kui pinge muutumine vooluringis allub seadusele

$$u = U_M \sin \frac{2\pi}{T} t,$$

ja sellel vooluringil on aktiiv- ja induktiivtakistus, siis voolu tugevuse muutumine väljendub järgmise valemiga:

$$i = I_M \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \varphi \right),$$

kus φ on pinge ja voolu vaheline faasinihe. Sel juhul on pinge ja voolu graafikutel joonisel 185, *a* näidatud kuju.

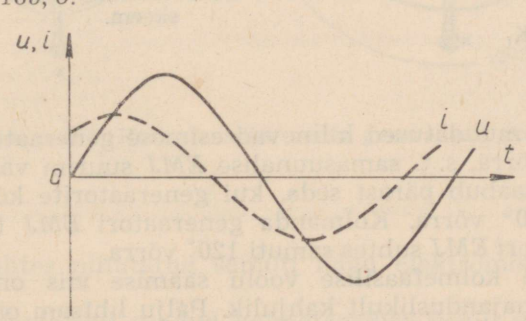


Joon. 185, *a*. Pinge ja voolu faasinihe aktiiv- ja induktiivtakistusega vooluringis.

Kui vooluring omab aktiiv- ja mahtuvuslikku takistust, siis voolu tugevuse muutumine väljendub järgmiselt:

$$i = I_M \sin \left(\frac{2\pi}{T} t + \varphi \right).$$

Pinge ja voolu graafikud, mis vastavad sellele juhule, on kujutatud joonisel 185, *b*.



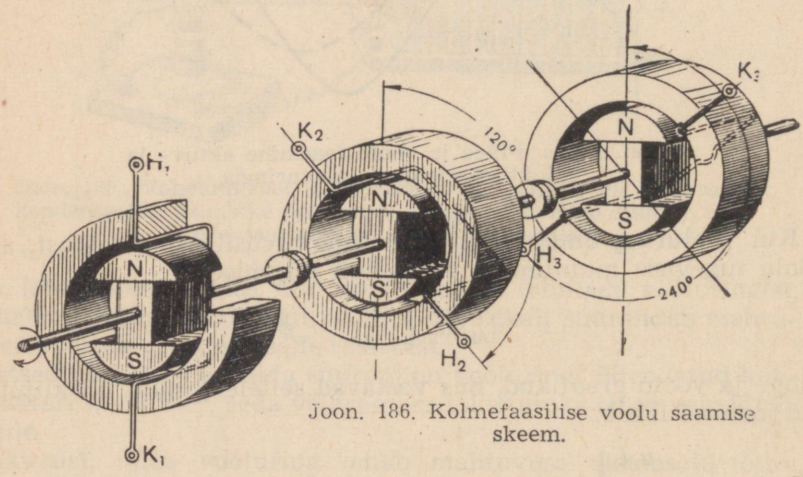
Joon. 185, *b*. Pinge ja voolu faasinihe aktiiv- ja mahtuvustakistusega vooluringis.

100. Kolmefaasiline vool. § 96 vaadeldud vahelduvvoolu nimetatakse ühefaasiliseks vahelduvvooluks, kuna teda põhjustas generaatoris tekkinud üksainus *EMJ*. Kuid peamiseks voolusüsteemiks, mida tänapäeval kõikjal kasutatakse, on kolmefaasiline vahelduvvool, millel on, nagu edaspidi näeme (§ 101), rida eeliseid ühefaasilise süsteemiga võrreldes.

Kolmefaasiliseks vahelduvvooluks nimetatakse süsteemi kolmest ühefaasilisest voolust, mida tekitanud kolm EMJ on ühesuguse amplituudi ja sagedusega, kuid nihutatud faasis 120° või ajas $^1/_3$ *perioodi võrra.*

Kolmefaasilise süsteemi iga üksikut vooluringi nimetatakse faasiks.

Kolmefaasilise voolusüsteemi võivad põhimõtteliselt tekitada kolm ühesugust ühefaasilist vahelduvvoolu generaatorit, mille rootorid on ühesuguses asendis üksteisega jäigalt seotud ega muuda pöörlemisel oma suhtelist asendit. Staatorite mähised on aga rootori pöörlemissuunas üksteise suhtes 120° võrra pööratud, nagu see on näha jooniselt 186 (nende otsad on märgitud tähtedega *H* ja *K*). Nendel tingimustel on täiesti ilmne, et teise generaatori *EMJ* (E_2) muudatused hilinevad esimese generaatori *EMJ* (E_1) suhtes 120° võrra, s. t. samasuunalise *EMJ* suurim väärtus teises generaatoris saabub pärast seda, kui generaatorite kõik rootorid pöörduvad 120° võrra. Kolmanda generaatori *EMJ* (E_3) hilineb teise generaatori *EMJ* suhtes samuti 120° võrra.



Joon. 186. Kolmefaasilise voolu saamise skeem.

Kuid selline kolmefaasilise voolu saamise viis on tehniliselt keeruline ja majanduslikult kahjulik. Palju lihtsam on paigutada kõik kolm staatori mähist ühele staatori kerele, mida näeme ka joonisel 187. Mähiste algused on sellel joonisel tähistatud tähte-

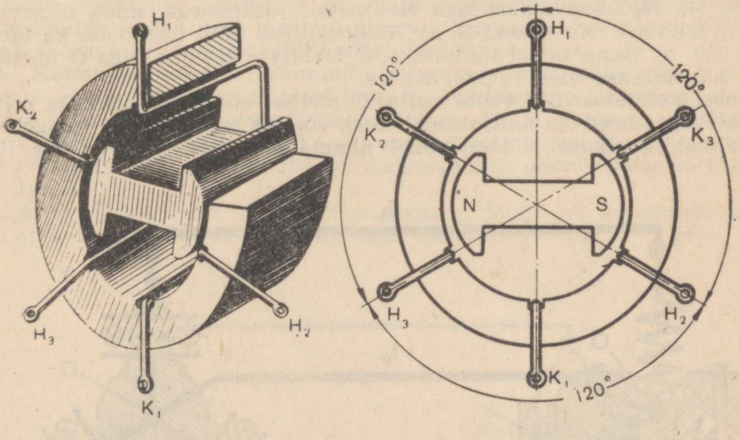
dega *H*, lõpud tähtedega *K*. Sellist generaatorit nimetatakse kolmefaasilise voolu generaatoriks.

Seega kolmefaasilise voolu generaatori staatoril on kolm mähist (mida nimetatakse generaatori faasimähiseiks), millede algused (või lõpud) on üksteise suhtes 120° nihutatud.

Kolmefaasilise generaatori rootor on konstruktiivselt sarnane ühefaasilise generaatori rootoriga.

Rootori pöörlemisel tekitatakse kõigis mähiseis ühesuguse sageduse ja amplituudiga *EMJ*, mis aga ei saavuta üheaegselt oma maksimume. Arvestades, et *EMJ* maksimum tekib põhjapooluse keskpunkti mähise alguse alt läbimineku hetkel, pole raske näha, et samasuunaline *EMJ* maksimum tekib teises mähises pärast rootori pöördumist 120° võrra esimese mähise suhtes ja kolmandas mähises pärast rootori pöördumist 240° esimese mähise suhtes (selle asendi suhtes, mille puhul esimeses mähises tekkis maksimaalne *EMJ*).

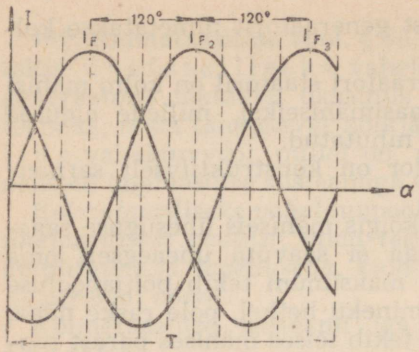
Ühendades generaatori iga faasi välisvooluringiga, saame kolm ühefaasilist vooluringi, millede vahel pole mingit elektrilist ühendust, kusjuures voolu tugevused igas üksikus vooluringis nende ühesuguse takistuse puhul on võrdse amplituudiga, kuid faasis



Joon. 187. Kolmefaasilise voolu generaatori skeem.

üksteise suhtes nihutatud samuti nagu elektromotoorsed jõudki 120° võrra.

Ostsillograafi abil saadud kolmefaasilise voolu graafik on toodud joonisel 188.



Joon. 188. Kolmefaasilise voolu graafik.

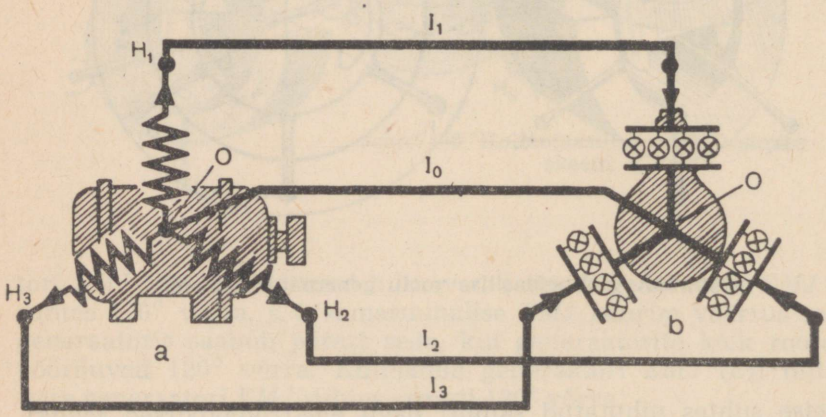
Sellise generaatori ühendamiseks koormusega läheb vaja 6 juhet. Juhtmete arvu vähendamiseks välisvooluringis ühendatakse omavahel generaatori mähised ja koormus, moodustades elektriliselt seotud kolmefaasilise süsteemi. Sellist ühendamist saab teostada kahel viisil: täht- ja kolmnurklülituse näol.

Need mõlemad lülitused võimaldavad kokku hoida juhtmete materjali antud võimsuse ülekandmisel, võrreldes materjalide kuluga sama võimsuse ülekandmisel kolmest sõltumatust ühefaasilisest generaatorist.

101. Tähtlülitus. Kolmefaasilist generaatorit tähistatakse tavaliselt skeemidel kolme staatorimähise näol, mis asetsevad üksteise suhtes nurga all 120°. Tähtedega H ja K tähistatakse vastavate mähiste algusi ja lõppe.

Kui kolme staatorimähise lõpud (K_1, K_2, K_3) ühendada ühte punkti, mida nimetatakse generaatori nullpunktiks (O), saame staatorimähiste niisuguse lülituse, mida nimetatakse tähtlülituseks; nende mähiste algused H_1, H_2, H_3 ühendatakse aga elektriliini juhtmetega, mida nimetatakse faasijuhtmeiks (joon.189, *a*). Analoogiliselt võib ühendada ka tarbijad (joon. 189, *b*). Generaatori nullpunkti O tarbijate nullpunktiga O ühendavat juhet nimetatakse nulljuhtmeks.

Sellisel kolmefaasilise voolu neljajuhtmelisel süsteemil on kaks erinevat pinget. Pinget faasi- ja nulljuhtme vahel, või mis on seesama — pinget mingi staatorimähise alguse ja lõpu vahel nimetatakse faasipingeks (U_f).



Joon. 189, *a* — staatorimähiste lülitamine tähte;
b — koormuse lülitamine tähte.

Kahe faasijuhtme või staatorimähise alguste vahel mõõdetavat pinget nimetatakse liinipingeks (U_f).

Liinipinge on faasipingest $\sqrt{3}$ korda suurem:

$$U_l = \sqrt{3}\, U_f.$$

Näide. Tähte ühendatud kolmefaasilise süsteemi faasijuhtmete vaheline pinge on 220 V. Millega võrdub faasipinge, s. t. pinge null- ja mingi faasijuhtme vahel?

Lahendus.

$$U_f = \frac{U_l}{\sqrt{3}}; \quad U_f = \frac{220\ \text{V}}{\sqrt{3}} = 127\ \text{V}.$$

Näide. Tähte ühendatud kolmefaasilise süsteemi faasipinge on 220 V. Millega võrdub pinge faasijuhtmete vahel?

Lahendus.

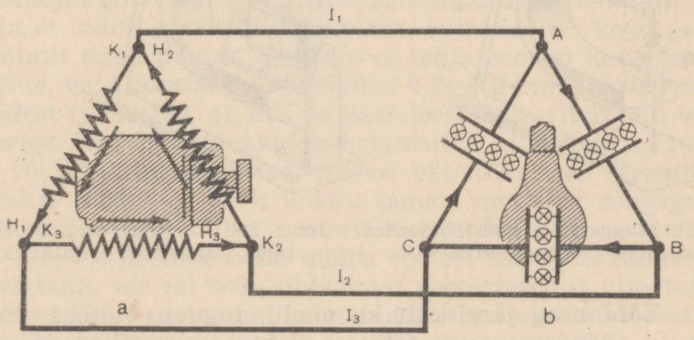
$$U_l = \sqrt{3}\, U_f; \quad U_l = 220\ \text{V} \cdot 1{,}71 \approx 380\ \text{V}.$$

Tänapäeval tuuakse kõigisse uutesse elumajadesse sisse kolmefaasiline vool, liinipingega 220 V (näiteks Moskvas linna piirides) ja 380 V (Moskva linnalähedastes liinides). Elektrilambid lülitatakse faasi ja nulljuhtme vahele, s. t. tähte (nulljuhtme olemasolu on hädavajalik), vastavalt pingega $\frac{220\ \text{V}}{\sqrt{3}} = 127\ \text{V}$ ja $\frac{380\ \text{V}}{\sqrt{3}} = 220\ \text{V}$.

Faaside ühesuguse koormuse puhul on voolu tugevus nulljuhtmes (I_0) võrdne nulliga ja see juhe muutub liigseks. Niisugune juhus esineb näiteks kolmefaasilise elektrimootori lülitamisel vooluringi.

102. Kolmnurk-lülitus. Kolmnurk-lülituseks nimetatakse niisugust lülitust, kus generaatori esimese faasi lõpp K_1 ühendatakse teise faasi algusega H_2, teise faasi lõpp K_2 kolmanda faasi algusega H_3 ja lõpuks kolmanda faasi lõpp K_3 esimese faasi algusega H_1, aga saadud kolmnurga tipud ühendatakse elektriliini juhtmetega (joon. 190, *a*). Analoogiliselt ühendatakse ka koormus (joon. 190, *b*).

Vaadeldes joonist 190, pole raske otsusele jõuda, et kolmnurk-lülituse puhul on generaatori liini- ja faasipinged võrdsed $U_l = U_f$.



Joon. 190, *a* — staatorimähiste lülitamine kolmnurka;
b — koormuse lülitamine kolmnurka.

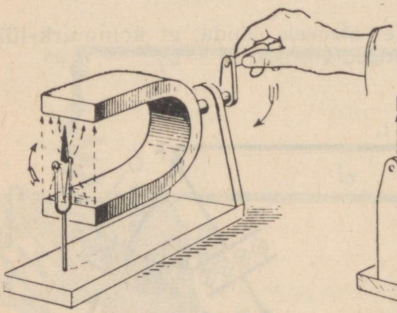
103. Asünkroonmootor. Kolmefaasilise voolu kasutuselevõtmine tehnikas võimaldas luua ehituselt lihtsa ja ekspluatatsioonis mugava elektrimootori, mida nimetatakse asünkroonmootoriks. Asünkroonmootori ehitus põhineb nõndanimetatud pöörleva magnetvälja kasutamisel. Kõige lihtsamini võib saada sellise välja hobuserauakujulise magneti pöörlemisel. Tema lähedusse teljele asetatud magnetnõel (joon. 191) hakkab pöörlema samas suunas nagu magnetki.

Kui pöörlevasse magnetvälja paigutada teljele kinnitatud suletud kontuur (joon. 192), siis pöörlemisel suletud kontuuri külgi lõigates indutseerib pöörlev magnetväli nendes *EMJ*, mis tekitab selles kontuuris induktsioonvoolu. Selle voolu ja pöörleva magnetvälja koosmõjul hakkab kontuur pöörlema, kusjuures tema pöörlemissuuna määrab vasaku käe reegel.

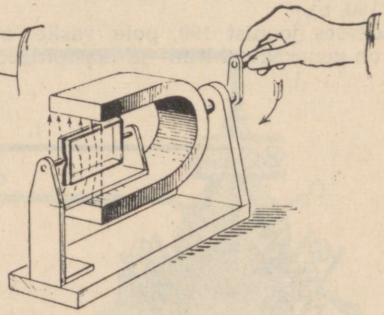
Pole raske näha, et kontuuri pöörlemine peab toimuma vastavalt magnetvälja pöörlemise suunale. Kuid selle nähtuse arutlusel on palju lihtsam lähtuda mitte parema ja vasaku käe formaalsete reeglite seisukohast, vaid Lenzi seadusest, mis näitab selle nähtuse füüsikalist olemust.

On täiesti selge, et induktsioonvoolu tekkimise põhjuseks kontuuris on magnetvälja pöörlemine kontuuri suhtes. Järelikult, vastavalt Lenzi seadusele, takistab induktsioonvool välja pöörlemist. Kuid aeglustada magnetvälja pöörlemist ta ei suuda, kuna pöörlemise kiirus on määratud mehhaanilise välisjõu poolt. Seetõttu hakkab kontuur ka ise pöörleva magnetvälja suunas pöörlema, selle tulemusena väheneb kontuuri külgede magnetväljaga lõikumise relatiivne kiirus.

Kui oletada, et kontuur saavutas välja pöörlemise kiiruse, siis



Joon. 191. Magnetnõel pöörleb samas suunas kui magnetki.



Joon. 192. Asünkroonmootori töötamise põhimõtet selgitav katse.

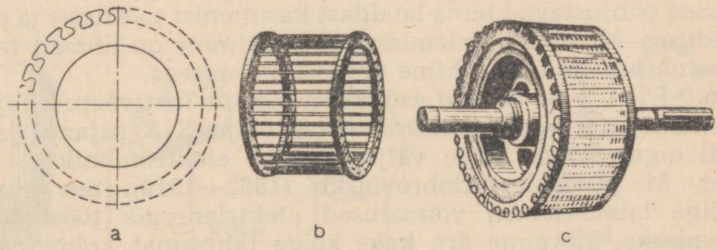
muutub *EMJ* ning järelikult ka voolu tugevus temas võrdseks nulliga ja pöördemomenti tekitav elektromagnetiline jõud kaob. Seetõttu alati takistusjõudude (hõõrdejõu jne.) momendi mõju all viibiv kontuur hakkab seisma jääma. Keeru pöörlemise kiiruse

vähenemise tõttu hakkavad tema küljed jälle lõikuma magnetväljaga ja tekib uuesti pöördemoment, mis ühtlasel pöörlemisel alati võrdub takistusjõudude momendiga. Kontuuri pöörlemise kiirus pöörlevas magnetväljas on alati väiksem välja pöörlemise kiirusest, seepärast räägitakse, et kontuuri pöörlemine toimub välja suhtes a s ü n k r o o n s e l t (mitteüheaegselt).

Kolmefaasilised asünkroonmootorid koosnevad kahest peamisest osast: liikumatust osast ehk s t a a t o r i s t ja pöörlevast osast — r o o t o r i s t.

Pöörleva magnetvälja tekitamiseks mootoris ei panda magnetpooluseid mehhaaniliselt pöörlema, vaid juhitakse staatori liikumatuisse mähiseisse kolmefaasiline vahelduvvool.

Kui staatori pöörlevasse magnetvälja paigutada teljel asetsev raudsilinder (rootor), tekivad tema keres, millest tungib läbi pöörlev väli, induktsioonvoolud. Nende voolude ja pöörleva välja vastastikune toime põhjustab Lenzi seaduse järgi rootori pöörlemise välja pöörlemise suunas kiirusega, mis on väiksem kui välja pöörlemise kiirus.



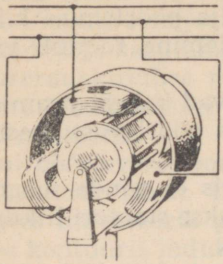
Joon. 193. Asünkroonmootori rootori ehitus.

Selleks et suurendada mootori pöördemomenti, tuleb rootori kerele mõjuv jõud rakendada võimalikult kaugele tema teljest, s. t. on vaja, et induktsioonvoolud ei tekiks mitte rootori kogu paksuses, vaid ainult tema pinnal. Seetõttu ei tehta rootori keret massiivse silindrina, vaid koostatakse üksikuist 0,3—5,0 mm paksustest raudplekkidest (joon. 193, *a*), mis on üksteisest isoleeritud laki või maisipaberiga. Nendesse plekkidesse stantsitud uurdeisse paigutatakse vask- või alumiiniumvardad. Kerest väljaulatuvad varraste otsad joodetakse mõlemalt poolt kokku samast metallist rõngaga (joon. 193, *b*), mille tõttu sellist rootorit kutsutakse l ü h i s r o o t o r i k s (joon. 193, *c*), ja kuna selle mähis rootori kerest eraldatuna näib oravarattana, siis nii seda lihtsaimat rootorimähist nimetataksegi.

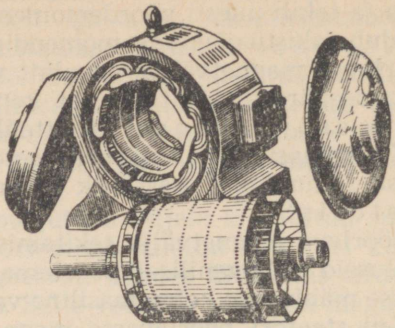
Joonisel 194, *a* on toodud kolmefaasilise asünkroonmootori võrku lülitamise skeem.

Tuleb meeles pidada, et voolud rootoris on induktsioonvoolud.

Lühisrootoriga asünkroonmootor on väga lihtne ja vastupidav



Joon. 194, *a*. Kolmefaasilise asünkroonmootori võrku lülitamise skeem.



Joon. 194, *b*. Asünkroonmootori peamised osad.

mootor, kuna temal puuduvad kollektor ja liugkontaktid. Need omadused põhjustavad tema laialdast kasutamist tööstuses ja põllumajanduses. Mootori pöörlemissuuna muutmine on lihtsalt teostatav mistahes kahe faasijuhtme ümberlülitamisega.

Joonisel 194, *b* on toodud asünkroonmootor lahtivõetud kujul.

Kolmefaasilise voolusüsteemi töötas välja XIX sajandi ja XX sajandi alguses üks kõige väljapaistvam elektrotehnik — vene insener M. O. Dolivo-Dobrovolski (1862—1919). See süsteem lõi kõige laialdasemad võimalused elektrienergia tööstuslikuks kasutamiseks. Märgime ära kaks kõige tähtsamat kolmefaasilise süsteemi eelist tavalise ühefaasilise vahelduvvoolu süsteemiga võrreldes: 1) juhtmematerjali kokkuhoid elektrijaama tarbijaga ühendavais liinides, 2) võimalus tekitada pöörlevat magnetvälja, mida kasutatakse asünkroonmootorite jaoks.

104. Kahe elektroodiga elektrontoru. Elektronlampideks nimetatakse väga mitut liiki seadmeid, mille töötamine on rajatud hõõguvast metallist elektronide väljumise nähtusele.

Elektrontorude kasutamisala on äärmiselt laialdane. Piisab sellest, kui öelda, et raadiotehnika (raadio, raadiolokatsioon ja kaugnägemine), automaatika ja telemehhaanika tervenisti baseeruvad nende seadmete tööle. Edaspidi tutvume elektrontorude mõnede praktiliste rakendustega.

Joonisel 195 on näidatud lihtsaima, kahe elektroodiga elektrontoru skeem ja väliskuju. Selles torus kujutab anood endast metallist silindrit, mille sisse telje suunas on asetatud kütteniit — katood.

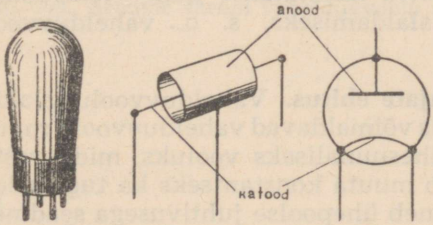
Kütteniidi hõõgumisel lendavad kütteniidist välja elektronid. Kui pinge kütteniidi ja anoodi vahel võrdub nulliga, siis kütteniidist väljalennanud elektronid moodustavad tema ümber omamoodi

«elektronide pilve» (joon. 196). See pilv hoitakse kütteniidi lähedal, mis elektronide kaotuse tõttu laadub positiivselt. Positiivselt laetud kütteniit mitte ainult ei hoia kinni väljalendavaid elektrone, vaid tõmbab neid isegi kütteniiti tagasi. Lõppkokkuvõttes tekib nende kahe protsessi vahel liikuv tasakaal, analoogiline tasakaaluga, mis leiab aset küllastunud auru ja vedeliku vahel (püsiva temperatuuri juures). Niisuguse tasakaalu puhul jääb pilvès olevate elektronide keskmine arv konstantseks.

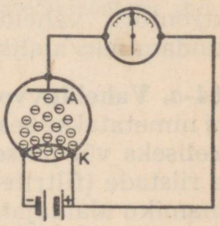
Kui tekitada nüüd torus elektriväli, tehes kütteniidi *K* katoodiks ja plaadi *A* anoodiks, lülitades selleks anoodi vooluringi patarei, mille pinge on 80—100 V, siis hakkavad pilves olevad elektronid sööstma anoodi poole: lambi anoodvooluringi läbib vool.

Tõstes katoodi teatava kütte juures pinget kütteniidi ja anoodi vahel, liigub ikka rohkem ja rohkem elektrone anoodi poole ja järelikult ikka vähem pöördub neid tagasi kütteniiti. Seejuures kasvab vool toru anoodvooluringis.

Teatava pinge puhul katoodi ja anoodi vahel tõmbab anood kõik kütteniidist väljalendunud elektronid enda külge.



Joon. 195. Kahe elektroodiga elektrontoru ja selle ehitus.

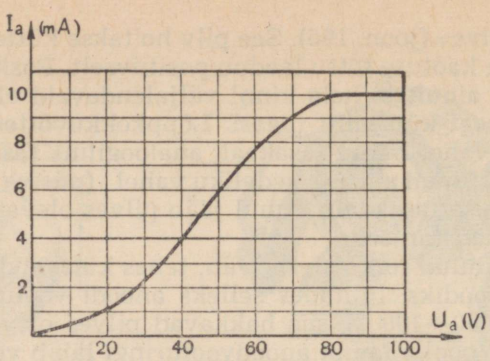


Joon. 196. Pinge puudumisel anoodi ja katoodi vahel tekib kütteniidi lähedal elektronide pilveke.

Kui veelgi tõsta anoodpinget, siis voolu tugevus juba enam ei suurene, sest kütteniit võib antud temperatuuril saata igas sekundis välja ainult kindla hulga elektrone, mis määrabki suurima voolu tugevuse. Sellist voolu nimetatakse küllastusvooluks.

Anoodvooluringi voolu tugevuse sõltuvus anoodi ja katoodi vahelisest pingest on kujutatud graafiliselt joonisel 197. Seda graafikut nimetatakse anoodi tunnusjooneks.

Elektrontoru tähtsaimaks omaduseks on tema *ühepoolne juhtivus:* elektronid liiguvad temas kütteniidilt anoodi poole, mis vastab konventsionaalsele voolusuunale anoodilt kütteniidi poole. Vastupidine voolusuund ei ole võimalik, sest vastupidise voolusuuna saamiseks oleks tarvis ühendada plaat *A* vooluallika negatiivse poo-



Joon. 197. Anoodvooluringi voolu tugevuse ja anoodi pinge sõltuvuse graafik.

lusega: sel juhul ta aga ei tõmbaks elektrone enda poole, vaid tõukaks kütteniidist väljuvad elektronid tagasi.

Oma ühepoolse juhtivuse tõttu kasutatakse kahe elektroodiga elektrontoru vahelduvvoolu alaldamiseks, s. o. vahelduvvoolu muundamiseks alalisvooluks.

104-*a*. Vahelduvvoolu alaldajate ehitus. Vahelduvvoolu alaldajaiks nimetatakse seadmeid, mis võimaldavad vahelduvvoolu muuta katkeliseks või pulseerivaks ühesuunaliseks vooluks, mida vastavate riistade (filtrite) abil saab muuta konstantseks ka tugevuselt.

Enamiku alaldajate töö põhineb ühepoolse juhtivusega seadmete kasutamisel. Need seadmed lasevad vabalt läbi ühesuunalist voolu ja peaaegu üldse ei võimalda läbipääsu vastassuunalisele voolule.

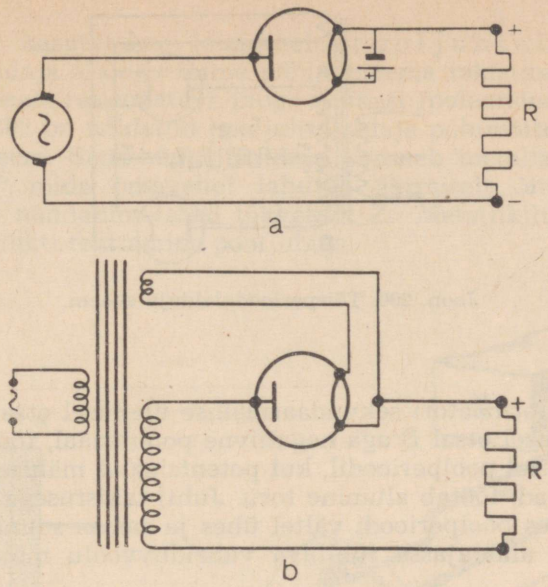
Vahelduvvoolu alaldajaina kasutatakse laialdaselt kahe elektroodiga elektrontoru. Joonisel 198, *a* on kujutatud elektrontoru vahelduvvoolu ringi lülitamise skeem. Vahelduvvoolu allika võib lülitada vooluringi vahetult või transformaatori kaudu, nagu see on näidatud joonisel 198.

Iga kord, kui anoodil on katoodiga võrreldes positiivne potentsiaal, läbib toru ja takistust R vool. Kui anoodil on negatiivne potentsiaal, siis voolu ei ole. Seega läbib vool takistust R ainult alaldajale rakendatud pinge iga positiivse poolperioodi jooksul.

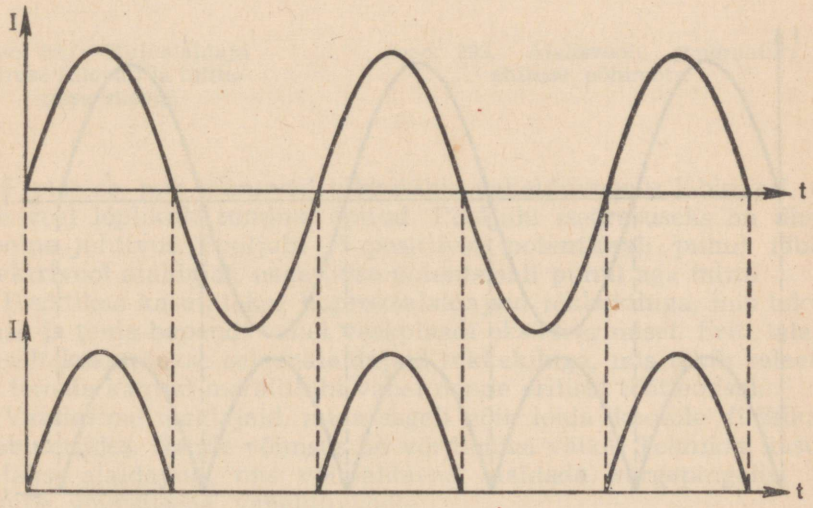
Juhti takistusega R läbiv vool kujutab endast ühesuunalist pulseerivat voolu.

Joonisel 199 kujutab ülemine kõver vahelduvvoolu, alumine — alaldatud pulseerivat voolu.

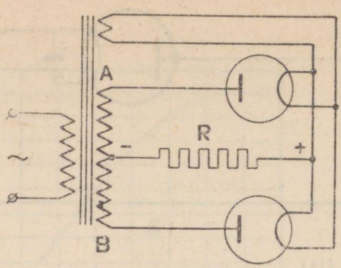
Vahelduvvoolu mõlema poolperioodi ärakasutamiseks võetakse tarvitusele kahe poolperioodi alaldamise seadmed. Joonisel 200 on kujutatud selline skeem kahe elektrontoruga, joonisel 201 aga koormust R läbiva pulseeriva voolu graafik.



Joon. 198. Seadme skeem vahelduvvoolu alaldamiseks elektrontoru abil.



Joon. 199. Vahelduvvoolu graafik (ülemine kõver) ja alaldatud (alumine graafik) voolu graafik.

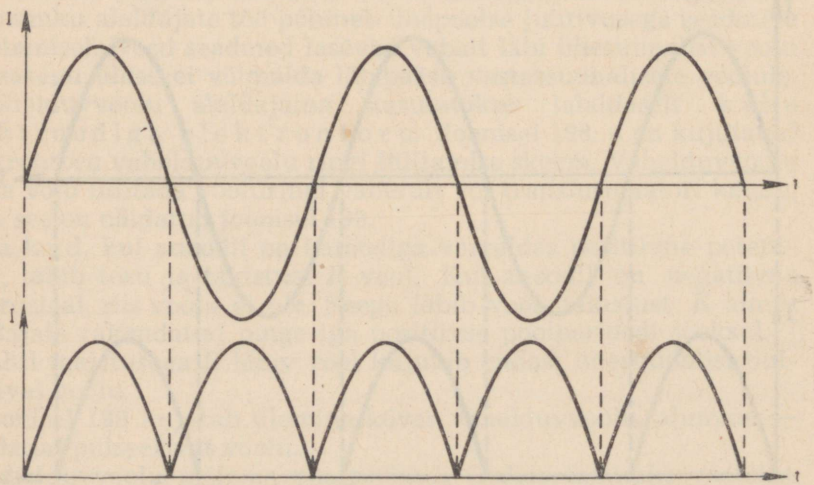


Joon. 200. Täisperioodalaldaja skeem.

Kui transformaatori sekundaarmähise ülemisel otsal *A* on positiivne, alumisel otsal *B* aga negatiivne potentsiaal, töötab ülemine toru. Järgmisel poolperioodil, kui potentsiaalid mähise otstel märgilt muutuvad, töötab alumine toru. Juhti takistusega *R* läbib aga vool mistahes poolperioodi vältel ühes ja samas suunas. Sel viisil kasutatakse alaldajasse juhitava vahelduvvoolu mõlemaid poolperioode.

Kahe elektroodiga toru, mida kasutatakse vahelduvvoolu alaldamiseks, nimetatakse k e n o t r o n i k s.

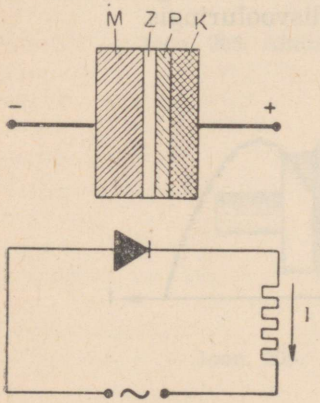
Kenotronil on ideaalselt ühepoolne juhtivus, kuid tema sisetakistus on väga suur, mille tõttu kenotronalaldajaid kasutatakse peamiselt raadioseadmete toitmiseks, mis ei nõua kuigi suurt voolu.



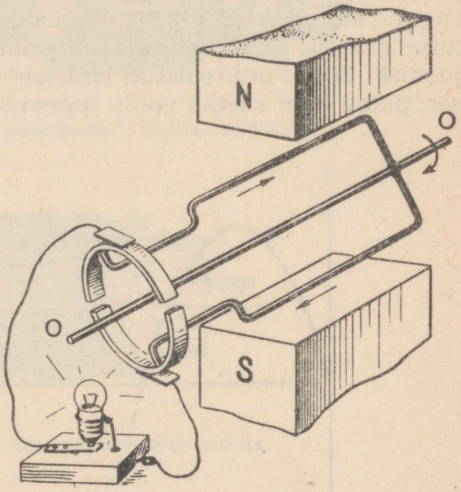
Joon. 201. Vahelduvvoolu graafik (ülemine kõver) ja pulseeriva voolu graafik kahe poolperioodi alaldamise juures.

Praktikas kasutatakse laialdaselt pooljuhtalaldajaid. Pooljuhtalaldaja alaldav toime põhineb tema takistuse erinevusel sõltuvalt temale rakendatava pinge suunast (polaarsusest).

Joonisel 202 on näidatud pooljuhtalaldaja põhimõtteline ehitus- ja lülitusskeem. Seda tüüpi alaldaja koosneb metallkettast *M* ja pooljuhist *P*, mida omavahel lahutab äärmiselt õhuke (umbes 10—15 mm) nõndanimetatud tõkkekiht *Z*. Metallikihi *K* ülesandeks on kontakti tekitamine pooljuhiga.



Joon. 202. Kuivalaldaja ehituse (üleval) ja lülitamise skeem.



Joon. 203. Alalisvoolu generaatori ehituse põhimõte.

Protsesse, mis toimuvad tõkkekihis vahelduvvoolu läbimisel, ei ole veel lõplikult tundma õpitud. Pooljuhi iseärasuseks on ühepoolne juhtivus. Pooljuhi *P* positiivse potentsiaali puhul läbib elektrivool alaldajat, negatiivse potentsiaali puhul aga mitte.

Praktikas kasutatakse kuproksalaldajaid tõkkekihiga, mis tekib vase ja tema hapendi vahel vaskplaadi oksüdeerimisel. Eriti laialdaselt kasutatakse seleenalaldajaid tõkkekihiga, mis tekib seleeni ja temale kantud metallikihi vahel nende erilisel töötlemisel.

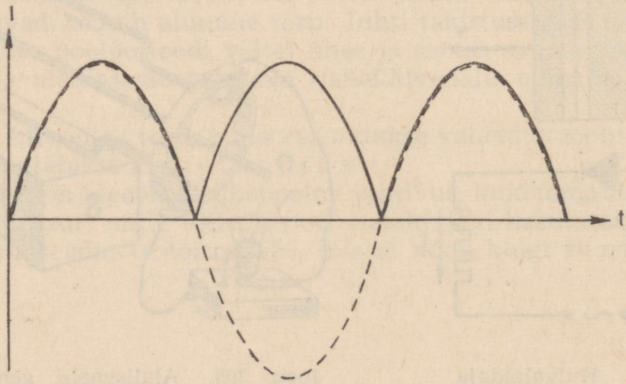
Vaatlesime alaldajaid, mida sageli võib leida koolide füüsikakabinettides. Nende võimsus on võrdlemisi väike. Tehnikas kasutatakse alaldajaid, mis võimaldavad alaldada kõrgepingelisi ja suure võimsusega vahelduvvoole.

105. Alalisvoolu generaator. Alalisvoolu võib saada ka spetsiaalseist alalisvoolu generaatoreist. Allpool kirjeldatakse sellise generaatori ehitust.

Me nägime (§ 96), et magnetväljas pöörlevas kontuuris muudab *EMJ* kontuuri ühe pöörde jooksul kaks korda oma suunda. Välisvooluringis alalisvoolu saamiseks kasutatakse erilist mehhaanilist ümberlülitusseadet — k o l l e k t o r i t.

Lihtsaimal juhul kujutab kollektor endast kaht teineteisest isoleeritud poolrõngast, mille külge kinnitatakse kontuuri otsad. Poolrõngad paigutatakse teljele ja nad pöörlevad koos kontuuriga, puutudes seejuures vastu liikumatuid harju (joon. 203).

Neil hetkil, kui voolu suund kontuuris muutub, vahetavad ka harjad poolkettaid. Seetõttu välisvooluringis on voolul alati ühesugune suund, kuid tema tugevus muutub. Voolu tugevuse muutumise graafik generaatoriga ühendatud välisvooluringis on toodud joonisel 204. Punkteeritud sinusoid kujutab voolu tugevust mähises, pidev joon vastab voolu tugevusele välisvooluringis.



Joon. 204. Voolu tugevuse muutumise graafik alalisvoolu generaatori vooluringis.

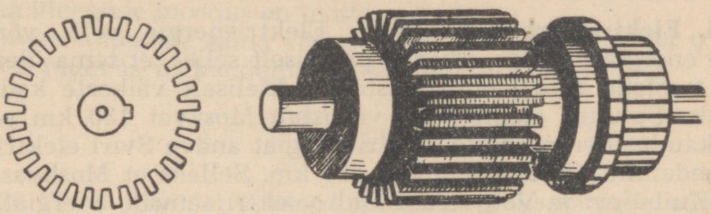
Kasutades ühe asemel mitut kontuuri, võib saada alalisvoolu, mille graafik on ajateljega peaaegu paralleelne sirge. Kollektor koosneb sel juhul paljudest üksteisest isoleeritud lestadest.

Tänapäeva alalisvoolu generaatori ankrumähis kujutab endast väga keerulist kinnist süsteemi, mis koosneb suurest arvust sektsioonidest. Igast sektsioonist on tehtud väljavõte, mis on joodetud kollektorilesta külge.

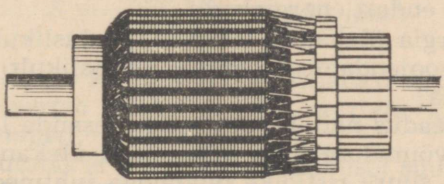
Ankru silindrikujuline kere on koostatud üksikuist üksteisest õhukese paberi või lakiga isoleeritud 0,3—0,5 mm paksustest terasplekkidest ja kinnitatud teljele. Plekkidesse stantsitud uuretesse paigutatakse ankrumähis. Ankur ilma mähiseta on toodud joonisel 205 ja kokkumonteeritult joonisel 206.

Alalisvoolu generaatori väliskere on valatud terasest või malmist. Tema siseküljele kinnitatakse lehtterasest koostatud poolus-

kingad (joon. 207). Pooluste südamikkudele paigutatakse ergutusmähised, mis tekitavad väliskeret ja ankrut läbiva magnetvoo. Kogu see süsteem moodustab induktori. Ergutusmähistesse tuleb vool masina ankrust. Ankru pöörlemisel lõikavad tema uuretes

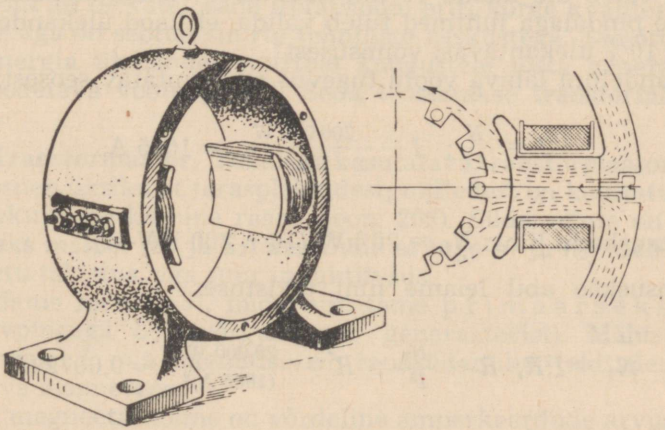


Joon. 205. Alalisvoolu generaatori ankru südamik.



Joon. 206. Alalisvoolu generaatori ankur.

asuvad juhtmed ergutusmähiste poolt loodud magnetvälja jõujooni ja nendes tekib *EMJ*, ja kui on olemas suletud välisvooluring, tekib ka induktsioonvool.



Joon. 207. Alalisvoolu generaatori kere.

Vastavalt Lenzi seadusele mõjub induktsioonvool takistavalt teda esilekutsunud põhjusesse. Selleks põhjuseks on ankru liikumine, seega induktsioonvool ankrus takistab ankru pöörlemist. Selle takistusjõu ületamisele kulubki soojus- või veejõumasina mehhaaniline energia.

106. Elektrienergia ülekanne. Elektrienergia eelis, võrreldes teiste energialiikidega, seisneb peamiselt selles, et tema ülekannet võib teostada suurtele kaugustele suhteliselt väikeste kadudega. Näiteks Šatuura elektrijaam varustab Moskvat 130 km pikkuse liini kaudu; Leningradile elektrienergiat andva Sviri elektrijaama ülekandeliini pikkus on umbes 250 km. Selleks et Moskvas kasutada Kuibõševi ja Volgogradi hüdroelektrijaamade energiat, tuleb elektrivoolu üle kanda tunduvalt suurematele kaugustele.

Elektrienergia ülekandmisel teatavale kaugusele on energiakaod ülekandeliinides vältimatud, kuna elektriliini juhtmeid läbiv vool soojendab neid. Ülekandeliinide juhtmete soojendamisele minev energia kujutab endast energiakadu.

Et elektrienergia ülekanne oleks majanduslikult kasulik, tuleb kaod juhtmete soojendamisele muuta võimalikult väikesteks. Kuidas seda teostada?

Joule-Lenzi seadus näitab kaht selle ülesande lahendamise võimalust. Üheks võimaluseks on vähendada ülekandeliini juhtmete takistust, võttes suure ristlõike pindalaga juhtmed.

Teine võimalus on vähendada ülekantava voolu tugevust. Kuid ühe ja sellesama võimsuse juures on voolu tugevust võimalik vähendada ainult pinge tõstmise teel.

Vaatleme näite varal, milline nendest võimalustest on praktiliselt teostatav.

Elektrijaamas on üles seatud alalisvoolu generaator võimsusega 200 kW, mis töötab pingel 120 V. Generaatori poolt toodetud energia tuleb üle kanda 10 km kaugusele elektrijaamast. Millise ristlõike pindalaga juhtmed tuleb valida, et kaod ülekandeliinis ei ületaks 10% ülekantavast võimsusest?

Ülekandeliini läbiva voolu tugevus on arvutatav seosest:

$$I = \frac{N}{U}; \quad I = \frac{200\,000\ \text{W}}{120\ \text{V}} \approx 1665\ \text{A}.$$

Võimsuskadu liinis $N_1 = 20$ kW (10% 200 kW-st).

Võimsuskao abil leiame liini takistuse:

$$N_1 = I^2R; \quad R = \frac{N_1}{I^2}; \quad R = \frac{20\,000\ \text{W}}{(1665\ \text{A})^2} \approx 0{,}0072\ \Omega.$$

Valemi $R = \varrho \cdot \frac{l}{S}$ abil leiame juhtmete ristlõike pindala:

$$S = \varrho \cdot \frac{l}{R};\ S = \frac{0{,}0175\ \frac{\Omega \text{mm}^2}{\text{m}} \cdot 2 \cdot 10\,000\ \text{m}}{0{,}0072\ \Omega} = 48\,500\ \text{mm}^2.$$

Üks meeter sellist juhet kaalub 435 kG, aga kogu liini jaoks vajalik juhe kaaluks 8700 tonni. Praktiliselt tähendab see, et selline energia ülekande moodus on teostamatu.

Kantagu nüüd üle sama võimsus 200 kW pingel 12 000 V.

Voolu tugevus ülekandeliinis arvutatakse võrduse abil:

$$I = \frac{20\,000\ \text{W}}{12\,000\ \text{V}} \approx 16{,}65\ \text{A}.$$

Kuna voolu tugevus vähenes 100 korda, siis samade võimsuskadude korral ülekandeliinis, mis on arvutatavad valemiga $N_l = I^2R$, suureneb ülekandeliini takistus 100^2 korda.

Juhtmete ristlõike pindala aga väheneb 100^2 korda ja on nüüd:

$$S = \frac{48\,500\ \text{mm}^2}{100^2} = 4{,}85\ \text{mm}^2.$$

100^2 korda väheneb ka juhtmeteks vajaliku vase kaal.

Seega *elektrienergia ülekandmisel suurtele kaugustele tuleb kasutada kõrgepinget.*

Praktikas kasutatakse energia ülekandmisel suurtele kaugustele pingeid 3300, 6600, 110 000, 220 000 ja 400 000 V.

Mida pikem on ülekandeliin, seda kõrgemat pinget seal kasutatakse. Dnepri hüdroelektrijaam annab voolu pingega 160 000 V, Sviri elektrijaam 220 000 V. Uued võimsad hüdroelektrijaamad projekteeritakse veel suurematele pingetele.

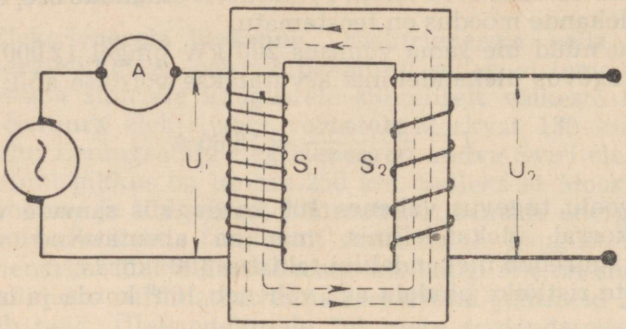
Vahelduvvoolu generaatorid ehitatakse tavaliselt pingele 2200, 6600, 11 000, 13 200 V. Veel kõrgema pingega generaatorite ehitamine on raskendatud; neil juhtudel oleks nõutav generaatori kõikide voolu all olevate osade isolatsiooni eriti kõrge kvaliteet, mille täitmine aga on seotud suurte tehniliste raskustega. Seetõttu tuleb elektrienergia ülekandel suurtele kaugustele tõsta generaatorite poolt toodetava voolu pinget. Seda teostatakse transformaatorite abil.

107. Transformaator. Tehnikas kasutatava transformaatori südamik koosneb üksikuist terasplekkidest, milledest on koostatud ühe- või teisekujuline kinnine raam (joon. 208). Südamikule on paigutatud kaks mähist (S_1 ja S_2) keerdude arvuga n_1 ja n_2. Mähistel on tähtsusetu takistus, aga suur induktiivsus.

Ühendame mähise S_1, mida nimetame p r i m a a r s e k s, otsad vahelduvpingega U_1 (võrgust või generaatorist). Mähist läbib vahelduvvool I, mis magnetiseerib raudsüdamiku, tekitades temas vahelduva magnetvoo.

Voolu magneetiv toime on võrdeline amperkeerdude arvuga (In). Vastavalt voolu tugevuse suurenemisele kasvab ka magnetvoog

südamikus, mille muutumine ergutab pooli keerdudes omainduktsiooni *EMJ*. Niipea kui omainduktsiooni *EMJ* saavutab poolile rakendatud pinge väärtuse, lõpeb primaarvooluringis voolu tugevuse juurdekasv. Seega on transformaatori primaarmähisele alati



Joon. 208. Transformaatori lülituse skeem (tühijooksul).

rakendatud pinge U_1 ja omainduktsiooni *EMJ* E_1. Seejuures on pinge U_1 elektromotoorsest jõust E_1 suurem pingelanguse võrra mähises, mis on väga väike. Järelikult võib ligikaudu kirjutada:

$$U_1 = E_1. \tag{1}$$

Tasakaal nende vahel kujuneb välja automaatselt.

Transformaatori südamikus tekkiv vahelduv magnetvoog tungib läbi transformaatori sekundaarmähise keerdudest, ergutades selle igas keerus samasuguse *EMJ* kui primaarmähises.

Kuna primaarpoolis on keerdude arv n_1, sekundaarpoolis aga n_2, siis on nendes indutseeritud *EMJ*-d vastavalt:

$$E_1 = n_1 e,$$

$$E_2 = n_2 e, \tag{2}$$

kus e on ühes keerus tekkiv *EMJ*.

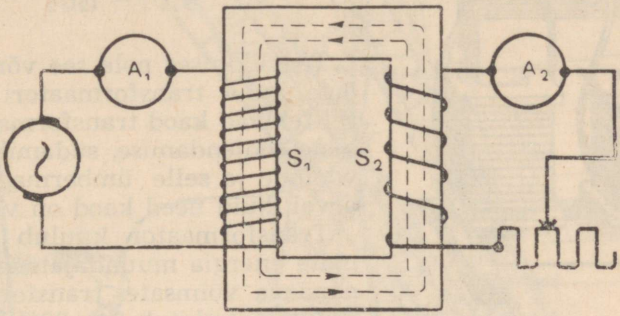
Sekundaarmähise lahtistel otstel tekkiv pinge U_2 on, nagu teada, võrdne temas valitseva *EMJ*-ga, s. t.

$$U_2 = E_2. \tag{3}$$

Võrdustest (1), (2) ja (3) järeldub, et *pinge suurus transformaatori primaarmähise otstel suhtub pinge suurusega sekundaarmähiste otstel nii, nagu primaarmähise keerdude arv suhtub sekundaarmähise keerdude arvuga:*

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{n_1}{n_2} = k. \tag{4}$$

Konstantset suurust k nimetatakse transformaatori ülekandearvuks. Juhul kui on vaja pinget tõsta, tehakse sekundaarmähis suurema keerdude arvuga (pinget tõstev transformaator), juhul aga, kui on vaja pinget madaldada, võetakse transformaatori sekundaarmähis väiksema keerdude arvuga (pinget madaldav transformaator).



Joon. 209. Koormatud transformaatori skeem.

Seni kui sekundaarmähis on avatud (teda ei läbi vool), töötab transformaator tühijooksul. Tühijooksul tarbib ta vähe energiat, kuna raudsüdamikku magnetiseeriv vool on pooli suure induktiivsuse tõttu väga väike ja samuti on väike ka transformaatori mähiste takistus. Tühijooksul ei esine energia ülekannet primaarvooluringist sekundaarvooluringi.

Koormame transformaatorit, sulgedes tema sekundaarmähise vooluringi reostaadi kaudu (joon. 209). Sekundaarmähist läbib nüüd induktsioonvool I_2. Vastavalt Lenzi seadusele põhjustab see vool magnetvoo vähenemist südamikus. Kuid magnetvoo nõrgenemine südamikus kutsub esile omainduktsiooni *EMJ* vähenemise primaarmähises ja tema tasakaalu hävimise primaarmähisele generaatori poolt antava pinge U_1 ja omainduktsiooni *EMJ* E_1 vahel. Seetõttu suureneb voolu tugevus primaarmähises suuruse I_1 võrra ja võrdub nüüd suurusega $I + I_1$. Selle tagajärjel kasvab magnetvoog südamikus ja hävinud tasakaal U_1 ja E_1 vahel taastub uuesti.

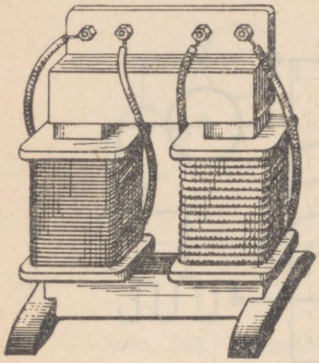
Seega sekundaarvoolu I_2 tekkimine kutsub esile voolu tugevuse suurenemise primaarmähises suuruse I_1 võrra, mis määrab transformaatori primaarmähise koormusvoolu. Kuna voolu magneetiv toime on võrdeline amperkeerdude arvuga In, võib määrata suhte transformaatori koormusvoolude I_1 ja I_2 vahel võrdustest:

$$I_1 n_1 = I_2 n_2 \text{ või } \frac{I_1}{I_2} = \frac{n_2}{n_1}, \qquad (5)$$

s. t. *koormusvoolud transformaatori primaar- ja sekundaarmähistes on pöördvõrdelised mähiste keerdude arvuga.*

Transformaatori koormamisel toimub pidev energia ülekanne primaarvooluringist sekundaarvooluringi. Vastavalt energia jäävuse ja muundumise seadusele võrdub voolu võimsus sekundaarvooluringis primaarvooluringi võimsusega; järelikult peaks kehtima võrdus:

$$I_1U_1 = I_2U_2.$$



Joon. 210. Väikese võimsusega transformaatori väliskuju.

Tegelikkuses pole see võrdus päris õige, kuna transformaatori töötamisel tekivad kaod transformaatori mähiste soojendamise, südamiku keerisvoolude ja selle ümbermagneetimise arvel, kuid need kaod on väikesed.

Transformaator kuulub täiuslikemate energia muundajate hulka. Tänapäeva võimsate transformaatorite kasutegur ulatub 94—99%-ni. Joonisel 210 on kujutatud väikese võimsusega transformaator. Joonisel 211 on kujutatud Dnepri hüdroelektrijaama transformaator-alajaam.

Transformaatori idee tekkis esmakordselt Venemaal ja kuulub «vene valguse» leiutajale P. N. Jablotškovile. Arendades seda ideed edasi, konstrueeris Moskva ülikooli assistent I. F. Ussagin esimese transformaatori, mida ta demonstreeris 1882. a. Moskvas tööstusnäitusel.

108. NSV Liidu elektrifitseerimine. Määratu tähtsaks pidas NSV Liidu elektrifitseerimist Nõukogude riigi looja V. I. Lenin.

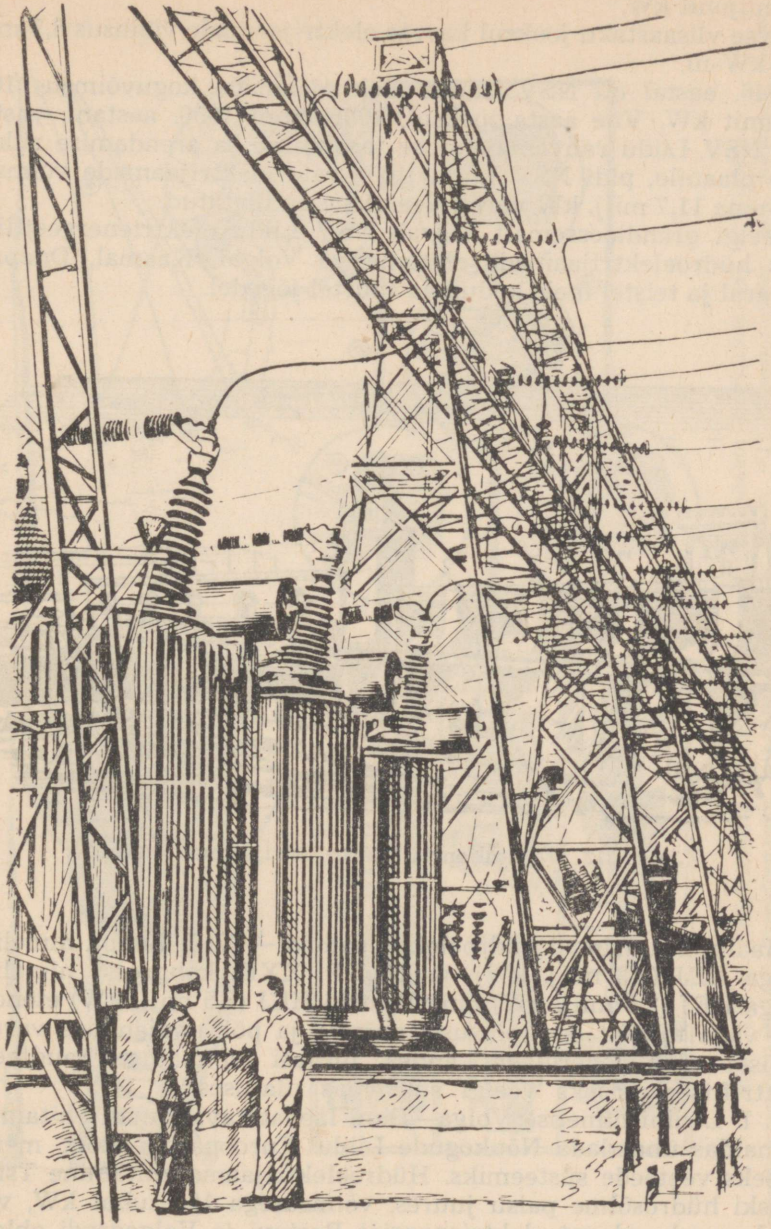
Oma kõnes Kommunistliku Noorsooühingu III kongressil ütles V. I. Lenin:

«Me teame, et kommunistlikku ühiskonda ei saa üles ehitada, kui me ei sea uuesti jalule tööstust ja põllumajandust, kusjuures neid ei tule jalule seada vanamoodi. Need tuleb jalule seada moodsal, teaduse viimase sõna järgi rajatud alusel. Te teate, et selleks aluseks on elekter, et alles siis, kui toimub kogu maa kõigi tööstuse ja põllumajanduse harude elektrifitseerimine, kui te sellest ülesandest jagu saate, alles siis suudate ehitada endale selle kommunistliku ühiskonna, mida ei suuda üles ehitada vana sugupõlv.»[1]

Veebruaris 1920. a. moodustati Lenini initsiatiivil Venemaa Elektrifitseerimise Riiklik Komisjon (lühendatult GOELRO).

GOELRO plaanis nähti ette 10—15 aasta jooksul 30 rajooni-elektrijaama ehitamine koguvõimsusega 1,75 miljonit kilovatti. Lenini eluajal ehitati kaks esimest võimsat elektrijaama: Šatuura soojuselektrijaam (130 km kaugusel Moskvast), võimsusega üle 100 000 kW, ja Volhovi hüdroelektrijaam, võimsusega 80 000 kW.

[1] V. I. Lenin, Teosed, 31. kd., lk. 258.



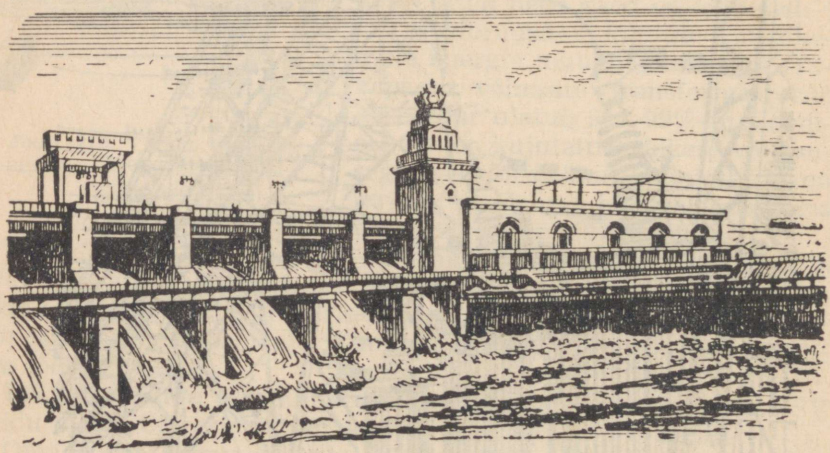
Joon. 211. Dnepri hüdroelektrijaama transformaator-alajaam.

Kuid juba 1932. a. moodustas rajooni-elektrijaamade võimsus 2,9 miljonit kW.

Teise viisaastaku jooksul kasvas elektrijaamade võimsus 8,1 miljoni kW-ni.

1946. aastal oli NSV Liidus elektrijaamade koguvõimsus 10,7 miljonit kW. Viie aasta jooksul, 1946. kuni 1950. aastani, vastavalt NSV Liidu rahvamajanduse taastamise ja arendamise riiklikule plaanile, pidi NSV Liidus töötavate elektrijaamade võimsus kasvama 11,7 milj. kW võrra. See plaan on ületatud.

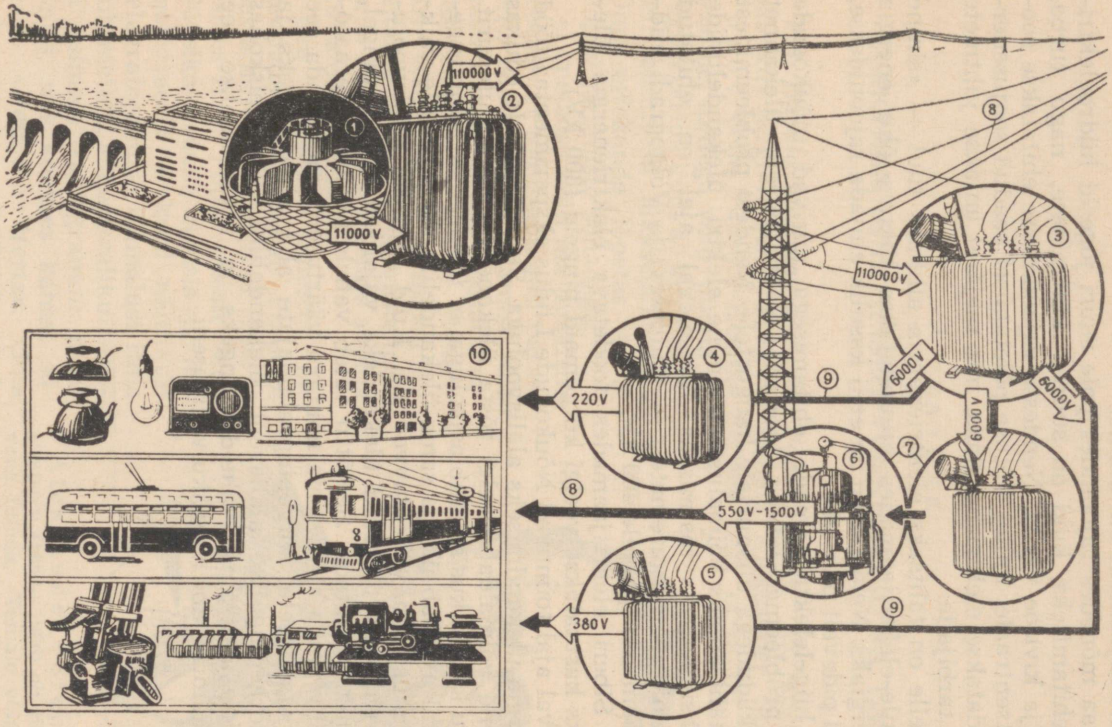
Veelgi grandioossemalt kasvab NSV Liidu elektrienergeetiline baas hüdroelektrijaamade ehitamisega Volgal, Kaamal, Dnepril, Angaral ja teistel meie kodumaa suurtel jõgedel.



Joon. 212, *a*. Tsimljanski hüdroelektrijaama välisvaade.

Maailma suurimad hüdroelektrijaamad — V. I. Lenini nimeline Volga HEJ (2,3 milj. kW) ja NLKP XXII kongressi nimeline Volga HEJ (2,5 milj. kW) ning Bratski HEJ (3,5 milj. kW) etendavad väga tähtsat osa tööstusettevõtete ja põllumajanduse varustamisel elektrienergiaga, andes ühtlasi võimaluse raudteede elektrifitseerimiseks veelgi suuremas ulatuses.

V. I. Lenini nimelise Volga—Doni laevatatava kanali ehitamine võimaldas ühendada Nõukogude Liidu Euroopa-osa kõik mered ühtseks veeteede süsteemiks. Hüdroelektrijaama ehitamine Tsimljanski hüdrosõlme paisu juures, võimsusega 160 tuhat kW, võimaldas anda odavat elektrienergiat Rostovi ja Volgogradi oblasti tööstusettevõtetele ja niisutatavate pool-kõrbe ja põua all kannatavate alade põllundusele. Oma jõgede energia me rakendame selleks, et arendada tööstust ja põllumajandust, tõsta nende toot-



Joon. 212, *b*. Elektrienergia ülekande ja jaotamise skeem elektrijaamast tarbijateni.

1. Generaator pingega 11 000 V. 2. Transformaator, mis tõstab pinge kuni 110 000 V. 3. Transformaator, mis madaldab pinge kuni 6000 V. 4. Transformaator, mis madaldab pinge kuni 220 V. 5. Transformaator, mis madaldab pinge kuni 380 V. 6. Elavhõbealaldaja. 7. Muundusjõujaam. 8. Elektri ülekande õhuliin. 9 Kaabelliinid. 10. Tarbijad.

likkust, kergendada nõukogude inimeste tööd, tõsta kommunismi ehitava rahva materiaalset heaolu.[1]

Elektrifitseerimises etendab tähtsat osa soojuselektritsentraalide ja tuule-elektrijaamade ehitamine.

Meie maa mõnedes rajoonides pole suuri jõgesid hüdroelektrijaamade ehitamiseks, kuid on suured kütteainete, nagu turba, põlevkivi ja kivisöe varud. Nendesse rajoonidesse ehitatakse soojuselektritsentraale, milles kütuse põletamisel saadud soojusenergia muundatakse elektrienergiaks, mis seejärel antakse juhtmete kaudu üle tarbijaile.

Peale selle on tähtsaks elektrienergia allikaks tuul — «sinine süsi». Tuule-elektrijaamades muundatakse liikuva õhu energia elektrienergiaks. Neid jaamu on eriti kasulik ehitada rajoonidesse, kus tuuled pidevalt puhuvad.

Seoses hiigelelektrijaamade ehitamisega uurivad nõukogude teadlased probleeme, kuidas teostada elektrienergia ülekannet vähimate kadudega ülisuurtele kaugustele. Nendest probleemidest on kõige tähtsamaks võimaluste otsimine elektri ülekandeliinide pinge maksimaalseks tõstmiseks. Käesoleval ajal on ehitatud ülekandeliinid meie suurematest — Kuibõševi ja Volgogradi hüdroelektrijaamadest pingele 400 kV.

Suurtes Siberi elektrijaamades toodetava elektrienergia ülekandmiseks kasutatakse veelgi kõrgemaid pingeid (800 kV).

Käesoleval ajal toimuvad Nõukogude Liidus eksperimentaaltööd elektrienergia ülekandmiseks alalisvooluga. Selle ülesande edukas lahendamine võimaldab veelgi tõsta ülekandeliinide kasutegurit. Alalisvoolu kasulikkus seletub asjaoluga, et ühesuguste voolutugevuste korral avaldab üks ja sama ülekandeliin alalisvoolule väiksemat takistust kui vahelduvvoolule. Kuid selliseid alalisvoolugeneraatoreid, mis töötavad ülekandeks vajalikul kõrgel pingel, ei ole võimalik ehitada. Seetõttu tuleb vahelduvvoolugeneraatoritest saadav pinge algul tõsta nõutava väärtuseni, muundada see seejärel spetsiaalsete kõrgepingealaldajate abil alalispingeks ja juhtida kõrgepingeline alalisvool ülekandeliini. Tarbimiskohas muundatakse alalispinge vahelduvpingeks ja madaldatakse see transformaatorite abil vajaliku väärtuseni.

---

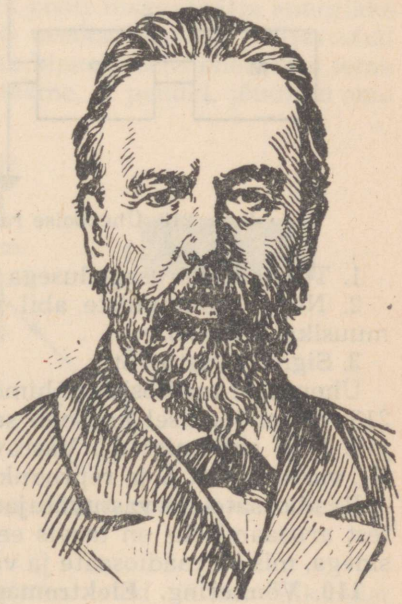
[1] Konkreetse plaani NSV Liidu edasiseks elektrifitseerimiseks annab NLKP XXI kongressil vastuvõetud seitseaastaku plaan.

V PEATÜKK

ELEKTROMAGNETILISED VÕNKUMISED JA LAINED

109. Raadio leiutamine A. S. Popovi poolt. 25. aprillil (uue kalendri järgi 7. mail) 1895. a. kandis Aleksander Stepanovitš Popov Vene Füüsika-Keemia Seltsile ette, et ta on leiutanud seadme, millega võib püüda ja registreerida kuni 30 km kaugusel toimuvaid äikeselahendusi. Oma ettekande lõpetas A. S. Popov järgmiste sõnadega:

«Lõpetades võin ma avaldada lootust, et minu aparaati pärast selle edaspidist täiustamist võib kasutada signaalide edasiandmiseks kaugusesse kiirete elektriliste võnkumiste abil, niipea kui leitakse selliste võnkumiste tekitaja, mis oleks võimeline andma küllaldast energiat.»



Aleksander Stepanovitš Popov (1859—1906) oli silmapaistev vene füüsik. Temale võlgneb inimkond raadio leiutamise.

See ülesanne õnnestus lahendada temal endal. Peaaegu aasta hiljem, 24. märtsil 1896. a. esines A. S. Popov uuesti Vene Füüsika-Keemia Seltsis ja demonstreeris seekord näitlikult telegrafeerimise võimalust ilma juhtmeteta, andes avalikult edasi esimese radiogrammi maailmas, mis koosnes kahest sõnast: *«Heinrich Hertz»*. Oma radiogrammis märkis ta teadlase nime, kes 1887. a. lõpul sai esmakordselt katseliselt elektromagnetilisi laineid, millede olemasolu ennustas teoreetiliselt Maxwell juba 1865. aastal.

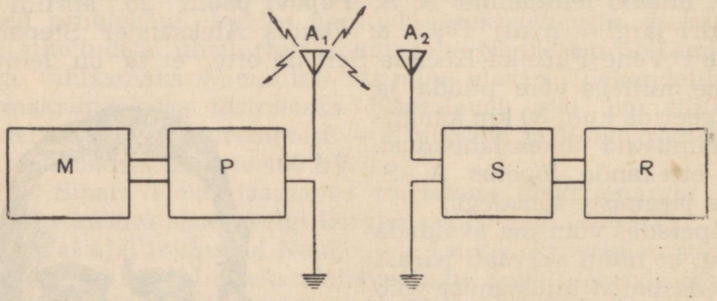
7. mai 1895. a. läks kindlalt maailma kultuuriajalukku ühe laia-

ulatuslikumalt rahvamajandusse, inimeste igapäevasesse ellu ja sõjaasjandusse tunginud leiutise — raadio sünni päevana.

Raadio (raadiotehnika) on praegusel ajal laialdane ja mitmekülgne tehnikaharu, mis haarab signaalide, kõne, muusika ja esemete kujutiste edasiandmist kaugusesse, lennukite ja laevade juhtimist, maapinnal üksteisest kaugel asuvate punktide vahemaa mõõtmist, mittenähtavate esemete asukoha määramist jne.

Raadiotehnika hiilgav õitseng, mille tunnistajateks meie tänapäeval oleme, sai suurel määral võimalikuks füüsikateaduse saavutuste tõttu. Raadiotehnika relvastas omakorda teadust erakordselt painduvate ja võimsate uurimisvahenditega ja paljude uute ideedega.

Raadioülekandeks on tarvis teostada järgmised põhilised operatsioonid:



Joon. 213. Ühepoolse raadioside põhimõtteline skeem.

1. Tekitada kõrgsagedusega elektromagnetilisi võnkumisi.
2. Nende võnkumiste abil saata ruumi mingi signaal (kõne, muusika, kujutis).
3. Signaal vastu võtta.

Ühepoolse raadioside põhimõtteline skeem on kujutatud joonisel 213. Sellel joonisel koosneb saatejaam juhtimisseadmest *M*, saatjast *P* ja antennist A_1. Vastuvõtu-raadiojaam koosneb antennist A_2, vastuvõtjast *S* ja reproduktsiooniseadmest *R*.

Raadiosaate- ja vastuvõtujaama ehitusest ja töötamise põhimõttest arusaamiseks on tarvis eelkõige tutvuda füüsikaliste protsessidega, mis on raadiosaate ja vastuvõtu aluseks.

110. Võnkering. Elektromagnetilised võnkumised. Raadiotehniliste seadmete põhielemendiks on v õ n k e r i n g. Võnkeringiks nimetatakse elektrivoolu ringi, mis koosneb kondensaatorist *C* ja induktsioonpoolist *L* (joon. 214, *a*).

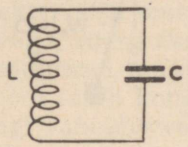
Pöörates ümberlüliti *P* kontaktile *a* (joon. 214, *b*), võib kondensaatorit laadida, s. o. anda temale teatud hulga elektrienergiat.

Kui nüüd katkestada kondensaatori ühendus patareiga, jääb tema plaatidele teatud elektrilaeng: ühele positiivne, teisele negatiivne.

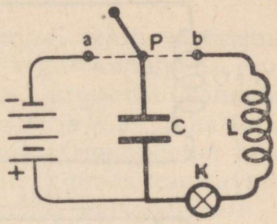
Ümberlüliti asetamisel seisu *b* hakkavad elektronid plaadilt, kus neid oli rohkem, liikuma plaadile, kus neid oli vähem, ja voolurin-

gis tekib vool, mida registreerib vooluringi lülitatud lambikese K süttimine.

Elektrivool, läbides induktsioonpooli, tekitab pooli sees ja ümber magnetvälja. Kondensaatori tühjendamisel toimub konden-

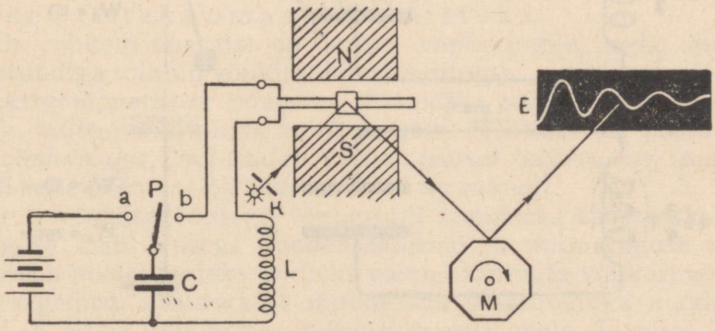


Joon. 214, *a*. Võnkering.



Joon. 214, *b*. Lihtsaim skeem elektromagnetiliste võngete tekitamiseks.

saatori elektrivälja energia üleminek pooli magnetvälja energiaks analoogiliselt sellega, kuidas toimub tasakaaluseisust väljaviidud pendli potentsiaalse energia üleminek kineetiliseks energiaks tema liikumisel tasakaaluasendisse. Meie teame, et pendel, jõudnud oma

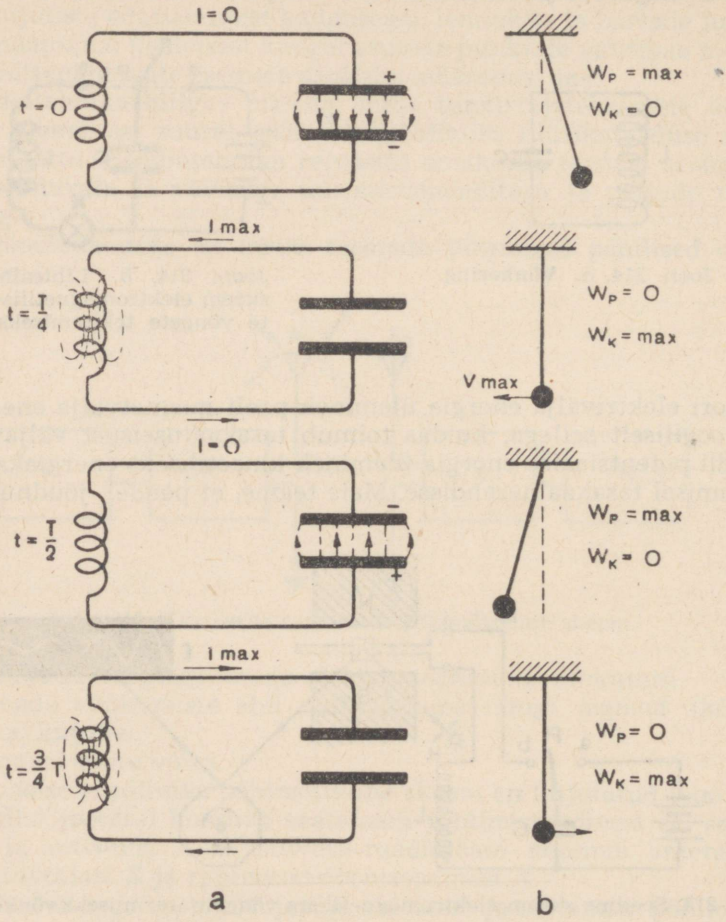


Joon. 215. Seadme skeem elektromagnetiliste võngete uurimiseks võnkeringis.

tasakaaluasendisse, ei jää sinna seisma, vaid jätkab liikumist inertsi mõjul. Selle liikumise tagajärjel toimub pendli kineetilise energia üleminek potentsiaalseks energiaks. Midagi taolist toimub võnkeringis elektromagnetiliste võnkumiste puhul.

Selleks et põhjalikumalt aru saada nähtustest, mis toimuvad võnkeringis pärast seda, kui kondensaator tühjenes ja kogu elektrivälja energia läks üle magnetvälja energiaks, teeme katse. Kasutame ostsillograafi ja koostame joonisel 215 kujutatud seadeldise, mille abil saame graafiku, mis kujutab voolu muutumise protsessi võnkeringis.

Ekraanil E saadud voolu muutumise graafik annab meile pildi võnkeringis toimunud protsessist. Graafikust on näha, et tühjenemisvool ei saavuta silmapilkselt oma maksimaalset väär-



Joon. 216. Skeem, mis illustreerib energia muundumise protsessi võnkeringis. Võrdluseks on kõrval toodud kineetilise ja potentsiaalse energia muundumise skeem pendli võnkumisel.

tust, vaid kasvab järk-järgult vastavalt sellele, kuidas kondensaator ise järk-järgult tühjeneb. Selle nähtuse põhjuseks on omainduktsiooni *EMJ* tekkimine võnkeringis, mis takistab voolu tugevuse igasugust muutmist antud vooluringis. Samuti omainduktsiooni olemasolu tõttu ei kao vool võnkeringis pärast oma maksimaalväärtuse saavutamist silmapilkselt, vaid väheneb järk-järgult, hoituna alal omainduktsiooni elektromotoorse jõu poolt (kooskõlas

Lenzi seadusega). See vool laebki kondensaatori plaate ümber nii, et nad omandavad esialgsetele vastupidised laengud.

Kondensaatori ümberlaadimise lõppedes on pooli magnetvälja energia muutunud elektrivälja energiaks, mis eksisteerib kondensaatori plaatide vahel, kusjuures aga selle välja suund on vastupidine esialgse välja suunaga.

Edasi, kondensaatori uuesti tühjenemisel tekib vastassuunaline vool. Elektrivälja energia hakkab järk-järgult kahanema, muutudes magnetvälja energiaks, mis omakorda järgneval kondensaatori ümberlaadimisel muutub uuesti elektrivälja energiaks jne.

Niimoodi läbib kondensaatorist ja induktsioonpoolist koosnevat vooluringi vahelduvvool. Pinge ja voolu tugevus muutuvad poolis perioodiliselt nii suuruselt kui ka suunalt. Perioodiliselt muutub ka elektrivälja tugevus kondensaatoris ja magnetvälja tugevus poolis.

Magnetvälja tugevuse ja elektrivälja tugevuse perioodilisi muutusi nimetatakse elektromagnetilisteks võngeteks.

Joonisel 216, *a* on kujutatud energia muundumise protsessid võnkeringis, joonisel 216, *b* on aga näidatud analoogilised nähtused energia muundumisest pendli võnkumisel.

111. Elektromagnetilised omavõnkumised. Periood ja sagedus. Eelmises paragrahvis käsitletud võnkumisi, mis tekivad võnkeringis, millele on antud mingi energiavaru, nimetatakse elektromagnetilisteks omavõnkumisteks.

Mida rohkem energiat on antud võnkeringile, seda suurema amplituudiga toimub võnkumine võnkeringis.

Elektromagnetiliste võngete perioodiks nimetatakse ajavahemikku, mille vältel pinge kondensaatori plaatidel või voolu tugevus võnkeringis, muutudes alates teatud väärtusest, saavutab uuesti selle väärtuse nii suuruselt kui ka suunalt.

Antud võnkesagedusega võnkeringi saamiseks kasutatakse mitmesuguse mahtuvusega kondensaatoreid ja mitmesuguse induktiivsusega poole. Selleks et oleks võimalik muuta võnkeringi omavõnkesagedust, kasutatakse muudetava mahtuvusega kondensaatoreid (§ 24) ja muudetava induktiivsusega poole. Joonisel 217 on kujutatud erineva induktiivsusega poole, mida kasutatakse raadiotehnikas.

Mida suurem on kondensaatori mahtuvus, seda pikema aja vältel ta tühjeneb; teisest küljest, mida suurem on pooli induktiivsus, seda aeglasemalt toimub voolu kasvamine vooluringis ja seda aeglasemalt tühjeneb kondensaator.

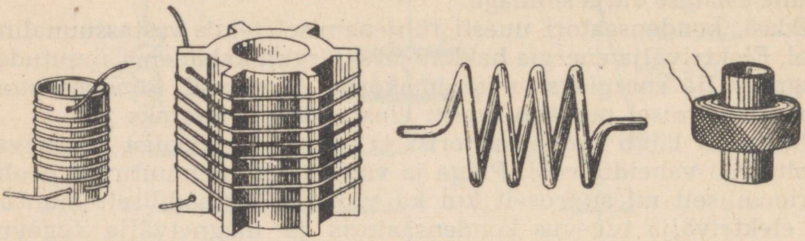
Omavõnkesageduse perioodi T sõltuvus võnkeringi mahtuvusest ja induktiivsusest on määratud Thomsoni (Kelvini) valemiga:

$$T = 2\pi\sqrt{LC},$$

kus L on induktiivsus henrides, C mahtuvus faradites ja T periood sekundites.

Võnkeperioodi pöördväärtust (f) nimetatakse *võnkesageduseks*, $f = \frac{1}{T}$. Võnkesagedust mõõdetakse hertsides (Hz), 1 Hz on üks võnge sekundis.

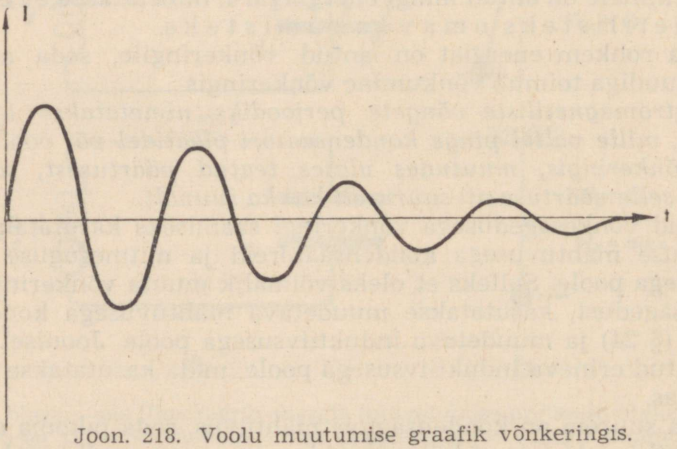
Kuna raadiotehnikas on tegemist väga suurte võnkesagedustega,



Joon. 217. Raadiotehnikas kasutatavate erineva induktiivsusega poolide tüüpe.

siis kasutatakse praktikas sageli 1000 korda suuremaid ühikuid — kilohertse (kHz) — ja samuti ka 10^6 korda suuremaid ühikuid — megahertse (MHz).

112. Sumbuv elektromagnetiline võnkumine. Võnkeringis kulgeva voolu kõverast (joon. 218) on näha, et voolu amplituud pide-

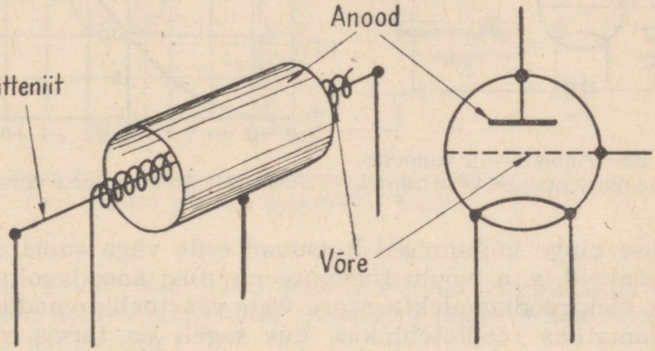


Joon. 218. Voolu muutumise graafik võnkeringis.

valt väheneb. See fakt viitab sellele, et võnkeringis ei muutu mitte kogu elektrivälja energia magnetvälja energiaks, vaid osa sellest kulutatakse pidevalt võnkeringi takistuse ületamiseks. Kui võnkeringile ei anta energiat juurde, siis lõpeb võnkumisprotsess temas praktiliselt väga kiiresti, nii nagu lõpeb pendli võnkumisprotsess, mis samuti kogu aeg kulutab temale, ükskord antud energiat mitmesuguste takistuste ületamiseks. Nii mehhaanilisi kui ka seda liiki elektrilisi võnkumisi nimetatakse *sumbuvateks võnku-*

misteks. Et võngete sumbumisprotsess toimuks aeglasemalt, on tarvis vähendada võnkeringis takistust, mis vähendab juhi soojendamiseks kuluvat energiahulka. On aga võimatu valmistada võnkeringi, milles omavõnked kestaksid kuitahes kaua, sest võnkeringi elementide takistust ei saa vähendada nullini. *Omavõnked võnkeringis on alati sumbuvad võnkumised.*

113. Kolme elektroodiga elektrontoru. Kaasaja raadiotehnikas kasutatakse peamiselt sumbumatuid elektromagnetilisi võnkeid, milliseid saadakse kolme elektroodiga elektrontoru abil. Seetõttu on vaja tutvuda selliste torude ehituse ja töötamise põhimõtetega.



Joon. 219. Kolme elektroodiga elektrontoru ja selle ehitus.

Joonisel 219 on näidatud kolme elektroodiga elektrontoru ehitus ja antud selle skemaatiline kujutus.

Selles torus on kütteniit, mida kuumutatakse eri küttepatarei abil, ümbritsetud metallist spiraaliga ja paigutatud metallist silindrisse. Klaaskolvis, kuhu on paigutatud kolm elektroodi, tekitatakse kõrge vaakuum. Kütteniiti ümbritsevat spiraali nimetatakse võreks, metallsilindrit — anoodiks, kütteniit on aga katoodiks nagu kahe elektroodiga elektrontoruski. Kütteniidi kaks otsa, võre ja anoodi otsad, on toodud läbi klaaskolvi välja ja ühendatakse vooluringi nelja jala abil.

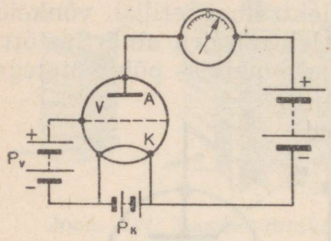
Missugust osa täidab võre elektrontorus?

Tekitades vastava patarei P_v abil võre ja kütteniidi vahel mingisuguse pinge (joon. 220), võib suurendada või vähendada anoodvoolu, jättes anoodpinge muutmatuks. Tõepoolest, kui võre potentsiaal on kõrgem kütteniidi potentsiaalist, siis tõmbab võre kütteniiti ümbritsevast elektronide pilvest elektrone enda poole. Need elektronid lähevad võre keerdude vahelt läbi ja jõuavad anoodile. Kui võre potentsiaal on madalam kütteniidi potentsiaalist, siis tõukab ta elektrone eemale, mille tagajärjel elektronide voog anoodile väheneb või isegi täielikult katkeb. Viimasel juhul öeldakse, et elektrontoru on «lukustatud».

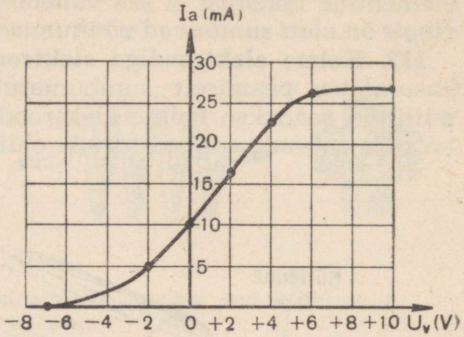
Joonisel 221 on näidatud elektrontoru võre tunnusjoon. Horisontaalteljele on kantud võre ja katoodi vahelise pinge väärtused, vertikaalteljele — voolu tugevus anoodvooluringis.

Selle tõttu, et võre asub katoodile väga lähedal, on võre mõju elektronide voole väga suur.

Väikesed võre ja kütteniidi



Joon. 220. Anoodvoolu tugevnemine ja nõrgenemine võre toimel.



Joon. 221. Elektrontoru võre tunnusjoon.

vahelise pinge kõikumised kutsuvad esile väga suuri elektronide voo võnkeid, s. o. voolu tugevuse muutusi anoodvooluringis. See kolme elektroodiga elektrontoru väga väärtuslik omadus teeb teda asendamatuks raadiotehnikas, kus sageli on tarvis võimendada õige nõrku elektrivõnkeid.

114. Sumbumatute elektromagnetiliste võngete saamine. Sumbumatute kõrgsageduslike võngete saamiseks, mida rakendatakse raadiosides, kasutatakse lampgeneraatorit. Lampgeneraatori ülesandeks on toiteallikast saadava alalisvoolu energia muutmine võnkeringis tekkivaks kõrgsageduslikuks vahelduvvoolu energiaks.

Sellise generaatori lihtsaim skeem on esitatud joonisel 222. Ta koosneb võnkeringist, elektrontorust ja toiteallikatest.

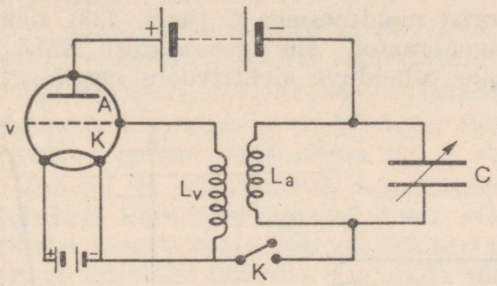
Kui pärast elektrontoru kütte sisselülitamist ja katoodi K kuumenemist vajaliku temperatuurini sulgeda võtme abil anoodvooluahel, siis läbib seda vool, mis laeb võnkeringi kondensaatori C. Viimane tühjeneb pooli L_a kaudu ja võnkeringis tekib võnkumine, mille sagedus on määratud võnkeringi mahtuvuse ja induktiivsuse suurusega.

Vahelduvvool, läbides pooli L_a, indutseerib võrepoolis L_v vahelduva EMJ, mille sagedus on võrdne võnkeringi võnkuva voolu sagedusega.

Kuna pooli L_v üks ots on ühendatud võrega ja teine ots lambi kütteniidiga, siis tekib lambis võre ja katoodi vahel sama sagedusega elektriväli, võre ja katoodi vahel aga vahelduvpinge. See vahelduvpinge tüürib anoodvoolu lambi vooluringis, kord suurendades, kord vähendades selle tugevust ühes rütmis võnkeringis tekkinud võnkumistega.

Vaatleme seda protsessi veidi detailsemalt.

Poolperioodi vältel on võre potentsiaal positiivne, lamp on «avatud» ja teda läbib anoodvool. Selle poolperioodi esimese poole jooksul, samal ajal kui kondensaatori *C* ülemisele plaadile koguneb negatiivne laeng, laeb anoodvool kondensaatorit, täiendades



Joon. 222. Lihtsaim sumbumatute elektromagnetiliste võngete generaatori skeem.

tema laengut. Kondensaatori tühjenemisel, mis toimub sama poolperioodi teisel poolel, suurendab anoodvool pooli läbivat kondensaatori tühjenemisvoolu.

Teisel poolperioodil on võre potentsiaal negatiivne, lamp «sulgub» ja anoodvool temas lõpeb. Kirjeldatud protsess kordub igal perioodil.

Sel viisil ühendab ja lahutab lamp generaatoris iga perioodi jooksul vajalikel hetkil patarei automaatselt võnkekontuurist, tagades selle täiendamist energiaga ja hoiab seega kontuuris alal s u m b u m a t u i d v õ n k u m i s i.

Graafiliselt kujutatakse sumbumatuid võnkumisi konstantse amplituudiga perioodiliselt muutuva kõvera abil.

Sumbumatuid võnkumisi tekitavas lampgeneraatoris toimuva energeetilise protsessi heaks analoogiaks on energia muundumised, mis toimuvad pendliga kellas. Pendli sumbumatuid võnkumisi hoiab alal energia juurdetulek vedrust või ülestõstetud vihist, elektronlambi ülesannet täidab aga kella ankurmehhanism, mis kaks korda perioodi vältel võimaldab täiendada võnkuva pendli energiat.

115. Sundvõnkumised. Resonants. Kujutleme, et me kõigutame pendlit, mõjudes temale perioodiliselt muutuva jõuga. Sel juhul pendel ei võngu iseseisvalt, vabalt, vaid perioodiliselt mõjuva välisjõu toimel. Selliseid pendli võnkeid nimetatakse s u n d v õ n g e t e k s (vt. I osa).

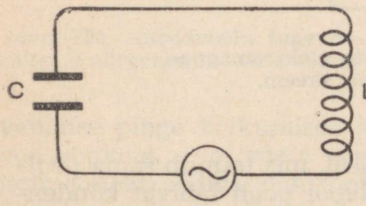
Pendli sundvõnkumised võivad toimuda sagedusega, mille määrab ainult välisjõu muutumise sagedus.

Sundvõnkumist võib hoida alal välisjõu mõjul nii, et pendli võnkeamplituud jääb konstantseks, s. o. võib saavutada sumbuma-

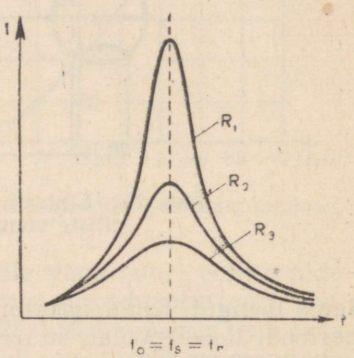
tuid sundvõnkumisi. Sellise võnkumise juures täiendatakse pidevalt pendli energiakadusid temale mõjuva konstantse amplituudiga välisjõu **töö arvel.**

Elektrilistes võnkeringides võivad samuti toimuda elektromagnetilised sundvõnked.

Kui mingis võnkeringis, mis koosneb poolist induktiivsusega *L* ja kondensaatorist mahtuvusega *C* (joon. 223), töötab kogu aeg vahelduvvoolugeneraator, siis generaatori *EMJ* kutsub selles võnkeringis esile vahelduva elektrivoolu sagedusega, mis vastab



Joon. 223. Võnkering koos sellesse lülitatud vahelduvvoolugeneraatoriga.



Joon. 224. Resonantskõverad.

generaatori *EMJ* võnkesagedusele. See vahelduvvool põhjustab elektromagnetiliste sundvõngete tekkimist võnkeringis, nende võnkesagedus ei lange üldiselt ühte kontuuri vabade võngete omasagedusega, mis on määratud valemiga:

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}.$$

Kui sellel välisel vahelduval elektromotoorsel jõul on konstantne amplituud, siis toimuvad ka sundvõnkumised võnkeringis konstantse amplituudiga, s. o. sumbumatu võnkumisena.

Nagu nägime, võib seega võnkeringis esineda kaht tüüpi võnkumisi: 1) omavõnkumised, mille sagedus sõltub võnkeringi induktiivsusest ja mahtuvusest, ja 2) sundvõnkumised, mille sagedus sõltub võnkeringile mõjuvast elektromotoorsest jõust ja võib olla meelevaldne.

Kui võnkeringi omavõnkesagedus tunduvalt erineb rakendatud pinge sagedusest, on võnkeringi takistus suur ja voolu tugevus temas on väike.

Kui võnkumise omasagedus langeb ühte sundvõnkumise sagedusega, siis saavutab sundvõnkumise amplituud suurima väärtuse.

See juhtum on eriti tähtis, seda nimetatakse *resonantsiks.*

Võnkeringi sagedust võib muuta kahel viisil: muutes vooluringi

mahtuvust või induktiivsust. Kui võnkeringi omavõnkesagedus läheneb rakendatud pinge sagedusele, näeme voolu tugevuse kasvu võnkeringis, võnkeringi takistus saab minimaalseks ja võrdub tema oomilise takistusega ning vool võnkeringis on kõige tugevam.

Seega on võnkeringis resonantsi tekkimise tingimuseks temale väljastpoolt antava vahelduvpinge sageduse ja võnkeringi omavõnkesageduse võrdsus.

Joonisel 224 on toodud resonantskõverate näiteid. Horisontaalteljele on märgitud võnkeringi muutuv omasagedus f_0 (väljastpoolt rakendatava pinge sagedus f_s on tavaliselt konstantne), vertikaalteljele on märgitud voolu tugevus võnkeringis. Resonantsi puhul ($f_0 = f_s = f_r$) voolu tugevus võnkeringis (s. o. sundvõnkumiste amplituud) on suurim, ta sõltub ainult toitepingest ja oomilisest takistusest. Sageduse kõrvalekaldumisel ühele või teisele poole resonantssagedusest langeb voolu tugevus võnkeringis kiiresti.

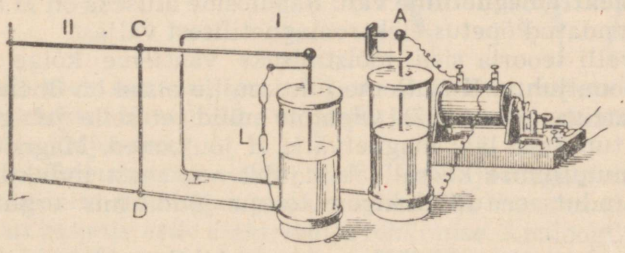
Mida väiksem on kontuuri takistus, s. o. mida väiksem on sumbuvus, seda tugevam on vool võnkeringis ja seda järsema tõusuga on resonantskõver. Sellist olukorda nimetatakse t e r a v a k s r e s o n a n t s i k s.

Terava resonantsiga võnkering on väga tundlik resonantssageduse kõikumise suhtes. Vastupidi, kui võnkeringil on suur sumbuvus (võnkeringi takistus on suur), on vool resonantsi ajal väike, resonantskõver lame ja kõvera tipp nüri. Joonisel 224 on näidatud kolm resonantskõverat takistuste puhul $R_1 < R_2 < R_3$.

Resonantsi kasutatakse laialdaselt raadiotehnikas. Seda nähtust kasutatakse näiteks raadiovastuvõtja häälestamisel mingile saatejaamale. Pöörates häälestusnuppu, muudame kondensaatori mahtuvust ja seega ka vastuvõtja võnkeringi omavõnkesagedust. Kui vastavate võnkeringide omavõnkesagedus ühtib sagedusega, millega töötab raadiosaatja, tekib resonants ja voolu tugevus vastuvõtja võnkeringides saavutab maksimaalväärtuse ning heli tugevus antud saatejaama vastuvõtul on maksimaalne. Selles seisabki vastuvõtja saatejaamale häälestamise põhimõte.

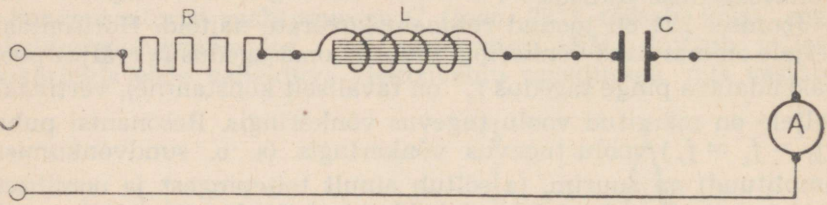
Kahe võnkekontuuri resonantsi võib jälgida katseliselt vastaval seadmel, mis on kujutatud joonisel 225.

Esimene võnkering koosneb leideni purgist, täisnurksest traataasast ja sädevahemikust. Sellel on teatud mahtuvus ja induktiivsus. Andes sädevahe-



Joon. 225. Lihtsaim seade resonantsi vaatlemiseks.

mikule A pinge, laetakse kondensaator ja teatud pinge juures kondensaatori plaatidel läbib sädevahemikku säde. Säde, mis kujutab endast elektrivoolu juhtivat sillakest, suleb võnkeringi. Selle tagajärjel tekivad võnkeringis sumbuvad võnkumised. Hetkel, kui säde kustub, lakkavad võnkumised ja toiteallikas laeb kondensaatori uuesti. Võnkeringis toimuvat võnkumisprotsessi võib antud juhul kujutleda üksikute, võnkeringi omavõnkesagedusega üksteisele pidevalt järgnevate sumbumata võngetena.



Joon. 226. Seadme skeem elektrilise resonantsi vaatlemiseks.

Teises võnkeringis on samuti leideni purk, mille mahtuvus on sama või veidi erinev esimese võnkeringi purgi mahtuvusest, ja samade mõõtmetega traataas, millel on nihutatav põikühendus *CD* võnkeringi induktiivsuse muutmiseks. Põikühenduse asukoha muutmisega otsitakse seisund, kus purgi sisemise ja välimise katte vahele ühendatud huumlambike *L* maksimaalselt helendub. Lambikese helendumine näitab, et pinge kondensaatori katetel on saavutanud maksimaalväärtuse. See toimub, kui teine võnkering on seatud resonantsi esimese võnkeringi sagedusega.

Elektromagnetiliste sundvõnkumistega ja resonantsinähtega ei puutu me kokku mitte ainult raadio-, vaid ka elektrotehnikas. Nii näiteks vahelduvvool mistahes vooluringis kujutab endast elektromagnetilisi sundvõnkumisi. Igal antud vahelduvvooluringil teatava induktiivsuse ja mahtuvusega on koos sellega ka omavõnkesagedus. Kui vooluringi omavõnkesagedus on võrdne vooluringi toitva generaatori *EMJ* sagedusega, siis saavutab vool selles vooluringis maksimumi. Selles seisnebki resonantsinähtus vahelduvvooluringis.

Seda nähtust võib vaadelda seadmel, mille skeem on esitatud joonisel 226. Sellel seadmel koosneb võnkering induktsioonpoolist *L* (transformaatori mähis) ja kondensaatorist *C*.

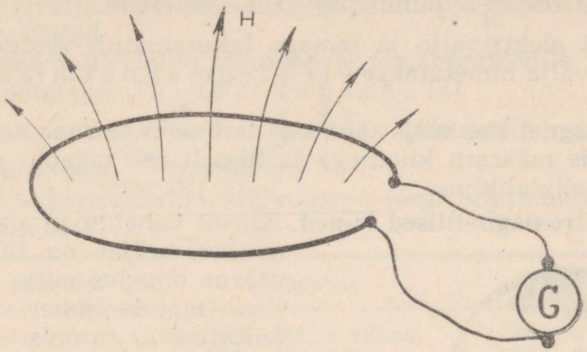
Takistus *R* on ühendatud vooluringi voolu tugevuse piiramiseks resonantsil, ampermeeter *A* registreerib voolu muutumist vooluringis. Pool induktiivsusega *L* ja kondensaator mahtuvusega *C* on lülitatud järjestikku. Muutes vooluringi induktiivsuse või mahtuvuse suurust, saavutatakse voolutugevuse maksimum vooluringis. Selle voolu tugevus resonantsil on määratud ainult vooluringi lülitatud takistusega *R*.

116. Elektromagnetiline väli. Raadioside aluseks on M a x w e l l i poolt arendatud õpetus elektromagnetilisest väljast.

Maxwelli teooria sisu mõistmiseks vaatleme kõige üldisemat induktsioonijuhtu. Kujutleme juhti, mille otsad on ühendatud galvanomeetriga (joon. 227). Oletame nüüd, et selle juhiga piiratud pinnast tungivad läbi magnetvälja *H* jõujooned. Magnetvälja igasuguse muutumise korral tekib juhis vastavalt induktsiooni seadustele indutseeritud elektromotoorne jõud, mis ergutab temas voolu.

Esialgsel vaatlemisel jääb mulje, et juhil on elektromagnetilises

induktsioonis kõige olulisem osa. Kuid see pole nii. Maxwell näitas, et juht ainult võimaldab teha kindlaks induktsiooninähtust. Selle nähtuse tõeline põhjus seisab aga selles, et ruumis, kus muutub magnetväli, tekib elektriväli.



Joon. 227. Magnetvälja muutumine kutsub esile elektrivälja tekkimise, mida saab avastada galvanomeetriga ühendatud juhtme abil.

James Clerk Maxwell (1831—1879) oli geniaalne inglise teadlane. Ta lõi elektromagnetilise välja teooria ja selle põhjal jõudis otsusele, et vahelduv elektri- ja magnetväli on tihedalt teineteisega seotud, moodustades ühtse elektromagnetilise välja, mis levib elektromagnetiliste lainete kujul valguse kiirusega. Tuginedes elektri-, magneti- ja valgusnähtuste sõltuvusele, töötas Maxwell välja valguse elektromagnetilise teooria ja ühendas seega üheks tervikuks seni eraldi seisnud füüsika alad: elektri, magnetismi ja optika.

Peale selle kuuluvad Maxwellile suured avastused füüsika teistel aladel, muuseas ka gaaside molekulaarkineetilise teooria alal.

Erinevalt elektrostaatilisest väljast, s. o. liikumatute laengute väljast, on elektrodünaamilise välja jõujooned suletud samuti nagu magnetvälja jõujooned.

Maxwell põhjendas teoreetiliselt, et elektri- ja magnetvälja vahel valitseb tihedaim side: *igasugune magnetvälja muutumine kutsub ümbritsevas ruumis esile elektrivälja tekkimise.* Analoogiliselt, *igasugune elektrivälja muutumine kutsub ümbritsevas ruumis esile magnetvälja tekkimise.*

Mida suurema kiirusega $\frac{\Delta E}{\Delta t}$ toimub elektrivälja tugevuse muutumine, seda tugevam on tekkinud magnetväli, mis on seotud elektriväljaga. Täpselt samuti tekib magnetvälja tugevuse suurema muutumiskiiruse $\frac{\Delta H}{\Delta t}$ puhul tugevam elektriväli.

Muutuvat elektrivälja ja temaga lahutamatult seotud muutuvat magnetvälja nimetatakse elektromagnetiliseks väljaks.

Elektromagnetilise välja tähtsaim iseärasus seisneb selles, et ta levib ruumis määratu kiirusega ja nimelt see tagabki raadioside teostamise võimalikkuse.

117. Elektromagnetilised lained. Kiirelt vahelduval elektromagnetilisel väljal on tähelepanuväärne omadus mitte jääda püsima traatide ümber, vaid levida ümbritsevas ruumis.

Heinrich Hertz (1857—1894) oli kuulus saksa füüsik. Ta tekitas esimesena elektromagnetilisi laineid, mille olemasolu teoreetiliselt ennustas Maxwell. Hertzi poolt teostatud elektromagnetiliste lainete omaduste uurimine näitas, et need lained alluvad samadele seadustele kui valguslainedki. Seega oli lõplikult tõestatud valguse elektromagnetiline teooria.

Kui ruumi mingis punktis tekkis kiirelt vahelduv elektriväli, siis ergutab see naaberpunktides magnetvälja, mis põhjustab omakorda elektrivälja tekkimise (kuna ta samuti vaheldub) jne.

Muutlikud elektri- ja magnetväljad haaravad ikka uusi ja uusi ruumi piirkondi, levides vaakuumis kiirusega 300 000 km/s, s. o. valguse levimise kiirusega.

Ruumis levival elektromagnetilisel väljal on teatav hulk energiat.

Perioodiliselt muutuva elektromagnetilise välja levimise protsess kujutab endast lainetusprotsessi, s. o. elektromagnetilisi laineid.

Elektromagnetiliste lainete allikaks võivad olla mitte ainult eriseadmed — saatjad, vaid ka elektri sädelahendused, näiteks äikeselahendused.

Teooria ja katsed näitavad, et elektrivälja tugevuse ja magnetvälja tugevuse vektorid elektromagnetilises laines on risti nii teineteisega kui ka levimissuunaga.

Joonisel 228 on kujutatud suunas *OZ* leviva elektromagnetilise laine elektrivälja tugevuse (*E*) ja magnetvälja tugevuse (*H*) muutumise graafikud.

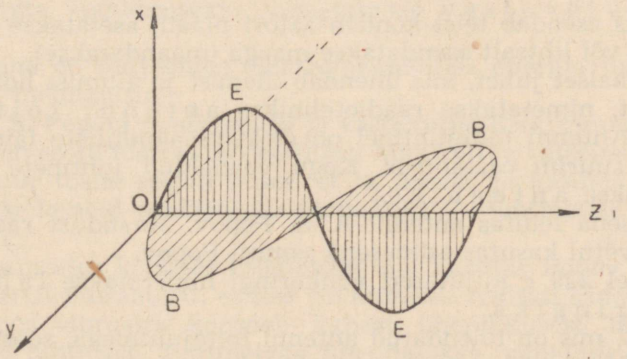
Vahemaad, mille laine läbib ühele võnkeperioodile vastava aja vältel, nimetatakse lainepikkuseks (λ).

Järelikult, $\lambda = cT$ ehk $\lambda = \frac{c}{f}$, kus c on elektromagnetiliste lainete levimiskiirus.

Kehtiva rahvusvahelise kokkuleppe järgi liigitatakse raadiolained järgmiselt:

Laine nimetus	Sagedus	Lainepikkus
Pikad lained	100 kHz ja vähem	3000 m ja enam
Kesklained	100—1500 kHz	3000—200 m
Vahelmised lained	1500—6000 „	200—50 m
Lühilained	6—30 MHz	50—10 m
	Ultralühilained:	
Meetrilised	30—300 MHz	10—1 m
Detsimeetrilised	300—3000 „	1—0,1 m
Sentimeetrilised	3000—30000 „	0,1—0,01 m

Raadioamatööride praktikas nimetatakse laineid 2000 kuni 750 m pikkadeks, 750 kuni 200 m kesk-, 50 kuni 10 m lühi- ja lühemaid kui 10 m ultralühilaineteks.

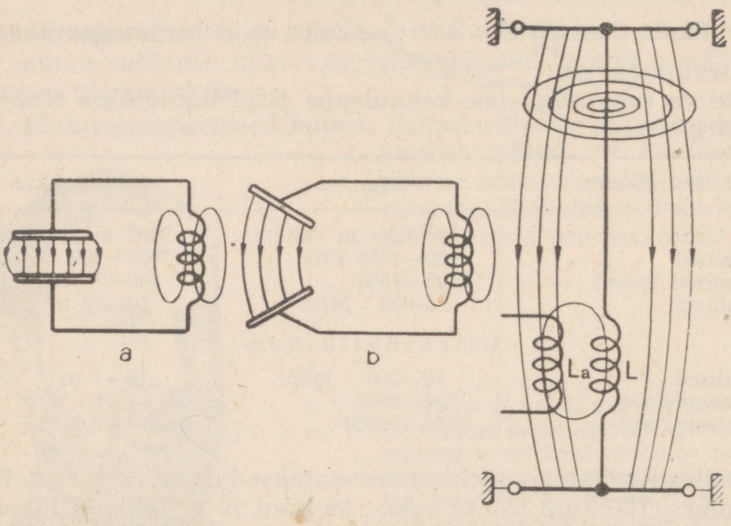


Joon. 228. Elektromagnetilise laine elektri- ja magnetvälja muutumise graafikud.

118. Elektromagnetiliste lainete kiirgumine ja vastuvõtt. Võnkeringis (joon. 229, *a*, *b*), mis koosneb poolist ja kondensaatorist, on tekkiv vahelduv magnetväli koondunud peamiselt pooli, elektri-

väli aga kondensaatori plaatide vahele. Niisugune võnkering, mida nimetatakse kinniseks võnkeringiks, peaaegu üldse ei kiirga ruumi elektromagnetilisi laineid.

Lainete väljakiirgamist võnkeringist võib teostada kondensaatori plaatide eemaldamisega teineteisest, nagu on näidatud joonisel 229, *c*. Sellel joonisel on kondensaatori ülemine plaat asendatud juhtmega, mis asub võimalikult kõrgel maapinnast. Alumine



Joon. 229. Kinniste võnkekontuuride (*a*, *b*) üleminek lahtisteks (*c*).

juhe, mis asendab teist kondensaatori plaati, asetatakse õige maa lähedale või lihtsalt asendatakse maaga (maandatakse).

Vertikaalset juhet, mis ühendab ülemist ja alumist horisontaalset juhet, nimetatakse raadiotehnikas antenni toitejuhtmeks. Antenni toitejuhtmel on elektromagnetiliste lainete kiirgamisel suurim osatähtsus. Kogu vaadeldud juhtmete süsteemi nimetatakse antenniks.

Esimesena leiutas antenni A. S. Popov. Maandust raadiosaatel ja vastuvõtul kasutas esimesena samuti Popov.

Joonisel 229, *c* kujutatud võnkeringi nimetatakse lahtiseks võnkeringiks.

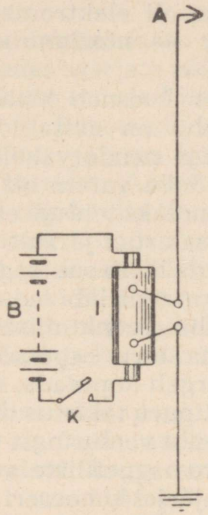
Pool *L*, mis on ühendatud antenni toitejuhtmega, seostab toitejuhtme kõrgsagedusgeneraatori induktsioonpooliga L_a. See võimaldab pideva elektromagnetilise võnkumise säilimist lahtises võnkeringis. Nende võngete maksimaalse amplituudi saavutamiseks peab antenn olema resonantsis elektromagnetiliste võnkumiste generaatoriga.

Antennist kiirgunud elektromagnetilised lained levivad igas suunas. Kui elektromagnetilised lained kohtavad oma teel mingisugu-

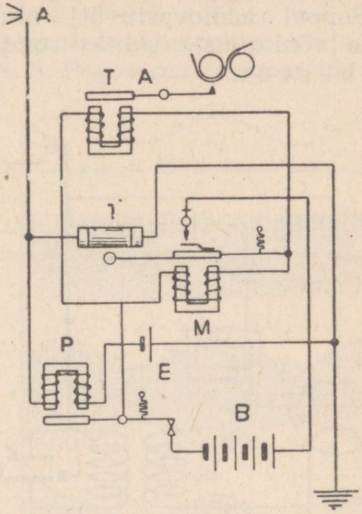
seid juhtmeid, siis indutseerivad nad ka neis kiiresti muutuvaid voole, mille sagedus ja kuju on samasugune kui neid põhjustanud elektromagnetilisel väljal.

Selle juures osa elektromagnetilise välja energiast muundub juhtides tekkivate induktsioonvoolude energiaks.

Juhtmeid, mida spetsiaalselt kasutatakse elektromagnetiliste lai-



Joon. 230. A. S. Popovi raadiosaatja.



Joon. 231. A. S. Popovi raadiovastuvõtja.

nete energia «püüdmiseks», nimetatakse vastuvõtuantenniks.

Niisugune on üldjoontes elektromagnetilise energia juhtmeteta ülekande mehhanism.

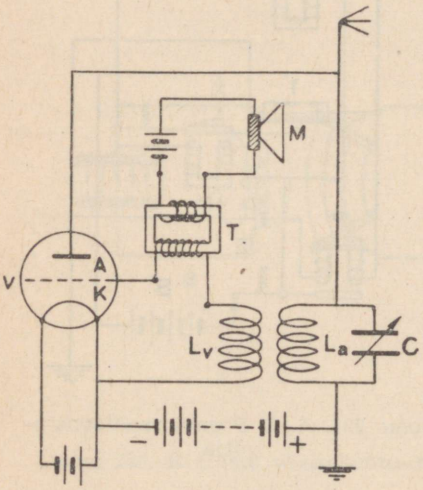
119. A. S. Popovi raadiosaatja ja vastuvõtja. Elektromagnetiliste lainete olemasolu tõestas teoreetiliselt Maxwell ja katseliselt Hertz. Popovi suur teene seisab selles, et ta tekitas ja kasutas elektromagnetilisi laineid praktiliseks otstarbeks — juhtmeteta telegrafeerimiseks.

Oma esimestes katsetes raadioside alal kasutas Popov saatjana lihtsat Hertzi vibraatorit, milles võnkumised tekitati sädelahendusega. Hertzi vibraator koosneb kahest ühepikkusest lähestikku asetsevast juhtmest. Juhtmetega ühendatakse vahelduva kõrgepinge allikas. Kui pinge juhtmete vahel saavutab suuruse, mille juures tekib sädelahendus, tekivad vibraatoris võnkumised. Seejuures kiirguvad ümbritsevasse ruumi elektromagnetilised lained.

Hiljem Popov asendas Hertzi vibraatori antenni ja maaga, mille vahel asetses sädevahemik.

Sellise saatja skeem on esitatud joonisel 230. Siin on *I* kõrgepinge vahelduvvoolu allikas (näiteks Ruhmkorffi induktor), mida toidab patarei *B*. Võtme *K* allavajutamisel tekib sädevahemikus säde, mille tagajärjel antennist *A* kiirguvad välja elektromagnetilised lained. Need lained, jõudes vastuvõtujaama (joon. 231) antennini *A*, tekitavad antennist, koheererist *T* ja maast koosnevas vooluringis elektromagnetilisi võnkumisi.

Popovi raadiovastuvõtja olulisemaks osaks oli elektromagnetiliste võnkumiste suhtes tundlik indikaator — nõndanimetatud koheerer.



Joon. 232. Seadme skeem helivõnkumiste muutmiseks elektromagnetilisteks võnkumisteks.

Koheerer koosneb klaastorukesest, kuhu on asetatud kaks elektroodi ja nende vahele metallipuru. Juba varem oli uurimistega kindlaks tehtud, et metallipuru takistus järsult väheneb, kui teda läbib suursagedusvool, s. t. kui teda läbivad elektromagnetilised võnkumised. Kui pärast seda toru raputada või temale kergelt koputada, suureneb metallipuru takistus uuesti.

Kui antenni vooluringis tekkinud elektromagnetiliste võnkumiste tagajärjel koheereri takistus väheneb, siis tugevneb vool, mis tuleb elemendist *E* läbi koheereri ja elektromagneti mähise *P*. Selle tagajärjel tõmbub elektromagneti *P* ankur ligi ja suleb tugeva patarei *B* vooluringi. See patarei toidab paralleelselt ühendatud telegraafiaparaati *TA* ja elektromagnetit *M*. Elektromagneti *M* ülesandeks on raputada koheererit *T* ja katkestada patarei *B* vooluring. Telegraafiaparaadi lindile tekib kas joon või punkt, vastavalt sellele, kui kauaks ühendab võti *K* saatejaama (joon. 230) vooluringi.

Pole raske näha, et raudsüdamiku ja kontaktiga elektromagnet *P* kujutab endast nõrkade voolude juures töötavat elektromagnetilist releed.

Popovi edasiseks täiustuseks oli antenni häälestamine teatavale kindlale sagedusele.

1897. a. teostas A. S. Popov rea katseid Balti mere laevastiku laevadel raadiosignaalide üleandmise alal.

1899. a. talvel kasutati raadiot karile jooksnud soomuslaeva «Kindraladmiral Apraksin» päästetöödel. A. S. Popov koos oma abilistega P. N. Rõbkini ja D. S. Troitskiga pidasid päästetööde

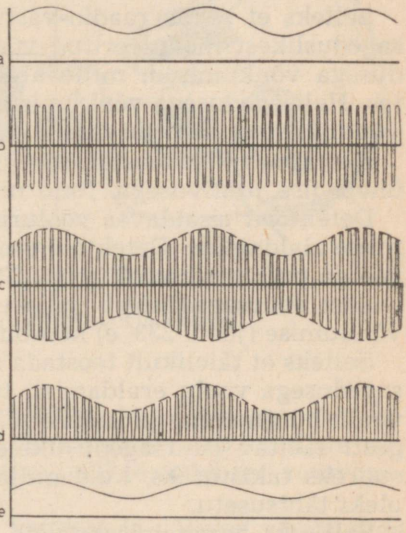
ajal sidet Suursaare, mille lähedal soomuslaev istus karil, ja saarest 50 km kaugusel merekaldal asuva Kotka vahel. Samal ajal kasutati raadiot kalurite päästmiseks, keda jää oli viinud ulgumerele.

See oli raadio esimene praktiline kasutamine. Samal ajal tegi P. N. Rõbkin väga tähtsa avastuse — vastuvõtu kuulmise järgi, telefonitoru abil. Selline avastus võimaldas suurendada raadioside ulatust.

Parandades saate- ja vastuvõtuaparaatide konstruktsiooni ja suurendades saatjate võimsust, tõstis A. S. Popov raadiosignaalide saateulatuse sadade kilomeetriteni.

A. S. Popov oli suurepärane teadlane ja oma kodumaa tuline patrioot. Ameerika kapitalistid tegid talle korduvalt ettepanekuid müüa oma leiutis neile ja asuda elama Ameerikasse. A. S. Popov lükkas otsustavalt tagasi sellised ettepanekud ja kirjutas neile vastuseks:

«Mina olen vene inimene ja mul on õigus anda kõik oma teadmised, kogu oma töö, kõik oma saavutused ainult oma kodumaale... Ja kui mitte kaasaegsed, siis võib-olla meie järeltulevad põlved mõistavad, kui suur on minu kiindumus kodumaasse ja kui õnnelik ma olen, et mitte piiri taga, vaid Venemaal leiutati uus sidevahend.»



Joon. 233. Võnkumiste moduleerimine ja detekteerimine.

120. Moduleeritud võnked. Helide ülekandmiseks raadio teel on eelkõige tarvis helivõngete abil esile kutsuda neile vastavaid antennist väljakiirgavate elektromagnetiliste lainete muudatusi. Selleks ergutatakse mikrofoni vooluringis elektrivoolu võnkumisi, mis täpselt vastavad mikrofonile mõjuva heli võnkumisele. Elektrivoolu võnked mikrofoni vooluringis indutseerivad sellesse lülitatud transformaatori T sekundaarmähiste otstel vahelduvpinge.

Transformaatori sekundaarmähis ühendatakse suursagedusgeneraatori võrevooluringi v (joon. 232). Seega antakse elektrontoru võrele helisagedusega vahelduvpinge (joon. 233, *a*). Seetõttu muutub suursageduslike võnkumiste (joon. 233, *b*) amplituud generaatori võnkeringis vastavalt elektrontoru võrepinge muutustele, mis toimuvad helivõnkesagedusega (joon. 233, *c*).

Suursagedusvõnkumisi, kus toimuvad ühed või teised muudatused, mis vastavad ülekantavaile helidele või mingisugustele muu-

dele signaalidele, nimetatakse moduleeritud võnkumisteks, nende muudatuste protsessi ennast aga moduleerimiseks.

121. Detekteerimine. Detektorvastuvõtja. Raadiovastuvõtja koosneb põhiliselt järgmistest elementidest: 1) antennist, 2) võnkeringist, 3) detekteerivast seadmest ja 4) telefonist.

Tänu sellele, et raadiosaatja antenni läbivad suursagedusvoolud on moduleeritud, on ka antennist kiirguvad elektromagnetilised lained moduleeritud.

Samasugused moduleeritud võnkumised tekivad ka raadiovastuvõtja antennides.

Selleks et saada raadio-vastuvõtuseadmes heli, on tarvis suursageduslikest moduleeritud võnkumistest eraldada need helisagedusega võnkumised, mille abil teostati modulatsioon raadiosaatjas. Helisagedusega võnkumiste eraldamise protsessi moduleeritud võnkumistest nimetatakse detekteerimiseks.

Detekteerimist teostatakse juhtide või eriseadmete abil, mis on ühepoolse juhtivusega. Neid nimetatakse detektoriteks.

Detektorit sisaldavas vooluringis toimub moduleeritud võnkumiste alaldamine. Detektori vooluringi läbiv vool on muutliku suurusega pulseeruv vool (joon. 233, *d*). See pulseeruv vool kujutab endast suursagedusliku pulseeruva lainetuse ja helisagedusega võnkumise (joon. 233, *e*) kombinatsiooni.

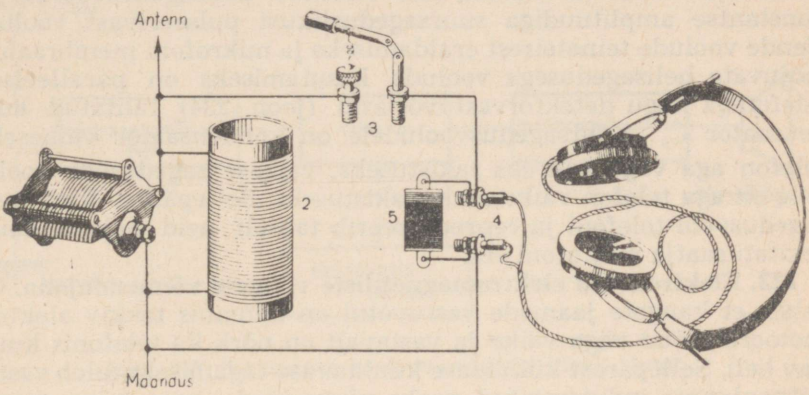
Selleks et täielikult teostada suursagedusliku pulseeruva ja helisagedusega voolu eraldamist, tuleb detektori vooluringis läbi viia voolu hargnemine ja nimelt niisugune, et üks harudest oleks kergesti läbitav suursageduslikele vooludele, teine aga oleks neile suureks takistuseks, kuid mille takistus helisagedusega vooludele oleks tähtsusetu.

Selliseks hargnemiseks võib näiteks kasutada paralleelselt lülitatud kondensaatorit ja telefoni. Kondensaatorit läbivad suursageduslikud voolud, läbi telefonimähise läheb peamiselt helisagedusega vool. Seega tekitatakse telefonis uuesti sama sagedusega helivõnked, mida kasutati suursageduslike võnkumiste moduleerimisel raadiosaatjas.

Lihtsaimate detektoritena kasutatakse kristall- ehk kontaktdetektoreid, milledes detektoriks on kontakt ühepoolse juhtivusega kristalli ja metalli vahel või kontakt kahe kristalli vahel.

Joonisel 234 on kujutatud detektorvastuvõtja näitlik skeem. Sellel skeemil on toodud vastuvõtu-võnkering, mis koosneb võnkeringi induktsioonpoolist ja muutliku mahtuvusega kondensaatorist. Vastuvõtu-võnkering on lülitatud antenni vooluringi. Muutliku mahtuvusega kondensaatori abil teostatakse võnkeringi häälestus vastuvõetava raadiojaama sagedusele. Võnkeringiga on ühendatud detektori vooluring, mis koosneb paralleelselt lülitatud kondensaatorist ja telefonist. Vastuvõtuseadme detektori vooluringis tekkivad moduleeritud suursageduslikud võnkumised alaldatakse nii, nagu seda eespool seletati, aga hargnemispunktis (telefon-konden-

saator) toimub helisagedusega voolude ja suursageduslike võnkumiste lahutamine. Telefoni membraan tekitab helisagedusega voolude mõjul sellised helivõnked, mis panid võnkuma saatejaama mikrofoni membraani.



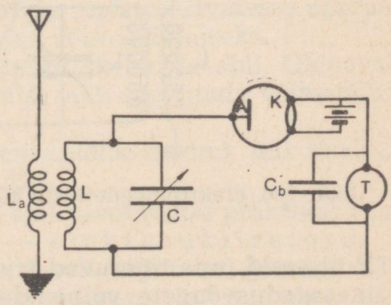
Joon. 234. Lihtsaima detektorvastuvõtja skeem.

Seega kasutatakse detektorvastuvõtjaid seal, kus pole vooluallikaid. Need vastuvõtjad töötavad ainult elektromagnetiliste lainete energia arvel. See energia muundatakse antennis suursageduslike voolude energiaks.

Detektorvastuvõtjad ei võimalda kaugete ja väikese võimsusega saatejaamade vastuvõtmist, nad ei kõlba ka valjuhääldajate tööle rakendamiseks. Tunduvalt täiuslikumad ja võimsamad on elektrontoru- ehk lampvastuvõtjad, milles detekteerimist teostatakse elektrontoru abil.

Tänapäeva raadiotehnika kogu määratu võimsus baseerub elektrontorude kasutamisel.

122. Lihtsaim lampvastuvõtja. Lihtsaima lampvastuvõtja skeem on kujutatud joonisel 235. Sellel skeemil on antenn induktiivselt pooli L_a kaudu sidestatud võnkeringiga, mis koosneb poolist L ja muudetava mahtuvusega kondensaatorist C. Võnkering on ühendatud kahe elektroodiga elektrontoruga (dioodiga).



Joon. 235. Lihtsaima lampvastuvõtja skeem.

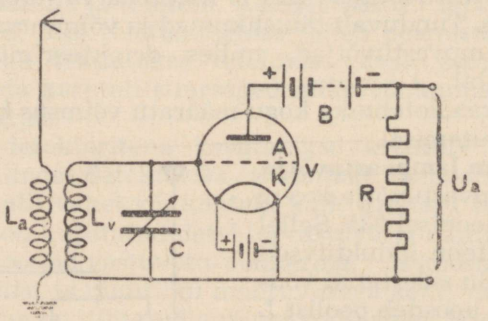
Antenni tuleva elektromagnetilise laine mõjul tekib selles moduleeritud suursageduslik

vool, mille sagedus võrdub võnkesagedusega selles laines. Tänu pooli L_a induktiivsele sidestusele võnkeringi pooliga L, tekib viimases samasugune suursageduslik moduleeritud vool, detektori ja elektrontoru vooluringi läbib aga toru ühepoolse juhtivuse tõttu pulseeriv muutliku suurusega vool.

Pulseeriv vool on liitvool, mis koosneb helisagedusvoolust ja konstantse amplituudiga suursageduslikust pulseerivast voolust. Nende voolude teineteisest eraldamiseks ja mikrofoni membraanile mõjuvate helisagedusega voolude kasutamiseks on paralleelselt telefoniga nagu detektorvastuvõtjaski (joon. 234) lülitatud kondensaator C_b. Suursagedusvooludele on kondensaator väikeseks, telefon aga väga suureks takistuseks, väikese sagedusega vooludele on aga telefon väiksemaks takistuseks. Sellepärast läbib helisagedusvool telefoni ja reprodutseerib täpselt neid helisid, mida tekitati saatja mikrofoni ees.

123. Elektrontoru elektromagnetiliste võngete võimendajana. On selge, et kaugete jaamade vastuvõtul on antennis tekkiv elektromotoorne jõud väga väike ja vastavalt on nõrk ka telefonis kuuldav heli. Sellepärast küllaldase kuuldavuse tagamiseks tuleb vastuvõtuantennis indutseeritud voolu võimendada enne tema detekteerimist, ja kui vastuvõtja töötab valjuhääldajaga, võimendada ka helisagedusvoolu. Seega võimendatakse algul suursagedusvõnkeid, pärast aga väikesagedusvõnkeid. Vastavalt sellele nimetatakse ka võimendajaid: esimesi suursagedusvõimendajateks, teisi aga väikesagedusvõimendajateks. Tuleb rõhutada, et voolu suurenemine toimub kohaliku vooluallika energia arvel, kuna saabunud signaal ainult tüürib selle vooluallika tööd.

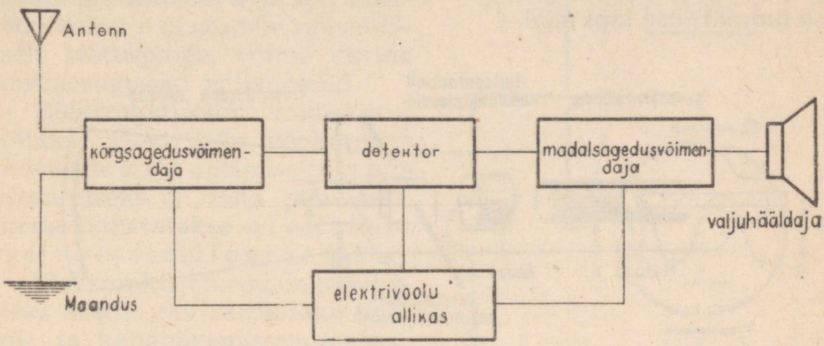
Elektromagnetilisi võnkeid saab võimendada kolme elektroodiga elektrontoru (trioodi) abil.



Joon. 236. Elektromagnetiliste võnkumiste võimendamine trioodi abil.

Protsessid, mis toimuvad trioodis, on nii suursagedus- kui ka väikesagedusvõngete võimendamise puhul põhiliselt ühesugused. Ühe elektrontoruga ehk üheastmelise võimendaja skeem on esitatud joonisel 236.

Selles lülituses sidestatakse avatud võnkering L_a pooli L kaudu induktiivselt trioodi võrega v. Elektromagnetiliste võngete tekkimisel vastuvõtu-võnkeringis muutub pinge võre ja katoodi vahel («võrepinge»). Kuna võre on asetatud katoodile tunduvalt



Joon. 237. Tänapäeva raadiovastuvõtja plokk-skeem.

lähemale kui anood, siis isegi väga väikesed võrepinge muutused põhjustavad anoodvoolu tunduvaid muutusi. Seega kutsuvad nõrgad võnkeringi võnkumised esile suuri anoodvoolu kõikumisi toru anoodvooluringis. Energiaallikaks toru anoodvooluringis on patarei B. Antennist võrele juhitav vool ainult reguleerib patarei energia kulutamist toru anoodvooluringis. Seega töötab toru käesoleval juhul releena, mida juhitakse saatejaamast.

Toru anoodvooluringi on lülitatud takistus R. Kuni trioodi anoodvool on konstantne, on takistuse R otstel teatud kindla suurusega pinge. Kui aga anoodvoolu tugevus muutub, siis muutub koos sellega ka pinge takistuse otstel. Seega on harul takistusega R vahelduvpinge, mis muutub samuti kui võrele juhitav pinge.

Takistusel R saadud vahelduvpinge U_a võib olla suurem kui võrele juhitud pinge. Niimoodi võimendab toru temasse juhitavat vahelduvpinget. Pinget U_a võib juhtida registreerivatesse aparaatidesse või teise toru võrele edasiseks võimendamiseks.

Võimendamist võib teostada ka teiste skeemide abil. Olenevalt elektrontoru tüübist ja lülitusskeemist võib saavutada võimendust sadu kordi.

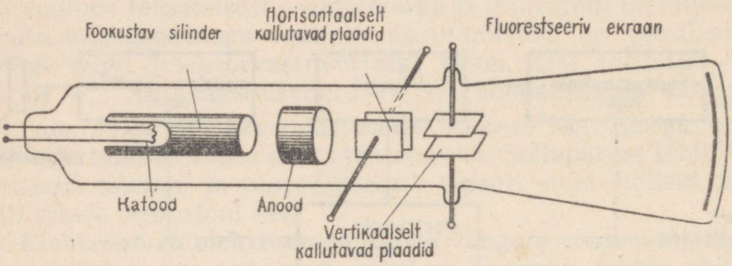
Kaasaegse vastuvõtja täielik skeem (plokk-skeem), mis sisaldab kõiki elemente, on esitatud joonisel 237.

124. Elektronkiiretoru. Käesoleval ajal kasutatakse praktikas väga laialdaselt eriliiki elektronseadist — *elektronkiiretoru*.

Elektronkiiretoru, mis on skemaatiliselt kujutatud joonisel 238, koosneb õhust tühjaks pumbatud (hõrenduseni 10^{-6} mm elavhõbedasammast) klaaskolvist ja reast elektroodidest.

Elektronide allikaks selles torus on voolu poolt köetav katood.

Katoodi ja anoodi vahel tekitatakse mitmesaja või mitme tuhande voldine pinge. Katoodist väljapaiskuvad elektronid saavad anoodi ja katoodi vahelises elektriväljas kiirenduse ja läbivad anoodil oleva pilu kitsa kimbuna. See elektronide kimp, sattudes spetsiaalsele ekraanile, kutsub põrkekohas esile ekraani helendumise väikese ümmarguse täpi näol.



Joon. 238. Elektronkiiretoru ehitus.

Kogu seadist, mis koosneb hõõgkatoodist ja anoodist, nimetatakse elektronprožektoriks ehk elektronkahuriks.

Elektriliste protsesside jälgimiseks toru ekraanil juhitakse kitsas elektronide kimp läbi väikeste kondensaatorite plaatide vahelt, mida nimetatakse kallutusplaatideks.

Kui ühele kondensaatorile anda alalispinge, tekib kondensaatori plaatide vahel järelikult elektriväli ja seda välja läbiv elektronkiir kaldub kõrvale suunas, mis on vastupidine elektrivälja suunale.

Seejuures liigub valguslaik ekraanil teise kohta, kusjuures nihke suurus on võrdeline rakendatud pingega.

Kui aga vahelduvpinge rakendada kondensaatori vertikaalselt kallutavatele plaatidele, siis hakkab valguslaik võnkuma piki vertikaaljoont. Nende võnkumiste amplituud on võrdeline rakendatud pinge amplituudiga.

Selleks et võnkumiste kuju nähtavaks teha, tuleb horisontaalselt kallutavate plaatide paarile rakendada niisugune vahelduvpinge, mis ühtlaselt suureneb kuni teatava väärtuseni ja seejärel väga kiiresti langeb nullini. Pärast seda pinge muutumise protsess kordub. Sellist pinget nimetatakse laotuspingeks.

Laotuspinge sunnib elektronkiirt ja koos sellega valguslaiku ekraanil ühtlaselt nihkuma horisontaalsuunas ja pärast praktiliselt silmapilkselt tagasi pöörduma algseisu. Selle protsessi kordumine annabki võnkumiste laotuse aja järgi, mis selgitab uuritavate elektriliste võnkumiste kuju, kuna valguslaigu resultantliikumine ekraanil kujutab endast uuritava pinge muutumist sõltuvalt ajast.

Joonisel 239 on kujutatud plaatide *AB* vahel vahelduvvoolu pinge kõver, mis on saadud elektronkiiretoru abil.

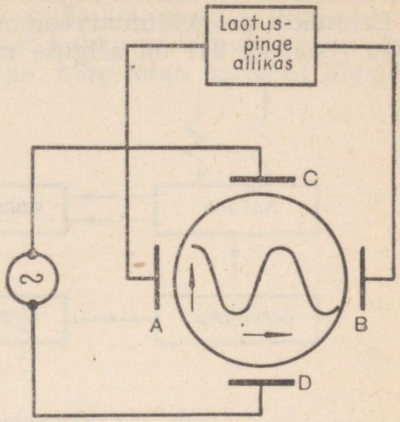
Elektronkiire praktiliselt inertsivaba liikumine võimaldab elekt-

ronkiiretorusid kasutada väga kiiresti kulgevate protsesside jälgimiseks ja pildistamiseks. Sellel võimalusel on määratu suur tähtsus raadioalaste uurimuste teostamisel.

Rakendades elektronkiiretoru vertikaalseile plaatidele helisagedusega muutuva pinge, horisontaalseile plaatidele aga endiselt laotuspinge, võime uurida mitmesuguseid helivõnkeid.

Elektronkiiretoru, mida kasutatakse elektriliste võnkumiste kõverate kuju uurimiseks ja pildistamiseks, on riista põhiosaks, mida nimetatakse elektronkiire-ostsillograafiks.

Elektronkiiretorud on põhilisteks seadisteks raadiolokatsiooni- ja kaugnägemisseadmetes.



Joon. 239. Vahelduvvoolu pingekõver, mis on saadud elektronkiiretoru ekraanil.

125. Raadiolokatsioon.[1] *Raadiolokatsiooniks nimetatakse mitmesuguste esemete avastamist ja nende kauguse mõõtmist raadiolainete abil.*

Raadiolokatsiooni aluseks on ultralühilainete peegeldumine esemetelt (raadiokaja), mis on analoogiline helilainete peegeldumisega (helikajaga) (joon. 241).

On olemas keerulised antennid (raadioprožektorid), mis on võimelised kiirgama ultralühilaineid kitsa kimbu — raadiokiire näol.

Oletame, et raadiojaam saadab ruumi raadiokiire. Selle raadiokiire suunda võib «raadioprožektorit» pöörates muuta. Kohates oma teel näiteks lennukit, peegeldub raadiokiir sellelt osaliselt ja pöördub tagasi (joon. 241).

Raadiokiirt ei saadeta välja pidevalt, vaid väga lühikeste ajavahemike vältel, mis vastavad sekundi miljondikele, kusjuures vaheajad (raadiosaate puudumine) üksikute signaalide vahel on umbes sada korda pikemad kui signaal. Selle tõttu jõuab raadiosignaal liikuda vaheaja vältel lennukini ja tagasi.

Mõõtes signaali liikumise aja ja teades, et ta liigub õhus kiirusega 299 820 km/s, võib määrata kauguse lennukini.

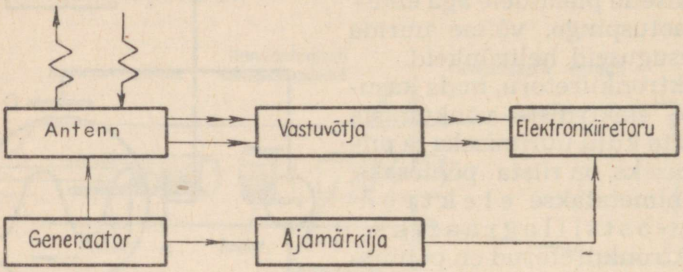
Joonisel 240 on kujutatud raadiolokaatori plokk-süsteem. Tema peamisteks osadeks on impulssgeneraator, suundantenn, vastuvõtja, elektronkiiretoru ja niinimetatud ajamärkija, mis juhib elektronkiirt üle elektronkiiretoru ekraani. Elektronkiiretoru ekraanil tekib horisontaalne helenduv joon (joon. 242).

Raadiosignaali väljasaatmise hetkel hakkab ajamärkija juhtima

[1] Väljend raadiolokatsioon on tuletatud ladinakeelsetest sõnadest *radio* — kiirgan ja *lokus* — koht.

elektronkiirt mööda ekraani. Raadiosignaal läheb antenni, kiirgub ruumi ja samal ajal mõjutab vastuvõtjat, tekitades elektronkiiretoru ekraanil nulljaotuse kohal elektronkiire kõrvalekaldumise vertikaalsuunas, mis on kujutatud joonisel 242.

Lennukilt peegeldunud raadiosignaal võetakse vastu sama antenniga (joonisel 241 on selguse mõttes kujutatud kaks antenni —

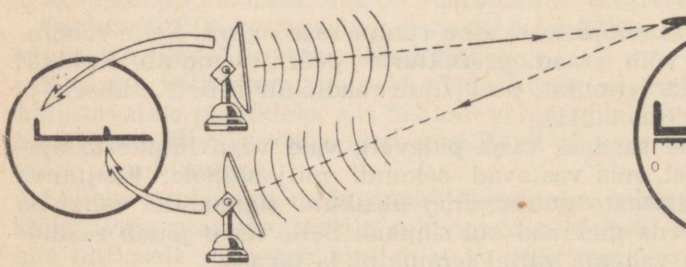


Joon. 240. Raadiolokaatori plokk-skeem.

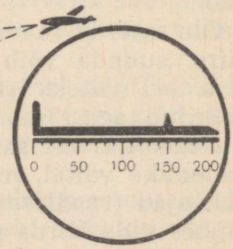
saate- ja vastuvõtuantenn), see signaal läbib vastuvõtja ja annab elektronkiiretoru ekraanil elektronkiire vertikaalse kõrvalekaldumise mingisugusel kaugusel esimesest kõrvalekaldumisest.

Teades kiire liikumise aega horisontaalsuunas, võib kauguse vertikaalsete kõrvalekaldumiste vahel gradueerida otse kilomeetrites (joon. 242).

Suund, millises asub avastatav objekt, määratakse raadiolokaa-



Joon. 241.
Raadiolokaatori töötamise skeem.



Joon. 242.
Raadiolokaatori skaala.

tori antenni asendi järgi, mille juures elektronkiiretoru ekraanile ilmub peegeldunud raadiosignaal.

Tänapäeva raadiolokatsioonijaamad (neid nimetatakse sageli «raadiolokaatoreiks») võimaldavad avastada lennukeid mitmesaja kilomeetri kauguselt ja mõõta kaugust nendeni kümmekonna meetri täpsusega, lennuki asukoha suunda aga täpsusega kuni üks-kaks kraadi.

Raadiolokatsioonil on peale puhtsõjaliste kasutamisviiside väga suur tähtsus rahulikeks eesmärkideks. Siia kuulub esmajoones õhu- ja mere-raadionavigatsioon lennukitele ja laevadele. Raadiolokatsiooni tehnika võimaldab sooritada lähemaid ja kaugemaid pimelende, pimemaandumisi, hoiatab kokku põrkamast teiste lennukite, mägede, kõrgete hoonete jm. ning aitab laevadel liigelda öösel, udus ja kitsastes sõiduvetes.

VI PEATÜKK

VALGUSE LEVIMINE

126. Sissejuhatus. Valgusallikad. «Valgus on vajalik tingimus kõige peenema, universaalsema ja võimsama tundeelundi — silma — tööks,» kirjutas akadeemik S. I. Vavilov. «Öö jätab inimese sellest organist ilma, muutes aktiivse elu passiivseks.

Kunstlik valgus soodustab tegutsemist, hoides vaimu ärkvel. Valgus pikendab faktiliselt inimese teadlikku eksisteerimist, selles seisnebki eelkõige tema hiiglasuur tähtsus. Seepärast pole midagi imestada, et valgustuse küsimus on praegusel ajal muutunud väga suureks tehnilis-majanduslikuks probleemiks.»

Me näeme mitmesuguseid kehi, kui nendelt tulev valgus langeb meile silma. Mõningaid kehi me näeme sõltumatult sellest, kas meie ümber on valge või pime. Nad ise kiirgavad ümbritsevasse ruumi valgust. Selliseid kehi nimetatakse *valgusallikateks*.

Kuid enamikku kehadest me näeme ainult siis, kui nad ise on valgustatud valgusallikate poolt.

Valgusallikaid võime jaotada loomulikeks ja kunstlikeks. Suurima tähtsusega loomulikuks valgusallikaks on meile Päike, sest Päikese poolt kiiratud valgus on algallikaks enamikule energiatagavaradest, mis tänapäeval on inimkonna käsutuses. Päikese valgus on kõigi Maal elavate organismide — taimede, loomade ja inimeste elu allikaks.

Kunstlikud valgusallikad, mis inimkond sai oma käsutusse vastavalt oma arenemisele ja millega igaüks meist seni on kokku puutunud (lõkketuled, tuletikud, küünlad, petrooleumi- ja elektrilambid), on nagu Päikegi alati kuumad.

Kõik need valgusallikad kiirgavad hõõguvas olekus valgust, seepärast nimetatakse neid *soojuslikeks valgusallikaiks*.

Soojuslike valgusallikate kõrval tungivad tänapäeval ikka laialdasemalt tehnikasse ja igapäevasesse ellu uued valgusallikate liigid, milledes kasutatakse gaaside helendumist neid läbiva elektrivoolu toimel.

Sellistes lampides gaasi temperatuur helendumisel peaaegu ei muutu, sellepärast nimetatakse neid mõnikord külmhelenduslam-

pideks. Nad on tunduvalt ökonoomsemad elektrihõõglampidest, nagu me edaspidi näeme (§ 189). Peale selle võime mõnes neist saada valgust, mille koostis on samasugune päikesevalguse omaga. Selliseid «päevavalguslampe» kasutatakse praegu paljudes tehastes ja eriti mõnedes Moskva metroo maa-alustes jaamades.

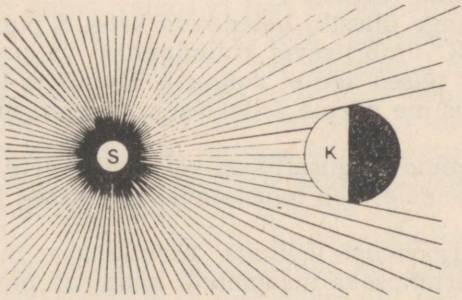
Päike on Maast umbes 150 miljoni kilomeetri kaugusel. Kaugus Maalt tähtedeni on tunduvalt suurem. Kuidas Päikese, tähtede ja teiste helenduvate kehade valgus levib ruumis? Mis on valgus? — Kõik need küsimused huvitasid inimkonda juba ammu. Tänapäeval on selgitatud palju küsimusi valguse loomuse ja tema levimisseaduste kohta.

Nagu mistahes teiseski teadusharus, nii ka õpetuses valgusest eelnes suurtele teoreetilistele üldistustele katseliste faktide uurimine ja kogumine ning nende alusel seaduste leidmine. Nende seaduste täpne tundmine on vajalik selleks, et sügavamalt mõista valguse loomust ja omadusi.

Optiliste nähtuste põhiseaduste hulka kuuluvad:

1) valguse sirgjoonelise levimise seadus;
2) valguse peegeldumisseadused;
3) valguse murdumisseadused.

127. Valguse sirgjoonelise levimise seadus. Teame, et, asetanud silma ja mingi väikese valgusallika vahele läbipaistmatu eseme, me



Joon. 243. Varju tekkimine.

ei näe valgusallikat. See on seletatav sellega, et *ühtlases keskkonnas* (näiteks õhus) *levib valgus sirgjooneliselt*. Valguse sirgjooneline levimine on kogemuslik fakt, mis tehti kindlaks juba kauges minevikus. Nii näiteks seadus valguse sirgjoonelisest levimisest esineb Eukleidese teoses (300 a. e. m. a.), kuid tõenäoliselt oli see tuttav ja kasutusel juba palju varem.

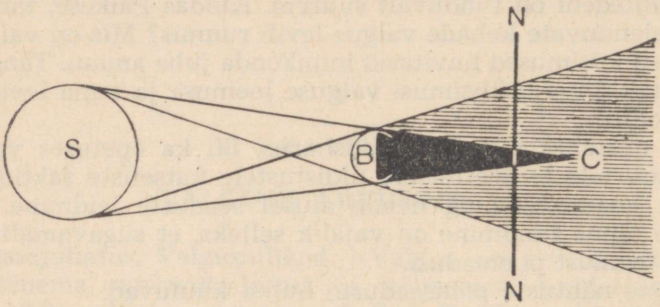
Ühtlases keskkonnas valguse sirgjoonelise levimise üheks katseliseks tõestuseks on kõigile hästi tuntud varju tekkimine.

Olgu S (joon. 243) mõõtmetelt väga väikene valgusallikas ja K — keha, mis tõkestab valgusallikalt S kiirguvat valgust.

Kehale K langevad kiired ei läbi keha, kehast K mööduvad kii-

red ei kõverdu ega muutu, järelikult keha K taha moodustub koonusekujuline piirkond, mille ükski punkt ei saa valgust valgusallikalt S. Seepärast ekraanil, mis on asetatud risti sellise koonuse teljega, saame keha K teravapiirilise varju.

Kui valgusallika mõõtmed on suured, võrreldes tema kaugusega takistusest, siis keha igast punktist lähtuv valgus annab ühe varjukoonuse tõkke taga. Üldse ei lange valgust ainult ruumi, mis on



Joon. 244. Kahe valguspunkti poolt valgustatud läbipaistmatu keha tekitab varju ja poolvarju.

ühine kõigile varjukoonustele. Joonisel 244 on näidatud varjukoonuste läbilõige, mis on tekkinud keha B taga valgusallika S kahest punktist lähtunud valgusest.

Valgus ei lange ühestki helenduva keha S punktist ruumi BC. Iga koonust BC ümbritsevat ruumipunkti valgustab ainult mõni keha S punkt, teised aga ei valgusta. Kui B ja C vahele asetada ekraan NN, siis me näeme sellel varju, mis on ümbritsetud poolvarjuga.

Varju tekkimine valgusallikast väljunud kiirte langemisel läbipaistmatule esemele teeb mõistetavaks päikese- ja kuuvarjutuste tekkimise.

Valguse sirgjoonelist levimist kasutatakse maamõõtmistöödel sirgjoonte tähistamiseks maapinnal, kauguste mõõtmisel maapinnal, merel ja õhus.

Laialdaselt kasutatakse valguse sirgjoonelist levimist tootmises esemete ja riistade sirgjoonelisuse kontrollimiseks mööda vaatekiirt.

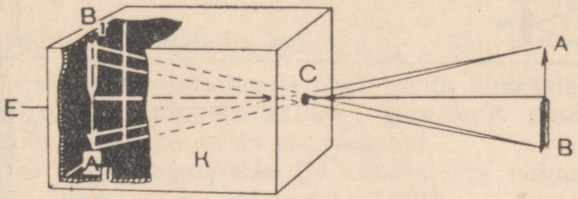
On väga tõenäoline, et sirgjoone mõiste tekkis valguse sirgjoonelise levimise fakti põhjal.

Valguse sirgjoonelise levimisega seletub kujutise saamise võimalus väikese ava abil.

Oletame, et AB on helenduv ese, mis on asetatud kambri K seinas oleva väikese avause C ette (joon. 245). Kuna valgus levib sirgjooneliselt, siis igast AB punktist läheb läbi avause C kiirte koonus, mis kambri seinal E tekitab väikese laigu. Erinevate valguspunktide tekitatud laikude kogum tekitab kambri seinal E eseme kujutise A_1B_1, mis on esemega võrreldes ümber pööratud.

Kuid valguse sirgjoonelise levimise seadus kaotab kehtivuse kiire läbiminekul väga väikestest avaustest. Tutvume selle nähtusega katse põhjal.

Vähendame avaust C ja vaatleme ühtlasi kujutist A_1B_1. Märkame, et avause mõõtmete vähendamisel kujutise A_1B_1 selgus alguses kasvab, väheneb ainult heledus, sest vähendatud avaust läbib vähem valgust. Kuid kui avause mõõtmed muutuvad väga väikeseks (meie katse puhul $d \approx 0{,}01$ mm), siis kujutis ei sarnane



Joon. 245. Kujutise saamine väikese ava abil.

enam esemega ja on ähmane, laialivalguv. Kui avause diameetri suurusjärk on 0,0005 mm, siis kaob kujutis täiesti. Kambri sein E muutub seejuures nõrgalt, kuid ühtlaselt valgustatuks.

See on seletatav sellega, et väga väikeste avade läbimisel valgus ei levi enam sirgjooneliselt.

Nähtust, mille puhul valgus ei levi sirgjooneliselt, nimetatakse valguse difraktsiooniks; seda vaadeldakse IX peatükis.

128. Valguse kiirus. Valguse kiirust maapinnal määratakse mitmesuguste meetodite abil. Selliste mõõtmiste põhimõtete selgitamiseks kirjeldame Michelsoni (loe: maikelson) meetodit.

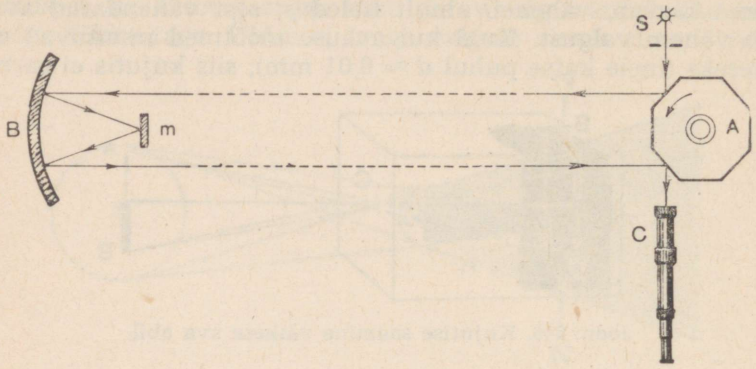
Oma mõõtmistel Michelson kasutas kaht mäetippu Kalifornias (Antonio ja Wilson), millede vaheline kaugus 35,426 km oli täpselt mõõdetud. Wilsoni mäe tippu oli asetatud tugev valgusallikas S (joon. 246), millest valgus langes kaheksatahulisele peegelprismale A. Prisma peegeltahult peegeldunud kiir langes Antonio mäe tippu asetatud nõguspeeglile B. Siis langes kiir peeglile m, ja peegeldudes temalt, langes peegli B teise punkti, pärast seda langes peegelprisma A teisele tahule ja peegeldus. Peegeldunud kiir püüti kinni teleskoobi C abil.

Pilu läbinud kiir võis pikksilma langeda ainult juhul, kui peegli asend jäi täpselt endiseks.

Peegelprisma A pandi mootori abil pöörlema ja mootori kiirus reguleeriti nii, et läbi vaatetoru oli pidevalt näha pilu S. See võis juhtuda ainult sel tingimusel, kui prisma pööramise ajal $\frac{1}{8}$ täispöörde võrra läbis kiir tee, mis oli võrdne mäetippude kahekordse kaugusega. Teades peegli tiirude arvu sekundis ja kiire poolt läbitud tee pikkust, leidis Michelson, et valguse kiirus õhus

$c = (299\,791 \pm 4)\frac{\text{km}}{s}$, s. o. peaaegu $300\,000\ \frac{\text{km}}{s} = 3 \cdot 10^{10}\ \frac{\text{cm}}{s}$.

Katsed näitavad, et valguse kiirus mitmesugustes kehades on erinev. Näiteks vees on valguse kiirus umbes $225\,000\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$, klaasis umbes $200\,000\ \frac{\text{km}}{\text{s}}$.



Joon. 246. Valguse kiiruse määramiseks korraldatud Michelsoni katse skeem.

129. Valgusvool. Punktikujuline valgusallikas. Nägemismulje järgi hinnatavat valgusenergiat nimetame lühidalt valgusenergiaks. Kui mingile pinnale aja t vältel langeb valgusenergia L, siis suurust $\frac{L}{t}$ nimetatakse valgusvooks (Φ).

$$\Phi = \frac{L}{t}.$$

Valgusenergia hulka, mis kiiratakse mingi valgusallika poolt ajaühikus igas suunas, nimetatakse valgusallika koguvalgusvooks (Φ_0).

Kujutleme, et valgusallikaks on väike hõõguv keha. Selline valgusallikas kiirgab valgust kõikides suundades ühtlaselt. Kui hindame sellisest allikast kiirguva valguse mõju kaugustel, mis on kera diameetriga võrreldes suured, siis tema mõõtmetel ei ole mingit tähtsust. Sellisel juhul võime valgusallikat lugeda punktikujuliseks.

Niisiis, *punktikujuliseks valgusallikaks (valguspunktiks) nimetatakse valgusallikat, mille mõõtmeid võime mitte arvestada võrreldes kaugusega, millisel hinnatakse tema mõju, ning kui valguskiirgus on kõikides suundades ühtlane.*

Praktilises elus esinevad alati lõplike mõõtmetega kehad, seega ka lõplike mõõtmetega valgusallikad. Iga sellist valgusallikat võib vaadelda valguspunktide koguna. Mida väiksemad on valgustava keha mõõtmed võrreldes tema kaugusega kohast, kus uurime tema mõju, seda vähem eksime, kui loeme teda valguspunktiks.

130. Valgustugevus. Valgusallika iseloomustamiseks kasutatakse valgustehnikas suurust, mida nimetatakse valgustugevuseks.

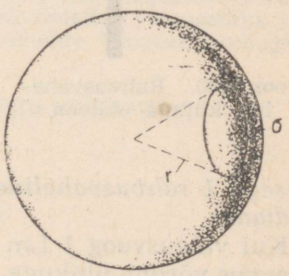
Kujutame endale ette punktikujulist valgusallikat, mille ümber vaatleme kerapinda raadiusega r. Kujundame selle kera sisse koonuse, mille tipp asetseb kera keskpunktis. See koonus lõikab kera pinnast välja mingi pinna σ (joon. 247).

Koonilise pinnaga piiratud ruumi osa nimetatakse ruuminurgaks.

Ruuminurka (ω) mõõdetakse suhtega $\frac{\sigma}{r^2}$. Kui $\sigma = r^2$, siis ruuminurga suurus on 1 ruuminurga ühik, mida nimetatakse sterradiaaniks. Kera pindala on $4\pi r^2$, järelikult punkti ümber oleva ruuminurga suurus on 4π sterradiaani.

Valgusallika valgustugevuseks (I) nimetatakse valgusvoo Φ ja ruuminurga ω suhet, milles valgusvoog levib:

$$I = \frac{\Phi}{\omega}.$$



Joon. 247. Ruuminurk ω võrdub koonuse poolt kera pinnast väljalõigatud pindala σ ja kera raadiuse ruudu r^2 jagatisega.

Järelikult, valgustugevust mõõdetakse valgusvooga, mis levib ühes sterradiaanis.

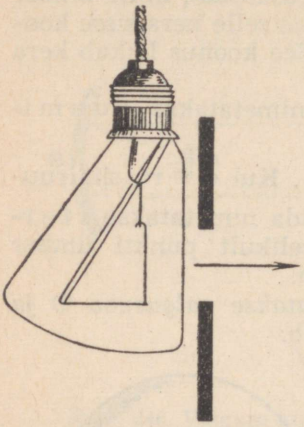
Punktikujulise valgusallika definitsioonist järeldub, et punktikujulise valgusallika valgustugevus on ühesugune igas suunas. Paljude valgusallikate — hõõglambi, kaarlambi jne. valgustugevus on aga erinev erinevates suundades. Kasutades vastavat armatuuri, võime valgusallika kiirgust suunata oma soovile vastavalt. Kontsentreerides kogu valgusallika valgusvoo väikesesse ruuminurka, saame hiiglasuure valgustugevuse ühes suunas. Sellele printsiibile põhineb kaasaegsete prožektorite ehitus.

131. Valgustustugevus. Kui me loeme raamatut, kirjutame või töötame mingil tööpingil, peab objekt, millega me tegeleme, olema valgustatud. Kõigile on teada, et näiteks lugemine nõrga valguse puhul väsitab silmi. Samuti väsivad silmad väga tugeva valguse puhul. Kuid mõisted nõrk ja tugev on suhtelised ja subjektiivsed. Objektiivseks valgustuse hindamiseks kasutatakse valgustustehnikas valgustustugevuse ehk pinnavalgustuse mõistet (E). *Valgustustugevuseks E nimetatakse mingile pinnale langeva valgusvoo Φ ja selle pinnatüki pindala S suhet.*

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

Voo ühtlase jaotumise puhul pinnal on valgustustugevus arvuliselt võrdne pindalaühikule langeva valgusvooga.

132. Valgustustehniliste suuruste ühikud. Põhiliseks valgustustehniliseks suuruseks on v a l g u s v o o g. Kuid praktikas on põhiühikuks võetud valgustugevuse ühik. *Rahvusvahelise kokkuleppe põhjal on võetud valgustugevuse ühikuks rahvusvaheline küünal (r. k.). Rahvusvaheline küünal on defineeritud ühe osana erilise ehitusega hõõglamp-etalooni* (joon. 248) *valgustugevusest rangelt määratud suunas.*



Joon. 248. Rahvusvahelise küünla etaloon.

Teame, et

$$I = \frac{\Phi}{\omega},$$

järelikult

$$\Phi = I\omega.$$

Oletades, et I võrdub ühe valgustugevuse ühikuga ja $\omega = 1$ ruuminurga ühikuga, siis $\Phi = 1$ valgusvoo ühikuga.

Valgusvoo ühikuks on võetud luumen (Lm).

Luumen on valgusvoog, mida kiirgab punktikujuline valgusallikas tugevusega 1 rahvusvaheline küünal ruuminurka suurusega 1 steradiaan[1].

Kui valgusvoog 1 Lm langeb pindalaühikule, siis on valgustustugevus võrdne ühikuga.

Valgustustugevuse ühikuks on luks (Lx). *Luks on valgustustugevus, mis tekib valgusvooga risti oleva 1 m^2-se pinna ühtlasel valgustamisel valgusvooga 1 Lm.*

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

Sobiv töökoha valgustustugevus on väga tähtis töö tootlikkuse ja silmade tervishoiu seisukohalt. On kindlaks määratud valgustustugevuse normid mitmesuguste tööliikide jaoks. Esitame mõned nendest normidest.

VALGUSTUSTUGEVUS LUKSIDES:

lugemisel	30—50;
peentöödel	100—200;
fotografeerimisel (ateljees)	10 000 ja enam;
kinoekraanil	20—30;
väljas pilves ilmaga	1000 ja enam;
väljas selge ilmaga (keskpäeval)	10 000;
väljas kuuvalgel ööl	0,2.

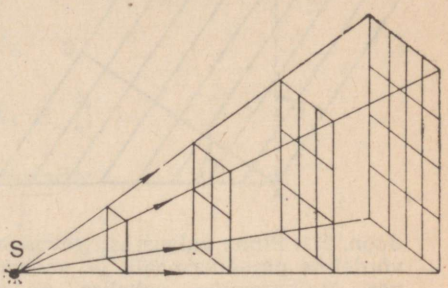
[1] 1948. a. võeti NSV Liidus tarvitusele uus valgustugevuse etaloon, mis koosneb kindlaksmääratud mõõtmetega peenikesest torust. Valgusvoogu, mida kiirgab selle toru lahtine ots kindla temperatuuri juures, nimetatakse l u u m e n i k s.

133. Valgustustugevuse seadused. Punktikujulisest valgusallikast lähtuv valgusvoog valgustab erinevalt valgusallikast mitmesugusel kaugusel asetsevaid esemeid. Mida kaugemal asetseb valgustatav pind valgusallikast S, seda väiksem valgusvoog langeb selle pinna igale ühikule (joonis 249), järelikult seda väiksem on tema valgustustugevus.

On muidugi täiesti arusaadav, et valgusallika ja pinna jääva kauguse puhul valgustustugevus sõltub samuti valgusallika valgustugevusest.

Leiame selle sõltuvuse. Olgu punktikujulise valgusallika tugevus I. Kujundame tema ümber kerapinna raadiusega r. Selle pinna ($S = 4\pi r^2$) valgustustugevus on:

$$E = \frac{\Phi_0}{4\pi r^2}. \qquad (1)$$



Joon. 249. Pinna valgustustugevus on pöördvõrdeline valgusallika ja pinna vahelise kauguse ruuduga.

Valgusallika, mille valgustugevus on I, kogu valgusvoog

$$\Phi_0 = 4\pi I.$$

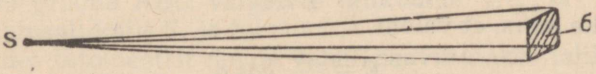
Asetades Φ_0 väärtuse valemisse (1), saame:

$$E = \frac{I}{r^2}.$$

Vaadeldaval juhul on kiired risti valgustatava pinna mistahes elemendiga. Järelikult, *pinnaga risti olevate kiirte puhul on valgustustugevus võrdeline valgusallika valgustugevusega ja pöördvõrdeline valgustatava pinna kauguse ruuduga valgusallikast.*

See seadus kehtib täpselt punktikujulise valgusallika puhul. Praktikas on sellele seadusele põhinevate arvutuste tulemused seda lähemad katsetulemustele, mida väiksemad on valgusallika mõõtmed ja mida suurem on kaugus valgustatava pinnani.

Valgustustugevus sõltub peale ülaltähendatud tegurite veel sellest, millise nurga all valgus langeb valgustatavale pinnale.

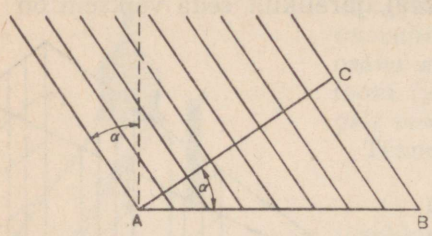


Joon. 250. Kiired, mis langevad valguspunktist S küllalt suurel kaugusel asuvale väikesele pinnale σ, on praktiliselt paralleelsed.

Võtame mõõtmetelt väikese valgusallika S. Kiired, mis temalt langevad küllalt kaugel olevale väikesele pinnale σ, on praktiliselt

paralleelsed (joon. 250). Kui seda pinda pöörata, siis langeb temale ainult osa valgusvoost.

Leiame valgustustugevuse sõltuvuse pinnale langevate kiirte langemisnurgast. Joonisel 251 langeb sama valgusvoog Φ kahele ristkülikukujulisele pinnale, mis asetsevad risti joonise tasapinnaga. Lõigud AC ja AB on nende pindade lõikejooned joonise tasapinnaga. Olgu nende ristkülikukujuliste pindade kõrgused 1 cm, siis nende pindalad, mõõdetuna ruutsentimeetreis, võrduvad arvuliselt lõikude AC ja AB pikkustega. Asetame pinna AC (nimetame teda lihtsuse mõttes nii) risti langevate kiirtega, tema valgustugevus



Joon. 251. Pinna valgustustugevus on võrdeline pinnanormaali ja valgusvoo levimissuuna vahelise nurga koosinusega.

$$E_0 = \frac{\Phi}{AC}. \qquad (1)$$

Pind AB olgu kallutatud valguskiirte suhtes nurga α võrra, tema valgustustugevus on määratav võrdusest

$$E = \frac{\Phi}{AB}. \qquad (2)$$

Jagades võrduse (2) võrdusega (1), saame

$$\frac{E}{E_0} = \frac{AC}{AB},$$

millest

$$E = E_0 \frac{AC}{AB}.$$

Kuid kolmnurgast ACB näeme, et $\frac{AC}{AB} = \cos \alpha$.

Järelikult

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

Pinna valgustustugevus on võrdeline kiirte langemisnurga koosinusega.

Pole raske näha, et valem

$$E = \frac{I}{r^2} \cos \alpha$$

ühendab mõlemad valgustustugevuse seadused.

134. Kahe valgusallika valgustugevuse võrdlemine. Valgustugevuste võrdlemiseks kasutatavaid riistu nimetatakse fotomeetriteks. Fotomeetrite kasutamisel teeme nägemisorganite abil

kindlaks kahe pinna valgustustugevuse võrdsuse, seejuures kumbki pind eraldi on valgustatud võrreldavate valgusallikatega. Olgu (joon. 252) S_1 ja S_2 valgusallikad, mille valgustugevused on I_1 ja I_2. Asetame nende vahele ekraani A nii, et ekraani mingi väikese pinna valgustustugevused paremalt ja vasakult poolt oleksid võrdsed:

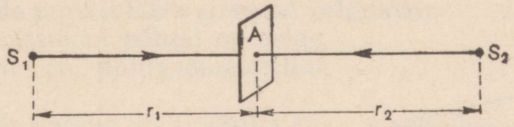
$$E_1 = E_2; \qquad (1)$$

kuid

$$E_1 = \frac{I_1}{r_1^2} \text{ ja } E_2 = \frac{I_2}{r_2^2}.$$

Siit võime võrduse (1) põhjal kirjutada:

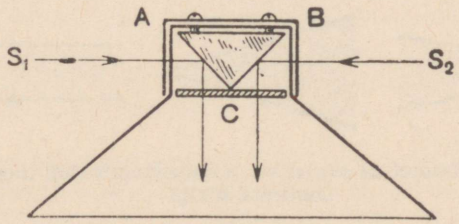
$$\frac{I_1}{r_1^2} = \frac{I_2}{r_2^2} \text{ või } \frac{I_1}{I_2} = \frac{r_1^2}{r_2^2}.$$



Joon. 252. Kahe valgusallika valgustugevuse võrdlemine.

Kui üheks valgusallikaks võtta lamp-etaloon ja mõõta kaugusi r_1 ja r_2 juhul, kui ekraani valgustustugevused mõlemalt poolt on võrdsed, siis võib määrata teise valgusallika valgustugevuse.

Joonisel 253 on kujutatud ühe lihtsaima fotomeetri skeem. Kol-



Joon. 253. Lihtsaima fotomeetri skeem.

metahulise prisma ABC valgetele tahkudele AC ja BC langeb valgus valgusallikailt S_1 ja S_2.

Liigutades fotomeetrit nende vahel, saavutatakse tahkude AC ja BC ühesugune valgustus.

Seejuures mõlemad tahud liituvad ühte, nendevaheline piir kaob.

Harjutus 16.

1. Leidke ligikaudne valgustustugevus oma kodusel ja kooli töölaual; võrrelge seda paragrahvis 132 toodud normidega. Arvutustulemused on lähedasemad tegelikkusele, kui valgustamisel ei kasutata abažuure (lambivarje). Miks?

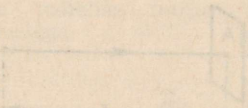
2. Valgustustugevuse normide järgi peentööd teostava metallitöölise töökohal peab valgustustugevus olema 75 luksi.

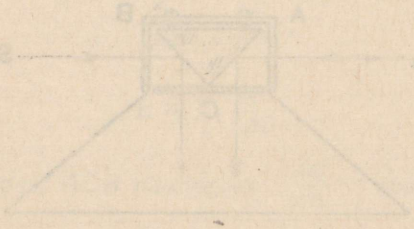
Kui kõrgele töökohast tuleb asetada 100-küünlane lamp?

3. Valgustugevuse etalooniks võeti 25-küünlane lamp, mis asetati 20 cm kaugusele fotomeetrist. Milline on mõõdetava lambi valgustugevus, kui teda tuli asetada 0,5 m kaugusele fotomeetrist?

4. Päike asetseb 30° kõrgusel horisondist. Arvutada maapinna valgustustugevus luksides, kui on teada, et Päikese asetsedes seniidis on valgustustugevus 100 000 Lx.

5. Fotopaberi tumenemise määrab paberi valgustustugevuse ja säritusaja (paberi valgustamise aja) korrutis. Mitu korda ja kuidas on tarvis muuta säritusaega, kui pildistatava eseme ja valgusallika vahelist kaugust suurendada kolm korda?





VII PEATÜKK

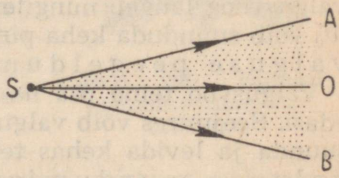
VALGUSE PEEGELDUMINE JA MURDUMINE

135. Valguskiir. Valguskiirte kimp. *Valguskiireks nimetatakse valguse levimise suunda.* Valguspunkt kiirgab valgust igas suunas, seega iga seda punkti läbiv sirge on valguskiir.

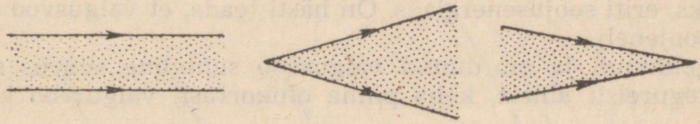
Meie definitsiooni põhjal on selge, et valguskiir on puhtgeomeetriline mõiste.

Praktiliselt valgus levib alati sirgjooneliselt — piiratud koonuses, mida nimetatakse valguskiirte kimbuks.

Joonisel 254 on valguskiirte kimp kujutatud kolme kiire abil: telgkiirega *SO* ning kiirtega *SA* ja *SB*, mis piiravad kimpu.



Joon. 254. Valguskiirte kimp on kujutatud kolme kiire abil: telgkiirega *SO* ning kiirtega *SA* ja *SB*, mis piiravad kimpu.



Joon. 255. Paralleelsete, hajuvate ja koonduvate kiirte kimbud.

Kiirtekimp on puhtas õhus nähtamatu, kuid lastes teda õhku, mis sisaldab väikesi osakesi — tolmuk übemeid, suitsu või väikesi veepiisku (udu), muutub kiirtekimp nende mõjul nähtavaks.

Juba varem juhtisime tähelepanu sellele, et iga tegeliku katse puhul pole meil tegemist valguskiirega, vaid kiirtekimbuga. Sõltuvalt tema piirdepinna kujust eristame paralleelseid, hajuvaid ja koonduvaid kiirtekimpe (joon. 255).

Diafragmade abil võib kiirtekimbu laiust teha väikeseks, kuid mitte meelevaldselt väikeseks. Vähendades ava, mida läbib kiirtekimp, kiirte sirgjoonelisus järjest väheneb, — valgus hakkab tungima varju piirkonda. (Sellest kõnelesime juba paragrahvis 127.)

Meie silma langeb tavaliselt hajuv kiirtekimp ja me näeme

nende kiirte lõikumiskohal valguspunkti. Selle juures on võimalikud kaks juhtu:

1) kiirte lõikepunkt on tõeliselt olemas; sel korral nimetatakse nähtavat valguspunkti tõeliseks;

2) hajuval kiirtekimbul ei ole tõelist lõikepunkti, kuid meile näib, et kiired väljuvad hajuvate kiirte kujutletavate pikenduste lõikepunktist. Sellist punkti nimetatakse näilikuks (ebatõeliseks).

Tegelikult midagi ebatõelist siin pole. Kuskil on olemas reaalne punkt, millest väljusid meile silma langevad kiired. Kuid mitte alati me ei näe teda seal, kus ta tegelikult asetseb, ja selles mõttes kasutataksegi nimetust «ebatõeline punkt».

Optika osa, milles valguse levimist vaadeldes on aluseks võetud valguskiire mõiste, nimetatakse geomeetriliseks optikaks.

136. Nähtused, mis toimuvad valguse langemisel kehale. Kui valgusvoog langeb mingile kehale, siis langeva valgusvoo üks osa Φ_0 võib suunduda keha pinnalt tagasi. Sellist nähtust nimetatakse valguse peegeldumiseks.

Valgusvoo teine osa Φ_n võib tungida kehasse ja levida sellesedasi. Seejuures võib valgusvoog keha pinnal muuta oma esialgset suunda ja levida kehas teises suunas. Seda nähtust nimetatakse valguse murdumiseks.

Kui liita valgusvood Φ_0 ja Φ_n, siis nende summa on võrdne kehale langeva kogu valgusvoo suurusega Φ. Kuid valgusvoo levimisel kehas tema intensiivsus keskkonnas neeldumise tõttu pidevalt väheneb. Seejuures valgusenergia muutub teisteks energialiikideks, eriti soojusenergiaks. On hästi teada, et valgusvoo mõjul keha soojeneb.

Peegeldunud ja murdunud valgusvoo suhteline suurus sõltub reast tegureist: ainest, keha pinna olukorrast, valgusvoo koostisest jt.

Neeldumine sõltub samuti keha ainest ja valgusvoo koostisest.

Niisiis, *valgusvoo langemisel keha pinnale esineb valguse peegeldumine ja murdumine, keha läbimisel aga neeldumine.*

137. Valguse peegeldumisseadused. Tutvume katseliselt valguse peegeldumisseadustega.

Asetame tasapeegli *PP* kraadideks jaotatud ümmarguse ketta tsentrisse nii, et kiired langeksid peegelpinna normaali *ON* ja peegli lõikepunkti (joon. 256).

Olgu *SC* — langev kiir, ja CS_1 — peegeldunud kiir. Nurka *SCN* langeva kiire *SC* ja normaali *CN* vahel nimetatakse langemisnurgaks. Nurka S_1CN peegeldunud kiire S_1C ja normaali *CN* vahel nimetatakse peegeldumisnurgaks.

Katsest näeme, et langev kiir ja peegeldunud kiir asuvad samas tasapinnas kiire langemispunktist tõmmatud peegli normaaliga.

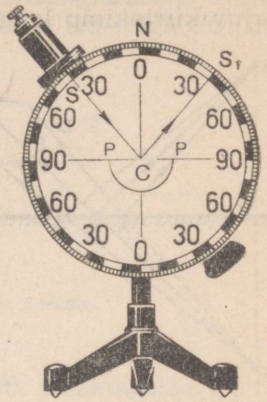
Pöörates ketast muudame langemisnurka ja märkame, et ühtlasi muutub ka peegeldumisnurk.

Mõõtes iga kord langemisnurga ja temale vastava peegeldumisnurga, võime veenduda, et nad on võrdsed.

Seega valguse peegeldumisel kehtivad järgmised seadused:

1. Peegeldunud kiir asetseb samas tasapinnas langeva kiirega ja kiire langemispunkti läbiva peegli pinnanormaaliga.

2. Peegeldumisnurk on võrdne langemisnurgaga.

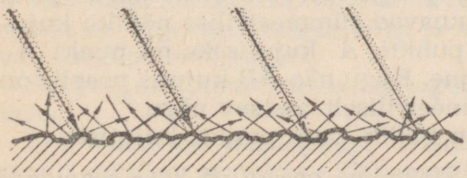


Joon. 256. Valguse peegeldumisseaduste leidmine.

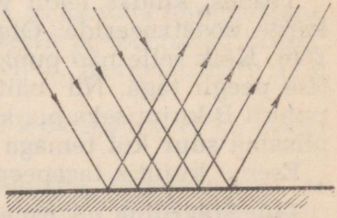
Kui langev kiir kulgeb suunas S_1C, siis, konstrueerides peegeldunud kiire käiku ülaltoodud peegeldumisseaduste põhjal, näeme, et peegeldunud kiir ühtib sirgega CS. Järelikult, *langev ja peegeldunud kiir on pööratavad.*

138. Difuusne peegeldumine ja peegeldumine peegelpinnalt. Suur enamik meile nähtavaist kehadest ei ole valgusallikad ja on nähtavad vaid sel juhul, kui valgusallikas neid valgustab. Kuid esemeid me võime näha ainult siis, kui valguskiired langevad meile silma. Järelikult, valgustatud kehad peegeldavad valgust. Seejuures tuleb eristada hajuvat (difuusset) peegeldumist peegeldumisest peegelpinnalt.

Hajunud peegeldumisel kiired peegelduvad igas suunas, mistõttu me näeme keha igast sihist. Näiteks peegeldab valgust difuusselt tavaline paberileht (joon. 257).



Joon. 257. Valguse hajutatud (difuusne) peegeldumine ebatasaselt pinnalt.



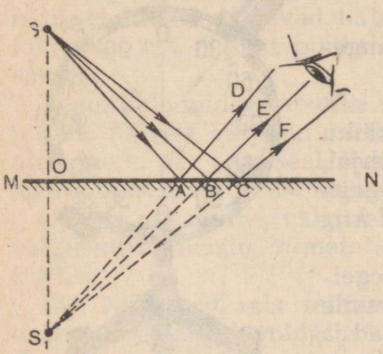
Joon. 258. Ühesuunaline peegeldumine peegelpinnalt.

Difuusselt peegeldavat pinda võib vaadelda koosnevana elementaar-tasapindadest, millel on mitmesugused asendid ja mis moodustavad omavahel mitmesuguseid nurki. Kuid kui kehale langev paralleelne kiirtekimp peegeldub ühes kindlas suunas, siis sel juhul kõneleme peegeldumisest peegelpinnalt (joon. 258).

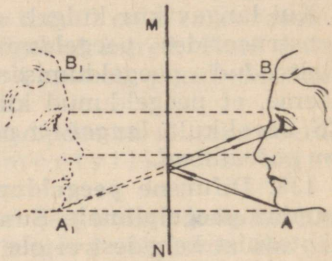
Peegeldumine peegelpinnalt esineb näiteks peegeldumisel hoolikalt lihvitud metalli pinnalt.

139. Tasapeegel. Tasapeegliks nimetame tasapinnalist peegelpinda.

Olgu joonisel 259 MN tasapeegel ja S — peegli ees asetsev valguspunkt. Kiired väljuvad sellest punktist erinevais suundades: suundades SA, SB, SC jne. Peegli pinnalt need kiired peegelduvad ja levivad hajuva kimbuna suundades AD, BE, CF jne. Kui selline hajuv kiirtekimp langeb silma, siis meile näib, et kiired väljuvad



Joon. 259. Punkti näiliku kujutise tekkimine tasapeeglis.



Joon. 260. Eseme näiliku kujutise tekkimine tasapeeglis.

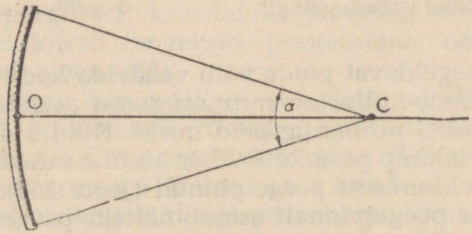
nende kiirte pikenduste lõikepunktist S_1 peegli taga. Täisnurksete kolmnurkade SOA ja S_1OA võrdsuse põhjal pole raske näidata, et punkt S_1 asetseb peegli taga samal kaugusel temast kui peegli ees asetsev punkt S.

Punkte S ja S_1 nimetatakse sümmeetrilisteks peegli pinna suhtes, kusjuures punkti S_1 nimetatakse punkti S näilikuks kujutiseks.

Teades, kuidas leida valguspunkti kujutist, on eseme kujutist kerge konstrueerida. Olgu AB peegli MN ees olev nägu (joon. 260). Kõik selle näo punktid annavad sümmeetrilise näiliku kujutise peegli taga. Nii näiteks punkti A kujutiseks on punkt A_1, punkti B kujutiseks punkt B_1 jne. Kogu näo AB kujutis peeglis on niisama suur kui temaga sümmeetriliselt asetsev nägu.

Eseme kujutis tasapeeglis on näilik nagu punkti kujutiski.

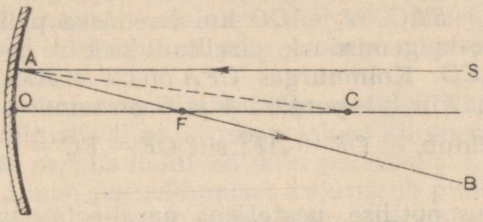
140. Sfääriline nõguspeegel. Sfääriline peegel on kera segmendi hoolikalt lihvitud pind. Sfäärilised peeglid on nõgusad või kumerad.



Joon. 261. Sfääriline nõguspeegel.

Kerapinna keskpunkti *C* nimetatakse peegli optiliseks keskpunktiks (joon. 261), kera segmendi keskpunkti *O* peegli lagipunktiks.

Iga sirget, mis läbib sfäärilise peegelpinna keskpunkti *C*, nimetatakse peegli optiliseks teljeks. Optilist telge *CO*, mis



Joon. 262. Nõguspeegli fookuse mõiste selgitamiseks.

läbib kera keskpunkti *C* ja peegli lagipunkti, nimetatakse optiliseks peateljeks.

Nurka α kahe raadiuse vahel, mis asuvad teljega ühes tasapinnas ja mille ühed otspunktid asuvad peegli äärtel, nimetatakse peegli nurkavaks ehk apertuuriks.

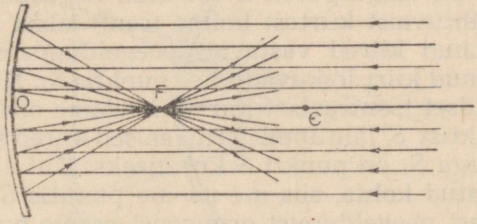
Optilise peatelje lähedasi kiiri nimetatakse teljelähedasiks ehk tsentraalseiks kiirteks. Kõik meie edaspidised järeldused kehtivad just selliste kiirte puhul.

Kui nõguspeeglile langeb optilise peateljega paralleelsete kiirte kimp, siis need kiired pärast peegeldumist koonduvad väikeses ruumiosas, mis asetseb optilisel teljel ligikaudu raadiuse keskpunktis.

Kui seda katset teostada päikesekiirtega ja asetada mingisugune keha sellele kohale, milles koonduvad peeglilt peegeldunud kiired, siis ta on tugevasti valgustatud ja kuumeneb. Kergestisüttiv aine võib isegi põlema hakata.

Sel põhjusel nimetatakse nõguspeegleid koondavaiks peegleiks.

141. Sfäärilise nõguspeegli fookus. Langegu teljelähedane ja peegli optilise peateljega *OC* paralleelne kiir *SA* nõguspeeglile



Joon. 263. Paralleelselt optilise peateljega nõguspeeglile langev kiirtekimp koondub pärast peegeldumist fookuses.

(joon. 262). Tõmbame sfäärilise peegelpinna kõveruskeskpunktist C ristsirge CA ja konstrueerime peegeldunud kiire AB. See kiir lõikab optilist telge punktis F. On kerge tõestada, et see punkt poolitab kauguse OC, s. o. $OF = FC = \frac{1}{2}R$, kus R on sfäärilise peegli raadius.

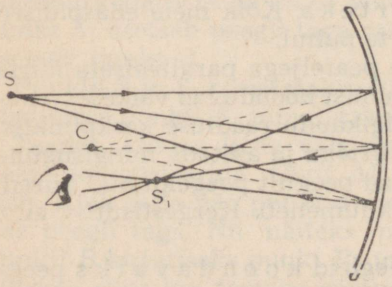
Tõepoolest, $\angle SAC = \angle ACO$ kui sisemised põiknurgad. Kuid $\angle SAC$ on kiire langemisnurk, järelikult ka kiire peegeldumisnurk $\angle CAB = \angle ACO$. Kolmnurgas CFA on $CF = AF$, kuid et kiir SA on teljelähedane kiir, siis punktid A ja O on teineteisele lähedased, sellest aga järeldub, et $OF = AF$; siit $OF = FC = \frac{1}{2}R$, mida oligi tarvis tõestada.

Punkti F, kus optilise peateljega paralleelne tsentraalne kiir pärast peegeldumist lõikab optilist telge, nimetatakse p e e g l i f o o k u s e k s.

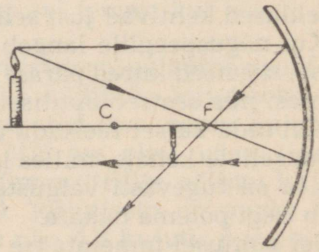
Kaugust OF peegli lagipunktist fookuseni nimetatakse f o o k u s k a u g u s e k s ja tähistatakse lühidalt f.

Pärast peegeldumist koondub fookusesse kogu tsentraalne kiirtekimp, mis langes peeglile paralleelselt peegli optilise peateljega (joon. 263).

Tasandit, mis läbib fookust risti optilise teljega, nimetatakse f o k a a l t a s a n d i k s.



Joon. 264. Punkti kujutise konstrueerimine nõguspeeglis.



Joon. 265. Küünla kujutis nõguspeeglis.

Joonisel 264 on valguspunkt S asetatud nõguspeegli ette. Vaatleme temast lähtuvaist kiirtest kolme tsentraalset kiirt ja joonestame peegeldunud kiired vastavalt peegeldumisseadustele. Kõik kolm peegeldunud kiirt lõikuvad ühes punktis S_1. Kuna me võtsime kolm meelevaldset tsentraalset kiirt, siis võime oletada, et ka kõik ülejäänud punktist S lähtunud tsentraalsed kiired samuti lõikuvad punktis S_1. Seega S_1 on punkti S kujutiseks. Kui asetada silm joonisel 264 näidatud kohta, siis me näeme punktis S_1 valguspunkti. Järelikult pärast peegeldumist erinevaist eseme punktidest lähtunud tsentraalsed kiired peavad lõikuma vastavais punktides ja nende punktide kogum moodustab eseme kujutise. Kontrollime seda katseliselt.

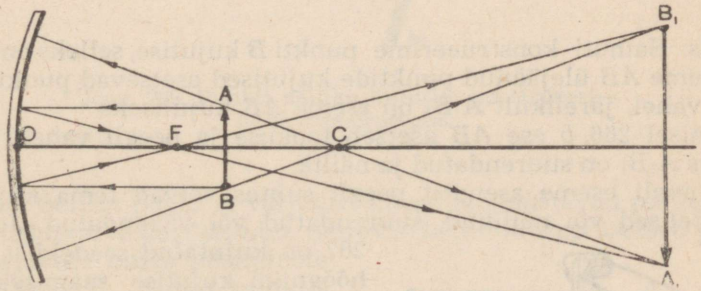
Asetame põleva küünla joonisel 265 näidatud viisil peegli ette ja vaadates sobivast kohast näeme tõepoolest peegli ees küünla vähendatud ja (küünla ja peegli antud asendi puhul) ümberpööratud kujutist. Kui me kohale, kus nägime kujutist, asetame valge paberilehe, siis saame sellel küünlaleegi kujutise, mis on nähtav igast suunast, sest valge paberileht peegeldab valgust difuusselt.

Seega katse kinnitab meie oletust, et kõik ühest punktist lähtuvad tsentraalsed kiired pärast peegeldumist nõguspeeglilt lõikuvad samuti ühes punktis.

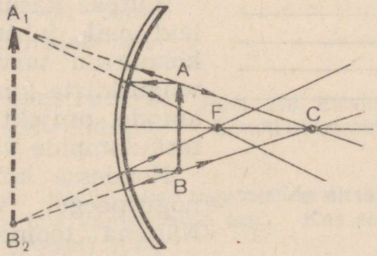
142. Kujutise konstrueerimine nõguspeeglis. Nägime (§ 141), et kõik valguspunktist väljunud tsentraalsed kiired pärast peegeldumist sfäärilises peeglis lõikuvad ühes punktis, s. t. punktikujuline valgusallikas annab peegeldumisel kujutisena punkti.

Seepärast piisab punkti kujutise leidmiseks kahe sellest punktist väljuva kiire käigu tundmisest: nende lõikumispunkt on ka kõigi teiste antud punktist väljunud kiirte lõikumispunktiks. Neid kiiri võib valida täiesti meelevaldselt, kuid kõige kohasem on kasutada kiiri, mille levimissuund peale peegeldumist on juba ette teada. Eseme kujutis moodustub selle eseme üksikute punktide kujutistest.

Olgu meil tarvis konstrueerida eseme AB kujutis nõguspeeglis (joon. 266, *a*).

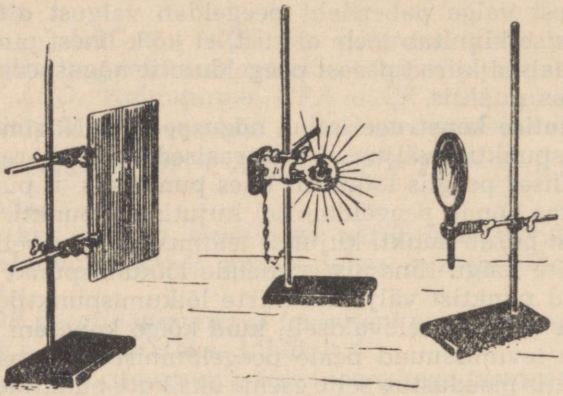


Joon. 266, *a*. Eseme kujutise konstrueerimine nõguspeeglis: ese asetseb fookuse ja peegli keskpunkti vahel, kujutis on tõeline ja suurendatud.



Joon. 266, *b*. Ese asetseb fookuse ja peegli vahel, kujutis on suurendatud ja näilik.

Joonestame kaks punktist A lähtuvat kiirt: üks, mis on paralleelne optilise peateljega, teine — mis läbib keskpunkti C; pärast peegeldumist esimene läbib fookust F, teine kulgeb samas sihis tagasi. Nende kiirte lõikepunkti A_1 läbivad kõik ülejäänud kiired, mis väljuvad punktist A ja peegelduvad: punkt A_1 on punkti A

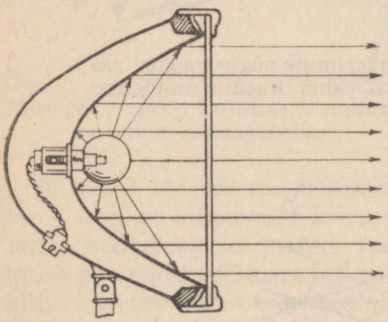


Joon. 267. Lambi hõõgniidi kujutise saamine nõguspeeglis.

kujutis. Samuti konstrueerime punkti B kujutise, selleks on punkt B_1. Eseme AB ülejäänud punktide kujutised asetsevad punktide A_1 ja B_1 vahel, järelikult A_1B_1 on eseme AB kujutiseks.

Joonisel 266, *b* ese AB asetseb fookuse ja peegli vahel. Eseme kujutis A_1B_1 on suurendatud ja näilik.

Sõltuvalt eseme asendist peegli suhtes võivad tema kujutised olla tõelised või näilikud, suurendatud või vähendatud. Joonisel 267 on kujutatud seadeldist lambi hõõgniidi kujutise saamiseks nõguspeeglis.



Joon. 268. Auto esilaterna ehituse skeem.

143. Nõguspeeglite kasutamine. Nõguspeeglit kasutatakse teaduses ja tehnikas väga laialdaselt.

Näiteks kasutatakse nõguspeegleid neil juhtudel, kui mingile kohale on tarvis kontsentreerida valguskiirte kimpu. Nii ehitatakse autode, projektsiooniaparaatide ja taskulampide valgustusseadmed.

Nendesse kõikidesse asetatakse nõguspeegel valgusallika taha. Näitena toome auto esilaterna, mida kujutab joonis 268.

Paraboolsel nõguspeeglil on väga suur tähtsus prožektorite ehitamisel. Prožektor koosneb kahest põhiosast: võimsast valgusalli-

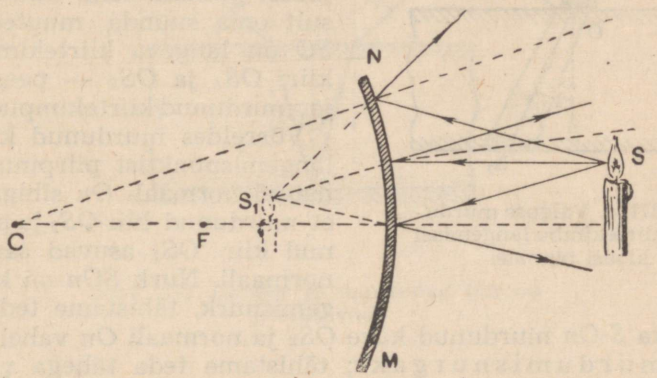
kast (elektrikaarest) ja suurest nõguspeeglist, mis on asetatud valgusallika taha nii, et valgusallikas asuks peegli fookuses.

Prožektorit kasutatakse valgusallikana filmimisel, ehitusplatside, staadionide ja väljakute valgustamisel.

Sõjaasjanduses kasutatakse prožektoreid valgustamiseks ja signaliseerimiseks.

Nõguspeeglid on väga tähtsaiks osadeks teleskoopide-reflektorite ehituses.

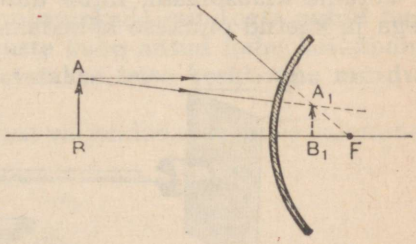
144. Kumerpeegel. Olgu *MN* kumerpeegel (joon. 269). Asetame tema ette punktikujulise valgusallika *S* ja konstrueerime selle



Joon. 269. Punkti näiliku kujutise konstrueerimine kumerpeeglis.

kujutise. Sellest punktist väljuvad kiired moodustavad pärast peegeldumist hajuva kiirtekimbu. Selle kiirtekimbu tipp asetseb peegli taga hajuvate kiirte pikenduste lõikepunktis S_1. Selles punktis silm näeb valguspunkti *S* näilikku kujutist, nagu seda selgitati juba paragrahvis 135. Sõltumatult eseme *AB* asendist kumerpeegli suhtes on tema kujutis peeglis (A_1B_1) alati näilik ja vähendatud.

Eseme kujutise konstrueerimine kumerpeeglis on näidatud joonisel 270.

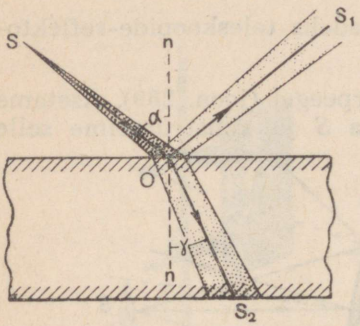


Joon. 270. Eseme näiliku kujutise konstrueerimine kumerpeeglis.

Harjutus 17. Autojuhi kabiini ukse taga on vertikaalselt asetatud peegel, millest autojuht jälgib, mis toimub auto taga. Kas see peegel peab olema tasa-, nõgus- või kumerpeegel? Miks?

145. Valguse murdumisseadused. Kui valguskiir langeb läbipaistva keskkonna siledale pinnale, siis ei toimu mitte ainult kiire

peegeldumine. Kiire langemispunktist väljub veel teine kiir, mis kulgeb teises läbipaistvas keskkonnas. Seda kiirt nimetatakse murdunud kiireks. Murdunud kiire suund üldiselt ei ühti langeva kiire suunaga, kuid nende vahel on kindel seos, mille võib leida katsete põhjal.



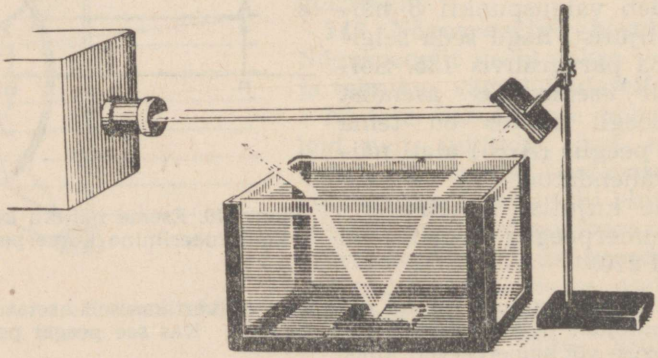
Joon. 271, *a*. Valguse murdumine kiirtekimbu langemisel klaasi pinnale.

Joonisel 271, *a* langeb valguskiirte kimp klaasplaadi poleeritud pinnale. Õhu ja klaasi piirpinnal see kiirtekimp jaguneb kaheks kimbuks: üks neist peegeldub klaasi pinnalt, teine suundub järsult oma suunda muutes klaasi. *SO* on langeva kiirtekimbu telgkiir; OS_1 ja OS_2 — peegeldunud ja murdunud kiirtekimpude kiired.

Võrreldes murdunud kiire sihti langemispunktist piirpinnale tõmmatud normaali *On* sihiga, näeme, et murdunud kiir OS_2 ja peegeldunud kiir OS_1 asuvad samal pool normaali. Nurk *SOn* on kiire langemisnurk, tähistame teda tähega *a;* nurka S_2On murdunud kiire OS_2 ja normaali *On* vahel nimetatakse murdumisnurgaks; tähistame teda tähega γ. Langemisnurga muutumisel muutub ka murdumisnurk. Murdumisnurk võrdub nulliga, kui langemisnurk on null, langemisnurga suurenemisega suureneb ka murdumisnurk; siiski murdumisnurk jääb alati langemisnurgast väiksemaks.

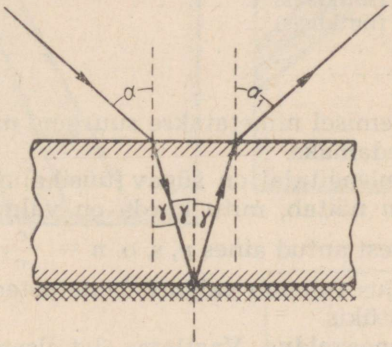
Joonisel 271, *b* on kujutatud seadeldis valguse murdumise vaatlemiseks kiire üleminekul õhust vette ja veest õhku.

Võtame klaasplaadi, mille alumine pind on paralleelne ülemisega ja kaetud õhukese hõbedakihiga (joon. 272). Laseme plaadile



Joon. 271, *b*. Seadeldis valguse murdumise vaatlemiseks üleminekul õhust vette ja veest õhku.

valguskiire, mille langemisnurk olgu α, ja jälgime tema käiku klaasist õhku. Märkame, et murdumisnurk on alati suurem langemisnurgast. Kui alumisele piirpinnale langeva kiire langemisnurk on γ, siis pärast peegeldumist kiire langemisnurk ülemisele pinnale on niisama suur. Väljudes õhku, moodustab kiir nurga α_1. Mõõtes



Joon. 272. Langev ja murdunud kiir on pööratavad.

nurki α_1 ja α, võib veenduda, et nad on võrdsed: $\alpha_1 = \alpha$. Kui langev kiir kulgeb murdunud kiire sihis, siis murdunud kiir kulgeb langeva kiire sihis, s. t. *langev ja murdunud kiir on pööratavad.*

Katsete põhjal on leitud järgmised valguse murdumisseadused:

1. Langev ja murdunud kiir ning langemispunktist keskkondade piirpinnale tõmmatud normaal asetsevad ühes tasapinnas.

2. Kõikide langemis- ja murdumisnurkade muutuste puhul langemis- ja murdumisnurkade siinuste suhe antud kahe keskkonna puhul on jääv suurus, mida nimetatakse teise keskkonna murdumisnäitajaks esimese suhtes.

Matemaatiliselt võib seda seadust väljendada järgmise valemina:

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

kus α on langemisnurk, γ murdumisnurk ja n murdumisnäitaja.

Antud aine murdumisnäitajat vaakuumi suhtes nimetatakse selle aine absoluutseks murdumisnäitajaks.

Praktiliselt määratakse murdumisnäitaja mitte vaakuumi, vaid õhu suhtes. Antud aine murdumisnäitaja leidmiseks vaakuumi suhtes on tarvis selle aine murdumisnäitajat õhu suhtes korrutada õhu absoluutse murdumisnäitajaga 1,0003.

Antud aine murdumisnäitaja väärtused punase valguse kohta on antud järgmises tabelis.

Aine	Murdumisnäitaja punase valguse puhul õhu suhtes
Vesi	1,33
Kvartsklaas	1,46
Kivisool	1,54
Klaas (kerge kroonklaas)	1,51
Klaas (kerge flintklaas)	1,60
Klaas (raske flintklaas)	1,74
Väävelsüsinik	1,62
Teemant	2,40

Kahe aine võrdlemisel nimetatakse suurema murdumisnäitajaga ainet optiliselt tihedamaks.

Valguse murdumisnäitajal on sügav füüsikaline sisu. Absoluutne murdumisnäitaja n näitab, mitu korda on valguse kiirus c suurem valguse kiirusest antud aines v, s. o. $n = \frac{c}{v}$.

See tähtis järeldus tuleneb valguse lainetusteooriast, mille alused esitame XI peatükis.

146. Täielik sisepeegeldus. Vaatleme detailsemalt valguse üleminekut optiliselt tihedamast keskkonnast hõredamasse.

Langegu klaasist õhu ja klaasi piirile *MN* hajuv kiirtekimp. Määrame selle kolme kiirega — kahe äärmise kiirega I ja III ning telgkiirega II (joon. 273, *a*).

Piirpinnal osa kiirtekimbust peegeldub klaasi tagasi, osa väljub õhku. Suurendame pidevalt langemisnurka. Märkame, et langemisnurga suurenemisel peegelduva kimbu heledus kasvab, murdunud kimbul aga väheneb. Mingi langemisnurga γ_0 puhul kiir I libiseb mööda piirpinda (joon. 273, *b*). Sama langemisnurga γ_0 puhul toimub sama nähtus telgkiirega II ja lõpuks ka kiirega III. Edasisel kiire III langemisnurga suurenemisel murdunud kiiri enam pole, kogu langev kiirtekimp peegeldub klaasi (joon. 273, *c*). Sellist nähtust nimetatakse täielikuks sisepeegeldumiseks. Langemisnurka γ_0, mille puhul murdunud kiir libiseb mööda piirpinda, nimetatakse täieliku sisepeegelduse piirnurgaks.

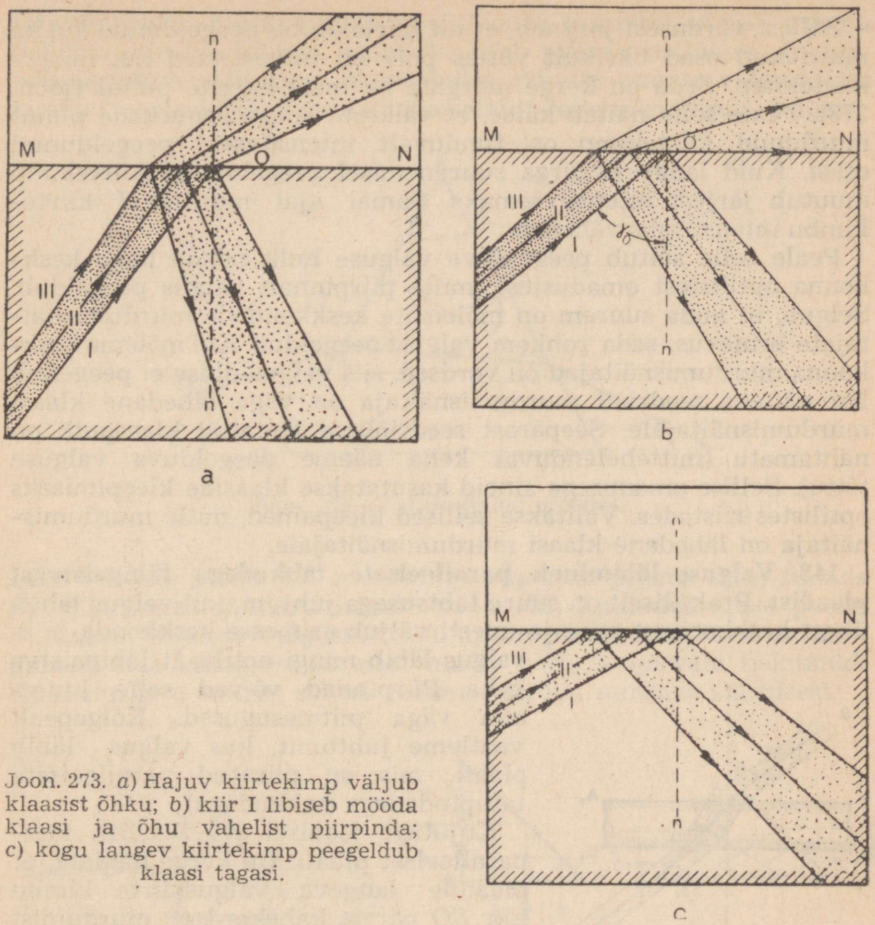
Seega täielik sisepeegeldus esineb valguse üleminekul optiliselt tihedamast keskkonnast hõredamasse juhul, kui kõik kiired vaadeldavast kiirtekimbust langevad piirnurgast suurema nurga all piirpinnale.

Langemisnurga γ_0 puhul murdumisnurk on 90°. Olgu klaasi murdumisnäitaja õhu suhtes n, siis, arvestades langeva ja murduva kiire pööratavust, võime kirjutada:

$$\frac{\sin 90^\circ}{\sin \gamma_0} = n \text{ ehk } \frac{1}{\sin \gamma_0} = n,$$

siit

$$\sin \gamma_0 = \frac{1}{n}.$$



Joon. 273. *a*) Hajuv kiirtekimp väljub klaasist õhku; *b*) kiir I libiseb mööda klaasi ja õhu vahelist piirpinda; *c*) kogu langev kiirtekimp peegeldub klaasi tagasi.

Saadud suhtest on piirnurk arvutatav. Vee puhul ($n = 1{,}33$) on piirnurk 48,5°, klaasil ($n = 1{,}51$) 42°, aga teemandil ($n = 2{,}4$) on piirnurk 24,5°.

Täielikku sisepeegeldumist kasutatakse paljudes optilistes riistades, näiteks välibinoklites, periskoopides jne.

Täieliku sisepeegeldusega on seletatav rida nähtusi, näiteks kastepiiskade sätendamine päikese käes, sädelevad purskkaevud, kalliskivide sära («mäng»), miraažide tekkimine jne.

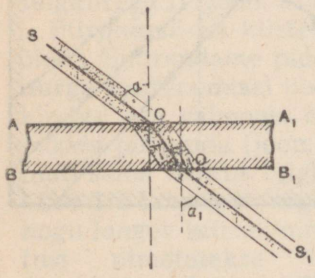
147. Valgusvoo muutumine peegeldumisel ja murdumisel. Oletame, et kahe keskkonna piirpinnale langev valgusvoog Φ ei neeldu teises keskkonnas. Osa temast (Φ_0) peegeldub piirpinnalt keskkonda tagasi, teine osa (Φ_n) tungib teise keskkonda ja levib temas. Sellistel tingimustel

$$\Phi = \Phi_0 + \Phi_n.$$

Sellest võrdusest järgneb, et nii kiirtekimbu peegeldunud kui ka murdunud osad üksikult võttes pole nii intensiivsed kui langev kiirtekimp. Seda on kerge märgata ka meie katsete puhul (joon. 273). Peale selle näitab katse, et väikeste langemisnurkade puhul murdunud kiirtekimp on tunduvalt intensiivsem peegeldunud osast. Kuid langemisnurga suurenemisel peegeldunud kiirtekimp muutub järjest intensiivsemaks. Samal ajal murdunud kiirtekimbu intensiivsus väheneb.

Peale selle sõltub peegelduva valguse hulk nende kahe keskkonna optilistest omadustest, mille piirpinnalt valgus peegeldub. Selgub, et mida suurem on mõlemate keskkondade murdumisnäitajate erinevus, seda rohkem valgust peegeldub. Kui mõlema keskkonna murdumisnäitajad on võrdsed, siis valgus üldse ei peegeldu. Nii näiteks seedriõli murdumisnäitaja on väga lähedane klaasi murdumisnäitajale. Seepärast seedriõlisse asetatud klaaspulk on nähtamatu (mittehelenduvat keha näeme peegelduva valguse tõttu). Sellise omadusega aineid kasutatakse klaaside kleepimiseks optilistes riistades. Valitakse sellised kleepained, mille murdumisnäitaja on lähedane klaasi murdumisnäitajale.

148. Valguse läbiminek paralleelsete tahkudega läbipaistvast plaadist. Praktiliselt on suure tähtsusega juhtum, kui valgus läheb ühest keskkonnast teise ja uuesti väljub esimesse keskkonda, s. o. valgus läbib mingi optiliselt läbipaistva keha. Piirpinnad võivad selle juures olla väga mitmesugused. Kõigepealt vaatleme juhtumit, kus valgus läbib plaati, mis on piiratud paralleelsete tasapindadega (tahkudega).



Joon. 274. Murdumine tasaparalleelses plaadis.

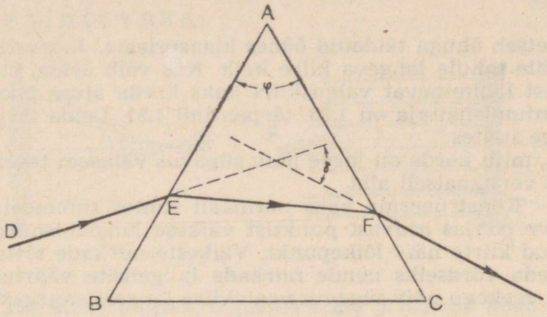
Kujutage joonisel 274 AA_1BB_1 tasaparalleelset plaati. On kerge näidata, et plaadile langeva valguskiirte kimbu kiir SO pärast kahekordset murdumist väljub plaadist suunas OS_1, mis on paralleelne SO-ga.

Tähistame kiire SO langemisnurga tähega α, murdumisnurga aga tähega γ. Tahkude AA_1 ja BB_1 paralleelsuse tõttu klaasi läbiva kiire langemisnurk $\gamma_1 = \gamma$ ja järelikult väljudes temast moodustab murdumisnurga $\alpha_1 = \alpha$. Seega tasaparalleelsest plaadist läbiminekul valguskiir ei muuda oma suunda, ta ainult nihkub. Mida paksem on plaat, seda suurem on nihe. Kui vaadelda eset läbi tasaparalleelse klaasi, siis ta näib oma tõelise asendi suhtes nihutatuna.

Harjutus 18. Kaks teineteisega paralleelselt asetatud paksu klaasplaati on eraldatud õhukihiga. Joonestada valguskiire käik läbi selle süsteemi.

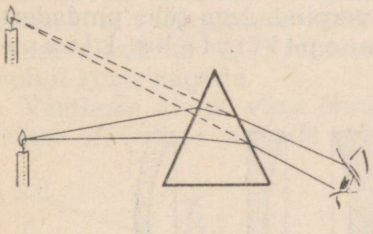
149. Valguse läbiminek kolmetahulisest läbipaistvast prismast. Joonisel 275, *a* on AB ja AC prismat piiravad tasapinnad (prisma

tahud), prisma murdev nurk on φ. Joonise tasapind on risti prisma mõlema murdva tahuga, joonis kujutab prisma ristlõiget. Juhime prisma tahule *AB* mingi ühevärvilise, näiteks punase valguskiirte kimbu (joonisel 275, *a* on näidatud ainult selle kiirtekimbu telgkiir

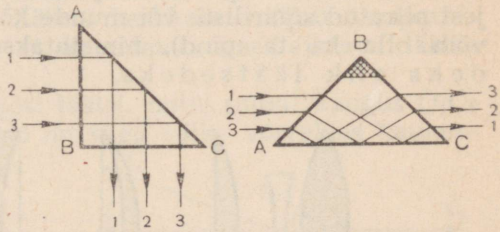


Joon. 275, *a*. Murdumine prismas.

DE). Punktis *E* kiir *DE* murdub ja suundub prisma sisse suunas *EF*. Kiir murdub teistkordselt tahul *AC*, kaldudes aluse poole. Prismast väljunud valguskiirte kimp on pärast kahekordset murdumist oma esialgsest suunast nurga δ võrra kõrvale kaldunud. Kaldenurga δ suurus sõltub prisma murdva nurga φ suurusest.



Joon. 275, *b*. Küünla kujutise vaatlemine läbi kolmetahulise prisma.



Joon. 276. Suunda muutev (vasakul) ja ümberpööray (paremal) prisma.

Kui vaadelda mingit eset läbi kolmetahulise prisma, siis ese näib olevat nihkunud selle nurga serva poole, mis on moodustatud valgusallikast väljunud kiirte teel olevaist tahkudest (joon. 275, *b*).

Kui lasta kiirtekimp võrdhaarsele täisnurksele klaasprismale *ABC* (joon. 276), siis prisma sees kiired peegelduvad täielikult prisma tahult *AC*, sest sel juhul on tahule *AC* langevate kiirte langemisnurk suurem 42°-st, s. o suurem klaasi täieliku peegelduse piirnurgast. Joonisel näidatud asendeis võib täisnurkset prismat *ABC* kasutada valguskiirte kimbu suuna muutmiseks 90° võrra ja mingi optilises riistas saadud kujutise ümberpööramiseks. Viimasel

juhul prisma sees tahult AC peegelduvad alumised kiired osutuvad prismast väljudes ülemisteks, ülemised aga alumisteks kiirteks. Sellist prismat nimetatakse *ümberpööravaks* ja kasutatakse paljudes optilistes riistades, eriti prismabinoklites.

Harjutus 19.

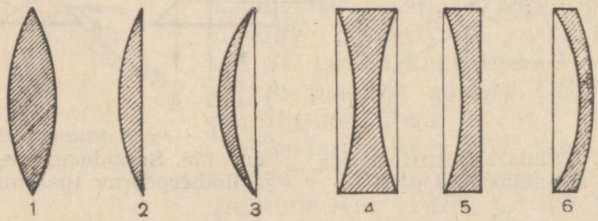
1. Vees asetseb õhuga täidetud õõnes klaasprisma. Joonestada selle prisma ühele murdvale tahule langeva kiire käik. Kas võib öelda, et selline prisma murrab temast läbiminevat valguskiirt kaks korda aluse poole?
2. Vee murdumisnäitaja on 1,33, tärpentinil 1,51. Leida tärpentini murdumisnäitaja vee suhtes.
3. Määrata, mitu korda on järve näiv sügavus väiksem tegelikust, kui vaadelda paadist vertikaalselt alla.

Märkus. Konstrueerida kaks normaali suhtes sümmeetrilist kiirt, mis väljuvad järve põhjas asuvast punktist väikese langemisnurga all, ja määrata murdunud kiirte näiv lõikepunkt. Väikeste nurkade tõttu võib nurkade siinuseid lugeda võrdseiks nende nurkade tangensite väärtustega.

Kas sõltub veekogu näiv sügavus vaatekiire langemisnurgast veepinna suhtes?

4. Määrata valguse kiirus teemandis (murdumisnäitaja on 2,4).
5. Joonestada kiire käik tema üleminekul klaasist õhku, kui kiire langemisnurk on 45° ja klaasi murdumisnäitaja on 1,72.
6. Leida kivisoola täieliku sisepeegelduse piirnurk ($n = 1{,}54$).
7. Määrata kiire nihe läbiminekul tasaparalleelsest klaasplaadist paksusega $d = 3$ cm, kui kiire langemisnurk on 60°. Klaasi murdumisnäitaja $n = 1{,}51$.
8. Leida tagapinnalt hõbetatud 1 cm paksuse tasaparalleelse plaadi esipinnast 4 cm kaugusel oleva eseme kujutise asend, arvestades, et plaadi murdumisnäitaja on 1,51.

150. Läätsed. Valgusele läbipaistvaid kehasid, mis on kahest küljest piiratud sfääriliste või muude kõverpindadega (üks pindadest võib olla ka tasapind), nimetatakse *optilisteks klaasideks ehk läätsedeks*.



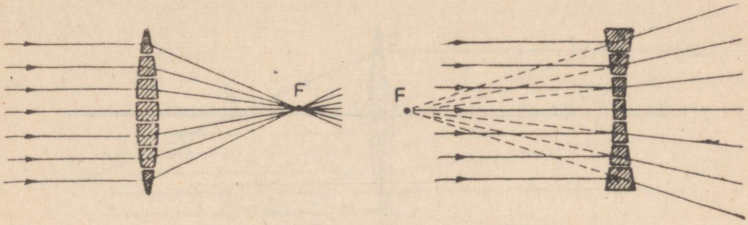
Joon. 277. Läätsede läbilõige: *1, 2, 3* — koondavad läätsed; *4, 5, 6* — hajutavad läätsed.

Kuju poolest võivad läätse piiravad pinnad olla sfäärilised, silindrilised vm. (edaspidi vaatleme ainult sfäärilisi läätsi).

Läätsi, mis on keskkohalt paksemad kui äärtelt, nimetatakse *kumeraiks*; läätsi, mille ääred on paksemad keskkohast, nimetatakse *nõgusaiks*.

Joonisel 277 on kujutatud läbilõikes mitmesuguseid sfääriliste läätsede liike: 1, 2, 3 — kumerläätsed, 4, 5, 6 — nõguslääts ed.

Suuname paralleelse valguskiirte kimbu kumerläätsele ja asetame läätse taha ekraani. Liigutades ekraani läätse suhtes, saame sellel väikese heleda täpi. Kumerlääts, murdes temale langevaid kiiri, koondab neid. Seepärast nimetatakse sellist läätse koondavaks. Nõguslääts, murdes valgust, hajutab kiiri. Sellist läätse nimetatakse hajutavaks.

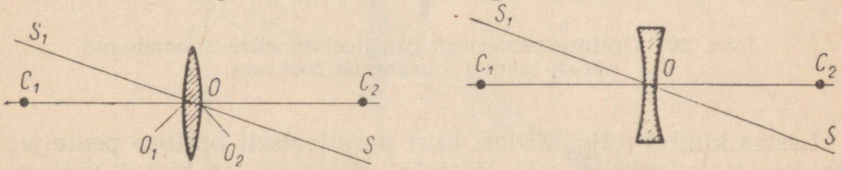


Joon. 278. Kiiri murdes tegutseb lääts prismade koguna.

Joonis 278 selgitab koondavate ja hajutavate läätsede mõju. Koondavat läätse võib vaadelda suure hulga prismade koguna, mille alused on keskkoha pool, aga hajutavat läätse — suure hulga prismade koguna, mille alused on äärte pool.

Kuna prismad murravad valguskiiri aluse poole, kaldenurga suurus sõltub aga prisma murdvast nurgast, siis on arusaadav, et keskkohalt paksemad läätsed murravad kiiri keskkoha poole, s. o. koondavad neid, äärtelt paksemad läätsed murravad kiiri äärte suunas, s. t. hajutavad neid. Läätse keskkoht mõjub tasaparalleelse plaadina: ta ei muuda ei koondava ega hajutava läätse puhul kiirte suunda.

Vaatleme ainult väga õhukesi läätsi, mille puhul kaugus O_1O_2 läätse sfääriliste pindade vahel on väga väike võrreldes kaugus-



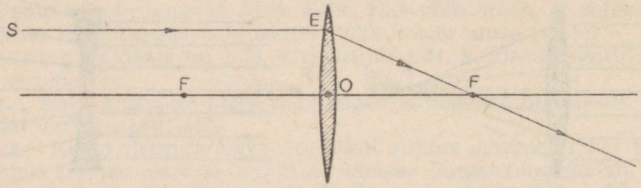
Joon. 279. Läätse optiline telg ja optiline keskpunkt.

tega O_1C_1 ja O_2C_2 (joon. 279). Sellistes läätsedes võib punkte O_1 ja O_2 praktiliselt lugeda liituvaiks üheks punktiks O. Seda punkti O nimetatakse läätse optiliseks keskpunktiks.

Iga sirget, mis läbib optilist keskpunkti, nimetatakse läätse optiliseks teljeks. Läätse sfääriliste murdvate pindade tsentreid C_1 ja C_2 läbivat optilist telge nimetatakse läätse optiliseks peateljeks (joon. 279), teisi — kõrvaltelgedeks.

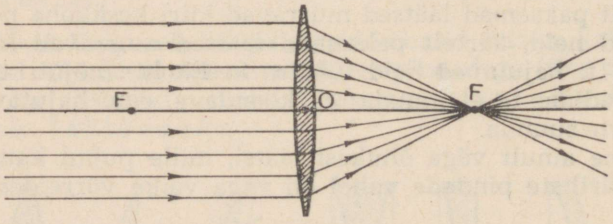
Valguskiir, mis kulgeb piki mingit optilist telge, läbib läätse oma suunda muutmata.

151. Läätse fookus. Kui suunata koondavale läätsele teljelähedane kiir, mis on paralleelne läätse peateljega, siis läätse läbides lõikab kiir telge kindlal kaugusel läätsest — punktist *F*. Kaugust *OF* nimetatakse läätse fookuskauguseks, aga punkti *F* (joon. 280) nimetatakse läätse peafookuseks. Igal läätsel on kaks peafookust, kummalgi pool läätse üks.



Joon. 280. Läätse optilise peateljega paralleelne tsentraalne kiir läbib pärast murdumist fookuse *F*.

Valguse murdumisseadustele toetudes võib teoreetiliselt tõestada, et kõik teljelähedased kiired, s. o. optilise peatelje lähedal kulgevad kiired, mis langevad õhukesele koondavale läätsele paralleelselt oma teljega, koonduvad fookuses. Katse kinnitab seda teoreetilist väidet (joon. 281).



Joon. 281. Optilise peateljega paralleelsed kiired koonduvad pärast läätses murdumist fookuses.

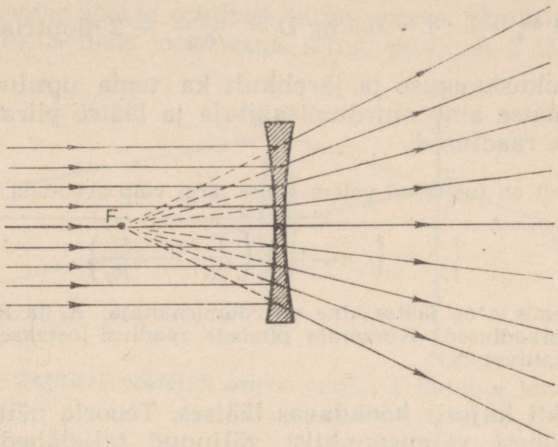
Lastes kimbu teljelähedasi kiiri paralleelselt optilise peateljega õhukesele kaksiknõgusale läätsele, märkame, et kiired väljuvad läätsest hajuva kimbuna. Kui selline hajuv kimp langeb meile silma, siis meile näib, et kiired väljuvad ühest punktist *F* (joon. 282). Seda punkti nimetatakse kaksiknõgusa läätse näilikuks fookuseks (ebafookuseks).

Teljega risti olevat ja fookust läbivat tasapinda *MN* nimetatakse läätse fokaaltasapinnaks (joon. 283). Läätsel on kaks fokaaltasapinda, mis asetsevad üks ühel, teine teisel pool läätse.

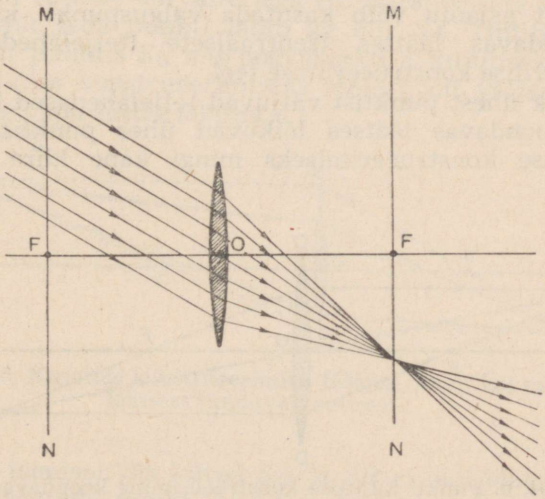
Kui läätsele langeb kiirtekimp, mis on paralleelne mingi optilise kõrvalteljega, siis pärast murdumist läätses see koondub vastaval optilisel kõrvalteljel viimase lõikekohal fokaaltasapinnaga (joonis 283).

152. Läätse optiline tugevus. Fookuskauguse (f) pöördväärtust nimetatakse läätse optiliseks tugevuseks (D):

$$\frac{1}{f} = D.$$



Joon. 282. Kaksiknõgusa läätse näilik fookus.



Joon. 283. Optilise kõrvalteljega paralleelsed kiired koonduvad pärast läätses murdumist punktis, mis asub fokaaltasapinnal.

Läätse optilise tugevuse ühikuks võetakse sellise läätse optiline tugevus, mille fookuskaugus on 1 meeter; seda ühikut nimetatakse dioptriaks.

Kumerläätsedel on optiline tugevus positiivne, nõguslääatsedel negatiivne.

Näide. Kui suur on optiline tugevus kumeral prilliklaasil, mille fookuskaugus $f = 50$ cm?

$$D = \frac{1}{f}\ ;\ f = 0{,}5\ \text{m};\ D = \frac{1}{0{,}5} = 2\ \text{dioptriat.}$$

Läätse fookuskauguse ja järelikult ka tema optilise tugevuse määravad läätse aine murdumisnäitaja ja läätse piiravate sfääriliste pindade raadiused.

Teoreetiliselt on tuletatud valem, mille järgi võib arvutada läätse optilist tugevust:

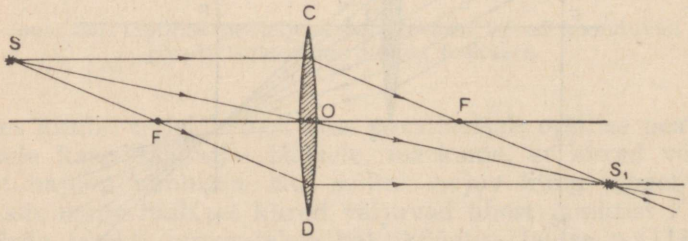
$$\frac{1}{f} = \left(n-1 \right) \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right).$$

Selles valemis n on läätse aine murdumisnäitaja, R_1 ja R_2 läätse pindade kõverusraadiused. Kumerate pindade raadiusi loetakse positiivseiks, nõgusatel negatiivseiks.

153. Punkti kujutis koondavas läätses. Teooria näitab ja katse kinnitab, et ühest valguspunktist väljunud teljelähedased kiired pärast läätse läbimist koonduvad samuti ühes punktis, mida nimetatakse *esimese punkti kujutiseks*.

Seda tähtsat asjaolu võib kasutada valguspunkti kujutise leidmiseks koondavas läätses tsentraalsete (teljelähedaste) kiirte käigu geomeetrilise konstrueerimise teel.

Kuna kõik ühest punktist väljuvad teljelähedased kiired pärast murdumist koondavas läätses lõikuvad ühes punktis, siis piisab punkti kujutise konstrueerimiseks mingi kahe kiire lõikepunkti leidmisest.

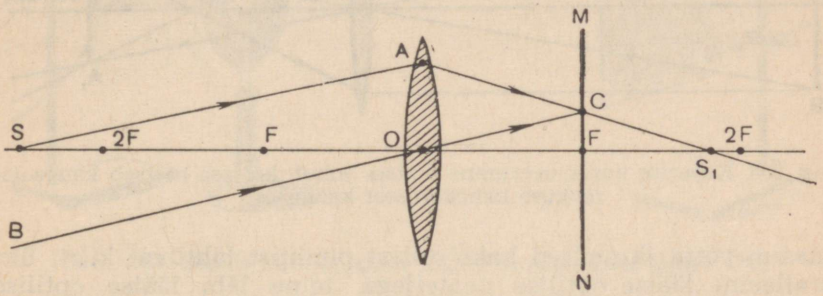


Joon. 284, *a*. Punkti kujutise konstrueerimine koondavas läätses.

Konstrueerime näiteks valguspunkti kujutise (joon. 284, *a*). Kõige lihtsam on seda teostada kiirte abil, mis on näidatud sellel joonisel. Üks neist — optilise peateljega paralleelne kiir SC, murdudes läätses, läbib läätse fookuse F, teine kiir SD, mis läheb punktist S läbi fookuse F, kulgeb läätse taga paralleelselt läätse teljega. Kolmas kiir SO läbib läätse optilise tsentri murdumatult.

Iga teise punktist S lähtuva kiire käiku peaks konstrueerima, kasutades valguse murdumisseadusi, mis oleks aga tunduvalt keerukam. Kuid selleks pole mingit vajadust, sest kõik punktist S väljuvad tsentraalsed kiired pärast murdumist läätses läbivad kindlasti punkti S_1.

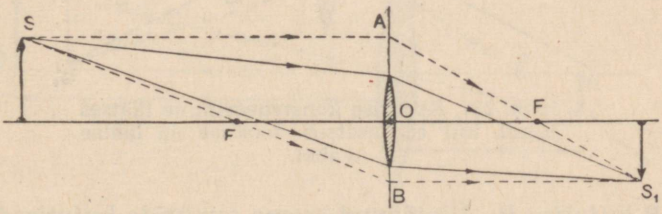
Konstrueerime läätse optilisel teljel asuva punkti S kujutise (joon. 284, *b*). Selleks joonestame mingi punktist S lähtuva kiire.



Joon. 284, *b*. Optilisel peateljel asuva punkti S kujutise konstrueerimine.

Selle kiirega paralleelselt joonestame optilise kõrvaltelje BC, mis lõikab fokaaltasandit punktis C. Pärast murdumist läätses läbib punkti C kogu optilise kõrvalteljega BC paralleelsete valguskiirte kimp, järelikult seda punkti läbib ka kiir SA. Optilist peatelge lõikab see kiir punktis S_1, mis ongi punkti S kujutiseks.

Punkti kujutise konstrueerimiseks meie poolt väljavalitud kiired ei pea tingimata läätse läbima.

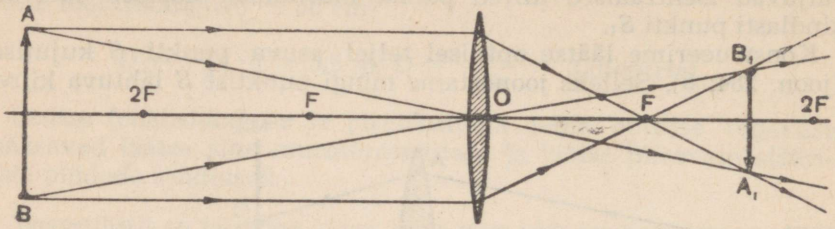


Joon. 285. Kujutise konstrueerimine läätses juhul, kui ese on läätsest tunduvalt suurem.

Nii näiteks joonisel 285 kiired SA ja SB ei läbi läätse, kuid me võime neid kasutada punkti kujutise konstrueerimiseks. Tegelikult määrab kujutise punktist S väljuvate läätse mõõtmetega piiratud kiirte kimp. See reaalne kiirtekimp, murdudes läätses, läbib punkti S_1.

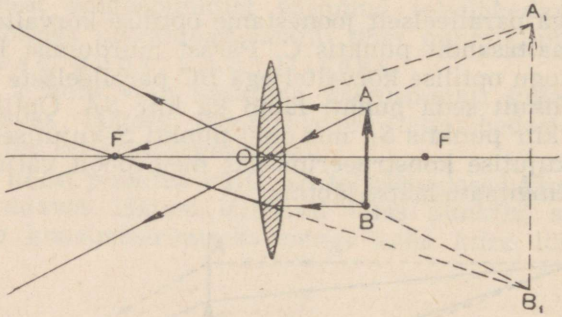
154. Esemete kujutis koondavas läätses. Vaadeldes eset punktide koguna ja kasutades ühest punktist väljunud tsentraalsete kiirte omadust pärast murdumist läätses lõikuda ühes punktis, võib geomeetriliselt konstrueerida eseme kujutist läätses.

Konstrueerime näiteks eseme AB kujutise koondavas läätses (joon. 286). Selleks piisab tema kahe äärmise punkti A ja B kujutise konstrueerimisest. Näiteks punkti A kujutise leidmiseks on



Joon. 286. Kujutise konstrueerimine läätses juhul, kui ese asetseb kaugemal fookuse kahekordsest kaugusest.

lihtsaim võtta järgmised kaks sellest punktist lähtuvat kiirt: üks paralleelne läätse optilise peateljega, teine läbi läätse optilise tsentri, s. o. piki optilist kõrvaltelge AA_1. Pärast läätse läbimist lõikuvad mõlemad kiired punktis A_1. Samal viisil konstrueerime



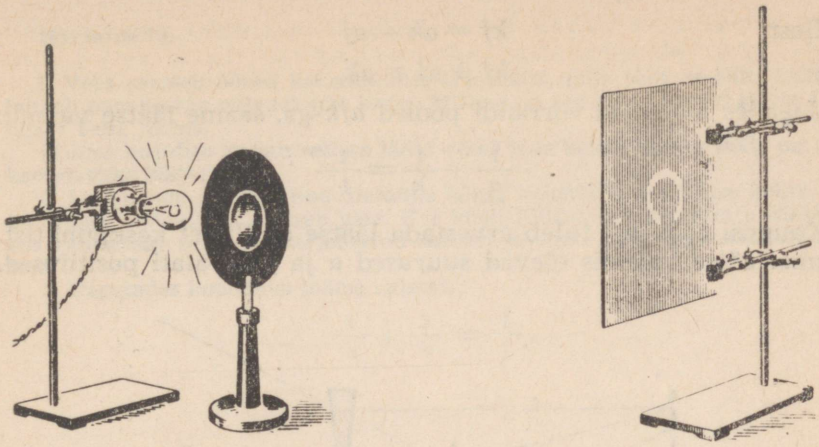
Joon. 287. Kujutise konstrueerimine läätses juhul, kui ese asetseb fookuse ja läätse vahel.

punkti B kujutise B_1. Ülejäänud eseme punktide kujutised asetsevad punktide A_1 ja B_1 vahel. Seega A_1B_1 on eseme AB kujutis. Kujutis A_1B_1 on tõeline, ümberpööratud ja vähendatud.

Joonisel 287 on näidatud läätse fookuse ja läätse vahele asetatud eseme kujutise konstrueerimine. Sel juhul saame näiliku kujutise.

Läätses saadud eseme kujutise iseloom, s. o. tema suurus ja asend, sõltub eseme asendist läätse suhtes. Eseme kujutise asukoha ja tema suuruse võime leida läätse valemi abil. Joonisel 288 on näidatud seadis kujutise saamiseks läätse abil.

155. Läätse valem. Läätse valemi tuletamiseks kasutame joonist 289. Siin AB on ese ja A_1B_1 selle kujutis. Lähtudes täisnurksete kolmnurkade FOC ja FA_1B_1 sarnasusest, võime kirjutada:

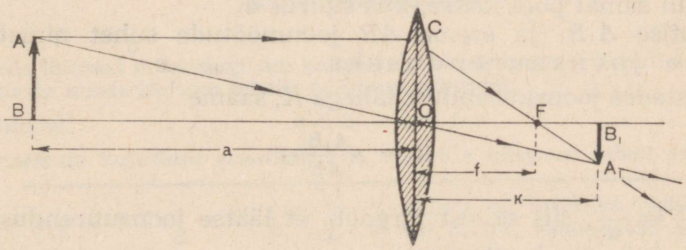


Joon. 288. Seadis mitmesuguste kujutiste saamiseks läätse abil.

$$\frac{OC}{A_1B_1} = \frac{FO}{FB_1}. \tag{1}$$

Kolmnurkade ABO ja A_1B_1O sarnasusest saame:

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{BO}{B_1O}. \tag{2}$$



Joon. 289. Läätse valemi tuletamiseks.

Et $AB = OC$, siis võrrete (1) ja (2) vasakud pooled on võrdsed. Seega peavad olema võrdsed ka nende võrrete paremad pooled, saame:

$$\frac{FO}{FB_1} = \frac{BO}{B_1O}.$$

Asendades $FO = f$; $FB_1 = k - f$, kus $k = OB$ — kujutise kaugus läätsest; $OB = a$ — eseme kaugus läätsest, saame:

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

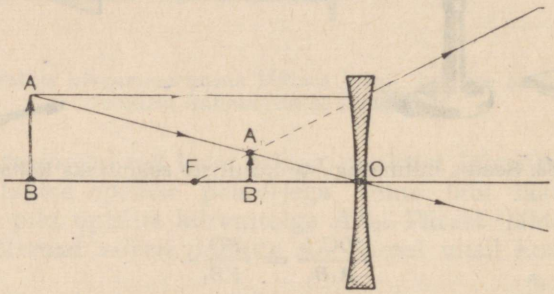
millest: $kf = ak - af$

või $kf + af = ak.$

Jagades mõlemad võrrandi pooled afk-ga, saame läätse valemi:

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

Kaugusi a, k ja f tuleb arvestada läätse optilisest keskpunktist. Kumerläätse valemis olevad suurused a ja f on alati positiivsed,



Joon. 290. Punkti kujutise konstrueerimine kaksiknõgusas läätses.

kuid suurus k on näilike kujutiste puhul negatiivne, sest ta asetseb sel juhul samal pool läätse, kus suurus a.

Kujutise A_1B_1 ja eseme AB joonmõõtude suhet nimetatakse läätse joonsuurenduseks.

Tähistades joonsuurendust tähega K, saame

$$K = \frac{A_1B_1}{AB}.$$

Et $\frac{A_1B_1}{AB} = \frac{k}{a}$, siis sellest järgneb, et läätse joonsuurendus

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

156. Kaksiknõgus lääts. Konstrueerime punkti kujutise, mille tekitab kaksiknõgus lääts. Valguspunktist S lähtunud kiired kulgevad pärast läätsest läbiminekut hajuva kimbuna (joon. 290). Meile näib, et need kiired väljuvad ühest läätse ees asetsevast punktist S_1, mis ongi punkti S näilikuks kujutiseks.

Tehes katseid kaksiknõgusa läätsega, on kerge veenduda, et tema poolt tekitatud eseme kujutised on alati näilikud, vähendatud ja pärispidised, sõltumata sellest, millisel kaugusel läätsest asetseb ese.

Seda võib näidata ka graafiliselt (joon. 291).

Harjutus 20.

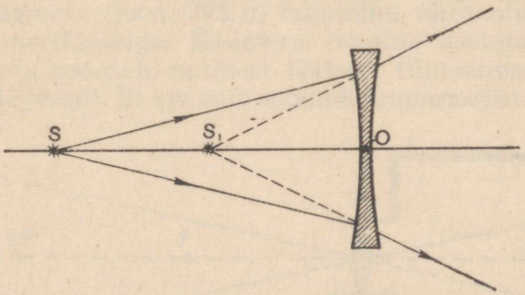
1. Vees asetseb õõnes kaksikkumer klaasläätS, mille sees on õhk. Läätsele langeb paralleelne valguskiirte kimp. Milline on see kimp pärast läätse läbimist? Teha joonis!

Millise kujutise annab selline lääts vees? Kas kaksikkumer lääts on alati koondavaks läätseks?

2. Lahendada analoogiline ülesanne õõnsa kaksiknõgusa läätse kohta, mis on õhuga täidetud ja asetseb vees. Kui kooli füüsikakabinetis on uuriklaase, siis valmistage neist ülalkirjeldatud läätsed ja tehke nendega vastavaid katseid.

3. Kasutades koondava läätse valemit:

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



Joon. 291. Eseme kujutise konstrueerimine kaksiknõgusas läätses.

arvutada läätsest mitmesugustel kaugustel olevate esemete kujutiste asukoht ja määrata nende iseloom tabelis näidatud juhtudel.

Juhtudel $a < 2f$ ja $a < f$

konstrueerida kujutised graafiliselt ja võrrelda tulemusi tabeli andmetega:

Jrk. nr.	a	k	Milline on kujutis: tõeline või näilik, vähendatud või suurendatud ja kus ta asub läätse suhtes
1.	$a \to \infty$		
2.	$a > 2f$		
3.	$a = 2f$		
4.	$2f > a > f$		
5.	$a = f$		
6.	$a < f$		

4. Kirjutada hajutava läätse valem, pidades silmas, et kaugust läätse optilisest keskpunktist punkti näiliku kujutiseni loetakse negatiivseks.

5. Määrata läätsede optilised tugevused, kui läätsede fookuskaugused on 10 cm ja —10 cm!

6. Millisel kaugusel läätsest, mille fookuskaugus $f = 10$ cm, asetseb eseme kujutis, kui ese asub 50 cm kaugusel läätsest?

7. Kaksikkumerast läätsest 40 cm kaugusel asuva eseme kujutis tekkis 15 cm kaugusel läätsest. Määrata läätse fookuskaugus ja kujutise suurus, kui eseme suurus on 60 cm.

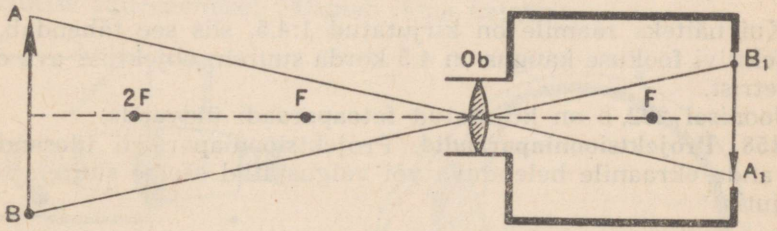
8. Fotokaamera objektiivi fookuskaugus on 13,5 cm. Selle kaameraga tehtava ülesvõtte ajal oli kaamera pikkus 15 cm, eseme kujutise suurus negatiivil oli 2 cm. Kui suur oli ese tegelikult?

9. Hõõglambi ja ekraani vaheline kaugus $l_1 = 150$ cm. Nende vahele asetati koonduv lääts, mis andis ekraanil hõõgniidi terava kujutise läätse kahe asendi puhul. Kui suur on läätse fookuskaugus, kui läätse mainitud asendite vaheline kaugus $l = 30$ cm?

VIII PEATÜKK

OPTILISED RIISTAD. NÄGEMINE

157. Fotoaparaat. Fotoaparaadi põhiosadeks on kaamera ja objektiiv. Kaamera (joon. 292, *a*) tagumine, ekraanina töötav sein on suletud mattklaasiga. Kaamera esiseina asetatakse objektiiv *Ob*, mis koosneb mitmest läätsest (lihtsaimal juhul ühest koondavast läätsest). Et ese võib asuda fotoaparaadist mitmesugus-



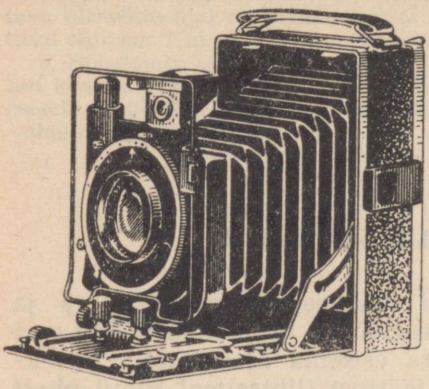
Joon. 292, *a*. Objektiiviga fotokaamera skeem.

tel kaugustel, siis esemest terava kujutise saamiseks tehakse kaamera lõõtsataoliste külgseintega, mis võimaldab mattklaasi või objektiivi liigutada. Kaamera mattklaasile saadakse eseme AB tõeline ümberpööratud kujutis A_1B_1, mida saab jäädvustada, asendades mattklaasi fotoemulsiooni õhukese kihiga kaetud plaadi või lindiga. Pildi nähtavaks tegemiseks töödeldakse plaati või filmi spetsiaalsete lahustega (reaktiividega).

Plaadile langev valgusenergia hulk on fotografeerimisel suure tähtsusega. Selle energia hulk on võrdeline plaadi valgustamisajaga (ekspositsiooniaja ehk säritusajaga). Säritusaeg sõltub pildistatava eseme valgustustugevusest ja fotoplaadi valgustundlikkusest. Kuid peale selle sõltub plaadile langeva energia hulk objektiivi omadustest.

Fotoplaadi valgustustugevus sõltub kaamerasse tunginud valgusvoost ja plaadi kaugusest objektiivist. Kaamerasse tunginud valgusvoogu piirab objektiivi ava. Valgusvoog on eseme ja objektiivi

teatud vahemaa puhul võrdeline ava pindalaga, s. t. ava diameetri ruuduga (d^2). Kui ese asub küllalt kaugel, siis asetseb fotoplaat objektiivi fokaaltasandi lähedal, järelikult tema kaugus objektiivist on f. Kuid valgustustugevus on pöördvõrdeline selle kauguse ruuduga. Seega plaadi valgustustugevus on võrdeline d^2-ga ja pöördvõrdeline f^2-ga. Suurust $\frac{d^2}{f^2}$ nimetatakse objektiivi valgusjõuks. Praktikas kasutatakse sageli suurust $\frac{d}{f}$, mida nimetatakse suhteliseks avaks. Objektiivide raamidel on märgitud objektiivi fookuse kaugus f ja suhteline ava, väljendatuna arvu 1 ja suhte $\frac{f}{d}$ jagatisena.

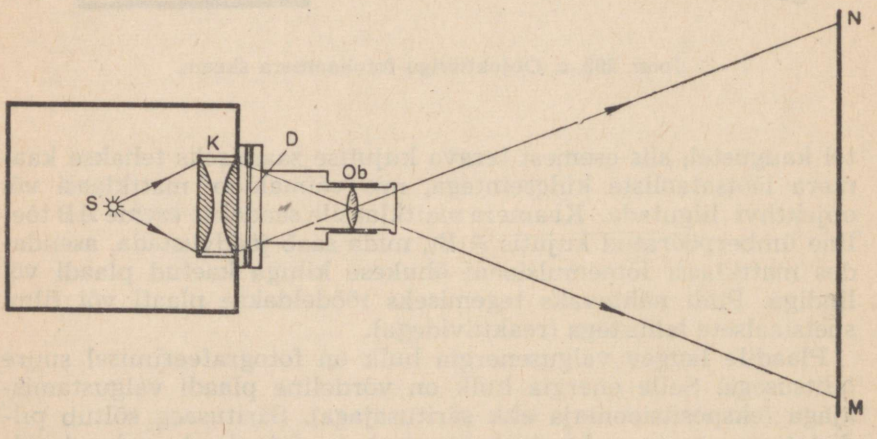


Joon. 292, *b*. Fotoaparaadi üldvaade.

Kui näiteks raamile on kirjutatud 1:4,5, siis see tähendab, et objektiivi fookuse kaugus on 4,5 korda suurem objektiivi ava diameetrist.

Joonisel 292, *b* on kujutatud fotoaparaadi üldvaade.

158. Projektsiooniaparaadid. Projektsiooniaparaadi ülesandeks on anda ekraanile helenduva või valgustatud eseme suurendatud kujutis.



Joon. 293. Projektsiooniaparaadi ehituse skeem.

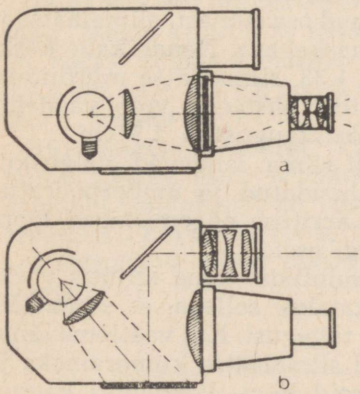
Joonisel 293 on antud klaasil olevate jooniste (diapositiivide) projekteerimiseks kasutatava projektsiooniaparaadi ehituse skeem. Projektsiooniaparaadi tähtsamaks optiliseks osaks on objektiiv *Ob*,

mis on ühe koondava läätsena töötav läätsede süsteem. Objektiivi ülesanne on anda ekraanile *MN* diapositiivi *D* tugevasti suurendatud kujutist. Selleks asetatakse diapositiiv objektiivi fokaaltasapinna lähedusse. Objektiivi võime nihutada kujutise teravustamiseks — «fookustamiseks».

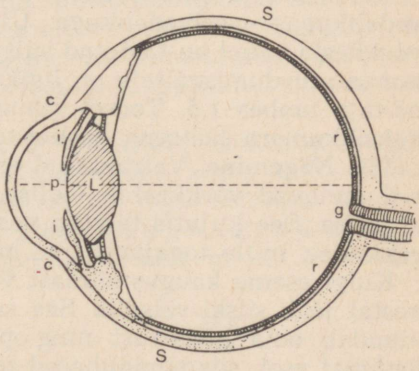
Et suunata objektiivi kogu valgust, mis tuleb objektiiviga võrreldes tavaliselt küllalt suurte mõõtmetega diapositiivilt, kasutatakse kondensorit *K*. Kondensor on suurte mõõtmetega lühifookuseline läätsede süsteem. Kondensor asetatakse nii, et valgus koonduks temalt objektiivi keskkohta.

Projektsiooniaparaadi valgusallikaina kasutatakse kaarlampe või spetsiaalseid projektsiooniaparaatidele valmistatud hõõglampe võimsusega 300, 500 ja 1000 W.

Praktiliselt on projektsiooniaparaadi joonsuurendus $\frac{k}{f}$, kus k on kaugus objektiivi ja kujutise (s. o. ekraani) vahel; f — objektiivi fookuskaugus. Seepärast on suurema suurenduse saamiseks tarvis ekraan viia aparaadist kaugemale või kasutada lühema fookuskaugusega objektiivi. Kuid seejuures on tarvis silmas pidada, et kujutise suurenemisel väheneb tema heledus.



Joon. 294. Epidiaskoop:
a — töötab alumine objektiiv;
b — töötab ülemine objektiiv.



Joon. 295. Silma läbilõige.

Läbipaistmatute esemete, näiteks paberil või raamatuis olevate jooniste projekteerimiseks ekraanile kasutatakse laialdaselt erilise konstruktsiooniga projektsiooniaparaate — episkoope. Nendes aparaatides valgustatakse projekteeritavat eset (joonist või joonestust) tugevasti küljelt lampide ja peeglitega ning projekteeritakse objektiiviga ekraanile. Tänapäeval kasutatakse projekteerimiseks laialdaselt riistu, milles on liidetud seadmed läbipaistvate (dia) ja läbipaistmatute (epi) esemete projekteerimiseks. Selliseid riistu

nimetatakse epidiaskoopideks. Joonisel 294 on epidiaskoobi skeem. Joonisel 294, *a* on kujutatud seadeldis diapositiivi projekteerimiseks — töötab alumine objektiiv. Alumisel joonisel 294, *b* on näidatud seadeldis läbipaistmatu pildi projekteerimiseks — töötab ülemine objektiiv.

159. Silm. Joonis 295 kujutab inimese silma läbilõiget. Klaaskeha välist kihti nimetatakse valgekestaks (*SS*), selle eesmist läbipaistvat osa (*CC*) nimetatakse sarvkestaks. Valgekesta sisekülg on kaetud soonkestaga, mis koosneb veresoontest. Eesosas muutub soonkest vikerkestaks (*ii*), mille keskosas on ümmargune silmaava (*P*).

Silma sees asub soonkestal võrkkest (*rr*), mis kujutab enesest nägemisnärvi harusid, mille otsad koosnevad erilistest rakkudest — nn. kolvikestest ja kepikestest.

Vikerkesta taga silma sisemises õõnes asetseb läbipaistev kõhrjas keha *L* — silmalääts. Silmalääts võib eriliste lihaste abil oma kumerust muuta. Silmaläätse vastas võrkkestal asub kollane tähn *g*, mis on suurima valgustundlikkusega.

Lihaste abil asetub silm selliselt, et eseme kujutis langeks kollasele tähnile.

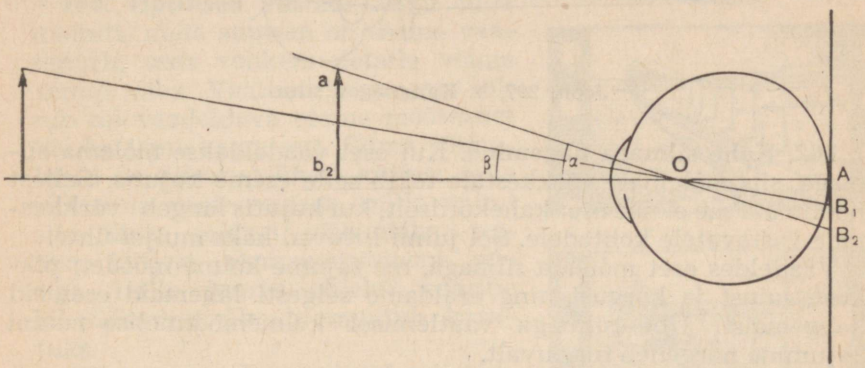
Sarvkesta ja silmaläätse vaheline ruum on täidetud värvitu vedelikuga — vesivedelikuga. Ülejäänud osa silmast silmaläätse ja võrkkesta vahel on täidetud sültja klaaskehaga. Nende kahe keskkonna murdumisnäitaja on ligikaudu 1,33, silmaläätse murdumisnäitaja umbes 1,5. Tervet silma optilist süsteemi võib vaadelda kaksikkumera läätsena keskmise fookuskaugusega 1,5 cm.

160. Nägemine. Valgustatud esemelt silma langevad valguskiired annavad võrkkestal tõelise, vähendatud ja ümberpööratud kujutise. See kujutis tekitab vastava ärrituse nägemisnärvi lõpprakkudes, mille tagajärjel me näemegi eset.

Kuigi eseme kaugus silmast võib muutuda, tema kujutis võrkkestal jääb siiski selgeks. See saavutatakse sellega, et silmalääts muudab oma kumerust ning optilist tugevust. Kui vaatleme lähedasemat eset, siis silmalihased teevad silmaläätse kumeramaks ja ta murrab rohkem temast läbiminevaid kiiri. Vaadeldes kaugemaid esemeid, muutub silmalääts tasasemaks ja vähem murdvaks. Seda silma omadust kohaneda vaadeldavate esemete kaugusega nimetatakse akommodatsiooniks. Kuid silma akommodatsioonil on piir: väga lähedasi esemeid me ei suuda selgelt näha, sest me ei saa võrkkestale nende esemete teravat kujutist.

Olgu *O* (joon. 296) silma optiline keskpunkt. Konstrueerime võrkkestale eseme ab_2 kujutise AB_2. Nurka α nimetatakse vaatenurgaks. Eseme kaugenemisel silmast jääb tema kujutis akommodatsiooni tõttu võrkkestale, kuid väheneb ($AB_1 < AB_2$). Samuti väheneb vaatenurk β. Kui eemaldada ese väga suurele kaugusele, siis tema vaatenurk muutub väga väikeseks, punktid *A* ja B_1 lähenevad niivõrd, et me pole enam võimelised eraldama eseme üksikosi.

Kui eseme kujutis võrkkestal on niivõrd väikene, et ta tekib ainult ühel närviotsal, siis silmas saame temast ainult punktikujulise kujutise. Et kaht punkti silm näeks erinevate punktidena, ilma ühte liitumata, siis peab nende kujutiste kaugus võrkkestal olema vähemalt võrdne kahe närviotsa vahelise kaugusega. Katse näitab, et selleks peab vaatenurga suurus olema vähemalt 1 nurgaminut.

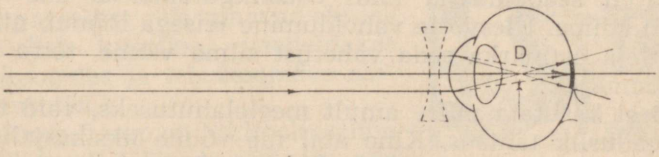


Joon. 296. Võrkkestal tekib eseme kujutis.

Mida suurem on vaatenurk, seda suuremale hulgale närviotstele tekib eseme kujutis ja seda selgemalt on ta nähtav. Kaugust, mis on kõige sobivam eseme vaatlemiseks, nimetatakse *parima nägemise kauguseks*. Normaalse silma puhul on see kaugus ligikaudu 25 cm.

161. Nägemisdefektid. Prillid. Pingutusteta olekus normaalse silma fookus asub võrkkestal. Kuid esineb silmi, mille fookus samadel tingimustel on võrkkesta ees või taga. Esimesel juhul on tegemist *lühinägeva*, teisel juhul *kaugnägeva* silmaga.

Lühinägeva silma optiline tugevus on suurem kui normaalsel silmal.

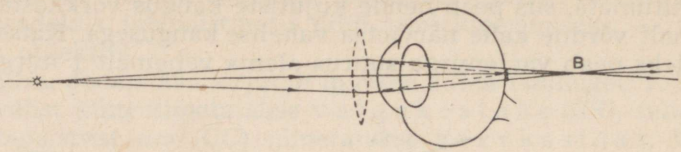


Joon. 297, *a*. Lühinägev silm. Pidevad jooned kujutavad kiirte käiku, kui prille ei kasutata, punktiirjooned kujutavad kiirte käiku prillide kasutamise puhul.

Valguskiired, mis tulevad mingilt kaugelt esemelt, lühinägevas silmas ei koondu võrkkestal, vaid lähemal, punktis *D* (joon. 297, *a*); sellepärast näevad lühinägevad inimesed kaugeid esemeid segaselt. Lühinägevust võib parandada nõgusate prillide kandmisega.

Kaugnägeva silma optiline tugevus on normaalsest väiksem,

seetõttu suhteliselt lähedastelt esemetelt tulevad kiired koonduvad võrkkesta taga punktis *B* (joon. 297, *b*). Seda viga saab parandada kumerate prillide kandmisega.



Joon. 297, *b*. Kaugnägev silm.

162. Kahe silmaga nägemine. Kui eset vaadeldakse mõlema silmaga, siis mõlemale võrkkestale tekib selle eseme kujutis. Sellest hoolimata me ei näe eset kahekordselt, kui kujutis langeb võrkkestade vastavatele kohtadele. Sel juhul liituvad kaks muljet ühte.

Vaadeldes eset mõlema silmaga, me tajume kolme mõõdet: pikkust, laiust ja kõrgust ning eraldame selgesti lähemaid esemeid kaugemaist. Ühe silmaga vaatlemisel kolmemõõtmelise ruumi tajumine nõrgeneb tunduvalt.

Nägemine kahe silmaga võimaldab meil otsustada eseme suuruse ja kauguse üle.

Vaadeldes eset kahe silmaga, suuname silmade teljed kord eseme lähedasse, kord kaugemasse punkti. Seejuures silmalihased pingutuvad erinevalt. Elukogemuste põhjal lihaste pingutusastme järgi me otsustame, kui kaugel on ese.

163. Nägemismulje kestus. Kino. Võrkkesta ärritus ei kao silmapilkselt teda tekitava valguse kadumisel, vaid püsib ligikaudu 0,1 sekundit. Seepärast rida nägemismuljeid, mille vaheajad ei ületa 0,1 sekundit, annavad ühteliituva mulje. Sellele põhineb kino.

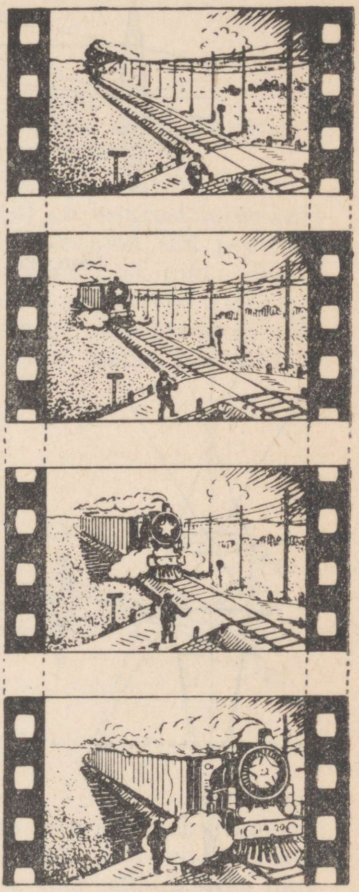
Pikale läbipaistvale tselluloidlindile tehakse rida fotoülesvõtteid mingist liikuvast esemest (joon. 298). Sel viisil valmistatud linti projekteeritakse ekraanile projektsiooniaparaadi abil, mis on varustatud seadeldisega lindi edasiliigutamiseks ühe ülesvõtte (kaadri) kaupa. Ülesvõtte vaheldumine teisega toimub nii kiiresti, et vaatleja ei märka seda vahetust silma võime tõttu säilitada nägemismuljet.

Kino ei kasutata mitte ainult meelelahutuseks, vaid tal on ka suur teaduslik tähtsus. Kino abil me võime üksikasjaliselt vaadelda mitmesuguste protsesside käigu üksikfaase, pannes nende ülesvõtteid liikuma ekraanil mistahes kiirusega. Niiviisi me võime lühikese aja vältel vaadelda näiteks selliseid pikaajalisi protsesse, nagu lille arenemine ja planeetide liikumine tähtede suhtes. Sel otstarbel tehakse järjest rida ülesvõtteid küllalt suurte võrdsete ajavahemike järel ja neid ülesvõtteid lastakse läbi kinoaparaadi normaalse kiirusega 25 ülesvõtet sekundis.

Täpselt samuti võib saada aeglustatud pilte näiteks sellistest protsessidest, nagu mürsu lend kahurist. Selleks on tarvis teha ülesvõtteid väga suure kiirusega.

Sellise kiirusega filmimine toimub sekundi murdosa vältel, mille jooksul saadakse rida ülesvõtteid, mis ajaliselt erinevad üksteisest sekundi üliväikeste murdosade tõttu. Projekteerimisel mööduvad meie eest ülesvõtted normaalse kiirusega, umbes 25 võtet sekundis, mistõttu me näeme filmitud kiiret nähtust aeglustatuna (nn. aegluubis) ja suudame eraldada selle nähtuse üksikfaase.

164. Optilised riistad. Nagu juba mainiti, mida suurem on eseme vaatenurk, seda rohkem detaile võime temal näha. Vaatenurga suurus sõltub nii vaadeldava eseme mõõtmeist kui ka tema kaugusest. Silma võimalused on piiratud ühest küljest selle väiksema vaatenurgaga, mille puhul silm üldse midagi võib näha, teisest küljest akommodatsiooni piiriga, mille juures objekti edasine lähendamine silmale muutub kasutuks.



Joon. 298. Kinopildid (kaadrid).

Mitmesugused optilised riistad, suurendades vaatenurka, võimaldavad paljukordselt suurendada silma loomulikku nägemisvõimet.

Vaatenurka suurendavad optilised riistad jagunevad kahte rühma:

1) riistad väikeste esemete vaatlemiseks (mikroskoobid);

2) riistad kaugete objektide vaatlemiseks (teleskoobid).

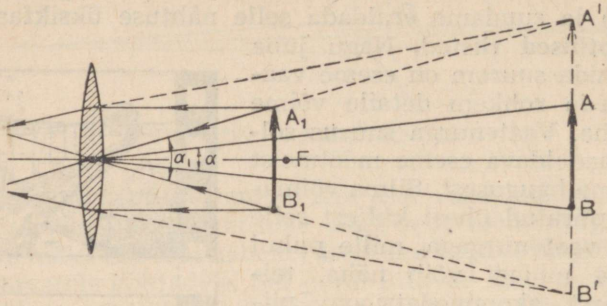
Esimesse rühma kuuluvad luup ja mikroskoobid, teise — pikksilmad, binoklid, refraktorid, reflektorid jne.

Erinevalt projektsiooniaparaadist ja fotoaparaadist, mis annavad ekraanile tõelise kujutise, vaadeldakse mikroskoopides ja teleskoopides näilikke kujutisi.

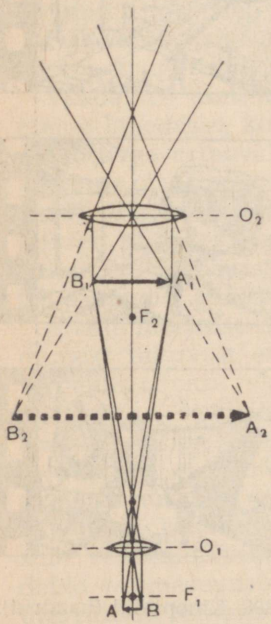
165. Luup. Luup on lühifookuseline kumerlääts või läätsede süsteem, mis töötab ühe läätsena.

Luubi töötamist kujutab joonis 299. Eseme AB vaatenurk on parima nägemise kaugusel α. Kui see nurk on väga väike, siis on eseme üksikosi raske eraldada. Vaatenurga suurendamiseks võib eset lähendada silmale asendisse A_1B_1. Selles asendis on eseme vaatenurk α_1, mis on suurem kui α. Küid ka sel juhul võivad eseme detailid olla eraldamatud selle tõttu, et ese asetseb liiga lähedal silmale (asub silma akommodatsiooni piirist lähemal).

Kuid kui asetame eseme A_1B_1 ja silma vahele luubi selliselt, et tema abil tekkiv eseme kujutis tekiks asendis $A'B'$ (see on siis, kui ese asub luubi fookuse ja tema optilise tsentri vahel), siis näeme eset parima nägemise kaugusel suurendatud vaatenurga α_1 all.



Joon. 299. Luubi töötamise skeem.



Joon. 300. Kujutise konstrueerimine mikroskoobis.

Praktiliselt kasutatakse luupe fookuskaugusega 100 kuni 10 mm.

Jooniselt 299 on näha, et luubi suurendus $K = \frac{D}{f}$, kus D on parima nägemise kaugus, f — läätse fookuskaugus (luubi tsentrit võib praktiliselt lugeda ühtivaks silma tsentriga).

Et $D = 250$ mm, siis tavaliselt kasutatavate luupide suurendused on 2,5 kuni 25.

Väga väikeste esemete vaatlemiseks kasutatakse mikroskoope.

166. Mikroskoop. Mikroskoobi optiline süsteem (joon. 300) koosneb objektiivist O_1 ja okulaarist O_2, mille optilised teljed ühtivad. Ese AB asetatakse objektiivi ette veidi kaugemale fookusest.

Objektiiv annab tõelise suurendatud ja ümberpööratud kujutise A_1B_1; selle asendit võib määrata tavalisel viisil, suunates eseme punktidest ühe kiire paralleelselt optilise teljega, mis murdudes läätses O_1 läbib peafookuse F_1, ja teise kiire läbi läätse optilise keskpunkti. Seda kujutist vaadeldakse okulaariga O_2, mis annab luubina töötades näiliku suurendatud ja esemega AB võrreldes ümberpööratud kujutise A_2B_2. Kui objektiivi ja okulaari teineteise poole

pööratud fookuste vahemaa tähistada tähega δ, siis objektiivi suurendus on $\frac{\delta}{f_1}$, kus f_1 on objektiivi fookuskaugus; okulaari kui tavalise luubi suurendus on $\frac{D}{f_2}$, kus D on parima nägemise kaugus ja f_2 — okulaari fookuskaugus.

Järelikult kogu mikroskoobi suurendus

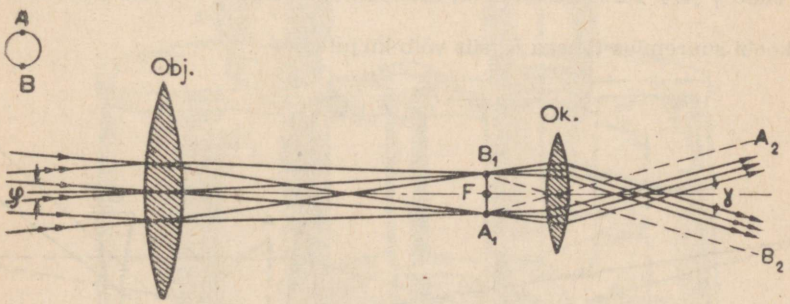
$$K = \frac{\delta D}{f_1 f_2}.$$

Nagu objektiiv, nii on ka okulaar keeruline läätsede süsteem, mille ülesandeks on kindlustada kujutise hea kvaliteet.

Tänapäeva optiliste mikroskoopide suurendus ulatub 2500-ni.

Osakesed mõõtmetega alla 0,3 mikroni (μ) on mikroskoobis eraldamatud. Selle põhjuseks on valguse difraktsioon (IX peatükk).

167. Refraktor. Teleskoop on astronoomiline riist, mida tarvitatakse taevakehade vaatlemiseks. Teleskoobid jagunevad refraktoriteks, milles vaatenurga suurendamine saavutatakse läätsede süsteemi abil, ja reflektoriteks, mille peaosaks on paraboolne peegel.



Joon. 301. Kiirte käik refraktoris.

Refraktori optiline süsteem on keerukas. See koosneb kumerast pikafookuselisest objektiivist *Obj.* (joon. 301), mis on pööratud eseme (objekti) poole, ja kumerast väikese fookuskaugusega okulaarist *Ok.*, mis asub silma ees. Sellist refraktorit nimetatakse Kepleri pikksilmaks. Objektiivi ülesanne on anda taevakeha tõeline kujutis. Objektiivi fookuskaugusega võrreldes suurel kaugusel oleva taevakeha mistahes punktist tulevad kiired on praktiliselt paralleelsed, seepärast tema tõeline ümberpööratud ja vähendatud kujutis tekib objektiivi fokaaltasapinnal, või täpsemalt, väga lähedal sellele.

Joonise 301 ülemises osas on tingimisi kujutatud teleskoobis vaadeldav täht.

Olgu *A* ja *B* kaks mingisugust diametraalselt asetsevat vaadeldava tähe punkti. Joonisel 301 punktist *A* väljuvad kiired on tähis-

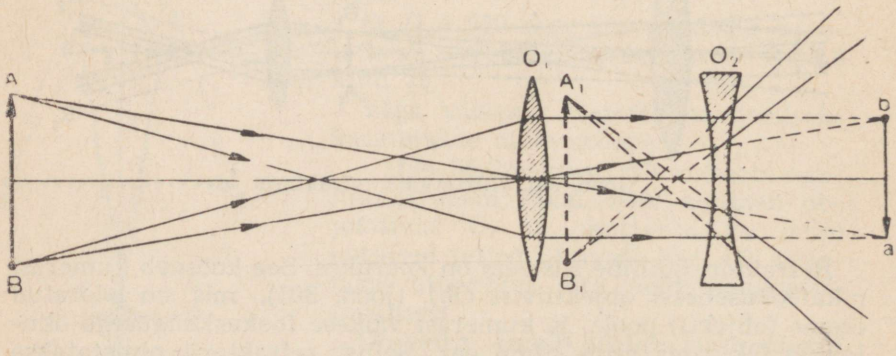
tatud ühe noolekesega, punktist B väljuvad kiired aga kahe noolekesega. Kiired langevad teleskoobi objektiivile sama nurga all, mille all me näeme tähte palja silmaga — nurga φ all. Kiired, mis tulevad punktidest A ja B, koonduvad objektiivi läbides vastavalt punktides A_1 ja B_1, mis asetsevad objektiivi fokaaltasapinnas, kus saadakse ka tähe tõeline kujutis. Teleskoobi okulaar paigutatakse nii, et tema esimene fookus ühtiks objektiivi teise fookusega. Seega tähe tõeline kujutis tekib ka okulaari fokaaltasapinnal. Seetõttu kiirtekimbud, mis läbivad okulaari esimese fokaaltasapinna punkte A_1 ja B_1 ning murduvad okulaaris, lähevad edasi paralleelsete kiirte kimpudena. Nende paralleelsete kiirte kimpude suuna määramisel on joonisel 301 punktidest A_1 ja B_1 tõmmatud kiired A_1A_2 ja B_1B_2, mis läbivad okulaari optilise keskpunkti.

Kiirte kimbud, mis väljuvad okulaarist, moodustavad omavahel nurga γ. Selle nurga all langevad nad ka vaatleja silma.

Nurk γ on tunduvalt suurem nurgast φ, mis tingibki teleskoobi suurenduse.

Teleskoobi suurenduse mõõduks on suhe $\frac{\gamma}{\varphi}$, mis nagu jooniselt nähtub, nurkade γ ja φ väiksuse tõttu on asendatav suhtega $\frac{F_{obj.}}{F_{ok.}}$. Kui tähistada teleskoobi suurendus tähega K, siis võib kirjutada

$$K = \frac{F_{obj.}}{F_{ok.}}.$$



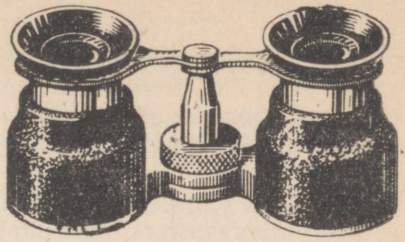
Joon. 302. Kiirte käik Galilei pikksilmas.

168. Pikksilm. Binokkel. Pikksilmi kasutatakse maapealsete objektide vaatlemiseks.

Joonisel 302 on kujutatud G a l i l e i p i k k s i l m a skeem. Selles riistas eseme AB punktidest tulevad valguskiired, läbides koondavat läätse (objektiivi O_1), muutuvad koonduvaiks. Nad annaksid ümberpööratud vähendatud kujutise ab, kuid veel enne selle tekkimist kiired langevad hajuvale läätsele (okulaar O_2) ja muutuvad uuesti hajuvaiks. Kui sellised kiired langevad meile silma,

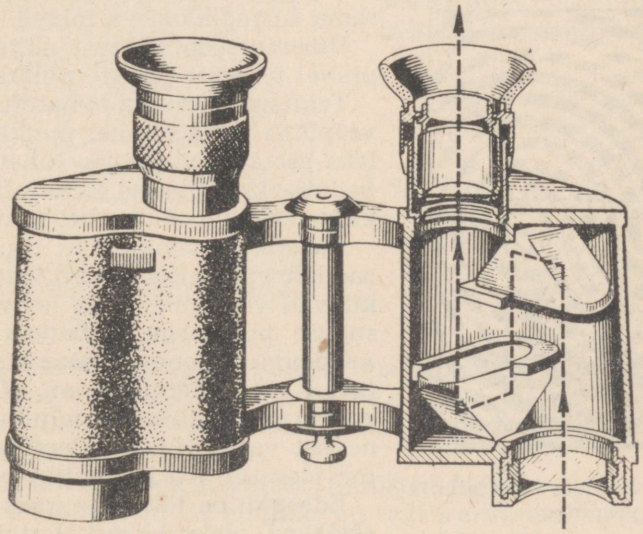
siis näeme näilikku päripidist eseme kujutist A_1B_1.

Väikese suurendusega binoklid (nn. «teatribinoklid») koosnevad kahest Galilei pikksilmast (joon. 303).



Joon. 303. Teatribinokkel.

Suure suurendusega binoklid (välibinoklid) valmistatakse kahest Kepleri pikksilmast (joon. 304). Selles riistas on kujutist ümberpööravaks süsteemiks kaks prismat (kaks ümberpööravat prismat), milles toimub täielik sisepeegeldumine. Need prismad võimaldavad üheaegselt lühendada pikksilma pikkust ja suurendada kaugust objektiivide keskkohtade vahel, võrreldes silmaavade vahelise kaugusega. Suurem kaugus objektiivide vahel tugevdab stereoskoopilist efekti.



Joon. 304. Prismabinokkel.

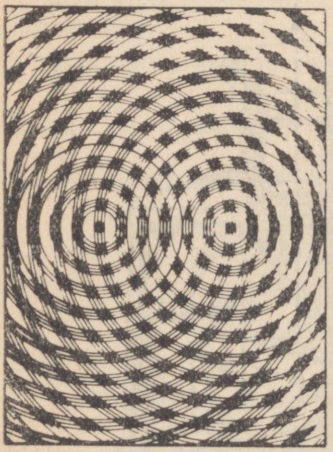
Harjutus 21.

1. 8,5×8,5 cm²-lise pindalaga diapositiivil olevat kujutist soovitakse projekteerida ekraanile, mille mõõtmed on 1,5×2 m² ja mis asub kaugusel $k = 6$ m projektsiooniaparaadist. Kui suur peab olema fookuskaugus kasutataval objektiivil?
2. Millise suurenduse annab luup optilise tugevusega 10 dioptriat?
3. Mikroskoobi objektiivi fookuse kaugus on 4 mm, okulaaril 2,5 cm. Määrata selle mikroskoobi suurendus, kui ese asetseb objektiivi peafookusest 0,2 mm kaugusel.
4. Teleskoobi objektiivi fookuskaugus on 10 m, okulaari fookuskaugus 5 cm. Määrata selle teleskoobi suurendus.

IX PEATÜKK

VALGUSE LAINELISED OMADUSED

169. Lainete interferents. Lainelist protsessi iseloomustavate nähtuste hulka kuulub lainete interferents, mis seisneb selles, et kahe laine liitumisel võib toimuda võnkumise tugevnemine või nõrgenemine. Selle nähtusega tutvumiseks vaatleme, mis toimub, kui ruumi mingisse punkti tulevad sama lainepikkusega lained.



Joon. 305. Lainete interferents veepinnal.

Uurime seda nähtust näiteks veepinnal levivate lainete puhul.

Tekitame vahetpidamatult laineid veepinna mingis kahes punktis. Selleks asetame veepinna vahetusse lähedusse kaks elastse metallplaadikese külge kinnitatud traaditüki otsa.

Plaadikese võnkumisel traatide otsad lähevad perioodiliselt vette ja tekitavad võnkumisi, mis levivad ühesuguse pikkusega lainetena mööda veepinda. Mõlemad juhtmeotsad tekitavad eri lainetesüsteemi. Kaks lainetesüsteemi liitudes mõjutavad teineteist vastastikku. Tulemusena saame joonisel 305 kujutatud pildi.

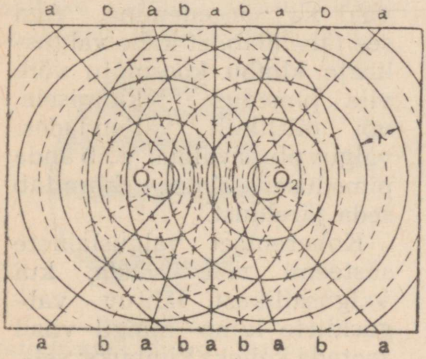
Edaspidi on tähtis, et kaks lainetesüsteemi oleksid kooskõlastatud, s. t. et sama lainepikkuse juures nad väljuksid võnkumistsentreist samades faasides, või kui nad alguses on erinevais faasides (näiteks tekivad vastupidistes faasides), siis faasinihe ei tohi muutuda aja jooksul. Selliseid laineid nimetatakse koherentseteks.

Vaadeldava katse puhul on koherentsus tagatud sellega, et mõlemad traadiotsad perioodiliselt ja samaaegselt puudutavad veepinda — võnkumistsentrid tekitavad samas faasis olevaid laineid.

Konstrueerime kahe koherentse lainetesüsteemi liitumise pildi. Joonisel 306 on tähistatud pidevate ringjoontega ringlainete harjad, mis levivad veepinnal laineallikaist lähtudes, ja punktiirjoontega lainepõhjad. Punktides, kus kohtuvad mõlema süsteemi ühesuguste

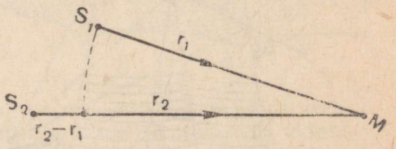
faasidega lained (lainepõhi lainepõhjaga ja -hari -harjaga), toimub võnkumise tugevnemine (maksimumid asetsevad pidevatel joontel *aa*). Nõrgenenud võnkumiste punktid (miinimumid), kus ühe laine põhi kohtub teise laine harjaga, asetsevad piki punktiirjoont *bb*.

Koherentsuse puhul maksimumide ja miinimumide vaheldumise pilt on püsiv. Tõepoolest, kui antud momendil mingis punktis kohtub lainehari harjaga, siis poolperioodi pärast samuti kohtub lainepõhi lainepõhjaga ja veel poolperioodi pärast jällegi hari harjaga jne., s. o. antud punktis on kogu aeg võnkumise maksimum.



Joon. 306. Kahe koherentse lainetesüsteemi liitumise pildi konstrueerimine.

Kõrvutades koherentsete lainete liitmise jääva pildi ülaltähendatud katse fotoga (vt. joon. 305) vee pinnal olevate lainete liitumisest, näeme ka fotol maksimumide vaheldumist miinimumidega.



Joon. 307. Kahe laine käiguvahe.

Sellist võnkumiste amplituudide maksimumide ja miinimumide vaheldumist nimetame interferentspildiks.

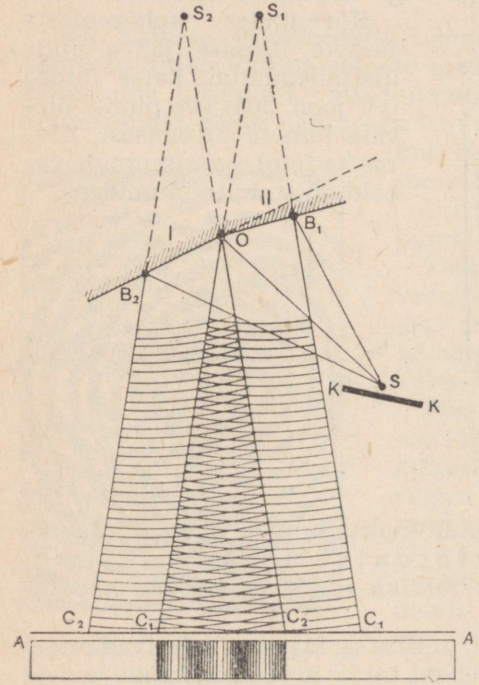
Lainete liitumisnähtust, mis tekitab interferentspildi, nimetatakse lainete interferentsiks.

Selleks et lahendada küsimust, millistes faasides kohtuvad interfereeruvad lained antud punktis, on tarvis arvestada nende lainete käiguvahet. Vaatleme lainete liitumist punktis M (joon. 307), mis asub esimesest laineallikast S_1 kaugusel r_1 ja teisest laineallikast S_2 kaugusel r_2. Kaugust $r_2 - r_1$ nimetatakse lainete käiguvaheks. Kui laineallikad võnguksid samades faasides, siis käiguvahede puhul, mis on võrdsed lainepikkuse täisarvkordsega ehk poollainepikkuse paarisarvkordsega, tuleksid lained punkti M samas faasis ja nende liitumisel tekiks punktis M võnkumise tugevnemine. Kui aga käiguvahe võrdub poollaine paarituarvkordse pikkusega, siis punktidest S_1 ja S_2 lähtunud lained saabuvad sellesse punkti vastupidistes faasides ja võnkumised nõrgenevad.

Seda asjaolu on kerge kontrollida konstrueeritud interferentspildil (vt. joon. 306). Selleks piisab vastava süsteemi lainete arvu lugemisest, mis mahuvad meid huvitavate maksimum- ja miinimumpunktide ning võnkumistsentrite vahelisele kaugusele.

Näeme, et maksimumid tekivad neis kohtades, mis kas asetsevad mõlemast võnkumistsentrist samal kaugusel, või punktides, kus käiguvahe vastab poollainepikkuse paarisarvkordsele, miinimumid aga seal, kus käiguvahe võrdub paaritu arvu poollainepikkuse kordsega.

170. Valguse interferents. Lainete interferentsinähtus ei esine mitte ainult veepinnal tekkinud lainete juures, vaid kõigi laneliikide: hääle-, elektromagnetiliste ja teiste lainete juures. Järelikult, kui valgusel on lainelised omadused, siis kahe valguskiirte kimbu liitumisel võib tekkida mitte ainult valguse tugevnemine, vaid ka nõrgenemine. Aga see tähendab, et kahe valguskiirte kimbu koosmõju võib viia pimeduse tekkimisele, või piltlikult väljendades: valgus pluss valgus võib anda pimeduse. Katse kinnitab seda järeldust.



Joon. 308. Valguse interferents Fresneli peeglite abil.

Koherentset valguslainete süsteemi võib saada, kui valgusallikast lähtuv valguskiirte kimp mingil viisil jaotada kaheks kimbuks; selle jagunemise puhul mõlema kimbu kiired läbivad erinevad teepikkused, tekib käiguvahe; siis juhitakse need mõlemad kimbud kokku ja nad interfereeruvad.

Ülalnäidatud tingimusi on võimalik täita mitmesugustel viisidel.

Prantsuse füüsiku Fresneli (l.: frenel) ühe katse puhul punktikujulisest valgusallikast lähtunud kiirtekimp jaotatakse kaheks kimbuks kahe peegli abil, millevaheline nurk on peaaegu 180°.

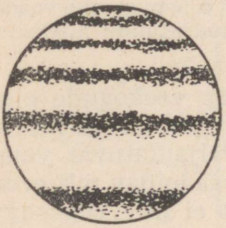
Joonisel 308 on näidatud valgusallikast S lähtunud kiirte tee ekraanile AA. Kiired ei pääse otseselt ekraanile, sest nende ees on tõke KK.

Valgusallikast S lähevad kiired ekraanile kaht erineva pikkusega teed mööda ja seepärast hilinevad teineteise suhtes. Punktist S väljunud ja peeglitel I ja II peegeldunud lained moodustavad koherentsete lainete süsteemid $SB_1OC_1C_1$ ja $SOB_2C_2C_2$, mis nagu väljuksid valgusallikaist S_1 ja S_2 — valgusallika S näilikest kujutistest peegleis I ja II.

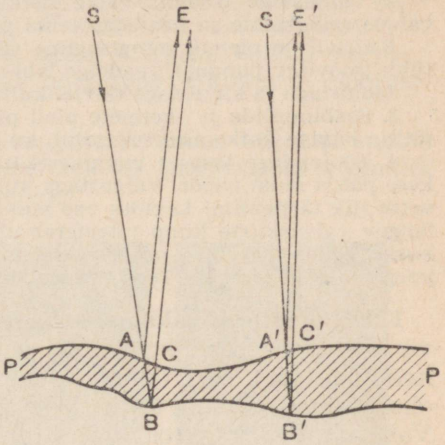
Ruumis OC_1C_2 mõlemad lainetesüsteemid liituvad omavahel ja interfereeruvad. Ruumi OC_1C_2 asetatud ekraanil AA näeme vaheldumisi heledaid ja tumedaid triipe.

Kirjeldatud Fresneli katse valguse interferentsi vaatlemiseks on printsipiaalselt lihtne, kuid kooli füüsikakabineti tingimustes on seda tehniliselt raske teostada.

Kiirtekimbu jagunemine kaheks sellele järgneva liitumisega esineb õhukeste kelmete valgustamisel. Väga kerge on vaadelda valguse interferentsi näiteks valguse peegeldumisel õhukeselt seebikelmelt.



Joon. 309.
Interferentsitriibud seebikelmel.



Joon. 309, *a*. Joonis, mis selgitab seebikelme ühevärvilise valgusega valgustamisel toimuvat nähtust.

Projekteerime koondava läätse abil ekraanile seebikelme, mis on tekitatud traatraami vahele ja mida valgustatakse punase valgusega. Kelme kujutis ekraanil näib alguses olevat ühtlaselt valgustatud. Kuid vastavalt kelme õhenemisele seebivedeliku allavoolamise tõttu (alguses ülemiselt, siis ka teistelt kelme osadelt) ilmuvad vahelduvad horisontaalsed tumedad ja punased triibud (joon. 309). Edasisel kelme õhenemisel vaadeldav pilt muutub; tumedate triipude asemele tekivad punased ja vastupidi. Analoogilist pilti võib vaadelda ka kelme valgustamisel mingi teise ühevärvilise valgusega.

Joonis 309, *a* selgitab seebikelme ühevärvilise valgusega valgustamisel toimuvat nähtust. Viirutatud triip PP kujutab seebikelme mingi osa ristlõiget. Kelmele langeb paralleelne ühevärviliste valguskiirte kimp SS. Peegeldudes ülemiselt ja alumiselt pinnalt (punktides A, B ja A', B'), tekib käiguvahe ja kiired, liitudes suundades AE ja $A'E'$, interfereeruvad omavahel. Kui neid koondada läätse abil, siis saaksime ekraanil rea heledaid triipe, mis on eraldatud tumedate vahedega. Kelme valgustamisel valge valgusega saaksime värvilise interferentspildi. See on tingitud asjaolust, et valge valgus koosneb erineva pikkusega valguslainetest, mis tekitavad interfereerumise puhul valguse maksimumid ja miinimumid erinevates kohtades.

Tumedate ja heledate triipude olemasolu ja nende vaheldumine ülalkirjeldatud katsetes näitavad valguse lainelist loomust.

Harjutus 22.

1. Valmistage seebilahust, puhuge klaastoru või pipeti abil seebimull ja vaadelge värvidemängu mulli pinnal!
2. Valmistage traadist väike ristkülikukujuline kontuur, tekitage tema vahele seebikelme ja vaadelge tema pinnal toimuvat värvidemängu!

Kui teil on olemas mingisugune värviline klaas või värvitud tsellofaani tükk (soovitav punane), vaadelge läbi selle filtri seebikelme interferentspilti! Joonistage ja kirjeldage (kirjalikult) vaadeldud nähtust!

3. Seebimullide ja -kelmete pind pidevalt õheneb vedeliku allavoolamise tõttu. Jälgige katkemismomendini, kuidas muutub kelmete värvus.
4. Soojendage tasases vannikeses (võib ka alustassis) vett ja asetage vannikese põhja must paber. Valgustage küljelt veepinda ja pärast seda tilgutage vette tilk tärpentini! Levides vee pinnal moodustab tilk õhukese kile, milles langev valguskiirte kimp interfereerub. Interferentsi tulemust võib vaadelda kuskil seinal värvilise peegelduslaiguna, mis on moodustunud kiirtekimbu peegeldumisel kelmelt. Teostage see katse!

171. Lainete difraktsioon. Kerge tuul tekitab veekogude pinnal virvenduse, s. o. väikese pikkuse ja amplituudiga laineid. Kui nad kohtavad oma teel takistusi, näiteks veest väljaulatuvat vaia ja oksakest, siis allpool tuult takistuste taga on vaadeldav pilt erinev. Vahetult vaia taga on vesi vaikne. Lainetust ei ole. Teistsugune on aga pilt oksakese taga. Osutub, et lained painduvad ümber oksakese.

Lainete paindumise nähtust nende teel asuvate tõkete taha nimetatakse lainete difraktsiooniks.

Miks meie näites esineb oksakese taga lainete difraktsioon, vaia taga aga ei esine?

Asi seisneb selles, et oksa diameeter on võrreldav temale langevate lainete pikkusega, aga vaia diameeter ületab selle pikkuse palju kordi.

Tekitame vannis vee pinnal lainete süsteemi ja piirame lainete edasist levimist avaga, mille laius on mitu korda suurem lainepikkusest.

Joon. 310. Suurt ava läbinud laine levib sirgjoontega piiratud alas.

Joon. 311. Väikese ava taga asuv piirkond on täidetud ringikujuliste lainetega.

Näeme, et ava taga lained levivad alas, mis on piiratud langevate lainete pinnaga ristiolevate sirgjoontega (punktiirjooned joonisel 310).

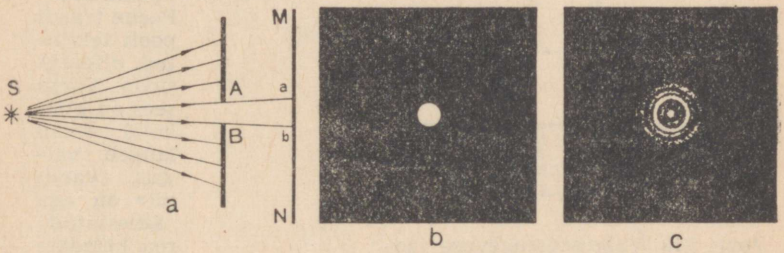
Alles võrdlemisi suurel kaugusel avast painduvad lained kergelt kõrvale ja ületavad need sirged.

Teeme piirava ava langevate lainete pikkusest kitsamaks. Sel juhul on piirkond ava taga täidetud ringikujuliste lainetega, mille tsentriks on väike ava (joon. 311). Esineb laine difraktsioon.

Difraktsiooni tõttu on muuseas raske märgata «hääle varju».

Häälelaine pikkus on harilikult võrreldav takistuste mõõtmetega ja hääl paindub nende taha.

172. Valguse difraktsioon. Kui valguse levimine kujutab endast lainelist protsessi, siis peab olema teatud tingimustes võimalik esile kutsuda ka valguse difraktsiooni.



Joon. 312. Ümmarguse ava poolt tekitatud valguse difraktsioon: *a* — katseseadme skeem; *b* — ekraani valgustus juhul, kui ava läbimõõt on võrreldav kaugusega kuni ekraanini; *c* — ekraani valgustus juhul, kui ava läbimõõt on tuhandeid kordi väiksem kaugusest kuni ekraanini.

Lastes valgusallikast *S* tuleva kiirtekimbu läbi ava *AB* (joon. 312, *a*), saame ekraanil *MN* valguslaigu (joon. 312, *b*). Selle laigu diameeter iseloomustab ekraanile langeva kiirtekimbu laiust. Ava *AB* vähendamisel väheneb ka laik, s. t. kitseneb valguskiirte kimp. Kuid alates ava teatavast kindlast suurusest (suurusjärguga 0,01 mm ja vähem), ei kutsu selle edasine vähendamine esile laigu *ab* vähenemist, vaid hoopis suurenemist. Seejuures kaotab laik oma teravuse; ta on laienenud ja ebaühtlaselt valgustatud (joon. 312, *c*). Sellel ilmub rida üksteisele järgnevaid tumedaid ja heledaid rõngaid. Need rõngad täidavad tunduvalt laiema piirkonna, kui see järgneb geomeetrilisest konstruktsioonist, mis põhineb valguse sirgjoonelise levimise faktil.

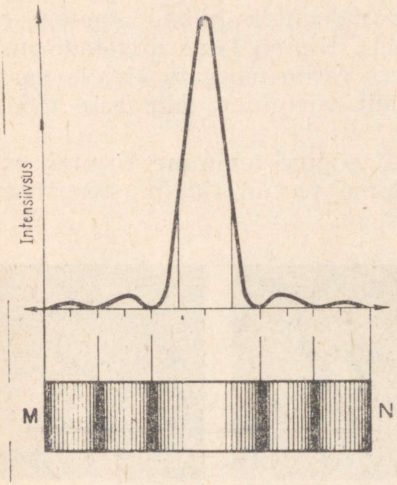
Valgustustugevuse jaotus ekraanil juhul, kui difraktsiooni tekitab kitsas pilu, on näidatud joonisel 313.

Kui kitsa valguskiirte kimbu teele paigutada ette peenike tõke (nõel, juuksekarv), siis saame ekraanil rea tumedaid ja heledaid triipe (joon. 314). Geomeetrilise varju keskel saame seejuures heleda triibu.

Kõik need nähtused esinevad ühevärvilise (monokromaatilise)

valguse puhul. Kui aga kasutatakse valget valgust, siis esinevad tumedate ja heledate laikude ja triipude asemel värvilised.

Meie poolt kirjeldatud nähtust, kus esineb kõrvalekaldumine



Joon. 313. Valgustustugevuse jaotus ekraanil valguse läbimisel kitsast avast.

Joon. 314. Peene traadi poolt tekitatud difraktsioon. Varju sees on piirkond, kuhu langeb valgus, varju piir on aga äärestatud rea heledate ja tumedate ribadega.

valguse sirgjoonelise levimise seadustest, s. o. valguse paindumine varju piirkonda, nimetatakse valguse difraktsiooniks.

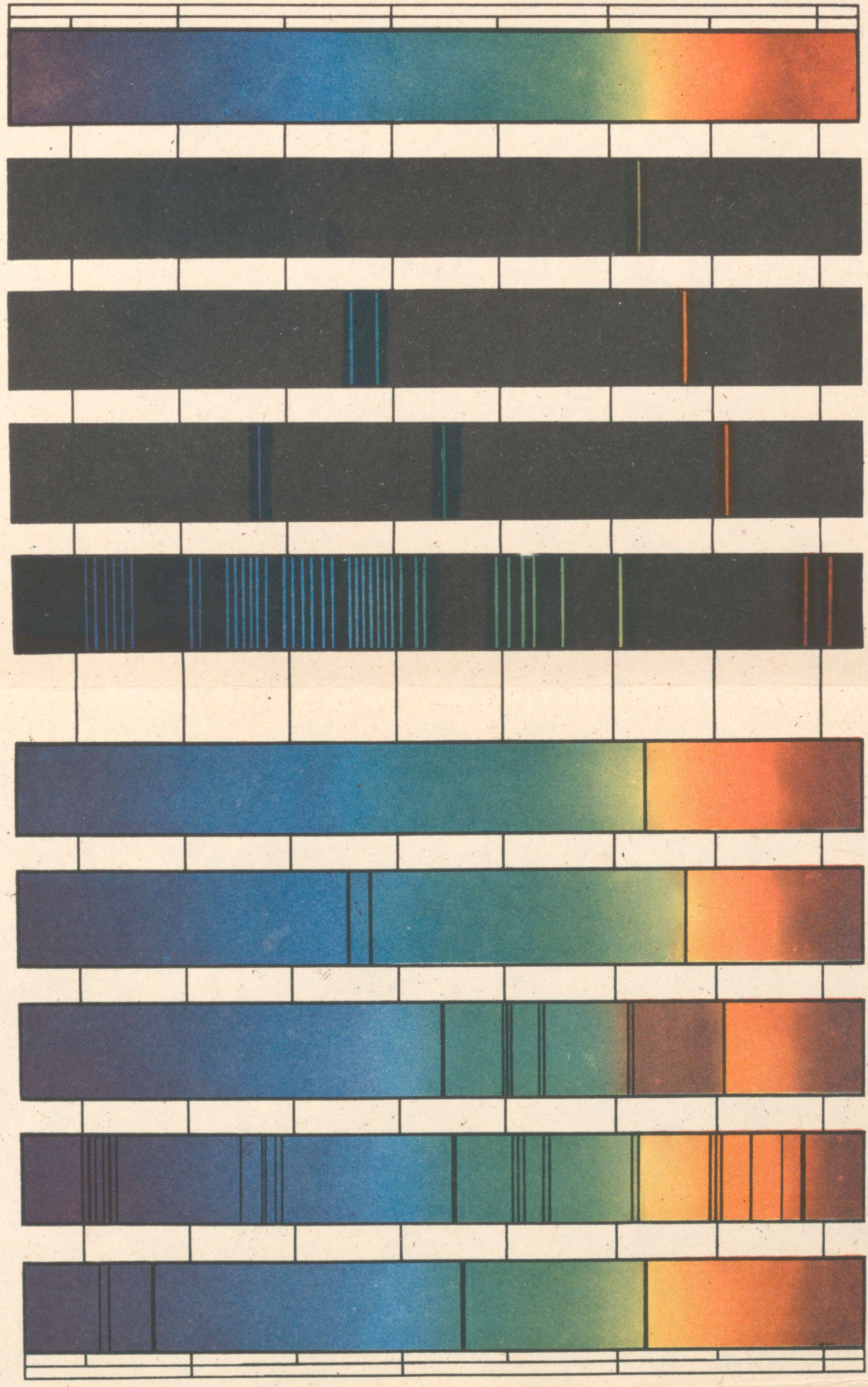
Valguse lainepikkus on erakordselt väike. Nähtavate valguskiirte lainepikkus on piirides 0,8—0,4 mikronit, mistõttu kõik tavaliste mõõtmetega kehad on valguslainete jaoks väga suured. Sellised kehad ei saa painutada valguslaineid kõrvale. Võime öelda, et neil juhtudel valgus levib sirgjooneliselt. Kui aga valguslainete teel on kehad või avad, mille suurused on mõõdetavad valguse lainepikkusega, siis esineb valguslainete difraktsioon.

Difraktsiooninähtus esineb sageli ja ta on väga mitmesugune. Nii näiteks, kui vaadata läbi silmaripsmete võrgu kitsast valgusallikat (elektrilambi niiti, kitsast piirituspõleti leeki jne.), siis näeme peale valgusallika enda temast vasemal ja paremal mitut vikerkaarevärvilist riba. Samasugune pilt esineb valgusallika vaatlemisel läbi tiheda kammi.

Huvitav difraktsioonipilt tuleb ilmsiks mingi kauge helenduva eseme vaatlemisel läbi riide.

Sageli võime tähele panna Päikese või Kuu ümber «tarasid». Need esinevad siis, kui õhus hõljub jäätolmu või udu. Valgus Päikeselt või Kuult, minnes läbi sellise keskkonna, difrageerub.

KIIRGUS-(1-5) JA NEELDUMISSPEKTRID (6-10)



Harjutus 23.

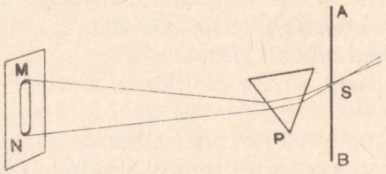
1. Tehke nõelaga papitükki ava ja vaadake läbi selle elektrilambi hõõgniiti. Joonistage teie poolt nähtud pilt ja kirjeldage seda. Pannes ava ette värvilise klaasi või tsellofaanpaberi (valgusfiltri), teostage sama katse. Kuidas muutub vaadeldav nähtus?

2. Kleepige klaasile kaks žiletitera nii, et nende vahel tekib kitsas pilu, ja vaadake selle riista abil mitmesuguseid valgusallikaid. Kasutage ka valgusfiltrit. Joonistage ja kirjeldage vaadeldavaid nähtusi.

3. Pingutage raamile peenike traat (või juuksekarv) ja, hoides viimast väljasirutatud käes silmade ees, vaadake seda läbi luubi. Joonistage ja kirjeldage teie poolt vaadeldavaid nähtusi.

4. Puhastage kaks väikest fotoplaati (6×9 cm^2) valgustundlikust kihist ja kuivatage need. Raputage ühele plaadile ühtlane kiht lükopoodiumi. Et lükopoodium selle külge paremini kleepuks, hingake enne plaadile. Katke plaat, millele on raputatud lükopoodiumi, teise plaadiga ja kantige mõlema plaadi ääred paberiga. Vaadelge sel viisil valmistatud riistaga mitmesuguseid valgusallikaid.

173. Valguse dispersioon. Newtoni katsed. Teame, et prismat läbides kaldub valguskiirte kimp prisma aluse poole (joon. 275, *a*). Juhul, kui see on valge valguse kimp, siis pärast prisma läbimist ta ei kaldu mitte üksnes kõrvale, vaid laguneb värvilisteks kimpudeks. Seda lagunemisnähtust ehk *valguse dispersiooni* uuris esimesena *Isaac Newton* 1666. a. oma tähelepanuväärsete katsete seeria abil (joon. 315).



Joon. 315. Newtoni katse. Päikesekiirte kimbu läbiminekul prismast tekib spekter.

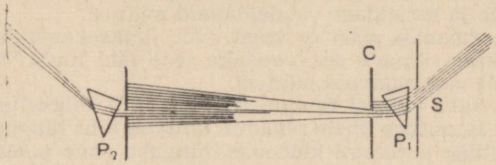
Newtoni katsetes oli valgusallikaks aknaluuki *AB* tehtud väike ümmargune ava *S*, mida valgustasid Päikese kiired. Kui ava ette asetati prisma *P*, siis tekkis seinal ümmarguse laigu asemel värviline riba *MN*, mida Newton nimetas spektriks. Sellises spektris oli seitse üksteiseks järk-järgult üleminevat põhivärvi: *violetne, sinine, helesinine, roheline, kollane, oranž* ja *punane*. Igaüks neist võtab spektris enda alla erinevate mõõtmetega riba. Kõige pikem on violetne riba, kõige lühem punane.

Järgmine katse seisneb selles, et prisma P_1 abil saadud laiast kiirtekimbust eraldati väikese avaga varustatud ekraani *C* abil välja mingi kindla värvusega kitsad kiirtekimbud (joon. 316) ja suunati need teisele prismale P_2.

Prisma P_2 kallutab küll kiired kõrvale, kuid ei muuda nende värvi. Selliseid kiiri nimetatakse *liht-* ehk *monokromaati-*

listeks kiirteks. Katse näitab, et punased kiired kalduvad vähem kõrvale kui violetsed, s. o. erinevat värvi kiired murduvad prismas erinevalt.

Koondades prismast väljuvad kiired kokku, sai Newton valgel ekraanil värvilise riba asemel ava valge kujutise.



Joon. 316. Newtoni katse. Prisma P_2 kallutab ekraani C poolt välja eraldatud ühevärvilised kiired kõrvale, kuid ei muuda nende värvi.

Kõigist neist katsetest tegi Newton järgmised järeldused.

1) *Valge valgus on liitvalgus, mis koosneb paljudest värvilistest kiirtest.*

2) *Antud aines on eri värvi kiirtel erinev murdumisnäitaja. Seetõttu laguneb prisma poolt kõrvalekallutatud valgete kiirte kimp spektriks. Spekter koosneb valgustatava ava värvilistest kujutistest, mis katavad osaliselt üksteist.*

3) *Spektri värviliste kiirte kokkujuhtimisel tekib uuesti valge valgus.*

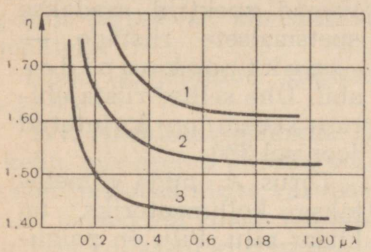
Dispersiooninähtus ei esine mitte üksnes valge valguse läbimine-kul prismast, vaid ka paljudel teistel valguse murdumise juhtudel. Nii näiteks kaasneb päikesevalguse murdumisele veetilkades, mis hõljuvad atmosfääris, valguse lagunemine värvilisteks kiirteks. Sellega seletubki vikerkaare tekkimine.

174. Lainepikkus ja kiirte värvus. Vastavalt lainetusteooriale määrab valguskiire värvi tema lainepikkus või võnkesagedus. Valguse värvus on seega analoogiline heli kõrgusega, mis teatavasti on samuti määratud võnkesagedusega.

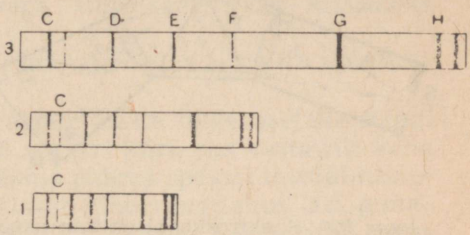
Sarnaselt sellega, nagu me hääled järjestame kasvava võnkesageduse järgi ühte pidevasse ritta, võime kujutada endale ette ka kõiki valguskiiri paigutatuna kasvava võnkesagedusega, s. o. kahaneva lainepikkuse järgi ühte ritta.

Spektraalpiirkond	Lainepikkus (mμ)
Punased kiired	760—640
Oranžid ja kollased kiired	640—580
Rohelised kiired	580—495
Helesinised ja sinised kiired	495—440
Violetsed kiired	440—400

Prismas lahutatakse murdumise protsessis valge valguse kimp värvilisteks kimpudeks. Igale neist vastab mingi kitsas lainepikkuste piirkond, mis asub 400—800 millimikroni vahelises intervallis.



Joon. 317. Murdumisnäitaja ja lainepikkuse vahelise sõltuvuse graafik.

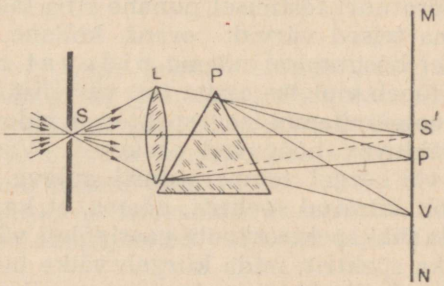


Joon. 318. Ühesuguse kujuga prismade abil saadud spektrite võrdlevad suurused: *1* — vesi; *2* — kerge kroonklaas; *3* — raske flintklaas.

Seega aine murdumisnäitaja sõltub valguse lainepikkusest. See ongi valguse dispersiooni põhjuseks. Joonisel 317 on antud graafik klaasi (1), kvartsi (2) ja fluoriidi (3) murdumisnäitaja sõltuvuse kohta lainepikkusest.

Joonisel 318 on antud päikesespektrite võrdlev suurus, mis on saadud erinevatest materjalidest tehtud ühesuguse kujuga prismade abil.

175. Spektrograaf ja spektroskoop. Spektri saamiseks suunas Newton prismale aknakattesse tehtud avast tuleva kiirtekimbu, mis oli küllaltki lai ja silindriline.

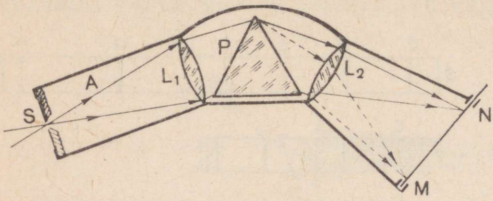


Joon. 319. Dispersiooni tekitamiseks kasutatava katseseadme skeem.

Sel teel saadud spekter kujutab endast erivärvilisi, osaliselt üksteist katvaid ümmarguse ava kujutisi. Selleks et saada puhtamat spektrit, soovitas Newton kasutada mitte ümmargust ava, vaid kitsast pilu, mis on paralleelne prisma murdva servaga.

Selline seadeldis spektri saamiseks on skemaatiliselt kujutatud

joonisel 319. Läätse L abil saadakse ekraanil MN pilu S terav kujutis S'. Pärast seda asetatakse läätse taha prisma P, mis annab spektri.



Joon. 320. Spektroskoobi ehituse skeem.

Kõige puhtamad ja teravamad spektrid saadakse spetsiaalsete riistade — spektroskoopide abil. Ühe sellise riista ehituse skeem on kujutatud joonisel 320.

Torus A, mida nimetatakse kollimaatoriks, on kitsas pilu. Pilu on paigutatud läätse L_1 fokaaltasandisse, mistõttu pilu ja läätse L_1 läbinud valgus langeb paralleelsete kiirte kimbuna prismale P ja laguneb värvilisteks paralleelsete kiirte kimpudeks. Kuna eri värvi kiired kalduvad kõrvale erineva nurga võrra, siis väljuvad prismast paralleelsete kiirte kimbud erinevates suundades. Lääts L_2 koondab need kiirtekimbud oma fokaaltasandi MN eri punktides. Sellel tasandil saadakse värvilised pilu kujutised, s. o. spekter. Kui paigutada tasandisse MN mattklaas, siis saame sellel spektri kujutise. Paigutades sinna kohta fotoplaadi, võib spektrit fotografeerida. Riista, milles spekter saadakse fotoplaadil, nimetatakse spektrograafiks.

Spektri vahetuks jälgimiseks määratud riistades — spektroskoopides — vaadeldakse läätse L_2 fokaaltasandis saadud spektrit silmaga läbi mingi läätse L_3 kui luubi.

176. Kiirgusspektrid. Tahke keha hakkab helenduma temperatuuril umbes 500° C. Vaadeldes selle keha spektrit, näeme punast riba. Keha temperatuuri tõstmisel punane riba laieneb; spektrisse hakkavad ilmuma teised värvid: oranž, kollane, roheline, helesinine jne. Valgel hõõgumisel näeme pidevat spektrit, mis algab punase ja lõpeb violetse osaga (vt. värvilist tabelit).

Küünla ja petrooleumilambi leegi spekter on pidev. Sellise spektri annavad leegis leiduvad hõõguvad osakesed. Vaadeldes elektrilambi hõõgniidi või kõrgel temperatuuril sulava metalli, näiteks malmi pinna poolt kiiratud spektrit, näeme, et ka see on pidev.

Kui vaadelda läbi spektroskoobi gaasipõleti värvitut leeki, siis näeme väga nõrka spektrit, mida kiirgab väike hulk tahkeid hõõguvaid söeosakesi. Selliseid söeosakesi on gaasileegis alati olemas.

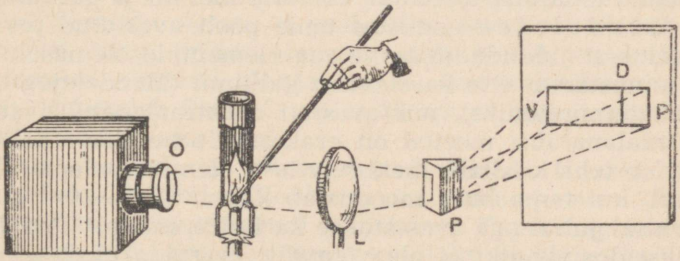
Viime gaasipõleti leeki keedusoolalahusega läbiimmutatud asbestitüki. Naatriumiaurud värvivad leegi kollaseks ja me näeme spektroskoobis heledat kollast joont. Asetades põleti leeki teiste soolade lahuseid, saame teistsuguseid spektreid, mis koosnevad suuremast või väiksemast hulgast spektri eri osades asuvatest üksikutest värvilistest joontest.

Elektrilahendusel helenduvad hõrendatud gaasid annavad täpselt samuti üksikutest värvilistest joontest koosneva spektri. Selliseid

spektreid nimetatakse joonspektriteks (vt. spektrite tabelit). Mõningatel juhtudel koosnevad helenduvate gaaside ja aurude spektrid ribadest. Ribade üks äär on tugevasti valgustatud ja nende helendus kahaneb teise ääre suunas. Suure dispersiooni puhul lagunevad ribaspektrid väga suureks arvuks kitsasteks joonteks.

Kõiki kirjeldatud spektreid nimetatakse kiirgusspektriteks.

177. Neeldumisspektrid. Kui valgete kiirte teele asetada mingi keha, mis neelab ühtesid või teisi spektri kiiri, siis vastavalt keha poolt neelatud kiirte värvusele saame pideva spektri taustal tumedad jooned või ribad. Nii näiteks laseb kloorraua lahus läbi punaseid ja kollaseid kiiri ning osa rohelistest kiirtest; vasevitrioli lahus laseb läbi siniseid kiiri. Punane klaas laseb läbi punaseid kiiri ja neelab teistele spektri osadele vastavad kiired; roheline klaas neelab punased kiired ja laseb läbi spektri rohelises piirkonnas asuvad kiired.



Joon. 321. Naatriumi neeldumisspektri saamiseks kasutatava katseseadme skeem.

Vaatleme spektrit, mida tekitab hõõguv keha, kui lasta tema kiired läbi auru või gaasi (joon. 321). Paigutades kiirte teele ette naatriumiauru, märkame pideva spektri kollases osas tumedat joont. See tume joon tekib samasse kohta, kus naatriumiaurude kiirgusspektris asub kollane joon.

Kirjeldatud nähtus on kooskõlas Kirchhoffi seadusega, mille järgi *aatomite neeldumisjooned vastavad täpselt nende aatomite kiirgusjoontele.*

Hõõguvate tahkete või vedelate kehade spektreid, mis on läbi lõigatud tumedate joonte või ribadega, nimetatakse neeldumisspektriteks (vt. spektrite tabelit). Tumedad jooned või ribad tekivad teatud lainepikkustega valguse neeldumisest mitmesugustes ainetes.

Selleks et seletada spektrite tekkimist, tuleb tunda aatomite ehitust ja omadusi. Neid küsimusi valgustatakse raamatu viimases peatükis.

178. Spektraalanalüüs. Spektraalanalüüsiks nimetatakse mitme-

suguste ainete keemilise koostise määramist nende ainete poolt kiiratud või neelatud valguse spektri järgi.

Hõõguvate tahkete ja vedelate kehade poolt kiiratud valgus annab pideva spektri, joonspektrid on omased hõõguvatele aurudele ja gaasidele.

Kuid spektraalanalüüs ei võimalda mitte üksnes otsustada valgust kiirgava keha agregaatoleku üle, vaid ta on ka üheks kõige täpsemaks keemilise analüüsi meetodiks. Tõepoolest, nägime (§ 176), et helenduvad gaasid ja aurud annavad joonspektri ja seejuures iga gaas või aur annab temale iseloomuliku spektri. Kui leiame spektris kollase joone, siis võime kindlalt väita, et valgusallikas on naatriumi auru; kui leiame iseloomuliku rohelise joone, räägime talliumi olemasolust jne. Omades mitmesuguste gaaside ja aurude poolt kiiratud joonte kataloogi, võime spektri järgi kindlaks teha selle või teise aine olemasolu. Kui spektris leidub üks või mitu joont, mis ei vasta ühegi meile tuntud elemendi joontele, siis võime väita, et leidsime uue elemendi. Sel viisil õnnestus avastada elemendid rubiidium, tseesium, tallium, indium ja gallium.

D. I. Mendelejev ennustas tema poolt avastatud perioodilisuse seadusest juhindudes terve rea elementide olemasolu. Muuhulgas ennustas ta ette ka element galliumi (Mendelejev nimetas selle ekaalumiiniumiks), mis avastati spektraalanalüüsi abil.

Spektraalanalüüsi meetod on erakordselt tundlik. Selle meetodiga võib teha kindlaks meid huvitava elemendi olemasolu isegi sel juhul, kui tema hulk moodustab kokku 10^{-7}—10^{-8} g, mõnel eriti soodsal juhul aga avastatakse ka hulki, mis ei ületa 10^{-10} g. Nii väikseid ainehulki ei ole võimalik avastada ükskõik milliste keemiliste meetoditega.

Niisiis, spektris leiduvate kindlate spektraaljoonte järgi võib otsustada mingi elemendi olemasolu üle uuritavas segus, s. o. teostada kvalitatiivset analüüsi. Kuid vastavate spektraaljoonte intensiivsuse vaatlemine võimaldab otsustada ka segus leiduva aine hulga üle. Spektraaljoonte intensiivsuse ja antud aine hulga vaheline seos on siiski võrdlemisi keeruline.

Nõukogude teadlased töötasid välja sellised meetodid ja konstrueerisid vastavad riistad, mis võimaldavad analüüsida kaasaegses tehnikas hiiglasuurt tähtsust omavate keeruliste sulamite koostist. Kasutades spetsiaalseid riistu võib tehaste laboratooriumides 1—2 minuti jooksul kindlaks määrata mitmesuguste tähtsate masinaosade valmistamiseks kasutatavate terasesortide koostise. On arusaadav, kui suurt tähtsust omavad need meetodid meie tööstuse seisukohalt.

179. Päikese spekter. Vaadeldes spektroskoobi abil Päikese spektrit, märkame, et pidev spekter on läbi lõigatud paljude spektri eri osades asuvate tumedate joontega. Neid tumedaid jooni kirjeldas esmakordselt saksa füüsik Fraunhofer (1787.—1826. a.), mistõttu neid nimetatakse Fraunhoferi joonteks (vt spektrite tabelit).

Spektri iseloomu järgi otsustades võime öelda, et Päikese pind, andes pideva spektri, omab väga kõrge temperatuuri. Spektris asuvad tumedad Fraunhoferi jooned tähistavad Päikese pinna ja Maa vahelises keskkonnas neeldunud kiiri. Osa selliste kiirte energiast neelatakse Päikest ümbritsevas gaasikihis — kromosfääris, osa aga Maa atmosfääris. Seletuse Fraunhoferi joonte tekkimise kohta Päikese spektris andis Kirchhoff. Kuna gaasid ja aurud neelavad just neid kiiri, mida nad on võimelised kiirgama (§ 177), siis iga Päikese ja Maa atmosfääris leiduv aine neelab temale iseloomulikke kiiri. Sellega seletubki tumedate joonte tekkimine pideva spektri taustal. Mõõtes nende tumedate joonte asukohad spektris, võime kindlaks määrata, millist ainet päikesekiired läbisid. Võib isegi kindlaks teha seda, millised tumedad jooned saadakse neeldumisel Maa ja millised Päikese atmosfääris. Nii võib määrata Päikese atmosfääri keemilist koostist.

Sel teel tehti kindlaks, et Päikese atmosfääris on olemas vesinikku, naatriumi, kaltsiumi, rauda ja teisi Maal leiduvaid aineid.

Siinjuures on huvitav märkida, et Päikese spektri järgi tehti tuntud elementide kõrval kindlaks selline element, mida maa peal veel ei tuntud. Seetõttu oletati, et peale Maal leiduvate elementide on olemas veel mingi eriline element, mida leidub ainult Päikesel. Seda elementi nimetati heeliumiks (kreekakeelse sõna *helios* järgi, mis tähendab Päikest). Alles 26 aastat hiljem avastati selle elemendi olemasolu ka Maal.

180. Infrapunased ja ultravioletsed kiired. Uurime Päikese spektrit seadeldise abil, mille skeem on esitatud joonisel 322. Nihutame tundliku termoelemendi jootekohta T piki spektrit edasi ühest kohast teise. Sel teel teeme kindlaks, et nii spektri punase otsa P kui ka violetse otsa V taha langeb kiirgus (jootekoht soojeneb ka neis kohtades, tekitades termovoolu, mida mõõdab galvanomeeter G). See katse näitab, et peale nähtava kiirguse on spektris veel olemas nähtamatu, meie silmale tajumatu kiirgus.

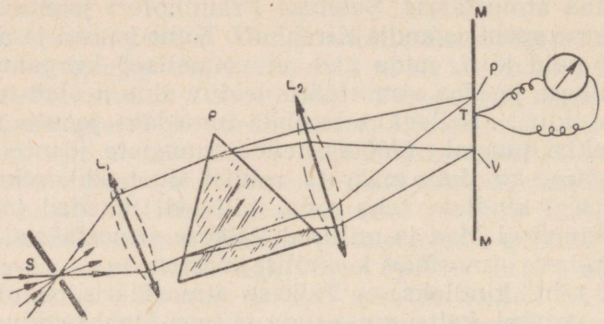
Spektri punase otsa taha langevat kiirgust nimetatakse infrapunaseks kiirguseks ja violetse otsa taha langevat kiirgust — ultravioletseks kiirguseks. Infrapunaste kiirte lainepikkus on suurem kui nähtavatel kiirtel, ultravioletsete kiirte lainepikkus on aga nähtavate kiirte lainepikkustest väiksem.

Samal meetodil me võime uurida peale Päikese spektri ka ükskõik milliste hõõguvate kehade spektreid. Katsed näitavad, et kiirguse spektraalne koostis sõltub eelkõige kiirgava keha temperatuurist. Osutub, et nähtav kiirgus tekib ainult siis, kui temperatuur on kõrgem kui 500° C. Madalamate temperatuuride puhul koosneb peaaegu kogu kiirgus ainult infrapunastest kiirtest.

Ultravioletsed kiired on seevastu aga intensiivsed ainult suhteliselt kõrgete temperatuuride puhul. Nii näiteks on tavalise elektrilambi (temperatuur 2000—2500° C) spektris ultravioletsete kiirte protsent tähtsusetult väike. Temperatuuri 3000° C omav elektri-

kaar annab aga kiirguse, kus ultravioletsete kiirte protsent on tunduvalt suurem.

Infrapunased ja ultravioletsed kiired alluvad samadele optika seadustele, millele alluvad nähtavad kiiredki. Kuid oma mõju poolest ainele erinevad nad nähtavatest kiirtest.



Joon. 322. Energia spektraalse jaotuse uurimisel kasutatava katseseadme skeem.

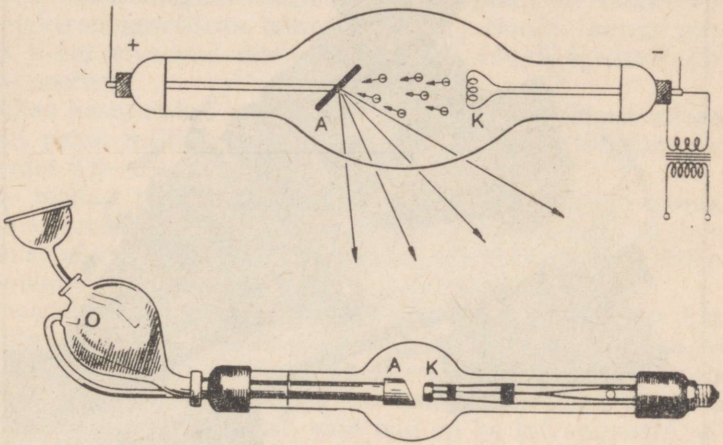
Infrapunaste kiirte kõige iseloomulikumaks omaduseks on nende soojuslik toime, mistõttu neid on kõige kergem kindlaks teha infrapunaseid kiiri neelavate ainete soojenemise järgi. Kuid peale selle võivad infrapunased kiired avaldada ka keemilist toimet. Nii näiteks osutus infrapunaste kiirte abil võimalikuks teha õiseid ülesvõtteid, kasutades selleks spetsiaalseid infrapunastele kiirtele tundlikke fotoplaate.

Ultravioletsetele kiirtele on aga kõige iseloomulikum nende suur keemiline ja bioloogiline aktiivsus. Seetõttu on ultravioletseid kiiri kõige kergem kindlaks teha nende mõju järgi fotoplaadile. Ultravioletsete kiirte bioloogilise toime näiteks on päevitumine. Üksikasjalisemalt käsitletakse valguse toimet X peatükis.

181. Röntgenikiired. Saksa teadlane Röntgen märkas 1895. aastal, et kiirete elektronide voolu kohtumisel mõne suurt aatomkaalu omava metalliga, näiteks plaatinaga või volframiga, tekib erilist liiki kiirgus. Seda kiirgust hakati nimetama röntgenikiirguseks. Röntgenikiired, samuti nagu ultravioletsed kiiredki, nägemisaistingut esile ei kutsu, kuid nad kutsuvad esile mõnede ainete helendumise ja mõjuvad fotoplaadile. Tänu neile kahele omadusele nad avastatigi. Röntgenikiiri saadakse spetsiaalsetes hõrendustorudes, nn. röntgenitorudes. Joonisel 323 on kujutatud elektron-röntgenitoru ehituse skeem (üleval) ja toru üldkuju (all). Selles torus on elektronide allikaks hõõguv volframspiraal *K*, mis pannakse hõõguma erilise küttepatarei või küttetransformaatori abil. Hõõguvalt spiraalilt väljalennanud elektronide voog kiireneb tugevas elektriväljas, mille tekitab kõrgepingeallikas anoodi ja katoodi vahel, ja langeb kiirte suunaga kaldu olevale metallvarva otsale *A*. Metallvarba *A* nimetatakse antikatoodiks.

Vastu antikatoodi põrkuvate elektronide pidurdumisel (pärssimisel) tekivad röntgenikiired, mis levivad antikatoodi pinnalt.

Kuna intensiivse elektronidega pommitamise tõttu antikatood tugevasti soojeneb, siis valmistatakse ta raskestisulavatest metallidest (näiteks volframist). Sageli tuleb antikatoodi koguni erilise seadise *O* abil veega jahutada (joon. 323, alumine).



Joon. 323. Röntgenitoru skemaatiline joonis.

Röntgenikiired lähevad vabalt läbi klaastoru seinte õhku ja neid võib uurida juba väljaspool toru.

Kui panna toru lähedale musta paberisse mähitud fotoplaat, siis pärast röntgenikiirtega kiiritamist mustendab plaat ilmutamisel nii, nagu oleksid talle mõjunud valguskiired. Kui pimeduses panna toru töötama ja toru lähedale paigutada kartongist ekraan, mis on kaetud väävlistsingiga või baarium-plaatinatsüanüüriga, siis ekraan helendub rohekas-sinakalt.

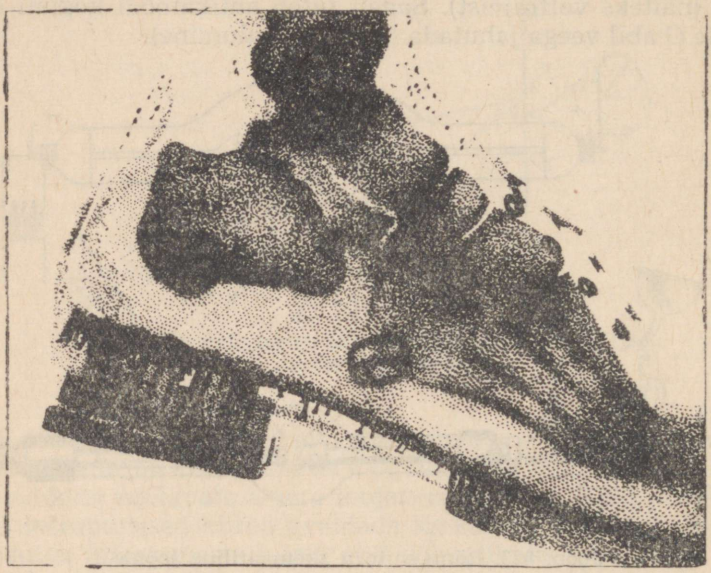
Mõjudes gaasidele on röntgenikiired võimelised esile kutsuma nende ionisatsiooni. Näiteks elektroskoopi ümbritseva õhu kiiritamisel röntgenikiirtega kaotab elektroskoop oma laengu, ükskõik kumba märki laengut ta ka ei omaks.

Röntgenikiired ei kaldu kõrvale elektriväljas ega ka magnetväljas. See näitab, et röntgenikiired ei ole liikuvad elektronid, nagu seda on katoodkiired. On kindlaks tehtud, et *röntgenikiired on väga väikese lainepikkusega elektromagnetilised lained.*

Tänapäeval on röntgenitorude abil saadud kiiri lainepikkusega mõnisada ångstromi[1], s. t. suurema lainepikkusega, kui seda on kõige lühemad tuntud ultravioletsed lained. On õnnestunud saada ja vaadelda ka väga lühikesi laineid (pikkusega sajandikud ja tuhandikud ångstromist).

[1] Ångstrom (Å) — pikkusühik, 1 Å $= 10^{-8}$ cm.

Röntgenikiirtel on suur läbitungimisvõime. Nad läbivad kergesti paljusid kehi, mis on läbipaistmatud selle sõna tavalises mõttes. Nii näiteks läbivad need kiired nõrgenemata paberit, kartongi, puud, tunduvalt halvemini läbivad nad metalle. Mida tihedam on



Joon. 324. Jala röntgenogramm.

aine, seda vähem laseb ta läbi röntgenikiiri. Nii näiteks, kui 5—10 cm paksust alumiiniumikihti röntgenikiired läbivad suhteliselt kergesti, siis neelduvad needsamad kiired 1 cm paksuses seatinakihis peaaegu täielikult.

Röntgenikiirte omadust läbida ainet kasutatakse praktikas juba alates nende avastamise ajast. Arstiteaduses rakendatakse laialdaselt inimese keha röntgenikiirtega läbivalgustamist haiguse kindlakstegemise eesmärgil. Seda arstiteaduse ala nimetatakse röntgenidiagnostikaks. Röntgenikiirtega läbivalgustamine soodustas kirurgia arengut (murrete uurimine, kuulide ja mürsukildude avastamine haavatu kehas). Joonisel 324 on näidatud röntgenikiirte abil saadud inimese jalalaba foto. Laialdaselt on levinud ka teine arstiteaduse ala — röntgenoteraapia, s. t. haiguste ravimine röntgenikiirtega.

Metallurgias kasutatakse röntgenikiiri sageli metallivalu homogeensuse analüüsimiseks. Nende abil õnnestub avastada metallist masinaosades olevaid õhumulle.

182. Valguse elektromagnetiline loomus. Füüsika arenguga tehti kindlaks, et optiliste ja elektromagnetiliste nähtuste vahel on olemas seos. 1865. a. inglise teadlane Maxwell tõestas teoreetiliselt, et valgus on elektromagnetilise loomuga.

Maxwelli teooria kohaselt valgus levib valgusallikast elektromagnetiliste lainete näol.

Rohkearvulised katsed kinnitasid seda tähelepanuväärset teaduslikku ennustust. Valguse elektromagnetilise loomuse tõestamisel on eriti suur tähtsus saksa teadlase Hertzi ja vene teadlase Lebedevi eksperimentaalsetel töödel, kes katsete põhjal näitasid valguslainete ja elektromagnetiliste lainete identsust.

Valguse elektromagnetilise teooria seisukohalt on nähtav valgus ainult elektromagnetiliste lainete erijuht. Nende lainete mitmesugused liigid erinevad üksteisest ainult võnkesageduse (lainepikkuse) poolest.

Tehnikas kasutatakse raadiolaineid pikkusega mõnest kilomeetrist kuni mõne millimeetrini. Nähtava valguse lainepikkused on aga piirides 0,8—0,4 mikronit.

Nagu teada, tekivad raadiolained võnkeringides toimuvate elektromagnetiliste võnkumiste tõttu. Vähendades võnkeringi mahtuvust ja induktiivsust, võib saada ikka lühemaid ja lühemaid elektromagnetilisi laineid.

On loomulik oletada, et ka *kõige lühemad lained, mis kuuluvad nähtava valguse koosseisu, tekivad keha üksikutes aatomites toimuvate elektriliste võnkumiste tulemusena.* Katsed ja teooria kinnitasid täielikult seda hüpoteesi. Osutub, et aatomid ei kiirga mitte ainult nähtavat valgust, vaid nad on ka infrapunaste, ultravioletsete, röntgeni- jt. elektromagnetiliste kiirguse liikide allikaks. Sellest, kuidas aatomid kiirgavad, on jutustatud edaspidi (paragrahvis 196).

Käesoleval ajal on katseliselt uuritud kogu lai elektromagnetiliste lainete diapasoon, alates pikkade raadiolainetega ja lõpetades kõige lühemate radioaktiivsete ainete poolt kiiratavate lainetega.

Niisiis, looduses on olemas väga mitmesuguse pikkusega elektromagnetilisi laineid. Sõltuvalt lainepikkusest on neil erinevad omadused (nähtavus, värvus, läbitungimisvõime jne.). See on üheks eredaks näiteks sellest, kuidas kvantiteedi (laine pikkuse) muutumise tõttu muutub ka kvaliteet (laine omadus).

Looduses eksisteerivaid elektromagnetilisi laineid võib paigutada lainepikkuste järgi ritta, alates kõige pikematest ja lõpetades kõige lühematega, s. o. koostada elektromagnetiliste lainete skaala.

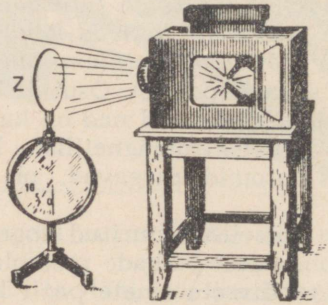
Järgmises tabelis on toodud elektromagnetiliste lainete kõik liigid ja on antud nende kokkuleppeline klassifikatsioon.

	Lainepikkus cm-tes
Elektrilised kiired (raadiolained)	$3 \cdot 10^{6}$—10^{-2}
Infrapunased kiired	$3 \cdot 10^{-2}$—$7{,}6 \cdot 10^{-5}$
Silmale mõjuvad valguskiired	$7{,}6 \cdot 10^{-5}$—$4 \cdot 10^{-5}$
Ultravioletsed kiired	$4 \cdot 10^{-5}$—$6 \cdot 10^{-7}$
Röntgenikiired	10^{-7}—10^{-10}
Gammakiired	alates 10^{-9} ja lühemad.

X PEATÜKK

VALGUSE TOIME

183. Fotoefekt. Saksa teadlane Hertz avastas 1887. aastal valguse mõju elektrilahendusele. Uurides sädelahendust, leidis Hertz, et kui negatiivset elektroodi valgustada ultravioletsete kiirtega, siis algab lahendus elektroodide vahel madalama pinge juures.



Joon. 325. Fotoefekt: valguse mõjul kaotab metall oma negatiivse laengu.

Edasi avastati, et elektroskoobiga ühendatud negatiivselt laetud metallplaadi *Z* (joon. 325) valgustamisel elektrikaare valgusega langeb elektroskoobi osuti alla. See katse näitab, et metallplaat kaotab valgustamisel elektrikaare valgusega oma negatiivse laengu. Positiivset laengut metallplaat valgustamisel ei kaota.

Negatiivse laengu kadumise nähtust metallkehadelt nende valgustamisel valguskiirtega nimetatakse fotoelektriliseks efektiks ehk lihtsalt fotoefektiks.[1].

1888. a. algasid tuntud vene teadlase A. G. Stoletovi tööd fotoefekti alal.

Stoletov uuris fotoefekti seadeldise abil, mille skeem on kujutatud joonisel 326, *a*, *b*.

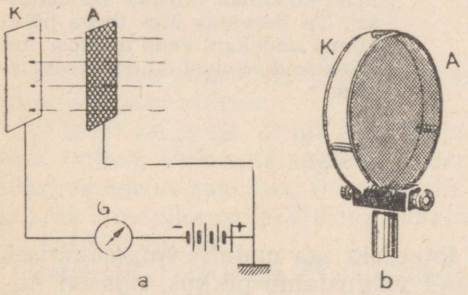
[1] *Photos* (kreeka keeles) — valgus; *efekt* (ladina keeles) — mõju.

Kaks väikest ketast, tsinkplaat *K* ja õhuke võre *A*, on kinnitatud vertikaalselt üksteise vastu. Võre ja tsinkplaat moodustavad kondensaatori. Kondensaatori plaadid ühendati vooluallika poolustega ja seejärel valgustati elektrikaare valgusega.

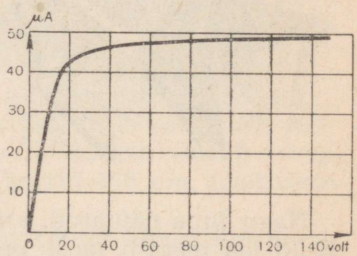
Valgus tungis vabalt läbi võre ja valgustas tsinkketta pinda.

Stoletov tegi kindlaks, et kui kondensaatori tsinkplaat ühendada pingeallika negatiivse poolusega, s. o. võtta katoodiks, siis ahelasse lülitatud galvanomeeter *G* näitab voolu olemasolu. Kui aga katoodiks on võre, siis vool puudub. Tähendab, valgustatud tsinkplaat kiirgab negatiivselt laetud osakesi, mis ka tingivad voolu tema ja võre vahelises alas.

Stoletov kasutas oma katseteks väga mitmesugustest metallidest — alumiiniumist, vasest, tsingist, hõbedast ja niklist — plaate. Ühendades need pingeallika negatiivse poolusega, pani ta tähele, et elektrikaarelt saadava valguse mõjul tekkis tema katseseadeldises elektrivool. Sellist voolu nimetatakse fotovooluks.



Joon. 326, *a* — skeem katseseadmele, mida Stoletov kasutas fotoefekti uurimiseks, *b* — Stoletovi katseriist.



Joon. 327. Fotovoolu tugevuse ja pinge vahelise sõltuvuse graafik.

Pinge suurendamisel kondensaatori plaatide *K* ja *A* vahel fotovoolu tugevus suurenes, saavutades mingi pinge juures oma maksimaalse väärtuse, mida nimetatakse küllastusvooluks.

Fotovoolu tugevuse ja pinge vahelise sõltuvuse graafik on esitatud joonisel 327; graafikult on näha, et teatava pinge juures saavutab fotovool oma maksimaalse väärtuse.

Uurides küllastatud fotovoolu tugevuse sõltuvust katoodplaadile langeva valgusvoo suurusest, avastas Stoletov järgmise seaduse:

küllastatud fotovoolu tugevus on võrdeline metallplaadile langeva valgusvooga.

See seadus kannab Stoletovi seaduse nime.

Edasi tehti kindlaks, et fotovool kujutab endast metallist väljalöödud elektronide voogu.

Nagu hiljem näeme, leidis fotoefekt laialdase praktilise rakenduse.

184. Valguskvandi mõiste. Vastavalt valguse elektromagnetilisele teooriale (§ 182), osutub valgus elektromagnetilisteks laineteks. Valguse lainelisi omadusi näitavad niisugused nähtused, nagu interferents ja difraktsioon.

Kuid tervet rida aine poolt valguse kiirgamise ja neelamise nähtusi ei saa seletada lainetusteooria põhjal. Nende nähtuste hulka kuulub ka fotoefekt.

Aleksander Grigorjevitš Stoletov (1839—1896) — kuulus vene füüsik. Stoletov avastas fotoelektriliste nähtuste seaduspärasuse, töötas välja ferromagneetikute uurimise meetodid ja leidis nende magneetuvuse kõvera kuju.

Stoletovi teened on väga suured meie kodumaa füüsika arendamisel. Ta kasvatas üles terve põlvkonna andekaid vene teadlasi, kes rikastasid teadust suurte avastustega.

Nagu juba näidatud, esineb fotoefekt iga metalli valgustamisel. Kuid iga metalli jaoks on kindel valguslaine pikkus, mis on niinimetatud fotoelektrilise efekti «pikalaineline» piir. Valguskiirtega, mille lainepikkus on suurem sellest piirist, ei saa fotoefekti esile kutsuda, s. t. ei saa antud metallist ühtki elektroni välja lüüa. Nii näiteks, kui valgustada tsinkplaati nähtava valguse kiirtega, siis milline ka ei oleks selle valgusvoo suurus, ta ei löö tsingist välja ühtki elektroni. Kuid isegi nõrk ultravioletsete kiirte voog lööb tsingist välja elektrone.

Lainetusteooria põhjal ei ole võimalik seletada, mispärast erineva lainepikkusega valguskiired mõjuvad erinevatele ainetele erinevalt. Kõige hämmastavamana tundub see fakt, et valguse poolt metallist väljalöödud elektroni energia ei sõltu üldse valgusvoo suurusest, vaid sõltub ainult lainepikkusest. Ükskõik kas me valgustame metalli väga nõrga või tugeva antud lainepikkusega valgusega — väljalendavad elektronid omavad üht ja sama energiat. Siinjuures ilmneb, et lainepikkuse vähenedes elektronide energia, seega ka nende kiirus kasvab.

Kõigile neile nähtustele annab seletuse 19. sajandi lõpul tekkinud kvantteooria. Kvantteooria rajajaks oli saksa füüsik P l a n c k.

Kvantteooria järgi ei kiirga aine aatomid ja molekulid valgust pideva voona, vaid kindla suurusega jagamatute annuste kaupa.

Neid jagamatuid valguse annuseid hakati nimetama valguse kvantideks[1] ehk footoniteks[2].

Footoni energia suurus ε sõltub valguse võnkesagedusest järgmiselt:

$$\varepsilon = h\nu,$$

kus ν on valguse võnkesagedus ja h on nn. Plancki konstant

$$h = 6{,}62 \cdot 10^{-34} \text{ erg} \cdot \text{s}.$$

Kasutades kujutlust footonitest, lõi kuulus teadlane Einstein fotoefekti teooria. Vastavalt sellele teooriale lööb footon metallile langedes sellest välja ühe elektroni. Footoni energia $h\nu$ kulub seejuures tööks P, mida tuleb teha elektroni väljatoomiseks metallist (väljumistööks) ja elektronile kineetilise energia $\frac{mv^2}{2}$ andmiseks, s. t.

$$h\nu = P + \frac{mv^2}{2}. \qquad (1)$$

Kui mõne sageduse ν_0 jaoks osutub, et $h\nu_0 \leqslant P$, siis $v = 0$ ja fotoefekt aset ei leia.

Öeldust on selge, et iga aine jaoks peab olema oma kindel sagedus, millest väiksema sageduse korral fotoefekti ei esine. Nii näiteks väikseim sagedus, mis kutsub esile fotoefekti, vastab tsingi korral lainepikkusele 370 mμ, kaaliumi korral 450 mμ, naatriumi korral 680 mμ jne.

Valemist (1) on näha, et väljalöödud elektronide kineetiline energia on määratud ainult metallile langeva valguse sagedusega. Ta ei sõltu sellest, kas fotoefekti esilekutsuv valgusvoog on nõrk või tugev. See on kooskõlas katsetega.

Valguse kvantteooria edu muutis radikaalselt valguse omaduste kohta kehtivaid vaateid. Meie kujutlus valgusest kui ainult lainetest ei ole küllaldane. Ta ei peegelda kõiki valguse omadusi. Ühtedes nähtustes ilmnevad valguse lainelised omadused, teistes nähtustes aga valguse korpuskulaarsed omadused (korpusklite all mõeldakse valguse footoneid).

Sellistes nähtustes nagu fotoefekt käitub valgusvoog eriliste osakeste — footonite voona.

Seega elektromagnetilist loomust omades on valgusel nii lainelised kui ka korpuskulaarsed omadused.

185. Fotoelemendid. Riistu, mille ehituse aluseks on fotoefekt, nimetatakse fotoelementideks.

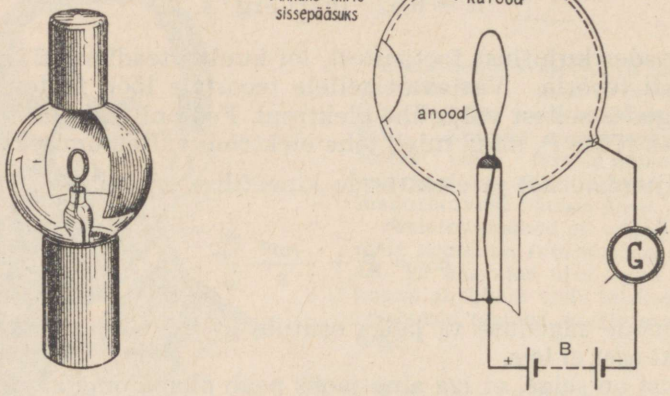
Joonisel 328 on kujutatud tänapäeva fotoelemendi väliskuju ja tema ehituse skeem.

Valgustundlik kiht — katood — katab peaaegu kogu klaasballooni sisepinna, välja arvatud väike valguse juurdepääsuks jäetud

[1] kvant — ladina keelest *quantum* (hulk).
[2] footon — kreeka keelest *photos* (valgus, valguse osake).

aknake. Anoodiks on ballooni sisse kinnitatud traatrõngas. Balloonis on vaakuum.[1]

Kui ühendada rõngas patarei *P* positiivse poolusega ja valgustundlik metallikiht läbi galvanomeetri *G* negatiivse poolusega, siis kihi valgustamisel mingi valgusallikaga tekib ahelas vool.



Joon. 328. Fotoelemendi väliskuju ja tema ehituse skeem.

Patarei võib täiesti välja lülida, kuid ka siis esineb vool. Vool on sel korral ainult väga nõrk, kuna vaid tühine osa valguse poolt väljalöödud elektrone langeb traatrõngale — anoodile. Selleks et sundida kõiki valguse poolt väljalöödud elektrone langema anoodile, on küllaldane, kui anoodi ja katoodi vahel rakendada pinget umbes 80—100 volti.

Fotoelektrilist efekti võib tekitada, kasutades mistahes metalli. Kuid enamik neist, sellised nagu vask, raud, plaatina ja volfram, on tundlikud ainult ultravioletsetele kiirtele. Ainult leelismetallid — kaalium, naatrium ja eriti tseesium — on tundlikud ka nähtavatele kiirtele. Neid metalle kasutataksegi fotoelementide katoodi valmistamiseks.

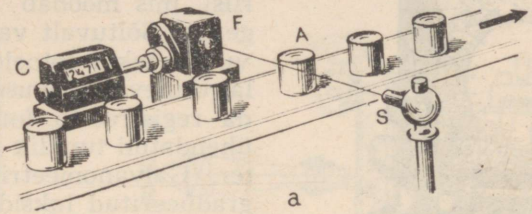
Fotoelemente rakendatakse tehnikas, peamiselt just fototelegraafias (kujutiste edasiandmine mööda juhet kauge maa taha), kaugnägemises ja kinos. Peale selle kasutatakse fotoelemente laialdaselt erakordselt tundlikes riistades — releedes, mis on tähtsad mitmesuguste mehhanismide automaatsel käivitamisel.

Vaatleme näiteks fotoelementide rakendamist fotorelees ja helikinos.

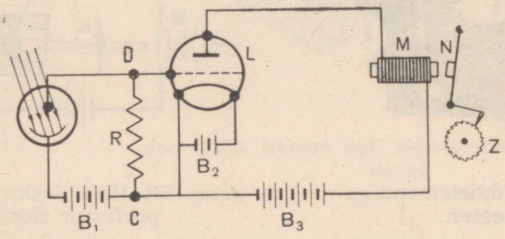
186. Fotorelee. Fotoreleeks nimetatakse mitmesuguste seadelduste automaatseks juhtimiseks valmistatud riista, kus kasutatakse

[1] Leidub fotoelemente, milles balloon on täidetud mingi inertse gaasiga.

fotoefekti inertsitust, s. o. fotoelemendi võimet peaaegu momentaanselt reageerida valguse mõjule või selle muutusele. Fotoelemendis on fotoelement kombineeritud elektromagnetilise releega. Sõltuvalt fotoelemendi tüübist ja fotorelee enda ülesandest võib fotorelee omada üht või teist ehitust.



a



b

Joon. 329, *a* — loendusmehhanismiga ühendatud fotorelee; *b* — fotorelee ehituse skeem.

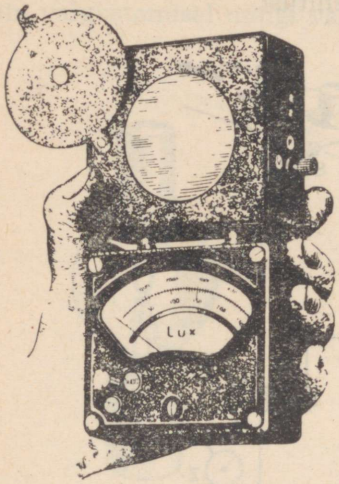
Fotorelee võib töötada kas valguse langemisel fotoelemendile või fotoelemendi valgustamise katkestamisel.

Fotorelee rakendused on erakordselt mitmekesised. Fotorelee võib eduga sisse lülitada majakate ning boide valguse ja tänavalaternad linnades, sorteerida värvi ja kuju järgi mitmesuguseid esemeid, panna käima või jätta seisma elektrimootoreid ja tööpinke. Joonisel 329, *a* on kujutatud seadeldis, mis loendab automaatselt konveieril liikuvaid esemeid.

Laternast *S* (joon. 329, *a*) langeb fotoelemendile *F* kitsas kiirtekimp. Fotoelemendi külge lülitatud loendusmehhanism *C* seejuures ei tööta. Momendil, mil mööda konveierit liikuv ese katkestab valgusvoo, hakkab fotorelee tööle ja loendusmehhanism *C* registreerib mööduva detaili.

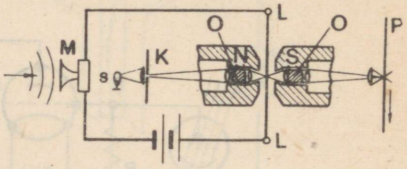
Fotorelee ehituse skeem on esitatud joonisel 329, *b*. Fotoelemendi katoodi valgustamisel tekib võre ja hõõgniidi (katoodi) vahele lülitatud takistusel *R* pingelangus. Kuna fotovoolu ahelas on punkti *D* potentsiaal madalam kui punkti *C* potentsiaal, siis lambi *L* võre, mis on lülitatud takistuse *R* ühe otsa külge, saab katoodi suhtes negatiivse potentsiaali. Seetõttu võre takistab elektronide langemist katoodilt anoodile. Sellises olekus on lamp «suletud». Kui aga

valgus fotoelemendile ei lange, on lamp «avatud». Anoodahelas, mida toidetakse patareiga B_3, tekib vool. See vool magneedib anoodahelasse lülitatud elektromagneti *M*, mis tõmbab ankru *N* külge ja pöörab loendusmehhanismi rõngast *Z* ühe hamba võrra.



Joon. 330. Fotoelemendiga luksmeeter.

Joonisel 330 on kujutatud fotoelemendiga luksmeeter, s. t. riist, mis mõõdab valgustustugevust. Sõltuvalt valgustustugevusest tekib fotoelemendi ahelas erineva tugevusega vool, mida registreerib fotoelemendiga ühendatud tundlik galvanomeeter. Galvanomeetri skaala on graadueeritud luksides.



Joon. 331. Heli üleskirjutamise skeem professor Šorini järgi.

187. Heli üleskirjutamine ja reprodutseerimine. Kõikidest mitmekesistest fotoelemendi rakendustest on kaasaegses tehnikas kõige massilisem tema rakendamine helikinos.

On olemas mitu heli filmile üleskirjutamise süsteemi. Joonisel 331 on kujutatud professor A. F. Šorini poolt väljatöötatud heli filmile üleskirjutamise meetodi skeem.

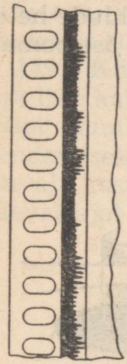
Vä kesest elektrilambist *s* tulevad valguskiired läbivad kitsast pilu *K* ja spetsiaalset objektiivi *O* ning langevad väga kitsa ribana pidevalt liikuvale valgustundlikule filmile *P*. Kiirte teele pannakse eriline riist, mida nimetatakse valguse modulaatoriks. See riist kasutab valgusvoo reguleerimiseks elektrilisi võnkumisi. Valguse modulaatoriks on magnet, mille pooluste vahele on pingutatud metallniit *L*. See niit on lülitatud vooluahelasse mikrofoniga *M* järjestikku. Mikrofonile mõjub helilaine.

Kuna niiti läbiva voolu tugevus muutub vastavalt heli võnkumistele, siis nende muutustega taktis võngub ka modulaatori niit. Seejuures katab niit kord suuremal, kord vähemal määral kinni valguskiirte tee. Ka kinofilmi valgustatakse sellele vastavalt kord tugevamini, kord nõrgemini.

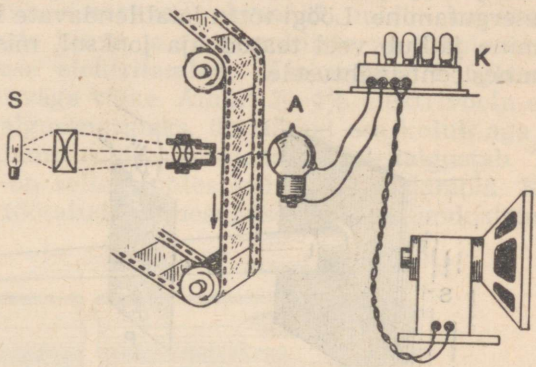
Seega on kinofilmi valgustundlikule kihile üles märgitud kõige väiksemad voolu tugevuse muutused, mida põhjustavad heli võnkumised mikrofoni ees.

Professor Šorini süsteemi järgi ülesmärgitud «heliriba» koosneb erineva pikkusega läbipaistmatute ristkriipsukeste kogust (joon. 332).

Kinofilmile heli üleskirjutamise protsessis, nagu näeme, fotoelementi ei rakendata.



Joon. 332. Heliriba.



Joon. 333. Skeem heli reprodutseerimise kohta kinos.

See-eest on kinofilmist heli reprodutseerimisel fotoelement täiesti hädavajalik.

Joonisel 333 on näidatud heli reprodutseerimise skeem kinos. Konstantse tugevusega lambist *S* tulev valgus koondatakse läätsedesüsteemi abil kitsaks kimbuks, mis langeb kinofilmile. Läbides kinofilmi «heliriba», muutub valgusvoog täpses vastavuses selle valgusvoo võnkumisele, mis mõjus filmile heli üleskirjutamise ajal. Fotoelemendis *A* tekib selle valgusvoo mõjul vool, mille tugevus muutub vastavalt talle langeva valguse muutumisele. Seda voolu võimendatakse võimendajaga *K* ja antakse valjuhääldajasse, mis on paigutatud ekraani taha või kõrvale. Valjuhääldajas kutsuvad elektrivoolu võnkumised esile heli kiirgava mehhaanilise süsteemi võnkumise.

188. Luminestsents. Põhilisteks valgusallikateks maakeral on tugevasti hõõguvad kehad. Selliseid valgusallikaid nimetatakse soojuslikeks valgusallikateks. Kuid peale soojuslike valgusallikate on olemas ka külmhelenduse allikaid, milledes valgusenergia saadakse teiste energialiikide (näiteks keemilise energia) arvel.

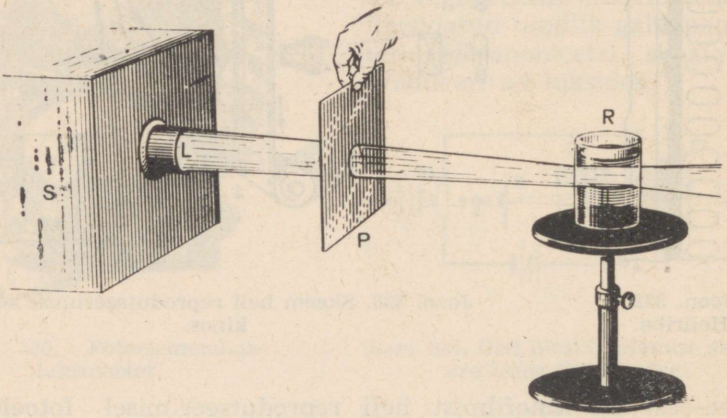
Võrdlemisi mitmekesist «külma valguse» nähtuste ringi nimetatakse l u m i n e s t s e n t s i k s[1].

Mitmekesised on ka luminestsentsi tekkimise põhjused. Putukate (näiteks jaaniusside), pehkinud puutükkide, mädaneva liha ja

[1] Luminestsents tuleb ladinakeelsest sõnast *lumen* (valgus).

teiste kehade helendumine, mida inimene tunneb juba ammust ajast, on külmhelenduse näideteks. Siin tekib helendus keemiliste protsesside, peamiselt just hapendumise tõttu.

Kui asetada alasile väike hulk kollaseid lämmastikhapu uraani kristalle ja lüüa nendele vasaraga, siis võib pimedas näha, et löögi puhul helenduvad need kristallid korraks ilusas rohelises valguses. Antud juhul on kristalli külmhelenduse põhjuseks tema mehhaaniline ergutamine. Löögi tõttu laialilendavate kristallikildude helendumine jätkub veel teatud aja jooksul, mis on väga iseloomulik luminestsentsinähtusele.



Joon. 334. Katseseade luminestsentsi uurimiseks.

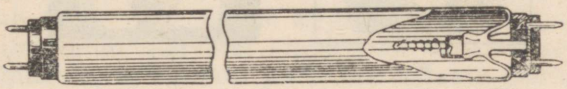
«Külma valguse» tekitajaks võib olla ka valgus ise. Asetades näiteks ultravioletsete kiirte teele mitmesuguste orgaaniliste kristallide (rodamiini, fluorestseiini, eskuliini) lahuseid, tekivad mitmesugust värvi (oranž, roheline, sinine jne.) helendused. Ka valge valgusega valgustamisel kiirgab fluorestseiin heledalt rohelisi kiiri. Klaasanumas asuv peaaegu värvitu petrooleumikiht näib küljelt vaadatuna helesinisena. Läbivalgustamisel rohekana näiv klorofüllilahus on küljelt vaadatuna punane.

Joonisel 334 on kujutatud seadeldise skeem, mis võimaldab vaadelda lahuste valgustamisel tekkivat luminestsentsi. Sellel skeemil on *S* valgusallikas, *L* — lääts, *P* — valgusfilter ja *R* — anum uuritava lahusega. Lämmastikhapu uraani kristallid ja teised uraaniühendid kiirgavad näiteks ka valguse mõjul heledalt rohelist valgust, täpselt samuti nagu nad kiirgavad mehhaanilisel ergutamiselgi. See fakt viitab tõsiasjale, et paljudel juhtudel ei sõltu luminestsentsi iseloom luminestsentsi tekitamise viisidest. Kuid kõikidel valguse poolt tekitatud luminestsentsijuhtudel omab luminestsentskiirgus teistsuguse spektraalse koostise kui teda esile kutsunud valgus. Luminestsentskiirgust ei saa seega vaadelda kui lihtsat valguse hajumist.

Tehnikas rakendatakse käesoleval ajal laialdaselt erilisi anorgaanilisi ühendeid, mida nimetatakse fosfooorideks. Nad helenduvad nii valguse toimel kui ka gaasis toimuval elektrilahendusel ioonidega ja elektronidega pommitamisel. Fosfooridel säilib luminestsents kaua ka pärast ergutava mõju katkemist.

Tugevalt luminestseeruvad näiteks tsinkoksiidi ja baariumi ning plaatina kahelistsüaani soolade kristallid. Kattes papitükke nende ainetega, saame luminestseeruvad ekraanid, mida kasutatakse muuseas ultravioletsete kiirte ja röntgenikiirte vaatlemiseks.

189. Külmhelenduse elektrilambid. Kaasaegsete hõõglampide optiline kasutegur on väga väike. Ainult 3—4% elektrivoolu energiast muutub neis valgusenergiaks, ülejäänud osa kulub aga soojendamiseks. Elektrilamp rohkem soojendab kui valgustab. Tunduvalt kasulikumad on selles suhtes külmhelenduslambid. Käesoleval ajal on välja töötatud mitmesuguseid gaashelenduslampide



Joon. 335. Päevavalguslamp.

tüüpe. Nende lambid on täidetud elavhõbeda või naatriumi auruga. Gaashelenduslampide poolt kiiratava valguse suurendamiseks ja valguse omaduste parandamiseks tegi akadeemik Vavilov ettepaneku katta gaashelenduslambi sisemine pind luminestseeruva ainega (luminofooridega).

Luminofoorid neelavad valgust ühes spektraalpiirkonnas ja muudavad selle teise spektraalpiirkonna valguseks. Valgustehnika jaoks on eriti tähtsad luminofoorid, mis muudavad neile langevate ultraviolettkiirte energia nähtava valguse energiaks. Ülalkirjeldatud lampe nimetatakse luminestsentslampideks.

Luminofooride spetsiaalse valikuga õnnestus konstrueerida päevavalguslampe, s. o. selliseid lampe, mille valguse spektraalne koosseis on samasugune kui päevase päikesevalguse oma. Joonisel 335 on kujutatud päevavalguslamp.

Sel ajal kui hõõglambid annavad iga vati kohta valgusvoo 7 kuni 20 luumenit, on luminestsentslampide poolt iga vati kohta antud valgusvoog 30—60 luumenit.

Gaashelenduslambid tõrjuvad aja jooksul välja väikese ökonoomsusega hõõglambid ja nende päralt on kahtlemata tulevik.

190. Valguse keemiline mõju. Valguse mõjul võivad toimuda väga mitmesugused keemilised reaktsioonid.

Valguse neeldumine kutsub mõningatel juhtudel esile aine lagunemise. Nii näiteks broomiaurude valgustamisel laguneb broomi molekul kaheks aatomiks. Sageli põhjustab valgus hapendumist.

Valguse poolt esilekutsutud reaktsioone nimetatakse *fotokeemilisteks reaktsioonideks*.

Fotokeemilistes reaktsioonides seisneb elementaarprotsess ainele langeva footoni neelamises aine molekuli poolt ja valgust neelanud molekulide keemilises muundumises.

Kõige aktiivsemateks kiirteks on lühikese lainepikkusega kiired: sinised, violetsed ja ultravioletsed. Kuna sellise valguse footonitel on suur energia, siis on see ka täiesti arusaadav.

a b

Joon. 336, *a* — negatiiv; *b* — positiiv.

Mõnikord annab valgus protsessile ainult algtõuke, kutsudes esile selle esimese staadiumi. Seejärel areneb aga protsess iseseisvalt edasi. Vesiniku ja kloori segu võib olla pimeduses klaasanumas kuitahes kaua, ilma et temaga toimuks mingit muutust. Kuid kui asetada anum päikesevalguse kätte, toimub mõlema gaasi kiire ühinemine kloorvesinikuks, kusjuures reaktsiooniga kaasub plahvatus. Siin kutsub valgus esile reaktsiooni, sarnaselt sellega, nagu dünamiiti sattunud säde kutsub esile dünamiidi plahvatuse.

Valguse pikaajalist keemilist mõju märkame värvide pleekimisel, mis seisneb kõige sagedamini värvaine hapendumises. Pleekimisel värvid tuhmuvad ainult niikaua, kui kaua nad on valguse mõju all.

Fotokeemilised reaktsioonid võivad seisneda ka liitaine lagunemises koostisosadeks. Kõige tähtsam seda liiki reaktsioon on taimede rohelistes osades neeldunud süsihappegaasi lagunemine valguse mõjul süsinikuks ja hapnikuks. Seda nähtust uuris üksikasjaliselt vene teadlane K. A. *Timirjazev*.

Tehnika seisukohalt on kõige tähtsamateks fotokeemilisteks reaktsioonideks fotoplaadi või -filmi valgustundlikus kihis toimuvad reaktsioonid.

Juba 1839. a. märgati, et joodhõbedaga kaetud metallplaat valguse mõjul muutub. Kui sellisele plaadile mõjuda elavhõbeda aurudega, siis valgustatud kohtades elavhõbe sadestub. Kui lahustada joodhõbe hüposulfitis, siis saadakse peegelplaadi valgustatud kohtades välge elavhõbeda-amalgaam. Sellise plaadi vaatlemisel teatud kindla nurga all võib näha eseme kujutist.

Kaasaegses fotograafias tehakse valgustundlikud plaadid klaasist või tselluloidist, millele kantakse kiht broomhõbeda emulsiooni želatiinis. Pärast kuivamist omandab selline kiht väga suure valgustundlikkuse. Kaasaegsed fotografeerimise meetodid võimaldavad näiteks teha momentvõtteid öistel valgustatud tänavatel.

Kuiv broomhõbedaga kaetud plaat asetatakse teatavaid ettevaatusabinõusid rakendades fotoaparaati ja tekitatakse sellele objektiivi abil kujutis.

Kui me võtame pimedas toas, mis on valgustatud broomhõbedale vähetundliku punase valgusega, plaadi aparaadist välja, siis ei näe me sellel mingisugust märgatavat muutust. Kuid asetades plaadi ilmutisse (hüdrohinooni, metooli jt. ainete lahusesse), muutuvad plaadi varem valgustatud kohad tumedaks. Mida heledamini oli üks või teine pildi koht valgustatud, seda tugevamini need kohad tumenevad. Valgustamata kohad ei muutu — neile jääb hele broomhõbeda kiht. Ilmutamisel saame n e g a t i i v i: negatiivi heledad kohad vastavad pildistatud eseme tumedatele kohtadele ja ümberpöördult (joon. 336). Et see kujutis valguse mõjul ei muutuks, tuleb ilmutatud ülesvõtet kinnistada. Selleks asetatakse ta hüposulfitilahusesse, kus ilmuti poolt taandamata jäänud broomhõbe lahustub. Negatiiv pestakse ja kuivatatakse.

Sellest negatiivist võib saada ükskõik kui palju positiive. Selleks pannakse negatiivi alla samasugune, üht või teist koostist omava valgustundliku kihiga kaetud paberileht ja valgustatakse negatiivi. Ilmutamisel saadakse negatiivi negatiiv ehk p o s i t i i v, s. o. selline kujutis, millel pildistatud objekti heledatele kohtadele vastavad heledad kohad ja tumedatele — tumedad kohad. Positiiv kinnistatakse, pestakse ja kuivatatakse samuti nagu negatiivgi. Positiivprotsesse on väga mitmesuguseid. Neist mõningate puhul saadakse negatiivi valgustamisel kohe nähtav kujutis, mis ei vaja enam edasist ilmutamist.

Fotokeemiline tehnika on tänapäeval saavutanud väga kõrge taseme. Võib saada ülesvõtteid loomulikes värvides, võib fotografeerida infrapunaste kiirtega (pimedas) (§ 177) jne.

191. Valguse rõhk. Vaadeldes komeetide liikumist, tegid teadlased kindlaks, et komeetide sabad, mis koosnevad väga väikestest osakestest, on alati suunatud Päikesest eemale ja et need sabad suurenevad komeetide lähenemisel Päikesele. Juba K e p l e r (1619. a.) püüdis komeetide sabade tekkimist seletada päikesekiirte rõhuga.

Maxwelli poolt väljatöötatud valguse elektromagnetiline teooria väitis, et mingi keha pinnale langev valgusvoog peab avaldama sellele pinnale rõhku.

Rohkearvulised katsed kinnitada neid teoreetilisi ennustusi ei andnud tulemusi. Paljud teadlased ei uskunud valguse rõhu olemasolu võimalust. Kuid vene füüsik P. N. L e b e d e v ületas kõik need raskused. Erakordselt peente ja keeruliste katsete abil oskas ta kindlaks teha valguse rõhu olemasolu ja mõõta selle rõhu suurust

algul (1899. a.) tahkete kehade ja hiljem (1909. a.) gaaside puhul.

Gaasidele avalduva valguse rõhu eksperimentaalne kindlakstegemine näitas, et Kepleri hüpotees komeetide sabade eemaletõukamisest päikesekiirte poolt on õige. Pärast Lebedevi katseid hakati valguse rõhku arvesse võtma kõikides kosmilisi protsesse käsitlevates teooriates.

Pjotr Nikolajevitš Lebedev (1866—1912) — kuulus vene füüsik. Ta tegi kindlaks ja mõõtis esimesena rõhu, mida valgus avaldab tahketele kehadele ja gaasidele. Lebedev sai elektromagnetilisi laineid, mille pikkus avaldub millimeetrites, ning tõestas nende lainete ja valguskiirte omaduste identsuse. Tema eksperimentaalsed uurimused kinnitasid valguse elektromagnetilise teooria õigsust ja aitasid seega kaasa valguse olemuse avastamisele. Lebedev oli väljapaistev kollektiivse teadusliku töö organiseerija. Ta lõi esimese suure vene füüsikute koolkonna, millest võrsusid paljud suured nõukogude teadlased.

Joonisel 337 on kujutatud seadeldise skeem, mille abil P. N. Lebedevil õnnestus kindlaks teha ja mõõta tahketele kehadele avalduvat valguse rõhku.

Läbinud kogu läätsede ja peeglite süsteemi, langeb elektrikaarest *B* tulev valgus torsioonkaalude kergele kettale *R*. Torsioonkaalud ripuvad õhust tühjaks pumbatud klaasballoonis peene niidi otsas. Kaalude pöördumise järgi valguse rõhu mõjul võib otsustada valguse rõhu suuruse üle. On märkimisväärne, et Lebedevi katsetes muutub valgusenergia vahetult mehhaaniliseks energiaks.

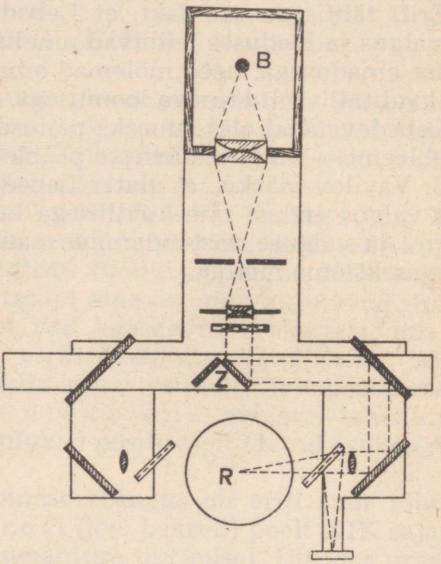
Joonisel 338 on kujutatud mitmesugused mõõtmisseadeldised, mida Lebedev kasutas oma katsetes.

Tahketele kehadele avalduva valguse rõhu mõõtmisel tuli Lebedevil ületada erakordselt suuri raskusi. Milles need raskused siis seisnesid? Eelkõige tekivad peenikese niidi otsa riputatud väikeste ketaste valgustamisel nn. r a d i o m e e t r i l i s e d j õ u d, mis on sadasid tuhandeid kordi suuremad valguse poolt avaldatavast rõhumisest. Radiomeetriliste jõudude tekkimine seletub järgmiselt. Kettale langev valgus soojendab ketta valgustatud külge, mistõttu see on soojem kui varjus asuv külg. Seetõttu lüüakse ketta soojemale küljele langevad gaasi molekulid ketta aine molekulide poolt tuge-

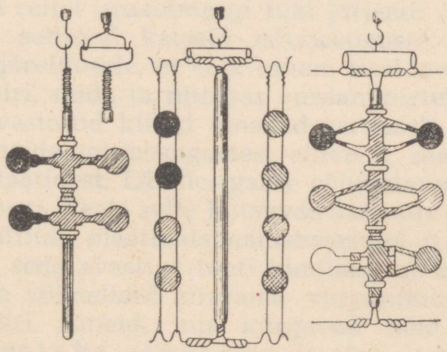
vamini tagasi kui ketta vastasküljele, s. o. külmemale küljele langevad gaasi molekulid. Gaasi molekulid annavad aga kettalt peegeldumisel «tagasilöögi». Soojemale (valgustatud) küljele on tagasilöök suurem kui külmemale (valgustamata) küljele. Selle tulemusena saadakse tagasilöökide resultant, mis on suunatud samale poole, kuhu on suunatud uuritav valguse rõhkki.

Lebedevil tuli eelnevalt uurida radiomeetriliste jõudude mõju, kusjuures selgus, et need jõud on seda väiksemad, mida hõredam on gaas ja mida õhemad on valmistatud kettad.

Peale radiomeetriliste jõudude mõjusid kettale veel k o n v e k t s i o o n i j õ u d, mis ületasid kümneid tuhandeid kordi valguse rõhumise. Konvektsioonijõudude tekkimise põhjus on järgmine. Katseriista ketta soojendamisel temale langevate kiirte poolt soojeneb ka ketta läheduses asuv õhukiht. Seejuures tekib valgustatud pool ja varju pool asuvate gaasikihtide temperatuuride erinevus, mis põhjustab konvektsioonivoolude tekkimise. Hõrenduse suurendamisel riistas kahanevad ka need jõud. Lastes ühest ja samast valgusallikast tulevaid kiiri langeda kord ketta ühele, kord teisele küljele, kõr-



Joon. 337. Lebedevi poolt valguse rõhu mõõtmisel kasutatud katseseadme skeem.



Joon. 338. Lebedevi katseseadme detailid.

valdas Lebedev konvektsioonijõud. See saavutati joonisel 337 kujutatud peegli nihutamisega.

Lebedevil õnnestus seega vähendada kõrvalisi jõude miinimumini ja võtta täpselt arvesse nende mõju. Lebedevi katsed näitasid järgmist: 1) valguskiirte kimp avaldab rõhku nii neelavatele kui ka peegeldavatele pindadele; 2) valguse rõhk on võrdeline pinnale langeva kiirte energiaga ja ei sõltu nende värvist.

Eriti tähtis on see fakt, et Lebedev näitas esimesena tõsiasja, et valgus ja looduses leiduvad ainelised kehad on seotud järgmise ühise omadusega: need mõlemad omavad massi, olgugi et see mass on kvalitatiivselt erineva loomusega.

Lebedevi tööd olid suureks panuseks ühe sügavaima teadusliku probleemi — valguse olemuse probleemi lahendamisel. Akadeemik S. I. Vavilov märkis, et alates Lebedevi avastusest «hakkas füüsikas valgus endast täie kindlusega kujutama üht liikuva mateeria vormi ja valguse vastandamine mateeriale kaotas selles sünteesis igaveseks oma mõtte».

XI PEATÜKK

AATOMI EHITUS

192. Aatomi keerulist ehitust tõestavaid nähtusi. Sõna aatom tähendab kreeka keeles jagamatu. Vana-kreeka teadlased lugesid aatomit jagamatuks osakeseks — omapäraseks «telliseks», millest on ehitatud kõik looduses esinevad kehad.

Kujutlus aatomi jagamatusest püsis füüsikas peaaegu kuni XIX sajandi lõpuni. Edasine füüsika areng muutis täielikult selle kujutluse. Elektromagnetiliste nähtuste tundmaõppimine XIX sajandi lõpul ja XX sajandi algul näitas, et aine aatomid kujutavad endast keerulisi moodustisi. Leiti, et nad koosnevad osakestest, mis on positiivsete ja negatiivsete elektrilaengute kandjateks. Algul õnnestus aine aatomist eraldada väga väikseid (elementaarseid) negatiivselt laetud osakesi — *elektrone*. Seejärel tehti kindlaks, et aatomite koostisse kuuluvad positiivselt laetud osakesed — *prootonid*.

Aatomi ehituse tundmaõppimise arengus oli eriti suur tähtsus prantsuse teadlase *Becquerel'i* (loe: bekrell) poolt XIX sajandi lõpul avastatud radioaktiivsusenähtuse uurimisel. Uurides uraaniscolade luminestsentsi, märkas Becquerel, et kui päikesekiirtega valgustatud uraanisool panna musta paberi sisse mähitud fotoplaadile, siis fotoplaat tumeneb. Ta oletas, et tumenemist põhjustab luminestsentskiirgus.

Ükskord asetas aga Becquerel fotoplaadile sellise uraanisoola tüki, mida ei olnud enne päikesekiirtega valgustatud, ja pani kogu preparaadi pimedasse kasti. Ilmutades mõne päeva pärast fotoplaadi, leidis ta sellel uraanimaagi tüki jäljendi (joon. 339).

Korraldanud selliseid katseid mitmesuguste uraanisooladega, tuli Becquerel järeldusele, et kõik uraani sisaldavad ühendid kiirgavad erilisi kiiri, mida ta nimetas «uraanikiirteks».

Osutus, et avastatud kiired omavad sarnaselt röntgenikiirtega võimet läbi tungida mitmesugustest ainetest, sealhulgas ka õhukestest metallplaatidest. Läbides gaase põhjustavad «uraanikiired» nende ionisatsiooni. Peale selle kutsuvad nad esile mõningate ainete (näiteks tsinksulfiidi, plaatinatsüaanisbaariumi jt.) luminestsentsi.

Varsti pärast seda avastust tehti kindlaks, et ka teiste elementide ühendid on võimelised kiirgama «uraanikiirtega» sarnaseid nähtamatuid kiiri. Aineid, mis kiirgavad neid kiiri, nimetati *radioaktiivseteks aineteks* ja aine omadust kiirata selliseid kiiri *radioaktiivsuseks*.

Radioaktiivsust uurisid igakülgselt Pierre ja Marie Curie (loe: pjeer ja marii kürii). 1898. aastal õnnestus neil uraanimaagist eraldada kaht radioaktiivset elementi: polooniumi (Po) ja raadiumi (Ra).

Raadium on haruldane element. Selleks et saada üht grammi puhast raadiumi, tuleb töödelda vähemalt 5 tonni uraanimaaki.

Raadiumi radioaktiivsus on mitu miljonit korda suurem kui uraani oma. Võib avastada juba kümnemiljardiku grammi raadiumi olemasolu tema radioaktiivse mõju tõttu.

Edaspidi avastati veel terve rida radioaktiivseid elemente.

Joon. 339. Becquerel'i poolt saadud jäljend uraanimaagi tükist.

Mitmesuguste katsete tulemusena järeldati, et radioaktiivsus on aine aatomite sisemuses toimuvate protsesside tulemus. Elektromagnetiliste nähtuste ja radioaktiivsuse uurimine võimaldasid seega kindlaks teha, et aatom on keeruline osake, mille sees toimuvad omapärased füüsikalised protsessid. Tekkis küsimus: milline on aatomi struktuur, millistest elementaarosakestest ta koosneb ja kuidas need osakesed liiguvad?

193. Radioaktiivse kiirguse liigid. Varsti pärast radioaktiivsuse avastamist tehti kindlaks, et radioaktiivne aine kiirgab kolme liiki kiiri, mis erinevad üksteisest ainetest läbitungimise võime ja teiste omaduste poolest. Neid nimetati α-kiirteks, β-kiirteks ja γ-kiirteks.

Mõjudes radioaktiivsele kiirgusele magnetväljaga, võib neid kiiri eraldada (joonisel 340 on magnetväli risti joonise tasapinnaga); magnetväli kallutab α-kiired ja β-kiired kõrvale vastupidistes suundades, kuid γ-kiiri ta kõrvale ei kalluta.

α-, β- ja γ-kiirguse uurimine võimaldas kindlaks teha nende olemust. Osutus, et α-kiired kujutavad endast kiiresti (kiirusega suurusjärgus $2 \cdot 10^9 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$) liikuvate osakeste voogu. Igaüks neist osakestest on laetud kahekordse elementaarlaenguga ja omab hee-

liumi aatomiga võrdset massi. Seega α-osakesed on kahekordselt ioniseeritud heeliumiaatomid.

β-kiired kujutavad endast elektronide voogu, millede kiirus võib ulatuda 99%-ni valguse kiirusest. Kuna elektronide mass on palju väiksem α-osakeste massist, siis β-osakesed kalduvad magnetväljas tugevamini kõrvale kui α-osakesed. γ-kiired on väga lühilaineline elektromagnetiline kiirgus.

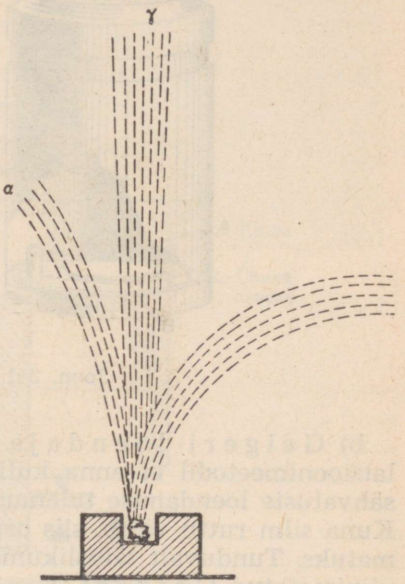
Osakesed paiskuvad radioaktiivse aine sisemusest välja suure kiirusega, järelikult kannavad nad endaga kaasas ka suurt energiahulka.

Aatomifüüsikas väljendatakse harilikult osakese energiat erilistes ühikutes — elektronvoltides (eV) või megaelektronvoltides (MeV), kusjuures üks megaelektronvolt on miljon elektronvolti.

Energiahulk 1 eV on võrdne sellise tööga, mis tehakse elektroni ümberpaigutamisel ühest elektrivälja punktist teise, juhul kui nende elektrivälja punktide vaheline pinge on üks volt.

Väljendame elektronvoldi ergides:

$$1\ \text{eV} = 4{,}8 \cdot 10^{-10} \frac{1}{300}\ \text{ergi} = 1{,}6 \cdot 10^{-12}\ \text{ergi}.$$



Joon. 340. Skeem radioaktiivse kiirguse komponentideks lagunemise kohta magnetväljas.

Kui väljendada radioaktiivsel lagunemisel saadud α-osakeste energia elektronvoltides, siis osutub, et see on vahemikus 4 MeV kuni 9 MeV.

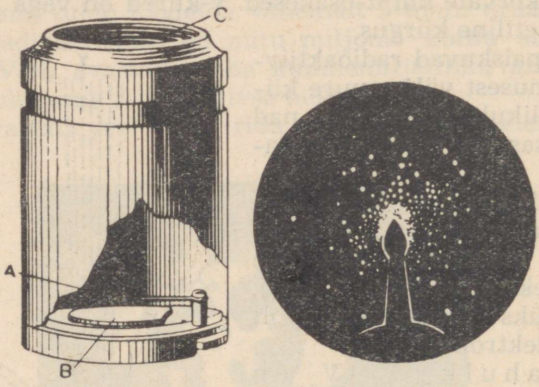
194. Osakeste uurimise eksperimentaalsed meetodid. Üksikute osakeste kindlakstegemiseks ja aine ning osakeste vahelise vastastikuse mõju uurimiseks on tänapäeval füüsikute käsutuses mitmesuguseid meetodeid. Vaatleme neist ainult stsintsillatsioonide ja Wilsoni kambri meetodeid.

a) Stsintsillatsioonide (sähvatuste) meetod. Katse näitab, et õhukese tsinksulfiidikihiga kaetud ekraanile langevad osakesed tekitavad ekraanil valgusesähvatusi (sädemeid), mida võib vaadelda luubi abil. Sähvatuste järgi võib loendada radioaktiivse aine poolt ajaühikus kiiratud α-osakeste arvu. Kõige lihtsamal kujul on see meetod leidnud rakendamist Crookes'i spintariskoobis (joon. 341).

Tsinksulfiidist tehtud ekraani *B* kohal punktis *A* asub broom-

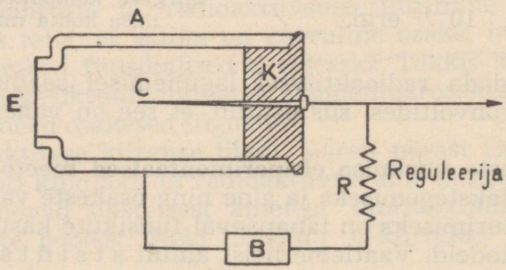
raadiumi terake. Kui vaadata läbi luubi *C*, hoides eelnevalt silmi pimeduses, siis näeme ekraani eri kohtades sagedasi sähvatusi.

β-osakesed omavad väikest massi ning väikest kineetilist energiat ja nende poolt tekitatud sähvatused on nõrgad. Seetõttu on neid sel meetodil raske vaadelda.



Joon. 341. Spintariskoop.

b) G e i g e r i l o e n d a j a. Osakeste registreerimine stsintsillatsioonimeetodil ei anna küllaldast täpsust: ekraanile tekkivate sähvatuste loendamise tulemus sõltub vaatleja nägemisteravusest. Kuna silm ruttu väsib, siis osutub pikemaajaline vaatlemine võimatuks. Tunduvalt täiuslikumaks osakeste loendamise riistaks on niinimetatud G e i g e r i l o e n d a j a. Sellise loendaja töötamise printsiibi selgitamiseks vaatleme joonist 341, *a*.

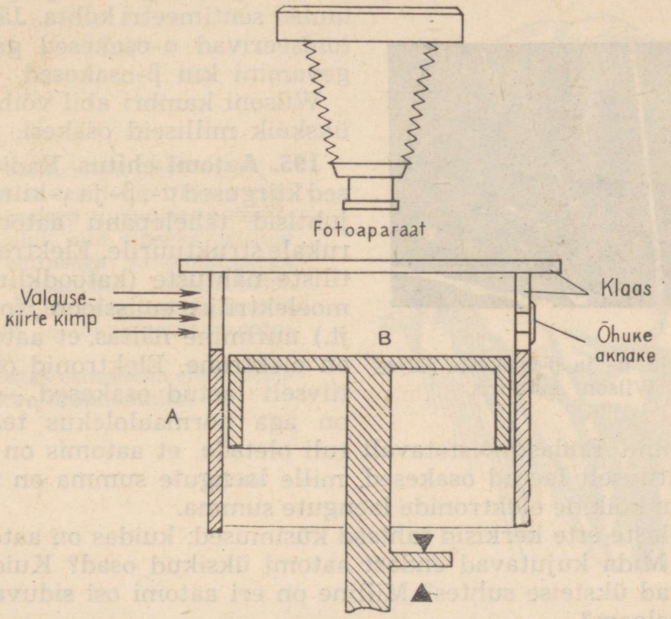


Joon. 341, *a*.

Metallsilindri *A* ühes otsas on isoleeritud ainest valmistatud kaas *K*, teises otsas aga aknake, mida tihedalt suleb vilgukiviplaat *E*. Läbi kaane *K* on pistetud metallteravik *C*, millele vooluallikas *B* annab takistuse *R* kaudu kõrge alalispinge. Silindri *A* korpuse ja teraviku *C* vahel tekib seega tugev elektriväli.

Silindris *A* on hõrendatud gaas. Kui gaas ei ole ioniseeritud, siis

vooluallika *B* ahelas vool puudub. Oletame, et läbi aknakese *E* lendab silindrisse *A* mingi osake, mis on võimeline gaasi ioniseerima; sel juhul tekivad *A* ja *B* vahelisse elektrivälja ioonid, mis põhjus-



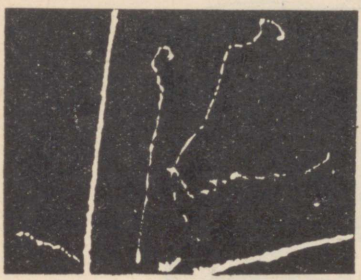
Joon. 342. Wilsoni kambri skeem.

tavad lühiajalist elektrivoolu; viimast võib vahetult registreerida mõõduriistaga või võimendada ja edasi anda mingile registreerimisseadeldisele. Sel teel võib täpselt loendada antud kohta ja antud suunas lendavaid osakesi, eeldades, et need osakesed on võimelised gaasi ioniseerima.

c) Wilsoni kamber. Kui läbi üleküllastatud auru sisaldava ruumi lendab kiiresti liikuv osake, siis ta tekitab oma teel icone. Nagu kogemus näitab, osutuvad need ioonid kondensatsioonitsentriteks, millele koguneb väikeste tilgakestena veeaur. Kogu osakese tee ulatusel tekib veepiiskadest koosnev kitsas jälg, mis tähistab osakese teed. Kirjeldatud nähtus on aluseks ühe tähtsaima kaasaegse füüsika katseriista — Wilsoni kambri ehitusele. Joonisel 342 kujutatud Wilsoni kamber koosneb silindrilisest anumast *A*, mille ülemised seinad ja põhi on tehtud klaasist. Silindris võib liikuda kolb *B*. Kambris on küllastatud vee- või piirituseaur. Kolvi liikumisel alla tekib kambris üleküllastatud aur. Uuritavad osakesed lastakse kambrisse läbi väikese aknakese.

Osakeste jälgede fotografeerimisel valgustatakse kambrit tugevasti.

Joonisel 343 on toodud α- ja β-osakeste jälgede fotod. Ei ole raske märgata, et mõlemad jälgede tüübid erinevad osaliselt teineteisest. α-osakese jälg on tugev, β-osakese jälg aga kitsas. α-osakese jäljes ühe sentimeetri kohta tulevate veepiisakeste arv on suurusjärgus 10 000, β-osakese jäljes on aga kõigest saja piisakese ümber sentimeetri kohta. Järelikult ioniseerivad α-osakesed gaasi tugevamini kui β-osakesed.



Joon. 343. α- ja β-osakeste jäljed Wilsoni kambris.

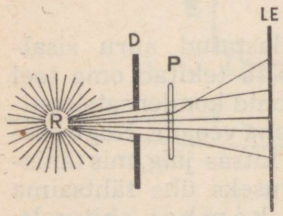
Wilsoni kambri abil võib uurida ükskõik milliseid osakesi.

195. Aatomi ehitus. Radioaktiivsed kiirgused α-, β- ja γ-kiirte kujul juhtisid tähelepanu aatomi keerukale struktuurile. Elektromagnetiliste nähtuste (katoodkiirte, termoelektrilise emissiooni, fotoefekti jt.) uurimine näitas, et aatomi sees on elektrone. Elektronid on negatiivselt laetud osakesed — aatom on aga normaalolekus teatavasti neutraalne. Endastmõistetavalt tuli oletada, et aatomis on olemas ka positiivselt laetud osakesed, mille laengute summa on niisama suur kui kõikide elektronide laengute summa.

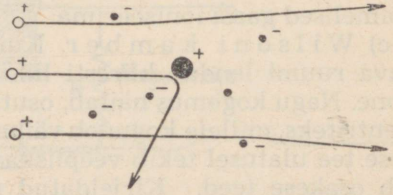
Teadlaste ette kerkisid tähtsad küsimused: kuidas on aatom ehitatud? Mida kujutavad endast aatomi üksikud osad? Kuidas nad asetsevad üksteise suhtes? Milline on eri aatomi osi siduvate jõudude iseloom?

Paljude katsete ja teoreetiliste uurimuste tulemusena ehitati üles aatomiteooria. Selle teooria väljakujunemisel olid eriti tähtsad Rutherfordi (loe: rathföd) poolt teostatud katsed, milledes ta uuris α-osakeste läbitungimist õhukestest metallplaatidest.

Nende katsete põhiideed illustreerib joonis 344.



Joon. 344. α-osakeste hajumise uurimiseks kasutatava katseseadme skeem.



Joon. 345. Aatomi tuumast erinevatel kaugustel möödalendavate α-osakeste trajektoorid.

α-osakeste allika *R* ette on asetatud diafragma *D*, mille keskel on väike ava. Avale langevad α-osakesed läbivad seda kitsa kimbuna. Läbipaistva luminestseeruva ekraani *LE* sellel kohal, kuhu

langeb α-osakeste kimp, tekib helenduv laik, mis kujutab endast iga üksiku α-osakese löögi tõttu tekkinud sähvatuste (stsintsillatsioonide) kogu. Kuna sekundis ekraanile langevate osakeste arv on suur, siis üksikud stsintsillatsioonid liituvad vaatlejale heledaks laiguks.

Ernst Rutherford (1871—1937) — suur inglise teadlane. Tema eksperimentaalsed uurimised aatomifüüsika alalt olid aluseks paljude aatomi ehitusega ja omadustega seotud saladuste avastamisel. Rutherford avastas aatomi tuuma olemasolu ja lõi planetaarse aatomimudeli.

Ta teostas esimesena elementide kunstlikku muundamist.

Pannes ekraani ette mingisugusest ainest õhukese kile *P*, näiteks 1 μ paksuse kuldlehe, näeme, et helenduva laigu intensiivsus väheneb. Samal ajal ilmub teatav hulk stsintsillatsioone väljaspool tsentraalset kimpu. Neid stsintsillatsioone kutsuvad esile α-osakesed, mis kuldlehte läbides muutsid oma lennusuunda, s. t. hajusid. Loendades ühes ajaühikus ekraani eri kohtades toimuvate stsintsillatsioonide arvu, võib määrata hajunud α-osakeste jaotuse ruumis.

Leiti, et hajumisnurga suurenedes kahaneb α-osakeste arv kiiresti. Järelikult läbib suurem osa α-osakestest kuldlehte ilma oma esialgsest liikumise suunast kõrvale kaldumata. Siiski esines üksikuid osakesi, mis kaldusid kõrvale väga suurte nurkade all. Mõni neist muutis oma liikumise suunda peaaegu 180° võrra.

Millega seletada α-osakeste kõrvalekaldumist ainet läbides? Täiesti loomulik on oletada, et α-osakeste hajumine on põhjustatud aine koosseisu kuuluvate osakeste mõjust.

Kuna α-osakese mass ületab elektroni massi 8000 korda, siis tuleb väita, et α-osakeste liikumise suuna muutumine plaadi läbimisel ei ole mingil juhul põhjustatud plaadi aine koosseisu kuuluvate elektronide poolt.

Rutherfordil õnnestus vaadelda selliseid juhte, kus üksikud α-osa-

kesed kaldusid kõrvale täisnurgast suurema nurga võrra. Sellised juhud võisid esineda ilmselt ainult siis, kui α-osake läks lähedale aine positiivselt laetud osakesele ja tõukus sellelt tagasi (joon. 345).

Kuna α-osakeste suuri kõrvalekaldumisi esines võrdlemisi harva, siis Rutherford tuli selle fakti põhjal järeldusele, et ainult väike osa aatomist kujutab endast tõket α-osakestele nende läbitungimisel ainest.

Analüüsinud rohkearvuliste katsete tulemusi, esitas Rutherford 1911. a. aatomist järgmise mudeli.

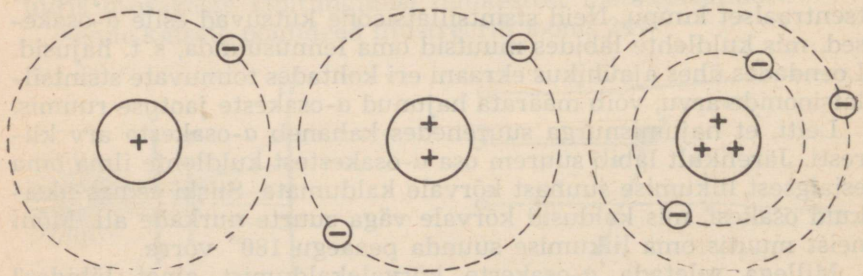
Aatom koosneb positiivselt laetud tuumast, mis võtab enda alla väga väikese osa aatomi ruumalast. (Tuuma diameeter on suurusjärgus 10^{-12}—10^{-13} cm.) Tuuma ümber asuvad elektronid.

Elektronid tiirlevad ümber tuuma temast võrdlemisi suurtel kaugustel. Nende elektronide kogu nimetatakse *elektronkatteks*. Seega kujutletakse aatomit väiksemastaabilise päikesesüsteemina (seepärast nimetatakse sellist aatomi mudelit *planetaarseks*).

Uurides tuumalaengu suuruse küsimust, tulid teadlased järeldusele, et erinevate ainete aatomituumad omavad positiivset laengut suurusega Ze, kus e on elektroni laeng ja Z elemendi järjekorranumber Mendelejevi perioodilisuse süsteemis.

Katsed näitavad, et aatom tervikuna on neutraalne; järelikult tuuma positiivne laeng peab olema neutraliseeritud temaga võrdse negatiivse laenguga. Siit on selge, et tuuma ümber tiirlevate elektronide arv peab olema võrdne elemendi järjekorranumbriga. Näiteks vesiniku aatomis tiirleb tuuma ümber 1 elektron, heeliumi aatomis 2, liitiumi omas 3; nii jätkub see kuni uraanini, mille aatomis tiirleb tuuma ümber 92 elektroni.

Joonisel 346 on kujutatud vesiniku, heeliumi ja liitiumi aatomite mudelid.



Joon. 346. Vesiniku, heeliumi ja liitiumi aatomite mudelid.

Arvestades seda asjaolu, et elektronide arv aatomis on võrdlemisi väike (võrdne elemendi järjekorranumbriga) ja et elektroni mass on 1840 korda väiksem kõige kergema aatomi — vesinikuaatomi massist, võime tulla järeldusele, et praktiliselt kogu aatomi mass on kontsentreeritud tema tuuma.

196. Aatomiteooria areng. Elektromagnetiliste lainete neelamine ja kiirgamine aatomite poolt. Peale Rutherfordi katsete, mis viisid aatomi planetaarse mudeli loomisele, etendab aatomiteooria arengus väga tähtsat osa elektromagnetiliste lainete neelamise ja kiirgamise küsimuse uurimine.

Paragrahvis 182 räägiti valguse elektromagnetilisest olemusest ja sellest, et valguskiirte (elektromagnetiliste lainete) allikaks on aine aatomid. Kuidas siis aatomid kiirgavad? Sellele küsimusele leiti vastus pärast pikaajalisi otsinguid. Algul vastati sellele järgmiselt.

Kuna aatomis negatiivselt laetud elektron liigub mööda suletud orbiiti ümber positiivse tuuma (kesktõmbe) kiirendusega, siis ta tekitab muutuva elektromagnetilise välja. Seega aatom osutub elektromagnetiliste lainete allikaks. Nende lainete pikkus või kiirguse võnkesagedus on määratud sagedusega, millega elektron tiirleb ümber tuuma.

Kuna elektron võib tiirelda ümber tuuma ükskõik millise sagedusega, siis tuleb loota, et antud aine aatomite kiirgusspektris on esindatud kõikvõimalike lainepikkustega kiired.

Kui võtta mingi gaas, s. o. hiiglasuure arvu aatomite kogus, ja panna see helenduma (näit. kuumutamise teel), siis saadud valguse spekter peab olema pidev — üleminek ühelt sageduselt teisele peab toimuma pidevalt.

Siiski ei osutunud selline vastus aatomi kiirguse mehhanismi kohta rahuldavaks. Katsed näitavad täiesti vastupidist.

Esiteks ei ole helenduva hõrendatud gaasi spekter pidev spekter, vaid on joonspekter, mis koosneb üksikutest üksteisest eraldatud joontest. Teiseks on nende joonte sagedus selline, et joonte tekkimist ei saa seletada, kasutades kujutlust, mille kohaselt kiirgus tekib elektronide tiirlemisest ümber tuuma.

Peale selle näitas ülalesitatud kujutlus oma täielikku võimetust aatomi püsivuse (stabiilsuse) küsimuse lahendamisel.

Kui elektron, liikudes ümber tuuma, kiirgab pidevalt elektromagnetilisi laineid, siis aatomi energiavaru peab pidevalt vähenema. Tõepoolest, elektromagnetiliste lainete poolt kantakse endaga kaasa ka energiat, viimane aga ammutatakse aatomi sisemistest energiavarudest. Aatomi energia vähenemisel peab tiirlev elektron pidevalt lähenema tuumale ja elektriliste tõmbejõudude tõttu kukkuma lõpuks tuuma. Aatom kaotab oma elektronkatte ja koos sellega ka oma füüsikalised ja keemilised omadused.

Katsed näitavad aga, et aatomid on väga püsivad süsteemid.

Juba XX sajandi algul tulid teadlased järeldusele, et elektromagnetiliste lainete kiirgamisest ja neelamisest aatomite poolt tuleb luua uued kujutlused. Eelkõige oli vaja seletada fotoefekti (meie vaatlesime seda paragrahvis 183).

Katsed näitavad, et real juhtudel tuleb valgust vaadelda footonite voona, millede energia on $h\nu$ (see kehtib ka röntgenikiirte ja γ-kiirte kohta). Kuidas aga need footonid tekivad?

Kasutades kujutlust ümber tuuma tiirleva elektroni pidevast kiirgusest, oli samuti ka sellele küsimusele võimatu vastata.

1913. a. lõi taani füüsik Niels Bohr teooria, mis võimaldas anda eespool püstitatud küsimustele vastuse.

Bohr oletas, et aatom võib olla niinimetatud statsionaarsetes olekutes, kus ta ei kiirga ega neela energiat. Sellise aatomi elektronid, mis asuvad ühes neist olekutest, tiirlevad mööda statsionaarseid orbiite ega kiirga seejuures elektromagnetilisi lainеid. Kiirgamine ja neelamine tähendab aatomi üleminekut ühest statsionaarsest olekust (näiteks energiaga E_1) teise olekusse (energiaga E_2), millele vastab elektroni üleminek ühelt statsionaarselt orbiidilt teisele. Sellise ülemineku puhul kiiratakse või neelatakse footon, mis omab kindla annuse elektromagnetilist energiat, s. o. energiakvanti. Energiakvandi suuruse annab seos

$$h\nu = E_1 - E_2,$$

kus ν on elektromagnetilise kiirguse sagedus ja h Plancki konstant.

Mõjutades aine aatomeid valgusega, röntgenikiirtega, α-kiirte või elektronide vooga, võib esile kutsuda aatomi üleminekut ühest statsionaarsest olekust teise. Sellist aatomi oleku muutumist nimetatakse ergutamiseks.

Ergutatud olekus ei ole aatom kaua (mõni miljardik osa sekundist); ta kiirgab välja footoni ja pöördub seejärel oma normaalsesse, mitteergutatud olekusse tagasi. Sellega seletubki footonite tekkimine.

Bohri teooria järgi võib seletada ka spektraaljoonte tekkimist. Iga spektraaljoon tekib selle tulemusena, et üleminekul ühest energeetilisest olekust teise kiirgab aatom footoni. Aatomi algoleku ja lõppoleku energiate vahe määrab siin elektromagnetilise kiirguse võnkesageduse ja järelikult ka antud joone asukoha spektris.

Aatomite diskreetsete energeetiliste olekute olemasolu osutub üheks aatomi omaduste kõige iseloomulikumaks jooneks ja see on tõestatud paljude katsete abil.

Küsimus sellest, kuidas aatomi energeetilised olekud on seotud aatomi struktuuriga, tema osade vastastikuse paigutusega, on suureks teaduslikuks probleemiks, mida aatomifüüsika väsimatult uurib.

Aatomiteooriat arendatakse tänapäeval edasi kvantmehhaanikas. Kvantmehhaanika näitas, et aatomite ja molekulide maailmas, nn. mikromaailmas kehtivad sellised seadused, mis erinevad makromaailma, s. o. meie poolt vahetult vaadeldavate kehade maailma seadustest.

197. Isotoobid. Aatomifüüsika arengus etendas väga tähtsat osa isotoopide, s. o. selliste elementide avastamine, mis asuvad Mendelejevi perioodilisuse süsteemis ühel ja samal kohal.

Nagu mõõtmised näitavad, väljenduvad ainete radioaktiivse lagunemise tulemusena saadud isotoopide aatomkaalud täisarvudes. Nii näiteks uraanimaagis leiduva seatina isotoobi aatomkaal võr-

dub 206-ga, aktiiniumimaagis 207-ga ja tooriumimaagis 208-ga; väljaspool radioaktiivseid maake leiduva seatina aatomkaal on aga 207,2. Oli täiesti loomulik oletada, et see «harilik» seatina kujutab endast seatina isotoopide segu. Katse kinnitas seda oletust.

Edaspidi tehti kindlaks, et kõikide, sealhulgas ka mitteradioaktiivsete elementide isotoopide aatomkaalud väljenduvad täisarvudes. Kuidas siis seletada seda fakti, et paljude elementide aatomkaalud ei väljendu täisarvudes? Sellest on lihtne aru saada järgmiste näidete abil.

Klooril on kaks isotoopi aatomkaaludega 35 ja 37, mille suhteline sisaldus on vastavalt 75% ja 25%. Siit saadaksegi kloori keskmine aatomkaal:

$$(35 \cdot 0{,}75) + (37 \cdot 0{,}25) = 35{,}5.$$

Peaaegu kõikidel elementidel on olemas isotoobid. Nii näiteks omab hapnik kolm isotoopi, aatomkaaludega 16, 17 ja 18; lämmastikul on kaks isotoopi, aatomkaaludega 14 ja 15, inglistinal on isegi 11 isotoopi.

Eriti huvitav on vesiniku raske isotoop, nn. deuteerium (keemiline sümbol *D*). Tema aatomite mass on peaaegu kaks korda suurem kui vesiniku põhiisotoobi aatomitel. Raske vesiniku tuuma nimetatakse deutoniks (ehk deutroniks).

Vett, mille molekulis hariliku vesiniku asemel on deuteerium, nimetatakse raskeks veeks (D_2O). Raske vesi erineb harilikust veest märgatavalt oma füsioloogiliste ja biokeemiliste ning tunduval määral ka keemiliste ja füüsiliste omaduste poolest.

Nii näiteks raske vee tihedus on 12% võrra suurem hariliku vee tihedusest. Raske vesi külmub 3,8° *C* juures ja keeb temperatuuril 101,4° *C* (normaalse õhurõhu puhul).

Paljudele elavatele organismidele mõjub raske vesi hävitavalt.

198. Massiarv. Tuumade tähistamine. Aatomifüüsikas väljendatakse aatomi tuumade masse suhtelistes ühikutes: neid arvestatakse hapniku isotoobi aatomi massi suhtes, mis võetakse võrdseks 16-ga. Kerge vesiniku aatomi mass on selle massi suhtes 1,008, heeliumil 4,003, liitiumil 6,940 jne.

Isotoobi aatomkaalu suurusele kõige ligem täisarv kannab massiarvu nimetust.

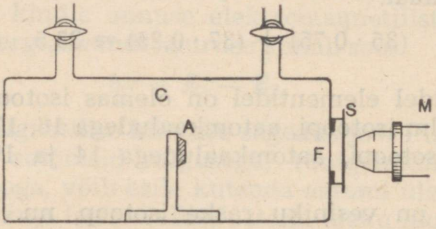
On kokku lepitud tähistada tuuma sellele tuumale vastava elemendi keemilise sümboliga ja kahe indeksiga: ülemisega ja alumisega. Ülemine indeks tähistab massiarvu ja alumine indeks laengut (järjekorranumbrit perioodilisuse süsteemis). Nii näiteks sümbolid ${}_1H^1$, ${}_8O^{16}$, ${}_6C^{12}$, ${}_7N^{14}$ tähistavad vesiniku, hapniku, süsiniku ja lämmastiku isotoopide tuumi, mille «massid» on vastavalt 1, 16, 12 ja 14 ning laengud 1, 8, 6 ja 7.

199. Elementide kunstlik muundumine. Kui aatom neelab või kiirgab elektromagnetilisi laineid, siis ta ei muuda oma keemilisi omadusi. Tema individuaalsus säilib. Kas on üldse võimalik sun-

dida aatomit muutma oma omadusi, kas on võimalik muuta üht aatomit teiseks?

Selle sajandeid kestnud alkeemikute unistuse — kunstliku elementide muundamise — teostas esmakordselt 1919. a. Rutherford. Seadeldise skeem, mille abil teostati esimene muundamine, on kujutatud joonisel 347.

Kambris *C* asub α-osakesi kiirgav radioaktiivne aine *A*. Langedes ekraanile *S*, kutsuvad need osakesed esile stsintsillatsioone, mida vaadeldakse mikroskoobi *M* abil. Ekraani *S* ette on asetatud metallekraan *F*, mis on nii paks, et α-osakesed ei saa tungida läbi selle ja kutsuda esile stsintsillatsioone ekraanil *S*.



Joon. 347. Rutherfordi poolt lämmastiku tuumade lagundamiseks kasutatud katseseadme skeem.

Osutus, et kui kamber *C* täita hapnikuga, siis ekraani *F* olemasolu puhul stsintsillatsioone ekraanil ei tekkinud; kui aga hapnik asendada lämmastikuga, siis tekkisid stsintsillatsioonid. Millised osakesed neid esile kutsusid? Rutherford oletas, et stsintsillatsioone kutsuvad esile osakesed, mida kiirgavad lämmastiku tuumad nende pommitamisel α-osakestega.

Katsed kõrvalekaldumise kohta magnetväljas näitasid, et need osakesed on vesinikuaatomite t u u m a d ehk p r o o t o n i d.. Prootonite ilmumist kambrisse *C* seletas Rutherford sellega, et lämmastikuaatomite pommitamisel α-osakestega tungivad mõned neist lämmastikuaatomi tuuma ja löövad tuumast välja prootoneid. Viimased, omades tohutult suure kiiruse, tungivad läbi ekraani *F* ja kutsuvad esile stsintsillatsioone.

Niisiis, selles nähtuses leiab aset tuuma muundumise protsess, mida võib kujutada kahe etapina. Esimene etapp seisneb α-osakese neelamises lämmastiku tuuma poolt koos uue, keerulisema, kuid ebapüsivama tuuma moodustamisega. Protsessi teises etapis laguneb see tuum kaheks osakeseks, milledest üks on p r o o t o n.

Kui lämmastiku tuum neelab α-osakese, moodustub uus tuum massiga $14 + 4 = 18$ ja laenguga $7 + 2 = 9$. See tuum vastab ebapüsivale fluorile.

Teises etapis laguneb liit-tuum kaheks osakeseks, milledest üks osutub prootoniks massiga 1 ja laenguga 1. Teise osakese mass $18 - 1 = 17$ ja laeng $9 - 1 = 8$ vastavad hapniku isotoobile.

Vaadeldud tuumareaktsiooni võib kirjutada järgmisel kujul:

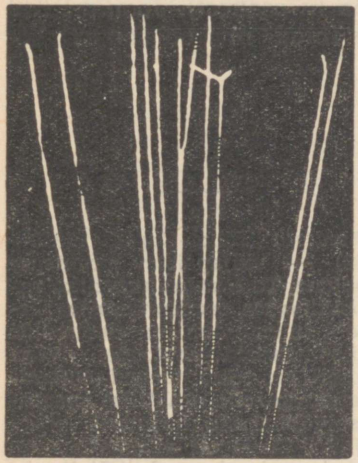
$$_2He^4 + {}_7N^{14} \rightarrow ({}_9F^{18}) \rightarrow {}_8O^{17} + {}_1H^1.$$

Tavaliselt jäetakse kirjeldatud reaktsiooni märkimisel vahepealne tuum ($_9F^{18}$) ära:

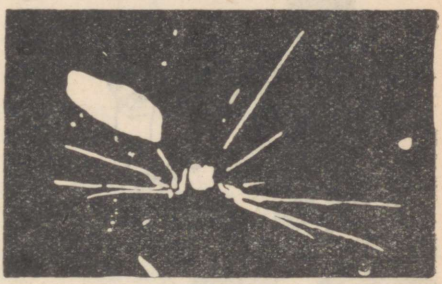
$$_2H^4 + {}_7N^{14} \rightarrow {}_8O^{17} + {}_1H^1.$$

Lämmastiku- ja heeliumiaatomitest saadakse seega hapniku- ja vesinikuaatomid. See reaktsioon ei kujuta endast midagi muud kui ühe elemendi muundumist teiseks.

Peale lämmastikuaatomite tuumade õnnestus α-osakestega kiiritamisel purustada veel paljude teiste elementide, nagu näiteks boori, fluori, naatriumi, fosfori, alumiiniumi jt. aatomite tuumi.



Joon. 348. Joonis fotost, mis näitab α-osakeste kokkupõrkamist lämmastikuaatomi tuumaga.



Joon. 349. Joonis liitiumiaatomi lagunemisel tekkinud α-osakeste jälgede fotost.

Ühtede elementide tuumade muundumise üle teiste elementide tuumadeks võib otsustada jälgede iseloomu järgi, mida jätavad osakesed Wilsoni kambris liikudes: α-osakesed jätavad neile iseloomulikud jäljed jämeda sirge joone näol, prootonite jälgedeks on aga palju peenemad jooned. Kui osakene liigub nii, et ta ei põrka teiste osakeste vastu, on tema jäljeks peaaegu sirge joon. Kui aga toimub põrkamine, siis osakese jälg muudab järsult oma suunda, nagu see on näidatud joonisel 348. Iga niisugune jälg sarnaneb kaheharulise hargiga. Selle foto järgi võib järeldada, et jälje hargnemise punktis tungis α-osake tuuma, mille tulemusena tekkis prooton (peenike jälg) ja uus tuum (jäme jälg).

Tuumareaktsiooni tulemusena tekkinud osakeste jälgede uurimine viis uue osakese — p o s i t r o n i avastamisele. Positroni mass on võrdne elektroni massiga ja ta omab elektroni laenguga võrdse positiivse laengu.

Tuleb märkida, et α-osakeste põrkamine vastu aatomi tuuma on

võrdlemisi haruldane nähtus. Nii näiteks 500 000 α-osakese jälje fotografeerimisel Rutherfordi katsetes tekkisid hargid ainult kaheksal juhul. Seega tuli keskmiselt umbes 60 000 α-osakese kohta üks selline α-osake, mis lõi lämmastiku tuumast prootoni välja.

Aatomite tuumi ei saa muundada mitte üksnes nende kiiritamisel α-osakestega. Selleks võib kasutada ka näiteks prootonit, andes talle mingil viisil nii suure energia, et ta elemendi tuuma vastu põrgates võiks selle purustada. Sel teel õnnestus näiteks muuta liitiumi heeliumiks. Seda tuumareaktsiooni võib kirjutada järgmiselt:

$$_3L^7 + {}_1H^1 \rightarrow 2_2He^4,$$

kus 2_2He^4 tähistab kaht heeliumi tuuma (α-osakest). Joonisel 349 on näidatud selliste α-osakeste jälgede fotod, mis on saadud liitiumi lagunemisel prootonite mõjul.

Frédéric Joliot-Curie (1900—1958) — väljapaistev prantsuse teadlane. Ta avastas kunstliku radioaktiivsuse, saades tuumareaktsiooni tulemusena rea elementide radioaktiivseid isotoope. Väga suured on tema teened aatomienergia ja selle praktilise kasutamise võimaluste uurimisel.

Joliot-Curie oli väsimatu rahu eest ja aatomienergia sõjalisteks eesmärkideks kasutamise vastu võitleja.

Tuuma muundamiseks läheb vaja «tuumamürske», s. o. väga suure energiaga osakesi. Mugava suure energiaga osakeste allika annab meile loodus ise loomulike α-kiirte näol. Kuid ka kõige tugevamate radioaktiivsete preparaatide poolt põhjustatud kiirgus ei võimalda tekitada tuumareaktsioone küllalt laias ulatuses. Selleks on vaja palju võimsamaid kiirgusallikaid. Et omada võimalust suunata tuumade muundumist, kutsuda soovikohaselt esile ühte või teist tuumareaktsiooni, kasutatakse peale α-osakeste prootoneid, deutroneid ja teisi osakesi. Selleks et kasutada prootoneid, deutroneid ja teisi osakesi «tuumamürskudena», on olemas seadeldised, mis võimaldavad saada neid osakesi küllaldasel arvul ja küllalt suure energiavaruga.

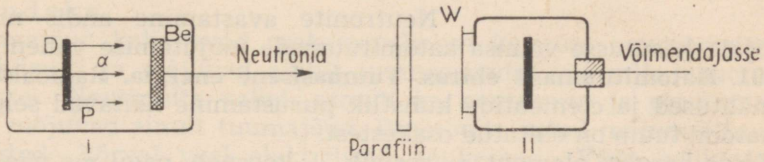
200. Neutron. Rea kergete elementide, sealhulgas ka berülliumi kiiritamisel α-osakestega märgati, et aine, mida kiiritatakse, muutub mingisuguse erilise nõrga intensiivsusega, kuid väga suure läbitungimisvõimega kiirguse allikaks.

Uurimised näitasid, et kiirgus kujutab endast laenguteta osakeste voolu. Neid aine osakesi nimetati n e u t r o n i t e k s.

Joonisel 350 on kujutatud neutroni ja tema omaduste uurimiseks konstrueeritud seadeldise skeem.

Õhust tühjakspumbatud kambris I asub ketas *D*. Ketta pinnad on kaetud radioaktiivse elemendi polooniumiga, mis on α-osakeste allikaks.

Berülliumplaadike Be on α-osakestele märklauaks. Berülliumi pommitamisel α-osakestega eralduvad neutronid. Läbides õhukest kambri seina, tungisid nad läbi aknakese *W* lugejasse II.



Joon. 350. Neutroni avastamisel kasutatud katseseadme skeem.

Katsete tulemused näitavad, et kui berülliumist tulnud neutronid langevad vahetult lugejasse, siis registreeritakse minutis mitu osakest. Õhukese seatinaplaadi paigutamisel lugeja ette osakeste arv märgatavalt ei muutu. Kui aga aknakese ette asetada õhuke parafiinplaat (joon. 350), siis osakeste arv minutis kasvab tunduvalt. See kasv seletub järgmiselt.

Parafiin sisaldab suurel hulgal vesinikuaatomeid, mille mass on lähedane neutroni massile. Läbi parafiini minnes neutronid põrkavad kokku vesinikuaatomi tuumadega (prootonitega) ja annavad neile üle tunduva osa oma energiast. Selle tulemusena lüüakse parafiinist välja prootoneid. Viimased tungivad lugejasse ja registreeritakse selles.

Niisiis, erinevalt laetud osakestest (prootonitest, elektronidest, α-osakestest) neutronid, tungides läbi aine, ei kaota selle aine aatomite ioniseerimisel oma energiat. Sellega seletubki neutronite suur läbitungimisvõime.

Selsamal põhjusel ei saa neutroneid Wilsoni kambris vahetult kindlaks teha. Kui aga neutron põrkab kokku aatomi tuumaga, näiteks prootoniga, siis viimane omandab seejuures suure kineetilise energia ja seega ka võime ioniseerida aatomeid. Sel teel, s. o. aatomituumasse avaldatud mõju järgi, avastatigi neutroni olemasolu. Kui neutron ise jälge ei jäta, siis prooton, mis tekib neutroni kokkupõrkamisel näiteks vesinikuaatomi tuumaga, jätab Wilsoni kambrisse ioonidest koosneva jälje (joon. 351).

Täpsed mõõtmised on näidanud, et neutroni mass on väga lähedane prootoni massile. Järelikult võib neutronit vaadelda kui aine osakest massiarvuga 1 ja laenguga 0. Neutronit märgitakse sümboliga ${}_0n^1$. Tuumareaktsiooni, mis kutsub esile neutronite tekkimise α-osakeste põrkumisel vastu berülliumi tuuma, võib esitada järgmisel kujul:

Joon. 351. Neutroni poolt vesinikust väljalöödud prootonite jäljed.

$$ {}_4Be^9 + {}_2He^4 \rightarrow {}_6C^{12} + {}_0n^1. $$

Neutroneid võib omakorda kasutada elementide muundamiseks. Kohe pärast nende avastamist õnnestuski jälgida näiteks sellist reaktsiooni:

$$ {}_7N^{14} + {}_0n^1 \rightarrow {}_5B^{11} + {}_2L^4. $$

Neutronite avastamine andis niisiis uurijate käsutusse võimsa aatomituumade mõjutamise vahendi.

201. Aatomituumade ehitus. Tuumasisene energia. Radioaktiivsusnähtused ja elementide kunstlik purustamine näitavad selgelt, et aatomi tuum on ehitatud osakestest.

Kõige kergem element — vesinik — koosneb, nagu me nägime, ühest elektronist ja ühest prootonist. Vesinikuaatomi tuumaks on prooton. Millistest osakestest siis koosnevad teiste aatomite tuumad? Milline on tuuma ehitus?

Nõukogude teadlased D. D. Ivanenko ja E. D. Gapon püstitasid hüpoteesi, mille järgi kõikide elementide tuumad koosnevad prootonitest ja neutronitest. Tuuma mass on võrdne prootonite ja neutronite masside summaga.[1] Kuna neutron on elektriliselt neutraalne, siis tuuma laeng on põhjustatud ainult prootonite poolt.

Teades massiarvu ja elemendi isotoobi järjekorranumbrit, võib kindlaks määrata prootonite ja neutronite arvu selle elemendi aatomite tuumades.

Nii näiteks on hõbeda massiarv 108 ja järjekorranumber 47. See tähendab, et hõbeda-aatomi tuumas on 47 prootonit ja 108—47 = 61 neutronit.

Kui Z on elemendi järjekorranumber (mis näitab prootonite arvu tuumas), M tema massiarv ja N neutronite arv tuumas, siis võib kirjutada järgmise võrduse:

$$ M = Z + N. $$

Kuna ühe ja sama elemendi isotoopidel on sama järjekorranumber, kuid erinevad massiarvud, siis see tähendab, et nende aatomite tuumades on ühesugune arv prootoneid, kuid erinev arv neutroneid.

[1] Rangelt võttes ei ole tuuma mass päris täpselt võrdne prootonite ja neutronite masside summaga.

Üheks tähtsamaks probleemiks õpetuses aatomi ehitusest on tuuma osakesi siduvate jõudude olemuse probleem.

Nende jõudude olemasolust annab meile tunnistust mitteradioaktiivsete elementide tuumade püsivus.

Mis jõud need siis on? Kuna tuumad koosnevad prootonitest ja neutronitest, siis nendeks jõududeks ei või olla tavalised elektrilise vastastikuse mõju jõud. Pealegi mõjuvad prootonite vahel elektrilised tõukejõud. Samuti on selge, et nendeks jõududeks ei või olla gravitatsioonijõud: gravitatsioonijõud on nii väikeste kehade jaoks, nagu seda on prooton ja neutron, tähtsusetult väikesed ja nad vaevalt võivad tuumaprotsessides etendada mingisugust märgatavat osa.

On loomulik oletada, et peamised jõud, mis mõjuvad tuuma osakeste vahel, on mingisuguse teise iseloomuga. Nende jõudude olemus ei ole veel senini tuntud; neid on hakatud nimetama t u u m a j õ u d u d e k s.

Tuumajõud kahanevad osakestevahelise kauguse suurenemisel väga kiiresti ja mõjuvad ainult tuumas endas või selle vahetus läheduses. Neutronite vahel, samuti ka neutronite ja prootonite vahel, mõjuvad ainult tuumajõud. Prootonite vahel mõjuvad tuumajõudude kõrval veel elektrilised tõukejõud. Väga väikestel kaugustel on tuumajõudude mõju tunduvalt suurem kui elektriliste jõudude oma.

Aatomi tuumade kõige iseloomulikumaks omaduseks on tuuma koosseisu kuuluvate osakeste kolossaalselt suur vastastikuse mõju energia. Seda energiat nimetatakse t u u m a s i s e e n e r g i a k s ehk a a t o m i e n e r g i a k s.

On kindlaks tehtud, et mingis ainehulgas leiduv aatomienergia varu ületab samas ainehulgas leiduva keemilise energia varu umbes miljon korda. Teadlastel on õnnestunud avastada teid tuumasisese energia kasutamiseks.

202. Uraani tuuma jagunemine. Tuuma ahelreaktsioon. 1939. aastal tehti kindlaks, et uraani kiiritamisel neutronitega tekib uus mittestabiilne uraani tuum, mis laguneb kaheks, umbes võrdsete massidega tuumaks.

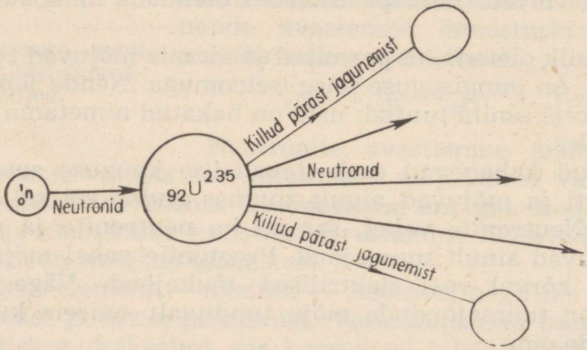
Sellist tuumareaktsiooni liiki, kus raske tuum laguneb kaheks, umbes võrdsete massidega tuumaks, nimetatakse tuuma j a g u n e m i s r e a k t s i o o n i k s.

Katse näitab, et uraani tuuma jagunemisel tekkinud uued tuumad lendavad tohutult suure kiirusega laiali, — toimub omapärane aatomi tuuma plahvatus, millega kaasneb intensiivne γ-kiirgus. Seega tuumade jagunemisel tuuma energia muundub laialilendavate osakeste kineetiliseks energiaks ja kiirgusenergiaks.

Ühe uraani tuuma jagunemisel eraldunud energia on umbes 200 MeV. On välja arvestatud, et kui kõik 1 kg uraanis leiduvad tuumad laguneksid, siis sellega kaasneks niisugune energia eraldumine, nagu see toimub 2000 tonni söe põlemisel või 20 000 tonni trinitrotoluooli plahvatamisel.

Uraani tuuma killud on radioaktiivsed ja nendega toimub rida üksteisele järgnevaid muundumisi, milledega omakorda kaasneb energia eraldumine. On kindlaks tehtud, et uraani tuuma lagunemisel tekivad paljud elemendid, näiteks baarium, krüptoon, rubiidium, kadmium jt.

Kuid kõige tähelepanuväärsem jagunemisreaktsiooni iseärasus seisneb selles, et temaga kaasub iseenesest toimuv (spontaanne) neutronite lahkumine tuumast. Nagu uurimised on näidanud, tuleb ühe jagunenud tuuma kohta 1—3 neutronit (joon. 352).



Joon. 352. Neutronite tekkimise skeem uraani tuuma jagunemisel.

Nagu selgus, etendab see fakt suurt osa tuumaenergia kasutamisel. Kuna uraani tuuma jagunemisel moodustub veel peale kahe uue tuuma 1—3 neutronit, siis need neutronid haaratakse omakorda teiste uraani tuumade poolt, mis seejuures jagunevad, moodustades nüüd juba kahekordse või kolmekordse uute neutronite hulga; viimased võivad esile kutsuda edasist jagunemist.

Neutronite ja koos nendega jagunevate tuumade hulk kasvab vahetpidamata. Koos sellega kasvab ka eraldatud energia hulk, mis võib ulatuda hiiglasuurte väärtusteni. Kogu see protsess toimub väga kiiresti.

Ülalkirjeldatud tuumareaktsiooni nimetatakse *ahelreaktsiooniks*. Sellise reaktsiooni skeem on näidatud joonisel 353.

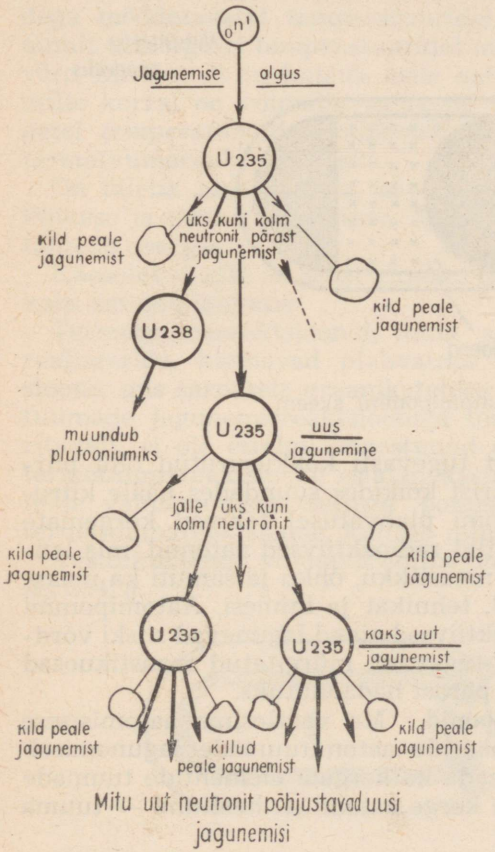
Kuna ahelreaktsioonidel toimuvad tuuma jagunemise protsessid erakordselt kiiresti (praktiliselt silmapilkselt), siis tohutu suure energiahulga eraldumine toimub mõningates tingimustes tugevajõulise plahvatusena.

Tuuma ahelreaktsiooni esilekutsumine plahvatuse kujul on siiski ainult teatavate kindlate tingimuste puhul võimalik.

Asi on selles, et looduslik uraan koosneb peamiselt kahe isotoobi — $_{92}U^{238}$ (99,3%) ja $_{92}U^{235}$ (0,7%) segust. Selgus, et ahelreaktsioon on võimalik ainult isotoobi $_{92}U^{235}$ tuuma jagunemisel.

Isotoop $_{92}U^{238}$ ainult neelab neutroneid, täpselt samuti nagu neelavad neid uraanis leiduvad igasugused kõrvalised segud, ja takistab tuuma ahelreaktsiooni kulgemist.

Järelikult, ahelreaktsiooni moodustamiseks on vaja looduslikust uraanist eraldada puhtal kujul isotoop $_{92}U^{235}$. Selle isotoobi eraldamine kujutab endast praktiliselt lahendatud, kuid äärmiselt rasket ülesannet.



Joon. 353. Ahelreaktsiooni skeem.

Peale $_{92}U^{235}$ võib tuuma ahelreaktsioon toimuda metallilise plutooniumi tükis. Plutooniumi $_{94}Pu^{239}$ ehedalt ei leidu. Teda saadakse looduslikust uraanist erilistes seadeldistes, nn. uraanikateldes.

Plutooniumi kasutamine $_{92}U^{235}$ asemel on kasulik sellepärast, et plutooniumi võib eraldada uraanist keemilisel teel. See on tunduvalt kergem kui isotoopide eraldamine.

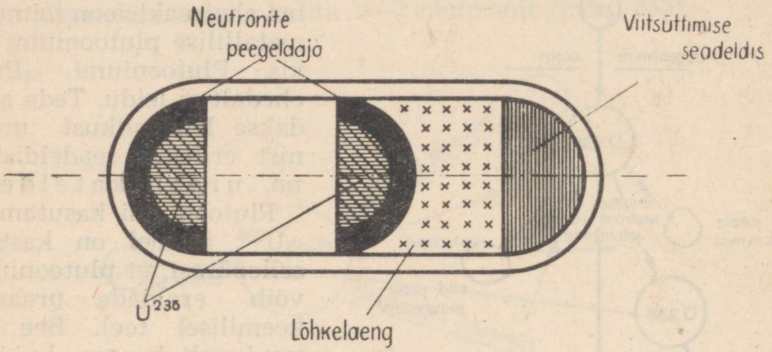
Eespool märgiti, et uraani ja plutooniumi tuumade jagunemisel toimub ahelreaktsioon hiiglasuure jõuga plahvatusena. Plahvatus võib toimuda siiski ainult sel juhul, kui $_{92}U^{235}$ või $_{94}Pu^{239}$ tükkide massid on suuremad teatud kindlast, nn. kriitilisest massist. Asi seisneb selles, et väikese massiga uraani- või plutooniumitükkide puhul võivad tuuma jagunemisel tekkivad neutronid sellest tükist välja hüpata, ilma et nad kutsuksid esile tuuma jagunemist. Sellepärast võib nii suurtes kogustes, millede $_{92}U^{235}$ ja $_{94}Pu^{239}$ hoida ohutult ainult mass on väiksem kriitilisest massist.

Plahvatuse saamiseks on vaja viia kiiresti kokkupuutesse kaks plutooniumi- või uraanitükki (kusjuures kummagi tüki mass peab olema väiksem kriitilisest massist, nende tükkide summa mass aga sellega võrdne).

Selle ülesande lahendamise skeem on näidatud joonisel 354.

Kaks uraanitükki on teineteisest eraldatud. Kui neid lähendada, siis koos omavad nad kriitilise massi. Toimub tuuma ahelreaktsioon, mille tulemusena tekib plahvatus. Vajalikul momendil uraanitükid lähendatakse teineteisele sütiku ja lõhkelaengu abil.

Aatomipommi plahvatus tekitab võimsaid õhulaineid, millega kaasneb pimestav valguskiirgus ja rikkalik radioaktiivsete ainete tekkimine. Aatomi plahvatusel on põhiliseks hävitavaks teguriks



Joon. 354. Aatomipommi skeem.

lööklaine, mis kujutab endast tugevasti kokkusurutud õhu piirkonda ja levib plahvatustsentrist kõikides suundades hääle kiirusest suurema kiirusega. Aatomi plahvatusel tekivad kergemate elementide tugevasti ioniseeritud radioaktiivsed aatomid, mis langevad maha ning mürgitavad maastikku, õhku ja samuti ka maastikul asuvaid esmeid, hooneid, tehnikat ja inimesi. Aatomipommi plahvatamisel tekkinud radioaktiivsed ained lagunevad siiski võrdlemisi kiiresti. Seetõttu isegi tugevasti mürgitatud maastikuosad ja vesi muutuvad mõne päeva pärast hädaohutuks.

202 a. Termotuumareaktsioonid. Me vaatlesime aatomisisese energia saamist raskete elementide aatomituumade jagunemisel.

Kuid tuumaenergiat võib saada ka kergete elementide tuumade ühinemise teel. Vaatleme kerge aatomi — heeliumi — tuuma tekkimisprotsessi.

Heeliumiaatom, mis koosneb kahest prootonist ja kahest neutronist, võib näiteks tekkida kahe vesinikuisotoobi — raske vesiniku (deuteeriumi) ja üliraske vesiniku (triitiumi) tuumadest.

Kui lähendada deuteeriumi ja triitiumi tuumi, siis need satuvad võimsate tuuma-külgetõmbejõudude mõjusfääri. Need jõud seovad kaks neutronit ja kaks prootonit püsivaks süsteemiks, mis kujutab endast heeliumiaatomit. Seejuures ülejäänud neutron lendab suure kiirusega minema.

Heeliumituuma tekkimise protsessis tuumajõud teevad suure hulga tööd, mille tulemusena üksteist vastastikku mõjutavate osakeste kineetiline energia kasvab. Tuumajõudude poolt tehtud töö

arvel tekkinud kineetiline energia antakse edasi ümbritsevale keskkonnale neutroni väljalendamise kaudu, samuti ka γ-kiirguse kaudu. Nendes tuumareaktsioonides eraldub (reageeriva aine massiühiku kohta) umbes 10 korda rohkem energiat kui raskete elementide tuumade jagunemisreaktsioonides.

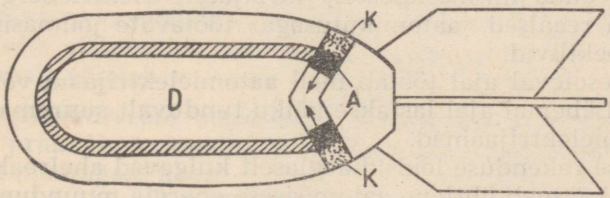
Erinevalt raskete elementide tuumade jagunemisreaktsioonidest võivad kergete elementide tuumade ühinemisreaktsioonid kulgeda ainult väga kõrgetel, miljonite ja isegi kümnete miljonite kraadidega mõõdetavatel temperatuuridel. Seda põhjustab asjaolu, et ainult ülikõrgetel temperatuuridel muutub tuumade liikumine niivõrd kiireks, et ta kutsub esile aatomituumade tugevad põrked, mille korral on võimalik tuumade vahetu ühinemine. *Väga kõrgetel temperatuuridel kulgevaid tuumareaktsioone nimetatakse termotuumareaktsioonideks.*

On täielik alus oletada, et termotuumareaktsioonid toimuvad Päikese ja tähtede sisemuses. Nende reaktsioonide arvel täienebki tähtede energia.

Käesoleval ajal on Maal ainsaks ülikõrgete temperatuuride allikaks aatomiplahvatus.

Termotuumareaktsioonid, mida seniajani on olnud võimalik realiseerida, kannavad plahvatuse iseloomu. Termotuumareaktsioone, mis sarnaselt uraanikateldes kulgevate raskete elementide tuumade jagunemisreaktsiooniga toimuksid aeglaselt ja reguleeritavalt, ei ole esialgu õnnestunud esile kutsuda. Seetõttu võib termotuumareaktsioone esialgu kasutada ainult ülivõimsate pommide valmistamisel. Selliste pommide hulka, kus kasutatakse termotuumareaktsioone, kuulub niinimetatud vesinikupomm.

Vesinikupommi võimalik ehitus on esitatud skemaatiliselt joonisel 354, *a*.



Joon. 354, *a*.

Vesinikupommil peab olema tugev metallkest, mille mõõtmed on suuremad aatomipommi mõõtmetest. Sellesse kesta *D* on paigutatud vesinikukütuse varu, mis sisaldab deuteeriumi ja triitiumi. Tema lähedal asub kaks teineteisest eemaldatud uraani- või plutooniumitükki *A* (aatomipommi laeng).

Uraanitükkide lähendamiseks kasutatakse tavalise lõhkeaine (trotüüli) laenguid *K*.

Trotüüli lõhkemisel aatomilaengud lähenevad. Nende kokkupuutumisel tekib aatomiplahvatus; temperatuur tõuseb ülikõrgele ja vesinikukütus plahvatab.

Vesinikupommi, samuti nagu aatomipommigi plahvatusega kaasneb kõrge temperatuur, lööklaine ja radioaktiivsete laguproduktide tekkimine.

Kuna vesinikupommi jaoks ei ole olemas kriitilist massi, siis printsipiaalselt on tema võimsus piiramatu.

203. Aatomienergia praktilise kasutamise perspektiivid. Aatomienergia avastamine kuulub 20. sajandi kõige tähtsamate teaduslike avastuste hulka. Täiel määral on selle avastuse tähtsust tulevaste inimpõlvede seisukohalt praegu raske ennustada.

Kahjuks on Ameerika Ühendriikide valitsevad klassid seda tähelepanuväärset avastust senini kasutanud inimmasside hävitamiseks.

Tundes muret oma kasumite pärast, takistavad Ameerika reaktsioonilised ringkonnad aatomienergia rahulikuks tööstuslikuks otstarbeks kasutuselevõtmise probleemi läbitöötamist. Samal ajal kulutavad nad hiiglasummasid suure hulga aatomipommide loomiseks, püüdes aatomirelvaga hirmutada rahuarmastavaid rahvaid ning allutada neid oma võimule.

Teisiti suhtub aatomienergia kasutamisse Nõukogude Liit, kellel on samuti teada aatomirelva saladus. Nõukogude Liit võitleb energiliselt aatomirelva keelamise eest, aatomipommide tagavara hävitamise eest ja aatomienergia laialdase kasutamise eest rahuaja tööstuses.

Kuna tuumaenergiat võib muuta teisteks energialiikideks, siis on võimalik ehitada soojustsentraale, milledes tuuma jagunemine annab iga päev miljoneid kilovatt-tunde energiat; seda energiat võib edasi anda mitmesugustele tarbijatele elektrienergia kujul. Samuti on reaalsed «aatomikütusega» töötavate jõumasinate loomise perspektiivid.

Juba käesoleval ajal töötab meil aatomielektrijaam võimsusega 5000 kW. Lähemal ajal lastakse käiku tunduvalt suurema võimsusega aatomielektrijaamad.

Laialdase rakenduse leidsid aeglaselt kulgevad ahelreaktsioonid, milledega kaasneb ühtlane aatomisisese energia muundumine teisteks energialiikideks. Sellised reaktsioonid kutsutakse esile uraanikateldes aeglaste neutronite abil.

Joonisel 355 on kujutatud ühe võimaliku aurujõuseadme skeem aatomikatlaga.

203 a. Kunstlik radioaktiivsus. 1934. a. tegid prantsuse füüsikud Irène ja Frédéric Joliot-Curie kindlaks, et alumiiniumi pommitamisel α-osakestega toimub tuumareaktsioon, mida võib üleskirjutada järgmiselt:

$$_{13}Al^{27} + {}_{2}\alpha^{4} \rightarrow {}_{15}P^{30} + {}_{0}n^{1}.$$

Selle tuumareaktsiooni tähelepanuväärseks iseärasuseks oli see,

et reaktsiooni tulemusena tekkinud fosfori isotoop $_{15}P^{30}$ osutus radioaktiivseks: ta lagunes iseenesest, kiirates positroni ja muundudes räni isotoobiks:

$$_{15}P^{30} \rightarrow {}_{14}Si^{30} + \beta^{+}.$$

Peatselt avastati ka teisi selliseid reaktsioone, mille tulemusena tekkisid radioaktiivsed elemendid. Näiteks magneesiumi pommitamisel α-osakestega kulges järgmine reaktsioon:

$$_{12}Mg^{24} + {}_{2}\alpha^{4} \rightarrow {}_{14}Si^{27} + {}_{0}n^{1}.$$

Magneesiumi tuum neelas α-osakese, paiskas välja neutroni ja muundus räni isotoobi $_{14}Si^{27}$ tuumaks. Erinevalt püsivast räni isotoobist $_{14}Si^{30}$, mis tekkis alumiiniumi ülalkirjeldatud muundumisel, osutus räni isotoop $_{14}Si^{27}$ radioaktiivseks. Ta lagunes samuti iseenesest, kiirates välja positroni ja muundudes alljärgneva skeemi kohaselt alumiiniumiks:

$$_{14}Si^{27} \rightarrow {}_{13}Al^{27} + \beta^{+}.$$

Seega Irène ja Frédérik Joliot-Curie avastasid võimaluse kunstlike radioaktiivsete elementide tekitamiseks.

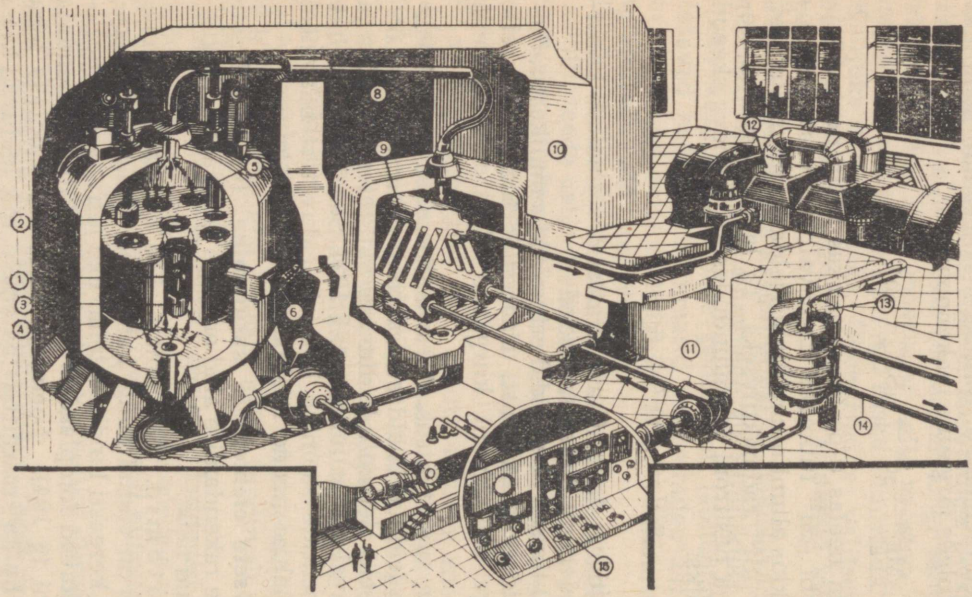
Kunstlikud radioaktiivsed elemendid erinevad loomulikest radioaktiivsetest elementidest (raadiumist, uraanist ja tooriumist) selle poolest, et nad kõige sagedamini kiirgavad elektronide asemel positrone.

Sellel avastusel on suur tähtsus. Asi seisneb selles, et radioaktiivsed elemendid on leidnud laialdast praktilist rakendamist. Loomulikke radioaktiivseid elemente leidub aga väikestes hulkades ja nende saamine on tavaliselt kulukas (vt. § 192). Seetõttu kunstlike radioaktiivsete elementide saamine kõikjal leiduvatest odavatest ainetest annab võimaluse nende laialdaseks tootmiseks.

203 b. Radioaktiivsete elementide kasutamine. Radioaktiivsete elementide praktilise rakendamise alad on väga laialdased. Valgustame ainult mõningaid neist.

«Märgitud» aatomid. Nii nimetatakse radioaktiivse elemendi aatomeid, mis on viidud mingi keha sisse. «Märgitud« aatomite olemasolu võib kergesti kindlaks teha: nad kiirgavad radioaktiivseid kiiri, mis jätavad fotoplaadile jälje või tekitavad loendaja kambris ionisatsiooni (§ 194). Loendaja abil võib kindlaks teha tähtsusetult väikest hulka «märgitud» aatomeid, mis leiduvad keha antud kohas. Seda asjaolu just kasutataksegi «märgitud» aatomite praktilisel rakendamisel. Toome mõned näited.

Taimede elus etendab väga tähtsat osa fosfor, mida taimed saavad pinnasest fosforhappe soolade — fosfaatide kujul. Seetõttu vähese fosforisisaldusega pinnast väetatakse fosfaatidega ja põllumajanduslike kultuuride viljakuse tõstmiseks kasutatakse sageli pealtväetamist.



Joon. 355. Skeem, mis kujutab üht võimalikest aatomikatlaga (tuuma reaktoriga) aurujõuseadmetest. *1.* Üks uraanivarbadest aatomikatlas. *2.* Kadmiumvarb, mis neelab neutroneid ja mille ülesandeks on reguleerida katla tööd. Selle ülestõstmine või allalaskmine toob endaga kaasa reaktsioonikambrisse langevate neutronite arvu suurenemise või vähenemise, aga järelikult ka tuumade lagunemise protsessi suurenemise või vähenemise. *3.* Uraani korrosiooni eest kaitsev alumiiniumkest. *4.* Grafiit, mis aeglustab neutroneid ja mis aitab seega esile kutsuda intensiivsemat ahelreaktsiooni. *5.* Uraanikatla betoonsein, mis kaitseb teenindavat personali radioaktiivse kiirguse kahjuliku mõju eest. Sama ülesannet täidavad ka betoonseinad *10. 6.* Katla töörežiimi registreeriv ionisatsioonikamber. *7.* Uraanikatlas (seal tekib tuumade jagunemise tõttu kõrge temperatuur) kuumenenud gaasi edasiandev pump. Gaas läheb toru *8* mööda aurukatlasse *9* ja kuumendab veetorukatlas vett, kuni see muutub kõrge rõhu all olevaks ülekuumendatud auruks, mis panebki käima elektrijaama turbiini *12. 13.* Katel äratöötanud auru jahutamiseks. Viimane soojendab vett, mis läheb toru *14* mööda kütteks ja teisteks vajadusteks. Pump *11* surub vee katlast *9* turbiinidesse ja jahutajasse.

Kuni viimase ajani oletati, et mineraalsoolad tulevad taimedesse lahusena juurte kaudu ja süsihappegaas võetakse vastu lehtede kaudu. Agronoomid on aga siiski kindlaks teinud, et kui taimede väetamisel mineraalväetiste lahust ei juhita mulda, vaid niisutatakse sellega nende lehti, siis taimed arenevad kiiremini. Tekkis küsimus, et kas toitained ei tule ehk taime lehtede kaudu. «Märgitud» aatomite abil õnnestuski sellele küsimusele vastata.

Kasutades taimede pealtväetamiseks aineid, mis sisaldavad fosfori radioaktiivseid aatomeid, tegid teadlased kindlaks, et taimelehtedele kantud väetised jõuavad viljani kiiremini kui väetised, mis tulevad pinnasest läbi juurte. See tehti kindlaks järgmiselt.

Võeti kaks ühesugust taime. Fosfaadilahusega, mis sisaldas radioaktiivset fosforit, valati üle taime ümber asuvat pinnast; teisele taimele valati aga samasugune lahus lehtedele. Mõne päeva pärast lõigati mõlemad taimed ära ja paigutati vastu fotoplaati. Pärast ilmutamist tekkisid plaadil valged kohad, mis näitasid radioaktiivse fosfori «märgitud» aatomite asukohta. Ilmnes, et lehtede kaudu väetatud taime fotol oli valgeid kohti rohkem. Seega taimed omandavad väetise tõepoolest kiiremini siis, kui see omandamine toimub lehtede kaudu.

Viies inimese organismi väikese hulga radioaktiivset rauda, naatriumi, joodi või mõnda teist elementi ja registreerides keha erinevatest osadest tulevat radioaktiivset kiirgust, võib tundma õppida nende elementide jagunemist inimorganismis, nende levimise kiirust ja teisi protsesse.

Arstiteadus. Erakordselt suure tähtsuse on omandanud radioaktiivsed isotoobid meditsiinilises diagnostikas. Ühel juhul oli näiteks vaja kindlaks määrata kasvaja asukoht peaajus.

Oli teada, et peaajukasvaja koed neelavad peaaegu sada korda rohkem fosforit kui terved koed. Haigele anti sisse radioaktiivset fosforit sisaldavat lahust. Kasvaja, mis neelas suurema hulga fosfori «märgitud» aatomeid, tehti kohe kindlaks loendaja abil, mida nihutati edasi mööda kolju välispinda.

Raadiumi radioaktiivset kiirgust rakendatakse meditsiinis juba ammu vähihaiguste ravimiseks. Raadium on aga haruldane ja kallihinnaline element, mistõttu seda ravimismeetodit rakendati vähestes kohtades. Raadiumi asendamine kunstlike radioaktiivsete elementidega muutis järsult olukorda: mainitud ravimeetod sai üldkättesaadavaks.

Tööstuslikud rakendused. Radioaktiivne γ-kiirgus võib läbi tungida palju paksematest ainekihtidest kui röntgenikiirgus. Röntgenikiirte saamiseks on vaja kallihinnalisi ja küllaltki kohmakaid seadmeid; γ-kiirguse saamiseks on vaja ainult tükk kunstlikku radioaktiivset ainet. See asjaolu võimaldab mitmesugustest materjalidest valmistatud kõikvõimalike detailide paljusid läbivalgustamisoperatsioone, mida tehakse tühimike (õhumullide, mõrade) avastamise eesmärgil, sooritada kiiremini, lihtsamini ja odavamini.

204. Osakeste vastastikune muundumine. Me rääkisime niinimetatud elementaarosakestest: elektronidest, prootonitest, neutronitest, positronidest, footonitest. Elementaarosakeste all tuleb mõista selliseid osakesi, mida füüsikaliste teadmiste antud arenguetapil kujutletakse lihtsaimatena, s. o. sellistena, mis ei koosne teistest osakestest.

Teame nüüd, et aatomite tuumad koosnevad neutronitest ja prootonitest, mingisuguseid teisi elementaarosakesi aatomi tuuma koostisse ei kuulu. Neutronite ja prootonite kõrval lendavad radioaktiivsel lagunemisel tuumast välja peale selle veel α-osakesed, elektronid ja footonid. Mis puutub α-osakestesse, siis on nad liitosakesed. Nad moodustuvad tuumas leiduvatest neutronitest ja prootonitest. Tekib küsimus, kust tulevad elektronid ja footonid? Tuumas neid ei ole. Tähendab, nad moodustuvad tuuma lagunemise protsessis.

Tänapäeval on teada, et elektronide kiirgamine toimub ühe tuuma neutroni prootoniks muundumise tulemusena. Teiselt poolt prooton, neelates elektroni, muundub neutroniks.

On avastatud protsessid, kus footon muutub elektroniks ja positroniks ja vastupidi, kus elektron koos positroniga muutub footoniks. Samuti on avastatud palju teisi muundumise liike.

Niisiis, vastastikune muundumine osutub elementaarosakeste iseloomulikuks tunnuseks. Elementaarosakesed ei jagune, kuid neil on vastastikuse muundumise omadus.

Osakeste muundumine üksteiseks põhjustab elementaarosakeste maailmas erakordset nähtuste rikkalikkust ja mitmekesisust, mis annab tunnistust mateeria ammendamatuist omadustest.

Uued avastused aine ehituse valdkonnas õigustavad kõige veenvamalt V. I. Lenini mõtet, mis tema poolt avaldati 1909. a. tema geniaalses töös «Materialism ja empiriokrititsism»:

«Igasuguste muutumatute elementide, «asjade muutumatu olemuse» jms. tunnustamine ei ole mitte materialism, vaid see on metafüüsiline, s. o. antidialektiline materialism.»

«Asjade «olemus» või «substants» on ka suhtelised; nad väljendavad ainult seda, et inimene tunnetab objekte sügavamalt, ja kui eile see tunnetus ei läinud kaugemale aatomist, täna — kaugemale elektronist ja eetrist, siis rõhutab dialektiline materialism, et kõigi nende progresseeruva inimliku teaduse poolt ülesseatud loodusetunnetamise teetähiste iseloom on ajutine, suhteline, ligikaudne. Elektron on niisama ammendamatu kui aatomgi, loodus on lõpmatu, kuid ta eksisteerib lõpmatult, ja just see looduse olemasolu tunnustamine väljaspool inimese teadvust ja aistmist, ainuvõimalik kategooriline, ainuvõimalik tingimatu tunnustamine eraldabki dialektilise materialismi relativistlikust agnostitsismist ja idealismist.»

I. TÄIENDAV ÕPPEMATERJAL PEATÜKILE «ELEKTRILAENGUD JA ELEKTRIVÄLI»

1. Coulombi seadus SI-süsteemi ühikutes. Rahvusvahelises mõõtühikute süsteemis *(SI)* on elektrilaengu ühik kulon mitte põhiühik, vaid tuletatud ühik. Seetõttu ei defineerita selles süsteemis laenguühikut Coulombi seaduse $F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$ kaudu ja võrdetegur k valemis ei võrdu ühega.

Coulombi seadus vaakuumi jaoks väljendub *SI*-süsteemis järgmiselt:

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

kus

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}.$$

Seega,

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_0 r^2}.$$

ε_0 nimetatakse vaakuumi elektriliseks läbitavuseks ehk elektriliseks konstandiks. Nimetajas esinev suurus $4\pi r^2$ näitab, et ühe laengu mõju kahaneb pöördvõrdeliselt sellise kera pindalaga, mille keskpunktis asub see laeng ja mille raadius on r.

Kui $q_1 = q_2 = 1$ C ja $r = 1$ m, siis $k = F \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{c^2}}$.

Seega *võrdetegur k on arvuliselt võrdne jõuga, millega mõjutavad teineteist kaks ühekulonilist laengut 1 meetri kauguselt.*

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\mathrm{N \cdot m^2}}{\mathrm{c^2}}.$$

Vaakuumi elektrilise läbitavuse väärtuse võib määrata valemist:

$$k = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0};$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4\pi k};$$

$$\varepsilon_0 = \frac{1}{4 \cdot 3{,}14 \cdot 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{c}^2}} \approx 8{,}8 \cdot 10^{-12} \cdot \frac{\text{c}^2}{\text{N} \cdot \text{m}^2}.$$

Keskkonna mõju laengute vahel mõjuvatele jõududele iseloomustab selle keskkonna elektriline läbitavus (vt. § 13).

Kui kaks laengut asuvad keskkonnas, mille elektriline läbitavus on ε, siis Coulombi seadus väljendub nende jaoks järgmiselt:

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon r^2}.$$

Keskkonna ja vaakuumi elektriliste läbitavuste suhet nimetatakse keskkonna suhteliseks elektriliseks läbitavuseks (ε_s):

$$\varepsilon_s = \frac{\varepsilon}{\varepsilon_0},$$

kust $\varepsilon = \varepsilon_s\ \varepsilon_0$. Asetades ε Coulombi seaduse valemisse, saame

$$F = \frac{q_1 q_2}{4\pi\varepsilon_s\ \varepsilon_0 r^2}.$$

Suhteline elektriline läbitavus on nimetuseta suurus. Keskkonna elektriline läbitavus omab samasugust nimetust nagu vaakuumi elektriline läbitavuski.

Leheküljel 22 on toodud mõnede ainete suhtelised elektrilised läbitavused.

2. Valem kondensaatori mahtuvuse arvutamiseks SI-süsteemi ühikutes. Arvutused, mis ei kuulu keskkooli füüsika kursusesse, näitavad, et plaatkondensaatori mahtuvus *SI*-süsteemi ühikutes väljendub järgmise valemiga:

$$C = \frac{\varepsilon S}{d},$$

kus C on mahtuvus faradites, S — kondensaatori ühe plaadi pindala ruutmeetrites, d — plaatidevaheline kaugus (dielektrikukihi paksus) meetrites ja ε — plaatide vahel asuva dielektriku elektriline läbitavus.

Plaatkondensaatori mahtuvuse valemist järgneb, et *SI*-süsteemis on dielektriku elektrilise läbitavuse mõõtühikuks 1 $\frac{\text{F}}{\text{m}}$.

$$\varepsilon = \frac{Cd}{S};\ \varepsilon \text{ ühik} = 1\ \frac{\text{F} \cdot \text{m}}{\text{m}^2} = 1\ \frac{\text{F}}{\text{m}}.$$

Kuid varem me saime keskkonna elektrilise läbitavuse mõõtühiku nimetuseks $\frac{C^2}{N \cdot m^2}$. Näitame, et $1\,\frac{C^2}{N \cdot m^2} = 1\,\frac{F}{m}$.

$$1\,\frac{C^2}{N \cdot m^2} = 1\,\frac{C \cdot C}{N \cdot m \cdot m} = 1\,\frac{C \cdot C}{J \cdot m} = 1\,\frac{C}{V \cdot m} = 1\,\frac{F}{m}.$$

3. Laetud kondensaatori energia. Kui laetud kondensaator ühendada madalpingelise lambiga, siis lamp sähvatab korraks heledalt põlema. See katse näitab, et laetud kondensaator omab energiat. Kondensaator saab oma energia töö arvel, mida sooritatakse tema laadimisel. Selle tööga mõõtubki laetud kondensaatori energia. Kuidas seda tööd arvutada?

Kondensaatori laadimisel kandub laeng tema plaatidele üle mitte hetkeliselt, vaid järk-järgult, väikeste osadena. Pärast esimese osa ülekandumist kondensaatori plaadile tõukuvad teised laenguosad plaadil olevast laengust eemale. Et viia uut laenguosa kondensaatori plaadile, tuleb teha tööd elektriliste tõukejõudude ületamiseks.

Laengu suurenemisel kondensaatori plaatidel kasvab ka plaatidevaheline pinge. Pinge keskmist väärtust kogu laadimisprotsessi vältel võib lugeda võrdseks poolega pinge lõppväärtusest:

$$U_k = \frac{U}{2}, \text{ kus } U = \varphi_1 - \varphi_2.$$

Arvutame töö, mida tehakse laengu üleviimisel keskmise pinge U_k puhul:

$$A = U_k q \text{ ehk } A = \frac{Uq}{2}.$$

See töö võrdub energiaga, mis antakse kondensaatorile tema laadimisel:

$$A = W = \frac{Uq}{2}.$$

Kuna $q = CU$, siis kondensaatori energiat võib väljendada mahtuvuse ja pinge kaudu:

$$W = \frac{CU^2}{2}.$$

Kondensaatori laadimisel kogutud energia kujutab endast tema plaatide vahel tekkinud elektrivälja potentsiaalset energiat. Kondensaatori tühjenemisel muundub see energia teisteks energialiikideks, näiteks keha siseenergiaks, valgusenergiaks, keemiliseks energiaks jne.

II. POOLJUHTIDE ELEKTRILISED OMADUSED

1. Pooljuhtide juhtivus. Metalljuhtides on teatavasti suur hulk vabu elektrone ehk juhtivuselektrone, mis säilivad metallis igal temperatuuril, isegi absoluutsel nullil.

On olemas ka suur klass aineid, nn. p o o l j u h t e, mis erinevad metallidest eelkõige selle poolest, et tavalistel temperatuuridel on neis tunduvalt vähem vabu elektrone. Näiteks 1 cm^3 metallis on toatemperatuuril 10^{22}—10^{23} elektroni. Kuid pooljuhtide hulka kuuluv aine germaanium sisaldab samal temperatuuril kõigest 10^{12}—10^{13} vaba elektroni iga kuupsentimeetri kohta. Seega vabade elektronide arv germaaniumis on palju miljoneid kordi väiksem kui metallis. Vabade elektronide väikese kontsentratsiooni tõttu on pooljuhtidel suur eritakistus.

Peale germaaniumi kuuluvad pooljuhtide hulka veel räni, seleen, vaskhapend (vask(I)oksiid), pliisulfiid ja paljud teised ained.

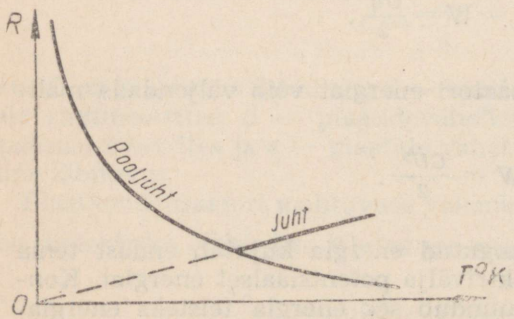
Kui vooluallikaga ühendatud pooljuhti soojendada, siis voolutugevus temas kasvab järsult. Vooluringis oleva juhi soojendamine aga kutsub esile voolutugevuse vähenemise. Seega pooljuhid, erinevalt metallidest, omavad negatiivset takistuse temperatuuritegurit. Kuidas seda nähtust seletada?

Pooljuhi soojendamisel kasvab temas järsult vabade elektronide arv.

Kui pooljuhti soojendada küllalt kõrge temperatuurini, siis selle eritakistus võib muutuda lähedaseks metallide eritakistusele.

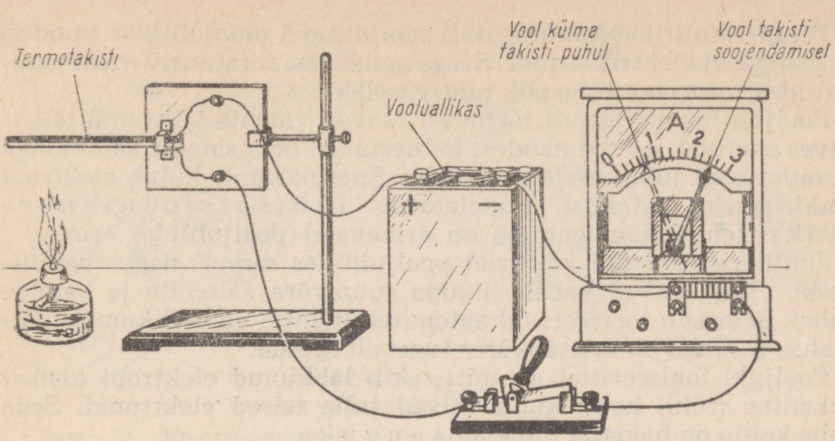
Joonisel 1 on kujutatud graafikud, mis kirjeldavad juhi ja pooljuhi takistuse sõltuvust temperatuurist.

Pooljuhte kasutatakse mitmesuguste riistade termotakistites, mille takistus soojenemisel tugevasti muutub. Näiteks termotakisti MMT-4 omab takistuse temperatuuritegurit —0,024 deg^{-1} ja tema takistus temperatuuril 20° C on 10 kilo-oomi piirides. Juba selle takisti nõrk soojendamine piirituslambi leegil kutsub esile voolutugevuse märgatava suurenemise (joon. 2). See omadus võimaldab termotakisteid laialdaselt kasutada spetsiaalsetes seadmetes (takistustermomeetrites), mis mõõdavad elektriliste meetoditega temperatuuri.



Joon. 1. Juhi (metalli) ja pooljuhi takistuse sõltuvus temperatuurist.

2. Fototakistid. Pooljuhte, mille takistus valguse mõjul muutub, nimetatakse f o t o t a k i s t e i k s. Fototakisti elektronid lä-



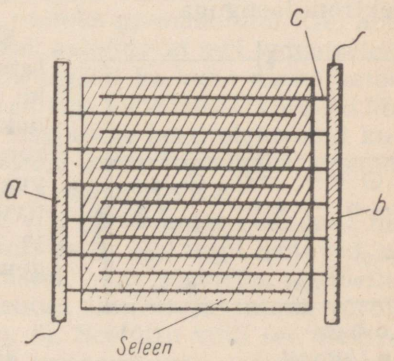
Joon. 2. Katse, mis näitab pooljuhi takistuse vähenemist soojendamisel.

hevad valguse mõjul üle seotud olekust vabasse olekusse ja suurendavad pooljuhi juhtivust. Mida suurem on valgustustugevus, seda suurem on pooljuhi juhtivus.

Fototakisti saame, kui kanname õhukese seleeni, talliumsulfiidi või mõne muu valgustundliku pooljuhi kihi peentest paralleelsetest juhtidest valmistatud võrele (joon. 3).

Fototakistid on väga tundlikud valgustustugevuse muutumisele. Seetõttu kasutatakse neid laialdaselt automaatikas ja telemehhaanikas. Pliisulfiidist ja pliiseleniidist valmistatud fototakistite väga kõrge tundlikkus võimaldab neid kasutada astronoomilistel vaatlustel selliste kiirguste kindlakstegemiseks, mida inimese silm ei taju isegi kõige võimsamate teleskoopide abil.

Vaatleme, kuidas töötab lihtsaim fototakistiga seade, mille ülesandeks on loendada konveieril liikuvaid tooteid (joon. 329). Valguskiir, mille levimise teele satuvad loendatavad esemed, langeb elektromagneti mähisega järjestikku ühendatud fototakistile. Iga ese katkestab valguskiire. Selle tulemusena muutub järsult voolutugevus mähises ning elektromagnet ja seega ka loendusmehhanism hakkavad tööle.



Joon. 3. Seleentakisti ehitus: *a* ja *b* — elektroodid; *c* — jooned alusel.

3. Pooljuhtide omajuhtivus. Lisandeid mittesisaldavate pooljuhtide juhtivust nimetatakse omajuhtivuseks.

Temperatuuril absoluutne null pooljuhtidel omajuhtivus puudub ja pooljuhid elektrit ei juhi. Seega sellel temperatuuril ei ole pooljuhtides vabu elektrone ehk juhtivuselektrone.

Pooljuhi temperatuuri tõstmisel saavad valentselektronid täiendavat energiat, mõned nendest katkestavad oma sideme aatomitega ja muutuvad juhtivuselektronideks. Energiat, mis kulub elektroni eraldamiseks aatomist, nimetatakse *ionisatsioonienergiaks*. Ionisatsioonienergia on erinevatel pooljuhtidel erinev.

Juhtivuselektronid käituvad pooljuhtides samuti nagu metallideski. Nad võivad vabalt liikuda ruumvõre aatomite ja ioonide vahel. Seevastu ioniseeritud aatomitel puudub vaba liikumise võimalus, sest nad on kristallvõres tugevalt seotud.

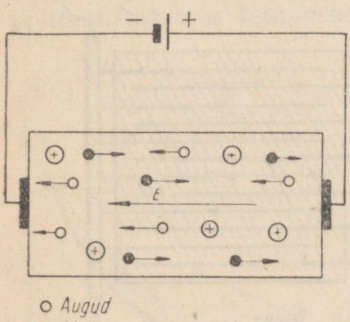
Pooljuhi ioniseeritud aatomis tekib lahkunud elektroni asemel vakantne (tühi) koht, kuhu võivad tulla teised elektronid. Seda vaba kohta on hakatud nimetama *auguks*.

Kui vabasse kohta tuleb üks naaberaatomi seotud elektronidest, siis see koht täidetakse. Kuid naaberaatomisse, kust elektron tuli, tekib uus vaba koht. Vabade kohtade täitumine valentselektronidega, s. t. elektronidega, mis ei ole kaotanud oma sidet aatomitega, tekitab mulje, nagu augud pidevalt liiguksid.

Ideaalselt puhtas pooljuhis on aukude arv võrdne elektronide arvuga, kusjuures augud liiguvad kaootiliselt samuti nagu elektronidki.

Välise pingeallika poolt tekitatud elektrivälja mõjul (joon. 4) liiguvad juhtivuselektronid välja jõujoontele vastassuunas. Augud liiguvad aga nii, nagu liiguksid positiivsed laengud, s. t. välja jõujoonte suunas. Selle põhjuseks on asjaolu, et seotud elektronid, samuti nagu vabad elektronidki, liiguvad ühe aatomi juurest teise juurde, vastu elektrivälja jõujoontele, augud aga vastupidises suunas.

Kuna augud liiguvad positiivsete laengute liikumise suunas, siis võib neid vaadelda positiivsete laengutena, mille suurus võrdub elektroni laenguga.

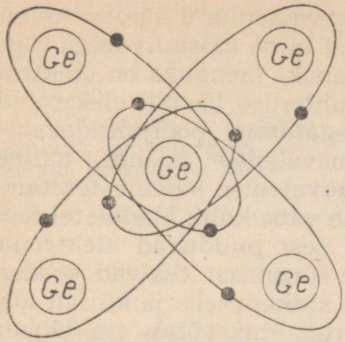


Joon. 4. Elektronide ja aukude liikumine pooljuhis välise elektrivälja E mõjul.

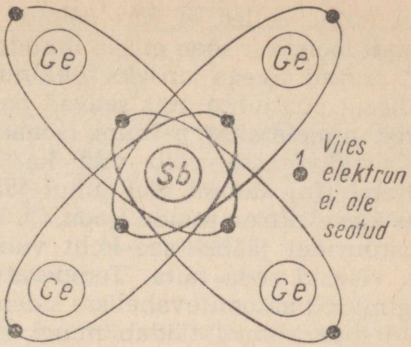
Seega vool pooljuhtides on põhjustatud mitte ainult elektronide, vaid ka aukude liikumisest. Seetõttu öeldakse, et pooljuhid omavad nii elektron- kui ka aukjuhtivust. Voolutugevus I pooljuhis võrdub elektronjuhtivusest tingitud voolutugevuse I_e ja aukjuhtivusest tingitud voolutugevuse I_a summaga:

$$I = I_e + I_a .$$

Juhtivuselektronide ja aukude liikumisel võivad vabad elektronid täita vabu kohti aatomites ja viia aatomeid neutraalsesse olekusse. Sellist



Joon. 5. Elektronsidemed germaaniumikristallis (lihtsustatult). Mustad ringid — valentselektronid.



Joon. 6. Germaaniumiaatomi asendumine antimoniaatomiga. Must ring numbriga 1 tähendab liigset elektroni.

protsessi nimetatakse elektronide ja aukude rekombinatsiooniks. Rekombinatsioon on vastupidine protsess ionisatsioonile, sest selle tulemusena juhtivuselektronide ja aukude arv väheneb. Pooljuhis toimuvad need protsessid üheaegselt, kusjuures konstantsel temperatuuril jääb juhtivuselektronide ja aukude arv muutumatuks.

Pooljuhi aatomid võivad ioniseeruda mitte ainult pooljuhi soojendamisel, vaid ka selle valgustamisel, nii nagu see toimub gaaslahenduse korral.

4. Lisandjuhtivus. Pooljuhi omadusele ja juhtivuse iseloomule avaldavad suurt mõju lisandid. Pooljuhis võib olla palju mitmesuguseid lisandeid. Kuid tavaliselt on nende hulgas mingi põhiline lisand, mis oluliselt määrab ära pooljuhi omadused.

Vaatleme mingi puhta pooljuhi, näiteks germaaniumi (Ge) aatomite vahelisi sidemeid. Germaaniumi aatomis on neli valentselektroni. Iga valentselektron tiirleb üheaegselt ka kahe naaberaatomi ümber. Seega iga aatomitevahelise sideme tekkimisest võtavad üheaegselt osa kaks valentselektroni, kusjuures need elektronid kuuluvad erinevatele aatomitele. Selliseid aatomitevahelisi sidemeid nimetatakse kovalentseteks sidemeteks.

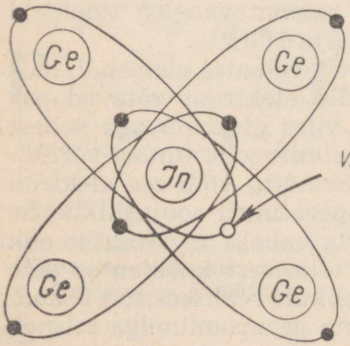
Kui germaaniumi kristallvõresse viia viievalentse elemendi, näiteks antimoni (Sb) aatom, siis neli selle elektroni võtavad osa kovalentsete sidemete moodustamisest, viies elektron aga sellest osa ei võta. Ta on oma aatomiga seotud ainult sellé tuuma võrdlemisi nõrga külgetõmbejõuga (joon. 6). Seetõttu võib see elektron isegi toatemperatuurist madalamal temperatuuril soojusliikumise tõttu kergesti aatomist lahkuda ja saada vabaks elektroniks ehk juhtivuselektroniks. Sel juhul auku ei teki, sest kovalentne side germaaniumikristalli struktuuris on täielikult realiseeritud lisandi aatomi nelja elektroniga. Võrreldes puhta germaaniumiga seisneb

vahe ainult selles, et võre sõlmes on germaaniumi aatomi asemel lisandi ioon. See ioon ei saa liikuda, sest ta on kristallvõrega tugevalt seotud. Seega ainsaks tekkinud vabaks laenguks on elektron. Selliseid pooljuhte, mis saavad oma juhtivuse lisandi elektronide arvel, nimetatakse *n*-tüüpi (sõnast negatiivne) pooljuhtideks.

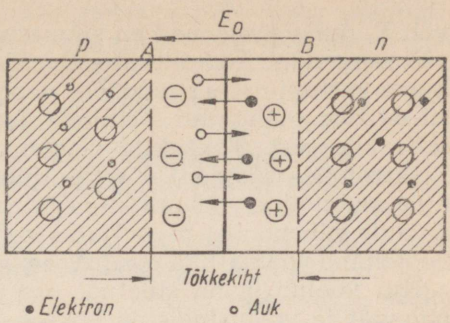
Kristallvõresse võib viia ka kolmevalentse lisandi, näiteks indiumi (In) aatomi. Sel juhul jääb kovalentse sideme tekitamiseks üks elektron puudu (joon. 7). Tekib vaba koht. Madalatel temperatuuridel jääbki see koht vabaks, sest puuduvad elektronid, mis võiksid seda täita. Temperatuuri tõusmisel tekivad soodsad tingimused aatomitevaheliste sidemete katkemiseks ja küllalt kõrgel temperatuuril täidab mingi elektron, mis võtab osa lähedal asuvate germaaniumi aatomite kovalentsest sidemest, selle vaba koha. Germaaniumi aatomite sidemete struktuuris tekib aukvaba positiivne laeng. See auk võib nüüd liikuda. Negatiivsed indiumi ioonid jäävad kristallvõre sõlmedes liikumatuks, sest nad on tugevalt seotud lähedal asuvate germaaniumi aatomitega. Sellises pooljuhis tekib vool aukude liikumise tulemusena; seetõttu nad omavad aukjuhtivust ja neid nimetatakse *p*-tüüpi (sõnast positiivne) pooljuhtideks.

Praktiliselt sisaldavad pooljuhid nii ühte kui ka teist liiki lisandeid. Kuid tavaliselt on üks lisandiliikidest ülekaalus. Sellele vastavalt jaotataksegi pooljuhid kahte tüüpi. Kui domineerib elektronjuhtivus, siis loetakse põhilisteks laengukandjateks elektrone; kui aga ülekaalus on aukjuhtivus, siis põhilisteks laengukandjateks on augud. Kuid mittepõhilised laengukandjad, millel, võrreldes põhiliste laengukandjatega, on vastupidise märgiga laeng, etendavad väga tähtsat osa mitmesuguste pooljuhtseadmete töötamisel.

5. Kahe pooljuhi kontakt. Kahe erineva juhtivustüübiga pooljuhi ühenduskohal on väga huvitav ja tähtis omadus: ühenduskoha takistus sõltub voolu suunast, s. t. et ühenduskoht omab praktiliselt ühepoolset juhtivust. Seetõttu võib seda kasutada vahelduvvoolu alaldamiseks.



Joon. 7. Aukude tekkimine germaaniumiaatomi asendumisel indiumiaatomiga.

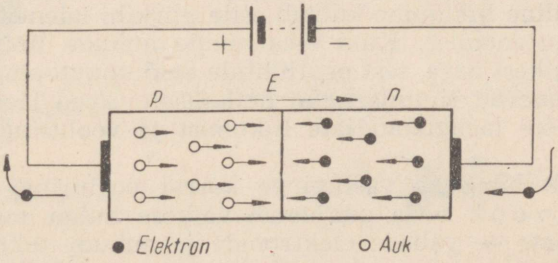


Joon. 8. *n*-tüüpi ja *p*-tüüpi pooljuhtide kokkupuutel toimuvate protsesside skeem.

Vaatleme pooljuhtide ühenduskohas toimuvaid protsesse. Ühendame tihedalt kaks pooljuhti, millest üks on *n*-tüüpi ja teine *p*-tüüpi (joon. 8). Elektronid ja augud hakkavad otsekohe difundeeruma ühest pooljuhist teise ja pooljuhtide vahel tekib kontaktpinge. Kontaktpinge tekkimise põhjus on järgmine. *n*-tüüpi pooljuhist difundeeruvad elektronid *p*-tüüpi pooljuhi pinnakihti, rekombineeruvad seal aukudega ning jätavad sellega negatiivsed lisandi ioonid sinna ainsateks laengukandjateks. Need negatiivsed ioonid tekitavad *p*-tüüpi pooljuhi pinnakihis negatiivse laengu. Analoogilise protsessi tulemusena tekitavad positiivsed lisandi ioonid *n*-tüüpi pooljuhi pinnakihis positiivse laengu. Tekib elektriline kaksikkiht (nii nagu laetud kondensaatori plaatidel). Kaksikkihi elektriväli, saavutanud küllalt suure väärtuse, takistab elektronide ja aukude edasist difundeerumist. Selle tulemusena jääb põhiliste laengukandjate arv pooljuhi ühenduspinna lähedastel aladel väikeseks ning need alad omandavad suure takistuse. Mõlema pooljuhi suure takistusega alad moodustavad nn. t õ k k e k i h i (kiht *AB* joon. 8).

Tõkkekihi elektrivälja E_0 nimetatakse sageli k o n t a k t v ä l j a k s. Kontaktväli takistab ainult põhiliste laengukandjate liikumist. Kuid igas pooljuhis on väiksemal hulgal ka mittepõhilisi laengukandjaid. Nende liikumist kontaktväli soodustab.

Kui *p*-pooljuht (joon. 9) ühendada patarei positiivse poolusega ja *n*-pooljuht negatiivse poolusega, siis pooljuhtides tekib elektri-



Joon. 9. Vabade elektronide ja aukude liikumine pooljuhis vooluallika ühendamisel läbilaskesuunas (otsevool).

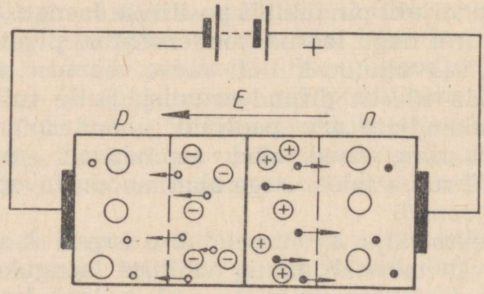
väli E, mille jõujooned on suunatud pooljuhilt p pooljuhile n. See väli nõrgendab kontaktvälja E_0. Elektronid ja augud hakkavad liikuma vastupidistes suundades pooljuhtide kokkupuutepinna poole, rikastades tõkkekihti põhiliste laengukandjatega ja vähendades selle takistust. Tõkkekihi elektronid ja augud rekombineeruvad. Elektronide vähenemist n-pooljuhis kompenseerib uute elektronide saabumine vooluallika negatiivse poolusega ühendatud juhist; aukude vähenemist p-pooljuhis kompenseerib aga elektronide äravoolamine vooluallika positiivse pooluse poole.

Kui vooluring on suletud, siis ülalkirjeldatud protsess toimub pidevalt ja vooluringis on kogu aeg vool. Seda voolu nimetatakse p ä r i v o o l u k s ja sellele vastavat pinget — p ä r i p i n g e k s.

Küllalt suurt pärivoolu võib saada juba võrdlemisi väikese päripinge abil, sest piirkihi takistus on suhteliselt väike.

Kui muuta pinge polaarsust, s. t. anda pooljuhtidele vastupidine pinge, siis pooljuhtide piirkihti läbiva voolu tugevus muutub järsult.

Sel juhul muutub välise välja E jõujoonte suund pooljuhtides vastupidiseks. Seetõttu hakkavad elektronid n-pooljuhis liikuma piirkihilt vooluallika positiivse pooluse poole ja augud p-pooljuhis vooluallika negatiivse pooluse poole (joon. 10). Põhiliste laengu-



Joon. 10. Vabade elektronide ja aukude liikumine pooljuhis vooluallika ühendamisel «tõkestatud» suunas (vastuvool).

kandjate selline liikumine kutsub esile piirkihi laienemise ja selle takistuse suurenemise. Kuid elektronide aukude liikumine kestab väga lühikest aega, sest pooljuhtide kokkupuutepinna mõlemal poolel suurenevad ruumlaengud hetkeliselt. Need laengud takistavad põhiliste laengukandjate liikumist ja vooluringis voolu ei teki.

Praktiliselt läbib ka vastupinge korral vooluringi nõrk vool, nn. v a s t u v o o l. Seda põhjustab väikese hulga mittepõhiliste laengukandjate — vabade elektronide ja aukude tekkimine soojuslike protsesside tulemusena. Need elektronid ja augud tekitavadki vastuvoolu. Pooljuhi temperatuuri tõusmisel vastuvool suureneb.

Ühepoolne juhtivus iseloomustab mitte ainult kahe pooljuhi, vaid ka metalli ja pooljuhi vahelist piirkihti. Kuid juhtivuse mehhanism on sel juhul tunduvalt keerukam.

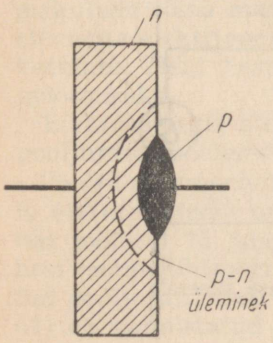
6. Pooljuhtdiood. Kahe pooljuhi piirkihi (tõkkekihi ehk *p-n*-kontaktülemineku) ühepoolset juhtivust kasutatakse laialdaselt seadmetes, mida hakati nimetama pooljuhtdioodideks.

On olemas palju mitmesuguseid pooljuhtdioodide tüüpe. Vaatleme nendest germaaniumdioodi.

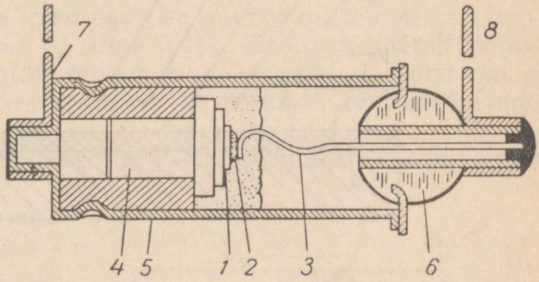
Germaaniumdiood valmistatakse germaaniumi monokristallist, millesse on viidud *n*-juhtivust suurendavat lisandit (arseeni, antimoni jt.). Germaaniumplaadi ühe poole külge sulatatakse väike indiumitükike. Indiumiaatomid difundeeruvad tahkesse germaaniumi ja tekitavad selles *p*-tüüpi juhtivuse. Seejuures ei tohi indiumiaatomid tungida läbi kogu plaadi paksuse, sest siis omandaks kogu germaanium *n*-juhtivuse. Seega germaaniumplaadi kaks erineva juhtivusliigiga piirkonda tekitavad *p-n*-ülemineku (joon. 11).

Joonisel 12 on kujutatud germaaniumdioodi ehitus. See koosneb teineteise külge sulatatud germaaniumikristallist 1 ja indiumikristallist 2, mis on ühendatud kontaktjuhtmetega 3 ja 4. Kontaktjuhe 4 on metallkesta 5 kaudu ühendatud kontaktväljaviiguga 7. Kontaktjuhe 3, mis on klaasisolaatori 6 abil kestast isoleeritud, on ühenduses väljaviiguga 8. Hermeetiline kest kaitseb pooljuhte niiskuse eest, sest niiskus võib tunduvalt halvendada pooljuhtide omadusi.

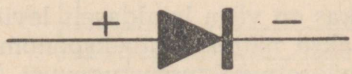
Indiumikristalliga ühendatud elektrood on anoodiks ja germaaniumikristalliga ühendatud elektrood — katoodiks. Pooljuhtdioodi tingmärk on kujutatud joonisel 13.



Joon. 11. Germaaniumplaadi kaks erineva juhtivusliigiga piirkonda tekitavad *p-n*-ülemineku.



Joon. 12. Germaaniumdioodi ehitus.



Joon. 13. Pooljuhtdioodi tingmärk skeemidel.

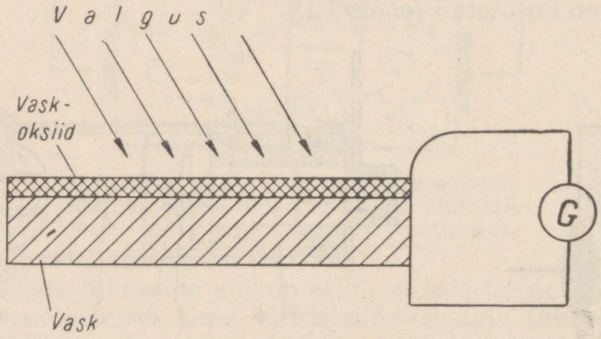
Pooljuhtdioode kasutatakse laialdaselt vahelduvvoolu alaldamiseks. Pooljuhtdioodidega alaldajate skeemid on analoogilised vaakuumdioodidega alaldajate skeemidega ja erinevad viimastest ainult küttevooluringide puudumise poolest (IV peatükk, joon. 198). Pooljuhtdioodide kasutamine lihtsustab skeeme ja suurendab alaldajate ökonoomsust.

7. Ventiilfotoelemendid. Elektronide üleminekut valguse mõjul seotud olekust vabasse olekusse nimetatakse fotoefektiks.

Kui vabaks saanud elektronid jäävad ainesse, tõstes selle elektrijuhtivust, siis nimetatakse fotoefekti *seesmiseks*. Kui aga elektronid valgustatud ainest lahkuvad, siis on meil tegemist välise fotoefektiga. Kuid on võimalik ka vahepealne nähtus, mille puhul vabaks saanud elektronid lähevad valgustatud ainekihist üle valgustamata ainekihti, kusjuures ainekihte eraldab teineteisest õhuke tõkkekiht. Sellist nähtust nimetatakse *ventiilfotoefektiks*.

Ventiilfotoefekti avastas 1888. a. Kaasani Ülikooli professor V. J. Uljanin, korraldades katseid seleeniga. Seda nähtust hakati praktiliselt kasutama fotoelementides alles käesoleva sajandi kolmekümnendatel aastatel.

Joonisel 14 on kujutatud vaskoksiid-fotoelemendi ehitus. See koosneb vaskalusest 1, millele on kantud nii õhuke vask(I)oksiidi kiht, et see on läbipaistev. Valgustatav kiht asub vaskaluse ja õhukese vaskoksiidikihi vahel. Valguse mõjul vabanevad elektronid difundeeruvad metalli ja laevad selle negatiivselt. Seega metalli ja vaskhapendikihi vahel tekib potentsiaalide vahe, mis on võrdeline fotoelemendi valgustustugevusega.



Joon. 14. Vaskoksiid-fotoelemendi ehituse skeem.

Praktikas on väga laialdaselt levinud seleenfotoelemendid. Neid rakendatakse näiteks fotoeksponomeetrites, mille abil saab väga lihtsalt määrata valgustustugevust. Fotoeksponomeetris on seleenfotoelement otseselt ühendatud galvanomeetriga. Galvanomeetrit läbiva voolu tugevuse järgi otsustatakse fotoelemendi pinna valgustustugevuse üle.

Seleenfotoelement sarnaneb oma ehituselt vaskoksiid-fotoelemendiga.

Seleenfotoelemendi valmistamisel kantakse raudplaadile õhuke termiliselt töödeldud seleeni kiht. Seleenikiht kaetakse väga õhukese läbipaistva kullakilega. Tõkkekiht tekib seleeni ja kullakile vahel.

Ventiilfotoelement kujutab endast fotoelektrigeneraatorit, milles valgusenergia muundatakse vahetult elektrienergiaks.

Ühe fotoelemendi elektromotoorne jõud ei ületa 1 volti. Kõrgemate pingete saamiseks ühendatakse fotoelemendid patareiks.

Tänapäeval kasutatavates ränifotoelementide patareides muundub elektrienergiaks 10—15% neile langevast valgusenergiast. Seega ränifotoelementide patareid kujutavad endast küllalt kõrge kasuteguriga elektrienergia generaatoreid. Neid patareisid kasutatakse väikeste asulate telefonivõrkude toitmiseks.

Ränifotoelementide patareide väga tähtsaks ülesandeks on Maa tehiskaaslastele paigaldatud raadioaparatuuri toitmine. Selleks et tarbijaid pidevalt elektrienergiaga toita ka öisel ajal, ühendatakse fotoelementide patareid akumulaatoritega.

Suuri teeneid pooljuhtidetehnika arendamisel on nõukogude teadlasel A. F. Joffel.

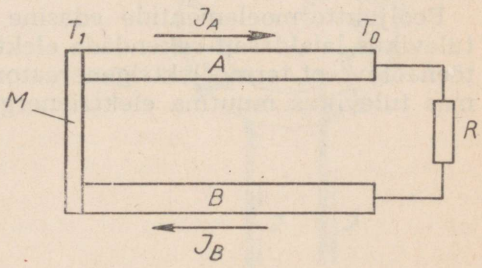
8. Pooljuhttermoelemendid. Termoelektrigeneraator. II peatükis 58. paragrahvis on käsitletud kahest erinevast metallist (vismut — antimon, konstantaan — raud, vask — raud jt.) valmistatud termoelemente.

Termoelementi tuleb vaadelda termoelektrilise masinana, mis ilma igasuguste liikuvate mehhanismideta muundab osa jootekoha soojendamiseks kulunud kütuseenergiast elektrienergiaks.

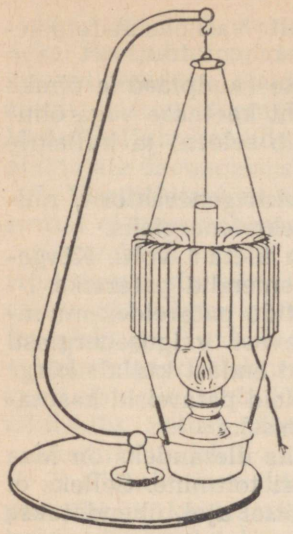
Metalltermoelementide kasutegur on suurte mittetootlike energiakulude tõttu madal: see ei ületa 0,5%. Seetõttu metalltermoelemente elektrienergia allikatena (termoelektrigeneraatoritena) ei kasutata. Neid kasutatakse teaduses ja tehnikas temperatuuride mõõtmiseks.

Elektrienergia allikatena kasutamiseks on tunduvalt sobivamad pooljuhttermoelemendid.

Pooljuhttermoelement, mille ehituse skeem on kujutatud joonisel 15, koosneb kahest metalljuhtmega ühendatud pooljuhtharust. Üks haru (*A*) on valmistatud elektronjuhtivusega ja teine haru (*B*) aukjuhtivusega pooljuhist. Nendega ühendatud metalljuhet kuumutatakse, pooljuhtide teisi otsi aga jahutatakse õhu või voolava veega.



Joon. 15. Pooljuhttermoelemendi ehituse skeem.



Joon. 16. Termoelektrigeneraator.

Need otsad ühendatakse elektrienergia tarbijaga *R*. (Tarbijaks võib olla raadiovastuvõtja, elektrilamp, elektrimootor jne.)

Nooled joonisel 15 näitavad voolu suunda termoelemendi harudes.

Elektronjuhtivusega pooljuhis *A* on elektriväli ja seega ka vool I_A suunatud kuuma otsa poolt külma otsa poole, aukjuhtivusega pooljuhis aga (I_B) külma otsa poolt kuuma otsa poole. Jootekohtade temperatuuride ühesuguse vahe korral tekib pooljuhttermoelementides kümneid kordi suurem elektromotoorne jõud kui metalltermoelementides (vt. elektromotoorsete jõudude tabel, § 58).

Pooljuhttermoelementide kasutegur ulatub kuni 7% ning võib olla veelgi kõrgem.

Et saada suuremat elektromotoorset jõudu, ühendatakse termoelemendid patareiks.

Joonisel 16 on kujutatud NSV Liidu Teaduste Akadeemia pooljuhtide laboratooriumis loodud termoelektrigeneraator. Termopatarei sisemisi jootekohti kuumutatakse petrooleumilambi leegis tekkivate kuumade gaasidega ja väliseid jootekohti jahutatakse toaõhuga. Radiaatoriribid soodustavad jootekohtade jahtumist. Termoelektrigeneraatori selline konstruktsioon võimaldab hoida kuumade ja külmade jootekohtade temperatuuride vahet 300 kraadi piirides.

Termoelektrigeneraatorid võivad töötada ükskõik millisel kütusel — kivisöel, puudel, turbal jt.

Joonisel 16 kujutatud termoelektrigeneraatorit kasutatakse laialdaselt raadioaparaatide toitmiseks elektrifitseerimata kohtades.

Pooljuhttermoelementide edasine täiustamine võimaldab neid tulevikus laialdaselt rakendada elektrienergia saamiseks. On väga tõenäoline, et termoelektrigeneraatorite abil hakatakse juba lähemas tulevikus muutma elektrienergiaks päikesevalguse energiat.

III. TÄIENDAV ÕPPEMATERJAL PEATÜKILE «MAGNETVÄLI JA ELEKTROMAGNETILINE INDUKTSIOON»

1. Voolu magnetvälja induktsioon. Magnetiline läbitavus. Magnetiliste jõudude mõjul magneetub iga aine suuremal või vähemal määral. Kuid ühed ained (õhk, vesi, puu, süsi, alumiinium, vask jne.) magneetuvad väga nõrgalt, teised aga (raud, teras ja rida spetsiaalseid sulameid) väga tugevalt.

Aine võimet magneetuda iseloomustatakse suurusega, mida nimetatakse magnetiliseks läbitavuseks. Seda suurust tähistatakse kreeka tähega μ (müü).

Oletame, et mingi magnetilise läbitavusega keskkonnas on sirgvoolu magnetväli.

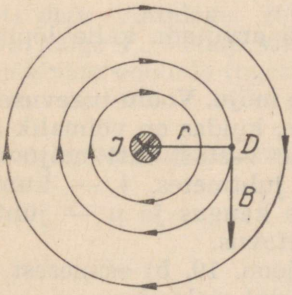
On ilmne, et mida tugevam on vool juhtmes, seda suurem on magnetiline induktsioon (magnetvälja tihedus) mingis juhtme lähedal asuvas ruumi punktis. Peale selle on selge, et mida kaugemal juhtmest asub vaadeldav punkt, seda väiksem on magnetiline induktsioon, sest et kauguse kasvades voolu magnetväli nõrgeneb. Magnetiline induktsioon sõltub ka keskkonna võimest magneetuda, s. t. keskkonna magnetilisest läbitavusest.

Katsed ja arvutused näitavad, et magnetilist induktsiooni mingis välja punktis D (joon. 17) võib arvutada valemist

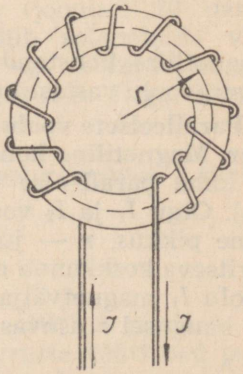
$$B = \mu \frac{I}{2\pi r}, \qquad (1)$$

kus B on magnetiline induktsioon, I — voolutugevus, r — vaadeldava punkti kaugus sirgvoolu teljest ja μ — keskkonna magnetiline läbitavus.

Praktilise elektrotehnika seisukohalt on tähtis osata arvutada magnetilist induktsiooni vooluga poolis. Kui poolil on suletud rõnga (toroidi) kuju (joon. 18) ja pooli läbimõõt on tunduvalt väik-



Joon. 17. Sirgvoolu I magnetvälja induktsiooni vektor B punktis D, mis asub juhtmest kaugusel r.



Joon. 18. Suletud rõnga kujuline pool (toroid).

sem pooli pikkusest, siis magnetiline induktsioon väljendub järgmise valemiga:

$$B = \mu n I.$$

n selles valemis tähendab pooli ühe pikkusühiku kohta tulevat keerdude arvu (mähise tihedust).

Keskkonna magnetiline läbitavus avaldub valemi (1) põhjal järgmiselt:

$$\mu = \frac{2\pi r B}{I}.$$

Leiame magnetilise läbitavuse ühiku nimetuse *SI*-süsteemis. Selleks väljendame magnetilise induktsiooni B $\frac{Wb}{m^2}$-tes ehk $\frac{V \cdot s}{m^2}$-tes, voolutugevuse I amprites ja kauguse r meetrites.

$$1\ \frac{Wb \cdot m}{m^2 \cdot A} = 1\ \frac{V \cdot s \cdot m}{m^2 \cdot A} = 1\ \frac{V \cdot s}{A \cdot m} = 1\ \frac{\Omega \cdot s}{m}.$$

Ühikut $\Omega \cdot s$ nimetatakse henriks (lühendatult H). Seega magnetilise läbitavuse mõõtühikuks *SI*-süsteemis on $1\ \frac{H}{m}$.

Keskkonna magnetiline läbitavus μ väljendatakse kahe teguri korrutisena:

$$\mu = \mu_s \mu_0,$$

kus μ_0 on vaakuumi magnetiline läbitavus, mida nimetatakse magnetiliseks konstandiks, ja μ_s — suhteline magnetiline läbitavus. Keskkonna suhteline magnetiline läbitavus on nimetuseta arv. Ta võrdub aine magnetilise läbitavuse ja magnetilise konstandi suhtega:

$$\mu_s = \frac{\mu}{\mu_0}.$$

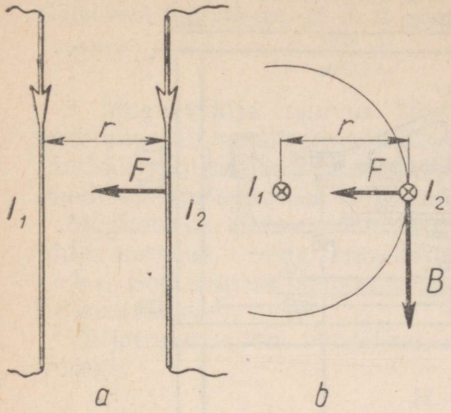
Magnetilise konstandi väärtust võib arvutada kahe lõpmatult pika sirgvoolu vastastikuse mõju järgi.

2. Paralleelsete voolude vastastikune mõju. Voolu tugevuse ühik amper. Magnetiline konstant. Vaatleme, kuidas on võimalik arvutada kahe paralleelse vooluga juhtme vastastikust mõju (joon. 19, *a*). Olgu I_1 ja I_2 voolu tugevused juhtmetes, l — kummagi juhtme pikkus, r — juhtmetevaheline kaugus ja μ — juhtmeid ümbritseva keskkonna magnetiline läbitavus.

Voolu I_1 magnetvälja induktsioon (joon. 19, *b*) esimesest juhtmest kaugusel r asuvas punktis väljendub valemiga

$$B = \mu \frac{I_1}{2\pi r}.$$

Jõud, millega väli mõjutab vooluga juhet, võrdub magneti-



Joon. 19. Kahe vooluga sirgjuhtme vaheline vastastikune mõju.

lise induktsiooni, voolu tugevuse ja juhtme pikkuse korrutisega:

$$F = BIl.$$

Selle põhjal võib avaldada jõu, millega voolu I_1 magnetväli mõjutab voolu I_2:

$$F = BI_2l$$

ehk

$$F = \mu \frac{I_1 I_2}{2\pi r} l.$$

Vaakuumi puhul

$$F = \mu_0 \frac{I_1 I_2}{2\pi r} l.$$

See valem on võetud *SI*-süsteemis ühe põhiühiku — voolu tugevuse ühiku ampri defineerimise aluseks.

Amper on sellise voolu tugevus, mis, läbides kahte lõpmatult pikka, teineteisest 1 meetri kaugusel vaakuumis asuvat paralleelset juhet, põhjustab nende juhtmete vahel juhtme pikkuse iga meetri kohta jõu $2 \cdot 10^{-7}$ *njuutonit.*

Teineteist vastastikku mõjutavad juhtmed peavad seejuures olema sirgjoonelised ja kaduvväikese ringikujulise ristlõikega.

Voolutugevuse ühiku ampri taastamiseks on konstrueeritud nn. amperkaalud.

Amperkaalude ehituse skeem on kujutatud joonisel 20. Kaks ühesugust solenoidi 1 ja 2 on riputatud väga tundlike kaalude kangi otste külge. Esimene neist on paigutatud liikumatusse solenoidi 3 ning on ühendatud sellega järjestikku vooluringi.

Vooluringi sulgemisel tõmbub liikuv solenoid 1 liikumatu solenoidi 3 sisse ja kaalud lähevad tasakaalust välja. Tasakaalu taastamiseks tuleb koormata kaalukangi teist (joonisel 20 parempoolset) õlga vihtidega, mille kaal võrdub solenoidide vahel mõjuva jõuga F. Nende vihtide kaal $P = mg$ on võrdeline solenoide läbivate voolude tugevuste korrutisega, s. o. I^2-ga. Seega

$$mg = kI^2,$$

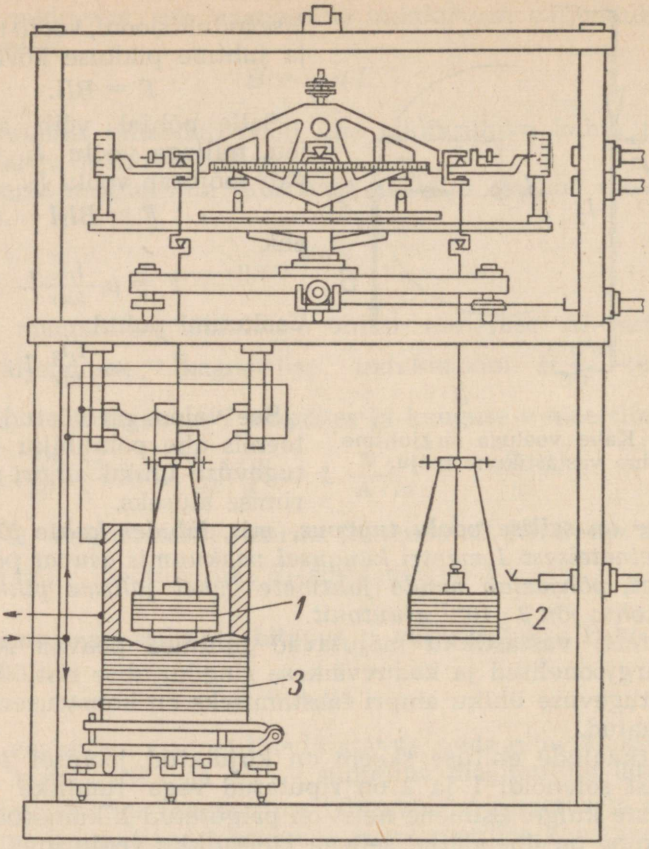
kus k on amperkaalude konstant. Seega voolu tugevus I avaldub järgmiselt:

$$I = \sqrt{\frac{mg}{k}}.$$

Selliste kaalude mõõtmistäpsus on 10^{-5} — 10^{-6} A piirides.

Asetades ampri definitsioonis toodud suuruste väärtused paralleelsete sirgvoolude vahel mõjuvate jõudude valemisse, saame

$$2 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{N} = \mu_0 \frac{1\mathrm{A} \cdot 1\mathrm{A} \cdot 1\mathrm{m}}{2\pi \cdot 1\mathrm{m}}.$$



Joon. 20. Amperkaalude ehituse skeem.

Siit järgneb:

$$\mu_0 = \frac{2\pi \cdot 2 \cdot 10^{-7}\,\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2} = 12{,}6 \cdot 10^{-7}\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2}\,.$$

Jätame õpilastele tõestada, et

$$1\,\frac{\mathrm{N}}{\mathrm{A}^2} = 1\,\frac{\Omega \cdot \mathrm{s}}{\mathrm{m}} = 1\,\frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}\,.$$

Seega magnetilise konstandi väärtus on $12 \cdot 10^{-7}\ \frac{\mathrm{H}}{\mathrm{m}}$.

Harjutus. 1. Arvutada 0,8 meetri pikkusele sirgjuhtmele mõjuv jõud, kui seda läbib vool tugevusega 12 A ja kui see asub teisest väga pikast sirgjuhtmest, milles on vool tugevusega 12 A, 5 cm kaugusel. Juhtmed on teineteisega paralleelsed ja asuvad vaakuumis. (Vastus: $F = 5{,}8 \cdot 10^{-4}$ N.)

2. Arvutada 10-amprise sirgvoolu välja magnetiline induktsioon punktis, mis asub juhtmest 5 cm kaugusel. Keskkonna suhteline magnetiline läbitavus võtta võrdseks ühega. (Vastus: $B = 4 \cdot 10^{-5}\,\frac{\mathrm{Wb}}{\mathrm{m}^2}$.)

3. Leida magnetiline induktsioon poolis, millel on 4000 keerdu, kui pooli läbib vool tugevusega 0,5 A ja pooli pikkus on 40 cm. Pooli sees on õhk. (Vastus: $B \approx 3{,}8 \cdot 10^{-4} \frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$.)

3. Magnetvälja tugevus. Magnetiline induktsioon on suurus, mis iseloomustab resultantmagnetvälja magneeditud aines. See resultantväli kujutab endast välise välja (näiteks voolu välja) ja magneeditud aine seesmise välja summat.

Magnetilise induktsiooni kõrval kasutatakse arvutustes veel ühte suurust, mida nimetatakse magnetvälja tugevuseks. See suurus iseloomustab magneetiva (välise) magnetvälja intensiivsust.

Väljatugevus on võrdeline magnetvälja tekitava voolu tugevusega.

$$H = n I,$$

kus I on voolutugevus amprites ja n pooli iga pikkusühiku kohta tulev keerdude arv. H on magnetvälja tugevus $\frac{\text{A}}{\text{m}}$-tes.

Magnetvälja tugevus on seotud magnetilise induktsiooniga järgmise valemiga

$$H = \frac{B}{\mu}.$$

SI-süsteemis on magnetvälja tugevuse ühikuks $\frac{\text{A}}{\text{m}}$:

$$H \text{ ühik} = 1 \frac{\text{Wb} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \text{H}} = 1 \frac{\text{V} \cdot \text{s} \cdot \text{m}}{\text{m}^2 \cdot \Omega \cdot \text{s}} = 1 \frac{\text{A}}{\text{m}}.$$

Magnetvälja tugevus on vektoriaalne suurus. Väljatugevuse vektor H on igas magnetvälja punktis suunatud seda punkti läbiva magnetilise jõujoone puutujat mööda.

Harjutus. 1. Kui suur peab olema voolu tugevus poolis, millel on 120 keerdu pooli pikkuse iga sentimeetri kohta, et välja tugevus poolis oleks 500 $\frac{\text{A}}{\text{m}}$?

2. Kui kaugel 5-amprise tugevusega sirgvoolust on magnetvälja tugevus 20 $\frac{\text{A}}{\text{m}}$?

4. Aine magnetilised omadused. Aine magnetilised omadused ilmnevad selle aine võimes magneetuda.

Aine magnetiliste omaduste katselised uurimised, millega alustas juba Faraday, näitasid, et kõikidel ainetel on need omadused olemas. Valdaval enamikul ainetel on magnetilised omadused nõrgad. Neid aineid nimetatakse nõrgalt magneetuvateks aineteks, erinevalt väikesest aineterühmast (raud, nikkel, koobalt), nn. tugevalt magneetuvatest ainetest.

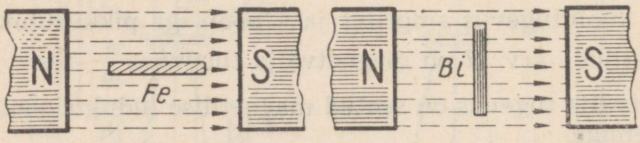
Aine magnetiliste omaduste uurimiseks valmistatakse ainest

väike pulgake (kui aine on vedel, siis valatakse see klaastorusse) ja riputatakse see elektromagneti pooluste vahele.

Kui katsekeha asetada homogeensesse välja, siis omandab ta välja mõjul mingi kindla asendi. Katseliselt on kindlaks tehtud, et ühte rühma kuuluvatest ainetest valmistatud pulgad paiknevad jõujoonte sihis, pulgad aga, mis on valmistatud teise rühma kuuluvatest ainetest, pöörduvad jõujoontega risti.

Mittehomogeenses magnetväljas asetuvad esimesse rühma kuuluvatest ainetest valmistatud pulgad piki jõujooni ning tõmbuvad piirkondadesse, kus väli on tugevam; teise aineterühma kuuluvad pulgad tõukuvad aga piirkondadesse, kus väli on nõrgem.

Pulkade erinev käitumine magnetväljas on seletatav sellega, et ühed nendest (esimese rühma ainetest valmistatud) magneetuvad välja jõujoonte suunas, teised aga vastassuunas (joon. 21).



Joon. 21. Homogeenses magnetväljas raudpulk asetub piki välja jõujooni, vismutpulk pöördub aga välja jõujoontega risti.

Esimesse rühma kuuluvaid nõrgalt magneetuvaid aineid nimetatakse paramagnetilisteks ja teise rühma kuuluvaid — diamagnetilisteks aineteks.

Paramagnetilistel ainetel on suhteline magnetiline läbitavus ühest suurem ($\mu_s > 1$) ja diamagnetilistel ainetel — ühest väiksem ($\mu_s < 1$).

Järgnevas tabelis on toodud mõnede ainete suhtelised magnetilised läbitavused.

Mõnede nõrgalt magneetuvate ainete suhtelised magnetilised läbitavused.

Õhk	1,00000036	paramagnetilised ained
Tina	1,000004	
Alumiinium	1,000023	
Plaatina	1,000364	
Vismut	0,999825	diamagnetilised ained
Antimon	0,999937	
Hõbe	0,999981	
Vask	0,999991	

Vaakuumi suhteline magnetiline läbitavus, nagu see järgneb suhtelise läbitavuse definitsioonist, võrdub ühega.

Kui asetada solenoidi mingist nõrgalt magneetuvast ainest pulk, siis solenoidi magnetväli märgatavalt ei muutu, sest aine magnetiline läbitavus on lähedane ühele.

Nõrgalt magneetuvad ained jäävad magneedituks ainult niikaua, kuni nad asuvad välises magnetväljas.

Tugevalt magneetuvaid aineid nimetatakse ferromagnetilisteks (selle rühma tähtsama esindaja — raua järgi).

Ferromagnetilised ained käituvad magnetväljas samuti nagu paramagnetilised ainedki, kuid nad magneetuvad nendest tundu-valt tugevamini.

Järgnevalt on toodud mõnede ferromagnetiliste ainete suhteliste magnetiliste läbitavuste suurimad väärtused.

Ferromagnetiline aine	Suhteline magnetiline läbitavus
Koobalt	174
Nikkel	1120
Pehmeteras	2180
Elektrotehniline lehtteras	7500
Raua ja nikli sulam	60000
Permalloi (Ni — 78%; Fe — 18%; Mo — 3%; Mn — 0,5%).	115000

Ferromagnetiliste ainete iseloomulikuks omaduseks on mitte ainult magnetilise läbitavuse suur väärtus, vaid ka see, et nende magnetiline läbitavus ei ole konstantne nagu paramagnetilistel ainetel, vaid sõltub magneetiva välja tugevusest.

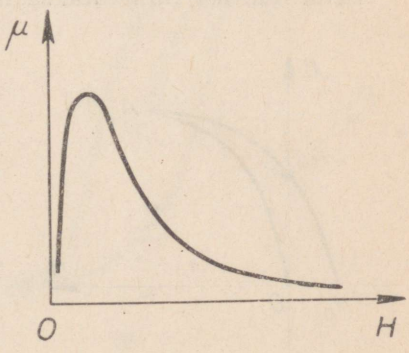
See sõltuvus on väga keerukas ning on erinevatel ainetel erinev, μ sõltuvus H-st on kujutatud joonisel 22.

Ferromagnetiliste ainete magnetiline läbitavus kasvab nõrkades väljades väljatugevuse kasvades kiiresti ja saavutab maksimumi. Välja tugevuse edasisel suurendamisel magnetiline läbitavus väheneb ja väga suure välja tugevuse korral läheneb ühele. See toimub siis, kui ferromagnetiline aine on magneeditud küllastuseni.

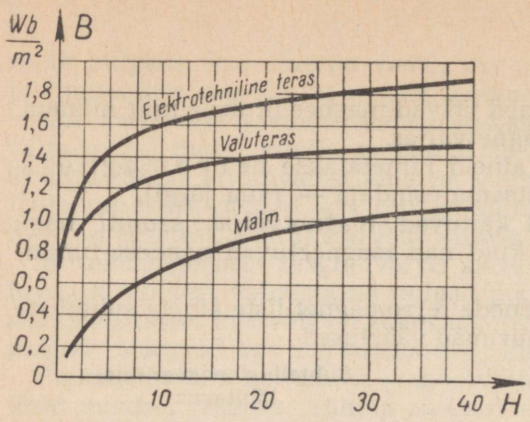
Kui ferromagnetiline aine on saavutanud magnetilise küllastusoleku, siis magnetiline induktsioon selles aines võib kasvada ainult magneetiva välja tugevuse suurenemise arvel.

Magnetilise küllastusoleku võivad saavutada ainult ferromagnetilised ained. Nõrgalt magneetuvatel ainetel küllastusolek puudub.

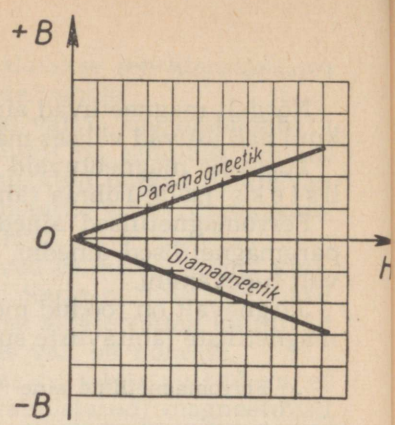
Nõrgalt magneetuvate ja ferromagnetiliste ainete magnetiliste omaduste erinevus peegeldub ilmekalt graafikutest (joon. 23), mis kirjeldavad antud aines magnetilise induktsiooni sõltuvust välise magnetvälja tugevusest.



Joon. 22. Aine magnetilise läbitavuse sõltuvus magneetiva välja tugevusest.



Joon. 23, *a*. Erinevate ferromagnetiliste ainete magneetuvuskõverad.



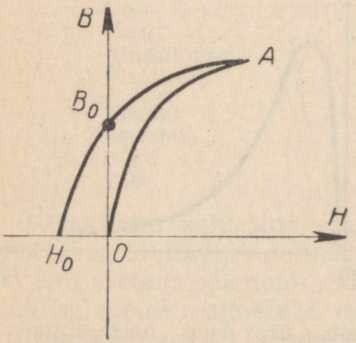
Joon. 23, *b*. Paramagneetikute ja diamagneetikute magneetuvuskõverad.

5. Magnetiline hüsterees. Ferromagnetilise aine magneetimiseks asetatakse sellest ainest südamik pooli. Kui pooli keerdudesse juhtida vool, siis südamik magneetub. Voolu tugevuse kasvamisel kasvab sellega võrdeliselt ka välise magnetvälja tugevus H poolis. Selle tulemusena aine magneetub üha enam, s. t. magnetiline induktsioon B kasvab.

Graafiliselt kujutab südamiku magneetumisprotsessi kõver OA (joon. 24).

Vähendades voolu tugevust poolis, hakkame järk-järgult magnetvälja tugevust vähendama. Seejuures hakkab vähenema ka magnetiline induktsioon südamikus. Kuid võrreldes magneetumisprotsessiga, kulgeb demagneetumisprotsess erinevat teed mööda: seda kirjeldab graafikul mitte kõver AO, vaid kõver AB_0. Seega *südamiku demagneetumine jääb maha magnetvälja tugevuse kahanemisest poolis.*

Seda nähtust nimetatakse h ü s t e r e e s i k s.



Joon. 24. Magneetuvuskõverad.

Kui voolu tugevus pooli keerdudes ja seega ka magneetiva välja tugevus on saanud võrdseks nulliga, siis südamik on ikkagi veel magneeditud olekus ja induktsioon temas ei võrdu nulliga. Säilinud magnetilist induktsiooni, mida graafikul kujutab lõik OB_0, nimetatakse remanentsiks ehk j ä ä k m a g n e t i s m i k s.

Südamiku täielikuks demagneetimiseks tuleb poolis tekitada vastupidiselt suunatud väli. Sellise välja saame, kui muudame voolu suunda poolis.

Suurendades esialgse väljaga vastupidiselt suunatud välja tugevust H_1, võime magnetilise induktsiooni südamikus viia nullini.

Seda protsessi kirjeldab graafikul kõvera osa B_0H_0. Lõik OH_0 kujutab vastupidiselt suunatud välise magnetvälja sellist tugevust, mille puhul toimub südamiku täielik demagneetumine.

Seda väljatugevuse väärtust H_0 nimetatakse koertsitiivjõuks. Koertsitiivjõu suurus iseloomustab ferromagnetilise aine «vastupidavust» demagneetimisele.

Jääkmagnetism B_0 ja koertsitiivjõud H_0 (eriti just viimane) on erinevatel ferromagnetilistel ainetel erinev. Need suurused on ferromagneetikute tähtsad karakteristikud.

Väikese koertsitiivjõuga aineid nimetatakse tehnikas pehmeteks ferromagneetikuteks. Suure koertsitiivjõuga aineid nimetatakse kõvadeks ferromagneetikuteks.

Kõvad ferromagneetikud on asendamatud materjalid püsivmagnetite valmistamisel, sest püsivmagnetite jääkmagnetism peab olema võimalikult suur, s. t. lähedane küllastusoleku vastavale magnetilisele induktsioonile.

Pehmeid ferromagneetikuid kasutatakse neil juhtudel, kui materjal peab aparaadi või masina töötamisel pidevalt ümber magneetuma.

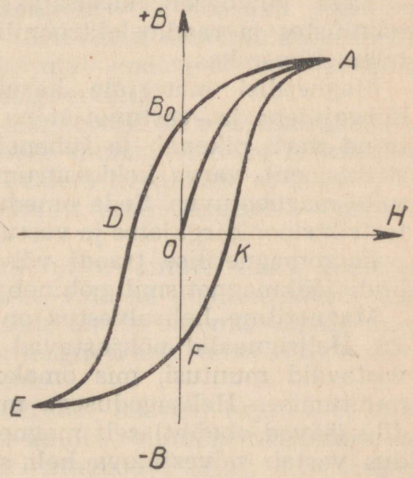
Jätkame selles paragrahvis kirjeldatud nähtuse vaatlemist.

Suurendades väljatugevust H uues suunas (joon. 25), võib materjali magneetida kuni küllastusolekuni, millele vastab punkt E. Kui hakkame materjali uuesti demagneetima, siis väljatugevuse väärtusel $H = 0$ esineb jällegi jääkmagnetism. Selle jääkmagnetismi suurust kujutab lõik OF.

Kui korrata aine ümbermagneetimise tsüklit, siis magnetilise induktsiooni muutumise protsess kordub vastavalt kinnisele kõverale AB_0DEFKA. Seda kõverat nimetatakse hüstereesisilmuseks.

Pehmete (väikese koertsitiivjõuga) ferromagneetikute hüstereesisilmus on kitsas, kõvade (suure koertsitiivsusega) oma aga lai.

Hüstereesinähtuse olemasolu tõttu kulub ainete ümbermagneetimiseks energiat. Mida suurem on antud aine koertsitiivjõud, seda suurem on ümbermagneetimiseks kuluv energia. Seetõttu valmistatakse transformaatorite ja vahelduvvoolu generaatorite südamikud eriti pehmetest ferromagneetikutest.



Joon. 25. Hüstereesisilmus.

Metallurgias toodetakse selleks otstarbeks spetsiaalset magnetiliselt pehmet transformaatoriterast.

Materjali ümbermagneetimiseks kuluv energia muundub südamiku siseenergiaks. Seetõttu südamik soojeneb. Kuid soojenemisel ferromagnetiliste ainete magnetilised omadused halvenevad ja teatud kriitilisel temperatuuril, mis igal ainel on erinev, kaovad täiesti. Kriitilisest temperatuurist kõrgematel temperatuuridel käitub ferromagnetiline aine tavalise paramagnetilise ainena.

Ferromagnetiliste ainete kriitilise temperatuuri olemasolu avastas Pierre Curie. Seetõttu nimetatakse seda temperatuuri Curie' punktiks.

Raua Curie' punkt on 769° K ja niklil 350° K.

Ferromagnetiliste materjalide magneetumise seaduste uurimine on üks tähtsamaid praktilisi ja teoreetilisi ülesandeid. Esimesi ulatuslikke uurimusi sel alal teostas vene teadlane A. T. Stoletov. Väljapaistvaid tulemusi ferromagnetiliste ainete uurimisel saavutasid nõukogude teadlased V. K. Arkadjev, N. A. Akulov, J. T. Dorfman, C. V. Vopsovski jt.

6. Magnetiliste materjalide kasutamine. Magnetilisi materjale kasutatakse väga laialdaselt tänapäeva tehnikas. Vaatleme järgnevalt nende kõige tähtsamaid kasutusalasid.

Üheks põhiliseks magnetiliste materjalide tarbijaks on elektrotehnika. Hiiglasuur kogus magnetiliselt pehmet materjali — elektrotehnilist lehtterast — kulutatakse igal aastal generaatorite, elektrimootorite ja transformaatorite valmistamiseks. Samuti kulub palju ferromagnetilisi materjale ülisuurtes tuumaosakeste kiirendajates, võimsates elektromagnetilistes kraanades, valjuhääldajates, elektrimõõduriistades ja teistes seadmetes kasutatavate elektromagnetite ehitamiseks.

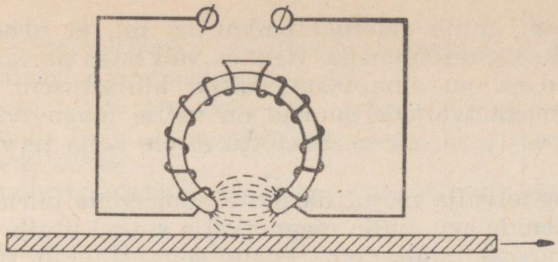
Väga laialdaselt kasutatakse magnetilisi materjale raadiotehnilistes ja raadioelektroonilistes seadmetes, automaatikas ja telemehhaanikas.

Magnetilisi materjale kasutatakse ultraakustikas ultraheli-kiirgajatena ja -vastuvõtjatena. Ferromagnetilisest ainest valmistatud varb pikeneb ja lüheneb ümbermagneetumisel (magnetostriktsioon), varva kokkusurumisel ja venitamisel aga muutub selle magneetuvus. Seda omadust kasutataksegi ultraheli magnetostriktsioonkiirgajates ja vastuvõtjates.

Ferromagnetilise traadi või spetsiaalselt valmistatud magnetlindi jääkmagnetismil põhineb üks tähtsamaid helisalvestusviise.

Magnetiline helisalvestus on skemaatiliselt kujutatud joonisel 26. Helisignaalid põhjustavad vooluringis elektrivoolu tugevuse vastavaid muutusi, mis omakorda kutsuvad esile magnetvälja muutumise. Helisagedusega muutuvat magnetvälja läbivale lindile jäävad ebaühtlaselt magneeditud alad, mille esinemise sagedus vastab salvestatava heli sagedusele. Lindi jääkmagnetismi tõttu säilivad need alad magneedituna ja heli jääb salvestatuks.

Seoses ülikõrgsagedustehnika arenguga on välja töötatud uued



Joon. 26. Magnetilise helisalvestuse skeem.

pooljuhtide hulka kuuluvad mittemetallilised ferromagnetilised materjalid, mille eritakistus on väga palju kordi ($10^8 — 10^{20}$ korda) suurem metallisulamite eritakistusest. Seetõttu ei teki neis kõrgsageduslikul magneetimisel kuigi märgatavaid induktsioonivoole (pöörisvoole) ja nende vooludega kaasnevaid energiakadusid. Selliste ainete üheks levinumaks liigiks on metallihapendid ühise keemilise valemiga $MeOFe_2O_3$, kus Me tähendab mingit metalli: rauda, niklit, koobaltit, mangaani jt. Neist ainetest valmistatakse magnetiliselt pehmeid pooljuhtmaterjale — ferriite, mida kasutatakse väga laialdaselt ülikõrgsagedustehnikas.

7. Aine magnetiliste omaduste olemus. Aine magnetiliste omaduste selgitamise esimeseks katseks oli Amper'i hüpotees. Amper oletas, et püsivmagnetites on olemas molekulaarvoolud, mis tekitavadki magnetvälja (Amper'i hüpoteesi on käsitletud III peatükis, § 79).

Aatomi ehituse tundmaõppimine ja elementaarosakeste omaduste uurimine avasid Amper'i molekulaarvoolude ja ainete magnetiliste omaduste olemuse.

Aine iga aatom on keerukas süsteem. Ta koosneb positiivse laenguga tuumast ja selle ümber tiirlevatest elektronidest. Elektronide liikumine ümber tuuma kujutab endast elementaarvoolu, mis nagu iga teine voolgi tekitab magnetvälja.

Uurimused näitasid, et aatomi magnetväli on põhjustatud mitte ainult elektronide liikumisest ümber tuuma, vaid ka elektronide endi magnetväljade olemasolust. Peale selle ilmnes, et magnetväli on olemas ka nendel osakestel, millest tuum koosneb — prootonitel ja neutronitel.

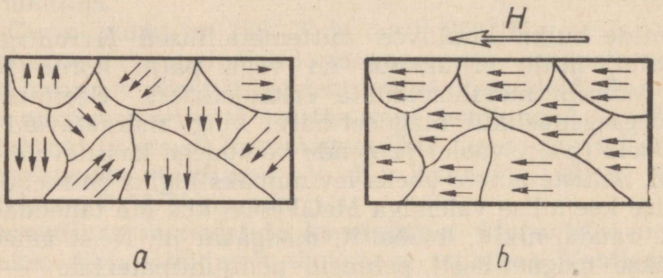
Kuid aatomi magnetväli sõltub mitte ainult tema koostisse kuuluvate osakeste magnetväljadest, vaid ka nende osakeste asetusest ja liikumisest aatomis. Ühtede ainete aatomis võivad magnetväljad liituda ja anda resultantmagnetvälja, teiste ainete aatomites aga sellist resultantvälja ei teki.

Selleks et aine osutuks magneedituks, on veel vajalik, et tema aatomid ja molekulid omandaksid kindla ruumilise orientatsiooni.

Iseenesest omandavad sellise orientatsiooni ainult ferromagnetiliste ainete aatomite magnetväljad. Ferromagnetilistes ainetes avastati väikesed piirkonnad (mõõtmetega suurusjär-

gus 10^{-3} mm), mille aatomid paiknevad nii, et nende magnetväljad on ühesuguse suunaga. Nendes väikestes piirkondades, nn. *domeenides*, on aine magneeditud küllastuseni. Erinevate domeenide magnetväljade suunad on välise magnetvälja puudumisel erinevad (joon. 27, *a*). Seetõttu ei ole keha tervikuna magneeditud.

Välise magnetvälja mõjul üksikute domeenide piirid nihkuvad; nende domeenide arv, mille magnetvälja suund ühtib välise magnetvälja suunaga, suureneb. Peale selle toimub magneeditud domeenide orienteerumine välise välja suunas (joon. 27, *b*).



Joon. 27. a) erinevad domeenid on magneetunud eri suundades; b) magneeditud domeenid on orienteerunud välise välja suunas.

Selles seisnebki ferromagnetiliste ainete magneetumisprotsess.

Ferromagnetiliste domeenide olemasolu hüpoteesi püstitas juba 1907. a. prantsuse füüsik Weiss. Nõukogude teadlased L. D. Landau ja E. M. Lifšits tõestasid 1935. a. teoreetiliselt selle hüpoteesi.

Spontaanse magneetumise piirkondade — domeenide olemasolu võib kindlaks teha, vaadeldes mikroskoobiga lihvitud ferromagneetiku pinda, mis on kaetud väga peene rauapulbriga. Rauapulber tõmbub domeenide piiride külge. Selliseid katseid korraldasid esmakordselt nõukogude teadlased N. S. Akulov ja M. V. Dektjar.

Paramagnetiliste ainete aatomitel ja molekulidel on oma magnetväli. Välise magnetvälja mõjul orienteeruvad need mikroväljad nii, et eelistatud suunaks on välise magneetiva välja suund. Välise välja tugevuse H kasvades kasvab sellega võrdeliselt ka mikroväljade poolt aines tekitatud magnetiline induktsioon B. Soojusliikumine takistab mikroväljade orienteerumist välise välja suunas. Seetõttu paramagnetilised ained ei magneetu küllastuseni.

Diamagnetiliste ainete aatomitel puudub oma magnetväli. Kui sellistes ainetes tekitada väline magnetväli, siis need magneetuvad välise väljaga vastupidises suunas. Selle nähtuse põhjus on järgmine.

Väline magnetväli põhjustab elektronide liikumise muutumist nende tiirlemisel ümber aatomituumade. Selle tulemusena tekivad aatomites välise väljaga vastupidiselt suunatud magnetväljad (vastavalt elektromagnetilise induktsiooni nähtusele).

Seega aine magnetilistes omadustes peegeldub selle aine sisemine molekulaarne ja atomaarne ehitus.

Ainete magnetiliste omaduste üksikasjalik uurimine võimaldab füüsikutel saada palju andmeid aine struktuuri ja elementaarosakeste omaduste kohta.

Nende omaduste edasine uurimine avardab meie teadmisi maailmast.

8. Pooli magnetvälja energia. Pooli magnetväli omab energiat. Selle järelduse võib teha reast katsetest, millest üks on kirjeldatud § 94. Selles katses ühendatakse taskulambipirn ja suure induktiivsusega elektromagnet paralleelselt vooluringi. Kuna vooluallika pinge on väike, siis lamp ei põle. Vooluringi katkestamisel süttib aga lamp üheks hetkeks heledalt põlema.

Lambi süttimine toimub vooluringi katkestamise ajal ja on seetõttu seotud mitte vooluallika energia muundumisega, vaid toimub eneseinduktsiooni elektromotoorse jõu poolt esilekutsutud induktsioonivoolu energia arvel. Voolu energia saadakse aga põhiliselt pooli magnetvälja energiast. Seega vooluringi katkestamise hetkel muundub pooli magnetvälja salvestatud energia teisteks energialiikideks. Kuidas arvutada pooli magnetvälja energiat?

On ilmne, et energia kogunemine magnetvälja toimub vooluringi sulgemise hetkel, sest kui voolu tugevus on saavutanud juba jääva väärtuse, siis magnetvälja energia enam ei muutu. Sel ajal kulutab vooluallikas energiat ainult alalisvoolu säilitamiseks, kusjuures see osa energiast muundub juhtmete siseenergiaks (pool soojeneb).

Ajavahemikus, mille kestel voolu tugevus kasvab nullist kuni I-ni, teeb vooluallikas täiendavalt tööd voolu tugevuse kasvamist takistava eneseinduktsiooni elektromotoorse jõu ületamiseks. Magnetvälja salvestatud energia võrdubki selle tööga.

Arvutused, mis ei kuulu keskkooli füüsika kursusesse, näitavad, et pooli magnetvälja energiat võib arvutada valemist:

$$W = \frac{LI^2}{2},$$

kus L on pooli induktiivsus (§ 95).

IV. TÄIENDAV ÕPPEMATERJAL PEATÜKILE «VAHELDUVVOOL»

1. Võimsus vahelduvvooluringis. Võimsus alalisvooluringi mingis osas võrdub energiaga, mis selles vooluringi osas muundub ühe sekundi jooksul teisteks energialiikideks. See võimsus võrdub arvuliselt pinge ja voolu tugevuse korrutisega:

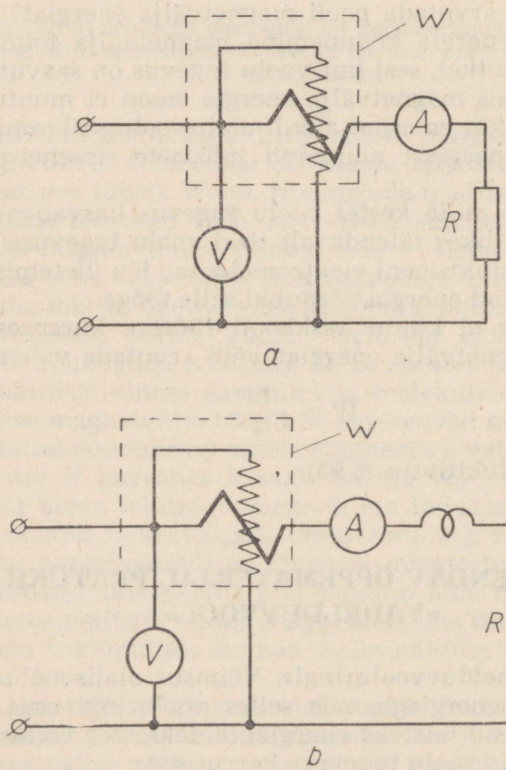
$$N = UI$$

Kui vahelduvvooluringis puudub induktiivsus ja mahtuvus, siis kehtib see valem ka vahelduvvooluringi mingi osa kohta. Võimsust vahelduvvooluringi osas, mis omab aktiivtakistust, nimetatakse aktiivvõimsuseks. Aktiivvõimsus iseloomustab vahelduvvoolu energiat, mis ühe sekundi jooksul muundub teisteks energialiikideks (siseenergiaks, mehhaaniliseks energiaks jt.). Aktiivvõimsuse ühikud on vatt (W) ja kilovatt (kW).

Ühendame vahelduvvooluringi aktiivtakistusega juhi ja mõõdame voltmeetriga pinge selle otstel; ampermeetriga mõõdame voolu tugevuse ja vattmeetriga võimsuse (joon. 28, *a*).

Võrreldes vattmeetri näitu N korrutisega UI võime veenduda, et $N = UI$. Seega aktiivvõimsust võib mõõta kas vahetult vattmeetriga või arvutada voltmeetri ja ampermeetri näitude järgi.

Tunduvalt raskem on leida võimsust vahelduvvooluringis sel juhul, kui vooluring omab peale aktiivtakistuse veel induktiivtakistust ja mahtuvuslikku takistust. Ühendame vahelduvvooluringi aktiivtakistusega järjestikku pooli, millel on küllalt suur induktiivsus (joon. 28, *b*). Vattmeetri näit, mis vastab vooluringi



Joon. 28. Skeem võimsuse mõõtmiseks vahelduvvooluringis.

ühendatud aktiivtakistusele, on nüüd väiksem kui korrutis UI. Võime kirjutada, et

$$N = k\,U\,I, \tag{1}$$

kus k on mingi kordaja, mida nimetatakse võimsusteguriks. Nagu teoreetilised arvutused näitavad, avaldub võimsustegur järgmiselt:

$$k = \cos\varphi.$$

φ selles valemis on voolu ja pinge vaheline faasinihe vahelduvvooluringis. Pannes väärtuse võimsuse valemisse (1), saame:

$$N = U\,I\cos\varphi.$$

Suurust $S = U\,I$ nimetatakse näivvõimsuseks. Näivvõimsust vahelduvvooluringis mõõdetakse voltamprites (VA) või kilovoltamprites (kVA). Seega aktiivvõimsus vahelduvvooluringis võrdub näivvõimsuse ja $\cos\varphi$ korrutisega:

$$N = S\cos\varphi.$$

Üldjuhul (kui vahelduvvooluring omab nii aktiiv- kui ka reaktiivtakistust) on aktiivvõimsus näivvõimsusest väiksem, mistõttu $\cos\varphi < 1$. Kui vooluringis on ainult aktiivkoormus, siis $\cos\varphi = 1$. Ainult induktiiv- või mahtuvusliku koormuse korral on $\cos\varphi = 0$ ja $N = 0$.

Mida suurem on $\cos\varphi$, seda paremini ekspluateeritakse generaatorit ja elektrivõrku. Seetõttu tuleb vahelduvvooluringides saavutada võimalikult suur võimsusteguri väärtus.

Elektrienergia tarbija võimsusteguri suurendamise vajadus selgub järgmisest näitest.

Oletame, et elektrijaama vahelduvvoolu generaatori võimsus on 240 kVA ja pinge generaatori klemmidel on 1200 V. Seega maksimaalne voolu tugevus võrgus võib olla:

$$I = \frac{S}{U} = \frac{240\,000}{1200} = 200\text{ A}.$$

Kui generaatoriga ühendada koormus, millel on ainult aktiivtakistus (näiteks hõõglambid, elektrisoojendusriistad), siis $\cos\varphi = 1$ ja aktiivvõimsus $N = UI\cos\varphi = 1200 \cdot 200 \cdot 1 = 240\,000\text{ W} = 240\text{ kW}$. Sel juhul kasutatakse generaatori energia täielikult ära.

Kui aga ühendada selle generaatoriga koormus, mille $\cos\varphi = 0{,}5$ (tarbijad, millel on nii aktiiv- kui ka induktiivtakistus), siis aktiivvõimsus võrgus on $N = 1200 \cdot 200 \cdot 0{,}5 = 120\,000\text{ W} = 120\text{ kW}$. Antud juhul läbib generaatori mähist endise tugevusega vool, kuid kasulik võimsus on väiksem. Madal võimsustegur vähendab generaatori kasutegurit.

Võimsusteguri suurendamine elektrivõrkudes on üks energeetika tähtsamaid ülesandeid.

V. TÄIENDAV ÕPPEMATERJAL PEATÜKILE «ELEKTROMAGNETILISED VÕNKUMISED JA LAINED»

1. Elektromagnetiliste lainete omadused. Elektromagnetiliste lainete omadusi võib uurida seadme abil, mis koosneb saatjast — mõnesentimeetrisel lainepikkusel ($f = 10\,000$ M Hz) töötavast kõrgsagedusgeneraatorist ja nende lainete vastuvõtjast. Vastuvõtjast antakse signaal edasi võimendajasse, kust see pärast võimendamist juhitakse valjuhääldajasse. Sel teel saame signaali muuta kuuldavaks.

Kui saatja ja vastuvõtja vahele, s. t. elektromagnetiliste lainete levimise teele, asetada metall-leht, siis raadiosignaalide vastuvõtmine katkeb.

See katse näitab, et juhid ei lase läbi elektromagnetilisi laineid.

Dielektrikud aga (näiteks klaasplaat) lasevad elektromagnetilisi laineid läbi ja vähendavad ainult veidi vastuvõetava signaali võimsust.

Elektromagnetilised lained peegelduvad juhtidelt. Mingist dielektrikust valmistatud prisma läbimisel muudavad nad oma suunda, s. t. murduvad.

Kasutades lühilainesaatjaid ja vastuvõtjaid, võib esile kutsuda elektromagnetiliste lainete interferentsi ja difraktsiooni.

Seega elektromagnetilistel lainetel on omadused, mis on iseloomulikud mitmesugustele teistele lainetelegi: häälelainetele, valguslainetele jne.

Elektromagnetiliste lainete võimet peegelduda, murduda ja interfereeruda kasutatakse mitmesugustes raadiotehnilistes seadmetes. Nende omadustega on seotud ka erineva lainepikkusega elektromagnetiliste lainete levimise iseärasused. Näiteks pikad elektromagnetilised lained levivad ainult maapinnal, mis neid tugevasti neelab. Kui pikad lained saata välja maapinnaga mingi nurga all, siis nad hajuvad maailmaruumi ega pöördu enam Maale tagasi. Lühilaineid neelab maapind veelgi tugevamini, kuid see-eest need peegelduvad tagasi suurtes kõrgustes asuvatelt ioniseeritud atmosfäärikihtidelt ja pöörduvad pärast peegeldumist maapinnale tagasi. Seetõttu ongi võimalik lühilainete abil sidet pidada suurtelt kaugustelt, kasutades seejuures väikese võimsusega raadiojaamu. Kuid pikklaineside on palju püsivam kui lühilaineside, sest lühilainete peegeldustingimused muutuvad pidevalt. Ultralühilained ei paindu suurte takistuste taha. Nende abil saab sidet pidada ainult sel juhul, kui vastuvõtja ja saatja vahel ei ole takistust, mis võib peegeldada laineid ja muuta nende levimise suunda.

Harjutus.

1. Arvutada elektriülekandeliini läbiva tööstusliku sagedusega voolu poolt kiiratavate elektromagnetiliste lainete pikkus. (Vastus: $6 \cdot 10^6$ m.)
2. Selgitage, miks lühilaineside puhul võib tekkida vaikusvöönd.

3. Raadiovastuvõtja abil võib vastu võtta elektromagnetilisi laineid lainepikkustega 25—2000 m. Arvutada nende lainete suurim ja väikseim võnkesagedus. (Vastus: $f_s = 1{,}2 \cdot 10^7$ Hz; $f \approx 1{,}5 \cdot 10^5$ Hz.)

2. Kõrgsagedusvoolude kasutamine. Kõrgsagedusvõnkumisi kasutatakse põhiliselt raadiosides, kuid nende rakendamise võimalused laienevad.

Kõrgsagedusvoolu kasutatakse tööstuses, arstiteaduses ja paljudel teistel aladel.

Erinevalt alalisvoolust läbib kõrgsagedusvool põhiliselt ainult juhtme pinnakihti. Seda nähtust nimetatakse pinnaefektiks.

Voolu metalli tungimise sügavus sõltub voolu sagedusest, metalli eritakistusest ja selle magnetilisest läbitavusest. Näiteks sagedusel 50 Hz on juhtiva pinnakihi paksus vaskjuhtmes 10 mm, sagedusel 500 000 Hz (500 kHz) — 0,1 mm ja sagedusel 150 000 000 Hz (150 MHz) — kõigest 0,006 mm.

Pinnaefekti kasutatakse terasesemete termilisel töötlemisel.

Mitmesugustes mootorites ja masinates kasutatakse väga kõva pinnaga detaile (need peavad hästi vastu kulumisele ning taluvad kindlalt lööke ja tõukeid). Kuid selliste detailide valmistamine tavaliste kuumutamismeetodite abil oli väga keerukas, mõnikord isegi võimatu, sest detail jõuab kuumeneda üle kogu oma ruumala ja muutub pärast karastamist rabedaks.

Kõrgsageduskarastamisel asetatakse karastatav ese mähisesse, mida läbib kõrgsagedusvool. Vahelduv magnetväli indutseerib metallesemes kõrgsagedusvoolu. Küllalt suure voolutugevuse puhul kuumeneb eseme pind väga lühikese ajaga (mõne sekundi jooksul) kõrge temperatuurini. Kui pärast voolu väljalülitamist eset kiiresti jahutada, siis karastub ainult selle pinnakiht; eseme sisemine osa ei karastu, see jääb pehmeks.

Tööstuses kasutatakse terasesulatamisel induktsioonahje, kus kuumutamine toimub kõrgsagedusvoolude abil. Viimasel ajal keevitatakse kõrgsagedusvoolude abil plastmasse.

Kõrgsagedusgeneraatoreid kasutatakse ka keraamika- ja puidutoodete ning teiste esemete kuivatamiseks. Neid esemeid soojendatakse mitte induktori vahelduvas magnetväljas, vaid kondensaatori vahelduvas elektriväljas. Dielektriku üksikud aatomid, ioonid ja molekulid hakkavad elektrivälja muutumise taktis võnkuma. Nende sunnitud võnkumise tõttu dielektrik soojeneb. Elektriväli levib kergesti üle kogu dielektriku ruumala ja kutsub esile ühtlase soojenemise. Dielektriku poorides asuv vesi hakkab kiiresti keema ja väljub nendest auruna.

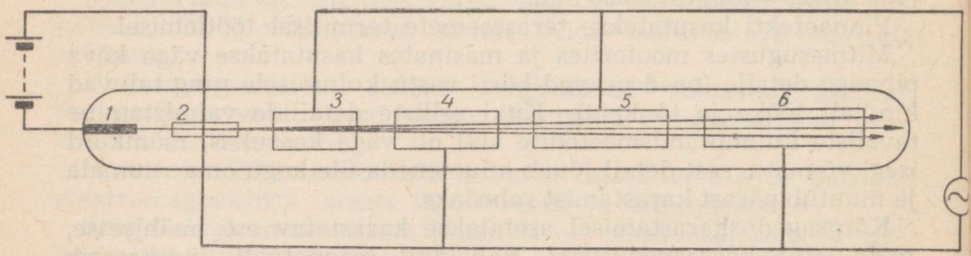
Kõrgsagedus-soojendust kasutatakse ka arstiteaduses. Mõnede haiguste puhul on väga kasulik inimese siseorganeid tugevasti soojendada. Selleks kasutataksegi kõrgsagedusvoolude abi.

VI. TÄIENDAV ÕPPEMATERJAL PEATÜKILE «AATOMI EHITUS»

1. Kiirendajad. Seadmeid, mille abil saadakse suure energiaga osakesi, nimetatakse kiirendajateks.

Et anda osakestele suurt energiat, tuleb neid kiirendada. Selleks võib kasutada kõrgepingelist elektrostaatilist välja, kus pinge ulatub mitme miljoni voldini. Sel põhimõttel ehitati esimesed kiirendajad. Tänapäeval kasutatakse osakeste kiirendamiseks peamiselt vahelduvat elektrivälja. Sel põhimõttel on ehitatud mitmesugused lineaar- ja tsüklilised kiirendajad.

Lihtsaima lineaarkiirendaja skeem on toodud joonisel 29. Vaakuumtorusse on paigutatud laetud osakeste allikas 1, kiirenduselektrood 2 ja toruelektroodid 3, 4, 5 ja 6. Nendele elektroodidele antakse spetsiaalsest generaatorist kõrgsagedusega vahelduvpinge.



Joon. 29. Lineaarkiirendaja skeem.

Elektronide kiirendamisel antakse elektroodile 2 osakesteallika 1 suhtes positiivne potentsiaal ja positiivsete ioonide kiirendamisel — negatiivne potentsiaal. Selles elektriväljas kiirenenud osakesed satuvad pärast elektroodi 2 läbimist elektroodide 2 ja 3 vahelisse ruumi. Elektroodidele 2 ja 3 rakendatud kõrgsagedus-pinge tekitab nendevahelises ruumis elektrivälja, milles laetud osakesed veelgi kiirenevad. Pärast seda sisenevad osakesed elektroodi 3. Osakesed läbivad elektroodide 2 ja 3 vahelise tee ajaga, mis võrdub elektroodidele 3, 4, 5 ja 6 rakendatud pinge võnkumise poole perioodiga. Järgmise poole perioodi vältel muutub elektriväli elektroodide 2 ja 3 vahel vastupidiseks. Sellises väljas peaksid osakesed pidurduma. Kuid selle aja vältel, mil väli on vastupidise suunaga, liiguvad laetud osakesed elektroodi 3 sees kiirenduseta, s. t. inertsi mõjul. Selleks ajaks, mil osake väljub elektroodist 3 ja satub elektroodide 3 ja 4 vahelisse ruumi, on elektriväli uuesti muutnud oma suunda ja osakese liikumine kiireneb selles väljas. Järgnevate teelõikude (4—5 ja 5—6) läbimisel kõik need protsessid korduvad.

Seega lineaarkiirendajas läbib osake kiirendustee lõike elektrivälja muutumise taktis. Kui kasutada lineaarkiirendajas suurt arvu elektroode, siis võib selle kiirendaja abil saada väga suure energiaga osakesi.

Suure energiaga positiivsete ioonide saamiseks kasutatakse tavaliselt tsüklilisi kiirendajaid ehk *tsüklotrone*. Ka tsüklotronide töötamine põhineb osakeste mitmekordsel kiirendamisel, kuid nendes liiguvad osakesed mitte sirgjooneliselt, vaid spiraalselt.

Tsüklotroni põhiosaks on suur elektromagnet, mille pooluste vahel tekitatakse tugev homogeenne magnetväli. Töökambris, kus asub elektromagnet, on kõrgvaakuum.

Kui elektromagneti välja satub mingi laetud osake, millel on välja jõujoontega risti suunatud algkiirus, siis osake liigub väljas ringjoonelist trajektoori mööda. Selle ringjoone raadius on võrdeline osakese algkiirusega.

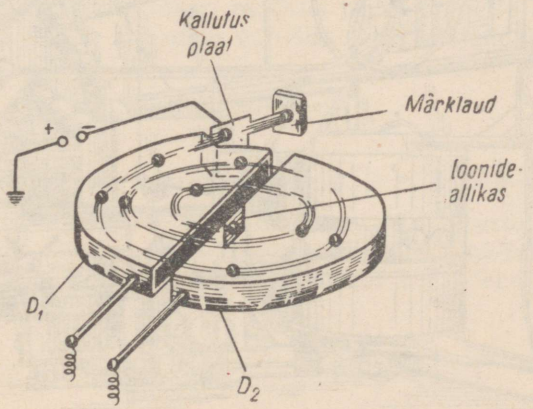
Tsüklotroni töökambris, elektromagneti pooluste vahel, asub lame kettakujuline karp, mis on piki diameetrit kaheks osaks lõigatud (joon. 30), nii et nende vahele jääb pilu. Karbi pooled on D-kujulised. Seetõttu nimetatakse neid duantideks. Duandid on kiirenduselektroodideks: nende vahele tekitatakse kõrgsagedusgeneraatori abil 30 000—100 000-voldine vahelduvpinge.

Selle elektrivälja muutumise periood võrdub magnetväljas ringjooneliselt liikuvate osakeste tiirlemisperioodiga.

Duantidevahelisse pilusse, kambri keskpunkti lähedale, paigutatakse ioonideallikas.

Duantide sees elektriväli puudub. Seal liiguvad ioonid inertsi mõjul. Elektromagneti magnetväli, mille jõujooned on risti ioonide liikumise kiirusega, ei muuda kiiruse suurust, vaid ainult kõverdab ioonide trajektoore, sundides neid liikuma ringjooneliselt.

Oletame, et hetkel, mil vasakpoolne duant D_1 omas maksimaalset negatiivset potentsiaali, ilmusid duantide vahele positiivsed ioonid. Elektrivälja mõjul nihkuvad ioonid selle duandi poole ja tungivad selle sisse. Magnetvälja mõjul liiguvad ioonid duandis mööda poolringi. Ajavahemiku $\frac{T}{2}$ pärast (T — duantidele raken-



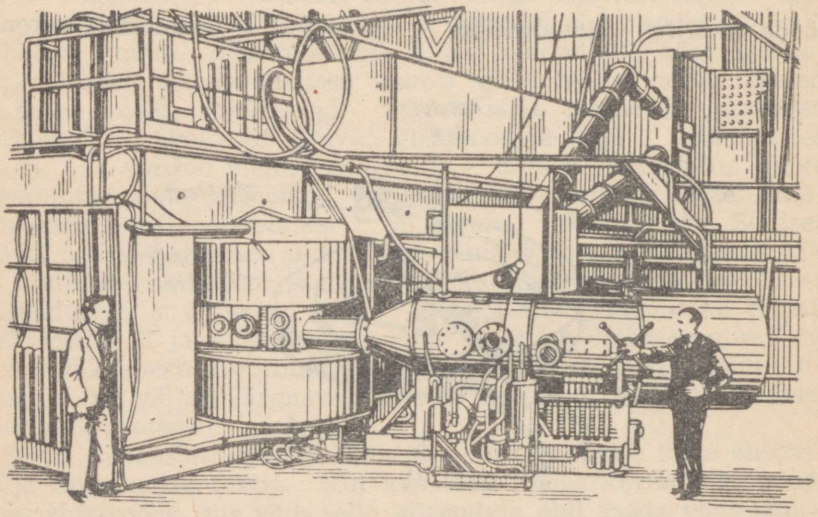
Joon. 30. Tsüklotroni kambri skeem.

datud vahelduvpinge periood) on ioonid uuesti duantide vahel. Seega ioonid jõuavad uuesti duantidevahelisse pilusse siis, kui pingel on niisama suur arvuline väärtus nagu esimesel kiirendamiselgi, kuid vastupidise suunaga. Kuna ioonid liiguvad nüüd läbi pilu samuti vastupidises suunas (sisenedes duanti D_2), siis nende liikumine kiireneb teistkordselt ja nende energia suureneb. Liikudes parempoolses duandis, kirjeldavad osakesed uuesti poolringjoone, mille raadius on veidi suurem (sest kiirus on suurenenud) ja ilmuvad duantide vahele ajahetkel, mil pinge on omandanud algväärtuse. Ioonid saavad uue kiirenduse ja nende energia suureneb.

See protsess kordub pidevalt, ioonide energia kasvab üha suuremaks ja ioonid, liikudes spiraali mööda, lähenevad üha enam duandi välisseinale. Pärast sadade tiirude sooritamist on ioonid kogunud küllalt suure energia ja on jõudnud duandi külgseina lähedale. Duandi väljumisava lähedale on asetatud kallutusplaat, mis hoitakse mitmekümne tuhande voldise pinge all. Kiirendatud ioonid kalduvad kõrvale ja suunduvad duandist kambrisse, kus asub märklaud.

Niisugune on tsüklotroni töötamispõhimõte. Tsüklotroni abil võib saada igas sekundis $9 \cdot 10^{13}$ osakest, mille energia on 100 MeV. Võrdluseks olgu öeldud, et 1 g raadiumi kiirgab sekundis $3{,}7 \cdot 10^{10}$ α-osakest energiaga 4,7 MeV.

Tsüklotroni kasutatakse raskete osakeste — prootonite, α-osakeste ja ioonide kiirendamiseks. Kuid elektronide kiirendamiseks ta ei ole rakendatav, sest sel juhul avaldab väga tugevat



Joon. 31. Tsüklotroni väliskuju.

mõju elektronide massi suurenemine nende liikumiskiiruse suurenemisel.

Tsüklotroni väliskuju on näidatud joonisel 31.

1944. a. täiustas nõukogude füüsik V. I. Veksler lihtsaima tsüklilise kiirendaja — tsüklotroni töötamispõhimõtet. Tänapäeval saadakse osakesi, mille energia ulatub miljarditesse elektronvoltidesse.

Ühendatud Tuumauurimisinstituudis Dubna linnas (Moskva lähedal) on ehitatud võimas kiirendaja — sünkrofasotron, mis võimaldab saada osakesi energiaga kuni 10^{10} MeV.

Toome mõningaid andmeid selle seadeldise kohta. Sünkrofasotroni elektromagneti välisdiameeter on 72 m, elektromagneti ja tema mähiste kogukaal — 36 000 T ja vaakuumkambri maht — 160 m^3; enne kui osake saavutab energia 10^{10} MeV, teeb ta 4,5 miljonit tiiru ja läbib seejuures ligikaudu 1 miljon kilomeetrit; elektromagneti toitmiseks kasutatakse voolu tugevusega 12 800 A.

2. Sidemeenergia. Massidefekt. Aatomienergia. Selleks et purustada tuuma prootoniteks ja neutroniteks, tuleb tuumajõudude ületamiseks teha tööd, s. t. tuumale tuleb anda energiat. Prootonite ja neutronite ühinemisel aatomituumaks eraldub energiat. Energia jäävuse seaduse põhjal peab ühinemisel vabanenud energia võrduma energiaga, mis kulub tuuma lagundamiseks prootoniteks ja neutroniteks. Seda energiat nimetatakse s i d e m e e n e r g i a k s. Mida püsivam on tuum, seda suurem on tema sidemeenergia.

Kuidas saab kindlaks määrata tuuma sidemeenergia suurust?

Aatomituumade sidemeenergia määramise lihtsaim viis põhineb ühel tähtsal loodusseadusel, mis seob keha massi tema energiaga. Selle seaduse avastas väljapaistev teadlane A. Einstein.

Sellest seadusest järgneb, et *keha massi muutumine toob endaga kaasa selle keha energia muutumise.*

Kui Δm on mingi keha massi muutus ja ΔE on selle keha energia muutus, siis nende suuruste vahelist seost väljendab järgmine valem:

$$\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}.$$

c selles valemis tähendab valguse kiirust $\left(c = 3 \cdot 10^{10} \frac{\text{cm}}{\text{s}^2}\right)$.

Sellest valemist järgneb, et keha massi tähtsusetult väikesele muutusele vastab suur energia muutus. Arvutame näiteks energia, mis eraldub mingi keha massi vähenemisel 1 g võrra. Võrdusest $\Delta m = \frac{\Delta E}{c^2}$ saame:

$$\Delta E = 0{,}001 \cdot 9 \cdot 10^{16} \frac{\text{kg} \cdot \text{m}^2}{\text{s}^2} = 9 \cdot 10^{13}\ \text{J}.$$

Selline energiahulk vabaneb 3000 tonni kivisöe täielikul põlemisel.

Kuid millist osa etendab vaadeldud seadus aatomituumade sidemeenergia arvutamisel?

Tuuma tekkimisel prootonitest ja neutronitest vabaneb elektromagnetilise kiirguse energia, s. t. tuumasüsteem kiirgab välja footoneid. Selle tulemusena aineosakeste koguenergia väheneb. Ka nende mass peab vähenema, sest osa massi eemaldub koos footonitega. Seega tekkinud tuuma mass peab olema väiksem tuuma koostisse kuuluvate prootonite ja neutronite masside summast. Seda masside vahet nimetatakse tuuma massidefektiks. Massidefekti olemasolu kinnitavad vastavad katsed.

Aatomite masse väljendatakse tavaliselt aatommassi ühikutes. Aatommassi ühikuks on võetud $\frac{1}{16}$ hapnikuaatomi massist. Aatommassi ühik on $1{,}66 \cdot 10^{-24}$ g.

Massi muutus ühe aatommassi ühiku võrra vastab energia muutusele 931 MeV. Prootoni mass $m_p = 1{,}00813$ aatommassi ühikut ja neutroni mass $m_n = 1{,}00895$ aatommassi ühikut. Nende masside summa võrdub 2,01708 aatommassi ühikuga.

Vesinikuaatomi ja neutroni ühinemisel tekib deuteeriumiaatom, mille mass on 2,0147 aatommassi ühikut. Seega deuteeriumiaatomi mass on tema koostisosade masside summast 0,00238 aatommassi ühiku võrra väiksem, ehk teisiti öeldes, massidefekt võrdub 0,00238 aatommassi ühikuga. Sellele massidefektile vastava footoni energia on $931 \cdot 0{,}00238 = 2{,}2$ MeV, mida kinnitavad ka katsed. Nagu katsed näitavad, tuleb niisama suur energia kulutada deuteeriumiaatomi lagundamiseks prootoniks ja neutroniks. Seega deuteeriumiaatomi sidemeenergia on 2,2 MeV.

Massidefekt iseloomustab aatomituuma sidemeenergiat. Arvutame heeliumituuma (α-osakese) sidemeenergia. Heeliumituum koosneb kahest prootonist ja kahest neutronist. Nende osakeste masside summa on $2 \cdot 1{,}00813 + 2 \cdot 1{,}00895 = 4{,}03416$ aatommassi ühikut. Kuid heeliumituuma mass on 4,00280 aatommassi ühikut. Seega massidefekt on:

$$\Delta m = 4{,}03416 - 4{,}00280 = 0{,}03 \text{ aatommassi ühikut.}$$

Sellele massile vastab energia 28 MeV, mis kujutabki endast heeliumituuma sidemeenergiat.

Arvutades samal teel liitiumituuma sidemeenergia, saame tulemuseks 39 MeV.

Seda energiat nimetatakse tavaliselt tuumaenergiaks ehk aatomienergiaks.

Kuna tuumajõud on väga suured, siis tuumaprotsessides vabaneb hiiglasuur energiahulk. Näiteks 1 g liitiumi lagunemisel prootonite toimel eraldub 12 500 000 J energiat, mis vastab 8 tunni söe põlemisel vabanevale soojushulgale.

Harjutus.

1. Arvutada energia muutus megaelektronvoltides, mis vastab massi muutusele ühe aatommassi ühiku võrra.

2. Liitiumituuma sidemeenergia on 39 MeV. Arvutada sellele energiale vastav massidefekt.

3. Tuumareaktor. Tuumaenergia kõige tähtsamaks rakendusalaks on selle muundamine elektrienergiaks. Tuumaenergia muundatakse elektrienergiaks aatomielektrijaamades, mille põhiliseks osaks on tuumareaktor.

Tuumareaktoris kasutatakse looduslikku uraani, mitte aga isotoopi $_{92}U^{235}$, mis teatud tingimustes annab plahvatusliku ahelreaktsiooni. Looduslikus uraanis võivad $_{92}U^{235}$ jagunemisel eraldunud neutronid kohata oma teel nii $_{92}U^{235}$ kui ka $_{92}U^{238}$ tuumi.

Nagu uurimused näitasid, jaguneb uraaniisotoop $_{92}U^{235}$ peamiselt aeglaste neutronite toimel. Seejuures eraldub hiiglasuur energiahulk ja vabaneb uusi neutroneid, mis on vajalikud ahelreaktsiooni tekitamiseks. Uraaniisotoop $_{92}U^{238}$ neelab kiireid neutroneid.

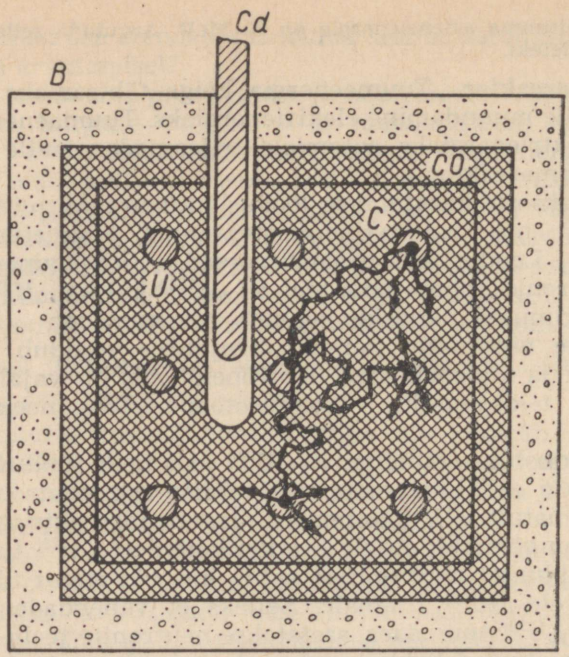
Kuna looduslikus uraanis on $_{92}U^{238}$ aatomeid tunduvalt suuremal arvul kui $_{92}U^{235}$ aatomeid, siis valdav osa neutronitest neeldub paratamatult $_{92}U^{238}$ tuumades. Jagunemisreaktsiooni edasine jätkumine on võimalik ainult siis, kui kõikidest $_{92}U^{235}$ tuuma jagunemisel eraldunud neutronitest satub kas või ainult üks neutron mingile teisele $_{92}U^{235}$ tuumale. Selleks et vähendada neutronite neeldumist $_{92}U^{238}$ tuumades, asetatakse neutronite teele aeglustaja. Neutronid põrkuvad kokku aeglustaja aatomitega ja nende energia väheneb. Neutronite aeglustajaks sobivad kergetest aatomitest koosnevad ained, näiteks süsinik (grafiit), raske vesi ja berüllium.

Grafiitaeglustajaga tuumareaktori skeem on kujutatud joonisel 32.

See reaktor töötab järgmiselt. $_{92}U^{235}$ tuumade jagunemisel eraldub energiat ja lendavad laiali neutronid. Need neutronid põrkuvad kokku süsiniku-(grafiidi-)aatomitega ja nende liikumine aeglustub. Selleks et raskendada neutronite väljalendamist reaktori piiridest, pannakse reaktori aktiivse tsooni ümber neutronite peegeldaja — antud juhul grafiitkest. Pärast korduvaid põrkumisi süsinikutuumadega pöörduvad neutronid reaktori aktiivsesse tsooni tagasi, kohtuvad seal varem või hiljem $_{92}U^{235}$ tuumadega ja kutsuvad esile nende jagunemise.

Teatud tingimustel võib reaktoris tuumareaktsioon kulgeda väga kiiresti. Kui sellist kiiresti kulgevat reaktsiooni ei pidurdata, siis võib juhtuda katastroof. Selle vältimiseks on tuumareaktoris regulaatorid. Regulaatoritena kasutatakse vardaid, mis on valmistatud neutroneid tugevalt neelavatest ainetest (kadmiumist, boorist). Skeemil on kujutatud üks reguleerimisvarras. Tõstes ja langetades neid vardaid, võib reguleerida reaktsiooni kiirust. Ohutuse tagamiseks on olemas veel avariivarras, mis vajaduse korral laskub automaatselt reaktorisse, neelab seal intensiivselt neutroneid ja katkestab ahelreaktsiooni.

$_{92}U^{235}$ tuumade jagunemisel eraldub aatomienergiat ja temperatuur reaktoris tõuseb. Reaktori grafiitplokke jahutatakse veega,



Joon. 32. Tuumareaktori skeem: *U* — uraanvardad, *C* — väga puhas grafiit, *CO* — neutronite peegeldaja, *B* — betoonkaitse radioaktiivse kiirguse eest, *Cd* — kadmiumvarras või varrastesüsteem.

gaasidegga (vesinikuga, heeliumiga) või sulametallidega, näiteks naatriumiga.

Need ained kuumenevad, suunduvad seejärel spetsiaalsetesse seadeldistesse ja annavad seal oma energia veele, mis muutub auruks. Veest tekkinud auru kasutatakse elektrijaamade turbiinides ja teistes seadmetes.

4. Aatomielektrijaam. Aatomienergeetikale pandi alus 27. juunil 1954. a. Nõukogude Liidus esimese 5000 kW-se võimsusega aatomielektrijaama käikulaskmisega. Aatomienergeetika esiklapse ehitamine oli kodumaa teaduse ja tehnika triumf, meie maa teadlaste, inseneride ja tööliste tohutu suure töö tulemus. Käesoleval ajal jätkatakse NSV Liidus tööd aatomielektrijaamade ehitamise alal. Näiteks on lõppemas kahe võimsa aatomikütusel töötava (I. V. Kurtšatovi nimelise Belojarski ja Novo-Voroneži) elektrijaama ehitamine.

NSV Liidu Teaduste Akadeemia esimeses aatomielektrijaamas kasutatakse grafiitaeglustajal töötavat uraanireaktorit, mis on ümbritsetud 1 m paksuse veekihiga ja 3 m paksuse betoonikihiga. Reaktori sees asuvad õhukeseseinalised terastorud (üldpikkusega

7 m), milles voolab destilleeritud vesi. Vee rõhk torustikus on 100 at ja reaktori töötamise ajal soojeneb vesi kuni 260°—270° C (antud rõhul vesi selle temperatuuri juures veel ei kee). Edasi läheb vesi soojusvahetajasse, kus ta annab osa oma siseenergiast ära teise vooluringi veele. Sealt suunatakse ta pumba abil tagasi reaktorisse. Teise vooluringi vesi muutub soojusvahetajas auruks, mis läheb auruturbiini. Turbiin käivitab elektrigeneraatori. Teine vooluring on samuti suletud. Turbiinist läheb aur kondensaatorisse, kus ta muutub veeks. Tekkinud vesi puhastatakse lisanditest ja juhitakse soojusvahetajasse. Erinevate vooluringide vesi liigub soojusvahetajas teineteisele vastupidises suunas.

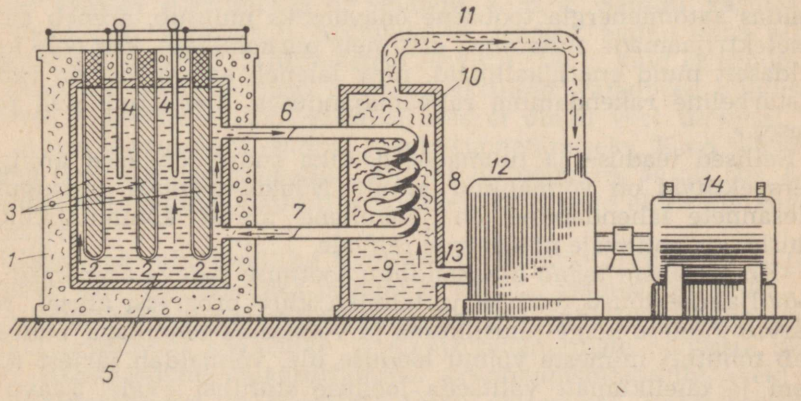
Veevooluringide eraldamine on vajalik sellepärast, et esimeses vooluringis vesi läbib reaktori ja muutub radioaktiivseks. Teise vooluringi vesi ei ole reaktiivne. Seetõttu puudub turbiini ja jaama teiste seadmete juures radioaktiivne kiirgus.

Aurujõuseadmega aatomkatla põhimõtteline skeem on kujutatud joonisel 33.

Jaam kulutab tuumakütusena igas ööpäevas 30 g uraani (niisama suure võimsusega tavaline soojuselektrijaam kulutab ligikaudu 100 t kivisütt ööpäevas). Jaama aurutootlikkus on 40 t ööpäevas ja kasutegur 15—17%.

5. Tuumaenergeetika arenguperspektiivid Nõukogude Liidus NLKP programmis püstitatud ülesannete valgusel. Tänapäeva teadust aatomi ehitusest nimetatakse aatomi- ja tuumafüüsikaks. Aatomifüüsika tegeleb aatomi ehituse küsimustega (elektronkatted, aatomite vastastikune mõju) ja tuumafüüsika — aatomituumade ehitusega ja tuumareaktsioonidega.

Ehkki aatomifüüsika ja tuumafüüsika on noored teadused, on nende avastused juba praegu aluseks erakordselt tähtsatele prak-



Joon. 33. Aatomielektrijaama põhimõtteline skeem: *1* — tuumareaktori betoonkaitse, *2—3* — uraanivardad, *4* — avariivarras, *5* — esimese vooluringi vesi, *6—7* — torustik, *8* — soojusvahetaja, *9* — vesi, *10* — aur teises vooluringis, *11—13* — torustik, *12* — auruturbiin, *14* — elektrigeneraator.

tilistele rakendustele (tuumaenergeetika, radioaktiivsete isotoopide rakendamine jne.). Nende teaduste edasises arengus avanevad kindlasti veelgi laialdasemad perspektiivid.

Tänapäeva aatomi- ja tuumafüüsika edasiarendamisel on suured teened nõukogude teadlastel I. V. Kurtšatovil, L. A. Artsimovitšil, D. V. Skobeltsõnil, S. N. Vernovil, D. D. Ivanenkol jt.

Nõukogude teaduse saavutused võimaldasid meie teadlastel, inseneridel, tehnikutel ja töölistel luua maailma esimene aatomielektrijaam, maailma esimene aatomijäälõhkuja ja saavutada teisi väljapaistvaid edusamme aatomienergia rahuotstarbelise rakendamise alal.

Hiljuti tekkis uus tormiliselt arenev füüsikaharu — elementaarosakeste füüsika. Selle ala seisukohalt on hiiglasuur tähtsus laetud osakeste kiirendajate füüsika ja tehnika edasiarendamisel.

Nagu juba eespool on öeldud, toimuvad Nõukogude Liidus väga suured uurimistööd juhitavate termotuumareaktsioonide valdkonnas. Meie maal on juba loodud esimesed seadmed juhitavate termotuumareaktsioonide tekitamiseks. Selle ülesande edukas lahendamine annab inimkonna käsutusse praktiliselt ammendamatu energiaallika.

Edusammud kiirendajate tehnikas, tuumaenergeetikas ja juhitavate termotuumareaktsioonide tekitamise alal näitavad, et Nõukogude Liidus rakendatakse aatomienergiat üha laialdasemalt rahuliku ülesehitustöö ülisuurte ülesannete lahendamisel ja et me juba lähemal ajal oleme uute, veel suuremate ebatavaliste avastuste tunnistajateks.

Ajaloolisel Nõukogude Liidu Kommunistliku Partei XXII kongressil vastuvõetud NLKP programmis on kõikide teiste ülesannete hulgas, mis seisavad meie rahva ees kommunismi materiaal-tehnilise baasi loomisel, püstitatud järgmine ülesanne: «Sedamööda, kuidas aatomienergia tootmine odavamaks muutub, areneb aatomielektrijaamade ehitamine, eriti neis piirkondades, kus pole küllaldaselt muid energiaallikaid, ning laieneb aatomienergia rahuotstarbeline rakendamine rahvamajanduses, meditsiini alal, teaduses.»

Sellised teaduse ja tuumaenergeetika suurejoonelised arenguperspektiivid on võimalikud ainult Nõukogudemaal, niisuguste ülesannete lahendamine on jõukohane ainult kommunistlikku ühiskonda ehitavale nõukogude rahvale.

«Kommunism tagab ühiskondliku tootmise pideva arenemise ja tööviljakuse tõusu teaduse ja tehnika kiire progressi alusel, rel vastab inimese kõige täiuslikuma ja võimsama tehnikaga, suurendab tohutult inimeste võimu looduse üle, võimaldab järjest ronkem ja täielikumalt valitseda looduse stiihilisi jõude. Saavutatakse kogu ühiskondliku majanduse plaanipärase organiseerimise kõrgeim aste, tagatakse materiaalsete rikkuste ja tööjõuressursside kõige efektiivsem ja ratsionaalsem kasutamine ühiskonnaliikmete kasvavate vajaduste rahuldamiseks.» (NLKP programm.)

FÜÜSIKA JA TEHNILINE PROGRESS

1. Füüsika ja tehnika vastastikune seos. Füüsika etendab tehnika arengus väga tähtsat osa. Tehnikas kasutatakse füüsikute poolt avastatud loodusseadusi. Masinaehituses kasutatakse mehhaanika seadusi, soojustehnikas — soojuslike nähtuste seadusi, elektro- ja raadiotehnikas leiavad rakendamist elektriliste ja magnetiliste nähtuste kohta kehtivad seadused ja tuumatehnikas aatomifüüsika seadused.

Füüsika ja tehnika ajalugu avab sügava seose füüsika ja tehnika vahel.

Füüsikalised avastused on sageli põhjustanud suuri muutusi tehnikas ja on andnud isegi algtõukeid uute tehnikaharude tekkimiseks.

Näiteks Galilei ja Huygensi poolt 17. sajandil avastatud pendli võnkumise seadused kujundasid põhjalikult ümber kellade konstruktsiooni. Atmosfäärirõhu avastamine tõi endaga kaasa esimeste aurumasinate leiutamise. Elektromagnetilise induktsiooni avastamine Faraday poolt viis elektrotehnika tekkimisele. Maxwelli teoreetilisi töid, millest järgnes elektromagnetiliste lainete olemasolu, ja nende lainete eksperimentaalset avastamist Hertzi poolt rakendas A. S. Popov traadita side väljatöötamiseks ja pani sellega aluse raadiotehnikale. Uraanituuma jagunemise avastamine põhjustas tuumafüüsika tekkimist.

Kuid tehnika omakorda esitab füüsikale uusi ülesandeid ja annab füüsikute käsutusse vajalikud tehnilised vahendid üha keerukamate katsete sooritamiseks.

Oli aeg, mil tehnika oli oma arengus füüsikast ette jõudnud. Näiteks inimesed kasutasid kangi, kuid ei tundnud kangi seadust, mille avastas Archimedes 3. sajandil e. m. a. Samuti kasutasid laevaehitajad praktiliselt Archimedese seadust ammu enne selle avastamist. Keskaja prillimeistrid lihvisid läätsi, kuid ei tundnud valguse murdumisseadusi. Seega praktilised vajadused sundisid inimesi rakendama loodusseadusi, mis ei olnud veel tunnetatud, ja andma teadusele ülesannet nende tunnetamiseks. Kuid tehnika areng ilma vastava teadusliku aluseta oli võimalik ainult siis, kui tehnika võis tugineda ainult inimeste praktilistele elulistele kogemustele.

Ühiskonna, ühiskondliku tootmise ja teaduse arenedes muutus tehnika üha keerukamaks ja hakkas vajama teaduslikku alust.

Soojustehnikas ja elektrotehnikas kasutati juba 19. sajandi teisel poolel laialdaselt soojuslike ja elektromagnetiliste nähtuste seadusi aurumasinate, auruturbiinide, sisepõlemismootorite, elektrivoolugeneraatorite ja elektrimootorite ehitamisel. Raadiotehnika ja elektrotehnika vajavad veelgi sügavamaid teaduslikke põhjendusi ja annavad omakorda teadusele uusi ülesandeid.

20. sajandil toimunud avastused füüsikas tõid endaga kaasa nii sügavaid muutusi teaduses ja tehnikas, et tänapäeval räägitakse

teaduse ja tehnika revolutsioonist. Eelkõige kehtib see elektron- ja aatomifüüsika valdkonnas tehtud avastuste kohta. Elektrooniliste nähtuste uurimine tõi endaga kaasa elektronide liikumise seaduste rakendamise elektronlampides, fotoelementides ja elektronkiiretorudes. Need seadmed põhjustasid revolutsiooni raadiotehnikas ja panid aluse automaatikale ja televisioonile. Tootmise automatiseerimine võimaldab tõsta tööstusettevõtete tootlikkust ja kergendab tunduvalt tööliste tööd.

Vaakuum- ja pooljuhtelektroonika areng võimaldas luua uusi masinaid, mis sooritavad keerukaid loogilisi operatsioone ja asendavad mitte ainult inimese käsi, vaid real juhtudel ka aju. Tekkis uus teaduse- ja tehnikaharu — küberneetika.

Avastused aatomi- ja tuumafüüsika valdkonnas tõid endaga kaasa tuumaenergia praktilise kasutamise. 1954. a. Nõukogude Liidus ehitatud maailma esimene aatomielektrijaam avas aatomienergia rahueesmärkideks kasutamise ajastu. Tänapäeval on päevakorda tõusnud küsimus, kuidas tekitada juhitavaid termotuumareaktsioone ja kasutada neid rahuotstarbeks.

«Juhitavad termotuumareaktsioonid,» rääkis NLKP XXII kongressil väljapaistev nõukogude füüsik akadeemik I. V. Kurtšatov, «peavad võimaldama energiat saada mitte haruldaste elementide uraani ja tooriumi aatomituumades peituvate energiavarude arvel, vaid heeliumi tekkimise arvel looduses laialdaselt levinud ainest — vesinikust.»

«Selle raskeima ja suurejooneliseima ülesande lahendamine vabastaks inimese alatiseks murest energiavarude pärast, mis on vajalikud tema olemasoluks Maal.»

Juhitavate termotuumareaktsioonide probleemi lahendamist loetakse NLKP XXII kongressil vastuvõetud NLKP programmis teaduse üheks tähtsamaks ülesandeks.

Alles hiljuti tekkis uus raadiofüüsika- ja raadiotehnikaharu — kvantraadiotehnika. Kasutades nn. kvantseadusi, millele allub elektronide ja aatomite liikumine, konstrueerisid selle uue teadusharu loojad kvantgeneraatorid ja -võimendajad. Nende seadmetega saab tekitada kitsaid raadio- ja valguslainete kimpe, mille abil võib energiat üle kanda praktiliselt kuitahes suurtele kaugustele.

Aatomite ja molekulide käitumist juhtivate seaduste tundmine võimaldas kunstlikult saada etteantud omadustega uusi materjale. Tänapäeval osatakse kunstlikult valmistada isegi teemanti. Füüsika ja keemia seadusi rakendades võib saada isegi selliseid materjale, mida senini veel ei olnud looduses olemas. Kunstlikud sünteetilised materjalid asendavad metalli, villa, puuvillriiet ja looduslikke ehitusmaterjale.

Füüsika ja keemia saavutused võimaldasid lahendada ülitähtsa teaduslik-tehnilise ülesande: võimaldasid inimesel alustada kosmose vallutamist.

2. NLKP programmis püstitatud ülesanded nõukogude füüsikutele. Teaduse saavutuste rakendamine mitmesugustel tehnikaaladel avab ülisuured võimalused majanduse ja kultuuri arenguks. Seetõttu omistabki meie partei suurt tähtsust teaduse edasiarendamisele. NLKP programmis on kirjutatud:

«Partei soodustab igati teaduse osatähtsuse edasist kasvu kommunistliku ühiskonna ehitamisel, ergutab uurimistöid, mis avavad uusi võimalusi tootlike jõudude arendamiseks, uusimate teaduse ja tehnika saavutuste laialdast ja kiiret praktikasse rakendamist, eksperimentaaltööde, sealhulgas vahetult tootmises toimuvate eksperimentaaltööde taseme resoluutset tõstmist, teaduslik-tehnilise informatsiooni, kogu kodu- ja välismaiste eesrindlike kogemuste tundmaõppimise ja levitamise süsteemi eeskujulikku korraldamist. Teadus muutub täiel määral otseseks tootlikuks jõuks.»

Omistades teaduse arendamisele suurt tähtsust, esitab partei oma programmis teadusele sellised tähtsad ülesanded: «... ühtse energiasüsteemi teaduslike aluste väljatöötamine, uute energiaallikate avastamine, selliste meetodite avastamine, mille abil saab soojus-, tuuma-, päikese- ja keemilist energiat otseselt muundada elektrienergiaks, ning termotuumareaktsioonide juhtimise probleemi lahendamine; uute masinate ning automaat- ja telemehhaanikasüsteemide loomise teooria ja põhimõtete väljatöötamine, raadioelektroonika intensiivne arendamine, arvutus-, juhtimis- ja informatsioonimasinate teoreetiliste aluste väljatöötamine ja tehniline täiustamine.»

Nende ülesannete lahendamisel kuulub oluline osa füüsikale, mis on sügavalt tunginud tänapäeva tehnikasse.

Üheks tähtsaks füüsika omaduseks on tema laialdane rakendatavus mitmesugustel teadusaladel. Tänapäeva füüsika võtab aktiivselt osa ka selliste keerukate probleemide lahendamisest, nagu elu olemuse kindlakstegemine ja eluprotsesside juhtimise meetodite leidmine. NLKP programm esitab bioloogiateadustele järgmised peamised ülesanded:

«Inimkonna huvid seavad nende teaduste ette peamiste ülesannetena elunähtuste olemuse kindlakstegemise, orgaanilise maailma avastamise, elusorganismide füüsika ja keemia uurimise, mitmesuguste meetodite väljatöötamise eluprotsesside (sealhulgas ainevahetuse), organismide pärilikkuse ja suunatava muutumise juhtimiseks.»

Nende ülesannete lahendamisel on ülisuur tähtsus füüsikal. On tekkinud uus edukalt arenev füüsikaharu — biofüüsika.

Meie ajastu on kosmose vallutamise ajastu. Maa tehiskaaslaste loomine Nõukogude Liidus avas uue etapi inimühiskonna ajaloos.

NLKP programmis on öeldud: «Suuri võimalusi uute loodusnähtuste ja -seaduste avastamiseks, planeetide ja Päikese uurimiseks lõid Maa tehiskaaslased ja kosmoseraketid, mis on võimaldanud inimesel tungida kosmosesse.»

Nende võimaluste realiseerimine avab teadusele ja inimkonnale uued, laialdased perspektiivid.

Tänapäeval, teaduse ja tehnika tormilise arengu ajastul, kõlavad erilise jõuga inimkonna geeniuse V. I. Lenini ettenägelikud sõnad:

«Inimmõistus on avastanud palju looduseimesid ja avastab neid üha enam, suurendades sellega oma võimu looduse üle.»

VASTUSEID.

§ 5. 2. $g^{\frac{1}{2}}\ cm^{\frac{3}{2}}\ s^{-1}$. 3. ± 10 *LÜ*. 4. 4 *dn*. 5. 11 *cm*. 6. $ab = \frac{1}{2}bc$; $x = ac$. 7. $6{,}7 \times 10^{-2}$ *LÜ*.

§ 6. 2. 0,19 *LÜ* cm^2 kohta. 3. $1{,}05 \times 10^{-7}$ *C*.

§ 10. 1. $g^{\frac{1}{2}}\ cm^{-\frac{1}{2}}\ s^{-1}$. 3. 0,2. 4. 250. 5. 1000 *dn*. 6. 0,75; 0,71 (mõlemat laengut ühendava sirglõigu keskristsirge punktis). 7. $1{,}8 \times 10^{-3}$.

§ 18. 1. $g^{\frac{1}{2}}\ cm^{\frac{1}{2}}\ s^{-1}$. 2. 400 ergi. 3. 30 V. 4. 500 *LÜ*. 5. 10^6 *LÜ*. 6. 9,8 *V*. 7. $\approx$ 1400 *V*. 8. $1{,}61 \times 10^{-12}$ *ergi*; $5{,}8 \times 10^7 \frac{\text{cm}}{\text{s}}$.

§ 23. 4. 180 *cm*. 5. $C = r\,\frac{\varphi_1}{\varphi - \varphi_1}$. 6. $\varepsilon = \frac{U - U_1}{U_1}$. 7. $\approx$ 50 LÜ.

§ 42. 3. $0{,}017\,\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$. 4. $0{,}94\,\frac{\Omega \cdot mm^2}{m}$. 6. 4-st *m*-st kuni 5 *m*-ni. 7. 99,98 Ω. 8. 1445 *kg*.

§ 45. 2. 82,5Ω; 1,2 *A*. 3. 2 *A*; 4,8 *A*. 4. 1,05Ω; 5,25 *V*; 1,31 *A*; 1,05 *A*; 2,63 *A*. 5. 0,5Ω; 0,45Ω. 6. 5 *A*.

§ 52. 1. 0,06 *A*. 2. 25 *A*; 122,5 *V*. 3. r = R.

§ 53. 1. 0,97 *A*; 0,64 *A*.

§ 78. 1. $\approx 0{,}08\,\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$. 2. 4 *dn*. 3. $\approx$ 1 *A*.

§ 134. 2. 1,16 *m*. 3. 156 küünalt. 4. 50 000 luksi.

§ 149. 2. 1,14. 3. 1,33. 4. $1{,}25 \cdot 10^{10}\,\frac{cm}{s}$. 6. 40, 5°. 7. 1,53 *cm*. 8. 5,32 *cm* plaadi esipinnalt.

§ 156. 5. 10 dioptriat; —10 dioptriat. 6. 12,5 *cm*. 7. 11 *cm*; 22,5 *cm*. 8. 18 *cm*. 9. 36 *cm*.

§ 168. 1. 32 *cm*. 2. 2,5 korda. 3. 200 korda. 4. 200 korda.

SISUKORD

I OSA

ELEKTER.

1. Õpetus elektrinähtustest ja selle tähtsus tänapäeva teaduses ja tehnikas 3

I peatükk. **Elektrilaengud ja elektriväli.**

2. Kehade elektriseerimine. Elektrilaeng 5
3. Elektriväli 6
4. Coulomb'i seadus 8
5. Elektrilaengu ühikud 9
6. Laengu jaotumine juhi pinnal 10
7. Elektroniteooria 12
8. Elektrivälja tugevus 13
9. Elektriväljade graafiline kujutamine 15
10. Homogeenne väli 17
11. Juhid elektriväljas 18
12. Dielektrikud elektriväljas 20
13. Elektriline läbitavus 21
14. Töö elektriväljas 22
15. Potentsiaal ja potentsiaalide vahe 24
16. Potentsiaali- ja potentsiaalide vahe ühikud 26
17. Potentsiaalide vahe seos väljatugevusega 27
18. Laengute tasakaalu tingimus juhtides 27
19. Elektromeeter 28
20. Elektrimahtuvus 29
21. Elektrimahtuvuse ühikud 31
22. Kondensaator 32
23. Plaatkondensaatori elektrimahtuvuse sõltuvus tema mõõtmeist ja dielektrikute liigist 34
24. Kondensaatorite liike 36

II peatükk. **Alalisvool.**

25. Elektrivoolu tekkimise ja olemasolu tingimused 39
26. Alalisvool. Voolu suund. Voolu toime 41
27. Voolu tugevuse mõõtmine. Voolu tugevuse ühikud 42
28. Elektrivool metallides 43
29 Elektronide liikumine metallis ja nende väljumistöö 44
30. Elektrivool vaakuumis 45
31. Elektrivoolu olemus elektrolüüdis 46
32. Elektrivoolu olemus gaasis 49
33. Vooluallika elektromotoorne jõud 50
34. Galvaani element 51
35. Elemendi polarisatsioon. Leklanšee element 53
36. Akumulaator 54
37. Ohmi seadus vooluringi osa kohta 56
38. Pinge ja pingelangus 58

39. Takistuse ühik 59
40. Takistusmagasin 59
41. Takistuse sõltuvus juhi materjalist ja mõõtmetest 60
42. Juhi takistuse sõltuvus temperatuurist 62
43. Juhtide järjestikune ühendus 64
44. Juhtide paralleelne ühendus 65
45. Vooluringi arvutus 68
46. Mõõduriistade šuntimine 71
47. Voltmeeter 74
48. Eeltakistus voltmeetrile 75
49. Juhtide takistuse määramine ampermeetri ja voltmeetri abil . . 77
50. Ohmi seadus kogu vooluringi kohta 78
51. Vooluallika elektromotoorne jõud ja klemmide pinge 80
52. Lühiühendus 82
53. Elementide ühendamine patareiks 83
54. Alalisvoolu töö ja võimsus 85
55. Joule'i-Lenzi seadus 87
56. Elektriliini juhtmete ristlõike pindala valik 89
57. Metallide elektrikeevitus 91
58. Termoelektrivool 92
59. Elektrolüüs. Faraday esimene seadus 95
60. Faraday teine seadus 96
61. Faraday arv 99
62 Iooni laeng 100
63. Näiteid elektrolüüsi kasutamisest tehnikas 101
64. Elektrivool gaasis 105
65. Gaaside tõukeionisatsioon 106
66. Mitmesuguseid lahenduste liike gaasides 108
67. Jablotškovi küünal 111
68. Elektrisädeme rakendamine metallide töötlemisel 112
69. Vool hõrendatud gaasis 115
70. Katoodkiired 116
71. Katoodkiirte olemus 117

III peatükk. **Magnetväli ja elektromagnetiline induktsioon.**

72. Magnetväli 121
73. Magnetvälja suund 123
74. Sirgvoolu magnetväli 124
75. Ringvoolu magnetväli 125
76. Vooluga pooli magnetväli 126
77. Magnetvälja mõju vooluga juhile 127
78. Magnetvälja tugevus 129
79. Raua magneetumine 131
80. Magnetvälja tihedus. Magnetvoog 133
81. Elektromagnetid ja nende kasutamine 134
82. Elektromagnetiline relee 135
83. Elektrimõõduriistad 137
84. Elektromagnetiline ostsillograaf 139
85. Mikrofon ja telefon 140
86. Valjuhääldaja 141
87. Maa magnetväli 142
88. Elektromagnetiline induktsioon 144
89. Indutseeritud *EMJ* tekkimise selgitamine elektroniteooria põhjal . 147
90. Indutseeritud elektromotoorse jõu suurus 148
91. Induktsioonvoolu suund. Lenzi seadus 150
92. Parema käe reegel 152
93. Pöörisvoolud 153
94. Omainduktsioon 154
95. Pooli induktiivsus 156

IV peatükk. **Vahelduvvool.**

96. Vahelduvvoolu saamine 158
97. Vahelduvvoolu generaator 160
98. Vahelduvvoolu tugevus. Voolu tugevuse ja pinge efektiivväärtus 163
99. Vahelduvvooluringi induktiivsus ja mahtuvus 164
100. Kolmefaasiline vool 168
101. Tähtlülitus 170
102. Kolmnurk-lülitus 171
103. Asünkroonmootor 172
104. Kahe elektroodiga elektrontoru 174
104a. Vahelduvvoolu alaldajate ehitus 176
105. Alalisvoolu generaator 179
106. Elektrienergia ülekanne 182
107. Transformaator 183
108. NSV Liidu elektrifitseerimine 186

V peatükk. **Elektromagnetilised võnkumised ja lained.**

109. Raadio leiutamine A. S. Popovi poolt 191
110. Võnkering. Elektromagnetilised võnkumised 192
111. Elektromagnetilised omavõnkumised. Periood ja sagedus . . 195
112. Sumbuv elektromagnetiline võnkumine 196
113. Kolme elektroodiga elektrontoru 197
114. Sumbumatute elektromagnetiliste võngete saamine 198
115. Sundvõnkumised. Resonants 199
116. Elektromagnetiline väli 202
117. Elektromagnetilised lained 204
118. Elektromagnetiliste lainete kiirgumine ja vastuvõtt 205
119. A. S. Popovi raadiosaatja ja vastuvõtja 207
120. Moduleeritud võnked 209
121. Detekteerimine. Detektoriga vastuvõtja 210
122. Lihtsaim lampvastuvõtja 211
123. Elektrontoru elektromagnetiliste võngete võimendajana . . . 212
124. Elektronkiiretoru 213
125. Raadiolokatsioon 215

II OSA

OPTIKA. AATOMI EHITUS.

VI peatükk. **Valguse levimine.**

126. Sissejuhatus. Valgusallikad 218
127. Valguse sirgjoonelise levimise seadus 219
128. Valguse kiirus 221
129. Valgusvoog. Punktikujuline valgusallikas 222
130. Valgustugevus 223
131. Valgustustugevus 223
132. Valgustustehniliste suuruste ühikud 224
133. Valgustustugevuse seadused 225
134. Kahe valgusallika valgustugevuse võrdlemine 226

VII peatükk. **Valguse peegeldumine ja murdumine.**

135. Valguskiir. Valguskiirte kimp 229
136. Nähtused, mis toimuvad valguse langemisel kehale 230
137. Valguse peegeldumisseadused 230
138. Difuusne peegeldumine ja peegeldumine peegelpinnalt . . . 231
139. Tasapeegel 231
140. Sfääriline nõguspeegel 232

141. Sfäärilise nõguspeegli fookus 233
142. Kujutise konstrueerimine nõguspeeglis 235
143. Nõguspeeglite kasutamine 236
144. Kumerpeegel 237
145. Valguse murdumisseadused 237
146. Täielik sisepeegeldus 240
147. Valgusvoo muutumine peegeldumisel ja murdumisel 241
148. Valguse läbiminek paralleelsete tahkudega läbipaistvast plaadist 242
149. Valguse läbiminek kolmetahulisest läbipaistvast prismast . . 242
150. Läätsed 244
151. Läätse fookus 246
152. Läätse optiline tugevus 247
153. Punkti kujutis koondavas läätses 248
154. Esemete kujutis koondavas läätses 249
155. Läätse valem 250
156. Kaksiknõgus lääts 252

VIII peatükk. **Optilised riistad. Nägemine.**

157. Fotoaparaat 255
158. Projektsiooniaparaadid 256
159. Silm 258
160. Nägemine 258
161. Nägemisdefektid. Prillid 259
162. Kahe silmaga nägemine 260
163. Nägemismulje kestus. Kino 260
164. Optilised riistad 261
165. Luup 261
166. Mikroskoop 262
167. Refraktor 263
168. Pikksilm. Binokkel 264

IX peatükk. **Valguse lainelised omadused.**

169. Lainete interferents 266
170. Valguse interferents 268
171. Lainete difraktsioon 269
172. Valguse difraktsioon 271
173. Valguse dispersioon. Newtoni katsed 273
174. Lainepikkus ja kiirte värvus 274
175. Spektrograaf ja spektroskoop 275
176. Kiirgusspektrid 276
177. Neeldumisspektrid 277
178. Spektraalanalüüs 278
179. Päikese spekter 278
180. Infrapunased ja ultravioletsed kiired 279
181. Röntgenikiired 280
182. Valguse elektromagnetiline loomus 283

X peatükk. **Valguse toime.**

183. Fotoefekt 284
184. Valguskvandi mõiste 286
185. Fotoelemendid 287
186. Fotorelee 288
187. Heli üleskirjutamine ja reprodutseerimine 290
188. Luminestsents 291
189. Külmhelenduse elektrilambid 293
190. Valguse keemiline mõju 293
191. Valguse rõhk 295

192. Aatomi keerulist ehitust tõestavaid nähtusi 299
193. Radioaktiivse kiirguse liigid 300
194. Osakeste uurimise eksperimentaalsed meetodid 301
195. Aatomi ehitus 304
196. Aatomiteooria areng. Elektromagnetiliste lainete neelamine ja kiirgamine aatomite poolt 307
197. Isotoobid 308
198. Massiarv. Tuumade tähistamine 309
199. Elementide kunstlik muundumine 309
200. Neutron 313
201. Aatomi tuumade ehitus. Tuumasisene energia 314
202. Uraani tuuma jagunemine. Tuuma ahelreaktsioon 315
202a. Termotuumareaktsioonid 318
203. Aatomienergia praktilise kasutamise perspektiivid 320
203a. Kunstlik radioaktiivsus 320
203b. Radioaktiivsete elementide kasutamine 321
204. Osakeste vastastikune muundumine 324
Lisa 325

Пёрышкин Александр Васильевич
ФИЗИКА
Учебник для средней школы
(часть II)
На эстонском языке
Обложка П. Рээвээра
Издательство «Ээсти Раамат»
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

*

Toimetaja E. Randma
Kunstiline toimetaja H. Keigo
Tehniline toimetaja P. Kass
Korrektor Ö. Kajando

Ladumisele antud 2. XII 1964. Trükkimisele antud 29. XII 1964. Paber 60×90, 1/16. Trükipoognaid 23,5 + 1 lisa. Arvestuspoognaid 23,97. Trükiarv 5000. Tellimise nr. 8991.
Trükikoda «Kommunist», Tallinn, Pikk tn. 2.

Hind 41 kop.

6—6

A-2637

41 kop.

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00480772 5