E. MALTENEK JA M. KESKÜLA

# FÜÜSIKA

## ÕPERAAMAT KESKKOOLILE

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

TALLINNA EESTI KIRJASTUSE-ÜHISUSE KIRJASTUS

4-134

# FÜÜSIKA

## ÕPERAAMAT KESKKOOLILE

### KOLMAS KÖIDE

MAGNETISM JA ELEKTER

3237

TALLINNA EESTI KIRJASTUSE-ÜHISUSE TRÜKIKODA, PIKK TÄN. 2

191 II
386

Tallinna Eesti Kirjastuse-Ühisuse trükikoda, Pikk tän. 2.

2
Tartu Riikliku Ülikooli
Raamatukogu
57662
A-3.575 I
N 15436196

## Kuues jagu:

# Magnetism ja elekter.

### Peatükk I:

## Magnetism.

§ 1. **Loomulik magnet.** Juba vanal ajal oli teada, et mõned rauaärtsid terast ja rauda külge tõmbavad. Seesugust ärtsi nimetati magnetiks, — arvatavasti Väike-Aasias asuva linna Magneesia järele, mille ümbruses teda kõige esiti olla leitud.

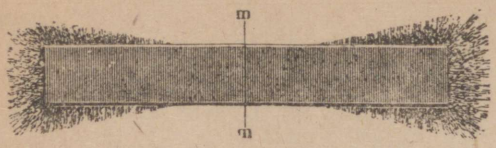
Kui niisugune ärtsitükk, n. n. loomulik magnet, raudviilipurru kasta, siis tõmbuvad viilipuru kübemed tema külge ja jäävad pikkade niitidena magneti külge rippuma. Selle külgetõmbumise põhjust hüütakse magnetismiks. Magnetism avaldub meile ainult nende kehade kaudu, mille peale ta mõjub, sest et inimesel meel puudub, millega ta magnetismi otsekohe võiks tunda. Sellepärast paistavad magnetismi avaldused arusaamatutena, nii et meie tänapäevani kindlasti ei tea, mis magnetism õieti on. Tähtsamate hüpoteesidega magnetismi loomu kohta tutvuneme edaspidi.

Magnet-rauaärts ($Fe_3 O_4$) kristalliseerub korralikkudena oktaeedritena. Teda leitakse Rootsis, Chiles jne. kristallise massina, mis sügavast maapinnast võetuna tihti ainult nõrgalt magnetiline on ja mis alles peale selle, kui ta mõni aeg maapinnal õhu käes seisnud, tugevamalt magnetiseerub.

§ 2. **Kunstlik magnet; tema poolused ja telg.** Kui teras- või rauatükk loomuliku magneti lähedusse asetada, siis omandab ka tema võime rauda ning terast külge tõmmata: Teras ja raud moondub loomuliku magneti läheduses ise magnetiks. Pehme raud kaotab kõik omad magnetilised omadused niipea kui teda loomulikust magnetist eemaldada; teras selle vastu hoiab nad jäädavalt alles ja jääb seega kunstlikuks magnetiks, mille magnetism avaldub täpipealt samuti kui loomuliku magneti oma. Kunstlikkudele magnetitele antakse harilikult prismalise varva või hobuseraua kuju; tihti tarvitatakse ka nõelasarnast magnetit — n. n. magnetnõela (joon. 3).

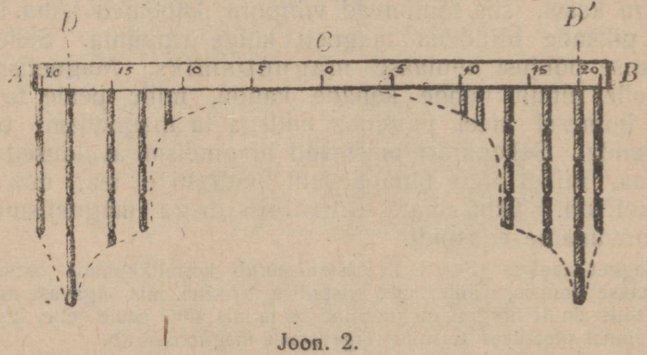
Magnetvarva raudviilipurru kastmisel torkab silma, et viilipuru magneti kogu pinna külge mitte ühepaksuselt ei jää: kõige rohkem hoidub teda magneti otsade küljes, kuna ta magneti

keskkohas täiesti puudub (joon. 1). Sellest järgneb, et magneti külgetõmbevõime peaasjalikult tema otsadesse on koondatud. Magneti keskkohas ei avaldu magnetism üleüldse mitte. Neid punkte, millesse magneti tõmbejõud näib koondatud olevat, hüütakse magneti poolusteks; ühendusjoont magneti mõlemas otsas asuva pooluse vahel nimetatakse magneti teljeks, ning keskmist piirkonda, milles külgetõmbumine üleüldse ei avaldu, — magneti neutraalpiirkonnaks ehk neutraaljooneks.



Joon. 1.

Tõmbejõu suuruse muutumist piki magnetvarba näitab ülevaatlikult järgmine katse: märgime antud magnetvarvale AB sentimeeterskaala, nullpunktiga magneti neutraaljoonel C (joon. 2); asetame magneti horisontaalseisu ning riputame tema külge lühikesi raudtraadi otsi, nii et nad kettidena magneti küljes hoiduksid. Otsustades külgetõmbejõu suuruse üle nende kettide pikkuse kaudu, mida magnet oma pinna mitmesugustes punktides kanda



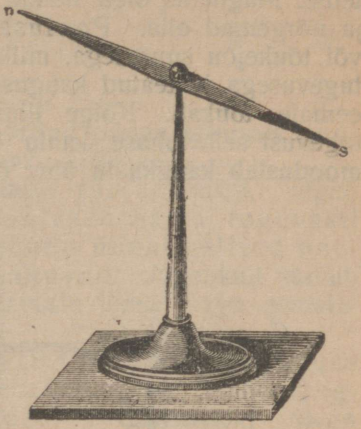
Joon. 2.

suudab, kujutab kettide otsi ühendav kõverjoon nimetatud jõu jagunemist piki magnetit. Selgub, et magneti jõud on kõige suurem tema otsade läheduses, punktides D ja D', mis asuvad vähe sisepool magneti otspindu. Samades punktides asuvad järjelikult ka magneti poolused.

§ 3. **Põhja- ja lõunapoolus; kompass.** 1) Kui magnetnõel ns (joon. 3) keskpaigaga teraviku otsa asetada, nii et ta horisontaalpinnas vabalt võib pöörduda, siis asendub nõel alati nii, et tema üks ots põhja ja teine lõunasse näitab. Tõukame nõela nimetatud põhja-lõuna sihist kõrvale, siis asendub ta mõne kõikumise järele uuesti samma sihti.

Sellest selgub, et magnetnõela mõlemad otsad — nii siis ka tema poolused mitte ühesugused ei ole, sest põhja poole

pöördub igal juhusel ikka ainult üks ja sama ots, — ei iialgi teine. Magnetnõela seda otsa mis põhja poole näitab, hüütakse tema põhjapooluseks (N), lõunasse sihitud otsa aga — lõunapooluseks (S).



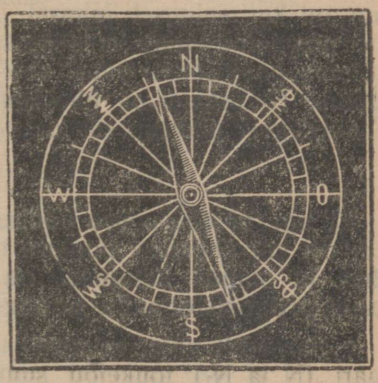

Joon. 3.

Arusaadavalt võib kirjeldatud katseks nõela asemel tarvitada ka magnetvarba, kui viimane aga nii on asetatud, et ta horisontaalpinnas vabalt pöörduda võib. Järjelikult on igal magnetil kaks isesugust poolust: põhjapoolus (N), mis alati põhja, ja lõunapoolus (S), mis alati lõunasse pöördub.

2) Lähendame magnetnõelale (joon. 3) teise samasuguse nõela, siis näeme, et nõelte ühenimelised poolused eemale tõukuvad, kuna nende isenimelised poolused külge tõmbuvad. Nõelale mingi teise magnetvarva N-pooluse lähendamisel tõukub nõela n-poolus sellest eemale, kuna tema s-poolus külge tõmbub jne. Sellest järgneb seadus: **Magnetite ühenimelised poolused tõukuvad üksteisest eemale, nende isenimelised poolused aga tõmbuvad vastastikku külge.**

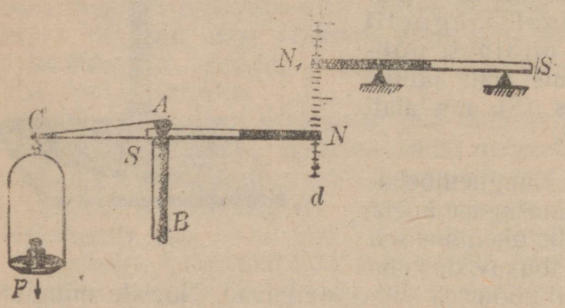
Selle seaduse põhjal on magnetnõelaga kerge ära määrata iga teise magneti poolusi; selleks lähendame nõelale tundmata pooluse ning vaatame, missugune nõelaots temast eemale tõukub: on see nõela n-ots, siis on tundmata poolus põhjapoolus.

3) **Kompassiks** hüütakse riista, mille abil käepäraselt määrata võib ilmakaarte sihti ja mis sellepärast iseäranis laevasõidul tähtsat osa etendab. Kõige lihtsamas kujus moodustab kompassi väike magnetnõel, mis sellekohases karbikeses teraviku otsa asetatult vabalt võib pöörduda. Karbi põhja on märgitud nurgakraadid ning neile vastavad ilmakaared (joon. 4). Pöörame horisontaalselt hoitud karbi nii, et nõela põhjapoolus seisaks jaotusel N, siis näitavad teised jaotuskriipsud nendele märgitud ilmakaarte sihti.




Joon. 4.

§ 4. **Pooluse tugevus; Coulombi seadus.** 1) Me teame, et üks magnet suudab suuremat koormat enese küljes hoida kui teine. Magnetid, õieti nende poolused võivad nii siis tugevamad ja nõrgemad olla. Pooluse tugevust võib mõõta selle tõmbe- või tõukejõu suurusega, millega antud poolus mingit teist tuntud tugevusega ja teatud kaugusel seisvat poolust külge tõmbab või eemale tõukab. Kõige lihtsamalt võib võrrelda kahe pooluse tugevust sellekohase kaalu (joon. 5) abil: pikk magnetvarb NS moodustab kangkaalu ühte õlga, teise — hariliku õla (AC) otsas ripub vaekauss P. Seame kangi CN tasakaalu ja asetame pooluse N lähedale teise magnetvarva pooluse $N_1$: Mõlemad tõukuvad üks-teisest eemale ning tasakaal hävineb. Vaekausile pandud lisakoorma P abil tasakaalustame kaalud uuesti. Nüüd seisavad poolused N ja $N_1$ endisel kaugusel, mille suurust täpipealt ära võib lugeda pooluste taha kinnitatud sentimeeterskaalalt cd. Pooluste N ja $N_1$ tõukejõudu tasakaalustab lisakoorma P raskusjõud; seega võrduvad mõlemad jõud ning P annab pooluste tõukejõu f suuruse grammides.



Joon. 5.

Asetame $N_1 S_1$ asemele kaks samasugust magnetit, siis näitab kaalumine, et ka tõukejõud on 2 korda suurem (2 f), tingimusel et kaugus pooluste $N_1$ ja kaalukangi pooluse N vahel sama suur on kui eelmisel juhusel. Asetaksime ka kangi õla külge ühe magneti asemele kaks samasuurt magnetit, siis oleks tõukejõud mõlema pooluspaari vahel veel 2 korda suurem (4 f) jne. Seisab pooluse $N_1$ asemel $m_1$ ühesugust poolust ning pooluse N asemel m ühesugust poolust, siis on tõukejõud

$$F = m.\ m_1.\ f.$$

Et aga m ühesuguse pooluse tugevus kokku m korda suurem on kui üheainsa pooluse tugevus, siis ütleb katse resultaat, et **ühel ja samal kaugusel on tõukejõud magnetite pooluste vahel proportsionaalne pooluste tugevuste kasvatisega ($m.m_1$).**

Sarnaselt nagu eelmisel juhusel leiame nüüd antud pooluspaari (N ja $N_1$) tõukejõu suuruse pooluste mitmesugusel kaugusel üks-teisest. Oli tõukejõud N ja $N_1$ vahel kaugusel 1 cm f grammi, siis leiame katsest, et

kaugusel 2 cm on tõukejõud samade pooluste vahel $\frac{1}{4}f = \frac{1}{2^2}f$

„ 3 cm „ „ „ „ „ $\frac{1}{9}f = \frac{1}{3^2}f$

„ r cm „ „ „ „ „ $\frac{1}{r^2}f$

seega **kahaneb tõukejõud ümberpöördud proportsioonis pooluste kauguse kvadraadiga** (Coulomb, 1785—89).

Mõõtes samal viisil magnetpooluste tõmbejõudu, selgub et kahe magneti isenimelised poolused sama tugevasti külge tõmbuvad. kui tugevasti nende ühenimelised poolused samal kaugusel eemale tõukuvad. Järjelikult sünnib pooluste külgetõmbumine samade seaduste järele nagu eemaletõukuminegi.

2) Poolustugevuse üksusena tarvitatakse seesuguse magnetpooluse tugevust, mis samasuguse teise magneti poolust 1 sentimeetri kaugusel 1 düünilise jõuga külgetõmbab või eemaletõukab. Niisugust poolust hüütakse ka üksuspooluseks. Ülevalleitud seaduste põhjal tõmbuvad 2 poolust, mille tugevused on m ja $m_1$ üksust, kaugusel r cm üks-teisest seistes külge jõuga

$$F = \frac{m.m_1}{r^2} \text{ düüni} \qquad 1)$$

Selles formulis sisalduvadki mõlemad eelpoolleitud seadused, mis tuntud ühise nimetuse all Coulombi seadus.

Poolustugevuse nimetus tuletab formulist (1):

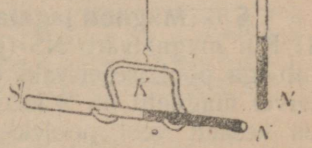
$$m.m_1 = Fr^2, \text{ s. t.}$$

poolustugevus × poolustugevus = jõud × (pikkus)²

Absoluutses mõõdusüsteemis on düüni nimetus $CGS^{-2}$ (II, § $18_5$). Seega on

$$\text{poolustugevus} = \sqrt{\text{düün} \times (\text{pikkus})^2} = \sqrt{CGS^{-2} \times C^2} = C^{\frac{3}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}.$$

3) Coulomb leidis oma seaduse tema konstrueeritud keerdkaalu abil (skeem, joon. 6): Silindrilise klaasnõu (joon. 33) kaane peal seisab toru T. Viimase kaanel on ringskaala A. Läbi kaane läheb pööratava nupu B ots, mille külge on kinnitatud ülipeenike traat C (joon. 6); traadi otsas ripub magnetit NS hoidev konks K. Nuppu B pöördakse nii, et magnet NS põhja-lõuna sihis hoidub, ilma et traat selle juures keerus oleks. Teise magneti $N_1S_1$ poolusе $N_1$ lähendamisega poolusele N, pöördub NS horisontaalpinnas teatava nurga võrra omast põhja-lõuna sihist. Et teda algsihti uuesti tagasi pöörda, tuleb nupu B-ga traat vähe keerdu keerata. Traadi elastsusjõud tasakaalustab pooluste N ja $N_1$ tõukejõudu, kui NS omas esialgses sihis hoidub. Tundes traadi elastsusjõudu, tunneme järjelikult ka pooluste tõukejõudu. Elastsusjõu suuruse leiame arvestuse teel traadi dimensioonidest, kui tuntud on tema keerdumisnurga suurus, sest Hooke seaduse järele (II § $57_3$) on

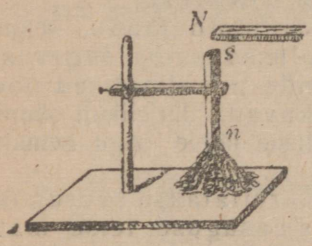


Joon. 6.

elastsusjõud proportsionaalne keerdumisnurgaga. Viimase suurust aga võib otsekohe ära lugeda nupu B külge kinnitatud näitaja abil, mis ringskaala A peal ühes nupuga pöördub. Pooluste N ja $N_1$ kauguse täpipealseks mõõtmiseks on silindrinõu klaasseinale märgitud sentimeeterskaala (vaata joon. 33).

Arusaadavalt võib kõigil kirjeldatud katsetel ainult pikke magnetid tarvitada, sest vastasel korral muudaks magneti teine poolus mõõdetava tõmbe- või tõukejõu suurust.

§ 5. **Magnetiline induktsioon.** Lähendame statiivi külge kinnitatud raudvarva ns (joon. 7) ülemisele otsale magneti põhjapooluse N: Me näeme, et raudvarva alumise otsa külge viilipuru tõmbub nagu oleks varb ns ise magnet. Magnetpoolus teeb nii siis tema läheduses asuva raua ka magnetiks, — me ütleme, et magnet indutseerib rauas magnetismi. Kui magnetnõelaga katsuda, siis selgub, et raudvarva ülemine ots on magnetiliseks lõunapooluseks (s) ja tema alumine ots põhjapooluseks (n) muutunud.



Joon. 7.

Sellest järgneb seadus: **magnetpooluse N lähendamisel indutseerub antud raudvarva lähemas otsas (s) indutseeriva poolusega isenimeline ja varva kaugemas otsas (n) samanimeline magnetpoolus.**

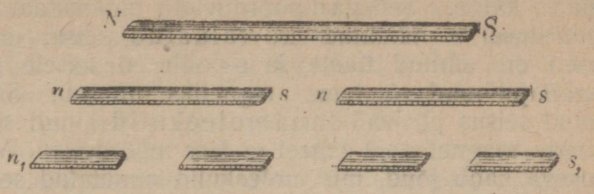
Induktsiooniga seletub, miks magneti mõlemad poolused rauda külge tõmbavad ja miks ükski nendest teda eemale ei tõuka: magnetile lähemas rauaotsas indutseerub alati isenimeline poolus, mis lähendatud magnetpooluse külge tõmbub. Teadagi indutseerub selle juures raua kaugemas otsas samanimeline poolus, mis lähendatud magnetpoolusest eemale tõukub. Et aga pooluste vastastikune mõju seda väiksem on, mida kaugemal nad üks-teisest seisavad, siis on raudvarva kaugema otsa peale mõjuv tõukejõud väiksem kui tema lähedama otsa peale mõjuv tõmbejõud, nii et viimasel ülekaal on ja kogu raud magneti külge tõmbub.

Induktsiooniga seletub ka, miks viilipuru kettidena magneti külge rippuma jääb: magneti pinna külge puutuv esimene rauakübe muutub ise väikseks magnetiks; tema kaugemal seisev ots tõmbab sellepärast järgmise rauakübeme enese külge: see muutub ka magnetiks, tõmbab veel ühe kübeme enese külge jne.

§ 6. **Magneti jagatavus; hüpotees molekulaarmagnetitest.** 1) Kui magnetvarb NS (joon. 8) keskelt pooleks murda, siis muutub iga pool iseseisvaks täieliseks magnetiks, millel samuti nagu tervel magnetil on 2 isenimelist poolust (n ja s). Murrame pooled ns keskelt veel pooleks, siis saame igast ühest nendest jällegi 2 iseseisvat magneti ($n_1s_1$), nii et igas murdumiskohas ikka 2 uut ühetugevust isenimelist poolust tekib. Sarnast jagamist võiksime kuitahes kaugele jatkata; me leiaksime siis, et ka kõige väikse-

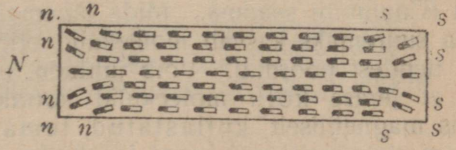
mal kui osal ikkagi 2 isenimelist poolust on. Sellepärast ei vôi üheainsa poolusega magnetit olemas olla.

2) Kui ettekujutada, et kirjeldatud jagamist senni jatkatakse, kunni murdosad ($n_1 s_1$) kõige väiksemad aineosakesed—moleekulid — on, siis peaks ka juba igal moleekulil 2 poolust olema. Selle põhjal oletatakse, et tõepoolest iga moleekul väikest iseseisvat magnetit—n. n. molekulaarmagnetit kujutab, millel täpipealt samad omadused on kui harilikul magnetilgi.



Joon. 8.

Selle n. n. molekulaarmagnetite hüpoteesi järele seisab nii siis magnetvarb koos hulgast molekulaarmagnetitest, mis kõik ridades piki varba asuvad, sarnaselt nagu murtud magneti osad $n_1$ $s_1$ joonistusel 8. Varva sees seisavad molekulaarmagnetite isenimelised poolused üks-teist vastu, mille tõttu need poolused väljapoole mingit magnetilist mõju ei avalda. Ainult molekulaarmagnetite kettide otsades on ühel pool molekulaarmagneti põhjapoolus, teisel pool lõunapoolus, mis väljapoole võib avalduda (joon. 9). Kõigi moleekulite-kettide äärmised poolused kokku moodustavadki magnetvarva poolused N ja S. Varva otsas asub kõrvuti hulk ühenimelisi molekulaarpoolu-seid (n). Need poolused tõukuvad teadagi ka küljeti eemale, nii et kettide otsad mitte paralleelsed ei ole, vaid vähe laiali painduvad. Sellepärast ei avaldu pooluse N magnetism mitte ainult varva otspinnal, vaid ka otsapoolsetel külgpindadel. Selle tõttu näib, et poolus N mitte varva otspinnal ei asu, vaid vähe sügavamal magneti sees (§ $2_2$).



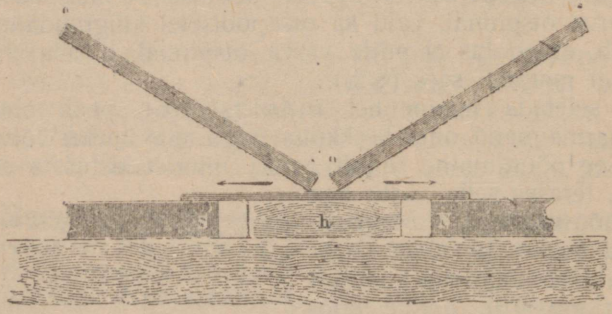
Joon. 9.

Et seletada magnetilist induktsiooni, peab oletama, et molekulaarmagnetid oma keskkoha nagu telje ümber võivad pöörduda. See pöördumine sünnib rauas ilma takistuseta ehk hõõrumiseta, terases selle vastu aga suure hõõrumisega. Magnetiseerimata terases ja rauas seisavad molekulaarmagnetid korratult läbisegi (joon. 10), nende poolused ei avalda väljapoole mingit mõju, vôib ju iga põhjapooluse kõrval seista teise moleekuli samatugev lõunapoolus, mis esimese mõju tasakaalustab. Indutseeriva magnetpooluse lähen-

Joon. 10.

damisel tõukuvad kõigi moleekulite samanimelised poolused temast eemale ning nende isenimelised poolused tõmbuvad tema külge. Sellega pöörduvad molekulaarmagnetid näiteks joonistusel 9 näidatud korraldatud seisu, millel kõik n-poolused on sihitud ühele ja s-poolused teisele poole ning mille tagajärjel raud või teras magnetiks muutub. Seesuguses korraldatud seisus püsivad rauamoleekulid ainult senni, kunni indutseeriv magnet neid tagasi ei lase pöörduda. Magneti eemaldamisega kaob jõud, mis moleekulid nimetatud seisus hoidis ning, omas soojusliikumises alatasa üks-teise vastu põrgates (III. § 38), lähevad moleekulid peagi uuesti segi, millega ka raua magnetism kaob. Terases takistab suur hõõrumine moleekulite pöördumist; magnetiseerimine ei sünni terases sellepärast mitte nii kiirelt ja täielikult kui rauas. Kord aga juba magnetiseeritud, ei pöördu terase moleekulid ka enam tagasi ja terase magnetism ei kao.

§ 7. **Magnetiseerimine ja terasmagnetite valmistamine.** 1) Eelmise § järele peab terase magnetism seda tugevam olema, mida rohkem tema moleekulitest korraldatud seisu on pöördud. Terasele mingi tugeva magneti pooluse lähendamisel pöördub esialgu ainult teatav osa moleekulid korraldatud seisu; viimaste arv oleneb lähendatud magnetpooluse tugevusest ja tema kaugusest terasmoleekulitest, oleneb ju moleekulid pöörav jõud nendest suurustest (Coulombi seadus). Mida lähemale terasele magneti toome, seda suuremaks kasvab moleekulid pöörav jõud ning seda suurem arv nendest pöördub. Võib juhtuda, et nimetatud jõud nii tugev on, et terase kõik moleekulid korralduvad; sarnasel puhul on teras magnetiliselt küllastatud, tema magnetism ei või siis enam ei mingil põhjusel kasvada. Et saada võimalikult tugevat terasmagnetit, peame järjelikult tema moleekulite peale nii lähedalt kui võimalik tugevat magnetpoolust mõjuda laskma.



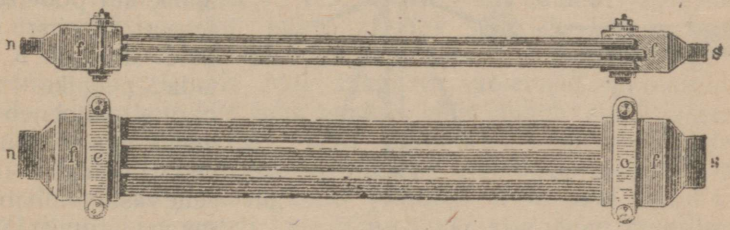
Joon. 11.

2) Praktiliselt toimetatakse terase magnetiseerimist järgmiselt: paraja kõvaduseni karastatud terasvarb asetatakse tugevate mag-

netite pooluste N ja S' peale (joon. 11); varva keskpaigas hoitakse kahe teise tugeva magneti isenimelised poolused n ja s', ning tõmmatakse viimastega piki terasvarba tema keskelt otsade poole. Seda korratakse senni, kunni varb soovitud tugevuseni on magnetiseerunud. Peale selle kui terasvarb omalt aluselt on võetud, avaldub tema selles otsas, mis asus magneti N-pooluse peal, lõunapoolus ning teises otsas põhjapoolus.

Kirjeldatud tõmbamisega lähendatakse pooluseid n ja s' võimalikult paljudele terasmoleekulitele. Et moleekulite pöördumist hõlbustada ja magnetiseerimist suurendada, põrutatakse selle juures terasvarba kas haamriga kloppimise või mõnel teisel teel. Et põrutamine tõepoolest molekulite pöördumist kergendab, seda tõstab muu seas asjaolu, et iga valmis terasmagnet põrumisel nõrgeneb, mis näitab, et põrumisel osa tema moleekulitest segi pöördub.

3) Kui magnetiseeritud jäme terasvarb salpeeterhappesse langetada ja teda mõni aeg seal hoida, siis kaotab ta kogu oma magnetismi; varva jämeduse mõõtmisel selgub, et tema pinnalt õhuke teraskiht salpeeterhappes ära on sulanud. Sellest



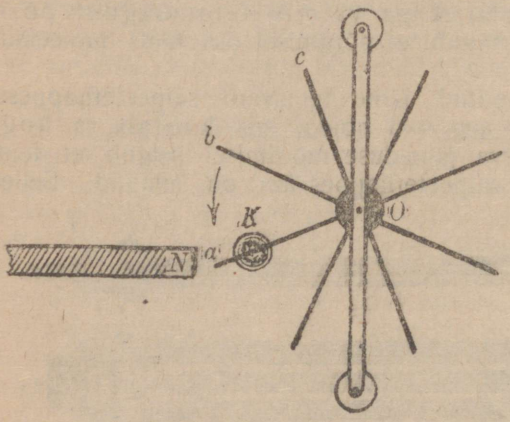
Joon. 12.

peab järeldama, et terasvarva kogu magnetism oli koondatud tema välimises õhukeses teraskihis, mis happes ära sulas: terase magnetiseerimisel saab magnetiliseks ainult tema välimine kiht, ega mitte kogu teras. Tugevate magnetite saamiseks võetakse sellepärast ühe jämeda terasvarva asemel hulk peenikesi varbu, magnetiseeritakse neid üksikult ning kinnitatakse nad siis paralleelselt üks-teise peale, nii et kõik ühenimelised poolused ühel pool asuvad. Harilikult antakse seesugustele varbadele õhukeste terasplaatide kuju, mille otsad ühisteks poolusteks ühendatakse (joon. 12). Seesugust kokkuseatud magnetit hüütakse ka magnetmagasiiniks. Tihti antakse magasiinile hobuseraua kuju (joon. 13.); teadagi suudavad seesuguse magneti mõlemad poolused N ja S suuremat rauatükki kanda kui magnetvarva üksik poolus. Pooluseid ühendavat rauatükki (aa) hüütakse ka ankruks.

Joon. 13.

4) Kuumendamisel kahaneb magneti tugevus; punasel hõõgamisel (700—800° C) kaotab nii teras kui raud kogu oma magnetismi. Lühiajalise kuumendamise järele jääb terasesse peale jahtumist nõrk magnetism, pikemaajalise kuumendamise järele aga kaotab teras oma magnetismi jäädavalt. Sarnane soojuse mõju seletub asjaoluga, et soenemisel keha molekulid kiiremini liikuma hakkavad (III, § 38), mille tõttu nad ka kergemini võivad segi pöörduda.

Tähelepanemisväärt on soojuse mõju külgetõmmatava rauatüki peale: kui terasmagneti pooluse ette punaselt hõõgav raudkuulike riputada, siis ei tõmbu ta magneti külge; alles kuulikese jahtumisel näeme tõmbejõudu järk-järgult kasvavat. Samal põhjusel hakkab magnetpooluse N ees (joon. 14) asuv peenikesest raudtraadist valmistatud täht püstvõllil O tiirlema, kui pooluse ees seisva täheharu alla põlev küünal K asetada: peenike traadiharu a kuumeneb tulileegis ega tõmbu siis enam pooluse N külge; selle vastu tõmbab poolus aga järgmist külma haru b. Kogu täht pöördub kunni b satub magneti ette ja ühtlasi tulileeki, kus ta kiirelt kuumeneb. Sellega kaob tõmbejõud b ja N vahel, magnet tõmbab järgmist külma haru c jne. Et peenikeste traadiharude kuumenemine ja jahtumine väga kiirelt sünnib, siis tiirleb täht vahetpidamata.

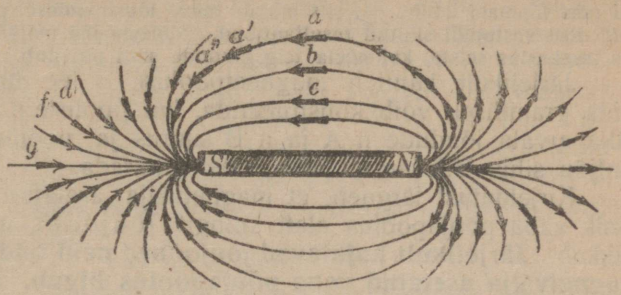


Joon. 14.

§ 8. **Magneti väli; jõujooned.** 1) Magneti väljaks hüütakse magnetit ümbritsevat ruumi, milles tema pooluste mõju teiste magnetiliste kehade peale avaldub. Õieti ulatab iga magneti väli lõpmata kaugele; et aga pooluste mõju teiste kehade peale viimaste kaugenemisel kiirelt väheneb, siis mõistetakse „välja“ all ainult seda piiratut ruumi, milles see mõju veel tuntavalt avaldub.

Asetame pikema terasmagneti NS (joon. 15) horisontaalse laua peale ja lähendame temale lühikese magnetnõela a. Asub nõel magneti keskkohal, siis tõmbab N-poolus nõela lõunapoolust sama tugevasti kui S-poolus nõela põhjapoolust, seisavad ju N ja S-poolus nõelast ühekaugusel. Mõlema tõmbejõu mõjul pöördub nõel a paralleelseks magnetile NS ning

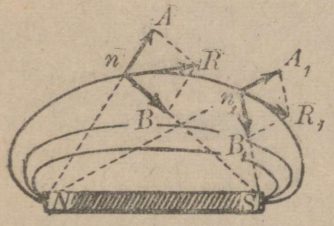
näitab oma põhjapoolusega magneti lõunapooluse poole. Nihutame nõela S-poolusele lähemale, seisu a': Coulombi seaduse järele tõmbab S-poolus nüüd nõela põhjapoolust tugevamini külge kui N-poolus nõela lõunapoolust; selle tõttu kaldub nõela põhjapoolus magneti S-pooluse poole alla.




Joon. 15.

Veel lähemal S-poolusele (seis a'') kaldub nõela põhjapoolus veel järsumalt alla jne. Märgime lauale nõela üksikud seisud (a, a', a'' jne.) ning ühendame nad joonega, siis saame kõverjoone S a N, mille otsad magneti poolustele toetuvad. Samasuguse, kuid vähe lamedama kõverjoone (S b N) saaksime, kui nõela alguses seisu b või c asetaksime. Pooluste läheduses leiaksime samal teel veel hulga kõverjooni (d, f, g), mis küll magneti mõlemaid pooluseid ei ühenda, kuid mille siht igas punktis ühte langeb sinna asetatud magnetnõela sihiga. Kõiki neid kõverjooni hüütakse magnetjõujoonteks. Nende abil kujutatakse graafiliselt magneti välja. Teadagi võiksime samasuguseid jõujooni leida igal teisel tasapinnal, mis läbi magneti telje tõmmatud. Jõujooned ümbritsevad nii siis magnetit kõigilt poolt; joonistus 15 näitab ainult üht lõikepinda läbi jõujoontega kujutatud magnetvälja.

2) Asetame magnetvälja nõela asemele üksiku magnetpooluse, näiteks pika magnetvarva põhjapooluse n (joon. 16). Viimase peale mõjub välja tekitava magneti põhjapooluse N tõukejõud, mida graafiliselt kujutada võib vektoriga nA, ning lõunapooluse S tõmbejõud nB. Mõlema jõu suuruse leiame arvestuse teel Coulombi seaduse abil, kui tuntud on pooluste tugevused ja kaugused N n ja S n. Nende resultantjõud on nR; viimase sihis hakkab poolus n liikuma. Niipea kui n vähe edasi on nihkunud, muutuvad kaugused Nn ja Sn ja ühes sellega ka pooluse peale mõjuvad jõud. Mingis punktis $n_1$ on pooluse peale mõjuv resultantjõud näiteks $R_1$, mille siht enam ühte ei lange pooluse esialgse liikumissihiga (nR). Sellepärast on pooluse tee kõverjooneline. (N n $n_1$ S). Kerge on näha, et sellele kõverjoonele paigu-




Joon. 16.

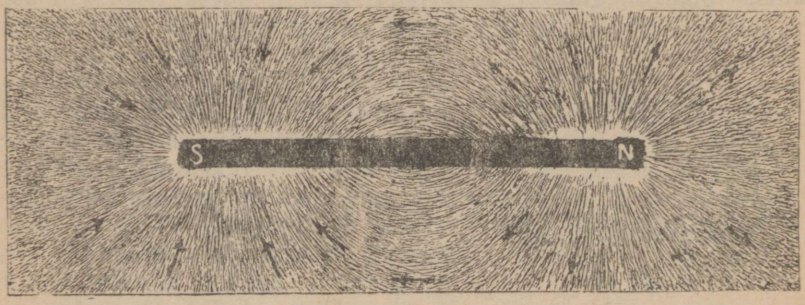
tatud lühike magnetnõel igas punktis resultantjõu R, ehk, mis sama tähendab, kõverjoone riivasjoone sihti peab asenduma.

Tõepoolest: nõela põhjapooluse peale mõjub endine resultantjõud n R; kui nõel lõpmala lühike on, siis mõjub tema lõunapooluse peale sama suur, kuid otse vastupidi sihitud resultantjõud. Mõlema jõu mõjul võib nõel ainult siis tasakaalus seista, kui nõela telg jõudude sihti pöördub.

Järjelikult kujutab magneetpooluse n tee ühte jõujoont, mida graafiliselt võib konstrueerida, kui pooluse n iga seisu jaoks välja arvata jõudude n A ja n B suurus ja poolust n iga resultantjõu sihis järk-järgult ikka edasi nihutada.

Kirjeldatust järgneb, et magnetvälja asetatud pika magneti üksik vaba põhjapoolus alati mingit jõujoont mööda liikuma hakkab. **Järjelikult kujutavad jõujooned neid teid, mida mööda magnetvälja asetatud vaba põhjapoolus liigub.** Et vaba põhjapoolus magneti lõunapooluse külge tõmbub, siis on tema liikumissiht alati põhjapooluselt lõunapoolusele. Selle põhjal käsitatakse jõujooni nii kui oleks neil enestel mingi siht. Tingimisi loetakse jõujoone sihiks vaba **põhjapooluse** liikumissihti; me ütleme, et jõujooned tulevad välja magneti lõunapoolusest ja lähevad läbi õhu tagasi magneti põhjapoolusse. Oletatakse, et nad seal veel ei lõpe, vaid et nad läbi magneti enese tagasi tulevad tema lõunapoolusse, ühinedes sel kombel kinnisteks joonteks, mille lõpp ja algus kokku langeb.

3) Et magnetvälja paigutatud raud ise magnetiks indutseerub, siis pöördub iga väike pikklik rauakübe samuti jõujoone sihti kui magnetnõelgi. Leidub magneti ümbruses hulk kergesti liikuvaid rauakübemeid (viilipuru), siis pöörduvad need kõik jõujoonte sihti ja moodustavad seega mööda jõujooni sihitud kübemete kette. Selle põhjal leitaksegi katse teel magnetvälja jõujoonte kuju: horisontaalse magneti N S (joon. 17) peale pannakse sile paberileht ja raputatakse viimasele võimalikult ühtlaselt vähe rauaviilipuru. Kui lehte nõrgalt põrutada, siis korraldub viilipuru




Joon. 17.

mööda jõujooni kettideks, nii et jõujoonte kuju nähtavaks saab. Joonistus 17 kujutab sel teel saadud magnetvälja spektrumi, milles sissejoonistatud noolekesed näitavad vaba põhjapooluse liikumissihti.

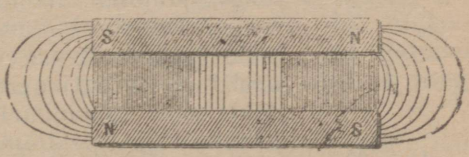
4) Magnetvälja tugevuseks ehk intensiivsuseks antud punktis nimetatakse seda jõudu R (joon. 16) mis mõjub sellesse väljapunkti asetatud põhja üksuspooluse peale. Me nägime juba, et see jõud (R), tähendab ka välja tugevus igas punktis isesugune on, sellepärast võib rääkida ainult antud punkti väljatugevusest.

Väljatugevuse üksuseks loetakse seesuguse välja tugevust, milles üksuspooluse peale mõjuv jõud võrdub ühe düüniga. Seda üksust hüütakse gauss'iks (õpetlase K. Gauss'i järele). Coulombi seaduse järele on nimetatud jõud proportsionaalne magnetvälja asetatud pooluse tugevusega; on viimane m üksust, siis on jõud m düüni. Väljas, mille tugevus on $\mathfrak{H}$ gaussi, mõjub seega pooluse m peale jõud

$$f = m \cdot \mathfrak{H} \text{ düüni} \qquad 2)$$

Magnetvälja tugevust võib graafiliselt kujutada jõujoonte tihedusega. On välja tugevus antud punktis näiteks 1 gauss, siis tõmmatakse jõujooned läbi selle punkti nii tihedalt, et läbi perpendikulaarselt jõujoontele seisva ja 1 $cm^2$ suuruse lõikepinna seal ainult üks jõujoon läheb. On välja tugevus teises kohas 100 gaussi, siis tõmmatakse selles kohas läbi 1 $cm^2$ vastavalt 100 jõujoont jne. Niisugusel konstruktsioonil on väli seda tugevam, mida tihedamad on jõujooned.

5) Ühtlaseks ehk homogeenseks hüütakse seesugust välja, mille tugevus on igal pool ühesuurune ja ühesihiline, s. t. milles sinna asetatud üksuspooluse peale igal pool ühesuurune ja ühesihiline jõud mõjub. Ühtlase magnetvälja jõujooned peavad seega kõik paralleelsed olema ja ühetiheduselt seisma. Peaaegu ühtlane on väli kahe paralleelse magneti otsade N ja S vahel (joon. 18), mille isenimelised poolused vastamisi seisavad. Homogeenses väljas tõmbub sinna asetatud väikse magneti põhjapoolus sama tugevasti ühele poole kui tugevasti tema lõunapoolus teisele poole tõmbub. Selle tõttu ei tõmbu niisugune magnet mitte edasi, vaid tema otsade peale mõjuvad jõud moodustavad ainult jõupaari, mis magnetit ümber tema keskkoha pöörab kunni tema telg jõujoontega paralleelseks saab.

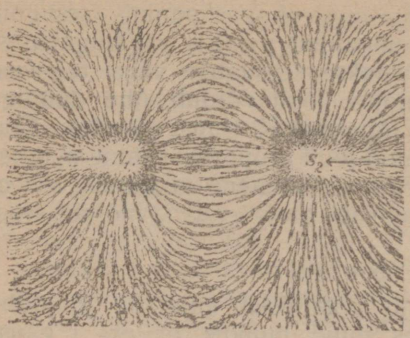


Joon. 18.

§ 9. **Jõujoonte omadused.** 1) Joonistus 19 kujutab magnetvälja kahe magneti isenimeliste pooluste $N_1$ ja $S_2$ vahel. Me näeme, et jõujooned mõlemaid pooluseid kaartena ühendavad. Et poolused ise külge tõmbuvad, siis peavad jõujooned nende vahel nagu pinevil olema ning pooluste üksteisele lähenemisel lühemaks tõmbuma.

Jõujoonte pinevust näitab ülevaatlikult järgmine katse: kui paberlehte, mille peal viilipuru abil joonistusel 19 kuju-

tatud spektruum saadi, pikemat aega õrnalt põrutada, siis näeme, et jõujooned omast esialgsest seisust koomale magneti telje poole nihkuvad ja ühtlasi lamedamaks ning lühemaks kokku tõmbuvad. Oli näiteks mingi jõujoon varemalt seisus NaS (joon. 20), siis tõmbub ta lehe põrumisel kokku ja asendub seisu NbS. Sellest selgub, et

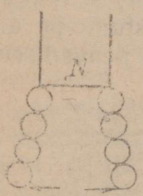



Joon. 19.

Joon. 20.

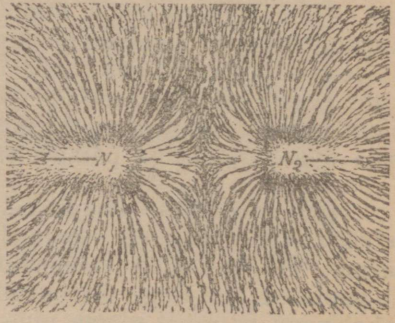
jõujooned tõepoolest pikuti pinevile on ja et neil nagu väljavenitatud elastsetel kumminööridel tung on lühemaks tõmbuda.

2) Riputame magneti pooluse N külge kaks rida väikseid raudkuulikesi: kuulide ketid ei ripu mitte paralleelselt, vaid nad tõukuvad küljeti eemale ja painduvad sellepärast alt laiali (joon. $2_1$). Nagu viilipuru-ketid magneti spektrumil, nii kujutavad siin kuulikeste-ketid magnetjõujooni. Samuti kui kuulikesed üks-teisest küljeti eemale tõukuvad, nii peavad viilipuruketid spektrumil, järjelikult ka magnetjõujooned ise, küljeti eemale tõukuma. Kui vaadelda kahe samanimelise pooluse $N_1$ ja $N_2$ vahel tekkiva välja spektrumi (joon. 22), siis võib tähele panna, et mõlemast poolusest tulevad viiripuruketid (jõujooned) üks-teisega kokkupuutudes tõepoolest sel kombel tagasi painduvad, nagu rõhuksid nad küljeti üksteise vastu.




Joon. 22.

3) Pooluste $N_1$ ja $N_2$ (joon. 22) eemaletõukumine ei ole siis mitte mingisugune kaugelemõjumine, mille juures selle mõju ühelt kehalt teisele kandjaks ühtegi keha ega teist reaalset asja ei ole, vaid pooluste tõukumine on ainult küljeti üks-teise vastu rõhuvate jõujoonte surve, mis jõujoonte kaudu üle kandub pooluste eneste peale. Samuti on isenime-

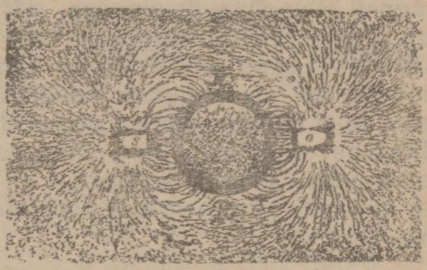



Joon. 22.

liste pooluste külgetõmbumine ainult pooluseid ühendavate jõujoonte (joon. 19) pikipinevuse tagajärg jne.

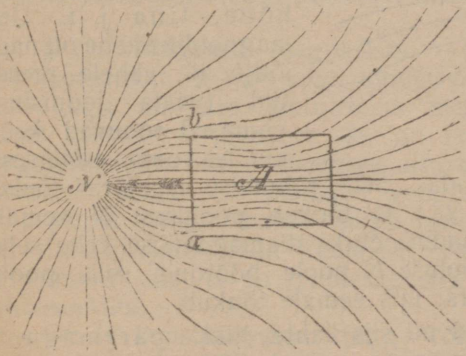
Jõujoonte teooria looja—Faraday vaate järele on jõujooned ise tõeliselt olemas: magnetvälja piirkonnas tekivad eetris mingisugused muudatused; viimaste sihid moodustavadki jõujooni. Oletades, et eetriosakesed jõujoone kui telje ümber mingi keerise moodustavad, võib seletada, miks seesuguste keeriste teljed küljeli üks-teisest eemale tõukuvad ja pikuti kokku tõmbuvad.

§ 10. **Raua mõju magnetvälja peale.** Asetame magneti isenimeliste pooluste n ja s vahele (joon. 23) raudrõnga RR ja leiame viilipuru abil magnetvälja spektrumi. Me näeme, et väli raua mõjul tuntavalt on muutunud (võrdle joon. 19). Jõujooned ei lähe nüüd enam otsekohe N-pooluselt S-poolusele, vaid paindu-vad raudrõngasse, nagu imeks raud neid enesesse. Selle tagajarjel läheb läbi raua palju rohkem jõujooni kui läbi õhu; raua ja pooluste vahel tihenevad jõujooned ning väli muutub seal intensiivsemaks. Rõnga sees aga näeme viilipuru korratult seisvat, mis tunnistab, et seal mingit välja olemas ei ole. Kui rõngasse magnetnõel asetada, siis selgub, et poolused N ja S nõela peale seal tõepoolest mingit mõju ei avalda: **Magnetvälja asetatud raud koondab enesesse jõujooni ning rauaga piiratud ruumis hävineb magnetväli sootumaks.**



Joon. 23.

Viimast asjaolu kasutatakse selleks, et mõnda aparaati, näiteks magnetnõela, segavate magnetiliste mõjude eest kaitsta. Aparaati ümbritsev raudsein nagu varjab magnetvälja samuti kui läbipaistmatu keha varjab valgust.




Joon. 24.

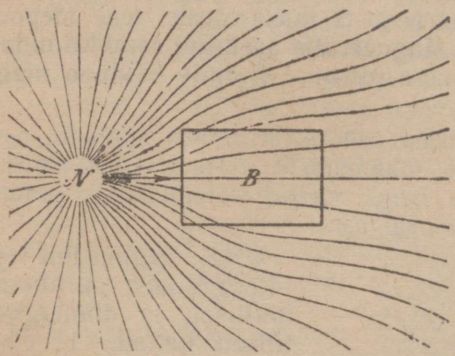
§ 11. **Magnetiline läbitungitavus; paramagnetilised ja diamagnetilised kehad.** 1) Ühtlases keskkonnas lähevad üksikust magnetpoolusest jõujooned radiaalselt igale poole ühtlase tihedusega laiali. Kui pooluse lähedusse rauatükk A (joon. 24) paigutada, siis koonduvad jõujooned rauasse ning raud tõmbub pooluse külge.

Võib ette kujutada, et poolust N ümbritsev keskkond miskit takistust avaldab jõujoonte tekkimisele ja et rauas see takistus väiksem on kui õhus. Nimelt siis peaksid jõujooned kõige väiksema takistuse kohas, s. t. rauas, kõige tihedamalt tekkima, nagu see tõeliselt ka sünnib. Sarnase ettekujutuse põhjal ütleme, et jõujooned tungivad läbi raua hõlpsamini kui läbi õhu, ehk raua magnetiline läbitungitavus on suurem kui õhu oma.

Kõik kehad, millel magnetiline läbitungitavus on suurem kui õhul, muudavad magnetvälja sel kombel, et jõujooned paistavad nendest samuti kui isenimelisest magnetpoolusest välja tulevat. Näiteks on raua otspind ab (joon. 24) sarnane mingi magneti S-pooluse otspinnaga, mis antud pooluse N külge tõmbub. Järjelikult tõmbuvad kõik kehad, mille magnetiline läbitungitavus on suurem kui õhul, antud magnetpooluse külge. Seesuguseid aineid hüütakse paramagnetilisteks. Peale raua on paramagnetilised veel nikkel, kroom, mangaan, plaatina, koobalt jne., kuid viimaste läbitungitavus on raua omast palju väiksem; sellepärast on ka jõujoonte koondumine nendes väiksem ning nende kehade magneti külge tõmbumine vastavalt nõrgem.

Kõigis paramagnetilistes kehades indutseerub antud magneti (N) poole pöördud otsas (a b, joon. 24) isenimeline poolus.

2) Usna teise pildi saame, kui pooluse N lähedusse tükikese vismuti B (joon. 25) paigutame: magneti spektrum näitab, et jõujooned ümber keha B otsa painduvad ja peaaegu sugugi tema sisse ei tungi. Vismuti magnetiline läbitungitavus on nii siis väiksem kui õhul. Seesuguseid kehi nimetatakse diamagnetilisteks. Nende hulka kuuluvad muu seas kuld, hõbe, tina j. t. Diamagnetiline keha on nagu jõujoonte vahele pressitud (vaata joonistus); viimased rõhuvad keha, püüdes oma esialgsesse sümmeetrilisse seisu asenduda. Selle rõhumise tagajärjel tõukub keha magnetväljast välja, s. t. ta tõukub poolusest N eemale. Nähtus on sarnane kui indutseeruks diamagnetilise keha selles otsas, mis antud magnetpooluse N poole pöördud, selle poolusega ühenimeline poolus, mis eemale tõukub.

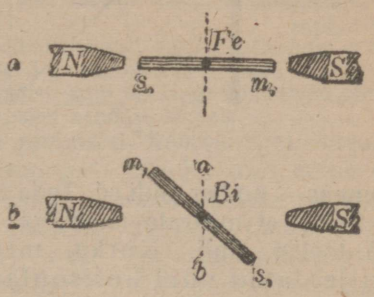


Joon. 25.

Kõik kehad jagunevad nii siis kahte liiki: paramagnetilisteks, mille läbitungitavus on suurem kui õhul ja mis magneti

külge tõmbuvad, ning diamagnetilisteks, mille läbitungitavus on väiksem kui õhul ja mis magnetist eemale tõukuvad.

3) Kui tugeva magneti pooluste N ja S vahele (joon. 26ª) väike raudvarb Fe niidi otsa riputada, siis asendub ta pooluseid ühendava magnettelje sihti, sest N ja S indutseerivad neile lähemates varvaotsades vastupidiseid pooluseid $s_1$ ja $n_1$ ning tõmbavad viimaseid külge.




Joon. 26.

Riputame aga raudvarva asemele vismutvarva Bi, siis indutseerivad poolused N ja S varva lähemais otsades samanimelisi pooluseid $n_1$ ja $s_1$ (joon. 26ᵇ), mis esimestest eemale tõukuvad. Selle tagajärjel pöördub varb n. n. ekvatoriaalseisu ab, mis perpendikulaarne on magneti teljele.

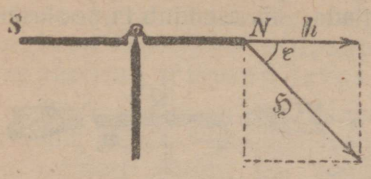
Kirjeldatud katsega on nii siis kerge ära määrata, kas antud aine on para- või diamagnetiline. Kui varva asemele võtta õhukese seinaga klaastoru ja viimane täita mitmesuguste vedelikkudega, siis selgub, et ka vedelikud ja koguni gaasid para- ja diamagnetilisteks jagunevad. Näiteks on rauasoolade sulatised (kloorraud, rauavitriool jne.) paramagnetilised, kuna piiritus ja õli on diamagnetilised. Gaasidest on ainult hapnik paramagnetiline, teised gaasid on diamagnetilised.

Para- ja diamagnetismi definatsiooni juures (p. 2) sai mõõduandvaks loetud kehade magnetiline läbitungitavus võrdlemisi õhuga. Sellepärast on see definatsioon maksev ainult õhus asuvate kehade jaoks. Õieti on keha ainult senni paramagnetiline, kunni tema läbitungitavus suurem on kui selle keskkonna oma, milles ta asub. Kui näiteks rauda sisaldav klaasvarb, mis õhus nõrgalt paramagnetiline on, mõnda vedelikku asetada, mis tugevamalt paramagnetiline on, s. t. mille läbitungitavus suurem on kui klaasvarva oma, siis näeme, et vedelikus rippuv klaasvarb pooluste vahel ekvatoriaalseisu asub, nii siis diamagnetiliseks muutub. Samal põhjusel võib näiteks üks ja sama keha õhutus ruumis paramagnetiline, hapnikus aga diamagnetiline olla.

§ 12. **Maakera magnetism.** 1) Et magnetnõel ka ilma teiste magnetite mõjuta alati kindla põhja-lõuna sihi võtab, siis peab kogu maakera ümbritsema magnetväli. Me võime sellepärast oletada, et maakera ise on suur magnet, mille poolused geograafiliste nabade läheduses asuvad. Harilikult moodustab kompassi nõela siht maakera geograafilise meridiaaniga, s. t. põhja-lõuna sihiga teatud nurga, mida magneti kääranguks ehk deklinatsiooniks hüütakse. Käänang võib kas ida- või läänepoolne olla, ta on mitmesugustes kohtades maapinnal väga mitmesuurune.

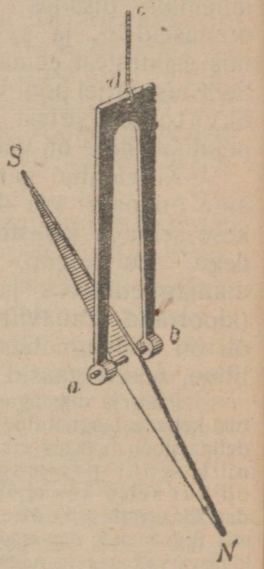
Oma konstruktsiooni tõttu võib kompassi nõel ainult horisontaalpinnas pöörduda; sellepärast pöörab seesugust nõela NS (joon. 27) ainult horisontaalselt sihitud osa sellest jõust $\vec{H}$,

millega maakera magnetism nõela pooluse N peale mõjub ja mis längu alla on sihitud. Riputame aga nõela sel kombel, et ta nii horisontaal- kui vertikaalpinnas vabalt pöörduda võib, siis ei käändu nõel mitte ainult meridiaan-sihist kõrvale, vaid ta kaldub ka ühe otsaga längu alla — mõjuva jõu $\mathfrak{H}$ sihti. Seesugust nõela kujutab näiteks joonistus 28: vertikaalpinnas pöördub nõel ümber telje ab, horisontaal-



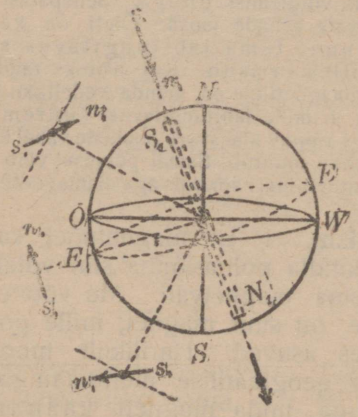
Joon. 27.

pinnas — ümber niidi cd. Teda tarvitatakse selleks, et määrata maakera magnetjõu $\mathfrak{H}$ tõelist sihti. Nurka, mille võrra kirjeldatud nõel horisontaalpinnast ülesvõi alla kaldub, hüütakse maakera magnetismi kaldenurgaks ehk inklinatsiooniks. Vastavalt nimetatakse kirjeldatud magnetnõela kalde- ehk inklinatsioonnõelaks.



Joon. 28.

2) Ekvaatoril seisab kaldenõel ($n_1 s_1$) peaaegu horisontaalselt (joon. 29); lähenedes maakera põhjanabale, kaldub nõela põhjapoolus ($n_1$) ikka järsumalt alla. Põhjanaba N läheduses leidub koht



Joon. 29.

(Põhja Ameerikas, umbes 70° põhja laiust ja 96° lääne pikkust Greenvich'ist arvatud), kus kaldenõel otse vertikaalselt seisab. Sellest peab järeldama, et maakera magnetiline lõunapoolus ($S_1$) selles kohas maakera pinnas asub.

Lähenedes ekvaatorilt geograafilisele lõunanabale (S), kaldub magnetnõela lõunapoolus alla ja nõel seisab vertikaalselt lõunanaba läheduses (72° lõuna laiust ja 154° ida pikkust), kus järjelikult asuma peab maakera magnetiline põhjapoolus

($N_1$). Ringi EE, kus kaldenõel horisontaalselt seisab, nimetatakse maakera magnetiliseks ekvaatoriks.

Kui maakaardil kõverjoontega ühendada kõik kohad, millel on ühesuurune deklinatsioon, siis moodustavad leitud jooned n. n. isogoone. Need jooned on tähtsad meresõitudel, sest nende abil võib igas kohas hõlpsasti ära määrata, kui palju kompassi nõela siht kõrvale käändub geograafilisest meridiaanist.

Kõverjooni, mis geograafilisel kaardil ühendavad kohti ühesuuruse inklinatsiooniga, hüütakse isokliinideks. Need jooned lähevad samuti nagu geograafilised paralleeljoonedki ümber maakera, kuid ei lange viimastega mitte ühte, vaid kalduvad kord vähem, kord rohkem nendest kõrvale.

3) Et maakera magnetilised poolused meist kaugel asuvad, siis võime mingis väiksemas piirkonnas, näiteks toas maakera magnetvälja homogeenseks ja tema jõujooni üksteisele paralleelseteks pidada. Antud kohas määrab maakera magnetvälja tema jõujoonte siht ning välja tugevus. Esimene on määratud deklinatsiooni ja inklinatsiooni suurusega, välja tugevust peame aga iseäraldi mõõtma. Selleks tarvitatakse harilikult horisontaalset magnetnõela, mida õõtsuma tõugatakse. Samuti nagu pendel seda kiiremini õõtsub, mida tugevam on õõtsumist sünnitav jõud (II, § $51_8$), nii õõtsub ka magnetnõel maakera magnetväljas seda kiiremini, mida tugevam on väli. Lähemad juurdlused näitavad, et maakera magnetvälja intensiivsus on ümberpöördult proportsionaalne temas õõtsuva magnetnõela õõtseväldetega. Mõõtes ühe ja sama magnetnõela õõtseväldet mitmes kohas, võime ülevalnimetatud seaduse põhjal nende kohtade magnetvälja intensiivsusi võrrelda. Niisugused katsed näitavad, et maakera magnetväli kõige nõrgem on ekvaatoril ning et ta lähenemisel poolustele järk-järgult tugevamaks muutub.

4) Maakera magnetism ei ole mitte konstant, vaid muutub aja jooksul nii sihis kui tugevuses. Näiteks oli 1580 a. Pariisis idapoolne kääname $11^0$, mis aast-aastalt vähenema hakkas, siis läänepoolseks muutus ja praegugi veel $16^0$ lääne poole on. Kalde oli 1871 a. Pariisis $75^0$, mis järk-järgult vähenes ja praegu ainult $67^0$ on. Peale sarnaste aastasadasid kestvate korrapäraste muudatuste võib tähele panna lühiajalisi perioodiliselt korduvaid muudatusi (näiteks päeva või aasta jooksul), mis avalduvad magnetnõela väikses kõikumises tema keskmisest seisust ühele või teisele poole. Tihti muutub maakera magnetväli järsku ja väga tuntavalt. Niisugused magnetilised tormid on harilikud seotud maavärisemise, tuldpurskavate mägede tegevuse, virmaliste ilmumisega jne. Arvatakse, et nende põhjuseks on iseäralised, plahvatussarnased sündmustikud (protuberans'id) päikse pinnal.

## Peatükk II:

## Paigal seisev elekter (Elektrostaatika).

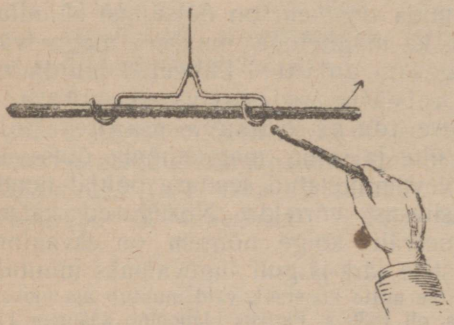
§ 13. **Kehade elektriseerimine hõõrumisel.** Hõõrume kuiva klaastoru siidilapiga, siis omandab klaas iseäralised omadused: ta tõmbab kergeid paberi- ja korgitükke enese külge, tekitab tema läheduses hoitud käes kõditavat või nõelapiste sarnast ärritust, sünnitab klaasi ja käe vahel väikseid

sädemeid jne. Me nimetame nende iseäralikkude omaduste põhjust elektriks ja ütleme, et klaas hõõrumisel elektriseerub.

Samuti kui klaas elektriseerub ka vaik, näiteks kirjalaki pulk, hõõrumisel villase riidega ning avaldab siis samasuguseid omadusi kui klaaski. Juba vanad greeklased teadsid, et merevaik kirjeldatud nähtusi tekitab. Et merevaigu greekakeelne nimetus on „elektron", siis hüüti neid nähtusi elektrilisteks ning nende põhjust elektriks.

Katsed näitavad, et hõõrumisel kõik tuntud kehad enam või vähem elektriseeruvad. Mõnede kehade juures võib elektriseerumist ainult siis tähele panna, kui neid klaasi või vaiguga kõigist teistest kehadest eraldada (§ $16_2$).

§ 14. **Positiivne ja negatiivne elekter.** 1) Paigutame siidiga hõõrutud klaastoru siidiniidi otsas rippuvale konksule (joon. 30). Kui seesugusele elektriseeritud torule lähendada mistahes asja, siis pöördub tema ots asja poole, mis näitab, et toru ja asjade vahel külgetõmbumine valitseb: **Elektriseeritud ja mitteelektriseeritud keha tõmbuvad üks-teise külge.**



Joon. 30.

Nüüd hõõrume teist samasugust klaastoru siidiga ja asendame tema nööril rippuva elektriseeritud toru lähedale: selgub, et need kehad külge ei tõmbu, vaid eemale tõukuvad. Hoiame aga villaga hõõrutud kirjalaki-pulga rippuva klaastoru läheduses, siis näeme, et klaastoru nüüd veel tugevamini kirjalaki poole tõmbub kui sel juhusel, kui kirjalakk elektriseerimata oli. Rippuvale klaastorule mitmesuguste teiste elektriseeritud kehade lähendamisel selgub, et nad kõik jagunevad kahte liiki: ühed tõukavad elektriseeritud klaastoru eemale, teised tõmbavad teda külge. Esimesed sarnanevad siidiga hõõrutud klaasvarvaga, teised — villaga hõõrutud kirjalakiga. Kirjeldatud vahe võib tekkida ainult selle tõttu, et kehadel ilmuv elekter kahesugune on. Klaasi ja kirjalaki elektritel on otse vastupidine mõju mingi kolmanda elektriseeritud keha peale. Sellepärast nimetatakse ühte nendest (klaasielektrit) positiivseks (+E) ning teist (vaiguelektrit) — negatiivseks (—E) (Franklin 1747 a.)

Nagu kaks elektriseeritud klaastoru eemale tõukuvad, nii tõukuvad eemale kaks mistahes keha, kui nad mõlemad samasuguse elektriga on nagu klaas. Samuti tõukuvad eemale ka kaks mistahes keha, kui nad mõlemad negatiivse vaiguelektriga

on elektriseeritud. Selle vastu tõmbuvad aga külge kehad, millest üks on klaasi- ja teine vaiguelektriga. Nähtavasti ei olene kehade külgetõmbumine või eemaletõukumine nende ainetest, vaid ainult nende elektritest. Sellepärast oletatakse, et ka elektrid ise — kui meie neid ilma ainelise aluseta koguda saaksime — kas külgetõmbuvad või eemaletõukuvad, ja nimelt:

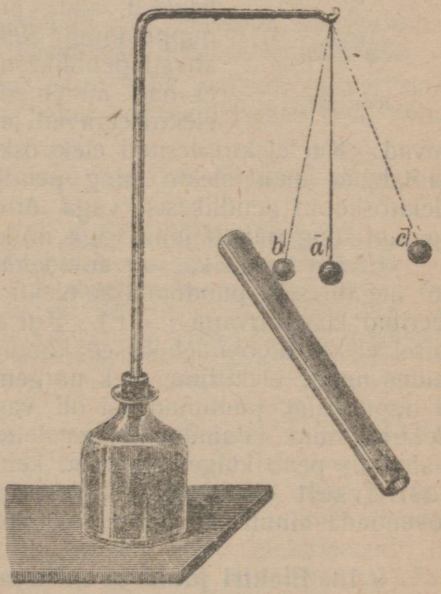
**Isenimelised elektrid tõmbuvad külge, samanimelised tõukuvad eemale**

2) Kas elektriseerub keha hõõrumisel positiivselt või negatiivselt, see ei olene mitte ainult hõõrutava, vaid ka hõõruva keha ainest. Näiteks elektriseerub eboniit villase riidega hõõrumisel samuti nagu vaik — negatiivselt, kuna ta amalgameeritud*) nahaga hõõrumisel sarnaselt nagu siidiga hõõrutud klaas positiivselt elektriseerub. Juba sellest selgub, et nimetustel nagu „klaasielekter", „vaiguelekter" jne. puudub kindel tähendus. Täiesti juhuslikult lepiti omal ajal kokku nimetada positiivseks elektriks seda elektrit, millega elektriseerub siidiga hõõrutud sile klaas.

Peale hõõrutavate kehade aine oleneb elektriseerumine veel keha pinna omadustest: näiteks elektriseerub sileda pinnaga klaas harilikult positiivselt, tuhmi pinnaga klaas aga tihti peale negatiivselt.

§ 15. **Elektri ülekandumine kehade kokkupuutumisel; elektroskoop:** 1) Puudutame elektriseeritud kehaga klaasi või vaiku, siis avaldab ka viimane elektrilisi omadusi. Sellest peab järeldama, et elekter elektriseeritud keha pinnalt kokkupuutumisel üle läheb teistele kehadele, ehk **kehade kokkupuutumisel kandub elekter ühelt kehalt teisele.**

Sellega seletub siidiniidi otsas rippuva kerge korgikuulikese n. n. elektripendli (joon. 31) omapärane liikumine elektriseeritud klaasvarva läheduses: Varva lähendamisel tõmbub kerake nagu iga teine elektriseerimata keha varva külge



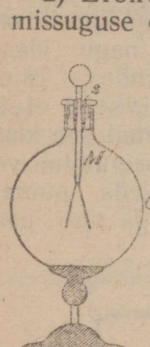

Joon. 31.

*) Amalgameerituks hüütakse nahka, mis elavhõbeda, tsingi ja inglistina seguga õhukeselt on kaetud.

(seis b); kokkupuutudes elektriseerub aga kerake samanimelise elektriga kui varbki ning tõukub selle tagajärjel viimasest kaugele eemale (seis c), tõukuvad ju kõik ühenimeliselt elektriseeritud kehad üksteisest eemale,

Kui pendlikerakesele, mis kord juba elektriseeritud klaasvarva külge puutunud, lähendada hõõrutud kirjalakipulka või mingit teist negatiivselt elektriseeritud keha, siis tõmbub kerake külge, sest et isenimelised elektrid külge tõmbuvad. Et sama kerake kõigilt positiivselt elektriseeritud kehadelt eemale tõukub, siis võib elektripendliga hõlpsasti ära määrata, kas on mingi keha positiivselt või negatiivselt elektriseeritud.

2) Elektroskoop on aparaat, mille abil tunda võib, kas ja missuguse elektriga antud keha on elektriseeritud. Teda moodustab klaaspudel G (joon. 32), mille eboniitkorgi läbi vaskvarb M on torgatud. Varva ülemine ots kannab väikest nuppu (kerakest), tema alumine ots aga kahte kerget pendlikest. Viimased on lihtsad kerged kuld- või alumiiniumlehekesed, mis ülemist otsapidi varva otsa on kinnitatud, nii et nad oma alumiste otsadega väga kergesti laiali võivad painduda. Harilikult ripuvad mõlemad lehekesed vertikaalselt alla; puudutame aga elektroskoobi nuppu mingi elektriseeritud kehaga, siis tõukuvad pendlikeste alumised otsad laiali, sest et nad mõlemad varva kaudu ühenimeliselt elektriseeruvad ja selle tagajärjel eemale tõukuvad. Kui elektriseeritud elektroskoopi sõrmega puudutada, siis kaotab ta oma elektri ning pendlikesed langevad kokku. Et elektroskoobi pendlikesed väga õrnad on, siis on ta ülitundlik aparaat ning näitab juba väga nõrka elektriseerumist.



Joon. 32.

Et ära tunda kas on antud keha elektriseeritud positiivselt või negatiivselt, puudutatakse elektroskoobi nuppu alguses elektriseeritud klaasvarvaga (+ E). Kui siis uuritava kehaga puudutamisel elektroskoobi lehekesed koomale langevad, siis peab selle juures nende elektriline olek nõrgenema, millest võib järeldada, et nupu külge puutunud asi oli vastupidiselt, s. t. negatiivselt elektriseeritud. Painduvad aga lehekesed selle juures veel laiemale, siis peab külge puutunud keha olema samanimeliselt, s. t. positiivselt elektriseeritud, sest lehekeste elektriseerumist võib kõvendada ainult samanimeliselt elektriseeritud keha.

§ 16. **Elektri juhid ja mittejuhid.** Asetame kaks elektroskoopi kaugele üks-teisest ja ühendame nende nupud metalltraadiga. Kui ühte nuppu elektriseeritud kehaga puudutada, siis lähevad mõlema elektroskoobi lehekesed korraga laiali. Puudutame sõrmega ühte nuppu, siis langevad mõlema elektroskoobi lehed ühel ja samal ajal kokku. Sama nähtus kordub, kui traadi

asemel nupud märja niidi või paberiribaga ühendada. Kuivab aga niit või paber, siis näeme, et ainult selle elektroskoobi lehekesed laiali lähevad, mille nupu külge elektriseeritud kehaga puudutatakse. Teise elektroskoobi lehekesed kaugenevad ainult aegamööda teine-teisest ning tõukuvad alles teatud aja järele sama laiali kui esimese elektroskoobi omad. Sõrmega ühe nupu külge puudutamisel langevad selle elektroskoobi lehekesed otsekohe kokku, teise omad aga langevad järk-järgult koomale. Kui mõlemad elektroskoobid kumminööri või klaasvarvaga ühendada, siis näeme, et teine elektroskoop sootumas rippumatu on esimesest, nii et esimese elektriseerumine mingisugust mõju ei avalda teise elektroskoobi lehekeste peale.

Need katsed näitavad, et elekter metalltraati ja märga niiti mööda silmapilkselt ühest kohast teise läheb ja et ta kumminööri ning klaasvarba mööda edasi ei pääse. Kuiv nöör laseb elektrit nähtavasti ainult aegamööda edasi, sest et teise elektroskoobi lehekesed alles teatud aja järele esimese lehekestele järgnevad.

Keha, milles elekter silmapilkselt ühest kohast teise ülekandub, hüütakse elektri juhiks; seesugust keha, milles elekter ühest kohast teise üle ei kandu, hüütakse mittejuhiks ehk isolaatoriks. Kehad, mis elektrit ainult vähe juhivad, on pooljuhid.

Heade juhide hulka kuuluvad kõik metallid, süsi, soola ja hapete sulatised vees, harilik kaevuvesi, inimese keha j. t.

Mittejuhid ehk isolaatorid on; õhk, vaigud, väävel, klaas, eboniit, õlid, siid, täiesti kuiv paber, absoluut puhas vesi, õhutu ruum j. t.

Pooljuhid on: taimede kiud harilikul niiskusel nagu lina, puu, hariliku kuivusega paber j. t.

Täielisi isolaatore on väga vähe; suurem osa mittejuhtidest on hügroskoopilised, nad imevad enesesse või tihendavad enese pinnal õhu rõskust ja muutuvad seega juhtideks. Näiteks on kuiv aknaklaas hea isolaator. Rõskes õhus aga tekib tema pinnal õhuke veekiht, mis elektrit juhib. Tahetakse, et klaas võimalikult vähe elektrit juhiks, siis kaetakse ta mingi õhukese vaigukihiga (näiteks shellak-lakiga), mis nimetatud veekihi tekkimist takistab. Katsetel isolaatoritega peab õhk alati kuiv ja soe olema, sest ainult siis hoidub isolaatorite pind kuivana.

2) Kui klaasvarva ühte otsa hõõruda, siis näitab elektroskoop, et ainult hõõrutud koht elektriline on, kuna varva kõik teised kohad on täiesti ilma elektrita. Kinnitame aga metallvarva klaasvarre külge ja hõõrume metalli, siis selgub, et mitte ainult hõõrutud koht, vaid kogu metalli pind elektriseerub: Ka see katse näitab, et mittejuhis (klaas) elekter ainult sinna kohta koondatult jääb, kus teda tekitati, kuna ta aga juhis üle keha kogu pinna laiali kandub. Sellega seletubki, miks käes hoitud klaasvarb hõõrumisel elektriseerub, kuna samuti hoitud metallvarb mingisuguseid elektrilisi omadusi ei avalda: Esimesel juhusel jääb elekter varva pinna hõõrutud kohale, teisel juhusel aga

laguneb ta varba mööda laiali käeni ning pääseb läbi meie keha maasse.

Kui tahetakse, et elekter antult kehalt ära ei voolaks, siis peab seda keha isoleerima, s. t. teda peab isolaatoritega ümbritsema. Selleks ripub näiteks elektripendli kerake nimelt siidiniidil, selleks asetatakse kehad, millesse elektrit tahetakse koondada, klaas- või eboniitsammastele jne.

§ 17. **Mõlema elektri üheaegne tekkimine; hüpoteesid elektri loomu kohta.** Kinnitame väikse vaskketta ja samasuure klaasketta isoleerivate käepidemete külge, näiteks klaasvarbade otsa. Kui käepidemetel hoitud kettaid üks-teist vastu hõõruda, siis näitab elektroskoop, et vask peale hõõrumist on elektriseerunud negatiivselt, klaas aga positiivselt. Nüüd paneme ühe ketta lapiti teise peale ja puudutame mõlematega korraga elektroskoobi nuppu: selgub, et elektroskoobi lehekesed paigalt ei liigu, millest järgneb, et ühendatud kettad omad elektrid on kaotanud. Korrates sama katset mitmesuguste teiste ketastega, selgub, et kõigist hõõrutavatest kehadest üks alati positiivselt ja teine negatiivselt elektriseerub, s. t. **et hõõrumisel korraga mõlemad elektrid sünnivad.** Kui hõõrutud kehade elektrid uuesti ühendada, siis hävineb nende mõju. Me ütleme sel puhul, et hõõrutud kehade isenimelised elektrid ühinemisel neutraliseeruvad.

Täpipealsemalt võib leitud seadust tõestada järgmiselt: eelpool kirjeldatud hõõrutud ketastega puudutame kummagiga ise elektroskoopi. On mõlemad elektroskoobid ühesugused, siis lähevad nende lehekesed ühevõrra laiali, mis näitab, et vask sama tugevasti oli elektriseeritud kui klaas. Nüüd ühendame mõlema elektroskoobi nupud isoleeritud käepidemel hoitud metalltraadiga. Selgub, et ühendamise silmapilgul mõlema elektroskoobi lehekesed kokku langevad, mis näitab, et nende elekter ühinemisel tõepoolest hävineb.

2) Kui kaht isoleeritud keha üks-teist vastu hõõruda, siis ei anna meie neile väljaspoolt teadagi midagi juure ega võta neilt selle juures midagi ära. Sellepärast peab oletama, et elektrid, mis peale hõõrumist kehade pinnal ilmsiks tulid, juba algusest saadik kehades peitusid ja et me neid hõõrumisega ainult teineteisest eraldasime. Samuti nagu magnetismi puhul, nii peab ka siin oletama, et iga keha ühevõrra positiivset ja negatiivset elektrit seisaldab; väliselt ei avaldu need elektrid ainult sellepärast mitte, et nad kehas igal pool ühevõrdselt on segatud, nii et üks elekter teise mõju tasakaalustab. Hõõrumisel aga satub ühe keha (klaasi) peale rohkem positiivset, teise peale vastavalt rohkem negatiivset elektrit; sel teel elektriseerunud kehade ühendamisel peavad nende elektrid siis teadagi uuesti neutraliseeruma, nagu me seda tõepoolest nägime ülevalkirjeldatud katses.

Seesuguste harutuste põhjal kujunes hüpotees, mille järele olemas on kaks isesugust ollust — positiivne ja negatiivne elekter (Symmer 1759), mis neutraalsetes kehades alati ühevõrd-

selt on segatud ja mis kehade elektriseerumisel osalt lahutuvad, nii et üks hôôrutavatest kehadest rohkem ühte, teine rohkem teist elektri-ollust pärib („Dualistline vaade").

Franklin (1750 — 55) sellevastu seletas, et olemas on ainult üks elektriollus — positiivne elekter. Elektriseerimata kehasse kuulub alati teatud kindel hulk seda ollust ehk „fluidumi". On kehas teda rohkem, siis paistab ta meile positiivselt elektriseerituna, leidub kehas teda aga vähem kui neatraalolekuks tarvis, siis on keha negatiivselt elektriseeritud. Franklini vaate järele ei ole keha negatiivne elektriseerumine nii siis muud kui positiivse elektri-olluse puudumine. Kehade neutraliseerumine on selle vaate järele ainult positiivse elektriolluse voolamine sellest kehast, kus teda rohkem on kui tarvis, kehasse, kus temast puudus on. Ühendame näiteks 2 „vastupidiselt" elektriseeritud keha juhiga, siis voolab positiivne elektriollus „positiivsest" kehast, kus seda ollust liiga palju „negatiivsesse" kehasse, kus teda liiga vähe, kunni mõlemad kehad neutraalolekuks tarviliku elektrihulga omandavad. Puudutame sõrmega „negatiivset" keha, siis voolab sinna maast positiivset elektriollust, kunni keha neutraliseerub jne.

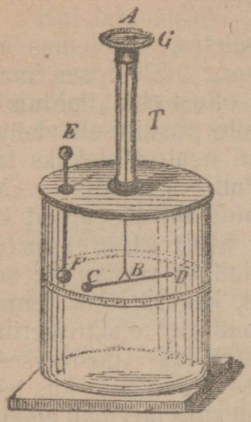
Et seletada elektriseeritud kehade külgetõmbumist ja eemaletõukumist pidi Franklin oletama, et elektriolluse osakesed üksteisest eemale tõukuvad, kuna elektri ja mateeria osakesed külge tõmbuvad. Puudub ühes kehas positiivset elektri ollust, s. t. on keha „negatiivselt" elektriseeritud, siis tõmbuvad selle keha mateeria osakesed teise, positiivselt elektriseeritud keha üleliigseid elektriolluse osakesi enese külge. Et seletada, miks negatiivselt elektriseeritud kehad eemale tõukuvad, pidi Franklin veel oletama, et ka mateeria osakesed üks-teisest eemale tõukuvad.

3) Kuigi praeguse aja vaated lahku lähevad kirjeldatud hüpoteesidest, on viimased, iseäranis dualistline hüpotees väga kohane elektrinähtuste ülevaatlikuks kirjeldamiseks. Sellepärast käsitame edaspidi neid nähtusi nii nagu oleks tõepoolest olemas kaks isesugust elektriollust. Me peame aga meeles pidama, et seesugune käsitamisviis ainult piltlik on ja et me mõistetega nagu „elektri hulk" veel midagi ütelda ei taha elektri loomu kohta. Me toimetame siinkohal samuti nagu soojusõpetuseski, kus me „soojuse hulgast" nagu mingi aine hulgast rääkisime, olgugi et meil teada oli, et soojus ainult liikumine on.

§ 18. **Coulomb'i seadus; elektri hulk ja tema üksus.** 1) Et leida seadust, mille järele sünnib elektriseeritud kehade külgetõmbumine ja eemaletõukumine, mõõtis Coulomb oma keerdkaalu abil (joon. 33) nende jõudude suurust mitmesugustel tingimustel.

Oma ehitusviisi poolest on see keerdkaal täiesti sarnane § 43 kirjeldatud kaaluga. Magneti asemel ripub siin peenikese traadi otsas isoleeriv varvake CD, mille üks ots kannab kerget, ülehõbetatud kerakest C. Metall-

varva EF otsa kinnitatud teine kerake F lähendatakse kerakesele C. On mõlemad kerakesed elektriseeritud, siis tõmbuvad nad külge või tõukuvad eemale, kusjuures selle jõu suurust endisel viisil traadi keerdumisnurgaga mõõdetakse.



Joon. 33.

Mõõtmiste algul pöördakse kera C nii, et ta kerakese F külge puutub, ilma et traat AB selle juures keerus oleks. Nüüd puudutatakse nupu E külge elektriseeritud kehaga: metallvarva EF kaudu saavad F ja C samanimelised elektrilaengud ning C tõukub kerast F eemale. Selle juures keerdub traat vähe keerdu; teataval keerdumisnurgal t, mille kaare suurust mõõta võib nõu seinale märgitud sentimeeterskaalaga, tasakaalustab traadi elastsusjõud kerakeste tõukejõudu ning kera C hoidub tasakaalus. Et keerdumisnurk proportsionaalne on tõukejõu suurusega (§ 4$_3$), siis võime seda jõudu sellekohastes üksustes kujutada suurusega t. Nupu A keeramisega võime traadi veel rohkem keerdu keerata; selle juures kasvab keerdumisnurk (t + näitaja G pöördumisnurk) ning ühes sellega traadi elastsusjõud; kerake C aga läheneb kerale F. Katse näitab, et kerakeste C ja F kauguse r poole võrra vähendamiseks ($\frac{1}{2}$ r) peab traadi keerdumisnurka 4 korda suurendama (4 t). Tahame kerakesi lähendada kunni $\frac{1}{3}$ r või $\frac{1}{4}$ r, siis peab keerdumisnurk olema vastavalt 9 t või 16 t. Et t ühtlasi kerakeste tõukejõudu kujutab, siis järgneb nendest katsetest, et kerakeste kauguse vähendamisel 2, 3, 4 jne. korda kasvab nende tõukejõud vastavalt 4, 9, 16 jne. korda, s. t. elektriseeritud kerakeste tõukejõud kasvab ümberpöördud proportsioonis nende kauguse kahanemise kvadraadiga.

Kerakeste laengu suuruse ehk nende elektrihulkade ja tõukejõu vahekorra leiame järgmisest katsest: Nagu eelmisel katselgi anname C ja F-ile mingi laengu ning mõõdame selle nurga t suurust, mille võrra traat kerakeste tõukejõuga keerdu läheb. Nüüd puudutame nuppu E isoleeritud käepidemel hoitava metallvarvaga, mille otsades on samasuured kerakesed kui E ja F. Osa elektrit voolab varvalt EF teda puudutava teise varva peale, nii et kerakese F laeng väheneb. Et mõlemad varvad on ühesuurused, siis jaguneb elekter ühtlaselt mõlema varva peale, nii et peale teise varva eemaldamist EF peale 2 korda väiksem elektrihulk jääb kui esialgu. Katse näitab, et kerakesed C ja F selle järele lähenevad. Et neid endisele kaugusele r asendada, peame näitaja G tagasipööramisega traadi keerdu niivõrd vähendama, et ka keerdumisnurk 2 korda väiksemaks muutuks. Kui nuppu E veel kord sama elektriseerimata lisavarvaga puudutada, siis väheneb varva EF laeng veel poole võrra, nii et kerakesele F jäänud elektrihulk nüüd 4 korda väiksem on kui esialgu. Selgub, et kerakesed uuesti endisele kaugusele asenduvad, kui traadi keerdumisnurka tema esialgsest suurusest 4 korda väiksemaks teha. Sellest järgneb, et ühel ja samal kaugusel on tõukejõud proportsionaalne kerakeste elektrihulkadega.

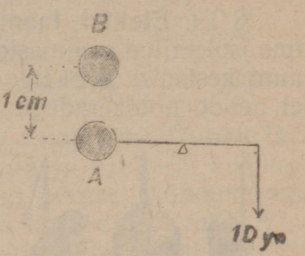
Tõukejõud muutub sama seaduse järele ka siis kui teise kerakese (C) laengut muuta, sellepärast peab tõukejõud proportsionaalne olema mõlema keha elektrihulkade $E_1$ ja $E_2$ kasvatisega. Selle asemel et mõlemaid kerakesi ühenimeliselt elektriseerida, võib neile ka isenimelised elektrihulgad anda. Viimasel puhul tõmbuvad kerakesed külge ning traadi keerdumisnurk annab meile endiselt tõmbejõu suuruse üle selgust. Katsed näitavad, et ülevalleitud 2 seadust maksvad on ka sel juhusel.

Coulombi katsetest järgneb n. n. Coulomb'i seadus:

**Kahe elektrihulga tõuke- ja tõmbejõud on proportsionaalne elektrihulkade suurustega ning ümberpöördult proportsionaalne nende kauguse kvadraadiga.**

2) Selle seaduse põhjal võib ära määrata elektrihulga ehk -laengu üksust. Elektrihulga üksuseks ehk lühidalt elektriüksuseks tarvitatakse seesugust laengut, mis õhus asudes 1 sentimeetri kaugusel seisvat teist samasuurt ja -nimelist laengut 1 düünilise jõuga eemale tõukab. Seda üksust hüütakse absoluutseks elektrostaatiliseks elektriüksuseks ehk laenguüksuseks (ESÜ = elektri staatiline üksus), sest et tema tuletub paigalseisva elektri tõmbejõu seadustest (elektrostaatikast).

Leiame näiteks kaalumise teel, et kerake A eemale tõukub samasuurusest kerakest B (joon. 34) jõuga $\frac{1}{981}$ grammi = 1 düün, juhusel kui mõlemate kerade tsentrumite vahe on 1 cm, siis peab nende kummagi laeng võrduma 1 abs. elektrostaatilise üksusega (1 ESÜ).



Joon. 34.

On ühe kerakese elektrilaeng $E_1$ üksust, siis on Coulombi seaduse põhjal ka tõukejõud $E_1$ korda suurem s. t. $E_1$ düüni. Kasvab teise kerakese laeng $E_2$ üksuseni, siis suureneb tõukejõud veel $E_2$ korda, s. t. ta võrdub $E_1.E_2$ düüniga. Suureneb kaugus kerakeste vahel ühest sentimeetrist kunni r sentimeetrini, siis väheneb tõukejõud $r^2$ võrra; seega on elektrihulkade $E_1$ ja $E_2$ tõukejõud kaugusel r cm.

$$P = \frac{E_1 \cdot E_2}{r^2} \text{ (düüni)} \qquad 3)$$

ESÜ nimetus tuletub formulist (3):

$$E_1.E_2 = r^2.P$$

s. t. (ESÜ).(ESÜ) = (pikkusüksus)$^2$.(jõudüksus).

*CGS*-süsteemis on pikkusüksuse nimetus sentimeeter (*C*) ja jõudüksuse nimetus düün ($CGS^{-2}$, II, § 18), seega on

$$(\text{ESÜ})^2 = (\text{cm})^2.(\text{düün}) = C^2.CGS^{-2} = C^3GS^{-2}$$

millest järgneb ESÜ nimetus:

$$\text{ESÜ} = \sqrt{C^3GS^{-2}} = C^{\frac{3}{2}}G^{\frac{1}{2}}S^{-1}$$

3) Et elektrostaatiline elektriüksus väga väike laeng on, siis tarvitatakse praktikas 3000 miljoni korda suuremat üksust, mida coulombiks (Cb) hüütakse. Seega on

$$1\ \text{Cb} = 3.10^9.\text{ESÜ} \qquad 4)$$

**Näited:** 1) Kahe kerakese ühenimelised laengud on 25 ja 36 ESÜ. Missugusel kaugusel tõukuvad nad eemale jõuga 16 düüni?

1 cm kaugusel on kerakeste tõukejõud formuli (3) põhjal $P = 25.36$ düüni. Otsitud kaugus x cm peab nii suur olema, et

$$\frac{25.36}{x^2} = 16 \text{ (düüni), seega on}$$

$$x = \sqrt{\frac{25.36}{16}} = 7{,}5 \text{ (cm)}$$

2) Kui tugevasti tõmbavad külge 2 ühe kilomeetri kaugusel seisvat kera, mille isenimelised laengud võrduvad 1 coulombiga?

Et 1Cb $= 3.10^9$ESÜ ja 1 km $= 10^5$ cm, siis on formuli (3) järele tõmbejõud

$$P = \frac{E_1 . E_2}{r^2} = \frac{3.10^9 \times 3.10^9}{(10^5)^2} \text{ düüni} = 9.10^8 \text{ düüni.}$$

1 düün $= \frac{1}{981}$ grammi, seega on tõmbejõud kerade vahel

$$\frac{9.10^8}{981} \text{ g} \cong 920 \text{ kg}$$

4) Kahe sentimeetri kaugusel seisvad kerakesed on ühe võrra laetud ja tõukuvad eemale jõuga 0,4 grammi. Kui suur on kerade laeng?

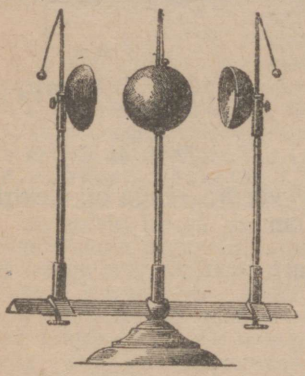
Tõukejõud on $P = 981.0,4$ düüni $= 392,4$ düüni. Kaugus $r = 2$ cm Formuli (3) järele on, kui silmas pidada, et laengud $E_1$ ja $E_2$ on võrdsed

$$E_1 . E_2 = Pr^2 = E^2$$

ehk

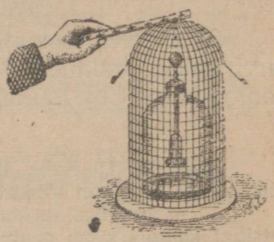
$$E = r\sqrt{P} = 2\sqrt{392,4} = 39,5 \text{ (ESÜ).}$$

§ 19. **Elektri laengu jagunemine juhi pinnal.** 1) Nihutame isoleeritud sammastele kinnitatud õõnsad poolkerad (joon. 35) kunni keskmise elektriseeritud kerani ja ümbritseme sel kombel nende poolkeradega elektriseeritud kera pinna. Kui poolkerad uuesti laiali nihutada, siis näeme, et nende peale kinnitatud elektripendlikesed laiali tõukuvad, kuna kera pendlikene, mis enne eemale tõukus, nüüd alla ripub. Poolkerad on nähtavasti kera kogu elektri enesesse võtnud. See aga on võimalik ainult sel juhusel, kui kera kogu laeng tema välisel pinnal asub, sest et poolkerad ainult selle pinna külge puutusid. Niisugustest katsetest järgneb seega, et **juhi kogu laeng asub tema välisel pinnal.**



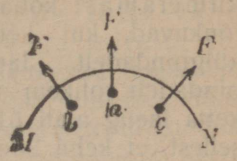
Joon. 35.

Veel selgemini tõestab nimetatud seadust järgmine katse: Asetame tundliku elektroskoobi isoleeritud alusele, kummutame tema peale kuplisarnase traatvõre (joon. 36) ning ühendame võre all seisva elektroskoobi nupu juhi kaudu võrega. Kui võre elektriseerida, siis näeme küll, et tema seintele kinnitatud pendlikesed laiali tõukuvad, kuna elektroskoobi lehekesed alla ripuvad: olgugi et elektroskoobi nupp ja traatvõre juhiga on ühendatud, ei lähe elekter võre sees seisvasse elektroskoopi, vaid hoidub ainult võre pinnal. Faraday puges koguni ise suurde isoleeritud metallkambrisse ja ei võinud seal ka kõige tundlikkumate elektroskoopidega mingisugusid elektrilisi avaldusi tähele panna, olgugi et kambrit väga tugevasti elektriseeriti. Kõik see tõestab, et elekter tõepoolest ainult juhtide välisel pinnal hoidub.



Joon. 36.

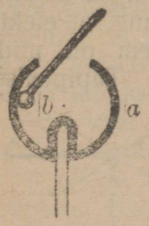
2) Oletades, et elekter samuti kui mateeriagi üksikutest iseseisvatest osakestest koos seisab, seletub leitud seadus nende osakeste üks-teisest eemaletõukumise abil. Et näiteks positiivselt elektriseeritud juhi „üleliigne" elekter (§ $17_2$) tasakaalus peab viibima, siis peab resulteeriv tõukejõud, mis mingit elektriosakest a (joon. 37) kõigist teistest osakestest eemale tõukab, perpendikulaarne olema juhi pinnale MN, sest vastasel korral võiks seda resultantjõudu lahutada normaalseks ja tangentsiaalseks komponendiks, millest viimane elektriosakest mööda juhi pinda edasi peaks tõukama, mida tasakaalus oleva elektri puhul aga mitte ei sünni. Juhi pinnale perpendikulaarselt mõjuv resultantjõud F tõmbab elektriosakesi a, b, c jne. oma sihis kunni juhi pinnani, kust nad enam edasi ei pääse ja kus nad selle tõttu koonduvad.



Joon. 37.

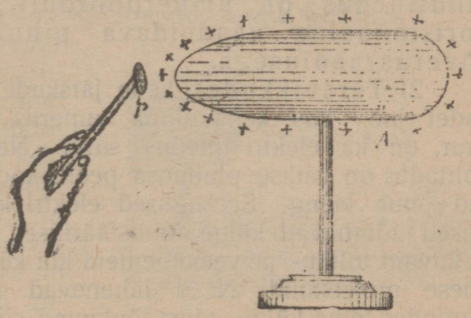
3) Et isoleeritud juhile antud laeng ainult tema pinnale jääb, siis mahub õõnsasse kehasse sama palju elektrit kui massiivsessegi. Tahame elektrit isoleeritud juhisse (konduktorisse) koondada, siis on see täiesti ükskõik, kas on see juht massiiv või õõnes; näiteks võime hõbetatud korgikerasse sama palju elektrit koondada kui samasuurde hõbekerasse. Elektriaparaatide nupud, kerad jne. on sellepärast harilikult õõnsad.

Mõnedel katsetel on tarvilik, et isoleerivale käepidemele kinnitatud nupp b (joon. 38) — n. n. proovikehakene terve oma laengu ära annaks mingi teisele kehale, näiteks elektroskoobile. Sel puhul kinnitatakse elektroskoobi varva otsa nupu asemele õõnes metallkera a, millel nii suur avaus, et proovikehake vabalt kera õõnsusse pääseb. Proovikehaga kera a õõnsuse puudutamisel voolab esimese laeng kera välisele pinnale ning sealt elektroskoopi. Kui proovikeha õõnsusest nii välja võtta, et ta kera a avause välimist äärt ei puutu, siis jääb proovikeha täiesti ilma elektrita.



Joon. 38.

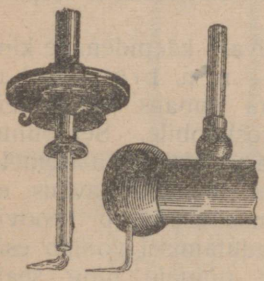
§ 20. **Elektri tihedus kehade pinnal; teravikud.** 1) Kui väike proovikehake — eboniitvarrele kinnitatud metallketas P (joon. 39)—elektriseeritud konduktori A pinna külge lapiti panna, siis ei jää konduktori pinna kaetud osal asuv elekter mitte ketta ja konduktori vahele, vaid ta tõukub



Joon. 39.

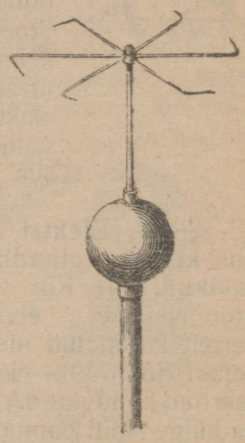
ketta välimisele (tagumisele) pinnale (võrdle § $19_3$). Prooviketta eemaldamisel jääb sellepärast kogu see laeng kettale, mis asus A kaetud pinnaosal. Ülekandes selle laengu proovikettaga elektroskoopi, võib viimase lehekeste eemaletõukumise järele otsustada laengu suuruse üle. Katse näitab, et elektroskoobi lehekesed siis kõige laiemale tõukuvad, kui prooviketas oma laengu keha A kõige kumeramast kohast sai, ja et lehekesed kõige nõrgemini eemale tõukuvad, kui ketta laeng pärit on keha A lamedatelt külgpindadelt. Järjelikult saab prooviketas keha A kumeratelt pindadelt rohkem elektrit kui tema lamedatelt pinnaosadelt. Et ketta laeng alati ühesuuruselt pinnaosalt võetakse, siis järgneb sellest, et keha kumeratel pindadel elektri laeng tihedamini on koondatud kui tema lamedatel pindadel, ehk **elektri pindtihedus on seda suurem, mida kumeram on juhi pind.**

Kera puhul on juhi pind igal pool ühevõrra kumer; sellepärast peab ka kera pindtihedus igal pool ühesuurune olema. Katse näitab, et elektri laeng kera pinnal tõepoolest ühtlaselt jaguneb, kuna tema jagunemine kõigil teistel kehadel on mitteühtlane. Metallkubikui leiame näiteks, et elektri tihedus kõige väiksem on kubiku tahu keskkohas, suurem on ta servadel, kõige suurem aga kubiku nurkadel.



Joon. 40.

Kui mitmesuurused isoleeritud metallkerad peene traadiga ühendada ja neid elektriseerida, siis võib kogu süsteemi peale vaadata kui üheainsa liitkeha peale. Prooviketta abil leiame, et elektri tihedus keradel seda suurem on, mida väiksem on nende raadius. Täpipealsemad mõõtmised näitavad, et tihedused ümberpöördult proportsionaalsed on kerade raadiustega. Sama seaduse järele jaguneb elekter ka iga teisekujulise juhi pinnal: elektri pindtihedus on ümberpöördult proportsionaalne vaadeldava pinnaosa kõverusraadiusega.



Joon. 41.

2) Teravikkudel, keha järskudel servadel jne., kus keha pinna kumerus väga suur, on ka elektri tihedus suur. Nendes kohtades on väikse pinnaosa peale koondatud suur laeng. Seesugused elektri koondused tõmbavad külge atmosfäärilises õhus leiduvaid tolmu- ja veekübemeid kui ka õhu enese moleekulid. Need lähenevad teravikule, elektriseeruvad, puutudes tema külge, ning tõukuvad siis tugevasti eemale (§ $15_1$). Nii sünnib terve vool teravikult tulevatest õhuosakestest, mis

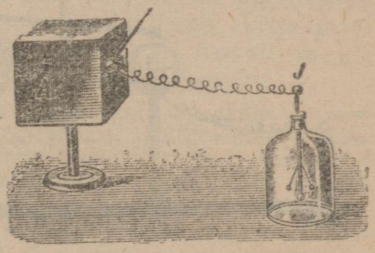
avaldub elektri tuulena. Kinnitame näiteks konduktorile terava nõela (joon 40) ja elektriseerime teda tugevasti, siis „puhub" teravikult nii tugev tuul, et lähendatud küünla leek kõrvale paindub. Samasuguse tuule mõjul hakkab tiirlema sellekohane elektri tuulratas (joon. 41), mille harude teravikkudest õhk eemale tõukub ning mille printsiip sama on kui Segneri vesiratta oma (II, § $64_2$).

Teravikult tagasipõrkuvad elektriseeritud õhujaokesed kannavad osa teraviku laengust enesega kaasa. Selle tõttu väheneb teravikuga varustatud keha laeng väga kiirelt. Kui elektroskoobi nupu külge nõel kinnitada, siis langevad tema lehekesed peale laadimist varstigi kokku, kuna sileda nupuga elektroskoop oma laengu kaua alles hoiab. Sellepärast peavad konduktorid, millele elektrit koondada tahetakse, võimalikult sileda pinnaga ja ilma teravate servadeta või otsadeta olema.

§ 21. **Kehade elektriseerumisaste ehk potentsiaal.** 1) Et elektri osakesed omavahel eemale tõukuvad, siis viibib keha pinnal asuv elektriosake alaliselt teiste osakeste tõukejõudude mõju all, mille tagajärjel ta võimalikult kaugele teistest osakestest tahaks asenduda. Puudutame näiteks elektriseeritud proovikehakesega kera (joon. 38) ôônsust, siis tõukuvad elektriosakesed sealt igale poole võimalikult kaugele laiali ning jäävad alles kera välisel pinnal peatama, sest et seal nende edasiliikumine takistub. Ühendaksime aga kirjeldatud kera näiteks traadi kaudu mingi teise juhiga, siis tõukuksid elektriosakesed mööda traati veel kaugemale ning asenduksid ka teise juhi pinnale. Sellest näeme, et elektriosakesed keha pinnal on pinevil, sarnaselt nagu kokkusurutud spiraalvedru osakesed, mis üks-teisest kaugeneda tahaksid ja mis ainult sellepärast paigal seisavad, et mingi väline tõke vedru pikeneda ei lase. Seesugust pinevust hüütakse elektriseeritud keha potentsiaaliks.

Mida rohkem elektrit me isoleeritud kehale anname, seda rohkem elektriosakesi koondub sinna, seda tugevamini peavad nad üks-teisest eemale tõukuma. Järjelikult peab nimetatud pinevus ehk keha potentsiaal seda suurem olema, mida suurem on tema laeng. Oletatakse, et keha potentsiaal on proportsionaalne tema laenguga (põhjendus vaata § 32).

Potentsiaali peale võib vaadata kui keha elektriseerumisastme peale. Samuti nagu keha soenemisaste (temperatuur) seda suuremaks kasvab, mida rohkem kehale sooja anname, nii tõuseb ka keha potentsiaal tema laengu kasvamisel. Elektri potentsiaaliga on mitmeti sarnane ka gaasi rõhumine ja vedeliku nivookõr-



Joon. 42.

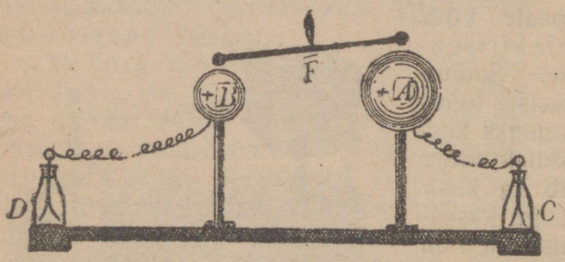
gus: mida rohkem gaasi kinnisesse nõusse suruda, seda suuremaks kasvab rõhumine; mida rohkem vett anumasse pumbata, seda kõrgemale tõuseb vee nivoo.

2) Elektriseerime isoleeritud juhi näiteks kubiku A (joon. 42) teatud astmeni ning puudutame tema külge proovikehakesega, mis peenikese traadi kaudu ühenduses on elektroskoobi nupuga J. Osa elektrijaokesi tõukub traati mööda elektroskoobi lehtedele ning viimased tõukuvad laiali. Et lehed seda kaugemale laiali peavad tõukuma, mida rohkem elektrit nende pindadele koondub (Coulombi seadus), ja et koondumine seda suurem on, mida rohkem elektriosakesi kubikult elektroskoopi tõukub, s. t. mida suurem on kubiku potentsiaal, siis on elektroskoobi lehekeste laialitõukumise kaugus mõõduks kubiku elektriseerumisastmele ehk tema potentsiaalile. Katsetel näeme tõepoolest, et lehekesed seda kaugemale tõukuvad, mida rohkem elektrit me kubikule anname, s. t. mida suuremaks teeme tema potentsiaali.

Vedades proovikehakest mööda kubiku pinde ja servi (joon. 42), näeme, et elektroskoobi lehekesed selle juures liikumatult paigal seisavad; nad ei lange koomale ega tõuku laiemale. Sellest peab järeldama, et potentsiaal kubiku pinna kõigis punktides ühesuurune on, vaatamata selle peale, et tema servadel elektri tihedus suurem on kui tahkudel (§ $20_1$). Potentsiaal ei olene nii siis elektri jagunemisest juhi pinnal, ta on kogu juhil ühesuurune, vaatamata selle peale, missugune on juhi kuju.

Viimane asjaolu paistab arusaamatuna, sest peaks arvama, et nendes punktides, kus tihedus suurem, ka potentsiaal suurem on. Lähemalt vaadates selgub aga, et mõlemad suurused tõepoolest rippumatud peavad olema: tiheduse määramisel võtame proovikehaga ainult selle laengu osa, mis ketta alla jääb (§ $20_1$); mil viisil elekter keha teistel osadel on jaotatud, see on täiesti ükskõik. Potentsiaali aga ei määra mitte ainult see elektrihulk, mis vaadeldavas punktis asub, vaid mõõduandvad on siin ka kõik teised elektriosakesed üle kogu juhi pinna, tõukab ju antud punktis (näiteks proovikehakese puutumiskohas, joon. 42) asuvat elektriosakest mitte ainult tema lähem naaberosake, vaid seda teevad ka kõik kaugemalseisvad teised elektriosakesed. Matemaatiline juurdlus näitab, et resulteeriv tõukejõud juhipinna igas punktis tõepoolest ühesuurune peab olema.

3) Ühendame isoleeritud konduktorid A ja B (joon. 43) kahe ühesuguse elektroskoobiga ning elektriseerime mõlemad konduktorid ühenimeliselt nii, et elektroskoopide lehekesed ühekaugusele laiali tõukuvad. Eelmise järele peavad siis mõlema konduktori potentsiaalid ühesuurused olema. Nüüd ühendame A ja




Joon. 43.

B isoleeritud käepidemel hoitava traadiga (F): Selgub et peale ühendamist mõlemad elektroskoobid endist potentsiaali näitavad. Ühendamisel ei võinud järjelikult elektrit ühelt kehalt teisele voolata, sest muidu oleksid kehade laengud ja ühes sellega ka nende potentsiaalid muutunud. Nii siis: On kehade potentsiaal ühesuurune, siis ei muutu nende laengud, kui kehad mingi juhiga ühendada, vaid elekter viibib seesugustel kehadel tasakaalus.

Nüüd elektriseerime keha A kõrgema potentsiaalini kui keha B, nii et elektroskoobi C lehekesed laiemale tõukuvad kui D omad. Ühendades endisel kombel mõlemad konduktorid, näeme, et C lehekesed koomale langevad, D omad aga veel laiemale tõukuvad, kunni mõlemad ühelaiuselt püsima jäävad. Sellest selgub, et konduktorite ühendamisel A potentsiaal langeb ja B oma tõuseb, kunni mõlemad ühesuuruseks saavad. Ühendustraati mööda peab järjelikult osa elektrit konduktorilt A konduktorile B voolama:

**Elekter voolab kõrgema potentsiaaliga juhilt madalama potentsiaaliga juhile, kunni mõlema potentsiaalid ühesuuruseks saavad.**

Samuti voolab soojus kõrgema temperatuuriga kehast madalama temperatuuriga kehasse, kunni kehade temperatuurid ühesuuruseks muutunud; sarnaselt voolab gaas suurema rõhumise all seisvast nõust väiksema rõhumisega nõusse, ning vedelik kõrgema nivooga nõust madalama nivooga nõusse. Ka siin avaldub analoogia potentsiaali ning temperatuuri, rõhumise ja nivookõrguse vahel.

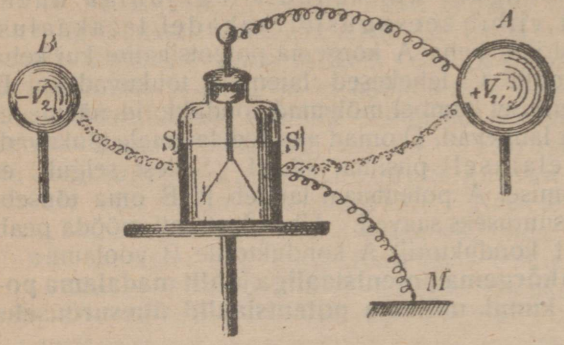
4) Elektroskoobi nupu ühendamisel maaga langevad tema lehekesed kokku, s. t. nende tõukumise suurus on sel puhul null. Et lehekeste tõukumise kaugus potentsiaali mõõduks on, siis võime järjelikult maakera potentsiaali nulliks pidada.

Laeme kaks ühesugust konduktori (joon. 43) vastupidiste elektritega kunni nendega ühendatud elektroskoopide lehekesed ühekaugusele laiali tõukuvad. Sarnasel puhul on kehade potentsiaal (arvuliselt) ühesuurune. Kui aga konduktorid ühendada, siis langevad mõlema elektroskoobi lehekesed sootumaks kokku, millest järgneb, et kehade potentsiaal peale ühendamist nulliks, s. t. sama suureks muutub kui maakera omagi. See on võimalik ainult siis, kui ühe konduktori potentsiaal maakera omast (= 0) suurem oli, teise oma aga vastavalt väiksem. Nullist väiksemad suurused aga on negatiivsed, sellepärast peame ühe keha potentsiaali negatiivseks (—), teise oma positiivseks (+) pidama. Tingimisi nimetame + E-ga laetud keha potentsiaali positiivseks, — E-ga laetud keha potentsiaali negatiivseks.

Samuti nagu me tingimisi valisime temperatuuri 0-punktiks sulaneva jää temperatuuri, nimetades kõrgemaid temperatuure positiivseteks, madalamaid negatiivseteks, nii valime ka potentsiaali 0-punktiks ainult tingimisi maakera potentsiaali. Seesuguse valiku põhjuseks on asjaolu, et maakera potentsiaal tuntavalt ei muutu, kui temale ühte või teist laengut juure anda, sest maakera on võrdlemisi maapealsete kehadega niivõrd suur, et viimaste laengud tema potentsiaali peale mingit mõju ei avalda.

5) Me võime nii siis potentsiaali ainult võrdlemisi maapotentsiaaliga mõõta, s. t. me ei mõõda kunagi potentsiaali absoluut suurust,

vaid ikka ainult kahe keha potentsiaalide vahet. On ühe keha potentsiaal võrdlemisi maaga $+V_1$, teise oma $+V_2$, siis on potentsiaalvahe mõlema keha vahel $V_1 - V_2$. Potentsiaalvahet kahe keha vahel hüütakse ka pingeks nende kehade vahel.




Joon. 44.

Ka elektroskoobiga mõõdame alati ainult pinget, s. t. potensiaalvahet elektroskoobi lehekeste ja tema nõu seinte vahel. Et elektroskoobi nõu harilikult ühedatud on maaga, siis võrdub tema potentsiaal maapotentsiaaliga ning elektroskoop näitab mõõdetava keha ning maakera potentsiaalvahet.

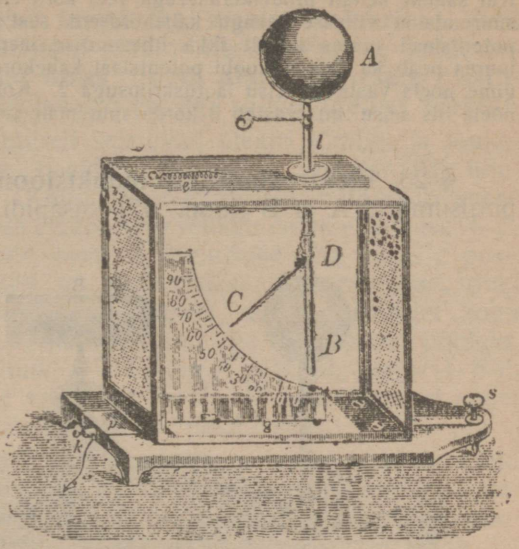
Selle tõestamiseks tarvitatakse metallseintega elektroskoopi SS (joon. 44). Kui seesugune elektroskoop isoleeritud alusele asendada ja tema nupp ning seinad mõõdetava kehaga A ühendada, siis on lehekeste ja seinte S potentsiaalid ühesuurused, seega pinge nende vahel null. Katse näitab, et elektroskoobi lehekesed selpuhul üleüldse laiali ei tõuku, s. t. et nad tõepoolest potentsiaali 0 näitavad. Kui elektroskoobi sein S maaga (M) ühendada, siis omandab ta maa potentsiaali (0), kuna lehekestele jääb keha A potentsiaal $= V_1$. Pinge seina ja lehekeste vahel on nüüd $+V_1 - 0 = +V_1$; me näeme, et lehekesed sel juhusel harilikul kombel (s. t. samuti nagu klaasseinte puhulgi) laiali tõukuvad. Ühendaksime isoleeritud elektroskoobi seina (S) mingi negatiivselt elekriseeritud kehaga B, mille potentsiaal olgu $-V_2$, siis on pinge lehekeste ja seina vahel $V_1 - (-V_2) = V_1 + V_2$, seega suurem kui eelmisel juhusel. Katse näitab, et lehekesed nüüd palju kaugemale laiali tõukuvad, s. t. tõepoolest suuremat potentsiaalvahet näitavad kui eelmisel juhusel.

§ 22. **Elektromeetrid; potentsiaalvahe üksus.** 1) Elektromeetriks hüütakse seesugust elektroskoopi, mille abil võimalik on mõõta potentsiaalvahet antud keha ja maa või mingi teise keha vahel.

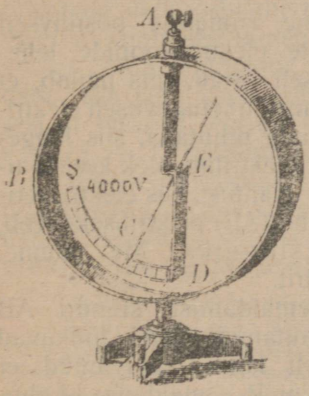
Joonistus 45 kujutab Kolbe ehitatud elektromeetrit. Metallvõrega ümbritsetud kastikesse ulatab iloleeritult läbi kastikaane minev metallvarb B. Punktis D on varva külge kinnitatud üliõhuke alumiiniumleheke C, mis elektriseerumisel varva alumisest otsast kergesti eemale tõukub. Sellejuures liigub lehekese ots skaalat mööda, millel ära on märgitud lehekese igale seisule

vastav potentsiaalvahe suurus mingisugustes üksustes. Kastikese seinad ühendatakse maaga, nii et elektromeeter näitab potentsiaalvahet nupuga A ühendatud keha ning maa vahel.

Suuremate potentsiaalvahede mõõtmiseks tarvitatakse tihti Brauni elektromeetrit (joon. 46). Läbi rõngasarnase metallkere B läheb isoleeritud varb AD, mille alumine ots kannab skaalat DS. Keskkohas (E) on varb kaks korda täisnukselt murtud ning läbi varvasse lõigatud pilu ripub horisontaalvõllikesele kinnitatud kerge alumiiniumnõel C. Raskuse mõjul hoidub nõel C paralleelselt




Joon. 45.




Joon. 46.

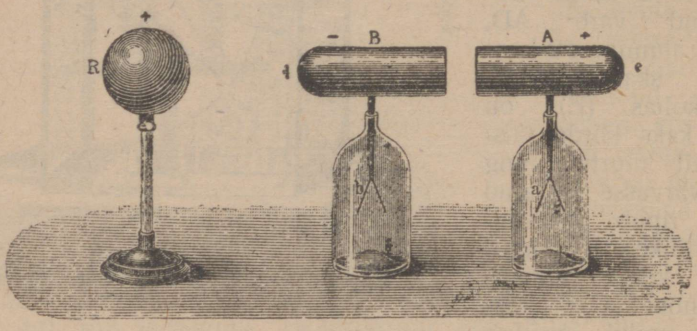
varvale ED ning tema ots seisab skaala 0-punktil. Elektriseerudes tõukub nõel samasuguselt elektriseeritud varvast DE eemale ning asendub längu. Nõela ots pöördub siis skaala mingile jaotusele, millel märgitud on vastav potentsiaalvahe nõela (ja temaga ühendatud nupu A) ning kere B vahel. Ka siin ühendatakse kere harilikult maaga ja mõõdetakse seega potentsiaalvahet võrreldes maaga.

2) Potentsiaalvahe ehk pinge üksusena tarvitatakse praktikas volti. Üks volt on see potentsiaal (võrreldes maaga), mille omandab ühe sentimeetrilise raadiusega kera, kui temale anda 1 elektrostaatiline laengüksus (täpipealsem definatsioon vaata § $32_4$). Elektromeetrite skaaladele märgitakse potentsiaalvahe harilikult voltides.

Elektromeetri skaala valmistamiseks tuleb teda gradueerida. Selleks võrreldakse antud elektromeeter mingi teisega, mille skaala jaotused on mingil teisel teel varemalt leitud. Juhuslistes üksustes saame skaala, kui gradueerimist järgmiselt toimetame: laeme mingi suurema isoleeritud keha ja hoiame

teda kogu katse aeg ühesuuruse potentsiaali juures. Nüüd puudutame proovikerakesega seda keha, võtame temalt teatud elektrihulga ja kanname selle elektrooskoobi nupu peale. Märgime elektroskoobi nõela seisu skaalal numbriga 1. Kui samalt kehalt proovikerakesega veel kord elektrit elektroskoopi tuua, siis suurendame viimase laengu kahekordseni, sest et proovikerake ühe ja sama potentsiaali juures kehalt ikka ühesuuruse laengu saab. Kahekordse laengu juures peab ka elektroskoobi potentsiaal kahekordseks saama; sellepärast märgime nõela vastavat seisu jaotuskriipsuga 2. Kolmanda laengu järele asendub nõela ots seisu, mis vastab 3 korda suuremale potentsiaalile jne.

§ 23. **Elektrostaatiline induktsioon.** 1) Lükkame juhtivad poolsilindrid A ja B (joon. 47) otsapidi kokku, nii et nad ühe




Joon. 47.

pika silindri moodustavad ning lähendame viimasele positiivselt laetud konduktori R: silindrid hoidvate elektroskoopide lehekesed tõukuvad selle juures ühetugevuselt laiali, mis näitab, et kummagi silindripool konduktori lähenemisel ühetugevuselt elektriseerub. Kui konduktor R tagasi kaugemale nihutada, siis langevad lehekesed uuesti kokku, s. t. silindri elektriline olek kestab ainult senni, kunni R silindri läheduses asub. Nähtust, kus elektriseeritud keha (R) teist, tema lähedal asuvat keha (AB) elektriliseks teeb, hüütakse elektrostaatiliseks induktsiooniks. Me ütleme, et keha R indutseerib silindris AB elektrit.

Lahutame enne konduktori R eemaldamist silindri AB pooleks (vaata joonistust 47). Ka lahutamise järel tõukuvad mõlema elektroskoobi lehekesed endiselt laiali, kuid nüüd ei lange nad ka siis mitte enam kokku, kui R eemaldada. Lahutatud silindripooled jäävad nii siis elektrilisteks ka peale R mõju kadumist.

Elektripendli või kolmanda elektroskoobi abil leiame, et silindripool B on laetud negatiivselt, s. t. vastupidiselt konduktorile R, silindripool A aga positiivselt, s. t. samanimeliselt kui R. Lükkame elektriseerunud silindripooled uuesti kokku, siis langevad mõlema elektroskoobi lehekesed alla, millest järeldama peab, et silindripooltel indutseeritud isenimelised laengud ühe-

suurused pidid olema, sest et ainult ühesuurused vastupidised laengud ühinemisel neutraliseeruda võivad (§ $17_2$). Katsest järgneb seadus:

**Elektriseeritud keha läheduses asuva isoleeritud juhi otsades ilmuvad ühesuurused isenimelised laengud. Indutseeriva keha poole pöördud otsas ilmub alati esimesele vastupidine, temast kaugemalseisvas otsas aga samanimeline elekter.**

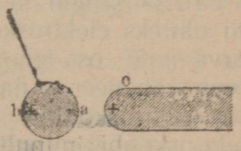
2). Induktsiooni nähtused seletuvad elektri tõmbe- ja tõukejõududega. § $17_2$ järele sisaldab neutraalne silinder AB ühevõrra + E-d ja — E-d. Konduktoril R asuv + E tõmbab enese külge silindri AB negatiivse elektri ning tõukab eemale viimase + E. Selle tõttu koondub silindri otsas d negatiivne ning otsas c positiivne elekter. R kaugenemisel kaob tõuke- ja tõmbejõud, ning silindril eraldatud elektrid seguvad uuesti, mille tagajärjel kogu silinder neutraliseerub. Lahutame silindri aga R läheduses pooleks, siis hoidub B peal teatud hulk —E-d ning A peal samapalju + E-d; mõlemad laengud ei saa nüüd ka peale R eemaldamist enam ühineda ja B jääb negatiivseks, A — positiivseks.

3) Puudutame sõrmega R läheduses seisvaid kokkulükatuid poolsilindrid, siis tõukub otsas c asuv + E konduktorist R võimalikult kaugele ning voolab selle tõttu läbi meie keha maasse. Otsas d asuv — E tõmbub R külge, ta on seotud ja jääb ka peale puutumist silindrile. Sellepärast näeme katsel, et sõrmega puutumisel elektroskoobi a lehekesed kokku langevad, kaotavad nad ju oma + E, mis vaba oli ning ära voolas. Sellevastu aga tõukuvad elektroskoobi b lehekesed peale puudutamist veel tugevamini laiali, sest et nende laengule (— E) vastu mõjuv + E ära voolas. Kui konduktor R peale silindri külge puudutamist eemaldada, siis jääb kogu silinder AB negatiivselt elektriseerituks, sest et otsas d seotud — E nüüd üle kogu silindri jaguneb ja vastava + E puudumisel enam neutraliseeruda ei või. Nii siis:

Kui elektriseeritud keha läheduses asuvat juhti (AB) puudutada, siis voolab indutseeriva keha laenguga samanimeline vaba elekter maasse, kuna vastupidine seotud elekter juhile jääb ning viimast elektriseerib.

4) Induktsiooni seadustega seletuvad mitmed elektrilised nähtused:

a) neutraalse ja elektriseeritud keha külgetõmbumise põhjuseks on asjaolu, et induktsiooni mõjul kehas mõlemad elektrid lahutuvad. Elektriseeritud keha c (joon. 48) läheduses ilmub vastupidine laeng (a), kuna samanimeline laeng kõige kaugemasse punkti b tõukub. Keha c tõmbab laengut a külge ning tõukab laengut b eemale. Et a lähemal on kui b, siis on tõmbejõud suurem tõukejõust ja kogu keha ab tõmbub c külge, vaatamata selle peale, kas c laeng on positiivne või negatiivne.

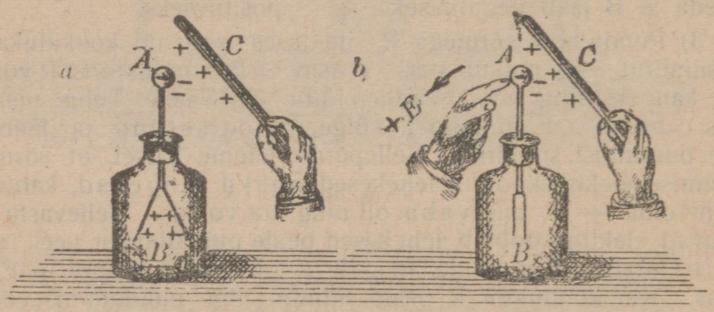


Joon. 48.

b) Ka elektri ülekandumine kehade kokkupuutumisel on induktsiooni järeldus: Juba enne, kui elektriseeritud keha saab teise keha külge puutuda, indutseerib ta viimases mõlemaid elektrid. Kokkupuutumisel neutraliseeruvad

indutseeriv ja indutseeritud vastupidine elekter, nii et puudutatud kehale alles jääb ainult samanimeline elekter. Meile paistab sellepärast, nagu läheks külgepuutumisel elektriseeritud keha laeng elektriseerimata kehale. On esimene keha tugevasti elektriseeritud, siis võib teisel kehal indutseeritud vastupidine elekter juba enne külgepuutumist elektri sädemena ühineda esimese keha elektriga. Ka sel puhul jääb teisele kehale järele ainult samanimeline elekter; meile paistab nagu hüppaks esimese keha laeng sädemena teise, elektriseerimata keha peale.

c) Elektriseeritud keha, näiteks hõõrutud klaasvarva lähendamisel elektroskoobi nupule tõukuvad viimase lehekesed juba enne külgepuutumist laiali. Ka selle nähtuse põhjuseks on induktsioon: Klaasvarva C (joon. 49-a) lähenemisel kogub elektroskoobi nupule A vastupidine — E, kuna samasuur hulk + E-d lehekestele B tõukub, mille tõttu viimased laiali lähevad. Eemaldame klaasvarva, siis seguvad mõlemad elektrid elektroskoobi varval ning lehekesed langevad kokku. Kui klaasvarva läheduses hoitud nupu A külge sõrmega puudutada, siis voolab vaba + E elektroskoobi lehtedelt maasse (joon. 49-b) ja viimased, olles



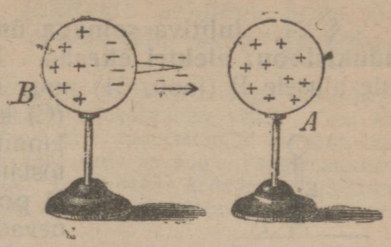

Joon. 49.

nüüd ilma laenguta, langevad kokku. Eemaldame aga peale puudutamist varva C, siis vabaneb nupul A seotud — E ning jaguneb üle kogu elektroskoobi. Ka lehekesed saavad laengu — E ning tõukuvad selle tõttu laiali.

Induktsiooniga seletub ka, miks elektriseeritud elektroskoobi lehekesed vastupidise elektri lähendamisel koomale langevad ja samanimelise elektri lähendamisel laiemale tõukuvad: Oli näiteks elektroskoobi laeng alguses — E, siis tõmbab klaasvarva + E osa lehekeste — E-d elektroskoobi nuppu. Lehekeste laeng väheneb ja nad langevad koomale. Lähendame seesugusele elektroskoobile aga eboniitvarva, siis tõukab viimase — E elektroskoobi nupult veel rohkem — E-d lehekestele. Seega kasvab viimaste laeng ja nad tõukuvad kaugemale laiali.

5) Kui elektriseeritud kera A (joon. 50) lähedusse teine elektriseerimata kera B paigutada, mille külge terav nõel on kinnitatud, siis indutseerib esimese kera + E tema poole pöördud teravikül — E. Teravikult voolab see — E elektri

tuulena õhku (§ $20_2$). Negatiivselt elektriseeritud elektri tuule jaokesed tõmbuvad keha A pinna ⁻ külge ning neutraliseerivad seal järk-järgult keha A positiivset laengut. Selle tagajärjel väheneb keha A laeng, kuna keha B samal ajal + E-ga elektriseerub, sest et teravikust võib välja voolata ainult — E, millega kehasse B teatud osa üleliigset + E-d jääb. Meile paistab nagu imeks teravik tema lähedal seisvast elektriseeritud kehast (A) elektrit (+ E) enesesse, kunni mõlema keha potentsiaalid ühesuuruseks saavad.



Joon. 50.

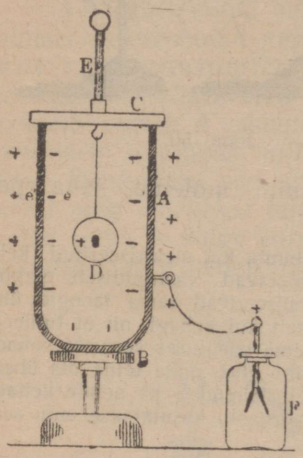
Eelmisega väga sarnane on nähtus, mis ilmub, kui elektriseeritud keha läheduses tulileeki hoida: Ka tulileegist voolavad vastupidiselt elektriseeritud gaasiosakesed keha pinnale ja neutraliseerivad tema laengut; ühtlasi elektriseerub siis tulileek ise samanimeliselt kui kehagi, nii et tulileegi potentsiaal ruttu samasuuruseks kasvab kui tema läheduses seisvate kehade oma. Hoiame leegis näiteks isoleeritud traadi üht otsa, mille teine ots ühendatud elektromeetriga, siis näitab viimane leegi, tähendab ka nende kehade potentsiaali, mis leegi läheduses seisavad. Seda asjaolu kasutatakse muu seas atmosfäärilise õhu potentsiaali mõõtmistel.

6) Induktsioonil lahutatud elektrihulkade suuruste kohta annab selgust järgnev katse: Elektromeetri nupule lähendame elektriseeritud kera kunni elektromeetri nõel näiteks jaotuskriipsule 1 asendub. Olgu selle juures kera ja elektromeetrinupu kaugus r cm. Nihutame kera järk-järgult nupu poole, siis tõuseb järk-järgult elektromeetri nõel. Katse näitab, et kui kera seisab kaugusel $\frac{1}{2}$ r, siis elektromeetrinõel asub jaotuskriipsul 4, kaugusel $\frac{1}{3}$ r tõuseb elektromeetrinõel jaotuskriipsuni 9 jne. Et elektromeetrinõela potentsiaal (1, 4, 9 jne.) on proportsionaalne elektromeetris indutseeritud laengutega, siis järgneb katsest, et üks ja sama elektriseeritud keha indutseerib teises kehas (elektromeetris) elektrihulgad, mis kaugustel r, $\frac{1}{2}$ r, $\frac{1}{3}$ r, jne. proportsionaalsed on arvudega 1, 4, 9 jne. = $1^2$, $2^2$, $3^2$ jne., s. t., et induktsioonil lahutatud elektrihulgad on ümberpöördult proprotsionaalsed indutseeriva keha kauguse kvadraadiga.

Nüüd hoiame indutseeriva kera elektromeetri nupust konstant kaugusel ja puudutame teda samasuuruse teise elektriseerimata isoleeritud keraga. Puudutamisel annab esimene kera poole omast laengust teisele. Katse näitab, et peale teise kera eemaldamist elektromeetri nõel langeb, — näiteks jaotuskriipsult 4 kriipsuni 2. Puudutame indutseerivat kera veel kord sama neutraalse teise keraga, siis väheneb tema laeng kunni $\frac{1}{4}$ tema esialgsest suurusest. Elektromeetri nõel aga langeb selle järele jaotuskriipsuni 1 jne. Selgub, et ühel ja samal kaugusel on

indutseeritud elektrihu gad proportsionaalsed indutseeriva keha laenguga

§ 24. **Juhtiva seinaga ümbritsetud elektriseeritud keha induktsioon; elektri ekraan.** 1) Asetame metallnõu A isoleerivale alusele B (joon. 51) ning riputame siidinööriga nõu kaane (C) külge metallkera D. Kaane külge kinnitatud isoleeriva käepideme E-ga tõstame kaane üles, elekriseerime kera D positiivselt ning teeme siis järgnevad katsed;



Joon. 51.

a) Langetame D nõusse, ilma et ta viimase seinu puudutaks. Nõu välisseinaga ühendatud elektroskoop F näitab siis positiivset laengut, mille suurus ei olene keha D asukohast, sest D tõstmisel või langetamisel ei muutu elektroskoobi lehekeste tõukumine: Keha D indutseerib nõu sisepinnal—E ja tema välispinnal +E (joon. 51); ainult viimane on vaba, mille tõttu elektroskoopi ainult +E pääseb. Järjelikult ei olene indutseeritud vaba +E hulk indutseeriva keha D asukohast.

b) Puudutame nüüd sõrmega nõu A külge, siis langevad elektroskoobi lehekesed kokku, sest et vaba +E nõu välispinnalt maasse voolas, kuna seotud —E nõu sisepinnalt elektroskoopi ei pääse.

c) Peale puudutamist tõstame kera D nõust välja, ilma et ta selle juures nõu seinu puudutaks. Selgub et selle järele elektroskoobi lehekesed uuesti laiali tõukuvad ja nimelt täpipealt sama kaugele kui katsel a. Elektroskoobi laeng aga on nüüd negatiivne: Peale kera D eemaldamist vabaneb nõu sisepinnal seotud — E, jaguneb üle nõu A kogu pinna ja voolab ka elektroskoopi.

d) Väljatõstetud keraga D puudutame nõu A seina: elektroskoobi lehekesed langevad uuesti kokku, sest et kera D laeng (+ E) neutraliseerib nõu laengu (— E).

Nendest katsetest järgneb:

**Mõlema indutseeritud elektri hulgad on võrdsed,** sest et elektroskoobi lehekesed ühekaugusele laiali tõukuvad nii katsel a (vaba + E mõjul) kui katsel c (seotud — E mõjul).

**Nõu seintel indutseeritud elektrihulgad võrduvad indutseeriva keha (D) laenguga,** sest et kera D puutumisel seina A külge esimese laeng neutraliseerib teise oma (katse d).

Viimast asjaolu kasutatakse selleks, et mõõta antud keha laengu suurust, ilma et keha külge puutuda ja tema laengut mõõtmisel vähendada: mõõdetav keha riputatakse isoleeritult metallnõusse (joon. 51), n. n. Faraday

silindrisse ning mõõdetakse isoleeritud nõu välisel pinnal indutseeritud laengu suurust, mis eelmise järele võrdub keha laenguga. Teadagi hoidub antud keha laeng selle juures tervelt alles.

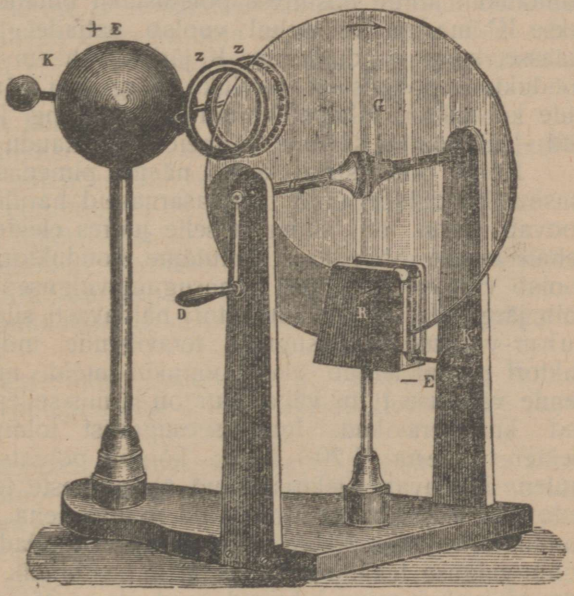
**Asub elektriseeritud keha juhtivate seintega nõus, siis ei olene seintel indutseeritud elektrihulk keha asukohast** (katse a).

See seadus paistab vastolus olevat § 23[6] leitud seadusega, mille järele indutseeritud elektrihulk oleneb kaugusest mõlema keha vahel. Kuid seal ei ümbritsenud üks keha teist; sellepärast ei indutseerinud esimene keha mitte ainult teisel kehal elektrit, vaid ta tegi seda ka kõigil kaugemalseisvatel kehadel nagu näiteks põrandal, lael jne. Kui kõigis kehades indutseeritud elektrihulgad kokku arvata, siis selgub, et see summa tõepoolest ka siin olenematu on indutseeriva keha asukohast.

2) Kui elektriseeritud keha on igalt poolt ümbritsetud maaga ühendatud juhtiva seinaga, siis ei avalda selle keha laeng väljaspool seina mingisugust elektrilist mõju (katse b). Sein nagu varjab elektri mõju, teda hüütakse sellepärast ka elektri ekraaniks.

„Varjamine" ei sünni mitte ainult siis, kui ekraan elektriseeritud keha igalt poolt ümbritseb, vaid „vari" tekib ka iga lihtsa metallekraani taga. Paigutame näiteks maaga ühendatud raudlehe positiivselt elektriseeritud keha lähedusse, siis on nähtus samasugune kui katsel b: indutseeritud + E voolab ekraanist maasse, nii et ekraanile ainult — E jääb, mis ekraani elektriseeritud keha poole pöördud pinnal seotud on ja mis sellepärast ekraani taha mingisugust mõju ei avalda. Elektri ekraani tarvitatakse sagedasti elektriaparaatide kaitsmiseks segavate väliste elektriliste mõjude (induktsiooni) vastu. Selleks ümbritsetakse aparaat näiteks maaga ühendatud metallkupli või -võrega.

§ 25. **Elektriseerimismasin.** Elektriseerimismasina ülesanne on elektrit tekitada suuremal hulgal kui see võimalik on hariliku klaasvarva hõõrumisega. Kõige lihtsam on n. n. hõõruv elektriseerimismasin (joon. 52). Vii-




Joon. 52.

mase peaosa moodustab vända; D abil tiirutatav suur klaasketas G. Klaasi pinnad hõõruvad tiirlemisel vastu amalgameeritud pinnaga nahkpatju, mis sellekohase hargisarnase hoidja R vahele on kinnitatud. Hõõrumisel elektriseerub klaasi pind positiivselt ning nahkpadjad negatiivselt.

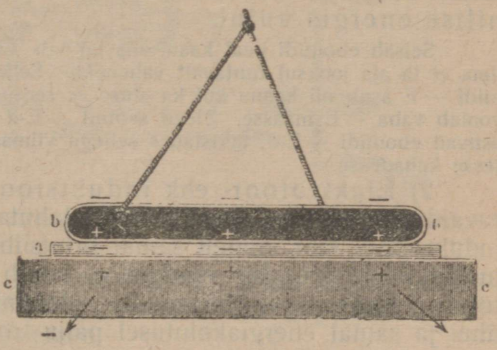
Patjadele kogunud — E voolab amalgaamkihti mööda viimasega metalliselt ühendatud konduktorisse K'. Mittejuhtivale klaaspinnale aga jääb + E tema tekkimiskohale ning liigub ratta tiirlemisel edasi. Et temast midagi õhku kaduma ei läheks, kaetakse klaasi pind patjade taga siidiriidega, mis patjade külge kinnitatud ning kunni rõngakujuliste kammideni Z—Z ulatab. Viimaste klaasi poole pöördud teravikud „imevad" klaasilt tema + E konduktorisse K (§ $23_5$), mis isoleerival jalal asudes metalliselt on ühendatud teravikkudega. Et kogutud + E kammide servadelt ja nurkadelt mitte välja õhku ei voolaks, on kammid väljastpoolt kaetud isoleerivate rõngastega; samuti on kõik teised juhtivad jaod silepinnalised ja ilma suurte kumerusteta.

Masina töötamisel kogub hõõrumisega lahutatud + E vahetpidamata konduktorisse K, — E aga konduktorisse K'. Ühendame mõlemad konduktorid näiteks traadiga, siis neutraliseeruvad nende elektrid, sest et tekkinud — E ja + E hulgad alati võrdsed on. Hoiame aga K'-ga ühendatud traadi teise otsa ainult konduktori K läheduses, siis kasvavad järk-järgult vastupidiste elektrite hulgad konduktoris K ja traadi otsas; pinge nende vahe tõuseb ning viimaks hüppab säde ühelt kehalt teisele. Tahetakse, et K võimalikult kõrge positiivse potentsiaali omandaks, siis ühendatakse K' maaga. Sel puhul voolab patjadel tekkiv — E alatasa maasse, kuna konduktorisse K järjest rohkem + E-d kogub. On konduktori potentsiaal tarviliku kõrguseni tõusnud, siis hüppab säde konduktori lähedal hoitud sõrme ning konduktorile kogunud + E voolab sõrme ja meie keha kaudu maasse.

Kõrge potentsiaali juures näeme pimedas, et elektriseerimismasina konduktori pind puhmasarnaseid harulisi valguskiiri õhku hoovab (joon. 65), ilma et selle juures elekter sädemena ühelt kehalt teisele hüppaks. Kinnitame konduktorile nõelakese, siis voolab viimase teravikust samasugune valgusepuhm õhku. Sellest võib järeldada, et ka konduktori nähtavasti siledalt pinnalt tulev puhm-valgus mingisuguste teravikkude mõjul sünnib: Konduktori pinnal leidub alati tolmukübemeid, mille pinnakumerus nende väiksuse tõttu väga suur on ja mis sellepärast samuti mõjuvad kui teravikud. Igast seesugusest tolmukübemest voolab elekter tuulena (§ $20_2$) õhku; kõrgel potentsiaalil hakkab õhk tuulena lendavate elektriseeritud õhuosakeste teel helenema ning seda valgust näemegi nimetatud puhmadena. Et võimalik oleks konduktorile võimalikult palju elektrit koondada, peab nimetatud puhm-valguse tekkimist nii palju kui võimalik takistama; selleks peavad kõik masina juhtivad osad olema täiesti tolmupuhtad ja poleeritud pinnaga.

Kirjeldatud hõõrumismasinal ei ole praegusel ajal mingit praktilist tähendust, sest et järgnevas § kirjeldatud elektrofoormasinad palju kasulikumalt töötavad.

§ 26. **Elektrofoor; induktsioon- ehk elektrofoormasinad.** 1) Elektrofoori moodustab juhtivale alusele cc asetatud ümarik eboniit- või vaikplaat aa (joon. 53) ja siidinööri otsas rippuv õõnes metallkaan bb Eboniidi (vaigu) hõõrumisel rebasesaba või mingi teise loomanahaga elektriseerub tema pind negatiivselt ja hoidub niisugusena pikemat aega. Tõstame siidinööri pidi metallkaane bb elektriseeritud eboniidi peale, siis indutseerib viimase — E kaane alumisel pinnal seotud + E ning tema ülemisel pinnal vaba — E.



Joon. 53.

Puudutame sõrmega kaane b külge siis voolab vaba — E maasse, ja kaanele jääb ainult seotud + E, mis kaane ülestõstmisel vabaneb, ning siis kogu kaant positiivselt elektriseerib. Sõrme lähendamisel kaanele hüppab väike säde kaanest sõrme, millega esimene oma laengu kaotab. Me võime kaane nüüd uuesti eboniidile paigutada, teda sõrmega puudutada ja ülestõstes uue laengu + E-d saada. Sel teel võtame elektriseeritud eboniidilt kuitahes palju + E-d, ilma et eboniidi laeng ise väheneks. Niiviisi võime elektrofooriga näiteks isoleetitud konduktori kõrge potentsiaalini laadida.

Töötamist elektrofooriga võib nii siis lahutada neljaks üksteisele järgnevaks tegevuseks:

a) kaane asetamine elektiseeritud eboniidi pinnale (mõlema elektri indutseerumine kaanes);

b) sõrmega puudutamine kaane külge (vaba — E eemaldamine kaanest);

c) kaane ülestõstmine (seotud + E vabanemine kaanes):

d) kaanega puudutamine laetava konduktori külge (kaane tühendamine).

Kõik need tegevused korduvad samas järjekorras ka allpool kirjeldatud elektrofoormasinate töötamisel, ja on viimase arusaamiseks tarvilik enesele selgelt ettekujutada hariliku elektofoori juures korduvat sündmustikku nagu ta üleval kirjeldatud.

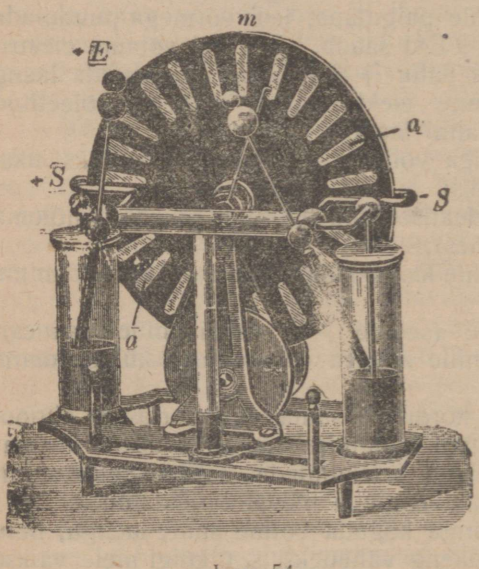
Kuigi meie elektrofooriga koguda võime suure laengu, ilma et selle juures eboniidi alglaeng väheneks, s. t. kuigi meie väikse energiaga alglaengust saame suure energiaga elektrihulga, jääb

ka sellel tegevusel maksvaks energia hävimatuse seadus, mille järele võimata on sünnitada ühte energiat ilma teise energia kuluta. Elektri energia tekitamisel elektrofoori abil kulutame nimelt mekaanilist tööd: Iga kord kui kaant bb eboniidilt üles tõstame, tõmbub kaanele jäänud + E eboniidi — E külge. Selle külgetõmbumise ületamiseks kulutamegi täpipealt samapalju mekaanilist energiat, kui palju me laetavasse konduktorisse kogume elektri energiat. Elektri energia on nii siis võidetud mekaanilise energia kulul.

Seisab eboniidi peal kaan, siis hoidub eboniidi laeng väga kaua alal, ilma et ta aja jooksul tuntavalt väheneks. Selle põhjuseks on asjaolu, et eboniidi — E asub nii kaane kui ka aluse cc seotud + E vahel, sest ka viimasest voolab vaba — E maasse. Need seotud + E-d seovad omakorda nende vahel asuvad eboniidi — E-d, takistades sellega viimase laiali hajumist õhku ja teistesse kehadesse.

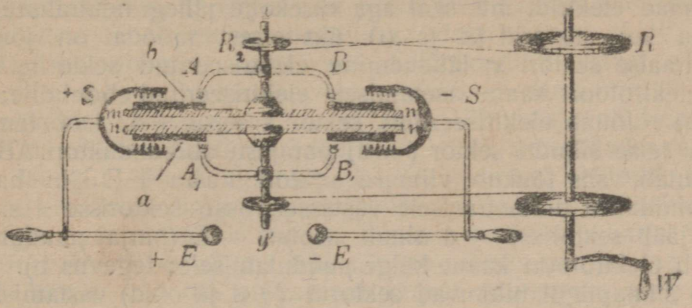
2) Elektrofoor- ehk induktsioonmasinatel ei ole hõõruvaid osi; nendes sünnib elektri lahutamine ja kogumine ainult induktsiooni läbi, nimelt samal printsiibil kui hariliku elektrofoori juureski. Hõõrumise puudumisel kulub nendes masinates vähem tööd mekaanilise hõõrumise ületamiseks ning nad annavad ühel ja samal energiakulutusel palju rohkem elektrit kui hõõrumismasinad.

Oma ehitus- ja töötamisviisi poolest mitmeti lahkuminevatest induktsioonmasinatest on viimasel ajal iseäranis tihti tarvitusel Wimshursti'i konstrueeritud (1883) kahtepidi tiirlev masin (joon. 54), mille horisontaal-läbilõike skeemi kujutab joon. 55. Kaks klaas- või eboniitketast m ja n on võllide x ja y otsa kinnitatud. Neid tiirutatakse rihmarataste $R_1$ abil (joon. 55), kusjuures tagumise ketta rihm ristamisi, esimese oma aga otse on tõmmatud, nii et mõlemad kettad üksteise vastu tiirlevad. Ketaste välispindadele on kleebitud rida radiaalseid õhukesi metallpaberist (stanioolist) sektore a, b (joon. 54). Sektorite vastu seisavad kammide SS teravikud, mis ühenduses on isoleeritud konduktoritega E. Umbes 45° horisontaalpinna vastu on masina aluse külge kinnitatud kaks metallvarba —|— n. n. abikonduktori AB (joon. 55). Viimaste



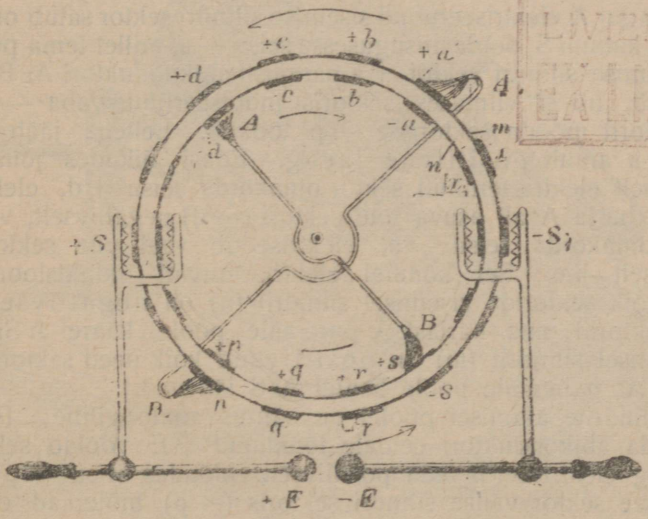

Joon. 54.

otsad kannavad pehmeid metallharju, mis masina tiirlemisel kummagi ketta stanioolsektorid mööda libisevad. Abikonduktor ühendab nii siis neid diametraalselt üksteise vastu seisvaid sektore, mis ketta tiirlemisel parajasti tema otsade (harjade) kohta satuvad.




Joon. 55.

Kui masinat vändast W tiirutada, siis koguvad konduktoritele E vastupidised elektrid ning nende vahel hüppavad vahetpidamata pikad tugevad sädemed.




Joon. 56.

Masina töötamisviisi seletamiseks on joonistusel 56 mõlemad kettad kujutatud kontsentriliste silindritena m ja n, mis tiirlevad vastupidises sihis ja mille pindadel asuvad nimetatud stanioolsektorid a, b, c jne. Abikonduktorid AB ja $A_1B_1$ ühendavad endisel viisil diametraalselt vastupidiseid sektore a-p ja d-s, mis läbi kammide S ja $S_1$ tõmmatud horisontaalpinda vastu umbes $45^0$ all seisavad.

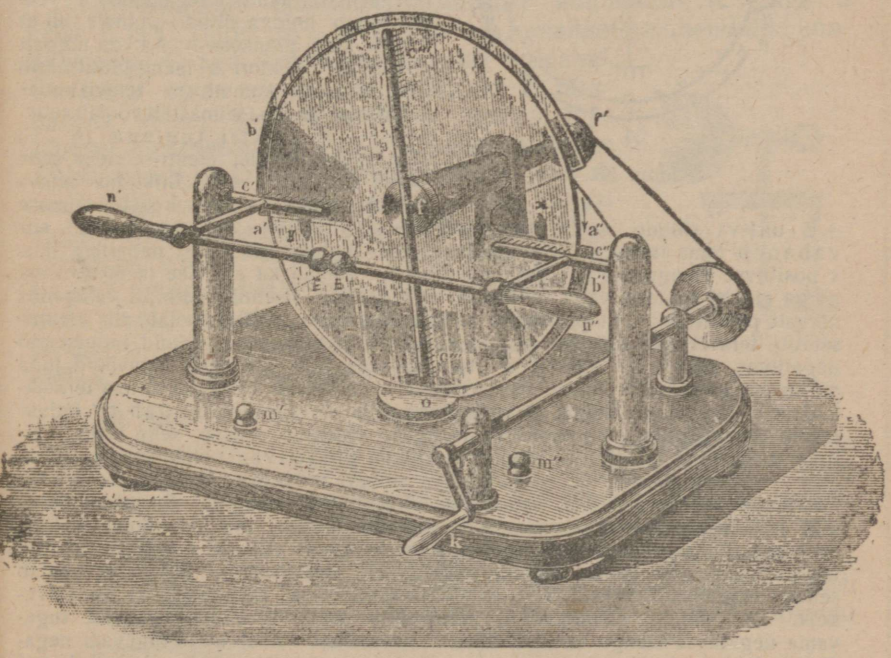
Masina käimapanemisel on mõnel sektoril (x) kas abikonduktori harja hõõrumise tagajärjel või koguni veel endisest töötamisest väike, näiteks positiivne laeng. Seesugusest sektorist x möödaminevates teise silindri sektorites ($x_1$) indutseeruvad siis mõlemad elektrid, mis seal aga otsekohe jällegi neutraliseeruvad, niipea kui sektorid (x ja $x_1$) üks-teisest mööda on jõudnud. (Neutraalse sektori $x_1$ lähenemine elektriseeritud sektorile x vastab elektrofoori kaane asetamisele elektriseeritud eboniidile; tegevus a). Jõuab elektriseeritud sektor x seisu +d, kus tema all viibiv teise silindri sektor (—d) parajasti abikonduktori AB harja puudutab, siis tõukub viimase sektori vaba +E läbi harja ja abikonduktori diametraalselt vastasseisvasse sektorisse +s. Sellega jääb sektorisse —d ainult seotud —E (harja puudutamine vastab elektrofoori kaane külge puudutamisele; tegevus b). Järgmisel silmapilgul nihkuvad sektorid (+d ja —d) vastamisi kaugemale, —d ei puutu enam harja A külge ning tema laeng —E, mis seotud oli, vabaneb, elektriseerides sektori negatiivselt (elektrofoori kaane ülestõstmine; tegevus c). Jõudes kammi $S_1$ alla, annab seesugune negatiivselt elektriseerunud sektor oma laengu kammi teravikkudele ja viimastega ühendatud kondukto-rile $E_1$ (elektrofoori kaane tühjendamine; tegevus d).

Harjal A elektriseerunud sisemise silindri sektor satub omal liikumisel kammi $S_1$ poole niisugusesse seisu — a, millel tema peal seisev välimise silindri sektor +a parajasti abikonduktori $A_1$ $B_1$ harja all viibib, nii et viimases sektoris indutseeritud vaba —E abikonduktorit mööda sektorisse —p tõukub. Sellega jääb sektorisse +a ainult positiivne laeng. Edasi liikudes jõuab see positiivselt elektriseerunud sektor omakorda seisu +d, elektriseerib seal harja A all asuva uue sektori (—d) negatiivselt, viimane jõuab omakorda seisu —a, elektriseerib veel uue sektori +a positiivselt jne. Sel kombel elektriseeruvad induktsiooni teel peagi kõik sektorid: sisemisel silindril (n) on negatiivsed kõik need sektorid, mis harjast A paremale poole, kaarel A $S_1$ liiguvad: välisel silindril (m) on positiivsed kõik need sektorid, mis harjast $A_1$ pahemale poole kaarel $A_1$ S lähevad.

Silindrite alumisel poolel on nähtus analoogiline; Punktist A mööda abikonduktori eemale tõukunud +E voolab sektorisse +s ning elektriseerib teda positiivselt. Jõudes seisu +p indutseerib see sektor välise silindri sektoris (—p) mõlemad elektrid, millest vaba +E mööda konduktori $B_1$ $A_1$ sektorisse +a tõukub ja sellega viimast veel tugevamini positiivselt elektriseerib. Seotud —E jääb sektorile (—p) ning kandub silindri edasipöördumisel kammi $S_1$ alla, kust ta konduktorisse $E_1$ „imetakse". Enne indutseerib aga see sektor (seisul —s) harja B all seisvas sektoris mõlemad elektrid, millest vaba —E ülemisse sektorisse —d tõukub, kuna seotud +E sektori +s positiivselt elektriseerib jne. Nii elektriseeruvad positiivselt kõik need sisemise silindri sektorid, mis kaarel BS liiguvad, ning negatiivselt kõik need välise si-

lindri sektorid, mis kaarel $B_1S_1$ liiguvad. Me näeme, et nii sisemisel kui välisel silindril kammi $S_1$ alla pöörduvad ainult negatiivselt elektriseeritud, kammi S alla aga ainult positiivselt elektriseeritud sektorid. Selle tõttu „imevad" kammi S teravikud konduktorisse E järjest uut positiivset, kammi $S_1$ teravikud konduktorisse $E_1$ järjest uut negatiivset elektrit.

Alguses nõrgalt positiivselt elektriseeritud välise silindri sektorid (+a, b, c, d) elektriseerivad punktis A sama nõrgalt sisemise silindri sektore (—d, c, b, a). Viimased indutseerivad punktis $A_1$ välise silindri sektorites uut +E-d, suurendades sellega nende laengut. Need tugevamalt elektriseeritud sektorid indutseerivad omakorda harja A juure jõudes sisemise silindri sektorites veel tugevama negatiivse laengu, viimane suurendab harja $A_1$ alt läbi minevate välise silindri sektorite positiivset laengut jne. Nii kasvab kiirelt sektorite potentsiaal järjest suuremaks ning ühes sellega ka konduktorite E ja $E_1$ oma. Lõpuks tekib viimaste vahel terve vool tugevaid sädemeid.



Joon. 57.

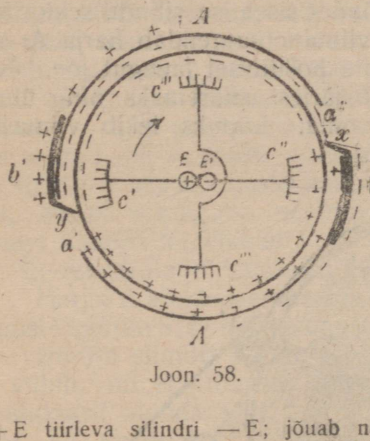
3) Vähe teistsugusel printsiibil töötab Holtz'i konstrueeritud elektrofoormasin (joon. 57). Temas tiirleb ainult üks klaasketas, nimelt väiksem esimene, kuna suurem tagumine ketas paigal seisab. Tagumisse kettasse on lõigatud kaks avaust a' ja a''; nende kõrvale on kleebitud ketta tagapinnale kaks laia pabersektori b' ja b''. Sektoritelt ulatavad kitsad paberteravikud x ja y ketta



TRÜ Raamatukogu

avaustesse, nii et teravikkude kõveraks painutatud otsad tiirleva esimese ketta tagapinda riivavad. Pabersektorite ääre kohal seisab tiirleva ketta ees 2 horisontaalset kammi c' ja c'', mille teravikud on sihitud tiirleva ketta eespinna vastu. Peaaegu vertikaalselt on masina aluse külge liikumatult kinnitatud abikonduktor c''' — c''', mille otsadel on samasugused teravikud kui kammidelgi. Masina käimapanemisel lükatakse kammidega c' ja c'' ühendatud konduktorid EE' kokku, antakse ühele pabersektorile (b') nõrk positiivne laeng (näiteks puudutamisel elektriseeritud klaasvarvaga) ning tiirutatakse masinat. Peagi kuuldub iseäralik kahin, mis tundemärgiks on, et masin elektriseerub. Konduktorite E laialitõmbamisel hüppavad nende vahel pikad tugevad sädemed.

Selle masina töötamisviisi seletatakse skeemi abil (joon. 58), millel kettad samuti kui eelmisel juhusel on kujutatud silindritena. Väline silinder (A) vastab tagumisele paigalseisvale, sisemine — tiirlevale esimesele kettale. Pabersektoritelt (b' ja b'') tulevad teravikud x ja y painduvad läbi avauste a' ja a'' ja riivavad tiirleva silindri välis-(taga) -pinda.



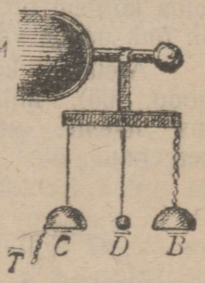

Joon. 58.

Anname sektorile b' positiivse laengu, siis laguneb see laeng paberit kui pooljuhti mööda ühtlaselt laiali; osa sellest laengust kandub aegamööda ka veel sektorit b' hoidva silindri pinnale, nii et lõpuks kogu pinnaosa b' Aa'' on nõrgalt positiivne. Sektori b' laeng indutseerib läbi klaaside kammi c' teravikkudes negatiivse laengu; viimastelt voolab sellepärast — E elektri tuulena (§ 23.) silindri sisepinnale, elektriseerides seda pinda negatiivselt. Liikudes seisva silindri b' Aa'' kohal, seob viimase +E tiirleva silindri — E; jõuab negatiivne silindriosa aga avauseni a'', siis vabaneb tema laeng. See negatiivne laeng indutseerib nüüd paberteravikus x positiivse laengu; nagu igast teravikust, nii voolab ka siin see laeng x otsast nõrga elektri tuulena välja; viimane elektriseerib sisemise silindri välispinna nõrgalt positiivselt. Et positiivne elekter teravikust x välja voolab, siis elektriseerub teravik ise kui ka pabersektor b'' negatiivselt. Nüüd indutseerib negatiivne sektor b'' kammi c'' teravikkudes +E. Et need teravikud juba nii-kui-nii positiivselt olid elektriseerunud — voolas ju vastasseisvatest teravikkudest c' negatiivne elekter elektrituulena välja —, siis suurendab b'' induktsioon teravikkude c'' positiivset laengut. Nendest voolab selle tõttu positiivne elektrituul, mis tiirleva silindri sisepinna positiivselt elektriseerib. Kammist c'' mööda jõudes, on seega tiirleva silindri mõlemad pinnad positiivsed. Pöördudes avause a' kohta, vabanevad silindripinna laengud. Sisepinnal asuv +E indutseerib paberteravikus y negatiivse laengu, mis teravikust elektrituulena silindri välispinnale voolab ja mitte ainult viimase +E-d ei neutraliseeri, vaid selle pinna koguni negatiivselt elektriseerib. Sektor b' kaotab sellega negatiivset elektrit, s. t. ta elektriseerub veel tugevamini positiivselt. Oma laengu suurenemisel indutseerib sektor b' nüüd vastavalt tugevama negatiivse laengu teravikkudes c'; viimastelt voolab nüüd tugevam negatiivne elektrituul silindri sisepinnale, mis teda tugevamini kui eelmisel korral negatiivselt elektriseerib; pöördudes avauseni a'', elektriseerib see pinnaosa endisel viisil ka sektori b'' veel tugevamini negatiivselt jne. Nii kasvavad sektorite b' ja b'' laengud järjest suuremaks, kunni nende elektri õhkuvoolamine ja teised kaotused edaspidist kasvamist takistavad. Lahutame nüüd konduktorid E ja E', siis kestab kogu protsess endisel viisil edasi: teravikust c' voolab alatasa välja — E-d, teravikust c'' samapalju +E-d; selle tõttu elektriseerub konduktor E positiivselt ja E' negatiivselt, nii et neilt kogu masina töötamisaeg elektrit võib võtta.

Abikonduktor c'''—c''' etendab järgmist osa: Kui konduktorid E ja E' liiga kaugele laiali tõmmata, nii et nende vahel enam sädemeid ei ilmu, siis võib näiteks E positiivne laeng nii suureks kasvada, et ta tagasi hakkab voolama tiirleva silindri pinnale. Siis ei elektriseeru silindri pind kammi c' all mitte enam negatiivselt, vaid positiivselt ning kammi c'' all mitte enam positiivselt, vaid negatiivselt. Sellega kahaneks masinaosade potensiaal; et teda tõsta, peaksime konduktorid E ja E' uuesti kokku lükkama. Võib juhtuda, et selle juures kogu masina poolused vastupidisteks ümberpöörduvad, mis paljudel katsetel mitte soovitav ei ole. Seesugust pooluste ümberpöördumist takistabki abikonduktor c'''—c''': tema kaudu ühinevad silindri alumisele ja ülemisele poolele tagasi voolanud elektrid, nii et tiirleva silindri pind juba teravikkude c'''—c''' taga neutraalseks muutub. Siis pöördub sektorite b' ja b'' ette ikka ainult neutraalne silindripind ja kord juba elektriseerunud sektorites ei või laeng kahaneda. On konduktorid E ja E' kokku lükatud, siis ei avalda abikonduktor masina töötamise peale mingit mõju.

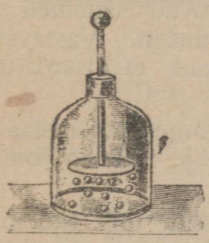
§ 27. **Mõned katsed elektriseerimismasinaga; elektri mitmesugused mõjud.** 1) Elektri mekaanilist mõju võib vaadelda mitmel lihtsal katsel:

a) Riputame elektriseerimismasina konduktori A külge 2 kella B ja C (joon. 59), millest B on metallketiga ühendatud konduktoriga, C aga temast siidinööriga eraldatud. Siidiniidi otsas rippuv metallkerake D tõmbub B külge, sest et viimane masina töötamisel elektriseerub. Kella B külge puutudes elektriseerub ka D samanimeliselt kui B; tõukub selle tõttu kellast B eemale ja tõmbub ühtlasi elektriseerimata kella C külge. Viimase külge puutudes voolab kerakese laeng läbi metalltraadi T maasse; kerake neutraliseerub ja tõmbub nüüd uuesti B külge, tõukub sealt tagasi jne. Kerakese põrgete mõjul helisevad mõlemad kellad kogu aeg mil masin töötab.



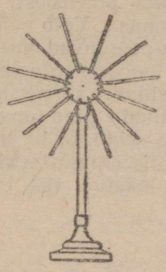
Joon. 59.

b) Kaunis sarnane eelmisega on katse n. n. hüplevate kerakestega (joon. 60): Maaga ühendatud alusel seisavad kerged korgikerakesed; Kui ülemine ketas ühendada elektriseerimismasina konduktoriga, siis tõmbuvad kerad elektriseeritud ketta külge üles, tõukuvad sealt, ise elektriseerudes, tagasi alla, annavad oma laengu alusele, tõmbuvad uuesti üles jne.

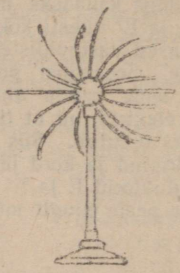

Joon. 60.

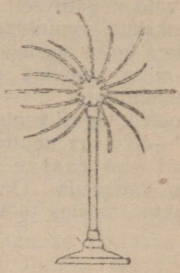
c) Isoleeritud kera külge kinnitatud pabernarmad tõukuvad kera elektriseerumisel igale poole radiaalselt ja sirgjooneliselt laiali (joon. 61). Selle põhjuseks on ühenimeliselt elektriseeritud narmaste vastastikune küljeti-eemaletõukumine, mille mõjul narmad üksteisest võimalikult kaugele püüavad asenduda. Võib tõestada, et nad üks-teisest kõige kaugemal nimelt

siis seisavad, kui nad ühtlaselt jaotatult sirgjooneliselt mööda kera raadiusi on sihitud. Kui kaks seesugust kera masina mõlema konduktoriga ühendada ja kerad üksteisele lähendada, siis tõm-



Joon. 61.



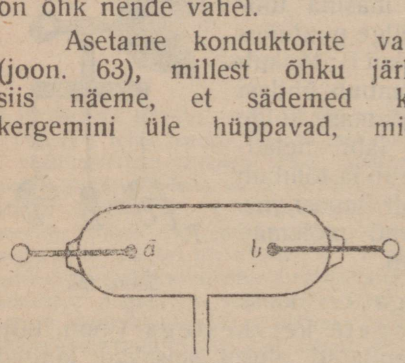


Joon. 62.

buvad mõlema kera isenimeliselt elektriseeritud narmad üks-teise külge. Selle tõttu painduvad nad kõveraks ja pöörduvad otsadega üks-teise vastu (joon. 62).

2) Elektri säde masina konduktorite vahel on seda pikem, mida kõrgem on konduktorite potentsiaalvahe ning mida hõredam on õhk nende vahel.

Asetame konduktorite vahele näiteks kinnise klaasnõu (joon. 63), millest õhku järk-järgult välja võib pumbata, siis näeme, et sädemed kerakeste a ja b vahel seda kergemini üle hüppavad, mida hõredamaks teeme õhu; kui näiteks õhu harilikul tihedusel a ja b vahel ka kiirelt tiirleva masina juures sädemeid ei ilmu, siis tekivad nad õhu hõrendamisel juba masina aeglaselt tiirutamisel. Pumpame klaasnõust aga kogu õhu välja, siis kaovad sädemed a ja b vahel uuesti. Vastavad katsed näitavad, et absoluut õhutus ruumis säde üleüldse ei teki.

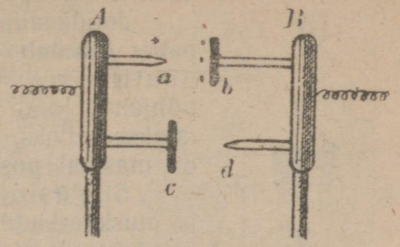



Joon. 63.

Sädeme kuju on väga mitmekesine; kõrge potentsiaalvahe juures on säde suuremalt osalt haruline ja tuletab oma kuju poolest välku meele.

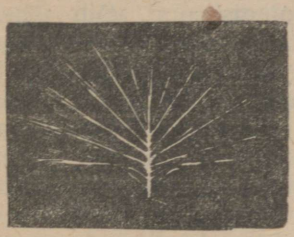
Sädeme valguse sünnitavad aurud ja gaasid, mis sädeme teel järsku kuumenevad ja mis selle tõttu hõõgama hakkavad. Osalt on need aurud pärit konduktorite ainest (metall), sest et sädeme tekkimisel viimasest väike osa ära aurub. Sellepärast oleneb sädeme värv konduktorite ainest. Sädeme ülehüppamisel paisuvad järsku soenevad gaasid: tekib õhutõuge, mida me tugevama või nõrgema pauguna või plaksuna kuuleme.

Ühendame joonistusel 64 kujutatud isoleeritud konduktori A elektriseerimismasina positiivse poolusega, samasuguse konduktori B aga tema negatiivse poolusega. Senni kui A ja B ligistikku seisavad, näeme sädemete voolu nii elektroodide ab kui ka cd vahel. Nihutame A ja B üksteisest kaugemale, siis kustuvad sädemed c ja d vahel, kuna nad a ja b vahel endiselt edasi kestavad. Jättes A ja B samasugusele kaugusele, ühendame nad nüüd elekriseerimismasinaga ümberpöördult, s. t. teeme B positiivseks ja A negatiivseks. Selgub, et sädemed nüüd mitte enam a ja b vahel ei hüppa, vaid c ja d vahel. Võtame elektroodid c ja d konduktorite küljest sootumaks ära, siis ei ilmu sädemeid üleüldse mitte, olgugi et a ja b samal kaugusel seisavad kui eelmisel katsel. Sellest selgub, et säde ilmub alati ainult selle elektroodipaari vahel, mille teravik on positiivne, s. t. et positiivne elekter alati teravama otsaga elektroodilt (a ja d) üle hüppab jämedama otsaga elektroodile (b ja c). Alles siis, kui elektroodid võrdlemisi ligistikku seisavad, võib positiivne elekter ka jämeda otsaga (kettaga) elektroodilt teravikule hüpata.



Joon. 64.

Vahe mõlema elektri vahel avaldub ka valgusnähtustes, mis elektri teravikust väljavoolamisel ilmuvad: positiivse konduktori külge kinnitatud nõela otsast voolab + E välja harulise, alatasa muutuva kujuga puhmana (joon. 65) — n. n. positiivse puhm-valgusena; negatiivsel konduktoril aga voolab samast nõelast — E välja väikse, vähe punaka rahulikult ergava punktina, — n. n. negatiivse erg-valgusena.

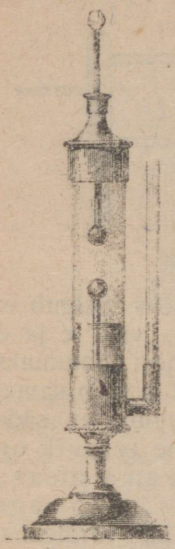

Joon. 65.

3) Elektri soojusmõju avaldub kõige peaiu tema sädemes, millega hõlpsasti süütada võib bensiini, eetrit ja teisi aineid; tugeva sädemega süütub koguni paber, puuvill jne.

Elektrisädeme soojust võib mõõta n. n. elektrilise termomeetriga (joon. 66): Kinnises klaasnõus asuvate kerakeste vahel lastakse säde üle hüpata; soenev õhk paisub seda rohkem, mida rohkem soojust vabaneb sädemes. Paisudes tõrjub õhk silindri alumises osas asuva vee külgtorru, nii et viimase nivoo-kõrgus mõõduks on tekkinud soojuse hulgale.

4) Elektri keemiline mõju avaldub kõigil kirjeldatud katsetel iseäralise gaasi — osooni tekkimises: Niipea kui

elektrisäde läbi õhu hüppab, või kui elekter teravikult õhku voolab, tundub iseäraline lõhn, mille põhjuseks on õhu keemiliselt muutunud hapnik, — osoon ($O_3$).



Joon. 66.

Joodkaaliumi ja tärkliskiistri seguga kaetud paber muutub positiivse konduktori külge puutumisel tumedaks. Seda nähtust, mis põhjeneb joodi eraldumisel jood-kaaliumist, kasutatakse selleks, et ära määrata, missugune poolus on masinal positiivne ja missugune negatiivne.

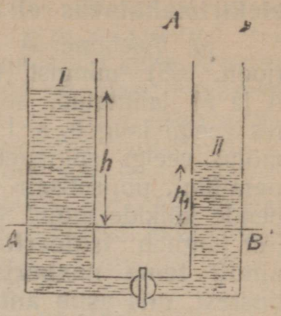
5) Füsioloogiline mõju avaldub naha- ja musklierkude ärritusena. Lähendame masina konduktorile sõrme, siis tunneme esiteks õrna kõdi nagu puutuks sõrm ämblikuvõrgu külge; lähendame aga sõrme kunni konduktorist säde sõrme hüppab, siis tunneme nõelapistesarnast valu, mille põhjuseks on naha erkude ärritus. On üks käsi ühendatud masina + konduktoriga ja asub teine käsi tema — konduktori läheduses, siis voolab sädeme hüppamisel elekter läbi meie keha ja ärritab musklite erkusid, mille tagajärjel musklid järsku kokku tõmbuvad. Sarnasel puhul räägitakse elektri löögist. Tugeva laengu löögi tagajärjeks võib olla halvatus või koguni surm.

§ 28. **Elektrimahutavus; dielektriline konstant.** 1) Laadides mitmesuguseid kehi ühekõrguse potentsiaalini, võib tähele panna, et selleks ühe keha puhul rohkem, teise puhul aga vähem elektrit kulub. Hoiame näiteks suure ja väikse isoleeritud metallkera elektriseerimismasina konduktori läheduses, siis peame selleks, et keradega ühendatud elektromeetrid ühekõrgust potentsiaali näitaksid, suurele kerale palju rohkem sädemeid hüpata laskma kui väiksemale. Et suurem hulk sädemeid ka rohkem elektrit peab kerale kandma, siis kulub seega suure kera laadimiseks tõepoolest rohkem elektrit kui väikse kera laadimiseks sama potentsiaalini.

Sellest selgub et kunni ühesuguse elektriseerumisastmeni (potentsiaalini) mahub ühte kehasse rohkem, teise vähem elektrit. Me ütleme sellepärast, et igal kehal on oma kindel elektrimahutavus, mis oleneb keha suurusest ja kujust. Laeme kaks juhti ühekõrguse potentsiaalini, siis on selle juhi elektrimahutavus suurem, mille laeng on suurem. Anname aga kahele juhile ühesuurused laengud, siis on selle elektrimahutavus suurem, mille potentsiaal on väiksem, sest et viimase laengut suurendama peab selleks, et tema potentsiaali teise juhiga ühekõrguseks tõsta.

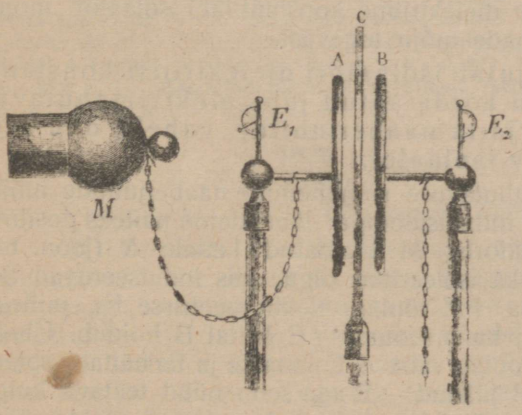
Võrreldes potentsiaali temperatuuriga (§ 21), peame elektrimahutavust võrdlema soojusmahutavusega, sest ka soojushulk, mis kulub antud keha teatud temperatuurini soendamiseks, oleneb selle keha soojusmahutavusest. Keha

potentsiaali, elektrihulga ja elektrimahutavuse vahekorda selgitab võrdlus mingi nõu (joon. 67) nivookõrguse (h), tema veehulga ja mahutavusega: vee (elektri) voolamine ühest silindrist (A) teise (B) oleneb ainult nivookõrgustest $h_1$ ja $h_2$ (kehade potentsiaalidest); laiema (suurema mahutavusega) silindri nivoo tõstmiseks kulub rohkem vett kui kitsama silindri nivoo tõstmiseks; ühesuuruste veehulkade juures on suurema mahutavusega silindri nivoo madalam väiksema mahutavusega silindri nivoost jne.



Joon. 67.

2) Ühendame elektriseerimismasinaga isoleeritud metallketta A (joon. 68), siis voolab teatud hulk elektrit konduktorilt M kettale, kunni M ja A potentsiaalid ühekõrguseks saavad. Nüüd lahutame A konduktorist ja lähendame temale teise, maaga ühendatud ketta B (vahepealne ketas C olgu esialgu kõrvaldatud): Me näeme, et A-ga ühendatud elektromeeter $E_1$ langeb. Et A igalt poolt isoleeritud on, siis peab tema laeng endiseks jääma; kui B lähendamisel tema potentsiaal siiski langeb, siis on see võimalik ainult sel puhul, kui A elektrimahutavus ketta B lähendamisel suureneb. A ühendamisel uuesti konduktoriga M voolab nüüd veel teatud hulk elektrit kettale A, ning viimase potentsiaal tõuseb endise kõrguseni. Lahutame A ja M ning nihutame B veel lähemale A-le, siis langeb A potentsiaal veelgi, millest järeldama peab, et tema elektrimahutavus selle juures veelgi suureneb. Nii võime maaga ühendatud teise ketta lähendamisega esimese ketta (A) elektrimahutavust suurendada ja temale seda rohkem elektrit koguda, mida lähemale toome teise ketta. Nagu katsed näitavad, avaldub samasugune nähtus ka iga teisekujulise isoleeritud juhi juures, millele mingi maaga ühendatud teine juht lähendatakse. Sellest järgneb üleüldine seadus: **Isoleeritud juhi elektrimahutavus suureneb, kui temale lähendada teisi maaga ühendatud juhte.**



Joon. 68.

Kui kirjeldatud katset korrata mingist teisest juht-ainest valmistatud samasuurte ketastega, siis selgub, et A elektrimahutavuse kasvamine ei olene ketaste ainetest, vaid ainult kaugusest A ja B vahel. Järjelikult mahub kergele alumiinium-kettale ühesuguste teistel

tingimustel samapalju elektrit kui raskele tinakettale, s. t. **juhi elektrimahutavus ei olene tema massist.**

3) Asetame A ja B vahele veel kolmanda ketta C (joon. 68) mingist isoleerivast ainest, näiteks klaasist. On A ja M lahutatud, siis näeme, et elektromeeter $E_1$ selle juures veelgi langeb, s. t. et ketta A elektrimahutavus klaasketta C mõjul veelgi suureneb. Tarvitades klaasketta asemel eboniit-, paraffiin-, portsellaan- või mõnda teist isolaator-ketast, selgub, et nende kõikide mõjul A elektrimahutavus suuremaks kasvab. Sellest järgneb: **Isoleeritud juhi elektrimahutavus ei olene mitte ainult tema naaberjuhtidest, vaid ka selle isolaatori omadustest, mis asub antud juhi ja naaberjuhtide vahel.** Muidu ühesugustel tingimustel on antud juhi elekrimahutavus kõige väiksem sel juhusel, kui tema ja ta naaberkehade vahel on õhk.

Kokkuvõttes näeme, et elektrimahutavus oleneb juhi suurusest, kujust ja tema asukohast teiste juhtide suhtes ning sellest isolaatorist, mis asub antud juhi ja naaberjuhtide vahel; ta ei olene ei juhi massist ega tema ainest. Seega erineb elektrimahutavus tuntavalt soojusmahutavusest, sest viimane oleneb keha ainest ja massist ning ei olene tema kujust, asukohast ega teistest tingimustest.

4) Eelmistest katsetest selgus, et läbi klaasi või eboniidi mõjudes ketas B suurendab ketta A elektrimahutavust rohkem kui läbi õhu mõjudes. Seega peab B mõju läbi klaasi ja eboniidi tugevam olema kui läbi õhu. Elektriseeritud juhtide mõju üks-teise peale oleneb nii siis neid lahutava isolaatori ehk dielektriku omadustest; arvu, mis iseloomustab nimetatud mõju tugevust, hüütakse eraldava dielektriku dielektriliseks konstandiks. Sarnaselt nagu keha läbipaistvuse aste võiks iseloomustada valguse mõju tugevust keha taga asuvate teiste kehade peale, nii isoloomustab dielektriline konstant läbi isolaatori mõjuvate elektriseeritud kehade mõju tugevust.

Praktiliselt kujutab isolaatori dielektrilist konstanti arv, mis näitab mitu korda antud juhi elektrimahutavus suureneb, kui tema ja ta naaberjuhtide vahele õhu asemele asetada vastav isolaator.

5) Keha elektrimahutavuse suurenemine naaberjuhtide mõjul seletub elektrostaatilise induktsiooniga: lähendame näiteks positiivselt laetud ja konduktorist M eraldatud kettale A (joon. 68) ketta B, mis esialgu ka isoleeritud olgu, siis indutseeruvad B-s mõlemad elektrid; vaba $+E$ tõukub elektromeetrisse $E_2$, millega viimase näitaja tõuseb, kuna seotud $-E$ kettal B hoidub. Ühendame B maaga, siis voolab vaba $+E$ maasse ja $E_2$ näitab potentsiaali null. Kettale B jäänud $-E$ aga seob nüüd teatava hulga $+E$-d kettas A. See seotud osa ketta A laengust ei avalda väljapoole mingit mõju; elektromeetri $E_1$ peale mõjub sellepärast

ainult vabaks jäänud laenguosa, mille tõttu tema näitaja langeb, sellega ketta A potentsiaali alanemist näidates. Resultaat on nii siis sarnane, nagu väheneks A laeng temas seotud +E võrra. Elektriseerimismasina potentsiaal on nüüd ketta A omast kõrgem, seega voolab M ja A ühendamisel masinast viimasesse teatav hulk +E-d juure. Ketta A suurenenud laeng seob vastavalt suurema hulga —E-d kettal B; viimane seob omakorda ka vastavalt suurema hulga +E-d kettal A; selle potentsiaal langeb, masinast voolab kettale A veelgi +E-d juure jne. Nii kasvab ketta A laeng kunni tema vabaks jäänud +E üksi potentsiaali annab, mis samasuur on kui masina oma. Võrreldes ketta A nüüdset laengut sellega, mis temma mahtus ilma ketta B mõjuta, näeme, et A laeng on kasvanud temas seotud +E võrra. Mida lähemal seisavad kettad üks-teisele, seda suuremad on nende seotud elektrihulgad (§ 24), seda suuremaks kasvab järjelikult ketta A kogulaeng ja tema elektrimahutavus. Seotud elektrihulk kettal A võib mitukümmend korda suurem olla tema vabast elektrihulgast; seega võib ketta A elektrimahutavus B mõjul sama palju korda suureneda.

**Näide:** Oletame, et elektriseerimismasinalt ükskult seisva ketta A peale 1000 elektriüksust (E. Ü.) võib koguda. See laeng indutseerib lähendatud kettal B isenimelise elektri, mille hulk väiksem on kui 1000 E. Ü. (§ 24). Oletame, et A ja B niisugusel kaugusel üks-teisest seisavad, et 1000 E. Ü. kettal A indutseerivad ja seovad kettal B 990 E. Ü. vastupidist elektrit. Et ka need 990 E. Ü. sama seaduse järele tagasi ketta A laengu peale mõjuvad, siis seovad nad viimases elektrihulga, mis võrdub $\frac{990}{1000}$ osaga ketta B laengust (= 990 E. Ü.), s. t. 0,99.990 = 980,1 E. Ü. Kettal A jääb sellega vabaks ainult 1000—980,1 = 19,9 E. Ü; kuna sinna aga 1000 üksust vaba elektrit koonduda võib, siis voolab masinast kettale 1000—19,9 = 980,1 E. Ü. juure. See lisalaeng seob omakord kettal B 0,99.980,1 = 970,3 E. Ü. vastupidist elektrit. Viimane seob jällegi 0.99.970,3 = 960,6 E. Ü. ketta A laengust, nii et sinna vabaks jääb 1000—960,6 = 39,4 E. Ü. Masinast voolab järjest uut elektrit kettale A, kunni vabaks jäänud laengu osa seal 1000 üksuseni kasvab, millega A lõpulikult laetud on.

Nimetame laetud ketta A kogu laengu tähega x ja seda osa, mille võrra see laeng teisel kettal vastupidist elektrit seob, — tähega k (käsitatud juhusel on k = 0,99), siis on ketta B kogulaeng k x. See elektrihulk seob kettal A laengu k × laeng B = k × k x = $k^2x$, nii et seal vabaks jääb x—$k^2x$ E. Ü. Käsitatud näitel oli lõpulikult laetud ketta A vaba laeng 1000 E. Ü., seega on

$$1000 = x - k^2x, \text{ ehk}$$

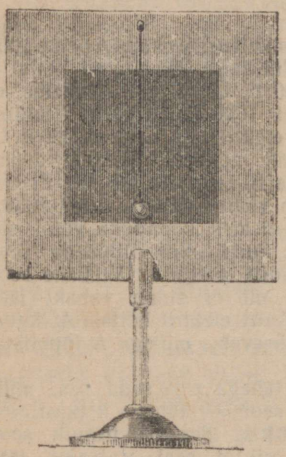
$$x = \frac{1000}{1-0{,}99^2} = 50221 \text{ E. Ü., s. t.}$$

ketta A laeng tõuseb B mõjul 1000 üksusest 50221 üksuseni.

6) Eelmises punktis seletatust järgneb, et ketta A elektrimahutavus mitte ainult sel puhul ei suurene, kui B on ühendatud maaga, vaid ka siis, kui ta ühenduses on masina teise konduktoriga (—E). Viimasel juhusel voolab kettal B indutseeritud vaba +E masina teisele konduktorile ja neutraliseerub seal masina —E-ga. Tagajärg on samasugune kui voolaks nimetatud +E ära maasse (p. 5). Et masina potentsiaal kõrgem on ketta B potentsiaalist, siis ei neutraliseeru mitte ainult ketta B

positiivne laeng, vaid masinast voolab kettale B koguni — E-d. Sellega kogub kettale B peale indutseeritud (ja seotud) —E veel teatav hulk —E-d masinast, nii et tema kogulaeng võrdlemisi endiste juhustega suurem on.

§ 29. **Kondensaatorid.** Kondensaatoriteks hüütakse aparaate, millesse elektrit koondada ehk „tihendada" võib. Igal kondensaatoril on 2 üks-teisest isoleeritud ja harilikult suure pinnaga juhti. Üks nendest, näiteks ketas A, joon. 68 on elektri kogumiseks, teine aga (ketas B) esimese juhi mahutavuse suurendamiseks. On isolaatoriks mõlema juhi vahel õhk, siis hüütakse aparaati ka õhk-kondensaatoriks (joon. 68). Et aga läbi õhu ühest juhist teise kergesti säde võib hüpata, millega kondensaator oma laengu kaotaks, — siis tarvitatakse kondensaatorite isolaatoriks harilikult mõnda kõva dielektrikut, näiteks klaasi, eboniiti, vilgukivi j. t.



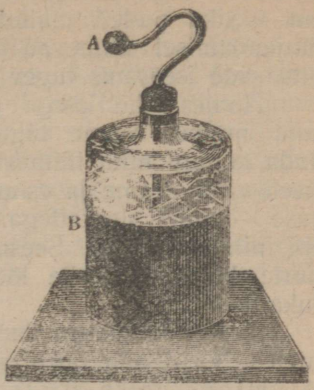
Joon. 69.

Lihtsamat kondensaatori kujutab n. n. Franklini tahvel (joon. 69), milles juhtide osa etendavad mõlemale poole klaasplaati kleebitud stanioollehed. Üks leht ühendatakse elektriseerimismasinaga, teine maaga. Esimesele lehele kogub siis suurem elektrilaeng samuti kui kettale A (joon. 68, § 28₂). Klaasi külge kinnitatud kergete elektripendlite eemaletõukumisest näeme, missugusel pinnal vaba laeng asub ja missugusel ainult seotud elekter hoidub.

Kui Franklini tahvel laadida ja siis tema mõlemate pindade ühendused masinaga ja maaga kõrvaldada, siis tõukub teadagi masinaga ühenduses olnud stanioollehe pendel eemale, kuna maaga ühenduses olnud lehe oma alla ripub. Puudutame nüüd sõrmega esimest lehte, siis voolab tema vaba laeng maasse, mille tõttu tema pendel langeb. Esimese lehe vähenenud laeng seob vastavalt väiksema elektrihulga teisel lehel. Seega vabaneb viimasel teatav osa tema laengust; et leht isoleeritud on, siis jääb vabanenud laeng temale ja tõukab selle lehe pendli eemale. Kui nüüd seda lehte sõrmega puudutada, siis voolab vabanenud elekter maasse ning tema pendel langeb alla. Vaba elektri äravoolamisega väheneb selle lehe kogulaeng; ühtlasi väheneb selle juures ka esimesel lehel seotud laenguosa, s. t. seal vabaneb osa elektrit, mis esimese lehe pendli eemale tõukab. Nüüd võime esimese lehe vaba laengu maasse juhtida, sellega teisel lehel osa laengut vabastada jne. Sõrmega vaheldamisi üht ja teist lehte puudutades, võime niiviisi kondensaatori laengu järgu kaupa maasse juhtida.

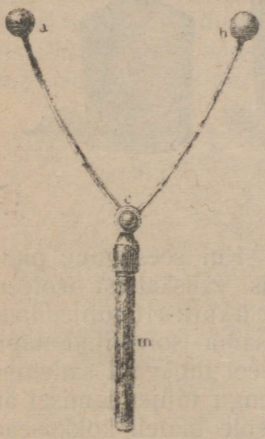
2) Praktikas tarvitatakse kondensaatorina harilikult n. n. Leideni pudelit (joon. 70). Viimast moodustab klaaspudel või -purk, mille välis- ja sisepind umbes ⅔-ni pudeli kõrgu-

sest kaetud on stanioollehega (B). Läbi korgi läheb nupuga (A) varustatud metallvarb kunni pudeli põhjani, nii et nupp A ühenduses on pudeli sisekattega. Laadimisel ühendatakse sisekate varva ja nupu A kaudu elektriseerimismasina konduktoriga; see kate etendab nii siis ketta A osa (joon. 68). Väliskate B on kas aluslaua või pudelit hoidva käe kaudu ühendatud maaga, ta vastab nii siis kettale B (joonnistus 68), kuna katteid eraldav pudeli klaassein vastab isolaatorkettale C.



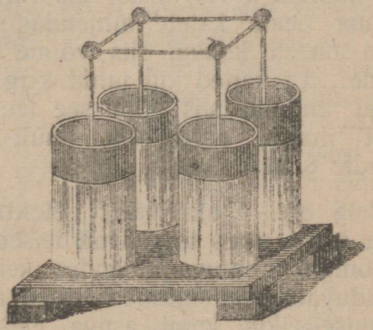
Joon. 70.

Kinnitame Leideni pudeli väliskattele traadi ja lähendame viimase teise otsa laetud pudeli nupule: nupu ja traadi otsa vahel hüppab hele ja kõvasti plaksuv säde, mille kaudu mõlema katte vastupidised laengud ühinevad ehk, nagu öeldakse, pudel tühjeneb. Harilikult toimetatakse pudeli tühjendamist klaaspideme m otsa kinnitatud metallhargiga (joon. 71), — n. n. tühjendajaga. Tühjendaja ühe nupuga puudutatakse pudeli väliskatet, teine nupp aga lähendatakse kondensaatori nupule A kunni säde üle hüppab.



Joon. 71.

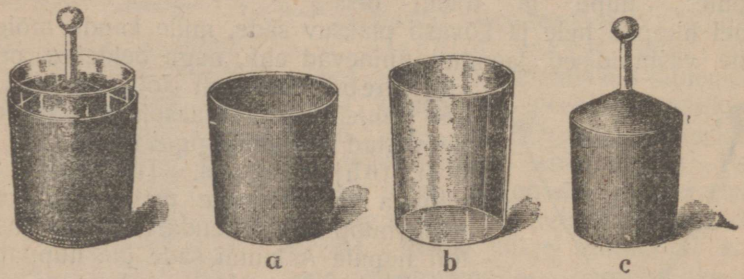
Et kondensaatori mahutavus seda suurem on mida suuremad on tema juhtide pinnad, siis peaksime suure mahutavuse saamiseks väga suure pudeli võtma. Sarnasel korral on käepärasem ühe suure pudeli asemel tarvitada mitu väikest, mis elektri patareiks (joon. 72) on ühendatud. Patarei kõigi pudelite sisekatted on nuppude kaudu omavahel ühendatud; samuti on juhtiva aluslaua kaudu ühendatud kõigi pudelite väliskatted. Kui üks nupp ühendada elektriseerimismasinaga ja


Joon. 72.

aluslaud maaga, siis täitub iga pudel samuti nagu seisaks ta üksinda. Kogu patarei mahutavus on seega niipalju korda suurem üksiku pudeli mahutavusest, kuipalju patareis on pudelid. Tühjendamisel ühinevad kõigi pudelite laengud korraga, mille tõttu säde iseäranis tugev on.

Hoides ühe käega pudeli väliskatet ja puudutades teisega tema nuppu, saame tugeva elektrilöögi (§ 27$_5$). Lööki võivad tunda koguni mitu inimest korraga, kui neid käsipidi ahelasarnaselt ritta seame ja esimese ühendame pudeli väliskattega, viimase — pudeli sieskattega. Pudeli laengud ühinevad sel puhul läbi inimeste-ahela. Seesugused katsed nõuavad ettevaatust, sest suurte kondensaatorite löök võib olla tervisele kahjulik, isegi elukardetav.

3) Kondensaatori laeng ei asu mitte ainult tema juhtivates katetes, vaid osa laengust tungib katteid eraldava klaasi või mingi teise dielektriku pindkihti. Selle tõestamiseks tarvitatakse Leideni pudelit (joon. 73), mille plekist valmistatud



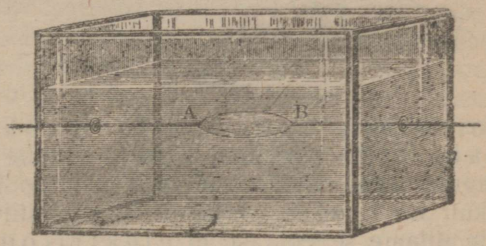

Joon. 73.

sise- ja väliskatet klaasist võib eraldada. Kui seesugune pudel laadida ja tema sisekate klaasist ning klaas väliskattest isoleeritud näpitsaga väljatõsta, siis võime katteid üksikult tühjendada. Seame peale katete tühjendamist pudeli sama isoleeritud näpitsaga uuesti kokku, siis võime pudelist veel tugevaid sädemeid saada. Et katted kui juhid kogu oma laengu tühjendamisel ära pidid andma, siis võib see laeng, mis peale pudeli kokkuseadmist ilmub, pärit olla ainult klaasi sisse tunginud elektrist (võrdle § 31$_4$).

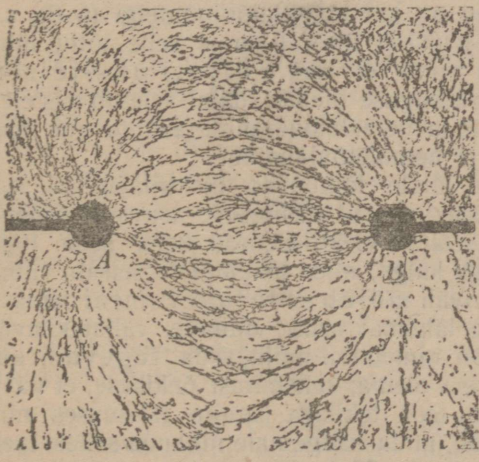
§ 30. **Elektriväli; elektri jõujooned.** 1) Elektriseeritud kera ümbruses tõmbuvad teised kehad selle kera külge, induktsiooniga lahutuvad nendes kehades mõlemad elektrid ja seal avalduvad veel mitmed teised nähtused. Kõigi nende nähtuste põhjuseks on keral asuva elektrihulga tõmbe- või tõukejõud (§ 23$_2$, 23$_4$). Elektriseeritud keha ümbritsevat ruumi, milles avalduvad nimetatud nähtused, s. t. milles mõjuvad keha laengu tõmbe- ja tõukejõud, hüütakse selle laengu elektriväljaks.

Sarnaselt kui magnetvälja kujutatakse magnetjõujoontega, nii võib elektrivälja kujutada elektrijõujoontega. Asetame elektrivälja näiteks väikse elektriseeritud kerakese, mis igas sihis vabalt võib liikuda, siis hakkab ta väljas valitseva tõmbe- või tõukejõu mõjul edasi liikuma. Seesuguse kerakese tee moodustabki kuju ja sihi poolest ühe elektrijõujoone. Samuti kui magnetjõujoone puhul (§ 83) võime ka siin jõudude liitmisseaduse abil teoreetiliselt leida ja graafiliselt kujutada seesuguse kerakese liikumisteed. Katse teel aga leiame elektrijõujoonte kuju elektrivälja spektrumist.

Viimase tekitamiseks võib tarvitada näiteks klaasnõu (joonistus 74), millesse terpentiinõli kallatakse. Õlisse segatakse vähe peenikesi gipskristalle või lühikesi siidkiude. Kui traadid A ja B ühendada elektriseerimismasina isenimeliste poolustega, siis tekib A ja B vahel elektri väli, mille jõujoonte sihis kettideks korralduvad õlis leiduvad kristallikesed või siidkiud. Sel teel tekkinud spektrumi kujutab joonistus 75 suurendatult.



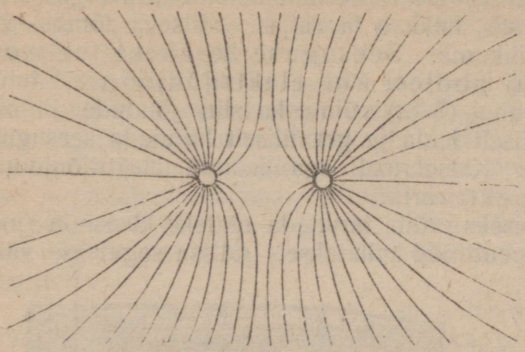

Joon. 74.




Joon. 75.

Veel lihtsamalt näeme jõujoonte ligikaudset kuju elektriseeritud kerale kinnitatud pabernarmaste seisust (§ 271), sest et seesugused painduvad narmad samuti kui kristallikesed õlis asenduma peavad jõujooni mööda. Me näeme narmaste seisust, et üksikult seisva elektriseeritud kera elektriväljas jõujooned igale poole raadiusi mööda sirgjooneliselt ja ühtlaselt laiali lähevad (joon. 61), et kahe vastupidiselt elektriseeritud kera vahel elektriväli kujuneb, mille jõujooned kaartena ühelt keralt teisele painduvad (joon. 62) jne. Samasugusel teel võib näha, et ühenimeliselt elektriseeritud kerade vahel väli tekib (joonistus 76),

mille jõujooned samal kombel üks-teisest eemale tõukuvad kui kahe ühenimelise magnetpooluse magnetjõujoonedki.



Joon. 76.

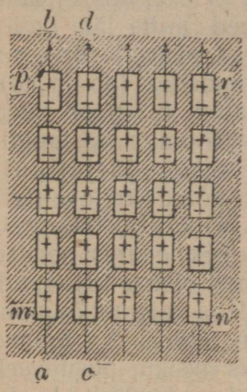
2) Et elektrivälja asetatud elektriseeritud vaba keha alati ühes kindlas sihis mööda jõujoont liikuma hakkab, siis öeldakse tingimisi, et igal jõujoonel enesel teatud kindel siht on. Elektrijõujoone sihiks loetakse seda sihti, mida mööda välja asetatud **positiivselt** elektriseeritud vaba keha liikuma hakkab. Et ühenimelised elektrid eemale tõukuvad, siis liigub seesugune keha alati positiivselt elektroodilt negatiivse juure; järjelikult on ka elektrijõujoonte siht positiivselt elektrilt negatiivsele. Me ütleme sellepärast, et elektrijõujooned algavad positiivse elektri juures ja lõpevad negatiivse juures.

Mitmesuguste nähtuste põhjal oletatakse, et elektrijõujoontel samasugused omadused on kui magnetjõujoontelgi (§ 9), s. t. et ka need jõujooned pikuti pinevil on ja selle tõttu lühemaks tahaksid tõmbuda ning et nad küljeti üks-teisest eemale tõukuvad. Seesuguse oletuse najal seletub siis elektrilaengute külgetõmbumine ja eemaletõukumine samuti kui magnetiline külgetõmbumine ja eemaletõukumine.

3) Coulombi seaduse järele tõmbuvad elektrilaengud seda tugevamini külge, mida lähemal nad üks-teisele asuvad; sellepärast tõmbub elektrivälja asetatud elektriseeritud keha seda tugevamini välja tekitava laengu külge, mida lähemal ta seisab viimasele; teiste sõnadega, elektriväli mõjub seda tugevamini temasse asetatud keha peale, mida lähemal asub viimane väljatekitavale laengule. Mida suurem on nimetatud mõju, seda tugevam ehk intensiivsem peab väli ise olema; sellepärast öeldakse, et välja tugevus on kõige suurem teda tekitava laengu läheduses ning et väli seda nõrgemaks jääb, mida kaugemale nihkuda sellest laengust. Välja spektrumitest (joon. 75 ja 76) näeme, et jõujooned kõige tihedamini koonduvad elektroodide läheduses, millel asuvad välja laengud, ja et nad elektroodidest kaugenemisel ikka hõredamaks ja hõredamaks jäävad. Järjelikult on elektriväli seal kõige tugevam, kus jõujooned kõige tihedamad ning **välja intensiivsus kahaneb jõujoonte hõrenemisega.** Seega kujutab spektrumi jõujoonte tihedus elektrivälja tugevust ehk intensiivsust.

§ 31. **Dielektriline polarisatsioon; juhi ja dielektriku vahe.** 1) Jõujoonte teooria looja Faraday silmis ei olnud jõujooned mitte ainult graafilised märgid, vaid reaalselt olemas olevad struktuurimuudatused või deformatsioonid, mis elektriseeritud keha ümbritsevas dielektrikus või eetris elektrijõujoonte sihis tekivad. Neid muudatusi nimetas Faraday dielektriliseks polarisatsiooniks.

Tema vaate järele on igas neutraalses ainemoleekulis ühevõrra mõlemat liiki elektrit. Satub aine elektrivälja, siis tõmbub igas moleekulis üks elekter moleekuli ühte otsa, teine aga tõukub moleekuli teise otsa. Et tõmbumine ja tõukumine elektri jõujoonte sihis sünnib, siis moodustavad jõujoonel ab (joon. 77) seisvad dielektrikumoleekulid keti, mille lülides (moleekulites) positiivne elekter näiteks moleekuli ülemisse ja negatiivne tema alumisse otsa on koondunud. Seesuguste polariseeritud moleekulite ketid ab, cd jne. moodustavadki elektrijõujooned.

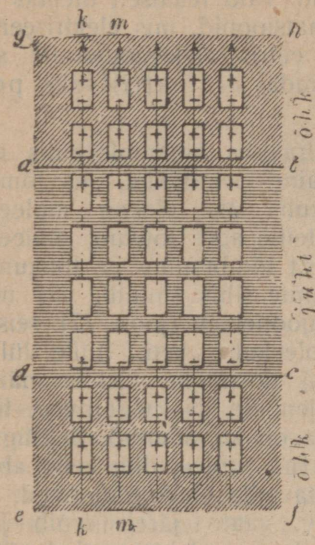


Joon. 77.

Faraday vaate järele võib juhi moleekulites leiduv elekter vabalt ühest moleekulist teise voolata; dielektriku moleekulites aga on elekter seotud moleekuliga, nii et ta ainult viimase piirides ühele või teisele poole võib nihkuda, ilma et ta ühest moolekulist teise pääseks. Ühel jõujoonel (näiteks ab) asuva kahe naabermooleekuli üks-teise vastu pöördud otsadesse koondunud vastupidised laengud ei saa dielektrikus järjelikult mitte ühineda ja neutraliseeruda. Piki kogu ketti (ab) seisab sellepärast ühe mooleekuli + E vastu teise moleekuli — E. Need laengud tõmbuvad külge, mille tagajärjel kogu kett lühemaks püüab tõmbuda ja nii siis pikuti pinevil on (jõujoone pikipinevus). Kõrvuti seisvates kettides (ab ja cd) asub ühe keti — E kõrval igal pool naaberketi samasuur —E, ning esimese + E kõrval teise keti + E. Need samanimelised laengud tõukuvad kogu keti pikkusel üks-teisest eemale, millega ka ketid ise küljeti eemale tõukuvad (jõujoonte küljeti-eemaletõukumine).

Juhtivas aines (abcd, joon. 78) voolab elekter vabalt ühest moleekulist teise; sellepärast ei või juhis polarisatsioon mitte alal hoiduda, sest et ühe moleekuli + E otsekohe ühineb naabermoleekuli — E-ga, mille tõttu moleekulites lahutatud laengud piki kogu ketti neutraliseeruvad. Ainult juhi pinnal asuvates moleekulites, seal kus elektrijõujooned lõikuvad juhi pinnaga, — jääb järele ühel pool (ab) positiivne ning teisel pool (cd) negatiivne elekter (juhi pindadel indutseeritud laengud.)

2) Oletatakse, et kirjeldatud polarisatsioon mitte ainult kõvades dielektrikutes ei teki, vaid kõigis; järjelikult ka õhus ja eetris, kuuluvad ju ka viimased dielektrikute hulka. Asub näiteks juht abcd (joon. 78) õhus või õhutus ruumis (eetris), siis polariseeruvad õhu ja eetri moleekulid elektrivälja piirkonnas dcef ja ab hg, moodustades elektrijõujooned kk, mm, jne. Et juhis moleekulid polariseeruda ei saa, siis ei lähe need jõujooned mitte läbi keha abcd, vaid nad peavad lõppema selle keha pindadel (ab ja cd). Nagu nimetatud (p. 2) on need pinnad induktsiooniga vastupidiselt elektriseeritud; järjelikult algavad ja lõpevad elektrijõujooned juhi elektriseeritud pindadel. Sellepärast peavad elektrijõujooned olema lahtised, eraldudes sellega magnetjõujoontest, mis on kinnised jooned (§ 8$_3$). Näiteks üksiku, positiivselt elektriseeritud kera pinnalt lähevad jõujooned radiaalselt laiali; need jooned ei paindu aga selle kera juure tagasi ega lõpe kusagil ruumis, vaid ulatavad kunni kaugemalseisvate kehade (näiteks toa lae, seinte jne.) pinnani, kus nad vastupidise elektri (— E) indutseerivad ja seovad. **Iga elektrijõujoone alguseks on seega teatud hulk + E-d ning tema lõpuks sama palju — E-d.**

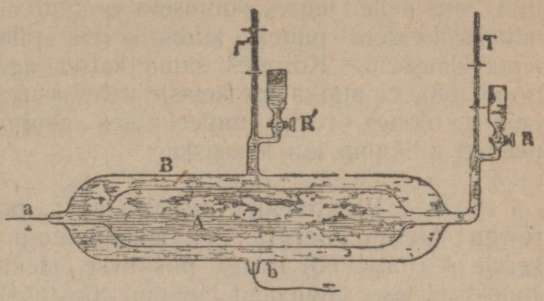


Joon. 78.

3) Kirjeldatud vaated põhjenevad mitmesugustel nähtustel, mis ilmuvad elektrivälja asetatud dielektrikutes. Nii leitakse näiteks, et kõva dielektriku struktuur elektrivälja jõujoonte sihis tõepoolest muutub. Seda tõestab muu seas asjaolu, et näiteks harilik homogeen klaas tugevasse elektrivälja asetatuna valgust polariseerib nagu oleks klaasil mingi kristalse aine struktuur. Mõnes dielektrikus tekivad elektrivälja mõjul nii tugevad mekaanilised pinevused, et ta koguni oma kuju ja ruum-ala võib muuta (elektrostriktsioon).

Täidame näiteks üks-teise sisse asendatud klaasnõud A ja B (joon. 79) nõrga väävelhappega (juht). Kui traatide a ja b kaudu väävelhape ühendada näiteks elektriseerimismasina vastupidiste poolustega, siis mõjub kogu aparaat nagu Leideni pudel, mille sisekatteks on hape nõus A, väliskatteks hape nõus B ning isolaatoriks sisemise klaasnõu sein. Hapete vahel asuv klaassein A eraldab vastupidiseid laenguid; seega viibib ta tugevas elektriväljas, mille jõujooned perpendikulaarselt läbi klaasseina lähevad. Vaadeldes happe nivoo kõrgust torudes T ja T', näeme et joonistusel tähendatud laengute mõjul happe nivoo torus T' tõuseb ja torus T langeb. Elektriseerimisel suureneb

seega sisenõu A mahutavus. Nähtuse põhjuseks võib olla ainult elektriväli, mille jõujooned positiivsest sisenõust läbi klaasi lähevad negatiivsesse välisnõusse ja mis nõu A seinu jõujoontè sihis nagu välja venitab.



Joon. 79.

Et juhtides jõujooned tekkida ei või, seda tõestab muu seas asjaolu, et läbi metallekraani „ükski elektriline mõju ei ulata (§ $19_1$), sest kui jõujooned läbi metalli läheksid, siis avalduks ka teisel pool ekraani elektriline külgetõmbumine või eemaletõukumine.

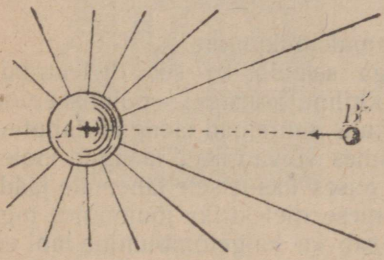
Dielektrilise polarisatsiooniga seletub ka see dielektrikute omadus, mida iseloomustab dielektriline konstant: polariseerumisel võivad ühe dielektriku molеekulis suuremad laengud lahutuda kui teise dielektriku molеekulis; ühes võivad need laengud molеekuli piirides kaugemale nihkuda, teises üks-teisele lähemale jääda. Vastavalt on siis piki-pinevus esimese dielektriku jõujoontes tugevam kui teise omis; järjelikult peab ka külgetõmbumine läbi esimese dielektriku tugevam olema kui läbi teise, oleneb ju külgetõmbumise suurus jõujoonte piki-pinevusest.

4) Mõned nähtused sunnivad oletama, et polariseerumisel elektrilaengute edasinihkumine molеekuli piirkonnas on seotud suurema või väiksema „hõõrumisega“. Ühes dielektrikus sünnib laengu nihkumine täiesti vabalt (näiteks õhk, eeter), sellepärast hoiduvad seal molеekulid polariseerituna ainult niikaua, kui elektriväli kestab, sest välja hävinemisega nihkuvad molеekulis lahutatud elektrid otsekohe tagasi oma endisse seisu ning neutraliseeruvad. Teistes dielektrikutes (klaas, eboniit j. t.) takistab nimetatud „hõõrumine“ lahutatud elektrite tagasinihkumist, nii et molеekulite neutraliseerumine ainult järk-järgult ja alles teatava aja järele peale elektrivälja kadumist võib sündida. Seesuguses dielektrikus hoiduvad nii siis jõujooned veel mõni aeg peale välja hävinemist alles; tema välispinnad (pr ja mn, joon. 77) jäävad selle tõttu sama kaua peale välja kadumist elektriseerituks. Sellega seletubki elektri „klaasi sisse tungimine“ Leideni pudelis (§ $29_3$): pudeli katete vahel asuv klaas polariseerub pudeli laadimisel ja hoidub polariseerituna veel mõni aeg peale selle, kui katted eemaldati ja tühjendati. Peale pudeli kokkuseadmist voolab klaasi pinnal hoidunud laeng katètesse, millega pudel uuesti saab laetud.

Et kõvade dielektrikute polariseerumine tõepoolest mingisuguse „hõõrumisega“ sünnib, seda tõestab muu seas asjaolu, et kõvad dielektrikud soenevad, kui neid korduvalt muutuvas elektriväljas hoida: seesuguses väljas peavad dielektriku

molekulite laengud alatasa pea ühele, pea teisele poole nihkuma; nihkumist takistava „hõõrumise" ületamiseks kulub elektrienergiat, mis selle juures soojuseks muutub. Laeme ja tühjendame näiteks Leideni pudeli kiires korras pikemat aega, siis soeneb tema klaassein. Korrates sama katset aga õhk-kondensaatoriga (joon. 68), ei märka me ketaste vahel asuva õhu (dielektriku) soenemist, olgugi et õhu molekulites laengud samuti edasi-tagasi peavad nihkuma kui klaasiski.

§ 32. **Elektrivälja potentsiaal; potentsiaali mõõtmine tööga; laengu energia.** 1) Lähendame positiivselt elektriseeritud kerale A (joon. 80) mingi positiivse elektrihulga B, näituseks 1 elektriüksuse: Mõlemad laengud tõukuvad eemale; lõpmata kaugel seisva laengu B puhul on tõukejõud praktiliselt null, lähenemisel aga kasvab see jõud järjest suuremaks. B lähendamisel mingi raadiust AB mööda peame nii siis alatasa ületama seda tõukejõudu, s. t. peame kulutama mekaanilist tööd, kusjuures lähendamiseks kuluv tööhulk seda suuremaks kasvab, mida lähemale A-le jõuab B. On lähendatav laeng alati näiteks üks elektrostaatiline elektriüksus (ESÜ) ja algame lähendamist alati lõpmata kaugelt (tõukejõud = o), siis kulub antud elektriväljas selle laengu lähendamiseks punktini B (raadiust AB mööda) alati üks ja sama kindel hulk mekaanilist tööd, sest et nii tõukejõud kui lähendamistee jäävad igal juhusel ühesuguseks. Laseme punkti B toodud laengu vabaks, siis tõukub tema tagasi kunni lõpmatuseni, s. t. siis teeb ta ise tööd, kusjuures tehtud tööhulk peab võrduma tema lähendamiseks kulutud tööga. Lähendamisel kulutatud töö ei lähe seega mitte kaduma, vaid ta koondub lähendatud laengusse potentsiaalse energiana samuti nagu kõrgele tõstetavas kivis koondub tõstmistöö kivi potentsiaalse energiana.



Joon. 80.

Antud välja igas punktis on nii siis sinna toodud ühel elektrostaatilisel elektriüksusel oma kindel potentsiaalne energia, mis võrdub tema lähendamiseks kulutatud tööga ning mille suurus järjelikult oleneb nii välja tekitava laengu (A) tugevusest kui selle punkti asukohast. Nimetatud potentsiaalenergia suurus iseloomustab nii siis selle punkti elektrivälja, kuhu lähendatud laeng toodi; teda hüütakse lühidalt elektrivälja potentsiaaliks selles punktis. Eelmisest järgneb, et antud väljapunkti potentsiaal võrdub arvuliselt selle tööhulgaga, mis kulub ühe positiivse elektrostaat. elektriüksuse lähendamiseks lõpmata kaugelt kunni antud punktini.

Asub positiivne elektriüksus negatiivse laengu väljas, siis ei kulu kirjeldatud lähendamiseks mingit tööd, vaid elektri tõmbejõud ise teeb samasuure töö. Seega on „kulutatud" töö negatiivne (s. t. kulutamise asemel saame tööd), nii siis on ka väljapunkti potentsiaal — negatiivne.

2) Lähendame ühe positiivse elektrost. üksuse kunni laetud keha pinnani, siis võrdub tema potentsiaalne energia arvuliselt keha pinna potentsiaaliga. Viimane peab olema ühesuurune kogu juhi pinnal (§ 21), sest vastasel korral kuluks mingi elektrilaengu edasi nihutamiseks mööda juhi pinda tööd, mis aga võimalik ei ole, sest tööd võib kuluda ainult seal, kus olemas on liikumissihis mõjuv jõud. Kui seesugused jõud juhi pinda mööda mõjusid, siis nihkuksid nende mõjul keha enese laengu-osad niikaua ühest kohast teise, kunni nad tasakaalu satuksid ja seega nimetatud jõud hävineksid.

Õõnsa juhi sisepiirkonnas ei avaldu elektri tõuke- ja tõmbejõud (§ 19$_1$); järjelikult ei kulu elektrilaengu ühest kohast teise nihutamiseks seal mingit tööd. Sarnasel puhul ei muutu ka juhi sisepiirkonna potentsiaal, s. t. **juhtiva keha sees on potentsiaal igal pool ühesuurune ja võrdne keha pinna potentsiaaliga.**

3) Paistab ehk arusaamatuna, et keha potentsiaali, kui tema elektriseerumisastet (§ 21$_1$) mööta võib tööga. Analoogiad teiste nähtustega aga näitavad, et see täiesti võimalik on: tahame näiteks nõusse (joon. 67), mille vedeliku nivookõrgus on h m, läbi mingi põhjaavause uut vedelikku juure pumbata, siis peame pumpamiseks, või õieti ainult uue vedeliku läbi nõu põhja pressimiseks seda rohkem tööd kulutama, mida kõrgem on nivoo. Et näiteks ühte liitrit vedelikku läbi põhjaavause nõusse suruda, peame antud nivookõrgusel alati ühe kindla tööhulga kulutama; see tööhulk oleneb siis ainult nivookõrgusest ja võib järjelikult viimase mõõduks olla. Et vedeliku nivookõrgus analoogiline on keha elektriseerumisastmega, siis laseb kirjeldatud näide aimata, mil viisil töö ka keha elektriseerumisastme mõõduks võib olla.

Kirjeldatud analoogia nivookõrguse ja potentsiaali vahel lubab oletada, et ka need seadused üks-teisega sarnased on, mis arvuliselt seovad tööd ja nivookõrgust ning tööd ja potentsiaali suurust. Oletusel, et nõusse pumbatav veehulk nii väike on, et ta nivookõrgust h ei muuda, kulub Q liitri vee nõusse surumiseks (läbi nõu põhjaavause) töö

$$A = Q \times h, \text{ s. t.}$$

töö = veehulk × nivookõrgus.

Vastavalt peaks siis elektri jaoks maksma seadus:

töö = elektrihulk × potentsiaal, ehk

$$A = E \times V \qquad 5)$$

Võib tõestada, et seesugune seadus elektri jaoks tõepoolest maksev on.

Valitseb antud väljapunktis potentsiaal V, siis tähendab see, et 1 ESÜ lähendamiseks lõpmatusest kunni selle punktini kulub V tööüksust (p. 1). Lähendame ESÜ asemel E üksust, siis on tõukumine selle elektrihulga ja välja teki-

tava laengu vahel E korda suurem (Coulombi seadus), s. t. lähendamiseks kulub siis EV tööüksust. Järjelikult võrdub kulutatud töö A (A) tõepoolest E ja V kasvatisega.

4) Seadus (5) on maksev igasuguses mõõdusüsteemis; temast tuletuvad potentsiaali üksused: on E = 1 coulomb ja A = 1 joule, siis on V = 1 potentsiaali praktiline üksus, mida voldiks hüütakse. Praktilises mõõdusüsteemis on seega antud väljapunkti potentsiaal üks volt, kui ühe coulombi lähendamiseks lõpmatusest kunni selle punktini ära kulub üks joule (= $10^7$ ergi) tööd. Formuli (5) järele on nii siis

$$\text{Coulombid} \times \text{voldid} = \text{joulid} \qquad 5^a)$$

Elektrostaatilises absoluutses mõõdusüsteemis on elektriüksuseks ESÜ (§ $18_3$) ja tööüksuseks erg, järjelikult on potentsiaali elektrostaatiliseks üksuseks (PSÜ) seesuguse väljapunkti potentsiaal, milleni lähendamiseks ühe ESÜ puhul kulub töö 1 erg, s. t.

$$1\ \text{ESÜ} \times 1\ \text{PSÜ} = 1\ \text{erg} \qquad 5^b)$$

Et 1 coulomb = $3.10^9$ ESÜ (§ $18_3$) ja 1 joule = $10^7$ ergi, siis leiame formulist ($5^a$), et $3.10^9$ ESÜ × 1 volt = $10^7$ ergi, ehk

$$1\ \text{ESÜ} \times 300\ \text{volti} = 1\ \text{erg}.$$

Võrreldes seda võrrandiga ($5^b$), selgub et

$$\mathbf{1\ PSÜ = 300\ volti} \qquad 6)$$

Kuigi potentsiaali tööga mõõdetakse, ei ole tema üksuse nimetus mitte samasugune kui töö oma: Formulist (5) leiame, et

$$\text{potentsiaal} = \frac{\text{töö}}{\text{elektrihulk}}$$

töö nimetus oli $C^2GS^{-2}$ (II § $18_3$), elektrihulga nimetus on $C^{\frac{3}{2}}G^{\frac{1}{2}}S^{-1}$ (§ $18_2$); seega on

$$\text{potentsiaali nimetus } \frac{C^2GS^{-2}}{C^{\frac{3}{2}}G^{\frac{1}{2}}S^{-1}} = C^{\frac{1}{2}}G^{\frac{1}{2}}S^{-1}$$

5) Elektriseeritud keha laengu energia võrdub selle tööga, mis kulub tema laengu Q ülekandmiseks lõpmatust kaugusest antud keha pinnale. Teadagi vabaneb samasuur energia laetud keha tühjendamisel ja moondub soojuseks, valguseks, heliks jne. Laengu energia suuruse leiame järjelikult, kui mõõdame tühjendamisel vabanenud energiate hulka. Riess mõõtis näiteks laengu energiat, tühjendades kondensaatori läbi peenikese traadi ja mõõtes selle traadi soenemist. Tema katsetest järgnes, et laengu Q energia võrdub:

$$W = \tfrac{1}{2}E.V \qquad 7)$$

Mõõdetake E coulombides, V — voltides, siis leitakse energia vastavates praktilise mõõdusüsteemi üksustes — joulides.

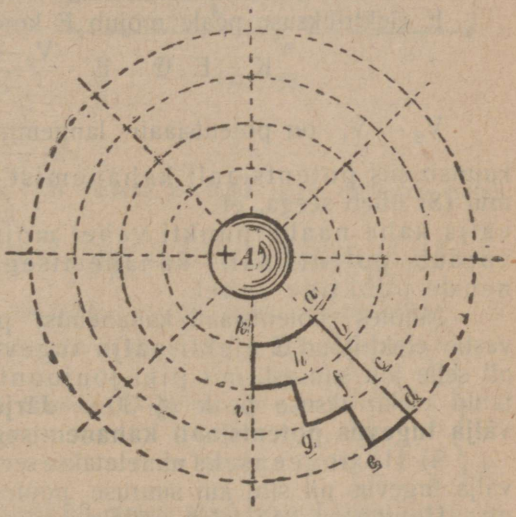
Leitud formulit kinnitab teooria. On elektrilaeng E ja keha potentsiaal V, siis leiame selle laengu keha pinnale kandmiseks kulutatud töö järgmiselt: Kanname kogu laengu üksikute elektriüksuste kaupa lõpmatust kaugusest keha pinnale; esimese ESÜ lähendamisel kehale on viimase potentsiaal veel null; järgmiste üksuste juures kasvab potentsiaal järgu kaupa ning on

viimase ESÜ lähendamisel V. Lähem matemaatiline juurdlus näitab, et töö väljaarvamiseks võib oletada, et keha potentsiaalil oli kõigi ESÜ lähenemisel keskmine suurus $\frac{0+V}{2} = \frac{1}{2}V$. Formuli (5) järele on siis kogu laengu lähendamiseks kulutatud töö tõepoolest $A_1 = \frac{1}{2}V \times E$.

## § 33. Elektrivälja nivoopinnad; potentsiaali kahanemine ja elektrijõud; potentsiaali arvestamine.

1) Igas elektriväljas leidub lõpmata hulk punkte, mille potentsiaal on ühesuurune. Kõik need punktid asuvad ühel pinnal, mida ekvipotentsiaalpinnaks ehk nivoopinnaks hüütakse. Et juhi pinna punktides potentsiaal ühesuurune on, siis moodustab juhi pind esimese nivoopinna.

Kujutame ette, et ümber elektriseeritud kera A (joon. 81) on tõmmatud kontsentrilised kerapinnad a, b, c jne. Et jõujooned üksikult seisva kera puhul radiaalsed on, siis peavad nad igal pool nimetatud kerapindadele perpendikulaarsed olema. Elektri-tõukejõud mõjub jõujoonte sihis, seega on ka tema perpendikulaarne nendele kerapindadele. Liikudes elektrilaenguga mööda ühte seesugust kerapinda, on elektri tõmbe- või tõukejõud seega alati perpendikulaarne liikumissihile, mille tõttu seesugusel liikumisel tööd ei kulu. Järjelikult ei muutu sellel liikumisel ka laengu potentsiaalne energia, mis muud ei tähenda, kui et ühe kerapinna kõigi punktide potentsiaal on ühesuurune. Sellepärast moodustavad ümber elektriseeritud kera tõmmatud kontsentrilised kerapinnad kera laengu elektrivälja nivoopindu.




Joon. 81.

Et elektri tõuke- ja tõmbejõud igas väljas jõujoonte sihis mõjuvad, siis järgneb ülevalkirjeldatust, et ka keerulisemas elektriväljades **nivoopinnad on perpendikulaarsed jõujoontele.**

2) Eelmisest § kirjeldatud arutustes lähendasime elektriüksust välja tekitavale laengule alati sirgjoonelises radiaalses sihis AB (joon. 80), sest et seal käsitatud eraldi seisva kera ümber kõik jõujooned sirgjoonelised ja radiaalsed on. Tõepoolest aga ei olene lähendamiseks kulutatud töö lähendamise teest, vaid ainult viimase lõpupunkti kaugusest välja laengust. Lähendame elektriüksuse näiteks mingit murdjoont defghika mööda (joon. 81) kerale A, siis kulutame tööd ainult teeosadel ef, gh ja ik, kus liikumine sünnib jõujoone sihis, s. t. vastu elektritõukejõudu. Nivoopindadel asuvatel teeosadel (de, fg, hi, ka) mingit tööd ei kulu; järjelikult teeme tööd ainult teel ef + gh + ik, mis sama pikk on ja millel samasuured jõud mõjuvad kui raadiusel da = dc + cb + ba. Liikumisel mööda raadiust da on seega kulutatud töö sama suur kui liikumisel mööda mingit murd- või kõverjoont, mis punkte d ja a ühendab. Algame lähendamist lõpmatusest, siis on, punkti a jõudes, kulutatud töö ikka üks ja sama, sündigu lähendamine ükskõik missugust teed mööda.

3) On kahe väljapunkti potentsiaalid $V_1$ ja $V_2$, siis tähendab see, et ühe elektriüksuse lähendamiseks lõpmatusest esimese punktini kulub $V_1$, teiseni aga $V_2$ tööüksust. Järjelikult kulub sama elektriüksuse üleviimiseks teisest punktist esimesse $V_2 - V_1$ tööüksust. Seisavad mõlemad punktid ligistikku, kaugusel d, siis võib oletada, et nende punktide ühendusjoont mööda mõjuv elektri-tõukejõud $\mathfrak{E}$ on kogu pikkusel d konstant. Sel puhul võrdub elektriüksuse üleviimiseks ühest punktist teise kulutatud töö kasvatisega $\mathfrak{E} \times d$, mis eelmise järele võrduma peab $V_2 - V_1$. Sellest järgneb, et kahe ligistikku seisva väljapunkti vahel ($V_1$ ja $V_2$) ühe elektriüksuse peale mõjuv jõud, n. n. välja elektrijõud on

$$\mathfrak{E} = \frac{V_2 - V_1}{d} \qquad 8)$$

E elektriüksuse peale mõjub E korda suurem jõud

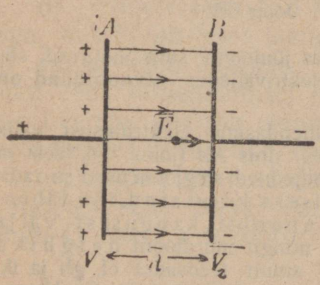
$$K = E \cdot \mathfrak{E} = E \cdot \frac{V_2 - V_1}{d} \qquad 8^a)$$

$V_2 - V_1$ on potentsiaali langemine pikkusel d, $\frac{V_2 - V_1}{d}$ kujutab siis potentsiaali kahanemist pikkusüksusel (cm). Formul (8) ütleb seega, et

välja kahe naaberpunkti vahel mõjub elektrijõud ($\mathfrak{E}$), mis võrdub potentsiaali kahanemisega (ühel sentimeetril) nende punktide vahel.

Mõõtes potentsiaali kahanemist piki jõujoont, kujutab vastav elektrijõud $\mathfrak{E}$ elektrivälja tugevust, mõistame ju viimase all selle jõu suurust, mis piki jõujoont mõjub antud välja asetatud elektriüksuse peale (§ 30₃). **Järjelikult võrdub elektrivälja tugevus potentsiaali kahanemisega piki jõujoont.**

4) Homogeenseks nimetatakse seesugust elektrivälja, milles välja tugevus nii sihi kui suuruse poolest igal pool ühesugune on. Homogeen väli tekib näiteks kahe lõpmata suure paralleelplaadi A ja B vahel (joon. 82): Plaatide vahele paigutatud laeng E tõmbub välja igas punktis ühesuuruse jõuga perpendikulaarselt plaadi B poole. Selles väljas on kõik jõujooned paralleelsed ja ühetihedad. On plaatide potensiaalid $V_1$ ja $V_2$, siis on potentsiaali kahanemine piki jõujoont ja temaga võrdne välja tugevus $\frac{V_2 - V_1}{d}$, kus d kujutab plaatide kaugust üksteisest. On näiteks $V_2 - V_1 = 3000$ volti $= 10$ PSÜ ja plaatide kaugus $d = 5$ cm, siis tõmbub laeng $E = 15$ ESÜ plaadi B külge jõuga (formul 8ª):



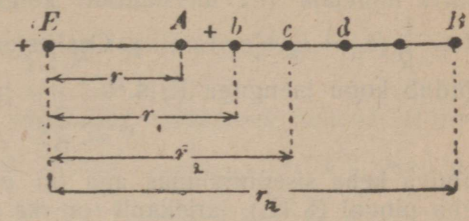
Joon. 82.

$$K = E \cdot \frac{V_2 - V_1}{d} = 15 \frac{10}{5} \frac{\text{ESÜ} \times \text{PSÜ}}{\text{cm}} = 30 \frac{\text{erg}}{\text{cm}} = 30 \text{ düüni.}$$

5) Lihtsatel juhustel võib potentsiaali suurust arvestusega leida. Ühte punkti koondatud laengu E puhul näitab arvestus, et kaugusel r asuva punkti A (joon. 83) potentsiaal on

$$V = \frac{E}{r} \qquad 9)$$

Tõestus: Eelmise § järele võime potentsiaali suurust mõõta selle tööga mida teeb elektritõukejõud, eemaldades 1 positiivse ESÜ antud punktist A lõpmata kaugele. Et leida mingisugusel teepikkusel AB (joon. 83) tehtud tööd, jagame pikkuse AB lõpmata väikesteks osadeks Ab, bc, cd jne. ja leiame igal seesugusel teelõikel tehtud töö. Coulombi seadusest järgneb,et:




Joon. 83.

tõukejõud punktis A on $P_1 = \frac{E.1}{r^2} = \frac{E}{r^2}$;

„ „ b „ $P_2 = \frac{E}{r_1^2}$ jne.

Lõike Ab lüheduse tõttu võib oletada, et tema kogu pikkusel mõjub ühesuurune keskmine jõud

$$\frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{E(r^2 + r_1^2)}{2 r^2 r_1^2} = \frac{E(r^2 + r_1^2 - 2 r r_1 + 2 r r_1)}{2 r^2 r_1^2} = \frac{E[(r_1 - r)^2 + 2 r r_1]}{2 r^2 r_1^2},$$

Et $r_1 - r$ on lõpmata väike, siis võib $(r_1 - r)^2$ nulliks pidada. Seega on $\frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{E}{r r_1}$. Lõikel Ab tehtud töö on siis $\frac{E}{r r_1}(r_1 - r) = E.\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_1}\right)$.

Samuti leiame, et lõikel bc on töö $E.\left(\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2}\right)$

ja lõikel cd $E.\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3}\right)$ jne.

Et leida töö suurust pikkusel AB, peame need tööosad kunni punktini B summeerima. Summa üksikud lülid hävinevad kõik peale esimese ja viimase, nii et pikkusel AB tehtud töö on $E\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{r_n}\right)$. Kaugeneb ESÜ lõpmatuseni, siis kasvab $r_n$ lõpmata suureks, s. t. $r_n = \sim$ ja $\frac{1}{r_n} = O$. Seega on otsitud töö

$$A = E.\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{\sim}\right) = \frac{E}{r} = V.$$

Kui välja tekitab mitu laengut $E_1$, $E_2$, $E_3$ jne., mille kaugused vaadeldavast väljapunktist on vastavalt $r_1$, $r_2$, $r_3$ jne., siis võib tõestada, et vaadeldava väljapunkti potentsiaal nimetatud laengute suhtes on

$$V = \frac{E_1}{r_1} + \frac{E_2}{r_2} + \frac{E_3}{r_3} + \ldots\ldots = \Sigma \frac{E}{r} \qquad 10)$$

6) Leitud formulite põhjal leiame laetud kera potentsiaali: Juhtiva kera pinnal jaguneb tema laeng E ühtlaselt. Laengu iga osake e annab kera tsentrumis (s. t. kaugusel R = raadius)

potentsiaali $\frac{e}{R}$. Formuli (10) järele on siis tsentrumi potentsiaal kõigi pinnalaengute suhtes:

$$V = \Sigma \frac{e}{R}.$$

Et kõik laengud e tsentrumist ühekaugusel seisavad, siis on murru nimetaja (R) ühesuurune kõigi laenguosade jaoks, s. t. $V = \frac{1}{R}(e_1 + e_2 + e_3 + \ldots)$. Osakeste summa $(e_1 + e_2 + e_3 + \ldots)$ võrdub kogu laenguga E, s. t.

$$V = \frac{E}{R};$$

Juhtiva keha sisepiirkonnas aga on potentsiaal sama suur kui keha pinnal (§ $32_2$), järjelikult on ka kera pinnapotentsiaal

$$V = \frac{E}{R} \qquad 11)$$

Sama suur oleks pinnapotentsiaal, kui kogu laeng E koondatud oleks kera tsentrumisse (formul 9). Tähendab:

**Juhtiva kera puhul on pinnapotentsiaal niisugune, kui asuks kogu laeng kera tsentrumis.** Sama seadus maksab ka kõigi nende punktide potentsiaali kohta, mis asuvad väljaspool kerapinda.

§ 34. **Elektrimahutavuse ja dielektrilise konstandi mõõtmine; elektrimahutavuse üksused.** 1) Elektrimahutavuse üksuseks on seesuguse keha mahutavus, mille potensiaal ühe laengüksuse mõjul ühe potentsiaalüksuse võrra tõuseb.

Praktilises mõõdusüsteemis on keha elektrimahutavus 1 farad, kui tema potensiaal laenguga 1 coulomb tõuseb 1 voldi võrra. On keha mahutavus C faradi, siis tõuseb tema potentsiaal 1 Cb mõjul ainult $\frac{1}{C}$ voldi võrra, E coulombi mõjul aga $\frac{E}{C}$ võrra. Seega on keha potentsiaal:

$$V = \frac{E}{C} \qquad 12)$$

Samuti tõuseb nõu nivookõrgus mingi veehulga mõjul h cm võrra kui nõu mahutavus on 1, $\frac{h}{2}$ cm võrra kui mahutavus on 2 ja $\frac{h}{C}$ cm võrra kui mahutavus on C.

2) Elektrostaatilises absoluutses mõõdusüsteemis on keha mahutavus 1 elektrostaat. mahutavusüksus (MSÜ = mahutavuse staat. üksus), kui laeng 1 ESÜ tema potentsiaali ühe PSÜ võrra tõstab. Sarnaselt kui eelmisel juhusel, leiame et $V = E:C$, ehk $C = E:V$, s. t.

$$1\ \text{MSÜ} = 1\ \text{ESÜ}:1\ \text{PSÜ} \qquad 12^a)$$

Formul[illegible](12)[illegible]annab, et

$$1 \text{ farad} = 1 \text{ coulomb} : 1 \text{ volt}$$

Et $1 \text{ Cb} = 3.10^9$ ESÜ ja $1 \text{ volt} = {}^1/_{300}$ PSÜ[illegible](§[illegible]$32_4$), siis järgneb sellest, et $1 \text{ farad} = 3.10^9 \text{ ESÜ} : {}^1/_{300}\text{PSÜ} = 9.10^{11}$ ESÜ:1 PSÜ, ehk

$$\frac{1}{9.10^{11}} \text{ faradi} = 1 \text{ ESÜ}:1 \text{ PSÜ}.$$

Võrreldes seda võrrandiga (12 [a]), näeme, et

$$1 \text{ MSÜ} = \frac{1}{9.10^{11}} \text{ faradi, s. t.}$$

$$1 \text{ farad} = 9.10^{11} \text{ MSÜ} \qquad 13)$$

Selgub, et 1 farad on väga suur mahutavus. Sellepärast tarvitatakse praktikas tihti faradi asemel $\frac{1}{1000000} = 10^{-6}$ osa temast, mida mikrofaradiks (MF) hüütakse:

$$1 \text{ MF} = 10^{-6} \text{ faradi} = 9.10^5 \text{ MSÜ}. \qquad (13^a)$$

3) Kerapinna potentsiaal oli $V = E:R$ (§ $33_6$). Võrreldes seda formuliga (12) näeme, et kera puhul on

$$C = R.$$

Silmas pidades, et kera potentsiaali arvestamisel (§ $33_6$) elektrostaatilist elektriüksust (ESÜ) tarvitati, ütleb leitud võrdsus, et kera mahutavus C, avaldatud elektrostaatilistes mahutavusüksustes, võrdub arvuliselt tema raadiusega R, avaldatud sentimeetrites. Elektrostaatilises mõõdusüsteemis mõõdetakse nii siis mahutavust samuti kui pikkustki sentimeetrites. On mingi keha mahutavus näiteks 10 MSÜ, siis tähendab see, et tema mahutavus on sama suur kui kera oma, mille raadius on 10 cm.

Formuli (12) järele on

$$1 \text{ MSÜ} = \frac{1 \text{ ESÜ}}{1 \text{ PSÜ}} = \frac{C^{\frac{3}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}}{C^{\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}} = C = \text{cm},$$

(sest $1 \text{ ESÜ} = C^{\frac{3}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}$ ja $1 \text{ PSÜ} = C^{\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}$, § $32_1$).

Seega on MSÜ nimetus tõepoolest sama kui pikkusüksuse oma.

1 MF on seesuguse kera mahutavus, mille raadius on $9.10^5 \text{ cm} = 9000 \text{ m}$. Järjelikult on kogu maakera mahutavus ligi 707 MF.

4) Antud keha elektrimahutavuse mõõtmiseks võib tarvitada järgmist metoodi: Anname tuntud mahutavusega kehale, näiteks kerale raadiusega C cm mingi laengu E ja mõõdame elektromeetriga keha potentsiaali V. Siis on laengu suurus

$$E = C.V \text{ (formul 12)},$$

sest et kera mahutavus on C MSÜ.

Nüüd ühendame sama keraga isoleeritud mõõdetava keha (elektriseerimatult) ja mõõdame elektromeetriga mõlema keha ühise potentsiaali V'. Et laengu suurus mõlemal kehal kokku on endine E, nende ühine mahutavus aga C + x (kus x on keha otsitud mahutavus), siis peab formuli (12) järele olema

$$E = (C + x) V' = CV, \text{ ehk}$$

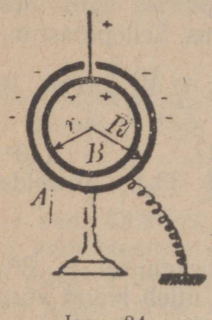
$$x = \frac{V - V'}{V'} C$$

5) Kerapinnalise kondensaatori (joon. 84 ja 84-a) mahutavuse jaoks annab arvestus, et

$$C = \frac{R^2}{d} = \frac{O}{4\pi d}, \qquad (14)$$

kus O tähendab ühe katte pinnasuurust ja d katete kaugust üksteisest. Mõõdame O ja d sentimeetrites, siis leiame C elektrostaatilistes üksustes.

Tõestus: Kondensaatori väliskatte A ühendame maaga, tema sisekatte B aga elektriallikaga. Sisekatte laeng E mõjub väliskatte peale sarnaselt nagu oleks ta kera tsentrumisse koondatud (§ $33_6$). Järjelikult peab väliskatte potentsiaal selle laengu suhtes olema +E:R (formul 9). Tõeliselt aga on väliskatte potentsiaal null, sest et ta maaga on ühendatud. See on võimalik ainult siis, kui väliskattel enesel asub nii suur vastupidine laeng —E', et viimase potentsiaal (—E':R) hävitab esimese potentsiaali; s. t. et $\frac{+E}{R} + \frac{-E'}{R} = 0$, millest järgneb, et E = —E'. Väliskatte laeng —E' annab omalt poolt sisekattefe potentsiaali $-\frac{E}{R}$, mis võrdub väliskatte potentsiaaliga, sest et kera A sisepiirkonnas on potentsiaal sama suur kui A pinnal. Seega on sisekatte potentsiaal tema enese laengu mõjul $\frac{+E'}{r}$ ja väliskatte laengu mõjul $\frac{-E'}{R}$, kokku aga



Joon. 84.

$$V = \frac{+E'}{r} + \frac{-E'}{R} = E\left(\frac{1}{r} - \frac{1}{R}\right) = E\left(\frac{R-r}{Rr}\right) = E\,\frac{d}{Rr}.$$

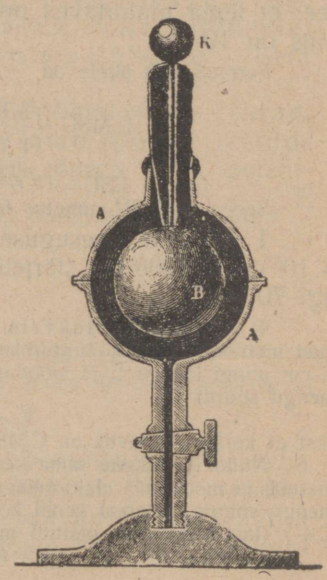
Et katted harilikult üks-teise lähedal seisavad, siis võib ilma suurema veata lugeda r = R, nii et $V = E\,\frac{d}{R^2}$. Tundes sisekatte laengut E ja potentsiaali (V), leiame kondensaatori mahutavuse (formul 12):

$$C = \frac{E}{V} = \frac{E}{E\,\frac{d}{R^2}} = \frac{R^2}{d} = \frac{O}{4\pi d},$$

sest et katte pind on $O = 4dR^2$.

Formuli (14) järele võib ligikaudselt välja arvata ka tasapinnaliste kondensaatorite ja Leideni pudelite mahutavuse. Temast järgneb seadus.

**Kondensaatori mahutavus on proportsionaalne katte pinnaga ja ümberpöördult proportsionaalne katete kaugusega üksteisest.**



Joon. 84a.

6) Dielektrilise konstandi mõõtmiseks täidetakse vahe kerakondensaatori (joon. 84-a) katete A ja B vahel järgimööda mitmesu-

guste dielektrikutega ja mõõdetakse kondensaatori mahutavust iga dielektriku puhul. Oli mahutavus õhuga C ja mõõdetava dielektrikuga C', siis on § $28_4$ järele

$$\text{dielektriline konstant } k = \frac{C'}{C}$$

Tähtsamate ainete jaoks on dielektrilise konstandi suurus järgmine:

| | | | |
|---|---|---|---|
| Õhk ($0^0$ C ja 1 atm) | 1 | klaas (harilik) | 4—7 |
| kõva paraffiin | 1,7—2,3 | vilgukivi | 4—8 |
| petroleum | 2,2 | kroonklaas | 7 |
| eboniit | 2—3 | puhas vesi | 80 |

On kondensaatori katete vahel õhu asemel mingi teine dielektrik, siis peame tema mahutavuse leidmiseks formuli (14) järele leitud suuruse kasvatama vastava aine dielektrilise konstandiga k, s. t. mahutavus on siis

$$C = k\,\frac{O}{4\pi d} \qquad 14^a)$$

**Näited:** 1) Metallkera raadiusega 30 cm saab laengu 0,000001 coulombi. Kui suur on tema potentsiaal voltides?

1 Cb = $3.10^9$ ESÜ; seega on 0,000001 Cb = $10^{-6}$ Cb = $3.10^3$ ESÜ = 3000 ESÜ.

Et kera mahutavus on 30 MSÜ, siis kulub tema potentsiaali tõstmiseks ühe PSÜ võrra 30 ESÜ elektrit. Saab kera 3000 ESÜ, siis tõuseb tema potentsiaal $\frac{3000}{30} = 100$ korda rohkem, s. t. 100 PSÜ = 100.300 = 30.000 voldi võrra.

Formuli (12) järele on

$$V = \frac{E}{C} = \frac{3000\ \text{ESÜ}}{30\ \text{MSÜ}} = 100\ \text{PSÜ} = 30.000\ \text{volti.}$$

2) Kui suur on keha elektrimahutavus, kui ta 240 ESÜ mõjul saab potentsiaali 3600 volti?

3600 volti $= \frac{3600}{300} = 12$ PSÜ. Seega on mahutavus $C = \frac{E}{V} = \frac{240\ \text{ESÜ}}{12\ \text{PSÜ}} =$ = 20 MSÜ = 20 cm, s. t. ta võrdub kera mahutavusega, mille raadius on 20 cm.

3) Kahe kera raadiused on 5 ja 7 cm. Nendele antakse laengud 120 ja 98 ESÜ. Kui suur on pinge mõlema laetud kera vahel ja kui suur on potentsiaal peale kerade ühendamist?

Kerade mahutavused on 5 ja 7 MSÜ. Nende potentsiaalid on peale laadimist.

$V' = \frac{120}{5} = 24$ PSÜ = 7200 volti ja $V'' = \frac{98}{7} = 14$ PSÜ = 4200 volti. Seega on pinge laetud kerade vahel:

$$V' - V'' = 7200 - 4200 = 3000\ \text{volti.}$$

Peale ühendamist on kerade ühine mahutavus C = 7 + 5 = 12 MSÜ. Kogulaeng on 120 + 98 = 218 ESÜ. Selle laengu mõjul on süsteemi potentsiaal

$$V = \frac{218}{12} = 18{,}33\ \text{PSÜ} = 5450\ \text{volti.}$$

Ühendamisel voolab elekter väiksemalt keralt suuremale, sest et esimese algpotentsiaal (7200 volti) suurem on teise omast (4200 volti).

4) Kerade raadiused on 7 cm ja 13 cm. Pinge nende vahel on 27000 volti. Suurema kera laeng on $E_2 + 260$ ESÜ. Missugune on väiksema kera laeng $E_1$?

Suurema kera potentsiaal (maa suhtes) on $V_2 = \frac{E_2}{C_2} = \frac{+260}{13} = +20$ PSÜ = = 20.300 = +6000 volti. Et pinge kerade vahel on 27.000 volti, siis peab teise

kera potentsiaal (maa suhtes) kas negatiivne olema, nimelt $-27000+6000=$ $=-21000$ volti $=-70$ PSÜ, või positiivne $+27000+6000=+33000$ volti. $=+110$ PSÜ. Esimesel juhusel on väiksema kera laeng negatiivne

$$E_1 = V_1 C_1 = +70.7 = -490 \text{ ESÜ.}$$

Teisel juhusel on

$$E_1 = V_1 C_1 = +110.7 = +770 \text{ ESÜ.}$$

5) Franklini tahvli katte pind on $O = 0{,}5\ m^2 = 5000\ cm^2$; katete kaugus $d = 4$ mm $= 0{,}4$ cm ja isoleeriva klaasi dielektriline konstant $k = 4$. Tahvel laetakse potentsiaaini $V = 3600$ volti, kusjuures teine kate on ühendatud maaga. Kui suur peab olema niisugune Leideni pudeli mahutavus, mille potentsiaal ühendamisel nimetatud laetud tahvliga tõuseb 1110 voldini?

Tahvli mahutavus oleks õhus formuli (14) järele:

$$C' = \frac{O}{4\pi d} = \frac{5000}{4\pi 0{,}4} \cong 1000 \text{ MSÜ.}$$

Klaasi mõjul on mahutavus $k = 4$ korda suurem, s. t.

$$C = 4.1000 = 4000 \text{ MSÜ.}$$

Potentsiaalil 3600 volti $= \frac{3600}{300} = 12$ PSÜ on tahvli katte laeng

$$E = CV = 4000.12 = 48000 \text{ ESÜ.}$$

Ühendatud tahvli ja Leideni pudeli potentsiaal on $V_2 = 1110$ volti $=$ $= 3{,}7$ PSÜ, nende ühine mahutavus on $(C + x) = (4000 + x)$, kus x on Leideni pudeli otsitud mahutavus. Et laengu suurus ei muutu, siis on formuli (12) järele

$$C + x = \frac{E}{V_2} = \frac{48000}{3{,}7} \cong 13000 \text{ MSÜ, s. t.}$$

$x = 13000 - C = 13000 - 4000 = 9000$ MSÜ $= \frac{9000}{9.10^{11}}$ faradi $= 10^{-8}$ faradi $=$ $= 10^{-8}.10^6$ MF $= 0{,}01$ MF.

§ 35. **Atmosfääriline elekter; äike; piksevardad.** 1) Kui kõrge teiva otsa põlev küünal kinnitada ja viimase leegis isoleeritud traadi üks ots hoida, siis omandab juhtiv traat leeki ümbritseva õhu potentsiaali, sest et tulileek samuti nagu teravik oma lähema ümbruskonna potentsiaali omandab (§ 23₅). Ühendame traadi alumise otsa maapinnal asuva elektromeetriga, siis tõukuvad viimase lehekesed laiali. Sellest näeme, et atmosfäärilisel õhul teistsugune potentsiaal on kui maakeral, sest vastasel korral ei võiks tulileegi ja maapinna vahel potentsiaalvahet tekkida. Õhu potentsiaali suurus on väga kõikuv, ta ei muutu aja jooksul mitte ainult suuruses vaid koguni omas märgis. Selgel päiksepaistsel ilmal on õhu potentsiaal positiivne; tema suurus kasvab maapinnalt kaugenemisega. Tõstame küünla näiteks ühe meetri võrra kõrgemale, siis näitab elektromeeter 140—150 voldilist potentsiaalitõusu. Kuid see potentsiaalitõus (meetri kohta) ei ole igal kõrgusel mitte ühesuurune: kuna ta maapinna läheduses on 140—150 volti, leitakse, et ta kõrgetes õhukihtides (üle 3000 m. kõrgusel) on ainult 8—10 volti meetri tõusu kohta. Potentsiaal maapinna ja atmosfääri vahel tõuseb nii siis seda suuremaks, mida kõrgemal asub vastav õhukiht, kuid potentsiaalvahe kasvamine sünnib seda aeglasemalt, mida kõrgemale jõuame.

Atmosfääri potentsiaali põhjuseks peavad olema elektrilaengud, mis õhu moleekulid elektriseerivad. Neid laenguid hüütakse atmosfääriliseks elektriks. Selge ilma puhul peab atmosfääriline elekter maapinna läheduses positiivne olema.

Atmosfäärilise elektri tekkimist seletatakse uuemal ajal n. n. joonide tekkimisega (§ 92₂): päiksevalguses leiduvate ultraviolett kui ka mõningate teiste kiirte mõjul lagunevad õhu moleekulid positiivseteks ja negatiivseteks osadeks — n. n. joonideks. Katsetega võib tõestada, et veeaur tiheneb veepiiskadeks hõlpsamini negatiivsete kui positiivsete joonide ümber. Negatiivsete joonide laeng langeb ühes nende ümber tekkinud veepiiskadega vihmana maapinnale, kuna aga õhku järele jääb ainult positiivne elekter. Ka lahutuvad mõlemad liiki joonid veel selle tõttu, et ühes nendest (negatiivsed) oma laengu kergemini kui teised ära annavad naaberkehadele. Seesugustel põhjustel arvatakse atmosfääriline elekter tekkivat ja alles hoiduvat.

On katseid tehtud atmosfäärilise õhu ja maapinna võrdle. misi suurt potentsiaalvahet ära kasutada elektri voolu saamiseks. Kuid peaasjalikult selle potentsiaalvahe suure kõikumise tõttu ei ole sellel alal sennini midagi nimetamisväärilist savutatud.

2) Äikse puhul tekivad atmosfääri elektri jagunemises suured ja järsud muudatused: tugevate vihmavalangute tagajärjel eraldub pilvedes negatiivne elekter positiivsest. Pilve potentsiaal võib selle tõttu nii kõrgeks tõusta, et tema elekter pika sädemena — välguna maasse voolab (võrdle § 27₂). Välgu kuju võib väga mitmesugune olla:

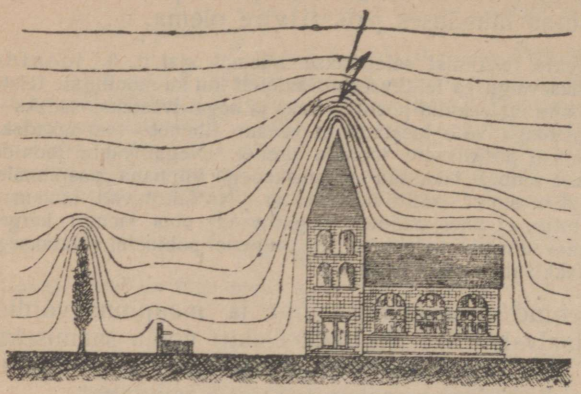
Säde- või joonesarnane välk on lihtne, väga pikk (kunni 8 klm.) elektrisäde, mis pilve maaga ühendades harilikult mitmesse sihti haruneb.

Pinnakujuline välk on, vastandiks eelmisele, ilma teravate piirjoonteta; ta valgustab pilve suuremat või väiksemat pinnaosa ja ilmub harilikult ilma müristamiseta. Siia liiki kuulub ka tuntud pälkamine (põua välgud).

Välgu mõju on sarnane suure Leideni pudeli tühjendamise omaga. Lööb välk mingi metallasjasse, siis sulaneb viimane, kui ta mitte küllalt tugev ei ole. Põlevad ained süütuvad, — iseäranis kergesti siis, kui nad asuvad suuremate, maast isoleeritud metallkehade läheduses, millest välk sädemetena maasse üle hüppab. Lööb välk liiva sisse, siis sulanevad liivaterad kokku ja sünnib pikk kõva keha (n. n. „piksenool"). Majaseintesse lüües purustab välk neid ülisuure jõuga; välgust tabatud puu lõhkub pikkadeks kiududeks, tema koor paiskub kogu tüvelt eemale jne. Viimaste nähtuste põhjuseks arvatakse olevat puukoore ja kiudude vahel leiduva mahla järsk aurumine.

Inimese ja loomade keha võib saada välgu sisselöömisel kas väliselt haavatud ja põletatud, või erkude põrutusel halvatud ja surmatud. Hädaoht on kõige suurem, kui äikse ajal lagedal väljal või üksikute puude varjus seista. Majadesse võib välgu sisselöömist hõlbustada küdevast ahjust tõusev suits, mis

elektrit juhib. Sellevastu on akna avamine äikse ajal täiesti hädaohuta, kui aga selle juures toas tugevat tõmbetuult ei teki.

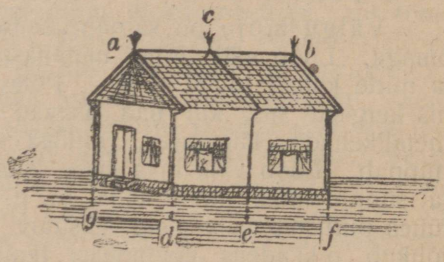


Joon. 85.

Atmosfäärilise elektri ühtlasel jagunemisel oleks nivoopinnad paralleelsed maapinnale, kujutab ju viimane esimest nivoopinda (§ 331.) Et aga maapinnal juhtivad kehad seisavad, siis paenduvad nivoopinnad ümber nende kehade (joon. 85). Selle tõttu seisavad nivoopinnad kõige kõrgema keha kohal kõige tihedamini üksteise ligidal. Potentsiaali kahanemine ja elektrijõud on selles kohas järjelikult kõige suurem (§ 343) ning välk lööb sellepärast alati kõige kõrgema keha sisse.

3) Piksevarda ülesanne on kaitsta temaga varustatud ehitust välgu sisselöömise vastu. Tema ülesleidja Benjamin Franklin (1749) soovitas piksevardaks metall-varrast, mille alumine ots maaga ühendatud, kuna tema terav ja kullatud teine ots üle kaitsetava maja harja ulatab. Uuematel uurimistel leiti, et varda otsa kuldamine täiesti üleliigne on, ja et ühe pika varda asemele soovitav on panna mitu lühemat varrast.

Kõige paremaks loetakse järgmist piksekaitset (n. n. Melsens'i süsteemi): Piki kaitsetava ehituse katuseharja kinnitatakse tugev metalljuht a b (joon. 86). Viimane on varustatud terve rea lühikeste (3—4 jalga pikkade) raudteravikkudega a b c (tihti koguni teravikkude puhmadega). Ülemine juht on maaga ühendatud vertikaaljuhtide süsteemiga, mille otsad e f d võimalikult sügavale maa sisse ulatavad. Oletatakse, et teravikud a, b ja c pilvest elektrit enesesse „imevad“ (§ 235) ja teda sel kombel järk-järgult vertikaaljuhtide kaudu maasse juhivad. Paljud nähtused aga tõestavad, et teravikkude „imemine“ koguni mitte alati välgu tekkimist takistada ei suuda. Sellepärast varustataksegi ülevalkirjeldatud piksekaitsel maja katus mitme teravikuga: peaks välk siiski sisse lööma, siis lööb ta kõige kõrgemal seisvatesse teravikkudesse ja voolab vertikaaljuhte mööda maasse, ilma et ta ehitust rikuks. Ühendusjuhtide arv peab võrdlemisi suur olema, sest et välk ainult sisselöömiskoha s. t. teravikkude läheduses seisvaid juhte mööda edasi läheb ja suuremaid kõrvalekaldumisi sirgjoonelisest teest ei tee. Kaitsejuhtidega ühendatakse kõik teised majas




Joon. 86.

leiduvad suuremad metallmassid. Vastasel korral võiks välk nendesse üle hüpata ja selle juures tekkiva sädemega maja põlema süüdata.

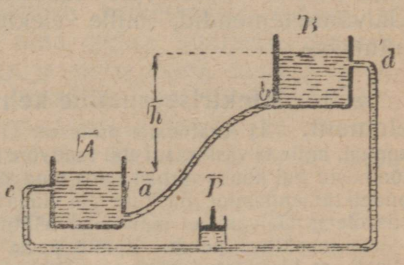
4) Välguga ühel ajal tekkiv müristamine on õhulainetamine, mille põhjuseks on välgust soendatud õhuosade paisumine. Viimane sünnib nii järsku, et paisumine plahvatuse sarnaseid õhutõukeid sünnitab, mis helilainetena meie kõrva tulevad.

## Peatükk III:

# Elektrivool ja Galvani-elekter.

§ 36. **Elektri voolu tekkimine; voolu tugevus.** 1) Ühendame laetud Leideni pudeli välis- ja sisekatte märja niidiga, siis tühjendub pudel läbi niidi. Et märg niit võrdlemisi halb elektrijuht on, siis ei sünni pudeli laengute neutraliseerumine mitte silmapilkselt, vaid teatava aja jooksul: on sisekatte potentsiaal näiteks kõrgem väliskatte omast, siis hakkab sisekattelt positiivne elekter läbi niidi väliskattesse voolama, samuti kui vesi kahte nõu ühendavat toru ab mööda (joon. 87) kõrgema nivooga nõust hakkab voolama madalama nivooga nõusse (võrdle § 21₃). Niidis tekib elektri vool, mis senni kestab, kunni mõlema katte potentsiaal ühesuuruseks muutub. Leideni pudeliga võib ainult lühikeseajalist voolu sünnitada; et katete potentsiaalvahe voolu ajal alatasa väheneb, siis kahaneb vastavalt ka elektri liikumine niidis (§ 21₃) ning seesugune vool ei ole ühtlane. Selleks et tekitada pikemaajalist ühtlast elektrivoolu, peab mõlema keha potentsiaalvahe kogu voolu aeg ühesuurusena püsima. Selleks võime Leideni pudeli katted näiteks ühendada elektriseerimismasina konduktoritega: kui masin vahetpidamata töötab, siis elektriseeruvad katted järjest uuesti ning nende potentsiaalvahe võib küllalt võimsa masina puhul ühesuurusena hoiduda.

Nivookõrguste vahe h (joon. 87) ja kehade potentsiaalvahe sarnadusest järgneb torus ab voolava vee ja näiteks Leideni pudeli katteid ühendava juhi kaudu voolava elektri sarnadus: Samuti kui vee voolamisel kahaneb nivookõrguste vahe järkjärgult nullini, nii kahaneb elektri voolamisel potentsiaalvahe nullini. Et elektrivoolu pikemat aega ühesuurusena hoida, peame elektriseerimismasinat tiirutama, et veevoolu ühesuurusena hoida, peaksime kogu voolu aeg pumba P-ga vett nõust A nõusse B pumpama, nii et h muutumatuks jääks. Nii elektriseerimismasina tiirutamiseks kui pumba töötamiseks



Joon. 87.

kulub mekaanilist tööd: Et voolu ühesuurusena hoida, peab tööd (energiat) kulutama.

2) Nagu vee voolu nii nimetame ka elektri voolu seda tugevamaks, mida rohkem elektrit (vett) igas aegüksuses voolab läbi ühendusjuhi (toru). Voolu tugevuse mõõduks on elektri hulk, mis ühes sekundis läbi ühendusjuhi voolab. Praktilises mõõdusüsteemis oli elektrihulga üksuseks coulomb. Seega peame voolu tugevuse ehk lühidalt voolu üksuseks valima seesuguse voolu, milles igas sekundis üks coulomb elektrit läbi juhi voolab. Seda üksust hüütakse coulomb-sekundiks ehk amper'iks.

Et ühest otsast juhti igas sekundis sama palju elektrit sisse voolab kui palju teda juhi teisest otsast samal ajal välja voolab, siis on selge, et ühes sekundis läbi juhi mistahes põiklõike voolav elektrihulk on igas kohas ühesuurune; teiste sõnadega: **Voolu tugevus on üle juhi kogu pikkuse igal pool ühesuurune.**

3) Vee voolamist näeme otsekohe. Kuid, kui see vool ka mitte nähtav ei oleks, avalduks ta meile ikkagi mitmesugustes kõrvalnähtustes. Me võiksime veevoolu olemasolu ja koguni tema tugevust ära tunda tema mekaanilise mõju kaudu. Teiseks tundemärgiks võiks olla näiteks soojus, mis tekib vee hõõrumisel vastu toru seinu jne. Elektrivool avaldub ainult seesuguste kõrvalnähtuste kaudu, ei saa me ju seda voolu ennast mitte näha. Tema omaduste ja mõjude tundmaõppimiseks peab võimalus olema voolu pikemat aega ühtlasena ja küllalt tugevana hoida. Elektriseerimismasin selleks ei kõlba, sest et ta ainult nõrka voolu võib tekitada; teda võib võrrelda väikse pumbaga (joon. 87), mis ainult vähe vett suudab ühest nõust teise pumbata (kuigi ta teda väga kõrgele üles võib suruda); et nivoode kõrgus endiseks jääks, võib siis ainult vähe vett ühest nõust teise voolata lasta, s. t. võib sündida ainult nõrk vool. Voolu omaduste tundmaõppimiseks peame sellepärast tutvunema nende abinõudega, millega kohast voolu võib tekitada. Käepärased selleks on n. n. Galvani-elemendid, mille elektrit tihti ka Galvani-elektriks hüütakse.

§ 37. **Elektriseerumine kehade kokkupuutumisel; Galvani-element.** 1) Anatoomia professor Galvani pani tähele (1789), et surmatud konnal, mille ta vasktraadi abil raudvõre külge riputas, reie musklid igakord kokku tõmbusid kui konna varbad sama raudvõre puudutasid. Kuna teada oli, et Leideni pudeli tühjendamine musklite läbi viimastes samasugust kokkutõmbumist tekitab, siis oletas Galvani, et nimetatud nähtus on mingisuguse elektri avaldus, mis looma musklites tekib. Varsti peale selle näitas füüsika professor Volta (1794), et kirjeldatud nähtuse põhjuseks mitte looma musklites, vaid kahe metalli (vase ja raua) kokkupuutumiskohas ilmuv elekter on. Ta nimetas seda elektrit Galvani auks Galvani-elektriks.

2) Kui isesugustest metallidest valmistatud kaks varba või plaati niiviisi mingi nõrga happe sisse paigutada, et nad üks-teise

külge ei puutuks, siis elektriseerub üks nendest positiivselt, teine negatiivselt. Olid metallid näiteks vask ja tsink ning hape nôrk väävelhape, siis näitab tundlik elektroskoop, et **tsink elektriseerub negatiivselt ja vask—positiivselt.** Katsete kordamisel suuremate ja väiksemate vask- ja tsinkvarbadega näitab elektromeeter, et **mõlema metalli potentsiaalvahe ehk pinge ei olene ei varva pinna suurusest ega tema massist, vaid ainult tarvitatud metallidest ja happest.** Kastes samasse happesse näiteks tina- ja tsinkvarva, leiame, et pinge nende vahel on väiksem, plaatina- ja tsinkvarva puhul aga suurem kui eelmisel juhusel. Samad katsed näitavad, et vask, mis tsingiga positiivselt elektriseerub, plaatina või söega negatiivselt elektriseerub.

Kui kõik metallid niiviisi paarikaupa järgemööda ühte ja samasse happesse asetada, siis võime leitud resultaatide põhjal metallid sel kombel ühte ritta seada, et pinge ühe paari vahel seda suurem on, mida kaugemal üks-teisest seisavad antud paari metallid nimetatud reas. Nõrga väävelhappe jaoks on seesugune rida:

tsink, kadmium, raud, tina, alumiinium, nikkel, vismut, vask, hôbe, plaatina, süsi. *)

Väävelhappes on nii siis pinge tsingi ja söe vahel kõige suurem, tsingi ja kadmiumi või mingi teise, reas kõrvutiseisva metalli vahel — kõige väiksem. On mõlemad varvad ühest ja samast metallist, siis on pinge nende vahel null.

Võtame väävelhappe asemel mingi teise happe või soolasulatise (vees), siis saame teistsuguse rea, sest et pinge antud metallide vahel oleneb ka vedelikust. Happed ja soolasulatised juhivad elektrit; ainult seesugustes vedelikkudes tekibki kirjeldatud potentsiaalvahe. Neid juhtivaid vedelikke hüütakse elektrolüütideks. Nagu nimetatud, kuuluvad elektrolüütide hulka kõik happe- ja soolasulatised vees. Puhas vesi, õlid, suhkrusulatis jne. ei juhi elektrit ega sünnita metallide vahel mingisugust potentsiaalvahet.

3) Kui happesse asetatud metallvarvad silmapilguks traadiga ühendada, siis neutraliseeruvad nende vastupidised laengud elektri vooluna läbi traadi. Peale ühenduse katkestamist selgub, et varbade potentsiaalvahe otsekohe oma endise suuruseni kasvab. Kui üks varb elektromeetri nupuga ja teine tema kerega ühendada ja varvad ise siis peenikese traadiga omavahel ühendada, siis näitab elektromeeter, et nende potentsiaalvahe ka elektri voolu ajal ühesuurusena hoidub. Eelmise § järele peab ühendustraadis seega ühtlane elektrivool tekkima.

Traadis voolab positiivne elekter vasest (Cu) tsingi (Zn) juure, sest et viimase potentsiaal madalam on esimese omast (Tsink on negatiivne, vask — positiivne). Et elekter ka tsinki mitte koonduda ei või, — vastasel korral tõuseks tsingi potentsiaal ning kahaneks metallide potenstsiaalvahe,—siis peab elek-

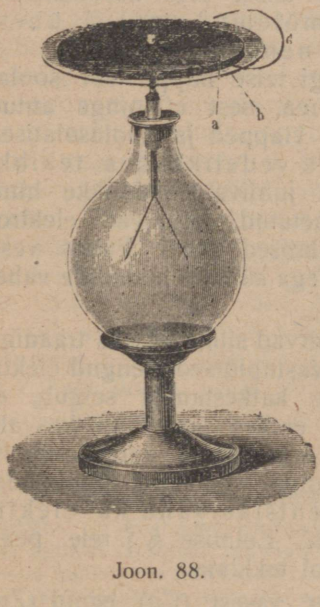
*) Paggendorffi järele.

ter ka läbi elektrolüüdi voolama, ja nimelt tsingist vase juure. Seega voolab elekter mööda kinnist ringi (Cu — ühendustraat — Zn — elektrolüüt — Cu), mida hüütakse vooluahelaks. Katkestame ühendustraadi, siis lõpeb vool: me ütleme, et ahel saab avatud.

Elektrolüüti asetatud metalliide-paari, mis oma potentsiaalvahe alaliselt ühekõrgusena hoiab, nimetatakse Galvani-elemendiks, mõlemat metalli — elemendi elektroodiks. Pea kõigis elementides moodustab tsink negatiivse elektroodi, vask, süsi või mingi teine aine — positiivse elektroodi.

4) Ülevalkirjeldatud nähtused põhjenevad asjaolul, et kõik metallid ja elektrolüüdid lihtsal kokkupuutumisel elektriseeruvad. Kastame näiteks tsingi väävelhappesse, siis elektriseerub tsink negatiivselt, väävelhape ise aga samavõrra positiivselt. Nagu tsink, nii elektriseerub negatiivselt ka vask-, raud- ja iga teine metallvarb, mis väävelhappesse kastetakse. Selle juures omandab aga üks metall (tsink) suurema (negatiivse) potentsiaali kui teine (vask).

Kokkupuutumisel tekkivate potentsiaalide mõõtmiseks tarvitatakse elektroskoopi (või elektromeetrit), millel nupu asemel on metallketas b (joon. 88). Ketta peale pannakse õhuke klaasplaat (a) ning tilgutatakse viimase pinnale vähe uuritavast elektrolüüdist. Kõveraks painutatud traadi d alumine ots hoitakse elektroskoobi ketta küljes, tema ülemise otsaga (c) aga puudutatakse vedeliku tilka. Kokkupuutumisel elektriseerub vedeliku tilk positiivselt ja traadiots c negatiivselt; viimase laeng läheb läbi traadi kettale b kus teda vedeliku positiivne laeng seob. Kui klaasplaat ühes positiivse vedelikuga eemaldada, siis vabaneb kettale b kogunud — E ning elektroskoobi lehekesed tõukuvad laiali. Võtame elektroskoobi asemel elektromeetri, siis võime sel kombel mõõta kokkupuutumisel tekkiva potentsiaali suurust, sest et ketta b laeng teadagi seda suurem peab olema, mida kõrgem oli elektriseeritud traadiotsa c potentsiaal.



Joon. 88.

Mõõtmised näitavad, et kui tsingi potentsiaal kokkupuutumisel väävelhappega on näiteks —18 (mingisugustes potentsiaalüksustes), siis on vase potentsiaal kokkupuutumisel sama happega ainult —5. Asetame nüüd tsingi ja vase korraga samasse happesse, siis elektriseerub tsink järjelikult 18 — 5 = 13 potentsiaalüksuse võrra tugevamalt negatiivseks kui vask, s. t., et vase potentsiaal on 13 üksuse võrra kõrgem kui tsingi oma. Tsingi suhtes on vase potentsiaal seega positiivne (olgugi et ta väävelhappe suhtes on negatiivne), on ju mõisted positiivne ja negatiivne ainult relatiivsed, mis näitavad, missuguse keha potentsiaal

on kõrgem ja missuguse oma madalam. Ühendame näiteks tsingi maaga, siis omandab ta (maa suhtes) potentsiaali null; et aga vase potentsiaal tsingi potentsiaalist ikkagi 13 üksuse võrra kõrgemaks jääb, siis on vasel nüüd ka maa suhtes positiivne potentsiaal 13. Ühendame aga vase maaga, siis on tsingil maa suhtes potentsiaal —13.

5) Ka siis, kui metallid omavahel kokku puutuvad, elektriseerub üks nendest (näiteks vask) positiivselt, teine (tsink)—negatiivselt. Metallide jaoks leidis Volta järgmise seaduse:

Kui moodustada ahel mitmest üks-teise külge puutuvast metallist, siis on äärmiste metallide potentsiaalvahe sama suur kui ta oleks nende metallide otsekohesel vastastikku kokkupuutumisel.

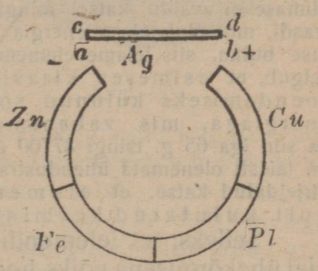
Kujutame potentsiaalvahet tsingi ja vase vahel märgiga Zn|Cu, siis ütleb nimetatud seadus, et näiteks tsingist (Zn), rauast (Fe), tinast (Pl) ja vasest (Cu) valmistatud ahela (joon. 89) otsade a ja b vahel on pinge

$$Zn|Fe + Fe|Pl + Pl|Cu = Zn|Cu.$$

Ühendaksime a ja b mingi metalljuhiga, näiteks hõbetraadiga cd, siis tekiks ahela otsas a kokkupuutumisel hõbedaga (c) potentsiaal Zn|Ag, ning punktide b ja d kokkupuutumisel potentsiaal Ag|Cu. Volta seaduse järele on nende potentsiaalide summa

$$Zn|Ag + Ag|Cu = Zn|Cu$$

s. t. sama suur kui ahela enese otsade vahel. Kokkupuutumiskohas mõjub nii siis ühelt poolt hõbeda mõjul tekkiv potentsiaal, teiselt poolt aga ahela otsade vahel valitsev samasuur vastupidine potentsiaal. Teadagi ei hakka siis cd ühendamisel ab-ga elekter läbi punkti a voolama. Samasugune on asjaolu ka igas teises, ainult metallidest kokku seatud ahelas: Ainult metallidest kokku seatud ahelas ei või seega elektrivoolu sündida. Galvani-elemendis peab järjelikult vähemalt üks elektrolüüt olema.




Joon. 89.

Paljud õpetlased on arvamisel, et metallide kokkupuutumisel tekkiva potentsiaalvahe põhjuseks on ainult asjaolu, et metallide pinnal alati koondatud on õhus leiduvad aurud ja gaasid. Seega ei puutu metallid õieti mitte omavahel, vaid ainult nimetatud vedeliku- või gaasikihiga kokku. Pinge tekkimise põhjus on siis ka siin metalli ja vedeliku kokkupuutumine.

§ 38. **Elemendi elektromotoorne jõud; elemendi polarisatsioon; tähtsamad elemendid.** 1) Kõigis elementides on üheks elektroodiks seesugune metall (harilikult tsink), mis elektroolüüdiga kergesti uusi keemilisi ühendusi võib anda. Nagu juba varemalt nimetatud, peitub metalli ja elektrolüüdi (happe) vahel valitsevas „keemilises suguluses“ teatav potentsiaalne energia, mis nende ainete keemilisel ühinemisel vabaneb ja teistsugusteks ener-

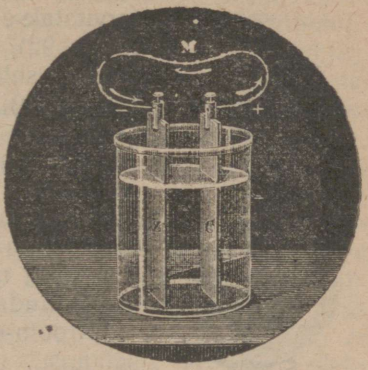
giavormideks võib moonduda. Osa sellest energiast moondubki Galvani-elemendis elektri energiaks, mille kulul tekib elektrivool.

Seda tõestab järgmine katse: Täidame 2 ühesugust klaasnõu väävelhappega ja asetame kummagisse ühesuguse tsink- ja plaatinelektroodi-paari. Esimeses klaasis ühendame traadi kaudu tsingi plaatinaga, nii et selle elemendi ahel kinnine on; teises klaasis aga jätame ahela avatuks. Kui teatava aja järele mõlemad elektroodid ära kaaluda, siis selgub, et ühe ja sama aja sees esimeses elemendis palju rohkem tsinki on ära sulanud kui teises. Avatud ahelaga elemendis sulab tsink hariliku keemiaseaduse järele, ilma et plaatinelektrood sulamise peale mõju avaldaks; sulamisel vabanev energia kulub happe soendamiseks. Viimase temperatuuritõusust leiame, et näiteks 65 g (= tsingi 1 ekvivalent) ära sulanud tsinki igal juhusel Q = 37700 g-kal soojust annab. Vaatamata selle peale, et kinnise ahelaga elemendis rohkem tsinki ära sulas, s. t. et seal rohkem keemilist energiat vabanes kui teises klaasis, leiame, et happe temperatuur mõlemas klaasis umbes ühevõrra on tõusnud, s. t. et happe soendamiseks mõlemas klaasis ühepalju energiat kulus. Ülejäänud osa vabanenud energiast peab esimeses klaasis siis mingisuguseks teiseks energiaks olema moondunud ja nimelt elektriks, sest peale viimase ei avaldu katsel mingisugune teine energia. Voolates läbi ühendustraadi, moondub elektrienergia soojuseks. Kui mõõta traadis vabanenud soojuse hulka, siis leiame elemendis tekkinud elektrienergia hulga. Mõõtmistest selgub, et esimeses klaasis tekkinud elektrienergia ühes happe soendamiseks kulunud soojusega täpipealt ekvivalent on selle energiaga, mis vabanema peab tsingi sulamisel. (Oletusel, et ka siin iga 65 g. tsingi 37700 g-kal energiat tekitab.) Nimetatud korrapärasus on tälesti olenemata ühendustraadi pikkusest ja jämedusest; sellepärast näitab kirjeldatud katse, et elemendi elektrienergia tõepoolest ainult kulutatud keemiaenergiast tekib.

Selleks, et elemendi elektroodide potentsiaalvahe ka voolu ajal ühekõrgusena võiks hoiduda, peab positiivne elekter läbi elektrolüüdi alatasa negatiivselt elektroodilt positiivse elektroodi juure kanduma. Seda jõudu, mis positiivset elektrit läbi elektrolüüdi viib ning mis sellega elektroodide potentsiaalvahe sünnitab ja alal hoiab, nimetatakse elemendi elektromotoorseks jõuks (lühendatult EMJ) Varem tarvitatud analoogias veevooluga (joon. 87) vastab EMJ-le see jõud, mis surub veenivoode kõrgusvahe alalhoidmiseks tarviliku pumba (P) kannu peale. Katkestame veevoolu torus ab ning laseme pumba P endise võimsusega töötada, siis tõstab pump vee nivoo B teatava kõrguseni, mis oleneb ainult sellest jõust, millega pumba kann vee peale surub (arvates jõudu 1 $cm^2$ peale kannu suruvast pinnast). Seda jõudu võib järjelikult mõõta tekkinud nivoode kõrgusvahega h. Analoogiliselt võib EMJ-u mõõta selle potentsiaalvahega, mis ilmub avatud ahelaga elemendi elektroodide vahel. Seda potentsiaalvahet hüütakse lühidalt elemendi elektroodide pingeks. Tähendab: **Elemendi elektromotoorne jõud on proportsionaalne avatud ahelaga elemendi elektroodide pingega.** Nagu elektroodide pinge, nii ei olene ka EMJ elemendi suurusest (§ $37_2$).

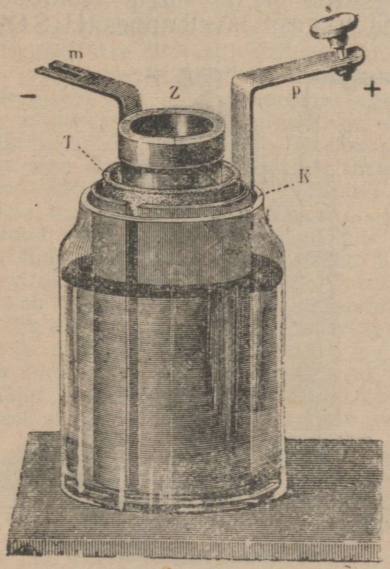
Elektromotoorset jõudu mõõdetakse samade üksustega (näiteks voltidega) kui potentsiaaligi, sellepärast järgneb eelmisest seadusest, et EMJ võrdub elektroodide pingega.

2) Kõige lihtsama, n. n. Volta-elemendi saame, kui tsink- ja vaskplaadi väävelhappe ja vee segusse asetame (joon. 90. Elektroodide ühendamisel näiteks peene raudtraadiga M soendab tekkinud elektrivool traati. Kuid varstigi paneme tähele, et traat jahtuma hakkab, millest järeldama peame, et vool traadis kahaneb. Seesugune element võib nii siis ainult lühikest aega oma potentsiaalvahet alal hoida ja voolu sünnitada; ta ei kõlba seega praktiliseks tarvitamiseks.



Joon. 90.

Voolu kahanemise põhjuseks on n. n. elemendi polarisatsioon: tsink sulab väävelhappes ($H_2SO_4$) ja sünnitab tsinkvitriooli ($ZnSO_4$), mille juures vesinik ($H_2$) vabaneb. Niipea kui elekter voolama hakkab, viib vool vesiniku tsingilt läbi elektrolüüdi enesega kaasa vase juure, mille tõttu vesinik väikeste mullikestena vase pinnale kogub. Hape ei puutu nüüd enam vase pinna külge ja elemendi tegevus kahaneb. Et takistada seesugust polariseerumist, peab vesinikukihti kõrvaldama. Selleks ümbritsetakse vask (või süsi) ainetega, mis enesest kergesti hapnikku (O) ära annavad; vabanenud vesinik ühineb siis hapnikuga veeks ($H_2O$) ja saab sellega kahjutuks.




Joon. 91.

3) Pikemaajalist ja ühetugevat voolu annab tuntud Daniell-element (joon. 91): klaaspurk on poorse (alt kinnise) savisilindriga T kaheks ruumiks eraldatud. Välises osas on kontsentreeritud vasevitrioli ($CuSO_4$) sulatis, millesse vasksilinder K ulatab. Savisilinder on täidetud nõrga väävelhappega (10 jagu vett ja 1 jagu väävelhapet); temas asub tsinksilinder Z. Elemendi elektromotoorne jõud on ligi 1,1 volti ja ta hoidub väga ühesuurusena.

Tsink sünnitab väävelhappega tsinkvitriooli ($Zn + H_2SO_4 = ZnSO_4 + H_2$); sellejuures vabanenud vesinik ($H_2$) ühineb läbi savisilindri pooride vasevitrioliga, sün-

nitades jällegi väävelhapet ($H_2 + Cu\ SO_4 = H_2SO_4 + Cu$) ja vaske (Cu). Viimane kandub vooluga välise vasksilindri pinnale. Me näeme, et selles elemendis mitte väävelhape, vaid vasevitriool laguneb, ja et vesinik vase pinnale ei pääse.

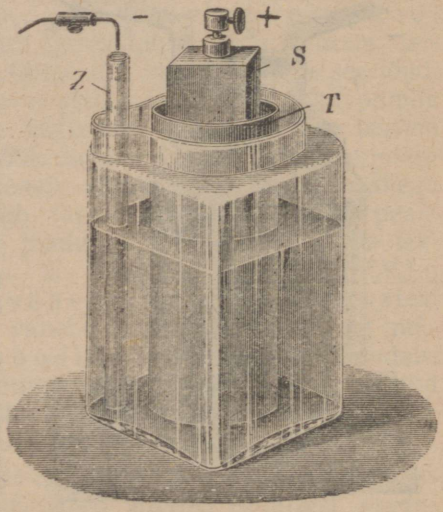
Joon. 92.

Lühikeseajalise kuid tugeva voolu saamiseks tarvitatakse Bunseni kroomhappe-elementi (joon. 92): pudelisarnases klaasnõus on kroomhappe sulatis vees või kaaliumbikromaadi (12 jagu), väävelhappe (25 jagu) ja vee (100 jagu) segu. Sulatisse ulatab kaks süsiplaati; nende vahel seisab üles-alla tõstetav tsinkplaat. Viimane kastetakse vedelikku ainult elemendi tarvitamise aegu, sest muidu kuluks tsink liiga ruttu. Selle elemendi EMJ. on 1,9 volti; ta võib ainult lühikest aega tugevat voolu anda.

Kroom-elemendis vabaneb vesinik tsingi sulamisel. Ta ühineb aga otsekohe kroomhappe hapnikuga veeks ja ei polariseeri seega süsiplaate. Elemendi halb külg on, et temas tsink ka siis sulab, kui voolu ei võeta. Teistes elementides ei sünni seda mitte, või kuigi, siis ainult väga väiksel mõõdul.

Väga tugeva ja ühtlase voolu annab harilik Bunsen-element. Tema konstruktsioon on sarnane Daniell-elemendi omaga (joon. 91): poorses savisilindris (T) on kontsentreeritud salpeeterhape ($HNO_3$); viimasesse ulatab süsisammas (positiivne elektrood). Välises nõuosas on tsinksilinder (K) nõrgas väävelhappes ($H_2SO_4$). Bunsen-elemendist eraldub töötamise aegu kihvtine gaas — lämmastiku hapend ($N_2O_4$), mispärast tema tarvitamine ettevaatust nõuab. Elemendi EMJ on 1,9 volti.

Tsink sünnitab väävelhappega $ZnSO_4$ ja $H_2$. Vesinik ühineb läbi savisilindri pooride salpeeterhappega, mille juures vabaneb lämmastiku hapend ($H_2 + 2HNO_3 = H_2 + H_2N_2O_6 = H_4O_2 + N_2O_4 = 2H_2O + N_2O_4$).




Joon. 93.

Leclanché-elemendis (joon. 93) seisab süsiprisma S riidest kotikeses või savisilindris (T), mis täidetud mangaanülihapendi ($MnO_2$)

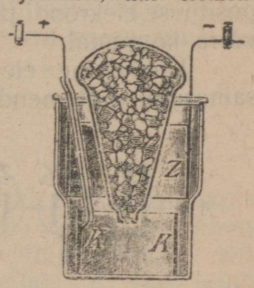
pulbri ja söetolmu seguga. Klaasnõus on küllastatud salmiaaksulatis, ($NH_4$ Cl) millesse kastetud tsinkvarb (Z). Elektromotoorne jõud on 1,5 volti; element annab korraga ainult lühikest aega tugevat voolu, kuid lühikese „puhkeaja“ järele kasvab tema võimsus endiseks. Sellepärast on ta kohane seesugusteks otstarveteks, kus voolu tarvis ainult aeg-ajalt ja kus element alati töötamiseks valmis peab olema (näiteks elektrikellade, telefoni jne. jaoks). See element võib töötada kuude kaupa ilma järelvalveta.

Tihti pressitakse mangaanülihapend ja söepuru kõvaks plaadiks ja asetatakse kaks seesugust plaati mõlemale poole süsielektroodi.

Ka tuntud „kuivad elemendid“ kuuluvad Leclanché-elementide hulka: nende ehitusviis on samasugune kui üleval kirjeldatud, ainult vedela salmiaaksulatise asemel täidetakse elemendi nõu kas salmiaaksulatises leotatud saepuruga või sellest sulatisest valmistatud süldisarnase poolvedela ainega. Et „kuiv element“ õhukindlalt on sulutud, siis hoidub täitmiseks tarvitatud aine kaua niiskena. „Kuiv“ on sarnane element ainult selles mõttes, et temaga ümberkäia võib nagu kõva kehaga, ilma et karta oleks vedeliku väljavoolamist.

Leclanché-elemendis ühineb tsink salmiaaguga kloortsingiks ($Zn Cl_2$), kusjuures mangaanülihapendi mõjul vabaneb ammoniaakgaas ($NH_3$), sest $Zn+2 NH_4Cl=ZnCl_2+2NH_4$ ja $2 NH_4 + MnO_2 = MnO + H_2O + 2 NH_3$. MnO ja vesi jäävad vedelikku, kuna $2NH_3$ gaasina üles tõuseb.

Meidinger-elementi (joon. 94) tarvitatakse juhustel, kus element väga kaua ilma järelvalveta ja ühetugevalt töötama peab (näiteks telegrafis.) Tema klaasnõu alumises osas on vasevitrioolisulatis, millesse paigutatud madal vasksilinder K K. Otse vasevitrioolisulatise peale kallatakse ettevaatlikult kergemat tsinksulfaadi või mõrusoolasulatist, mis raskema alumise vedeliku peale ujuma jääb, ilma et vedelikud seguksid. Klaasnõu ülemises osas ripub negatiivne elektrood — tsinksilinder Z. Niiviisi asub iga elektrood ise vedelikus, ilma et tarvis oleks poorset vaheseina vedelikkude vahele. Et elemendi töötamisel vasevitriool alatasa laguneb, siis langetatakse nõusse kummuli pöördud pudelisarnane klaasnõu, mis vasevitrioolikristallidega täidetud. Selle pudeli avaus ulatub vasevitrioolisulatisse; niipea kui sulatise kontsentratsioon nõrgeneb, sulab pudelis seisvatest tagavarakristallidest osa vitriooli, millega sulatis kogu töötamisaeg küllastatuna hoidub. Et vitrioolitagavara pudelis suur on, siis võib element väga kaua töötada, ilma et tarvis oleks teda uuesti täita. Positiivne elektrood tuuakse elemendist välja vasksilindri K külge joodetud isoleeritud traadi kaudu. Elemendi töötamisviis on sarnane Daniell-elemendi omaga. Tema EMJ on umbes 1,1 volti.



Joon. 94.

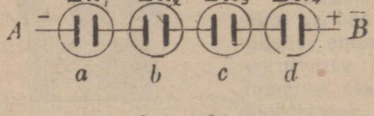
4) Kõigis kirjeldatud elementides amalgameeritakse tsinkelektroodi pind, s. t. ta kaetakse õhukese elavhõbekihiga.*) Selle otstarb on kaitsta tsinki ilmaaegse sulamise eest happes.

*) Amalgameerimiseks kastetakse tsink nõrka väävelhappesse ja tilgutatakse tema märja pinna peale vähe elavhõbedat. Viimane jääb tsingi külge ja teda võib lapiga ühtlaseks õhukeseks kihiks laiali hõõruda.

Üsna puhast tsinki kaitseb element juba ise nimetatud pahe eest: niipea kui näiteks Volta-elemendis tsink happesse langetada, katab õhuke vesinikukiht tema pinna, millega hape enam tsingi juure ei pääse ja tsingi sulamine lõpeb. Alles siis, kui element voolu annab, kannab elekter vesiniku tsingilt vasele ning tsink hakkab uuesti sulama. Seesuguses elemendis kulub tsink nii siis ainult voolu tarvitamise aegu. Harilikult on aga tsingis alati väikseid lisandid teistest metallidest. Need lisandid etendavad happes positiivse elektroodi osa; tsingi pinna üksikute punktide vahel tekib potentsiaalvahe, ning järelduseks on nõrgad voolud (tsingi sees) nende punktide vahel. Selle juures vabanevad teatud kohad tsingi pinnast teda kaitsvast vesinikukihist ja tsink kulub (sulab) ka siis, kui elemendi väline ahel avatud on, mis teadagi soovitav ei ole. Elavhõbekiht takistab potentsiaalvahe ja voolu tekkimist tsingi pinna üksikute punktide vahel; kaitsev vesiniku kiht hoidub seega tsingi pinnal ja elektrood töötab samuti kui puhta tsingi puhul.

§ 39. **Elementide ühendamine patareiks.** 1) Ühendame Leclanché-elemendi tsinkelektroodi maaga, siis on tema potentsiaal 0. Elektromeeter näitab, et sel puhul positiivse elektroodi potentsiaal võrdlemisi maaga on + 1,1 volti. Selle asemel, et tsinki maaga ühendada, võime teda ka näiteks elektrilambi ühe juhiga ühendada, mille potentsiaal (maaga) olgu 110 volti. Elektromeeter näitab, et siis positiivse elektroodi potentsiaal (võrdlemisi maaga) on 111,1 volti, s. t. jällegi 1,1 voldi võrra kõrgem kui teise elektroodi oma. Sellest järgneb, et elektroodide pinge ei olene kogu elemendi potentsiaalist. Et kõik elemendi osad juhid on, siis omandab kogu element selle keha potentsiaali, millega me näiteks tema negatiivse elektroodi ühendame, kuid positiivse elekroodi potentsiaal hoidub ka siis veelgi elemendi EMJ võrra kõrgemal.

Ühendame elemendi a (joon. 95) vaskelektroodi $K_1$ teise, samasuguse elemendi (b) tsinkelektroodiga Z: juhiga A võrreldes on siis kogu teise elemendi (b) potentsiaal 1,1 volti, kuid tema + elektroodi ($K_2$) potentsiaal on üleüldisest potentsiaalist veelgi näiteks 1,1 voldi võrra kõrgem, s. t. pinge A ja $K_2$ vahel on $1,1 + 1,1 = 2 \times 1,1$ volti. Ühendame $K_2$ kolmanda elemendi Z-elektroodiga, siis on viimase $K_3$-elektrood jällegi 1,1 voldi võrra kõrgema potentsiaaliga, s. t. pinge A ja $K_3$ vahel on $3 \times 1,1$ volti jne. Lülitame sel kombel üheks ahelaks n elementi, mille EMJ on e volti, siis saame äärmiste elektroodide (A ja B) vahel pinge

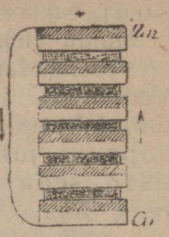


Joon. 95.

$$V = n \cdot e$$

Seesugust ühendust, kus eelmise elemendi + elektrood ikka ühendatud on järgmise elemendi — elektroodiga, hüütakse järjestikkuseks- ehk seeria-ühenduseks. Tähendab: **Järjestikku ühendatud elementidest koosseisva patarei pinge on nii mitu korda suurem üksiku elemendi pingest, kui mitu elementi on patareis.**

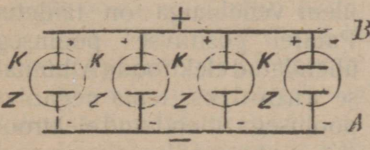
Ajalooliselt huvitav „Volta-sammas“ (joon. 96) kujutab kõige lihtsamat järjestikku ülendatud patareid: temas seisavad õhukesed tsink- ja vaskketaste paarid üks-teise peal, kus juures iga paari vahel happega imbutatud vilt asub. Kahelpool vilti seisvad tsink- ja vaskketas moodustavad ühe Volta-elemendi; ühe seesuguse elemendi tsinkelektrood puutub otsekohe teise elemendi vaskelektroodi külge. Kõrge sambaga, kus hulk seesugusid plaate üks-teise peal asub, sai Volta võrdlemisi suure pinge.



Joon. 96.

Samasuguse kujuga on ka Zamboni-sammas: temas on kokku kleebitud kuld- ja hõbepaberi ringid (vask- ja inglistina) paarikaupa üks-teise peale asetatud. Hügroskoobiline kliister moodustab siin elektrolüüdi osa. Suure hulga paaridega võib pinge samba otsade vahel kunni 100 voldini tõusta. Kuigi tema laeng üliväike on, töötab sammas aastate kaupa. Teda tarvitatakse tundlikkude elektroskoopide juures, kus kerge isoleeritud kuldlehekene samba otsadega ühendatud plaatide vahel ühe või teise plaadi poole kaldub, kui lehekesele enesele nõrk ühe- või teisenimeline laeng antakse.

2) Kui kõigi elementide negatiivsed elektroodid Z (joon. 97) ühendada ühise juhiga, siis on pinge iga elemendi positiivse elektroodi ja selle ühendusjuhi vahel ühesuurune (näiteks 1,1 volti). Ühendame ka kõik positiivsed elektroodid (K) omavahel, siis on arusaadavalt kogu selle juhi B potentsiaal võrreldes juhiga A sama suur kui ühe elemendi pinge. Seesugust ühendamisviisi hüütakse paralleelseks (lähemalt selle üle v. § 62).

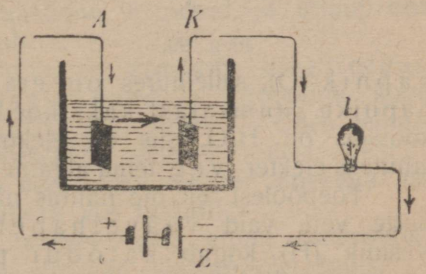


Joon. 97.

**Paralleelselt ühendatud patarei pinge on sama suur kui iga üksiku elemendi oma.**

## Peatükk IV:
## Elektrokeemia.

§ 40. **Elektrolüüs.** Asetame elektroodid A ja K soolhappe veesulatisse (joon. 98) ja ühendame nendega läbi väikse hõõglambi L patarei CZ poolused: Me näeme, et lamp hõõgab. Sellest peab järeldama, et läbi lambi elekter voolab. Et vool ainult kinniseS ahelas võib tekkida, siis peab elekter mitte ainult traatides, vaid ka happes voolama. Voolu üleüldisest sihist selgub. et vool happes elektroodist A elektroodi K juure läheb. Kogu aeg, kus lamp L hõõgab, eraldub elektroodide pinnal gaas, mis mullikestena vedeliku pinnale tõuseb.



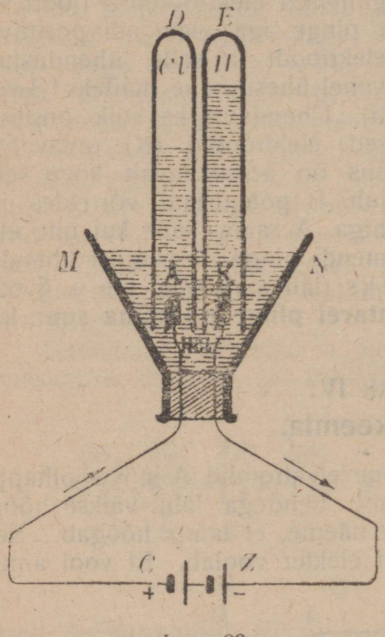
Joon. 98.

Sama katse kordamisel absoluut puhta veega ei

hakka lamp mitte põlema, vaid jääb ka patarei ühendamisel tumedaks. Samuti ei hõõga lamp, kui vee asemele kallata kontsentreeritud (s. t. veeta) soolhapet. Mõlemal juhusel ei eraldu elektroodidel ka mingisugust gaasi. Et gaasi eraldumine on vedeliku lagunemise tundemärk, siis järgneb kirjeldatud katsetest: **Vedelikud juhivad ainult siis elektrit, kui nad voolu mõjul keemiliselt lagunevad.** Absoluut puhas vesi ja veeta hape ei juhi elektrit, kuna hapete ja soolade veesulatised seda teevad, ainult viimased on seega elektrolüüdid (v. § $37_2$).

Nähtust, millel läbi vedeliku voolav elekter lahutab seda vedelikku, hüütakse elektrolüüsiks.

2) Elektrolüüsil eralduvaid gaase võime koguda joon. 99 kujutatud aparaadis: Nõu MN on täidetud näiteks soolhappe (HCl) sulatisega. Elektroodid A ja K asuvad katseklaasikeste D ja E õõnsustes, mis üleni vedelikuga on täidetud. Patarei positiivse poolusega ühendatud elektroodi(A)hüütakse anoodiks, tema negatiivse poolusega ühendatud elektroodi (K) katoodiks.



Joon. 99.

Järelkatsudes katseklaasikestesse kogunud gaase, selgub, et katoodil on eraldunud vesinik (H) ja anoodil kloor (Cl). Mõlemad gaasid on soolhappe (HCl) algained. Elektrivool lahutab nii siis soolhappe tema algaineteks — vesinikuks ja klooriks.

Täidame nõu MN veega, millele mõni tilk väävelhapet ($H_2SO_4$) juure on lisatud, siis eraldub katoodil K endiselt vesinik (H), anoodil A aga hapnik (O), sellejuures on eraldunud vesiniku ruum-ala hapniku ruum-alast kaks korda suurem. Et vee keemiline koosseis on $H_2O$, siis on elektrolüüsi nähtus siin sarnane kui lahutaks elekter vee tema algaineteks — vesinikuks ja hapnikuks.

Tõepoolest ei ole nähtus nii lihtne: elektrivool ei lahuta mitte vett, vaid väävelhapet tema algaineteks $H_2$ ja $SO_4$. Vesinik (H) kogub katoodi pinnale, $SO_4$ aga ühineb oma suure keemilise suguluse tõttu otsekohe peale happe lagunemist veega ($SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O$). $SO_4$ ja vesinik $H_2$ annab uuesti väävelhappe ($H_2SO_4$), kuna hapnik (O) selle juures vaba-

neb ja mullidena anoodi pinnale kogub. Vette lisatud väävelhappe hulk jääb seega kogu elektrolüüsi aeg ühesuuruseks. Vee lagunemine on järjelikult ainult keemilise *sekundäär-protsessi* tagajärg.

Ka kõik teised veega segatud happed lagunevad elektrolüüsil. *Katoodil* vabaneb selle juures alati *vesinik*; anoodile kogub happe ülejäänud osa, mis seal harilikult mingi uue keemilise ühenduse annab (sekundäär-protsess). *Hapete elektrolüüsil näib nagu kannaks elektrivool elektrolüüdis vabaneva vesiniku enesega kaasa katoodi pinnale*, on ju vóolu siht elektrolüüdis anoodilt katoodile ja kogub ju vesinik alati *katoodi* pinnale.

3) Vees sulatatud *soolad* lagunevad elektrivoolu mõjul kahte ossa. Kui näiteks läbi *vasevitrioooli* ($CuSO_4$) sulatise plaatinelektroodide kaudu voolu juhtida, siis vabaneb anoodil hapnik (O), katoodi pinnale aga kogub õhuke kiht *puhast vaske*. On elektroodid vasest, siis ei vabane elektrolüüsil mingit gaasi, vaid näib nagu kannaks vool ainult *puhta vase* anoodilt *katoodile*, sest kogu elektrolüüsi aeg kahaneb vasest valmistatud anoodi ja kasvab samasuguse katoodi mass.

Vasevitrioolis varjab lahutamisprotsessi tõelist käiku keemiline sekundäär-protsess: $CuSO_4$ laguneb osadesse Cu ja $SO_4$; vask kandub ühes vooluga katoodi pinnale, $SO_4$ kogub anoodi pinnale, kus ta veega ühineb väävelhappeks ja hapnikuks ($SO_4 + H_2O = H_2SO_4 + O$). On anood vasest, siis ühineb $SO_4$ anoodi metalliga ja sünnitab jällegi vasevitrioli ($SO_4 + Cu = CuSO_4$). Viimasel juhusel lahutab vool elektrolüüdis samapalju $CuSO_4$ kui palju teda anoodil keemilise sekundäär-protsessi tõttu uuesti tekib. Kogu vedeliku kontsentratsioon jääb seega muutumatuks ja anoodi vaskelektrood kulub sama palju kui palju katoodile vaske juure kogub.

Põrgukivi (lämmastikhapu hõbe $AgNO_3$) veesulatises kannab vool hõbeda katoodile; *kloorkulla* sulatises puhta *kulla* katoodile jne.

Ag $NO_3$ laguneb osadeks Ag ja $NO_3$. Viimane ($NO_3$) ühineb anoodi metalliga (hõbedaga) uuesti põrgukiviks ($NO_3 + Ag = Ag\ NO_3$), nii et ka siin sulatise kontsentratsioon ei muutu ja ainult hõbe ühelt elektroodilt teisele kandub.

Kirjeldatud näidetest selgub, et *soolade elektrolüüsil metall alati katoodi pinnale kandub*. Anoodile kogub soolamoleekuli ülejäänud osa ($NO_4$, $SO_4$, Cl jne.). Ühes eelmises punktis (p. 2) kirjeldatud nähtustega järgneb sellest üleüldine seadus: **Elektrolüüsil kannab positiivne elekter enesega läbi elektrolüüdi kaasa kas vesinikku või metalli.**

Nimetatud seadus ei ole maksev mitte ainult elektrolüüsil, vaid ka nendel nähtustel, mis ilmuvad Galvani-elemendis, sest nagu nimetatud (§ $38_2$) kandub ka elemendis vabanenud *vesinik* positiivse elektriga kaasa.

Tihtipeale ei eraldu soolade elektrolüüsil katoodil mitte metall vaid vesinik. Seesugusel juhusel on meil alati tegemist sekundäär-protsessidega, mis lahutamise tõelist käiku varjavad. Juhime voolu näiteks läbi naatriumsulfaadi sulatise ($Na_2SO_4$), siis peaks katoodile puhas Na koguma. Viimane aga ei püsi vees, vaid ta ühineb otsekohe veega, sünnitades Na OH ja H; ($Na_2 + 2H_2O = 2NaOH + H_2$). Järeldusena eraldub katoodil ainult vabanenud $H_2$.

4) Ainete lahutamine ei sünni mitte ainult soolade veesulatistes, vaid ka kõrgemal temperatuuril vedelaks sulandatud soolades. Sulandame plaatintiiglis näiteks kloorkaaliumi ja asetame sulandisse mingi negatiivse elektroodi. Niipea kui patarei + poolus tiigliga ühendada, kannab tiigli seinadelt katoodile voolav elekter metalli — praegusel juhusel puhta kaaliumi — enesega kaasa katoodi pinnale. Selle tagajärjel eraldub katoodil kaaliumi metall, mis katoodi välja tõstmisel sulandisest õhu hapnikuga kokkupuutudes violett leegiga ära põleb (Davy, 1807). Tarvitades sellekohaseid kaitseabinõusid, mis takistavad kaaliumi süütumist, võib sel teel vastavatest sooladest eraldada puhast kaaliumi, naatriumi ja teisi metalle.

Tehnikas on sulandatud soolade elektrolüüsil ülisuur tähtsus. Muu seas põhjeneb temal uuemal ajal leitud puhta alumiiniumi valmistamismetood: savimuld (alumiiniumoksüd) asetatakse sellekohasesse elektriahju ja kuumendatakse teda tugeva elektrivooluga kunni vedelaks sulanemiseni; sulandisse asetatakse vastavad elektroodid ja juhitakse nende kaudu vool, mis siis puhta alumiiniumi katoodile kannab.

Samal teel valmistatakse puhast kroom-, uraan- ja maagniummetalli, kui ka palju teisi aineid, mida keemilisel teel raske või koguni võimata on valmistada.

5) Tööstuses tarvitatakse elektrolüüsi väga mitmesugusteks otstarveteks. Tähtsamad nendest on:

a) Metallide, näiteks vase, puhastamine (raffineerimine): Selleks paigutatakse vasevitriooli sulatisse anoodi moodustav suur tooresvase tükk. Samasse vedelikku langetatakse üsna puhtast vasest katood ja juhitakse läbi sulatise tugev madala pingega (5—6 volti) elektrivool. Tooresvase tükist kandub siis puhas vask katoodile (punkt 3), kuna kõik lisandid nõu põhja langevad. Protsess kestab senni, kunni anoodilt kõik vask katoodile on kantud. Seesugune puhastamisviis on niivõrd odav, et ükski keemiline metood temaga võistelda ei suuda. Ka kulda ja teisi metalle puhastatakse samasugusel viisil.

b) Kehade pinna katmine õhukeste metallkihtidega nagu kuldamine, hõbetamine, nikkeldamine jne. (n.n. galvanosteegia). Selleks paigutatakse hästi puhastatud keha, mida kullata või hõbetada tahetakse, katoodina vastava metallsoola sulatisse. Anoodiks on sellest metallist plaat, millega antud keha katta tahetakse (kuld, hõbe, nikkel, vahest ka süsi). Võrdlemisi nõrga vooluga kandub siis katte-metall keha pinnale ja tekitab seal õhukese tiheda metallkihi.

c) Galvanoplastika all mõistetakse kõiksugu kehade metallkoopiate (harilikult vask-) valmistamist elektrolüüsi abil: Kõige pealt valmistatakse kopeeritavast kehast gips- või kummivorm—

n. n. matrits. Viimase pind kaetakse õhukese grafiitpulberkihiga ja tehakse ta sellega juhtivaks. Siis asetatakse matrits katoodina vasevitriooli sulatisse, milles lihtne vasetükk anoodina ripub. Voolu pikemaajalisel mõjumisel tekib matritsi pinnal paksem vasekiht, mida sealt hõlpsasti võib eraldada ja mis täpipealne koopia on asjust, mille järele vorm (matrits) valmistati: Joonistuste trükkimiseks tarvitatavatest „puulõigetest" valmistatakse sel teel vask-koopiad, millega siis trükkimist toimetatakse, ilma et originaal-puulõige selle juures kuluks.

§ 41. **Faraday seadused. Voolu keemiline mõõtmine.** 1) Vee elektrolüüsil (joon. 99) võib tähele panna, et torudesse (D ja E) seda rohkem gaasi kogub, mida rohkem järjestikku ühendatud elemente voolu sünnitamiseks tarvitatakse. Peab oletama, et suurem arv elemente ka rohkem elektrit läbi elektrolüüdi ajab; järjelikult on eraldunud gaasihulk seda suurem, mida rohkem elektrit läbi elektrolüüdi voolas.

Täpipealse vahekorra eraldunud gaasihulga ja läbi elektrolüüdi voolanud elektrihulga vahel leiame järgmisest katsest: patarei CZ (joon. 99) asemele paneme tuntud mahutavusega Leideni pudeli ja ühendame tema väliskatte traadi ühe otsaga (näiteks Z). Sellekohase mekanismi abil ühendame pudeli sisekatte vaheldamisi elektriseerimismasina konduktoriga ja siis teise traadi otsaga. Sel teel laeme esiteks pudeli ja tühjendame tema siis läbi elektrolüüdi, laeme pudeli uuesti jne. Niisuguse mekanismiga võib laadimist ja tühjendamist väga kiires korras ja pikemat aega toimetada. Tõusis pudeli pinge (elektromeetriga mõõdetav) igal laadimisel V voldini ja oli pudeli mahutavus C faradi, siis voolas igal tühjendamisel läbi elektroolüüdi $C \times V$ coulombi (formul 12), n tühjendamisel nii siis $n.C.V$ coulombi. Peale selle, kui sarnasel teel läbi elektrolüüdi on juhitud üks terve coulomb elektrit (s. t. kui $n.C.V = 1Cb$), mõõdame eraldatud vesiniku hulka: selgub, et 1 coulomb elektrit igasugustel tingumustel eraldab ligi 0,01 mg vesinikku. Korrates katset teiste elektrolüütidega, leiame et 1 Cb elektrit kannab anoodilt katoodile ligi 0,33 mg vaske ja ligi 1,12 mg hõbedat (§ $40_8$). Eraldatud aine hulk ei olene selle juures ei lahutamisprotsessi kestvusest, ei elektrolüüdi kontsentratsioonist ega tema temperatuurist.

Juhime läbi elektrolüüdi 1 coulombi asemel 2, 3, 4 jne. coulombi, siis leiame, et eraldatud ainete hulgad vastavalt 2, 3, 4 jne. korda suuremaks kasvavad. Sellest järgneb Faraday esimene seadus:

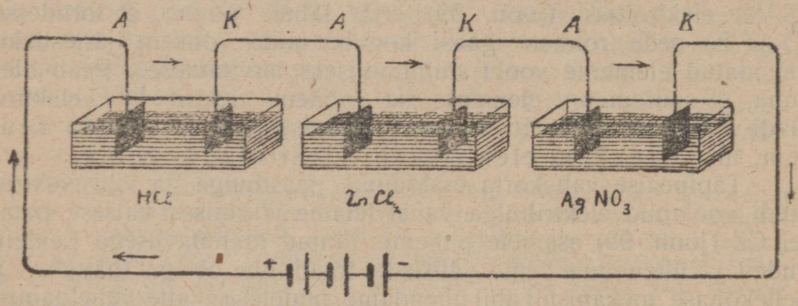
**Elektrolüüsil lahutatud ainete hulgad on proportsionaalsed läbi elektrolüüdi voolanud elektrihulgaga.**

Katsed näitavad, et eraldatud vesiniku hulk jääb alati ühesuuruseks, kas juhime 1Cb läbi väävelhappe, soolhappe või mingi teise elektrolüüdi. Samuti ei olene eraldatud vase või hõbeda hulk elektrolüüdiks tarvitatud soolast, vaid ta jääb ühe-

suuruseks iga soola puhul, mis sisaldab vaske või hõbedat. Antud ainest eraldub nii siis ühe coulombiga igasugustel tingimustel ikka ühesuurune hulk. Sellepärast öeldakse, et nimetatud ainehulk on ekvivalent ühe coulombiga; ühe coulombiga eraldunud ainehulka hüütakse antud aine elektrokeemiliseks ekvivalendiks.

Täpipealsed mõõtmised näitavad, et elektrokeemiline ekvivalent on vasel 0,3294 mg, hõbedal 1,118 mg ja vesinikul 0,01039 mg.

2) Juhime elektrivoolu järjestikku läbi kolme nõu (joon. 100), milles on elektrolüüdina soolhape (HCl), kloortsink ($Zn\,Cl_2$) ja




Joon. 100.

põrgukivi ($Ag\,NO_3$). Peale selle kui vool teatud aeg on mõjunud, s. t. kui läbi kõigi elektrolüütide on voolanud üks ja sama elektrihulk, kaalume elektroodidel eraldunud ained. Selgub, et kui näiteks soolhappes katoodi juures on eraldunud 1 gramm vesinikku, siis on teiste katoodide juure kogunud vastavalt $32{,}5\ g = \frac{65}{2}$ g tsinki ja 108 g hõbedat. Et vesinik ja hõbe on keemiliselt üheväärised ained, kuna tsink on kahevääriline ja et 1, 65 ja 108 on H, Zn ja Ag aatomkaalud, siis on 1 g vesinikku, $\frac{65}{2}$ g tsinki ja 108 g hõbedat keemilisest ekvivalentsed. Ka anoodidel eraldunud ainetehulgad on keemiliselt ekvivalentsed: me leiame, et esimesel ja teisel anoodil on eraldunud 35,5 g kloori, kolmandal aga $8 = \frac{16}{2}$ g hapnikku; kuna hapnik ($O = 16$) on kahevääriline ja kloor ($Cl = 35{,}5$) ühevääriline, siis on 8 grammi hapnikku ekvivalent 35,5 grammi klooriga. Sellest järgneb Faraday teine seadus: **Ühe ja sama elektrihulgaga eralduvad keemiliselt ekvivalentsed ainehulgad.**

3) Voolutugevusel 1 amper voolab igas sekundis läbi elektrolüüdi 1 Cb elektrit (§ $36_2$). Sellepärast järgneb Faraday esimesest seadusest, et vool 1 amper eraldab igas sekundis ühe elektrokeemilise ekvivalendi (k) ainet (s. t. 1,118 mg hõ-

bedat, 0,3294 mg vaske ja 0,01039 mg vesinikku). Kestab vool t sekundit ja on voolu tugevus J amperi, siis on läbi elektrolüüdi voolanud Jt coulombi; seega on eraldunud aine hulk

$$M = k\,Jt \text{ mg} \qquad 15)$$

s. t. **eraldunud ainehulk on proportsionaalne voolu tugevusega.**

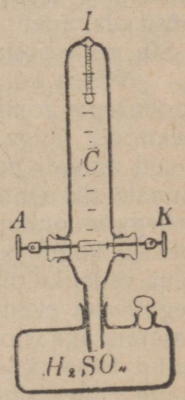
Selle põhjal võib voolu tugevust J mõõta keemilisel teel: on ainult tarvis leida ühes sekundis eraldunud aine, näiteks hõbeda hulk ja viimane jagada aine elektrokeemilise ekvivalendiga (k), sest kui $t = 1$, siis annab formul (15) voolu tugevuse jaoks

$$J = \frac{M}{K}\,.$$

kus k on tuntud.

Riista, milles sünnib voolu mõõtmiseks ettevõetav elektrolüüdi lahutamine, hüütakse voltameetriks. Harilikult tarvitatakse n. n. hõbe-voltameetrit, milles elektrolüüdiks on põrgukivi sulatis ($AgNO_3$) ja eraldatavaks aineks puhas hõbe ($k = 1{,}118$ mg).

Väiksema täpipealsusega on vask-voltameeter; temas eraldatakse vasevitriooli sulatisest puhast vaske ($k = 0{,}3294$ mg). Väga käepärane ja odav on n. n. paukgaas-voltameeter (joon. 101): vool juhitakse plaatin-elektroodide A ja K kaudu läbi nõrga väävelhappe. Elektroodidel vabanev vesinik ja hapnik, mis segatult paukgaasi sünnitavad, kogutakse vedelikuga täidetud silindrisse C. Tekkinud paukgaasi ruum-ala järele, mida otsekohe ära võib lugeda toru C seinal asuva jaotusskaala abil, on kerge leida eraldunud vesiniku kaalu, sest et vesiniku ruum-ala on 2 korda suurem hapniku ruum-alast (vaata § 40[2]).



Joon. 101.

**Näited:** 1) Kui tugev on vool, mis 1 minutis 0,5 g vaske eraldab?

1 amper eraldab 1 sekundis 0,3294 mg vaske; 1 minutis eraldab ta seega $60 \times 0{,}3294 = 17{,}76$ mg $= 0{,}01776$ g. Et samal ajal eraldada 0,5 g vaske, peab vool olema

$$J = \frac{0{,}5}{0{,}01776} \cong 28 \text{ amp.}$$

Formuli (15) järele on $J = \frac{M}{kt} = \frac{0{,}5 \cdot 1000 \text{ mg}}{0{,}3294 \text{ mg } 60} = 28$ amp; (0,5 g = 0,5 . 1000 mg ja 1 minut = 60 sekundit.)

2) Paukgaas-voltameetris eraldub 10 minuti sees 280 $cm^3$ gaasi, mille rõhumine on 760 mm ja temperatur $0^0$ C. Kui tugev on vool?

Eraldatud gaasis on vesinikku 2 jagu ja hapnikku 1 jagu, seega on seal vesinikku $\frac{2}{3} \cdot 280 = 186{,}6$ $cm^3$. Rõhumisel 760 mm ja temperatuuril $0^0$ kaalub 1 $cm^3$ vesinikku 0,00009 g = 0,09 mg (v. erikaalude tabel I kõite lõpul). Seega on eraldatud vesiniku kaal $M = 186{,}6 \,.\, 0{,}09$ mg $= 16{,}8$ mg; $k = 0{,}01039$ mg ja $t = 10 \,.\, 60 = 600$ sec.

$$J = \frac{16{,}8}{0{,}01039 \,.\, 600} \cong 2{,}7 \text{ amp.}$$

3) Lusikate hõbetamisel tahetakse iga lusika peale kulutada 10 g hõbedat. Kui kaua kestab ühe lusika hõbetamine, kui voolu tugevus on 12 amp? Eraldatava hõbeda kaal on M = 10 g = 10000 mg, J = 12 amp ja k = 1,118 mg.

Formulist (15) leiame, et

$$t = \frac{M}{k.J} = \frac{10000}{1,118.12} = 746 \text{ sec} = 12,4 \text{ minutit.}$$

§ 42. **Joon-teooria.** 1) Elektri voolamist läbi elektrolüütide ja sellega seotud elektrolüüs-nähtusi seletatakse Clausiuse ja Arrheniuse loodud joon-teooriaga. Selle teooria järele lagunevad elektrolüüdi neutraalsed moleekulid kaheks aatomiks või aatom-grupiks. Esimene aatom (või -grupp) pärib eraldumisel moleekulist vähe rohkem negatiivset elektrit kui teine; selle tõttu elektriseerub see aatom negatiivselt ning teine — vastavalt positiivselt. Neid moleekuli elektriseerituid pooli hüütakse ka joonideks. Joonid on nii siis lihtsad aatomid või aatom-grupid, milledel teatav elektrilaeng. Soolhappe elektrolüüsil (§ 40₂) laguneb näiteks soolhappe neutraalne moleekul (HCl) joonideks + H ja — Cl, millest esimene on positiivse laenguga vesiniku-aatom, teine samasuure negatiivse laenguga kloor-aatom. Väävelhappe elektrolüüsil laguneb neutraalne $H_2SO_4$-moleekul joonideks + $H_2$ ja —$SO_4$, millest esimene on vesiniku-joon, teine aatom-grupi $SO_4$ oma.

Niipea kui elektrolüüti kastetud elektroodid ühendada patarei poolustega, tõmbuvad + joonid negatiivse ja — joonid positiivse elektroodi külge. Selle tagajärjel hakkavad esimesed katoodi ning teised anoodi poole rändama. Jõuab näiteks + H-joon katoodi pinnale, siis neutraliseerub tema laeng katoodi vastupidise laenguga. Sellega moondub tema harilikuks neutraalseks H-aatomiks; aja jooksul kogub katoodi pinnale hulk vesiniku-aatome, mis mullidena vedeliku pinnale tõusevad. Jga + H-joon võtab katoodilt vähe negatiivset elektrit, selle tõttu väheneb katoodi laeng ja potentsiaal. Patareist aga voolab siis katoodi vastav hulk negatiivset elektrit juure, kunni tema potentsiaal endiseks saab. Et negatiivse elektri voolamine ühes sihis sama tähendab kui positiivse elektri voolamine vastupidises sihis, siis on kirjeldatud nähtus sarnane kui voolaks + joonidega katoodi pinnale kandunud positiivne elekter katoodilt tagasi elemendi negatiivsesse poolusesse.

Anoodil on sündmustik analoogiline: sinna jõudnud — Cl-joon neutraliseerub, moondudes harilikuks Cl-aatomiks; ta võtab selle juures anoodilt teatava hulga + E-d, anoodi potentsiaal langeb ja patarei + pooluselt voolab positiivne elekter anoodile. Niiviisi kannavad joonid elektrit alatasa läbi elektrolüüdi: + joonid viivad + E katoodile, — joonid kannavad — E anoodile; esimesi hüütakse sellepärast ka katioonideks (+), teisi — anioonideks (—). Kui jälgida ainult positiivse elektri liikumist kogu ahelas, siis võib kirjeldatud protsessi järgmiselt kujutada: patarei + poolusest voolab positiivne elekter anoodile, sealt kandub ta katioonide (+ H-joonide) kaudu läbi elek-

trolüüdi katoodile ja voolab katoodilt tagasi patarei — poolusesse. Negatiivne elekter voolab kogu ahelas vastupidises sihis, mõlemad voolud kokku aga moodustavad selle üleüldise elektrivoolu, mis näiteks elektrilambi hõõgama paneb. Igapäevases elus mõistame „elektrivoolu" all ainult positiivse elektri liikumist, sellepärast käsitame edaspidi nähtusi nii kui voolaks kogu ahelas ainult positiivne elekter.

2) Et ainete lagunemine elektrolüüsil ka kõige nõrgemate voolude mõjul sünnib ja selle juures silmapilkselt peale voolu tekkimist algab, siis on vähe tõenäolik, et vool ise võiks joonideks lõhkuda ehk jooniseerida elektrolüüdi moleekulid. Sellepärast oletas Clausius, et soolade ja hapete veesulatises (elektrolüütides) teatav osa sulatatud aine moleekulitest juba enne voolu tekkimist on joonideks lagunenud, ehk nagu öeldakse dissotsieerunud.

Seesuguse lagunemise põhjuseks loetakse vedeliku moleekulite soojus-liikumine (Browni liikumine): Vee moleekulid põrkuvad alatasa vastu nende vahel asuvaid soolamoleekuleid, mille tõttu mõned viimastest pooleks lõhkuvad. Ühte poolt (jooni) moodustavad alati soolas leiduva metalli või happes leiduva vesiniku aatomid, teist poolt — moleekuli ülejäänud osa. Metallide ja vesiniku iseäraliku omaduse tõttu pärib esimene pool alati vähem negatiivset elektrit kui teine pool, nii et metall- ja vesiniku-joon on alati positiivne, moleekuli ülejäänud osa aga negatiivne.

Dissotsiatsioon ei ole koguni mitte sama nähtus kui aine keemiline lagunemine: soolhappe lahutamisel sünnivad näiteks neutraalsed H ja Cl aatomid, mis igal ajal uuesti keemiliselt ühineda võivad; dissotsiatsioonil aga tekivad joonid + H ja — Cl, mille juures keemiline sugulus mingit osa ei mängi ja mille vahel ainult elektri külgetõmbejõud valitseb. Need joonid võivad keemiliselt alles siis ühineda, kui nad oma laengu on kaotanud, s. t. kui nad neutraalseteks aatomiteks on muutunud.

3) Elektrolüüdis tõmbuvad + H-joonid ja — Cl-joonid vastamisi külge; kokkupuutudes neutraliseeruvad nad ja ühinevad siis uuesti H Cl-moleekuliks. Samal ajal aga tekib alatasa uusi joone juure. Lõpulikult kujuneb siis vedelikus seisukord, millel näiteks ühes sekundis tekkivate joonide arv sama suur on kui samal ajal ühinevate joonide arv. Sel korral jääb sulatises leiduvate joonide koguarv konstandiks, kusjuures + joonide arv alati võrduma peab — joonide arvuga, tekivad ja ühinevad ju joonid ainult paari-kaupa.

Arrhenius tõestas et sulatatud aine jooniseeritud moleekulite % oleneb sulatise kontsentratsioonist. Kui näiteks vette ainult mõni tilk soolhapet tilgutada, siis lagunevad happe moleekulitest peaaegu kõik (99%) joonideks; mida kangema teeme sulatise, seda madalam on jooniseeritud H Cl-moleekulite %. Väga kontsentreetitult võib see % nii madalaks langeda, et joonide koguarv lahjemas sulatises suurem on kui kontsentreeritud sulatises; joonide arv läheneb nullile, kui happes üleüldse vee-

moleekuleid ei leidu.[4] Samuti peab joonide arv null olema absoluut puhtas vees, sest seal ei leidu ju mingisuguseid moleekuleid, mida vee moleekulid lõhkuda (jooniseerida) võiksid.

Teisest küljest näitavad aga katsed (§ 40₁), et absoluut puhas vesi kui ka veeta hape elektrit ei juhi, et aga juba mõni tilk vette kallatud hapet vee juhtivust palju suurendab. Sellest selgub, et elekter ainult siis läbi vedeliku võib voolata, kui viimases joone leidub, kusjuures vedeliku juhtivus seda suuremaks kasvab, mida suuremaks saab joonide arv. Sellepärast peab oletama, et **elektrolüüdis moodustab elektrivoolu ainult joonidega kaasa kantud elekter,** nii et elektrivool vedelikkudes ainult konvektsioonvool on.

Vool, mis antud pinge juures läbi vedeliku läheb, on seda tugevam, mida suurem on vedeliku joonide arv, sest et ühesuguste joonidega ülekantud elektrihulk proportsionaalne peab olema joonide arvuga. Voolu tugevus ei olene aga mitte ainult joonide arvust, vaid ka veel sellest kiirusest, millega nad läbi vedeliku lähevad, sest ühel ja samal joonide-arvul kandub teadagi seda rohkem elektrit läbi elektrilüüdi, mida kiiremini joonid liiguvad. Joonide kiirus oleneb hõõrumise suurusest, millega vedelik nende liikumist takistab; see hõõrumine aga on seda suurem, mida sitkem on vedelik. Teatavasti kahaneb vedeliku sitkus, kui teda soendada; sellepärast peab joonide kiirus soenemisel kasvama. Ühes joonide kiirusega kasvab aga ka voolu tugevus. Sellest järgneb, et **vedelikud juhivad elektrit seda paremini, mida soemad nad on.**

4) Eelmises punktis leitud seadused põhjenevad Arrheniuse leitud andmetel joonide arvu kohta. Need andmed leidis Arrhenius järgmisel teel: Vees sulatatud aine moleekulid püüavad samuti kui gaasi moleekulidki võimalikult suurt ruum-ala täita. Nagu gaas nii avaldab ka sulatatud aine selle laienemistungi tõttu teatavat rõhumist, mida osmootse rõhumise all tuntakse (II § 76₂). See rõhumine sünnib gaasirõhumise seaduste järele (Boyl'e-Mariotte'i ja Avogadro seadused) ning oleneb järjelikult sulatatud aine moleekulite arvust ja nende liikumiskiirusest (temperatuurist). Ühel ja samal temperatuuril on osmootne rõhumine seega proportsionaalne sulatatud moleekulite arvuga. Katse näitab, et suhkrusulatise osmootne rõhumine tõepoolest proportsionaalne on sulatatud suhkru hulgaga (moleekulite arvuga). Elektrolüütides aga on asjaolu teistsugune: kui näiteks vette ühe tilga soolhappe asemele 2 tilka tilgutada, siis ei kasva osmootne rõhumine mitte kahekordseks, vaid vähem, — ütleme näiteks 1,8-kordseks. Sellest peab järeldama, et ka rõhumist tekitavate happemoolekulite arv mitte kahekordseks, vaid ainult 1,8-kordseks on kasvanud. Et vette aga tõeliselt samapalju happemoleekuleid juure lisati kui palju neid seal enne seda oli, siis avaldub selles vastolu, mida järgmiselt seletatakse: esimese soolhappe-tilga moleekulid lagunesid vees peaaegu kõik joonideks; et joonid iseseisvalt liikuda võivad, siis mõjub igaüks nendest osmootse rõhumise suhtes samuti kui terve soolhappemoleekul nii et rõhumise tekitamisest osa võtab joonide arv (2n), mis kaks korda suurem on happe moleekulite arvust (n). Juurelisatud teise tilga happemoleekulid ei lagune mitte enam kõik, vaid seda teeb näiteks ainult 0,6 osa nendest. Seega lisame nüüd veele juure mitte 2n jooni, nagu esimese tilgaga, vaid 0,4n terveks jäänud happemoleekulit ning $2 \cdot 0{,}6n = 1{,}2n$ jooni, kokku nii siis $0{,}4n + 1{,}2n = 1{,}6n$ iseseisvat jaokest. Teise happetilga juurelisamise järele kasvab seega rõhumist sünnitavate jaokeste arv $2n + 1{,}6n = 3{,}6n$ suuruseni ehk $\frac{3{,}6n}{2n} = 1{,}8$ korda; samapalju korda peab siis kasvama ja kasvas ka tõepoolest osmootne rõhu-

mine. Tundes osmootse rõhumise suurenemist, on seesuguse arutuse põhjal hõlbus välja arvata, mitmes osa juurelisatud happe molekulitest dissotsieerub. Et peale selle tuntud on ühes grammis leiduvate happemolekulite arv, siis leiame sel teel ka sulatise joonide koguarvu igasugusel kontsentratsioonil.

§ 43. **Elektri aatomiline struktuur; elektroonid.** 1) Juba Helmholtz tähendas (1881), et Faraday seadustest järeldama peab, et elekter samuti kui mateeriagi koos seisma peab üksikutest ühesuurustest kõige väiksematest osakestest — elektri aatomitest ehk elektroonidest. See vaade põhjeneb asjaolul, et keemiliselt ühevääriste*) ainete joonidel on alati ühesuurune laeng. Tõepoolest, me nägime (§ 41$_2$), et üks ja sama elektrihulk alati keemiliselt ekvivalentsed ainehulgad eraldab. Nii kannab 1 g vesinikku katoodi juure samapalju elektrit kui 108 g hõbedat. Et vesiniku ja hõbeda aatomkaalud on 1 ja 108, siis kaalub üks hõbeda-aatom 108 rohkem kui üks vesiniku-aatom. Järjelikult on ühes grammis vesinikus sama palju aatome kui 108 grammis hõbedas. Nii hõbeda kui vesiniku jooni moodustab lihtne elektriseeritud aatom, sellepärast peab nende joonide arv, millest elektrolüüsil kogus 1 gramm vesinikku, sama suur olema kui nende joonide arv, mis sünnitasid 108 g hõbedat. Et nimetatud ainehulkade eraldamiseks ühepalju elektrit kulus ja et elekter ainult joonide kaudu läbi elektrolüüdi pääseb (42$_3$), siis pidi elektrolüüsil iga üksik vesiniku-joon samapalju elektrit enesega kaasas kandma kui iga hõbeda-joon; teiste sõnadega, vesiniku-jooni laeng peab võrduma hõbeda-jooni laenguga. Samal teel võib tõestada, et ka kõigi teiste ühevääriste elementide (K, Na, Br, Cl jne.) joonidel on sama suur laeng kui vesiniku-joonil.

Sulatame vees kloortsinki ($ZnCl_2$), siis dissotsieerub kloortsingi molekul joonideks $+Zn$ ja $-Cl_2$. Viimane joon seisab koos kahest Cl-aatomist. Kõigil neil juhustel, kus kloorjoonil oli ainult üks aatom (näiteks soolhappe dissotsieerumisel, kus joonid olid $-Cl$ ja $+H$), oli jooni laeng alati ühesuurune ja võrdne vesiniku-jooni omaga (§ 42$_1$); sellepärast peab oletama, et kui joonil on kaks ühesugust aatomi ($Cl_2$), siis ka tema laeng 2 korda suurem on vesiniku-jooni laengust. Et aga kloortsingi neutraalsest molekulist sündinud joonide $-Cl_2$ ja $+Zn$ laengud võrdsed peavad olema, siis järgnebe elmisest, et tsingi-jooni ($+Zn$) laeng 2 korda suurem on vesiniku-jooni laengust. Samal kombel võib näidata, et ka teiste kaheväärist e ainete nagu näiteks vase-jooni ($+Cu$) laeng kaks korda suurem on kui vesiniku-jooni laeng. Üleüldse on kaheväärist e elementide joonide laengud 2 korda, kolmeväärist e elementide joonide laengud 3 korda suuremad kui üheväärise vesiniku-jooni laeng jne.

*) Keemiline väärisus on teatavasti arv, mis näitab, mitme vesiniku-aatomiga antud elemendi aatom ühineda võib, ehk mitme vesiniku-aatomi aset tema mingis happes võib täita. Üheväärise aine aatom võib nii siis ühineda ainult üh e vesiniku-aatomiga.

Dissotsieerumisel pärivad nii siis ainete joonid alati kas $1^e$, $2^e$, $3^e$ või $4^{ja}$-kordse vesiniku-jooni laengu ja ei iialgi mingi murdarvu sellest laengust. Sellepärast peab oletama, et vesiniku-jooni laeng on kõige väiksem elektrihulk, mis iseseisvalt üleüldse olla võib, sest vastasel korral peaksime joonide laenguid leidma, mis mingi murdosa nimetatud vesiniku-jooni laengust oleks. Nagu mateeria seisab koos jagamatuist aatomitest, nii seisab ka antud elektrihulk koos jagamatuist elementaarlaengutest ehk elektroonidest, mis kõik võrduvad vesiniku-jooni laenguga. Oma ehitusviisi poolest on järjelikult see tundmatu miski, mida me elektriks hüüame, sarnane mateeriaga.

2) Elektrooni laengu suuruse leiame järgmiselt: elektrolüüsil kannavad 1,118 mg hõbeda aatomid (joonid) enesega kaasas 1 coulumb elektrit (§ 41₁); et iga hõbeda-joon ühepalju elektrit enesega kannab, siis kannavad ühe terve grammi hõbeda joonid enesega $1000:1{,}118 = 894{,}2$ Cb elektrit. Üks gramm-ekvivalent hõbedat, s. t. seesugune hulk temast, mille mass grammides võrdub tema aatomkaaluga (107,9), kannab enesega järjelikult

$$107{,}9 \times 894{,}2 \text{ Cb} = 96500 \text{ Cb}.$$

Faraday II seaduse järele lahutab üks ja sama elektrihulk keemiliselt ekvivalentsed ainehulgad; sellepärast peab ka $32{,}5$ grammi tsinki, 35,5 g kloori, $\frac{1}{2}$ g hapnikku ja 1 g vesinikku, mis kõik keemiliselt ekvivalentsed 108 g hõbedaga, — sama elektrihulga 96500 Cb enesega läbi elektrolüüdi kandma. On ühes grammis vesinikus N aatomi, siis on ühe vesiniku-jooni laeng ehk

$$\text{elektrooni suurus} = \frac{96500}{N} \text{ Cb}.$$

Uuemate uurimiste järele on vesiniku aatomite arv ühes grammis $N = 61{,}8.10^{22}$. Järjelikult on elektrooni laeng

$$e = \frac{96500}{61{,}8.10^{22}} = 1{,}56.10^{-19} \text{ Cb}.$$

Et $1 \text{ Cb} = 3.10^9$ ESÜ (§ 18₃), siis on

$$e = 1{,}56.10^{-19} \times 3.10^9 = 4{,}68.10^{-10} \text{ ESÜ}.$$

Jooni laeng e jagatud tema massiga m hüütakse jooni erilaenguks. Vesiniku-jooni mass $m_H = \frac{1}{N} = \frac{1}{61{,}8.10^{22}}$ grammi;

järjelikult on vesiniku erilaeng

$$\frac{e}{m_H} = \frac{96500}{N} : \frac{1}{N} = 96500 \text{ Cb/g}$$

Samasuure laengu e juures on kõigi teiste ainete joonide mass suurem kui vesiniku-jooni oma. Sellepärast on kõigist ainetest vesinikul kõige suurem erilaeng.

Kuigi üksiku jooni laeng on võrdlemisi väike, on elektrolüüdi joonide suure koguarvu tõttu nendega edasikantav kogulaeng väga suur. Nagu nimetatud kannab 0,01 mg vesiniku-joone enesega 1 Cb elektrit. Üks terve milligramm vesiniku-joone kannab siis enesega ligi 100 Cb. Selle laengu suurusest saame

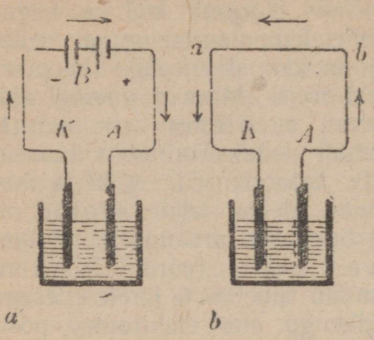
ettekujutuse, kui meele tuletame, et juba 1 Cb on nii suur laeng, mis teist samasuurt laengut 1 kilomeetri kaugusel külge tõmbab jõuga 918 kg (Coulombi seadus).

3) Elektrolüüdis on nii positiivsel H-joonil kui ka negatiivsel Cl-joonil laeng, mis võrdub ühe elementaarlaenguga. Sellepärast oleks loomulik oletus, et H-joon kannab enesega ühe positiivse ja Cl-joon ühe negatiivse elektrooni. Mitmed uuemal ajal leitud nähtused näivad aga tõestavat, et olemas on ainult negatiivsed elektroonid; vähemalt leitakse ainult viimaseid iseseisvalt ja eraldatult mateeriast (v. katoodkiired, § 92 ja raadium -kiired, § 95), kuna positiivne elekter alati seotud on mateeriaga. Selle põhjal kalduvad õpetlased arvamisele, et üleüldse olemas on ainult negatiivne elekter (võrdle Franklini teooria § 17). Negatiivne joon kannab selle vaate järele enesega (negatiivse) elektri ühe elementaarlaengu ehk elektrooni, positiivne joon aga on aine aatom või moleekul, mis kaotanud on ühe elektrooni ja milles selle tõttu vastavalt vähem elektrit on kui mateeria neutraalolekuks tarvis. Soolhappe moleekuli dissotsieerumisel eraldub näiteks H-aatom Cl-aatomist, selle juures võtab Cl-aatom enesega ühe elektrooni rohkem kui H-aatom ning elektriseerub negatiivselt, kuna H-aatom, kus nüüd elektroonide puudus valitseb, positiivselt elektriseerub; teadagi on siis ühe jooni üleliigne elektrihulk võrdne teises joonis puuduva elektrihulgaga, nii et mõlemate „laengud" arvuliselt ühesuurused on. Et dissotsieerumisel just vesinik ja metallid elektroone kaotavad, on täiesti kokkukõlas teiste nähtustega: teatavasti pääsevad näiteks metallides (heades juhtides) „elektri osakesed", s. t. elektroonid hõlpsasti ühest moleekulist või aatomist teise (v. § 31), kuna nad halbades juhtides ja mittejuhtides seotud on aine moleekuliga. Kui elektroonid metalli-aatomitega nõrgemini on seotud kui teiste ainete aatomitega, siis on arusaadav, et moleekuli lõhkemisel metallosa vähem elektroone pärib, s. t. positiivselt elektriseerub.

4) Kui olemas on ainult negatiivne elekter, siis võib elektri vool läbi metalli ainult negatiivsete elektroonide vool olla. Et elektri läbi metalli voolamise järele viimase aines mingisugust muudatust märgata ei ole, siis ei või sellest voolust joonid kui aineosakesed mitte osa võtta, sest viimased peaksid ju juhi ühte otsa koonduma ja sellega juhi aine koosseisu muutma. Sellepärast peavad elektroonid metalljuhis ilma ainelise aluseta liikuma, s. t. metallides ei ole elektri vool mitte konvektsioonvool.

Metalljuhis voolab nii siis ainult negatiivne elekter, s. t. see elekter, mis ilmub vaigupulga hõõrumisel ja mida kord juhusliselt negatiivseks nimetati. Et seesuguse elektri voolamissiht on patarei — poolusest tema + poolusesse, siis on elektroonide vool ühendustraadis otse vastupidine sellele, mida me sennini „positiivse elektri vooluks" nimetasime. Lihtsuse pärast mõistame ka edaspidi „elektrivoolu" sihi all ikkagi tema igapäevast tähendust, s. t. positiivse elektri liikumissihti, peame selle juures aga silmas, et tõeline, s. t. elektroonide vool otse vastupidine on.

§ 44. **Polarisatsioonivool; akkumulaatorid.** 1) Juhime plaatinelektroodide K ja A kaudu elektrit läbi nõrga väävelhappe (joon. 102-a): Me näeme, et elektroodide pind varstigi õhukese gaasikihiga kattub; anood A — hapnikuga ja katood K — vesinikuga. Kõrvaldame patarei B ja ühendame juhtide otsad peene traadiga ab (joon. 102-b), siis soeneb viimane, kuid hakkab peagi uuesti jahtuma. Sellest peab järeldama, et traadis ab lühikese kestvusega elektrivool tekkis. Nagu lähem katsumine näitab, on selle n. n. polarisatsioonivoolu siht otse vastupidine selle voolu sihile, mida patarei abil läbi elektrolüüdi juhiti.



Joon. 102.

Niipea kui elektroodid A ja K gaaskihiga kattuvad, ei ole nad enam ühesugused, sest ühe pinna moodustab vesiniku-, teise pinna aga hapnikukiht. Nagu mitmest metallist valmistatud elektroodide vahel pinge ilmub, nii sünnib see nüüd ka kirjeldatud elektroodide vahel. Selle pinge tõttu voolabki elekter läbi traadi ab. Teadagi kestab pinge ja vool ainult senni, kunni gaasikiht elektroode katab; hävineb viimane, siis saavad elektroodid jällegi ühesugusteks ning nende potentsiaalvahe kaob.

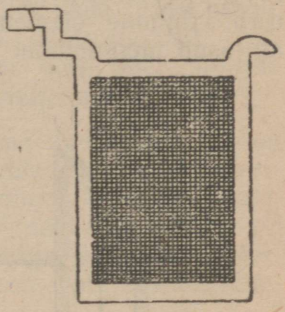
2) Kui elektroodidena tinaplaate tarvitada, siis muutuvad voolu mõjul nende pinnad keemiliselt: anoodi pind kattub õhukese tinaülihapendi-kihiga ($PbO_2$), katoodi pind — kareda puhta tinaga. Sel kombel muutunud tinaelektroodid sünnitavad peale patareivoolu katkestamist tugeva ja pikemat aega kestva polarisatsioonivoolu, nii et neid nagu Galvani-elemente voolu tekitamiseks võib tarvitada (Planté, 1859). Niisugustest elektroodidest valmistatud sekundäär-element ehk akkumulaator võib teadagi ainult niikaua voolu anda, kui anoodi tinaülihapendi- kiht, mis polarisatsioonivoolu kestvusel alatasa hävineb, veel sootumaks ära ei ole kulunud. Viimasel juhusel tuleb akkumulaator uuesti laadida, milleks elektroodide kaudu polarisatsioonivoolule vastupidise sihiga elektrivool juhitakse kunni anoodil uus tinaülihapendi-kiht tekib. Seega võib akkumulaatorisse elektrit nagu koguda ja teda sealt siis tarbekorral võtta. Ilma tarvitamata hoidub tinaülihapendi-kiht kaua aega muutumatult alal, nii et laetud akkumulaator veel kaua peale laadimist voolu võib anda.

Laadimisel on keemiline protsess järgmine: alguses tekib väävelhappe mõjul mõlema tinaelektroodi puhtal pinnal õhuke tinasulfaadi-kiht ($PbSO_4$). Vool kogub katoodi pinnale vesinikku, mis seal tinasulfaadiga väävelhappeks ühineb ja elektroodi pinnale puhta tina jätab ($PbSO_4 + H_2 = H_2SO_4 + Pb$). Viimane katab elektroodi pinna koheda tinamassiga. Anoodil aga ühineb voo-

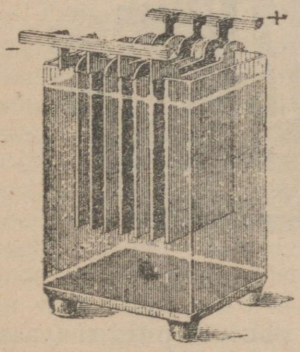
luga sinna kantud anioon $SO_4$ tinasulfaadiga, sünnitades tinaülihapendi ($SO_4 + Pb\ SO_4 + 2\ H_2O = 2\ H_2\ SO_4 + Pb\ O_2$), mis pruuni massina anoodi katab. Akkumulaatori tühjendamisel on keemiline protsess ümberpöördud: Anoodil ühineb $PbO_2 + H_2\ SO_4 = PbO + H_2O + SO_4$; $SO_4$ läheb vooluga endise katoodi pinnale ja sünnitab viimase metalliga uuesti tinasulfaadi: $Pb + SO_4 = Pb\ SO_4$. Anoodile jäänud tinahapend (Pb O) muutub teistkordsel laadimisel uuesti tinaülihapendiks jne.

Nagu kõigis elektrokeemilistes protsessides, nii sünnitab antud elektrihulk ka akkumulaatori laadimisel teatava kindla hulga tinaülihapendit. Tühjendamisel laguneb sama hulk tinaülihapendit; et tühjendamisprotsess ümberpöördud laadimisprotsessi kujutab, siis peab saadud hulga tinaülihapendi lagunemisel sama palju elektrit sündima kui teda kulus nimetatud tinaülihapendi tekitamiseks. Akkumulaatori tühjendamisel saadav elektrihulk peaks järjelikult võrduma laadimiseks kulutatud elektrihulgaga. Et aga akkumulaatoris osa elektrit soojuseks moondub, siis on akkumulaatorist saadav elektrihulk alati (vähemalt 15% võrra) väiksem kui laadimiseks kulutatud elektrihulk.

3) Kui ülevalkirjeldatud iihtsat tinaakkumulaatorit palju kordi vaheldamisi laadida ja tühjendada, siis hakkab järk-järgult ikka paksem ja paksem tinakiht keemiliselt muutuma, sest et elektroodide pinnad ülihapendi tekkimisel ja hävinemisel järk-järgult kohedamaks muutuvad, millega suurem tinahulk keemilistest protsessidest võib osa võtta. Mida paksem ülihapendi-kiht tekib, seda rohkem elektrit võime akkumulaatorisse koguda, seda suuremaks kasvab tema mahutavus. Et akkumulaatori mahutavust veelgi suurendada, tarvitatakse praegusel ajal mitte siledaid, vaid augulisi või võresarnaseid tinaplaate (joon. 103). Seesuguse plaadi aukudesse või lohkudesse pressitakse tinahapendi pulbrit (näiteks tinaläiget, PbO), mis laadimisel suuremal hulgal tinaülihapendiks moondub. Ühte nõusse riputatakse hulk seesuguseid plaate ja ühendatakse nad vaheldamisi ühiseks anoodiks ja katoodiks (joon. 104). Vedelikuna tarvitatakse alati nõrka väävelhapet.



Joon. 103.



Joon. 104.

Akkumulaatorid tarvitatakse seal, kus elektrit tagavaraks tahetakse koguda, näiteks elektrijaamades, kus neid päeva laetakse, et õhtul ja ööseti nendest valgustuseks voolu võtta, elektriautomobiilide käimapanemiseks ja mitmesugusteks teisteks otstarveteks.

Et ühe akkumulaatori kõik plaadid on ühendatud paralleelselt

(§ 39₂), siis võrdub kogu akkumulaatori pinge ühe plaadipaari pingega, mis on umbes 2 volti. Tühjendamisel hoidub pinge umbes ühesuurusena; ta hakkab alles siis järsku langema, kui akkumulaator tühi on. Alaneb pinge 1,8 voldini, siis tuleb akkumulaator uuesti laadida, vastasel korral läheb ta rikki.

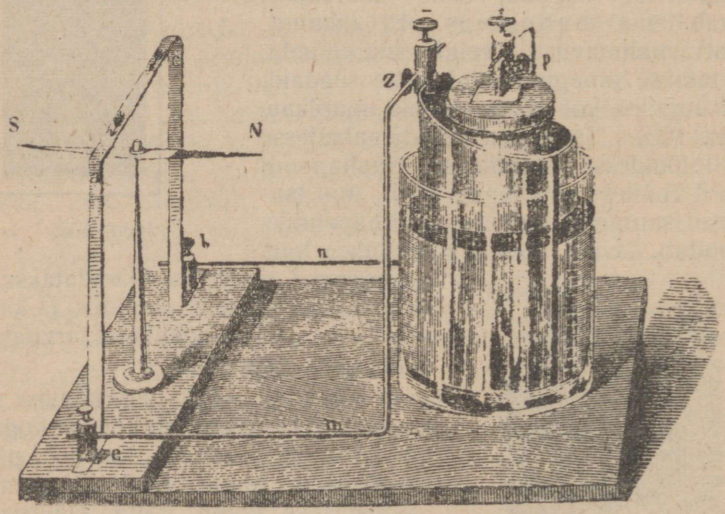
Akkumulaatori mahutavust avaldatakse amper-tundides. On mahutavus näiteks 50 amp-tundi, siis võib akkumulaatorist võtta kas 10 tunni vältel 5 amp, 20 tunni vältel 2,5 amp või 5 tunni vältel 10 amp jne. Iga akkumulaator võib anda ainult piiratud tugevusega voolu: on tema voolu tugevus piiratud näiteks 10 amperiga, siis rikkub ta, kui temalt suuremat voolu võtta, olgu tema mahutavus selle juures kuitahes suur.

Nõutakse akkumulaatorilt suuremat pinget kui 2 volti, siis ühendatakse neid mitu tükki järjestikku (§ 39₁); 110 voldi saamiseks tuleks 55 akkumulaatori järjestikku ühendada.

## Peatükk V:

## Elektrivoolu magnetiline mõju.

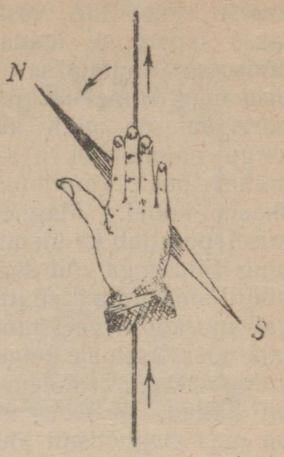
§ 45. **Voolu mõju magnetnõela peale.** 1) Daani õpetlane Örsted (1820) leidis, et magnetnõel tema lähedal voolava elektri mõjul omast põhja-lõuna sihist kõrvale kaldub. Juhime elemendist tuleva voolu läbi metallpaela, mille all asub magnetnõel NS (joon. 105): Põhja-lõuna sihis seisev




Joon. 105.

nõel pöördub voolu tekkimise silmapilgul voolule põigiti (vaata joonistus) ja hoidub uues seisus nii kaua, kui vool kestab.

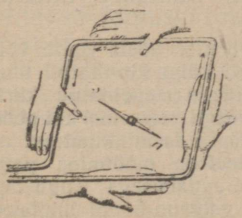
Nõela põhjapooluse N pöördumise siht oleneb nagu katsed näitavad voolu sihist kui ka sellest, kas asub nõel voolu all või peal. Igal juhusel määrab pöördumissihti n. n. parema käe reegel: **Kui parem käsi sel kombel traadi kohal hoida, et sõrmed voolu sihti näitavad ja et peopesa magnetnõela poole on pöördud, siis kaldub nõela põhjapoolus harguli hoitud pöidla sihis** (joon. 106).




Joon. 106.

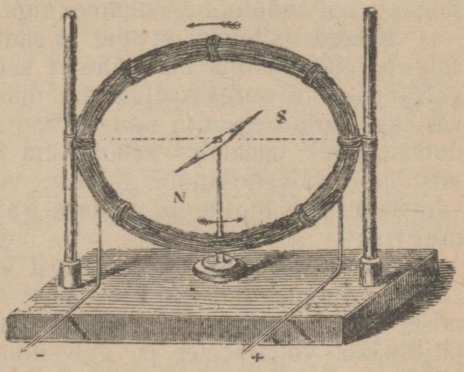
Samaks otstarbeks tarvitatakse ka n. n. Ampère'i ujuja-reeglit: kui ette kujutada, et inimene voolu sihis piki traati ujub, kusjuures ujuja nägu vastu magnetnõela on pöördud, siis kaldub põhjapoolus pahemale poole.

Painutame voolujuhi nelinurgaks ümber magnetnõela (joon. 107), siis mõjuvad nõela peale kõik juhi üksikud osad ühes ja samas sihis, sest et pöial piki kogu juhti ikka ühele poole näitab. Selle tõttu summeeruvad juhi üksikute osade mõjud ning nõel pöördub omast algsihist veel kaugemale.



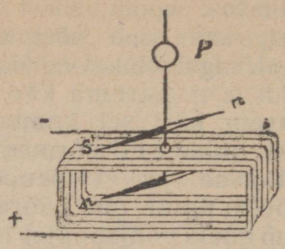
Joon. 107.

2) Asub nõel üsna voolu ligidal ja on viimane küllalt tugev, siis pöördub nõel perpendikulaarseks voolujuhile. Seisab ta kaugemal voolust või nõrgeneb vool, siis kaldub nõel ainult enam või vähem omast algsihist kõrvale. Teeme siidiga punutud (isoleeritud) traadist mitmekordse võru ja paigutame võru keskele magnetnõela (joon. 108), siis voolab läbi seesuguse „mähise" juhitud elekter järgemööda läbi kõigi traadikeerdude. Iga üksik keerd mõjub samuti kui see kujutatud joonistusel 107; kõigi keerdude mõjud aga summeeruvad, nii et nõel juba üsna nõrga voolu mõjul kõrvale pöördub. Säherdune riist on väga käepärane nõrkade voolude ja nende sihtide äratundmiseks. Teda hüütakse galvanoskoobiks.




Joon. 108.

Praktiliselt antakse galvanoskoobile järgmine kuju: peenikesest isoleeritud vasktraadist mähitakse lapergune madal rull. Mähise õõnsusse riputatakse peenikese niidi otsa magnetnõel ns (joon. 109). Vähe kõrgemal on niidi külge kinnitatud kerge näitajanõel n' s', mis pöördub mähise peale kinnitatud nurgakraadide skaala kohal. Magnetnõela pöördumisel pöördub ka ülemine näitaja-nõel ning viimasega võib skaalalt ära lugeda pöördumisnurga suurust. Tahetakse galvanoskoopi veel tundlikumaks teha, siis võetakse hariliku näitaja-nõela asemele teine magneetnõel n' s', mis niiviisi niidi külge kinnitatakse, et mõlema nõela isenimelised poolused ühele poole on sihitud. Kui üks nõel ainult vähe tugevam on teisest, siis on maa-magnetismi jõud, mis sarnast astaatilist nõelapaari põhja-lõuna sihis hoiab, üliväike (mõjub see jõud ju iga nõela peale ise sihis); sellepärast pöördub seesugune nõelapaar juba ülinõrga elektrivoolu mõjul. Kirjeldatud galvanoskoopi hüütakse tihti ka multiplikaatoriks.



Joon. 109.

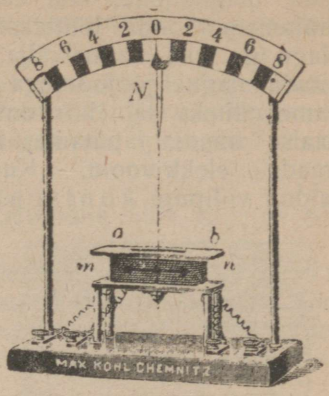
Selle asemel, et nõela pöördumisnurka lugeda ülemise nõela järele, võib seda teha ka väikse peegli P (joon. 109) abil, mis niidi külge kinnitatult ühes nõeltega pöördub. Kui peeglile kitsas valgusjuga juhtida ja peegeldatud kiirte valgustäpp mingi seinale heita, siis liigub valgustäpp peegli väiksemal kui pöördumisel mööda seina ühele või teisele poole. Valgustäpi edasinihkumisest on kerge välja arvata peegli pöördumisnurka. Sarnasel teel on mõõtmine palju täpipealsem, sest et me peegli ja seina kauguse suurendamisega valgustäpi edasiliikumist kuitahes suureks võime teha. Seesugust galvanoskoopi hüütakse peegel-galvanoskoobiks.

§ 46. **Voolu tugevuse mõõtmine magnetnõela abil.** 1) Tegelikult mõõdetakse voolu tugevust harilikult magnetnõela pöördumisnurgaga, sest et see mõõtmisviis hõlpsam ja käepärasem on kui mõõtmine voltameetriga.

Katsed näitavad, et ühe ja sama galvanoskoobi nõel ühesuuruse voolu mõjul alati ühe ja sama nurga võrra pöördub. Kui galvanoskoobi nurgaskaalale ära märkida igale pöördumisnurgale vastava voolu tugevuse näiteks amperides, siis võime nõela pöördumise järele skaalalt otsekohe ära lugeda selle voolu tugevuse, mis läbi galvanoskoobi mähise voolab. Kirjeldatud skaalaga varustatud galvanoskoopi hüütaks galvanomeetriks või ampermeetriks.

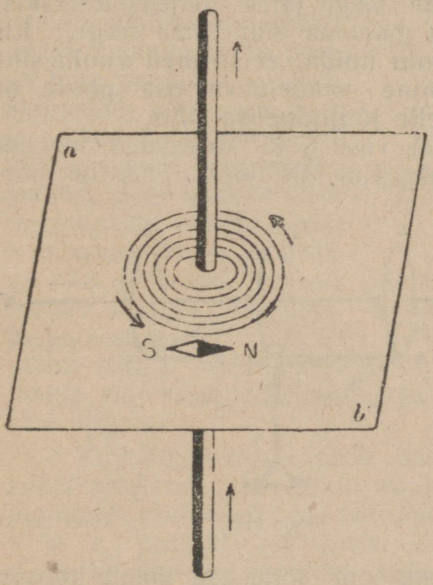
Voolu tugevuse äramärkimist galvanomeertri nurgaskaalale ehk galvanomeetri gradueerimist toimetatakse harilikult võrdlemisel voltameetriga. Selleks lülitakse konstant voolu ahelasse järjestikku voltameeter ja galvanomeetri mähis. Voolu suurus leitakse voltameetri andmetest ning märgitakse tema galvanomeetri nõela vastava seisu kohale. Muutes järk-järgult voolu tugevust saame sel teel tarviliku skaala.

Joonistus 110 kujutab üht galvonomeetrit [nagu teda koolides tihti õpeabinõuna tarvitatakse: Laperguse vertikaalse pabersilindri ab peale on mähitud isoleeritud vasktraat (mn). Silindri õõnsuses asub lühike horisontaalne magnetnõel, mis põigiti läbi silindri mineval horisontaalvõllil pöörduda võib, nii et nõela otsad üles ja alla võivad kalduda. Magnetnõela keskkohta on kinnitatud pikk näitajanõel N, mis ühes magneti kaldumisega paremale või pahemale poole pöördub. Kui läbi mähise voolu juhtida, siis kaldub „parema käe reegli" järele magnetnõela üks ots üles, teine alla. Seega pöördub ka näitaja N omast vertikaalseisust ning tema ülemine ots asendub voolu ajaks skaala mingi jaotuskriipsule. On skaala valmistatud võrdlemisel voltameetriga, siis näitavad jaotuskriipsud läbi mähise voolava elektri voolutugevust otsekohe näiteks amperides.




Joon. 110.

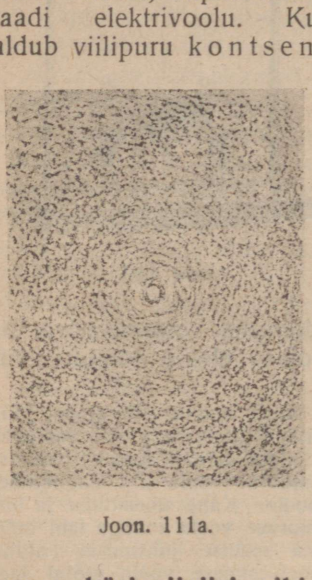
Differentsiaal-galvanomeetril on ühise silindri ab (joon. 110) peal kaks mähist, millest üks on mähitud ühtepidi, teine aga otse vastupidi. Juhime voolu ainult läbi esimese mähise, siis kaldub näitaja näiteks paremale poole; juhime tema aga läbi teise mähise, siis muutub voolu siht magnetnõela suhtes ja näitaja kaldub selle tõttu pahemale poole. Kahe ühesihilise ja ühesuuruse voolu korraga läbi mõlema mähise juhtimisel kalduks nõel esimese voolu mõjul sama võrra paremale kuivõrra ta teise voolu mõjul pahemale poole kalduks. Järjelikult jääb nõel mõlema voolu üheaegsel mõjul liikumatalt skaala 0-kriipsule paigale. On üks vool teisest vähe suurem, siis pöördub ka näitaja vähe kõrvale. Muutes voolude tugevust kunni näitaja skaala 0-punktile asendub, võime sel kombel mõlemad voolud täpipealt ühesuurusteks teha. Selle tõttu on differentsiaal-galvanomeeter väga käepärane riist kahe voolu võrdlemiseks. Tema mähisest tuleva neljast traadiotsast on kaks otsa esimese ja kaks teise mähise algus ja ots.




Joon. 111.

§ 47. **Sirgjoonelise voolu magnetväli.** 1) Magneti poolust võib külge tõmmata või eemale tõugata

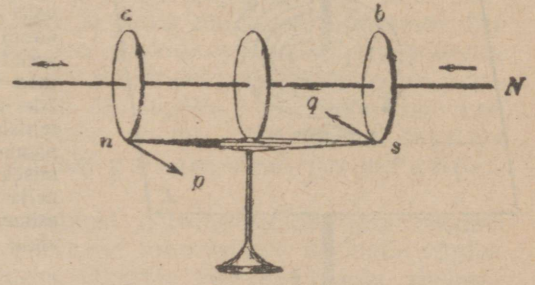
ainult mingi magnetjõud. Et magnetnõel elektrivoolu läheduses pöördub, siis peab ka selle pöördumise põhjuseks olema mingisugune magnetjõud, mis elektrivoolu ümbruses tekib. Selle jõu mõjumispiirkonda hüütakse elektrivoolu magnetväljaks. Nagu iga teist magnetvälja, nii võib ka voolu magnetvälja kujutada magnet-jõujoontega ning magnetvälja spektrumiga. Torkame näiteks läbi horisontaalse paberlehe ab (joon. 111) vertikaalse traadi, raputame lehele raudviilipuru ja juhime läbi traadi elektrivoolu. Kui lehte vähe põrutada, siis korraldub viilipuru kontsentrilisteks ringjoonteks ümber voolu (joon. 111a). Kas langetame lehte või tõstame teda piki voolu kõrgemale, voolu magnetvälja spektrum jääb endiseks. Sellest selgub, et **elektrivoolu magnetväljas on magnet-jõujooned voolu kontsentriliselt ümbritsevad ringjooned, mis asuvad voolule perpendikulaarsetel tasapindadel.**



Joon. 111a.

Magnet-jõujoonte sihti määrab ka siin välja asetatud magneti põhjapooluse liikumissiht (§ 83). Paberlehele paigutatud kompassnõela põhjapoolus N (joon. 111) näitab nii siis jõujoonte sihti. Voolu lähedal seisva magnetnõela poolus pöördub parema käe reegli järele, järjelikult määrab ka jõujoonte sihti sama reegel: **Kui parem käsi niiviisi piki voolu hoida, et sõrmed voolu sihti näitavad ja peopesa jõujoone vaadeldava osa poole on pöördud, siis näitab põial selle jõujooneosa sihti.**

Jõujoontega seletub lihtsal viisil § 45 kirjeldatud magnetnõela pöördumine voolu mõjul: Kui MN (joon. 112) on horisontaalne juht ja ns temale paralleelne magnetnõel, siis mõjuvad nõela pooluste peale voolu magnet-jõujoonte ringid a ja b, mille sihti näitavad noolekesed. Läbi nõela põhjapooluse n mineva jõujoone sihis peaks see poolus siis liikuma hakkama. Et nõel oma konstruktsiooni tõttu aga ainult horisontaalpinnas võib pöörduda, siis hakkab tema poolus n jõu-



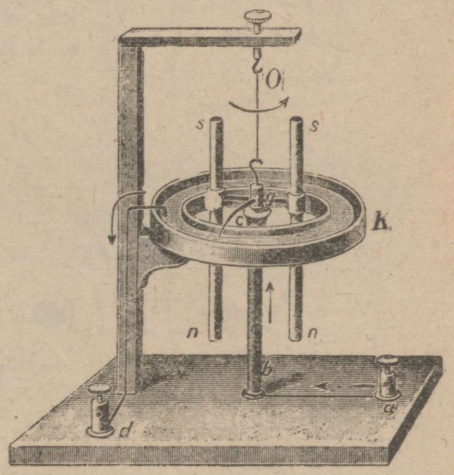

Joon. 112.

joonte tangendi p sihil liikuma, s. t. põhjapoolus pöördub joonistuspinna e t t e nagu see peabki sündima parema käe reegli järele. Lõunapoolus s liigub v a s t u jõujoone sihti, tema peale mõjuv jõud q on seega vastupidine ja paralleelne jõule p.

Joonistusest 112 selgub, et **jõud p, millega sirgjooneline vool mõjub magnetpooluse peale, on alati perpendikulaarne läbi voolu ja pooluse tõmmatud tasapinnale** (praegusel juhusel joonistuspinnale).

2) Et magnetpoolus tõepoolest jõujoone sihis liikuma hakkab, seda tõestab järgmine katse:

Põikvarva g abil on kaks paralleelset magnetit ns ja $n_1 s_1$ üks-teisega ühendatud (joon. 113) ning põikvarva keskkohas siidniidi O otsa üles-riputatud, nii et magnetpaar vabalt võib ümber niidi nagu telje ümber tiirelda. Traadi a kaudu juhitakse elektrivool vaskvarba b mööda üles. Varva b otsas on elavhõbedaga täidetud väike õõnsus, kuhu sisse ulatab niidi O otsas rippuva teraviku g ots. Sellepärast voolab elekter varvast b teravikku g ning viimasest läbi kõvera metallnõela c elavhõbedaga täidetud rõngakujulisse renni k, kust ta renni elavhõbedasse ulatava traadi d kaudu tagasi patarei teise poolusesse pääseb. Magnetite põhjapooluste n ja $n_1$ kohal voolava elektri ümber tekivad magnet-jõujooned, mis kontsentriliste ringjoontena ümber varva b seisavad. Nagu joonistusel 112 näidatud, peavad põhjapoolused n ja $n_1$ neid jõujooni mööda liikuma hakkama. Voolu kestvusel tiirlevad magnetid tõepoolest ümber b kui telje. Tiirlemise siht langeb ühte jõujoonte sihiga; pöörame voolu sihi ümber, siis muutub ka jõujoonte siht vastupidiseks ning ka magnetid hakkavad vastupidises sihis tiirlema.

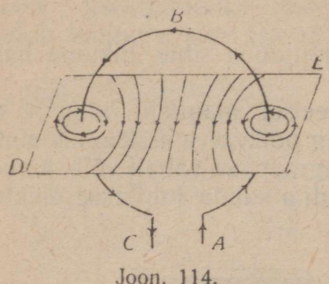



Joon. 113.

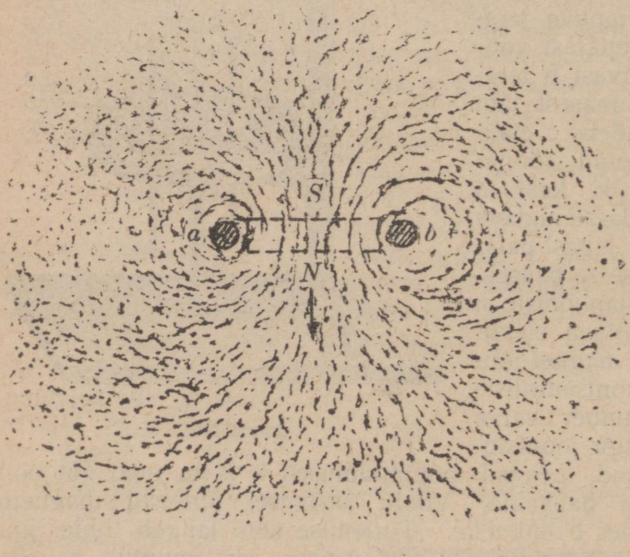
Kirjeldatud katsel peab vool ainult magnetite ühe poole kohal voolama. Juhiksime voolu magneti kogu pikkusel, siis mõjuksid jõujooned ka lõunapooluste peale. Lõunapoolused s ja $s_1$ peaksid sel korral ühes sihis ning põhjapoolused n ja $n_1$ vastupidises sihis tiirlema, millega magnetid teadagi seima jääksid.

Kui ette kujutada, et mõlemad magnetid üksteisele ikka lähemale nihutatakse, siis ei muutu selle juures kogu nähtuses midagi. Lõpuks võime mõlemad magnetid kõrvuti ühs-teise külge asetada, ilma et tiirlemine kaoks. Et kaks kõrvutiseisvat magnetit samuti mõjuvad kui üks suurem magnet, siis peab järjelikult ka üksainus magnet tiirlema, kui läbi tema alumise (või ülemise) poole voolu juhtida; seda tõestavadki selle kohased katsed.

§ 48. **Ringjoonel voolava elektri magnetväli.** 1) Painutame voolujuhi ringiks ABC (joon. 114) ja asetame horisontaalse paberlehe ED nii, et ta läbi ringi tsentrumi läheb. Kui lehe peale viilipuru raputada, siis saame ringvoolu magneetvälja spektrumi (joon. 114a): juhiläbilõiget a ja b ümbritsevad magnetjõujoonte ringid summeeruvad a ja b vahel (s. t. ringjuhi ABC poolt piiratud pinnas) ühisteks jõujoonteks, mille siht „parema käe reegli" järele peab olema SN, s. t. juhipinna tagant ette (võrde joon. 114).



Joon. 114.



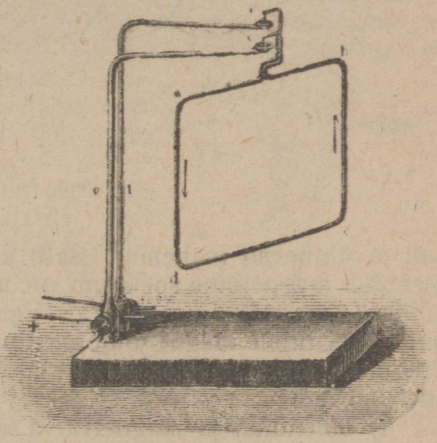
Joon. 114a.

Kui ettekujutada, et juhi ABC pinda moodustab õhuke ringikujuline plaat, mille läbilõiget spektrumi 114a pinnaga kujutaks ab, siis tuleksid kõik jõujooned läbi pinna S plaadi sisse ja läheksid läbi tema pinna N välja. Pind N on järjelikult sarnane mingi magneti põhjapoolusega ja pind S tema lõunapooluse otspinnaga. Asetaksime spektrumile, a ja b vahele jämeda magnetvarva, mille teljel oleks siht NS, ja lühendaksime järjest magnetit, kunni tema pikkus võrduks plaadi paksusega NS, siis saaksime n. n. magnetlehe, mille külgpinnal N asuks tema põhja-, ja külgpinnal S tema lõunapoolus. Läbi seesuguse magnetlehe läheksid jõujooned siis samal kombel kui läbi ringikujulise voolujuhi pinna. Selle-

pärast sünnitab ringvool samasuguse magnetvälja kui tema pinda asetatud magnetleht.

„Parema käe reegli" järeldusena selgub joonistusest 114, et kui ringvoolu pinna ABC peale vaadata vastu magnetjõujoonte sihti, siis paistab meile elekter voolavat vastu kellanäitaja liikumist. Vastu jõujoonte sihti vaadates, näeme ringvoolu pinna seda külge, millel põhjapoolus ilmub. Sellest järgneb reegel: **Põhjapoolus ilmub ringvoolu sellel külgpinnal, mille peale vaadates elekter vastu kellanäitaja liikumissihti voolab.**

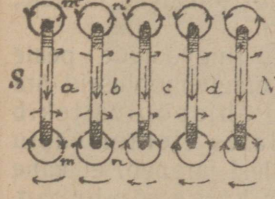
2) Ringvoolu ja magnetlehe sarnadust võib tõestada n. n. Ampère'i aparaadil (joon. 115): voolujuht on nelinurgeline traatraam abcd, mille otsad teravikkudega x ja y elavhõbedaga täidetud raudkausikestele toetuvad. Sammaste v ja t ning teravikkude x ja y kaudu võib elektrit läbi raami abcd juhtida, ilma et raami liikuvus sellega takistuks. On voolul näiteks joonistusel kujutatud siht, siis on raami ees seisva vaatleja poole pöördud raami see külgpind, millel ilmub magnetiline põhjapoolus (sest vaatlejale paistab elekter vastu kellanäitajat liikuvat). Lähendab vaatleja ringvoolule abcd suure magnetvarva põhjapooluse, siis tõukub raam eemale, nagu oleks tema pind tõepoolest mingi magneti põhjapooluse otspind. Sama magneti põhjapooluse lähedamisel teiselt poolt küljest tõmbub raam abcd külge jne.



Joon. 115.

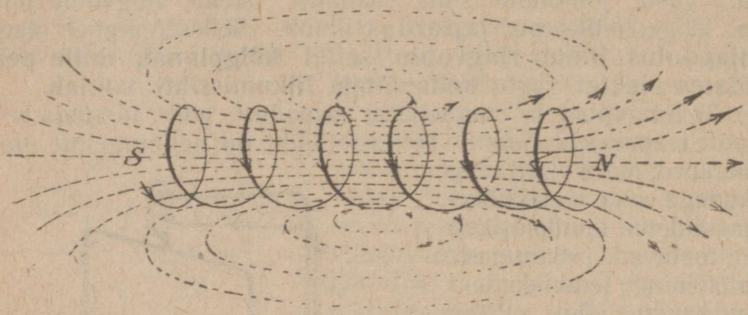
On raam küllalt kerge ja vool tugev, siis asendub raam maamagnetismi mõjul iseenesest nii, et tema magnetiline telg paralleelne on magnetilisele meridiaanile, s. t. nii, et tema „põhjakülg" on pöördud vastu põhja ja „lõunakülg" vastu lõunat.

3) Solenoiidiks hüütakse kruvisarnaseks spiraaliks painutatud voolujuhti (joon. 118). Et juhi keerud ligistikku koos seisavad, siis võib hõlbu pärast oletada, et kogu spiraal koos seisab hulgast paralleelsete pindadega ringvooludest a, b, c jne. (joon. 116), milles vool ühes ja samas sihis voolab. Ümber ringvoolude on jõujooned endiselt voolu juhti ümbritsevad ringid. Seal kus kõrvutiseisvate voolude jõujooned kokku puutuvad (punktid m, n, ja m' ja n') hävineb nende mõju, sest et seal jõujooned üks-teise vastu on sihitud. Seega jäävad mõjule




Joon. 116.

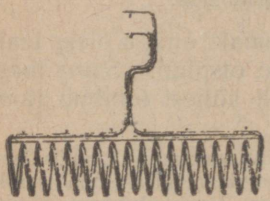
ainult jõujoonte need osad, mis on sihitud piki ringvoolude rida ja mis asuvad sees- ja väljaspool spiraali. Selle tõttu lähevad jõujooned solenoiidi sees piki solenoiidi ja peaaegu paralleelselt teine-teisele (joon. 117). Solenoiidi otsades painduvad jõujooned




Joon. 117.

laiali ja ühinevad (vähemalt osalt) kinnisteks jõujoonte-ringideks. Solenoiidi magnetiline spektrum on nii siis täiesti sarnane temale paralleelse magnetvarva omaga. Vahe seisab ainult selles, et solenoiidi spektrumil magnetjõujooned nähtavad on ka solenoiidi sisepiirkonnas, kuna magnetvarva juures jõujooned magneti otspindadel kaovad.

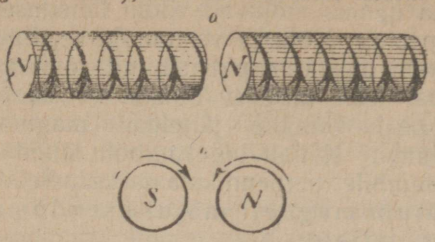
4) Solenoiidi ja magnetvarva sarnaduse tõestamiseks antakse solenoiidile harilikult joonistusel 118 näidatud kuju: Spiraaliks keeratud traadi otsad painutatakse ligistikku kokku ja varustatakse teravikkudega, mille abil kogu solenoiidi Ampère'i aparaadi (joon. 115) külge raami abcd asemele võib riputada. Vabalt rippuv solenoiid asendub siis läbi tema voolava elektri mõjul samuti kui magnetvarbki iseenesest põhja-lõuna sihti. Solenoiidi üks ots tõukub terasmagneti põhjapoolusest eemale, tema teine ots tõmbub sinna külge jne. Lähendame kaks solenoiidi üks-teisele, siis tõmbuvad nende otsad vastamisi külge, või tõukuvad eemale, just samuti kui kahe magnetvarva poolusedki.



Joon. 118.

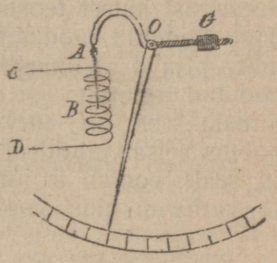
Vaadates solenoiidi kui rea paralleelsete ringvoolude peale (joon. 116), selgub, et ka kogu solenoiidi magnetpooluseid ära määrab ringvoolu jaoks leitud reegel (p. 1): Põhjapoolus tekib solenoiidi selles otsas mille peale vaadates elekter vastu kellanäitaja liikumissihti voolab. Sellest järgneb, et kahe solenoiidi teine-teise vastu pöördud otsad siis külge tõmbuvad, kui vool mõlemas solenoiidis ühes ja samas sihis voolab

(joon. 119), sest et sarnasel korral nimetatud poolused isenimelised on (vaadates N-pooluse peale, voolab elekter näiteks vastu kellanäitaja liikumist, vaadates S-pooluse peale — päri kellanäitaja liikumist, joon. 119b).

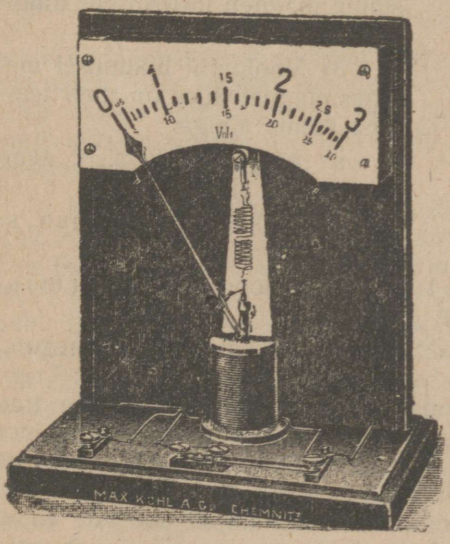



Joon. 119.

5) Lähendame solenoiidi otsale rauatüki, siis koonduvad jõujooned rauda (§ 10); raud ise magnetiseerub nii, et solenoiidi poole pöördud otsas vastupidine poolus tekib, mis solenoiidi külge tõmbub. Rauatükk tahaks asenduda nii, et temast võimalikult palju jõujooni läbi läheks, sellepärast tungib ta sinna, kus solenoiidi jõujooned kõige tihedamad, s. t. solenoiidi sisse (võrdle joon. 117). Solenoiidi lähedal hoitud raudpulk ei tõmbu nii siis mitte ainult solenoiidi otsa külge, vaid kogu ni solenoiidi sisse. Nagu magnetnõela pöördumine, nii oleneb ka raua solenoiidi sisse tõmbumine voolu tugevusest: tõmbejõud kasvab ühes vooluga. Selle peal põhjeneb tehnikas tihti tarvitatavate ampermeetrite ehitusviis. Vool juhitakse läbi solenoiidi B (joon. 120), millesse ulatab pehmest rauast valmistatud traadiots A. Viimane on seotud kangikesega AOG, mis läbi O minevale võllile toetub. Kangi külge on punktis O kinnitatud pikk näitajanõel, mille alumine ots kangi kaldumisel mööda skaalat pöördub. Mida tugevam on vool, seda sügavamale tõmbub traadiots A, seda madalamale kaldub kangiõlg Ao ja seda rohkem pöördub näitajanõel. Nõela otsa seisu järele võib järjelikult otsustada voolu tugevuse üle. Skaala valmistatakse võrdlemisel voltameetriga või mingi teise ampermeetriga. Joonistus 121 kujutab seesuguse elektromagnetilise ampermeetri ehk elektrodünamomeetri välist kuju.



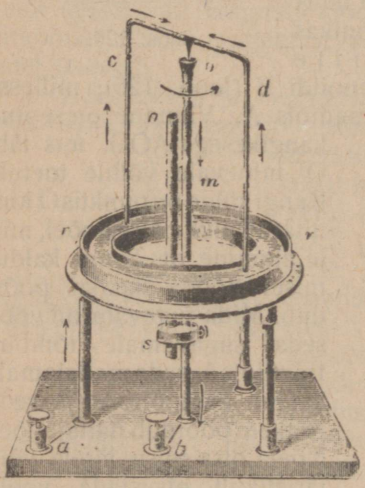

Joon. 120.




Joon. 121.

§ 49. **Magneti mõju elektrivoolu peale.** 1) Joonistusel 112 on kujutatud jõud p ja q, mis mõjuvad voolu läheduses hoitud magnetnõela pooluste peale. Mõju ja vastumõju seaduse järele peavad samasuurused, kuid otse vastupidi sihitud jõud ka voolujuhi enese peale mõjuma. Kui magnet liikuda ei saa ja kui voolujuht liikuv on, siis peab viimane järjelikult magneti mõjul vastupidises sihis pöörduma. Küllalt tugeva voolu läheduses pöördub magnetnõel voolujuhile perpendikulaarseks. Sellepärast peab ka liikuv voolujuht magneti mõjul asenduma perpendikulaarselt magneti teljele.

2) Katsel, mis kujutatud joonistusel 113, tiirlevad magnetid ümber voolu. Kui magnet kinni hoida ja voolujuht liikuvaks teha, siis peab järjelikult voolujuht ümber magneti tiirlema. Seesugust katset teostatakse aparaadil joonistus 122: elavhõbedaga täidetud raudkausikese O peale toetub teravik, mis kannab juhte c ja d. Viimased ulatavad alumiste otsadega elavhõbedaga täidetud renni rr, ja võivad nii siis teravikule toetudes vabalt tiirelda. ns on varva m külge kinnitatud magnet, mille põhjapoolus seisab juhtide c ja d vahel. Juhime läbi traadi a elektri renni rr; sealt voolab ta juhti c ja d mööda üles, pääseb läbi teraviku O varba m ning voolab läbi m ja b tagasi patareisse. Elektri voolamisel hakkavad voolujuhid c ja d tõepoolest ümber magnetpooluse n tiirlema. Tiirlemise sihti on kerge ära määrata, kui silmas pidada, et voolu tiirlemine ümber magneti on vastupidise sihiga magneti tiirlemisele ümber voolu.



Joon. 122.

3) Voolujuhi liikumisel mistahes magnetväljas on meil tegemist kolme sihiga:

a) magnetvälja, s. t. tema jõujoonte sihiga,

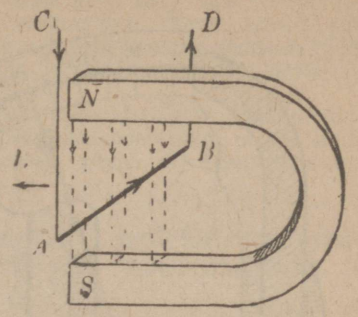
b) elektri voolamise sihiga ja

c) voolujuhi liikumise sihiga.

Nende kolme sihi vahekorda selgitab järgmine katse: riputame sirge voolujuhi AB (joon. 123) peenikeste painduvate traatide C ja D külge ning asetame juhi AB magneti NS pooluste vahele sel kombel, et voolu siht perpendikulaarne oleks pooluste N ja S magnetjõujoontele. Niipea kui elekter läbi juhi AB voolab, hakkab viimane noolega L näidatud sihis küljeti pooluste vahelt välja liikuma. Näib nagu tõukuks vool magnetvälja piirkonnast

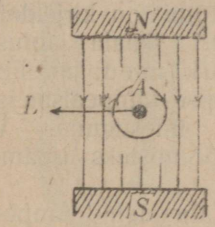
välja. Liikumissihi määramiseks tarvitatakse n. n. „pahema käe reeglit“: **Kui pahem käsi sarnaselt piki juhti (AB) hoida, et sõrmed voolu sihti näitavad ja peopesa perpendikulaarselt vastu magnetjõujoonte sihti seisab, siis näitab harguli hoitud põial juhi liikumissihti** (L).

See üleüldine reegel määrab voolujuhi liikumissihti igasuguses magnetväljas, olgu viimane tekitatud kas terasmagneti või elektrivoolu abil.




Joon. 123.

Jõujoontega seletub viimatikirjeldatud tähtis katse järgmiselt: Magnetpooluste N ja S vahel (joon. 124) on magnetväli homogeen, s. t. tema jõujooned on paralleelsed ja ühetihedused (§ 8$_6$ ); läheb elektrivool juhi A kaudu perpendikulaarselt läbi selle välja (praegusel juhusel perpendikulaarselt joonistuse t a h a), siis ümbritsevad voolu magnetjõujoonte ringid, mis summeeruvad homogeense magnetvälja jõujoontega. Paremal pool juhist A on voolu ja magneti jõujooned ü h e s i h i l i s e d, pahemal pool aga vastupidised. Esimesed toetavad sellepärast teine-teist, teised aga nõrgendavad üks-teist. Järjelikult kõveneb magnetväli paremal pool ja nõrgeneb pahemal pool juhti, s. t. esimeses kohas tihenevad jõujooned, teises hõrenevad nemad. Et jõujooned aga küljeti eemale tõukuvad (§ 9), siis on tihedamas kohas (paremal pool juhti) jõujoonte küljeti-rõhumine suurem kui hõredamas kohas (pahemal pool). Selle mitteühtlase rõhumise tõttu tekibki jõud L, millega vool magneti pooluste vahelt põigiti välja tõukub.

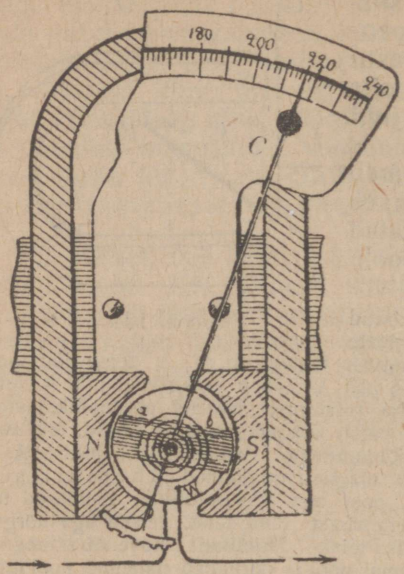



Joon. 124.

4) On voolujuht ringikujuline, siis asendub ta magnetväljas samuti kui vastav magnetleht (§ 48$_2$), s. t. ringvool pöördub magnetväljas nii, et tema enese magnetjõujooned paralleelselt ja ühtepidi oleksid sihitud magneti jõujoontega.

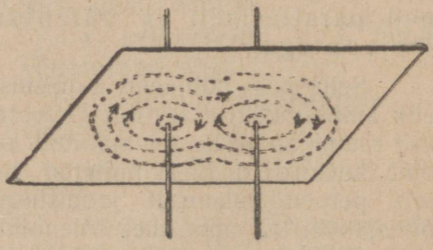
Selle peal põhjeneb joonistusel 125 kujutatud galvanomeetri ehk ampermeetri (Deprez-D'Arsonvali-) ehitusviis: Nelinurgelise raami ab peale on mähitud isoleeritud traat. Sel teel saadud solenoiid on kinnitatud horisontaalvõlli külge, mis seisab perpendikulaarselt joonistuspinnale. Võllile on kinnitatud näitajanõel C, mis ühes solenoiidiga pöördub ja mille ülemine ots selle juures skaalat mööda edasi-tagasi liigub. Kogu solenoiidimähis seisab tugeva terasmagneti pooluste N ja S vahel,—nii siis homogeenses magnetväljas. Ilma vooluta hoidub mähis peenikese spiraalvedru w abil niisuguses seisus, et näitaja ots skaala 0-punktil seisab. Juhime läbi mähise voolu (see sünnib läbi samade vedrude w, millest üks asub raami peal ja teine all ning mis ühenduses on mähise otsadega), siis tekib ka solenoiidis mag-

netväli. Selle väljä jõujooned on paralleelsed näitajanõelale, s. t. umbes perpendikulaarsed magneti NS jõujoontele. Solenoiid tahaks nüüd pöörduda nii, et tema jõujooned magneti jõujoontele paralleelseteks saaksid. Vedru w takistab teataval määdul seda pöördumist ning näitajanõel kaldub ainult seda rohkem ühele või teisele poole omast 0-seisust, mida tugevam on elektrivool. Seesuguses galvanomeetris on läbi mähise juhitud voolu tugevus proportsionaalne nõela kaldumisnurgaga. Kaldub nõel näiteks 5 amp. mõjul nurga võrra, mille kaare pikkus skaalal on 5 cm, siis pöördub nõelaots 1 amp mõjul ainult 1 cm võrra skaala 0-punktist kõrvale. Selle omaduse tõttu on kirjeldatud ampermeetri skaala jaotused kõik ühepikkused; järjelikult on mõõtmise täpipealsus igas piirkonnas ühesugune. Viimane asjaolu teeb kirjeldatud aparaadi mõõtmisteks iseäranis kohaseks.




Joon. 125.

§ 50. **Voolude vastastikune mõju.** Lähendame Ampère'i aparaadi (joon. 115) nelinurgelise raami küljele bc teise sirgjoonilise ja paralleelse voolujuhi, milles elekter samuti kui juhis bc alt üles voolab: Selgub, et mõlemad voolud külge tõmbuvad. Pöörame ühes juhis voolu sihi ümber, siis tõukuvad juhid eemale. Hoiame sirgjoonelise juhi raami abcd all, perpendikulaarselt küljele cd, siis pöördub cd paralleelseks tema all hoitavale juhile ja nimelt nii, et voolud mõlemas juhis ühtepidi on sihitud. Seesugustest katsetest järgnevad seadused:



Joon. 126.

1) **Paralleelsed voolujuhid tõmbuvad küljeti külge, kui voolude sihid on ühepidised; nad tõukuvad eemale, kui voolude sihid on vastupidised.**

2) **Ristimisi seisvad voolujuhid pöörduvad paralleelseteks, nii et voolude sihid nendes ühesugused oleksid.**

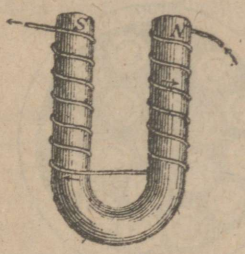
Ka voolude vastastikune mõju seletub magnetjõujoonte omadusega: On vool paralleelsetes juhtides ühtepidi sihitud, siis ühinevad nende magnetjõujooned ühisteks ringideks (võrdle joon. 126), sest et juhtide vahel on mõlema voolu jõujoonte sihid vastupidised. Need ühised jõujoonteringid ümbritsevad mõlemat juhti ning tahaksid koomale tõmbuda (§ 9). Kokkutõmbudes suruvad jõujoonteringid siis ka mõlemaid juhte üksteisele lähemale.

On voolud vastupidi sihitud, siis on jõujoonteringide sihid juhtide vahel ühesugused. Selle tõttu tihenevad seal jõujooned ning nende suurenenud küljeti-rõhumine kandub juhtide eneste peale. Viimased tõukuvad sellepärast eemale.

§ 51. **Elektromagnet; Ampère'i molekulaarvoolude teooria.** 1) Kui raudpulga ümber mähkida isoleeritud traat ja läbi viimase juhtida elektrivoolu, siis muutub raud nii kauaks kui vool kestab magnetiks. Seesugust ajutist magnetit hüütakse elektromagnetiks (joon. 127).

Joon. 127.

Elektromagneti poolused olenevad läbi traadi voolava elektri sihist. Pooluste määramiseks tuleb meeles pidada n. n. kellanäitaja reeglit: **Põhjapoolus tekib raua selles otsas, mille peale vaadates elekter vastu kellanäitaja sihti voolab** (võrdle joon. 119b). Tahame, et näiteks hobuserauakujulise magneti (joon. 128) otsade poolused oleksid isenimelised, siis peame traadi niiviisi mähkima, et otsade N ja S peale vaadates voolu siht oleks ühes otsas päri- ja teises vastu kellanäitaja liikumist.



Joon. 128.

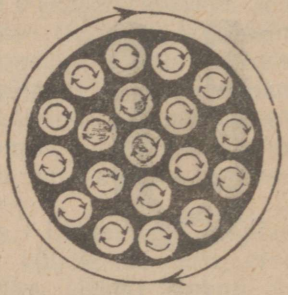
Mähise valmistamisel tuleb silmas pidada, et traat nii kõveral kui sirgel elektromagnetil üle kogu raua ühes ja samas sihis tuleb mähkida. Hõlbu pärast võib ette kujutada, et kõver raud mähkimise ajaks on sirgeks tõmmatud ja alles peale mähkimist kõveraks painutatakse.

2) Elektromagnet on seda tugevam, mida rohkem temal traadikeerde ja mida tugevam on elektrivool; me ütleme et magneti tugevus oleneb tema amper-keerdudest, missuguse nimetuse all mõistetakse keerdude arvu ja voolu amperide kasvatist.

Nõrgal magnetiseerumisel tõuseb pooluste tugevus peaaegu proportsionaalselt amper-keerdudega; kuid kõvemal magnetiseerumisel tõuseb ta ainult vähe ning läheneb teatavale piirsuurusele, mille juures amper-keerdude edaspidine suurendamine pooluste tugevuse peale enam mingit mõju ei avalda. Sel puhul on elektromagnet küllastatud. Küllastatud elektromagneti pooluste tugevus oleneb raua sordist: ta on pehmes rauas tuntavalt suurem kui terases. Tugevate elektromagnetite saamiseks peab raud sellepärast võimalikult pehme olema.

2) Magnetite ja voolude vastastikkusel mõjul põhjeneb Ampère'i loodud molekulaarmagnetite hüpotees. Selle vaate järele ei ole magnetism muud kui elektrivoolu üks eriavaldus. Oletatakse, et iga üksikut rauamoleekulit elektri ringvool ümbritseb, sarnaselt kui kogu elektrimagnetitki. See molekulaarvool sünnitab magnetvälja, mille mõjul harilik moleekul väikseks magnetiks—n. n. molekulaarmagnetiks muutub. Molekulaarmagneti telg on perpendikulaarne tema ringvoolu pinnale. Pöördub ringvoolu pind, siis pöördub ühtlasi ka molekulaarmagneti telg. Harilikult seisavad molekulaarvoolude pinnad juhuslisest igas sihis. nii et nende magnetiline kogumõju hävineb. Juhime aga ümber raua tugeva elektrivoolu, siis pöörduvad molekulaarvoolude pinnad kõik paralleelseks välise ringvoolu pinnale (§ 50). Ühes sellega asenduvad kõigi moleekulite põhjapoolused ühele ja lõunapoolused teisele poole, mille tõttu raud magnetiseerub (§ 6).

Terasmagneti lõunapooluse peale vaadates peab molekulaarvoolude siht igal pool kellanäitaja liikumise järele olema. Ühel lõikepinnal kõrvutiseisvate moleekulite ringvoolud (joon. 129) on nende kokkupuutumiskohas vastupidi sihitud; sellepärast hävineb nende mõju nimetatud kohtades. Jääb järele ainult magnetvarva pinnal asuvate molekulaarvoolude need osad, mis väljaspoole on pöördud; ainult need välised vooluosad nagu võtavad osa terase magnetismi tekitamisest. Sellepärast võib ühel lõikepinnal seisvate molekulaarvoolude asemel ette kujutada üht üleüldist voolu, mis ümber magnetvarva välise pinna voolab (vaata joonistus 129). Piki kogu magnetvarba peame nii siis ette kujutama rea paralleelseid, magnetit ümbritsevaid ringvoole, mis terase magnetismi põhjuseks on. Samasugust ringvoolude süstemi aga kujutab ka solenoiid. Sel kombel seletub magnetvarva ja solenoiidi sarnadus.



Joon. 129.

Me näeme, et Ampère'i teooria järele ei ole magnetpooluste külgetõmbumine ja eemale tõukumine muud, kui pooluseid ümbritsevate solenoiidisarnaste ringvoolude külgetõmbumine ja eemaletõukumine.

Uuemate vaadete järele on elektrivool elektroonide edasi liikumine. Ampère'i teooria põhjal peab siis ümber iga moleekuli kas üks või mitu elektrooni tiirlema.

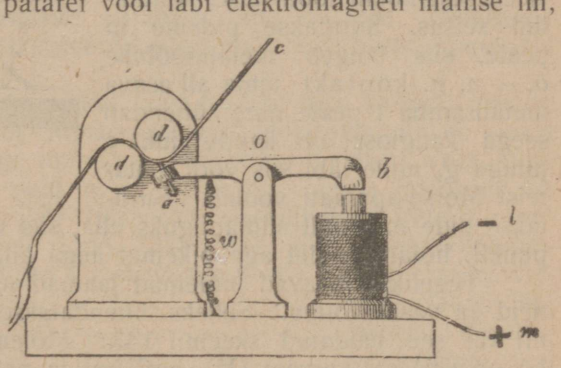
3) Kuna elektromagnetina tarvitatud raud peale voolu hävimist otsekohe oma magnetilised omadused kaotab, jääb teras ka peale voolu kadumist magnetiks. Sellepärast võib tugevaid terasmagnete valmistada, kui vastava terasvarva ümber mõni aeg elektrit lasta voolata.

Raua molekulite pöördumine sünnib kergesti, ilma suurema hõõrumiseta. Terase molekulites aga on hõõrumine nii suur, et nad kord juba teatud sihti pööratuina ka edaspidi samas sihis hoiduvad (võrdle § 6). Sellepärast on raua magnetism ajutine, terase oma aga jäädav. Ühe ja sama voolu mõjul pöördub kergesti liikuvatest rauamoleekulitest muidugi teada palju suurem arv kui suure hõõrumisega terasemoleekulitest. Sellepärast saabki pehme raud tugevamaks magnetiks kui teras.

Kuid ka õige pehmes rauas on ikkagi veel hõõrumist. Sellepärast jääb ka raud peale voolu katkestamist üsna nõrgalt magnetiseerituks (järel-magnetism). Vähendame elektromagneti voolu nullini ja pöörame voolu sihi ümber, siis peab vastupidi sihitud vool magnetiseerima mitte enam neutraalset rauatükki, vaid nõrgalt vastupidi magnetiseeritud rauda. Selle nõrga vastupidise järelmagnetismi hävitamiseks kulub osa voolu; sellepärast jääb elektromagneti poolus nüüd vähe nõrgemaks kui ta esimese voolu mõjul oli. Oli esimese voolu mõjul ühe amperi juures pooluse tugevus näiteks a üksust, siis on ta vastupidi sihitud sama tugeval voolul ainult a' üksust, kusjuures a alati suurem on kui a'. Seda nähtust nimetatakse magnetiliseks hüstereesis'eks.

Kui raudvarba elektrivooluga vaheldamisi ühes ja teises sihis palju kordi magnetiseerida, siis soeneb raud tuntavalt. Soojus võib siin tekkida ainult moleekulite pöördumist takistava hõõrumise ületamiseks kulutatud energiast ehk nagu öeldakse: hüstereesise ületamiseks kulutatud tööst.

§ 52. **Telegraf; elektrikell.** 1) Morse telegrafiaparaadis (joon. 130) juhitakse patarei vool läbi elektromagneti mähise lm, mille tõttu elektromagneti pooluse lähedal seisva raudkangi ab ots (b) pooluse külge tõmbub. Selle juures tõuseb kangi teine ots a vastu paberlinti cc, mis sellekohase kellavärgi abil rullide dd vahel aeglaselt edasi liigub. Kangiotsa (a) kinnitatud teravik surub paberlindi vastu rulli d ja kriimustab paberile juti. Niipea kui vool katkestada, kaob elektromagneti külgetõmbejõud, vedru w tõmbab kangiotsa a uuesti alla ning teravik ei puutu enam paberi külge. Sel kombel võib vooluahela lühikese- või pikemaajalise ühendamisega paberlindile märkida kas punkte või pikemaid jutte. Nende punktide ja juttide kombinatsioonid moodustavad tähestiku (Morse-tähestik), nii et nende abil võib sõnu ja lauseid paberlindile kirjutada. Näiteks tähendavad märgid

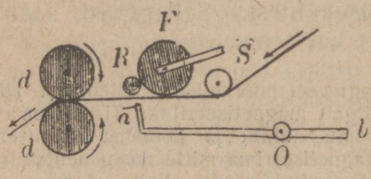


Joon. 130.

— — — — — . — . . . .

M o r s e

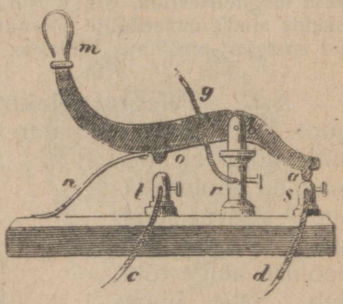
Teadagi, ei olene aparaadi tegevus sellest, kas asub patarei otse tema kõrval või kusagil kaugemal. Telegrafeerimisel seisab patarei ühes jaamas (saatejaam), Morse-aparaat aga teises (vastuvõttejaam). Välisjuhtide (telegrafi traatide) kaudu juhitakse patarei vool teises jaamas seisvasse aparaati. Saatejaamas ühendatakse ja katkestatakse vooluahel nii, et vastuvõttejaama Morse-aparaat soovitud tähed paberile märgiks ja sellega antud telegrammi üles kirjutaks.



Joon. 131.

Uuematel aparaatidel ei kriimusta teravik paberit, vaid lindile märgitakse kriipsud ja punktid tindiga. Seesuguse aparaadi kirjutavat osa kujutab joon. 131: Lint läheb rullide d ja S kaudu väikse teravservalise ketta R alt mööda, ilma viimast puudutamata. R tiirleb vastu rulli F, mille pinda katab tindiga imbunud pehme riie; sellega on ketta R serv alati värske tindiga kaetud. Tõmbub kangi ab väline ots elektromagneti külge, siis surub tema teine ots a lindi vastu ketta R serva ning viimane jätab lindile pikema või lühema tindijuti.

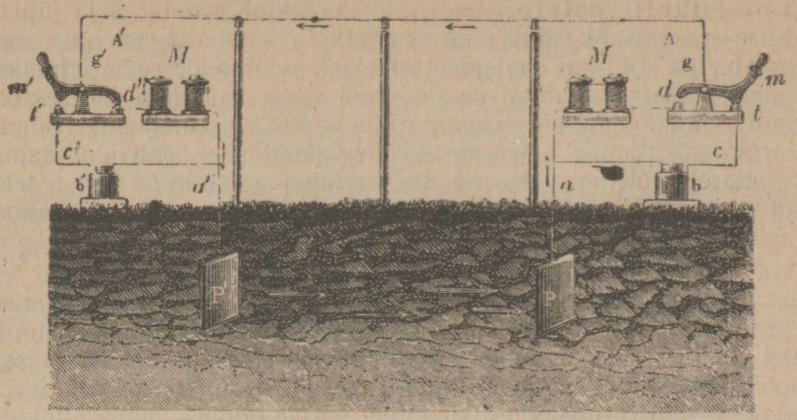
Märkide saatmiseks, s. t. voolu ühendamiseks ja katkestamiseks tarvitatakse saatejaamas n. n. võtit (joon. 132). Viimast moodustab metallkang m v, mis ümber võlli b pöördub ja mida vedru n iseenesest hoiab joonistusel kujutatud seisus. Surutakse pideme m peale, siis langeb metallnööbike o, — n. n. kontakt tema all asuva metallsamba t peale ning ühendab seega kangiosa ob kaudu juhi c juhiga g, mille läbi siis vool patareist Morse-aparaati voolab. Surutakse pide m ainult silmapilguks alla, siis märgib aparaat lindile punkti, hoiame pidet aga pikemat aega all, siis tekib lindil jutt.



Joon. 132.

Tegelikult peavad mõlemad jaamad nii märke saatma kui neid ka vastu võtma. Selleks ühendatakse aparaadid harilikult nii kui see näidatud skeemil 133: Mõlemas jaamas (A ja A') on oma Morse-aparaat (M), võti (m) ja patarei (b). Vajutatakse jaamas A võtme pidemele, siis pääseb vool läbi võtme kontakti t. Patareist b läheb vool läbi juhi c ja kontakti t välisjuhti g, mis ühendab mõlemaid jaamu. Jaamas A' voolab elekter läbi võtme ja kontakti d' Morse-aparaati M' (patareisse b' ta ei pääse, sest et kontakt t' lahtine on) ja viimasest juhi a' kaudu masse. Läbi maapinna tuleb vool tagasi plaadini P ja sealt juhti a mööda üles patareisse b (läbi Morse-aparaadi M elektrit ei voola, sest et võtmekontakt d avatud on). Seega on vooluahel kinnine ja patarei b elekter voolab läbi Morse-aparaadi M', märkides viimase lindile jaamast A saadetud märgid. Tahab jaam A' vastata, siis vajutatakse võtme m' pidemele, kuna võti m omas harilikus

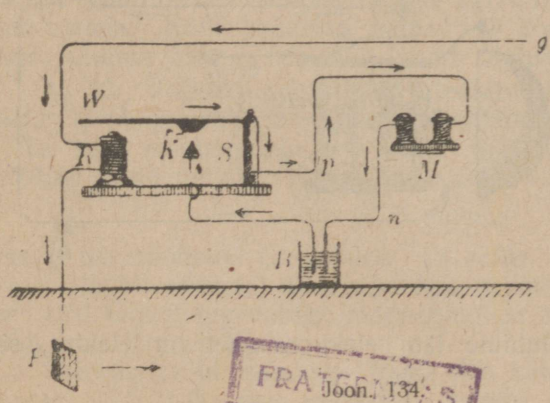
seisus hoidub (s. t. kontakt t avatud ja d ühendatud): patareist b' voolab elekter siis läbi c' — t' — g' välisjuhti, sealt läbi g — d—



Joon. 133.

M — a — P masse ning maast läbi P' — a' tagasi patareisse b'. Seega töötab nüüd jaama A Morse-aparaat ja märgib jaamast A antud telegrammi paberlindile. Kui ühestki jaamast ei telegrafeerita, siis hoiduvad mõlemad võtmed omas puhkeseisus (joon. 132): sel puhul ei ole ühegi batarei ahel kinnine, sest et avatud kontaktid t ja t' isoleerivad patareide ühe pooluse. Niisugusel juhusel ei ole siis ka elektrivoolu ning mõlemad Morse-aparaadid seisavad.

Asuvad mõlemad jaamad teine-teisest väga kaugel, siis on vool niivõrd nõrk, et Morse-aparaadi elektromagnet ei suuda kangi otsa enese külge tõmmata. Sel puhul ei juhita vool mitte otse Morse-aparaati, vaid n. n. relee'sse, mille ülesanne on ühendada Morse-aparaadi iseseisvat vooluahelat. Releed moodustab elektromagnet R (joon. 134) mille külge peenike terasvedru W tõmbub. Niipea kui saatejaamas võti alla surutakse, voolab elekter läbi välisjuhi g vastuvõtte jaama; seal läheb vool läbi relee elektromagneti R maasse, mille kaudu ta tagasi saatejaama voolab. Et vedru W väga kerge ja nõrk on, siis jatkub juba üsna nõrgast voolust selleks, et



Joon. 134.

FRA[illegible] S
LIVIENSIS
EX LIBRIS

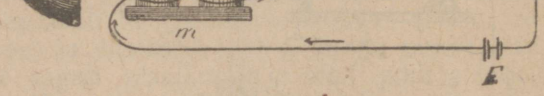
tema otsa R külge tõmmata. Alla paendudes puutub vedru kontakti K külge, mille järele vastuvõttejaama enese patareist B (n. n. kohalik patarei) vool läbi kontakti K, samba S ja juhi p Morse-aparaati M satub ning seal juhi n kaudu tagasi patareisse voolab. Iga kord kui saatejaamast nõrk vool releesse R juhitakse voolab tugev kohaliku patarei vool sama kaua läbi Morse-aparaadi; viimane märgib seega harilikul kombel saatejaamast antud märgid paberlindile. Seesugusel telegrafeerimisel peab igal jaamal 2 patareid olema: üks on naaberjaama relee jaoks (s. t. telegrammi saatmiseks), teine oma Morse-aparaadi jaoks (telegrammi vastu võtmiseks).

Peale Morse-aparaadi on tarvitusel veel mitmesugused teised telegrafiaparaadid. Nii tarvitatakse näiteks telegrafeerimisel väga pikkade merealuste juhtide kaudu aparaati, milles ülitundliku galvanomeetri nõela kõikumine 0-seisust ühele ja teisele poole paberlindile üles kirjutatakse. Nõela kaldumine ühele poole vastab Morse-tähestiku jutile, teisele poole — tema punktile. Vool juhitakse ühest jaamast teise sellekohase veealuse juhi — n. n. kaabel'i kaudu, milles vasktraat mekaaniliste vigastuste vastu kaitstud on tugevate isolaator- ja teraskatetega.

On olemas telegrafiaparaate, mis saadetud telegrammi otsekohe trükitähtedega üles kirjutavad. Nende keerulise ehitusviisiga aparaatide hulka kuulub muu seas palju tarvitatav Hughes'i *) aparaat.

Esimese telegrafiaparaadi, mis märke üleskirjutab, ehitas ameeriklane Morse (1835). Steinheil leidis (1838), et telegrafeerimisel teise juhi asemel maapinda võib tarvitada. 1866 aastal õnnestas Iirimaalt Põhjaameerikasse läbi Atlandi okeaani telegrafeerida.

2) Elektrikella peaosa on n. n. Wagneri haamer, mis mitte ainult kellas, vaid ka paljudes teistes aparaatides tarvitusel on. Teda moodustab raudplaat a (joon. 135), mis vedru e külge kinnitatult elektromagneti mm pooluste ees hõljub ning mille otsa kinnitatud väike haamrike K vastu kella G võib lüüa. Plaadi külge kinnitatud metallvedruke w toetub vastu plaatinteravikku r. Juhime läbi elektromagneti m elektrit, siis



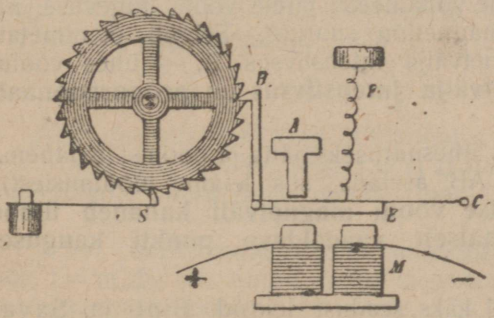

Joon. 135.

*) Loe Juus.

tõmbub raudplaat magneti külge ning w kaugeneb teravikult r. Viimast asjaolu kasutataksegi selleks, et haamrit õõtsuma panna: vool juhitakse patareist E läbi elektromagneti ja e vedrusse w, puutub viimane teraviku r külge, siis voolab elekter läbi alla vajutatud kellanupu d tagasi patareisse. Samal silmapilgul tõmbab elektromagnet plaadi a enese külge ning katkestab seega ühenduse w ja r vahel; vool katkeb, elektromagnet laseb plaadi a vabaks, mis vedru e mõjul tagasi põrkub. Seega ühinevad w ja r uuesti, vool läheb jällegi läbi elektromagneti, plaat tõmbub külge ja katkestab voolu jne. Nii õõtsub haamer ja kõliseb kell kogu aeg kus nupu d peale vajutatakse.

3) Elektri-ajamõõtjaid tarvitatakse selleks, et ühe hariliku kella järele käima panna mitu abikella, mis kõik täpipealt sama aega näitavad kui peakellgi.

Peakell on nii ehitatud, et tema igas minutis (näiteks igal pendlikäigul) mingi vooluahela ühendab ja otsekohe jällegi katkestab. Nimetatud ahelasse on ühendatud kõigi abikellade elektromagnetid M (joon. 136). Niipea kui peakell ahela ühendab, voolab patarei vool läbi M; raudplaat E tõmbub külge ning haak H pöörab abikella hammasratast ühe hamba võrra. Katkeb vool, siis tõmbub E tagasi endisse seisu, hammasratast aga ei lase haak S mitte tagasi pöörduda. Voolu järgmisel ühendamisel (ühe minuti järele) pöördub hammasratas samal viisil jällegi ühe hamba võrra jne. Hammasratta võllil asuv näitaja pöördub siis täpipealt sama kiirusega kui peakella minuti-näitaja. Kõik abikellad käivad sel kombel ilma vedruta ja ilma pendlita ning nende käik vastab täpipealt peakella käigule.



Joon. 136.

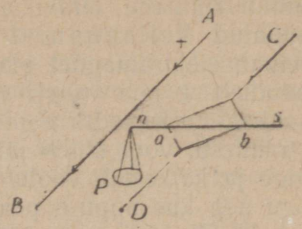
§ 53. **Voolu magnetvälja intensiivsus; Biot-Savart'i seadus.** 1) Magnetvälja intensiivsuseks ehk tugevuseks $\mathfrak{H}$ nimetasime (§ 8₅) seda magnetjõudu, mis antud väljapunkti asetatud üksuspooluse peale mõjub. Formuli (2) järele on see jõud

$$f = m.\mathfrak{H} \text{ düüni},$$

kus $\mathfrak{H}$ on mõõdetud Gauss'ides. Et leida elektrivoolu magnetvälja intensiivsust mingis punktis, peame mõõtma seda jõudu, mis seal tuntud tugevusega magnetpooluse m peale mõjub. Seda võib teha järgmiselt:

Kinnitame horisontaalse traadi AB kõrvale paralleelse peenikese niidi CD, mis keskkohas kaheks haruneb (joon. 137).

Niidi harude külge kinnitame väikse kerge magnetvarva ns, nii et kogu varb horisontaalpinnas ja nimelt perpendikulaarselt AB-le hoidub. Kui läbi AB elektrivoolu juhtida (noolekestega näidatud sihis), siis kaldub „parema käe reegli" järele põhjapoolus n üles. Et mõõta nõela pöördumist sünnitava jõu suurust, on ainult tarvis pooluse otsa väike vaekausike riputada ja viimasele asetatud kaalupommidega tasakaalustada üles sihitud magnetilist pöördejõudu. On vaekausil parajasti niisuur lisakoorem, et magnetvarb voolu ajal horisontaalpinnal hoidub, siis võrdub pooluse n peale mõjuv magnetjõud (f) lisakoorma raskusjõuga.

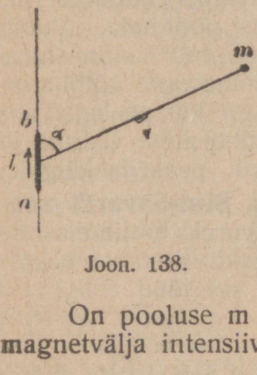


Joon. 137.

Kui voolu AB ahelasse voltameeter lülitada ja vool mõõtmise aegu võimalikult ühesuurune hoida, siis leiame voltameetri järele voolu tugevuse ning kaalumisega vastava magnetjõu suuruse. Selgub, et nimetatud jõud, nii siis ka magnetvälja intensiivsus $\mathfrak{H}$, — ühes vooluga kasvab: **Voolu magnetvälja intensiivsus on proportsionaalne voolu tugevusega.**

Kui voolu tugevus ühesuuruseks jätta ja poolust n lähemale ja kaugemale voolust AB asetada, siis leiame mõõtmistest, et **väga pika sirgjoonelise voolu magnetväli kahaneb ümberpöördult proportsionaalselt vaadeldava punkti kaugusega voolust.**

2) Ülevalnimetatud kaks seadust leidsid Biot ja Savart; nendest tuletas Laplace järgmise üleüldise seaduse, mida harilikult Biot-Savart'i seaduseks hüütakse:



Joon. 138.

Kui vaadelda lõpmata lühikest sirgjoonelist vooluosa ab=$l$ (joon. 138), siis sünnitab see n. n. vooluelement magnetvälja, milles pooluse m peale mõjub jõud

$$f = k\frac{mJl}{r^2}\sin\alpha \quad \text{düüni} \qquad 16)$$

kusjuures jõu siht on perpendikulaarne läbi pooluse m ja voolu l tõmmatud tasapinnale.

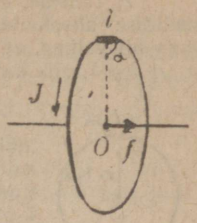
On pooluse m tugevus üks, siis annab formul (16) otsekohe magnetvälja intensiivsuse punktis m:

$$\mathfrak{H} = k\frac{Jl}{r^2}\sin\alpha \qquad 16\text{-a})$$

See formul ütleb, et välja intensiivsus on proportsionaalne voolu tugevusega (J), vooluelemendi pikkusega ($l$) ja $\sin\alpha$-ga (v. joon. 138); ta on ümberpöördult proportsioonaalne vooluele-

mendi kauguse kvadraadiga ($l^2$). Täht k on proportsionaalsuse koeffitsient, mille suurus oleneb valitud vooluüksusest.

3) Formuli (16-a) abil võib välja arvata magnetvälja intensiivsust ringvoolu tsentrumis 0 (joon. 139): Vooluelement $l$ üksinda sünnitab punktis 0 formuli (16-a) järele



Joon. 139.

$$\mathfrak{H}' = k \frac{J l}{r^2}$$

sest et raadius r on perpendikulaarne voolule $l$, nii et $\sin \alpha = \sin 90^0 = 1$. Kõik teised, ringjoonel asuvad vooluelemendid sünnitavad väljad, mis samasuured on kui $\mathfrak{H}'$, jäävad ju kõigi nende jaoks r, J ja $\sin \alpha$ ühesugusteks. Seega on väli, mis tekib kogu ringvoolu mõjul

$$\mathfrak{H} = \Sigma \mathfrak{H}' = k \frac{J}{r^2} \Sigma l$$

Et aga $\Sigma l$ kui kõigi vooluelementide summa on ringi pikkus $2 \pi r$, siis on ringi tsentrumis väli

$$\mathfrak{H} = \frac{2 k \pi . J}{r} \qquad 17)$$

Asub punktis 0 näiteks põhjapoolus m, siis mõjub viimase peale voolu magnetväli jõuga $f = m \mathfrak{H}$ düüni, mille siht on perpendikulaarne voolu ringi pinnale (joon. 139).

§ 54. **Elektromagnetiline mõõdusüsteem.** 1) Kui mõõta jõudu $f = m . \mathfrak{H}$, mis antud voolu magnetväljas mõjub tuntud tugevusega magnetpooluse m peale, siis võib eelmises § leitud formulite abil selle jõu suurusest otsekohe leida voolu tugevus J, sest näiteks ringvoolu puhul on formuli (17) järele

$$f = m . \mathfrak{H} = \frac{2 k \pi J m}{r}$$

millest järgneb

$$J = \frac{f r}{2 k \pi m} \qquad 17a)$$

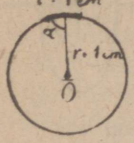
kus kõik suurused peale k on tuntud.

Et seesugune voolumõõtmine põhjeneb voolu magnetilistel mõjudel, siis hüütakse seda mõõtmist elektromagnetiliseks, selle juures tarvitatavaid üksusi aga — elektromagnetilisteks üksusteks. Elektrostaatiliste üksuste (§ 18₂) aluseks oli elektrihulkade külgetõmbumine (Coulombi seadus); tema põhjal määrati kindlaks elektri hulga staatiline üksus (E S Ü) ning tuletati viimasest kõik teised elektri-üksused, muu seas ka vooluüksus (§ 36). Elektromagnetilise mõõdusüsteemi aluseks aga on nagu nimetatud voolu magnetiline mõju (Biot-Savarti seadus), mille põhjal kõige pealt kindlaks määratakse voolu elektromagnetiline üksus (lühendatult VMÜ). Alles viimasest tuletatakse

siis teised elektriüksused, — muu seas ka elektrihulga ja potentsiaali elektromagnetiline üksus.

2) Tahame, et voolu elektromagnetiline üksus (VMÜ) kokkukõlas on üleüldise absoluutse mõõdusüsteemi põhiüksustega (düün, cm), siis peame tema nii valima, et kui formulis (16) on f = 1 düün, r = 1 cm, $l$ = 1 cm, m = 1 ja $\sin\alpha = 1$, siis ka voolu tugevus J oleks üks VMÜ, s. t. et

$$J = \frac{fr^2}{km\,l\sin\alpha} = \frac{1.1}{k.1.1.1} = 1,$$




millest järgneb, et sarnasel puhul peab olema k = 1. Seega on voolu elektromagnetiliseks üksuseks seesugune vool, mille 1 cm pikkune osa ($l$ = 1) ringil raadiusega 1 cm voolates (r = 1), mõjub tsentrumisse asetatud üksuspooluse peale (m = 1) jõuga 1 düün (joon. 140). Ringvool valitakse nimelt sellepärast, et tema juures on $\alpha$ alati $90^0$, s. t. $\sin\alpha = 1$.

Joon. 140.

Mõõdame voolu elektromagnetilistes üksustes, siis on kõigis eelmises § leitud formulites koeffitsient k = 1. Formul (17a) ütleb seega, et ringvoolu juures on

$$J = \frac{fr}{2\pi m} \text{ elektromagnet. üksust} \qquad 17b)$$

Teeme siin r = 1 cm, m = 1 ja J = 1 VMÜ, siis on

$$f = 2\pi \text{ düüni;}$$

Sellest järgneb, et elektromagnetilises süsteemis on vooluüksuseks seesugune vool, mis ringjuhti mööda raadiusega 1 cm voolates, mõjub tsentrumisse asetatud üksuspooluse peale jõuga $2\pi$ düüni.

VMU-se nimetus tuletub formulist (16), mille järele on

$$\text{VMÜ} = \frac{\text{jõud} \times (\text{pikkus})^2}{\text{poolustugevus} \times \text{pikkus}} = \frac{\text{düün} \times \text{cm}^2}{\text{üksuspoolus} \times \text{cm}}.$$

Düüni nimetus oli $CGS^{-2}$ (II, § 18b); üksuspooluse nimetus oli $C^{\frac{3}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}$ (§ 4a); seega on

$$\text{VMÜ} = \frac{CGS^{-2} \times C^2}{C^{\frac{3}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1} \times C} = C^{\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}.$$

3) Mõõdame mingi konstant voolu tugevust voltameetriga amperides, ning leiame ühtlasi selle jõu f suuruse, millega sama vool, ringjuhti mööda voolates, mõjub juhi tsentrumisse asetatud üksuspooluse peale. Formul (17b) annab siis sama voolu tugevuse elektromagnet. vooluüksustes. Võrreldes mõlemaid suurusi, näeme, et VMÜ on 10 korda amperist suurem, s. t.

$$1 \text{ VMÜ} = 10 \text{ amperi}$$

Ühe amperi juures voolab igas sekundis 1 coulomb elektrit läbi juhi (§ 36a). Järjelikult peab voolutugevusel 1 VMÜ igas sekundis läbi juhi voolama 1 elektromagnetiline elektrihulga üksus (lühendatult elektri magnetiline üksus = EMÜ). Et VMÜ on 10 korda amperist suurem, siis peab ka elektromagnetiline elektriüksus 10 korda coulombist suurem olema, s. t.

$$1 \text{ EMÜ} = 10 \text{ Cb}$$

Coulomb on $3.10^9$ elektrostaatilist elektriüksust (ESÜ), järjelikult on

$$1\ \text{EMÜ} = 10.3.10^9\ \text{ESÜ} = 3.10^{10}\ \text{ESÜ} \qquad 18)$$

Arv $3.10^{10}$ võrdub valguse kiiruse suurusega ($c = 3.10^{10}$ cm/sec $= 300000$ klm/sec). Järjelikult leiame elektrihulga elektromagnetilise üksuse, kui tema elektrostaatilise üksuse kasvatame valguskiiruse arvulise tähendusega. Samal kombel leiame, et ka kõigi teiste elektriüksuste juures on üleminekuks koeffitsiendiks elektrostaatilisest mõõdusüsteemist elektromagnetilisse kas valguskiiruse arvuline suurus $c = 3.10^9$ või tema kvadraat (võrdle üksuste tabel kõite lõpus).

ESÜ nimetus oli $C^{\frac{3}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}$ (§ 182). EMÜ nimetus on vool × aeg = = VMÜ × $S$ = $C^{\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1} \times S = C^{\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}}$

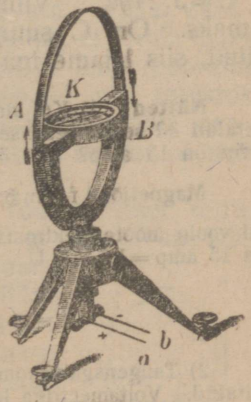
Võrreldes mõlemaid üksusi, näeme, et nende nimetuste vahel on vahekord

$$\text{ESÜ} = \text{EMÜ} \times CS^{-1} = \text{EMÜ} \times \text{kiirus},$$

sest et $CS^{-1}$ = cm/sec on kiiruse nimetus.

On ühe ja sama elektrihulga mõõtarv elektromagnetilises süsteemis A ja elektrostaatilises B, siis on formuli (18) põhjal A EMÜ $= 3\ 10^{10}$ A.ESÜ $=$ $=$ B.ESÜ, s. t. B $= 3\ 10^{10}$ A. Lisades viimase võrrandi lülide juure nimetused ESÜ = EMÜ × cm/sec, leiame, et B.ESÜ $= 3.10^{10}$ A EMÜ × cm/sec = A.EMÜ × × $3\ 10^{10}$ cm/sec. Selgub, et üleminekuks ühest mõõdusüsteemist teise on koeffitsiendiks arv $3.10^{10}$ cm/sec, mis mitte ainult arvuliselt, vaid ka nimetuse järele on valguse kiirus.

§ 55. **Tangensgalvanomeeter** on üks nendest aparaatidest, millega voolu tugevust absoluutselt, s. t. otsekohe tema magnetjõu järele mõõdetakse. Vool juhitakse traadi a ja b kaudu läbi ringjuhi AB (joon. 141). Viimase tsentrumis asub väike horisontaalne kompass K. Ring AB pöördakse maakera magnetmeridiaani pinda; siis hoidub kompassnõel ringi pinnas ja tema ots seisab kompassi nurgaskaala 0-punktil. Voolab läbi AB elekter, siis mõjuvad nõela mõlema otsa peale jõud f ja f (joon. 142), mis nõela perpendikulaarseks ringvoolu AB pinnale tahavad pöörda. Seda pöördumist takistab maakera magnetjõud ($f_m$ ja $f'_m$), mille siht on paralleelne pinnale AB. Nõel tasakaalustub siis, kui mõlemad ühel ja samal tasapinnal asuvad jõud tasakaalu satuvad. Tundes maakera magnetjõu horisontaalkomponendi $f_m$ suurust, võib välja arvata voolu magnetjõu f suurus ning viimasest leida formuli (17a) abil voolu tugevus J elektrom. üksustes. Arvestuse lihtsustamiseks võib oletada, et kogu nõel NS (joon. 142) nii väike on, et ta tervelt, s. t. oma mõlema poolusega ringvoolu tsentrumis asub. Siis jäävad poolused N ja S kogu pöördumisaeg tsentrumisse, ning jõud f jääb konstandiks. Teadagi ei muutu pöördumisel ka maakera



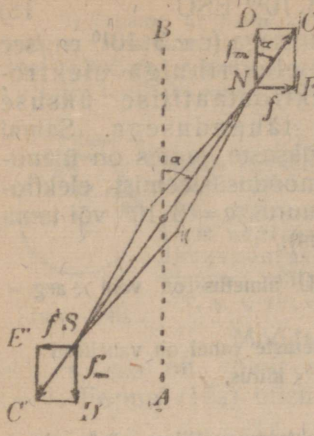
Joon. 141.

magnetjõud $f_m$ ei sihis ega suuruses. Nõel jääb tasakaalu, kui f ja $f_m$ resultantjõud NC on piki nõela telge sihitud. Sel juhusel on

$$CD:DN = tg\alpha, \text{ ehk } f:f_m = tg\alpha,$$

millest järgneb, et

$$f = f_m . tg\alpha$$




Joon. 142.

Et jõud f on proportsionaalne voolu tugevusega (formul 17), siis on

$$J = C tg\alpha,$$

kus C on mingi konstant arv. Me näeme, et voolu tugevus on proportsionaalne nõela kaldumisnurga ($\alpha$) tangens'iga. Sellest ka nimetus tangensgalvanomeeter.

Voolu magnetjõud $f = m\mathfrak{H} = \frac{m . 2\pi J}{r}$

(vaata formul 17b). Maakera magnetjõud on $f_m = m\mathfrak{H}_m$, kus $\mathfrak{H}_m$ on maakera magnetvälja horisontaalkomponent. Seega on

$$tg\alpha = \frac{f}{f_m} = \frac{m . 2\pi J}{m\mathfrak{H}_m r} = \frac{2\pi J}{r\mathfrak{H}_m}; \text{ ehk } J = \frac{r\mathfrak{H}_m}{2\pi} tg\alpha.$$

Viimasest formulist leiame voolu tugevuse elektrom. üksustes (sest formulis 17b tegime $k = 1$), kui $\mathfrak{H}_m$ on tuntud ja nurk $\alpha$ mõõdetud.

Et leida konstant C, juhitakse vool järjestikku läbi voltameetri ja tangensgalvanomeetri. On voolu tugevus voltameetri järele $J_1$ ja nõela kaldumisnurk selle juures $\alpha_1$, siis on $J_1 = C tg\alpha_1$, ja $C = J_1 : tg\alpha_1$. Viimane suurus jääb iga voolu jaoks üheks ja samaks. On C suurus antud tangensgalvanomeetri jaoks kord leitud, siis leiame iga voolu suuruse formuli järele $J = C tg\alpha$.

**Näited:** 1) Kui suur jõud f mõjub magnetpooluse peale $m = 5$, mis asetatud 30 sentimeetrilise läbimõõduga ringvoolu tsentrumisse, kui voolu tugevus on 15 amp?

Magnetjõud $f = m\mathfrak{H}$; välja intensiivsus on formuli (17) järele $\mathfrak{H} = \frac{2k\pi . J}{r}$.

Kui voolu mõõta elektromagnetilistes üksustes, siis on $k = 1$ ning voolu tugevus 15 amp $= 1{,}5$ V M Ü. Seega on

$$f = m\mathfrak{H} = 5 . \frac{2\pi . 1{,}5}{15} = \pi = 3{,}14 \text{ düüni.}$$

2) Tangensgalvanomeeter ja voltameeter on järjestikku vooluahelasse lülitatud. Voltameetriga leiame, et konstant voolul on 5 minuti sees 600 coulombi elektrit läbi juhi voolanud. Galvanomeetri nõel kaldub selle juures 45° võrra. Missugune on galvanomeetri konstant C?

Voltameetri järele on voolu tugevus $\frac{600 \text{ Cb}}{5 . 60 \text{ sec}} = 2 \text{ amp.} = 0{,}2$ V M Ü.

$$C = \frac{J}{tg\alpha} = \frac{0{,}2}{tg\ 45^0} = 0{,}2, \text{ sest et } tg\ 45^0 = 1.$$

## Peatükk VI:

# Takistus.

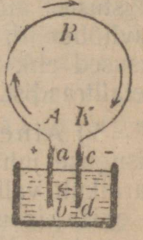
§ 56. **Takistus; Ohmi seadus.** 1) Ühendame suure Bunsen-elemendi või akkumulaatori elektroodid näiteks 0,5 mm jämeduse ja umbes 3 m pikkuse raudtraadiga. Voolu ahelasse lülitatud galvanomeeter näitab, et läbi traadi voolab umbes 1,3 amp. Nüüd pikendame traadi kahekordseks: sama galvanomeeter näitab voolu 0,65 amp, s. t. 2 korda nõrgemat. Pikendame traadi 3 kordseks, siis väheneb ka vool 3 korda jne., s. t. voolu tugevus on ümberpöördult proportsionaalne juhi pikkusega.

Kui tarvitada raudtraati mille läbimõõt on 1 mm, siis on vool 3 meetri pikkuses traadis umbes $5{,}2 = 4 \times 1{,}3$ amp, 6 meetri pikkuses $2{,}6 = 4 \times 0{,}65$ amp jne. Veel jämedamas traadis on vool veel tugevam. Et teise traadi lõikepind on 4 korda suurem kui esimese oma $[1^2 : (0{,}5)^2 = 4]$, siis selgub viimasest katsest, et voolu tugevus on proportsionaalne juhi läbilõikepinnaga.

Võrreldes voolu tugevust mitmesugustest ainetest valmistatud, kuid ühesuguste pikkuste ja jämedustega traatides, selgub, et näiteks raudtraadis vool väiksem on kui samasuguses vasktraadis, et ta viimases väiksem on kui hõbetraadis jne., s. t. voolu tugevus oleneb juhi ainest.

Kirjeldatud katsed sunnivad oletama, et juhid elektri voolamist kas enam või vähem takistavad. Me peame ette kujutama, et juhis on olemas mingisugune hõõrumine, mis elektri liikumist seal samuti takistab kui vee voolamist hõõrumine vastu veetoru seinu. Nii siin kui seal on vool seda tugevam, mida väiksem on hõõrumine. Eelmistel katsetel leidsime, et voolu tugevus on proportsionaalne juhi läbilõikepinnaga ja ümberpöördult proportsionaalne juhi pikkusega; sellest järgneb, et **juhi takistus on proportsionaalne tema pikkusega ja ümberpöördult proportsionaalne tema läbilõikepinnaga. Takistuse suurus oleneb juhi ainest.**

2) Kinnises vooluahelas (joon. 143) ei voola elekter mitte ainult läbi välise ühendustraadi ARK, vaid ta läheb ka läbi vooluallika enese ühest elektroodist teise juure. Nagu välises juhis, nii peab elekter ka vooluallikas eneses teatavat takistust ületama. Vastandiks juhi R takistusele, mida välistakistuseks hüütakse, nimetatakse vooluallika (elemendi) enese takistust sisetakistuseks. Elemendi sisetakistus oleneb samuti kui iga teine takistuski elektrit juhtiva osa — vedelikusamba abdc lõikepinnast (ab) ja pikkusest (ac); ta on nii siis igas elemendis isesuurune.



Joon. 143.

Nimetame välistakistust tähega $R_v$ ja sisetakistust tähega r, siis on vooluahela kogutakistus

$R = R_v + r$. Seda takistust peab ületama elemendi elektromotoorne jõud, mis elektri läbi kogu ahela liikuma surub. Niikaua kui EMJ jääb konstandiks, peab siis arusaadavalt ka voolu tugevus konstandiks jääma. Suurendame aga samal kogutakistusel EMJ-u, siis kasvab ka voolu tugevus. Võtaksime vooluallikaks näiteks teise elemendi, mille EMJ on 2 korda suurem kui esimese oma ja mille sisetakistus on endiselt r, siis näeksime, et läbi sama välisjuhi $R_v$ voolab 2 korda tugevam vool. Kolm korda suurem EMJ tekitaks endisel kogutakistusel 3 korda tugevamat voolu jne. Sellest järgneb: **ühesuuruse takistuse juures on voolu tugevus proportsionaalne voolu tekitava elektromotoorse jõuga.**

Me nägime juba (p. 1), et voolu tugevus oleneb ka takistusest; kui tarvitada ühte ja sama elementi (EMJ = konst.) ja suurendada tema vooluahela kogutakistust ($R = R_v + r$) 2, 3, 4 jne. korda, siis väheneb vool vastavalt 2, 3, 4 jne. korda, s. t. **ühesuurusel elektromotoorsel jõul on voolu tugewus ümberpöördult proportsionaalne ahela takistusega.**

Mõlemad seadused, mis tuntud üleüldise nimetuse all „Ohmi seadus" (G. Ohm, 1827), sisalduvad formulis

$$\text{Vool} = \frac{\text{EMJ}}{\text{takistus}} \text{ ehk } J = \frac{E}{R} \qquad 19)$$

§ 57. **Takistuse üksus; eritakistus ja juhtivus.** 1) Praktilises mõõdusüsteemis on takistuse üksuseks niisuguse vooluahela takistus, milles elektromotoorne jõud 1 volt tekitab voolu 1 amper. Seda üksust hüütakse oom'iks. On näiteks Volta-elemendi ($E \cong 1$ volt) poolused ühendatud niisuguse juhiga, et voolu tugevus on 1 amper, siis on juhi ja elemendi kogutakistus 1 oom, sest kui formulis (19) teha $E = 1$ volt ja $J = 1$ amp, siis on $R = 1$ oom.

Mõõtmised näitavad, et 1 oom võrdub seesuguse elavhõbe-niidi takistusega, mille läbilõige on 1 kv.mm ja pikkus 106,3 cm (temperatuuril $0^0$C). Sellepärast tarvitatakse takistuste mõõtmiseks vastavate ulatustega klaastorru kallatud elavhõbeniiti. Vähem täpipealsed, kuigi käepärasemad on takistusüksused ehk etaloonid, mis valmistatud spiraaliks painutatud metalltraadist.

2) Aine eritakistuseks hüütakse sellest ainest valmistatud niisuguse juhi (traadi) takistust, mille pikkus ja lõikepind on 1. Harilikult valitakse siin pikkuseks 1 m ja lõikepinnaks 1 mm², nii et eritakistus võrdub 1 meetri pikkuse ja 1 mm² jämeduse traadi takistusega. Temperatuuril $0^0$C on eritakistus tähtsamate ainete jaoks järgmine (oomides meetri kohta):

| | | | |
|---|---|---|---|
| Hõbe | 0,015 | Tina | 0,21 |
| Vask | 0,016 — 0,017 | Elavhõbe | 0,94 |
| Tsink | 0,06 | Uushõbe (Cu, Ni, Zn) | 0,16—0,5 |
| Nikkel | 0,08 — 0,1 | Manganiin (Cu, Mn) | 0,45 |
| Raud | 0,1 — 0,15 | Konstantaan (Cu, Ni) | 0,5 |
| Plaatina | 0,14 | Kõva süsi (gaasi —) | 50—70 |
| Inglistina | 0,135 | | |

Nimetame aine eritakistust tähega w, siis on sellest ainest valmistatud *l*m pikkuse ja 1 mm² jämeduse juhi kogutakistus $l \times w$ oomi (§ 56₁). On juhi lõikepind q mm², siis on takistus q korda väiksem, s. t. kogutakistus on

$$R = w \frac{l}{q} \text{ oomi} \qquad 20)$$

Selle abil võib välja arvata iga juhi takistust tema ulatuste ja eritakistuse põhjal.

3) On juhil suur takistus, siis juhib ta elektrit halvasti; me ütleme ka, et juhi elektrijuhtivus on väike. On selge, et aine elektrijuhtivus on ümberpöördult proportsionaalne takistusega; kui viimane on R, siis kujutab juhtivust arv 1/R. Analoogiliselt kujutab aine erijuhtivust suurus $\frac{1}{\text{eritakistus}} = \frac{1}{w}$.

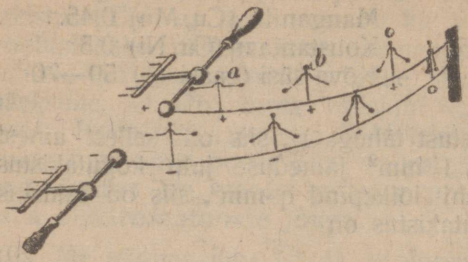
Franz ja Wiedemann mõõtsid ühe ja sama metalltüki elektri- ja soojusjuhtivust. Kui mitmesuguste metallide jaoks leituid arve võrreldi, siis selgus, et ainete elektrijuhtivused on ligikaudu proportsionaalsed nende soojusjuhtivustega (Franz-Wiedemanni seadus).

4) Ühendame akkumulaatori poolused raudtraadiga ning lülitame ahelasse ampermeetri. Kui traati kuumendada, siis näitab ampermeeter, et vool väheneb. Voolu nõrgenemine võib sündida ainult takistuse kasvamisega, sest et ahela EMJ muutmataks jäi. Sellest järgneb, et raua takistus soenemisel peab kasvama. Võtame raudtraadi asemele mingi teise, näiteks vasktraadi, siis ei muutu vool nii palju kui eelmisel juhusel. Tarvitame aga uushõbe-, manganiin- või nikkeliintraati, siis ei muutu vool traadi kuumendamisel peaaegu sugugi. Sellest järgneb, et **metallide takistus kasvab nende temperatuuriga.** Ainult mõningate metallsulandiste takistus (näiteks uushõbe = Cu + Ni + Zn) ei olene temperatuurist.

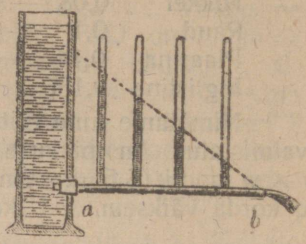
Mõõtmised näitavad, et puhaste metallide takistus kasvab keskmiselt $\frac{1}{3}$ % võrra temperatuuritõusul 1° C.

§ 58. **Potentsiaali muutumine piki voolu; Ohmi seadus vooluahela üksikute lülide jaoks.** 1) Ühendame elektriseerimismasina konduktorid pika niidiga ja kinnitame niidi keskkoha klaasvarva külge (joon. 144). Kui masin töötab, siis voolab piki

niiti nõrk vool (§ 36). Niidile kinnitatud ühesugused elektripendlid tõukuvad selle juures seda tugevamini laiali, mida lähemal konduktorile seisab pendel (vaata joonistus). Nagu pendlid



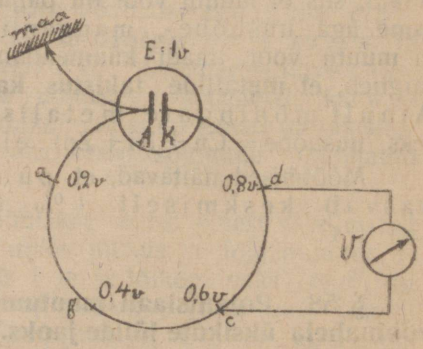

Joon. 144.




Joon. 145.

nii tõukuksid laiali ka elektromeetri lehekesed, kui elektromeeter pika traadi kaudu järgemööda ühendada voolujuhi mitmesuguste punktidega. Et elektromeeter temaga ühendatud juhipunkti potentsiaali näitab (võrdlemisi maaga), siis selgub sellest katsest, et voolava elektri puhul juhi pinna üksikutel punktidel mitmesugune potentsiaal on. Mõõtmised näitavad, et juhil (niidil) on kõige suurem potentsiaal positiivse konduktori juures; sealt väheneb ta järk-järgult ning langeb nullini juhi keskkohas; siis muutub potentsiaal negatiivseks ning langeb kõige suurema negatiivse väärtuseni negatiivse konduktori juures. Täpipealse elektromeetriga mõõtes leiame, et ühtlase juhi puhul potentsiaal piki juhti ühtlaselt langeb, s. t. et potentsiaali kahanemine ühe sentimeetri pikkusel on üle kogu juhi ühesuurune.

On juhiosa ab = bc (joon. 144), siis on potentsiaalvahe punktide a ja b vahel ($V_a - V_b$) sama suur kui punktide b ja c vahel ($V_b - V_c$). Äärmiste punktide a ja c vahel on potentsiaalvahe ($V_a - V_c$), järjelikult 2 korda suurem kui a ja b vahel. Uhtlases juhis aga on 2 korda pikemal osal ac ka kaks korda suurem takistus kui osal ab. Sellest järgneb, et **voolujuhi kahe punkti potentsiaalvahe on proportsionaalne nende punktide vahel asuva juhiosa pikkusega.**




Joon. 146.

Samuti kui ülevalkirjeldatud katsel, jaguneb potentsiaal ka ühtlases traadis adcd (joon. 146), mille läbi elemendi AK vool läheb. Ühendame elemendi (+) pooluse (A) maaga ja mõõ-

dame elektromeetriga traadi üksikute punktide potentsiaali maa vastu, siis leiame, et kui elemendi pinge on näiteks E = 1 volt, siis on juhi esimese viiendiku (Aa) lõpus, s. t. punktis a potentsiaal 0,2 volti, teise viiendiku lõpus (b) 0,4 volti, kolmanda viiendiku lõpus 0,6 volti jne. Et punkti A potentsiaal maaga võrreldes on null, siis on potentsiaalvahe esimese viiendiku (Aa) otsade vahel 0,2 — 0 = 0,2 volti, teise viiendiku otsade vahel (Ab) 0,4 volti jne. Kui sellekohase voltmeetriga V mõõta pinget näiteks punktide c ja d vahel, siis näitab ka voltmeeter potentsiaalvahet 0,2 volti $= \frac{E}{5}$, kusjuures juhiosa cd pikkus on $\frac{1}{5}$ juhi kogupikkusest. Ka siin on nii siis potentsiaalvahe proportsionaalne juhi pikkusega ehk, mis sama tähendab, tema takistusega.

Kirjeldatud potentsiaali jagunemine on täiesti sarnane veerõhumise kahanemisega piki veetoru (joon. 145): voolab torus ab vesi, siis näitab püsttorude veenivoo alanemine, et vee rõhumine kahaneb proportsionaalselt toru pikkusega. Et toru pikkus on proportsionaalne hõõrumisega (takistusega), siis on ka veenivoo alanemine proportsionaalne takistusega.

2) On potentsiaalvahe ehk pinge punktide a ja b (joon. 146) vahel 1 volt ja on takistus ahelalülis ab parajasti 1 oom, siis voolab nagu mõõtmine seda näitab läbi ahela vool 1 amper. On aga pinge $V_b - V_a$ volti ning takistus a ja b vahel R oomi, siis on vool

$$J = \frac{V_b - V_a}{R} \text{ amperi.} \qquad 21)$$

Võrreldes seda formuliga (19), näeme et mõlemad formulid sarnased on, kujutab ju lüli ab jaoks potentsiaalvahe $V_b - V_a$ seda elektromotoorset jõudu (E), mis elektrit läbi vastava juhiosa ajab. Ohmi seadus on nii siis maksev mitte ainult terve vooluahela, vaid ka ahela iga üksiku lüli jaoks.

Tunneme ahela mingi lüli takistust R ja pinget selle lüli otsade vahel $V_1 - V_2$, siis leiame formuli (21) abil läbi kogu ahela voolava voolu tugevuse J, sest et voolu tugevus piki kogu ahelat ühesuurune peab olema.

Sama formulit võib kirjutada järgmiselt:

$$V_1 - V_2 = J \cdot R \qquad 21a)$$

Tunneme ahelasse ühendatud juhitüki takistust R oomides ja ahela voolu J amperides, siis leiame sellest pinge juhi otsade vahel.

Lõpuks võib formulile (21) anda kuju:

$$R = \frac{V_1 - V_2}{J} \qquad 21b)$$

mille abil leitakse lüli takistus R, kui tuntud on vool J ja pinge $V_1 - V_2$ selle lüli otsade vahel.

**Näited:** 1) Tugeva akkumulaatori poolustega ühendatakse vasktraat, mille pikkus on $l = 5$ m ja läbilõikepind $q = 0{,}5$ mm². Kui tugev on vool?

Vase eritakistus on $w = 0{,}017$; juhi pikkus on 5 m, tema jämedus on 0,5 mm². Formuli (20) järele on juhi takistus

$$R = w \cdot \frac{l}{q} = 0{,}017 \frac{5}{0{,}5} = 0{,}17 \text{ oomi.}$$

Akkumulaatori EMJ on ligikaudu 2 volti; seega on pinge juhi otsade vahel $V_1 - V_2 = 2$ volti, ning voolu tugevus formuli (21) järele:

$$J = \frac{V_1 - V_2}{R} = \frac{2}{0{,}17} = 11{,}8 \text{ amp.}$$

2) Manganiintraadi pikkus on $l = 8$ m, tema jämedus $q = 2$ mm² ja eritakistus $w = 0{,}45$. Läbi traadi voolab 16 amp. Kui suur on pinge tema otsade vahel?

$$R = w \cdot \frac{l}{q} = 0{,}45 \cdot \frac{8}{2} = 1{,}8 \text{ oomi.}$$

Formuli (21ª) järele on pinge

$$V_1 - V_2 = J \cdot R = 16 \cdot 1{,}8 = 28{,}8 \text{ volti.}$$

3) Kui jäme peab olema 6 m pikkune tsinktraat, et tema läbi pingel 1,2 volti voolaks 10 amperi?

Formuli (21ᵇ) järele peab takistus olema

$$R = \frac{V_1 - V_2}{J} = \frac{1{,}2}{10} = 0{,}12 \text{ oomi.}$$

Formulist (20) leiame, et jämedus on:

$$q = w \frac{l}{R} = 0{,}06 \cdot \frac{6}{0{,}12} = 3 \text{ mm}^2,$$

sest et tsingi eritakistus on $w = 0{,}06$.

4) Elekter juhitakse jaamast tarvituskohta 2 mm² jämeduste vasktraatide kaudu, mille pikkus on 300 m. Jaamas on pinge 220 volti. Kui suur on pinge tarvituskohas, kui voolu tugevus on 5 amp?

Formuli (20) järele on ühe traadi takistus

$$R = w \cdot \frac{l}{q} = 0{,}017 \frac{300 \text{ m}}{2 \text{ mm}^2} = 2{,}5 \text{ oomi.}$$

Potentsiaali kahanemine ühes traadis on formuli (21ª) järele:

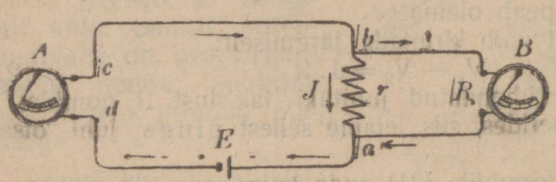
$$V_1 - V_2 = J \cdot R = 5 \; 2{,}5 = 12{,}5 \text{ volti.}$$

Mööda teist traati tagasi voolamisel kahaneb potentsiaal sama palju, s. t. üleüldse läheb juhtides kaduma pinge $2 \cdot 12{,}5 = 25$ volti. Seega jääb tarvituskohas järele

$$220 \text{ volti} - 25 \text{ volti} = 195 \text{ volti.}$$

## § 59. Potentsiaalvahe ja elektromotoorse jõu mõõtmine.

1) Potentsiaalvahe ehk pinge mõõtmiseks tarvitatakse voolumõõtjasarnast galvanomeetrit (joon. 110, 121 või 125). Mõõtes pinget näiteks punktide a ja b vahel (joon. 147), ühendatakse need punktid sellekohase galvanomeetri B mähisega. Punktide a ja b potentsiaalvahe tõttu hakkab elekter kõrgema potentsiaaliga punktist b läbi mõõtja B mähise madalama potentsiaaliga punkti a voolama. Tekkinud voolu i mõjul kaldub mõõtja B näitaja teatava nurga võrra, mis ära määrab voolu i tugevuse. On galvanomeetri mähise




Joon. 147.

takistus $R_1$ tuntud, siis võib formuli (21a) abil välja arvata punktide a ja b potentsiaalvahe, sest et

$$V_b - V_a = R_1 \cdot i$$

Et takistus $R_1$ ühes ja samas aparaadis alati ühesuuruseks jääb, siis järgneb leitud formulist, et otsitud pinge $V_b - V_a$ on proportsionaalne läbi aparaadi voolava vooluga i. Sellepärast võib seesuguse voolumõõtja skaalale amperide asemel otsekohe igale voolutugevusele vastav pinge voltides märkida. Mõõtja näitab siis otsekohe pinget, mis valitseb tema mähise otsadega ühendatud punktide (a ja b) vahel. Seesugust aparaati hüütakse voltmeetriks.

Voltmeetri mähise takistus peab võimalikult suur olema, s. t. tema mähis peab olema valmistatud peenikesest ja pikast traadist, sest vastasel korral oleks vool i nii tugev, et läbi peaahela osa arb minev vool J mõõtmisel tuntavalt väheneks. Ühes sellega aga väheneks voltmeetri ühendamise silmapilgul ka pinge a ja b vahel, on ju viimane $J \times r$, kus r kujutab a ja b vahel asuva peaahela osa takistust. Ei ole voltmeetri mähise takistus mitte väga suur, siis alaneb järjelikult pinge mõõtmise silmapilgul, nii et voltmeeter õieti ei või näidata.

Ampermeetri juures on asjaolu ümberpöördud: mõõtes ampermeetriga A ahela abcd (joon. 147) voolu, peame läbi ampermeetri mähise kogu voolu juhtima. Tahame, et ampermeeter seda voolu näitaks, mis ahelas enne ampermeetri sisselülitamist voolas, siis ei tohi sellel lülitamisel vooluahela kogutakistus suureneda, sest muidu väheneks vool. Järjelikult peab ampermeetri mähise takistus olema võimalikult väike, s. t. tema mähist peab moodustama lühike ja jäme traat. Peale ehitusviisi eraldub voltmeeter ampermeetrist ka mõõtmisviisiga: kuna voolu mõõtmisel ampermeeter alati järjestikku ahelasse lülitakse, ühendatakse voltmeeter paralleelselt pea-vooluahelale (arb, joon. 147).

2) Voltmeetri skaala valmistamiseks anname peaahela lülile arb (joon. 147) mingi täpipealt tuntud takistuse, näiteks 1 oomi. Peaahelas reguleerime voolu J nii, et tema suurus oleks järgemööda 1, 2, 3, 4 jne. amp. Formuli (21a) järele on siis pinge $V_b - V_a = J \cdot r$ vastavalt 1, 2, 3, 4 jne. volti. Et voltmeeter sama pinget peab näitama, siis on ainult tarvis tema näitaja iga seisu kohta vastav voltide arv märkida.

Tarvitame voltmeetrina joonistusel 125 kujutatud voolumõõtjat, siis on voltide arv proportsionaalne näitaja kaldumisnurgaga (§ 49₄).

Voldi suuruse absoluutse määramise üle vaata § 64₂.

3) Sama voltmeetriga võib mõõta elementide elektromotoorset jõudu E. Selleks ühendame elemendi poolused otsekohe voltmeetri mähise otsadega. Välistakistuseks on siis ainult voltmeetri mähise takistus R; sise-

takistus, mis võrdlemisi R-ga väga väike, olgu r. Vooluahela kogutakistus on siis R + r, ning formuli (19) järele on vool

$$i = \frac{E}{R+r} = \frac{E}{R\left(1+\frac{r}{R}\right)}$$

Et R väga suur on võrdlemisi sisetakistusega r, siis on $\frac{r}{R}$ väga väike, nii et teda ilma tuntava veata nulliks võib pidada. Seega on

$$i = \frac{E}{R} \text{ ja } E = i.R$$

s. t. mõõdetav elektromotoorne jõud E võrdub lihtsalt pingega voltmeetri mähise otsade vahel (i.R). Viimast aga näitabki voltmeeter.

4) Ühendame elemendi poolused juhiga, mille takistus $R_v$ mitte väga suur ei ole võrdlemisi elemendi sisetakistusega r, siis on vool formuli (19) järele:

$$J = \frac{E}{R_v + r}, \text{ ehk } E = J R_v + Jr, \text{ ja}$$

$$J R_v = E - Jr.$$

Viimases võrrandis on $J R_v$ pinge juhi otsade vahel (formul 21a) ehk elemendi elektroodide pinge $V_1 - V_2$. Suurus Jr aga kujutab potentsiaali kahanemist elemendi sees. Me näeme, et

elektroodide pinge ($JR_v$) = EMJ — potentsiaali kahanemine elemendis (Jr).

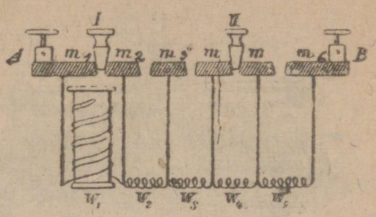
Mida suurem on sisetakistus r, seda suurem on Jr, seda madalamaks langeb elektroodide pinge, kui elemendist voolu võetakse. Ainult kui vool on null, s. t. kui ahel on avatud, muutub ka Jr nulliks ning elektroodide pinge saab võrdseks EMJ-ga (võrdle § 38₁).

Kui elemendi sisetakistus r on tuntud, siis leiame elemendi EBJ suuruse formulist $E = JR_v + Jr$, sest voolu J ja vastavat elektroodide pinget $JR_v$ võime otsekohe ampermeetri ja voltmeetriga mõõta.

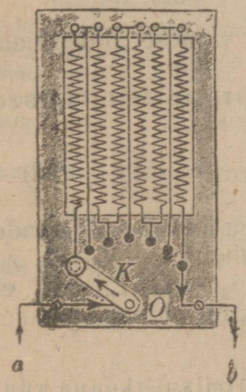
§ 60. **Reostaadid.** 1) Tihtipeale on tarvis vooluahela takistust soovi järele kiirelt ja käepäraselt muuta. Selleks ühendatakse ahelasse aparaat — n. n. reostaat, milles vool läbi pika metalltraadi peab minema, kusjuures viimase pikkust hõlpsasti võib muuta. Ühes traadi pikkusega muutub siis ka reostaadi ja kogu vooluahela takistus.

Nimetatud traadis ei kõlba ei raud ega mingi teine metall, mille takistus temperatuuriga muutub, sest muidu muutuks ka kogu vooluahela takistus reostaadi soenemisel. Sellepärast tarvitatakse reostaatides ainult manganiin-, nikkeliin- või konstantaantraati (§ 57₄).

Oma ehitusviisi poolest on reostaadid väga mitmekesised. Ühte nendest kujutab joonistus 148: paras tükk manganiin- või nikkeliintraati on mähitud portsellaanrullile ($W_1$); rull asub kastikeses ning traadi otsad on ühendatud kasti kaanele AB kinnitatud isoleeritud vaskplaatidega ($m_1$ - $m_2$). Seesuguseid traadirulle on ühes kastis terve rida $w_1$, $w_2$, $w_3$ jne. (joonistusel on rullina kujutatud ainult esimene traat). Ühendame näiteks patareist tulevad traadid äärmiste plaatidega A ja B, siis peab elekter järjestikku läbi kõigi takistuste voolama, s. t. reostaadi kogutakistus on siis $w_1 + w_2 + w_3 + w_4$. Kui aga kaks plaati sellekohase metallpulgakesega (I) omavahel ühendada, siis ei voola elekter mitte läbi rulli $w_1$, vaid ta läheb plaadist $m_1$ otsekohe plaati $m_2$, sest et seal on takistus väiksem. Plaadist $m_2$ läheb vool alles läbi takistuste $w_2 + w_3 + w_4$. Reostaadi kogutakistus on nüüd nii siis $w_1$ võrra väiksem. Ühendame veel mingi teise plaadipaari metallpulgakesega, siis eraldub ka viimastega ühendatud takistusrull, ning kogutakistus väheneb veelgi. Ühendame kõik plaadid omavahel, siis on aparaadi takistus praktiliselt 0, sest vool läheb otsekohe läbi tugevate plaatide AB, mille takistus on lõpmata väike. Sel kombel võib reostaadi kogutakistust mitmeti muuta. On üksikute takistuste $w_1$, $w_2$, $w_3$ jne. suuremad tuntud, siis tunneme ka kogu takistust igal juhusel.



Joon. 148.

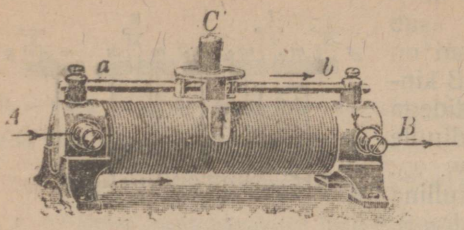


Joon. 149.

Väga käepärased on vändaga reguleeritavad reostaadid (joon. 149). Takistustraadid on spiraalidena raami külge kinnitatud; ühe spiraali otsad tulevad kahe kõrvutiseisva vasknööbi külge, mida mööda libiseb vända K ots. Seisab vänt äärmisel pahemal nööbil (vaata joonistus), siis läheb vool läbi traadi a ja vända O äärmise pahema nööbi kaudu esimesse spiraali; et selle spiraali teine ots järgmise nööbi külge tuleb, mis isoleeritult seisab, siis pääseb vool esimesest spiraalist ainult teise, teisest kolmandasse jne. Seega voolab elekter läbi kõigi spiraalide. Pöörame vända järgmise nööbi peale, siis jääb esimese spiraali algus eraldatuks ning vool läheb ainult läbi teise, kolmanda jne. spiraali. Nii väheneb reostaadi kogu takistus, kui vänta paremale poole pöörata. Takistus on 0, kui vänt äärmisel paremal nööbil seisab.

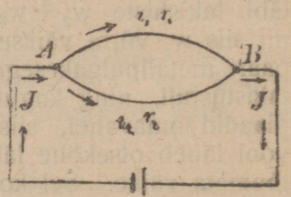
Lihtne on joonistusel 150 kujutatud reostaat, milles vool läbi üheainsa pika spiraali peab minema. Patarei traatide otsad

ühendatakse A ja B-ga. Otsast A läheb vool spiraali, ei pääse aga mitte spiraalist eraldatud punkti B, vaid peab läbi edasi-tagasi lükatava kontakti C ja varva ab punkti B minema. Takistustraadi pikkus, mille läbi elekter peab voolama, oleneb seega kontakti C seisust. Lükkame C otse A juure, siis ei lähegi vool läbi spiraali (takistus = 0), lükkame ta aga B juure, siis peab vool läbi kogu spiraali minema (takistus on kõige suurem).



Joon. 150.

§ 61. **Voolu harunemine; Wheatston'i sild; takistuse mõõtmine.** 1) Haruneb voolujuht punktis A (joon. 151) kaheks haruks $r_1$ ja $r_2$, siis haruneb ka peavool J kaheks haruvooluks $i_1$ ja $i_2$. Haruvoolude suuruse määravad järgmised seadused:



Joon. 151.

a) Mõlemad haruvoolud on kokku sama tugevad kui peavool, s. t. $i_1 + i_2 = J$, sest punkti A peab ühelt poolt sama palju elektrit juure voolama kui palju teda teiselt poolt ära voolab. Vastasel korral koguks elekter punkti A ning viimase potentsiaal tõuseks.

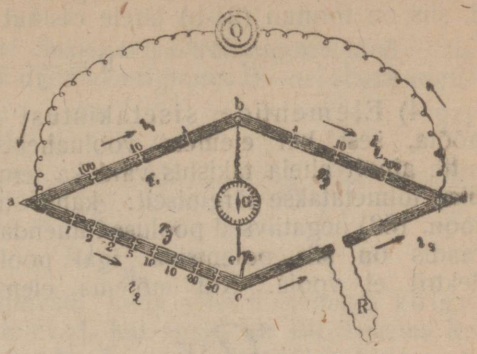
b) Haruvoolud on ümberpöördult proportsionaalsed harujuhtide takistustega, s. t.

$$\frac{i_1}{i_2} = \frac{r_2}{r_1}, \qquad 22)$$

sest Ohmi seaduse järele (formul 21-a) on pinge haru $Ar_1$ B otsade vahel $V_a - V_b = i_1 r_1$ ja haru $Ar_2$ B otsade vahel $V_a - V_b = i_2 r_2$, millest järgneb, et $i_1 . r_1 = i_2 . r_2$ ehk $i_1 : i_2 = r_2 : r_1$, sest et mõlema haru otspunktid A ja B ühised on, nii et nende vahel ka ühesuurune pinge peab olema.

Haruühendust tarvitatakse tihti ampermeetri mõõtmispiirkonna suurendamiseks: selleks ühendatakse mingi traat paralleelselt ampermeetri mähisele. Näiteks võib haru $r_1$ (joon. 151) kujutada ampermeetri mähist, haru $r_2$ aga paralleelset ühendustraati — n. n. haruühendust. Ühenduspunktis (A) haruneb vool kaheks: üks osa i, läheb läbi ampermeetri (takistusega $r_1$), teine osa $i_2$ — läbi paralleelse haruühenduse (takistusega $r_2$). On haruühenduse takistus ($r_2$) ainult $\frac{1}{9}$ (või $\frac{1}{99}$) ampermeetri mähise takistusest $r_1$, siis voolab läbi haruühenduse 9 (või 99) korda tugevam vool kui läbi ampermeetri (seadus b), s. t. $i_2 = 9\, i_1$ (või $99\, i_1$). Peavool (enne harunemist) $J = i_1 + i_2 = i_1 + 9i_1 = 10\, i_1$ (või $100\, i$). Läbi ampermeetri voolab nii siis ainult $^1/_{10}$ (või $^1/_{100}$) osa peavoolust J. Et leida peavoolu suurust, peame järjelikult ampermeetri näitamist (vool $i_1$) kasvatama 10-nega (või 100-ga).

2) Takistuste mõõtmiseks tarvitatakse tihti n. n. Wheatston'i silda (joon. 152): Vooluallikast Q tulev vool haruneb punktis a kaheks haruvooluks $i_1$ ja $i_2$ mis punktis d jällegi ühinevad. Harujuhte ab, bd ja ac moodustavad reostaadid (joon. 148), mille takistused $r_1$, $r_2$ ja $r_3$ täpipealt on tuntud, kus juures takistuse suurust soovi järele muuta võib. Harusse cd ühendatakse mõõdetav takistus R. Kui harujuhtide punktid b ja c otsekohe ühendada põiktraadiga bc, — n. n. Wheatstoni sillaga, siis võime takistused $r_1$, $r_2$ ja $r_3$ alati nii valida, et läbi silla bc elektrit ei voola, s. t. et galvanomeeter G voolu ei näita, olgugi, et läbi abd ja acd elekter voolab. Võib tõestada, et sarnasel puhul nelja takistuse vahel valitseb vahekord:



Joon. 152.

$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{R}, \qquad 23)$$

millest arvestuse teel leida võib otsitud takistuse R, kui tuntud on $r_1$, $r_2$ ja $r_3$.

**Tõestus:** Et läbi „silla" bc elektrit ei voola, siis on voolu harunemine punktis a samasugune kui ei olekski põikühendust bc olemas. Nimetame haru voolud tähtedega $i_1$ ja $i_2$, siis on pinge lüli ab otsade vahel $i_1 r_1$, ning lüli ac otsade vahel $i_2 r_3$. Kui läbi bc elektrit ei voola, siis peab punktide b ja c potentsiaal ühesuurune olema; järjelikult on potentsiaalvahe b ja a vahel sama suur kui c ja a vahel, s. t.

$$i_1 r_1 = i_2 r_3$$

Samuti peab potentsiaalvahe bd võrduma potentsiaalvahega cd, s. t.

$$i_1 r_2 = i_2 R$$

Esimesest võrrandist leiame, et $i_1 = i_2 \frac{r_3}{r_1}$; seades teise võrrandisse $i_1$ asemele selle tähenduse, saame:

$$i_2 \frac{r_3}{r_1} r_2 = i_2 R, \text{ ehk } R = r_2 \cdot \frac{r_3}{r_1}, \text{ s. t.}$$

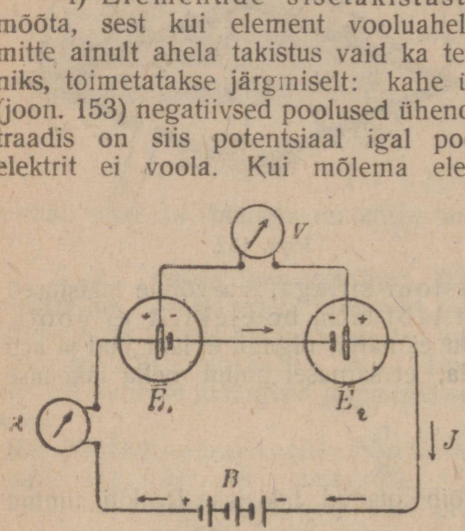
$$\frac{r_1}{r_2} = \frac{r_3}{R};$$

3) Takistuse mõõtmist võib toimetada otsitud takistuse otsekohese võrdlemisega mingi tuntud takistusega, näiteks reostaadi (joon. 148) omaga. Selleks lülitatakse mõõdetav takistus konstant elektromotoorse jõuga ahelasse ning mõõdetakse voolu tugevust. Siis kõrvaldatakse takistus ja lülitatakse tema asemele reostaat. Kui viimase takistust senni muuta, kunni vool samą suureks saab kui esimesel juhuselgi, siis peab mõõdetav takistus võrduma reostaadi tuntud takistusega.

Ka amper- ja voltmeetriga on võimalik mõõta takistusi: voolab läbi takistuse vool J ning on tema otsade potentsiaalvahe E, siis on formuli (21-b) järele otsitud takistus

$$R = \frac{E}{J}$$

4) Elementide sisetakistust ei saa harilikul kombel mõõta, sest kui element vooluahelasse lülitada, siis ei muutu mitte ainult ahela takistus vaid ka tema EMJ. Et seda ei sünniks, toimetatakse järgmiselt: kahe ühesuguse elemendi $E_1$ ja $E_2$ (joon. 153) negatiivsed poolused ühendatakse oma vahel. Ühendustraadis on siis potentsiaal igal pool ühesuurune, nii et temas elektrit ei voola. Kui mõlema elemendi positiivsed poolused ühendada patareist (B) tulevate traatitega, siis saame kinnise vooluahela, milles voolu tekitajaks on ainult patarei B elektromot. jõud, kuna ahelasse lülitatud elemendid $E_1$ ja $E_2$ ainult ahela takistust oma sisetakistuse r võrra suurendavad. Mõõtes voltmeetriga (V) potentsiaalvahet $V_1$—$V_2$ elementide väliste, s. t. positiivsete pooluste vahel, ning ampermeetriga ahela (A) voolu J tugevust, annab $(V_1—V_2):J$ ahela selle osa takistuse, kus mõlemad elemendid asuvad. Et selle takistuse ainult mõlema elemendi sisetakistused moodustavad, siis võrdub üks elemendi sisetakistus leitud takistuse poolega.



Joon. 153.

Seesuguste mõõtmistega leitakse, et sisetakistus on Bunsen-elemendis (32 cm kõrge) ligikaudu 0,2 oomi. Daniel-elemendis — 0,6 oomi ja Leclanché-elemendis — 0,3 oomi.

§ 62. **Elementide ühendamine patarelks.** 1) Lülitame n elementi järjestikku (§ 39₁), siis peab vool järgemööda läbi n ühesuguse elemendi minema, seega on kõigi elementide sisetakistus kokku n r oomi, kus r tähendab ühe elemendi sisetakistust.

Paralleelsel ühendamisel (§ 39₂) läheb vool ühel ajal läbi kõigi paralleelsete elementide. Sellepärast on n paralleelse elemendi sisetakistus samasugune kui ühe suure elemendi oma, mille elektroodide pinnad on n korda suuremad ühe antud elemendi elektroodile pindadest. Seesuguses elemendis läheb vool järjelikult ka läbi n korda suurema lõikepinnaga vedelikusamba (võrdle joon. 143), mille tõttu sisetakistus n korda väiksemaks jääb (formul 20). Paralleelselt ühendatud elementide kogu-

sisetakistus on nii siis $\frac{r}{n}$ s. t. n korda väiksem ühe elemendi sisetakistusest.

On välistakistus R ja ühe elemendi elektromotoorne jõud e, siis on EMJ järjestikku lülitatud n elemendi juures E = ne, ahela kogutakistus R + n.r ning vool

$$J_j = \frac{ne}{R+nr} \qquad 24)$$

Paralleelsel ühendamisel on EMJ E = e (§ 39₂), kogutakistus $R+\frac{r}{n}$ ja vool

$$J_p = \frac{e}{R+\frac{r}{n}} \qquad 25)$$

2) Leitud formulid näitavad, kuda viisi n elementi kõige kasulikumalt ühendada tulevad, kui antud on välistakistus R; nad näitavad, mil viisil ühendatult elemendid kõige tugevama voolu sünnitavad.

Juhus a) Välistakistus R on väga suur võrdlemisi elemendi sisetakistusega r: sel puhul võib ilma tuntava veata r nulliks lugeda, nii et vool on (form. 24 ja 25):

$$J_j = \frac{ne}{R} \text{ ja } J_p = \frac{e}{R}; \text{ s. t. } J_j = n J_p$$

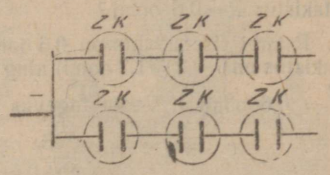
Järjestikku lülitatud elementide vool on n korda suurem paralleelselt ühendatud elementide voolust; viimase suurus võrdub üheainsa elemendi vooluga.

Juhus b) Välistakistus R on väga väike võrdlemisi r-ga: nüüd võime välistakistust nulliks pidada (R = 0), nii et voolud on:

$$J_j = \frac{ne}{nr} = \frac{e}{r} \text{ ja } J_p = \frac{e}{r/n} = \frac{ne}{r}; \text{ s. t. } J_p = n J_j$$

Sel juhusel on paralleelsete elementide vool n korda tugevam järjestikku lülitatud elementide voolust. Väiksel välistakistusel on järelikult kõige kasulikum paralleelne ühendus.

Juhus c) Ei R ega r ole nii väike, et teda nulliks võiks pidada: sel juhusel tarvitatakse n. n. salkühendust, milles elemendid näiteks paralleelselt salkadeks ühendatakse ning viimased omavahel järjestikku lülitatakse, või ümberpöördult. Näiteks kujutab joonistus 154 salkühendust, milles 3 elementi järjestikku salgaks on lülitatud ning kaks seesugust salka paralleelselt ühendatud.



Joon. 154.

Jgasugusel ühendusel on maksev üleüldine reegel: Patarei vool on kõige tugevam siis, kui elemendid niiviisi on ühendatud, et kogu sisetakistus võrdub välis-takistusega.

Tõestus: Olgu igas salgas y järjestikku ühendatud elementi ning salkade arv x, siis on elementide arv $n = x\,y$. Patarei EMJ on võrdne ühe salga EMJ-ga s. t. $E = ye$, kus e on ühe elemendi EMJ. Et $y = \frac{n}{x}$, siis on $E = \frac{ne}{x}$. Ühe salga sisetakistus on y korda suurem elemendi sisetakistusest (r), s. t. ta võrdub yr. Kui x seesugust salka on paralleelselt ühendatud, siis väheneb sisetakistus x korda, s. t. patarei sisetakistus on $\frac{yr}{x}$. Formuli (19) järele on siis vool

$$J = \frac{E}{R + \frac{yr}{x}} = \frac{ne:x}{R + \frac{yr}{x}} = \frac{ne}{xR + yr} = \frac{\frac{e}{xR}}{\frac{xR}{n} + \frac{yr}{n}} = \frac{e}{\frac{R}{y} + \frac{yr}{n}}$$

Viimast formuli võime järgmiselt muuta:

$$J = \frac{e}{\frac{yr}{n} + \frac{R}{y}} = \frac{e}{\left(\sqrt{\frac{yr}{n}}\right)^2 + \left(\sqrt{\frac{R}{y}}\right)^2 - 2\sqrt{\frac{Rr}{n}} + 2\sqrt{\frac{Rr}{n}}} =$$

$$= \frac{e}{\left(\sqrt{\frac{yr}{n}} - \sqrt{\frac{R}{y}}\right)^2 + 2\sqrt{\frac{Rr}{n}}}.$$

J saab kõige suuremaks, kui murru nimetaja teha kõige väiksemaks. Et lülis $2\sqrt{\frac{Rr}{n}}$ midagi vähendada ei saa, siis on murru nimetaja kõige väiksem, kui esimene lüli $\left(\sqrt{\frac{yr}{n}} - \sqrt{\frac{R}{y}}\right)^2 = 0$. Viimasest võrrandist leiame, et

$$\frac{yr}{n} = \frac{R}{y}, \text{ s. t. } R = \frac{yr}{n} \cdot y = \frac{r}{x} \cdot y \left(\text{sest et } xy = n \text{ ja } \frac{y}{n} = \frac{1}{x}\right).$$

Üleval leidsime, et patarei sisetakistus on $\frac{yr}{x}$. Järjelikult on vool siis kõige suurem, kui välistakistus R = sisetakistus $\frac{y}{x} \cdot r$.

**Näited:** 1) Patareis on 12 Bunsen-elementi, mille $e = 1{,}8$ volti ja sisetakistus $r = 0{,}2$ oomi. Milviisil ühendatult annavad need elemendid kõige tugevama voolu, kui välistakistus on $R = 2{,}4$ oomi?

Patarei sisetakistus peab võrduma välistakistusega. Ühendame kõik 12 elementi järjestikku, siis on sisetakistus $12\,r = 2{,}4$ oomi võrdne välistakistusega. Vool on formuli (24) järele

$$J = \frac{ne}{R + nr} = \frac{12 \cdot 1{,}8}{2{,}4 + 2{,}4} = 4{,}5 \text{ amp.}$$

2) Missugusel ühendusel on sama elementide vool kõige tugevam, kui välistakistus $R = 0{,}6$ oomi?

Patarei sisetakistus on 0,6 oomi, kui lülitada 6 elementi järjestikku (salga sisetakistus on $6 \cdot 0{,}2 = 1{,}2$ oomi) ning kaks seesugust salka ühendada paralleelselt $\left(\frac{1{,}2}{2} = 0{,}6 \text{ oomi}\right)$. Voolu tugevus on

$$J = \frac{6e}{R + 0{,}6} = \frac{6 \cdot 1{,}8}{0{,}6 + 0{,}6} = 9 \text{ amp.}$$

3) Milviisil ühendatult on sama patarei vool kõige tugevam, kui välistakistus on 0,001 oomi?

Ühendame kõik elemendid paralleelselt, siis on patarei sisetakistus $\frac{0{,}2}{12} = 0{,}0166$ oomi, s. t. veelgi suurem kui välistakistus. Et sise-

takistust vähemaks teha ei saa, siis on vool paralleelsel ühendamisel kõige suurem:

$$J = \frac{e}{R + \frac{r}{n}} = \frac{1{,}8}{0{,}001 + 0{,}0166} \cong 102 \text{ amp.}$$

4) Kui palju akkumulaatorisi tuleb järjestikku ühendada, et välistakistusel 2,76 oomi saada 16 amp.? Akkumulaatori $e = 2$ volti ja $r = 0{,}01$ oomi. Nimetame akkumulaatori arvu tähega x, siis on patarei $E = xe = x\,2$ volti ja sisetakistus $= xr = x.0{,}01$ oomi. Vool on siis $J = \frac{2x}{2{,}76 + 0{,}01x} = 16$ amp., ehk $x = 24$.

## Peatükk VII:

## Elekter ja soojus.

### § 63. Juhi soenemine elektri voolamisel; Joule'i seadus.

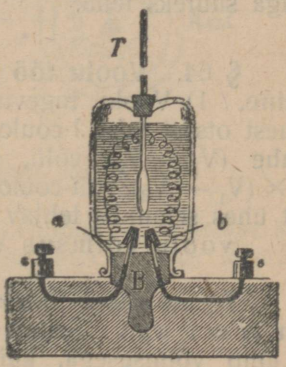
1) See „hõõrumine", mis takistab elektri voolamist juhis, sünnitab samuti kui iga mekaaniline hõõruminegi soojust. Iga juht, mille läbi voolab elekter, soeneb; see soenemine võib niivõrd suur olla, et juht hõõgama hakkab või koguni sulaneb ja auruks muutub.

Et leida tekkinud soojushulga olenemist voolu tugevusest ja juhi omadustest, võib kalorimeetri (joon. 155) abil mõõta seda soojushulka, mis vabaneb tuntud tugevusega voolu J mõjul kalorimeetrisse asetatud juhis ab. Mõõtmistest selgub, et **tekkiv soojushulk on proportsionaalne juhi takistusega, voolu tugevuse kvadraadiga ning voolu kestvusega.** Formulina avaldatud ütleb see seadus, et

$$\text{soojushulk } S = 0{,}24 J^2 Rt \text{ gramm-kalori} \qquad 26)$$

kus J on mõõdetud amperides, R oomides ja t sekundites. Tema leidja Joule (1841) järele hüütakse seda seadust Joule'i seaduseks.

2) Kui lülitada vooluahelasse mitmesuguse takistusega juhte, siis soenevad läbi ahela voolava elektri mõjul need juhid kõige rohkem, mille takistus on kõige suurem. Tulevad patarei poolustest näiteks vasktraadid ning läheb vool nendest sama jämedasse raud- või tinatraati, siis võib raud, mille eritakistus suur, hõõgama hakata ja tina koguni ära auruda, kuna vasktraadid vaevalt soenevad.



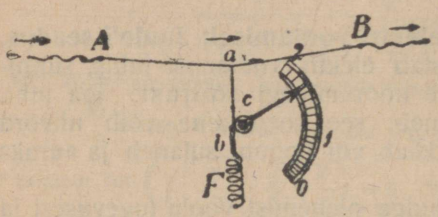

Joon. 155.

Selle peal põhjeneb näiteks elektri valgustusvõrkudes tarvitatavate kaitsjate ehitusviis. Kogu võrk on vaskjuhtidest; ainult kaitsja „korgis" peab vool läbi peenikese hõbe- või tina-

traadi minema, mis harilikult korgi portselaankesta sisse on kinnitatud. Kasvab vool mingil põhjusel (näiteks 2 traadiotsa kokkupuutumisel ja sellega seotud takistuse vähenemisel) suuremaks kui tarvis, siis sulaneb nimetatud tinatraat ning katkestab sellega voolu. Kaitsjad kaitsevad nii siis voolu juhte (ja teisi aparaate) liig tugevate voolude eest, mille mõjul juhid ise soenedes rikki võiksid minna või koguni maja põlema süüdata.

Traatide soenemist kasutatakse elektri *keedunõudes*, milles soenev traat teda ümbritsevaid vedelikke soendab. Ka miinide süütamiseks tarvitatakse elektrivoolu, mis selleks otstarbeks vaskjuhte mööda miinini juhitakse ja mis miini sees peenikese plaatintraadi hõõgama paneb.

*Soojus-ampermeetrites* (joon. 156) kasutatakse peene juhi AB soenemist ja sellega seotud pikenemist selleks, et ampermeetri näitajat pöörda: niipea kui läbi AB voolu juhtida, pikeneb ta ja vedru F tõmbab AB külge kinnitatud põikniidi ab alla poole. Niit on üks kord ümber näitaja võlli (c) mähitud, nii et niidi nihkumisel ka näitaja peab pöörduma. Mida tugevam on vool, seda pikemaks venib AB, seda enam alla langeb niit ab ja seda kaugemale pöördub näitaja. Skaala valmistamiseks peab seesugust ampermeetrit võrdlema kas voltameetriga või mõne teise õigesti näitava aparaadiga. Samuti nagu iga teist ampermeetrit, võib ka soojus-ampermeetrit *voltmeetrina* tarvitada, kui takistus AB väga suureks teha.



Joon. 156.

§ 64. **Voolu töö ja võimsus; voldi absoluutne määramine.** 1) Voolu tugevusel J amperi voolab igas sekundis juhi ühest otsast teise J coulombi elektrit. On juhi otsade potentsiaalvahe $(V_1 - V_2)$ volti, siis teeb see elektrihulk igas sekundis $J \times (V_1 - V_2)$ volt-coulombi ehk *joule'i* tööd (§ 32₄, formul 5a). Et ühes sekundis tehtav töö kujutab võimsust, siis on

voolu võimsus $W = J.(V_1 - V_2)$ joule'i sekundis
ehk watti 27)

Teeme selles formulis $J = 1$ amp ja $V_1 - V_2 = 1$ volt, siis on $W = 1$ watt. Sellest selgub, et watt on võimsus, mis võrdub 1 amp võimsusega, kui selle voolu tekitajaks on pinge 1 volt. Et 1 watt = 1 amp × 1 volt, siis tarvitatakse selle võimsuse jaoks ka nimetust *volt-amper*.

2) Voolates läbi juhi, teeb elekter nii siis tööd. Kui vooluhuht ise mingit välistööd ei tee, siis peab juhis see töö tervelt soojuseks moonduma, sest energia hävimatuse seaduse järele

ei või tööst midagi kaduma minna. Tekkinud soojus peab nii siis ekvivalent olema voolu tööga.

$$1 \text{ joule} = \frac{1}{9{,}81} \text{ m kg on ekvivalent } \frac{1}{9{,}81 \cdot 427} \text{ kg - kaloriga} =$$

$$= \frac{1000}{9{,}81 \cdot 427} \text{ g-kal} = 0{,}24 \text{ g-kal.}$$

Võimsusel 1 joule/sekundis = 1 watt peab nii siis igas sekundis 0,24 g-kal soojust tekkima. Sellest järgneb, et vool 1 amp sünnitab juhis, mille otsade vahel on pinge 1 volt, igas sekundis 0,24 g-kal soojust.

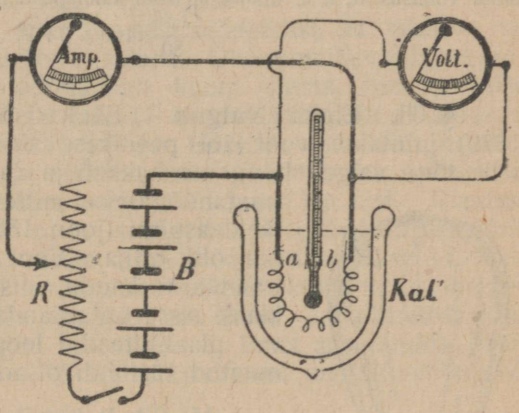
Voolutugevusel J amp ja pingel (juhi otsade vahel) $V_1 - V_2$ volti on võimsus $J(V_1 - V_2)$ watti; järjelikult tekib siis igas sekundis soojushulk $0{,}24 \cdot J(V_1 - V_2)$ g-kal; t sec sees tekib soojus:

$$S = 0{,}24 \; J(V_1 - V_2)\, t \text{ g-kal} \qquad 26a)$$

Sellest formulist järgneb otsekohe formul (26), sest $V_1 - V_2 = JR$, kus R on soojeneva juhi takistus. Seega on

$$S = 0{,}24 \; J^2 R t \text{ g-kal.}$$

3) Joule'i seaduse põhjal võib absoluutselt ära määrata voldi suurust. Selleks juhitakse vool läbi tuntud takistusega peenikese juhi ab (joon. 157), mis näiteks alkoholiga täidetud kalorimeetrisse (Kal.) on mahutatud. Voolu ahelasse lülitatud ampermeetriga mõõdetakse voolu tugevust, kuna kalorimeetrisse paigutatud juhi otsadega a ja b ühendatud voltmeetri skaala alles kontrolleeritud peab saama. Valides reostaadi R abil paraja voolutugevuse, laseme voolul t sekundit mõjuda ning leiame kalorimeetris tekkinud soojushulga S. Tundes ab takistuse suurust R, voolutugevust J ning voolu kestvust t, leiame formulist (26a), et pinge punktide a ja b vahel peab olema:




Joon. 157.

$$V_1 - V_2 = \frac{S}{0{,}24 \; J t} \text{ volti,}$$

mille järele voltmeetri skaalale ära märkida võib tema näitaja seisule vastava voltide arvu.

**Näited:** 1) Metalltraat, mille takistus $R = 8$ oomi, on $0^0$ C-ga vette asetatud. Kui läbi traadi 14 amp juhtida, kui ruttu hakkab siis 1 liiter vett keema? 1 sekundis tekib soojus $S = 0{,}24 \; J^2 R = 0{,}24 \cdot 14^2 \cdot 8$ g-kal $= 377$ g-kal.

1 liitri vee temperatuuri tõstmiseks $0^0$ C kunni $100^0$ C-ni kulub $1000 \times 100 = 100.000$ g-kal. Seega peab vett soendama

$$\frac{100000}{377} = 266 \text{ sekundit} = 4 \text{ min. } 26 \text{ sek.}$$

2) Läbi juhi voolab 1 minuti jooksul 14 amp, mille juures kalorimeetriga mõõdetud soojushulk on 2010 g-kal. Kui suur on pinge juhi otsade vahel?

Formuli (26a) järele on

$$V_1 - V_2 = \frac{S}{0{,}24 . J . t} = \frac{2010}{0{,}24 . 14 . 60} \cong 10 \text{ volti.}$$

3) Dünamomasin moondab mekaanilise töö elektri-energiaks. Masinast saadud vool paneb hõõgama 16 hõõglampi, millest igaüks tarvitab 0,5 amp pingel 220 volti. Mitu hobusejõudu kulub dünamomasina ümberajamiseks, kui teada on, et masinas kaduma läheb 20% ümberajamiseks kulutatud tööst?

Iga lamp tarvitab võimsuse (formul 27)

$$J (V_1 - V_2) = 0{,}5 . 220 \text{ volt-amperi} = 110 \text{ watt'i}$$

16-ne lambi jaoks kulub võimsus

$$W = 16 . 110 = 1760 \text{ watt'i} = 1{,}76 \text{ kilowatt'i.}$$

Et 1 watt on 1 joule/sec. $= \frac{1}{9 . 81} \frac{\text{mkg}}{\text{sec}} = \frac{1}{9{,}81 \cdot 75} \text{ HP} = \frac{1}{736} \text{ HP}$

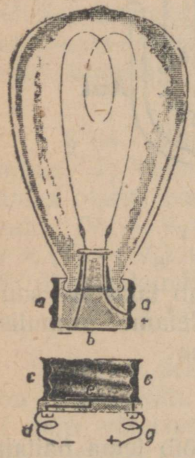
siis on

$$W = 1.75 \text{ kilowatti} = \frac{1760}{736} \text{ HP} = 2{,}39 \text{ HP.}$$

Kui masinas 20% tööst kaduma läheb, siis kujutab 2,39 HP 80% kulutatud võimsusest, s. t. dünamomasina käimapanemiseks kulub

$$\frac{2{,}39}{80} . 100 = 3 \text{ HP.}$$

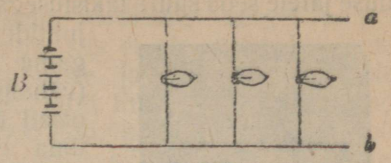
§ 65. **Elektri valgus.** 1) Elektri hõõglampides (Edison, 1879) juhitakse vool läbi peenikese süsi- või metalltraadi, mis selle tõttu valgelt hõõgama hakkab ja valgust välja kiirgab. Et traat hõõgamisel mitte ära ei põleks, asetatakse ta klaaspirni (joon. 158) ning pumbatakse pirnist õhk välja. Vool juhitakse pirni platintraadikeste kaudu, mis pirni kaelas õhutihedalt klaasi sisse on sulandatud. Pirni sees ühinevad plaatintraadid loogaks või spiraaliks painutatud süsiniidi otsadega.



Joon. 158.

Harilikult kinnitatakse pirni kaela peale metallkest (a a), mille sisse kruvilõige on lõigatud ning mida hõlpsasti näiteks seinale kinnitatud mutri (c c) — n. n. lambipesa sisse võib kruvida. Süsiniidi üks ots on ühenduses nimetatud metallkestaga (aa), tema teine ots aga lõpeb pirni otspinna külge kinnitatud plaadikesel b. Lambipesas on kruvilõige ühendatud vooluallika ühe poolusega ja pesa põhjas asuv plaadike e — teise poolusega. Kui lamp pesasse kruvida, siis läheb vool läbi kruvilõike süsiniiti ning, tuleb viimase teisest otsast läbi kokkupuutuvate plaadikeste b ja e tagasi.

Harilikult ühendatakse kõik lambid paralleelselt vooluahelasse, s. t. nad lülitakse kõik patareist B tulevate peajuhtide a ja b (joon. 159) vahele. Seesugusel ühendamisel võib iga lamp üksikult põleda, ilma et ta kudagi viisi oleneks teistest lampidest. Lülitaksime lambid järjestikku



Joon. 159.

ühte ahelasse, siis peaksid ühe lambi kustumisel ka kõik teised lambid korraga kustuma, katkeb ju kogu vool ühe lambi kustumisel. Et ühtlaselt „põleda," peavad kõigi lampide niidid ühe ja sama temperatuurini kuumenema. Selleks peab paralleelsel ühendamisel takistus kõigis ühesugustes lampides ühesuurune olema, on ju pinge iga lambi juures üks ja sama ja oleneb ju temperatuur läbi niidi voolava voolu tugevusest. Hõõglambid valmistatakse sellepärast kindlate pingete jaoks (näiteks 110 või 220 volti). Et tarvis on mitmesuguse heledusega lampe, siis võetakse niit kord jämedam, kord peenem. Jämedam niit laseb teadagi tugevama voolu enesest läbi ning tema hõõgav pind ja väljakiirgatav valgushulk on suurem. Hõõglampe ehitatakse 5 HK valgusest kunni 3000 HK valguseni.

Hõõglambi niidiks valitakse süsi sellepärast, et viimane ka väga kõrgetel temperatuuridel ei sulane. Ökonoomilise valguse saamiseks peab niit nimelt võimalikult kuum olema, sest et välja kiirgatav valgusenergia seda suurem on, mida kõrgem on kiirgava keha (niidi) temperatuur (V, § 80b). Uuemal ajal leiti metalle, nagu tantal, volfram ja zirkon, mis ilma et nad sulaneksid veel kõrgemaid temperatuure välja kannatavad kui süsi. Nendest metallidest valmistatakse n. n. metalltraat-hõõglambid, mis praegu mitmesuguste nimetuste all on üleüldisel tarvitusel (Tantallamp, Osramlamp jne.). Kiirgades valgust kõrgematel temperatuuridel kui süsiniidiga lambid, tarvitavad metalltraat-lambid üle 3 korra vähem energiat kui viimased: kuna süsi-lambis 1 HK valguse peale kulub 3 — 3,5 watti, tarvitavad metalltraat-lambid ainult 1 — 1,2 watti.

Veel kõrgemate hõõgamis-temperatuuride saavutamiseks tarvitatakse viimasel ajal volframniiti, mis mitte õhutusse ruumi, vaid lämmastikuga täidetud klaaspirni asetatakse. Selles gaasis võib volframniiti veel kuumemaks ajada, mille tõttu energiakulu 1 HK valguse peale kunni 0,5 watt'ini alaneb. Need lambid on tuntud nimetuse all poolvatt-lambid.

Samuti nagu kõigis teistes valgusallikates, nii muutub ka hõõglambis ainult väikene osa kulutatud energiast valguseks; paremal juhusel moodustab saadud valgusenergia umbes 5% kulutatud energiast, seega läheb siis ka hõõglambis tervelt 95% kulutatud energiast täiesti ilma kasuta soojusena kaduma.

2) Kui patarei poolustega ühendatud traatide otsad üks-teise külge puutuvad, siis on takistus traatide kokkupuutumise kohas väga suur, sest et harilikult ainult üksikud punktid juhtide pinnal

üksteise külge puutuvad. Ahelas tekkiv vool soendab siis Joule'i seaduse järele seda suure takistusega kohta väga intensiivselt, mille tõttu juhtide kokkupuutumiskoht heledalt hõõgama hakkab. On patarei küllalt tugev (vähemalt 40 volti), siis võime juhi otsad üks-teisest vähe eemale tõmmata, ilma et vool katkestuks: juhtide vahel tekib hele leek,—n. n. Volta-leek (Davy 1808). Viimast moodustavad traadiotsade hõõgamisel äraaurunud metallosakesed kui ka hõõgav õhk, mis ongi elektrijuhiks mõlema traadiotsa vahel.

Joon. 160.

Samuti kui traadiotsade vahel, nii võib Volta-leeki tekitada ka patarei poolustega ühendatud kahe süsivarva vahel; sel puhul on leek iseäranis hele, mispärast teda niisugusel kujul valgustamise otstarbeks tarvitatakse. Kui süte otsad näiteks kumerläätsa abil ekraanile projekteerida, siis näeme (joon. 160), et negatiivse poolusega ühendatud süsi terava otsaga, positiivsega ühendatud süsi aga nürida või koguni õõnsa otsaga on. Iseäranis heledalt hõõgab positiivse söe õõnsus ehk n. n. kraater; — seal on temperatuur järjelikult kõige kõrgem (ligi 4000°C). Et nimetatud õõnsus nagu õõnespeegel kiiri tagasi heidab, siis asetatakse elektri leeklampides positiivne süsi harilikult üles.

Kõrgel temperatuuril aurub süsivarva ots (ilma et ta sulaneks) ning ühineb õhu hapnikuga, s. t. süsi põleb aegamööda ära. Et vahe mõlema söe vahel suuremaks ei muutuks, peame süsi aegajalt koomale lükkama. Seda tehakse laboratooriumides käsitsi, leeklampides aga sellekohase regulaatori abil, milles elektromagnet vastava mekanismi kaudu süsi teine-teisest kogu aeg ühesuurusel kaugusel hoiab. Iseäranis kiirelt põleb positiivne süsi (ligi 2 korda kiiremini kui negatiivne), sellepärast võetakse see harilikult 2 korda jämedam kui negatiivne.

Leeklampide söed valmistatakse gaasretordi söest, mis peeneks jahvatatakse, mingi sideainega segatakse ja siis varvadeks pressitakse. Tihti tehakse süsi õõnes ning täidetakse õõnsus söepuru ja mingi soola (näiteks kaltsiumsoola) seguga. Volta-leegis tekib siis soolas leiduva metalli aur, mis heledalt hõõgades suure leegi sünnitab, nii et valgust mitte ainult söe otsad ei kiirga, vaid ka kogu leek ise. Leegi värv oleneb teadagi tarvitatud soolast.

Leeklampide juures peab pinge olema vähemalt 40 volti. Selle juures on voolu tugevus harilikult 3—12 amp ning valgustugevus 300 HK — 1500 HK.

Volta-leegil enesel ei ole suuremat takistust (viimase suurus oleneb leegi pikkusest), kuid temas tekib EMJ, mis vastu patarei EMJ-u on sihitud ning mille suurus on 30—35 volti. Et vool läbi leegi läheks, peab patarei EMJ tasakaalustama leegi

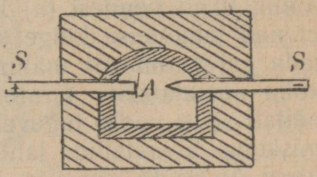
enese EMJ-u. Sellepärast võibki leek ainult mitte väiksemal kui 35 voldilisel pingel tekkida.

Et Volta-leek tekkida võib ainult võrdlemisi kõrgel pingel ja tugeval voolul (vähemalt 3 amp), siis ei ole võimalik leeklampe ehitada väikeste valgustugevuste jaoks. Pealegi ei ole nende leek just rahulik, lambi regulaatori liikuvad osad kuluvad jne. Kõigil nendel põhjustel tõrjuvad hõõglambid, iseäranis poolvattlambid, leeklampe valgustuspraktikast välja, sest hõõglampidel ei ole liikuvaid osi, nende tuli on rahulik ning neid valmistatakse igas suuruses. Olgugi, et leeklambi energiakulu on ainult 0,6 watti HK peale, ei seisa poolvattlambid ka selles suhtes nendest taga. Sellepärast tarvitatakse leeklampe praegusel ajal veel ainult seal, kus nõutakse ühe koha peale kontsentreeritud väga tugevat valgusallikat (projektsioon-laternas, kinematograafis, tuletornides jne.).

3) Ülevalkirjeldatud lampidest erineb n. n. Nernst-lamp, milles elektrivooluga hõõgama pannakse lühike magneesia-varvakene. Et magneesia külmalt elektrit sugugi ei juhi, siis peab nimetatud varvakest enne lambi „süütamist" soendama. Soenedes langeb magneesia-varvakese takistus, vool pääseb läbi tema ning paneb varva ühtlaselt hõõgama. Varvakese eelsoendamist toimetatakse kas lihtsalt tulileegiga või ümber varva mähitud plaatintraadiga, mis elektrivooluga lühikeseks ajaks hõõgama pannakse ja siis sellekohase elektromagnetiga vooluahelast eraldatakse. Nernst-lambi energiakulu on umbes sama suur kui leeklambi oma, s. t. ligi 0,6 watti HK peale. Praktikas ei näi temal mingisugust iseäralist tähendust olevat.

§ 66. **Elektri ahjud.** Volta-leegi temperatuur on kõigi maapealsete soojusallikate temperatuurist kõige kõrgem. Temas sulanevad koguni seesugused, kõrge sulanemispunktiga ained kui näiteks plaatina. Tema temperatuuril tekivad mitmesugused uued keemilised ühendused, mida teisel teel võimata saavutada jne. Näiteks ühinevad Volta-leegis pea kõik metallid süsinikuga n. n. karbiitideks. Tähtsamad viimastest on siliitsium-karbiit, — n. n. karborundum, mida tema suure kõvaduse tõttu tarvitatakse klaasi ja kõvade metallide lihvimiseks ja poleerimiseks; peale selle kaltsium-karbiit, millest tekib tuntud atsetüleen-gaas.

Seesuguste ühenduste valmistamiseks asetatakse ühinevad ained elektri-ahju (joon. 161) õõnesruumi A, milles süte SS vahel tugev Volta-leek tekitatakse. Leegiga kuumeneb see ruum kunni 3500°C-ni ning ained ühinevad. Ahi ise on valmistatud ainest, mis väga visa on sulanema (lubi, magneesia). Muu seas tarvitatakse elektri ahju ka kunstlikkude kalliskivide (rubiin, topaas, safiir jne.) valmistamiseks.



Joon. 161.

**Näited:** 1) Süsi-hõõglambi juures on pinge 65 volti. Läbi niidi läheb vool 0,8 amp; lamp annab 16 HK valgust. Kui palju tarvitab lamp energiat ühe HK peale?

Lamp tarvitab võimsuse (formul 27):

$$W = 0{,}8 \times 65 \text{ volt-amp} = 52 \text{ watt'i.}$$

1 HK peale kulub järjelikult $\frac{52}{16} = 3{,}25$ watti.

2) Osramlambi valgustugevus on 25 HK ja pinge 110 volti. Mitu amperi voolab läbi lambi, kui teada on, et 1 HK peale kulub 1 watt?

Et kuluv energia on 25 watti, siis on formuli (27) järele

$$J = \frac{W}{V_1 - V_2} = \frac{25}{110} \cong 0{,}23 \text{ amp.}$$

3) 3000 HK-lise poolwattlambil on pinge 220 wolti. Kui suur on vool ja lambiniidi takistus, kui energia kulu on 0,5 watti HK peale?

Lamp tarvitab võimsuse $w = 0{,}5 \cdot 3000 = 1500$ watti.

$$J = \frac{W}{V_1 - V_2} = \frac{1500}{220} \cong 6{,}8 \text{ amp;} \quad R = \frac{220}{6{,}8} = 32{,}3 \text{ oomi.}$$

§ 67. **Termoelekter.** 1) Kinnitame või joodame pikema vismutplaadi w—w (joon. 162) peale klambrisarnase vaskriba (Ku) otsad ja asetame niiviisi kujunenud metallraami sisse väikse teraviku otsa magnetnõela ns. Kui põhja-lõuna sihti paigutatud raamikese ühte otsa tulileegil kuumendada, siis pöördub magnetnõel põhja-lõuna sihist kõrvale (vaata joonistusel). Nõela pöördumise põhjuseks võib ainult olla mööda raami voolav elekter. Parema käe reegli järele peab voolul olema joonistusel näidatud siht, s. t. elekter peab voolama läbi kuumendatud jootmiskoha vismutist vaske. Soendame ka raamikese teist jootmiskohta või jahutame esimest, siis pöördub nõel jällegi põhja-lõuna sihti tagasi, mis näitab, et vool ainult niikaua kestab, kunni mõlema jootmiskoha temperatuur mitmesugune on. Seesugust soojuse mõjul tekkinud elektrivoolu hüütakse termovooluks, kirjeldatud metallpaari — termoelemendiks, kogu nähtust aga termoelektriliseks (Seebeck, 1821).

Joon. 162.

Selle asemel, et ühendada metallide mõlemad otsad, võime ainult ühed nendest (a) kokkujoota ja teised (b) aga nii asetada, et nad teine-teise külge ei puutu. Kui need lahtised otsad lülitada galvanomeetri mähisega üheks ahelaks, siis voolab jootmiskoha soendamisel termovool läbi galvanomeetri ning viimane näitab selle voolu tugevust. Kui mõõta temperatuurvahet jootmiskoha ja metallide lahtiste otsade vahel, siis leiame, et termovool on seda suurem, mida suurem on nimetatud temperatuurvahe.

Ainult teatavates piirides, mis olenevad tarvitatud metallidest, on termovool proportsionaalne temperatuurvahega. Õieti oleneb voolu tugevus ka temperatuuride absoluut kõrgusest. Hoiame näiteks ühe jootmiskoha (või elemendi lahtised otsad) alati temperatuuril 0° C ja tõstame järk-järgult teise

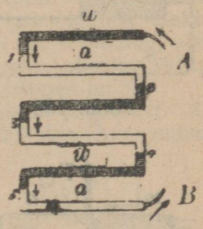
jootmiskoha temperatuuri, siis kasvab vool alguses proporsionaalselt temperatuuriga, siis ikka aeglasemalt, hakkab viimaks jällegi kahanema, langeb nullini ja voolab lõpuks vastupidises sihis.

2) Termovool ei teki mitte ainult vase ja vismudi, vaid ka teiste metallide vahel. Me võime kõik metallid sel kombel ritta seada, et voolu siht soendatud jootmiskohas igas, sellest reast võetud metallipaaris on eelpool seisvast metallist sihitud tagapool seisvasse metalli. Niisugune rida on:

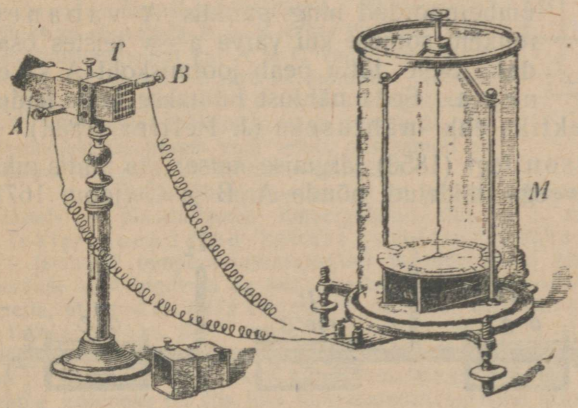
vismut, elavhõbe, plaatina, kuld, vask, tina, tsink, hõbe, raud, antimoon.

Jootmiskohtade ühesugusel temperatuurvahel on termovool ehk EMJ kahe metalli vahel seda suurem, mida kaugemal need metallid üks-teisest reas seisavad. Seega on termoelektromotoorne jõud vismudi ja antimooni vahel kõige suurem: on jootmiskohtade temperatuurid $0^0$ ja $100^0$ C, siis võrdub see EMJ 10,1 millivoldiga (0,0101 volti).

3) Termoelemendi EMJ on nii siis väga väike. Et teda suurendada, võib mitu elementi järjestikku üheks termosambaks ehk termopatareiks ühendada. Selleks joodetakse näiteks vismut- ja antimoonvarvakesed a ja w (joon. 163) otsapidi nii viisi kokku nagu see näidatud joonistusel. Soendame kõiki ühel pool seisvaid jootmiskohti (1, 3, 5 jne.), siis voolab termovool igas jootmiskohas vismudist antimooni, s. t. kogu ahelas ikka ühes ja samas sihis. Elementide EMJ summeeruvad siis ning otsade A ja B vahel on pinge vastavalt elementide arvule suurem. Harilikult koondatakse kõik elemendid sambakeseks T (joon. 164), mille otspindadel jootmiskohad asuvad. Ühendatakse termosamba poolused (A ja B) galvanomeetriga (multiplikaatoriga) M, siis on näiteks juba üsna nõrgast, samba T ühe otsa peale langevate soojuskiirte mõjust küllalt selleks, et galvanomeetrinõela pöörda. Seesuguse termosambaga mõõdetakse näiteks päiksespektrumi üksikute osade soojusenergiat (V. § 78₂).




Joon. 163.

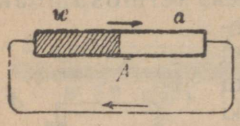



Joon. 164.

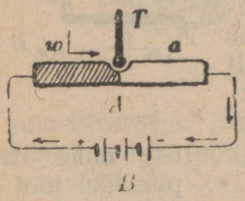
**Termoelementi tarvitatakse tihti ka temperatuuride mõõtmiseks: kui võrdlemisel hariliku termomeetriga galvanomeetri skaalale ära märkida termoelemendi jootmiskohtade temperatuurvahe termovoolu igal suurusel, siis võib nõela pöördumise järele skaalalt otsekohe ära lugeda nimetatud temperatuurvahe. Hoiame ühe jootmiskoha tuntud temperatuuril, siis leiame sel teel teise jootmiskoha ümbruses valitseva temperatuuri.**

Termopatarei ehitusviis on samasugune kui ülevalkirjeldatud termosamba oma. Kui ühed jootmiskohad näiteks tulileegis hoida ja teisi vastavate abinõudega jahutada, siis annab patarei voolu, mida näiteks akkumulaatorite laadimiseks võib tarvitada. Et seesuguses patareis ainult väga väike osa kulutatud soojusenergiast elektriks moondub, siis ei ole temal praktikas suuremat tähtsust.

§ 68. **Peltier- ja Thomson-effekt.** 1) Termoelemendis vismut-antimoon (w—a, joon. 165) moondub üks osa jootmiskoha A soendamiseks kulutatud soojusest elektriks. Elektri voolamisel noolega näidatud sihis kulub nii siis punktis A soojust. Asetame mõlemad metallid ühtlase temperatuuriga keskkonda, näiteks sulanevasse jäässe ning juhime patareist B (joon. 166) voolu läbi w—a, siis peab soojuse kulumise tagajärjel punkt A jahtuma, annab ta ju rohkem soojust ära kui varva w—a teised osad. Termomeeter T näitab, et see tõepoolest nii on; kallame õõnsusse A näiteks vett, siis võib elektri voolamisel vesi hanguda, olgugi et A ümbruses jää sulaneb.



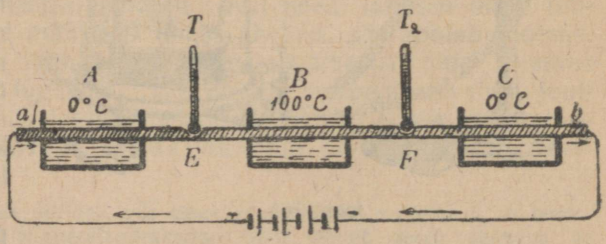
Joon. 165.



Joon. 166.

Juhime voolu vastupidises sihis läbi termoelemendi a—w, siis on kogu protsess ümberpöördud ning punktis A vabaneb rohkem soojust kui varva a—w teistes osades. Selle tõttu peab jootmiskoht A soenema. Seda nähtust hüütakse tema leidja järele Peltier-effektiks ehk -nähtuseks (J. Peltier, 1834).

2) W. Thomson tegi (1856) järgmise katse: ta juhtis pika vaskvarva ab läbi veega täidetud nõude A, B ja C (joon. 167), millest keskmine B temperaatuuril 100° C ja äärmised temperatuuril 0° C hoiti. Nõu B suhtes sümmeetrilistes punktides E ja F näitasid ter-

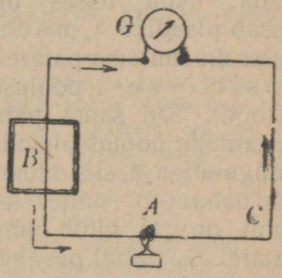


Joon. 167.

momeetrid $T_1$ ja $T_2$ juhi temperatuuri, mis mõlemas punktis arusaadavalt ühesuurune pidi olema. Kui läbi ab elektri voolu juhiti, siis tõusis temperatuur $T_2$ ja langes temperaatuur $T_1$. Enne voolu oli juhi ab temperatuuri langemine mõlemal pool sooja nõud B ühesugune. Punkti $T_2$ soenemisega muutub temperatuuri langemine pikkusel BF lamedamaks; punkti $T_1$ jahtumisega muutub ta pikkusel EB järsumaks. Soojema koha (B) suhtes muutub nii siis temperatuuri langemine päri voolu (BF) lamedamaks ja vastu voolu (BE) järsumaks. Nähtus on seesugune kui viiks elektrivool piki vaskjuhti soojuse enesega kaasa (n. n. positiivne Thomson-effekt). Samuti kui vases nii kannab elektrivool enesega soojust ka hõbedas, tsingis ja paljudes teistes metallides. Rauas, plaatinas ja niklis aga on nähtus ümberpöördud: nendes ainetes liigub soojus vastu elektrivoolu (n. n. negatiivne Thomson-effekt). Raudtraadis peab soojus elektrivoolu mõjul järjelikult selkombel piki juhti jagunema, et temperatuuri langemine päri voolu järsum on kui vastu voolu (punkt F on külmem kui E).

3) Peltier-effekt ei ole muud kui Seebeck'i termovoolu ümberpöördud nähtus (ühel nähtusel sünnitab kahe metalli jootmiskoha soendamine elektrivoolu, — teisel sünnitab elektrivool samas kohas soojust). Juba ammugi otsiti ka Thomson-effekti jaoks ümberpöördud nähtust, kuid näib, et alles 1916. a. katsetega tõestada võidi, et seesugune nähtus tõepoolest olemas on *).

Thomson-effekti ümberpöördud nähtus avaldub järgmiselt: Kui ühest ja samast metallist koosseisva ahela (joon. 168) ühte kohta (A) soendada, siis ei teki ahelas teadagi mingisugust elektrivoolu. Jahutame aga punkti A soendamise ajal juhti punktis B, siis näitab galvanomeeter, et ahelas vool tekib, mille siht vasktraadi puhul on jahutatud kohast B soendatud kohta A. Kahtlemata on siin voolu tekkimise põhjuseks juhi temperatuuri mittesümmeetriline langemine mõlemal pool punkti A. Et Thomson-effektiga sünnitada A ja B vahel järsumat temperatuurilangemist kui A ja C vahel, peaksime voolu läbi vasktraadi sihis AC juhtima. Katsest selgub, et kui kirjeldatud temperatuurijagunemist juhi soendamise ja jahutamisega sünnitada, siis tõepoolest iseenesest vool tekib, mis samuti on sihitud kui vastavas Thomson-effektiski.

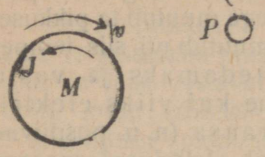


Joon. 168.

Kokkukõlas Thomson-effektiga on juhi soendamisel tekkival voolul raud-, nikkel- ja plaatintraadis ümberpöödud siht, s. t. raudtraadis voolab elekter soendatud kohast jahutatud kohta (punktist A punkti B). Et järsumal temperatuurilangemisel (soendatud ja jahutatud koha vahel) ka soojuse vool tugevam on kui lamedamal temperatuurilangemisel, siis paistab meile, et raudtraadis tugevam soojusvool enesega kaasa kannab elektri voolu. Selle asemel, et punkti A soendada ja B-d jahutada, võiksime näiteks piirituslambi leegiga piki raudtraati sihis AB edasi liikuda. Siis oleks leegi liikumise ees traat külm, tema taga aga soe. Soojusallikast (A) arvates kujuneks nii siis juhi temperatuurilangemine liikumissihis järsumaks, mille tõttu raudtraadis elektri vool peab tekkima, mille sint ühte langeb leegi liikumissihiga.

*) C. Benedicks, Annalen der Physik 1918, № 1.

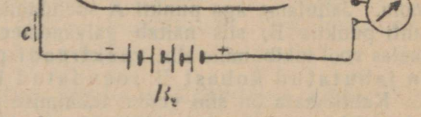
Kirjeldatud asjaolul põhjeneb hüpotees, mis seletab maakera magnetismi tekkimist: Et maakera pinnas palju rauda leidub, siis on tõenäolik oletus, et maapind samasuguse Thomson-effekti annab kui raud. Maakera tiirlemisel ümber oma telje (sihis v, joon. 169) soenevad maapinna üksikud punktid päikse kiirtel nii nagu tiirleks päike P ümber maakera idast läände. Eelmise järele peaks seesugune mööda maapinda edasiliikuv soendamine maapinnas elektrivoolu tekitama, mille siht ühte langeb soojusallika (päikse P) liikumissihiga. Seesugune vool tiirleks nii siis ümber maakera ühes päiksega idast läände ja sünnitakski „kellanäitaja reegli" järele magneti, mille põhja poolus asub maakera lõunanaba läheduses.



Joon. 169.

§ 69. **Termojoonid.** 1) Kui metalli kuumendada, siis hakkab ta, algades umbes 1000° C-st, enesest välja heitma negatiivseid elektriosakesi; ühed metallid teevad seda suuremal määral, teised väiksemal, kuid kõikidel on väljaheidetav elekter negatiivne. Seesuguseid negatiivseid osakesi, mida kuumendatud keha enesest hoovab, nimetatakse termojoonideks.

Termojoonide olemasolu tõestab järgmine katse: Õhutu klaasnõu ühte otsa on kinnitatud väike hõõgniit K (joon. 170), näiteks hariliku väikse hõõglambi metall-niit, mida elemendiga $B_1$ hõõgama võib ajada. Nõu teises otsas seisab plaadike A, mis ühenduses on suurema patarei $B_2$ positiivse poolusega (anood). Kui sama patarei negatiivne poolus ühendada hõõgniidiga K, siis moodustab patarei $B_2$ suhtes A—anoodi ja K—katoodi. Niikaua kui K külm on, ei näita tundlik galvanomeeter G ka üsna tugeva patarei $B_2$ puhul peaahelas ($B_2$ — a — K — A — $B_2$) mingit voolu, mis asusaadav, sest et vool K ja A vahel läbi tühja õhutu ruumi ei pääse. Kuumendame aga niiti K elemendi $B_1$ abil, siis näitab galvanomeeter G, et läbi tema mähise ($B_2$GA) elekter voolab ja nimelt seda tugevamalt, mida kuumemaks läheb niit K. Pöörame patarei $B_2$ poolused ümber, s. t. ühendame A tema — poolusega ja K tema + poolusega, siis ei teki ka niidi K hõõgamisel mingit voolu.



Joon. 170.

Nähtuse seletamiseks oletatakse, et kuum niit K negatiivseid elektroone enesest välja heidab. Need elektroonid satuvad elektrivälja, mis katoodi K ja anoodi A vahel olemas, ning tõmbuvad vastupidiselt elektriseeritud anoodi A külge. Sellega tekib piki klaasnõud läbi õhutu ruumi elektroonide vool i katoodilt anoodile, millel samasugused omadused on nagu harilikul elektrivoolul juhis.

Seesugust elektroonide voolu võib näiteks magnetvälja abil sihist KA kõrvale pöörda—samuti nagu harilikku elektrivoolugi. Selleks on ainult tarvis toru näiteks hoburauakujulise magneti pooluste vahele paigutada. Elektroonide voolusihti muudab ka põigiti sihitud elektriväli jne.

Anoodilt voolavad elektroonid juhti mööda patareisse $B_2$ ja sealt tagasi katoodi K. Et elektroonide vool on negatiivse elektri voolamine, siis peab harilik (positiivne) elektrivool, mida galvanomeeter näitab, otse vastupidi sihitud olema (§ 43₄).

Et vool katkeb, kui K anoodiks teha, siis võib kuum hõõgniit ainult negatiivseid elektroone enesest välja kiirgata, sest vastasel korral peaks vool ka ümberpöördud sihis läbi klaasnõu minema.

§ 70. **Metallide elektri-juhtivuse ja viimasega seotud soojusnähtuste teooria** põhjeneb peajoontes järgmistel ettekujutustel: Igas metallis on teatav osa vaba elektroone, mis ei ole seotud metalli aatomitega ja mis asuvad viimaste vahel sarnaselt kui gaasimoleekulid poorse keha poorides. Et metalli molekulid alatasa korratult edasi-tagasi liiguvad (soojusliikumine), siis ei või ka nende vahel asuvad elektroonid paigal seista, vaid ka nemad põrkuvad nii vastu molekuleid kui teisi elektroone. Ilmub metalljuhi otsade vahel pinge, siis tõmbuvad negatiivsed elektroonid positiivse otsa poole ning nende liikumine korraldub elektroonide vooluks piki traati. Voolu tugevus, kui ühes sekundis läbi juhi põiklõike voolava elektri hulk, oleneb voolavate elektroonide arvust ja nende kiirusest. Nii üks kui teine võib igas metallis isesugune olla, mispärast metallidel mitmesugune takistus on. Soeneb juht, siis hakkavad tema molekulid kiiremini ja suurema amplituudiga õõtsuma. On arusaadav, et sarnasel puhul piki juhti voolavad elektroonid tihedamini vastu molekuleid põrkavad, millega elektroonide kiirus ja järjelikult ka voolu tugevus väheneb: juhi takistus kasvab soenemisel.

Elektrivoolu elektroonid, oma teekonnal läbi juhi alatasa kokkupõrkudes viimase molekulitega, tõukavad ka neid kiiremini õõtsuma, mille tõttu juhi temperatuur voolul kasvab (Joule'i soojus). Selle juures tekib seda rohkem soojust, mida tihedamad on kokkupõrked, s. t. mida suurem on juhi takistus. Kokkupõrgetel moondub osa elektroonide kineetilisest energiast soojuseks. Elektroonide kiiruse, s. t. voolu alalhoidmiseks kulub vastav hulk elektrienergiat, mida juht väljast elektrivooluga alatasa juure saab. Seega sünnib Joule'i soojus juhti voolava elektrienergia kulul.

Juhi vabad elektroonid ei pääse juhist välja, vaid hoiduvad temas sarnaselt kui gaasimoleekulid kinnises nõus: need metallimoleekulid, mis mõne elektrooni on kaotanud (s. t. millest mõni elektroon kaugenedes vabaks on muutunud), on positiivselt elektriseerunud; nagu metalli sees nii asub ka tema pinnal hulk seesuguseid positiivseid moleekuleid. Viimased tõmbavad metallist välja põrkuvaid vaba elektroone tagasi ja ei lase seega elektroone metallist välja. Metalli sees ümbritsevad seesugused positiivsed moleekulid vaba elektrooni igalt poolt, mille tõttu nende mõju elektrooni peale tasakaalustub ja elektroon vabaks jääb. Alles siis, kui moleekuliga kokku põrgunud elektrooni hoog keha kuumenemisel nii suureks kasvab, et ta ületada suudab metalli pinnal asuvate positiivsete moleekulite tõmbejõudu, siis pääseb mõni elektroon metallist välja (termojoonid).

Õõtsudes korratult moleekulite vahel, on vaba elektroonidel samuti kui gaasimoleekulitel tung võimalikult laiali laguneda. Nagu gaasi või auru moleekulid selle juures tekitavad rõhumist vastu nõu seinu, nii rõhub see „elektrooni-aur" vastu metalli välispinda. Et metalli iga kubiksentimetri peale kuuluvate vabade elektroonide arv igas metallis isesuurune on, siis on metallides ka nimetatud rõhumine mitmesuguse suurusega. Puutub kaks isesugust metalli kokku, siis tahaksid elektroonid suurema rõhumisega metallist „diffun-

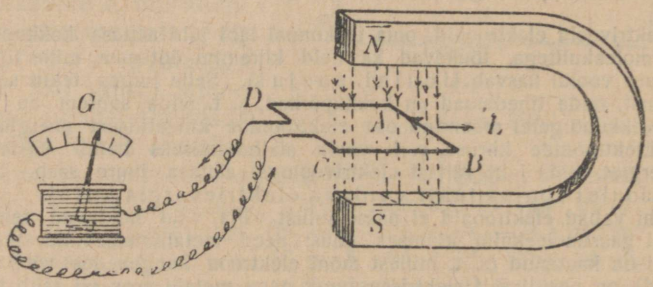
deeruda" väiksema rõhumisega metalli. Selle juures aga väheneb elektroonide arv esimese metalli kokkupuutuval pinnal; see pind elektriseerub ise positiivselt ning tõmbab teise metalli sattunud elektroonid tagasi enese külge. Tasakaalustub see tõmbejõud elektroonide diffunderimist tekitava jõuga, siis lõpeb elektroonide liikumine teise metalli, kuid mõlema metalli kokkupuutumiskohas hoidub potentsiaalvahe alles (elektriseerumine metallide kokkupuutumisel) *).

Tõuseb metallide kokkupuutumiskoha temperatuur, siis kasvab ka „elektrooni-auru" rõhumine mõlemas metallis, sest et elektroonid ühes moleekulitega soenedes kiiremini õõtsuma hakkavad. Ühtlasi suureneb siis nimetatud rõhumiste vahe, millega elektroonide diffundeerumise tung kasvab. Eelmise järele peab siis kasvama ka potentsiaalvahe metallide kokkupuutumiskohas (Termoelekter).

Vabades elektroonides peitub samuti nagu õõtsuvates moleekuliteski kineetiline soojusenergia. Sellepärast peab arvama, et soojuse edasikandumine sünnib mitte ainult moleekulite, vaid ka vaba elektroonide kaudu. Seda kinnitab muu seas asjaolu, et metallide soojuse ja elektri-erijuhtivused proportsionaalsed on (§ 57a). Nende nähtuste kui ka Thomson- ja Peltier-effekti teooria on aga niivõrd keeruline ja pealegi lõpulikult väljaarenemata, et siinkohal nende käsitamine oleks otstarbetu.

## Peatükk VIII:
## Induktsioon.

§ 71. **Põhinähtused.** 1) Lülitame juhi AB (joon. 171) galvanomeetri G mähise ahelasse ning hoiame tema tugeva magneti NS pooluste vahel. Kui juhti AB paralleelselt iseenesele sihis L sügavamale magnetvälja sisse lükata, siis pöördub galvanomeetri nõel, mis näitab, et tema mähises elekter voolab. Selle voolu põhjuseks peab olema mingi elektromotoorne jõud,




Joon. 171.

mis ainult juhi AB liikumise tagajärjel võis tekkida, sest et me katsel mingit muud põhjust ei leia, mis nimetatud elektromotoorset jõudu vooluahelas tekitada võiks. Selle, n. n. indutseeritud EMJ asukoht peab olema sama liikuv juht AB; tema suurust võime järjelikult mõõta AB otsadega ühendatud voltmeetriga. Indutseeritud EMJ mõjul tekkivat voolu hüütakse induktsioon-vooluks, kogu nähtust elektromagnetiliseks induktsiooniks.

*) Arvestused näitavad, et sel teel tekkiv potentsiaalvahe palju väiksem peaks olema kui ta tõepoolest on. Peab arvama, et selle põhjuseks on keemilised protsessid, mis kokkupuutuvate metallide potentsiaalvahe suurendavad (§ 37b).

Kui magneti pooluste vahel asuvat juhti AB paigal hoida, siis pöördub galvanomeetri nõel tagasi nulli peale; tõmbame aga AB tagasi, s. t. liigub juht vastupidises sihis, siis kaldub galvanomeetri nõel teisele poole nulli, mis näitab, et nüüd ka voolu siht endisele on vastupidine. Katsest järgneb:

Kui juht (AB) perpendikulaarselt magnetjõujoontele (NS) läbi magnetvälja liigub, siis indutseerub temas vool, mis niikaua kestab kunni juht liigub ja mille siht ühes juhi liikumissihi ümberpöördumisega vastupidiseks muutub.

Induktsioonvoolu sihi määrab järgmine „pahema käe reegel": **Kui pahem käsi sel kombel juhi liikumise (L) sihis hoida, et peopesa magnetjõujoonte (NS) sihti vastu on pöördud ja sõrmed juhi liikumissihti näitavad, siis näitab harguli hoitud põial indutseeritud voolu sihti.**

Meelespidamise kergendamiseks tuleb silmas pidada, et pahema käe reeglid määravad magnetväljas viibiva juhi liikumise (§ 49₃) või temas indutseeritud voolu sihi. Selle juures tuleb käsi alati nii hoida, et peopesa vastu magnetvälja jõujoonte sihti seisaks ja sõrmed tuntud sihti (voolu oma § 49₂ ja juhi liikumise oma § 71) näitaksid. Põial näitab siis mõlemal juhusel otsitud sihti (juhi liikumise oma – § 49₃ ja indutseeritud voolu oma—§ 71).

Parema käe reeglid määravad ainult põhjapooluse pöördumissihi (§ 45₁) ja voolu magnetjõujoonte sihi (§ 47₁).

2) Liigutame juhti AB (joon. 171) piki magnetvälja jõujooni, s. t. vertikaalselt üles-alla, siis ei näita galvanomeeter mingit voolu. Sellest järgneb, et **induktsioonvoolu tekkimiseks tingimata tarvilik on, et juht lõikaks magnetjõujooni.**

Liigutame juhti kord kiiremalt, kord aeglasemalt, siis kaldub galvanomeetri nõel kord kaugemale, kord lähemale. Et juht aegüksuses seda rohkem jõujooni lõikab, mida kiiremini ta liigub, siis selgub seesugusest katsest, et indutseeritud vool seda tugevam on, mida rohkem jõujooni lõikab juht aegüksuses.

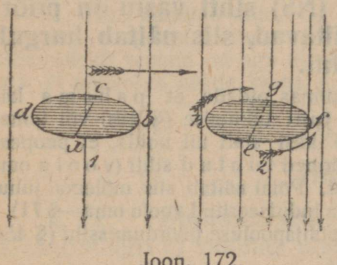
Teadagi ei muutu ülevalkirjeldatud nähtustes midagi, kui me juhi asemel liigutame magnetit: Me võime näiteks AB liikumatalt mingi aluse külge kinnitada ja magnetit ühes magnetväljaga edasi-tagasi või üles-alla liigutada. Esimesel juhusel tekib ka siis vool, teisel juhusel mitte. Induktsiooni juures on nii siis tähtis ainult juhi ja magnetvälja relatiivne liikumiue. Kokkuvõttes järgneb sellest seadus: **Kui juhi või magnetvälja liikumisel juht lõikab magnetjõujooni, siis indutseerub juhis vool, mis seda tugevam on mida suurem on aegüksuses lõigatud jõujoonte arv.**

3) Kui vaadelda mitte ainult juhti AB, vaid kogu raamikest ABCD, mida kinniseks vooluahelaks võib pidada, siis näeme, et sihis L liikuva raamikese puhul läbi pinna ABCD minevate jõujoonte arv kasvab, vastupidisel liikumisel — kahaneb. Vaadates vooluahela (ABCD) peale jõujoonte sihis (s. t. magneti N-pooluselt), on indutseeritud voolu siht esimesel juhusel vastu ning teisel — päri kellanäitaja liikumist (vaata joonistus). Tõstame aga või langetame ahelat ABCD, siis liigub ta piki jõujooni, ning läbi ahela pinna minevate jõujoonte arv ei muutu;

sel juhusel ei indutseeru ahelas ka voolu. Sellest järgneb n. n. Maxwell'i reegel kinnise vooluahela jaoks:

**Magnetväljas liikuvas kinnises vooluahelas indutseerub vool ainult sel puhul, kui läbi ahela pinna minevate jõujoonte arv muutub. Magnetvälja jõujoonte sihis vaadates on voolu siht ahela pinda lõikuvate jõujoonte arvu kasvamisel vastu kellanäitaja liikumist, nende kahanemisel aga päri kellanäitaja liikumist.**

Arusaadavalt on ka see seadus maksev nii ahela liikumisel paigalseisvas magnetväljas, kui ka magnetvälja liikumisel paigalseisva ahela suhtes.




Joon. 172.

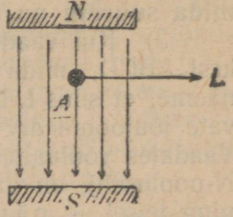
4) Liigub kinnine vooluahel abcd (joon. 172) kõigi oma osadega ühtlases magnetväljas, siis ei muutu ahela pinda lõikavate jõujoonte arv ka sel juhusel mitte kui ahel perpendikulaarselt jõujoontele liigub. Maxwelli reegli järele ei indutseeru seesuguses ahelas mingit voolu, olgugi et ahela kontuurid jõujooni lõikavad.

Pahema käe reegli (p. 1) abil on kerge tõestada, et see teisiti olla ei võigi: ahela eeskülg (abc) lõikab liikumisel sama palju jõujooni kui tema tagakülg (cda); nendel lõikumistel sünnivad ahela mõlemas pooles voolud, mille sihid on üks-teise vastu. Seega ei või koguahelas mingit voolu tekkida.

Satub vooluahel aga mitteühtlasse magnetvälja (efgh), siis kasvab samasugusel liikumisel nagu eelmisel juhuselgi tema pinda lõikavate jõujoonte arv ning Maxwelli reegli järele peab ahelas vool tekkima, mille siht on vastu kellanäitaja liikumist.

Sedasama ütleb ka pahema käe reegel (p. 1): et ahela eeskülg (efg) nüüd rohkem jõujooni lõikab kui tema tagakülg (ghe), siis on esimese poole vool tugevam kui teise poole oma ning kogu ahelas voolab elekter. Pahema käe reegli järele on tugevama (eeskülje) voolu siht vastu kellanäitaja liikumist, samasuguse sihiga on siis ka ahela üleüldine vool.

Pöördub kinnine vooluahel abcd (joon. 172) näiteks telje ac ümber, siis muutub läbi tema pinna minevate jõujoonte arv alatasa, olgu väli ühtlane või mitte ühtlane. Seega indutseerub ahelas vool, mille sihi jällegi Maxwelli reegel määrab. Viimane on seega täiesti üleüldine seadus, mis maksev igasugu kinnise ahela ja igasugu liikumise puhul.



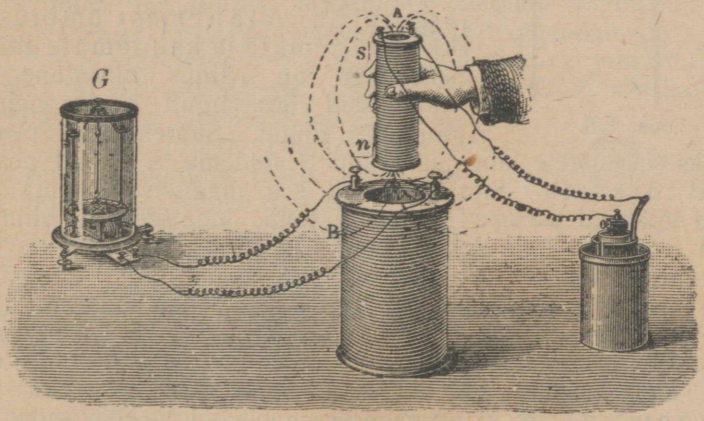

Joon. 173.

5) Elektronteooria järele on induktsioon otsekohene järeldus § 49$_3$ kirjeldatud nähtusest, kus magnetväljas asuv juht voolu mõjul liikuma hakkab: Et elektri vool muud ei ole kui elektroonide voolamine piki juhti, ja et voolujuhti alati ümbritseb kontsentriline magnetväli, siis peab ka iga üksikut liikuvat elektrooni ümbritsema samasugune magnetväli. Liigub näiteks elektroon A (joon. 173) sihis AL läbi

magnetvälja NS, siis ilmub ümber elektrooni magnetväli, mida kujutada võib kontsentriliselt ümber liikumissihi AL seisvate ringikujulíste magnetjõujoontega. See magnetväli on seotud elektrooniga ja liigub ühes temaga edasi, — umbes sarnaselt nagu läbi õhu liikuva kerakesega kaasa liigub kerakese ees tekkiv õhutihendus ja tema taga ilmuv õhuhõrendus. Liikudes sihis AL on elektroon sarnane positiivse vooluga, mille siht otse vastupidine elektrooni liikumisele (elektrooni liikumine on negatiivse elektri vool; võrdle § 434). Järjelikult tekib sihis AL liikuva elektrooni ümber samasugune magnetväli kui vastupidises sihis (LA) voolava positiivse elektri ümber. Viimase voolu jaoks on maksev „pahema käe reegel" (§ 493), mille järele seesugune vool paralleelselt iseenesele, s. t. perpendikulaarselt joonistuspinnale üles hakkab liikuma. Samuti peab siis perpendikulaarselt üles tõukuma ka sihis AL liikuma hakkav elektroon A.

Kujutame nüüd ette, et A on perpendikulaarselt joonistuspinnale seisva juhi lõikepind ja et kogu juht liigub magnetväljas NS paralleelselt iseenesele sihis AL. Samas sihis peavad ühes juhiga liikuma kõik tema vabad elektroonid. Kuid, liikudes sihis AL, tõukuvad elektroonid välja NS mõjul perpendikulaarselt joonistuspinnale üles, s. t. nad hakkavad piki juhti A üles liikuma. Seesugune elektroonide vool ei ole aga muud kui positiivse elektri voolamine vastupidises sihis. Sellepärast näitab juhi A otsadega ühendatud galvanomeeter, et (positiivne) vool joonistuspinna pealt tema alla on sihitud, s. t. just nii nagu see olema peab pahema käe reegli järele (§ 71).

§ 72. **Volta-induktsioon.** 1) Õõnsa rulli B (joon. 174) peale mähitud traadi otsad ühendame galvanomeetri G mähise otsadega. Läbi teise, peenema traatrulli A juhime elemendist voolu. Kui rull A kiirelt rulli B õõnsusesse langetada, siis näitab galvanomeeter, et mähises B vool tekib, mis niikaua kestab kunni A liigub. Tõstame A mähisest B välja, siis näitab galvanomeeter vastupidi sihitud lühiajalist voolu. Seda nähtust hüütakse Volta-




Joon. 174.

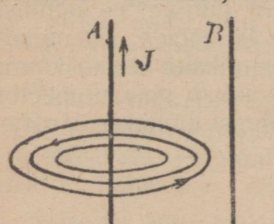
induktsiooniks, vastandiks magnet-induktsioonile, milles vool indutseeritakse magnetiga (§ 71).

Kinnitame rulli A õõnsusse raudpulga ja kordame katset, siis selgub, et indutseeritud vool ainult tugevam on ja et tema siht igal juhusel samasugune on kui eelmisel katsel.

§ 511 järele muutub raudpulk voolu mõjul elektromagnetiks; seega on kogu rull A sarnane hariliku magnetvarvaga, mis asub rulli teljel ja mille põhjapoolus on rulli selles otsas, mille peale vaadates elemendist tulev vool vastu kellanäitaja liikumist tiirleb. Kui rulli A asemel võtta harilik magnetvarb ja viimasega katset korrata, siis selgub, et kogu nähtuses tõepoolest midagi ei muutu. Seega peavad Volta-induktsiooni põhjused samad olema kui magnet-induktsiooni omad.

Magnetvarba ja elektromagnetit A ümbritsevad magnet-jõujooned, mis A langetamisel lõikavad rulli B peale mähitud traati. Et traadi keerud rullil B üks-teise kõrval seisavad, siis ei lõika jõujooned mitte ainult ühte traati, vaid iga keerdu. Kuna kõik keerud ühe pika juhi moodustavad, siis summeeruvad nendes indutseeritud EMJ-d, mille tõttu mähises B indutseeritud EMJ palju tugevam on kui üheainsa ringahela (keeru) puhul. Sellel põhjusel tarvitataksegi induktsioonnähtuste uurimistel üheainsa ringahela asemel traatrulli.

2) Lülitame juhi A (joon. 175) mingi vooluallika näiteks elemendi ahelasse, siis ei teki vool J ahela ühendamisel mitte korraga omas täies suuruses, vaid voolu tugevus kasvab järk-järgult (kuigi väga kiirelt) oma lõpuliku suuruseni. Ühes vooluga kasvab ka tema magnetvälja tugevus. Selle juures ei teki väli ahela ühendamise silmapilgul mitte kogu ruumis korraga, vaid ka tema laguneb järk-järgult juhi A lähemast ümbrusest ikka kaugemale ja kaugemale laiali. Sellepärast on nähtus niisugune, kui suureneksid järk-järgult voolu magnet-jõujoonte ringid. Suurenemisel peavad nad üks-teise järele läbi naaberjuhi B minema, s. t. nad peavad juhti B lõikama. Siin liigub nii siis magnetväli, tema jõujooned lõikavad paigalseisvat juhti, indutseerides viimases tuntud seaduste järele voolu. Ahela katkestamisel kahaneb vool J järk-järgult nullini. Voolu magnetjõujoonte ringid nagu tõmbuvad selle juures ümber voolu A kokku; nad lõikavad nüüd juhti B, liikudes vastupidises sihis. Voolu katkestamisel tekkiv induktsioonvool peab järjelikult ka vastu endist sihti voolama. Samasugused on nähtused voolu J kasvamisel ja kahanemisel, on ju esimene sarnane voolu tekkimisega, viimane — tema katkestamisega.



Joon. 175.

Asetame kogu rulli A mähise B õõnsusse (joon. 174) ning tekitame (suurendame) rullis A primäärvoolu või katkestame (nõrgendame) teda, siis kasvab või kahaneb ühes vooluga rulli A

magnetväli; viimase jõujooned lõikavad selle juures mähise B keerde ja indutseerivad seal voolu, mille siht on primäärvoolu tekkimisel (kasvamisel) ühtepidi ning tema katkemisel (kahanemisel) vastupidi. Mähise B otsadega ühendatud galvanomeeter näitab, et primäärvoolu muutumisel tekib tõepoolest induktsioonvool, mis seda tugevam on, mida kiiremini sünnib primäärvoolu tugevuse muutumine, s. t. mida kiiremini primäärvool tekib või katkeb.

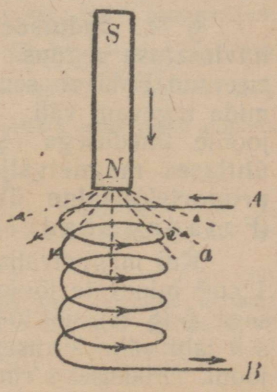
§ 73. **Lenz'i seadus.** 1) Indutseeritud voolu sihi määramiseks on väga käepärane H. Lenz'i leitud (1834) ja tema järele nimetatud seadus:

**Magnetite ja voolujuhtide liikumisega tekitatud induktsioonvoolul on alati seesugune siht, et tema magnetväli takistab induktsiooni tekitavat liikumist.**

Voolu A (joon. 175) lähendamisel juhile B indutseerub viimases vool. Et see vool takistada võiks juhis A lähenemist, peab tema siht olema vastupidine peavoolule J, sest et ainult vastupidi sihitud paralleelsed voolud eemale tõukuvad (§ 50) ja seega juhtide lähenemist takistada võivad. Et indutseeritud vool mähises B (joon. 174) takistaks rulli A lähenemist, peavad mõlemate rullide keerud üks-teist eemale tõukama. Nendes keerdudes, nii siis ka kogu rullides, peab voolude siht olema järjelikult üks-teise vastu: **lähendamisel indutseeritud voolu siht on vastupidine primäärvoolule.**

Et kaugendamisel indutseeritud voolu siht ümber pöördub, primäärvoolu oma aga endiseks jääb, siis on **juhtide kaugendamisel indutseeritud voolu siht samasugune kui primäärvoolu oma.** Tõepoolest: ühesihilised voolud tõmbuvad külge (§ 50), — seega takistavad nemad juhtide kaugendamist.

Voolu kasvamine või tekkimine on sarnane juhtide A ja B (joon. 175) lähendamisega: algab vool juhis A, siis laienevad järk-järgult tema magnetjõujooned ja lõikavad juhti B samuti kui läheneks A kogu oma jõujoontega B-le. Voolu kahanemine ja katkemine aga on siis sarnane juhtide kaugenemisega. Sellest järgneb: **Primäärvoolu kasvamisel või tekkimisel indutseerub naaberjuhis vastupidine, tema kahanemisel või katkemisel aga samasihiline vool.**



Joon. 176.

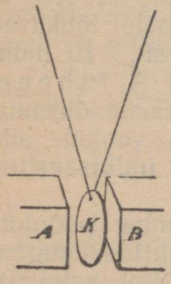
2) Lenz'i seadus on maksev ka magnetinduktsiooni kohta: selleks et solenoiid AB (joon. 176) takistaks magnetpooluse N lähenemist, peab temas seesugune vool tekkima, et solenoiidi ülemises otsas ka põhjapoolus tekiks. Selleks

aga peab induktsioonvool — solenoiidi ülemise otsa peale vaadates — vastu kellanäitajat tiirlema (§ 48).

Samasuguse sihi annab induktsioonvoolu jooks ka „pahema käe reegel" (§ 71₁). Magneti langetamisel liigub näiteks joonistuse pinnal asuv jõujoon Na ülevalt alla, lõigates solenoiidi keeru parempoolset külge. Nähtus on samasugune kui liiguks solenoiidi keerd alt-üles. Pahema käe reegli järele peame pahema käe sel kombel hoidma, et sõrmed näitaksid juhi liikumissihti (alt-üles) ja peopesa oleks pöördud vastu jõujoone sihti (s. t. vastu poolust N), perpendikulaarselt jõujoonele Na). Sel juhusel näitab siis pöial joonistuspinna taha, nii et solenoiidi keeru paremal küljel ka vool on sihitud joonistuspinna taha.

Magnetpooluse N tõstmisel (kaugendamisel) võib solenoiid seda liikumist takistada, kui tema ülemises otsas lõunapoolus tekib, mis magneti põhjapoolust N külge tõmbab. Selleks peab aga induktsioonvoolul nüüd vastupidine siht olema, s. t. ta peab— soleoniidi ülemise otsa peale vaadates—päri kellanäitajat tiirlema.

3) Lenz'i seadust iseloomustab muu seas järgmine katse: Riputame niidi otsa õhukese vaskketta K (joon. 177) tugeva elektromagneti pooluste A ja B vahele, nii et ketas põigiti õõtsudes A ja B vahelt vabalt läbi võib liikuda. Senni kui elektromagneti mähises voolu ei ole, õõtsub ketas vabalt edasi-tagasi. Tekitame aga A ja B vahel magnetvälja, siis jääb ketas pooluste vahele peatama nagu takistaks magnetväli ketta liikumist: Nagu igas juhis nii indutseerub ka kettas induktsioonvool, kui ta perpendikulaarselt läbi magnetvälja liigub. See vool ei lähe siin aga mitte mingit traat-ahelat mööda, vaid ta tiirleb ainult ketta metallis sarnaselt kui asuks kogu vooluahel ketta sees. Seesugust voolu hüütakse keerisvooluks ehk tema leidja järele ka Foucault-vooluks. Tema magnetväli takistab ketta liikumist läbi elektromagneti välja, nii kui see olema peabki Lenz'i seaduse järele.



Joon. 177.

§ 74. **Indutseeritud EMJ suurus; induktsioon ja energia hävimatuse seadus.** 1) Faraday leidis katse teel, et juhis indutseeritud EMJ on seda suurem, mida kiiremini liigub juht ning mida tugevam väli. Et magnetvälja tugevust kujutada võib jõujoonte tihedusega (§ 8), siis ütlevad nimetatud seadused, et **ühtlases magnetväljas liikuvas juhis on indutseeritud EMJ proportsionaalne ühes sekundis lõigatud jõujoonte arvuga** (Faraday seadus).

Kui magnetvälja sel kombel jõujoontega kujutada, et läbi 1 cm² minevate jõujoonte arv võrduks arvuliselt välja tugevusega $\mathfrak{H}$ (§ 8₅), siis lõikab 1 cm pikkune juht, mis perpendikulaarselt läbi välja kiirusega v cm/sec liigub, igas sekundis $v \times \mathfrak{H}$ jõujoont. Pikkusel $l$ cm lõikab sama juht siis $l$ korda rohkem jõujooni, s. t. $N = l.v.\mathfrak{H}$ jõujoont sekundis. Ülevalnimetatud seaduse

järele võrdub arv N indutseeritud elektromotoorse jõu E suurusega, kui viimast mõõta elektromagnetilistes üksustes, s. t.

$$E = \mathfrak{H} . l . v \qquad 28)$$

Teeme formulis (28) $\mathfrak{H} = 1$, $l = 1$ ja $v = 1$, siis on ka $E = 1$. Selle põhjal valitakse elektromagnetilises mõõdusüsteemis elektromotoorse jõu ehk potentsiaali üksuseks see EMJ, mis indutseerub 1 cm pikkuses juhis, kui viimane perpendikulaarselt jõujoontele kiirusega 1 cm/sec läbi magnetvälja liigub, mille tugevus on 1.

Et 1 volt × 1 amper = 1 watt = joule/sec = $10^7$ erg/sec (§ 64), siis on

$$1 \text{ volt} = \frac{10^7 \text{ erg/sec}}{1 \text{ amp.}};$$

Võimsust mõõdetakse nii elektromagnetilises kui elektrostaatilises süsteemis samade absoluutse süsteemi üksustega (erg/sec). Seame 1 amperi asemele sama voolutugevuse elektromagnetilistes üksustes (1 amp = 1/10 VMÜ), siis kujutab ülevalleitud murd ühele voldile vastavate elektromagnetiliste potentsiaalüksuste arvu (lühendatult potentsiaali elektrom. üksus = = PMÜ), s. t.

$$1 \text{ volt} = \frac{10^7 \text{ erg/sec}}{1/10 \text{ VMÜ}} = 10^8 \text{ PMÜ};$$

Üks volt on nii siis PMÜ-st $10^8$ korda suurem.

2) Eelmises punktis nimetatud Faraday seadus tuletub otsekohe energia hävimatuse seadusest: Lenz'i seaduse järele takistab induktsioonvool juhi liikumist. Et ületada seda takistust, peame kulutama mekaanilist tööd. See mekaaniline töö moondubki iudutseeritud voolu elektrienergiaks. Energia hävimatuse seaduse järele peab kulutatud mekaaniline töö ekvivalent olema indutseeritud elektrienergiaga. Tundes selle töö suurust, leiame indutseeritud voolu energia ning viimasest indutseeritud EMJ suuruse.

Biot-Savart'i seaduse järele mõjub voolujuht pikkusel $l$ cm magnetpooluse m peale jõuga (formul 16, § 53₂)

$$f = k \frac{mJl}{r^2} \sin \alpha \text{ düüni.}$$

Mõju ja vastumõju seaduse põhjal mõjub aga magnetpoolus m sama suure jõuga r cm kaugusel seisva voolujuhi $l$ peale. Suurus $\frac{m}{r^2}$ kujutab pooluse m poolt tekitatud magnetvälja intensiivsust ($\mathfrak{H}$) kaugusel r cm asuvas punktis (sest Coulombi seaduse järele mõjub magnetväli kaugusel r seisva üksuspooluse peale jõuga $\frac{m.1}{r^2} = \frac{m}{r^2}$, mis § 8₅ järele kujutabki välja intensiivsust $\mathfrak{H}$). Et ka voolujuht $l$ kaugusel r cm poolusest m seisab, siis on ka tema ümbruses selle pooluse väljatugevus $\mathfrak{H} = \frac{m}{r^2}$, nii et eelmise formuli järele voolu peale mõjuma peab jõud

Seisab voolujuht perpendikulaarselt välja jõujoontele, siis on $\alpha = 90°$ ja $\sin 90° = 1$. On J mõõdud elektromagnetilistes üksustes, siis on $k = 1$ (§ 54₂), seega on jõud

$$F\mathfrak{H}Jl \qquad 29)$$

Kiirusega v cm/sec lükatava juhi puhul peame igas sekundis ületama liikumist takistavat jõudu F pikkusel v cm. Selleks kulub igas sekundis töö vF. Samasuur peab olema indutseeritud voolu J töö ühes sekundis. § 64 järele võrdub voolu võimsus JE-ga. Seega on $JE = vF = v\mathfrak{H}Jl$, ehk

$$E = \mathfrak{H}lv.$$

Et 1 voldis on $10^8$ PMÜ-st, siis on elektromotoorne jõud:

$$E = 10^{-8} \Phi / v \text{ volti} \qquad 28a)$$

§ 75. **Omainduktsioon.** 1) Voolu tugevuse muutumisel ei indutseeru EMJ mitte ainult naaberjuhtides, vaid ka muutuva voolu enese juhis. Seesugust induktsiooni hüütakse omainduktsiooniks.

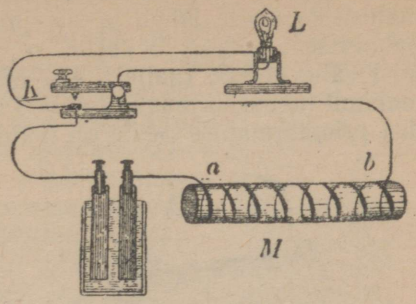
Juhime voolu näiteks läbi solenoiidi, siis laienevad voolu tekkimisel tema magnetjõujooned ning viimased lõikavad solenoiidi enese keerde samuti kui mingi teise mähise omi. Samal kombel kui naabermähistes nii indutseerub voolu tekkimisel (kasvamisel) ka voolu enese juhis (solenoiidis) tekkivale voolule vastupidi sihitud EMJ (§ 73). Voolu katkestamisel (kahanemisel) lõikuvad tema magnetjõujooned voolu juhiga ümberpöördud sihis ja indutseerivad seega voolujuhis katkevale voolule päripidi sihitud EMJ.

Teadagi avaldab indutseeritud EMJ mõju peavoolu tugevuse peale: voolu tekkimisel takistab omainduktsiooni EMJ voolu kasvamist, nii et viimane alles teatava aja jooksul oma täie suuruseni paisub. Nii kaua kui voolu tugevus ühesuuruseks jääb, seisavad kõik tema jõujooned paigal ning mingisugust omainduktsiooni nähtust ilmuda ei või. Hakkame aga voolu nõrgendama (katkestama), siis indutseerub voolu toetav EMJ, mis takistab voolu kahanemist. Selle tõttu ei lange vool mitte korraga nullini, vaid järk-järgult teatava lühikese aja vältel.

Ka omainduktsiooni EMJ suurus oleneb jõujoonte arvust, mis peavoolu juhti ühes sekundis lõikavad. On vool ise tugev, siis on tema väli intensiivne ning jõujoonte hulk suur, millega indutseerub ka tugev EMJ. Kahaneb vool kiirelt, siis lõikab tema juhti ühes sekundis suur hulk jõujooni, mis on tugeva EMJ põhjuseks. Peale selle määrab omainduktsiooni EMJ suuruse voolujuhi keerdude arv ja juhi kogu pikkus. Et iga jõujoon hulga (kui mitte kõiki) juhikeerde lõikab, siis summeeruvad üksikutes keerdudes indutseeritud EMJ nagu järjestikku ühendatud elementide omad. Selle tõttu on mähise omainduktsiooni EMJ seda suurem, mida rohkem temal keerde. Iseäranis tugevaks saab rulli omainduktsioon, kui temasse paigutada pehme raudvarb. Viimane koondab enesesse piki rulli õõnsust minevate jõujoonte osad ning juhib neid nii, et nad hävimisel peavad lõikama mähise kõiki keerde.

Kõigil nendel põhjustel võib omainduktsiooni EMJ palju suuremaks kasvada kui peavoolu pinge mähise otsade vahel. Lülitame näiteks elektromagneti M elemendi ahelasse (joon. 178) ja ühendame hõõglambi L nii, et ta avatud kontakti K juures seisaks järjestikku elektrimagneti ja elemendiga, siis võime lambi suuruse nii valida, et ta elemendi pingega veel mitte ei hõõgu. Ühendame nüüd silmapilguks kontakti K, nii et tugev

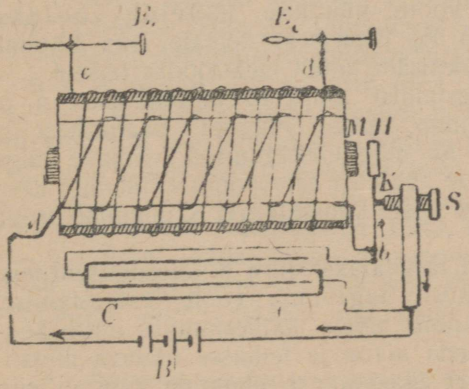
vool ainult läbi M läheb ja avame kontakti uuesti, siis indutseerub elektromagneti mähises tema voolu katkemisel tugev omainduktsiooni EMJ (otsade a ja b vahel). Viimane summeerub (avatud kontakti K puhul) elemendi EMJ-ga, mille tõttu läbi lambi L tugev voolutõuge läheb. Nii vilksatub lamp iga kord heledalt, kui kontakti K avada.




Joon. 178.

On vooluahelal suur omainduktsioon, siis tekib tema voolu katkestamisel nii suur EMJ, et katkestamiskohas pikem säde ilmub (avamissäde). Seesugust sädet näeme näiteks elektrikella plaatinkontakti juures kui ka iga elektromagneti vooluahela avamiskohas. Teadagi indutseerub seesuguses ahelas EMJ ka voolu tekkimisel; katsed näitavad aga, et voolu katkestamisel on omainduktsiooni EMJ palju suurem kui voolu tekitamisel. Selle põhjuseks on asjaolu, et katkestamisel vool kiiremini kahaneb kui ta ahela ühendamisel kasvab.

2) Omainduktsiooni tõttu voolab elekter mööda juhti sarnaselt kui oleks temal inertsus; ahela ühendamisel ei hakka elekter mitte silmapilkselt täie kiirusega liikuma, vaid tal kulub teatav aeg selleks, et paisuda täie tugevuseni (kiiruseni). Kord juba liikudes, ei hävine tema kiirus ahela katkestamisel mitte korraga, vaid järk-järgult, nii et elektri liikumine juhis ka peale jõu (elektrivälja) kadumist veel mõni aeg nagu hooga edasi kestab. Selle põhjal kogub elekter ahela katkestamiskohas juhi otsadele ning viimaste vahel ilmub võrdlemisi tugev potentsiaalvahe (omainduktsiooni EMJ).

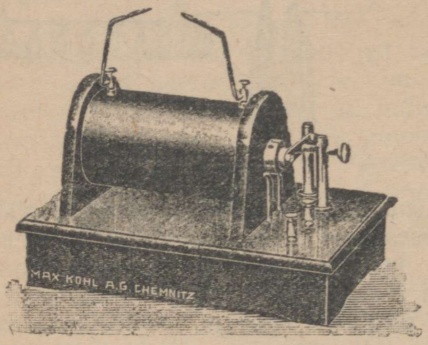



Joon. 179.

§ 76. **Induktsioon-aparaadid.** 1) Induktsioon-aparaadid ehk induktorid võimaldavad võrdlemisi madala pingega vooluallikast saadud elektrienergia pinget kuitahes kõrgele tõsta. Et väga kõrgetel pingetel avatud vooluahela otsade vahel säde ülehüppab, siis nimetatakse induktorid tihti ka sädeinduktoriteks.

Tuntud Ruhmkorff-induktori skeemi kuju-

tab joonistus 179: Patareist B voolab elekter juhi a kaudu elektrimagneti MM mähisesse, milles ta jämedat traati mööda läbi mähise keerdude läheb ja siis juhi b ja kontakti K kaudu tagasi patareisse voolab. Sellel n. n. primäär-mähisel on võrdlemisi vähe keerde (näiteks 40—50), ning tema ülesanne on võimalikult tugevasti magnetiseerida raudsilindrit MM. Jämedast traadist primäärmähise peale on mähitud väga peenike (0,1—0,15 mm läbimõõduga) siidiga ülepunutud vasktraat, mille keerdude arv võimalikult suur (kunni mitukümmend tuhat) ja mille mõlemad otsad c ja d on ühenduses isoleeritud elektroodidega $E_1$ ja $E_2$. Tekitame või katkestame voolu primäärahelas, siis kasvab või kahaneb elektromagneti magnetväli, ning viimase jõujooned, lõikudes sekundäär-mähise cd keerdudega, indutseerivad seal seda suurema EMJ, mida kiiremini muutub vool ja mida suurem on sekundäärmähise keerdude arv. Et viimane väga suur on, siis võib pinge sekundäärmähise otsade ja elektroodide $E_1 E_2$ vahel kasvada ülisuureks (kunni mitusada tuhat volti).




Joon. 180.

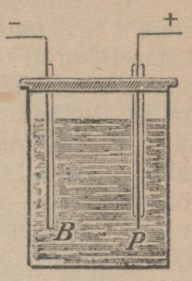
Sekundäärmähises indutseerub EMJ ainult primäärvoolu tekkimise ja katkemise silmapilkudel, kusjuures tema siht primäärvoolu tekkimisel on sihitud ühtepidi, katkemisel aga teisipidi. Kui primäärvoolu vahetpidamata kiirelt katkestada ja uuesti tekitada, siis tekib sekundäärmähises alatasa oma sihti vahetav tugev EMJ. Ühendame selle juures elektroodid $E_1 E_2$, siis sünnitab see EMJ sekundäärmähise ahelas elektrivoolu, mis samuti kui EMJ-ki alatasa oma sihti vahetab. Seesugust voolu hüütakse vaheldavvooluks. Nihutame elektroodid $E_1$ ja $E_2$ üksteisest eemale, siis hüppab nende kõrge pinge tõttu elektrisäde ühelt elektroodilt teisele.

2) Primäärvoolu katkestamist toimetab automaatselt n. n. katkestaja. Viimane kujutab lihtsat Wagneri haamrikest H (§ $52_2$), mis elektromagneti M magnetiseerumisel viimase külge tõmbub ja sellega kontakti K avab. Peale voolu katkemist tõmbab vedru haamrikese tagasi vastu kontaktkruvi S, ühendab seega vooluahela uuesti jne.

Suurematel induktoritel tarvitatakse tihti mitmesuguseid teisi katkestajaid, mis võimaldavad tugevama voolu katkestamise. Elavhõbe-katkestajas sünnib ahela katkestamine mitte kontakti K vahel, vaid elavhõbeda nivoo ja temasse ulatava metallteraviku vahel. Haamrikese H edasi-tagasi liikumine kandub siin sellekohaste kangide abil nimetatud metallteraviku peale, mis

üles-alla õõtsudes vaheldamisi elavhõbedasse langeb ja sealt välja tõstub ühendades ja katkestades sellega vooluahelat.

Väga tugeva sekundäärpinge annab tema leidja järele nimetatud Wehnelt-katkestaja (joon. 181): klaaspurgis asuvasse nõrka väävelhappesse ulatub tinaelektrood B (katood) ja läbi klaas- või portselaantoru minev plaatintraat P. Viimasest puutub väävelhappega kokku ainult tema alumine otsakene, kuna traadi ülemine osa nimetatud torukesega on isoleeritud. Kui seesugune katkestaja lülitada patarei ja induktori primäärmähise vahele (nälteks B ja a vahele, joon. 179), nii et elektrood P on patarei (+) poolusega ühenduses, siis läheb vool läbi katkestaja väävelhappe primäärmähisesse. Tema väikse pinna tõttu on plaatinteravikul P väga suur takistus, ta kuumeneb kiirelt ning vesi tema ümbruses aurub, lahutub isegi vesinikuks ja hapnikuks. Tekkinud auru- ja gaasikiht eraldab plaatinteraviku vedelikust ning katkestab sellega voolu. Voolu katkemise silmapilgul aga tekib avamissäde (§ 75₁), millega gaasid süütuvad ning mis seega kogu gaasikihi hävitab. Tekib uus vool ja uus gaasikiht, mis ahela uuesti katkestab jne. Wehnelt-katkestajas kahaneb vool katkemisel väga kiirelt. Selle tõttu indutseerub sekundäärmähises temaga palju tugevam EMJ kui teiste katkestajatega.



Joon. 181.

3) Et kiirendada voolu kahanemist ja sellega tekitada suuremalt sekundäärpinget, tarvitatakse mekaaniliste katkestajate juures kondensaatorit CC (joon. 179). Kondensaatori ülesanne on võimalikult kiirelt kustutada avamissädet, mis ilmuma peab kontakti K juures, ja mille läbi vool edasi kestab, nii et tema kahanemine aeglastub. Ühendatakse kondensaator paralleelselt sädeme kohale (haamri H vedru ja kruvi S külge), siis kulub peavoolu katkemise silmapilgul tekkiv omainduktsiooni EMJ kondensaatori laadimiseks, millega pinge kontakti K vahel alaneb ja säde kiiremini kustub. Et meil võimalik ei ole kiirendada peavoolu kasvamist ahela ühendamisel, siis sünnib katkemine alati kiiremini kui tekkimine. Sellepärast on sekundäärmähise pinge peavoolu katkemisel alati tugevam kui tema tekkimisel. Lükkame $E_1$ ja $E_2$ nii kaugele teine-teisest, et peavoolu tekkimisel indutseeritud EMJ ei suuda enam sädet tekitada, siis ilmub säde ainult peavoolu katkemisel ning elekter voolab läbi sädemete nii siis ikka ühes ja samas sihis. Niisugusel puhul võime rääkida induktori positiivsest ja negatiivsest poolusest.

Kondensaatori moodustavad harilikult õhukesed tinalehed (staniool lehed), mis paraffiinpaberiga eraldatult üks-teise peale laotakse, nii et kogu pakis vaheldamisi ikka üks tinaleht ja üks paberleht seisab. Esimene, kolmas,

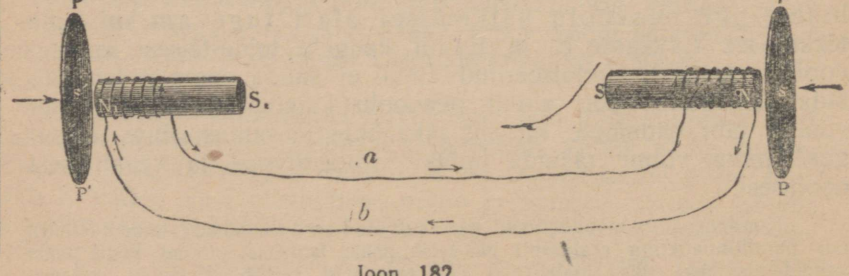
viies jne. tinaleht ühendatakse üks-teisega kondensaatori ühes otsas; teine, neljas, kuues jne. leht aga ühendatakse omavahel kondensaatori teises otsas. Kui mõlemad ühenduskohad näiteks patarei poolustega ühendada, siis seisab iga negatiivse tinalehe kõrval temast paraffiinpaberiga isoleeritud positiivne tinaleht, ning kogu kondensaator mõjub sarnaselt kui seisaks üks suur positiivne ja negatiivne tinaleht kõrvuti.

4) Sekundäärmähise kõrvutiseisvate keerdude vahel on suur pinge. Sellepärast peavad keerud olema väga hästi isoleeritud, vastasel korral tekiks säde keerdude eneste vahel, mis rikuks induktori. Sellepärast valatakse suuremate induktorite sekundäärmähise ümber mingi hea isolaator, näiteks sula paraffiin, eboniit jne. Hangudes moodustab seesugune isolaator ühtlasi hea kaitse sekundäärtraadi mekaaniliste vigastuste vastu. Sarnase, eboniidi sisse asetatud sekundäärmähisega induktori välimust kujutab joonistus 180.

Induktor moondab peavoolu madala pingega energia sekundäärvoolu kõrge pingega energiaks. Energia hävimatuse seaduse järele ei või viimase energia suurem olla esimese omast. Kui kaotusi, mis elektrienergia soojuseks moondumisega alati olemas, mitte tähele panna, siis on primäär- ja sekundäärenergiad võrdsed. Et voolu energia on $J \times E$ (§ 64), siis peab sekundäärvool primäärvoolust nii mitu korda väiksem olema, kui mitu korda primäärpinge on väiksem sekundäärpingest. On primäärvool näiteks 5 amp, pinge 16 volti ja on sekundäärpinge 16000 volti, siis ei või sekundäärvool suurem olla kui $5 \frac{16}{16.000} = 0{,}005$ amp.

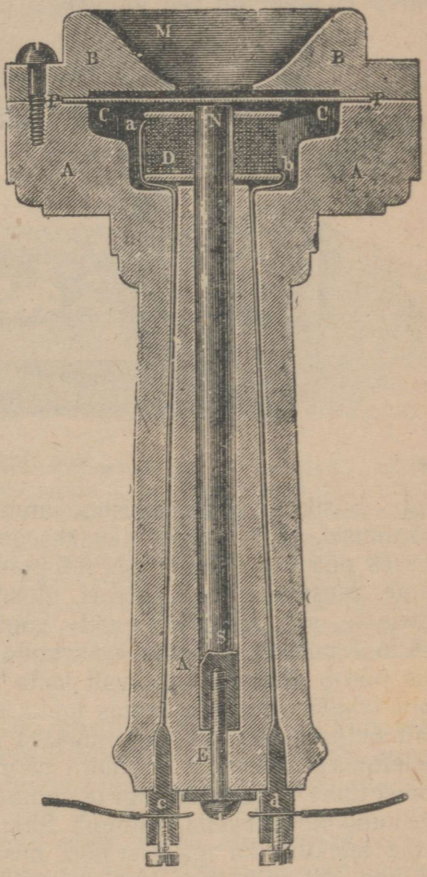
Et induktsioonvoolud ilmuda võivad mitte ainult induktori mähistes, vaid ka tema suuremates metallosades, mille läbi jõujooned lõikuvad (§ 73a), siis võivad tema raudsilindris MM (joon. 179) tekkida tugevad keerisvoolud, mis läbi raua voolates mingit kasulikku tööd ei tee, vaid ainult rauda soendavad. Selleks võib suur osa primäärenergiast ära kuluda, nii et sekundäärenergia, tähendab ka pinge, väikseks jääb. Et takistada kahjulikkude keerisvoolude tekkimist, valmistatakse raudsilinder mitte masiivsest rauast, vaid üksikutest sirgetest peenikestest raudtraatidest, mis lakiga kaetult üheks kimbuks koondatakse. Keerisvoolud ei pääse läbi üksikuid traate eraldava lakkihi ning jäävad sellepärast üsna nõrgaks.

77. **Telefon ja mikrofon.** 1) Telefoni printsiipi kujutab joonistus 182: NS ja $N_1S_1$ on magnetvarvad, mille ümber isoleeritud traat on mähitud. P ja P' on õhukesed raudplaadid,




Joon. 182.

mis nii on asetatud, et nad magnetite pooluste (N) lähedal hoiduvad. Kui noolega näidatud sihis vastu plaati P' rääkida, siis tõukub plaat helilainete mõjul õõtsuma ning tema keskkoht läheneb ja kaugeneb poolusest $N_1$. Igakord, kui P' läheneb poolusele, kogub tema enesesse rohkem magnetjõujooni, millega suurendub pooluse $N_1$ magnetism. Selle tõttu kasvab ja kahaneb pooluse $N_1$ tugevus vastavalt plaadi ja helilainete õõtsumisele. Magneti ümber mähitud traadis indutseerub magneti tugevuse muutumisel EMJ, mis läbi ahela ab vaheldavvoolu ajab. Voolates läbi teise magneti NS mähise, suurendab ja nõrgendab see vool vaheldamisi ka selle magneti tugevust, sest ühes sihis voolates toetab vool pooluse magnetismi, teises sihis — nõrgendab ta teda. Magneti tugevusega muutub tema külgetõmbejõud ning plaat P tõmbub pea tugevamini, pea nõrgemini pooluse N külge. Et mõlemate magnetite nõrgenemine ja tugevnemine ühel ajal ja ühesuguselt sünnib (vool läheb silmapilkselt ühest magnetist teise juure), siis hakkab plaat P samuti õõtsuma kui P'. Sellel õõtsumisel tekib P ümbruses õhulainetamine, mis helina kuuldav. Et mõlemad plaadid ühesuguselt peavad õõtsuma, siis on ka P juures kuuldav heli samasugune kui P' juures räägitud heli.

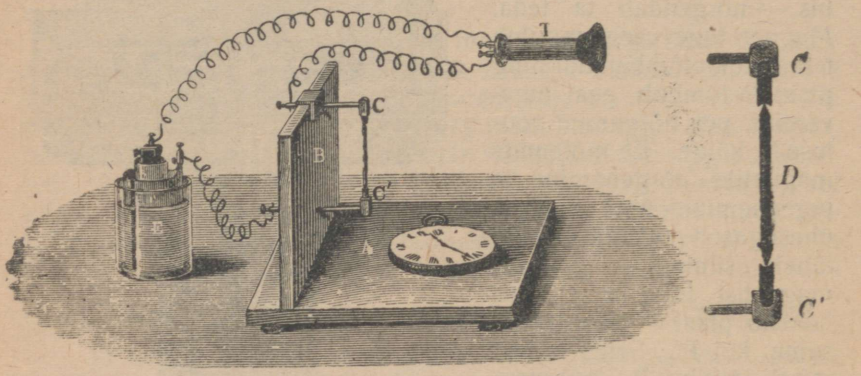


Joon. 183.

Telefonile, nii nagu teda veel praegu telefoni aparaatide kuulmistoruna tarvitatakse, antakse harilikult joon. 183 näidatud kuju (G. Bell, 1876): Sellekohase kesta sees asub magnetvarb NS, mille ülemise otsa ümber mähis D seisab (tihti lõpeb magnet enne mähist, ning viimases on pehmest rauast silindrikene, mis pooluse N otsa vastu toetub). Õhuke terasplaadike PP — n. n. membraan, on äärtega kinnitatud kesta külge, nii et tema keskkoht enam või vähem pooluse N poole võib painduda, selle järele kuidas pooluse tugevus muu-

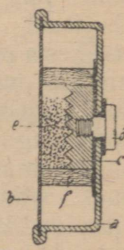
tub. Mähise otsad on ühenduses kruvide c ja d-ga, kust traat välisjuhti ja viimase kaudu teise samasuguse aparaadi juure läheb.

2) Telefonis tekkivad induktsioonvoolud on väga nõrgad, nii et ka heli sünnitava membraani õõtsumine ja kuuldav heli on samuti nõrk. Sellepärast ei tarvitata praegusel ajal induktsioonvoolude tekitajana mitte telefoni, vaid mikrofoni. Viimase printsiip põhjeneb asjaolul, et takistus kahe üks-teise külge puutuva süsitüki vahel seda väiksemaks muutub, mida tugevamini neid üks-teise vastu suruda. Kinnitame näiteks puulauakesele B (joon. 184) kaks metallvarba, mille pead C ja C' on kõvast söest, ning asetame vertikaalselt viimaste vahele teravate otsadega süsivarva D nii nagu see joonistuse paremal poolel eraldi on kujuta-




Joon .184.

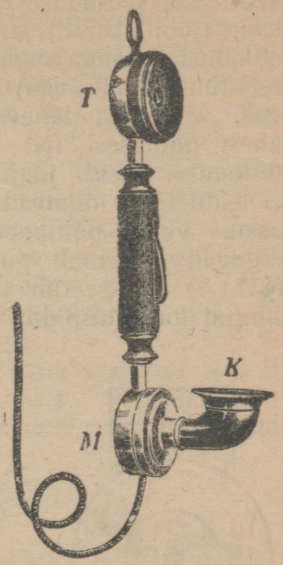
tud. Süsikontaktide takistus muutub lauakese B väiksemal kui põrumisel, sest et ühes lauakesega ka varb D põrub ning selle juures pea tugevamini, pea nõrgemini vastu C ja C' rõhub. Lülitame seesuguse mikrofoni elemendi E ja telefoni T-ga ühte ahelasse, siis peab elemendi vool järjestikku läbi süsivarva ja telefoni mähise minema. Asetame lauakesele näiteks taskukella, siis põrub süsivarb vastavalt kella tiksumise helilainetele; mikrofoni takistus muutub samas taktis ning ta laseb läbi ahela vastavalt helilainete õõtsetele muutuva suurusega voolu. Telefonis paneb see vool samuti kui mingist teisest telefonist tulev vaheldavvoolgi membraani õõtsuma ning me kuuleme seal kella tiksumist. Samasugusel teel kuuleme telefonis ka iga teist heli, mis vastu lauakest B põrkub. Et mikrofonis on vooluallikaks element, siis on võimalik selkombel läbi telefoni tugevaid voolutõukeid saata ning seega telefoni heli palju suurendada.




Joon. 185.

Tegelikult antakse mikrofonile väikse kapsli (joon. 185) kuju, ning tarvitatakse süsivarva asemel jämedat süsipulbrit, millega sellekohane õõnsus (e)

täidetakse. Kapsli kaaneks on õhuke süsimembraan (b). Viimase keskkoht paindub helilainete mõjul õõtsudes ühele ja teisele poole ning surub selle juures süsipulbri terakesed tugevamini või õrnemini üks-teise vastu. Rääkimisel muutub selle tõttu kogu pulbrisamba takistus ja läbi tema mineva voolu tugevus. Vool juhitakse läbi membraani (b) süsipulbrisse ning sealt isoleeritud kruvi d kaudu telefoni. Harilikult ühendatakse telefon T (joon. 186) ja mikrofon M ühe käepideme külge ja varustatakse mikrofoni kapsel kõlatoruga K, mille sisse räägitakse. Seesugusel ehitusviisil võib vaheldamisi rääkida ja teises jaamas räägitud sõnu kuulata, ilma et tarvis oleks pead pöörata.



Joon. 186.

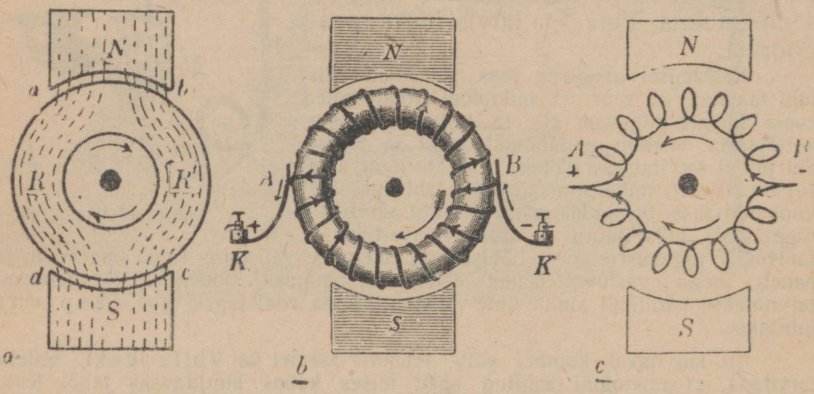
Rääkimisel kaugema maa peale on välisjuhi takistus nii suur, et mikrofoni voolutõuked enam küllalt tugevad ei ole selleks, et vastuvõttejaama telefoni membraani õõtsuma panna. Sel puhul tarvitatakse väikest induktorit (transformaatorit), mille primäärmähise läbi mikrofoni vool juhitakse. Sekundäärmähises indutseerub siis tugev EMJ, mille suurus muutub vastavalt mikrofonivoolu tugevusele. See EMJ sünnitabki pikas välisjuhis tugevama voolu ja paneb seega vastuvõttejaama telefoni membraani õõtsuma. Ka telefonil tarvitatakse harilikult ainult ühte välisjuhti, kuna vool tagasi läbi maapinna juhitakse.

3) Huvitaval kombel võib telefoni asemel ka Volta-leeki selleks tarvitada, et mikrofoni räägitud häält teises kohas kuuldavaks teha: leeklambi vool juhitakse läbi induktori ühe mähise; tema teine mähis lülitatakse mikrofoni ja elemendi ahelasse. Kui mikrofoni sisse rääkida, siis muutub tema ahela voolu tugevus; sellega indutseerub induktori teises mähises EMJ, mis toetab või takistab läbi sama mähise juhitud leeklambi voolu. Ühes vooluga muutub ka leegi suurus, kusjuures leegi igal muudatusel õhutõuge sünnib, mis helina meie kõrva tuleb. Et voolu ja leegi muutumine räägitud heli õõtsumisega taktis sünnib, siis kordab leek kõiki neid sõnu, mida mikrofoni räägitakse.

§ 78. **Dünamomasin; Grammi rõngas.** 1) Dünamomasinaks hüütakse masinat, millega võib sünnitada pikemaajalist tugevat elektrivoolu. Temas liiguvad sellekohased juhid tugevas magnetväljas, mille tõttu esimestes tugev EMJ indutseerub. Igas dünamomasinas leiame kaks osa: magnetvälja sünnitavad terasvõi elektromagnetid — n. n. väljamagnetid, ja viimaste väljas liikuvad juhid — masina tiirlev osa — n. n. ankur. Viimase ehitusviisi selgitab n. n. Grammi rõngas (joon. 187-b), mis moodustab kõige lihtsama ankru (Pacinotti 1860 ja Gramme 1871).

Kui magnetpooluste N ja S (joon. 187-a) vahele paigutada pehmest rauast rõngas RR', siis koondab raud kõik jõujooned enesesse (§ 10), nii et viimased kahe joana (R ja R') läbi rõnga

lähevad, kuna rõngaga piiratud ruumis magnetväli täiesti hävineb. Kui seesuguse raudrõnga ümber isoleeritud vasktraat mähkida (joon. 187-b) ja traadi ots ühendada tema algusega, siis moodustab rõnga mähis kinnise vooluahela. Rõnga tiirutamisel (ühes mähisega) ümber võlli ei muutu magnetjõujoonte seis, vaid nad lähevad ka siis endisel kombel kahe joana ühest poolusest (N) teise (S). Mähise keerud peavad rõnga tiirlemisel neid jõujooni lõikama; et rõnga sees jõujooni ei leidu, siis lõikuvad jõujoontega ainult keerdude välimised osad. Vastu põhjapoolust N pöördud mähiseosad (kaarel ab) liiguvad pahemalt poolt paremale. Pahema käe reegli järele (§ $71_1$ ) indutseerub nendes vool, mis on keeru välisel poolel sihitud joonistuspinna taha (eest taha). Üksikute keerdude voo-



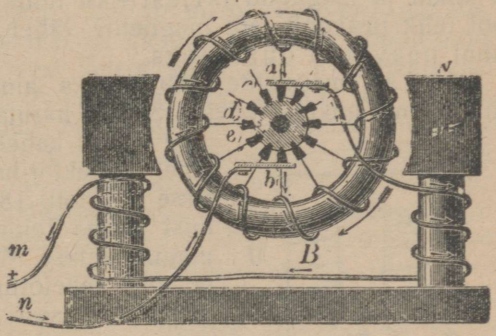

Joon. 187.

lud summeeruvad ning kogu rõnga ülemisel poolel voolab elekter ühes ja samas sihis (joon. 187-b). Vastu magneti lõunapoolust seisvates mähiseosades (kaarel cd) indutseerub vool keeru välimisel poolel vastupidises sihis (tagant ette), sest et juhtide liikumine kaarel cd on vastupidine eelmisele. Rõnga alumisel poolel voolab elekter nii siis otse vastu ülemise poole voolu. (Kaarel ad ja bc ei lõiku mähise keerud jõujoontega ning seal ei indutseeru mingit voolu). Punkti A tuleb järjelikult 2 voolu: üks ülevalt, teine alt, mõlemad on ühesihilised (joon. 187-c). Sellepärast ei voola elekter mitte ringi läbi kogu mähise (olgugi et viimane on kinnine ahel), vaid ta läheb läbi kontakti A juhti AK. Ühendame K ja K' mingi voolutarvitajaga, näiteks elektrilambiga, siis voolab elekter läbi lambi punkti B, haruneb seal kaheks vooluks, millest esimene läheb läbi rõnga ülemise ja teine läbi alumise mähise tagasi punkti A. Kui kogu rõngal tema mähise välised osad isolatsioonist paljastada, nii et rõnga tiirlemisel üks traadikeerd teise järele — vedrude A ja B alla pöördudes — ühendusse satub vedrudega, siis voolab elekter vahetpidamata ülevalkirjel-

datud viisil. Grammi rõngas nagu pumpab nii siis elektrit punktist B punkti A ning sünnitab sellega punkti A ja B vahel potentsiaalvahe ehk pinge. Samuti kui Galvani-elemendis nii nimetatakse ka siin seda põhjust, mis elektrit voolama paneb, dünamomasina elektromotoorseks jõuks. Tema suurust mõõdetakse harilikul kombel selle pingega, mis ilmub A ja B vahel, kui välisahel on avatud.

Nii EMJ-l kui voolul on igal silmapilgul üks ja sama siht ning suurus, sest mähise keerud seisavad harilikult tihedalt üksteise kõrval, nii et rõnga pöördumisel jõujooni lõikavad mähiseosad alati ühesugusteks jäävad. Seesugust voolu, mis alati ühes ja samas sihis läheb, hüütakse püsiva sihiga vooluks ehk lühendatult püsivvooluks, vastandiks vaheldavvoolule (§ 76), milles elekter vaheldamisi edasi-tagasi voolab.

2) Ülevalkirjeldatud masinal kuluksid vastu vedrusid A ja B (joon. 187-b) hõõruvad mähiseosad ruttu ära. Sellepärast ei juhita rõnga mähisest tulevat voolu mitte sel kombel välisahelasse kui see kirjeldatud, vaid seda tehakse n. n. kollektori abil. Viimast moodustab üksikutest vask-sektoritest (c, d, e jne.) kokkuseatud silinder (joon. 188), mis rõnga võllil asudes ühes viimasega pöördub. Sektorid on üks-teisest isoleeritud ning igaüks neist on ühendatud rõnga mähise ühe keeruga. Vedrude asemel (A ja B joon. 187-b) libisevad mööda kollektori n. n. harjad a b (harilikult kõvast söest valmistatud), mis rõnga tiirlemisel nende alla pöördunud sektore puudutavad ja mis seega ühenduvad rõnga mähise vastavate osadega samuti kui vedrud A ja B seda tegid otsekohesel kokkupuutumisel mähisega.



Joon. 188.

Tegelikult täidetakse vahed kollektori üksikute sektorite vahel mingi hea isolaatoriga, näiteks vilgukiviga. Kollektori väline pind treitakse siledaks silindripinnaks, mida mööda süsiharjad väikse hõõrumisega libisevad. Ka ei ühendata harilikult mitte iga keerd kollektoriga, vaid ainult iga teine, kolmas, neljas või veel kaugemal seisav keerd. Seda tehakse kollektori sektorite arvu vähendamiseks.

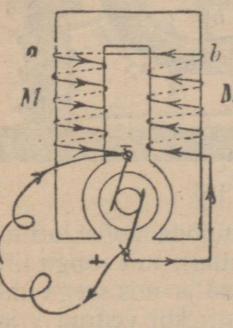
3) On magnetvälja tekitajaks harilikud terasmagnetid, siis nimetatakse masinat ka magneto-elektriliseks masinaks. Seesugust tarvitatakse praegusel ajal veel ainult plahvatusmootorite süütamiseks (näiteks automobiilides n. n. magneto-induktorina), telefonikella kõlisemapanemiseks ja teisteks otstarveteks, kus ainult nõrka voolu tarvis on. Palju tugevama magnetvälja ja elektrivoolu annavad elektromagnetid. Nendega varustatud masi-

nat hüütakse dünamo-elektriliseks masinaks ehk lühidalt dünamomasinaks.

Elektromagnetite ärritamiseks võetakse vool harilikult masinast enesest (Simens, 1867). Seda tehakse kahel viisil:

a) Kontaktharjast a (joon. 188) tulev juht on mähitud ümber elektromagnetite, nii et ankrust tulev vool läbi elektromagneti mähise peab minema enne kui ta välisahelasse pääseb. Ühendame välisahela (juhid m ja n), siis indutseerub ankrus üsna nõrk vool, olgugi et magnetite läbi elektrit ei voola. Selle voolu põhjuseks on nõrk järel-magnetism (§ $51_3$), mis pehmest rauast valmistatud elektromagnetis peale voolu kadumist alati järele jääb ja kauemat aega seal alal hoidub. Nimetatud nõrk vool läheb läbi elektromagneti mähise ning kõvendab tema välja. Tugevamas väljas indutseerub ka ankru mähises tugevam vool; see läheb läbi elektromagneti ja kõvendab veelgi viimase välja. Nii kasvab järk-järgult vool ja magnetväli kunni elektromagnet küllastub ja masin täie pingega töötab. Seesugusel ühendusel on ankur ja magnetid järjestikku lülitatud, nii et kogu ankruvool (ehk peavool) läbi magnetite läheb. Masinat hüütakse sel puhul peavoolu dünamoks.

b) Läbi magnetite võib aga ka ainult osa sellest voolust juhtida, mis ankrust tuleb. Selleks harutatakse vool kollektor-harjade juures kaheks: tugevam osa voolust läheb kollektor-harjast otsekohe välisahelasse R (joon. 189), kus takistus võrdlemisi väike. Teine osa voolust läheb läbi magnetmähise MM, milles takistus suur ja vool selletõttu nõrk. Ka siis ärritub masin ise, sest magnetite vool kasvab seda tugevamaks, mida suuremaks kasvab pinge kollektor-harjade vahel, viimane aga oleneb omakord magnetvälja tugevusest. Nii kasvab väli (ja ühes sellega masina pinge) nõrgast järelmagnetismist alates järk-järgult kunni magnetite küllastumiseni. Seesuguses masinas on magnetite mähised ühendatud paralleelselt välisahelale ning teda hüütakse haruvoolu dünamoks. Praegusel ajal tarvitatakse peaaegu ainult haruvoolu dünamosid.



Joon. 189.

4) Dünamo pinge (kollektorharjade vahel) oleneb kiirusest, millega ankru mähise keerud lõikavad jõujooni samuti ka magnetvälja tugevust (§ 71). Esimene tegur oleneb ankru tiirlemise kiirusest, teine — läbi magnetmähise juhitud voolu tugevusest. Ühesugusel tiirlemiskiirusel võime seega haruvooludünamo pinget reguleerida tema magnetvoolu tugevusega. Selleks lülitatakse magnetvoolu ahelasse (näiteks punktide a ja b vahele, joon. 189) reostaat ja muudetakse viimase takistuse suurendamise või vähendamisega kogu magnetahela takistust ning voolu.

Kuna peavoolu dünamo pinge kasvab ühes peavooluga — läheb siin ju kogu vool läbi magnetite —, ei olene haruvoolu dünamo pinge masinast võetava voolu tugevusest. Viimane asjaolu ongi haruvoolu masina paremus, sest praktikas nõutakse harilikult, et pinge välisahela igal voolul ühesuuruseks jääks.

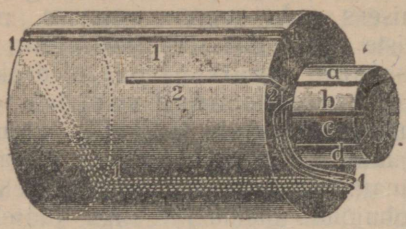
Nagu harilikul induktsioonil nii sünnib ka dünamomasinas elektrienergia sellest mekaanilisest tööst, mis ankru tiirutamiseks kulub.

Et mekaaniline töö ekvivalent peab olema voolu tööga, siis kulub dünamomasina tiirutamiseks seda suurem võimsus, mida suurem on voolu võimsus, teiste sõnadega: dünamomasin võtab teda tiirutavalt jõumasinalt ainult niipalju mekaanilist energiat, kui palju dünamolt saadud vool ise tööd teeb. Kulub dünamo vool näiteks 20 lambi (à 25 HK) valgustamiseks, siis nõuab tema tiirutamine ligi 1 hobujõu. 40 lambi valgustamiseks peab sama dünamo jõumasina võimsus järjelikult kaks korda suurem, s. t. 2 hobujõudu olema jne. Iga juurelisatud lamp raskendab ankru tiirutamist-ning nõuab selleks suuremat võimsust.

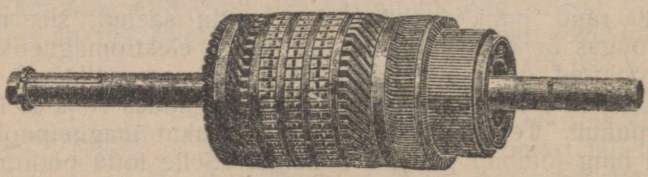
§ 79. **Püsivvoolu mootor.** Juhime Grammi rõngasse (joon. 187$^b$) läbi vedrude A ja B mingist välisest vooluallikast (näiteks elementidest) voolu, siis haruneb see vool punktis B kaheks osaks, mis rõnga mähise ülemist ja alumist poolt mööda punktini A lähevad ning seal jällegi ühinevad. Kui ettekujutada, et rõnga raud punktides A ja B on läbi saetud, siis muutuks kogu rõngas nende voolude mõjul kaheks elektromagnetiks, mille põhjapoolused on punktis A ja lõunapoolused punktis B (§ 51$_1$). Samasugused magnetpoolused tekivad punktides A ja B ka terve rõnga puhul. Tekkinud põhjapoolus A tõukub magnetpoolusest N eemale ning tõmbub pooluse S külge. Selle tõttu pöördub rõngas vastu noole sihti. Sama pöördumist toetab omalt poolt rõngas tekkinud lõunapoolus B. Rõnga pöördumisel satub vedru B alla mähise järgmine keerd. Voolates läbi viimase tekitab elekter ankru rõngas uued magnetpoolused — jällegi vedrude A ja B kohal. Need poolused pööravad ankru veel edasi kunni järgmine keerd vedrude alla satub jne. Kogu rõngas pöördub sellepärast vahetpidamata ühes ja samas sihis ning tema tiirlemine kestab nii kaua, kui elekter läbi ankru voolab. Seesugused, püsivvooluga aetavad mootorid moondavad seega elektri energia mekaaniliseks tööks, sest ankru tiirlemist võib kasutada näiteks masinate käimapanemiseks, s. t. kasuliku töö tegemiseks. Oma ehitusviisi poolest on püsivvoolu mootorid täiesti sarnased dünamomasinatega.

§ 80. **Trummankur; uuemate dünamomasinate konstruktsioon.** 1) Grammi rõngas indutseerub vool ainult tema mähiskeerdude välistes pooltes, sest et rõngaga piiratud siseruumis jõujooni ei leidu. Selle tagajärjel „töötab“ ainult võrdlemisi väike osa kogu mähise traadist ning Grammi rõngal peab olema võrdlemisi suur läbimõõt, ei kasutata ju siin milgil viisil rõnga siseruumi. Uuemal ajal ehitatakse sellepärast pea-

asjalikult n. n. trummankrud (Hefner-Alteneck, 1872), mille läbimõõt palju väiksem ja ehitusviis lihtsam. Seesuguse ankru moodustab massiiv raudsilinder; piki silindrit mähitakse traat nii nagu see näidatud joonistusel 190. Traadi ots kinnitatakse kollektorsektori a külge, mähitakse traat kas üks või mitu korda (joonistusel 2 korda) pikuti ümber ankru ning kinnitatakse seesuguse mähise (1) teine ots kollektori järgmise sektori (b) külge. Samalt sektorilt algab teine mähis (2), mis niisama kui esimenegi mähitakse ning mille lõpp tuleb kolmanda sektori juure (c). Nii kaetakse kogu silindri pind ühesuguste mähistega, kusjuures viimase mähise lõpp sektori a külge tuleb, millega juba ühendatud on esimese mähise algus. Valmis trummankru välimust kujutab joonistus 191. Tegelikult ei mähita traat mitte lihtsalt silindri




Joon. 190.



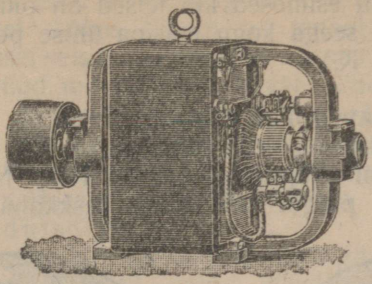
Joon. 191.

pinnale, vaid sellekohastesse kanaalidesse, — n. n. ankrunuutidesse, mis piki telge silindri pinna sisse lõigatud.

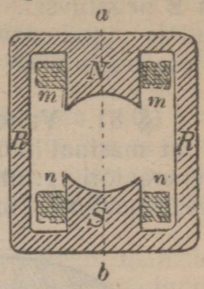
Asub seesugune ankur (näiteks Grammi rõnga asemel) magnetpooluste vahel, siis lähevad välja jõujooned temast põigiti läbi. Tiirlemisel muutub läbi üksiku mähise (näiteks 1, joon. 190) minevate jõujoonte arv, mille tõttu tema keerus Maxwelli seaduse järele vool indutseerub. (Me näeme, et trummankru mähises ühe keeru mõlemad pooled jõujooni lõikavad, nii et siin EMJ indutseerub kogu selles traadiosas, mis piki ankrut sihitud. Seega on siin mähise traat paremini ära kasutatud kui Grammi rõngas, kus ainult keerdude välised pooled jõujooni lõikasid). Kollektori harjade kaudu juhitakse ankru vool samal kombel välisahelasse kui Grammi rõnga puhulgi. Trummankrut tarvitatakse nii dünamomasinas kui ka püsivvoolu mootoris.

2) Joonistus 192 kujutab uuema dünamo ehk mootori välimust, joonistus 193 — tema kere läbilõiget: N ja S on elektromagneti poolused, mille vahel tiirleb ankur. Kogu elektromagnetile antakse seesugune kuju, et ta ühtlasi ka masina väliskereks on. Magnetite mähised (m-m ja n-n) asuvad pooluste N ja S

peal. Jõujoonte sihi leidmiseks võime ettekujutada, et kogu kere (joon. 193) pinnaga ab pikuti pooleks on lõigatud: tekkinud osad kujutavad kaht ühesugust kõverat elektromagnetit (NRS), mille poolused on N ja S ning mille neutraaljoon R kohal asub. Jõujooned tulevad välja nii siis poolusest N, lähevad läbi õhu poolusesse S, harunevad selles kaheks joaks ning lähevad mõlemalt poolt läbi RR tagasi poolusesse N.

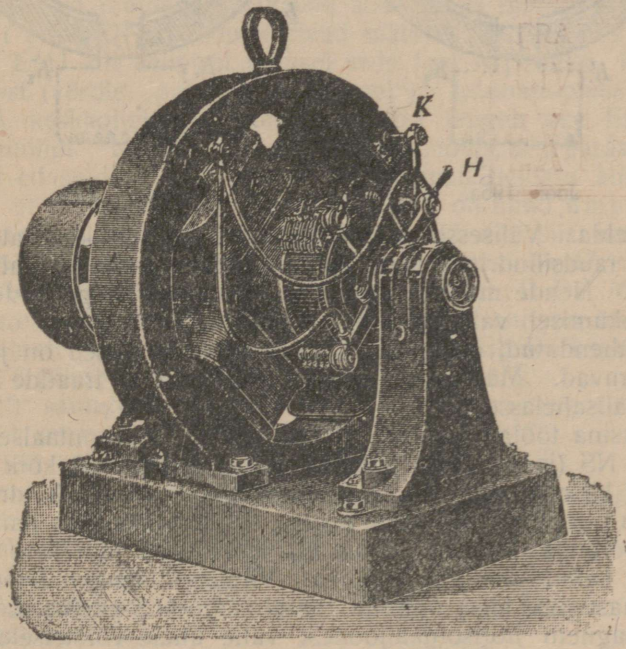


Joon. 192.




Joon. 193.

Suuremates dünamomasinatel on mitu poolus-paari. Magnetpoolused E (joon. 194) kinnitatakse sel puhul radiaalselt välise rõngasarnase raudkere sisse ning pooluste otspindade vahel tiir-

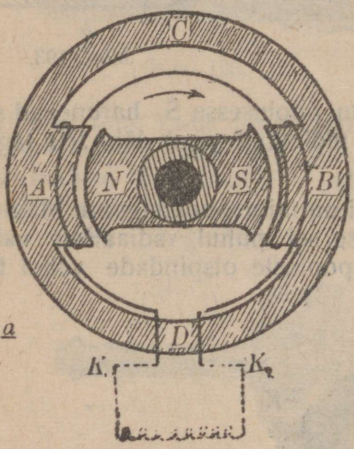



Joon. 194.

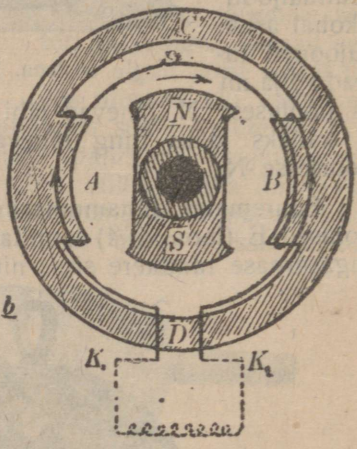
leb ankur. Pooluste mähised ühendatakse sel kombel, et kogu ringil tekib vaheldamisi ikka üks põhja- ja üks lõunapoolus. Iga

pooluse vastu seisab kollektoril üks süsihari. Nelja pooluse puhul (joon. 194) on masinal nii siis ka 4 harja (B): kaks positiivset ja 2 negatiivset. Nii esimesed kui teised on omavahel ühendatud ja moodustavad seega kogu masina ühise positiivse ja negatiivse pooluse (K ja $K_1$).

§ 81. **Vaheldavvool ja tema generaator.** 1) Voolu tekitavat masinat hüütakse üleüldse generaatoriks. Vaheldavvoolu generaatori printsiipi kujutab joonistus 195. NS on teras- või elektromagnet, mis pöigiti läbi tema keskkoha mineval võllil




Joon. 195a.



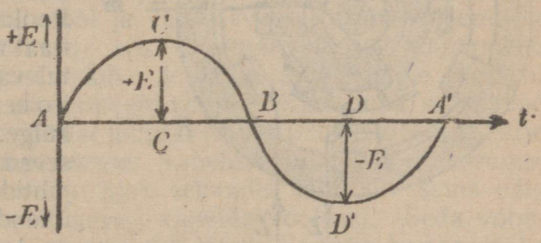

Joon. 195b.

võib tiirelda. Välisesse raudrõngasse C—D on kinnitatud kaks madalat raudsilindrit A ja B, mille ümber harilikul kombel traat mähitud. Nende mähiste keerdudes indutseerubki pooluste N ja S möödaliikumisel vaheldavvool. Mähised A ja B on omavahel niiviisi ühendatud, et nende EMJ alati ühesihilised on ja seega summeeruvad. Mähistest juhitakse tekkinud vool traatide $K_1$ ja $K_2$ kaudu välisahelasse.

Masina töötamisviis selgub järgmisest: horisontaalselt seisva magneti NS (joon. 195a) põhjapoolusest N lähevad kõik jõujooned läbi kitsa õhupilu pooluse vastas asuvasse raudsilindrisse (A). Viimases jagunevad nad kahte osasse, millest üks üles paindub ja läbi kererõnga ülemise poole C, teine aga läbi kere alumise poole D kunni silindrini B läheb. Viimasest tungivad jõujooned läbi samasuguse kitsa õhupilu tagasi magneti S-poolusesse. Pöörame magnetit horisontaaljoonest vähe ühele või teisele poole, siis valivad jõujooned ikkagi selle tee, kus neil kõige väiksem takistus, s. t. kus neil läbi õhu kõige lühem tee rauani on. Niikaua, kui veel osagi pooluse N otspinnast vastu A-d seisab, läheb suurem osa jõujooni ikkagi endisel kombel läbi

A ja B. Niisugusel väiksel pöördumisel ei lõika nii siis jõujooned mähiste A ja B keerde, mille tõttu viimastes ka mingit EMJ-u ei indutseeru. Seisab magnet NS vertikaalselt (joon. 195b), siis on jõujoontel kõige lähem tee rauani otse sihis C ja D; magneti seesugusel seisul ei lähe nad nii siis üleüldse läbi A ja B. Pöörame aga nüüd magnetit ainult vähe ühele või teisele poole, siis satub tema pooluse otspinna äär A või B vastu ning jõujooned lähevad otsekohe suurel hulgal läbi A ja B, kus takistus lühema õhutee tõttu väiksem. Sellel pöördumisel peab nii siis hulk jõujooni mähiseid A ja B lõikama, mille tõttu nendes tugev EMJ indutseerub.

Tiirleb magnet NS ühtlase kiirusega, siis peab mähistes A ja B indutseeritud EMJ suurus järjelikult alatasa muutuma: pooluste liikumisel A ja B kohal on EMJ null (jõujooned ei lõika A ja B mähist); pooluse N lähenemisel vertikaaljoonele hakkavad jõujooned mähise A keerdude ülemist poolt lõikama. Nagu üleval kirjeldatud, lõikab kõige suurem arv jõujooni mähise keerde nimelt siis, kui poolus N vertikaaljoone kohal liigub. Sellepärast kasvab mähises A indutseeritud EMJ maksimaalsuuruseni (+E) sellel silmapilgul, kui N vertikaaljoonel asub. Edasi pöördudes läheneb A-le alt tulev lõunapoolus S. Viimasesse tulevad jõujooned lõikavad selle juures mähise A keerdude alumist poolt. Nad indutseerivad mähises A seega samasihilise EMJ kui eelmisel juhusel seda tegi N-pooluse kaugenemine A-st (võrdle „pahema käe reegel"). Lõunapooluse lähenemisel A keskkohale (horisontaaljoonele) langeb see EMJ järk-järgult nullini. Nüüd seisab A vastu S-poolus, sellepärast kordub magneti edaspidisel pöördumisel kõik ülevalkirjeldatu ainult selle vahega, et mähises A indutseeritud EMJ-l on nüüd ümberpöördud siht: Jõuab S vertikaaljoonele (punkt C), siis kasvab see ümberpöördud sihiga EMJ maksimaalsuuruseni (—E) ning langeb peale selle järk-järgult nullini (S asub vastu B-d). Mähises B indutseerub EMJ samal kombel. Et A ja B nii on ühendatud, et mõlemate EMJ summeeruvad, siis muutub ka kogu masina EMJ (s. t. pinge $K_1$ ja $K_2$ vahel) samuti kui mähise A oma.



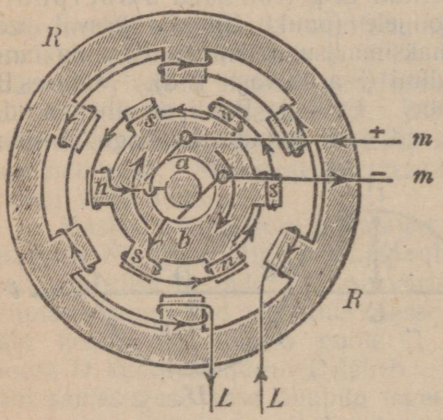
Joon. 196.

2) Elektromotoorse jõu muutumist võib graafiliselt kujutada järgmiselt: Olgu AA' (joon. 196) magnetpooluse N sirgjooneks tõmmatud tee ACBD (joon. 195). Kanname EMJ suuruse kõrgusena üle sirgjoone AA' selle punkti, milles vaadeldud silmapilgul viibib magnetpoolus N: Me leidsime, et EMJ on null, kui N liigub punkti A kohal; teel AC kasvab EMJ

maksimaalsuuruseni CC′ = + E. Siis langeb ta ja saab punktis B jällegi nulliks. Teel BD pöördub EMJ siht vastupidiseks. Tingimisi nimetame seda vastupidist EMJ-du negatiivseks ning kanname tema suuruse sirgjoone AA′ a l l a. Punktis D langeb EMJ kõige suurema negatiivse suuruseni DD = — E ja tõuseb nullini, kui N-poolus läheneb mähisele A. Ühendades kõik need kõrgused kõverjoonega, saame lainejoone AC BD A′.

Ühtlasel tiirlemisel on põhjapooluse (N) tee proportsionaalne tema liikumisajaga. Sirgjoon AA′ võib sellepärast kujutada ka pooluse N l i i k u m i s a e g a. Näiteks kujutab pikkus AC seda aega, mis poolusel kulub pöördumiseks 90° võrra, s. t. punktist A punktini C. Lainejoon kujutab sel puhul masina EMJ muutumist magneti ühe tiiru vältel. Et EMJ on proportsionaalne välisahela vooluga, siis kujutab sama lainejoon ka v o o l u tugevuse ja sihi muutumist magneti ühe tiiru vältel. Me näeme, et vaheldavvoolu siht on magneti esimese pooltiiru vältel ühtepidi, teise pooltiiru vältel vastupidi sihitud (E on alguses positiivne, siis negatiivne). Joonistusel 196 kujutatud lainesarnast voolukõikumist hüütakse vaheldavvoolu p e r i o o d i k s. Kahe pooluse puhul (N ja S) võrdub seega perioodide arv magneti tiirude arvuga. Tehnikas tarvitatakse harilikult voolu, millel on 50 p e r i o o d i s e k u n d i s. Seesuguse voolu saamiseks peab kahepoolusega generaator tegema järjelikult 50 tiiru sekundis ehk 3000 tiiru minutis.

EMJ ja voolu kõverjoone kuju oleneb masina ehitusviisist, Paremates masinates on tal joonistusel 196 näidatud s i n u s o i i d i kuju, milles kõrgused (E) on sinus-funktsioonid magneti pöördumisnurgast. Seesugust voolu hüütakse h a r m o o n i l i s e k s v a h e l d a v v o o l u k s.




Joon. 197.

3) Harilikult ei ole vaheldavvoolu generaatoril mitte 2 magnetpoolust, vaid rohkem. Kõik poolused kinnitatakse tähesarnaselt raudsilindri (joon. 197) külge, mida võllil tiirutada võib. Pooluste (n ja s) ümber on traat mähitud; viimase otsad tulevad võllile kinnitatud isoleeritud rõngaste a ja b külge. Rõngaste peal libisevad harjad ühendavad neid juhtidega mm. Kui viimased ühendada püsivvoolu allika poolustega, siis läheb vool ka võlli tiirlemisel rõngaste kaudu läbi kõigi magnetmähiste ning sünnitab vaheldamisi ühe põhja ja ühe lõunapooluse (n ja s). Vastu magnetpooluseid on paigalseisva väli-

rõnga RR sisse kinnitatud samapalju mähiseid, milles magnetpooluste möödaliikumisel indutseerub vaheldavvool. Kõik mähised on lülitatud järjestikku sel kombel ühte ahelasse, et nende EMJ alati ühtepidi on sihitud. Selle tõttu summeeruvad viimased ning välisjuhtide L ja L vahel tekib kõrge pinge.

Joonistuse 195 abil on kerge aru saada, et ka siin vaheldavvoolus üks periood sünnib, kui ühest ja samast mähisest mööda läheb üks n- ja järgmine s-poolus. Ühe tiiru vältel tekib voolus nii siis nii mitu perioodi, kui mitu pooluspaari on masinal. Kuue pooluse puhul (joon. 197) tekiks igal tiirul 3 perioodi; seega peab 50-perioodilise voolu saamiseks tiirude arv olema $\frac{50}{3}.60 = 1000$ tiiru minutis.

Vaheldavvoolu generaatoris tiirlevad alati väljamagnetid ja seisavad paigal mähised, milles industseerub vool. Liikuvat osa hüütakse siin r o o t o r i k s, paigalseisvat — s t a a t o r i k s. Teadagi ei kõlba masina enese vool tema magnetite ärritamiseks; sellepärast peab magnetite voolu jaoks mingi kõrvaline püsivvoolu allikas käepärast olema.

§ 82. **Vaheldavvoolu mõõtmine; tema faasinurk ja võimsus.** 1) Vaheldavvoolu mõõtmiseks ei kõlba ampermeetrid, milles magnetnõel voolu mõjul pöördub (joon. 110) ehk milles läbi pöörduva mähise juhitud vool pöörab terasmagneti väljas seisvat juhti (joon. 125). Seesuguste mõõduriistade näitaja peaks ühes vooluga kiirelt pea ühele, pea teisele poole pöörduma, mille tõttu ta tõeliselt nulli peale paigale jääks. Küll aga kõlbab vaheldavvoolu mõõtmiseks soojusampermeeter (joon. 156), sest et temas näitaja pöördumine oleneb ainult tekkinud soojuse hulgast, koguni mitte voolu sihist. Samuti võib selleks tarvitada ka elektrodünamomeetrit (joon. 120 ja 121), sest et ka temas jõud, mis rauda solenoiidi tõmbab, ei olene voolu sihist (raud tõmbub ühetugevalt nii põhja- kui lõunapooluse külge!).

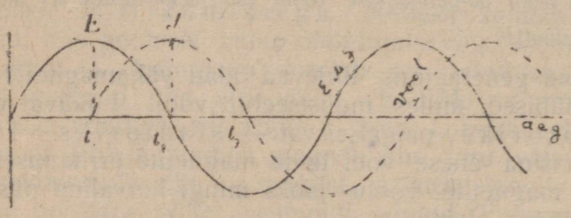
Nagu diagrammist 196 näha, väheneb vaheldavvoolu suurus samuti kui EMJ omagi maksimaalväärtusest J nullini ning kasvab siis, vastupidises sihis voolates, endise suuruseni J. Küsitav on, missugust suurust meie soojusampermeetriga õieti mõõdame: on selge, et kui püsivvool ja vaheldavvool soojusampermeetri näitajat ühevõrra pööravad, siis mõlemal juhusel ampermeetri traadis ühepalju soojust tekib. Joule'i seaduse järele peab siis ka igas sekundis läbi ampermeetri voolava (ükstapuha missuguses sihis) e l e k t r i h u l k mõlemal juhusel ü h e s u u r u n e o l e m a. Järjelikult näitab soojusampermeeter vaheldavvoolu puhul seesuguse püsivvoolu tugevust, millel igas sekundis läbi juhi sama palju elektrit voolab kui mõõdetavas vaheldavvooluski. Seda voolutugevust hüütakse v a h e l d a v v o o l u e f f e k t i i v s e k s t u g e v u s e k s. Sama effektiivset tugevust näitab ka elektrodünamomeeter. Nagu teooria näitab, on voolu maksimaalväärtuse J ning tema effektiivsuuruse $J_e$ vahel lihtne vahekord: $J_e = J : \sqrt{2} = 0{,}707\,J$. Praktikas mõõdetakse ainult vaheldavvoolu e f f e k t i i v s u u r u s t.

Voolab läbi sirge juhi takistusega R vaheldavvool $J_e$, siis on maksev Ohmi seadus

$$E_e = J_e \cdot R.$$

Pinge $E_e$ kujutab vaheldavvoolu effektiivpinget sirge juhi otsade vahel. Et E alati proportsionaalne on J-ga, siis on ka effektiivpinge $E_e = 0{,}707\ E$, kus E tähendab pinge maksimaalväärtust. Vaheldavvoolu voltmeetrid näitavadki alati ainult effektiivpinget.

2) On vooluahelas ainult harilik „Ohmi takistus", siis on maksev Ohmi seadus ning voolu tugevus kasvab ühel ajal EMJ tugevusega. Seesugusel puhul kujutab lainejoon (joon. 196) ühtlasi elektromotoorse jõu E kui ka voolu J muutumist. On aga vooluahelal tuntav oma induktsioon, siis takistab viimane voolu kasvamist (§ $75_1$) Selle tõttu paisub vool vähe hiljem oma maksimaalväärtuseni kui EMJ. On viimane kõige suurem näiteks silmapilgul $t_1$ (joon. 198), siis kasvab vool J maksimaalväärtuseni alles silmapilgul $t_1$. EMJ kahanemisel takistab omainduksioon voolu kahanemist. Sellega sünnib ka voolu nõrgenemine vähe hiljem kui EMJ vähenemine: kuna E muutub nulliks silmapilgul $t_2$, langeb vool J nullini alles silmapilgul $t_3$ kusjuures hiljaksjäämine $t_3 - t_1$ on sama suur kui $t_2 - t_1$. Nii muutub voolu tugevus küll sama seaduse järele kui EMJ oma, kuid vool jääb elektromotoorsest jõust aja $t_2 - t_1$ võrra maha. Sarnasel puhul öeldakse, et EMJ ja voolu faaside vahe on $t_2 - t_1$.




Joon. 198.

On voolu ahelal suur mahutavus, siis on nähtus sarnane, kuid ümberpöördud. Lülitame välisahelasse näiteks kondensaatori, siis laeb masin kõige pealt kondensaatori. Juba väikse EMJ juures (punkt 0, joon. 198) on kondensaatorisse voo av laadimisvool tugev. Kunni EMJ maksimaalväärtuseni (E) kasvab, on kondensaator juba laetud ning laadimisvool langeb nullini (punkt $t_1$). Hakkab EMJ langema, siis voolab elekter kondensaatorist tagasi, ning voolu suurus on kõige tugevam, kui EMJ nullini on alanenud (punkt $t_2$). Seega jääb mahutavuse mõjul EMJ voolust maha, ehk vool jõuab EMJ-st ette.

On ahelas korraga mahutavus ja omainduktsioon, siis peaks vool esimese mõjul EMJ-st ette jõudma, teise mõjul temast maha jääma. On mõlemate mõju ühesuurune, siis ei jää vool ei maha ega tõtta ette, s. t. ta muutub ühel ajal EMJ-ga samuti kui Ohmi takistuse puhulgi; me ütleme, et voolu ja EMJ faaside vahe on null.

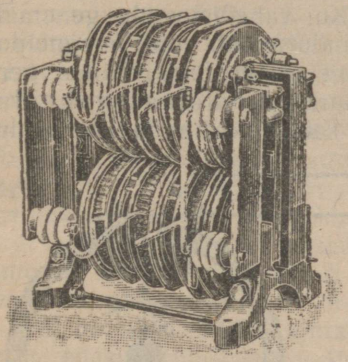
Praktikas mõõdetakse faaside vahet (aega $t_2 - t_1$) selle pöördumisnurga *cosinusega*, mille võrra generaatori magnet aja $t_2 - t_1$ jooksul pöördub. On see n. n. faasinurk $\varphi$, siis võrdub $t_2 - t_1$ vastavates üksustes mõõdetult suurusega $\cos \varphi$

3) Vaheldavvoolu võimsus on — nagu püsivvoolu omagi — vool × pinge (§ 64). Et aga vool ja pinge alatasa muutuvad, siis peaksime kogu diagrammi (joon. 198) väikesteks osadeks jagama, iga osa jaoks leidma väärtuse J × E ja kõik saadud väärtused summeerima. Nagu üksikasjaline matemaatiline juurdlus näitab, võrdub see summa effektiivvoolu, elektromotoorse jõu ja faasinurga cosinus'e kasvatisega ($J_e \cdot E_e \cdot \cos \varphi$). Järjelikult on vaheldavvoolu võimsus

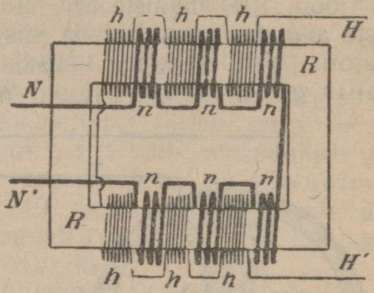
$$W = J_e \cdot E_e \cdot \cos \varphi.$$

On ahelas ainult Ohmi takistus, siis on faasinurk $\varphi = 0$ (aeg $t_2 - t_1 = 0$); et $\cos 0 = 1$, siis on sel puhul $W = J^e \cdot E_e$.

§ 83. **Transformaatorid.** 1) Me nägime (§ 63), et igas juhis osa elektrienergiast soojuseks moondub ja seega kaduma läheb. Joule'i seaduse järele oleneb kaduma minev energia ($J^2R$) voolu tugevusest, mitte tema pingest. Et voolu võimsus on proportsionaalne kasvatisega $J \times E$, siis võime soovitud energiahulga traati mööda ühest kohast teise saata kas tugeva voolu ja madala pingega, või nõrga voolu ja kõrge pingega. Esimesel juhusel läheb juhis kaotsi palju rohkem energiat kui teisel juhusel. Et kaotus oleks võimalikult väike, tarvitatakse pikemate juh-



Joon. 199.




Joon. 200.

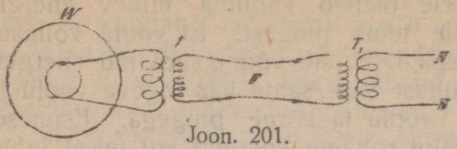
tide puhul võimalikult kõrget pinget. Vaheldavvoolu pinge tõstmist või alandamist toimetataksegi transformaatoritega.

2) Oma töötamisviisi poolest on transformaator (joon. 199) harilik induktsioonaparaat. Ka temal on kaks mähist, mis harilikult üks-teise peal asuvad. Primäärmähis NnN' (joon. 200) on jämedast traadist ja väheste keerdudega. Sekundäärmähis HhH' — aga peenest traadist ja hulga keerdudega. Mähised ei asu siin aga mitte raudsilindril, vaid kinnisel (harilikult nelinurgelisel raudraamil RR). Primäärmähised magnetiseerivad rauda, kusjuures jõujooned peaasjalikult ringi mööda raudraami lähevad. Et aga vaheldav primäärvool alatasa oma suurust muudab, siis tekivad ja hävivad vastavalt ka jõujooned. Selle juures lõikuvad nad sekundäärmähise keerdudega ja indutseerivad seal seda kõrgema EMJ, mida suurem on sekundäärmähise keerdude arv. Indutseeritud EMJ mõjul tekib sekundäärmähisega ühendatud juhis kõrge pingega vaheldavvool, mille muutumised samuti sünnivad kui primäärvoolu omad.

Sama transformaatoriga võib tarbekorral ka kõrge pingega voolu madala pingega vooluks moondada. Selleks juhitakse kõrge pingega vool sekundäärmähisesse, mille mõjul primäärmähises indutseerub madala pingega vool.

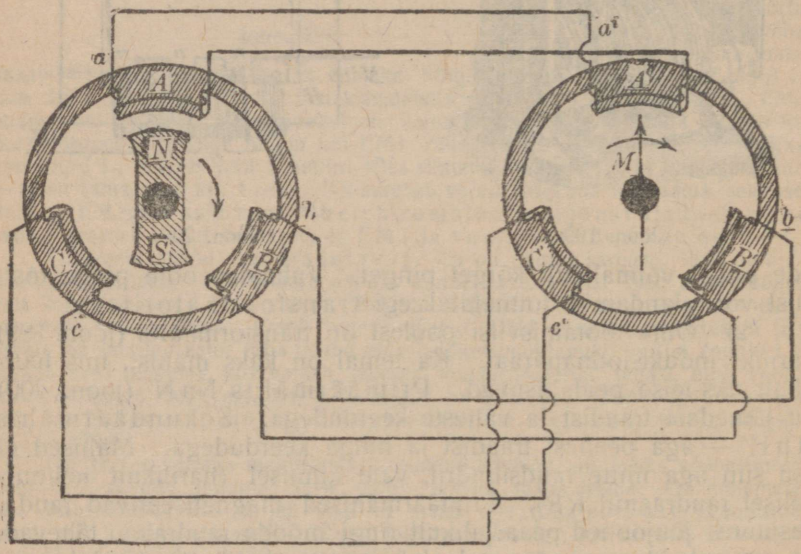
Skeem 201 kujutab vaheldavvoolu juhtimise printsiipi kauge maa peale: W on vaheldavvoolu generaator, mis annab näiteks

3000 voldilise voolu. Transformaatoris T tõstetakse pinge näiteks 20000—50000 voldini ja juhitakse vool välisjuhi F kaudu tarvitamiskohta. Seal läheb vool läbi teise transformaatori $T_1$ sekundäärmähise ja indutseerib tema primäärmähises 110 või 220 voldilise voolu, mida tarvitatakse valgustamiseks ja mootorite ümberajamiseks.



Joon. 201.

§ 84. **Kolmefaasi-vool.** 1) Kui vaheldavvoolu generaatoris (joon. 195) mähiste arv, milles indutseerub vool, magnetpooluste arvust suuremaks teha, siis saame mitmefaasi-voolu generaatori. Nendest kõige tähtsama juures, kolmefaasi-vaheldavvoolu generaatoris (joon. 202) seisab kahe magnetpooluse



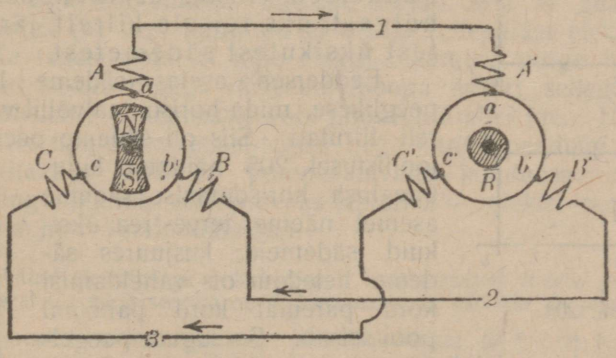
Joon. 202.

vastu (N ja S) kolm mähist A, B ja C. Magneti tiirlemisel indutseerub igas mähises harilik vaheldavvool. Nendes vooludes ei sünni aga voolu tõusud ja langemised mitte ühel ajal, vaid järgmises ikka hiljem kui eelmises. On vool näiteks mähises A maksimaalsuurusel, siin on ta mähistes B ja C vastupidine A-le ning mingisugusel keskmisel suurusel. Järgmisel silmapilgul on vool kõige tugevam mähises B; samal ajal on ta mähises C ja A keskmise suurusega ning vastupidine B-le. Veel hiljem on voolul maksimaalne tugevus mähises C jne. Pooluse N pöördumisel kaare AB võrra indutseerub mähises A täpipealt samasugune vool, missugune indutseerub mähises B pooluse pöördumisel

kaare BC ning mähises C pooluse pöördumisel kaare CA võrra. Seega kordab vool B voolu A muutumist, algades seda t sekundit hiljem, kus t on aeg, mis N-poolusel kulub pöördumiseks AB = 120° võrra. Vool C kordab seda veel t sekundit hiljem jne. Sellepärast öeldakse et voolude faasinurk on 120°.

2) Ühendame mähised A, B ja C täpipealt samasuguste mähistega A', B' ja C', mis on samuti kui esimesedki kinnitatud ühise raudrõnga sisse. Läbi A' voolav maksimaalvool sünnitab A' kohal samasuguse tugeva magnetpooluse kui poolus N teda indutseerib rauas A. Järgmisel silmapilgul (t sekundit hiljem) on maksimaalvool mähises B' ning nimetatud tugev poolus ilmub B' kohal. Veel t sekundit hiljem on poolus C' kohal jne. Sel teel sünnib teises rõngas samasugune tiirlev magnetväli nagu poolus N omal tiirlemisel seda tekitab esimeses rõngas. Kinnitame teise rõnga sisse võllile asetatud magneti M, siis pöördub tema ühes rõnga magnetväljaga ning tiirleb seega taktis magnetiga NS. Magneti M võlli tiirlemist võib mekaanilise töö tegemiseks kasutada. Kirjeldatud skeem kujutab nii siis kolmefaasivoolu mootori printsiipi. Et mootori võlli tiirude arv samasuur on kui generaatori (magneti NS) oma, siis hüütakse seesugust mootori sünkroon-mootoriks.

3) Joonistusel 202 kujutatud ühendusel peaksime kolmefaasivoolu edasijuhtimiseks tarvitama 6 traati. Ilma et kogu sündmustikus midagi muutuks, võime kolme mähise otsad a, b ja c masina sees omavahel ühendada (joon. 203). Kui nüüd vastavad mähiseotsad a' b' ja c' teises rõngas ka ühendada, siis




Joon. 203.

võime kolmefaasi-voolu ainult kolme traadiga (1, 2 ja 3) ühest masinast teise juhtida. Voolab maksimaalvool näiteks läbi juhi 1 (ja mähise A'), siis haruneb ta punktis a' kaheks ning tuleb läbi juhtide 2 ja 3 tagasi generaatorisse. On maksimaalvool juhis 2, siis haruneb ta punktis b' ning tuleb läbi 1 ja 3 tagasi jne. Magnetväli tiirleb ka seesugusel ühendusel ikkagi teises masinas samuti kui magnet NS esimeses rõngas. Ühendustraati abc ja

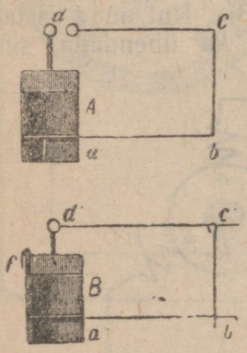
a'b'c' hüütakse mähiste nullpunktiks, sest nagu üksikasjalisem juurdlus näitab, on tema potentsiaal muutumatalt null.

4) Kui teise rõnga tsentrumisse asetata lihtne raudsilinder R, mis võllil tiirleda võib, siis indutseerib tiirlev magnetiväli silindri rauas keerisvoolu (§ 73₃), kusjuures see vool takistada püüab välja tiirlemist (Lenz'i seadus). Mõju ja vastumõju seaduse põhjal püüab siis magnetväli takistada silindri paigalseismist, s. t. ta tõmbab silindri enesega kaasa tiirlema. Sellel põhjeneb n. n. asünkroon-mootorite printsiip. Pikuti ümber raudsilindri R mähitakse traat ja ühendatakse viimase otsad, nii et kogu mähis moodustab kinnise ahela. Selles ahelas indutseeribki tiirlev magnetväli voolu, mis takistab välja tiirlemist ja mille tõttu silinder ise tiirlema hakkab. Keskmise ja väikse suurusega kolmefaasimootoritena tarvitatakse praegusel ajal ainult asünkroon-mootorid, sest viimastel ei ole ei kollektori ega harju, mille tõttu nende konstruktsioon on ülilihtne.

## Peatükk IX:

## Elektromagnetilised lained.

§ 85. **Oõtsuv elektrivool.** 1) Kui laetud Leideni pudeli A mõlemad katted traadiga abc (joon. 204) ühendada, siis ilmub punktis d säde, mis palja silmaga vaadatult tugeva heleda valgusjoana paistab. Uurides selle sädeme iseloomu, leidis Feddersen (1858), et ta koos seisab hulgast, üks-teisele kiirelt järgnevatest üksikutest sädemetest.



Joon. 204.

Feddersen asetas sädeme lähedale peeglikese, mida horisontaalvõlli väga kiirelt tiirutati. Siis oli sädeme peegelpildil joonistusel 205 näidatud kuju: üheainsa horisontaalse sädeme asemel näeme terve rea üksikuid sädemeid, kusjuures sädeme heledam ots vaheldamisi kord paremal kord pahemal pool seisab. Seesuguse peegelpildi tekkimine seletub järgmiselt: sädeme algul heidab peegel tema kujutuse punkti a; senni kui säde lõpule jõuab, on peegel juba vähe pöördunud, selle tõttu ilmub ka sädeme kujutus lõppmomendil mingis madalamas punktis b. Oleks säde lihtne ühesihiline elektrivoolamine, siis veniks ta seesuguses peeglis vaadatult ühtlaseks heledaks paelaks ab, mille üks äär on heledam kui teine. Et meie peegelpildis aga hulga üks-teise all seisvaid eraldatuid sädemepilte näeme, siis peab säde peri-

Joon. 205.

oodiliselt kustuma ja uuesti helenema. Selle juures peab voolu siht temas vaheldamisi kord paremalt pahemale poole, kord ümberpöördud olema. Tundes peegli tiirlemise kiirust, on võimalik välja arvata, kui kaua kestab iga üksik säde, s. t. kui kaua voolab elekter ühes sihis läbi sädeme.

Fedderseni katse tõestab nii siis, et kondensaatori (Leideni pudeli) tühjendamisel elekter mitte lihtsalt ühest kattest teise ei voola, vaid et läbi sädeme väga kiirelt oma sihti muutev vaheldavvool läheb. Seesugust voolu nimetatakse õõtsuvaks vooluks.

2) Õõtsuvaks hüütakse voolu sellepärast, et temas elektri liikumine sarnane on vedeliku ôôtsumisega ühendatud nõudes (IV, § 32). Me nägime, et vooluahela omainduktsiooni tõttu elekter nagu inertseks saab (§ 752). Teatav väike omainduktsioon on aga igasugusel ahelal, koguni sirgel traadil (näiteks abcd, joon. 204). Ühendame pudeli katted juhiga, siis hakkab elekter läbi juhi näiteks kõrgema potentsiaaliga väliskattest madalama potentsiaaliga sisekattesse voolama. Selle vooluga neutraliseeruvad katted, ning pinge nende vahel alaneb peagi nullini. Jnertsuse tõttu ei lõpe aga ka nüüd veel elektri liikumine, vaid ta kestab endise hooga edasi. Selle tagajärjel kogub sisekattesse rohkem + E-d ning tema potensiaal tõuseb kõrgemale kui väliskatte oma. Lõpeb viimaks liikuva elektri hoog, siis sunnib tekkinud potentsiaalvahe teda ümberpöördud sihis tagasi väliskattesse voolama. (Voolu ümberpöördumise silmapilgul kustub säde, süütub aga tagasivoolamisel otsekohe uuesti, sest et gaasid juhi otsade vahel (d) veel jahtunud ei ole ja sellepärast elektrit juhivad). Ka tagasivoolul ei lõpe elektri liikumine pinge hävinemisega, vaid kestab olgugi väiksema hooga edasi; sellega tõuseb uuesti väliskatte potentsiaal, vool pöördub ümber jne. Nii õõtsub siin elekter tõepoolest edasi-tagasi nagu harilik pendelgi. Õõtsumist tekitavaks jõuks on potentsiaalvahe kondensaatori katete vahel, ning liikumist alalhoidvaks faktoriks — elektri inertsus, ehk ôieti tema juhi omainduktsioon.

3) Antud elektrihulga puhul oleneb kondensaatori katete pinge tema mahutavusest C: mida suurem on mahutavus, seda väiksem on pinge. Seega on pinge proportsionaalne suurusega $\frac{1}{C}$. Mekaanikas (II § 513) leidsime, et ôôtseaeg $T = 2\pi\sqrt{m : K}$, kus K on õõtsumist tekitav jôud ning m — keha mass (inertsus). Lähemad juurdlused näitavad, et sama formul maksev on ka elektri õõtsumise jaoks. Et praegusel juhusel jõu K suurus on proportsionaalne $\frac{1}{C}$ ning inertsuse (massi m) suurus on proportsionaalne juhi omainduktsiooni L suurusega, siis on elektri ôôtseaeg

$$T = 2\pi\sqrt{L : \frac{1}{C}} = 2\pi\sqrt{L.C} \qquad 30)$$

T kujutab siin aega, mis kulub elektri liikumiseks väliskattest sisekattesse ja sealt tagasi, s. t. vaheldavvoolu **üheks perioodiks**:

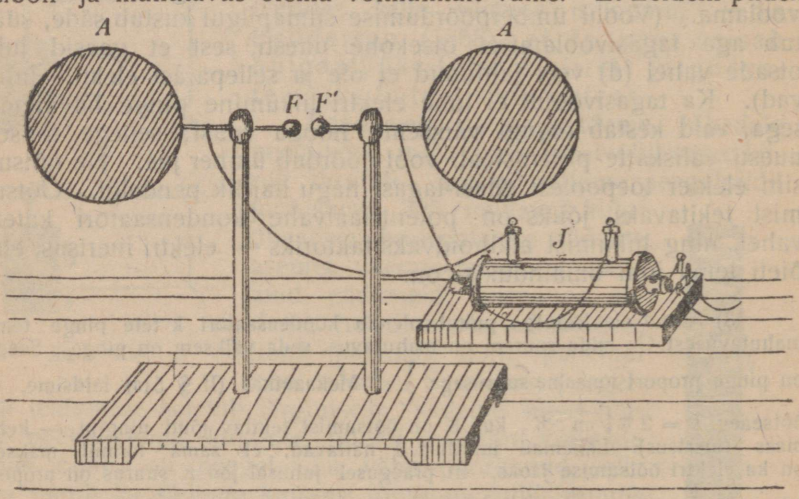
Õõtsumised sünnivad seda kiiremini, mida väiksemad on vooluahela omainduktsioon ja tema mahutavus. Õõtseaeg oleneb ainult nendest suurustest.

4) Elektri voolamisel mööda juhti moondub alati üks osa elektrienergiat soojuseks. Sellepärast väheneb iga õõtse järele voolava elektri energia. See vähenemine avaldub nii pinge kui ka voolu tugevuse järk-järgulises kahanemises: järgmisel õõtsel on vool ikka väiksem kui eelmisel, nii et teatava arvu õõtsete järele vool nullini langeb. Me ütleme, et õõtsumine kustub. Mida suurem on juhi takistus, seda rohkem muutub elektrienergiat soojuseks, seda kiiremine väheneb järjelikult vool ja kustub õõtsumine.

Samuti kui pendli õõtseaeg ei olene amplituudi suurusest, nii ei olene ka elektri õõtsete välde voolu tugevusest: vaatamata selle peale, et kustuval õõtsumisel vool alatasa väheneb, jääb tema õõtseag muutumatalt ühesuuruseks.

On juhi takistus suur (võrdlemisi tema omainduktsiooni ja mahutavusega), siis võib juhtuda, et voolu kogu energia juba esimesel õõtsel tervelt soojuseks muutub. Sel puhul kahaneb vool ainult nullini ja ta ei pöördugi ümber; teadagi ei või sarnasel korral mingisugust õõtsumist tekkida.

§ 86. **Hertz'i vibraator; elektrilained traatides.** 1) Võimalikult kiirete õõtsete tekitamiseks peab vooluahela omainduktsioon ja mahutavus olema võimalikult väike. Et Leideni pudeli

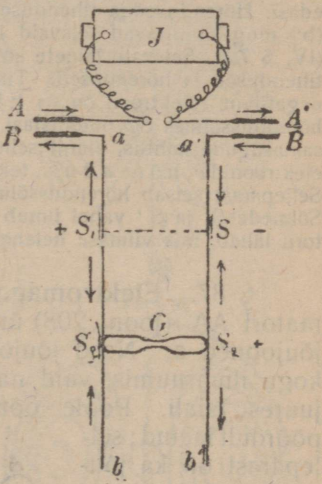



Joon. 206.

mahutavus liiga suur on, siis tarvitas H. Hertz oma kuulsatel katsetel järgmist aparaati, mida vibraatoriks hüütakse: kaks isoleeritud metallplaati või- kera (A ja A joon. 206) on kinnitatud üks-teise lähedale, nii et nendega ühendatud väiksed kera-

kesed F ja F' seisavad mõne millimeetri kaugusel teine-teisest. Induktor J laeb mõlemad plaadid. On pinge nende vahel tarvilisele kõrgusele tõusnud, siis hüppab F ja F' vahel säde. Samuti kui Leideni pudeli juures, nii sünnib ka selles sädemes elektri edasi-tagasi õõtsumine ühest plaadist teise. Et A ja $A_1$ mahutavus palju väiksem on Leideni pudeli omast ja et ka sirge juhi omainduktsioon väiksem on kui ringahela abcd (joon 204) oma, siis sünnib seesuguses vibraatoris õõtsumine palju kiiremini kui eelmisel katsel.

2) Elektri õõtsumisel tekivad vibraatoriga ühendatud traatides elektri lained. Viimaste demonstreerimiseks tarvitatakse harilikult Lecher'i metoodi (joon. 207): Hertzi vibraatori AA' kõrval seisab kaks samasugust paralleelset isoleeritud plaati BB'; viimaste juure tulevad isoleeritud sirged traadid ab ja a'b', millel laineid tekitatakse. Elektri õõtsumisel vibraatoris indutseeruvad plaatides B ja B' elektromotoorse jõu tõuked, mille mõjul traatidesse ab ja a'b' lainesarnased voolutõuked lähevad, mis piki traati edasi liiguvad. Nende „elektrilainete" tekkimine sünnib sarnaselt kui õhulainete tekkimine (näiteks viletorus) sünnib õhutõugete mõjul (IV, § 75). Samuti kui õhulained peegelduvad viletoru otsas, nii peegelduvad ka elektrilained traatide b ja b' otsades. Peegeldunud lained liiguvad seega piki traati tagasi ja interfereeruvad langevate lainetega seisvateks elektrilaineteks. Nende seisvate lainete sõlmpunktides (S—S') asuvad kohad, kus potentsiaal kõrgem või madalam on kui juhi teistes punktides. Sellejuures seisab juhi a'b' kõrgema potentsiaaliga sõlmpunkti ($S_2$) vastu juhi ab madalama potentsiaaliga sõlmpunkt ($S_2$), sest et mõlemas juhis on nimetatud lainesarnased voolutõuked alati vastupidise sihiga nagu seisaks ühe juhi laine harja vastu teise juhi laine org. Ühendame sõlmpunktid $S_2$ ja $S_2$' väikse Geissler-toruga, siis hakkab viimane hõõgama, sest et punktide $S_2$ ja $S_2$ vahel alaline potentsiaalvahe hoidub. Teistes punktides juhi pinnal on potentsiaal igal pool ühesuurune, nii et sõlmpunktist eemale nihutatud Geissler-toru tumedaks jääb. Nihutades Geissler-toru piki traate ab ja a b edasi, võime sel kombel leida kahe naabersõlme $S_1$ ja $S_2$ kauguse. Et aga viimane võrdub poole lainepikkusega (IV, § 72) siis on sellega võimalus antud otsekohe mõõta tekkinud elektrilainete pikkust *l*. Vibraatori õõtsumisperioodi võib arvestuse teel leida tema omainduktsioonist ja mahutavusest (form. 30); seega on tuntud ka lainete õõtsearv N.

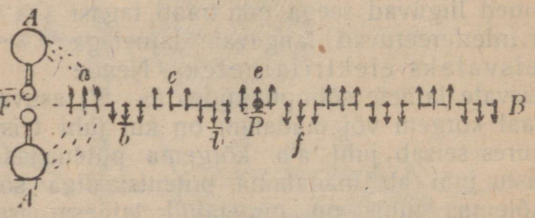


Joon. 207.

Formuli $c = N\lambda$ abil leiame sellest elektrilainete laialilagunemise kiiruse c metalljuhtides. Katsetest selgub, et c = 300000 km/sec, s. t. et elektrilained piki traati sama kiirelt laiali lagunevad kui valgus.

Elektroonteooria järele sünnib kirjeldatud elektrilainete tekkimine järgmiselt: Vibraatori plaatide A ja A' vahel ôôtsuvad elektroonid väga kiirelt edasi-tagasi. Sel silmapilgul, kui elektroonid sihis AA' hakkavad voolama (vaata joonistus 207) indutseerub juhtides B ja B' vastupidi sihitud vool (primäärvoolu kasvamine). Punktis a' saavad elektroonid selle vooluga nagu kokku surutud; — tekib elektroonide t i h e n d u s, mis piki traati a' b' edasi liigub sarnaselt kui seda teeb õhutihendus toru seintega piiratud õhusambas. Järgmisel silmapilgul hakkavad elektroonid vastupidises sihis voolama (A A): nüüd indutseerub juhis a' B paremale poole sihitud vool, mille mõjul elektroonid punktis a' nagu h õ r e n e v a d. Ka see hõrendus liigub piki traati a' b' edasi. Hõrendused ja tihendused interfereeruvad peale peegeldumist traadi otsas (b') ning sünnitavad seisvaid laineid nii nagu see sünnib õhulainete juures (IV, § 75). Seisvate lainete sõlmpunktides (S') asuvad vaheldamisi elektroonide tihendused ja hõrendused. Tihenduse puhul on sõlmpunktis juhi potensiaal negatiivne (elektroon on E!), hõrenduse puhul positiivne. Sellepärast on hõrendussõlmes $S_2'$ potentsiaal kõrgem kui tihendussõlmes S'. Juhis ab kordub samasugune nahtus, ainult selle vahega, et punktis a e s i m e s e l silmapilgul elektroonide h õ r e n d u s tekib, sest et esimesel voolutõukel on siht a B. Sellepärast seisab hõrendussõlme S' vastu tihendussõlm S ja ümberpöördult. Sõlmede S ja S' vahel ilmub järjelikult pinge, mille mõjul vool läbi Geisslertoru läheb, mis viimase helenema paneb.

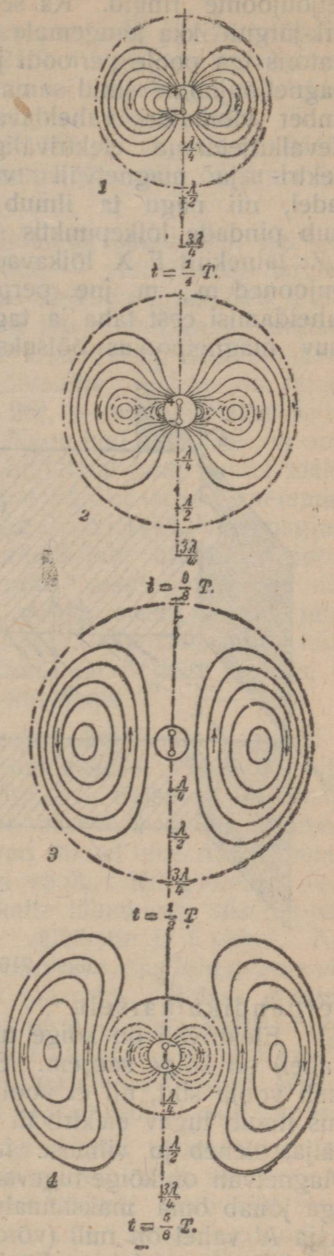
§ 87. **Elektromagnetilised lained eetris.** 1) Laetud vibraatori AA (joon. 208) ümbritsevad enne sädeme tekkimist elektrijõujooned a. Need jõujooned (elektriväli) ei teki mitte korraga kogu ilmaruumis, vaid nad lagunevad teatava kiirusega vibraatori juurest laiali. Poole ôôtsumisperioodi järele on A ja A' ümberpöördult laetud; sellepärast on ka jõujoonte siht siis vastupidine eelmisele. Ka need vastupidi sihitud jõujooned lagunevad vibraatorilt laiali; nad järgnevad ilmaruumis esimestele, ülespoole sihitud jõujoontele. Veel pool perioodi hiljem on jõujoontel vibraatori ümbruses esialgne siht jne. Jõudsid esimesed jõujooned ühe terve perioodi vältel näiteks punkti c, siis asuvad teised jõujooned punktis b, kuna kolmandad (a) alles vibraatori lähemas ümbruses seisavad. Kõik need jõujooned lagunevad ühtlase kiirusega laiali, nii et kogu sirgjoonel F B vaheldamisi üles ja alla sihitud jõujooned reas seisavad. Asetame punkti P mingi positiivse laengu, siis liigub tema jõujoonte e mõjul üles; järgmisel silmapilgul aga jõuavad punktini P jõujooned d ning nimetatud laeng hakkab alla liikuma; veel hiljem tõukavad sinna jõudnud jõujooned c laengu uuesti üles jne. Nii õõtsub laeng




Joon. 208.

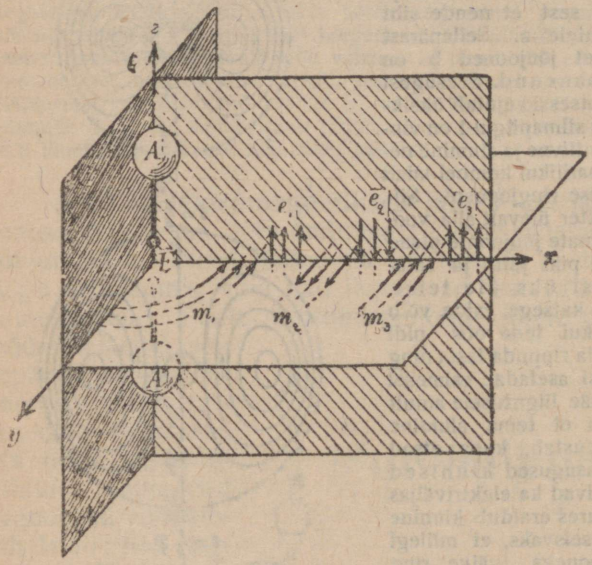
alatasa muutuvas elektriväljas ühe koha peal üles-alla, samuti kui vee pinnale visatud korgitükk veelainete mõjul üles-alla õõtsub. Selle sarnaduse tõttu hüütaksegi kirjeldatud vaheldava sihiga välja elektri laineteks. Sirgjoon FB on läbi lainetamistsentrumi F tõmmatud, järjelikult kujutab ta lainekiirt. Me näeme, et elektrilaines õõtsumine (või õieti välja sihi õõtsumisesarnane muutumine) sünnib perpendikulaarselt lainekiirele. Järjelikult on elektrilainetamine põiklainetamine.

Teataval silmapilgul olgu A' positiivselt ja A negatiivselt elektriseeritud (joon. 208): siis ei või jõujooned b enam A ja A' pindadele toetuda, sest et nende siht vastupidine on jõujoontele a. Sellepärast peame ettekujutama, et jõujooned b on vibraatorist täiesti vabanenud. Seesugust jõujoonte vabanemisprotsessi kujutab üksikasjalisemalt skeem 209: silmapilgul 1 on vibraatori ülemine plaat positiivne ja alumine negatiivne; jõujooned on harilikul kombel laiali lagunenud kunni äärmise ringjooneni. Silmapilgul 2 hakkab elekter ülevalt alla voolama. Vibraatorile lähemate jõujoonte otsad libisevad ühes vooluga piki juhti ja satuvad sel teel ristimisi üks üle teise. See nähtus on sarnane katsega, mida võib teha pikema niidiga, kui teda otsi pidi mõlemas käes hoides alla rippuda lasta ning käed siis järsku ristimisi asetada: esimesel silmapilgul järgnevad käe liigutusele ainult niidi ülemised osad, nii et tema alumine osa kinnise ringi moodustab, kuna otsad ristimisi seisavad. Samasugused kinnised jõujoonte ringid tekivad ka elektriväljas silmapilgul 2. Selle juures eraldub kinnine osa ning saab üsna iseseisvaks, ei millegi peale toetuvaks jõujooneks (väike ring mõlemal pool vibraatorit). Ka need jõujooned tõukuvad kaugemale ja suurenevad. Silmapilgul 3 on juba kõik jõujooned kinnised; samal ajal on potensiaalvahe vibraatori plaatide vahel null. Mõne aja järele elektriseerub vibraatori alumine pool positiivselt (4) ning tema lähemas ümbruses tekivad uued vastupidi sihitud jõujooned. Need kasvavad ühes vibraatori pingega; selle juures tõukavad uued jõujooned endiseid jõujoonteringe küljeti eemale ning lükkavad viimaseid enese ees, nii et ka kinnised ringid kaugemale nihkuvad. Järgmisel silmapilgul on uutel jõujoontel sama kuju nagu silmapilgul 1 ning kordub kõik ülevalkirjeldatu.




Joon. 209.

2) Neil silmapilkudel, kus elekter vibraatori ühest plaadist teise voolab, tekivad ümber vibraatori juhi kontsentrilised magnetjõujoonte ringid. Ka see väli laguneb vibraatorilt algades järk-järgult ikka kaugemale ilmaruumi laiali. Et voolu siht vibraatoris iga poole perioodi järele ümber pöördub, siis peavad ka magnetjõujoonte sihid sama tihti muutuma. Selle tõttu kujuneb ümber vibraatori vaheldava sihiga magnetväli, sarnaselt kui ülevalkirjeldatud elektriväligi. Joonistusel 210 on kujutatud elektri- ja magnetväli vastastikku perpendikulaarsetel pindadel, nii nagu ta ilmub vibraatori A A' ümber, mille säde asub pindade lõikepunktis F, ja mille juht ühte langeb teljega F Z: lainekiirt F X lõikavad horisontaalpinnas asuvad magnetjõujooned $m_1$, $m_2$ jne. perpendikulaarselt, kusjuures nende siht vaheldamisi eest taha ja tagant ette on. Kiire mingis punktis asuv magnetpoolus õõtsuks nende jõujoonte mõjul pinnal XY perpendikulaarselt kiirele FX, s. t. samuti kuidas õõtsuma peaks mingi laine osake, mis kiirt FX mööda pinnal XY laiali laguneb. Sellepärast hüütaksegi seesugust vaheldavat magnetvälja magnetiliseks laineks. Et vibraatori elektrilaine ($e_1$, $e_2$ jne.) asub pinnal XZ (võrdle joon. 208), siis seisavad mõlema laine õõtsumispinnad vastastikku perpendikulaarselt.




Joon. 210.

Elektriväli on kõige tugevam, kui vibraatori pinge (A ja A' vahel) on kõige suurem. Samal silmapilgul aga pöördub parajasti voolu siht, nii et voolu tugevus on null: Nendes kohtades, kus ilmub tugev elektriväli ($e_1$, $e_2$, $e_3$ jne.) ei või tekkida magnetvälja, oleneb ju viimase intensiivsus ainult voolu tugevusest. Magnetväli on kõige tugevam, kui vool on kõige suurem; viimane aga jõuab oma maksimaalväärtuseni sel silmapilgul, kus pinge A ja A' vahel on null (võrdle § 85₂), s. t. kus elektriväli vibraatori lähemas ümbruses hävineb. Sellepärast ilmuvad magnetvälja kõige intensiivsemad kohad ($m_1$, $m_2$ jne.) elektriväljade vahel.

Elektriline ja magnetiline laine kokku moodustavadki elektromagnetilise laine.

§ 88. **Elektriline resonans; resonaatorid ja dedektorid.** 1) Paigutame kiire F X teele (joon. 210) mingi juhi paralleelselt vibraatori A A′ teljele, siis tõukab mööda kiirt laialilagunev elektriväli juhis leiduvad elektroonid vaheldamisi üles ja alla. Sama liikumist toetab juhti perpendikulaarselt lõikav magnetväli. Mõlemate mõjul hakkab elekter juhis samuti üles alla õõtsuma kui vibraatoriski.

On juhi omainduktsioon ja mahutavus sama suur kui vibraatori oma, siis tekitaks seesugune juht, — vibraatorina tarvitatult — niisama kiireid õõtseid kui nad elektromagnetilises laines peituvad. Langevad aga sarnase juhi peale elektromagnetilised lained, siis summeeruvad laine üksikud tõuked ning elekter hakkab juhis ikka tugevamini ja tugevamini õõtsuma. Nähtus on täiesti sarnane heliharkide resonansiga (IV, § 26), — teda hüütakse sellepärast elektriliseks resonansiks. Nagu igal helihargil on oma kindel õõtseperiood, nii on ka igal vooluahelal oma kindel elektriline eneseõõtse periood. Viimane võrdub selle lainetamise perioodiga, mida antud juht vibraatorina ise tekitaks. Me nägime juba (§ 85₃), et see periood oleneb ainult juhi omainduktsiooni ja mahutavuse suurusest. Muutes juhi omainduktsiooni ehk tema mahutavust paraja suuruseni, võime seega antud juhti elektri lainetamisega alati resonanssi seada. Sarnasel puhul hüütakse juhti resonaatoriks. Resonaatorid tarvitatakse selleks, et ära tunda elektromagnetiliste lainete olemasolu.

2) Kõige lihtsama resonaatori saame, kui Leideni pudeli A (joon. 204) lähedusse asetame teise samasuure pudeli B, mille katted on ühendatud traadiga a′ b′ c′ d′. Seisavad mõlemad pudelid nii, et nende traadid abcd on paralleelsed, siis indutseerivad pudeli A sädemest laialilagunevad lained teise pudeli kinnises ahelas a′ b′ c′ d′ kiirelt vaheldava voolu. Kui pudeli B sisekattest tuua traadiotsake f tema väliskatte lähedusse, siis hüppab indutseeritud voolu mõjul väike säde väliskatte ja f vahel. Kui ahelaosa c′b′ ühele või teisele poole nihutada, siis lühendame või pikendame sellega resonaatori ahelat (a′b′c′d′). Ühtlasi muutub siis ka tema mahutavus ja omainduktsioon ning kogu ahela eneseõõtse periood. Katsel näeme, et säde f ainult ühe teatava kindla ahelapikkuse puhul kõige tugevam on; traadi c′b′ sellest seisust kas ühele või teisele poole lükkamisel kustub säde (Lodge katse).

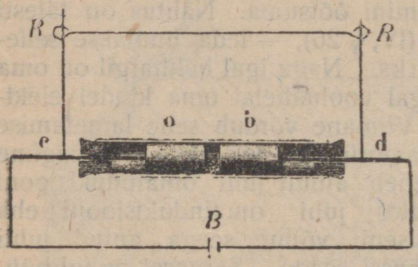
Resonaatoriks võime tarvitada ka Hertzi vibraatorisarnast juhipaari, kui viimase läbimõõdud sama suured valida kui lainetamist tekitava vibraatori omad; sest arusaadavalt peab siis resonaatori eneseõõtse periood võrduma vibraatori lainete perioodiga. Seesuguses resonaatoris hüppavad sädemekesed mõlema juhi kuulikeste vahel, mis selleks otstarbeks teadagi teine-teisele palju

ligemal peavad seisma kui vibraatoris. Kõige tugevamad on sädemed, kui resonaatori telg seisab paralleelselt vibraatori omale.

Hertz tarvitas oma katsetel resonaatoriks lihtsat traatrõngast, mille otsad ligistikku üks-teise vastu seisivad. Nende otsade vahel hüppabki sädemekene, kui ringi läbimõõt nii on valitud, et tema eneseõõtse periood võrdub elektrilainete perioodiga.

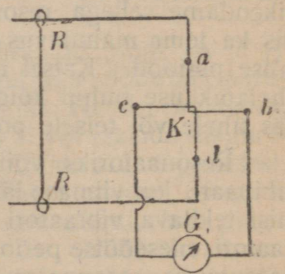
3) Seisab resonaator vibraatorist kaugel, siis jääb lainete mõju nii nõrgaks, et resonaatoris enam sädemeid ei teki. Sel puhul tarvitatakse resonaatori ahelas ilmuva nõrga vaheldavvoolu äratundmiseks n. n. dedektor'e, mille ülesanne on nimetatud voolu olemasolu mingisugusel teel avaldada.

Üks vanematest dedektoritest on n. n. kohärer (joon. 211): kaks hõbesilindrikest a ja b seisavad vastavas klaastorus 1—2 mm kaugusel teineteisest. Nende vahel on peenike viilipuru (raud, nikkel, hõbe jne,) mis lahtiselt a ja b vahelist ruumi täidab. Ühendame c ja d Galvanielemendiga B, siis ei voola läbi kohäreri peaaegu mingit voolu, sest et viilipuru takistus väga suur on. Juhime aga läbi niiviisi ühendatud kohäreri resonaatori Rcd R ahelas tekkiva õõtsuva voolu, siis alaneb viilipuru takistus (5—6 oomini) ning elemendi ahelas pääseb elekter läbi kohäreri. Kui kohäreri pihta peale lainete kadumist nõrgalt koputada, siis tõuseb tema takistus otsekohe endise suuruseni ning elemendi vool katkeb. Sel kombel näitab elemendi vool (millega näiteks kella võib kõlisema panna), kas langevad resonaatori peale elektromagnetilised lained või mitte.



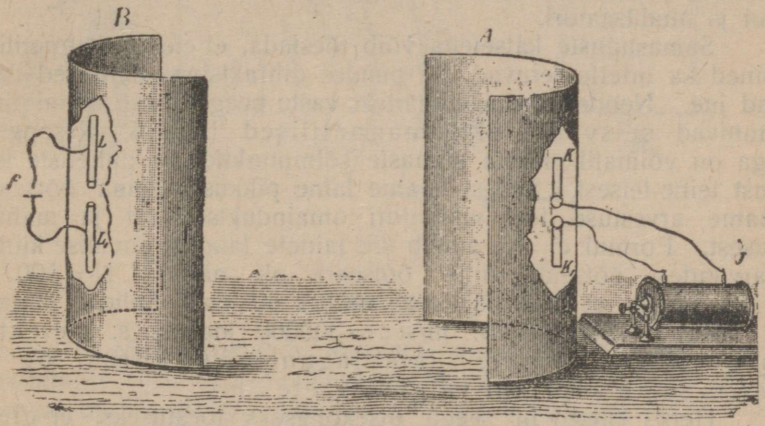
Joon. 211.

Uuemates dedektorites, nii nagu neid tarvitatakse traadita telegrafis, kasutatakse tihti voolu õõtsumise näitajana termoelemendikest. Seesugust dedektori moodustab peenike raudtraadike a K b (joon. 212) ning samasugune konstantaantraat c K d, mis sõlmes K üks-teise külge puutuvad. Juhitakse resonaatori RR vooluõõtsed läbi a Kd, siis soendab vool traatide kokkupuutumiskohta K, sest et seal takistus suurem on kui ahela teistest kohtades. Selle tõttu tekib termoelementi kujutavas traadipaaris c K — Kb (konstantaan-raud) nõrk termovool, mille siht teadagi püsiv on, ja mida galvanomeetriga G mõõta võib. Niipea kui lained langevad resonaatori peale, pöörab termovool galvanomeetri nõela. Peale kirjeldatud dedektorite on olemas veel terve hulk teisi dedektore.



Joon. 212.

§ 89. **Elektromagnetiliste lainete peegeldumine ja murdumine.** Tarvitades väga kiireid õõtseid (kunni 500 miljoni sekundis), võis H. Hertz (1886—88) oma vibraatoriga lühikesi elektromagnetilisi laineid sünnitada ning viimaste peegeldumist ja murdumist katseliselt tõestada. Elektrilainete peegliteks tarvitas ta silindrilisi plekk-ekraane (joon. 213). Ühe seesuguse ekraani ette kinnitas ta paralleelselt poolsilindri teljele oma vibraatori KK', millest elektrilained laiali lagunesid. Kui need lained samade seaduste järele peegelduvad nagu harilikud lainedki, siis peaks peegel neid paralleelse kiirtejoana tagasi heitma. 10—20 m. kaugusele esimesest peeglist asetas ta samasuguse teise peegli (B).




Joon. 213.

Langedes paralleelse joana sellele peeglile, peaks elektromagnetilised lained peegli peafookusse kokku peegelduma. Sinna asetatud resonaatoris ($L$-$L_1$) peavad siis punktis f sädemed tekkima. Katsel selgus, et sädemed tõepoolest ainult siis ilmuvad, kui mõlemad peeglid üks-teise vastu seisavad. Pöörame ühte nendest ainult vähe teise sihti, siis kaovad resonaatori sädemed. Kui mõlemad peeglid vastu suurt metallpinda pöörati nii et kiirte langemisnurk (metallpinnale) võrdus nende peegeldusnurgaga, siis ilmusid resonaatoris sädemed, kuna nad peeglite teistsugusel seisul kustusid. Sellega tõestas Hertz, et elektromagnetilised lained peegelduvad üleüldiste seaduste järele.

Asetati üks-teise vastu pöördud peeglite vahele mingi suur juhtiv keha (näiteks raudplekk), siis kustusid resonaatori sädemed. Samasugune mittejuhtiv keha (näiteks puu, kivi, klaas) ei muutnud kiirte mõju. Sellest järgneb, et elektrit juhtivad ained on elektromagnetiliste kiirte jaoks läbipaistmatud, kuna mittejuhid on läbipaistvad.

Peeglite vahele paigutati suur vertikaalne asfaltprisma: selgus, et resonaatori sädemete ilmumiseks teist peeglit nüüd vähe

ühele või teisele poole kõrvale tuli pöörata: Asfaltprisma murrab elektromagnetilisi laineid, kallutades neid prisma aluse poole, samuti kui klaasprisma kallutab valguskiiri oma aluse poole. Järjelikult sünnib ka elektromagnetiliste kiirte murdumine üleüldiste seaduste järele.

Elektromagnetilised lained on sirgjooneliselt polariseeritud: kui peeglid ristimisi seisavad, s. t. kui üks nendest on vertikaalne, teine — horisontaalne, siis kustuvad resonaatori sädemed, kuna nad peeglite paralleelseks pööramisel uuesti ilmuvad. Oleks elektromagnetilised lained loomuliku valguse kiirtega sarnased (V, § 81), siis peaksid ka ristiseisvas resonaatoris sädemed ilmuma, pääseb ju loomulik valgus läbi risti seisvate polarisaatori ja analüsaatori.

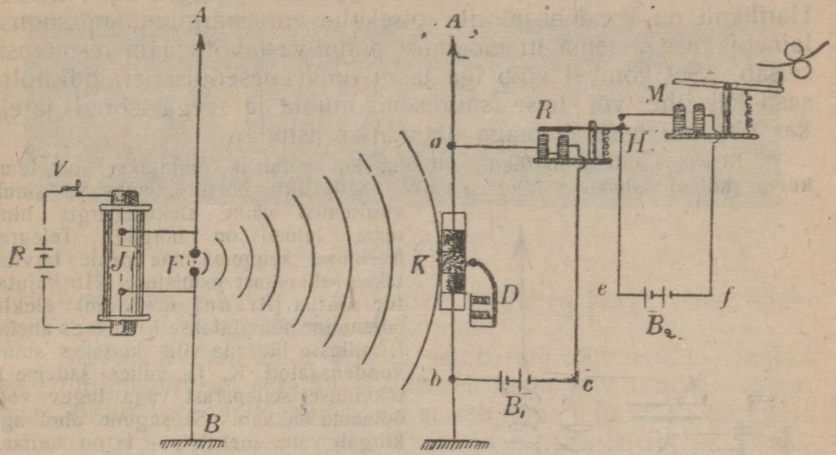
Samasuguste katsetega võib tõestada, et elektromagnetilised lained ka interfereeruvad, et nendes diffraktsioon-nähtused ilmuvad jne. Nende juhtimisel näiteks vastu peegeldavat metallpinda sünnivad seisvad elektromagnetilised lained. Resonaatoriga on võimalik mõõta viimaste sõlmpunktide ja puhetiste kaugust teine-teisest. Sellest leiame laine pikkuse; tema õõtsearvu saame arvestuse teel vibraatori omainduktsioonist ja mahutavusest. Formul $c = Nl$ annab siis lainete laialilagunemise kiiruse. Tarvitades õõtseid, mille õõtsearv oli näiteks $N = 500.10^6$, leidis Hertz, et lainepikkus oli umbes 60 cm. Sellest järgneb, et kiirus $c = 500.0{,}6.10^6$ m/sec = 300000 km/sec. s. t. elektromagnetiliste lainete laialilagunemise kiirus on ka eetris sama suur kui valguslainete oma.

Hertzi katsed on seega otsekoheseks tõestuseks, et elektromagnetilised lained samad on kui valguslainedki. (Maxwelli valgusteooria, V, § 58). Mõlemad eralduvad üks-teisest ainult oma lainepikkusega. Kuna kõige pikemate infrapunaste kiirte lainepikkus on 0,3 mm, on kõige lühemate, vibraatoriga sünnitatud elektromagnetiliste lainete pikkus ligi 3 mm. Traadita telegrafis tarvitatavate lainete pikkus on mitu tuhat meetrit ja rohkem.

90. **Traadita telegraf.** Marconi oli esimene, kes elektromagnetilisi laineid kasutas märkide edasiandmiseks ehk traadita telegrafeerimiseks (1896).

Saatejaamas tekitatakse elektrilaineid vibraatoriga F (joon. 214), mis Hertzi omast ainult sellega eraldub, et temas plaatide asemel on pikad traadid FA ja FB. Alumine traat on ühendatud maaga; ülemine FA juhitakse võimalikult kõrgele ja on täiesti isoleeritud, — teda hüütakse antenniks. Niipea kui induktor J mõlemad traadid laeb, tekib punktis F sädemete vool. Antennis (FA) õõtsub selle juures elekter üles-alla, mille tagajärjel elektrilained sünnivad, mis ilmaruumis igale poole laialilagunevad. Jõudes vastuvõttejaama antennini $A_1$, sünnitavad need lained viimases sama kiire, kuid nõrga üles-alla õõtsuva elektri-

voolu. See õõtsuv vool läheb läbi kohäreri K ning vähendab tema takistust. Selle tagajärjel voolab elekter elemendist $B_1$ läbi ahela $B_1$ b a Rc. Samasse ahelasse on lülitatud relee R, (§ $52_1$), milles voolu tekkimisel ühendub kontakt H. Sellega tekib vool ka ahelas $B_2$ e H M f, mille allikaks on patarei $B_2$. Viimane vool



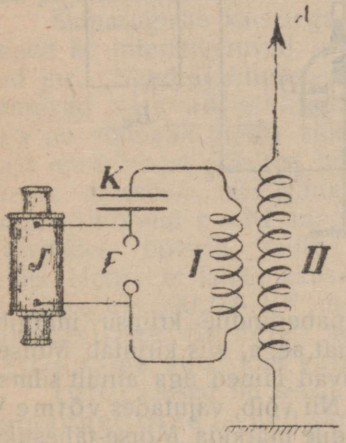

Joon. 214.

läheb läbi Morse-aparaadi M, mis paberlindile kriipsu märgib. Tekitatakse saatejaamas laineid pikemat aega, siis kirjutab Morse-aparaat lindile pikema joone. Kestavad lained aga ainult silmapilgu, siis märgib M lindile punkti. Nii võib, vajutades võtme V peale lühemat või pikemat aega, lindile märkida Morse-tähestiku tähed. Et kohäreri takistus igakord peale lainete hävinemist otsekohe endiseks kasvaks, koputab tema pihta väike Wagneri haamrike D, mis sama kontakti H läbi mingi elemendi vooluahelasse lülitatakse.

2) Saate- ja vastuvõttejaama antennid peavad resonansis olema, sest vastasel korral oleks elektri õõtsumine viimase antennis ($A_1$) niivõrd nõrk, et ta kohäreri peale ei suudaks tarvilikul määral mõjuda. Et üks ja sama saatejaam võiks mitmele vastuvõttejaamale märke saata, peaksid järjelikult nende kõikide antennid täpipealt ühesugused olema. Praktiliselt ei ole see teadagi mitte võimalik. Sellepärast muudetakse antennide omainduktsiooni ja mahutavust (millest oleneb nende eneseõõtse periood) sellega, et nende ahelasse mitmesuuruseid kondensaatore ja suure omainduktsiooniga traatrulle lülitatakse. Mahutavuse ja omainduktsiooni suurendamine või vähendamine mõjub siis õõtseperioodi peale samuti kui antenni pikendamine või lühendamine. Sel kombel võib üks ja sama antenn saata ja vastu võtta väga mitmesuguse pikkusega laineid. Et vastuvõttejaamas teada oleks, kust antennile tulnud lained pärit on, s. t. kust telegrafeeritakse,

on kokku lepitud, et iga jaam alati ainult ühe kindla pikkusega laineid saadab. Tallinnas teatakse, näiteks, et Pariisist tulnud lained on 3000 m, Peterburist tulnud aga 4000 m pikad. Kui Tallinna vastuvõttejaam oma antenni ahelasse seesuguse kondensaatori lülitab, et tema resonansis on 3000 m pikkuste lainetega, siis teab ta, et sarnasel korral kinnipüütud märgid on Pariisist. Harilikult on kondensaatorile otsekohe ära märgitud, missuguse lainepikkusega tema ühendamise puhul vastuvõttejaam resonansis seisab. Sel kombel võib iga jaam oma eneseõõtseperioodi hõlpsasti kas ühe või teise suuruseni muuta ja seega soovi järele kas ühe või teise jaamaga ühendusse astuda.

3) Kuigi antenn harilikult nii suur kui võimalik ehitatakse, on tema kogumahutavus siiski võrdlemisi väike. Selle tõttu õõtsub temas ka ainult võrdlemisi väike elektrienergia ning tema lained on nõrgad. Telegrafeerimisel kaugema maa peale tarvitatakse sellepärast joonistusel 215 kujutatud saatjat (Brauni süsteem): elektri õõtsumine sünnitatakse kinnises ahelas I, millesse lülitada võib kuitahes suure kondensaatori K, ja milles sädeme F tekkimisel sellepärast väga tugev vool õõtsuma hakkab. Seesugune ahel aga kiirgab vähe energiat, — ta on sarnane helihargiga, mis küll tugevasti õõtsub, kuid mis — näiteks käes hoitult — ainult võrdlemisi nõrga helilainetamise sünnitab. Ühendame aga ahela I induktsioonrulli I—II abil antenniga A, siis indutseerub ka viimases tugev õõtsuv vool, mis vastavalt tugevaid laineid ilmaruumi saadab. Antenn etendab siin resonanskasti osa, mis tema külge kinnitatud helihargi õõtsumised helilainetena õhku saadab, mis aga ise helilaineid ei saa sünnitada, vaid selleks helihargilt alatasa uusi tõukeid peab saama. Vastuvõttejaama konstruktsioon on ka siin sarnane saatja omaga: tema antennis tekkivad vooluõõtsed indutseerivad kinnises ahelas (I) tugevamaid õõtseid, mis mõjuvad sädekoha F asemele lülitatud kohäreri peale.



Joon. 215.

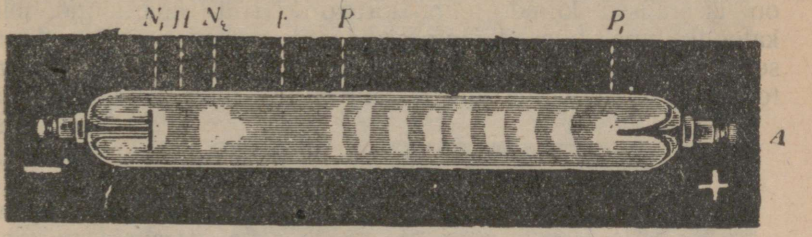
Suuremate traadita telegrafijaamade lained ulatavad praegusel ajal juba kunni maakera poole perimeetri kauguseni, nii et seesugused jaamad üle maakera kogu pinna võivad telegrafeerida.

## Peatükk X:

## Elektri voolamine läbi gaaside.

§ 91. **Elektri vool hõrendatud gaasis; katoodkiired.** 1) Elektri voolamisel läbi hõrendatud gaasi tekivad iseäralised valgusnähtused, mille uurimiseks harilikult tarvitatakse kinnist klaastoru (joon. 216), millest õhku järk-järgult välja võib pumbata. Ühendame seesuguse toru elektroodid A ja K tugeva elektriseerimis-masina ehk kõrge pingega patarei (1000 ja rohkem väikest elementi) poolustega, siis ilmub elektroodide vahel alguses pee-

nike niidikujuline säde. Õhu hõrendamisel võib sädeme tekitamiseks tarvilik pinge ikka madalam ja madalam olla. Rõhumisel 1 mm langeb tarvilik pinge kõige madalamale (200—300 volti); veel hõredamas õhus peab pinge aga uuesti kõrgem olema, kunni




Joon. 216.

lõpuks absoluut õhutus ruumis enam kuitahes kõrge pinge sädemeid ega teisi valgusnähtusi ei sünnita.

Alguses niidikujuline säde laieneb õhu hõrenemisel; umbes 3—4 millimeetrilisel rõhumisel heleneb kogu toru ühtlase valgusega; ainult katoodi K läheduses seisab tume kiht, mida hüütakse katood-pimeruumiks ehk Faraday-pimeruumiks. Viimane jagab kogu toru valguse kahte jakku: anoodilt algavaks positiivseks valguseks ja otse katoodi pinnal helenevaks negatiivseks valguseks.

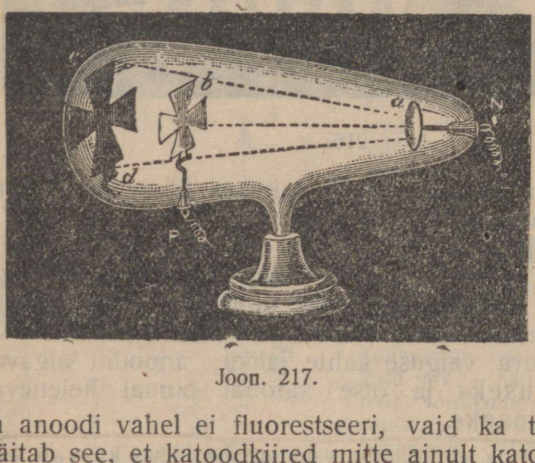
Tähelepanemisväärt on, et positiivse valgussamba pikkus kasvab ühes toru pikkusega, kuna Faraday-pimeruumi ja negatiivse valguse ulatus ei olene toru pikkusest. J. J. Thomson valmistas näiteks 15 meetri pikkuse toru, milles negatiivne valgus ja Faraday pimeruum ikkagi ainult mõne sentimeetri pikkuseni ulatasid, kuna positiivne valgus ligi 15 m pikk oli. Selle juures võib toru kuitahes kõver olla: positiivne valgus täidab toru õõnsuse ka igas kõverikus.

Pikkades torudes kulub positiivse valguse tekitamiseks võrdlemisi vähe energiat; sellepärast kasutatakse teda vahest valgustamise otstarbeks (n. n. More-valgus). Huvitav on et positiivse valgusega heleneva toruõõnsuse temperatuur ainult vähe kõrgem on ümbruskonna temperatuurist. Seda valgust võib sellepärast õigusega „külmaks“ valguseks nimetada.

Õhu edaspidisel hõrenemisel lühineb positiivne valgus ning pikeneb Faraday-pimeruum ja negatiivne valgus. Umbes 1—0,1 millimeetrilisel rõhumisel jaguneb punakas-violett positiivne valgus üksikuteks kihtideks (P—$P_1$), mis eraldatud üks-teisest kitsaste pimedate kihtidega (joon. 216). Selle juures ei seisa negatiivne valgus ($N_2$) enam katoodi pinnal, vaid vähe kaugemal viimasest, nii et sinika negatiivse valguse ja kollakalt heleneva katoodi enese pinna vahel uus tume kiht (H) — n. n. Hittorfi ehk Crookes'i pimeruum kujuneb. Helenevat katoodipinda hüütakse katoodi esimeseks valguskihiks.

2) Hõrendame gaasi edasi, siis kasvab Hittorfi pimeruumi pikkus; negatiivne valgus nihkub selle juures katoodist ikka kaugemale ning positiivne valgus tõmbub anoodi pinna poole ikka

lühemaks ja lühemaks. Lõpuks heleneb veel ainult anoodi pind, kuna positiivne valgussammas sootumaks on kadunud. Rõhumisel alla 0,02 millimeetrit kaob ka negatiivne valgus (№) ning kogu toru jääb tumedaks. Sellevastu fluorestseerivad aga nüüd toru seinad — iseäranis tugevasti anoodi ümbruses. Selle põhjuseks on iseäralised kiired, n. n. katoodkiired, mis sirgjooneliselt katoodi pinnalt tulevad ning mis klaasile langedes viimase fluorestseerima panevad. Crookes valmistas joonistusel 217 kujutatud toru milles anoodina on metallrist (b) ning katoodina väike ketas (a). Õhu suurel hõredusel (0,001 mm) ilmub klaasseinal risti taga tume teravate piirjoontega vari, kuna klaasi pind mujal heledalt fluorestseerib. Sellest järgneb, et fluorestsentsi tekitavad kiired tõepoolest sirgjooneliselt laiali lagunevad.

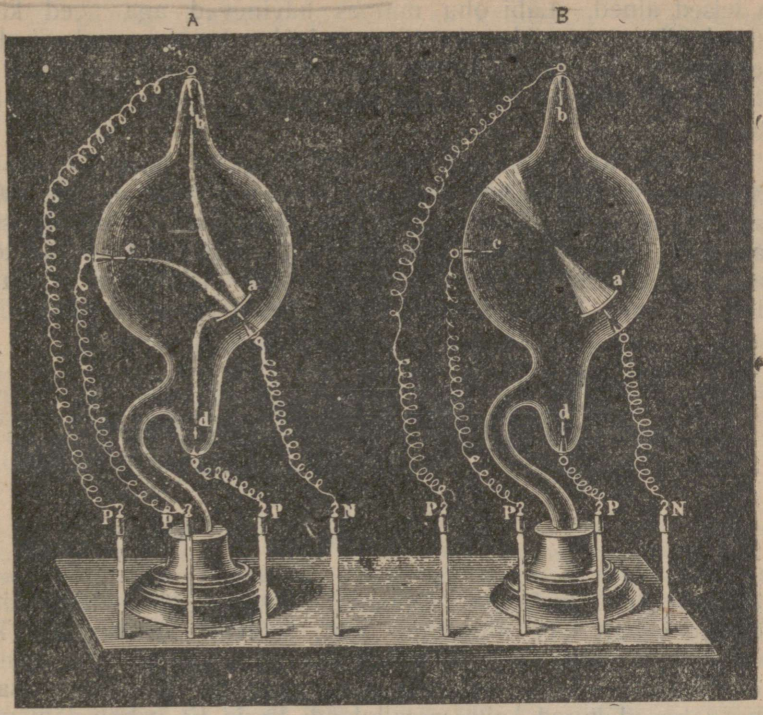


Joon. 217.

Et klaaspind mitte ainult katoodi ja anoodi vahel ei fluorestseeri, vaid ka tagapool anoodi, siis näitab see, et katoodkiired mitte ainult katoodilt anoodi pinnale ei lähe, vaid et nad anoodist mööda võivad minna ja ka viimase taga veel edasi kesta. Katoodkiirte tee ei olene nii siis anoodi asukohast, sest anoodi taga ei või viimane nende peale mõju avaldada. Ühendame näiteks joonistusel 218 kujutatud toru kadoodi (a) kõrge pingega patarei negatiivse poolusega ja kolm anoodi (b, c ja d positiivse poolusega, siis pöördub säde tihedas õhus teadagi anoodide poole ja haruneb seega kolme osasse (joon. A). Alandame aga õhurõhumist näiteks kunni $^1/_{1000}$ millimeetrini, siis jääb kogu toru ise võrdlemisi tumedaks ja heleneb ainult klaasseina ringikujuline osa, mis vastu katoodi (a') seisab (joon. B). Selle juures ei avalda anoodide (b, c ja d) asukoht kiirte peale mingit mõju. On katoodil õõnespeegli kuju, siis tulevad katoodkiired koonus-sarnase joana tema pinnalt (v. joon. B). Sellest selgub, et katoodkiired tulevad perpendikulaarselt katoodi pinnalt ja liiguvad sirgjooneliselt edasi, nagu ei oleks anoodi olemaski.

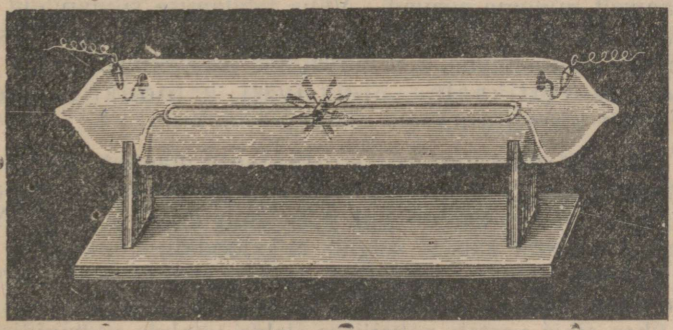
Kui viimatikirjeldatud toru (joon. 218, B) keskpaika väike plaatinplekike kinnitada, nii et katoodilt tuleva kiirtekoonuse tipp pleki peale langeb, siis soeneb viimane koondatud katoodkiirte mõjul, hakkab heledalt hõõgama ja võib koguni sulaneda. Põrkuvad katoodkiired vastu väikese, vesirattasarnase rattakese labidaid (joon. 219), siis hakkab ratas pöörduma ja veereb mööda

horisontaalset alust edasi. Kõigest sellest järgneb, et katoodkiirtes hulk energiat peitub.




Joon. 218.

Et katoodkiired väljaspool toru mingisugust mõju ei avalda, siis peab oletama, et katoodkiired läbi klaasi ei pääse. On

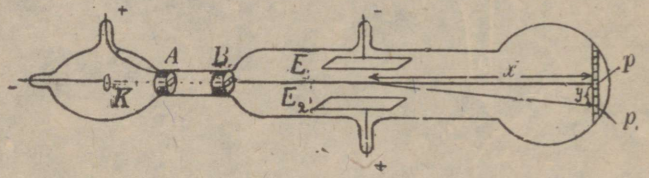


Joon. 219.

toru seinas aga väike „alumiinium-aken“, s. t. avaus, mis kaetud üliõhukese alumiiniumplekiga, siis tungivad katoodkiired läbi alumiiniumi atmosfäärilisse õhku. „Akna“ läheduses sünnitavad

need n. n. Leenard-kiired (Leenard, 1894) fluorestsentsi: nende mõjul fluorestseerib nii õhk ise kui ka akna lähedal hoitud klaas ja teised ained. Läbi õhu minnes hävinevad aga need kiired juba lühikesel teepikkusel, nii et nad õhus kuigi kaugele ei ulata. Seesugustest katsetest järgneb, et katoodkiirte jaoks on klaas läbipaistmatu, õhuke alumiiniumplaat aga — läbipaistev.

§ 92. **Katoodkiired kui elektroonide vool.** 1) Katsed näitavad, et katoodkiired oma sirgjoonelisest teest kõrvale kalduvad, kui neid läbi elektri- ehk magnetvälja juhtida. Seesugusteks katseteks võib tarvitada joonistusel 220 kujutatud õhutut toru: katoodiks, millest kiired tulevad, on väike metallketas K; anoodiks on toru kitsamas osas seisev ketas A, mille läbi kitsas




Joon. 220.

horisontaalne pilu läheb. Katoodilt tulevad sirgjoonelised kiired lähevad vabalt läbi nimetatud pilu, satuvad samasuguse, kuid veel kitsama piluga diafragmale (B) ning pääsevad üsna õhukese horisontaalse kiirtejoana toru parempoolsesse laiemasse osasse. Seal lähevad kiired kahe metallplaadi $E_1$ ja $E_2$ vahelt läbi ning sünnitavad toru parempoolses otsas seisval fluorestseerival ekraanil heleda horisontaalse juti p. Kui plaadid $E_1$ ja $E_2$ mingi kõrgepingega vooluallikaga ühenda, siis tekib nende vahel vertikaalne, peaaegu homogeen elektriväli, mille läbi katoodkiired perpendikulaarselt minema peavad. Välja tekitamise silmapilgul näeme, et jutt p kas üles- või allapoole nihkub — selle järele, missugune plaatidest on positiivne, s. t. missugune on elektrivälja siht. Sellest järgneb, et vertikaalne elektriväli katoodkiiri üles või alla peab painutama.

Asetame sama toru horisontaalsete magnetpooluste vahele, nii et kiirtejuga perpendikulaarselt läbi horisontaalse magnetvälja peab minema, siis kaldub jutt p endiselt üles või alla. Nii esimesest kui teisest katsest selgub, et katoodkiir sinna poole kaldub, kuhu kalduks painduv voolujuht, milles positiivne elekter voolab vastu kiirte sihti (s. t. anoodilt katoodile). Et positiivse elektri vool ühes sihis vastab negatiivse elektri voolule vastupidises sihis (§ 43), siis järgneb kirjeldatud katsetest, et katoodkiirtes **negatiivne** elekter kiirte sihis, s. t. katoodilt anoodile voolab. Et katoodkiired tõepoolest negatiivset elektrit enestega kannavad, seda tõestab muu seas asjaolu, et isoleeritud

kehad, mille peale katoodkiired langevad, negatiivselt elektriseeruvad.

2) Ülevalkirjeldatust järgneb, et katoodkiir mingisugune lainetamine ei või olla, sest lainetamisel ei või elekter mingil kombel kiirega ühes kanduda. Järjelikult kujutab katoodkiir negatiivse elektri konvektsioonvoolu. Võiks arvata, et meil siin tegemist on samasuguse joonide-vooluga, nagu teda tundma õppisime elektrolüüsi nähtustel. Sellepärast katsuti selgusele jõuda, kui suur on niisuguse jooni laeng ja mass või vähemalt tema erilaeng, s. t. laengu e ja massi m vahekord e/m. Selle suuruse, kui ka jooni kiiruse v saame, kui mõõdame kiirtejoa kõrvalekaldumise suurust $pp' = y$ (joon. 220) tuntud tugevusega homogeen elektri- ja magnetväljas:

Kui piki kiirt iga sentimeetri pikkusel seisab n jooni reas ja kui joonide kiirus on v cm/sec, siis läheb ühes sekundis läbi kiire iga põiklõike n. v jooni, millega kaasas kandub elektrihulk n. v. e. Seega võime iga üksiku kiire peale vaadata kui negatiivse elektrivoolu peale, mille tugevus on $i = n.v.e$, sest et voolu tugevus võrdub sekundis läbi mingi põiklõike mineva elektrihulgaga. On magnetvälja intensiivsus $\mathfrak{H}$, siis mõjub ühe sentimeetri pikkusel ($l = 1$) seesuguse voolu i peale jõud (§ 74₂, formul 29)

$$F = \mathfrak{H} i = \mathfrak{H} n v e$$

Selle jõu siht on perpendikulaarne nii magnetväljale kui kiire sihile; horisontaalses väljas ja kiires on ta seega vertikaalne; ning tema suurus on kostant niikaua kui $\mathfrak{H}$ ja v on konstandid. Seesugune konstant ja perpendikulaarselt liikumissihile mõjuv jõud sünnitab ringliikumise. Sellepärast peavad joonid magnetväljas liikuma mööda ringikaart, mille raadius olgu r. Ringliikumise kiirendus (II, § 44₅, formul 65) on $\frac{v^2}{r}$; iga üksiku jooni jaoks peab seda kiirendust sünnitava jõu suurus olema $\frac{v^2}{r} \cdot m$, kiire ühe sentimeetri pikkusel asuva n jooni jaoks aga $\frac{v^2}{r} \cdot m.n$. Eelmise järele on see jõud $F = \mathfrak{H}.n.v.e$ sellest järgneb, et

$$F = \mathfrak{H}.n.e.v = \frac{v^2}{r} \cdot m.n$$

ehk

$$\frac{v.m}{e} = \mathfrak{H}.r \qquad 31)$$

Läbi magnetvälja läinud kadoodkiire kõverjoonelisest teest leiame otse kohe ringi raadiuse r; kui tuntud on magnetvälja tugevus $\mathfrak{H}$, siis annab formul (31) väärtuse $\frac{m}{e} \cdot v$.

Liikudes läbi elektrivälja (joon. 220), mõjub iga jooni peale selle välja sihis jõud $\mathfrak{E}.e$ (§ 33₃, formul 8-a), kus $\mathfrak{E}$ tähendab välja intensiivsust. On väli homogeen, siis sünnib jooni liikumine temas samuti kui horisontaalselt visatud keha liikumine maakera raskusväljas, s. t. jooni liikumistee on paraabol. II, § 14₂ järele määrab paraaboli kuju formul (34) $x^2 = 2 \frac{v^2}{g} y$, milles kiirendus g on nagu harilikult jõud $\mathfrak{E}e$ jagatud jooni massiga m, s. t. $g = \mathfrak{E}e : m$. Seega on

$$\frac{v^2.m}{e} = \frac{\mathfrak{E} x^2}{2 y} \qquad 32)$$

Pikkused x ja y (vaata joon. 220) leiame katsest, samuti ka välja intensiivsuse

€. Võrrandites (31) ja (32) on seega tuntud parempoolsed lülid, sellepärast saame nendest otsitud väärtused v ning $\frac{e}{m}$.

Seesuguseid mõõtmisi on tehtud väga mitmesugustel tingimustel ning igasugustes gaasides. Nendest selgub, et joonide erilaeng

$$\frac{e}{m} = 1{,}75.10^8 \text{ (Cb/g)}$$

ei olene torus leiduvast gaasist, vaid et ta kõikide gaaside puhul ühesuuruseks jääb.

Et elektrolüüdis oli vesinikujooni erilaeng 96500 Cb/g (§43$_2$), kuna katoodkiirte joonides aga on erilaeng $1{,}75.10^8$ Cb/g siis on emba-kumba, kas katoodkiire jooni laeng on $\frac{1{,}75.10^8}{96500} =$ $\cong$ 1800 korda suurem vesiniku jooni laengust, või on vesiniku jooni mass sama palju korda suurem katoodkiire jooni omast. Mitmed iseseisvad katsed näivad tõestavat, et joonide laeng katoodkiirtes umbes sama suur peab olema kui elektrolüüdiski. Järjelikult on katoodkiire jooni mass 1800 korda väiksem kui kõige kergema elemendi — vesiniku aatomi mass.

3) Katoodkiirte joonide kiiruse kohta annavad ülevalkirjeldatud katsed üllatava resultaadi: joonide edasiliikumiskiirus kõigub harilikus katoodtorus 30000 kunni 100000 km/sec. Seega võrdub nende kiirus $^1/_{10}$—$^1/_3$ valguskiirusega. Kiirus oleneb toru elektroodide pingest ehk, mis sama tähendab, õhu hõredusest torus: mida hõredam õhk, seda kõrgem on tarvilik pinge, millega elekter läbi toru voolama hakkab (§ 90$_1$), seda suurem on katoodkiirte joonide kiirus. See on täiesti arusaadav, kui silmas pidada, et kõrgema pinge juures negatiivsed joonid tugevamini katoodilt eemale tõukuvad.

On võimalik tekitada katoodkiiri, mille kiirus veel palju suurem on kui üleval nimetatud (näit. raadiumi $\beta$ kiired). Läheneb katoodkiirte kiirus valguskiirusele (3000000 km/sec), siis avaldub eelmises punktis kirjeldatud mõõtmiste resultaatides järsk muudatus: kuna harilikkudel katoodkiirtel (v = kunni 100000 km/sec) erilaengu e/m suurus igasugusel kiirusel ühesuguseks jääb, hakkab ta jooni kiiruse lähenemisel valguskiirusele vähenema. Kaufmann leidis näiteks, et kiirusel 285000 km/sec jooni erilaeng ligi 3 korda väiksem oli kui harilikkudes katoodkiirtes. Väga suurtel kiirustel oleneb nii siis katoodkiire jooni erilaeng tema kiirusest. Et elektrolüüdiis kui ka mujal jooni laeng (e) ei olene ei tema kiirusest ega teistest tingimustest, siis peab oletama, et ka katoodkiirte jooni laeng on kiirusest olenematu. Kui katoodkiirte e/m ühes kiirusega siiski kahaneb, siis on see ainult võimalik, kui jooni mass selle juures kasvab. Sellest järgneb üllatav asjaolu, et katoodkiire jooni

mass oleneb kiirusest, kui viimane läheneb valguskiirusele.

4) Üleval leidsime, et katoodkiire jooni mass on 1800 korda väiksem kui vesiniku aatomi oma, et see mass mitte konstant ei ole, vaid kiirusest oleneb ja et selle jooni kiirus läheneda võib valguskiirusele. Vesiniku aatomi peame pidama kõige väiksema massiga iseseisvaks jagamatuks aineosakeseks; sellepärast ei või me ettekujutada aineosakest, mis veel 1800 korda väiksema massiga oleks. Me ei tunne ühtegi liikumist, mille juures ainelisel kehal valguskiiruse sarnane kiirus oleks, ega ühtegi juhust, kus keha mass muutuda võiks kiirusega. Kõigil nendel põhjustel oletatakse, et katoodkiirte joonides üleüldse mingisugust ainet ei olegi, vaid et nendes kiirtes elektriosakesed — elektroonid — vabalt ja ilma ainelise aluseta läbi väga hõreda gaasi liiguvad.

Oletatakse, et katoodkiire elektrooni mass ainult näiv on ja et me tema põhjust otsima peame elektrooni ümbritsevas magnetväljas. Nagu harilikult, nii otsustasime ka elektrooni massi suuruse üle ainult selle inertsuse järele, mis takistab elektrooni liikumismuudatust. Samuti kui inertsus keha liikumismuudatust takistab, nii takistab liikuva elektrooni enese magnetväli tema liikumise igasugust muudatust. Mida suurem kiirus, seda tugevam elektrooni magnetväli, seda suurem selle välja takistus elektrooni kiiruse muutmise vastu, — seda suuremana paistab meile siis ka elektrooni inertsus ja tema mass. Paigalseisval elektroonil mingit magnetvälja ei ole, sest et viimane ainult elektri liikumisel võib tekkida; sellepärast ei või paigalseisev elektroon ka inertsust avaldada, nii et tema mass peab olema null. Keskmistel kiirustel, nagu harilikkude katoodkiirte juures, on elektrooni intertsuse muutumine nii väike, et tema mass meile konstandina paistab; läheneb aga kiirus valguskiirusele, siis kasvab magnetvälja takistus ja elektrooni mass järsku palju suuremaks. Kirjeldatud vaate järele nimetatakse elektrooni massi elektromagnetiliseks massiks, eraldades teda sellega harilikust ainelisest massist. Selle hüpoteesiga seletub asjaolu, et katoodkiire jooni erilaeng (e/m) kõigis gaasides ühesuurune on (p. 1): et gaasi aatomid katoodkiirtest üleüldse osa ei võta, siis on väga tõenäolik, et kõigil elektroonidel ühesuurune laeng on; sarnasel puhul aga on ka nende elektromagnetiline mass ühesuurune. Olgugi et elektroonidel „inertsus“ on, ei mõju nende peale — igasuguse aine puudumisel — maakera raskusjõud: elektroonidel ei ole järjelikult kaalu, vähemalt ei avaldu ta üheski katses.

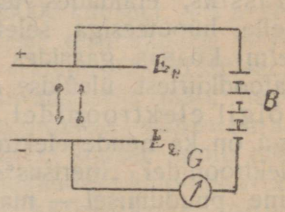
**§ 93. Kanaalkiired; katoodkiirte tekkimine.** 1) Kui katood K paigutada õhutu toru (joon. 221) keskele ja temale sõelasarnane kuju anda, siis tekivad harilikul viisil katoodkiired sihis KA, kuid peale selle näeme katoodi taga veel uusi kiiri,

mis läbi katoodi aukude (kanaalide) sirgjooneliselt sihis KC laiali lagunevad. Torus seisev hõre õhk heleneb nende n. n. kanaalkiirte teel, nii et neid otsekohe näha võib (Goldstein, 1886). Kanaalkiirte iseloomu ja koosseisu uurimiseks tarvitatakse samuti kui katoodkiirte puhulgi elektri- ja magnetvälja, läbi mille kiired juhitakse. Selgub, et ka kanaalkiired nendes omast esialgsest sihist kõrvale kalduvad, kuid palju väiksemal määral kui katoodkiired. Kõrvalekaldumise sihi järele võib otsustada, et kanaalkiired on positiivse elektri konvektsioonvool. Et need kiired tõepoolest positiivset elektrit enesega kannavad, näitab muu seas ka asjaolu, et kiirte teel seisev isoleeritud keha positiivselt elektriseerub. Mõõtes kanaalkiirte kõrvalekaldumise suurust elektri- ja magnetväljas, leitakse nende joonide erilaeng (e/m) olevat sama suur või väiksem kui elektrolüüsi vesiniku-jooni oma. Selle juures oleneb erilaeng sellest gaasist, millega katoodtoru enne hõrendamist täideti. Peab järeldama, et kanaalkiiri moodustavad jaokesed on samasugused positiivsed joonid kui elektrolüüsi joonidki, s. t. kanaalkiiri moodustavad katoodtorru jäänud gaasi aatomid (ehk moleekulid), mis kaotanud mõne elektrooni ja sellega positiivselt on elektriseerunud.

Joon. 221.

Kanaalkiirte kiirus on ligi 1000 korda väiksem katoodkiirte omast. Nagu viimane, nii oleneb ka kanaalkiirte kiirus katoodtorus seisva gaasi hõredusest: ta on seda suurem, mida suurem on hõredus ja mida kõrgem on pinge elektroodide vahel.

2) Katoodkiirte ja kanaalkiirte tekkimist seletab J. J. Thomsoni teooria gaasimoleekulite jooniseerumisega: Kui katoodkiired läbi alumiinium-akna harilikku õhku juhtida (§ 91₂), siis muutub õhk nende läheduses elektrijuhiks; näiteks kaotab elektriseeritud elektroskoop nimetatud akna läheduses väga ruttu oma laengu. Kui kiired juhtida kahe plaadi $E_1$ ja $E_2$ (joon. 222) vahele, siis näitab plaate ühendavasse ahelasse lülitatud galvanomeeter G, et patareist läbi ahela — tähendab ka läbi mõlema plaadi vahel seisva õhu — elekter voolab. Kahtlemata on meil siin tegemist samasuguse nähtusega kui elekrolüüsiski: õhk muutub juhtivaks sellepärast, et katoodkiired õhumoleekuleid jooniseerivad. Põrgates vastu gaasi moleekulit, purustab suure kiirusega lendav katoodkiire elektroon selle moleekuli ning viimasest tõukub üks temasse kuuluvatest elektroonidest välja. Selle tagajärjel elektriseerub aatomi ülejäänud osa positiivselt (+joon), kuna väljaheidetud elektroon mõne neutraalse gaasimoleekuliga ühineb ning



Joon. 222.

negatiivse jooni moodustab. Need joonid tõmbuvad plaatide $E_1$ ja $E_2$ külge ning kannavad elektrit läbi õhu plaatidesse samuti kui nad elektrolüüsil elektrit kannavad läbi elektrolüüdi.

Katoodkiirte tekkimine seletub selle põhjal järgmiselt: Nagu igas gaasis, nii leidub ka katoodtorru jäänud õhu või gaasi moleekulite hulgas mõni üksik positiivne joon; katoodi külgetõmbumise tõttu hakkab see joon piki toru katoodi poole liikuma ning omandab sellejuures suure kiiruse, sest et ta omal teel väga harva kokku põrkub teiste gaasimoleekulitega. Katoodini jõudes põrkub +joon suure hooga vastu katoodi pinda. Selle juures „purustab" ta mõne moleekuli katoodi aines ning seal vabanevad mõned elektroonid. Need tõukuvad samanimeliselt elektriseeritud katoodilt eemale ning liiguvad suure kiirusega anoodi poole. Et gaasimoleekulid torus väga harva seisavad, siis põrkuvad ainult mõned elektroonid nende vastu, kuna suurem osa elektroonidest vabalt ja sirgjooneliselt kunni toru teise otsani lendavad, moodustades katoodkiiri. Need elektroonid, mis vastu gaasimoleekuleid sattusid, jooniseerivad viimaseid: tekkinud + joonid liiguvad tagasi katoodi pinnale, sünnitades seal uusi elektroone, mis omakorda katoodkiirtena anoodi poole tõukuvad jne. On katoodis avaused, siis pääsevad mõned +joonid nendest läbi ning lendavad kanaalkiirtena oma hooga ka veel katoodi taga sirgjooneliselt edasi.

Nagu mõõtmised näitavad, ei ole toru takistus katoodi ja anoodi vahel mitte ühtlane: kõige suurem on ta katoodi läheduses. Sellepärast on potentsiaali langemine seal kõige järsum ja elektriväli kõige intensiivsem. Katoodist kaugenemisel mõjub nii siis elektrooni peale just katoodi läheduses kõige suurem jõud; elektroon omandab pea kogu oma kiiruse nimelt selle jõu mõjul ja lendab anoodi ümbruses, kus elektriväli üsna nõrk, ainult päritud hooga edasi. Sellepärast ei olene katoodkiirte tee anoodi asukohast.

§ 94. **Röntgenkiired.** 1) Põrkuvad katoodkiired vastu mingit tõket, siis tekivad põrkekohas isesugused kiired, mida nende leidja Röntgen (1895) X-kiirteks nimetas. Nende Röntgenkiirte tekitamiseks juhitakse sellekohases Röntgentorus (joon. 223) õõnespeeglisarnasest katoodist (B) tulevad katoodkiired (K) vastu plaatin- või volframplaadikest C — n. n. antikatoodi. Viimase pinnal tekivadki X-kiired, mis sealt igale poole laiali lagunevad. Anoodiks on väike elektrood A. Et viimase asukoht katoodkiirte sihi peale mingit mõju ei avalda, siis ühendatakse antikatood C harilikult anoodiga. Seisaks C isoleeritult, siis elektriseeruks ta katoodkiirte elektroonidega negatiivselt ning tõukaks selle järele tema pinnale tulevad katoodkiired eemale, millega X-kiirte tekkimine lõpeks.

Röntgenkiirte omadustest ja mõjudest on tähtsamad järgmised:

a) Nad lagunevad laiali sirgjooneliselt nagu valguskiiredki.

b) Nad tumestavad päevapildiplaati.

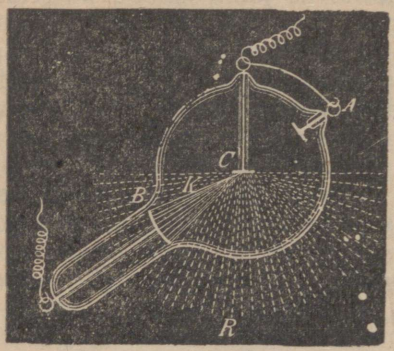
c) Harilikkudelt kehadelt ei peegeldu nad korrapäraselt ega murdu seal.

d) Nad tungivad läbi mitmete ainete, mis valguskiirtele läbipaistmatud (puu, paber, musklid ja liha jne.).

e) Nad tekitavad fluorestsentsi ja fosforestsentsi.

f) Nad jooniseerivad väga intensiivselt õhku.

g) Elektri- ja magnetväljas ei kaldu nad omast sirgjoonelisest teest kõrvale.




Joon. 223.

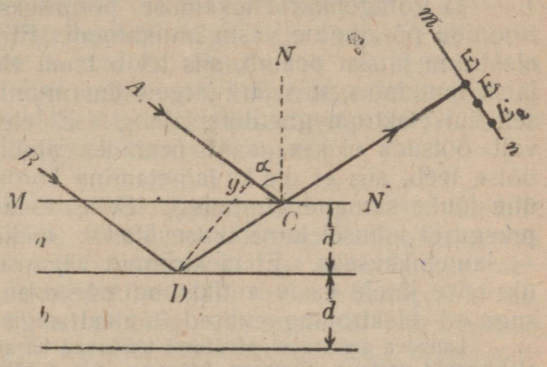
2) Röntgenkiired pääsevad läbi katoodtoru klaasseina ning lähevad ka läbi õhu. Et kõik ained nende jaoks mitte ühevõrra läbipaistvad ei ole, siis annavad nad vähem läbipaistvatest kehadest varju. Palja silmaga me seda varju küll ei näe — ei ole ju x-kiired ise nähtavad, — kuid juhime kiired fluorestseerivale baarium-plaatintsianüür ekraanile (V, § 79₁), siis heleneb viimane ainult nendes kohtades, kuhu kiired langevad, nii et varjukoht ekraanil tumedaks jääb. Hoiame näiteks käe kiirte teel, siis tungivad kiired vabalt läbi lihaosade, absorbeeruvad aga vähem läbipaistvates luuosades. Selle tõttu näeme ekraanil luude varjupilti (joon. 224). Asetame ekraani asemele musta paberiga kaetud päevapildiplaadi, siis tungivad Röntgenkiired läbi paberi ja tumestavad plaati, millega nimetatud varjupilti fotografeerida võib. Arsti-praktikas tarvitatakse Röntgenkiiri inimese kehaosade „läbivaatamiseks“ ja fotografeerimiseks.

Joon. 224.

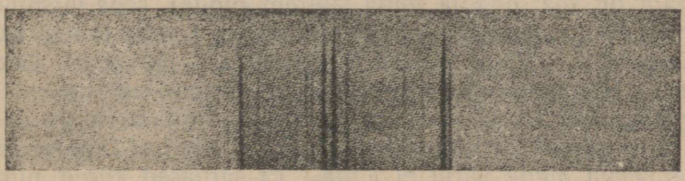
3) Palju vaieldi Röntgenkiirte loomu üle: et nad elektri- ja magnetväljas kõrvale ei paindu, siis ei või nad olla elektriseeritud jaokeste vool. Nad kujutavad nii siis kas mingisuguste neutraalsete üliväikeste osakeste teed, või valgusesarnast eetrilainetamist. Viimane vaade leidis tõestust, kui M. Laue'l (1912) õnnestas tekitada Röntgenkiirte interferentsnähtusi, juhtides neid kiiri läbi kristallide. Hiljem leidis W. L. Bragg, et Röntgenkiired õieti ka korrapäraselt peegelduvad, ja et me harilikult seda peegeldumist ainult sellepärast mitte tähele ei saa panna, et nende kiirte lainepikkus umbes

samasuur on kui ainete moleekulite kaugus teine-teisest. Sellepärast ei leidu Röntgenkiirte jaoks ühtegi „peeglit", vaid ka kõige siledamal pinnal seisavad ainemoleekulid nii kaugel üksteisest, et ta nende kiirte jaoks „tuhm" on ja kiired ainult hajuvad kuid korrapäraselt ei peegeldu.

Mitmesugused nähtused sunnivad oletama, et kristallide moleekulid paralleelsete kihtidena üks-teise peal lasuvad ja et nad igas seesuguses kihis nagu korrapärase sõelasarnase võre moodustavad. Kui tuntud on moleekulite arv ühes $cm^3$, siis võib antud kristalli jaoks välja arvata nimetatud moleekulkihi paksuse. Langevad mitmesuguse lainepikkusega paralleelsed Röntgenkiired AC ja BD seesuguse kristalli pinnale MN (joon. 225), siis peegeldub kiir AC kihis a seisva moleekuli pinnalt korrapäraselt sihis CE. Teine kiir BD võib läbi kihi a minna ja peegelduda alles järgmise kihi b moleekuli pinnalt, nii et peegeldatud kiirte sihid DE ja CE ühte langevad. Sarnaselt nagu kirjeldatud valguse interferentsil õhukestes kelmetes (V, § 681), toetavad need kiired üksteist, kui nende käigu vahe (DC—CG) võrdub 1, 2, 3 jne. lainepikkusega. Võib tõestada, et ka kõigi järgmiste moleekulkihtide mõju kiirte peale samasugune on. Antud langemisnurga ACN juures peegelduvad nii siis korrapäraselt ja iseäranis intensiivselt ainult need kiired, mille lainepikkus võrdub parajasti käiguvahega DC—CG. Asetame peegeldatud kiirte teele päevapildiplaadi mn, siis sünnitavad kiired DE viimasel teravate piirjoontega musta juti, kuna hajutatud kiired plaadi kogu pinda enam-vähem ühtlaselt ja palju nõrgemalt tumestavad. Pöörame nüüd kogu kristalli MN nii, et kiirte langemisnurk järjest kasvab, siis suureneb




Joon. 225.



Joon. 226.

vastavalt ka korrapäraselt peegeldatud kiirte peegeldusnurk (E CN). Selle juures väheneb korrapäraselt peegelduvate kiirte käiguvahe (DC—CG), s. t. uues peegeldumissihis (E C) toetavad üks-teist lühemad lained kui eelmisel juhusel, peab ju nende lainete pikkus võrduma lühema käiguvahega. Pun tis $E_1$ tekkiv tume jutt on nii siis lühemate lainete sünnitatud Tundes moleekulkihtide kaugust (d), võib välja arvata, kui suur on nende lainete pikkus, mis sünnitavad Röntgenkiirte spektrumi jutte $E_1$, $E_2$ jne,

Joonistus 226 kujutab kivisoola kristalli pööramisega plaadil mn tekitatud Röntgenkiirte spektrumi, mille juures Röntgentoru antikatoodiks oli plaatina. Tumedad jutid näitavad, et kristallile juhitud kiirtes iseäranis tugevad

on kolme kindla lainepikkusega kiired, kuna kõik teistsugused kiired enamvähem ühtlaselt on segatud (spektrumi ühtlane hall põhi). Samasugused kolm jutti ilmuvad ka teiste kristallide tarvitamisel; nad ei olene nii siis mitte kristallist, vaid antikatoodi ainest, sest kui plaatina asemele antikatoodiks võtta hõbe, vask jne., siis saame igal juhusel isesugused jutid. Saadud spektrum (joon. 226) kujutab nii siis plaatina Röntgenspektrumi.

Mõõtmised annavad harilikkude Röntgenkiirte lainepikkuse jaoks 0,15—0,03μμ. Kõige lühemad ultraviolett kiired (Schumanni kiired) olid 100μμ, seega on Röntgenkiirte lainepikkus 1000 ja enam korda väiksem kui kõige lühemate ultraviolett kiirte oma.

4) Röntgenkiirte tekkimise põhjuseks on katoodkiirte elektroonide põrkumine vastu antikatoodi. Et kokkupõrke silmapilgul elektroon järsku peatub, siis tekib tema elektromagnetilises väljas järsk muudatus, mis järk-järgult ilmaruumi laiali laguneb, sarnaselt kui elektromagnetiline lainegi. Et elektroon siin aga korduvalt õõtsuda ei saa, vaid peatades ainult nagu üheainsa poolõõtse teeb, siis ei ole ka lainetamine korduvalt kestev, vaid ainult ühe tõuke sarnane (impulss). Selle tõuke kestvust nimetamegi praegusel juhusel laine õõtsevälteks; tekkinud poollaine pikkust — lainepikkuseks. Et elektroonid väga suurel arvul ja ülikiirelt üks-teise järele vastu antikatoodi põrkuvad, siis moodustavad seesugused elektromagnetilised tõuked nagu korraliku lainetamise.

Langeva elektrooni põrutusel tõukuvad ka antikatoodi aatomites mõned elektroonid vastava kiirusega õõtsuma. Need õõtsed on vabad ja sünnivad sellepärast vastavate elektroonide eneseõõtse perioodiga Nendest tekib lainetamine, milles lainepikkus on samuti kui valguslainetamises teatud kindla pikkusega Just need korralikud lained, mis teadagi olenevad antikatoodi aatomite ehitusviisist, s. t. tema ainest, sünnitavad Röntgenkiirte spektrumil ilevalkirjeldatud tumedad jutid. Langeva elektrooni elektromagnetilised tõuked, mille pikkus on väga mitmesugune, annavad spektrumi ühtlase halli põhja.

Röntgenkiirte läbitungimisvõime oleneb tema lainepikkusest: mida kiiremini liiguvad Röntgentorus elektroonid (s. t. mida hõredam on seal õhk ja mida suurem pinge), seda järsumalt ehk kiiremalt jääb elektroon antikatoodil peatama, seda lühem ka tõuge ja lainepikkus. Nagu katsed näitavad, on lühikestel ehk n. n. kõvadel Röntgenkiirtel suurem läbitungimisvõime kui pikematel ehk pehmetel kiirtel. Näiteks võib väga hõreda õhuga Röntgentorus niisuguseid kiiri sünnitada, mis ka läbi luu vabalt pääsevad, ja mis seega luude varju ei anna. Et sarnased kiired nimetatud arstlisteks otstarveteks kohased ei ole, siis reguleeritakse kiirte „kõvadust“ sellega, et torru tarbekorral vähe õhku või mingit teist gaasi juhitakse.

5) Langevad Röntgenkiired mingi keha pinnale, siis heidab see keha enesest elektroone n. n. sekundäär-katoodkiiri välja. Pumpame näiteks katoodtoru õhu nii hõredaks, et elekter enam läbi toru ei saa voolata (tarvilikkude gaasijoonide puudumisel); niipea kui katoodi pinnale nüüd Röntgenkiiri juhtida, tekib vool otsekohe uuesti: Röntgenkiirte mõjul tõukuvad mõned elektroonid katoodi aine aatomitest välja; need elektroonid hakkavadki anoo-

dile lendama ja sünnitavdki elektri konvektsioonvoolu läbi õhutu ruumi.

Samasuguse, kuigi nõrgema võimega on ka ultraviolettkiired, sest samal katsel tekib vool ka nende kiirtega. Ultraviolettkiirte mõjul sündinud vabad elektroonid on tuntud nimetuse all „fotoelektrilised elektroonid." Mõõtmised näitavad, et ka kõigi nende elektroonide laeng sama suur on kui katoodkiirte oma, mis veel kord tõestab, et olemas on ainult ühesuurused negatiivsed vabad elektroonid.

Röntgenkiired jooniseerivad väga intensiivselt õhku ja teisi gaase. Lähemad uurimised näitavad et jooniseerijaks ei ole õieti mitte Röntgenkiired ise, vaid n. n. sekundäär-katoodkiired, s. o. elektroonid mis Röntgenkiirte mõjul välja tõukuvad gaasides leiduvate tolmukübemete aatomitest, gaasi nõu seintest j. n. e: katsed näitavad, et kui kõik seesugused kehad kõrvaldada, millest tekkida võiksid nimetatud sekundäär-katoodkiired, siis vähemalt suurem osa gaasidest Röntgenkiirtes ei jooniseeru.

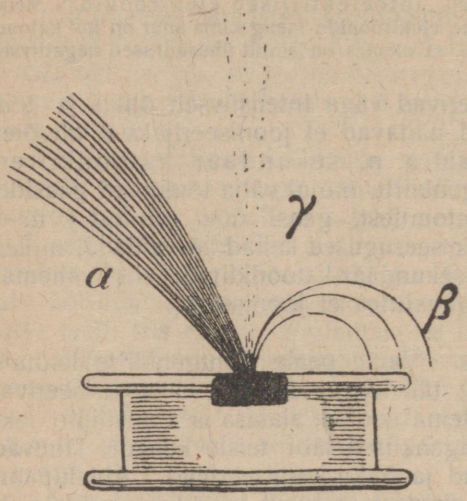
§ 95, **Radioaktiivsus.** Varsti peale Röntgenkiirte leidmist pani H. Becquerel (1896) tähele, et mitmed fosforestseerivad ained, iseäranis uraan ja tema soolad, alatasa iseäralisi kiiri tekitavad, mis samuti kui Röntgenkiired läbi teiste kehade lähevad, päevapildi plaati tumestavad ja õhku jooniseerivad. Abielupaaril Curie'l õnnestas teistest ainetest eraldada ja väiksel hulgal puhtalt koguda ühte uut keemilist elementi — raadium'i (1898), mille aatomkaal on 226,5. See metall*), mida ainult ülivähesel mõõdul looduses leidub, hoovab enesest vahetpidamata kiiri, mis miljonid kordi intensiivsemad on kui puhta uraani kiired. Hiljem leiti veel teisi aineid, mis ka samasuguseid kiiri sünnitavad, näiteks toorium, aktiinium, poloonium j. n. e. Kõiki seesuguseid aineid hüütakse radioaktiivseteks.

Mõni milligramm mingit raadiumsoola heleneb pimedas nii tugevasti, et tema valgusel lugeda võib. Tema kiirtega võib samuti kui Röntgenkiirtega läbipaistmatute kehade varjupilte fotografeerida. Raadiumi kiired jooniseerivad nii tugevasti õhku, et raadiumsoola läheduses võimata on elektroskoopi laadida, sest et ta oma laengu otsekohe kaotab. Raadium tekitab alatasa soojust, sellepärast on tema alati mõni kraad soem kui teda ümbritsev õhk. Curie uurimiste järele tekitab 1 g puhast raadiumi igas tunnis 134 g-kal soojust. Pikemat aega inimese või loomade naha peale mõjudes, rikuvad raadiumkiired nahakudesid ning sünnitavad kardetavaid põletikka. Sellepärast hoitakse raadiumi ja tema soole alati tinatoosides, sest et tina tema kiiri kõige rohkem absorbeerib.

2) Raadiumi kiired ei ole mitte homogeen, vaid nendes eraldub kolm liiki isesuguseid kiiri, mille nimetused on alfa-, beeta- ja gammakiired. Tugeva magnetväljaga võib neid kiiri

*) Puhta metallina sai proua S. Curie ja Debierne raadiumi alles 1910 aastal.

üks-teisest lahutada. Selleks paigutatakse raadiumsool tinasilindrikesse, nii et kiired ainult silindri ülemisest otsast õhku pääsevad. Kui seesugune vertikaalne silinder (joon. 227) tugevasse horisontaalsesse magnetvälja asetada, siis kaldub üks osa kiiri (α) pahemale, teine osa (β) paremale, kuna kolmas osa (γ) sirgjooneliseks jääb. Kaldumise sihi järele otsustades, peavad α-kiired olema positiivse ja β-kiired negatiivse elektri vool, kuna γ-kiired elektriliselt neutraalsed peavad olema.



Joon. 227.

Mõõtes kõrvalekaldumise suurust elektri- ja magnetväljas, selgub, et α-kiiri moodustab positiivsete ainejoonide vool (võrdle § 92₂), sest et nende jaokeste erilaeng (e/m) on kaks korda väiksem kui vesiniku jooni oma elektrolüüsis. α-joonide kiirus on küll 50—100 korda suurem kanaalkiirte joonide kiirusest, kuid mõlemate omadused ja mõjud on ühesugused. Nende joonide laengu suurust võib mõõta ka veel otsekohesel teel: vastavate abinõudega on võimalik otsekohe ära lugeda väljakiirgatud α-joonide arvu; samuti on võimalik mõõta nende kogulaengu suurust. Sel teel leitakse, et α-jooni laeng on täpipealt 2 korda suurem elektrooni laengust, millest järeldama peab, et α-joon on kaotanud 2 elektrooni.

Beeta-kiirte jaoks leiame kõrvalekaldumisest magnetväljas, et nende osakeste erilaeng e/m on umbes sama suur kui katoodkiirte elektroonide oma. Sellepärast oletatakse et β-kiirte sünnitajaks on vabad elektroonid. Nende elektroonide kiirus on mitmesugune, kuid keskmiselt suurem kui katoodkiirtes. Kõige kiiremad elektroonid liiguvad kiirusega kunni 290000 km/sec, s. t. peaaegu valguskiirusega. Beeta-kiired kujutavad nii siis väga kiireid katoodkiiri.

Ainult võrdlemisi aeglastes β-kiirtes võrdub $\frac{e}{m}$ katoodkiirte elektroonide erilaenguga. Ka siin väheneb elektrooni erilaeng, s. t. suureneb tema mass, kui kiirus läheneb valguskiirusele (§ 92₃).

Gamma-kiirte mõju on kõigiti sarnane „kõvade" Röntgenkiirte omaga. Nad kujutavad järjelikult samasugust eetrilaine-

tamist kui X-kiiredki. Kuna $\alpha$-ja $\beta$-kiired on konvektsioonkiired, on $\gamma$-kiired lainetamine.

§ 96. **Aatomite radioaktiivne moondumine.** Rutherford tõestas katsega, et raadiumi $\alpha$-kiirte osakesed ei ole mitte raadiumi enese elektriseeritud aatomid vaid tuntud iseseisva keemilise elemendi (gaasi) heeliumi aatomid, mille aatomkaal on 4.

Rutherford asetas raadiumi (õieti tema „emanatsiooni") väiksesse kinnisesse klaastorru, mille seinapaksus (0,01 mm) nii väike oli, et $\alpha$-kiired läbi klaasi tungisid. See toruke paigutati suuremasse kinnisesse nõusse ja pumbati viimasest kogu õhk välja. Kuue päeva järele leiti raadiumtorukest ümbritsevas õhutu ruumis vähe gaasi, mis kokkupressiti ja Geisler-torus elektrivooluga helenema aeti. Selgus, et saadud valgus heeliumi täieliku spektrumi andis, mis näitab, et $\alpha$-osakestest sündinud gaas tõepoolest heelium on. $\alpha$-jaokeste laeng oli 2 e, heeliumi aatom on 4 korda raskem vesiniku aatomist $m_H$; seega on $\alpha$-jaokese erilaeng $\frac{2e}{4m_H} = \frac{1}{2}\frac{e}{m_H}$. Nagu nimetatud annab $\alpha$-kiire kõrvalekaldumise suurus magnet- ja elektriväljas tema jooni erilaengu jaoks tõepoolest pool väiksema väärtuse kui vesiniku jooni puhul.

Peale $\alpha$-kiirte hoovab raadium enesest veel isesugust radioaktiivset gaasi — n. n. raadium-emanatsiooni, mille aatomkaal on 222,5. Seisku raadium kas õhutus ruumis või õhus, kas vedela õhu madalal temperatuuril või kuumendatult, ta tekitab igal tingimusel ikka ühepalju emanatsiooni ja ühepalju $\alpha$-joone. Sellest järgneb, et emanatsioon ja $\alpha$-joonide heelium mitte raadiumi ümbritsevatest teistest ainetest ei teki, vaid raadiumi enese aatomitest. Peab oletama, et raadiumi aatomid on sisemiselt nagu püsimatus tasakaalus. Juhusliselt lõhkeb üks või teine nendest, sünnitades püsivamaid heelium- ja emanetsiooaatome. Kui võrrelda raadiumi aatomkaalu (226,5) uuesti tekkinud ainete heeliumi (4) ja emanatsiooni (222,5) aatomkaaludega, siis näeme, et viimaste kaalude summa tõepoolest võrdub raadiumi aatomkaaluga.

Võrdlemisi raadiumi aatomite koguarvuga on lagunenud aatomite arv üliväike. Näiteks võib välja arvata, et 1 g raadiumis iga 10000 miljoni aatomi kohta ühes sekundis ainult 1 aatom lõhkeb. Sellepärast ei pane me üleüldse tähele, et raadiumi aine väheneb. Võib aga välja arvata, et 1 grammist raadiumist 1750 aasta järele ainult $^1/_2$ grammi järele jääb. Seda aega T = 1750 a., mille jooksul antud hulga raadiumi mass poole võrra väheneb, hüütakse raadiumi pooletumis-ajaks.

Ka raadiumi emanatsioon on radioaktiivne: tema kiirgab ainult $\alpha$-kiiri ja moondub selle juures uueks aineks — kõvaks kehaks, mida hüütakse raadium A-ks. Et selle aine aatom emanatsiooni aatomist välja heidetud $\alpha$-jaokese võrra kergem peab olema, siis on tema aatomkaal 222,5—4 = 218,5. Emanatsioon laguneb palju kiiremini kui raadium ise: tema pooletumisaeg T on 3,85 päeva. Tekkinud raadium A annab veel ühe heeliumaatomi ($\alpha$-jaokese) ära ning moondub uueks aineks — raadium

B-ks, aatomkaaluga 214,5. Raadiumi A lagunemine sünnib väga kiirelt: tema pooletumisaeg T on ainult 3 minutit. Ka raadium B laguneb (ära andes ainult β-kiiri) ning moondub raadium C-ks, viimane moondub raadium E-ks, see raadium F-ks, mis muud ei ole kui proua Curie leitud aine poloonium. Oletatakse, et poloonium, mis ka α-kiiri välja heidab, tinaks moondub: Et polooniumi aatomkaal on 210,5, siis peab ta α-jaokese kaotuse järele aineks moonduma, mille aatomkaal on 210,5 — 4 = 206,5, missugune arv tõepoolest võrdub tina aatomkaaluga. Raadiumi kirjeldatud moondumist kujutab järgnev tabel:

| Aine: | Pooletumisaeg T: | kiired: | Aatomk.: |
|---|---|---|---|
| Raadium | 1750 aastat | α, β | 226,5 |
| „ emanatsioon | 3,85 päeva | α | 222,5 |
| Raadium A | 3 min. | α | 218,5 |
| „ B | 26,8 „ | β | 214,5 |
| „ C | 19,6 „ | α, β, γ | 214,5 |
| „ D | 16 aastat | β | 210,5 |
| „ E | 5 päeva | β, γ | 210,5 |
| „ F (Poloonium) | 136 “ | α | 210,5 |
| Tina | — | — | 206,5 |

Ka uraan moondub teisteks aineteks, kuid väga aegamööda. Oletatakse, et koguni raadium on ainult üks tema moondumisjärkudest. K. Fajans'i järele (1913) sünnib uraani moondumine järgmiselt:

| Aine: | Pooletumisaeg T: | Kiired: | Aatomkaal: |
|---|---|---|---|
| Uraan I | $5 \times 10^9$ aastat | α | 238,5 |
| „ X | 24,6 päeva | β | 234,5 |
| „ $X_2$ | — | β | 234,5 |
| „ II | $10^6$ aastat | α | 234,5 |
| Joonium | $10^5$ „ | α | 230,5 |
| Raadium | 1750 „ | α | 226,5 |

Ka toorium ja aktiinium moonduvad järk-järgult teisteks aineteks. Nad sünnitavad samuti kui raadium iga-üks ühe moondumisrea. Sesse kolme ritta kuuluvad kõik senni leitud radioaktiivsed kehad.

Et raadiumis vabanev energia on pärit tema aatomite sees peituvast energiatagavarast, siis on arusaadav, et vabanev energiahulk ei olene sellest, kas on meil näiteks 1 gramm raadiumi puhtalt, või mingisuguse keemilise ühenduse näol. Kiirgamise intensiivsuse määrab nii ühel kui teisel juhusel raadiumi aatomite koguarv.

Elektroonide vabanemine ja sellega seotud radioaktiivse keha aatomite moondumine näitab, et elektroonid aatomi sisemises ehituses ülitähtsat osa etendavad. Mitte aatomid ei ole seega enam jagamatud ja jäädavad, vaid elektroonid. Ainult viimased on kõigis aatomites ühesuurused ja ühesugused; sellepärast võiks neid pidada selleks „algaineks“, millest ehitatud on kõik aatomid. Ongi vaateid, mille järele mingit „ainet“ ehk „mateeriat“ olemas ei ole, vaid mis oletavad, et kogu aine seisab koos ainult elektrist. Seesugusel puhul kaob igasugune vahe mateeria ja energia vahel ning elektrit võib nimetada samahästi „mateeriaks“ kui „energiaks“.

# Tabelid.

**Üksuste tabel** ($c = 3.10^{10}$ = valguskiirus).

| Suurus | Elektrostaatiline üksus | | Elektromagnetiline üksus. | | Praktiline üksus |
|---|---|---|---|---|---|
| Elektrihulk . . | ESÜ | $C^{\frac{3}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}$ | EMÜ $= c \times$ ESÜ | $C^{\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}}$ | *Coulomb* = 0,1 EMÜ = $= 3.10^9$ ESÜ |
| Vool . . . . | VSÜ | $C^{\frac{3}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-2}$ | VMÜ $= c \times$ VSÜ | $C^{\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}$ | *Amper* = 0,1 VMÜ |
| Potentsiaal . . | PSÜ | $C^{\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}$ | PMÜ $= \frac{1}{c} \times$ PSÜ | $C^{\frac{3}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-2}$ | *Volt* $= \frac{1}{300}$ PSÜ |
| Takistus . . . | TSÜ | $C^{-1} S$ | TMÜ $= \frac{1}{c^2} \times$ TSÜ | $CS^{-1}$ | *Oom* $= 10^9$ TMÜ |
| Mahutavus . . | MSÜ | $C$ | MMÜ $= c^2 \times$ MSÜ | $C^{-1} S^2$ | *Farad* $= 9.10^{11}$ MSÜ |
| Omainduktsioon | OSÜ | $C^{-1} S^2$ | OMÜ $= \frac{1}{c^2} \times$ OSÜ | $C$ | *Henry* $= 10^9$ OMÜ |
| Magn. poolustugevus . . | Üksuspoolus | $C^{\frac{3}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}$ | — | — | — |
| Magnetvälja intensiivsus . | Gauss | $C^{-\frac{1}{2}} G^{\frac{1}{2}} S^{-1}$ | — | — | — |

## Tuntud eetrilainete pikkused.

| | | |
|---|---|---|
| Hertzi elektromagnetilised lained. . | lõpmata pikad | kunni 3 mm. |
| Infrapunased kiired . . . . . | 0,3 | — $7{,}6.10^{-4}$ mm. |
| Nähtavad valguskiired . . . . . | $7{,}6.10^{-4}$ | — $4.10^{-4}$ mm. |
| Ultraviolett kiired . . . . . | $4.10^{-4}$ | — $10^{-4}$ mm. |
| Röntgenkiired . . . . . | $8.10^{-7}$ | — $3.10^{-8}$ mm. |
| Raadiumi $\gamma$-kiired . . . . . | $1{,}5.10^{-7}$ | — $7.10^{-9}$ mm. |

# Lisa.

**Õperaamatus nimetatud tähtsamad teadlased ja nende peateenused füüsika alal.**

Andrews, Thomas (1813—1885), inglane, keemia professor Belfast'is: gaaside kriitiline temperatuur.

Ampère, André (1775—1836), Pariisi füüsika professor: elektrodünaamika põhiseadused.

Archimedes, (surnud 212), greeklane, elas Sürakusis: tema nimeline hüdrostaatika seadus, kangide seadused, kruvi jne.

Avogadro, Amedeo (1776—1856), itaallane, füüsika professor Vercellis ja Turin'is: tema seadus aatomite arvu kohta.

Becquerel, Henri, Prantsuse füüsik: uraani radioaktiivsus (1896).

Biot, Jean Baptiste (1775—1862) prantslane, füüsika ja astronoomia professor: Biot-Savart'i seadus, heli kiirus kõvades kehades.

Boyle, Robert (1627—1691), inglane: tähtsad teened experimentaal füüsikas, iseäranis gaaside rõhumise alal.

Brewster, David (1781—1868), shotlane, füüsika professor Edinburg'is ja St. Andrews'is: kaleidoskoop, valguse polarisatsioonnurga seadus.

Bunsen, Robert Vilhelm (1811—1899), sakslane, keemia professor Marburgis, Breslaus ja Heidelbergis: spektraalanalüüs, Bunsen-lamp, Bunsen-element.

Carnot, Sadi (1776—1832), Prantsuse insener: termodünaamika põhiseadused.

Celsius, Anders (1701-1744), rootslane, astronoomia professor Upsalas: termomeetri skaala.

Clausius, Rudolph (1812—1888), sakslane professor Zürich'is, Würzburg'is ja Bonn'is: soojuse ja gaaside kineetilise teooria looja.

Coulomb, Charles Augustin (1736—1806), Prantsuse insener: tuntud Coulombi seadus.

Curie, Marie, poolakas, professor Pariisis: ühes abikaasa P. Curie'ga raadiumi leidjad (1898).

Dalton, John (1766—1844), inglane, matemaatika ja füüsika, õpetaja Manchester'is: gaasi ja auru segu rõhumise seadus värvipimeduse (daltonism) leidja; tähtsad keemia seadused

Daniell, John Frederik (1790—1845) keemia professor Londonis Daniell-element.

Davy, Humphry (1778—1829), keemia professor Londonis: elektri leeklamp; tegev elektrolüüsi alal.

Descartes, René (1596—1650), Prantsuse matemaatik: vikerkaari seletus.

Dulong, Pierre Louis (1785—1838), arst ja füüsika professor Pariisis: kehade paisumisseadused.

Edison, Thomas, (sünd. 1847) ameeriklane, kuulus ülesleidja: hõõglamp (1879); fonograf, ja palju muud.

Fahrenheit, Daniel Gabriel (1686—1736), sakslane, füüsika aparaatide meister: termomeetri skaala.

Faraday, Michael (1791—1867), inglane, Davy laboratooirumi teener, õpilane, assistent ja järeltuleja, üks suuremaid loodusuurijatest: elektri jõujoonte teooria, induktsioonnähtuste leidja, elektrolüüsi seadused, dielektriline polarisatsioon, valguskiire polarisatsioonpinna pöördumine.

Foucault, Jean Bernard Léon (1819—1868), Pariisi füüsik: maakera tiirlemist tõestav pendelkatse, valguskiiruse mõõtmine, elektri keeris- ehk Foucault-voolud.

Franklin, Benjamin (1708—1790), ameeriklane, raamatutrükkija ja poliitik, kes Ühisriikide vabadussõjas tähtsat osa etendas: piksevarras, elektri kondensaator (Fr. tahvel).

Fraunhofer, Joseph (1787—1823), sakslane, füüsika professor München'is: päikse spektrumi joonte leidja, tegev optika alal.

Fresnel, Augustin Jean (1788—1827), Prantsuse insener ja füüsik: valguse interferentskatse; tõestas, et valgus põiklainetamine on; valguse polarisatsiooni ja kaksimurdumise seletus.

Galilei, Galileo (1564—1642) itaallane, matemaatika professor Pisa's ja Padua's: inertsuse seadused; pikksilm, vaba langemise ja pendli seadused jne.

Galvani, Luigi (1737—1798), itaallane, alguses teoloog, siis arst, lõpuks anatoomia professor Bolognas: Galvani-elektri leidja.

Causs, Karl Friedrich (1777—1855), sakslane, matemaatika professor Göttingen'is: absoluut mõõdusüsteemi ja potentsiaalteooria looja, magnetjõudude mõõtmine jne.

Gay-Lussac, Joseph Louis (1778—1850), prantslane, füüsika ja keemia professor Pariisis: gaaside paisumisseadus.

Gramme, Zénobe Théophile (1826—1901), belglane, elektrotehnik: tema nimeline dünamomasina ankur.

Guericke, Otto (1602—1686), Magdeburgi bürgermeister: õhupumba, manomeetri ja hõõrumis-elektriseerimismasina leidja.

Hefner-Alteneck, Friedrich (1845—1904), Saksa insener ja Berliini akadeemia liige: trumm-ankru leidja, valgusüksusena tarvitatava lambi ehitaja jne.

Helmholtz, Hermann Ludvig Ferdinand (1821—1894), Saksa mitmekülgne teadlane: ernergia hävimatuse seadus; kõlavärvi analüüs, resonaatorid; värvide nägemise teooria; värvide hajumise teooria jne.

Hertz, Heinrich Rudolph (1857—1894), Helmholtzi õpilane, siis füüsika professor Karlsruhe's ja Bonn'is: elektromagnetiliste lainete leidja ja Maxwelli valgusteooria tõestaja.

Hittorf, Johannes Vilhelm (1824—1852), sakslane, füüsika professor Münster'is: uurimised läbi gaaside voolava elektri üle; katoodkiired; elektrolüüsi joonide kiirus.

Hooke, Robert (1635—1703), matemaatika professor Londonis: elastsuse seadus.

Huyghens, Christian (1629—1695), hollandlane, üks tähtsamatest matemaatikutest ja füüsikutest, elas Haag'is, Londonis ja Pariisis: kiirenduse g määramine pendli abil, füüsiline pendel; mõiste „hoog" looja; pendelkella leidja, valguse lainetamisteooria looja.

Joule, James Prescott (1818—1889), õllevabriku omanik Inglismaal: elektri voolul tekkiva soojuse seadus; mekaanilise soojusekvivalendi mõõtmine jne.

Lord Kelvin (sünd. William Thomson), kuulus Inglise õpetlane: elektromeetrid; hulk töid elektri ja magnetismi alal.

Kepler, Johannes (1571—1620), sakslane, matemaatika professor Graz'is ja Pragas: tema seadused planeetide liikumise kohta; astronoomilise pikksilma teooria; valguse murdumine.

Kirchhoff, Gustav Robert (1824—1887), sakslane, professor Breslau's ja Heidelberg'is: spektraalanalüüs (ühes Bunseniga); elektrivoolu harunemise seadused; kiirgamise ja absorbeerimise seadused.

Kopernikus, Nicolaus (1473—1543), sakslane; teoloog, arst, matemaatik ja astronoom: planeetide liikumine.

Laplace, Pierre Simon (1749—1827), Prantsuse matemaatik: taevakehade liikumise matemaatiline käsitamine; hüpotees päikse süsteemi tekkimise kohta jne.

Lenz, Heinrich Friedrich (1804—1865), professor Peterburis: induktsiooni seadused.

Lorentz, Hendrik Anton (sünd. 1853), hollandlane, füüsika professor Leyden'is: gaaside kineetilise teooria arendaja, üks elektroon-teooria loojatest.

Mariotte, Edme (1620—1684), Prantsuse füüsik: gaaside rõhumise seadus; silma pimeda täpi leidja.

Maxwell, James Clerk (1831—1879), professor Londonis ja Cambridge's: tähtsa elektromagnetilise valgusteooria looja; induktsiooni seadused; mekaanilise soojusteooria ja gaaside kinetilise teooria arendaja.

Mayer, Robert (1814—1878), Saksa arst: leidis iseseisvalt energia hävimatuse seaduse.

Newton, Isaac (1643—1727), professor Cambridge's, üks kogu ilma suurematest matemaatikutest: mekaanika põhiseaduste, värvide hajumise seaduste ja paljude teiste looja.

Oersted, Hans Christian (1777—1851), daanlane, füüsika professor Kopenhaagenis: magnetnõela pöördumine elektri voolu mõjul.

Ohm, Georg Simon (1787—1854), sakslane, füüsika professor Nürnbergis ja Münchenis: elektrijuhtide takistuse ja voolu tugevuse põhiseadused.

Pascal, Blaise (1623—1662), Prantsuse matematik ja füüsik: baromeetrite teooria ja kõrgusemõõtmine nendega; vedelikkude rõhumise põhiseadus.

Réaumur, René Antoine (1683—1765), Prantsuse akadeemik: termomeetri skaala.

Regnault, Henri Victor (1810—1878), prantslane, füüsika professor Pariisis: auru rõhumise olenemine temperatuurist; vee aurumissoojus; helikiiruse olenemine temperatuurist.

Röntgen, Vilhelm Konrad (sünd. 1845), professor Strassburgis, Giessenis, Würzburgis ja München'is: x-kiired.

Ruhmford, sündinud nimega Benjamin Thomson (1723—1814), ameeriklane, oli mitmesugusel alal tegev Londonis, Bayeris ja Pariisis: katselised tõestused soojuse ja mekaanilise töö ühevääriseuse kohta.

Savart, Félix (1791—1841) füüsika professor Pariisis: Biot-Savart'i seadus; tema sireen.

Seebeck, Thomas Johann (1770—1831), sakslane, sündinud Tallinnas, õppis arstiteadust, elas peaasjalikult Saksamaal: termoelektri leidja.

Siemens, Verner (1816—1892), Saksa suurtükiväe-ohvitser, siis Siemens ja Halske vabriku kaasomanik: dünamomasina printsiip; mitmed teised leidused elektrotehnikas.

Snellius, Villebrord (1591—1626), hollandlane, professor Leydenis: murdumisseadus.

Torricelli, Evangelista (1608—1647), itallane, Galilei abiline ja järeltuleja, professor Florentsis: baromeetri õhutu ruumi tekkimise põhjuse õige seletus; vedelikkude väljavoolamise seadus.

Volta, Alessandro (1745—1827), itaallane, füüsika professor Comos ja Pavias: Galvani elektrinähtuse õige seletus; Volta-element (sammas); elektroskoop ja elektrofoor.

Watt, James (1736—1819), shotlane, mekaanik ja vabrikuomanik: aurumasin.

Weber, Wilhelm Eduard (1804—1891), sakslane, professor Halle's ja Göttingen'is: tähtsad tööd elektrodünaamikas; elektrodünamomeeter; elektrostaatiliste ja elektromagnetiliste üksuste võrdlemine; esimene telegraf (Göttingenis, ühes Gauss'iga).

Wheatstone, Charles (1802—1875), inglane, esialgu aparaatide meister, siis professor Londonis: tema „sild" takistuste mõõtmiseks; Nõel-telegraf.

Young, Thomas (1773—1829), inglane, arst ja füüsika professor Londonis: valguse interferents; õhukeste kelmete värvid; värvide nägemise teooria; valgus- ja soojuskiirte samasus.

Zeeman, Pieter (sünd. 1865), hollandlane, füüsika professor Amsterdam'is: tähtsad leidused elektro-optikas.

# Kolmanda köite sisu.

## Kuues jagu: Magnetism ja elekter.

### Peatükk I: Magnetism.


Lhk.

§ 1. Loomulik magnet. . . . . 5

§ 2. Kunstlik magnet; tema poolused ja telg. Magneti külgetõmbejõu suuruse muutumine piki magnetit. . . . . 5

§ 3. Põhja- ja lõunapoolus; kompass . . . . . 6

§ 4. Pooluse tugevus; Coulombi seadus: pooluse tugevuse mõõtmine kaalumisega; tõuke- ja tõmbejõu olenemine pooluste tugevusest ja nende kaugusest. Poolustugevuse üksus. Coulombi keerdkaal. 8

§ 5. Magnetiline induktsioon. . . . . 10

§ 6. Magneti jagatavus; hüpotees molekulaarmagnetitest. . . . . 10

§ 7. Magnetiseerimine ja terasmagnetite valmistamine. Magnetiline küllastumine. Terases magnetiseerub ainult päälmine kiht. Magnetmagasiinid. Soojuse mõju raua ja terase magnetismi peale. . . . . 12

§ 8. Magneti väli; jõujooned. Jõujoonte leidmine magnetnõelaga. Magnetpooluse liikumine jõujooni mööda; nende graafiline konstruktsioon. Jõujoonte siht. Magneti viilipuruga saadud spektrum. Magnetvälja intensiivsus ja viimase üksus; välja asetatud pooluse peale mõjuva jõu suurus; välja intensiivsuse kujutamine jõujoonte tihedusega. Ühtlane magnetväli. . . . . 14

§ 9. Jõujoonte omadused. Nende piki-, pinevus ja küljeti-eemaletõukumine. Faraday vaated . . . 17

§ 10. Raua mõju magnetvälja peale. Jõujoonte koondumine rauda. Välja hävinemine rauaga piiratud ruumis. . . . . 19

§ 11. Magnetiline läbitungitavus; para- ja diamagnetilised kehad. Keha magnetilise läbitungitavuse suurus kui põhjus, millest oleneb, kas tõmbub antud keha magneti külge või tõukub temast eemale. Ainete para- või diamagnetismi praktiline määramine. Vedelikkude ja gaaside para- ja diamagnetism. . . . . 19

Lhk.

§ 12. Maakera magnetism. Magnetnõela käänang- ja kaldenurk. Maakera magnetilised poolused ja ekvaator. Isogoonid ja isokliinid. Maakera magnetismi tugevuse mõõtmine magnetnõela õõtsumisperioodiga. Maamagnetismi muutumine aja jooksul, magnetilised tormid. . . . . 21

**Peatükk II: Paigal seisev elekter (Elektrostaatika).**

§ 13. Kehade elektriseerumine hõõrumisel. . . 23
§ 14. Positiivne ja negatiivne elekter. . . . . 24
§ 15. Elektri ülekandumine kehade kokkupuutumisel, elektroskoop. . . . . 25
§ 16. Elektri juhid ja mittejuhid. Elektri edasikandumine juhtides. Mittejuhtide ja juhtide elektriseerumine hõõrumisel; isoleerimine. . . . . 26
§ 17. Mõlema elektri üheaegne tekkimine; hüpoteesid elektri loomu kohta. Mõlema elektri tekkimine isoleeritud kehade hõõrumisel ja nende neutraliseerumine kehade kokkupuutumisel. Kahe elektri-olluse hüpotees. Franklini ühe-elektri-olluse hüpotees. . . . . 28
§ 18. Coulombi seadus; elektri hulk ja tema üksus. Coulombi keerdkaal elektrilisteks mõõtmisteks. Elektrihulkade tõukumise ja tõmbumise seadus. Elektrihulga üksus absoluutses elektrostaatilises ja praktilises mõõdusüsteemis. Näited. . . 29
§ 19. Elektrilaengu jagunemine juhi pinnal. Katsed, mis tõestavad, et laeng ainult juhi välisel pinnal hoidub. Ühenimelise elektri üksikute osakeste eemaletõukumine kui põhjus, miks laeng juhi pinnale tõukub. Proovikehake. . . . . 32
§ 20. Elektri tihedus kehade pinnal; teravikud. Pindtiheduse olenemine pinna kumerusest. Elektri väljavoolamine teravikust; elektri tuulratas. . . 33
§ 21. Kehade elektriseerumisaste ehk potentsiaal. Potentsiaal kui keha laengu üks-teisest eemaletõukuvate osakeste pinevus; potentsiaal kui keha elektriseerumisaste. Potentsiaali mõõtmine elektroskoobiga; potentsiaali olenemattus keha pindtihedusest. Elektri tasakaal ja liikumine elektriseeritud kehade ühendamisel. Maakera potentsiaal kui tingimisi valitud null-potentsiaal; positiivne ja negatiivne potentsiaal. Potentsiaalvahe ehk pinge. 35
§ 22. Elektromeetrid; potensiaalvahe üksus. Kolbe ja Brauni elektromeetrid. Potentsiaalvahe üksus volt. Elektromeetri gradueerimine. . . . 38

Lhk.

§ 23. Elektrostaatiline induktsioon. Induktsioonnähtused. Nende seletus Coulombi seaduse põhjal. Neutraalse ja elektriseeritud keha külgetõmbumise põhjus; miks elekter kehade kokkupuutumisel ühelt kehalt teisele läheb; miks elektroskoop mingi elektriseeritud keha lähendamisel elektriseerub. Teravikkude „elektri-imemine" nende lähedal seisvatest elektriseeritud kehadest; tulileegi mõju elektriseeritud kehade peale. Indutseeritud elektrihulkade suurus. . . . . 40

§ 24. Juhtiva seinaga ümbritsetud laengu induktsioon; elektri ekraan. . . . . 44

§ 25. Elektriseerimismasin. Hõõruv elektriseerimismasin. . . . . 45

§ 26. Elektrofoor; induktsioon- ehk elektrofoormasinad. Elektrofoor; elektri tekitamine tema abil ja energia seadus. Wimshurst'i elektrofoormasin. Holtz'i elektrofoormasin. . . . . 47

§ 27. Mõned katsed elektriseerimismasinaga; elektri mitmesugused mõjud. Mekaanilised mõjud: elektri kellad, hüplevad kerakesed, elektriseeritud pabernarmad. Elektri säde; sädeme tekkimine teraviku ja suure otspinnaga elektroodi vahel; positiivne puhm-valgus ja negatiivne ergvalgus. Soojusmõjud. Keemiline mõju; osooni tekkimine, joodkaaliumi lagunemine. Füsioloogiline mõju. . . . . 53

§ 28. Elektrimahutavus; dielektriline konstant. Elektrimahutavus ning analoogia tema ja soojamahutavuse vahel. Elektrimahutavuse olenevus antud keha suurusest ja kujust, teda ümbritsevast dielektrikust ning naaberkehadest; tema olenemattus keha massist ja ainest. Dielektriline konstant. Näide. Vastupidiselt elektriseeritud naaberkeha mõju antud keha elektrimahutavuse peale. 56

§ 29. Kondensaatorid. Franklini tahvel; tema järgukaupa tühjendamine. Leideni pudel; tühjendaja; Leideni pudelite patarei. Kondensaatori laengu asukohad. . . . . 60

§ 30. Elektriväli; elektrijõujooned. Elektriseeritud keha ümbritsev elektriväli; elektri jõujoon kui välja asetatud positiivse laengu liikumistee. Elektrivälja spektrumid, nende tekitamine ja kuju. Elektrijõujoone siht; jõujoonte piki-pinevus ja küljetieemaletõukumine. Välja tugevus ja jõujoonte tihedus. . . . . 62

Lhk.

§ 31. Dielektriline polarisatsioon; juhi ja dielektriku vahe. Dielektriku moleekulite polariseerumine; jõujoonte piki-pinevus ja eemaletõukumine kui polarisatsiooni järeldus. Induktsioon juhtides; elektrijõujoonte algus ja lõpp. Elektrostriktsioon. Hõõrumine dielektriku moleekulis tema elektri nihkumisel; kondensaatori laengu „klaasi sisse tungimine"; kõvade dielektrikute soenemine muutuvas elektriväljas. . . . . 63

§ 32. Elektrivälja potentsiaal; potentsiaali mõõtmine tööga; laengu energia. Antud väljapunkti asetatud laenguüksuse potentsiaalne energia kui selle punkti potentsiaali mõõt. Potentsiaal keha pinnal ja tema sisepiirkonnas. Välja potentsiaali, elektrihulga ja kulutatud töö vahekord. Praktiline ja absoluutne elektrostaatiline potentsiaalüksus. Keha laengu energia . . . . . 68

§ 33. Elektrivälja nivoopinnad; potentsiaali kahanemine ja elektrijõud; potentsiaali arvestamine. Nivoopinnad; nende kuju elektriseeritud kera väljas. Elektriväljas liikuva laengu töö olenemattus liikumistee kujust. Välja elektrijõud ja potentsiaali kahanemine. Välja intensiivsus ja potentsiaali kahanemine piki jõujoont. Homogeen väli. Ühte punkti koondatud laengu potentsiaali arvestamine. Mitme punkt-laengu potentsiaal. Kera potentsiaal . . . . . 71

§ 34. Elektrimahutavuse ja dielektrilise konstandi mõõtmine; elektrimahutavuse üksused. Keha mahutavuse, laengu ja potentsiaali vahekord. Mahutavuse üksused. Mahutavuse mõõtmine. Kerapinnalise kondensaatori mahutavus. Dielektrilise konstandi mõõtmine. Näited. 74

§ 35. Atmosfääriline elekter; äike; piksevardad. Ohukihtide potentsiaal maa suhtes. Äike; välgu kuju; tema mõju sisselöömisel; miks välk kõige kõrgemasse kehasse lööb. Piksevardad. Müristamine . . . . . 78

## Peatükk III: Elektrivool ja Galvani-elekter.

§ 36. Elektri voolu tekkimine; voolu tugevus. Elektri voolamine Leideni pudeli katteid ühendavat juhti mööda; Analoogia vee vooluga; voolu tekitamiseks kuluv töö. Voolu tugevus ja tema praktiline üksus amper. . . . . 81

Lhk.

§ 37. Elektriseerumine kehade kokkupuutumisel; Galvani-element. Galvani katsed; Volta seletus. Happesse kastetud metallide elektriseerumine; potentsiaalvahe kahe seesuguse metalli vahel. Metallide rida väävelhappe jaoks; elektrolüüdid. Elektri voolamine happesse asetatud elektroode ühendavat traati mööda. Kinnine vooluahel. Kõik happesse kastetud metallid elektriseeruvad negatiivselt; nende potentsiaali suurused; miks üks elektrood teise suhtes positiivne on. Elektriseerumine metallide omavahelisel kokkupuutumisel; Volta seadus. Ainult metallide kokkupuutumisel ei teki voolu. . . . . 82

§ 38. Elemendi elektromotoorne jõud; elemendi polarisatsioon; tähtsamad elemendid. Voolu tekitamiseks kuluv energia on pärit elemendis vabanevast keemilisest energiast. Elektromotoorne jõud; analoogia veepumbaga; Elemendi EMJ ja elektroodide pinge. Volta-element; tema polariseerumine; elementide polarisatsiooni kõrvaldamine. Daniell-element; Bunseni kroomhappe-element; Bunsen-element; Leclanché-element; kuivad elemendid; Meidinger-element. Tsingi amalgameerimine ja selle tähendus. . . . . 85

§ 39. Elementide ühendamine patareiks. Elementide järjestikune lülitamine patareiks; patarei pinge. Volta- ja Zamboni-sammas. Elementide paralleelne ühendamine. . . . . 90

**Peatükk IV: Elektrokeemia.**

§ 40. Elektrolüüs. Vedelikkude elektrijuhtivus. Soolhappe ja vee elektrolüüs. Soola veesulatiste elektrolüüs; positiivse elektriga kaasa kantav aine. Sulandatud soolade elektrolüüs; alumiiniumi, kaaliumi ja teiste metallide valmistamine. Metallide raffineerimine; galvanosteegia; galvanoplastika. 91

§ 41. Faraday seadused. Läbi elektrolüüdi juhitud elektri hulga ja eraldatud ainehulga vahekord; ainete elektrokeemiline ekvivalent. Faraday teine seadus. Voolu tugevuse mõõtmine eraldunud aine hulgaga; voltameetrid. Näited. . . . . 95

§ 42. Joon-teooria. Joonid ja nende tähendus elektri voolamisel läbi elektrolüüdi. Sulatise dissotsiatsioon ja tema põhjused. Joonide arvu olenemine sulatise kontsentratsioonist; voolu tugevuse olenemine kontsentratsiooni suurusest ja sulatise tem-

Lak.

peratuurist. Elektrolüüdi osmootne rõhumine ja joonide arv (Arrheniuse teooria). . . . . 98

§ 43. Elektri aatomiline struktuur; elektroonid. Keemiliselt üheväärtiste ainete joonide ühesuurune laeng; kahe- ja kolmeväärtiste joonide laeng; vesinikujooni laeng kui elektri aatom ehk elektroon. Elektrooni laengu suurus; joonide erilaeng. Elektroonid kui negatiivse elektri aatomid; miks vesinik ja metall dissotsieerumisel positiivselt elektriseerub. Elektroonide vool metalljuhis; elektroonivoolu siht. . . . . 101

§ 44. Polarisatsioonvool; akkumulaatorid. Polarisatsioonvoolu tekkimine ja põhjus. Tinaplaatide pinna muutumine polarisatsioonil; Planté akkumulaator. Uuemad akkumulaatorid. . . . 104

**Peatükk V: Elektrivoolu magnetiline mõju.**

§ 45. Voolu mõju magnetnõela peale. Örsted'i leidus; parema käe reegel. Ringmähise mõju magnetnõela peale; galvanoskoop; astaatiline nõelapaar; peegel-galvanoskoop. . . . . 106

§ 46. Voolu tugevuse mõõtmine magnetnõela abil; galvanomeeter ja ampermeeter; differentsiaal-galvanomeeter. . . . . 108

§ 47. Sirgjoonelise voolu magnetväli; tema spektrum; jõujoonte siht; magnetnõela pöördumise seletus jõujoonte abil; nõela pooluse peale mõjuva magnetjõu siht. Magnetpooluse tiirlemine ümber voolu. . . . . 109

§ 48. Ringjoonel voolava elektri magnetväli; tema spektrumi sarnadus magnet-lehe omaga; kellanäitaja reegel. Ringvoolu ja magnet-lehe sarnaduse katseline tõestamine Ampére'i aparaadiga. Solenoiidi magnetväli; tema sarnadus magnetvarvaga; selle katseline tõestamine. Solenoiidi poolused. Raudvarva sissetõmbumine solenoiidi; elektrodünamomeeter. . . . . 112

§ 49. Magneti mõju elektri voolu peale. Vabalt liikuva voolujuhi tiirlemine ümber magnetpooluse. Magnetväljas asuva sirgjoonelise voolu liikumissiht; pahema käe reegel otsitud liikumissihi jaoks; magnetväljas seisva voolujuhi liikumise põhjus kui magnetjõujoonte küljeti-rõhumine. Ringvoolu pöördumine magnetväljas; Deprez-D'Arsonval'i ampermeeter. 116

§ 50. Voolude vastastikune mõju; selle seletus jõujoonte teooriaga. 118

Lhk.

§ 51. Elektromagnet; Ampère'i molekulaarvoolude teooria. Elektromagneti poolused. Tema tugevuse olenemine amper-keerdudest; magnetiline küllastumine. Molekulaarvoolude hüpotees; magnetism kui molekulaarvoolude mõju. Terase ja raua magnetiseerumine elektrivooluga; järelmagnetism; magnetiline hüstereesis. . . . . 119

§ 52. Telegraf; elektrikell. Morse telegrafiaparaat; jaamade ühendamis-skeem; relee; mõned teised telegrafiaparaadid. Elektrikell. Elektri-ajamõõtjad. 121

§ 53. Voolu magnetvälja intensiivsus; Biot-Savart'i seadus. Magnetvälja intensiivsuse otsekohene mõõtmine kaalumise teel; sirgjoonelise voolu magnetvälja intesiivsuse olenemine voolu tugevusest ja vaadeldava punkti kaugusest. Biot-Savart'i seadus. Magnetvälja intensiivsus ringvoolu tsentrumis. . . . . 125

§ 54. Elektromagnetiline mõõdusüsteem; põhjusmõtteline vahe tema ja elektrostaatilise mõõdusüsteemi vahel. Voolu elektromagnetiline üksus; tema vahekord amperiga; elektrihulga elektromagnetiline üksus, tema vahekord coulombi ja elektrostaatilise elektriüksusega. Ülemineku koeffitsient ühest mõõdusüsteemist teise. . . . . 127

§ 55. Tangens-galvanomeeter; voolu absoluutne mõõtmine tema abil. Näited. . . . . 129

## Peatükk VI: Takistus.

§ 56. Takistus; Ohmi seadus. Juhi takistuse olenemine tema ulatustest. Vooluallika sise- ja välistakistus; Ohmi seadus. . . . . 131

§ 57. Takistuse üksus; eritakistus ja juhtivus. Takistuse praktiline üksus. Aine eritakistus; juhi kogutakistuse väljaarvamine eritakistusest. Ainete elektri- ja soojuse-erijuhtivuste vahekord. Takistuse olenemine temperatuurist. . . . . 132

§ 58. Potentsiaali muutumine piki voolu; Ohmi seadus vooluahela üksikute lülide jaoks. Potentsiaali kahanemine piki juhti. Ohmi seadus juhi üksiku osa kohta. Näited. . . . . 133

§ 59. Potentsiaalvahe ja elektromotoorse jõu mõõtmine. Voltmeeter ja mõõtmine temaga; vahe ampermeetri ja voltmeetri konstruktsioonis ja mõõtmisviisis. Voltmeetri gradueerimine. EMJ mõõtmine voltmeetriga. Potentsiaali kahanemine vooluallika enese sees; EMJ ja elektroodide pinge. 136

Lhk.

§ 60. Reostaadid. . . . . 138

§ 61 Voolu harunemine; Wheatston'i sild; takistuse mõõtmine. Voolu harunemise seadused; haruvooluga ampermeeter. Wheatstoni sild ja takistuse mõõtmine tema abil. Takistuse mõõtmine volt- ja ampermeetriga. Elemendi sisetakistuse mõõtmine. . . . . 140

§ 62. Elementide ühendamine patareiks. Sisetakistus ja EMJ paralleelsel ja järjestikul ühendamisel. Elementide kõige kasulikum ühendamine antud välistakistusel. Näited. . . . . 142

## Peatükk VII: Elekter ja soojus.

§ 63. Juhi soenemine elektri voolamisel; Joule'i seadus. Tekkiva soojushulga olenemine voolu tugevusest ja juhi takistusest. Elektri kaitsjate ja keedunõude printsiip. Soojus-ampermeeter ja -voltmeeter. . . . . 145

§ 64. Voolu töö ja võimsus; voldi absoluutne määramine. Joule'i soojus kui voolu töö ekvivalent. Voldi määramine Joule'i seaduse põhjal. Näited. . . . . 146

§ 65. Elektri valgus. Hõõglambid; nende ühendamine; metalltraat-hõõglambid; poolvattlambid. Volta-leek; leeklambid. Nernst-lamp. . . . . 148

§ 66. Elektri ahjud; karbiitide valmistamine. Näited. 151

§ 67. Termoelekter. Seebeck'i katse. Metallide termoelektriline rida. Termosammas; temperatuuri mõõtmine tema abil; termopatarei. . . . . 152

§ 68. Peltier- ja Thomson-effekt. Peltier-effekt. Positiivne ja negatiivne Thomson-effekt. Thomson-effekti ümberpöördud nähtus; hüpotees maakera magnetismi tekkimisest. . . . . 154

§ 69. Termojoonid. . . . . 156

§ 70. Metallide elektrijuhtivuse ja viimasega seotud soojusnähtuste teooria. Elektrivool, takistus, Joule'i soojus, termojoonid ja termoelekter elektroon-teooria valguses. . . . . 157

## Peatükk VIII: Induktsioon.

§ 71 Põhinähtused. Induktsioon läbi magnetvälja liikuvas juhis; pahema käe reegel voolu sihi leidmiseks. Jõujoonte ja juhi lõikumine induktsiooni juures. Induktsioon kinnises ahelas; Maxwelli reegel. Induktsioon kinnise vooluahela liikumisel ühtlases ja mitte ühtlases magnetväljas. Elektroonteooria seletus induktsioon-voolu tekkimisest. 158

Lhk.

§ 72. Volta-induktsioon. Induktsioon primäärvoolu lähendamisel ja kaugendamisel. Induktsioon primäärvoolu kasvamisel ja kahanemisel. . . . . 161

§ 73. Lenz'i seadus; indutseeritud voolu sihi määramine tema abil. Lenz'i seadus magnetinduktsiooni jaoks. Keeris- ehk Foucault-vool. . . . . 163

§ 74. Indutseeritud EMJ suurus; induktsioon ja energia hävimatuse seadus. Faraday seadus; elektromagnetilise potentsiaalüksuse absoluutne määramine; tema vahekord voldiga. Faraday seaduse tuletus energia hävimatuse seadusest . . . 164

§ 75. Omainduktsioon. Tekkiva voolu kasvamise ja katkestatava voolu kahanemise takistumine ahela omainduktsiooni tõttu. Omainduktsiooni EMJ suuruse olenemine ahelast, voolust ja teistest tingimustest; säde voolu tekkimisel ja katkemisel. Elektri näiv inertsus. . . . . 166

§ 76. Induktsioon-aparaadid. Ruhmkorff'i induktor. Katkestajad. Kondensaator. Induktori mähise isolatsioon; sekundäärvoolu tugevus . . . . . 167

§ 77. Telefon ja mikrofon. Telefoni printsiip; Bell'i telefon. Mikrofoni printsiip ja praktiline konstruktsioon; transformaatori osa telefoneerimisel. Rääkiv volta-leek. . . . . 170

§ 78. Dünamomasin. Grammi rõngas. Grammi rõngaga püsivvoolu dünamomasina printsiip. Kollektor. Magneto- ja dünamo-elektriline masin. Peavoolu- ja haruvoolu-masin; haruvoolumasina pinge reguleerimine. Dünamomasina ümberajamiseks kuluva töö suurus. . . . . 173

§ 79. Püsivvoolu mootori printsiip. . . . . 177

§ 80. Trummankur; uuemate dünamomasinate konstruktsioon. . . . . 177

§ 81. Vaheldavvool ja tema generaator. Vaheldavvoolu generaatori printsiip. Vaheldavvoolu EMJ ja voolutugevuse diagramm. Mitme poolusega generaator. . . . . 180

§ 82. Vaheldavvoolu mõõtmine; tema faasinurk ja võimsus. Effektiivne voolutugevus ja pinge. Voolu mahajäämine EMJ-st ahela omainduktsiooni tõttu ja tema ettejõudmine EMJ-st ahela mahutavuse tõttu; faaside vahe ja faasinurk. Vaheldavvoolu võimsus. . . . . 183

§ 83. Transformaatorid. Kõrge pinge tähendus elektri-energia juhtimisel kauge maa peale. Transformaatorid. Elektri juhtimise skeem. . . . . 185

Lhk.

§ 84. Kolmefaasi-vool. Kolmefaasi-voolu generaatori printsiip. Tiirlev magnetväli; sünkroonmootor. Kolmefaasi-voolu edasijuhtimine 3 traati kaudu. Asünkroon-mootori printsiip . . . . . 186

**Peatükk IX: Elektromagnetilised lained.**

§ 85. Õõtsuv elektrivool. Leideni pudeli säde tiirlevas peeglis vaadatult; elektrivoolu õõtsumine sädemes. Õõtseaja formul; tema olenemine ahela omainduktsioonist ja mahutavusest. Kustumine. 188

§ 86. Hertz'i vibraator; elektrilained traatides; nende lainepikkuse mõõtmine ja laialilagunemise kiirus. Lainete tekkimine elektroonteooria järele . . . . . 190

§ 87. Elektromagnetilised lained eetris. Elektrilained vibraatori ümbruses; nende tekkimine jõujoonte-teooria järele. Magnetlained ümber vibraatori. Elektromagnetiline laine . . . . . 192

§ 88. Elektriline resonans; resonaatorid ja dedektorid. Vooluahela eneseõõtse periood; elektriline resonans. Resonaatorid. Kohärer; termoelektriline dedektor . . . . . 195

§ 89. Elektromagnetiliste lainete peegeldumine ja murdumine. Hertzi katsed; elektromagnetiliste lainete peegeldumine, murdumine ja polariseerumine. Seisvad elektromagnetilised lained; laialilagunemise kiirus eetris . . . . . 196

§ 90. Traadita telegraf; Marconi süsteem. Brauni süsteem . . . . . 198

**Peatükk X: Elektri voolamine läbi gaaside.**

§ 91. Elektri vool hõrendatud gaasis; katood kiired. Sädeme ja elektrivoolu tekkimiseks tarviliku pinge olenemine õhu hõredusest; sädeme kuju muutumine õhu järk-järgulisel hõrendamisel; positiivne ja negatiivne valgus, Faraday pimeruum; positiivse valguse kasutamine valgustuse otstarbeks. Valgusnähtused väga hõredas õhus; Hittorfi pimeruum. Katoodkiired, nende sirgjooneline tee ja viimase olenemattus anoodi asukohast; katoodkiirte energia; Leenard-kiired. 200

§ 92. Katoodkiired kui elektroonide vool; nende kõrvalepaindumine elektri- ja magnetväljas. Katoodkiired kui negatiivsete joonide vool; joonide

Lhk.

erilaengu ja kiiruse mõõtmine kõrvalekaldumise suuruse põhjal; erilaengu olenemattus torus leiduvast gaasist; jooni mass. Katoodkiirte joonide kiirus; jooni massi olenemine kiirusest kui viimane läheneb valguskiirusele. Katoodkiirte joonid kui vabad elektroonid; elektrooni elektromagnetiline mass. . . . . 204

§ 93. Kanaalkiired; katoodkiirte tekkimine. Kanaalkiired kui positiivsete joonide vool. J. J. Thomsoni teooria katood- ja kanaalkiirte tekkimise üle; gaasi jooniseerumine. . . . . 207

§ 94. Röntgenkiired. Röntgentoru ja -kiired; nende tähtsamad omadused. Röntgenkiirte peegeldumine ja interferents: interferents-nähtused peegeldumisel vastu kristalli pinda; Röntgenkiirte spektrum; tema kuju olenemine antikatoodi ainest; lainepikkus. Elektroonteooria seletus Röntgenkiirte tekkimise üle. Kõvad ja pehmed Röntgenkiired. Sekuntäär-katoodkiired, nende osa gaaside jooniseerumisel Röntgenkiirte mõjul. . . . 209

§ 95. Radioaktiivsus. Raadium ja tema kiirte mõjud. Raadiumi $\alpha$-, $\beta$- ja $\gamma$-kiired. . . . . 213

§ 96. Aatomite radioaktiivne moondumine. Heeliumi ja raadium-emanatsiooni tekkimine raadiumist; raadiumi pooletumis-aeg. Raadium-emanatsiooni moondumine teisteks radioaktiivseteks aineteks; raadiumi moondumiste tabel. Uraani, tooriumi ja aktiiniumi moondumine . . . . . 215

Tabelid . . . . . 217

Õperaamatus nimetatud tähtsamad teadlased ja nende peateenused füüsika alal. . . . . 219

## Tähtsamad trükivead.

| | | | | |
|---|---|---|---|---|
| Lehek. | 28 | 10 rida alt | on seisaldab | peab olema sisaldab |
| „ | 62 | 10 „ ülevalt | „ sieskattega | „ „ sisekattega |
| „ | 76 | 15 „ alt | on 4 d $R^2$ | „ „ $4 \pi R^2$ |
| „ | 96 | 12 „ „ | „ keemilisest | „ „ keemiliselt |
| „ | 134 | 9 „ „ | „ juhiosa pikkusega | „ „ juhiosa takistusega |
| „ | 134 | 4 „ „ | „ adcd | „ „ abcd |
| „ | 138 | 13 „ „ | „ EBJ | „ „ EMJ |
| „ | 138 | 4 „ „ | „ traadis | „ „ traadiks |
| „ | 156 | 15 „ „ | „ $B_2-a-K-$ | „ „ $B_2-c-K-$ |
| „ | 165 | 10 „ „ | „ peab jõud | „ „ peab jõud $F=k\mathfrak{J}Jl\sin\alpha$ |
| „ | 165 | 6 „ „ | „ $F\mathfrak{J}Jl$ | „ „ $F=\mathfrak{J}Jl$ |
| „ | 184 | 12 „ „ | „ siis võrdub | „ „ siis avaldatakse |