

K. KASK



uvitavaid  
elektrinähtusi

2/61622





A-26226<sup>11</sup>

K. KASK

# Huvitavaid elektrinähtusi

---

KIRJASTUS „EESTI RAAMAT“  
TALLINN 1964

*Kaane kujundanud E. Tali*

2

Tartu Riikliku Ülikooli  
Raamatukogu  
61622

Tänapäeva teaduse ja tehnika-kiire areng lausa nõuab, et töötajad sellega pidevalt sammu peaksid. Siit tuleneb otsene vajadus tehnika valdkonda kuuluva, sealhulgas iga liiki elektrilisi nähtusi ja nende füüsikalisi aluseid käsitleva kirjanduse järele. Selle varal värskendatakse varem omandatud teadmisi, õpitakse juurde, saadakse uusi ideid mitmesuguste füüsikaliste nähtuste rakendamiseks igapäevasesse tootmistegevusse. Tuhanded insenerid ja tehnikud, leiutajad ja ratsionaliseerijad, tootmise eesrindlased, novaatorid ja lugematu arv teisi tehnikahuvilisi kannavad pidevalt hoolt seadmete täiustamise ja edasiarendamise eest. Nende otsiv mõte on suunatud järjest uute ja paremate võtete leidmisele, mis lubaksid suurendada toodangut ja parandada selle kvaliteeti.

Käesolevas raamatus püütaksegi selgitada huvitava- maid, praktilisest seisukohast olulisemaid või perspektiivsemaid elektrilisi nähtusi, teha arusaadavaks nende olemus ja sellelaadiliste küsimuste vastu huvi äratamise kõrval täiendada lugeja üldisi, peamiselt keskkoolis omandatud teadmisi.

Kogu esitatav materjal on jaotatud nelja peatükki. Esimene neist käsitleb lühidalt põhiliste elektriliste ja magnetiliste nähtuste avastamise ajalugu, selgitades seejuures ka mõningaid põhimõisteid. Teises peatükis vaadeldakse üksikasjalikult peamiselt kehade elektriseerimise

tagajärjel esinevaid nähtusi. Kolmas peatükk käsitleb nähtusi, mida kutsuvad esile elektrivool, elektrivoolu ja magnetvälja vastastikune toime ja ka elektromagnetiline induksioon. Raamatu viimane peatükk tutvustab lugejale uusi perspektiivseid võimalusi elektrienergia vahetuks saamiseks muud liiki energiast (peamiselt keemilisest ja soojusenergiast).

Autor loodab, et raamat osutub kasulikuks küllaltki laiale lugejaskonnale, eeskätt noortele tehnikahuvilistele, sealhulgas kesk- ja kõrgema haridusega mitte-elektrilise spetsialistidele, kes, arvestades elektrotehnika osatähtsuse kiiret kasvu, püüavad laiendada oma silmaringi selles valdkonnas.

Materjali on püütud esitada võimalikult arusaadavas vormis, kusjuures on eeldatud, et lugejal on põhilisi keskkoolis omandatud sellealaseid teadmisi. Kuigi tekst sisaldab ka üksikuid valemeid, mille täpne mõistmine nõuab põhjalikumat ettevalmistust, ei sega see loodetavasti viimast mitteomavat lugejat kirjeldatavate nähtuste tundmaõppimisel.

Raamatu sisulise külje kujundamisele aitasid oluliselt kaasa retsensentide füüsika-matemaatikakandidaat H. Õiglase, tehnikakandidaat V. Sarve, tehnikakandidaat U. Aguri, aspirant A. Purga, dotsent H. Riikoja, tehnikakandidaat R. Uesoo ja insener J. Hundi asjalikud märkused ja soovitused, mille eest avaldan neile siinkohal siirast tänu.

*Autor*

### Merevaik ja magnet

On raske ütelda, millega puutusid inimesed kokku varem, kas elektriliste või magnetiliste nähtustega. Igal juhul ulatuvad need kokkupuuted väga kaugesse minevikku.

Magnetnõela omadust näidata põhja-lõuna suunda tunti Hiinas üle 3000 aasta tagasi. Hiina ülikud olevat kasutanud sõidukeid, mis olid varustatud väikeste inimesekujuliste magnetsuunanäitajatega. Vertikaalteljele kinnitatud kujuke oli paigutatud sõiduki esiossa, kusjuures kuju ettesirutatud parem käsi näitas lõunasse.

Niisuguseid sõidukeid tunti ka Vana-Egiptuses ja Jaapanis.

Arvatakse, et kompassi võtsid esimestena kasutusele hiinlased; Hiinast levis see hiljem Indiasse, Araabiasse ja mujale.

Juba üle 2500 aasta tagasi panid kreeka filosoofid — tollaegsed teadlased — tähele, et merevaik (kreeka k. *elektron*) omandab villase lapiga hõõrumisel erilise omaduse, mis avaldub kergele esemete külgetõmbamises. Nii-sama kaugele minevikku ulatuvad teated magnetiidi omaduse kohta tõmmata külge rauapuru ja muid raudesemeid.

Kirjanduses leiduvatest andmetest selgub, et VI sajandil e. m. a. demonstreeris kreeka filosoof Tales Mileetose linnast oma õpilastele katseid merevaigu ja magnetiga. Pärast teda ei korranud neid katseid aga keegi ja need jäid kauaks ajaks unustusse.

Alles XVI sajandi teisel poolel leidis inglise arst William Gilbert (1544—1603) kuninglikus raamatukogus (ta

oli Inglismaa kuninganna Elizabethi õukonnaarst) vanu araabiakeelseid käsikirju uurides katsete kirjeldusi, mida Tales tegi merevaigu ja magnetiidiga. Need teated äratasid Gilbertis huvi. Ta otsustas kõigepealt Talese katseid korrata. Seejärel hakkas ta selgitama, kas leidub ka teisi aineid, millel on merevaigu omadusi. Sellisteks aineteks osutusid klaas, väävel, gagaat (liik kivisütt) ja vääriskivid, nagu teemant, rubiin, opaal, safiir, ametüst jt. Hõõrumise teel merevaigu omaduste tekitamist teistel ainetel hakkas Gilbert (umbes 1570. a.) nimetama elektriseerimiseks.

Ka magnetiliste nähtuste süstemaatilisele uurimisele asus esimesena W. Gilbert. Ta valmistas magneteid, hõõrudes terasvardaid magnetiidiga. Niiviisi saadud magnetitega sooritas ta mitmesuguseid katseid. Seejuures ilmnes palju huvitavat. Näiteks kui kaks niidi otsa riputatud magnetit lähendati üksteisele, tõmbusid nende otsad kokku, ent tarvitses ainult pöörata üks magnet ümber, ja kohe tõukusid nad teineteisest eemale.

Katsed näitasid, et magnetite vahel valitsevad magnetilised jõud ja et magneti otsad on vastandlike omadustega. Neid nimetataksegi seepärast erinevalt — üht põhja- ehk positiivseks ja teist lõuna- ehk negatiivseks pooluseks. Selgus ka, et poolustel avalduvad magnetilised jõud kõige tugevamini, magneti keskosas aga kõige nõrgemini.

Kui magnet poolitati, siis osutusid mõlemad pooled jälle kahe poolusega magnetiteks. See asjaolu, samuti fakt, et pörutamise korral kaotab terasvarras oma magnetilised omadused, s. o. võime tõmmata külge rauapuru, viisid Gilberti mõttele, et terasvarras koosneb väga väikestest magnetitest, mis, asetsedes tavalises terases segipaisatuna, seavad end varda magneetimisel korrapärasesse ridadesse piki varda telge, kusjuures vastakuti asetuvad magnetite erinimelised poolused.

Gilbert pani tähele, et terasvardad, mis olid pikemat aega seisnud samal kohal, ilma et neid keegi oleks liigutanud, omandasid lõpuks mõningal määral magnetilisi omadusi. Sellest järeldas teadlane, et Maa kujutab endast suurt magnetit, mille mõjul ka terasvardad võisid muutuda magnetiteks. Tekkinud mõtte tõestamiseks magneetis Gilbert magnetiidi abil terasest kera ja nimetas selle terrellaks (ladina k. «väike maa»). Lähendades terrellale lii-

kuvalt horisontaalteljele kinnitatud magnetnõela, näitas Gilbert piltlikult, kuidas magnetnõel, sõltuvalt kerale lähendamise kohast, kaldub suuremal või vähemal määral kõrvale horisontaalasendist, milles ta on Maa ekvaatoril, ja vertikaalasendist, milles magnetnõel on Maa poolustel. Tegelikult maakera toimibki suure magnetina, mille telg on ligikaudu põhja-lõuna suunas. See suund ei lange siiski kokku maakera teljega. Põhjapoolkeral asub maakera kui magneti lõunapoolus, mille asukohaks on  $70^{\circ}50'$  põhjalaiust ja  $96^{\circ}$  läänepikkust; põhjapoolus asub aga lõunapoolkeral.

Et geograafilised ja magnetilised poolused ei lange ühte, siis ei ühti ka magnetnõela suund geograafilise põhja-lõuna suunaga.

On tehtud kindlaks, et maakera magnetpoolused muudavad aja jooksul oma kohta. Nii olevat aastal 1600 magnetiline lõunapoolus asunud piirkonnas  $78^{\circ}$  põhjalaiust ja  $59^{\circ}$  läänepikkust, viimasel aastakümnel on need koordinaadid, nagu juba tähendatud,  $70^{\circ}50'$  põhjalaiust ja  $96^{\circ}$  läänepikkust. Seega oli 360 aasta eest põhjapoolkera magnetiline poolus umbes 1300 km kaugusel geograafilisest poolusest, tänapäeval aga umbes 2100 km kaugusel.

Peale nimetatud pikaajaliste muutuste pooluste asukohas esineb ka teisi, lühemaajalisi maakera magnetiliste omaduste kõikumisi, näiteks ööpäevased erinevused, mis kord suurenevad, kord vähenevad, sõltudes päikese tegevusest (päikese tegevus intensiivistub seoses nn. päikeseplekkidega, millede maksimum kordub umbes 11 aasta järel). Seni puudub seletus selle nähtuse põhjuste kohta.

### Katsed ja avastused

Pärast Gilbertit tegelesid elektriliste nähtuste uurimisega juba mitme maa teadlased. Enamik neist kordas Gilberti katseid ega lisanud nendele midagi uut. Nii möödus umbes viiskümmend aastat, kuni kerkis esile juba silmapaistvam kuju, Magdeburgi linnapea füüsik Otto Guericke (1602—1686), toosama, kes leiutas õhupumba ja sai kuulsa nn. magdeburgi poolkerade demonstreerimisega 1654. a. Guericke ehitas esimese elektriseerimise põhimõtet rajaneva elektrimasina, mis koosnes teljele paigutatud

väävlikerast. Kera elektriseerimine toimus sel teel, et katsetaja hoidis vasakut kätt keral, paremaga aga pani selle vända abil pöörlema.

Sooritades oma katseid märkas Guericke, et kerged esemed, mis tõmbusid elektriseeritud keha külge, langesid hiljem sealt ära. Kui sellisele äralangenud esemele, näiteks udusulele, lähendati uuesti sama elektriseeritud keha, siis sundis viimane eseme eemale liikuma. Sellega oli avastatud elektriline tõukejõud. Lisaks tegi Guericke kindlaks, et elekter võib ühelt kehalt kanduda vahepealse keha (näiteks lõnga) kaudu teisele. Viimast asjaolu tõestasid hiljem, 1729. a. tehtud katsetega ka inglased Gray ja Wheeler. S. Gray nimi on seotud veel teiseegi olulise probleemi lahendamisega. Nimelt näitas ta, et ka metalle saab elektriseerida, millega enne teda ei olnud keegi toime tulnud. Selgus, et kogu saladus peitus isolatsioonis. Senised katsed ebaõnnestusid seetõttu, et metallide elektriseerimisel kadus laeng läbi inimese keha maasse. Kui metallkatsekehad isoleeriti maast, siis osutus võimalikuks neid elektriseerida.

Tähelepanuväärse avastuse tegi 1734. a. prantsuse loodusteadlane ja füüsik Charles François de Cisternay Du Fay (1698—1739). Järjekordsel katsel elektriseeris ta klaaspulga ja puudutas sellega õhukest kullalehekest, mis pörkas seejärel klaaspulgast eemale. Tugevama efekti saavutamiseks elektriseeris Du Fay lisaks veel vaigust pulgakese ja lähendas selle samale kuldlehekesele. Ent eemaletõukumise asemel tõmbus viimane vaigust pulgakese külge. See oli uus avastus. Katse näitas, et ilmselt on olemas kaht liiki elektrit: klaasi- ja vaiguelekter. Du Fay nimetaski neid selliselt. Kaks kübemekest, mis olid laetud klaasielektriga, tõukusid teineteisest eemale. Oli aga üks kübemeke laetud vaigu- ja teine klaasielektriga, siis nad tõmbusid teineteise ligi.

Tol ajal käsitleti elektrit mingi erilise, kaaluta vedelikuna, mis eelduse kohaselt pidi esinema kõikides kehtes. Osa teadlasi, nende hulgas ka Du Fay, pooldas kahe erineva, vaigu- ja klaasielektrivedeliku hüpoteesi, teine osa, kelle hulka kuulus ka ameerika füüsik Benjamin Franklin (1706—1790), arvas, et on olemas ainult üht liiki elektrivedelik.

Du Fay ideed elektrivedelike olemasolust arendas hiljem edasi prantsuse füüsik Charles Coulomb (1736—1806).

«Milline ka ei oleks elektri tekkimise põhjus,» kirjutas Coulomb, «eeldades, et on olemas kaks elektrivedelikku, võime seletada kõiki nähtusi. Ühe elektrivedeliku osakesed tõukuvad jõuga, mis on pöördvõrdeline kauguse ruuduga, ja tõmbavad ligi teise elektrivedeliku osakesi sama seaduse järgi.»

Coulomb'i ettekujutuse kohaselt jagunevat kõikides kehaes sisalduv loomulik elektrivedelik elektrivälja toimel võrdsel hulgal vaigu- ja klaasielektriiks. Elektrijuhhi korral koonduvat elektrivedelikud keha välispinnale. Kahe vastandliku elektrivedeliku segunemine põhjustavat elektrilaengute neutraliseerumist, nii nagu neutraliseeruvad segunemisel happed ja alused.

Seaduspärasuse, mille kohaselt kehade elektriseerimisel ilmneb ikka kaks elektriseeritud olekut — positiivne ja negatiivne — avastas B. Franklin 1749. a. Elektriseerimine seisnes tema arvates elektrivedeliku üleminekus ühelt kehalt teisele. See põhjustavat kas keha positiivset elektriseeritud olekut, kui kehas on elektri ülejääki, või negatiivset, kui kehas on elektrit puudu. Näiteks siidriie kaotavat klaasi elektriseerimisel osa oma elektrist ja osutuvat seepärast negatiivselt elektriseerituks, kuna klaaspulk, mis saab samal hulgal elektrit juurde, on elektriseeritud positiivselt. Seda Franklini unitaarset teooriat arendas hiljem edasi vene teadlane akadeemik Franz Ulrich Theodor Aepinus (1724—1802). Nimetused «positiivne» ja «negatiivne» elekter (mitte kehade elektriseeritud olek) võttis aga esimesena kasutusele saksa füüsik G. Lichtenberg (1742—1799). Need nimetused on püsinud tänapäevani.

Ka F. U. T. Aepinus oli seisukohal, et elekter kujutab endast ülipeent vedelikku, mille osakesed vastastikku tõukuvad, kuid mida kehad ligi tõmbavad. Seejuures ühed kehad lasevad elektrivedelikku kergesti läbi pooride — need on elektrijuhhid, teised aga takistavad selle liikumist kehas. Viimaseid nimetatakse nüüd isolaatoriteks. Aepinus jagas ka elektrinähtused kahte liiki: ühtesid põhjustab elektrivedeliku üleminek ühelt kehalt teisele (sädelahendus ja muud sellega kaasnevad valgusnähtused), teised kutsub esile kehade elektriseeritud olek (külgetõmme ja tõukumine).

Aepinus oletas ka erilise magnetvedeliku olemasolu, mille osakesed pidid samuti tõukuma. Enamik aineid ei

avaldata magnetvedelikule mingit toimet, ainult raud ja mõned teised ained tõmbavat seda ligi.

Need olid muidugi eksiarvamused. Mingit elektri- ja magnetvedelikku tegelikult ei eksisteeri. Ometi võimaldasid need hüpoteesid mingil määral seletada nii salapärasena tundunud elektrilisi ja magnetilisi nähtusi. Seepärast püsisid nad ka väga kaua, umbes XIX sajandi esimese pooleni.

Erilist huvi pakub Aepinuse matemaatiline käsitlusviis, mida ta rakendab elektriseeritud kehade ja ka magnetite vahel mõjuvate jõudude kohta. Matemaatiliselt avaldab ta neid funktsioonina kaugusest. Milline kuju on sellel sõltuvusel, selle kallal ta pikemalt ei juurdle. Mõninga kahtlusega kaldub ta siiski arvama, et tegemist on sõltuvusega kauguse ruudust. See hüpotees leidis hiljem kinnitust C. Coulomb'i poolt, kes mõõtis jõu suurust, millega elektriseeritud kehad tõmbuvad teineteise poole või tõukuvad, ja avastas 1785. a. seadusepärasuse, mis on füüsikas nüüd tuntud Coulomb'i seadusena.

Aepinus jõudis järeldusele, et kui keha ei ole elektriseeritud, siis teine keha, olgu ta elektriseeritud või mitte, ei tõmba teda ligi ega tõuka eemale. See seisukoht oli täiesti uus ja vastandlik valitsevale arvamusele. Enne Aepinust nimelt vaadeldi ikka elektriseeritud kehade mõjuavaldusi elektrilaenguta kehadele ja keegi ei tulnud sellele, et jõud avaldub ainult elektriseeritud kehade vahel. Aepinuse arvates ilmneb see mõjuavaldus alles pärast seda, kui ühe keha elektrilaeng on kutsunud ka teises kehas esile elektrilaengu. Sama arvas ta magnetite kohta. Magneti läheduses muutub raud magnetiks ja alles seejärel tõmbab magnet teda ligi.

Aepinuse töödes puutume esmakordselt kokku ka elektri- ja magnetvälja mõistega. Ta nimetab neid küll veidi teisiti — elektriliseks ja magnetiliseks keeriseks või elektri ja magneti atmosfääriks, milles vastavalt kas elektriseeritud keha või magneti ümber avalduvad tõmbe- või tõukejõud.

Leydeni ülikooli (Hollandis) materjalides 1746. aastast leidub teade huvitava avastuse kohta, mille tegid professorid Musschenbroek ja Cunaeus. Nendel oli olnud parajasti käsil vee elektriseerimine. Cunaeus hoidnud veepudelit käes, Musschenbroek aga juhtinud sellesse elektriseerimismasinast saadavaid elektrilaenguid. Kui siis Cunaeus

puudutanud elektriseeritud vett teises käes oleva metallvardaga, saanud ta tugeva elektrilöögi, hüpanud üles ja kekselnud valust moonutatud näoga tükk aega mööda laboratooriumi. Lugeja muidugi taipab, et oli tegemist esimese kondensaatoriga, et teadlased olid avastanud võimaluse elektrilaenguid koguda.

Umbes samal ajal oli analoogiline läbielamus ka E. Kleistil Pommeris (Saksamaal). Ta hoidnud elavhõbedat korgitud klaaspudelis. Et elavhõbedat saaks elektriseerida, torgati läbi korgi pikk nael. Elavhõbedale elektrilaengute kandmise ajal hoiti pudelit käes. Kui seejärel puudutati teise käega naela, saadi tugev elektrilöök.

Neid väga primitiivseid kondensaatoreid, nn. leideni purke täiendas hiljem peaaegu üheaegselt B. Frankliniga vene akadeemik F. Aepinus.

Aastail 1752—1753 uurisid vene akadeemikud Mihhailo Lomonossov (1711—1765) ja Georg Richmann (1711—1753) õhuelektrit.

G. Richmann konstrueeris esimese elektromeetri, et mõõta õhuelektri laenguid, mis saadi maast isoleeritud pikast metallvardast. Erinevalt Franklinist kaldus Richmann arvama, et kehade positiivse ja negatiivse elektriseeritud oleku all ei tule mõista elektrivedeliku üleküllust või puudujääki kehas, vaid selle erisuunalist liikumist.

M. Lomonossov, kes võttis innukalt osa õhuelektri uurimisest, andis ka omalt poolt palju uut. Tema arvamuse kohaselt põhjustab elektrilaengu tekkimist õhus õhusakeste hõõrdumine tõusvates õhuvooludes. Viimaste olemasolu, samuti nende osatähtsus elektrilaengute tekkimises leidis hiljem kinnitust.

Lomonossov oli esimesi teadlasi, kes astus välja elektrivedeliku-teooria vastu. Ta avaldas oma aja kohta eesrindlikku mõtet, et elekter on nn. maailma eetri osakeste pöörlev liikumine. Selle kõikjal esineva ülipeene materia abil kanduvad Lomonossovi arvates edasi ka valgus ja soojus. Erinevus valguse ja soojuse vahel seisnevat eetri liikumise viisis. Valgus kujutavat endast eetri võnkumist, soojus aga eetriosakeste pöörlevat liikumist. Viimase kutsub Lomonossovi arvates esile hõõrdumine.

Pöörlemine kanduvat ühelt osakeselt teisele, kusjuures osake, mis annab osa liikumisest teisele, hakkab seejärel pöörlema aeglasemalt. Elektrilaengu liikumise teel asuvad eetriosakesed saavad sel viisil järgemööda teatava pöör-

lemiskiiruse, mis kujutavatki endast elektrilaengut, liikumise levimine eetris aga elektrilaengu liikumist. See oli täiesti uus, omapärane idee.

XVIII sajandi esimesel poolel arvas veel enamik füüsikuid, et elektrilaeng kujutab endast erilist elektrivedelikku, selle liikumine aga elektrilaengu liikumist. Erinevalt sellest oletas Franklin, et elektrilaeng on kõrvalekaldu mine elektrivedeliku teatavast normaalsest tihedusest. See oli esimene samm ettekujutuse loomiseks elektrilaengu liikumisest kui mingist deformatsioonist, mis aitas omajagu kaasa iganeva elektrivedeliku-teooria kummutamisele.

Mõte analoogiast elektrisädeme ja välgu vahel tekkis tol ajal mitmel füüsikul, sealhulgas ka Franklinil, kes süstemaatiliselt uuris õhuelektriga seotud nähtusi. Tema tähelepanekuid, soovitusi ja katsete kirjeldusi leidub kirjades, mida ta saatis aastail 1747—1754 Inglismaale oma sõbrale, Kuningliku Seltsi liikmele Peter Collinsonile. Nendes leidub ka soovitus seada üles pikk terasvarras, mille kaudu elektrilaeng pääseks laboratooriumi. Seda tegidki mitmed füüsikud Euroopas. Teatavasti uurisid ka vene akadeemikud M. Lomonossov ja G. Richmann niisuguse varda abil õhuelektri omadusi. Ühel järjekordsel katsetusel 26. juulil 1753. a. lõi välg vardasse ja lähedal viibinud G. Richmann sai silmapilkselt surma.

Ootamata sellekohase kõrge masti valmimist Philadelphias, laskis Franklin 1752. a. suvel linnatagusel lagedal põllul pikse ajal üles terava vardakesega lohe. Kui nõör oli lahti harutatud, sidus ta selle otsa suure raudvõtme külge. Vihma ajal läks nõör märjaks ning raudvõtme ja selle lähedale nihutatud leideni purgi nupu vahel vilksatas säde. Sel teel õnnestus Franklinil laadida mitu leideni purki. Nii koguti esmakordselt õhuelektrit. Seepeale saadetud kirjas teatas Franklin oma sõbrale, et välg on tugev elektrilaengu tühjenemine, et välguelekter on samaugune nagu elektriseerimismasinalt kogutud elekter. Samas väljendas Franklin ka piksekaitse ideed, mille ta viis ellu alles hiljem.

## Elektrodünaamika sünd

Kuigi kokkupuuted elektriliste ja magnetiliste nähtustega ulatuvad kaugesse minevikku, puudus kaua aega selgus, kuidas on need nähtused üksteisega seotud. Teati ainult, et magnet tõmbab ligi rauatükikesi, elektriseeritud merevaik aga teisi kergeid esemeid, nagu paberitükikesi, seemneid jm. IV sajandi hiina autori Kuo Pho teoses leidub järgmine märkus: «Magnet tõmbab külge rauda nagu merevaik sinepiseemneid.» Mitmed tähelepanekud kõnelesid sellest, et elektriliste ja magnetiliste nähtuste vahel peab olema mingi tihe seos. Nii pandi tähele, et välk põhjustas mõnigi kord terasesemete magneetumist, meremehed aga täheldasid kompassinõela übermagneetumist. Kuid sellealased teadmised olid veel sedavõrd väikesed, et ei võimaldanud leida nende vahel olulist sidet. Tunti ju tol ajal ainult staatilist elektrit. Magnetvälja aga saab täheldada pidevalt liikuvate elektrilaengute, s. t. elektrivoolu korral.

Eeldused elektrivoolu saamiseks tekkisid allës XVIII sajandi lõpul, kui tehti järgmine tähelepanuväärne avastus. 1786. a. pani Bolognas (Itaalias) elav arstiteaduse professor Luigi Galvani (1737—1798) tähele, et raudaia küljes vaskkonksul rippuva värskelt lahatud konna jäse tõmbus iga kord kokku, kui see puudutas raudaia latti. Jälginud sündmust tähelepanelikult, järeldas Galvani, et konna jäseme musklites tekib lühiajaline pingeimpulss. Algul arvas ta, et seda põhjustab õhuelekter. Nähtuse uurimiseks korraldas Galvani hulga katseid. Osutus, et eriti tugevasti tõmbusid lihased kokku elektrilaengute toimel. Kuid jäsemelihase kokkutõmbumine esines ka siis, kui konna asetsetes terasplaadil ja tema seljaüdist läbipistetud skalpell puudutas plaati. Oli ilmne, et pinge tekkis iga kord, kui konna selgrooüdisse pistetud vaskkonks või skalpell puutus kokku teise metalliga. Osutamata sellele vajalikku tähelepanu tuli Galvani ekslikule arvamusele, et pingeallikaks on konna ise ja et see tõestavat mingi loomse elektri olemasolu. Mitmed tollaegsed teadlased, sealhulgas ka kuulus itaalia füüsik Alessandro Volta (1745—1827) kinnitasid oma katsetega Galvani õpetust loomsest elektrist. Ent hiljem hakkas Volta selles kahtlema. Ta pani tähele, et katsed kulgesid edukalt millegipärast siis, kui traadid, mis puudutasid konna, olid eri

metallidest. Peagi võis Volta väita, et kahe eri metalli toimel tõmbuvad kokku isegi üksikud lihaskimbukesed. Uurimiste najal jõudis Volta veendumusele, et tõeliseks pinge tekitajaks ei olnud Galvani katsetes mitte kõnn, vaid erinevad metallid, ja et konna koib oli seejuures ainult tundlikuks mõõteriistaks.

Teadlastel tekkis selles küsimuses suuri lahkarvamusi. Galvani kaitses loomse elektri teooriat, Volta aga, toetudes oma katsete tulemustele, vaidles sellele vastu. Võitjaks osutus lõpuks Volta. 1800. a. esitas ta avalikkusele maailma esimese keemilise vooluallika — Volta samba. Galvani teeneid hinnates nimetati seda liiki vooluallikaid galvaanielementideks.

Ent kas oli ikka Volta galvaanielemendi leiutaja? Kuni 1936. a. ei kahelnud selles keegi. Kuid siis äkki tekkis tõsine kahtlus. Ja üsna lihtsal põhjusel. Arheoloogilistel kaevamistel Iraagis Bagdadi linna lähedal 1936. a. töid teadlased umbes 3000 a. vanusest kultuurkihist päeva-valgele mingi keraamilise eseme — savipoti, milles olid vasksilindri ja raudvarda jäänused. Potis leidus ka pigi-või asfalditaolist massi. Tekkis mõte, et on tegemist galvaanielemendiga. Sellekohane kõmulate läbis kohe kulu-tulena kogu maailma ajakirjandust. Peatselt alanud maailmasõda pani aga uurimistööd pikemaks ajaks seisma. Neid jätkati hulk aastaid hiljem. Nüüd, umbes aasta eest, pöördus Iraagist Ühendriikidesse tagasi ekspeditsioon, kes oli sooritanud kaevamisi Bagdadist lõuna pool, muistse Seleukeia linna asupaigas. Siinsetes kungastes Tigrise jõe kaldail õnnestus ekspeditsioonil leida samasugust keraamikat — koonusekujulisi glasuuritud savipotte. Mõnes neist leidusid ka vasksilinder ja raudvarras, samuti bituumenit. Metallesemed olid ajahambast tugevasti puretud, näis, et neid oli söövitanud mingi hape. Mõne leitud seadise püüdsid teadlased panna tööle. Raudvarras kinnitati bituumeni abil vasksilindrisse, millesse valati ka vasevitrioli vesilahust. Mõõteriista abil võidi veenduda, et silindri ja raudvarda vahel ilmnes potentsiaalivahe. Asjatundjate arvates oli tõesti tegemist galvaanielemendiga, milles elektrolüüdina võidi kasutada näiteks äädikhapet. Seega siis tunti galvaanielemendi-taolist pingeallikat juba umbes 3000 aastat tagasi. Tunti, kuid hiljem unustati. Volta teeneks jääb ikkagi selle uuesti leiutamine.

Volta leiutusest möödus veel umbes paarkümmend

aastat, enne kui avastati elektrivoolu magnetiline toime. Enne seda tunti küll magnetite omadusi, tehti ka palju katseid elektrilaengutega, mida saadi elektriseerimismasinate abil. Katsete najal teati, et elektriseeritud kehad ei avalda mingit toimet magnetile ja, vastupidi, paigal olev magnet ei avalda mingit toimet paigal püsivale elektrilaengule. Seepärast on mõistetav teadlaste suur huvi avastuse vastu, mille tegi 1819. a. Taanis Kopenhaageni füüsikaproffessor Hans Ørsted (1777—1851). See toimus järgmiselt. Ühel järjekordsel loengul selgitas Ørsted üliõpilastele Galvani ja Volta töid. Seejuures demonstreeris ta mitmesuguseid katseid, koostades selleks galvaanielemendiga vooluringi. Laual oli ka magnetnõel. Katsete ajal märkas teadlane juhuslikult magnetnõela liikumist. Lõpetanud katsed, hakkas Ørsted kohe uurima magnetnõela käitumist, kui selle lähedale ja paralleelselt asetati elektrivooluga juhe. Ilmnes, et magnetnõel kaldus kõrvale ja jäi juhtme suhtes risti. See katse näitas, et vooluga juhtme ümber on magnetväli.

Kirjeldades oma katseid 1820. a. avaldatud raamatus, konstateeris Ørsted kokkuvõttes, et kui juhe, milles vool kulgeb põhjast lõunasse, asetseb magnetnõela kohal, kaldub viimase põhjapoolus itta, kui aga juhe on magnetnõela all, siis läände.

Ørstedi avastus andis paljudele teadlastele tõuke uuteks uurimisteks.

Prantsusmaal jätkas ja arendas Ørstedi tööd edasi andekas füüsik André Marie Ampère (1775—1836). Ta väitis, et iga vooluallika vooluringi sulgemisel tekib ühendusjuhtmetes elektrivool. Elektrivooluga juhtmete ümber aga tekib magnetväli, mis avaldabki mõju magnetnõelale. Viimase kõrvalekaldumise suund sõltub elektrivoolu suunast. Selle määramiseks andis Ampère järgmise nn. «ujuja seaduse»: inimene, kes ujub juhete mööda voolu suunas, nagu pööratud magnetnõela poole, näeb alati magnetnõela põhjapooluse kõrvalekaldumist vasakule. Ampère andis ka valemi jõu arvutamiseks, millega magnetväli mõjub vooluga juhtmele. Selle kohaselt on magnetvälja mõju maksimaalne, kui vooluga juhe on risti magnetväljaga.

Katsetega tegi Ampère kindlaks, et kaks ühesuunaliste vooludega paralleelset juhete tõmbuvad, kuna kaks vastasuunaliste vooludega paralleelset juhete tõukuvad.

Keeranud juhtme ühesuuruste keerdudega spiraali, mille ta nimetas solenoidiks, ja juhtinud sellest läbi voolu, veendus Ampère, et solenoid käitub magnetina: ühes otsas tekib tal põhja-, teises aga lõunapoolus. Seejuures selgus, et lõunapoolus tekib alati sellesse otsa, millele vaadates näeme voolu suunda langevat ühte kellasuti liikumise suunaga, põhjapoolus aga vastab vastupidisele voolu suunale.

Katsed solenoidiga viisid Ampère'i mõttele, et kehade magnetilised omadused ongi tingitud aines esinevatest elektrivooludest, et iga magnet kujutab endast väikeste looduslike solenoidide kogu. Ta oletas, et rauas ja terases eksisteerivad alalised elementaarvooluringid, mis magnetimisel asetuvad üksteisega paralleelselt ja kulgevad ühes suunas. Ühesuunalisteks osutuvad seepärast ka elementaarvoolude ümber tekkivad magnetväljad.

Elektrivoolude ning elektrivoolu ja magnetvälja vastastikuse toime uurimisega pani Ampère aluse uuele õpetusele, mille ta nimetas elektrodünaamikaks. Ta vastandas selle elektromagnetismi mõistele, mis võeti kasutusele varsti pärast Ørsted'i avastust ja millega tol ajal tähistati vaid magneti ja vooluga juhtmete vahelisi mõjuavaldusi. Ampère'i teoses «Katsetest tuletatud teooria elektrodünaamiliste nähtuste kohta» (koostatud aastail 1824—1826) leiame selle kohta järgmise märkuse: «Et nähtusi, millest siin juttu, kutsub esile liikuv elekter, siis pidasin vajalikuks nimetada nad elektrodünaamilisteks. Seni kasutatud nimetus — elektromagnetilised nähtused — oli kohane vaid magneti ja elektrivooluga juhtmete vaheliste mõjuavalduste jaoks, mille avastas Ørsted. Pärast seda, kui ma tõestasin, et sellised nähtused tekivad ka ilma magnetita, kahe elektrivooluga juhtme mõjuavalduse tulemusena, võib see nimetus viia eksiteele.»

Olgu tähendatud, et tänapäeva tähenduses haarab mõiste elektromagnetism kõiki elektrivooluga kaasnevaid, samuti muutuva elektri- ja magnetvälja poolt põhjustatud nähtusi.

Varsti pärast esimesi teateid Ørsted'i avastusest määrasid prantsuse füüsikud J. Biot ja F. Savart 1820. a. lõpul katseliselt kindlaks järgmise seaduse vooluga juhtme ümber tekkiva magnetvälja tugevuse kohta (millele matemaatik Pierre Simon Laplace andis matemaatilise väljenduse): lõpmata pika juhtme ümber tekkiva magnetvälja

tugevus vabalt valitud punktis on võrdeline vooluga ja pöördvõrdeline selle punkti kaugusega juhtmest.

Panuse magnetiliste ja elektriliste nähtuste uurimisse andis ka prantsuse füüsik Dominique Arago (1786—1853). See oli samuti umbes 1820. a., kui Arago tõestas, et rauapurusse asetatud vooluga juhe käitub nagu magnet — tõmbab rauapuru külge. Koos Ampère'iga magneetisid nad elektrivoolu abil rauda. 1825. a. avastas Arago magnetnõela pöörlemise, kui selle alla asetati pöörlev vaskketas. Arvati, et selle nähtuse kutsub esile nn. pöörlev magnetism, sest muud seletust ei osatud veel anda.

Umbes samal ajal avaldas inglise füüsik Humphry Davy (1778—1829) mõtet, et raua magneetumine elektrivoolu toimel seletab ka paberile puistatud rauapuru omapärast asetumist paberit läbiva vertikaalse sirge juhtme ümber. Rauakübemekesed nagu muutuksid väikesteks magnetiteks, seades ennast kontsentriselt ümber vooluga juhtme.

XIX sajandi esimesel poolel tunti kõikjal elavat huvi loodusteaduste vastu. See huvi ei piirdunud ainuüksi teadlaste ringkondadega, vaid kandus ka üldsusele. Inglismaal kujunes näiteks kõrgemas seltskonnas heaks tooniks käia kuulamas ülikooli professorite ja Kuningliku Seltsi liikmete teaduslikke ettekandeid. Vaesemate sellekohase huvi rahuldamiseks korraldasid kooliõpetajad populaarteaduslikke loenguid. Loengud käsitlesid tavaliselt teadlaste värskeid katseid ja nende tulemusi. Kõikjal katsetati ja vaieldi professorite või kooliõpetajatega. Niisugustes tingimustes leidsid aset ka hiljem maailmakuulsaks saanud teadlase Michael Faraday (1791—1867) esimesed kokkupuuted teadusega. Vaese sepa poeg pandi juba noorukina raamatukõitja juurde ametit õppima. Huvist loodusteaduse vastu külastas ta innukalt loenguid, ka luges ta palju sellesisulisi raamatuid. Koos teiste samaealiste noorukitega sooritas Faraday lihtsamaid katseid, matkides teadlaste uurimisi. Suureks sündmuseks oli noormehele, kui üks kõitekoja kliente kinkis talle pääsme Kuningliku Seltsi presidendile, silmapaistva füüsiku Humphry Davy loengutele. Hiljem õnnestus tal saada Davy assistendiks. Siit algaski noore füüsiku teadlaseteed. 1821. a. asus Faraday uurima magnetilisi ja elektrilisi nähtusi. Ta sooritas palju katseid. Teadlase säilinud märkmik sisaldab nende täpseid kirjeldusi. Ühes katses asetaski ta sirge, alalisvooluga juhtme

vertikaalselt ja riputas selle lähedale magnetnõela. Muutes pidevalt magnetnõela asendit vooluga juhtme suhtes, jälgis ta samal ajal magnetnõela käitumist. Selgus, et kui nõela keskpunkt asus juhtmest veidi ida või lääne pool, siis magnetnõel tervikuna kas tõmbus juhtme poole või tõukus eemale.

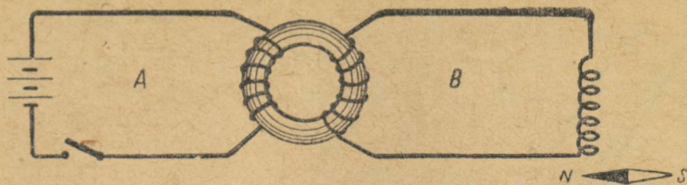
Katsete tulemusi analüüsidis tuli Faraday otsusele, et vool mõjub magnetpoolusele jõuga, mis on suunatud selliselt, et selle toimel kas magnetpoolus peab tiirlema ümber juhtme või juhe ümber magnetpooluse. Ta tõestas seda teravmeelselt koostatud katseseadme abil, mille kirjeldust võib nüüdki leida pea igas füüsikaõpikus. See oli elektrimootori esimene laboratoorne mudel.

### **Kas magneti abil saab tekitada elektrivoolu!**

1831. a. avastas Faraday elektromagnetilise induktiooni nähtuse. See sündmus oli pöördelise tähtsusega kogu elektrotehnika edasisele arengule. Avastus ei olnud aga sugugi juhuslik. Juba 1819. a. alates juurdles Faraday küsimuse kallal, kuidas saaks magneti abil tekitada elektrivoolu. Kui magneti lähedale asetatud rauatükk omandab magnetilised omadused, kas ei peaks siis ka elektromagnetilise abil võimalik olema saada teist elektromagnetit. Selleks peaks teises mähises tekkima elektrivool.

Aastate jooksul tehtud katsed ei andnud soovitud tagajärgi. Alles 29. augustil 1831. a. kroonis Faraday püüdeid edu. Sel korral, nagu selgub tema päevikust, ei kasutanud ta katsetamisel nagu tavaliselt kaht paralleelselt asetatud juhet, vaid pehmest rauast rõngast, millele olid paigutatud vasktraadist mähised. Ühe mähise otsad ühendas Faraday Volta sambaga (vooluring *A*), teise aga lameda spiraaliga (vooluring *B*), mis asetses magnetnõela lähedal, selle põhjapoolusest veidi lääne pool (joon. 1—1).

Kui vooluringi *B* sulgemise järel suleti või avati vooluring *A*, siis samal hetkel avaldus vooluringis *B* oleva spiraali magnetiline toime magnetnõelale, kallutades viimase algasendist kõrvale. Seejuures tõmbus magnetnõel vooluringi *A* sulgemisel spiraali poole, avamisel aga tõukus eemale. Sellega oligi saavutatud eesmärk, mida Faraday nii kaua taotles: oli tõestatud elektrivoolu esinemine teises mähises.



Joon. 1—1. Faraday katse skeem.

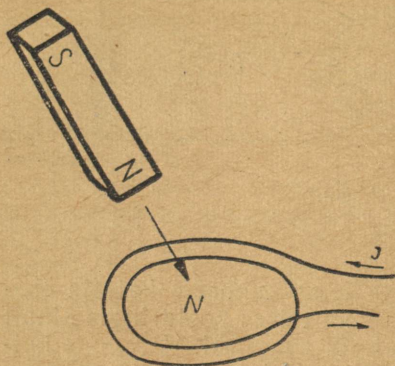
Nüüd selgus Faradayle ka tema esimeste katsete ebaõnnestumise põhjus. Tekib ju vool teises vooleringis ainult esimese vooluringi sulgemisel või avamisel. Varemate katsete ajal ei osutanud ta neil hetkil mingit tähelepanu magnetnõelale, arvates, et uus nähtus ei saa tekkida neil lühikestel silmapilkudel, vaid ainult püsiva voolu olemasolu korral esimeses vooluringis. Viimased katsed näitasid, et see arvamus oli ekslik.

Elektromotoorne jõud, mis kutsus vooluringis *B* esile voolu, tekkis niihästi hetkel, mil vooluring *A* suleti, kui ka hetkel, mil ta avati. Esimesel juhul vooluallika vool magneetis raudrõngast, teisel juhul aga nii vool kui ka magnetväli vähenesid ja kadusid.

Need katsed olidki aluseks Faraday üldtuntud induktiooniseadusele, mille kohaselt kinnises vooluringis indutseeritud elektromotoorne jõud on võrdeline vooluringiga piiratud pinda läbiva magnetvoo muutumise kiirusega. Seejuures indutseerib magnetvoog vähenedes positiivse ja suurenedes negatiivse elektromotoorse jõu. Indutseeritud elektromotoorse jõu positiivse suuna määrab järgmine kruvijuht: kui magnetvoo suund ühtib kruvi edasiliikumise suunaga, siis indutseeritud elektromotoorse jõu positiivne suund ühtib kruvi pöörlemise suunaga.

Tuleb vaid imestada, kuivõrd lihtsate vahenditega tegi teadlane oma katseid. Pooli valmistamise kohta jutustab ta ise järgmist: «Umbes 20 jalga vasktraati oli keritud spiraalina puusilindrile. Keerdude isoleerimiseks mähiti nende vahele peenikest nõõri. Pealt kaeti spiraal kalinuriga ja alles sellele keriti teine spiraal.»

Aastail 1833—1834 sõnastas Tartust pärit olev silmapaistev vene füüsik akadeemik Emil Lenz (1804—1865) järgmise tema nime kandva juhise indutseeritud voolu suuna määramiseks: kui lähendada rõngakujulisele juht-



Joon. 1—2. Lenzi juhis: rõngakujulises juhtmes tekib selle-suunaline vool, millega kaasnev magnetväli mõjub tõukavalt lähendatavale magnetile.

mele magnet või vooluga juhe, tekib rõngakujulises juhtmes sellesuunaline induktsioonivool, mille magnetiline toime pidurdab teda tekitava magneti või vooluga juhtme liikumist (joon. 1—2).

Elektromagnetilise induktsiooni avastamisel oli äärmiselt suur tähtsus elektrotehnika edasisele arengule. Sellega oli tegelikult antud teoreetiline alus elektrimasinaehitusele. Mitmel maal hakatigi neid konstrueerima. Esimese pöörleva rootoriga kasutamiskõlbliku elektrimootori ehitas 1834. a. vene akadeemik Moritz Hermann Jacobi (1801—1874).

Nüüd oli ka võimalik seletada D. Arago poolt 1825. a. avastatud «pöörlemise magnetismi». See osutus lihtsalt elektromagnetilise induktsiooni erijuhuks.

Kahtlemata oli elektromagnetiline induktsioon tolle aja suurimaid avastusi füüsika valdkonnas. Kuidas hindas seda Faraday, selle kohta on käibel paar järgmist anekdooti.

Korra küsinud keegi daam Faradaylt, mida küll võiks töötada avastatud elektromagnetiline induktsioon. Seepeale vastanud teadlane: «Kas teie võite mulle öelda, mis saab teie pojast, kui ta kord suureks kasvab?»

Vesteldes teadlasega küsinud keegi riigiametnik: «Mis te arvate, kas elektrist saaks ka mingit tulu?»

«Mõne aasta pärast maksustate te selle kindlasti!» vastanud teadlane.

Faraday väitis, et hõrdeelekter, s. o. kehade elektriseerimisel ilmnev elekter, galvaanielementide elekter, loomne elekter, termoelekter ja ka tema poolt avastatud «magnetiline» elekter on sisuliselt ühesuguse iseloomuga ja erinevad üksteisest ainult hulga ja intensiivsuse poolest.

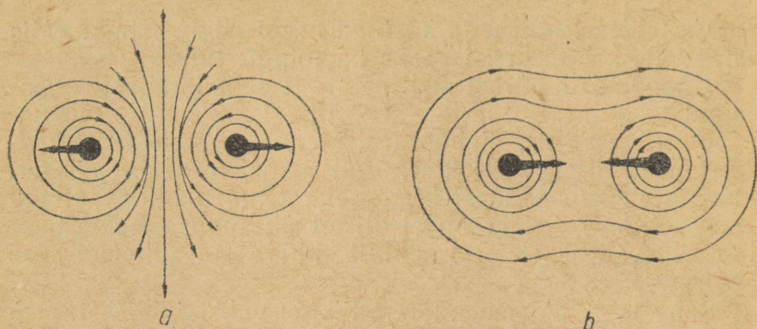
Soov leida sidet nende eri liikide vahel juhtiski Faraday aastail 1833—1834 elektrolüüsi kohta kehtivate seaduspärasuste avastamisele.

1835. aastal avastas Faraday ka eneseinduktsiooni nähtuse.

Selle olemuse kohta andis ta järgmise seletuse. Iga kordsel voolu muutumisel juhis (eriti raudsüdamikuga poolis) muutub seda ümbritsev magnetväli ja selle tagajärjel indutseerub täiendav elektromotoorne jõud. Eneseinduktsioon ilmneb vooluringi sulgemisel ja avamisel, samuti ka voolu tugevnemisel ja nõrgenemisel. Vooluringi sulgemise korral tekib juhtmes täiendav vool, mis on vastupidine põhivoolule. See vähendab põhivoolu ja möödub teatav aeg (olgugi väga lühike), kuni põhivool juhtmes saavutab oma normaalse tugevuse. Vooluringi avamisel on eneseinduktsioonivoolul sama suund mis põhivoolulgi, seepärast ta säilitabki kaduvat põhivoolu ja ühtlasi pikendab põhivoolu kestust vooluringi avamisel.

Need avastused muutsid täiesti tollaegseid vaateid elektri ja magnetismi kohta. Seni valitses teadlaste seas arvamine, et kõik elektrilised ja magnetilised mõjuavaldused, mis ilmnevad kehade vahel, kanduvad edasi silmapilkselt, ilma vahepealse keskkonna abita. Faraday ja seejärel ka teised teadlased rõhutasid seevastu keskkonna tähtsust ja oletasid, et mõjuavaldus kandub edasi maailma eetri kaudu. Koos sellega loobuti elektri- ja magnetvedelike ideest, püüdes selle asemel seletada elektrilisi ja magnetilisi nähtusi maailma eetri kui kõikjal eksisteeriva ja kõike läbiva keskkonna abil.

Faraday pühendas palju aastaid magnetväljade uurimisele. Teda huvitas eriti küsimus, mil viisil mõjutavad vastastikku üksteist magnetid, samuti ka vooluga juhtmed. Rauapuru omapärane asetus magnetväljas viis ta



Joon. 1—3. Paralleelsed vooluga juhtmed kas tõukuvad teineteisest eemale (erineva suunaga voolud, *a*) või tõmbuvad teineteise poole (samasuunalised voolud, *b*).

mõttele, et kõik mõjuavaldused magnetpooluste ja vooluga juhtmete vahel toimuvad neid ümbritsevate magnetväljade kaudu. Teadlane väitis, et neid mõjuavaldusi saab seletada magnetvälja jõujoonte abil, mida ta pidas füüsikaliseks reaalsuseks. Faraday ja tema järglased arvasid, et magnetväljas esinevad maailma eetri elastsed deformatsioonid analoogiliselt sellega, nagu neid tekitavad tõmbe- ja survejõud tahketes kehaes. Nad vaatlesid ühtliku magnetvälja mõju vooluga juhtmele, samuti vooluga juhtmete vastastikust mõju kui magnetväljade liitumise ja jõujoonte tegevuse tagajärge (joon. 1—3).

### Salapärased kiired

Elektrivoolu läbimist hõrendatud gaasidest hakkas esimesena 1835. aastal uurima prantsuse teadlane A. Masson Pariisis ja mõni aasta hiljem ka Faraday Inglismaal. Kuid tähelepanuväärseid tulemusi saavutas alles saksa füüsik ja matemaatik Julius Plücker (1801—1868), kes alustas sellekohaseid uurimisi 1858. a. Tema abiline, osav klaasipuhuja Heinrich Geissler valmistas vastupidavast klaasist suure munakujulise kolvi, mille otstesse joodetud traadid lõppesid kolvis metallplaatidega. Geissler nägi palju vaeva, enne kui leidis sobiva metalli, mis kolvi otstesse joodetuna säilitas soojenemisel vaa-

kuumi ega põhjustanud klaasi pragunemist. Katsed vase ja nikliga ebaõnnestusid. Sobivaks materjaliks elektrodide jaoks osutus lõpuks volfram.

Geissler valmistas teistelegi teadlastele katsekolbe ja neid tunti varsti kõikjal Geissleri torude nime all.

Teades, et ionide korrapärastatud liikumine moodustab vedelikes elektrivoolu, tähtis Plücker kontrollida, kas analoogilised nähtused esinevad ka gaasides (ta eeldas, et kõrgepinge toimel moodustuvad gaasis samuti ioonid).

Tuletagem siinkohal meelde, mis onioon. Teatavasti koosneb iga aatom positiivse elektrilaenguga tuumast ja selle ümber tiirlevatest negatiivse laenguga elektronidest. Aatom tervikuna on elektriliselt neutraalne; aatomis leiduvate elektronide laengute kogusumma on võrdne tuuma positiivse elektrilaenguga. Kui aatomist eemaldada mõni elektron, osutub aatom positiivselt laetuks ja teda nimetatakse positiivseks iooniks. Elektroni liitumisel neutraalse aatomi või molekuliga saadakse negatiivse laenguga osake, mida nimetatakse negatiivseks iooniks.

Nüüd aga pöördugem tagasi Plückeri katsete juurde.

Kui katseseade oli kõigiti korras, ühendas Plücker kolvi keskosas oleva kraaniga suletava torukese õhupumbaga ja pingestas elektrodid. Algul ei olnud voolu läbimist märgata. Siis aga, kui Plückeri abilise hakkas kolvist õhku välja pumpama ja manomeeter näitas ainult 40 mm Hg, tekkis anoodil sinakas helendav sammak, mis ulatus üle poole kolvi pikkuse katoodi suunas. Katoodil ilmus seevastu vaid nõrk valguskuma. Õhu edasisel väljapumpamisel hakkas anoodsammak vähenema ja muutus lõpuks kitsaks helendavaks ribaks. Hiljem kadus helendus hoopis. Katseid korrati mitu korda ja ikka olid tulemused samad.

Ühel järjekordsel katsel märkas Plücker kohe pärast helenduse kadumist — õhu väljapumpamist jätkati — katoodi vastas oleval kolviseinal äkki helerohelist valgust. Seda ei olnud ta varem tähele pannud. Plücker tegi õige oletuse, et katood kiirgab välja erilisi silmale nähtamatuid kiiri, mille toimel klaas hakkab fluorestseerima. Sirgjooneliselt levivad kiired langevad kolvi klaasseinale ja kutsuvad esile selle helendamise. Oma tähelepanekud avaldas Plücker 1859. a. trükis ja need äratasid suurt huvi.

Paljud tollaegsed nimekad teadlased kordasid Plückeri ja Geissleri katseid. Plückeri avastatud kiiri hakati füüsik E. Goldsteini ettepanekul nimetama katoodkiirteks.

Pärast Plückeri surma hakkas Saksamaal katoodkiiri uurima Münsteri ülikooli füüsikaprofessor Johann Wilhelm Hittorf (1824—1914). 1869. a. tegi ta kindlaks, et katoodkiiri võib magneti abil juhtida kõrvale nende esialgsest suunast. Kui ta lähendas kiirtele magneti, kaldus helen-dav laik klaasil märgatavalt kõrvale. Hittorfi valmistas katseteks uusi klaastorusid, asetades nendes katoodkiirte teele mitmesuguse kujuga metallist ja muust läbipaistma-tust materjalist plaadikesi. Katoodkiirte juhtimisel fluo-restseerivale klaaspinnale tekkisid sinna kiirte teel ole-vate plaadikeste varjud. Need katsed tõestasid, et uurita-vad kiired levivad sirgjooneliselt, sõltumata anoodi ase-tusest klaastorus.

1871. a. avastas füüsik Fleetwood Varley, et katoodkiiri kallutab kõrvale ka elektriväli, kusjuures kiired kal-duvad positiivse elektroodi poole. Kiirte selline käitumine näitas, et nad peavad koosnema negatiivse laenguga osa-kestest.

Teadmata midagi Hittorfi töödest, sooritas täiesti ise-seisvalt analoogilisi katseid ka inglise teadlane William Crookes (1832—1919). Oma sellekohastest uurimistest tegi ta 22. augustil 1879. a. teadusliku ettekande. Seda kuupäeva peetaksegi mõnes kirjanduslikus allikas eksli-kult katoodkiirte avastamise päevaks. Crookes tegi kind-laks, et tugevasti hõrendatud gaasiga klaastorus, mis on ühendatud kõrgepingeallikaga, tekib nähtamatu kiirgus. See kiirgus, mis lähtub katoodilt, koosneb sirgjooneliselt ja kiiresti liikuvatest aineosakestest. Seda aineosakeste voolu kallutab kõrvale magnetväli.

Crookes väitis, et kui anda katoodile nõguspeegli kuju, võib selle fookuses sulatada isegi kõrgeid tempe-ratuure taluvaid sulameid. Ta jõudis veendumusele, et katoodkiired kujutavad endast materiaalse osakeste ja nimelt negatiivse laenguga osakeste (mis esinevad igas aatomis) voolu. Need Crookesi väited olid tolle aja kohta niivõrd uued ja julged, et paljud nimekadki teadlased ei võtnud neid algul kuigi tõsiselt.

Katoodkiirte olemust asus selgitama rida teadlasi mitmel maal: Inglismaal Cambridge'i ülikooli professor

Joseph John Thomson, iirimaal George Fitzgerald, Saksa-  
maal Wilhelm Wien, Philipp Lenard jt.

J. J. Thomson määras 1892. a. pöörleva peegli abil kindlaks, et katoodkiirte levimise kiirus on umbes 100 000 km/s. Kiirte kõrvalekaldumise järgi elektri- ja magnetväljas arvutas Wilhelm Wien välja, et kiirguse moodustavate osakeste massi ja laengu vahekord on umbes üks kahe tuhandik samade suuruste vahekorrast ioonil. Näis, et kõik vihjab sellele, et salapärased kiired koosnevad elektronidest. Esimesena väitis seda iiri füüsik George Fitzgerald. J. J. Thomson ei avaldanud kaua oma arvamust katoodkiirte olemuse kohta. Alles 1897. a., pärast hulga katsete sooritamist, mis kinnitasid, et katoodkiired tõesti koosnevad negatiivse elektrilaenguga osakestest — teadlane nimetas neid algul korpuskliteks —, astus Thomson selle seletusega avalikkuse ette. Teda peetaksegi seepärast negatiivse elementaarlaenguga osakese avastajaks.

Mõtte elektri atomistlikust ehitusest väljendasid varem inglise füüsik Johnston Stoney ja ka sakslane H. Helmholtz. 1891. a. nimetas J. Stoney oletatava elementaarlaenguga osakese elektroniks, tegemata vahet, kas laeng on positiivne või negatiivne. Hiljem jäi see nimetus ainult negatiivse elementaarlaenguga osakesele, tõrjudes kõrvale J. J. Thomsoni poolt antud nimetuse — korpuskel.

### **Nii määrati elektroni laeng**

8. veebruaril 1897. a. esines ettekandega Cambridge'i ülikoolis inglise füüsik John Townsend. Ta jutustas, kuidas tal oli õnnestunud katseliselt kindlaks määrata elektroni laeng. Esmajoones olevat ta tekitanud elektriliselt laetud gaasi molekule — ioone, milleks juhtis läbi soolalahuse elektrivoolu. Saadud gaasi ioonid suunas ta niiske õhuga täidetud ruumi, ja kohe tekkis selles märgatav udu — väga väikesed veepiisad kondenseerusid gaasi ionidele. Arvutanud välja ionide arvu ja mõõtnud nende summaarse laengu, võis Townsend määrata kindlaksiooni elektrilaengu. Et kõikidel laetud osakestel, olgu need ioonid, elektronid või prootonid, on elektrilaeng ikka sama, siis õnnestuski Townsendil sel teel kindlaks määrata elektroni laeng.

Townsendi katsed kordas ka J. J. Thomson, saades samasuguse tulemuse.

Huvitudes Townsendi uurimistest, hakkas sama küsimusega tegelema Chicago ülikoolis ameerika füüsik Robert Andrews Millikan. Algul kordas ta Townsendi ja Thomsoni uurimisi. Hiljem, umbes 1911. a., õnnestus tal väga täpselt mõõta elektroni laengut ja massi. Nagu Townsend, nii mõõtis ka Millikan ioniseeritud gaasi molekulide laengut. Kuid elektriseeritud osakeste saamiseks valis ta teise tee. Millikan lähtus asjaolust, et vedeliku pihustamisel omandavad piisad elektrilaengu. Vedelikuna kasutas ta õli ja pihustas seda kahe horisontaalse metallplaadi vahele, mis olid ühendatud galvaanielemendi patareiga. Positiivne metallplaat tõmbas enda poole negatiivse, negatiivne plaat aga positiivse laenguga osakesi.

Reguleerides pinget saavutas Millikan olukorra, et õlitilgakesi jäi kahe plaadi vahele hõljuma. Iga niisuguse tilgakese raskus oli tasakaalustatud elektrilise tõmbejõuga. Läbi mikroskoobi vaatles Millikan tuhandeid hõljuvaid õlitilgakesi ja mõõtis nende laengut. Ta leidis, et mõõdetav laeng oli alati kas teatava kindla suurusega või täisarv korda suurem. See näitas, et on olemas laeng, millest väiksemat looduses ei esine. Millikan väitis, et see elementaarlaeng ongi elektroni laeng.

Samale tulemusele jõudis ka nõukogude teadlane akadeemik A. F. Joffe (1880—1960). Sellekohastel katsetel jälgis ta metallitolmu negatiivselt laetud kübemeid, mis hõljusid kondensaatori elektriväljas ja millele oli suunatud ultraviolettkiirgus. Kiirguse toimel tolmu kübemete laeng vähenes. Nende katsetega tõestas ka Joffe, et elektrilaeng muutub ikka hüppeliselt, alati kas ühe või mitme elektroni laengu võrra.

R. Millikani määratud elektroni laengut täpsustati vaid veidi 1929. a. Selle kohaselt elektroni laeng  $e = 1,602 \cdot 10^{-19}$  kulonit ja mass  $9,1 \cdot 10^{-28}$  g.

Tänapäeval võib elektri iseloomu ja ehituse kohta öelda järgmist. On olemas kahesugust elektrit: positiivset ja negatiivset. Elektriseerimata kehadel esineb mõlemat alati võrdne hulk. Elektri hulka kehal nimetatakse elektrilaenguks. Elektriseerimisel toimub kehade vahel laengute ümberjaotus.

Nagu aine koosneb algosakestest, nii koosneb ka elekter elementaarlaengutest. Negatiivseks elementaarlaenguks on elektroni laeng, positiivseks positroni laeng.

Eespool kõnelesime, et kui aatomist kas või üks elektron eemaldada, osutub ta positiivselt laetuks (positiivne ioon), kuna vähemalt ühe elektroni juurdesaamisel on aatom laetud negatiivselt (negatiivne ioon). Analoogiline nähtus esineb ka kehade elektriseerimisel. Kui laenguta kehas on aatomi positiivsed laengud tasakaalustatud negatiivsetega, siis elektriseerimisel tekib ühel kehal elektronide kuhjumine, s. o. negatiivne laeng, teisel aga saab nende puudujäägi tõttu ülekaalu positiivne laeng. Seega elektrilaengud ei teki ega kao, nad on keha del isenesest olemas; elektriseerimisel toimub vaid nende ümberjaotamine elektriseeriva ja elektriseeritava keha vahel. Põhiline elektriseerimisel ei ole sugugi hõõrumine, vaid see, et kehad puutuksid hästi kokku. Selleks peavad puutepinnad olema võimalikult siledad. Kui puutepinnad on teineteisele küllalt lähedal (vahekaugust hinnatakse umbes aatomi läbimõõdule), siis selle tõttu, et erinevates ainetes on ka elektronide potentsiaalne energia erinev, hakkavad suurema energiaga elektronid liikuma kehale, mille elektronide energia on väiksem. Elektronide ümberpaiknemine kestab kuni energiatega tasakaalustumiseni. Kehade pinnad osutuvad nüüd erinimeliselt laetuks, sest ühel pinnal on elektrone vähem, teisel aga rohkem. Kui seejärel kehad teineteisest eemaldada, siis laengud nendel säilivad.

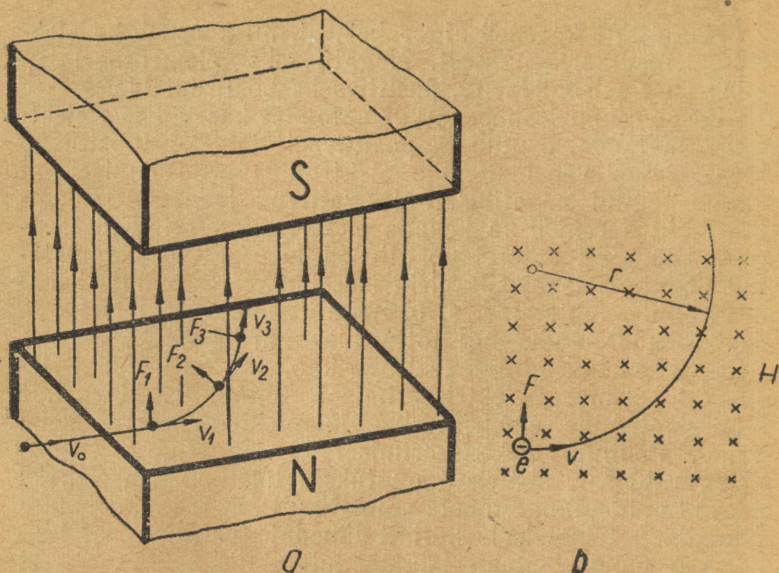
Sellisel viisil saab elektriseerida kehasid, mis ei juhi elektrit, näiteks klaasi, merevaiku, paberit jne.

Hõõrumine on elektriseerimisel vajalik ainult selleks, et suurendada puutepinda, sest mida suurem on puutepind, seda suurem on elektriseerimisel saadav laeng.

### Lorentzi jõud

XX sajandi algul avastas hollandi füüsik Hendrik Antoon Lorentz (1853—1928), üks elektroniteooria loojaid, elektroni liikumise seaduspärasused elektri- ja magnetväljades.

Elektroni sattumisel magnetvälja ilmneb, et viimane püüab muuta elektroni liikumisteed. Seejuures on liiku-



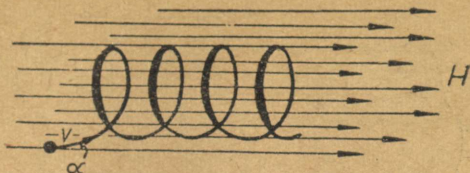
Joon. 1—4. Elektroni sirgjoonelise liikumise muutumine magnetväljas Lorentzi jõu toimetel.

vale elektronile avalduv jõud suunatud risti magnetvälja jõujoontega (joon. 1—4, a). Selle jõu avastanud teadlase auks nimetatakse seda Lorentzi jõuks.

Lorentzi jõud on seda suurem, mida suurem on elektroni liikumise kiirus risti magnetväljaga ja mida suurem on magnetvälja tugevus. Elektroni liikumistee ühtlikus magnetväljas, millesse elektron lendab risti jõujoonte suunaga (joon. 1—4, b), kujuneb ringiks.

Kui elektroni liikumissuund magnetvälja jõudmisel moodustab magnetvälja jõujoonte suunaga teravnurga  $\alpha$ , siis see nurk säilib muutumatuna ka elektroni liikumisel magnetväljas ja liikumistee omandab krivijoone kuju (joon. 1—5).

Vooluta juhtme paigutamisel magnetvälja häkkab selles igale elektronile mõjuma Lorentzi jõud. Et vabu elektrone on metallis suhteliselt palju ja nende liikumine ioonide vahel korrapäratu, siis on kõigi jõudude üldine mõju juhtmele igal hetkel võrdne nulliga ja juhe jääb paigale.

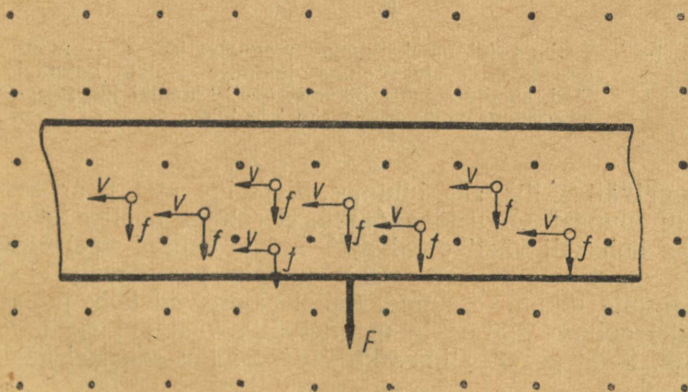


Joon. 1—5. Elektroni liikumistee ühtlikus magnetväljas, kui elektroni liikumise algsuund moodustab jõujoontega teravnurga ( $\alpha$ ).

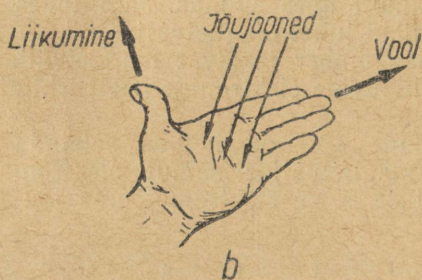
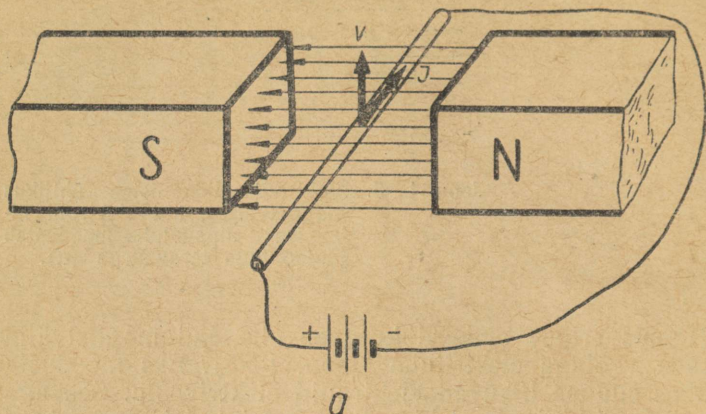
Hoopis erinev olukord kujuneb siis, kui magnetvälja asetada vooluga elektrijuhe (joon. 1—6). Eks moodustaju ühes suunas liikuvad elektronid elektrivoolu. See aga tähendab, et ka igale elektronile rakendatud Lorentzi jõud mõjuvad nüüd samuti ühes suunas. Ja liitudes annavad nad jõu, mis sunnibki juhet magnetväljas liikuma.

Vooluga juhtme ümber tekkivat magnetvälja käsitles Lorentz juhtmes liikuvate elektronide poolt tekitatud magnetväljana.

Lorentzi jõudude abil on hõlpus seletada vooluga juhtme liikumist magnetväljas, samuti elektromagnetilise induktsiooni nähtust, s. o. elektromotoorse jõu tekkimist



Joon. 1—6. Vooluga juhtmele avaldab magnetväljas mõju (jõujooned tungivad esile läbi joonise pinna) jõud ( $F$ ), mis võrdub üksikutele elektronidele mõjuvate jõudude ( $f$ ) summaga.



Joon. 1—7. Vooluga juhtme käitumine magnetväljas. *a* — magnetväljas olevale vooluga juhtmele mõjub Lorentzi jõud, sundides juhet liikuma; *b* — Lorentzi jõu mõju-mise suuna määrab «vasaku käe juhised».

magnetväljas liikuv juhtmes. Eelkõige aga paar sõna voolu suunast. Olgu tähendatud, et rahvusvahelise kokkuleppe kohaselt võeti omal ajal, kui ei tuntud veel elektrone, elektrivoolu positiivseks suunaks positiivsete elektrilaengute liikumise suund. Sellel rajanevad kõik juhised elektrivooluga juhtme ja magnetvälja vastastikuse toime kohta. Seda peame silmas ka Lorentzi jõu edasisel käsitlemisel.

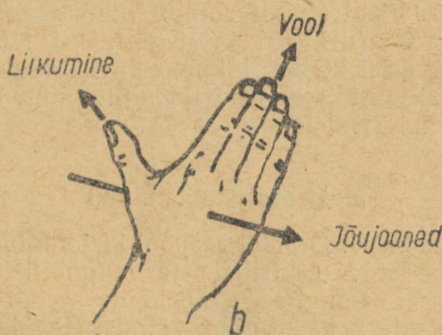
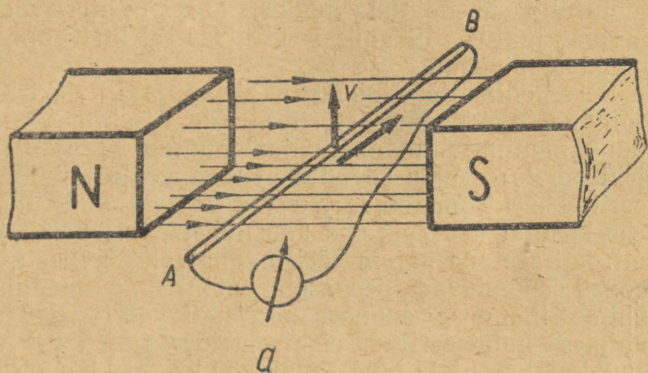
Asetsegu magnetväljas vooluga juhe (joon. 1—7, *a*). Juhtmes liikuvatele elektrilaengutele avalduva Lorentzi jõu mõju-mise suuna määrab nn. «vasaku käe juhised», mis kõlab järgmiselt: kui seada vasak käsi selliselt, et magnet-

välja jõujooned suunduvad peopesale ja väljasirutatud sõrmed näitavad voolu suunda, siis kõrvale hoitud põial osutab Lorentzi jõu mõjumise suunda (joon. 1—7, *b*).

Vastavalt sellele hakkab vooluga juhe joonisel 1—7, *a* liikuma suunas  $v$ , s. o. ülespoole.

Igas elektrimootoris asetseb magnetväljas hulkkooluga juhtmeid. Nendele avalduva Lorentzi jõu toimel hakkabki rootor pöörlema. Võrgust võetav elektrienergia muundub elektrimootoris sel teel mehaaniliseks energiaks.

Vastupidi, kui magnetväljas liigub kinnise vooluringi



Joon. 1—8. Elektromagnetiline induksioon. *a* — magnetväljas liikuvast elektrijuhtmes indutseeritakse elektromotoorne jõud; *b* — indutseeritud elektromotoorse jõu suuna määrab «parema käe juhised».

osa, siis selles indutseerub elektromotoorne jõud. Lorentzi jõu abil saab seda selgitada järgmiselt. Koos juhtmega liiguvad magnetväljas ka juhtmetalli kristallivõre ioonid ja elektronid; laenguga osakestele mõjub magnetväljas Lorentzi jõud, püüdes viia negatiivseid ja positiivseid elektrilaenguid vastupidises suunas. Liikuda saavad juhtmes aga ainult elektronid. Ja nad hakkavadki Lorentzi jõu mõjul liikuma.

Joonisel 1—8 toodud skeemi kohaselt liiguvad elektronid juhtmes punktist *B* punkti *A* poole, kuhjudes juhtmes selles osas, kuna punkti *B* poolses osas tekib elektronide puudujääk. Nii kujunebki juhtmes elektromotoorne jõud. Vooluringi ühendatud tundlik ampermeeter võimaldab jälgida juhtme liikumisel tekkivat elektrivoolu, s. o. induktsoonivoolu.

Sel põhimõttel toimubki tänapäeval elektrienergia tootmine elektrigeneraatorites. Elektrijuhtme liikumise suuna muutmisel magnetväljas muutub ka indutseeritud elektromotoorse jõu ja ühes sellega voolu suund. Indutseeritud elektromotoorse jõu (ka voolu) suuna määramiseks kasutatakse «parema käe juhust», mis kõlab järgmiselt: kui asetada parem käsi magnetvälja selliselt, et jõujooned suunduvad peopesale, põial aga on sirutatud juhtme liikumise suunas, siis näitavad sirged sõrmed juhtmes indutseeritud elektromotoorse jõu (ka voolu) suunda. Lorentzi jõud avaldub ka elektrolüütides ja dielektrikutes. Elektrolüüdi samba liikumisel magnetväljas koonduvad positiivsed ja negatiivsed ioonid samba vastasotstele. Dielektriku liikumisel magnetväljas tekib selles Lorentzi jõu toimel elektrilaengute nihkumine, seega dielektriline polarisatsioon.

### **Elektromagnetiline väli**

Taani füüsiku H. Ørsted'i eespool kirjeldatud avastuses ilmnes otsene side elektriliste ja magnetiliste nähtuste vahel. Varem ei saadud seda täheldada seepärast, et enne galvaanielementide kasutusele võtmist tegelesid teadlased ainult staatilise elektriga ja vastavalt elektrostaatilise väljaga, samuti magneteid ümbritseva muutumatu magnetväljaga. Galvaanielementidest saadava voolu korral oli aga tegemist liikuvate elektrilaengutega. See võimaldaski varsti avastada, et muutuvad elektri- ja mag-

netväljad on lahutamatud, et nad kokku moodustavad elektromagnetilise välja. Faraday avastatud elektromagnetilise induktsiooni nähtuses ilmneb eriti kujukalt elektromagnetilise välja nende kahe eri külje, s. o. elektri- ja magnetvälja omavaheline seos. Kutsub ju ajaliselt muutuv magnetväli esile ka muutuva elektrivälja ja viimase mõjul tekib juhtivas keskkonnas elektrivool. Elektrivooluga aga kaasneb temast lahutamatu magnetväli. Muutuv elektriväli tekib igal pool, kus esineb muutuv magnetväli. Indutseeritud muutuva elektrivälja jõujooned ümbritsevad muutuvat magnetvälja kontsentriliste ringidena.

1846. a. avaldatud artiklis väljendas Faraday mõtet, et elektriliste ja magnetiliste jõudude edasikandumine kujutab endast võnkumisenähtust ja et see võnkumine levib teatava kindla kiirusega. Faraday püstitas hüpoteesi, et keskkond võtab otseselt osa kõigist mõjuavaldustest nii elektriseeritud kehade kui ka vooluga juhtmete vahel, kusjuures keskkond etendab selles füüsikalises protsessis ülekandva lüli osa. Et elektromagnetilised väljad kanduvad edasi ka vaakuumis, siis tekkis Faradayl mõte, et kandvaks keskkonnaks on maailma eeter.

Inglise füüsik James Maxwell (1831—1879) andis Faraday ideele elektromagnetilise välja leviku kohta matemaatilise väljenduse. Oma sellekohases teaduslikus töös «Traktaat elektrist ja magnetismist», mis ilmus 1873. a., väitis Maxwell, et ka igas dielektrikus (samuti vaakuumis) tekib muutuva elektrivälja ümber muutuv magnetväli. Ta eeldas, et dielektrikus esineb elektrinihe ja vastavalt sellele ka nihkevool, mille magnetiline toime on samaväärne laenguga osakeste liikumise, s. o. elektrivoolu toimega.

Kasutades oma teooria väljatöötamisel näitlikke skeeme, kujutas Maxwell nihkevoolu kui maailma eetri osakeste nihkumist nende tasakaaluasendist. Elektrinihe on tegelikult välise elektrivälja toimel dielektriku aatomites ja molekulides esinev positiivsete ja negatiivsete elektrilaengute mõningane tasakaaluasendist nihkumine.

Vahekorda elektrinihke  $D$  ehk elektrivälja tiheduse ja elektrivälja tugevuse  $E$  vahel homogeenses aines iseloomustab dielektriline läbitavus  $\epsilon$ .

$$\epsilon = \frac{D}{E}.$$

Maxwelli hüpotees seisnes seega selles, et magnetvälja ei tekita ainuüksi liikuvad elektrilaengud, s. o. elektrivool, vaid ka ajaliselt muutuv elektrivälja tihedus.

«Traktaadis elektrist ja magnetismist» andis Maxwell järgmiste võrrandite süsteemi, mis määravad kindlaks matemaatilise sõltuvuse elektriliste ja magnetiliste jõudude vahel elektromagnetilises väljas:

$$\operatorname{div} D = 4\pi q;$$

$$\operatorname{div} B = 0;$$

$$\operatorname{rot} H = \frac{4\pi j}{c} + \frac{1}{4\pi} \frac{\partial D}{\partial t};$$

$$\operatorname{rot} E = -\frac{1}{c} \frac{\partial B}{\partial t}.$$

Need võrrandid võimaldavad arvutada kõiki elektromagnetilises väljas toimuvaid protsesse.

Mõnele lugejale valmistab võib-olla meeolehärmi, et koorman teda selliste keeruliste võrranditega, mõni vahest väidab, et ta ei ole matemaatik ega hakka ennast võrranditega vaevama, ja jätab selle lehekülje lihtsalt vahele. Seda ma ei soovitaks. Vaatamata suhteliselt keerukale kujule on võrrandite sisu siiski kergesti mõistetav.

Esimene võrrand konstateerib asjaolu, et elektrilaengutega kaasneb elektrostaatiline väli ja et selle välja jõujooned algavad ja lõpevad laengutel, mis on seega jõujoonte allikateks.

Teine võrrand näitab, et magnetväljas puuduvad jõujoonte allikad, et magnetvälja jõujooned moodustavad kinnisi kõveraid.

Kolmas võrrand kõneleb sellest, et magnetvälja kutsub esile kogu vool, s. o. nii juhtivusvool, mille moodustavad elektrijuhis liikuvad elektronid ja elektrolüüdis laengut kandvad aineosakesed, kui ka dielektrikutes (näiteks õhus) esinev nihkevool. Sellest võrrandist järeldubki, et magnetväli võib tekkida ka seal, kus ei esine ei elektrilaenguid ega magneteid, vaid kus on ajaliselt muutuv elektrinihe, seega nihkevool.

Ka iga lahtist vooluringi võib seepärast käsitleda kinnisena: selle suleb dielektrik, kusjuures elektrijuhis esineb juhtivusvool, dielektrikus aga nihkevool.

Viimane võrrand väljendab induktsiooniseadust. Vastavalt sellele indutseerub pinge igas elektrijuhis, mis lii-

gub magnetväljas või on asetatud muutuvasse magnetvälja. Ent Maxwelli võrrand ütleb veel rohkem. Ta näitab, et magnetvälja ajaline muutumine põhjustab pöörisekujulise elektrivälja tekkimist, mille jõujooned moodustavad suletud kõveraid.

Süsteemi kolmas ja neljas võrrand võimaldasid Maxwellil püstitada hüpoteesi elektromagnetiliste lainete olemasolu kohta, mida põhjustavad muutuv elektri- ja magnetväli. Muutuva magnetvälja ümber tekib ruumis muutuv elektriväli, viimase ümber omakorda muutuv magnetväli jne. Sel teel kujunebki elektromagnetiline võnkumine, mille lained levivad ruumi ühest punktist teise. Elektromagnetilised lained levivad teatava kiirusega, mis sõltub keskkonnast.

Füüsikute W. Weberi ja F. Kohlrauschi tehtud mõõtmised näitasid, et elektromagnetiliste lainete levimise kiirus õhus on väga lähedane valguse kiirusele vaakuumis  $c$ . See andis Maxwellile aluse teooria väljatöötamiseks, mille kohaselt ka valgus kujutab endast teatava pikkusega elektromagnetilisi laineid.

Maxwelli elektromagneti-teooria leidis praktilist kinnitust aastail 1887—1889 silmapaistva saksa füüsiku Heinrich Rudolf Hertzi (1857—1894) ja hiljem ka teiste füüsikute poolt. Suure töö selle teooria edasiarendamiseks tegid vene füüsikud A. G. Stoletov, P. N. Lebedev, A. S. Popov, A. A. Eichenwald jt.

Raadio leiutaja A. S. Popov (1859—1905) kasutas 1895. a. esimesena elektromagnetilisi laineid traadita telegraafi signaalide edasisaatmiseks.

XX sajandi algul lõi maailma eetri teooria kõikuma. Selle abil ei õnnestunud seletada kõiki elektrinähtusi, ka mitte elektromagnetilise välja levikut, kuigi seni eeskujuks olnud mehaanilise võnkumise selgitamiseks oli keskkonna olemasolu ilmtingimata vajalik. Ka kõige täpsemad mõõtmised ei kinnitanud maailma eetri olemasolu. Üha enam teadlasi hakkas loobuma püüdest seletada elektromagnetilisi nähtusi mehaanika abil. Eetriteooria oli määratud kadumisele, kuid Maxwelli võrrandid jäid, sest nad kirjeldasid elektromagnetilisi nähtusi õigesti. Mõjule pääses uus õpetus — elektroniteooria. Selle looja hollandi füüsik H. A. Lorentz kinnitas, et elektromagnetiline väli eksisteerib iseseisvalt ega vaja mingit erilist keskkonda. Vaatamata sellele pooldasid mõned teadlased veel pikemat

aega endisi seisukohti. Nõukogude füüsikutest arendas Faraday ja Maxwelli vaateid edasi akadeemik V. F. Mitkevits (1872—1951). Ta pidas ikkagi maailma eetrit keskonnaks, milles toimuvad kõik elektrilised ja magnetilised nähtused. Ka magnetjõujooni käsitles Mitkevits füüsikalise reaalsusena. Nende abil seletas ta kujukalt paljusid keerulisi elektromagnetilisi nähtusi. Isegi elektroni tekkimist pidas ta kinnise magnetjõujoone ülima kokkutõmbumise tagajärjeks.

1899. a. läbiviidud katsetega tõestas vene füüsik P. N. Lebedev (1866—1912) valgusrõhu olemasolu, s. t. et tahketele kehadele langev valgus avaldab nendele survet. See oli tõendiks, et elektromagnetilisel väljal on mass. Enne seda arvati, et massi puudumise tõttu ei ole elektromagnetilisel väljal ka inertsi.

Järgneva paremaks mõistmiseks meenutagem mõne sõnaga aatomi mudelit. Seda kujutatakse tavaliselt kerana, mille keskel asuva tuuma ümber tiirlevad elektronid. Et elektrone on aatomis tavaliselt palju ja nad tiirlevad erinevatel kaugustel tuumast, siis kujutatakse neid asuvana tuuma ümber eri kihtides. Neid ruumilisi kihte, milles üheaegselt tiirleb teatav arv elektrone, nimetatakse elektronikihtideks. Igas elektronikihis saab olla ainult kindel arv elektrone. Nii ei saa tuumale kõige lähemas elektronikihis olla rohkem kui 2 elektroni, järgmises mitte üle 8 elektroni jne. Iga aine aatomis on erinev arv elektrone ja sellest tingituna ka erinev arv elektronikihte. Et aatomi elektronikihid ei asu tuumast ühesugusel kaugusel, siis pole ka nendes tiirlevate elektronide seos tuumaga ühesugune: tuumast kaugemal asuva elektronikihi elektronid on tuumaga nõrgemini seotud kui lähedal asuva elektronikihi elektronid. Kõige nõrgemini on tuumaga seotud kõige kaugema, nn. välise elektronikihi elektronid. Elektronikihi elektrone iseloomustab nende energiasisaldus. Seepärast öeldakse ka, et elektronid asuvad vastavatel energianivoodel ehk -tasemetel. Elektroni energiasisaldusest sõltub ka tema tiirlemise orbiit. Kui aatomile anda väljastpoolt energiat juurde, siis tema siseenergia suureneb ja aatomi süsteemis toimub välise elektronikihi elektroni üleminek tuumast kaugemal asuvale orbiidile. Mida rohkem energiat antakse aatomile, seda kaugemale orbiidile siirdub elektron. Energia seisukohalt toimub elektroni üleminek madalamalt energiatasemelt kõrgemale,

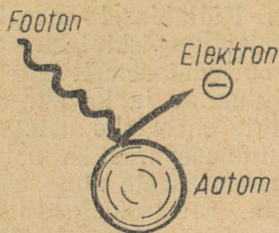
kusjuures see toimub hüppeliselt. Küllaldaselt energia juurdesaamisel võib elektron aatomist hoopiski lahkuda. Elektroni hüppeline üleminek ühelt energiatasemelt teisele on tingitud sellest, et energia neeldumine ja ka kiirgumine toimub ainult teatavate kindlate energiakoguste — kvantide kaupa. Kvantide võrra muutub seepärast ka molekulide, aatomite, ionide ja teiste aineosakeste ning nendest koosnevate süsteemide energia. Elektromagnetilise välja energiakvante nimetatakse footoniteks. Kuigi gammakiirgus kujutab endast vastava sagedusega elektromagnetilist võnkumist, nimetatakse selle energiakvante footonite kõrval ka gammakvantideks.

1933. a. avastati, et elektroni- ja positronipaar muundub kaheks gammakvandiks, s. o. kaheks footoniks, ja veidi hiljem, et footon võib muunduda elektroni- ja positronipaariks. See näitab, et elektromagnetiline väli võib tekkida aineosakeste (antud juhul elektroni ja positroni) kadumisel ja ka ise muunduda aineosakesteks.

Relatiivsusteooria looja saksa füüsik A. Einstein väljendas seost energia ja massi vahel järgmiselt:  $E=mc^2$  ( $E$  — energia,  $m$  — mass ja  $c$  — valguse kiirus vaakuumis). See seos on maksev ka elektromagnetilise välja kohta. Lähtudes sellest käsitlesid mõned füüsikud elektromagnetilist välja ekslikult puhta energiana. Energia ei saa eksisteerida lahus materias, ta on vaid selle omadusi. Materia on aga kõik see, mis meid ümbritseb, kogu elus ja eluta loodus. Materia esineb nii ainena kui ka väljadena. Teda iseloomustab massi ja energia olemasolu, samuti liikumine, mille all mõeldakse ka materia muundumist. Eespool veendusime, et need omadused on ka elektromagnetilisel väljal. Elektromagnetiline väli ongi tegelikult materia liik, tal on mass ja energia, ka liigub ja muutub ta pidevalt.

### **Kui footonid pommifavad ainet**

Katsetades 1887. a. elektromagnetiliste lainete kiirgajaga — vibraatoriga, märkas Bonni ülikooli professor H. Hertz, et elektroodide vahel tekkis säde eriti kergesti, kui nendele suunati kaarlambi valgust. Uurimine selgitas, et oli tegemist täiesti uue nähtusega. Nii, päris juhuslikult, avastaski H. Hertz fotoelektrilise efekti ehk nähtuse, lühendatult fotoefekti: kui metalli pinnale suunata valguskiir-



Joon 1—9. Fotoefekti korral ergastab footon aatomit sedavõrd, et sellest lahkuks elektron.

gust, siis hakkavad metallist eralduma elektronid ja metall osutub positiivselt laetuks.

Fotoefekti saab seletada järgmiselt. Langedes valgusjoana ainele, põrkavad footonid kokku aatomitega ja annavad oma energia nendele. Saadud energia arvel ergastub iga kokkupõrkest osavõtnud aatom sedavõrd, et tema välise elektronikihi elektron on suuteline lahkuma aatomi piirkonnast (joon. 1—9). Seetõttu osutuvad kõik need aatomid positiivselt laetuks. Aatomi ergastamiseks nimetame aatomile energia juurdeandmise protsessi, mille tagajärjel elektron kas siirdub kõrgematele energiatasemetele või lahkuks hoopis aatomist.

Et iga keemilise elemendi aatomi välise elektronikihi elektronid on aatomituumaga erinevalt seotud, siis tuleb ka elektroni vabastamiseks kulutada erineval hulgal energiat. Seepärast peab fotoefekti esilekutsumiseks iga metalli korral kasutama erinevat, ainult sellele metallile kohase sagedusega valguskiirgust. Kui metallile suunata valgus, mille iga footoni energia on metalli aatomist elektroni vabastamiseks vajalikust energiast väiksem, siis ei ole elektronid suutelised metallist lahkuma ja fotoefekti ei esine. Ümberpöörduvalt: fotoefekti põhjustab ka nõrk valguskiirgus, kui vaid seda moodustava elektromagnetilise võnkumise sagedus on küllalt suur.

Lähtudes kvantide teoriast esitas saksa füüsik Albert Einstein 1905. a. järgmise valemi, mis aitab selgitada fotoefekti olemust:  $E_{\text{kin}} = h\nu - (A_1 + A_2)$ , kus  $E_{\text{kin}}$  tähistab ainst lahkuvat elektroni kineetilist energiat,  $\nu$  — elektromagnetilise võnkumise sagedust,  $h\nu$  — footoni energiat,  $A_1$  — elektroni aatomist vabastamiseks vajalikku energiat ja  $A_2$  — elektronile aine pinnakihi läbimiseks vajalikku energiat.  $A_1 + A_2$  nimetatakse ka elektroni väljumistööks.

Et elektron saaks ainst lahkuda, tuleb selle aine aato-

mitte ergastamiseks suunata talle niisugune valguskiirgus, mille footoni energia oleks suurem kui elektroni väljumistöö, s. o.  $h\nu > A_1 + A_2$ . Ainest lahkuvate elektronide kineetilise energia ja vastavalt ka kiirus on seda suurem, mida suurem on aatomite ergastamiseks kasutatud valguskiirguse footonite energia, s. o. mida lühem on vastava elektromagnetilise laine pikkus, või — mis on seesama — mida suurem on elektromagnetilise võnkumise sagedus. Lahkuvate elektronide arvu määrab kiiritatavale ainele langev kvantide arv.

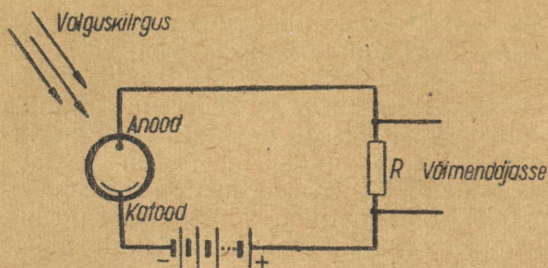
Kui valguskiirguse toimel valgustatava aine aatomid sedavõrd ergastuvad, et nendest lahkuvad elektronid väljuvad ka ainest, siis on tegu välisfotoefektiga. Pärast selle nähtuse avastamist H. Hertzi poolt uuris seda põhjalikult vene füüsik A. G. Stoletov.

Kui aatomist lahkuvad elektronid jäävad ainesse, moodustades selles vabu elektrone, siis on tegemist sisefotoefektiga ehk ainete fotojuhtivusega.

Seadiseid, milles fotoefekti kasutatakse elektriliste nähtuste esilekutsumiseks, nimetatakse tavaliselt fotoelementideks.

Välisfotoefekti korral kujutab elektrone kiirgav aine endast fotoelemendi fotokatoodi. Fotokatoode valmistati algul leelismetallidest (tseesiumist, kaaliumist, naatriumist jt.), millel elektronide väljumistöö on suhteliselt väike. Tänapäeval kasutatakse fotoelementides nagu raadiolampideski keerukaid katoode. Need koosnevad põhiliselt alusmetallist, oksiidikihist ja selle pinnale kantavast väga õhukesest, elektrone kergesti eraldavast metallikihist.

Joonisel 1—10 on toodud välisfotoefektil rajaneva fotoelemendi skeem. Fotoelement kujutab endast kahe elektroodiga raadiolampi, nn. dioodi, millel on suurepinnaline fotokatood. Viimane on tavaliselt kantud otse klaaskolvi sisepinnale. Katoodi vastas asetseb väikesepinnaline anood — peen varras või traatrõngake, mis ei takista valguse pääsemist katoodile. Valguskiirguse toimel eralduvad elektronid fotokatoodilt ja lendavad anoodile. Kujunev vool on võrdeline katoodile langeva valguskiirguse footonite arvuga. Fotoelemendi vooluringi ühendatud takisti  $R$  klemmidel tekkivat pinget kasutatakse tüürimispingena fotoelemendiga ühenduses olevas reguleerimis-, registreerimis- või muus aparatuuris.



Joon. 1—10. Välisfotoefektil põhineva fotoelemendi skeem.

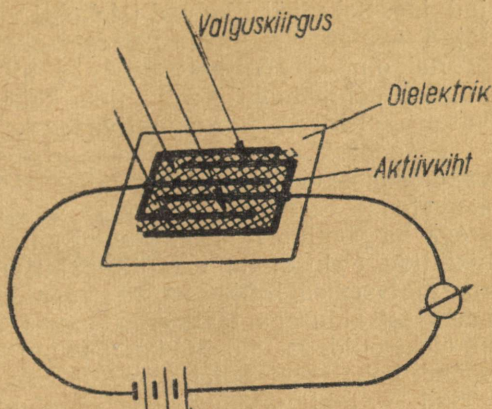
Aineid, mille elektritakistus väheneb kiirgusenergia toimel, s. o. millel esineb sisefotoefekt, nimetatakse fototakistiteks.

Joonisel 1—11 on toodud fototakistiga mõõteriista skeem. Isoleerainest plaadil asuvate elektrodide vahed täidetakse valguskiirguse toimel elektritakistust muutva aktiivainega. Selleks kasutatakse seleeni, talliumsulfiidi, kaadmiumsulfiidi, tinasulfiidi, vismutsulfiidi ja ka tinaseleni. Takistuse muutmiseks tingitud voolumuutuste jälgimiseks on vooluringi ühendatud tundlik galvanomeeter.

Peale välis- ja sisefotoefekti esineb veel nn. ventiilfotoefekt, mis võimaldab ehitada vastavaid pingeallikaid — fotopingeelemente (neid nimetatakse vahel ka ventiilfotoelementideks).

Ventiilfotoefekti käsitletakse mõnikord iseseisva nähtusena, seda nimetatakse fotogalvaaniliseks nähtuseks. Selle avastas 1839. a. prantsuse füüsik A. Becquerel. Ta täheldas seda nähtust metallelektroodi ja vedeliku piiril. Hiljem, 1876. a. konstateerisid inglise füüsikud U. Adams ja R. Day ventiilfotoefekti olemasolu ka tahketes kehaes. Nähtust uuris aastail 1888—1889 üksikasjalikult vene teadlane A. Uljanin. Ent kasutusele võeti see alles käesoleva sajandi kolmekümnendatel aastatel.

Lihtsamini selgitatav ventiilfotoefekt esineb vedelikus. Kui asetada elektrolüüti kaks samast metallist elektroodi ja valgustada üht neist, siis valgusenergia kvandid — footonid, mis puutuvad kokku valgustatava elektroodi aatomitega, ergastavad neid sedavõrd, et osa elektrone



Joon. 1—11. Sisefotoefektil põhineva fototakistiga mõõteriista skeem.

siirdub elektrolüüti. Selle tagajärjel kaob laengute tasakaal ja elektroodide vahel ilmneb potentsiaalivahe.

Enne kui käsitleda tahket fotopingeelementi, mis koosneb pooljuhtidest, peatugem lühidalt aine, eriti pooljuhtide juhtivusel.

Kui elektrivool esineb aines elektronide voona, siis on tegemist aine elektronjuhtivusega, ionide liikumise puhul agaioonjuhtivusega. Pooljuhtide korral esineb ka nn. aukjuhtivus. Selgitame seda paari sõnaga. Kui ergastamise tagajärjel eraldub pooljuhi aatomist elektron, siis jääb viimase koht vabaks ja aatom muutub positiivseks iooniks. Seda elektroni alt vabanenud kohta pooljuhi aatomis nimetatakse auguks, urbeks või tühimikuks, vahel ka defekt-elektroniks. Augu võib kohe täita mõne ergastatud naaberaatomi väliselektron, mille tõttu esimene aatom muutub jälle neutraalseks. Ent nüüd tekib auk selles aatomis, kust elektron tuli. Uue augu võib samal viisil täita mõnest teisest aatomist tulnud elektron jne. Lõpptulemusena saame mulje, et augud ja seega ka tekkinud positiivsed ioonid liiguvad pooljuhis elektrivälja suunas (nagu see ongi omane positiivsetele laengutele). Toimub umbes nii nagu väljamüüdnud teatrisaalis, kui esimeses reas vabaneb mõni koht ja nendele istuvad teatriküllastajad teisest reast, viimaste alt vabanenud kohtadele aga kolmandas reas istu-

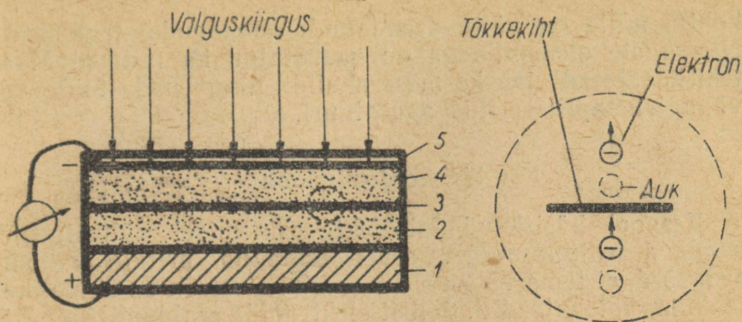
jad jne. Sel viisil liiguvad istekohti vahetavad teatrikülastajad lava suunas, vabanevad istekohad aga vastassuunas.

Asjaolu, et pooljuhis liiguvad nii elektronid kui ka augud, põhjustabki pooljuhtide kahesuguse elektrijuhtivuse — elektron- ja aukjuhtivuse.

Eespool kõnelesime, et energiasalduse seisukohalt vaadeldakse üksiku aatomi välise elektronikihi elektrone asuvatena vastavatel energiatasemetel. Tahkes kehas, seega ka pooljuhis, moodustavad aatomite välise elektronikihtide elektronide energiasalduse poolest lähedased energiatasemed kokku terved võõndid. Kõige väiksema energiasaldusega tasemed annavad nn. põhivõõndi, mis on elektronidega täidetud ka absoluutse nulli juures. Põhivõõndi kohal asub teine, juba suurema energiasaldusega võõnd — juhtivusvõõnd, mis absoluutse nulli juures on tavaliselt vaba. Pooljuhtides asuvad need võõndid teineteisele võrdlemisi lähedal. Seetõttu pääsevad põhivõõndi ülemiste energiatasemete elektronid juba aatomite energia suhteliselt tagasihoidliku suurendamise korral (milleks pooljuhti tarvitseb näiteks ainult soojendada) juhtivusvõõndisse ja pooljuht hakkab elektrit juhtima (joon. 3—3).

Nende teadmistega pöördugem fotopingeelementide juurde tagasi.

Tahke fotopingeelement koosneb kahest pooljuhist, millest ühel on elektron- ja teisel aukjuhtivus. Elemendi oluliseks osaks on tõkkekiht kahe pooljuhi vahel (joon. 1—12). Uhes suunas elektronid ületavad tõkkekihi, teises aga praktiliselt mitte. Potentsiaalivahe tekkimist fotopingeelementis võib lihtsustatud skeemi kohaselt kujutada järgmiselt. Kui pooljuhti, mis koosneb elektron- ja aukjuhtivusega kihist, valgustada elektronjuhtivusega kihi poolt, siis footonid, mis pörkavad kokku selle kihi aatomitega, ergastavad neid; ergastatud aatomi välise elektronikihi elektroni energia on vastavalt suurem, mille tõttu ta siirdub aatomis kõrgemale energiatasemele, põhivõõndist juhtivusvõõndisse. Sel teel tekib elektronjuhtivusega pooljuhis palju vabu elektrone. Niisama palju jääb põhivõõndisse ka elektronide alt vabanenud kohti — auke. Nende täitmiseks liigub sinna elektrone aukjuhtivusega pooljuhist, mille tõttu tekib mulje, et augud hakkavad liikuma elektronjuhtivusega pooljuhist üle tõkkekihi aukjuhtivusega pooljuhti, suurendades selles aukude arvu. Lõpptulemuseks on elektronide kuhjumine elektronjuhtivusega pool-



Joon. 1—12. Fotopingeelement. 1 — metallplaat; 2 — aukjuhtivusega pooljuht; 3 — tõkkekiht; 4 — elektronjuhtivusega pooljuht; 5 — läbipaistev metallist kattekiht.

juhtkihis. Nii tekibki mõlema pooljuhtkihi vahel potentsiaalivahe.

Pinge esineb fotopingeelementis seni, kuni seda valgustatakse. Niipea kui valgustamine katkestada, kaob ka pinge.

Fotopingeelementidel on erinev valgustundlikkus. Näiteks seleen-fotopingeelement on tundlik nähtava valguse suhtes, eriti selle rohelises osas (nagu inimese silmgi), väävel-talliumelement ja väävel-hõbeelement aga ka infrapunase kiirguse suhtes.

Mitte kogu fotopingeelementidele suunatud valgusenergia ei muundu elektrienergiaks, osa sellest läheb soojuseks. Fotopingeelementide kasutegur ja ka elementidest saadav pinge sõltuvad suurel määral elementidest kasutatud pooljuhtidest. Kõige madalama kasuteguriga — umbes 0,1% — on seleenelementid. Väävel-talliumelementide kasutegur on seevastu 1% ümber, kuna viimaseil aastail tarvitusele võetud ränielementidel on see isegi üle 10%. Erinev on ka fotopingeelementidest saadav pinge. Näiteks väävel-kaadmiumelement annab päikesekiirtega valgustamisel pinget üle 2 voldi, väävel-hõbeelement aga kõigest 0,15 volti.

Fotopingeelementid pakuvad häid võimalusi tootmisprotsesside automatiseerimiseks ja telejuhtimiseks, kõnelemata nende kasutamisest signaalsiooniseadmeis ja mujal. Viimasel ajal tarvitusele võetud räni- ja germaaniumelementid avavad uue tee valgusenergia elektriliseks muundamise alal. Eriti tuleb seda märkida ränielementide

kohta, mille on välja arendanud nõukogude teadlased. Niisuguste elementidega on varustatud ka mitmed Maa tehiskaaslased ja kosmoseraketid ning nad toidavad vägagi komplitseeritud aparatuuri.

### Elektroniemissioon

Eespool käsitletud fotoefekti esinemisel väljastpoolt saadava valgusenergia arvel ergastub metalli aatom sedavõrd, et tema välise elektronikihi elektron on suuteline lahkuma fotokatoodilt. Sellist elektronide eraldumist ainest nimetatakse elektroniemissiooniks. Sõltuvalt aatomi ergastamise viisist ja ka selleks kasutatud energia liigist tehakse vahet fotoemissiooni, termoemissiooni, elektrostaatilise emissiooni ja ka sekundaaremissiooni vahel.

Fotoemissiooni puhul eralduvad elektronid kehast valguskiirguse toimetel, mida see keha neelab ja mille arvel tema aatomid ergastuvad. Sisuliselt on see sama mis eespool käsitletud fotoefekt.

Iga foton saab vabastada ainult ühe elektroni, seepärast on fotoemissiooni korral metalli pinnalt eralduvate elektronide hulk võrdeline pinnale langeva valgusvooga. Fotoemissiooni soodustamiseks kasutatakse katoode, mis on kaetud eriti hulgaliselt elektrone kiirgava ehk, nagu seda veel nimetatakse, elektrone emiteeriva metallikihiga. Elektroniemissiooni suurendamiseks täidetakse tehnikas kasutatavad fotoelemendid hõrendatud gaasiga. Sellega saavutatakse, et valguse toimetel katoodist väljunud elektronid ioniseerivad gaasimolekule, mille arvel vool fotoelemendis tugevneb.

Keha kuumutamisel hõõgumiseni ergastuvad aatomid juurdesaadud soojusenergia arvel sedavõrd, et keha pinnalt hakkavad eralduma elektronid. See ongi elektronide termoemissioon. Termoemissioon leiab laialdast kasutamist tehnikas. Sel põhineb mitut liiki raadiolampide töö.

Raadiolambi katoodi kuumutamisel suureneb selle aatome välise elektronikihi elektronide energia soojusenergia arvel ja elektronid liiguvad kõrgematele energiatasemetele. Saades veelgi energiat juurde, lahkuvad elektronid katoodi metallist hoopis. Elektrivälja olemasolu korral liiguvad katoodil eraldunud elektronid välja sunnil eemale, kui aga elektriväli puudub, siis langevad tagasi. Nende asemel lendavad välja uued elektronid, nii et hõõguva katoodi kohal

moodustub omapärane elektronide pilv — negatiivne ruumlaeng. Mida kõrgem on katoodi temperatuur, seda rohkem elektrone lahkub temalt. Elektronide moodustatud elektrivoolu nimetatakse siin emissioonivooluks.

Elektroniemissiooni saab mõjutada katoodi katmise teel vastavate metallikihtidega. Näiteks volframist valmistatud katoodi katmine õhukese tooriumikihiga tõstab temperatuuril 700—1200° C katoodi elektronide emissiooni miljooneid ja miljardeid kordi suuremaks, võrreldes tavalise volframatoodiga. Samu tulemusi annavad ka tseesiumi, baariumi ja mõnede metallihapendite kihid katoodil.

Elektrostaatiline emissioon esineb siis, kui elektronid eralduvad metallist elektrivälja toimet. Selleks peab elektrivälja tugevus olema väga suur, arvutuste kohaselt kuni miljon volti sentimeetrile. Katsed näitavad, et mõningatel tingimustel esineb elektrostaatiline emissioon ka väiksema väljatugevuse korral, mis on seletatav elektroni laineomadustega.<sup>1</sup>

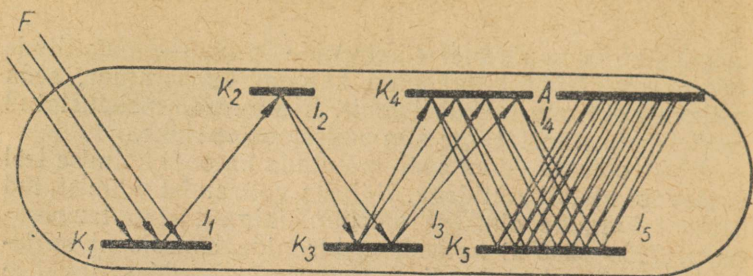
Kui metalli pinnale vaakumis langeb elektronide voog, siis osa elektrone neeldub, osa aga peegeldub tagasi. Kui elektronide kiirus on seejuures küllalt suur, siis löövad nad vastu metalli pinda põrgates sellest välja osa elektrone, mis koos tagasipeegeldunud elektronidega moodustavad suurema elektronide voo, kui oli see, mis langes esialgselt metalli pinnale. See nähtus kujutab endast elektronide sekundaaremmissiooni. Viimast kohtame ka pooljuhtidel ja dielektrikutel.

On tehtud kindlaks, et metallidel esineb elektronide sekundaaremmissiooni maksimum siis, kui elektronide kiirus metalli pommitamisel moodustab umbes neli sajandikku valguse kiirusest, s. o. umbes 12 000 km/s.

Elektronide sekundaaremmissiooni iseloomustab nn. sekundaaremmissioonitegur  $\delta$ , mis näitab peegeldunud ja pinnalt eraldunud elektronide suhet pinnale langenud elektronidega.

Enamikul metallidel on sekundaaremmissioonitegur umbes 1,4, mõnedel pooljuhtidel ja dielektrikutel aga suurem, näiteks talliumilisandiga germaaniumil kuni 1,7, klaasil ja vilgukivil kuni 3, leelismetallide ühenditel (LiF, NaCl, KCl, NaJ jt.) kuni 6. Gaasisisaldus metallis

<sup>1</sup> Prantsuse füüsiku Louis Victor de Broglie teooria kohaselt avalduvad igal liikuval elementaarosakesel, seega ka elektronil, laineomadused.



Joon. 1—13. Fotokordistaja skeem.  $F$  — valgusvoog;  $K_1 \dots K_5$  — fotokatoodid;  $A$  — anood;  $I_5 > I_4 > I_3 > I_2 > I_1$ .

tõstab sekundaaremissiooni, sekundaaremissiooniteguri maksimaalne väärtus tõuseb sel korral kuni 3-ni.

Eriti suur elektronide sekundaaremissioon esineb fotoelementides kasutataval tseesiumoksiid- jt. katoodidel. Nende sekundaaremissioonitegur on kuni 10.

Mõningate pooljuhtide õhukesed kihid metallidel annavad erakordselt suure elektronide sekundaaremissiooni, teguri väärtus küünib nendel mitme tuhandeni. Seda nähtust saab seletada järgmiselt. Esialgse sekundaaremissiooni tõttu omandab pooljuhi välispind positiivse laengu, kusjuures potentsiaal kihi all oleva metalli suhtes on paarikümmend volti. Et pooljuhi kihi paksus on väga väike (vaid umbes  $10^{-5}$  cm), siis osutub elektrivälja tugevus selles väga suureks, kuni mõni miljon volti sentimeetritele. See on küllaldane, et kutsuda metallis esile elektronide elektrostaatilist emissiooni. Selle tagajärjel kujunebki väga suur sekundaaremissioonitegur.

Elektronide sekundaaremissiooni kasutatakse fotokordistajas, mille abil võimendatakse väga nõrka voolu.

Fotokordistaja loodi nõukogude teadlase L. A. Kubetski poolt 1934. a. Selle skeem on toodud joonisel 1—13. Õhutihjas klaaskolvis on rida plaadikujulisi elektroode-fotokatoodide. Valgusvoog  $F$  vabastab esimesest fotokatoodist  $K_1$  fotovoolu  $I_1$ , mis kulgeb teisele elektroodile  $K_2$ . Primaarvoolu  $I_1$  iga elektron, põrgates vastu elektroodi  $K_2$ , vabastab sellest mitu sekundaarelektroni ning tekitab voolu  $I_2$ . Viimane suundub järgmisele elektroodile  $K_3$ . Sellest vabastatakse sekundaarelektronide vool  $I_3$ , mis suundub elektroodile  $K_4$  jne. Anoodile  $A$  kulgeb vool  $I_5$ , mis on väga palju kordi suurem esialgsest fotovoolust  $I_1$ .

Tahkete kehade, vedelike ja gaaside elektriseerumine, samuti elektriseerumisega väliselt küllaltki analoogiline dielektriline polarisatsioon põhjustab mitmesuguseid tehnikas rakendatavaid füüsikalisi nähtusi. Peatumegi nendel allpool.

### Berliini professori avastus

XIX sajandi esimesel veerandil koondus paljude teadlaste tähelepanu Ørsted, Arago, Ampère'i ja Faraday avastustele ja tähelepanekutele, mis andsid teadusele palju uut. Neid analüüsiti, korrati kuulsate teadlaste katseid, vahetati mõtteid ja vahel ka vaieldi püstitatud hüpoteeside üle. Kõne all olid peamiselt juhtmete ümber tekivad magnetväljad ja nendevahelised mõjuavaldused.

Berliini ülikoolis töötas sel ajal Tallinnast pärinev saksa füüsik Thomas Johann Seebeck (1770—1831). 1821. a. tegi ta järgmise omapärase tähelepaneku: kui kahest erinevast metallist koostatud vooluringi ühte liitekohta kuumutati gaasileegis, siis näitas teise liitekohta vahele ühendatud tundlik galvanomeeter elektrivoolu olemasolu, olgugi et vooluringis ei olnud mingit vooluallikat. See oli küllaltki kummaline. Millest tekkis vool? Ainus reaalne võimalus, mis võis kõne alla tulla, oli see, et elektrivoolu saadi gaasileegi soojusenergia arvel. Et juhtmete ümber tekkis ka magnetväli, siis see arvatavasti andiski Seebeckile mõtte nimetada nähtus termomagnetismiks. Alles umbes 35 aastat hiljem andis inglise füüsik W. Thomson saksa professori avastusele ta õige nime — termoelektriline nähtus. Sisuliselt on siin tegemist kehade

elektriseerumisega. Juba 1797. a. avastas Volta, et kahe eri metalli kokkupuutumisel tekib nende vahel potentsiaalivahe, mida nimetatakse kontaktpotentsiaalivaheks ehk kontaktpingeks. Volta koostas tol ajal tuntud metallidest rea, milles iga eelnev järgmisega kokkupuutumisel elektriseerub positiivselt.

Kontaktpinge tekib ka metalli ja pooljuhi, samuti kahe erineva pooljuhi vahel.

Pinge tekkimise põhjuseks peetakse vabade elektronide erinevat energiat ja kontsentratsiooni eri metallides ja pooljuhtides. See tingib elektronide vahetuse kahe kokkupuutuva metalli või metalli ja pooljuhi või ka kahe pooljuhi vahel.

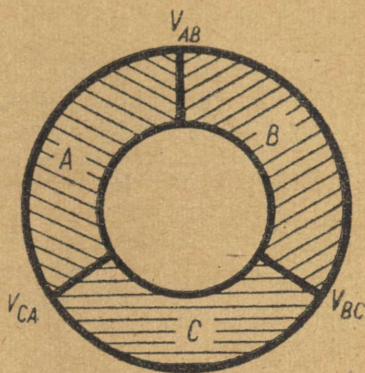
Puutugu näiteks kokku kaks erinevat metalli  $A$  ja  $B$ . Kui metallist  $A$  lahkub rohkem elektrone, kui neid tuleb asemele metallist  $B$ , siis tekib metallis  $A$  puutekoha piirkonnas elektronide puudus. Ja et aatomite positiivne laeng jääb seetõttu tasakaalustamata, siis osutubki metall  $A$  positiivselt laetuks. Samal ajal omandab metall  $B$  negatiivse laengu, sest tal on tekkinud puutekoha piirkonnas elektronide kuhjumine. Kujunenud potentsiaalivahe moodustabki metallipaari kontaktpinge, mis on üldiselt väike; see sõltub peamiselt elektronide energiast, sest üksikute metallide elektronide kontsentratsiooni erinevus ei ole kuigi suur. Kontakti väljakujunemise järel toimub elektronide vahetus kokkupuutuvate metallide vahel juba ühtlaselt: esimesest metallist läheb teise niisama palju elektrone, kui palju neid tuleb teisest esimesse. Seetõttu jääb kujunenud pinge ka püsima.

Volta, kellest meil oli eespool juttu, määras juba XVIII sajandi lõpul kindlaks, et ainult metallidest (olguigi erinevatest metallidest) koostatud vooluringis on kõikide potentsiaalivahede algebraline summa võrdne nulliga. See nn. Volta seadus lähtub asjaolust, et eri metallide puutekohad asuvad kõik ühesuguse temperatuuriga keskkonnas.

Kui vooluring koostada mitmest, näiteks kolmest eri metallist  $A$ ,  $B$  ja  $C$ , siis on vooluringis ka kolm puutekohta, mida tavaliselt nimetatakse liitekohtadeks, ja vastavalt sellele tekib kolm potentsiaalivahet:  $V_{AB}$ ,  $V_{BC}$  ja  $V_{CA}$  (joon. 2—1).

Kui vooluring avada näiteks metallide  $A$  ja  $C$  liitekohal, siis potentsiaalivahe vooluringi avatud otste vahel  $V_{AC} = V_{AB} + V_{BC} = (V_B - V_A) + (V_C - V_B) = V_C - V_A$ . See tä-

Joon. 2—1. Kui mitmest eri metallist koostatud vooluringi liitekohad asuvad ühesuguse temperatuuriga keskkonnas, siis vooluringis elektromotoorset jõudu ei teki.



hendab, et tekkiv pinge sõltub ainult vooluringi ots-  
tel olevatest metallidest (*A* ja *C*), mitte aga vahepeal-  
setest (*B*). Kui vooluringi liitekohad on sama tempera-  
tuuriga keskkonnas, siis vastavalt Volta seadusele ei teki  
selles vooluringis elektromotoorset jõudu. Üksikud potent-  
siaalivahed on siis võrdsed ja nende algebraline summa  
annab nulli. Toodud näite korral  $E = V_{AB} + V_{BC} + V_{CA} =$   
 $= (V_B - V_A) + (V_C - V_B) + (V_A - V_C) = 0$ .

Kui aga kõik liitekohad ei asu ühesuguse tempera-  
tuuriga keskkonnas, näiteks kui üht liitekohta kuumu-  
tada, siis nimetatud Volta seadus enam ei kehti. Sel kor-  
ral ei võrdu termoelektromotoorne jõud enam nulliga,  
mistõttu vooluringi ilmub elektrivool. See kujutabki  
endast termoelektrilist nähtust, mida mõnikord nimeta-  
takse ka Seebecki nähtuseks.

Termoelektrilise nähtuse puhul muundub soojusener-  
gia vahetult elektrienergiaks. Tehniliseks otstarbeks  
kasutatavat kahest eri metallist koostatud vooluringi  
nimetatakse termoelemendiks, ka termopaariks (viimane  
on tavaliselt temperatuuri mõõtmiseks kohandatud termoe-  
lement). Termoelemendi termoelektromotoorne jõud on  
seda suurem, mida suurem on temperatuurivahe ter-  
mopaari liitekohtade vahel. Ühe kraadi kohta on  
termoelektromotoorne jõud ainult mõnikümmend mikro-  
volti.

Võrreldes termoelemendist saadava energia hulka  
selle energiaga, mis kulutatakse termoelemendi liitekohta  
kuumutamisel, selgub, et seadise kasutegur ei ole kuigi

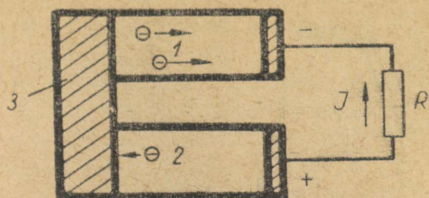
suur, metalltermoelemendil ainult mõni kümnendik protsenti.

Temperatuuri mõõtmisel hoitakse termoelemendi üht liitekohta (nn. külma liitekohta) teatava püsiva madala temperatuuriga keskkonnas (näiteks asetatakse sulava jääga täidetud termos pudelisse), teine liitekoht (nn. kuum liitekoht) aga paigutatakse keskkonda, mille temperatuuri soovitakse mõõta. Termoelemendi vooluringis ilmneva elektromotoorse jõu järgi, mida mõõdetakse vastava galvanomeetri või tundliku voltmeetriga, saadakse ettekujutus mõõdetavast temperatuurist. Selleks tuleb aga eelnevalt määrata antud termopaari elektromotoorse jõu sõltuvus termoelemendi liitekohtade temperatuuri vahest.

Termopaaridena kasutatakse peamiselt metallidest koostatud termoelemente.

Termoelemente saab valmistada ka pooljuhtidest. Need annavad suurema elektromotoorse jõu, mida ei hinnata enam mõnekümnele mikrovoldile, nagu see on tavaline metalltermopaaride puhul, vaid juba tuhandele ja enamale mikrovoldile liitekohtade temperatuuri vahe ühe kraadi kohta. Näiteks pooljuhtidest  $\text{Cu}_2\text{O}$  ja  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  termoelemendi termoelektromotoorne jõud on 120 millivolti, kui temperatuurivahe on  $100^\circ\text{C}$ .

Pooljuhtidest termoelemendi kasutegur on suurem, küünib 7—8%-ni. Kui koostada termoelement pooljuhist ja metallist, siis mõne niisuguse termoelemendi kuumas liitekohas on vool suunatud metallist pooljuhi poole, mõnes aga vastupidi, pooljuhist metalli poole. Seda saab seletada järgmiselt. Pooljuhtides kasvab vabade elektronide kineetiline energia võrdeliselt absoluutse temperatuuriga. Kui näiteks elektronjuhtivusega pooljuhti kuumutada ühest otsast, siis elektronide kineetiline energia kuumutatavas piirkonnas suureneb ja elektronid hakkavad kohe liikuma külma otsa poole. Seetõttu tekib pooljuhi külmal otsal negatiivne laeng, kuumal otsal aga positiivne. Aukjuhtivusega pooljuhi kuumutatav ots omandab seevastu negatiivse laengu, külmal otsal aga positiivse. Kui pooljuhtidest koostada termoelement selliselt, et kuumade liitekohtade kuumendamisel elektronid liiguksid mõlemas harus ühes suunas, siis saame suurema termoelektromotoorse jõuga termoelemendi. Niisuguse termoelemendi jaoks võetakse elektron- ja aukjuhtivusega pooljuhid, mis ühendatakse omavahel metallist vahetükiga. Kui nüüd



Joon. 2—2. Pooljuhtidest koosnev termoelement. 1 — elektronjuhtivusega pooljuht; 2 — aukjuhtivusega pooljuht; 3 — metallist ühendustükk.

vooluring sulgeda (näiteks takisti  $R$  abil) ja metallist vahetükki kuumendada, siis liiguvad elektronid mõlemas pooljuhis ühes suunas (joon. 2—2).

Kõrgema pinge saamiseks ühendatakse järjestikku terve sari termoelemente. Paralleelselt ühendamise korral saadakse tugevam vool. Nii moodustatakse termoelementidest termogeneraatorid.

Pooljuht-termogeneraatorid arendas välja silmapais-  
tevä nōukogude teadlane akadeemik A. F. Joffe. Juba 1929. a. esitas ta selle kohta täieliku teooria.

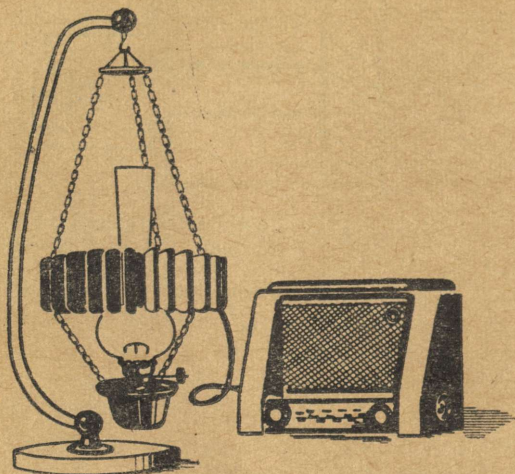
Esimesed termogeneraatorid täitsid küllaltki praktilist ülesannet — toitsid radioaparaate rajoonides, kus puudus elektrivõrk ja ka võimalus akude laadimiseks. Ribidega varustatud rõngakujulises keres olid järjestikku ühendatud termoelemendid paigutatud radiaalselt, kuumad liitekohad sissepoole, külmad väljapoole. Aetatuna petrooleumilambi klaasile, muundasid need seadised leegi soojusenergia elektriliseks (joon. 2—3).

Kui suureks võiks kujuneda termogeneraatori kasutegur?

Kui ei esineks mingit kadu, siis teoreetiliselt võimalik maksimaalne kasutegur (nn. termodünaamiline kasutegur) võiks olla:

$$\eta_{\max} = \frac{T_1 - T_0}{T_1}, \text{ kus } T_1 \text{ — kuumade liitekohta absoluutne temperatuur } ^\circ\text{K};$$

$$T_0 \text{ — külma liitekohta absoluutne temperatuur } ^\circ\text{K}.$$



Joon. 2—3. Üks esimesi termogeneraatoreid.

Eespool nimetatud termogeneraatorite kuumade liitekohtade temperatuur on keskmiselt 300—350 °C, külmade liitekohtade temperatuur aga umbkaudu 60 °C.

Vastavalt sellele võiks termogeneraatorite maksimaalne kasutegur olla (kui  $T_1 = 350 + 273 = 623$  °K ja  $T_2 = 60 + 273 = 333$  °K):

$$\eta_{\max} = \frac{623 - 333}{623} = 0,465, \text{ s. o. } 46,5\%.$$

Ent tegelikult on see kadude tõttu palju väiksem, kõigest 8—10%. Millest siis nii suur kadu?

Et säilitada liitekohtade temperatuuri vahet, tuleb kuumadele liitekohtadele juhtida pidevalt soojusenergiat. Tunduv osa juurdeantavast soojusest kandub mõlema haru soojusjuhtivuse tõttu termoelementide külmadele liitekohtadele. Osa termogeneraatori elektrienergiat kulub samuti termoelementide mõlema haru kasutuks soojendamiseks. Temperatuurivahe vähenemine põhjustabki kasuteguri vähenemist. Temperatuuride ühtlustumine termogeneraatori kuumade ja külmade liitekohtade vahel toimub üheaegselt nii elektronide kui ka kristallivõre sõlmedes asuvate ionide vahendusel. Kuumal liitekohal

omandavad elektronid suurema kineetilise energia ja siirduvad külma liitekohaga poole, andes siin energiat kristallivõre sõlmedes asuvatele ioonidele, mistõttu ioonide soojusliikumine intensiivistub ning ühes sellega tõuseb ka külma liitekohaga temperatuur. Termoelemendi teise haru külmal liitekohal asuvad väiksema kineetilise energiaga elektronid, mis liiguvad kuumaga liitekohaga poole, saavad seal ioonidelt energiat juurde, millega nõrgendavad ioonide soojusliikumist ja alandavad seal temperatuuri.

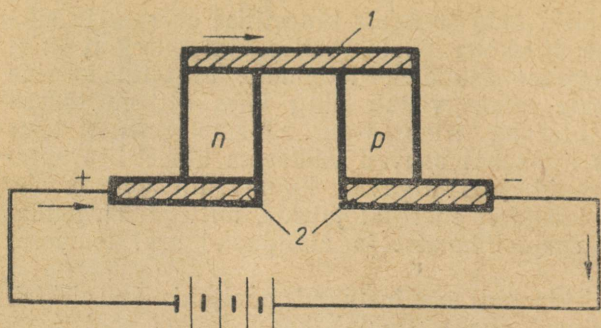
Samad elektronid moodustavad pooljuhis ka elektrivoolu, elektrivool aga põhjustab kadu Joule'i soojusena.

Et termoelementides esinev kadu oleks minimaalne, peab pooljuhi elektrierijuhtivus olema võimalikult suur, soojuserijuhtivus aga väike.

### Termoelektriline külmutus

Termoelektrilise külmutuse avastas 1834. a. prantsuse füüsik Jean Peltier. See nn. Peltier' nähtus on sisuliselt eespool kirjeldatud termoelektrilise nähtuse vastand ja seisneb järgmises: kui termoelemendist juhtida läbi alalisvoolu, siis üks liitekoht jaheneb, teine aga soojeneb. Termoelemendi liitekohaga jahenemist saabki ära kasutada jahutusseadmetes. Kui voolu suund on vastupidine termoelemendi soojendamisel selles tekkivale voolule, siis välise vooluallika vool hakkab soojendama termoelemendi kuumaga liitekohta ja jahutama külma. See tähendab, et külmas liitekohas neeldub teatav hulk ümbruskonnast võetavat soojust. Vaatamata sellele, et Peltier' nähtuse avastamisest on möödunud 130 aastat, on see praktilist kasutamist leidnud alles viimasel aastakümnel. Põhjuseks, miks seda ei tehtud varem, on asjaolu, et termoelemendi liitekohaga jahutamine oli väga väike. Alles pärast seda, kui akadeemik Joffe ja tema kaastöötajate mitmeaastase töö tulemusena arendati Nõukogude Liidus välja väga tugeva jahutustoimega termoelemendid, sai tekkida uus tehnika-haru — termoelektriline külmutus.

Termoelementides võeti kasutusele niisuguseid pooljuhtmaterjale, nagu  $\text{CoSb}_3$ ,  $\text{ZnSb}$ ,  $\text{PbS}$ ,  $\text{PbTe}$ ,  $\text{Bi}_2\text{Te}_3$ ,  $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ ,  $\text{Sb}_2\text{Te}_3$  jt. Eriti sobivateks osutusid tahked lahused  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{Bi}_2\text{Se}_3$  ja  $\text{Bi}_2\text{Te}_3 + \text{SbTe}_3$ , neist esimene termoelemendi negatiivse ja teine positiivse haru jaoks.



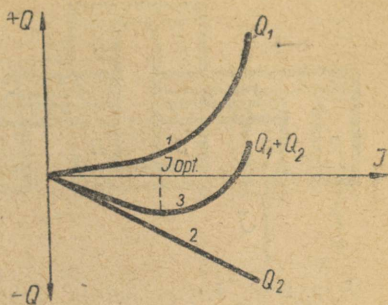
Joon. 2—4. Termoelektrilise jahutusseadme üksikelement.  $n$  — elektronjuhtivusega pooljuht;  $p$  — aukjuhtivusega pooljuht; 1 — jahutav liitekoht; 2 — soojenevad liitekohad.

Termoelektrilised jahutus- ja külmutusseadmed koostatakse üksikutest pooljuht-termoelementidest; iga termoelement koosneb kahest järjestikku ühendatud harust, mille moodustavad elektron- ( $n$ ) ja aukjuhtivusega ( $p$ ) pooljuhid (joon. 2—4).

Kui termoelementi läbib alalisvool joonisel 2—4 näidatud suunas, siis tekib liitekohtade 1 ja 2 vahel temperatuurivahe, kusjuures liitekohal 1 soojus neeldub (mille tõttu liitekohala temperatuur alaneb), liitekohal 2 aga soojus eraldub. Kui liitekohal 2 eralduv soojus juhtida kõrvale (näiteks jahutades liitekohta õhu või veega), siis liitekohala 1 temperatuur langeb veelgi. Olulist mõju termoelementi tööle avaldab harudes eralduv Joule'i soojus, mis on võrdeline voolu tugevuse ruuduga ( $Q_J = I^2 R t$ ), kuna külmal liitekohal neelduv soojus on võrdeline voolu tugevusega esimeses astmes ( $-Q_p = P I t$ ).

Arvutused näitavad, et umbes pool Joule'i soojust kandub külmale liitekohale, mis muidugi vähendab termoelementi jahutavat toimet. Öeldut iseloomustab joonis 2—5, millel kõver 1 tähistab külmale liitekohale kanduva Joule'i soojuse sõltuvust termoelementi läbivast voolust  $I$ , sirge 2 — külmal liitekohal neelduva soojuse sõltuvust voolust  $I$  ja kõver 3 iseloomustab termoelementi voolust sõltuvat soojusbilanssi. See kõver saadakse eelmiste liitmise teel. Kõvera 3 miinimum määrab optimaalse voolu  $I_{opt}$ , mis tagab termoelementi külmas liitekohas maksi-

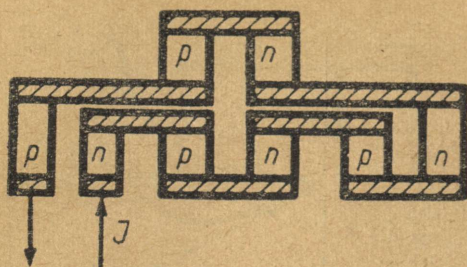
Joon. 2—5. Termoelemendi külmale liitekohale kanduva ( $Q_1$ ) ja liitekohal neelduva soojuse ( $Q_2$ ) sõltuvus termoelementi läbivast voolust  $I$ .



maalse jahutustoime. Voolu  $I$  ülemäärasel tugevdamisel saabub olukord, mil termoelemendi külm liitekoht enam ei neela soojust (kõvera 3 lõikepunkt teljega), vaid hakkab edaspidi hoopis soojust eraldama.

Eespool kõnelesime, et termoelemendi kuumalt liitekohalt soojuse ärajuhtimisega, s. o. selle liitekohta jahutamise saavutatakse külma liitekohta temperatuuri edasine langus. Termoelektrilistes jahutusseadmetes varustataksegi seepärast termoelementide kuumad liitekohad vastavate jahutusradiaatoritega. Sel eesmärgil kasutatakse mõnikord ka termoelementide kaskaadsüsteemi, s. o. mitmeastmelist asetust termopatareides. Näiteks kolmeastmelises süsteemis toetuvad kolmanda astme termoelementide kuumad liitekohad teise astme külmadele liitekohtadele, kuna teise astme termoelementide kuumad liitekohad toetuvad esimese astme külmadele liitekohtadele. Seejuures on viimased õhukese isoleerkihiga üksteisest eraldatud. Niisuguse paigutuse korral jahutab esimese astme termoelemendi külm liitekoht teise astme termoelemendi kuuma liitekohta, kuna teise astme külm liitekoht jahutab kolmanda astme kuuma liitekohta. Suuremat astmete arvu praktiliselt ei kasutata, see ei ole ka otstarbekas, sest iga järgmise astme «külmatootlikkus» väheneb. Isegi kolmanda astme termoelementide «külmatootlikkus» on niivõrd väike, et selle ära kasutamine osutub mõnikord küsitavaks, eriti kui pidada silmas ka konstruktiivseid raskusi, mis esinevad mitmeastmeliste termopatareide kujundamisel.

Arvestades aga mitmeastmeliste süsteemide eeliseid, kasutatakse seadistes, mille termoelementide soojuskoor-



Joon. 2—6. Järjestiktoitega kaheastmeline termopatarei.

mus ei ole suur, peaaegu eranditult kaheastmelist süsteemi.

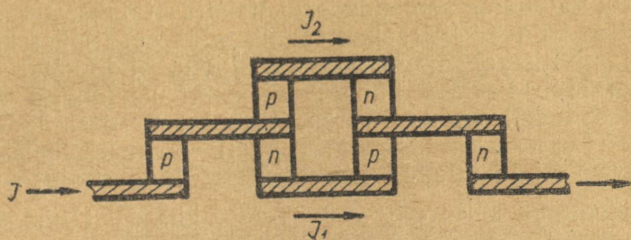
Jahutus- või külmutusseadme termoelementide arv ulatub mõnikord mitmesajani. Kõik nad ühendatakse tavaliselt järjestikku (joon. 2—6).

Väiksema soojuskoormuse korral kasutatakse mõnes termopatareis ka paralleelühendust (joon. 2—7).

Akadeemik Joffe ja tema kaastöötajad saavutasid kolmeastmelise termoelementide süsteemiga (esimeses astmes oli 72, teises 18 ja kolmandas 4 termoelementi) jahutustemperatuuri kuni  $-47^{\circ}\text{C}$ .

Termoelektrilised jahutus- ja külmutusseadmed leiavad tänapäeval kasutamist paljudel aladel, nagu tuumafüüsikas, põllumajanduses, astronoomias, arheoloogias, elektroonikas, arstiteaduses ja mitmes teiseski teaduse ja tehnika valdkonnas.

Tuumafüüsikas kasutatavates seadmetes on sageli nõutav sügav vaakuum. Tavalised kõrgvaakuümõlipumpad võimaldavad saada õhuhõrendust  $2-5 \cdot 10^{-6}$  mm Hg. Rõhu edasine vähenemine saavutatakse õliaurude täiendava kondenseerimisega pumba torustikes. Selleks kasutatakse vastavaid jahuteid, mis paigutatakse kõrgvaakuümõlipumba ja seadise vahele, millest õhku välja pumbatakse. Veega jahutamise korral võimaldab õliaurude kondenseerimine õhuhõrendust  $1 \cdot 10^{-6}-8 \cdot 10^{-7}$  mm Hg. Veelgi sügavama vaakuumi saamiseks kasutati varem jahutusvahendina vedelat lämmastikku. Tänapäeval on otstarbekamad vastavad termoelektrilised jahutid. Kodumaine tööstus valmistab neid kõrgvaakuümõlipumpade (nn. difusioonpumpade) jaoks juba seeriaviisiliselt.



Joon. 2—7. Paralleeltoitega kaheastmeline termopatarei.

Termoelektrilised jahutid koosnevad põhiliselt kaheastmelistest termopatareidest. Mõlema astme külmade liitekohtadega ühendatud jahutuspindele kondenseeruvadki õliaurud. Termoelementide kuumi liitekohti jahutatakse veega. Nendes jahutites saavutatakse küllaltki madal temperatuur: esimese astme jahutuspindele keskmiselt  $-20^{\circ}\text{C}$ , teise astme jahutuspindele  $-50^{\circ}\text{C}$  (kui kuumade liitekohtade jahutamiseks kasutatava vee temperatuur on  $18^{\circ}\text{C}$ ).

Põllumajanduses on termoelektrilised jahutusseadmed eriti sobivad piima jahutamiseks. Esimene vastav kodumaine jahuti loodi Agrofüüsika Instituudis. Nüüd on käsil sobivaima konstruktsiooniga piimajahuti väljaarendamine.

Mikroorganismide käitumist mitmesuguse temperatuuriga keskkonnas uuritakse erilistel mikrokoobilauakestel. Sisseehitatud termopatarei võimaldab uuritava objekti ümber tekitada soovikohast temperatuuri. Ühe sellise lauakese neljast termoelemendist koosnev termopatarei võimaldab reguleerida temperatuuri  $-7^{\circ}\text{C}$  kuni  $+60^{\circ}\text{C}$ .

Termopatareid kuuluvad ka mitmesuguste teiste reguleeritava temperatuuriga laboratoorsete seadiste (mikrokülmutuskapid ja -termostaadid) konstruktsiooni.

Termoelemente kasutatakse paljudes arstiriistades. Esijoones võiks nimetada näiteks nahahaiguste ravimisel tarvitataavaid pisijahutiteid, samuti mitmesuguste histoloogiliste ja patoloogilis-anatoomiliste uurimiste jaoks preparaate valmistamisel vajalikke külmutusseadiseid.

Termoelektrilised jahutus- ja külmutusseadmed leiavad kasutamist kõikjal, kus on vaja muuta keskkonna temperatuuri.

On märkimisväärne, et termoelementide abil on võima-

lik ka ruume soojendada. Selleks asetatakse termoelementide kuumad liitekohad ruumi, mida soovitakse kütta, külmad liitekohad aga välja. Asjaolu, et kuumal liitekohal eraldub ka osa külmal liitekohal neeldunud soojusest, teebki selle meetodi perspektiivseks. Akadeemik Joffe järgi on vastava termopatarei poolt võrgust võetava võimsuse  $W$  ja kuumal liitekohal eralduva soojuse  $Q_1$  vahel järgmine sõltuvus:  $\frac{W}{Q_1} = \frac{T_1 - T_0}{T_1}$ , kus  $T_1$  tähistab kuuma liitekoha ja  $T_0$  külma liitekoha absoluutset temperatuuri.

Kui näiteks termoelementi kuumade liitekohtade absoluutne temperatuur  $T_1 = 27 + 273 = 300$  °K (+27° C) ja külmade liitekohtade absoluutne temperatuur  $T_0 = 273 - 3 = 270$  °K (-3° C), siis

$$\frac{W_1}{Q_1} = \frac{300 - 270}{300} = 0,1.$$

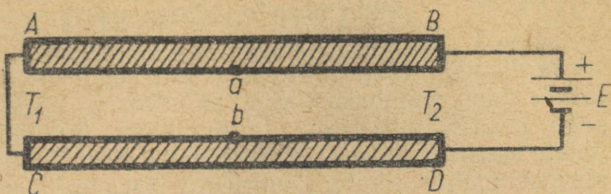
See tähendab, et kui liitekohtade sellise temperatuurivahe juures tahaksime termoelementide süsteemi abil köetavasse ruumi anda näiteks 100 kalorit soojust, siis elektrienergiana peaksime võrgust võtma teoreetiliselt ainult 10 kalorit, kuna 90 kalorit võtaks termoelementide süsteem väliskeskkonnast.

Termoelementides toimuvad protsessid ei piirdu kahjuks ainult soojuse eraldumise ja neeldumisega liitekohtadel, vaid, nagu eespool juba selgitatud, siin esineb ka kadusid põhjustav soojuse üleminek kuumalt liitekohalt külmale ja lisaks sellele muundub osa elektrienergiat termoelementi mõlemas harus Joule'i soojuseks.

Seepärast ei saa toodud näite korral piirduda elektrienergia võtmisega võrgust ainult 10% ulatuses, vaid seda tuleb kulutada palju rohkem, umbes 60% ruumidesse antavast üldisest soojushulgast. Ent selgi korral on see süsteem tulusam kui näiteks kütta ruume elektriahjudega.

Termoelementide abil ruumide kütmise süsteem on kasulik ka selle poolest, et suviti suure kuumuse ajal võib seda rakendada ruumide jahutamiseks. Selleks tarvitseb vaid muuta voolu suunda termoelementides, ja liitekohad, mis seni soojendasid ruume, hakkavad neid jahutama.

Termoelektriliste nähtuste hulka arvatakse ka inglise füüsiku William Thomsoni (lord Kelvini) poolt 1856. a. tehtud avastus, mille kohaselt ühtlases elektrijuhis, milles



Joon. 2—8. Thomsoni nähtuse tagajärjel on temperatuur punktis  $a$  kõrgem kui punktis  $b$  (kui  $T_1 > T_2$ ).

esineb temperatuurivahe, tekib elektromotoorne jõud. Selle tõttu ilmneb elektrijuhi Peltier' nähtuse taoline efekt: kui ebaühtlaselt kuumutatud juhti läbib vool, siis — sõltuvalt voolu suunast — eraldub või neeldub juhis lisaks Joule'i soojusele veel mõningal määral soojust (nn. Thomsoni soojust). Eraldub soojushulk on võrdeline juhti läbiva elektrivooluga ja juhis esineva temperatuurivahega.

Jämedates joontes võiks Thomsoni nähtust selgitada järgmiselt. Kui elektrijuhti, milles esineb temperatuurivahe, läbib elektrivool, kusjuures elektronide liikumise suund juhis ühtib soojuse levimise suunaga, s. o. elektronid liiguvad juhi kuumemast osast külmemasse, siis teel annavad elektronid energiat ümbritsevatele aatomitele, mis avaldub elektrijuhi soojenemises. Elektrivoolu vastupidise suuna korral täiendavad juhi külmemast osast kuumema poole liikuvad elektronid oma energiat ümbritsevate aatomite energia arvel. See avaldub elektrijuhi jahenemises. Thomsoni nähtuse demonstreerimiseks sooritatakse järgmine katse.

Kaks samast metallist varrast  $AB$  ja  $CD$  (joon. 2—8) on otstes  $A$  ja  $C$  ühendatud traadiga. Otste  $B$  ja  $D$  vahele ühendatakse galvaanielementide patarei  $E$ . Varraste otstel  $A$  ja  $C$  on kõrge temperatuur ( $T_1$ ), palju kõrgem kui otstel  $B$  ja  $D$  ( $T_1 > T_2$ ). Enne patarei  $E$  ühendamist varraste otste külge on temperatuur varraste suhtes sümmeetriliselt asetsevates punktides  $a$  ja  $b$  võrdne. Patarei ühendamisel otste  $B$  ja  $D$  külge hakkavad elektronid liikuma vardas  $CD$   $D$ -st  $C$  poole ja vardas  $AB$   $A$ -st  $B$  poole. Vardas  $AB$  ühtib elektronide liikumise suund soojuse levimise suunaga, vardas  $CD$  on see aga vastupidine. Thomsoni nähtuse tagajärjel osutub punkti  $a$  temperatuur kõrgemaks punkti  $b$  temperatuurist.

## Mida töötab sädemepump?

Inglismaal võeti 1961. a. patent seadisele, mida nimetati «sädemepumbaks». See mõnevõrra imeliku nimetusega seadis, millel ei ole pumbaga tegelikult midagi ühist, koosneb kahest isoleerplaadikesest ja nende vahel olevast umbes tikutoosisuurusest keraamilisest risttahukast. Kui võtta «sädemepump» pihku ja suruda korduvalt plaadikesi, tekib nende alt väljaulatuvate elektroodide vahel kohe raginal sädelahendus. Ja ega see olegi nii ilmsüütu mänguasi: ta annab kuni 30 000-voldiseid pingempulse. Millest siin pinge tekib? Vastuse leiame peagi, kui tuletame meelde dielektrilist polarisatsiooni. Teatavasti paiknevad kristalsetes dielektrikutes isenimelised ioonid rangelt sümmeetrilises korras, moodustades nn. kristallivõre. Elektronid on dielektriku kristallivõres sedavõrd tugevasti seotud aatomituumadega, et normaalseis tingimuses nad ei saa lahkuda ionide piirkonnast. Seetõttu kristall ei juhigi elektrit. Kui kristalne dielektrik paigutada elektrivälja, siis selle mõjutusel nihkuvad ioonid kristallivõres veidi oma kohtadelt. Seejuures nihkuvad positiivsed ioonid elektriväljaga samas suunas, negatiivsed aga vastassuunas. Ioonide sellise nihkumise tagajärjel esinebki dielektrikus elektriseerumisega väliselt küllaltki analoogiline nähtus — dielektriline polarisatsioon. Seda kohtame ka mittekristalsetes tahketes dielektrikutes, samuti vedelikes ja gaasides. Nende paigutamisel elektrivälja asetuvad positiivsed ja negatiivsed elektrilaengud molekulides veidi ümber. Elektronid surutakse aatomites oma liikumisteedelt pisut kõrvale, mistõttu molekuli ühele küljele koondub negatiivne, teisele aga positiivne laeng, moodustades nn. elektrilised dipoolid, s. o. isenimeliste elektrilaengute paarid. Dielektrikus kõrvuti asuvate molekulide polariseerimisel tekkinud elektrilaengute mõju tasakaalustub, dielektriku välisotstel avaldavad dipoolid aga ühist elektrilist välismõju.

Looduses leidub dielektrikuid (näit. vesi, eetrid, orgaanilised happed), mis juba loomulikus olekus sisaldavad dipoole. Niisuguste dielektrikute polarisatsioon seisneb dipoolide orienteerumises elektrivälja suunas. Kristallilise ehitusega aine dielektriline polarisatsioon ei teki ainuüksi elektrivälja toimel. Osal kristallidel võib seda näh-



Joon. 2—9. Kloor- ja naatriumioonide asetus keedusoolakristallis (kloorioon — must kera, naatriumioon — valge kera). *a* — kristalli normaalne kuju; *b* — kristall pärast kokkusurumist.

tust esile kutsuda ka mehaanilise või termilise mõjutamisega.

Dielektrilist polarisatsiooni, mis on tekitatud kristalli venitamise või kokkusurumise teel, nimetatakse piesoelektriliseks nähtuseks (kreekakeelsest sõnast *piezo* — surun) ja polarisatsiooni, mida põhjustab temperatuuri muutmine, püroelektriliseks nähtuseks (kreekakeelsest sõnast *pür* — tuli).

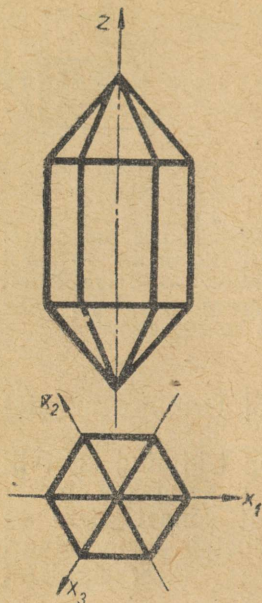
Piesoelektrilise nähtuse avastasid 1880. a. prantslased vennad Curie'd. Kvartskristalli surudes täheldasid nad selle paralleeltahkudel elektrilaengute tekkimist.

Keha, millel esineb piesoelektriline nähtus, nimetatakse piesoelektrikuks. Tüüpilised piesoelektrikud on kvarts, mineraal turmaliin, Seignette'i sool, suhkur ja teised.

On pandud tähele, et piesoelektrikuteks on niisuguse kristallilise ehitusega dielektrikud, milles dipool moodustavate positiivsete ja negatiivsete ionide raskuskeskmed ei lange ühte.

Võtame näiteks keedusoolakristalli, mis kujult meenutab kuupi (joon. 2—9). Keedusoolakuubi moodustavad neli kloor- ja naatriumiooni paari — dipooli, iga selle tahu — kaks sellist paari. Kuubi tahk on teatavasti ruut, mille tippudel asuvad kloor- ja naatriumioonid. Kloorioonide raskuskese asub neid ühendava diagonaali keskkohas. Samas asub ka naatriumioonide raskuskese, sest ruudu diagonaalid poolituvad nende lõikepunktis.

Seega langevad keedusoola kristalli moodustavate positiivsete ja negatiivsete ionide raskuskeskmed ühte.



Joon. 2—10. Kvartsikristalli sümmeetriateljed.  $z$  — peatelg,  $x$  — elektriline telg. Viimasega risti või piki seda rakendatud surve- või tõmbejõud kutsuvad esile piesoelektrilise nähtuse.

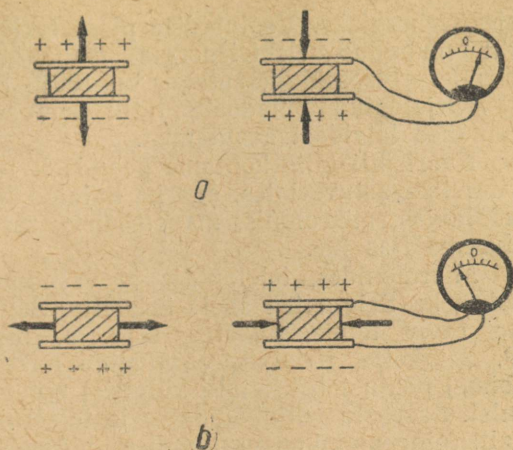
See aga tähendab, et kuubi positiivsed ja negatiivsed laengud on koondatud nagu ühte punkti ja nii kuup kui ka kristallivõre tervikuna ei moodusta elektrilisi dipole.

Kui keedusoolakuup kokku suruda, siis muutub ta risttahukaks (joon. 2—9, *b*). Kuid ka selles ühtivad iseenimeliste ionide raskuskeskmed, seega ei esine dipole. Siit järeldubki, et kristallidel, millel on sümmeetriakese, ei ole piesoelektrilisi omadusi.

Joonisel 2—10 on toodud kvartsikristalli sümmeetriateljed. Kristalli tippu läbivat  $z$ -telge nimetatakse peateljeks, tahkusid läbivaid  $x$ -telgi aga elektrilisteks telgedeks. Surudes või venitades kristalli nende telgede suunas või piki nendega  $90^\circ$  all asuvaid  $y$ -telgi, tekivad kristalli tahkudel asetsevatel elektroodidel elektrilaengud (joon. 2—11).

Kui kvartsist plaadikest surumise asemel venitada, siis tekivad elektroodidel vastupidise märgiga elektrilaengud.

Mida suurem on jõud, millega plaati surutakse või



Joon. 2—11. Piesoelektriline nähtus. *a* — jõud on rakendatud risti kristalli *x*-teljega; *b* — jõud on rakendatud piki kristalli *x*-telge.

venitatakse, seda suurem on ka elektroodidel tekkiv elektrilaeng.

Kui kvartsist plaadike (nn. piesokvarts) asetada elektrivälja (ühendades plaadikese küljes olevad elektrodid vooluallikaga, näiteks galvaanielemendi või akuga), siis ilmneb vastupidine nähtus. Sõltuvalt voolu suunast plaadike kas tõmbub kokku või paisub. Sel korral on tegemist vastupidise piesoelektrilise nähtusega, mis on elektrostriksiooni erijuhtum. Elektrostriksiooni all mõeldakse üldiselt keha kuju muutumist elektrivälja toimel.

Äsja kõnelesime, et piesoelektriline nähtus esineb kristallidel, millel ei ole sümmeetriakeset. Aga kuidas on metallidega? Koosnevad ju metallid väga väikestest kristallidest. Kas nendel ei esine piesoelektrilist nähtust?

Et metallides puuduvad isenimelised ioonid, mis võiksid moodustada dipole, siis ei saagi neis dielektrilist polarisatsiooni tekkida. Piesoelektriline nähtus esineb seega ainult dielektrikutel.

Piesoelektrikutena kasutati seni kõige sagedamini kvartsikristalle. Neid surudes või venitades kulutatakse teatav hulk mehaanilist energiat, mis muundub seejuures

elektrienergiaks. Vastupidise piesoelektrilise nähtuse korral muundub elektrienergia mehaaniliseks energiaks. Nende protsesside kasutegur on 100% lähedal.

Kirjeldatud omaduste tõttu leiavad piesoelektrikud tehnikas laialdast kasutamist.

Kvartsikristalle kohtame peamiselt ultraheligeneraatorites ja -vastuvõtjates, aga ka kajaloodis, helipeas, valjuhääldajas, mikrofonis, manomeetris, resonaatoris, kiirendusemõõtjas jne.

Mikrofonides, telefonides ja valjuhääldajates kasutatakse ka Seignette'i soola kristalle. Selle aine, millel on ka raviv toime, avastas 1672. a. prantsuse apteeker P. Seignette. Kristalli võnkumine mikrofonis helilainete toimel põhjustab kristalli külgedel potentsiaalivahe tekkimist. Seevastu valjuhääldajas ja telefonis põhjustab kristalli pingestamine vastupidise piesoelektrilise nähtuse tõttu kristalli mehaanilist võnkumist, mis kandub edasi membraanile.

Seignette'i sool ei ole aga kuigi püsiv. Niiskuse ja kuumenemise toimel lagunevad kristallid kergesti.

Nõukogude teadlased akadeemikud I. V. Kurtšatov, A. V. Šubnikov, B. M. Vul ja nende kaastöölised on viimase kolmekümne aasta jooksul avastanud palju uusi tugevaid piesoelektrikuid — baariumtitanaadi, ammoooniummonofosfaadi jt., mis mitmeti ületavad kvartsi ja Seignette'i soola.

Piesoelektrikud, mis annaksid pingepulsse 15 000 — 20 000 V, võiksid edukalt asendada sisepõlemismootorite seniseid suhteliselt keerukaid süüteseadmeid. See aga tähendaks progressi masinaehituses, esijoones aga autotööstuses. Seda töötabki Inglismaal 1961. a. patenteeritud esialgu küll mänguasjana näiv seadis, milles, nagu selgub, kasutatakse piesoelektrikuna pliiititaantsirkooniumkeraamikat.

Püroelektrilise nähtuse, mis seisneb keha temperatuuri muutmisega väljakutsutavas dielektrilises polarisatsioonis, avastas 1756. a. vene akadeemik F. U. T. Aepinus. Ta täheldas seda turmaliinil, hiljem aga selgus, et püroelektriline nähtus esineb peaaegu kõikidel kristallidel.

Katsete juures segab selle nähtuse vaatlemist kristalli elektrijuhtivus, mille tõttu kuumutamisel või jahutamisel — polarisatsioon esineb aga ainult sel ajal — tekivad laengud kaovad võrdlemisi kiiresti. Seepärast peavad

need protsessid kulgema võimalikult ruttu. Tekkiv elektri-laeng on ligikaudu võrdeline temperatuurivahemikuga, milles toimub kuumutamine või jahutamine.

### Mis on senjettelektrik?

Elektrivälja paigutatud dielektrikus tekib dielektriline polarisatsioon. Tavalistel dielektrikutel (klaasil, vilgukivil, portselanil, paberil jt.) säilib see ainult välise elektrivälja toimel ja kaob koos viimase kõrvaldamisega kiiresti. Seejuures on ta võrdeline elektrivälja tugevusega.

Ent mõnel ainel, nagu näiteks Seignette'i soolal ( $C_4H_4O_6KNa \cdot 4H_2O$ ) säilib dielektriline polarisatsioon ka pärast elektrivälja kõrvaldamist. See on nn. jääkpolarisatsioon.

Dielektrikuid iseloomustavaks suuruseks on suhteline dielektriline läbitavus, mis näitab, mitu korda mingi aine dielektriline läbitavus on suurem vaakuumi omast. Kui tavalistel dielektrikutel (puul, parafiinil, portselanil, paberil, vilgukivil, klaasil jt.) on see püsiv, ei sõltu elektrivälja tugevusest ja on suhteliselt väike, enamasti 1 ja 10 vahel (ainult keemiliselt puhtal veel on see 81 ja raadiotehnisel keraamikal kuni 80), siis Seignette'i soola dielektriline läbitavus ei ole püsiv, sõltub väga olulisel määral elektrivälja tugevusest ja on suhteliselt suur (kõige suurem temperatuuridel  $+22,5^\circ C - 4000$  ja  $-15^\circ C - 8000$ ).

Seignette'i soola erakorralisi dielektrilisi omadusi täheldas esimesena 1918. a. ameerika füüsik C. D. Andersen. Nõukogude Liidus uurisid seda väga üksikasjalikult akadeemik I. V. Kurtšatov ja Teaduste Akadeemia korrespondentliige P. P. Kobeko aastail 1930—1932. Nemad võtsidki Seignette'i soola dielektriliste omadustega ainete jaoks kasutusele nimetuse senjettelektrikud.

1935. ja järgmistel aastatel avastati Šveitsis grupp aineid, mis esinesid senjettelektrikutena väga madalal temperatuuril ( $-150^\circ C$ ). Sellesse gruppi kuulusid  $KH_2PO_4$ ,  $KH_2AsO_4$  jt.

1944. a. leidsid nõukogude füüsikud B. M. Vul ja I. M. Goldman, et baariumtitanaat  $BaTiO_3$  on senjettelektrik väga laias temperatuurivahemikus — kõige madalamast temperatuurist kuni  $+125^\circ C$ . Tema suhteline dielektriline läbitavus on  $20^\circ C$  juures keskmiselt 1000—2000, kuid mõningate lisandite abil on õnnestunud seda

tõsta kuni 8000-ni. Baariumtitanaat on polükristalliline aine, mis tekib  $\text{BaCO}_3$  ja  $\text{TiO}_2$  pulbri põletamisel. Nüüd saadakse baariumtitanaati ka monokristallidena.

Senjettelektrikute suurt suhtelist dielektrilist läbitavust seletatakse sellega, et nendes ainetes leidub terveid piirkondi, kus kõik elektrilised dipoolid on samasuunalised. Välise elektrivälja toimel orienteeruvad kõik need piirkonnad elektrivälja suunas ja annavadki liitudes väga tugeva resulteeriva elektrivälja.

Välise elektrivälja kõrvaldamisel ilmnev jääkpolarisatsioon on püsiv, samuti nagu jääkmagneetumus terasel. Seepärast nimetatakse seda isetekkeliseks ehk spontaanseks polarisatsiooniks.

Spontaanset polarisatsiooni kohtame ainult tahketel kristallilistel ainetel. Seignette'i soolal esineb see kindla ja ainult temale omase temperatuuri juures ( $+22,5^\circ\text{C}$  ja  $-15^\circ\text{C}$ ). Väljaspool neid temperatuure spontaanne polarisatsioon kaob. Selle nähtuse ilmumist ja kadumist seletatakse aine kristallilise struktuuri muutumisega. Temperatuuri, millel toimub selline muutus, nimetatakse Curie täpiks. Seignette'i soolal on kaks Curie täppi:  $+22,5^\circ\text{C}$  ja  $-15^\circ\text{C}$ . Teistel selliste omadustega sooladel on ainult üks Curie täpp ja nendel säilivad senjettelektrilised omadused ka allpool seda temperatuuri.

Baariumtitanaadi Curie täpp on umbes  $125^\circ\text{C}$ . Baariumtitanaat on suhteliselt odav keraamikamaterjal. Tema tugevus ja head dielektrilised omadused teevad ta väärtuslikuks isolatsiooniaineks raadio- ja elektrotehnikas.

Mõningate lisanditega on võimalik Curie täppi nihutada. Näiteks strontsiumtitanaadi  $\text{SrTiO}_3$  lisamine baariumtitanaadile viib viimase Curie täpi madalama, plii-titanaadi  $\text{PbTiO}_2$  lisamine aga kõrgema temperatuuri poole.

Ka strontsiumtitanaat ja plii-titanaat on senjettelektrikud, esimese Curie täpp on absoluutse nulli lähedal, teisel aga  $250^\circ\text{C}$ .

Võiks ütelda, et senjettelektrikud käituvad elektriväljas niisamuti nagu ferromagnetilised ained magnetväljas. Tõepoolest, viimastel (näiteks terasel, niklil ja koobaltil) on magnetiline läbitavus väga suur, ulatudes tuhandesse, seevastu teistel ainetel on ta praktiliselt ühe lähedal. See sõltub suurel määral magnetvälja tugevusest.

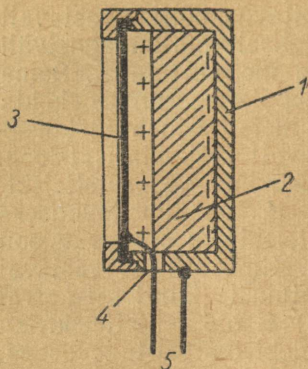
Senjettelektrikute dielektriline läbitavus sõltub vastavalt elektrivälja tugevusest. Juba suhteliselt nõrk magnetväli põhjustab ferromagnetiliste ainete magneetumust. Sama võib ütelda ka senjettelektriku polariseerumise kohta elektriväljas. Ferromagnetilistel ainetel esineb jääkmagneetumus, senjettelektrikutel vastavalt jääkpolarisatsioon. Curie täpist kõrgemal temperatuuril kaovad senjettelektriku iseloomulikud omadused ja ta muutub tavaliseks dielektrikuks. Sel korral on senjettelektriku polarisatsioon võrdeline elektrivälja tugevusega. Curie täpile vastaval või ka sellest madalamal temperatuuril (kuigi sel korral väheneb ka dielektriline läbitavus) ei ole senjettelektriku polarisatsioon enam võrdeline elektrivälja tugevusega, vaid jääb teataval määral sellest maha, mille põhjuseks on dielektriline hüsterees (analoogia magnetilise hüstereesiga). Elektrivälja perioodilisel muutmisel muutub see pärast polarisatsioon silmusekujulise kõvera järgi (analoogia ferromagnetiliste materjalide ümbermagneetumisel esineva hüstereesisilmusega).

Kui ehitada kondensaator, milles on dielektrikuks senjettelektrik, siis, kasutades ära dielektrilise läbitavuse sõltuvust temperatuurist ja elektrivälja tugevusest, osutub võimalikuks muuta kondensaatori mahtuvust väga suurtes piirides. Seda võimalust kasutataksegi tänapäeva tehnikas, näiteks võnkeringi sageduse muutmiseks, sageduse kordistamiseks, dielektrilistes võimendites, adapterites jne.

Kui senjettelektrikuga kondensaatorit vaheldumisi kuumutada ja jahutada, siis tekib vooluringis vahelduv pinget. Sel põhimõttel saabki ehitada nn. senjettelektrilist generaatorit, mis annab vahelduvat pinget umbes 1000 V ja rohkem, kuigi generaatori võimsus on seejuures väga väike.

### **Jaapani välitelefoni saladus**

Teise maailmasõja käigus vallutasid jaapanlased teatavasti Filipiinid ja tungisid ka Indoneesia saartele. Pika-peale suutsid liitlased nende edasitungi peatada ja nad seejärel taganema sundida. Seejuures jätsid Jaapani väed maha mitmesugust sõjavarustust, sealhulgas ka sideseadmeid. Torkas kohe silma, et nende telefoniaparaatides puudusid toitepatareid. Mitte et need oleksid aparaatidest



Joon. 2—12. Elektreediga kapselmikrofon. 1 — kapsel; 2 — elektreet; 3 — membraan; 4 — õhuava; 5 — väljuvad juhtmed.

meelega kõrvaldatud või eraldi paigutatud — ei, neid ei olnud lihtsalt vajagi. Sideseadmed töötasid laitmatult, olgugi et üheski telefoniaparaadis ja ka keskjaamas ei olnud toitepatareisid. Sõjaväelased ei suutnud mõistatust lahendada, seepärast anti asja selgitamine teadlastele. Peagi jõudsid ameerika teadlased selgusele, et jaapanlaste välitefoniside oli rajatud uut tüüpi telefoniaparaatidele, milles kasutati püsiva dielektrilise polarisatsiooniga dielektrikuid, nn. elektreete. Kõne ülekanne toimub nendes aparaatides helienergia muundumise tõttu elektriliseks, mida võimaldavad elektreedid.

Elektreet asetseb telefoniaparaadi kapselmikrofonis, teda katab mikrofoni membraan — õhuke metallplaat. Membraan, elektreet ja selle alus kokku moodustavad kondensaatori (joon. 2—12). Kondensaatori laeng on teatavasti võrdeline kondensaatori mahtuvusega ja plaatidevahelise pingega. Kui püsiva laenguga kondensaatoril muuta mahtuvust, siis vastavalt muutub ka plaatidevaheline pinge. Kõne ajal võngub mikrofoni membraan hääle võnkumise taktis. Koos sellega muutub membraani kaugus elektreest, mistõttu muutub ka kondensaatori mahtuvus. See aga põhjustab pinge muutumist vooluringis, mis ühendab üht mikrofoni teise abonendi telefoni ülesannet täitva samasuguse ehitusega mikrofoni. Vooluringis ilmnev vool on küllaldane, et tagada kõne head kuuldavust.

Sellega oligi lahendatud saladus, mis näis algul nii mõistatuslikuna.

Tutvugem lähemalt saladuse põhjusega, elektreediga.

Tuginedes puhtteoreetilistele kaalutlustele võimalikust analoogiast dielektrikute ja püsivmagnetite vahel, võttis Faraday juba 1838. a. tarvitusele püsiva polarisatsiooniga dielektriku mõiste. Hiljem soovitas inglise füüsik Oliver Heaviside (1850—1925) nimetada niisugused dielektrikud elektreetideks.

Esimese elektreedi valmistas 1922. a. jaapani füüsik M. Eguchi. Selleks võttis ta võrdsetes osades karnauubavaha ja vaiku, sulatas nad üles, segas hästi läbi ja jahutas saadud segu 12 tunni kestel tugevas elektriväljas ( $E=11$  kV/cm). Niisugune elektreetide valmistamise viis, mis seisneb dielektriku sulatamises ja seejärel elektriväljas jahutamises, on põhiliselt säilinud tänapäevani. Sel teel saadud elektreete nimetatakse mõnikord ka termo-elektreetideks.

Molekulide soojusliikumisest tingituna asetuvad dipoolid sulavahas ja -vaigus juhuslikult. Kui sulasegu asetada tugevasse elektrivälja, siis hulk dipoole orienteerub elektrivälja suunas, millise asendi nad säilitavad ka tardunud segus. Mida suurem on elektrivälja tugevus, seda enam dipoole orienteerub elektrivälja toimel.

Elektreedi elektrilaengut iseloomustab laengu pindtihedus, mida väljendatakse kulonites elektreedi pinna ühe ruutsentimeetri kohta. Tänapäeva parimatel elektreetidel on laengu pindtihedus kuni  $5 \cdot 10^{-9}$  C/cm<sup>2</sup>. See ei ole kuigi suur, seepärast on teadlaste pingutused suunatud nii uute ja paremate elektreetide kui ka nende polariiserimise tõhusamate meetodite otsimisele.

Taimse päritoluga vaha asemel võib kasutada ka meevaha. Häid elektreete saab segust, milles on 20—25% meevaha ja 75—80% kampolit. Sellaki lisamine (2,5—3%) teeb elektreedid kõvemaks ja temperatuuri suhtes vastupidavamaks. Elektreedi valmistamise käik on järgmine. Esmalt sulatatakse üles kampol, tõstes tema temperatuuri 120—130°C. Seejärel lisatakse peenendatud šellakit ja segatakse seni, kuni segu muutub täiesti ühtlaseks. Nüüd lastakse segu jahtuda kuni 100—110°C ja lisatakse siis vaha. Järgneb uus segamine, kuni segu muutub jälle ühtlaseks. Alles siis valatakse see vastavale alusele jahtuma. Kiire jahutamine hoiab ära elektreedi kihistumise.

Bulgaaria teadlane akadeemik G. Nadjakov avastas 1937. a., et polükristalliline väävel võib muutuda elektreediks ka tahkes olekus, kui ta asetada elektrivälja ning

teda seejuures intensiivselt valgustada. Valguskiirguse toimel orienteeruvad dipoolid elektrivälja suunas, jäädes sellisesse asendisse mõnekümneks tunniks ka pärast valgustuse ja elektrivälja kõrvaldamist. G. Nadjakov nimetas sel teel saadud elektreete fotoelektreetideks. Häid elektreete võib saada ka polüamiidvaikude ja polüvinüülatsetaatide alusel.

Anorgaaniliste ainete loetelu, millest saadakse elektreete, piirdub esialgu väevli, vilgukivi ja titaani ühenditega, nagu  $\text{CaTiO}_3$ ,  $\text{BaO} \cdot \text{TiO}_2$  jt. Neid elektreete, mida muide nimetatakse keraamilisteks, valmistasid ja uurisid nõukogude teadlased G. I. Skanavi ja A. N. Gubkin. Nad valmistasid keraamilisi elektreete ka lähteaineid eelnevalt sulatamata. Need elektreedid säilitavad oma laengu juba pikema aja jooksul.

Elektreetide alal ei ole teadlased oma viimast sõna veel ütelnud. Siin on kindlasti oodata nii mõndagi uut.

Paar sõna elektreetide rakendamisest tehnikas.

Esimene elektriline mõõteriist, mille konstruktsiooni kuulus elektreet, oli elektromeeter. Neid leidub nüüd mitut liiki: ketas-, keel-, pendel- ja vibratsioonielektromeeter. Elektreete kasutatakse ka õhu radioaktiivsuse määrajates — dosimeetrites.

Elektreeti elektrivälja tugevuse sõltuvus keskkonna niiskusest võimaldas konstrueerida uut tüüpi niiskusemõõtja. Elektreete kasutatakse veel mitmesugustes filtrites ja tolmpüüdjates.

On loodud ka esimesed elektreetidega elektrigeneraatorid. Need on väga väikese võimsusega ja suhteliselt suuremõõtmelised, mistõttu nende kasutamine võib kõne alla tulla ainult vastavates mõõte- ja reguleerimisaparaatides, mitte aga suuremas ulatuses elektrienergia tootjatena.

Olgu tähendatud, et igas elektreetidega seadises ja aparaadis peab olema ka abinõu, mis võimaldab pärast seadise või aparaadiga töötamist elektreeti lühistada.

### **Elektrokonveksiooninähtused**

Kehade elektriseerimist käsitledes selgitasime, et kahe erinevast ainest keha kokkupuutumisel toimub nende vahel elektronide vahetus. See võib aset leida nii tahkete

kehade kui ka tahkete kehade ja vedelike puhul. Näiteks kui parafiinikera langeb vette, elektriseerub ta negatiivselt, vesi aga positiivselt. Analoogiliselt elektriseeruvad elavhõbedasse kastmisel klaas, kirjalakk jne. Elektriväljas hakkavad aga elektriseerunud osakesed liikuma. Kindlat teoreetilist alust või seadust selle kohta, milline kahest kehast omandab elektriseerimisel positiivse ja milline negatiivse laengu, ei ole. On avaldatud küll arvamust, et keha, mille elektronide vabastamiseks on vaja kulutada vähem energiat, osutub positiivselt laetuks. Lisaks sellele väitis E. Coehn a. 1900, et suhteliselt suurema dielektrilise läbitavusega dielektrik omandab elektriseerimisel positiivse, väiksema dielektrilise läbitavusega keha aga negatiivse laengu. Selle kohaselt saab näiteks paber klaasiga kokkupuutumisel negatiivse, klaas aga positiivse laengu, sest klaasi suhteline dielektriline läbitavus on üle nelja, paberil aga kaks.

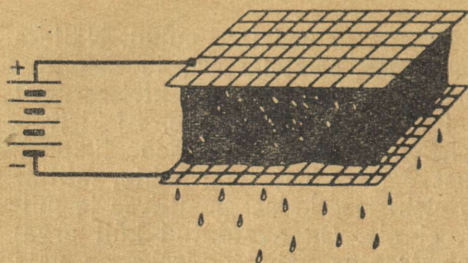
Elektriseerumine ilmneb ka tahkete kehade purustamisel, samuti sõmerate kehade ja vedelike voolamisel ja pihustamisel.

Tahkete, vedelate või gaasiliste kehade elektriseerumine, samuti dielektriline polarisatsioon dielektrikutes põhjustavad mitmesuguseid huvitavaid nähtusi. Nende hulka kuuluvad elektroforees, elektroendosmoos ja teised.

Elektroforees (kreeka k. *foros* — kandev) kujutab endast vedelas või gaasilises keskkonnas hõljuvate tahkete, vedelate ja gaasiliste osakeste liikumist elektrivälja toimel.

Valame klaasnõusse destilleeritud vett, puistame vette savipulbrit ja loksutame läbi. Sel teel valmistatud kolloidlahusesse asetame kaks elektroodi ja ühendame nad alalisvoolu pingega. Elektroodide vahel tekkivas elektriväljas hakkavad veega kokkupuutumisel elektriseerunud aineosakesed liikuma, kusjuures positiivselt laetud osakesed suunduvad negatiivsele elektroodile, negatiivsed aga positiivsele. Tärglise, savi, šellaki ja mõne teise aine osakesed omandavad veega kokkupuutumisel negatiivse laengu, seevastu näiteks metüülinsinise värvaine osakesed omandavad positiivse laengu.

Tahkete aineosakeste liikumine vedelikus võib põhjustada elektroforeesile vastupidist nähtust — vedeliku ja tahkete aineosakeste vahel tekib potentsiaalivahe. Näiteks kui veega täidetud klaasnõusse puistata klaasipulbrit, siis



Joon. 2—13. Turba kuivatamine elektroendosmoosi abil.

nõusse asetatud elektrootide vahel (üks elektroot asub klaasnõu põhjas, kuhu langeb klaasipulber, teine aga ülemises osas) ilmneb potentsiaalivahe.

Elektroendosmoos (kreeka k. *endon* — sees ja *osmos* — tõuge, liikumine) kujutab endast vedeliku liikumist elektriväljas läbi kapillaaride või diafragmade. Elektroforeesi puhul liikusid vedelikus elektrivälja toimel aineosakesed, elektroendosmoosi korral on aineosakesed paigal, liigub aga osakestevahelistes poorides olev vedelik. Seda võib selgesti märgata, kui asetada destilleeritud veega täidetud U-kujulisse torusse pimsskivi, vatti või liiva ja juhtida sellest läbi elektrivool. Vesi, mis enamikul juhtudel elektriseerub positiivselt, liigub negatiivse elektrooti poole ja tõuseb selles toruharus kõrgemale.

Ka elektroendosmoosil on vastupidine nähtus. See seisneb potentsiaalivahe tekkimises vedelikus viimase voolamisel läbi diafragmade ja kapillaaride. Näiteks kui juhtida vett läbi toru, mida ühes kohas tõkestab poorne vahesein, siis osutub vaheseina läbinud vesi positiivselt, vaheseina ees olev vesi aga negatiivselt laetuks. Pinge suurus elektrootidel sõltub survest, mis on torustikus, ja vaheseina materjalist, mitte aga selle paksusest.

Elektroforeesi ja elektroendosmoosi kasutatakse tehnikas mitmel alal. Elektroforeesi teel eraldatakse näiteks lateksist kautšukit, puhastatakse gaase tolmust, eraldatakse naftast vett, puhastatakse savi ja kaoliini ning eraldatakse nendest ka vett. Elektroforeesi abil täidetakse riide poorid vastava kemikaaliga (maarjasega või alumiiniumhüdrosiidiga), saades sel teel veekindlat riiet; ka kasutatakse seda nahaparkimisel. Elektroendosmoosiga

on võimalik kõrvaldada vett poorsetest ja kiulistest ainetest, näiteks kuivatada turvast. Märk turvas paigutatakse kihina kahe traatvõrgu vahele. Kui traatvõrgud pingestada, siis hakkab vesi alumise, s. o. patarei negatiivse klemmiga ühendatud võrgu poole liikuma ja turbast välja tilkuma (joon. 2—13). Elektroendosmoos leiab tänapäeval kasutamist suurtel ehitustel kui hea vahend pinnase kuivendamiseks ja tihendamiseks. Selle abil on osutunud võimalikuks päästa mõnigi arhitektuurimälestusmärk, mida pinnase vajumise või maalihke ohu tõttu ähvardas lagunemine. Õigeaegne pinnase tihendamine vältis ehituste paratamatut hävinemist.

### **Mõningaid dielektrilisest polarisatsioonist tingitud nähtusi.**

Elektriväljas mõjub dielektrikule mehaaniline jõud, mis püüab selle viia maksimaalse väljatugevuse piirkonda. Ebemete, paberitükikeste, tolmu ja muude kergeste osakeste külgetõmbamine elektriseeritud kehade poolt kujutabki endast elektrivälja sellist toimet dielektrikutele. Tehnikas leiab see nähtus kasutamist mitmesugustes tolmu- ja tahmapüüdjates.

Kui üht vedelikku tilgutada teise, mille suhteline dielektriline läbitavus on väiksem (näiteks vett kergesse õlisse), ja asetada samasse vedelikku elektriseeritud keha, siis tõmbuvad tilgad elektriseeritud keha poole, s. o. liiguvad piirkonda, kus elektrivälja tugevus on suurem. Vedelikus leiduvad gaasimullid seevastu tõukuvad elektriseeritud kehast eemale. Et vedelikul on suhteline dielektriline läbitavus suurem kui gaasil, siis tõmbub vedelik elektriseeritud keha poole, surudes gaasiosakesed eemale.

Elektriseerimisnähtused esinevad paljudes tootmisprotsessides, nagu näiteks paberitööstuses paberi silendamisel ja rullimisel, kiudainete kerimisel värvi- ja tekstiilitööstuses, vedelike voolamisel torustikes ja filtrites, nende segamisel sөгistites, vedelike pihustamisel, suurema viskoossusega aineosakeste liikumisel väiksema viskoossusega keskkonnas, gaasi liikumisel läbi vedeliku, samuti õhu ja tolmu segu liikumisel torustikes või ka tolmu puhumisel õhujoaga.

Kõigil neil juhtudel võivad tekkida väga suured

elektrilaengud. Näiteks paberivabrikus nn. masinsileda postpaberi valmistamisel võib metallvaltside vahelt väljuv kuiv paberikangas osutada sedavõrd elektriseerituks, et paberirullile lähendatud kätte kargab 5—10 cm ja vahel pikemgi säde. Paberimasinal töötajad saavad neil kordadel üllatada juhuslikke külustajaid järgmiselt. Töötaja (jalas kalossid või kummisaapad) astub paberirulli juurde, libistab käe üle paberi ja pöördub siis külustaja poole, sirutades sellele sõbralikult käe. Viimane võtab muidugi käe vastu ja samas tunneb kerget elektrilööki — käte vahel vilksatab säde.

Minevikus, kui jõuülekannete masinate vahel toimus peamiselt rihmade abil, põhjustasid need tolmustes tööruumides sageli tulekahjusid. Elektriseerimise tagajärjel kogunes rihmale ja masina maandamata osadele suuri elektrilaenguid. Rihma ja masinaosade vahel vilksatas säde ja see süütas tolmu või muu süttiva ainega küllastatud õhu.

Seda asjaolu tuleb silmas pidada ka transpordilintide ja muude taoliste seadmete korral, eriti kui on tegemist plahvatus- või tuleohtlike ainete või keskkonnaga. Neil juhtudel tuleb tarvitusele võtta kõik võimalikud abinõud, et vältida elektrilahendust sädeme kujul.

### **Elektrilise jõu tekkimisest galvaanielementides**

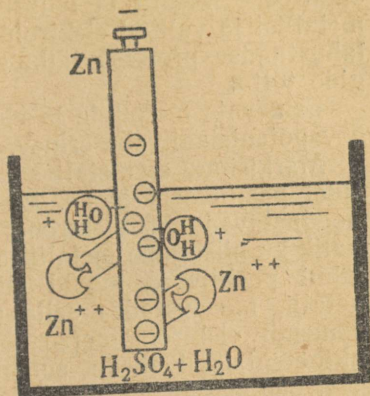
Termoelektriliste nähtuste käsitlemisel kõnelesime, et metallidest koosnevas kinnises vooluringis tekivad kontaktpinged, mis tasakaalustuvad, kui kõik eri metallide liitekohad asuvad ühesuguse temperatuuriga keskkonnas.

Vooluringis, mis ei koosne ainult metallidest, vaid sisaldab ka teist liiki elektrijuhte, s. o. elektrolüüte, kaob elektrijuhtide ja elektrolüütide vahel toimuvate keemiliste protsesside tõttu elektriline tasakaal ja selles tekib elektromotoorne jõud.

Niisugune vooluring esineb galvaanielementides.

Kui klaaspurki valada elektrolüüti, asetada sellesse kaks erinevast metallist elektroodi, kinnitada purgist väljaulatavate elektroodide külge traadid ja ühendada nende vahele mõõteriist (ampermeeter), siis näitab viimane voolu. Sel teel koostasimegi galvaanielemendiga vooluringi.

Joon. 2—14. Elektromotoorse jõu tekkimine tsingi ja väävelhappe vahel. Vee molekulid, pöördues negatiivse küljega elektroodi poole, kisuivad viimasest tsingi positiivseid ioone lahusesse. Vabaks jäävad elektronid moodustavad elektroodi negatiivse laengu.



Ajalooliselt esimese keemilise vooluallika — Volta elemendi saame siis, kui elektrolüüdiks võtta lahjendatud väävelhape ( $H_2SO_4$ ), elektroodideks aga vask ja tsink.

Galvaanielementidest tuntakse tänapäeval väga palju tüüpe, nagu näiteks Leclanche, Danielli, Meidingeri, Weston element jt. Erinevus nende vahel on peamiselt elektroodide materjalis ja kasutatavas elektrolüüdis.

Mis siis toimub galvaanielementides?

Vaatame esmalt, mis juhtub, kui elektrood puutub kokku happega. Kohe happesse asetamisel algab metalli lahustumise protsess. Seejuures ei lähe lahusesse mitte metalli neutraalsed aatomid, vaid positiivsed ioonid, kuna elektronid jäävad metalli, moodustades elektroodi negatiivse laengu (joon. 2—14).

Ent lahustumine ei kesta kogu aeg võrdse intensiivsusega. Varsti ta pidurdub, sedamööda kuidas suureneb lahuses ionide kontsentratsioon. Nüüd algab vastupidine protsess: elektroodi ümbritsevad ioonid, olles pidevas soojusliikumises, puutuvad kokku elektroodiga ja sades-tuvad sellele, kusjuures metalli vabad elektronid, liitudes ionidega, muudavad need uuesti neutraalseteks metalli aatomiteks. Kui on tegemist absoluutselt puhta metalliga, siis saabub varsti reaktsioonide tasakaal: teatava aja vältel lahusesse läinud metalli ionide arv võrdub sama aja vältel neutraalseteks aatomiteks muutunud ionide arvuga. Sellele tasakaaluolukorrale vastab teatav potent-

siaalivahe metalli ja lahuse vahel, mis sõltub elektroodi metallist ja valitud elektrolüüdist. Lisandite puhul metalli lahustumise protsess jätkub tekkivate kohalike vooluringide tõttu.

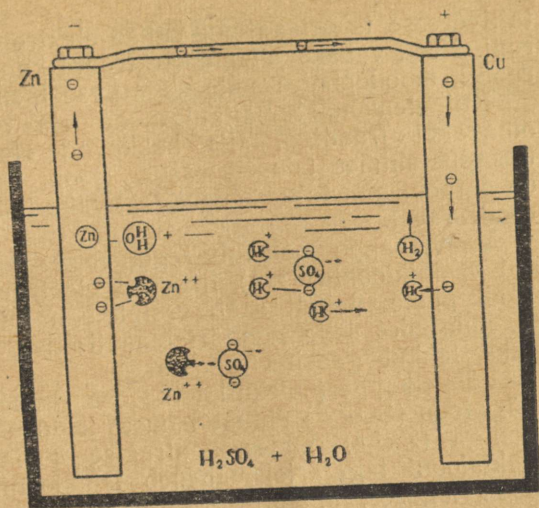
Erinevate metallide ja elektrolütide korral on ka erinev potentsiaalivahe erinev.

Märkisime, et metall saadab lahusesse enamikul juhtudel positiivseid ioone. Elektronid, mis jäävad metalli, moodustavad siis elektroodi negatiivse laengu. On võimalik ka niisugune metalli ja lahuse kombinatsioon, mille puhul positiivsed ioonid siirduvad lahusest elektroodimetalli, moodustades selle positiivse laengu. Galvaanieleменти elektromotoorse jõu moodustab üksikute kontaktpotentsiaalivahede summa. Need esinevad nii iga elektroodimetalli ja elektrolüüdi kui ka (mitme erineva elektrolüüdi korral) elektrolütide vahel. Kontaktpotentsiaalivahe erinevus eri metallide ja elektrolütide korral võimaldabki valida galvaanielementideks sobivaid metallipaare.

Volta elemendis on elektroodideks vask ja tsink. Samad metallid on elektroodideks ka Danielli (koostaja J. F. Danielli nime järgi) elemendis. Tsinkelektrood asetseb sel korral tsinksulfaadi ( $ZnSO_4$ ), vask aga vasevitrioli ( $CuSO_4$ ) lahuses. Mõlemad elektrolüüdid on teineteisest eraldatud poorse vaheseinaga. Positiivsete tsinkioonide siirdumise tõttu lahusesse omandab tsinkelektrood negatiivse laengu. Tsingi ja tsinksulfaadi piiril kujuneb potentsiaalivahe 0,51 V.

Vaskelektrood omandab positiivse laengu, sest sellel eralduvad vasevitrioli dissotsieerumisel tekkivad positiivsed vaskioonid. Vase ja vasevitrioli lahuse piiril on potentsiaalivahe 0,6 V. Potentsiaalivahe elektroodimetallide vahel on väga väike (0,006 V), veelgi väiksem on potentsiaalivahe tsinksulfaadi ja vasevitrioli lahuse vahel. Seega kujuneb Danielli galvaanielementi elektromotoorne jõud peamiselt kontaktpotentsiaalivahedest, mis esinevad elektroodimetallide ja elektrolütide vahel, antud juhul tsingi ja tsinksulfaadi ning vase ja vasevitrioli vahel. Kokku moodustab see 1,1 V.

Analoogiliselt kujunevad elektromotoorsed jõud ka teistes galvaanielementides. Tutvugem lähemalt protsessidega, mis toimuvad näiteks Volta elemendis. Eespool märkisime juba, et elektrolüüdiks on siin väävelhappe



Joon. 2—15. Elektromotoorse jõu tekkimine Volta elemendis.

lahus. Nagu igas vesilahuses, nii toimub ka selles elektro-  
lüütiline dissotsiatsioon.

Väävelhape ( $H_2SO_4$ ) lagub kaheks positiivseks vesi-  
nikiooniks ( $H^+$ ) ja negatiivseks happejäägi ioniks  
( $SO_4^{--}$ ). Seejuures on kahe vesinikiooni laeng võrdne  
happejäägi laenguga.

Volta elemendi korral lahustub tsink väävelhappes,  
kusjuures lahusesse astuvad positiivsed tsinkioonid  
( $Zn^{++}$ ).

See ionide üleminek lahusesse toimub vee molekulide  
sunnil.

Teatavasti on vee molekulid polaarsed, elektrilaengud  
moodustavad nendes dipooli meenutava süsteemi.

Elektroodidega kokku puutudes pöörduvad sellised  
vee molekulid negatiivse küljega (hapniku poolega) metalli  
kristallivõre positiivsete ionide poole. Isanimeliselt lae-  
tud osakeste vahel valitsevate tugevate elektriliste jõu-  
dude sunnil lahkub ion elektroodi metallist ja läheb  
lahusesse.

Et tsink on kahevalentne, siis jääb iga lahusesse läi-  
nud tsinkiooni kohta elektroodi metalli, s. o. tsiingi kris-

tallivõresse tsingi aatomi välise elektronikihi kaks elektroni. Need vabaks jäänud elektronid kuhjuvad tsinkelektroodil, moodustades selle negatiivse laengu.

Kui elemendist väljaulatuvad elektroodid ühendada omavahel traadiga, siis hakkavad elektronid liikuma ühendusjuhtmes tsingilt vasele (joon. 2—15). Põhjuseks on eespool nimetatud potentsiaalivahe tsink- ja vaskelektroodi vahel.

Väävelhappe molekuli lagunemisel tekkinud positiivsed vesinikioonid ( $H^+$ ) liiguvad elektrolüüdis vaskelektroodi poole. Sellelt saab vesinikioon puuduva elektroni ja, muutudes selle tagajärjel neutraalseks vesiniku aatomiks, lahkeb gaasina lahusest.

Väävelhappe molekuli teine osa — negatiivne happejäägi ion ( $SO_4^{--}$ ) ühineb lahuses leiduva positiivse tsinkiooniga ( $Zn^{++}$ ), andes neutraalse soola  $ZnSO_4$ . Selle reaktsiooni tagajärjel väheneb tsinkioonide kontsentratsioon lahuses, mistõttu sellesse saab tulla uusi tsinkioone. See omakorda põhjustab elektronide vabanemise tsinkelektroodil ja võimaldab nende juurdevoolu üle ühendustraadi vaskelektroodile. Siin liituvad elektronid elektroodile lähenenud positiivsete vesinikioonidega, andes neutraalsed vesiniku aatomid, mis osalt lahkuvad gaasina lahusest, osalt aga kleepuvad elektroodi külge. Lahkunud elektronide asemele tulevad tsinkelektroodist ühendusjuhtme kaudu vaskelektroodile uued elektronid jne. Kogu protsess kestab seni, kuni lõpevad protsessist osavõtvad ained — tsink ja väävelhappe.

---

Metallides kujuneb elektrivool vabade elektronide liikumisest. Vooluallika elektromotoorne jõud on seejuures põhjuseks, mis kutsub juhis esile elektrivälja muutuse, s. o. loob elektriväljas potentsiaalivahe, mis sunnibki elektrilaenguid juhis liikuma. Metallides sõltub seega elektrijuhtivus vabade elektronide olemasolust. Mõnede metallide elektrijuhtivus on eriti suur absoluutsele nullile lähedasel temperatuuril. See on nn. ülijuhtivus. Ülijuhtivuse korral ei kao vooli juhist ka vooluallika puudumisel vooluringis, kui vaid säilitatakse teatav madal temperatuur, mis on vajalik ülijuhtivuse tekkimiseks.

Suurem osa vedelikke koosneb peamiselt elektriliselt neutraalsetest molekulidest, mistõttu nendes on väga vähe vabu elektrone või muid elektrilaenguga osakesi. Need ained juhivad halvasti elektrit. Siia kuuluvad: vesi, petrooleum, mineraalõli, glütseriin, suhkru vesilahus jt. Seevastu elektrolüüdid — hapete, aluste ja soolade vesilahused — juhivad elektrit hästi. See on tingitud sellest, et elektrolüüdis toimub pidevalt molekulide lagunemine ioonideks. Viimased moodustavadki elektrivälja sunnil elektrivoolu. Seepärast kandub elektrolüüdis koos elektrilaengutega elektrodidele ka ainet. See nähtus kujutab endast elektrolüüsi.

Elektrivool gaasides — gaaslahendus — saab võimalikuks seetõttu, et gaas ioniseerub, s. o. selles tekib samuti ioone.

Käesolevas peatükis käsitleme aine elektrijuhtivust, ülijuhtivust, elektrolüüsi, polarisatsiooni ja gaaslahendust.

## Aine elektrijuhtivusest

Elektroniteooria tekkimise ajal arvati, et elektrivoolu moodustavate vabade elektronide arv metallis on väga suur. Andis see ju kergesti põhjendada metallide head elektrijuhtivust.

Arvamine, et metalli kristallivõre sõlmedes paiknevate ionide vahel tohutul hulgal liikuvad elektronid käituvad nagu gaasiosakesed, põhjustas nendele elektrongaasi nimetuse andmise. Kuid pärast metallide elektrijuhtivuse kvantide teooria ilmumist, millele panid aluse nõukogude füüsik J. Frenkel ja saksa füüsik A. Sommerfeld, tuli neid seisukohti revideerida.

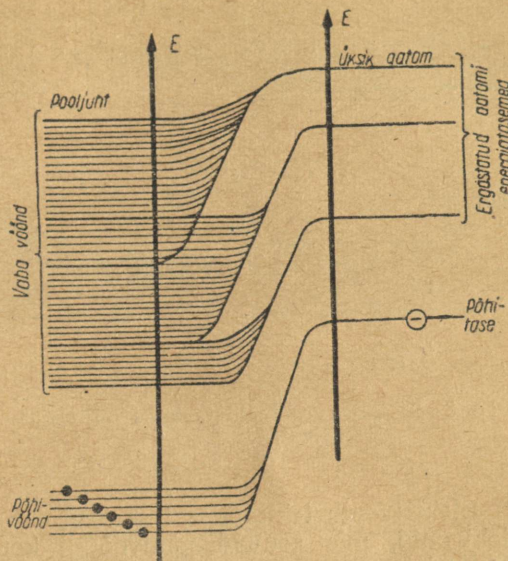
J. Frenkel näitas esimesena, et metalli välise elektroni-kihi elektrone ei tule sugugi võtta täiesti vabadena ja nendele ei saa omistada kuigi tähtsat osa soojusliikumises.

Tuli loobuda ka elektronide käsitlemisest elektrongaa-sina. Elektrivälja sunnil liikuvaid elektrone on õigem vaadelda selliselt seotuna metalli ionidega, et iga elektron kuulub üheaegselt või järgemööda kristallivõre mitmele ionile.

Selgitame seda lähemalt.

Kui metalliaur muutub vedelaks metalliks ja viimane omakorda tahkeks, siis lähenevad metalli aatomid üksteisele. Tahkes metallis on aatomid otse üksteise vastu surutud. Seetõttu asuvad väliste elektronikihtide elektronide orbiidid aatomites sedavõrd üksteise lähedal, et nad isegi kattuvad, mille tõttu elektronid on sunnitud tiirlema mitte ühe aatomituuma, vaid ka naaberaatomituuma ümber. Sellest tulebki, et väliste elektronikihtide elektronid, mida tavaliselt nimetatakse vabadeks elektronideks, hakkavad metalli kristallides tiirlema kord ühe, kord teise aatomituuma ümber, rännates selliselt metallis edasi.

Elektrijuhtivuse teooria edasine arendamine võimaldas selgitada erinevust juhtide, mittejuhtide ehk dielektrikute ja pooljuhtide vahel elektronide nn. energianivoode ehk -tasemete abil aatomis. Kui aatomite lähenemisel üksteisele moodustub tahke kristalliline keha, siis aatomite tugeva vastastikuse mõjutuse tagajärjel muutuvad ka nende väliste elektronikihtide elektronide energiatasemed. Kristalli moodustanud aatomite väliste elektronikihtide elektronide energiatasemed jagunevad nii mitmeks ener-



Joon. 3—1. Elektronide energiatasemed.

giatasemeks, kui mitu aatomit moodustab kristalli. Seejuures võib igal energiatasemel asuda ainult üks elektron. Tahket keha moodustavate aatomite väliste elektronikihtide elektronide lähedased energiatasemed moodustavad kokku terved energiavööndid ehk -tsoonid (joon. 3—1).

Igas tahkes kehas esineb elektronidega täidetud energiavööndeid ja vabu vööndeid, kuhu elektronid saavad siirduda ainult energia juurdesaamisel väljastpoolt.

Nagu juba eespool tähehdatud, nimetatakse kõige madalamate energiaväärtustega vööndit, mis on tavaliselt täidetud elektronidega, põhivööndiks. Elektrone, mis täidavad põhivööndit, nimetatakse põhivööndi elektronideks. Need ei võta osa ei elektri- ega ka soojusjuhtivusest.

Kui kõik võimalikud energiatasemed on täidetud elektronidega, siis ei ole sellises süsteemis võimalik elektrivoolu tekkimine, sest selleks peaksid elektrivälja poolt energiaga varustatud elektronid liikuma kõrgematele energiatasemetele. Kui ka kõik need on elektronidega juba täidetud, siis ei saagi elektronide edasiliikumist esineda.



Joon. 3—2. Energiavööndid juhis ja mittejuhis: *a* — mittejuht; *b* — elektrijuht.

Elektrivoolu tekitamisest saavad osa võtta ainult need elektronid, mis asuvad põhivööndi kõrgematel energiatasemetel, mille kohal asuvad elektronidega täitmata vabad ehk juhtivusvööndid. Selliseid vabu vööndeid võib ju leiduda, kuid võib ka juhtuda, et nad on põhivööndist eraldatud võrdlemisi ulatusliku tõkkevööndiga, millest ülehüppamiseks peab elektronil olema juba rohkem energiat.

Tõkkevööndis aga ei saa elektron mingil juhul viibida.

Kui elektriväli ei suuda anda elektronile küllaldasel määral energiat, et see saaks hüpata kõrgemal asuvasse juhtivusvööndisse, siis selline keha ei juhi tavalistes tingimustes elektrivoolu. Niisugune olukord esineb mittejuhtides ehk dielektrikutes (joon. 3—2, *a*).

Kui tõkkevöönd põhivööndi ja selle kohal asuva juhtivusvööndi vahel puudub (kui juhtivusvöönd järgneb kohe põhivööndile või isegi katab seda osaliselt) või on väga kitsas, mispuhul juhtivusvööndis leidub ka elektrone (joon. 3—2, *b*), siis on tegemist elektrijuhtiga.

Metallides on selliseid juhtivusvööndi elektrone palju ka absoluutsel nullil. Mittejuhtides neid ei ole, pooljuhtides aga leidub väga piiratud hulgal.

Niisiis iseloomustab mittejuhti võrdlemisi laia tõkkevööndi olemasolu põhivööndi ülemiste energiatasemetete ja juhtivusvööndi alumiste energiatasemetete vahel. See ulatub



Joon. 3—3. Energiavööndid pooljuhis. *a* — pooljuhi temperatuur on madal; *b* — pooljuhi temperatuur on kõrge.

kuni 10 elektronvoldini. Seetõttu ongi mittejuhil suur elektritakistus.

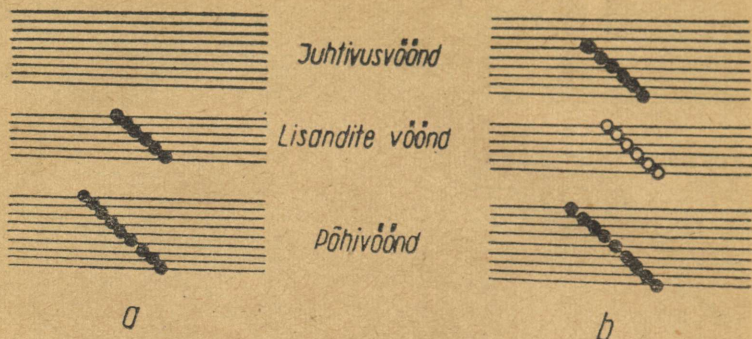
Kui elektrivool esineb elektronide voona, siis öeldakse, et elektrijuht on elektronjuhtivus, ionide liikumise puhul on tegemistioonjuhtivusega. Elektronjuhtivus on näiteks metallidel. Nad avaldavad elektronide liikumisele väikest takistust. Ioonjuhtivusega elektrijuhtideks on elektrolüüdid ja mõned soolad sulas olekus.

Dielektrikutel ilmneb elektronjuhtivus alles väga kõrge temperatuuril.

Elektrijuhtivuse mõttes osutuvad pooljuhid teatavasti juhtide ja mittejuhtide vahepealseteks. Pooljuhtidel esineb peamiselt elektron- ja aukjuhtivus, kuid on kaioonjuhtivusega pooljuhte.

Pooljuhtidel asuvad põhi- ja juhtivusvööndid üksteisele võrdlemisi lähedal (joon. 3—3, *a*). Seetõttu ilmneb nendel elektrijuhtivus juba küllaltki väikesel temperatuuri tõstmisel, kuigi madalal temperatuuril on nad võrdlemisi head dielektrikud.

Pooljuhtidel esinevat aukjuhtivust on võimalik seletada põhivööndi elektronide osavõtuga elektrivoolu tekkimisest, kui see vöönd muutub osaliselt vabaks osa elektronide juhtivusvööndisse ülehüppamise tagajärjel (joon. 3—3, *b*). Selle tõttu vabanevad põhivööndi mõned kõrgemad energiatasemed (joonisel 3—3, *b* on need märgitud rõngastega). Elektrivälja poolt antud energia arvel liiguvad nendele vabanenud kohtadele uued elektronid põhi-



Joon. 3—4. Doonori mõju pooljuhi energiavöönditele. *a* — pooljuhi temperatuur on madal; *b* — pooljuhi temperatuur on kõrge.

vööndi alumistelt energiatasemetelt, viimaste asemele aga elektronid veel madalamalt energiatasemetelt jne. Seega liigub ka siin iga elektroni alt vabanenud koht — auk — näiliselt vastu elektronide liikumise suunda, mille tõttu tekib mulje, et liigub positiivne elektrilaeng.

Pooljuhi elektrilised omadused sõltuvad suurel määral keemilistest lisanditest. Lisandid võivad muuta pooljuhi juhtivuse kas peamiselt elektron- või, vastupidi, peamiselt aukjuhtivuseks. Vastavalt sellele nimetatakse lisandeid kas doonoriteks või aktseptoriteks. Doonori aatomid annavad kergesti ära elektrone, aktseptori aatomid aga, vastupidi, haaravad põhiaine aatomitest elektrone.

Ühes täiendavate aatomite ja elektronidega toovad lisandid juurde ka vahepealsed lisandite energiatasemed, mis paiknevad põhi- ja juhtivusvööndite vahel ja millega elektronidel osutub kergemaks pääseda juhtivusvööndisse.

Joonisel 3—4 on toodud doonorlisandiga pooljuhi energiaaliline skeem, milles esineb peamiselt elektronjuhtivus. Nagu näeme, asuvad elektronidega täidetud lisandite energiatasemed päris lähedal juhtivusvöönditele. Nendelt vahepealsetelt energiatasemetelt pääsevad elektronid juba kergesti juhtivusvööndisse.

Vaatamata sellele, et tekib elektronjuhtivus, ei tarvitse põhivööndis veel tekkida auke, s. o. aukjuhtivus võib hoopis puududa.

Tuleb silmas pidada, et doonori kontsentratsioon pool-



Joon. 3—5. Aktseptori mõju pooljuhi energiavöönditele. *a* — pooljuhi temperatuur on madal; *b* — pooljuhi temperatuur on kõrge.

juhis on sedavõrd väike, et ühe doonoraatomi juurde tekkinud auk ei saa liikuda teise doonoraatomi juurde. Elektron aga saab juhtivusvööndis vabalt liikuda. Seetõttu tekibki elektronjuhtivus. Kui aga elektroni ergutatakse põhivööndist, siis sinna tekkinud auk saab liikuda naaberaatomi juurde, põhjustades samaaegselt elektronjuhtivusega ka aukjuhtivust.

Aktseptorlisandi korral tekib samuti vahepealseid lisandite energiatasemeid, mis asuvad põhivööndi lähedal (joon. 3—5), kus on vabu auke.

Kui temperatuur pooljuhis tõuseb, siis pääsevad elektronid põhivööndist lisandite vööndisse, mille tõttu põhivööndis tekib suur hulk auke. Need võivad vabalt liikuda, põhjustades aukjuhtivust.

### Hämmastav avastus: külm kaotab takistuse

Hollandi füüsik Heike Kamerlingh Onnes (1853—1926), kes uuris elavhõbeda juhtivust väga madalatel temperatuuridel, avastas 1911. a. huvitava nähtuse. Elavhõbeda temperatuuri alandamisel vähenes pidevalt ka selle elektritakistus. Nii jõuti  $4^{\circ}\text{K}$  lähedale. Elavhõbeda takistus oli veel täiesti mõõdetav. Ent kui edasisel jahutamisel saavutati  $4,12^{\circ}\text{K}$ , kadus takistus täiesti. See oli üsna ootamatu

ning hämmastav avastus ja tekitas teadlaste seas suurt elevust.

Takistuse vähenemine tähendab juhtivuse suurenemist. Takistuse vähenemine alla mõõdetava suuruse tähendab praktiliselt juhtivuse suurenemist lõpmatuseni. Seepärast nimetatigi nähtus ülijuhtivuseks. Ülijuhtivus avastati peagi ka teistel metallidel, nagu plii, alumiiniumil, titaanil, tsingil, tehneetsiumil, niobiumil jt., kokku 23 metallil. Neid metalle hakati nimetama ülijuhtideks.

Igal ülijuhil on teatav kindel temperatuur, nn. ülemineku- ehk kriitiline temperatuur, mil tavaline juhtivus muutub hüppeliselt ülijuhtivuseks. Ülijuhtivus säilib kriitilise temperatuuri ja absoluutse nulli vahelises temperatuurivahemikus; kord esilekutsutud vool ei kao, kui on säilitatud ülijuhtivuse esinemiseks nõutav madal temperatuur.

Eespool nimetatud ülijuhtidel on järgmised kriitilised temperatuurid ( $^{\circ}\text{K}$ ):

hafnium	Hf	0,35	tallium	Tl	2,39
titaan	Ti	0,53	indium	In	3,37
kaadmium	Cd	0,54	tina	Sn	3,69
tsirkoonium	Zr	0,7	elavhõbe	Hg	4,12
tsink	Zn	0,79	vanaadium	V	4,3
reenium	Re	0,95	tantaal	Ta	4,38
gallium	Ga	1,06	lantaan	La	4,71
alumiinium	Al	1,14	plii	Pb	7,26
uraan	U	1,30	niobium	Nb	9,1
toorium	Th	1,37	tehneetsium	Tc	11,7

Ülijuhtidena esinevad ka mõnede tavaliselt mitte ülijuhtideks muutuvate metallide sulamid ja ühendid, nagu vismuti ja kulla sulam ( $\text{Au}_2\text{Bi}$ ), volframi ja molübdeeni ühendid süsinikuga, s. o. karbiidid ( $\text{MoC}$ ,  $\text{Mo}_2\text{C}$ ,  $\text{WC}$ ), ja ka mõned pooljuhid, nagu  $\text{CuS}$ , mis muutub ülijuhiks  $1,6^{\circ}\text{K}$  juures,  $\text{V}_3\text{Si}$ , mille kriitiline temperatuur on  $17^{\circ}\text{K}$ , jt. Suhelisel kõrgem kriitiline temperatuur on niobiumnitriidil  $\text{NbN}$  ( $23^{\circ}\text{K}$ ), niobiumi ja tina sulamil  $\text{Nb}_3\text{Sn}$  ( $18^{\circ}\text{K}$ ), niobiumkarbiidil  $\text{NbC}$  ( $10,1^{\circ}\text{K}$ ) ja niobiumil ( $9,1^{\circ}\text{K}$ ).

Ülijuhtivus on mitmesuguse kristallilise ehitusega ainetel. Aine struktuuri muutmine mõjutab mõnel juhul ka ülijuhtivust. Näiteks vismutil esineb ülijuhtivus kristallilisel modifikatsioonil, mis saadakse 20 000 at rõhu all.

Ülijuhtivuse võib kaotada metalli intensiivne magnee-

timine. Sama mõju on suhteliselt tugeval voolul (õigemini sellest tingitud tugeval magnetväljal). Kuid voolu vähenemisel või metalli jahutamisel ülijuhtivus taastub.

Ülijuhtivuse avastamise järel demonstreeriti selle abil tihti «igavest» voolu. Selleks valmistati tavaliselt pliist rõngas, mida jahutati tugevas magnetväljas (seda tekitas rõngale paigutatud mähis) alla  $7,26^{\circ}\text{K}$ . Seejärel katkestati mähise vooluring. Magnetvälja kadumine kutsus rõngas esile elektrivoolu. Voolu olemasolu tõendas rõnga ümber tekkinud magnetväli, mis püsis muutumatuna mitu päeva. Selline vooluga rõngas viidi kord Hollandist koguni Inglismaale ja demonstreeriti seal teaduslikul nõupidamisel.

Uurimised näitasid, et lisanditeta ülijuhhis (s. o. kui ülijuhtivusega metall on täiesti puhas) jookseb elektrivool mööda pinda. Metall nagu muutuks voolule läbimatuks, ja mitte üksi voolule, vaid ka elektri- ja magnetväljale. Nõrk magnetväli praktiliselt ei tungi ülijuhisse, viimane kujutab endast seega diamagnetilist ainet, mille magnetiline läbitavus on null. Ülijuhti ümbritseva nõrga magnetvälja jõujooned ainult puudutavad juhi välispinda, tungimata sellesse. See, samuti elektritakistuse täielik puudumine, ongi ülijuhtivuse iseloomustavaid tunnuseid.

Kuigi magnetväli praktiliselt ei tungi ülijuhisse, esineb ta mõningal määral siiski väga õhukeses pinnakihis, mille paksust hinnatakse mõnele tuhandikule millimeetrile. Ent selles pinnakihis on ka ülijuhtivusest tingitud elektrivool, mille ümber tekkiv magnetväli kompenseeribki pinnakihti tunginud välise magnetvälja. Pinnakihis esinev elektrivool takistab seega magnetvälja tungimist ülijuhisse. Kui juhis ilmnebki magnetväli, enne kui jahutamisega on jõutud kriitilise temperatuurini, siis ülijuhiks muutumisel surutakse see juhist välja.

Magnetvälja tugevus ei ole ülijuhi pinnal igal pool sugugi ühesugune. Magnetvälja tugevnemisel hakkab seepärast ülijuhtivus kaduma esmalt nendes punktides, kus magnetväli on tugevam. Neis punktides tungibki magnetväli ülijuhisse ja viimases tekivad erineva juhtivusega kihid: normaalse elektri juhtivusega kihid vahelduvad ülijuhtivate kihtidega. Selline üleminekuseisund puudub ainult pikkadel silindrikujulistel ülijuhtidel. Kuid nii käituvad vaid puhtad metallid, sulamitel on see üleminek palju komplitseeritum.

Kuidas siis seletada ülijuhtivust? Millest on tingitud, et madalal temperatuuril metalli elektritakistus kaob?

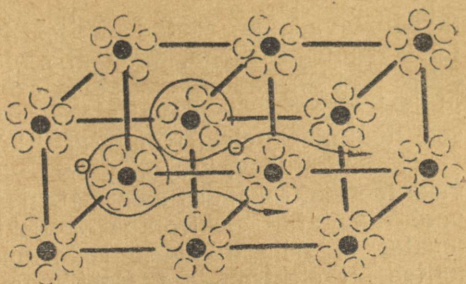
Kirjanduse andmetel võib seda seletada järgmiselt.

Välise elektrivälja sunnil hakkavad metalli kristallivõre ionide ümber tiirlevad elektronid nihkuma vastu elektrivälja. Kristallivõre sõlmedes asuvad positiivsed ionid avaldavad elektronidele tõmbejõudu; seepärast elektroni liikumise ajal ühe iooni piirkonnast teise muutub tema potentsiaalne energia perioodiliselt. Niisiis võiks metallide elektronjuhtivust käsitleda kui elektronide teatavat lainelist liikumist. Absoluutsel nullil ( $-273,16^{\circ}\text{C}$ ) peaksid ionid olema ideaalse kristallivõre sõlmedes paigal. Sellest tingituna peaks absoluutse nulli juures metallil puuduma ka elektritakistus. Tegelikult ei ole kristallivõre kunagi ideaalse ehitusega. Aines on ikka lisandeid, ka esinevad mehaanilised pinged, ja kõik see kokku põhjustab kristallivõre ebahürtluse. Elektronid, mis pörkavad ebahürtlases kristallivõres kokku ionidega, annavad nendele osa oma kineetilisest energiast, mistõttu ionid võnguvad ümber oma keskasendi ka absoluutsel nullil (joon. 3—6). Seepärast on enamikul metallidel ka siis väike elektritakistus.

On avaldatud arvamust, et ülijuhtideks muutuvatel metallidel kristallivõre ionide võnkumine ümber oma keskse asendi, mis esineb ka madalal temperatuuril, ei takista, vaid, vastupidi, soodustab elektronide edasilikumist. Elektronide laineline võnkumine nagu satuks resonantsi ionide võnkumisega, mistõttu elektronid liiguvad läbi elektrijuhis kristallivõre täiesti takistamatult.

Metallides, mis tavaliselt juhivad elektrit halvasti, mõjutavad kristallivõre ionid nende vahel liikuvaid vabu elektrone palju suuremal määral, kui see toimub elektrijuhtides. Seda enam peaks see mõjuavaldus ilmnema ülijuhtivuse tingimustes. Seepärast peaksid niisugused metallid eelduse kohaselt muutuma vastavatel tingimustel ülijuhtideks. Nii see tegelikult ongi. Kõik ülijuhtideks muutuvad metallid ei ole tavalistes tingimustes kuigi head elektrijuhid.

Ehkki ülijuhtivus avastati 1911. a., puudus ligi pool sajandit selle nähtuse autoriteetne seletus. Rahuldav teooria ülijuhtivuse kohta õnnestus luua ameerika füüsikutel J. Bardeenil, L. N. Cooperil ja J. R. Schriefferil, palju täielikumal kujul akadeemik N. Bogoljubovil alles 1957. a.



Joon. 3—6. Juhi kristallivõre sõlmedes asuvad ioonid on pidevas soojusliikumises ümber oma keskse asendi. Elektronid liiguvad elektrivälja sunnil läbi kristallivõre.

Selle teooria aluseks sai akadeemik P. Kapitsa poolt 1938. a. avastatud vedela heeliumi ülivoolavuse nähtus. Jahutatuna peaaegu absoluutse nullini ( $2,19^{\circ}\text{K}$ ), kaotab vedel heelium täielikult viskoossuse ja voolab ilma iga-suguse takistusega läbi kõige kitsamate pilude ja kapillaaride. Ilmnes, et ülivoolavusel ja ülijuhtivusel on palju ühiseid jooni. Oletati, et ülijuhtivuses etendavad tähtsat osa metallide vabatest elektronidest moodustuvad paarid, mis oma käitumiselt sarnanevad ülivoolavuse olukorras heeliumi aatomitega. Metallis nagu tekiks elektronipaaride ülivoolavus.

Ühes oma 1958. a. ilmunud artiklis kirjutas akadeemik N. Bogoljubov:

«Vastupidiselt tavalisele vedelikule või gaasile, kus üksikud osakesed liiguvad kaootiliselt, on ülivoolava vedeliku liikumisel korrastatud iseloom. See on tingitud ülivoolava vedeliku osakeste vastastikusest mõjust. Eriti märgatav on see vastupidiste kiirustega osakestel. Selle õige arvestamine valmistas ülivoolavuse teooria loomisel suuri raskusi, nii nagu see oli ka ülijuhtivuse teooria puhul...

Seni valitses füüsikas üldine arvamus, et vaevalt saab olla sügavat sarnasust heeliumi aatomitest koosneva süsteemi ja elektronidest koosneva süsteemi vahel...

Võiks kujundada järgmise üldise pildi elektronide käitumisest ülijuhtivuse olukorras. Metallis vabad elektronid

moodustavad siin seotud «kollektiivi», mis oma omadustelt sarnaneb sellega, mida ülivoolavuse teoorias nimetatakse kondensaadiks... Sellise «kollektiivi» liikumine on üldiselt püsiv. Täiendaval stabiliseerimisel magnetväljaga see liikumine (elektrivool metallis) ei kohta takistust.»

N. Bogoljubov, kes oli varem välja töötanud ülivoolavuse teooria, rakendas oma matemaatilist meetodit ka eespool nimetatud elektronide «kollektiivi» tekkimise tingimustes ja selle liikumise iseloomu analüüsimiseks. Ta näitas, et elektronide vastastikune tõukumine ei takista nende sidumist «kollektiivi» sel määral, nagu seda arvasid ameerika füüsikud. Toetades väidet, et elektronid grupeeruvad paaridena, said nad rea valemid ja suurusi, mis iseloomustavad ülijuhtivuse olukorda. Samad valemid mõningate uute järeldustega annab ka N. Bogoljubovi palju rangem teooria:

Ülijuhtivuse nähtuse kohest ära kasutamist tehnikas takistas esimeste avastatud ülijuhtide väga madal kriitiline temperatuur, mille saavutamine oli seotud oluliselt suurte raskustega. Kuid pärast nioobiumnitriidi NbN avastamist, mille kriitiline temperatuur on  $23^{\circ}\text{K}$ , s. o. tunduvalt kõrgem kui teistel tuntud ülijuhtidel, võib juba kindlalt väita, et ülijuhtide rakendamine on reaalne. Toodetakse ju tööstuslikult vedelat vesinikku, milleks on nõutav veel madalam temperatuur ( $20,5^{\circ}\text{K}$ ).

Vähemalt ühel alal on ülijuhtivus leidnud endale juba kindla koha — arvutustehnikas. Ülijuhtivuse sõltuvus magnetväljast ja ühes sellega ka ülijuhti läbivast voolust võimaldas ameerika füüsikutel luua sellekohaseid võimendusseadiseid, nn. krüotrone, mis on kaasaegse elektronarvuti mäluseadme vajalikeks elementideks.

Ülijuhtivuse abil on võimalik muundada ka soojusenergiat vahetult elektriliseks. Vastava seadme skeem oleks üldiselt järgmine. Ülijuhtiv silinder, mille ümber on mähis, asub püsivmagnetite vahel. Magnetvälja jõujooned ei tungi silindrisse, vaid ümbritsevad seda. Silindri temperatuuri tõstmisel ülijuhtivus kaob ja jõujooned tungivad kohe silindrisse. Samal hetkel indutseerub ka silindri ümber olevas mähises elektromotoorne jõud. Kui silindri temperatuuri vastava määrani alandada, siis ülijuhtivus taastub ja magnetvälja jõujooned surutakse silindrist uuesti välja. Seejuures läbivad jõujooned mähist ja viimases indutseerub jällegi elektromotoorne jõud. Kui

silindri temperatuuri perioodiliselt muuta, siis ka magnetväli kord läbib silindrit, kord surutakse sellest välja. Magnetvälja niisuguse perioodilise muutumise tõttu indutseerub mähises ka perioodiliselt muutuv elektromotoorne jõud ning vooluringi sulgemisel ilmneb selles vool. Seega soojus, millega saavutatakse silindri ülijuhtivuse perioodiline kadumine, muundub mähise vooluringis vahetult elektrienergiaks.

### Elektrivool juhtivais vedelikes

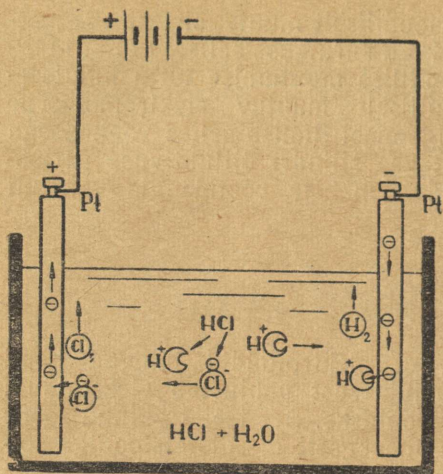
Eespool kõnelesime, et elektrolüüdid juhivad hästi elektrit, et nende elektrijuhtivust põhjustab elektrolüüdi molekulide lagunemine ionideks. Sel teel tekkinud ioone on lahuses väga palju. Üheaegselt dissotsiatsiooniga toimub elektrolüüdis ka vastupidine protsess — isenimeliste ionide ühinemine neutraalseteks molekulideks. Mõlema protsessi kiirus kujuneb lõpuks võrdseks, nii et ajaühikus ionideks lagunevate molekulide arv võrdub samal ajal isenimeliste ionide ühinemisel tekkivate molekulide arvuga. Seejuures on isenimeliste ionide arv lahuses igal hetkel võrdne ja välispidiselt on elektrolüüt seepärast neutraalne.

Katsed näitavad, et elektrolüütide molekulide lagunemisel annavad metallid ja vesinik positiivseid, molekulide ülejäänud osad aga negatiivseid ioone.

Elektroodide külge ühendatud vooluallikas tekitab elektroodidevahelises elektrolüüdis elektrivälja. Selles leiduvad ionid hakkavad välja toimel liikuma: positiivse laenguga ionid — katioonid — suunduvad negatiivse katoodi poole, negatiivse laenguga ionid — anioonid — aga positiivse anoodi poole. See ionide kahesuunaline liikumine moodustabki elektrolüüsil elektrolüüti läbiva elektrivoolu. Ionide liikumise kiirus elektrolüüdis on sõltuvalt ainest 0,0003—0,004 cm/s.

Kui võtta elektrolüüdiks näiteks lahjendatud soolhape (HCl) ja elektroodideks platinast plaadid ning ühendada need vooluallikaga, näiteks galvaanielementide patareiga, siis ilmuvad plaatidele kohe gaasimullid, mis hiljem tõusevad vedeliku pinnale ja kaovad.

Teatavasti laguneb soolhappe molekul vesilahuses vesinik- ja kloorioonideks ( $\text{HCl} \rightarrow \text{H}^+ + \text{Cl}^-$ ), kusjuures



Joon. 3—7. Soolhappe elektrolüüs.

vesinikioon on positiivne, kloorioon aga negatiivne. Kuni elektrolüüti ei läbi elektrivool, liiguvad ioonid korrapäraselt. Niipea aga, kui elektroodid on ühendatud vooluallikaga, hakkavad katioonid liikuma katoodile, anioonid aga anoodile.

Meie katses liiguvad vesinikioonid katoodile, liituvad seal vabade elektronidega ja muutuvad seetõttu neutraalseteks vesiniku aatomiteks, mis ühinevad molekulideks, tõusevad elektrolüüdi pinnale ja sealt õhku (joon. 3—7). Samal ajal liiguvad negatiivsed kloorioonid anoodile, annavad siin oma liigse elektroni ära, muutuvad neutraalseteks kloori aatomiteks, mis ühinevad samuti molekulideks, ja lahkuvad siis gaasina elektrolüüdist.

Kui soolhappe asemel võtta elektrolüüdiks mõne metalli soola vesilahus, näiteks vasevitriol ( $\text{CuSO}_4$ ), siis elektrolüüsimisel eraldub anoodil gaas, katood aga kattub vasega. Kui kaaluda katoodi enne ja pärast katset, saame kindlaks teha elektrolüüsi ajal katoodile kandunud vase hulga.

Uurides voolu keemilist toimet, avastas M. Faraday, et elektrolüüsi ajal elektroodil eraldunud aine hulk on võrdeline elektrolüüti läbinud laenguga, s. o. voolu tugevuse ja ajaga.

Elektrilaengud, mida kannavad elektrolüüsil aine ioo-

nid, on ikka võrdsed täisarv korda võetud minimaalse elektrilaenguga  $1,6 \cdot 10^{-19}$  kulonit.

Järelikult on selline elektrilaeng ( $1,6 \cdot 10^{-19}$  kulonit) kõige väiksem, mis elektrolüütides üldse esineb. Teatavasti on niisama suur ka elektroni elektrilaeng.

Metallisoolade elektrolüüsil eralduvad metallid alati katoodil, sadestudes seal ühtlase ja tiheda kihina. Tööstusharu, mis tegeleb metallide elektrolüütilise sadestamisega metallisoolade vesilahustest, nimetatakse galvanotehnikaiks. Sõltuvalt metalli sadestamise eesmärgist ja sadestatava kihi paksusest jaguneb galvanotehnika kaheks alaliigiks: galvanosteegiaks ja galvanoplastikaks.

Galvanosteegia tegeleb metallesemete katmisega teise metalliga, galvanoplastika — metalläratõmmete, -klišeede, -vormide, -kujude jm. valmistamisega. Elektrolüüsi kasutatakse ka puhaste metallide, gaaside ja mitmesuguste ainete tootmiseks.

Elektrolüüsimisel oma soolade vesilahustest sadestuvaid metalle on üle paarikümne, sagedast kasutamist galvanotehnikas leiavad neist peamiselt vask, nikkel, kroom, kaadmium, tsink, hõbe ja kuld. Elektrolüüsimisel saadava metalli sadestis esineb kristalsel kujul. Mida väiksemad on sadestatava metalli kristallid, seda siledam ja läikivam on sadestisega kaetud pind.

Galvanotehnilistest menetlustest kasutatakse peamiselt vasetamist, nikeldamist, kroomimist, tsinkimist ja hõbetamist. Vanim neist on vasega katmine. Tänapäeval on galvanosteegia tähtsamaid alasid nikeldamine ja kroomimine. Igapäevases elus kasutatavad esemed muudetakse nikliga katmise teel vastupidavaks ja nägusaks.

1836. a. ilmus Peterburi Akadeemia väljaannetes vene teadlase M. H. Jacobi kirjutis mälestusrahade ja muude reljeefsete esemete vormimisest elektrivoolu abil. Pärast põhjalikku uurimist avaldas Jacobi tulemused raamatus «Galvanoplastika», mis ilmus 1840. a. Oma teadusliku tööga rajas ta tolle aja kohta täiesti uue galvanotehnilise ala.

Galvanoplastikas esinevad samad nähtused, mis galvanosteegiaski, erinevus seisneb ainult selles, et galvanoplastika korral peab sadenev kiht alusest kergesti eralduma. Nagu eespool juba tähendatud, kasutatakse galvanoplastikat klišeede, kujude, grammofoniplaatide, torude, autoradiaatorite jm. tootmisel.

Tähtsaim galvanoplastika rakendusala on klišeede valmistamine. Originaal, millest tehakse galvaaniliselt tõmmis, on tavaliselt vaselõige või söövitus vasel. Originaal pressitakse suure surve all vastu vaha- või tinaplaati. Sel teel saadakse negatiiv. Vahaplaadid kaetakse peene grafiiditolmuga, mille õhuke kiht teeb vahapinna juhtivaks. Negatiivile sadestatakse vaske 1,5—2 mm paksuselt. Vaha eemaldatakse ja kliše ongi valmis. Suurema arvu tõmmiste saamiseks kaetakse negatiiv algul 5—10 mikroni paksuse niklikihiga ja alles sellele sadestatakse vask. Veel vastupidavamad on kroomitud klišeed.

Grammofoniplaadide valmistamisel lõigatakse poleeritud safiiri abil erilise koostisega vahaplaadile salvestatava ettekande helidele vastava lainelisusega spiraaljoon. Pärast plaadi puhastamist lõikelaastudest kaetakse see grafiidiga. Seejärel sadestatakse plaadile galvaaniliselt vaske. Kujunenud vaskplaat eemaldatakse kuumas vees vahaplaadilt. Saadud matriits poleeritakse ning kõva pinna saavutamiseks nikeldatakse ja kroomitakse. Seda esialgset matriitsi — originaali — hoitakse alal uute matriitside valmistamiseks, millega siis pressitakse plastmassist grammofoniplaate. Esialgne matriits paigutatakse uue positiivi saamiseks vormi ja valatakse üle parafiini ja vaha seguga. Saadud vahaplaadilt võetakse eespool kirjeldatud viisil uus negatiiv, millega valmistataksegi grammofoniplaate.

Vasktorude galvaanilisel tootmisel sadestatakse elektrolüüsivannis pöörlevale valtsile vaske. Et vasktoru saaks valtsilt kergemini ära tõmmata, grafiiditakse valts enne katmist.

Autoradiaatorite tootmisel kaetakse radiaatorikujuline augustatud pliiplekk galvaaniliselt vasega. Kui on saadud soovitud paksusega vasesadestis, kuumutatakse radiaatorit ja sulatatakse sellest plii välja. Sellised radiaatorid on vastupidavad ja nende valmistamine lihtne.

### **Polarisatsiooninähtus**

Kui elektrolüüsivanni valada lahjendatud väävelhapet ja sulgeda vooluring, milles olgu ka ampermeeter, siis võib kohe veenduda, et voolu ei teki. Kui ampermeetri asemel ühendada vooluringi galvaanielement või mõni muu

alalisvooluallikas, siis algab vannis kohe väävelhappe elektrolüüs.

Elektrivälja toimel liiguvad positiivsed vesinikioonid  $H^+$  väävelhappe lahuses anoodilt katoodile, negatiivsed happejäägi ionid  $SO_4^{--}$  aga katoodilt anoodile. Positiivsed vesinikioonid, mis puutuvad kokku katoodiga, haaravad igaüks ühe elektroni ja, muutudes neutraalseteks vesiniku aatomiteks, eralduvad katoodil. Negatiivsed happejäägi ionid annavad anoodiga kokku puutudes ära oma negatiivse laengu ja muutuvad neutraalseteks aatomigruppideks  $SO_4$ . Kuid viimased ei saa sellisel kujul püsida ja astuvad seepärast kohe ühendusse vee molekulidega, moodustades väävelhappe molekule ja hapniku aatomeid vastavalt skeemile



Tekkinud hapniku aatomid ühinevad molekulideks  $O_2$ . Seega eraldub elektrolüüsi tõttu anoodil hapnik, katoodil aga vesinik. Need gaasid ei astu plaatinaelektroodidega ühendusse, vaid katavad neid gaasimullidena.

Kõrvaldame vooluringist vooluallika ja ühendame selle asemele uuesti ampermeetri. Nüüd näitab mõõteriist elektrivoolu, kusjuures voolu suund on vastupidine sellega, mis ta oli välise vooluallika puhul. Elektrolüüsivann on nüüd muutunud vooluallikaks.

Gaasimullidega kaetud elektroodid moodustavad uue elektrokeemilise süsteemi hapnik—väävelhappe—vesinik, mis sisuliselt kujutab endast galvaanielementi. Anoodiks on selles elemendis vesinikuga kaetud elektrood, katoodiks aga hapnikuga kaetud elektrood.

Elektroodide polaarsuse muutumist nendel eralduvate ainete toimel nimetatakse elektroodide polarisatsiooniks, seejuures tekkivat elektromotoorset jõudu aga polarisatsiooni elektromotoorseks jõuks.

Elektroodil, mis on kaetud hapnikuga ja oli varem ühenduses vooluallika positiivse klemmiga, on nüüd negatiivne laeng ja sellel hakkab eralduma vesinik. Vesinikuga kaetud elektroodil seevastu on nüüd positiivne laeng ja eraldub hapnik. Seega kulgeb protsess elektroodide suhtes vastupidiselt sellega, mis toimus elektrolüüsi ajal.

Nüüd on mõlemal elektroodil hapnik ja vesinik, sest hapnikuga kaetud elektroodilt eraldub vesinik ja vesinikuga kaetud elektroodilt hapnik. Mõlema elektroodi juures

ühinevad hapnik ja vesinik veeks. Polarisatsioonivool esineb seni, kuni kestab hapniku ja vesiniku ühinemine.

Katsed näitavad, et tekkiv vool nõrgeneb väga kiiresti. Ühes sellega kaovad elektroodidelt gaasimullid. Koos viimase gaasimulliga kaob ka polarisatsioonivool. Kui tahaksime samast elektrolüüsivannist uuesti voolu saada, siis peaksime selle ühendama vooluallikaga.

Ainult ühesuguste elektroodide eelnev muutmine erinevateks elektrienergia abil (antud juhul platinaplaatide katmine hapniku ja vesinikuga) võimaldab muuta seadist galvaanielemendi-taoliseks alalisvooluallikaks.

Analoogiline nähtus tekib ka galvaanielementides.

Volta elemendi korral eraldub positiivsel elektroodil vesinik, mis katab elektroodi ja põhjustab polarisatsiooni. Polarisatsiooni elektromotoorne jõud kutsub esile voolu, mis, olles vastupidise suunaga, nõrgendab galvaanielemendi voolu.

Et gaasid on väga halvad elektrijuhid, siis, eraldudes elektroodidel, suurendavad nad ka elemendi sisetakistust, mis omakorda nõrgendab elemendi voolu.

Õeldust selgub, et polarisatsioon on galvaanielementides kahjulik ja seega ebasoovitav nähtus. Seda püütakse vältida peamiselt keemiliste vahenditega, mida nimetatakse depolarisaatoriteks. Viimaste ülesandeks on kõrvaldada elektroodil eralduv gaas, sidudes seda keemiliselt.

Olles küll ebasoovitav galvaanielementides, leiab polarisatsioon siiski ka kasulikku rakendamist, nimelt elektrienergia salvestamiseks.

Elementidetaolisi seadiseid, mis põhinevad polarisatsioonil, nimetatakse teist liiki elementideks ehk akumulaatoriteks (ladinakeelsest sõnast *accumulo* — koguma, kuhjama). Akumulaatorid on seega vooluallikad, millesse on võimalik salvestada elektrienergiat, muundades selle keemiliseks energiaks, et seda vajaduse korral sealt jälle elektrienergiana tagasi saada. Elektrienergia salvestamise protsessi nimetatakse akumulaatori laadimiseks, elektrienergia tagasisaamist — tühjendamiseks.

Laetud akumulaatori elektroodide ühendamisel elektrienergia tarbijaga tekib vastupidine reaktsioon, mis kutsubki akumulaatoris esile laadimisvooluga vastupidise elektrivoolu — tühjendamisvoolu. See võib kesta kuni keemilise energia tagavarade täieliku lõppemiseni akumulaatoris. Siis on taastunud esialgne keemiline olukord ja aku-

mulaatorit tuleb uuesti laadida välisest vooluallikast saadava alalisvooluga.

Alalisvooluallikatena leiavad akumulaatorid tänapäeval kaunis laialdast kasutamist. Nendes sisalduvate aktiivainete järgi liigitatakse nad kahte suuremasse rühma: happe-(plii-) ja leelisakumulaatorid (raudnikkel-, kaadmiumnikkel- ja hõbetsinkakumulaatorid).

## Gaaslahendus

Ajaloolisest seisukohast on gaaslahendusega, s. o. elektrivoolu gaasidest läbiminekuuga seotud nähtuste uurimine osutunud väga tähtsaks etapiks elektrotehnika üldises arengus. Esialgne oletus elektri atomistliku ehituse kohta, mis tekkis Faraday elektrolüüsiseaduste põhjal, muutus gaasides toimivate elektriliste nähtuste uurimisel saavutatud tulemuste tõttu hiljem kindlaks veendumuseks. Niipea kui tehti kindlaks elektri koosnemine elementaarlaengutest, hakkas võrsuma elektrotehnika uus haru — elektroonika, mis on tänapäeval muutunud määravaks teguriks tehnika edasises arengus.

Tavaliselt ei juhi gaas elektrit, ta on täielik isolaator. Gaasi aatomid ja molekulid on elektriliselt neutraalsed. Elektrivool aga kujuneb vabade elektrilaengute liikumisest elektriväljas. Järelikult, et muuta gaasi elektrijuhiks, tuleb selles tekitada elektrilaenguga osakesi — ioone.

Tõsi, kosmiliste kiirte, samuti radioaktiivsete ainete kiirguse toimetel mõned gaasimolekulid laguvad elektronideks ja positiivseteks ioonideks. Seepärast tavaliselt leidubki nii õhus kui ka igas muus gaasis väike hulk laetud osakesi.

Ioonide tekitamist gaasis nimetatakse gaasi ioniseerimiseks. Ioniseeritud gaas on hea elektrijuht.

Väliste ionisaatorite toimetel, milleks on eespool nimetatud kosmiline või ka radioaktiivne kiirgus, tekib gaasis keskmiselt igas aja- ja ruumiühikus teatav võrdne hulk ioone ja elektrone. Kokkupõrkamisel osa ioone ja elektrone rekombineerub, s. o. ühineb uuesti, moodustades neutraalseid molekule.

Ioniseerumise ja rekombineerumise tagajärjel saavutatakse tasakaaluolukord, s. o. gaasi ruumiühikus säilib pidevalt teatav väike arv laetud osakesi.

Kõik gaasi koostisosad, nii laenguga osakesed kui ka neutraalsed molekulid, on korrapäratus liikumises, kusjuures nad alatasa pörkavad üksteisega kokku. Osakeste liikumine kahe kokkupörke vahel on sirgjooneline ja seda teekonna lõiku nimetatakse vaba teekonna pikkuseks. Gaasiosakeste kiirused ja vaba teekonna pikkused on väga erinevad, seepärast saab gaasi kohta tervikuna juttu olla vaid keskmisest kiirusest ja vaba teekonna pikkusest, kusjuures viimane on pöördvõrdeline gaasirõhuga. Mida väiksem on rõhk, seda suurem on vaba teekonna pikkus.

Kui hõrendatud gaasiga täidetud klaastoru otstesse paigutatud elektroodid pingestada, s. o. ühendada pingeallikaga, siis omandavad laetud osakesed klaastorus suunatud liikumise ja vooluringis ilmneb vool. Elektrivool gaasis moodustabki gaaslahenduse.

Väliste ionisaatorite vahendusel toimuvat gaaslahendust nimetatakse vahendatud lahenduseks.

Eespool nimetatud loomulike väliste ionisaatorite toimel tekkiv vool on umbes  $10^{-12}$  —  $10^{-8}$  A.

Gaasi ioniseerimiseks tuleb talle anda energiat, mille toimel mõnest molekuli koosseisu kuuluvast aatomist vabaneb elektron, kuna molekuli ülejäänud osa moodustab positiivse iooni. Vabanenud elektron liitub mõnikord neutraalse molekuli koosseisu kuuluva aatomiga, mistõttu neutraalne molekul muutub negatiivseks iooniks.

Ioniseerimiseks vajalik minimaalne energia, mida nimetatakse ioniseerimisenergiaks, on igal gaasil konstantne ja sõltub ainult selle liigist.

Positiivsed ioonid hakkavad elektrivälja sunnil liikuma katoodi, negatiivsed ioonid ja elektronid aga anoodi poole. Pinge tõstmisel kiirendab elektrivälja laetud osakesi ikka rohkem ja rohkem. Et elektronidel on väiksem mass, siis omandavad nad ionidest tunduvalt suurema kiiruse. Alates teatavast pingest saavad vaba teekonna pikkusel kiirendatud elektronid energia, mis on võrdne ioniseerimisenergiaga, ja ioniseerivad järgmisel kokkupörkel gaasi molekule. Nii need elektronid kui ka ioniseerimisel vabanenud uued elektronid võivad mõne järgmise vaba teekonna ulatuses jälle ioniseerida uusi molekule. Sel teel vabaneb üha enam uusi elektrone ning tekib ka positiivseid ioone. Elektronide vabanemine kulgeb kasvava lavii-nina, mis liigub anoodi poole ja lõpeb alles siis, kui kõik laviiini moodustavad elektronid on jõudnud anoodile.

Uue laviini tekkimiseks peab leiduma katoodi läheduses uus lahendust algatav elektron, mis siis jällegi tekitab suure kiirusega anoodile liikuva laviini. Lahenduse vool on küll mõnevõrra tugevnenud, kuid lahendus jääb ikkagi vahenduslikuks.

Samal ajal liiguvad positiivsed ioonid katoodi suunas suhteliselt aeglaselt. Nende kokkupõrked gaasi molekulidega ei tekita ionisatsiooni. Alles teatavast pingest alates on ionide kiirus küllaldane, et vabastada katoodiga kokkupõrkamisel sellest uusi elektrone, mis siis anoodi poole liikudes põhjustavad uusi laviine. Siit alates ei sõltu gaaslahendus enam välistest ionisaatoritest, vaid areneb iseisvalt edasi. Seepärast seda nimetataksegi vahendituks gaaslahenduseks.

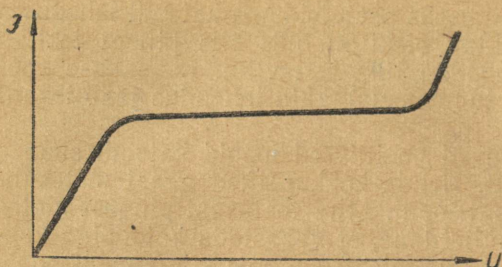
Teatavasti tekib ka elektrolüütides elektrivool ionide liikumisel elektriväljas. Kuid nende kahe nähtuse vahel on olulised erinevused. Kõigepealt ioonid ise. Elektrolüütides esinevad ioonid kujutavad endast alati laenguga aatomeid või aatomite rühmi, gaaside ioonid aga peamiselt kas ioniseeritud molekule või molekulide gruppe, mis liituvad positiivse või negatiivse iooniga. Seetõttu on suur erinevus ka ionide massis. Ioniseeritud gaasi ionide mass on märksa suurem kui elektrolüüdi ionide mass.

Elektrivoolu korral gaasis, s. o. gaaslahendusel ei esine elektrolüüsinähtust. Ka see näitab, et gaasi ionisatsioon on teise iseloomuga kui molekulide elektrolüütiline disotsiatsioon.

Gaaside parimateks ionisaatoriteks on röntgenikiired ja radioaktiivsete ainete kiirgus. Ent gaasi on võimalik ioniseerida ka ultraviolettkiirgusega, mõningate keemiliste reaktsioonidega ja intensiivse kuumutamisega.

Esineb ka järgmine gaasi ioniseerimise viis. Kui elektron või ioon, millele elektriväli annab suure kiiruse, põrkab kokku molekuliga, ei ioniseeri ta seda, vaid ergastab. Selliselt ergastatud molekul annab saadud energia hetk hiljem jälle vabaks. Kiirgusena vabanenud energia kvandi (footoni) neelab aga kohe mõni teine neutraalne molekul, mille tõttu see ioniseerub. Footoni suure kiiruse tõttu tekitab selline molekuli fotoionisatsioon gaaslahenduse piirkonnas suure juhtivusega kanaleid.

Katsed näitavad, et ioniseerida on võimalik ka selliseid gaase, mille molekulid koosnevad vaid ühest aatomist (heelium, neon ja argoon).



Joon. 3—8. Gaaslahenduse voolu-pinge kõver.

Vahendusliku elektrijuhtivuse korral, mis esineb näiteks elektrodide vahel asuva gaasi kiiritamisel röntgenikiirtega, saadakse tunnusjoonena voolu-pinge kõver, mille algosa on kaldsirge (joon. 3—8). Pinge edasisel tõstmisel sirge kõverdub ja muutub siis teatavas piirkonnas peaaegu horisontaalseks. See tähendab, et vaatamata pinge suurenemisele on vool selles piirkonnas enam-vähem püsiv. See on nn. küllastusvool. Püsiva voolu kujunemist seletatakse järgmiselt.

Protsessi algul kasvab pinge tõusuga ka lahenduspiirkonda ühes ajaühikus läbivate ionide arv, s. t. tugevneb vool, sest väljatugevuse suurenemine põhjustab ka ionide kiiruse suurenemise. Seejuures ei saa ajaühikus lahenduspiirkonda läbivate ionide arv ületada samas ajaühikus juurdetekkivate ionide arvu. Küllastusvool ongi kõigi tekkivate ionide poolt moodustatav elektrivool.

Vaatamata pinge tõusule jääb küllastusvool esialgu endiseks. Ent pinge tõstmisel suuremal määral hakkab lõpuks ka vool äkki tugevnema — toimub üleminek nn. huumlahendusele. See näitab, et ionide arv on järsult suurenenud. Põhjuseks on elektrivälja tugevuse kasv. Elektriväli annab nüüd mõnedele ionidele sedavõrd suure energia ja ühes sellega ka kiiruse, et ionide kokkupõrkamisel neutraalsete molekulidega viimased ioniseeruvad. Nüüd ei määra ionide üldist arvu enam välised tegurid, vaid elektriväli, mis põhjustabki edasist ionisatsiooni. Gaasi elektrijuhtivus ja koos sellega ka ionisatsioon muutub nüüd vahendituks.

Vahenditu ehk sõltumatu ionisatsioon ja vastavalt sellele ka gaaslahendus võib esineda mitmel erineval kujul,

näiteks huumlahendusena, kaarlahendusena, sädelahendusena ja koroonalahendusena.

**Huumlahendus.** Kui gaasi tihedus elektroodidevahelises ruumis on väike, siis võib positiivsete ionide kiirus elektroodidele küllaldase pinge rakendamisel tõusta lahenduspiirkonnas sedavõrd suureks, et katoodiga kokku põrgates löövad nad viimasest välja elektrone, mis anoodi poole lennates ioniseerivad teel gaasi molekulile. Sel viisil tekkivat gaaslahendust nimetatakse huumlahenduseks.

Huumlahenduse jälgimiseks võetakse eespool nimetatud klaastoru, mille otstesse on sulatatud elektroodid. Viimased ühendatakse kõrgepingeallikaga ja klaastorust hakatakse õhku välja pumpama. Kui õhurõhk torus on umbes 100 mm Hg, siis ilmub elektroodide vahele kitsas roosakaslilla helendav riba. Hõrenduse edasisel süvendamisel see riba laieneb ja helendus täidab varsti peaaegu kogu toru. Õhurõhk on seejuures vaid 1—2 mm Hg. Klaastorus võib näha mitmesuguse helendusega piirkondi. Katoodihelenduse ehk esimese kihi lähedal asuvat mittehelendavat ruumiosa nimetatakse katoodi pimeruumiks (ka Crookesi pimeruumiks), sellele järgnevat helendavat osa katoodi teiseks kihiks ehk negatiivseks kiirguseks, järgmist mittehelendavat ruumiosa anoodi pimeruumiks (ka Faraday pimeruumiks), kuna ülejäänud, anoodini ulatuvat helendavat gaasisammast nimetatakse positiivseks helendavaks sambaks ehk lihtsalt anoodisambaks.

Sõltuvalt torus valitsevast õhurõhust võib anoodisammast jaotuda tumedate vahedega kihtideks. Sel korral nimetatakse gaaslahendust kihiliseks huumlahenduseks.

Huumlahenduse helenduse kutsuvad esile elektronid, mis anoodi poole lennates põrkavad teel kokku gaasi molekulidega, ioniseerides ja ergastades viimaseid.

Jälgides potentsiaali elektroodidevahelises ruumis anoodist katoodini võib täheldada järgmist: piki anoodisammast langeb potentsiaal vähe, ka katoodi teise helendava kihi kohal on muutus väike, kuna katoodi pimeruumi kohal esineb järsk potentsiaali langus (joon. 3—9).

Huumlahenduse kujunemise järel on torus palju elektrone ja positiivseid ioone. Elektronid moodustavad elektronvoolu, ioonid agaioonvoolu. Kokku saamegi gaaslahenduse puhul esineva elektrivoolu.

Et iooni mass on palju suurem elektroni massist, siis liiguvad ioonid palju aeglasemalt kui elektronid. Kogu-

nedes moodustavad nad tiheda positiivse ruumlaengu võrdlemisi katoodi lähedal; see ulatub isegi üle katoodi pimeruumi. Just siin, kus ka elektrivälja tugevus on kõige suurem, on ionide kontsentratsioon eriti suur. Positiivsed ionid saavad siin suure kiiruse ja ühes sellega kineetilise energia. Langedes katoodile kutsuvad nad esile sekundaaremissiooni. Katoodilt lahkuvad elektronid saavad tugevas elektriväljas samuti suure kiiruse ja koos sellega gaasi molekulide ioniseerimiseks vajaliku energia. Katoodi pimeruumi läbimisel nad ioniseerivadki kokkupõrkamisel gaasi molekule, tekitades suurel hulgal positiivseid ioone ja elektrone. Katoodi teise helendava kihini jõudmisel on elektronide kiirus seepärast palju väiksem. Need suhteliselt aeglasel elektronid ei ioniseeri enam kokkupõrkamisel gaasi molekule, küll aga ergastavad seda tõhusamalt gaasi aatomeid. Elektrone on siin ka palju rohkem kui katoodi pimeruumis. Rohkearvuliste kokkupõrgete tagajärjel ilmneb katoodi teises helendavas kihis intensiivne valguskiirus.

Sellest piirkonnast lahkuvate elektronide kiirus ja vastavalt sellele ka kineetiline energia on väga väike. Nad ei saa enam ergastada gaasi ja liiguvad aeglaselt anoodi poole. Sellest ongi tingitud anoodi pimeruum. Kuid edasiliikumisel koguvad elektronid uuesti energiat, nii et järgmiste kokkupõrgete puhul nad jälle ioniseerivad ja ergastavad gaasi, mille tõttu saabki esineda helendav anoodisammas.

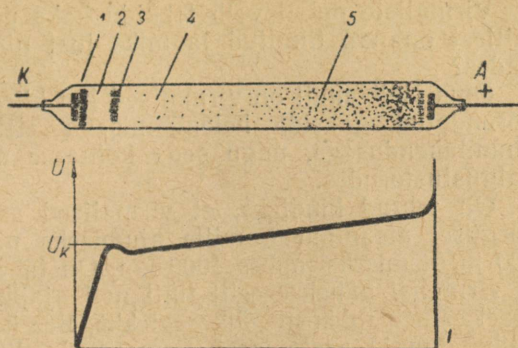
Huumlahenduse püsimiseks peab iga katoodist väljuv elektron tekitama lahendusruumis nii palju positiivseid ioone, et viimased kogusummas omakorda vabastaksid katoodist vähemalt ühe uue elektroni.

Peaaegu kogu helenduse, mis esineb huumlahenduse korral, annab anoodisammas.

Olenevalt gaasi liigist, hõrendusest ja rakendatud pingest võib helenduse värvus olla mitmesugune. Neon näiteks helendab oranžpunasena, argoon sinakasroheline, heelium kollasena, lämmastik kuld kollasena, süsihappegaas valgena jne.

Positiivse samba helendus leiab kasutamist nn. gaaslahenduslampides, mille hulka kuuluvad luminescents-lambid, reklaamvalgustustorud, elavhõbedaurulambid, naatriumaurulambid, huumlambid ja mõned teised.

Looduses kohtame huumlahendust virmalistena, kõigile



Joon. 3—9. Huumlahendus. 1 — katoodi esimene helendav kiht (katoodi kiirgus); 2 — katoodi pimeroom (Crookesi pimeroom); 3 — katoodi teine helendav kiht (negatiivne kiirgus); 4 — anoodi pimeroom (Faraday pimeroom); 5 — positiivne helendav samm.

tuntud kauni nähtusena, mida ta esinemise tõttu põhjamaadel nimetatakse tihti ka põhjavalguseks.

Nägin ühel hilisel talveõhtul umbes paarkümmend aastat tagasi virmalisi Tallinnas. See oli ülev vaatepilt.

Oli külm ja kõrgel sirasid tähed. Lisaks Linnutee kumale ilmus äkki põhjataevasse kahvatu punalilla kiirgus. Varsti laienes see üle kogu taevakaare, kujutades endast nagu värvilistest niitidest kootud ülisuurt volditud eesriiet, mille üksikud voldid, ei, isegi niidid värelesid, kustusid, süttisid uuesti ning sirutusid tohutute punaste, kollaste ja siniroheliste, tükati ka tumelillade kiirtekimpudena kõrgele.

See oli võrratu värvidemäng, elav ja kirev.

Seda ei saa sõnades edasi anda, seda tuleb igaühel endal näha.

Virmalised on sagedane loodusnähtus polaarpiirkondades, olgu siis põhja- või lõunapoolkeral. Ekvaatoril ja troopikapiirkondades neid ei esine.

Alad, kus nähakse kõige rohkem virmalisi, ümbritsevad vöödena Maa magnetilisi pooluseid, kulgedes mööda 67° põhja- ja lõunalaiust. Madalamal ja kõrgemal sellest laiuskraadist esineb neid vähem.

Virmaliste puhul võib tekkida kaks põhilist küsimust: millest on nad tingitud ja miks just nimetatud piirkondades?

Oma iseloomult on virmalised kui kiirgus analoogiline hõrendatud gaaside helendamisega elektriväljas, s. o. huumlahendusega, nagu seda kohtame näiteks reklaamvalgustustorudes.

On tehtud kindlaks, et virmalised esinevad teataval kõrgusel maapinnast, mille alumiseks piiriks on umbes 100 ja ülemiseks umbes 1000 km. On täheldatud ka seda, et virmalisi nähakse eriti tihti neil ajajärkudel, mil Päikesel esineb rohkesti päikesepunkte. See kordub teatavasti umbes iga 11 aasta järel. Sama perioodilisus on ka eriti intensiivsetel magnetilistel tormidel, mis häirivad raadiosidet ja laevasõitu, sest moonutuste tõttu Maa magnetväljas ei ole võimalik orienteeruda kompassi järgi.

Päikese pinna uurimine näitab, et seal esineb tumedaid laike, mis muudavad oma kuju ja asukohta. Muutub ka laikude kogupind: suureneb aeg-ajalt aastast aastasse ja, jõudnud kõrgpunkti, hakkab jälle vähenema, et umbes 11 aasta pärast saavutada uus maksimum. Sama perioodilisus on ka virmalisterohketel aastatel.

Kõigi nende nähtuste kõrvutamise teel jõudsid teadlased arvamusele, et päikesepunktid on kohtadeks, kust Päikese pinnast paiskub välja tohutul hulgal suure kiirusega liikuvaid laetud osakesi.

100—1000 km kõrgusel maapinnast on õhk väga hõre. Päikeselt maakera suunas paiskuvate elektriliselt laetud osakeste voog kujutab endast elektrivoolu läbi hõrendatud gaasi. Seega on nimetatud kõrgustel kõik eeldused huumlahenduse tekkimiseks.

Nüüd paar sõna sellest, miks virmalised esinevad just pooluste piirkondades.

Laboratoorsed katsed näitavad, et elektrilaenguga osakeste voogu mõjutab magnetväli. Eelmises peatükis õppisime tundma, et magnetväljas sirgjooneliselt liikuvatele elektrilaengutele mõjuvad jõud, mis viivad elektrilaengud kõrvale nende esialgselt teelt. Sellest ei pääse ka laetud osakesed, mis paiskuvad Päikeselt maailmaruumi. Kui osa neist jõuab Maa magnetvälja, siis kalduvad nad viimase mõjul kõrvale, liiguvad polaarpiirkonda ja põhjustavadki siin kõrgemates ja hõredamates õhukihtides valguskiirguse — virmalised.

Sellega ei ole muidugi kaugelki ammendatud kõik küsimused, mis võiksid kerkida seoses selle kauni loodusnähtusega. Siin on veel palju selgusetut, mille kallal teadlased töötavad ja mille kohta võib-olla juba lähemal ajal kuuleme nii mõndagi uut.

**K a a r l a h e n d u s.** Väljapaistev vene füüsik V. V. Petrov tegi 1802. a. järgmise katse. Ta kinnitas elektripatari pooluste külge söetükid, viis need kokkupuutesse ja eemaldas siis pisut teineteisest. Seejuures tekkis süte vahel silmipimestav helendus. Kui seda vaadeldi läbi musta klaasi, siis nähti, et valguskiirgus lähtus peamiselt süte otstelt. Nende vahel helendas ere ribake, mis süte horisontaalasendi puhul meenutas kaart.

Selle katsega oligi avastatud kaarleek, mida nüüd nimetatakse ka Petrovi kaareks. Mõnes kirjanduslikus allikas, eriti välismaal nimetatakse kaarleeki ka Volta kaareks. See tuleb sellest, et seitse aastat pärast Petrovi tegi samasuguse avastuse ka inglise keemik Davy, kes tuntud itaalia füüsiku auks nimetas nähtuse Volta kaareks.

Avastatud nähtus kuulub gaaslahenduste hulka. See on nn. kaarlahendus. Kaarlahendus erineb oluliselt huumlahendusest. Kui huumlahendusel on pingelang katoodil 200—400 V, siis kaarlahendusel on see vaid 10—20 V. Vastavalt erinevad ka voolud. Huumlahenduse puhul on voolu tugevus vaid  $10^{-3}$  — 1 A, kaarlahenduse puhul aga väga suur, vähemalt mitukümmend amprit.

Pinge küllaldaselt tõstmisel läheb eespool käsitletud huumlahendus üle kaarlahenduseks. Täpne teooria selle ülemineku kohta veel puudub.

Voolu tugevnemisega katoodi temperatuur tõuseb. Söepulkade otsad kuumenevad sedavõrd, et hakkavad kiirgama pimestavalt eredat valgust. Katoodil on temperatuur tavaliselt 2000—3000° C, anoodil kuni 4000° C.

Elektroodide vahel olev gaas kuumeneb väga kõrge temperatuurini (6000—7000° C), mis põhjustab termoionisatsiooni, s. o. gaasi molekulide lagunemise ioonideks ja elektronideks. Ioonid, mida kiirendab elektriväli, lendavad suure hooga katoodile. See põhjustab katoodi tugeva kuumenemise, mistõttu katood hakkab kiirgama elektrone — tekib elektronide termoemissioon.

Seega sõltub elektroodidevahelise ruumi elektrijuhtivus nii gaasi termoionisatsioonist kui ka elektronide termoemissioonist.

Kaarahenduse korral koondub leek katoodil väga väikesele pinnale — katoodtäpile. Voolutihedus katoodtäpil on väga suur, näiteks süsikatoodil  $470 \text{ A/cm}^2$ , elavhõbekatoodil umbes  $4000 \text{ A/cm}^2$  ja raudkatoodil  $7200 \text{ A/cm}^2$ . Kaarahenduse käigus kujuneb katoodsõel teravik, anoodsões aga tekib väike süvend — kraater.

Nagu juba tähendatud, omandab elektroodidevahelises ruumis olev gaas, milles toimub kaarahendus, väga kõrge temperatuuri. Kui kaarahendus leiab aset suure rõhu all, siis on temperatuur veelgi kõrgem, võib tõusta kuni  $10\,000^\circ\text{C}$ . Võrreldes anoodiga on katoodi temperatuur seejuures madalam. See seletub ühelt poolt sellega, et katoodi pommitavad ioonid on väiksema energiaga kui elektronid, mis pommitavad anoodi, viimane asjaolu on omakorda tingitud sellest, et ionide vaba teekond on lühem kui elektronidel. Teiseks kulub teatav hulk energiat katoodil ka elektronide termoemissiooniks.

Kaarahendust iseloomustav voolu-pinge tunnusjoon on erinev huumlahenduse tunnusjoonest. Kaarahenduse korral voolu tugevnemisel pinge langeb. Vastav tunnusjoon on seega langev. Selleks et kaarahendus kujuneks püsivaks ja ühtlaseks, tuleb järjestikku kaarahendusega ühendada vooluringi vastav takisti.

Kaarahendus leiab väga laialdast rakendamist tehnikas. Selle abil toimub metallide keevitamine (nn. kaarkeevitus), sulatamine ja mitmesuguste sulamite saamine. Valgusallikana kasutatakse kaarahendust projektsiooniaparaatides, helgiheitjates, tuletornides, kinoprojektories jne.

Kõrge temperatuuri tõttu kaasnevad kaarahendusega mitmesugused keemilised reaktsioonid. Nii saadakse vastavates elektrikaarahjudes kaltsiumkarbiidi ( $\text{CaC}_2$ ), mis teatavasti annab veega mõjutades atsetüleengaasi. Kaarahenduses hapendub õhu lämmastik, mille tõttu sellel menetlusel valmistatakse lämmastikhapet.

Elektrotehnikas leiab kaarahendus kasutamist peamiselt elavhõbealaldites.

**S ä d e l a h e n d u s.** Uurimised näitavad, et elektroodide vahel vilksatav säde kujutab endast tegelikult eraldalt helendavat, väga harulist ja looklevat kanalit (joon. 3—10). Selline helendav hargnev ribake läbib lahenduspiirkonna suure kiirusega ja kaob, et mõne hetke pärast uuesti ilmuda. See ongi sädelahendus.



Joon. 3—10. Säde iseloomulik kuju.

Õhus tekib säde, kui elektrivälja tugevus elektroodide vahel tõuseb umbes 31 200 V/cm. Õhk sädele lähedal kuumeneb lühikese aja jooksul väga kõrge temperatuurini, mistõttu ta paisumine toimub ka väga järsku. Seepärast kaasnebki sädemetega iseloomulik särin. Õhk muutub säde piirkonnas heaks elektrijuhiks.

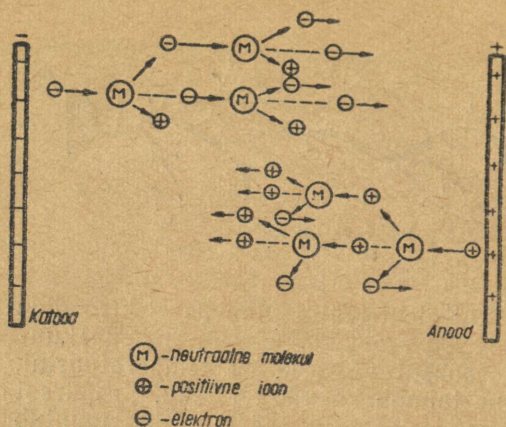
Sädelahenduse tekkimine on võimalik elektrivälja teatava tugevuse juures, mis on igal gaasil erinev, ka sõltub see gaasi rõhust ja temperatuurist.

1940. a. töötasid J. M. Meek ja H. Rather üheaegselt välja sädelahenduse teooria. See käsitleb gaasis toimuvaid ionisatsiooniprotsesse, mida põhjustavad nii elektronid kui ka fotonid, samuti laetud osakeste laviine ja voolu juhtivaid kanaleid kujundavaid striime-reid.

Gaasis leidub alati mõningane arv vabu elektrone ja ioone. Kui elektrivälja tugevus ei ole suur, siis annavad elektronid ja ioonid neutraalsete molekulidega kokku põrgates viimastele küll osa oma kineetilisest energiast, kuid sellest ei piisa, et neid ioniseerida. Alles siis, kui elektrivälja tugevus on küllaldane, et anda elektronile vajalikku kiirust ja ühes sellega ka energiat, on elektron suuteline kokkupõrkamisel neutraalse molekuliga vabastama mõnest selle aatomist elektroni ning muutma sel teel molekuli positiivseks iooniks. Selle nn. põrkeionisatsiooni tagajärjel tekkinud vabu elektrone ja ioone kiirendatakse elektriväljas ja nad põhjustavad omakorda gaasi molekulide ioniseerumist. Nii saame ahelreaktsiooniga sarnaneva ionisatsiooniprotsessi, mille tagajärjel tekivad nii elektroni- kui ka ioonilaviinid (joon. 3—11).

Elektronid ja ioonid lendavad suurel hulgal, laviinina, elektroodide poole, mille tagajärjel gaasis võib tekkida elektriline läbilöök.

Vastavad uurimised on selgitanud, et laetud osakeste

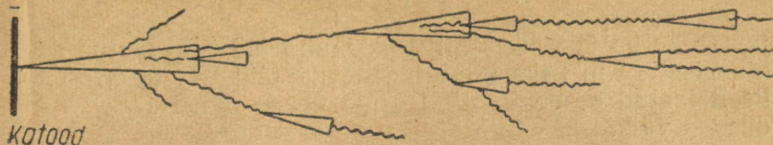


Joon. 3—11. Elektroni- ja ionilaviinide tekkimise skeem.

laviinide ja selle tagajärjel ka gaasis suurema elektrijuh-tivusega kanalite kujunemist põhjustab lisaks pörkeioni-satsioonile ka fotoionisatsioon. See kiirendab tunduvalt gaasi ioniseerumist.

Joonisel 3—12 on toodud skeem, mis selgitab, miks katoodilt lähtuv elektronidest ja ioonidest koosnev voog (striimer) levib kiiremini kui elektronilaviinid. Skeemil on viimased märgitud koonustena, kuna laineliste joon-tega on tähistatud footonite teekonnad. Igas koonuses, s. o. laviinis, ioniseerivad elektronid gaasi molekule nen-dega kokkupõrkamise teel. Saanud elektriväljas küllal-dase kiiruse ning ühes sellega ka energia, ioniseerivad seejuures vabanenud elektronid omakorda uusi gaasi molekule. Sel viisil kasvavad kiiresti anoodi poole liikuvate elektronide ja katoodi poole liikuvate positiivsete ioonide laviinid.

Kokkupõrkamisel elektronidega osa aatomeid ainult ergastub. Need aatomid vabastavad saadud energia footonitena. Liikudes suure kiirusega (ligi 300 000 km/s) jõuavad footonid laviinidest kaugele ette, enne kui põr-kavad kokku mõne gaasiosakesega ja ioniseerivad seda. Iga uus vabanenud elektron põhjustab anoodi poole liiku-des omakorda laviini tekkimist kaugel eespool teistest laviinidest. Sel viisil kujuneb fotoionisatsiooni abil elekt-



Joon. 3—12. Katoodilt lähtuva negatiivse striimeri kujunemise skeem.

roodide vahel kiiresti anoodi poole leviv elektrivoolu juhtiv ioniseeritud gaasi kanal.

Sootuks teisiti moodustub positiivne striimer. Ka see kujutab endast tugevasti ioniseeritud gaasi (plasma) voogu, mis levib anoodilt katoodile. Vahetult enne positiivse striimeri tekkimist läbivad lahendusruumi elektronilaviinid. Ioniseerides gaasi jätavad nad oma teele hulgaliselt positiivseid ioone. Kui viimaste kontsentratsioon jõuab teatava määraneni ( $10^{12}$  ioonini kuupsentimeetris), siis ilmneb intensiivne fotoionisatsioon. Seejuures vabanevad elektronid koonduvad positiivsete ionide suurema kontsentratsiooniga piirkonda, s. o. positiivse striimeri esiossa.

Nii tekib gaasis suure elektrijuhtivusega kanal. Kui positiivsete ionide kontsentratsioon striimeri esiosas on küllaldane, siis levib striimer väga suure kiirusega, vastasel korral ta aga katkeb.

Andsime sädelahendusele vahetult eelneva protsessi lihtsustatud skeemid. Tegelikult on striimerite levimise protsessid palju keerukamad, sest tekkivad ruumlaengud moonutavad tugevasti esialgset, striimerite kujunemist põhjustavat elektrivälja.

Elektrivälja ebaühtlus pikas gaaslahendusruumis ja puudulik fotoionisatsioon striimeri esiosast elektroodile kõige lähemas suunas põhjustabki elektrivoolu juhtiva kanali kõverdumist ja hargnemist.

Elektrivälja moonutamine striimeris tekkivate laengutega ja ka muude selles keerukas nähtuses esinevate protsesside tõttu toimub sädelahendus tihti üksikute tugegetena. Seejuures jookseb iga uus striimer mööda endise striimeri rada.

Looduses esineb sädelahendus kõigile hästi tuntud piksena. Sädemeks on sel puhul välg, sädeme särinaks aga kõuemürin.

Aikesepilved teatavasti kannavad elektrilaenguid. See-

juures on ka ühe äikesepilve üksikud osad tihti laetud erinimeliselt. Kui kaks pilve lähenevad teineteisele erinimeliselt laetud osadega, siis toimub nende vahel sädelahendus — välk.

Ent välk tekib ka pilve ja maapinna vahel. Äikesepilv, mis liigub maapinna kohal, indutseerib viimases suured elektrilaengud. Pilv ja maapind kujutavad endast hiiglasliku kondensaatori plaate, mille potentsiaalivahe võib ulatuda sadadesse miljonitesse ja isegi miljarditesse voltidesse. Sel puhul on õhus väga suure tugevusega elektriväli. Kui väljatugevus ületab umbes 31,2 kV/cm, toimub läbilöökk — välk, mis pimestavalt helendava, harulise lookleva ribana sähvatab pilvest maapinna suunas. Helendava kanali läbimõõt on tavaliselt 10—20 cm. Välgulahendusel esinevat voolu hinnatakse tavaliselt 20 000 amprile, kuid mõnikord küünib see 160 000—220 000 ampriini. Kõuekärgetuse põhjustab kanalit ümbritseva õhu järsk paisumine.

Välk on üldiselt pikkade elektrisädemete erijuhtum.

Inglane H. H. Hoffert avastas 1890. a., et välk koosneb reast impulssidest, mis tekivad erinevate ajalõikude järel ja levivad sama rada mööda. Uurimisel selgus, et üks välgusähvatus koosnes neljakümnest üksikust impulssist kogukestusega 0,6 s.

Kõige sagedamini esineb välk pilve ja maapinna vahel.

Selle kujunemise kohta võib ütelda järgmist. Tavaliselt negatiivse laenguga pilvest saab alguse nn. piloteeriv striimer. See kujundab juhtiva kanali, mida mööda liiguvad suure kiirusega maapinna poole elektronilaviinid, tekitades tugeva helenduse. See staadium kujutab endast nn. välgu liidri, s. o. suure juhtivusega kanali arenemist. Et õhu ionisatsioon on algul väike, siis toimub liidri levimine hüppeliselt, seepärast nimetatakse niisugust liidrit astmeliseks (vastandina pidevalt levivale nooljale liidri). Liidri lähenemisel maapinnale indutseerub viimases vastupidise märgiga laeng ja kõrgematelt hoone-telt, piksevardailt, ka puudelt hakkab ülespoole levima vastasliider. Mõlema liidri ühinemise hetkel läbib tekkinud suure juhtivusega kanalit välgu pealahendus, mille levimise kiirus ulatub kümnetesse tuhandettesse kilomeetritesse sekundis ja millega kaasneb tugev helendus. Et kanal tavaliselt hargneb, siis levib pealahendus kõigi harude kaudu. Kõige tugevam helendus on enamasti

kanali alumises osas. Kanalis tekib kõrge rõhk, mille toimel see pärast välgu pealahendust lõhkeb, tekitades mürinat.

Mõnikord võib näha erilise kujuga välku — keravälku.

Keravälg esineb üldiselt pikse ajal kohe pärast tavalist välku. Siis võib mõnikord näha pimestavalt valget, sinakat, kollakat või isegi punast kera, mis liigub sisesedes ja vahel ka sädemeid pildudes suhteliselt aeglaselt õhus edasi. Tema läbimõõt on tavaliselt 10—20 cm, kuid on esinenud ka suuremaid läbimõõte, isegi üle 10 m. Vahel ilmub ta korstnalõõri, ukse- või aknapilu kaudu ootamatult majja, hõljub siin mööda tuba ja kaob siis vaikselt mõne avause kaudu, jättes järele terava ebameeldiva lõhna. Mõnikord tekib keravälgu kadumisel tugev plahvatus. Selle tagajärjel võib puruneda ahjulõõr või korsten või tekkida muid kahjustusi. On juhtumeid, et keravälg on puudutanud inimest, põhjustades raskeid põletushaavu ja ka surma.

Mõnikord laskub keravälg äikesepilvest üsna maapinna lähedale ja tõuseb siis uuesti kõrgele. Juhtmete lähedale sattudes kuumutab ta viimaseid.

Keravälg liigub enamasti võnkeliselt, tehes väikesi hüppeid üles-alla või kõrvale, mõnikord peatub hetkeks ja liigub siis jälle edasi. Tema kiirus on umbes paar meetrit sekundis.

Keravälgu olemust ei ole teadlased suutnud veel täiel määral lahendada. Tema tekke ja helenduse kohta on püstitatud mitu hüpoteesi.

Kõige sagedamini seletatakse seda nähtust järgmiselt. Tavaline välg soodustab õhus osooni tekkimist. Samal ajal lõhub ta lämmastiku molekule aatomiteks. Arvatakse, et pärast tavalist välgusähvatust segunevad need keemiliselt aktiivsed gaasid tolmu- ja suitsukübemekestega ning moodustavad keerised. Tahked osakesed kuumenevad keerises ja hakkavad helendama.

On ka teistsugune seletus: keravälg tekib tavalise välgu tagajärjel, kui elektrivälja tugevus on küllalt suur. Tugeva elektrivälja toimel ioniseeruvad õhus leiduvad vesiniku aatomid täiesti ja tekib plasma. Magnetväli, mis ümbritseb tavalise välgu korral kujunevat välgukanalit, surub tekkiva plasma peeneks nõõriks. Välgu kadudes koondub plasma magnetvälja mõjul kas üheks või mitmeks keraks. Kui seejärel magnetväli nõrgeneb sedavõrd,

et plasma termiline isoleeritus kaob, plahvatab ja kaob ka keravälg.

Need ja mõned teised samalaadsed seletused eeldavad helenduseks vajaliku energia olemasolu keravälgu endas. See aga ei ole kooskõlas energia jäävuse seadusega, sest keravälgus sisalduvat energiat ei jätkuks nii intensiivseks helendamiseks, nagu see tavaliselt esineb. Väljapaistva nõukogude füüsiku akadeemik P. L. Kapitsa seletuse kohaselt ei saaks keravälg siseenergia arvel püsida üle mõne sajandiku sekundi, tegelikult aga ulatub see aeg mõnikord minutini ja rohkem. Akadeemik Kapitsa arvab, et keravälg saab helendamiseks vajaliku energia väljastpoolt. Keravälgu moodustav plasma neelab elektromagnetilist kiirgust, mida tekitab tavaline välg. Selline kiirguse neeldumine toimub resonantsiolukorras, s. o. kui plasmakera omavõnkeperiood on võrdne neelatava elektromagnetilise kiirguse võnkeperioodiga. Välguna toimuv sädelahendus tekitab intensiivset elektromagnetilist kiirgust, sealhulgas ka keravälgu toitmiseks kohase võnkesagedusega raadiolaineid. Kõige sagedamini esinev keravälg (kera läbimõõt 10—20 cm) neelab elektromagnetilist kiirgust, mille lainepikkused on 20—70 cm. Need on nn. detsimeeterlained.

Selle hüpoteesi kohaselt tekib keravälg eelkõige nendes kohtades, kus neelatavate raadiolainete intensiivsus on kõige suurem. Niisugusteks kohtadeks on võnkepaisud. Viimased moodustuvad välgukanalist kiirguvate raadiolainete ning hoonetelt, maapinnalt, puudelt ja muudelt esemetelt peegelduvate sama lainepikkusega raadiolainete interferentsi tõttu. Et võnkepaisud tekivad teataval kaugusel peegeldavast pinnast ( $1/4$ ,  $3/4$ ,  $5/4$  jne. lainepikkust), siis selgitab see ka asjaolu, miks keravälg tavaliselt ei liigu vahetult mööda esemeid ja maapinda, vaid hõljub neist teataval kaugusel mööda.

Selgitasime keravälgu olemust vaid mõne selle nähtuse kohta püstitatud hüpoteesi valguses. Lõpliku vastuse annab siin arvatavasti kõige lähem tulevik.

**K o r o o n a l a h e n d u s.** Kui pinge ei ole küllaldane sädelahenduse tekkimiseks, siis kutsuvad laetud osakeste laviinid esile teist tüüpi lahenduse — koroonalahenduse. See esineb tavaliselt kõrgepingejuhtmete vahel, kui elektrivälja tugevus juhtme pinnal ületab 21 kV/cm. Sel korral siirdub elektrilaeng juhtme pinnalt õhku ja pime-

das võib näha juhtme ümber nõrka lillakat kiirgust, mida saadab koos särinaga kerge sisin.

Koroonalahenduse korral ioniseeritakse õhk samal viisil, nagu see toimub sädelahenduse puhul. Ka siin etendab tähtsat osa fotoionisatsioon.

Ionisatsiooni tagajärjel tekivad õhus elektroni- jaioonilaviinid, mis põhjustavadki koroonalahendust.

Koroonalahendus leiab ka praktilist rakendamist. Sellel põhimõttel töötavad näiteks elektrifiltrid, mida kasutatakse gaaside puhastamiseks tahketest ja vedelatest lisanditest. Elektrifilter kujutab endast silindrikujulist kambrit, mille telje kohal on peenike traat; see on üheks elektroodiks. Teiseks elektroodiks on metallist silinder ise. Kui elektroodid ühendada kõrgepingejuhtmetega, kambrit aga juhtida läbi kas tolmu- või õhku või suitsu, siis niipea, kui traadi ümber tekib koroonalahendus, ioniseerub kambri oleval õhk. Tekkinud ioonid, põrgates kokku tolmu- või suitsuosakestega, kleepuvad nende külge, mistõttu viimased omandavad elektrilaengu. Silindri pinnale sadestuvad osakesed neutraliseeruvad ja langevad vastavasse kogujasse. Seetõttu on kambrit väljunud õhk täiesti puhas.

Ka piksekaitse (välgutõrje) toime põhineb mõningal määral koroonanähtusel.

Pikse ajal indutseeruvad maapinnas suured elektrilaengud ja maapinna kohal tekib seepärast väga tugev elektrivälja. Elektrivälja tugevus on eriti suur juhtide teravatel väljaulatuvatel osadel. Seepärast tekib piksevarde ülemisel tipul koroonalahendus. Viimase tõttu ei saa piksekaitsega varustatud hoonete kohal koguneda väga suuri indutseeritud laenguid. See aga tähendab seda, et nende kohal ei ole siis karta ka välgu sisselöömist. Kui see aga siiski juhtub, siis toimub see maaga ühendatud piksevardasse ja hoone jääb kahjustamata. Piksevarras täidab oma otstarvet ainult siis, kui ta on hästi maandatud, sest ainult siis saavad maapinnas indutseeritud elektrilaengud siirduda õhku.

Piksevarde tipus esinev koroonalahendus on mõnikord nii intensiivne, et ilmneb selgesti nähtav valguskiirgus. Sellist kiirgust on täheldatud ka muudel kõrgemale ulatuvatel esemetel, nagu näiteks mastitippudel, puulatvades jne. (nn. Elmo tuled).

Piksevarde leiutajaks peetakse ameerika füüsikut

B. Franklinit. On säilinud tema kiri 29. juulist 1750. a., milles Franklin avaldab arvamust, et maaga ühendatud ja kõrgele paigutatud metallvarras peaks lahendama pilvede elektrilaenguid ja seega vältima välgu sisselöömist.

Kui uskuda mungast maadeurija G. de Magalhãesi (mitte segada portugali päritoluga meresõitja ja maadeurija Fernão de Magalhãesiga, kes elas a. 1480—1521) 1688. a. ilmunud kirjutist Hiina kohta, siis tundsid hiinlased piksevarrast palju varem kui eurooplased ja ameeriklased.

Kirjeldades hiinlaste maju kirjutas Magalhães: «Nende nurkades sirutuvad ülespoole sarved, mida ilustavad draakonid. Koletistel on keeled väljas ja nad on sihitud ülespoole. Neid läbib metallvarras, mille alumine ots läheb maasse. Kui välk juhuslikult tababki maja, siis läheb ta seda teed, mida talle pakuvad draakonite keeled, ja kaob maasse, tegemata kellelegi mingit kahju.»

Viimasel ajal on aga selgunud, et piksevarrast tunti veelgi kaugemas minevikus. Arheoloogide sõnade järgi olevat neid kasutatud ka Vana-Egiptuses. Templi peavärvate külgtornidel olevat olnud pikad mastid. Nende otsarbe kohta kõneleb III sajandist e. m. a. pärit olev kiilkiri järgmist: «... Paar masti seisab omal kohal, et lõhestada pikset taevakõrgustes.»

Piksevarda ülesandeid olevat täitnud ka mõned vasega kaetud obeliskid. Nii et piksevarda iga ulatub rohkem kui kahe tuhande aastani.

### **Elektrivoolu levimise kiirusest juhtmeis**

Eespool käsitlesime elektrilaengute liikumist nii tahketes kehaes kui ka vedelikes ja gaasides. Mainisime, et ioonide liikumise kiirus elektrolüütides on suhteliselt väike. Seevastu gaaslahenduse korral liigub õhus elektrijuhtivusega kanalit kujundav striimer väga kiiresti. Jääb veel selgitada, kui suur on juhtmeis elektrivoolu moodustavate elektronide kiirus. Tavaliselt arvatakse, et see on väga suur, süttib ju näiteks elektrilamp samal hetkel, mil ta võrku lülitatakse. Seepärast nõuab see küsimus täpsustamist.

Tegelikult liiguvad elektrilaengud juhtmeis väga aeglaselt. Aga neid liikuma sundiv elektriväli tekib küll vooluringi juhtmete kogu ulatuses praktiliselt voolu sisse-

lülitamise hetkel. See tähendab, et elektriväli levib elektrijuhtmeis, mis ühendavad tarbijaid elektrijaamaga, väga kiiresti, õhus ligikaudu kiirusega 300 000 km/s. Niisiis on see, mida tavaliselt nimetatakse elektrivoolu kiiruseks, tegelikult perioodiliselt muutuva elektrivoolu kiirusega elektrilaengute liikumise kiirus. Piltliku ettekujutuse loomiseks elektrivälja ja elektronide liikumisest juhtmeis on soovitatav teha järgmine lihtne katse. Seadke ritta piljardikuulid ja andke esimesele kuulile näiteks puuhaamriga kerge löök. Silmapilkselt kandub tõuge edasi. Seda näitavad rea viimased kuulid, mis veerevad eemale. Kuid teised kuulid jäävad paigale.

Niisugune on umbes vahekord ka elektrivälja ja elektronide liikumise kiiruse vahel. Ei tule muidugi arvata, et ka elektronid oleksid juhtmetes selliselt reastatud — see oleks tõsiolude moonutamine.

Lõpuks katsume määrata juhtmes edasiliikuvate elektronide kiiruse, kui juhtme ristlõige on 1 mm<sup>2</sup> ja juheta läbiva voolu tugevus 6 A.

Elektrivoolu tugevuse määrab kindlaks ühes sekundis juhtme ristlõiget  $q$  läbiv elektrilaeng; seda saab väljendada ka elektronide kaudu.

Sisaldagu iga cm<sup>3</sup> juheta  $n$  aatomit. Lihtsuse mõttes eeldame, et igas aatomis on üks vaba elektron. Seega läbib ristlõiget igas sekundis  $n \cdot q \cdot v$  elektroni. Iga elektron kannab elementaarlaengut  $e$  ( $e = 1,6 \cdot 10^{-19}$  kulonit).

Voolutugevus  $I = e \cdot n \cdot q \cdot v$

Elektronide liikumise kiirus

$$v = \frac{I}{n \cdot e \cdot q}$$

Avalduses esinevatest suurustest on esialgu teadmata aatomite arv  $n$ , mille leiame Avogadro arvu abil. See määrab teatavasti aatomite arvu aine grammaatomis. Viimaseks nimetatakse keemilise elemendi aatomkaalu, mis on väljendatud grammides.

Avogadro arv  $N = 6,0247 \cdot 10^{23}$  aatomit.

Vase aatomkaal on 63,57, erikaal 8,9; grammaatomi maht  $V = \frac{63,57}{8,9} = 7,14$  cm<sup>3</sup>.

Vase aatomite arv 1 cm<sup>3</sup>-s oleks selle kohaselt

$$n = \frac{6,0247 \cdot 10^{23}}{7,14} = 8,44 \cdot 10^{22}$$

Nüüd saame arvutada elektronide liikumise kiiruse:

$$v = \frac{6}{8,44 \cdot 10^{22} \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 0,01} = 0,044 \text{ cm/s.}$$

Nagu näete, ei ole see kuigi suur.

### **Elektrivoolu ja magnetvälja vastastikune toime**

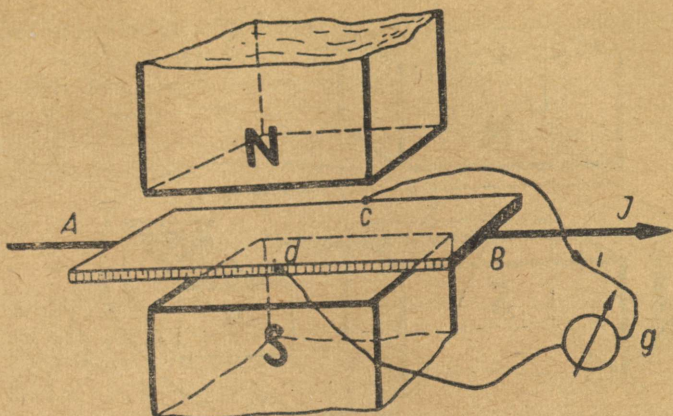
Eespool jutustasime, et magnetväljas liikuvatele elektronidele avaldub Lorentzi jõud, mis muudab elektronide sirgjoonelise liikumise kõverjooneliseks. Ka selgitasime, et magnetväljas jõujoontega risti liikuvast elektrijuhis tekib Lorentzi jõu toimel potentsiaalivahe. Katsed näitavad, et vastavate tingimuste kujunemisel võib juhis tekkida veel täiendav potentsiaalivahe (kas elektrivälja või temperatuurivahe olemasolu korral). Potentsiaalivahe tekkimist nimetatakse siis vastavalt kas galvanomagnetiliseks või termomagnetiliseks nähtuseks.

Esimesel juhul tekib magnetväljas asetsevas elektrivooluga juhis Lorentzi jõu toimel kas täiendav potentsiaalivahe või muutub juhi elektritakistus.

Esimesena täheldas galvanomagnetilisi nähtusi ferromagnetilistes metallides inglise füüsik William Thomson. Eksperimentaalselt uurisid neid 1887. a. vene teadlane D. A. Goldhammer ja 1928. a. nõukogude füüsik akadeemik P. L. Kapitsa. Metallides esinevaid galvanomagnetilisi nähtusi jälgides (väga tugevas magnetväljas) tegi P. Kapitsa kindlaks, et metallide elektritakistus kasvab võrdeliselt magnetvälja tugevusega. Eriti suuresti muutub seejuures vismuti elektritakistus. Seda kasutatakse elektrimasinates magnetvälja jaotuse mõõtmiseks (nn. vismutspiraali abil).

Galvanomagnetiliste nähtuste hulka kuulub nn. Halli nähtus, mille avastas 1879. a. ameerika füüsik E. Hall. See on järgmine. Kui juhtivast materjalist plaat, mida läbib elektrivool, asub tugevas magnetväljas, siis tekib plaadiga risti suunatud magnetvälja toimel plaadi külgedel potentsiaalivahe.

Olgu näiteks magnetväli suunatud ülevalt alla (joon. 3—13), elektrivool aga vasakult paremale ( $A-B$ ). Elektronid liiguvad siis plaadis vastassuunas, s. o. paremalt vasakule. Elektronidele avaldub magnetväljas



Joon. 3—13. Halli nähtus. Kui vool  $I$  läbib plaati risti magnetväljaga, siis plaadi külgedel  $c$  ja  $d$  ilmneb potentsiaalivahe.

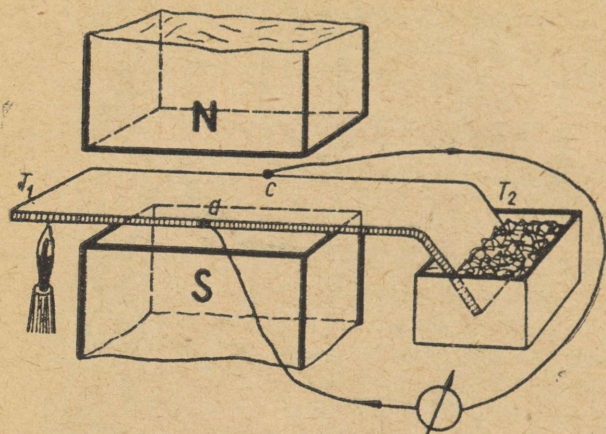
Lorentzi jõud, mis püüab nad viia sirgjoonelisest teekon-  
nast kõrvale. Antud juhul liiguvad elektronid plaadi ser-  
vadele  $d$ . Elektronide kuhjumise tagajärjel tekib plaadi ser-  
vadel  $c$  ja  $d$  potentsiaalivahe. Serval  $c$  kujuneb serva  $d$   
suhtes positiivne potentsiaal ja vool suundub läbi galva-  
nomeetri serva  $d$  suunas. Tekkiv potentsiaalivahe on võr-  
deline voolu ja magnetvälja tugevuse korrutisega ja pöörd-  
võrdeline plaadi paksusega.

Halli nähtus esineb elektron- ja aukjuhtivusega elektri-  
juhtides, seega nii metallides ja pooljuhtides kui ka ioni-  
seeritud gaasides, s. o. plasmas.

Magnetvälja kõrvaldamisel kaob Halli nähtus, sest  
sellega kaotatakse põhjus, mis kutsub esile elektronide  
kuhjumise; seepärast kaob plaadi servadel ka potent-  
siaalivahe.

Halli nähtust kasutatakse magnetvoo tiheduse mõõt-  
misel, automaatreguleerimise süsteemides, samuti elektri-  
masinate pöördemomendi mõõtmiseks ja reguleerimiseks.

Olgu tähendatud, et Hall avastas kirjeldatud nähtuse  
veel üliõpilasena. Hulk aastaid hiljem, kui avastus oli  
õpikute kaudu saanud üldsusele juba tuttavaks, arvati  
seepärast ikka, et selle tegi tuntud füüsiku mõni vanem  
sugulane. Korra viibinud Hall füüsikute nõupidamisel.



Joon. 3—14. Nernsti nähtus. Kui magnetväljas asuva plaadi otstel on erinev temperatuur, siis plaadi servadel ilmneb potentsiaalivahe.

Esitlemisel küsinud temalt paljud nõupidamisest osavõtjad: «Kas te olete juhtumisi vana Halli sugulane?» — mõeldes selle all Halli nähtuse avastajat. Sellele vastanud küsitud rahulikult: «Küllap mina see vana Hall olengi!»

Termomagnetilised nähtused tekivad ebaühtlaselt kuumutatud juhtides ja pooljuhtides, kui nad asetsevad magnetväljas. Magnetväli mõjutab elektronide liikumist juhis sedavõrd, et juhi otstel tekib potentsiaalivahe ja täiendav temperatuurivahe.

Termomagnetiliste nähtuste hulka kuulub nn. Nernsti nähtus, mida mõnes raamatus nimetatakse ka Ettinghauseni-Nernsti nähtuseks. Selle avastas saksa füüsik W. Nernst 1886. a. ja see seisneb järgmises. Kui juhtivast materjalist plaat asub risti suunatud magnetväljas ja plaadi otstel on erinev temperatuur, siis tekib selle servadel potentsiaalivahe (joon. 3—14).

Viimane on võrdeline magnetvoo tihedusega, plaadi laiusega ja temperatuurivahega.

Kui aga magnetväljaga risti asuvat plaati läbib elektrivool, siis tekib plaadi servadel temperatuurivahe (nn. Ettinghauseni temperatuurivahe).

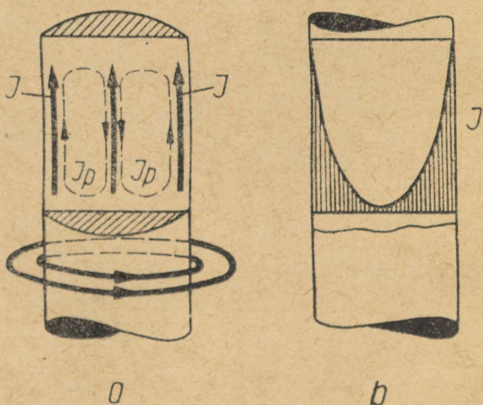
Viimasel ajal on teadlased Nernsti nähtuse vastu uuesti huvi tundma hakanud. Selle põhjal püütakse luua

nn. Nernsti termomagnetilist generaatorit, s. o. seadist, milles magnetväljas asetsevate varraste ühepoolse kuumutamise teel muundatakse soojust vahetult elektrienergiaks. Paremaid tulemusi on seni õnnestunud saada indiumi ja antimoni ühendist (InSb) varrastega. Esiialgu on seadise kasutegur 1,6%.

### Pinnaefekt

Induktsiooniseaduse põhjal tekib igas kinnises vooluringis, mis asub vahelduvas magnetväljas, induktiooni-vool. See tekib ka elektrit juhtivates massiivsetes keha-des. Sel korral nimetatakse neid voole pöörisvooludeks. Et indutseeritud elektromotoorne jõud on võrdeline magnet-  
voo muutumise kiirusega, siis on pöörisvoolud seda tuge-  
vamad, mida kiiremini muutub vahelduv magnetväli. Induktsiooni tagajärjel võivad seega massiivses metalli-  
tükkis tekkida väga tugevad voolud. Pooli südamikku ase-  
tatud metall võib seepärast sedavõrd kuumeneda, et hak-  
kab isegi sulama. Induktsiooninähtust rakendataksegi  
metallide sulatamiseks, samuti puidu jt. ainete kuivatam-  
iseks.

Pöörisvoolud tekivad ka vahelduvvooluga juhtmetes. Juhtmevooluga liitudes põhjustavad nad ebahühtlast voolu-



Joon. 3—15. Pinnaefekt. *a* — juhtmes indutseeruvad pöörisvoolud; *b* — voolujaotus juhtmes.

jaotust üle ristlõike. Joonisel 3—15 on nooltega märgitud vahelduvvoolu tugevnemise hetkel juhtmes indutseeritud pöörisvoolude suunad. Vastavalt sellele ühtib pöörisvoolude suund juhtme välispinna lähedal juheta läbiva vahelduvvoolu suunaga, juhtme telje kohal aga mitte; siin on pöörisvoolud suunatud juhtmevoolule vastu. Seepärast nõrgeneb vool juhtme telje kohal, välispinna lähedal aga tugevneb. Voolutihedus juhtme teljel osutub palju väiksemaks kui välispinna lähedal. Kõrgsagedusvoolu korral koondub juhtmevool praktiliselt juhtme välispinnale. See kujutabki endast pinnaefekti ehk skinnefekti (*skin* — inglise k. «nahk»). Pinnaefekti tõttu suureneb juhtme takistus, sest väheneb vooluga koormatav ristlõige. Et kõrgsageduse korral jääb juhtme teljeosa praktiliselt kasutamata, siis kasutatakse neil juhtudel metalli säästmiseks õõnsaid torukujulisi juhtmeid.

Pinnaefekti tõttu eraldub ka soojus massiivsetes juhtmetes ristlõike ulatuses ebaühtlaselt, peamiselt pindkihis. Seetõttu leiab pinnaefekt tehnikas kasutamist terasemetete pinna karastamisel.

---

## IV.

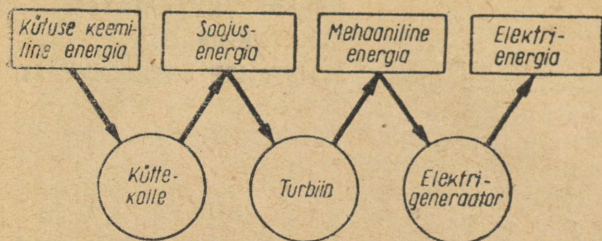
---

Eelmistes peatükkides tutvusime paljude elektrinähtustega, sealhulgas ka niisugustega, mille esinedes tekkis vooluringis elektromotoorne jõud ja vastavalt ka elektri-vool. Nüüd peatugem mõnel neist uuesti, vaadeldes neid vaid ühest seisukohast — kuivõrd neid on võimalik rakendada elektrienergia saamiseks.

Enne aga peatugem lühidalt sellel, kuidas toodetakse elektrienergiat tänapäeval.

Kaasaja elektrijaamades saadakse elektrienergia eranditult mehaanilise energia elektriliseks muundamise teel. Erinevus elektrijaamade üksikute liikide vahel seisneb peamiselt generaatoritele antava mehaanilise energia saamisviisis. Soojuselektrijaamas saadakse mehaaniline energia rea muundamisprotsesside tulemusena kütuses peituvast keemilisest energiast, vee- ehk hüdroelektri-jaamas vee-energiast, tuuleelektrijaamas tuuleenergiast, geotermilises elektrijaamas maa sügavuses peituvast soojusenergiast, aatomielektrijaamades tuumakütuse aatomituumade lagunemisel eralduvast soojusenergiast jne.

Soojuselektrijaama katelagregaadi koldes muundame kütuses peituvat keemilist energia soojuseks. Soojuse abil muutub pidevalt osa vett katelagregaadis kõrge temperatuuri ja rõhuga auruks, mis juhitakse auruturbiini. Soojusenergia kandub seega katelagregaadist edasi auru potentsiaalse energiana. Auruturbiinis muundub see kineetiliseks energiaks, mille toimel turbiini rootor hakkab pöörlema, sundides pöörlema ka võlli kaudu ühendatud elektrigeneraatori rootori. Elektromagnetilise induktsiooni seaduse põhjal indutseerub magnetvälja suhtes liikuvates mähistes elektromotoorne jõud ning generaator annab



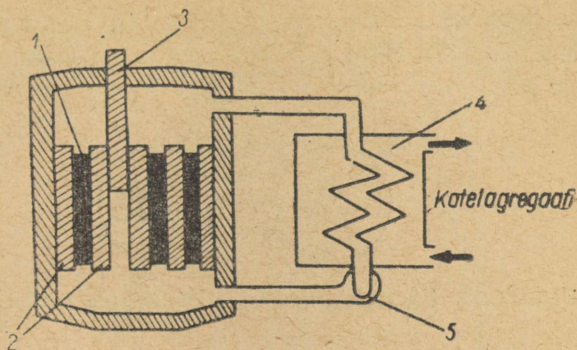
Joon. 4—1. Elektrienergia tootmise skeem soojuselektri-jaamas.

koormamisel elektrienergiat. Turbiini kaudu elektrigeneraatorile antud mehaaniline energia muundubki sel teel elektrienergiaks (joon. 4—1).

Aatomielektriijaamas on lähteenergiaks tuumareaktoris eralduv soojus. Reaktoris toimub tuumakütuse (peamiselt uraani isotoobi U-235) aatomituumade lagunemise ahelreaktsioon, millega kaasnebki energia vabanemine suurel hulgal. Protsess algab spontaanselt. Seda põhjustavad kosmilistes kiirtes leiduvad neutraalsed tuumaosakesed — neutronid. U-235 aatomituuma tabades põhjustab neutron tuuma lagunemist kaheks umbes võrdseks killuks, kusjuures vabaneb palju energiat ja ka 2—3 uut neutronit. Vabanenud neutronid lendavad laiali suure kiirusega (umbes 10—15 km/s). Teel tabavad nad U-235 aatomituumi, purustavad neid ja vabastavad omakorda uusi neutroneid. See laviinina arenev protsess kujutabki endast tuumareaktoris kulgevat ahelreaktsiooni.

Looduslikus uraanis leidub kerget isotoopi U-235 väga vähe, vaid 0,7%. Muu osa moodustab isotoop U-238.

Ahelreaktsioon saab areneda ainult siis, kui kerget isotoopi on koos vähemalt 1 kg (nn. kriitiline mass). Väiksema koguse korral juhusliku neutroni poolt esilekutsutud U-235 aatomituuma lagunemisel vabanevad neutronid lendavad uraanitükist lihtsalt välja, ilma et kohtaksid teisi U-235 aatomituumi. Vabanenud neutroneid neelavad aga meeleldi U-238 aatomituumad; see asjaolu väldibki ahelreaktsiooni kulgemist looduslikus uraanis. Õnneks ei neela raske isotoobi aatomituumad väga aeglasi neutroneid, mis on siiski suutelised purustama U-235 aatomituumi. Tuumakütusena on peamiselt kasutusel isotoobiga U-235 rikastatud looduslik uraan. Et vältida



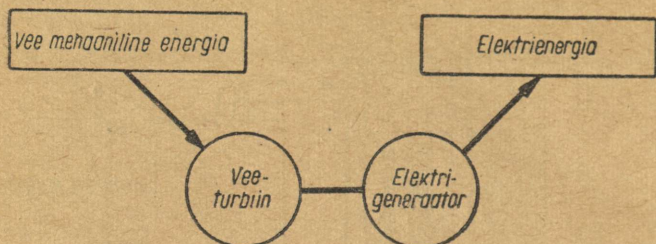
Joon. 4—2. Tuumareaktori skeem. 1 — uraanivardad; 2 — grafiitplokid; 3 — reguleerimisvarras; 4 — soojusvahendaja; 5 — pump.

uraani kerge isotoobi lagunemisel vabanevate neutronite kadu neeldumise tõttu raske isotoobi aatomituumades, ümbritsetakse tuumareaktoris kasutatavad uraanivardad vastava ainega, milles neutronid aeglustuvad. Niisugusteks aineteks on grafiit, raske vesi (mille moodustab vesiniku isotoop deuteerium aatomkaaluga 2), berüllium jt. Peamiselt kasutatakse kas grafiiti või rasket vett.

Et ahelreaktsioon ei areneks omapead, mis võiks põhjustada plahvatuse, peab see olema ka reguleeritav. Seda võimaldavadki ained, mis neelavad väga suurel määral aeglasi neutroneid. Ahelreaktsiooni reguleerimiseks asetatakse reaktorisse kaadmiumist või boorterasest vardad, mis lükatakse reaktorisse, kui soovitakse ahelreaktsiooni peatada, või tõmmatakse vastaval määral välja, et reaktsiooni kiirendada (joon. 4—2).

Ahelreaktsioonil eralduv soojus juhitakse reaktorist soojuskandja abil soojusvahendajasse. Soojuskandjana on kasutusel kas gaasid ( $\text{CO}_2$  Ar või He), vesi või ka metallid (Na või Bi); viimased on reaktoris valitsevates tingimustes vedelas olekus. Soojusvahendaja on ühendatud torustiku abil katelagregaadiga. Teised seadmed on samasugused nagu tavalises soojuselektrijaamas.

Tuumareaktor täidab seega aatomielektrijaamas üldiselt sama ülesannet, mida täidab katelagregaadi kolle soojuselektrijaamas, s. o. annab soojusenergiat. Muus osas



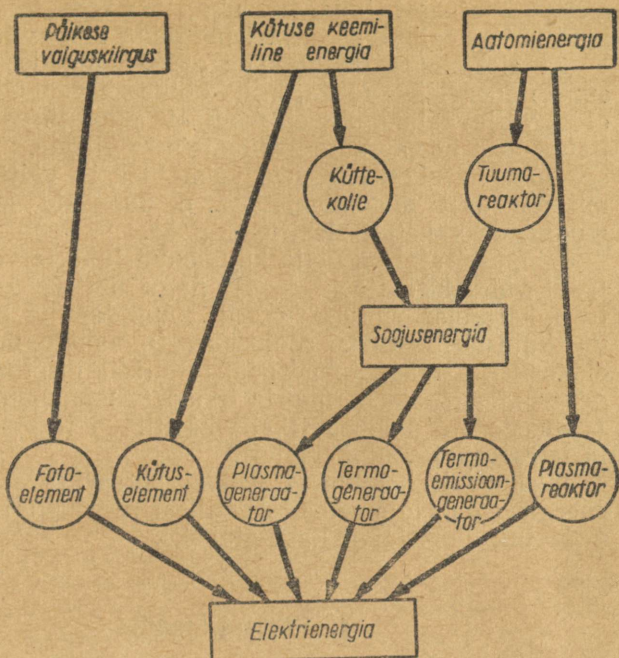
Joon. 4—3. Hüdroelektrijaamas elektrienergia tootmise skeem.

ei erine elektrienergia tootmise skeem joonisel 4—1 toodud soojuselektrijaama skeemist.

Gaasiturbiiniga soojuselektrijaamas suunatakse põlemiskambri (tavalises soojuselektrijaamas vastab sellele küttekolle) tulevad kuumad suitsugaasid otse gaasiturbiini. Edasine kulg on analoogiline elektrienergia tootmisega tavalises soojuselektrijaamas. Rea muundamisprotsesside tulemusena saadakse lõpuks elektrienergiat.

Kõik need energia muundamise protsessid on seotud energiakaoga. Eriti suur on see kütuses peituva keemilise energia muundamisel soojuseks, samuti soojuse muundamisel mehaaniliseks energiaks. Soojuselektrijaamas ulatuvad kaod 60—65%-ni. Seevastu need kaod, mis esinevad elektrigeneraatorites mehaanilise energia muundamisel elektriliseks, on suhteliselt väikesed, umbes 1—2%.

Hüdroelektrijaamades on energia muundamise protsesse vähem (joon. 4—3), seepärast on ka kadu väiksem; kasutatavast vee-energiast leiab kasulikku rakendamist umbes 60%. Ent hüdroelektrijaamadel on ka puudusi, mis ei võimalda orienteeruda ainult sellele tüübile. Pealegi pole igal pool vee-energiat. Suurim neist on võimsuse perioodiline kõikumine, mis on tingitud veeseisu muutumisest veekogudes. Kevadel, kui veeseis on kõige kõrgem, töötab ka hüdroelektrijaam täie võimsusega. Ent talvel, kui elektrienergia tarbimine on tavaliselt kõige suurem, ei suudeta seda madala veeseisu tõttu rahuldada. Ka on ehitamine soojuselektrijaamaga võrreldes palju kallim. Hüdroelektrijaama ehituskulud võimsusühiku kohta moodustasid näiteks mõned aastad tagasi keskmiselt 570 rbl./kW, soojuselektrijaamal aga 150 rbl./kW.



Joon. 4—4. Uusi võimalikke skeme elektrienergia tootmiseks.

Tänapäeval peetakse otstarbekohasemaks eri tüüpi elektrijaamade töötamist ühises võrgus. See võimaldab kõige paremini ekspluateerida nii hüdro- kui ka soojus- elektrijaamade võimsust.

Soojuselektrijaamas kütuse põletamisel saadava soojuse parema ära kasutamise eesmärgil on tänapäeval hakatud linnu ja tööstuskeskusi elektrienergia kõrval tsentraalselt varustama ka soojusenergiaga. Seetõttu esineb kaht liiki soojuselektrijaamu: tavalised, mis varustavad tarbijaid ainult elektrienergiaga, ning soojus- ja elektrijaamad (soojuse- ja elektritsentraalid), mis annavad nii elektrit kui ka soojust (auru või kuuma vee näol). Kui tavalises soojuselektrijaamas kütuse põletamisel saadavast soojusenergiast muundub elektrienergiaks keskmiselt 25,5%, siis soojus- ja elektrijaamas kasutatakse

sellest soojusest juba tunduvalt rohkem — keskmiselt kuni 60%, sealhulgas elektrienergiana umbes 12%.

Et elektrienergia tootmine elektrijaamades on seotud suurte energiakadudega, mille oluliseks vähendamiseks ei olegi väljavaateid, siis on teadlaste pingutused nüüd suunatud juba hoopis uute põhimõtete ja viiside, uute loodusseaduste avastamisele, mis võimaldaksid vältida energia mitmekordset muundamist, s. o. lubaksid lähteenergia muundada vahetult elektrienergiaks.

Viimasel ajal on välja kujunenud juba terve rida seda laadi võimalusi (joon. 4—4), nagu näiteks kütuses peituva keemilise energia vahetu muundamine elektriliseks nn. kütuselementides, soojusenergia vahetu muundamine elektriliseks magnetohüdrodünaamilisel meetodil plasma-generaatorites või termo- ja termoemissioongeneraatorites (viimaste töö põhineb tekstis käsitletud termoelektrilistel ja termoemissiooninähtustel).

Järgnevalt peatumegi nendel perspektiivsetel elektrienergia saamise meetoditel, millest nii mõnigi võib kujuneda tulevikus laialt kasutatavaks.

## 1. Kütuselemendid

Juba 1842. a. selgitas inglise füüsik W. Grove (1811—1896), et on võimalik ka vee elektrolüüsile vastupidine protsess. Kui elektrolüüsivanni juhtida hapnikku ja vesinikku, ühinevad nad veeks, andes seejuures elektrienergiat. Sel puhul on tegemist keemilise energia vahetu muundumisega elektriliseks. Seadis aga, milles see protsess toimub, kujutab endast galvaanielementi.

Ka kütuse põlemisel toimub kütuse koostises leiduva süsiniku, vesiniku ja muude põlevate ainete ühinemine õhuhapnikuga. Elemente, milles elektrienergiat saadakse kütuses sisalduvate põlevate ainete hapnikuga ühinemise tagajärjel, nimetataksegi kütuselementideks.

Kuidas seletada, et põlemisel, s. o. ainete ühinemisel hapnikuga saadakse elektrienergiat?

Keemiliste reaktsioonide olemust võiks üldiselt iseloomustada peamiselt aatomite välise elektronikihi, s. o. valentselektronide ümberasetumisega aatomites. Uue molekuli moodustumisel reaktsioonist osavõtivate elementide aatomid kas annavad ära või võtavad juurde mõne

elektroni või need muudavad oma teekonda ümber aatomituuma. Kõik need protsessid on seotud kas energia neeldumisega või selle eraldumisega. Et aatomist kõrvaldada mõni välise elektronikihi elektron, selleks tuleb kulutada teatav hulk energiat. Sama hulk energiat vabaneb, kui aatom saab puuduva elektroni tagasi. Iga elemendi aatomi ioniseerimiseks elektroni eemaldamise teel on nõutav erinev hulk energiat.

Elementide ioniseerimisenergia suurus sõltub elemendi asukohast perioodilise süsteemi rühmas. Esimese rühma elementidel on ta väiksem, igas järgmises rühmas aga suurem. Kõige suurem on ioniseerimisenergia viimase, s. o. VIII rühma elementidel.

Kui lähendada teineteisele kahe erineva rühma elementide aatomid, siis vastavate tingimuste olemasolu korral toimub nende vahel keemiline reaktsioon. Lihtsustatud ettekujutuse kohaselt liigub elektron väiksema ioniseerimispotentsiaaliga aatomist kõrgema potentsiaaliga aatomisse. Näiteks naatriumi ja kloori ühinemisel liigub elektron naatriumi aatomist kloori aatomisse, liitiumi ja fluori ühinemisel liitiumi aatomist fluori aatomisse jne. Elementide süsteemi esimeses rühmas oleva naatriumi aatomi ühinemisel süsteemi seitsmendas rühmas oleva kloori aatomiga saame teatavasti keedusoola ( $\text{NaCl}$ ). Selles reaktsioonis läheb üks elektron naatriumi aatomi välisest elektronkihist üle kloori aatomi välisesse elektronikihti. Et klooril kui kõrgema rühma elemendil on ioniseerimisenergia suurem, siis tekib kloori aatomis energia ülejääk. See moodustabki keemilise reaktsiooni puhul eralduva energia.

Ent keemilisele reaktsioonile võib läheneda ka teisest seisukohast. Nagu tähendatud, liigub elektron ühe elemendi aatomist teise elemendi aatomisse. See aga kujutab endast elektrivoolu. Et igast keemilisest reaktsioonist võtab üheaegselt osa suur hulk aatomeid ja molekule ning enamikul juhtudel nende paiknemine aines on juhuslik, liikumine aga kaootiline, siis võib oletada, et ka elektronide liikumine ja seega elektrivool on kaootiline, s. o. voolu esinemine aine igas punktis on igas suunas ühesuguse tõenäolisusega. Elektrotehnika seisukohalt on siin tegemist lühisetaolise nähtusega reaktsioonist osavõtvate aatomite vahel. Seega võiks keemilist reaktsiooni, käesoleval juhul põlemist, vaadelda kui suure hulga erineva

potentsiaaliga punktide üheaegset lühistumist, kusjuures elektrienergia muundub soojuseks.

Ka soojuselektrijaama koldes ühineb kütuses sisalduv süsinik õhuhapnikuga ja selle keemilise protsessi käigus vabanev elektronide energia muundub soojuseks, mis hiljem mehaaniliseks energiaks muudetuna saab alles elektrigeneraatoris uuesti muunduda elektriliseks.

Selline energia mitmekordne muundumine ongi teatavasti elektrijaama madala kasuteguri põhjus.

Olukord oleks hoopis teine, kui saaks muuta kütuse keemilise energia vahetult elektriliseks. Võimalus selleks peitub faktis, et kütuste keemiline energia on elektrilise päritoluga. Küsimus on õieti selles, kuidas vältida lühist keemilisest reaktsioonist osavõtivate ainete üksikute aatomite ja molekulide vahel. Näib, et tuleks aatomite vahel ümberasetuvatele elektronidele anda suunatud liikumine, nagu see toimub galvaanielementides. Selleks peaks ka reaktsioonist osavõtavad ained koondama eraldi ja paigutama nii, nagu asetuvad galvaanielementides elektroodid.

Et ka põlemise keemilised reaktsioonid kulgeksid umbes nii, nagu nad kulgevad galvaanielementides, peaksime põlemisprotsessi jaotama kahte järku. Esimene järk seisneks kütuse aatomitest või molekulidest elektronide eraldamises, teine järk aga elektronide liitumises hapniku aatomitega. Seda võimaldabki elektrolüüt, olgu see siis lahus, sulam või tahke keha. Nii saaksimegi elektrienergia tootmiseks sobiva seadise — eespool nimetatud kütuselemendi.

Eelmisest peatükist teame, et galvaanielementides ühineb teatav metall mingi teise keemilise elemendiga või ühendiga, näiteks taskulambipatareis ühineb tsink salmiaagis leiduva klooriga, Volta elemendis aga happesäädiga  $\text{SO}_4$  jne.

Et galvaanielementides peab vähemalt üheks elektroodiks olema metall, mille tootmine on omakorda seotud energiakuluga, siis pole galvaanielementide energeetiline kasutegur suur, rääkimata saadava elektrienergia kõrgest hinnast. Kütuselemendid võimaldavad kasutada metalli asemel kas tahke kütuse peamisi koostisosi, s. o. süsinikku ja veisnikku, või otseselt gaasilist kütust. Teiseks reagentiks on hapnik.

Niisiis moodustab kütuselemendi positiivse elektroodi tavaliselt hapnik, negatiivse aga kas süsinik, vesinik, vin-

gugaas, metaan või muu süsivesinik või mitme gaasi segu. Sellele vastavad ka kütuselemendi liigid: süsinikelement, vesinikelement, generaatorigaaselement jt.

Viimasel ajal on välismaal välja töötatud ka biokeemiline ehk, nagu teda veel nimetatakse, orgaaniline kütuselement, milles elektrienergia saadakse orgaanilise aine lagunemisest bakterite tegevuse toimetel.

Süsinikelemendil on üheks elektroodiks süsinik, teiseks hapnik, vesinikelemendis vastavalt vesinik ja hapnik, generaatorigaaselemendis generaatorigaas ja õhk jne. Et gaas ei saa praktiliselt olla elemendi elektroodiks, siis on gaaselektroodi kandjaks tavaliselt mingi poorne tahke keha, nn. kandeelektrood. Viimase vahendusel toimuvadki elektrokeemilised protsessid, mis lõpptulemusena annavad elektrivoolu.

Kandeelektroodiga kokkupuutuv gaas kinnitub selle pinnale, gaasi molekulid lagunevad aatomiteks ja need tungivad kandeelektroodi pooridesse. Seejärel gaasi aatomid ioniseeruvad, suundudes kas kohe või pärast keemilist reaktsiooni elektrolüüti.

Nende protsesside ebaühtlane kulgemiskiirus põhjustab elektroodi polariseerumist, mille tõttu koormamisel elemendi pinge langeb.

Et kandeelektrood saaks täita talle seatud ülesandeid, peab ta rahuldama järgmisi tingimusi: adsorbeerima kasutatavat gaasi (gaas peab kinnituma elektroodi pinnale), olema hea elektrijuht, mitte olema keemiliselt aktiivne ei gaasi ega ka elektrolüüdi suhtes, kuid samal ajal muutma gaasi elektrokeemiliselt aktiivseks.

Kütuselemendi juures on eriti tähtis viimane tingimus, s. o. elektrivoolu tekitavate reaktsioonide kulgemise kiirendamine. See on üldiselt raskesti teostatav, mille tõttu see tingimus on kujunenud kütuselemendi konstruktsiooni hindamise peamiseks aluseks.

Kütuselemendi konstruktsioone on esitatud väga palju, sest nagu tähendasime, pole probleem enam uus. Ent rahuldavalt töötavaid kütuselemente on õnnestunud luua alles viimasel ajal.

Allpool käsitleme lähemalt süsinik-, vesinik-, generaatorigaas- ja biokeemilist elementi.

**Süsinikelement.** Elemendi negatiivseks elektroodiks on süsi, positiivseks hapnik. Seda liiki kütuselemendi loomisel on suurimaks raskuseks osutunud asja-

olu, et toatemperatuuris ei ole süsinik keemiliselt kuigi aktiivne. Keemilised reaktsioonid süsiniku ja teiste ainete vahel kulgevad edukalt alles kõrges temperatuuris. See aga piirab elektrolüüdi valiku võimalusi.

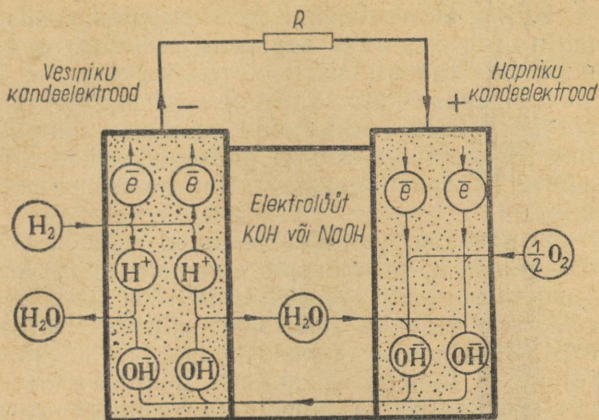
Uhe seni paremaks peetud süsinikelemendi ehitus on järgmine. Positiivseks kandeelektroodiks on peenestatud magnetiline raua oksiid  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , mis on küllastatud hapnikuga. Rauaoksiidi vastu liubub tihedalt roostevabast terasest plaat, mis täidab ka voolujuhtme ülesannet. Negatiivseks elektroodiks on söepuru, milles asuvad voolu väljastavate juhtmetena söeplaadid. Elektrolüüdiks on sula sooda ( $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ). Korrosiooni vältimiseks paikneb elektrolüüt keraamilises kestas.

Suure sisetakistuse tõttu on voolutihedus elemendis väike: 0,6-voldise pinge korral saadakse elektroodi pinnal voolutiheduseks ainult 0,5 mA/cm<sup>2</sup>.

Kütuselementi loetakse praktiliselt rakendatavaks, kui 1-voldise pinge korral saadakse voolutiheduseks umbes 100 mA/cm<sup>2</sup>. Süsinikelementide voolutihedust ei ole aga seni suudetud tõsta, mistõttu nende suurele kasutegurile (küünib 98%-ni) vaatamata ei ole nad praktiliselt veel rakendatavad.

Kütuselemendi kasuteguri all mõeldakse temast saadava maksimaalse elektrienergia ja sama kütuse põletamisel saadava soojusenergia suhet protsentides.

Vesinikelemendiga (nimetatakse ka vesinik-hapnikelemendiks) on saavutatud palju paremaid tulemusi kui äsja käsitletud süsinikelemendiga. Vesinikelemendi skeem on toodud joon. 4—5. Element koosneb kahest poorsest elektroodist ja nende vahel asuvast elektrolüüdist. Negatiivsele elektroodile juhitakse vesinikku, positiivsele aga hapnikku. Vesinik tungib läbi poorse kandeelektroodi, kusjuures vesiniku molekulid ( $\text{H}_2$ ) lagunevad positiivseteks ionideks ja elektronideks. Reageerides elektrolüüdiga (milleks on kas KOH või NaOH lahus) annavad vesinikioonid vee. Vesinikioonide tekkimisel vabanenud elektronid aga kuhjuvad vesinikelektroodile, moodustades selle negatiivse laengu. Tekkinud veest jääb osa elektrolüüti, osa aga juhitakse välja. Kui elemendi väline vooluring on suletud (näit. takisti  $R$  abil), siis liiguvad elektronid selles vooluringis vesinikelektroodilt hapnikelektroodile, kusjuures kütuselemendis toimuvad järgmised keemilised protsessid. Hapnik, mis tungib läbi



Joon. 4–5. Vesinikelemendi skeem. Elektroodidel toimuvad järgmised keemilised reaktsioonid:  
 vesinikelektroodil —  $\text{H}_2 + 2\text{OH}^- \rightarrow 2\bar{e} + 2\text{H}_2\text{O}$ ;  
 hapnikuelektroodil —  $\frac{1}{2}\text{O}_2 + \text{H}_2\text{O} + 2\bar{e} \rightarrow 2\text{OH}^-$

poorse kandeelektroodi, katab selle pinna. Ta reageerib elektrolüüdis oleva veega ja annab OH-ioonid. Negatiivse laengu saavad seejuures ioonid hapnikuelektroodile tulnud elektronidelt. Tekkinud ioonid liiguvad läbi elektrolüüdi vesinikelektroodi poole, kus nad vesinikuga ühinedes moodustavad vee. Et see protsess on pidev, siis säilib elektroodide vahel potentsiaalivahe ja element annab pidevalt voolu.

Kui elemendi väline vooluring on avatud, siis tõmbab vesinikelektroodile kuhjuv negatiivne laeng elektrolüüdist metalli positiivseid ioone ( $\text{K}^+$  või  $\text{Na}^+$ ) lähedale ja tekib laengute tasakaal. Analoogiline tasakaal tekib ka positiivsel elektroodil. Seetõttu edasisi reaktsioone gaaside ja elektrolüüdi vahel ei toimu. Potentsiaalivahe aga jääb elektroodide vahel püsima ja kui väline vooluring uuesti sulgeda, siis ilmneb selles kohe elektrivool.

Kui vesinik-kütuselemendi välise vooluringi elektritakistus on praktiliselt null, s. t. elektroodid on lühistatud, siis toimub keemiline reaktsioon vesiniku ja hapniku vahel väga kiiresti, mille juures kogu vabanev keemiline energia muundub soojuseks. See vastab tavalisele põlemisele.

Kui välise vooluringi takistus on suur, siis kulgeb keemiline protsess väga aeglaselt, seejuures eralduv energia muundub aga peamiselt elektrienergiaks.

Elemendi võimsuse tõstmise seisukohast lähtudes peaksid keemilised reaktsioonid toimuma suhteliselt kiiresti, ilma et seejuures esineks lühiseolukord. Selgub, et reaktsioone kiirendab gaaside rõhu ja ka temperatuuri tõstmine.

Seetõttu on paljudes vesinikelemendi konstruktsioonides gaasid kõrge rõhu all. Ühe sellise kütuselemendi töötemperatuur on 150—240° C ja rõhk kuni 56 at. Kõrget rõhku on vaja ka selleks, et vältida elektrolüüdi aurumist. Et keemilise reaktsiooni tagajärjel tekkiv vesi elektrolüüti ei lahjendaks, on ette nähtud eriseadis ülearuse vee eemaldamiseks. Nimetatud vesinikelemendi pinge on 240° C ja 56,2 at juures koormuseta olekus 1,05 V, maksimaalsel koormusel (voolutihedus 1076 mA/cm<sup>2</sup>) aga 0,6 V. Elemendi kasutegur voolutihedusel 400 mA/cm<sup>2</sup> on ligikaudu 54%, väiksema koormuse korral aga suurem. Seda liiki vesinikelemente on ehitatud võimsusega kuni 8 kW.

On kujundatud ka niisuguseid vesinikelemente, mille töötemperatuur on 20—90° C ja rõhk 2—2,5 at. Nendes elementides on õnnestunud kõrvaldada ka elektrodide polariseerumine. Kütuselemendi pinge voolutihedusel 700 mA/cm<sup>2</sup> on 1 V ja kasutegur umbes 70%. Selle kütuselemendi vesiniku kandeelektrood on poorsest niklist, hapniku kandeelektrood aga poorsest söest.

Generaatorigaaselement pakub eriti suurt huvi, sest selles ühinevad kütuste gaasistamise saadused õhuhapnikuga.

Nõukogude teadlase Davtjani konstrueeritud generaatorigaaselementi toidetakse kuuma generaatorigaasiga, mille peamisteks põlevateks koostisosadeks on vingugaas ja vesinik. Selle generaatorigaaselemendi pinge on 0,8 V ümber, voolutihedus 30 mA/cm<sup>2</sup>, kasutegur 60%, töötemperatuur 550—900° C. Hapniku asemel kasutatakse siin eelsoojendatud õhku. Õhu kandeelektrood sisaldab 60% peeneteralist raudoksiidi Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 20% magnetilist rauaoksiidi Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> ja 20% šamottsavi. Generaatorigaasi kandeelektroodis on 60% peeneteralist raudoksiidi Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ja 20% õhukesti raualaaste, mis on segatud 20% šamottsaviga. Tahke elektrolüüt sisaldab 43% soodat (Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), 27% monatsiitliiva (monatsiit on mineraal (Ce, La)PO<sub>4</sub>, mida

leidub jõe- ja mereliivas), 20% volframoksiidi ( $WO_3$ ) ja 10% naatriumivesiklaasi [9].

Elemendi heaks omaduseks on polariseerumise täielik puudumine.

Välismaal on loodud ka keerukamaid generaatorigaas-elemente. Ühe sellise negatiivsesse elektroodi juhitakse gaasigeneraatorist saadav vesigaas, kuna positiivsesse elektroodi suunatakse kuuma õhku. Kütuselement asub termostaadis, milles säilitatav temperatuur on umbes  $700^\circ C$ . Termostaati köetakse soojuse arvel, mis eraldub elemendis reageerimata jäänud gaaside põlemisel.

Ei puudu võimalus muundada kütuselementide abil elektrienergiaks ka põlevkivis peituvat keemilist energiat. Põlevkivist võib töötlemisel saada kõrge kütteväärtusega gaasi, mille koostis on ligikaudu järgmine: 32%  $C_nH_{2n}$ , 36%  $C_nH_{2n+2}$ , 12,5%  $H_2$ , 4%  $H_2S + CO_2$ , 9%  $CO$ , 0,5%  $O_2$  ja 6%  $N_2$ . Seda gaasi on mõeldav kasutada kütuselementis analoogiliselt generaatorigaasiga. Kui gaasigeneraator töötab seejuures kasuteguriga 80% ja kütuselement kasuteguriga 70%, siis ulatub kogu seadme kasutegur 56%-ni.

Biokeemiline ehk orgaaniline kütuselement. Saadav elektrienergia vabaneb siin orgaanilise aine lagundamise protsessis, mida teostavad bakterid. Seejuures tekkiv väävelvesinik  $H_2S$  laguneb ja vabanev vesinik ühineb hapnikuga.

Biokeemiline kütuselement koosneb kahest sektsioonist, kummaski on inertsest ainest elektrood. Sektsioone ühendab ionide vahetust võimaldav vahekeskkond, milles on  $KCl$  lahus. Anoodiga sektsioonis on kütuselahus, näiteks orgaanilist ainet sisaldav merevesi, millele on lisatud katalüsaatorina toimivaid fermente. Katoodiga sektsioonis on merevesi ja hapnik. Pealt on sektsioonid kaetud isoleeriva õlikihiga.

Biokeemilise kütuselementi kasutegur on umbes 50%. See on madalam kui eespool kirjeldatud kütuselementidel, sest osa energiat kasutatakse elemendis toimuvates elektrokeemilistes reaktsioonides, orgaaniliste või anorgaaniliste ainete assimileerimisel bakterite poolt. Looduslikes tingimustes on seda liiki hiiglaslikuks kütuselementiks meri, milles toimub vetikate ja muude pisiorganismide pidev lagunemine. Biokeemilistes kütuselementides võivad kütusena leida kasutamist ka tööstuste orgaanilised jäätmed, samuti roiskvesi.

Paar sõna kütuselementide perspektiivist.

On arvata, et laialdast kasutamist leiavad esmajoones need kütuselemendid, milles kütusena kasutatakse süsi-vesinikke. Nendest elementidest saadava elektrienergia hind arvatavasti ei ületa suurtes aatomielektrijaamades toodetava elektrienergia hinda.

On tõenäoline, et kütuselemente hakatakse tulevikus kasutama peamiselt liiklusvahendites, olgu siis linna- või tööstustranspordis või ka põllumajanduses. Saksa DV-s kogutud andmetel annab tänapäeval linna-autotranspordi eksploatatsioonikulude võrdlus (lähtudes liiklusvahendites kasutatavatest jõuseadmetest) järgmise pildi: bensiinimootorid — 100%, akutoitega elektrimootorid — 50%, kütuselementidega elektrimootorid — kaasajal 125%, lähemas tulevikus 30%.

Kuigi kütuselement-toitega elektrimootorid on veel tänapäeval kallimad kui bensiinimootorid, võib juba lähem tulevik tuua muutuse esimeste kasuks.

On väga tähtis, et kütuselementides kasutatavaid lähteaineid on võimalik regenereerida, s. o. taastada kas keemilisel, elektrokeemilisel, fotokeemilisel või termilisel teel. Näiteks vesinikelemendi lähteaineid vesinikku ja hapnikku saab regenereerida vee elektrolüüsimisega. See asjaolu võimaldab kütuselementide kasutamist ka kosmoselaevades. Selleks otstarbeks peetakse kõige kohasemaks vesinikelementi, samuti vesinik-broomelementi. Välismaal on väljatöötamisel ka täiesti uus kütuselement, milles kütusena kasutatakse lämmastikhapendit ja hapendajana kloori. Nende regenereerimine toimub valguse toimetel.

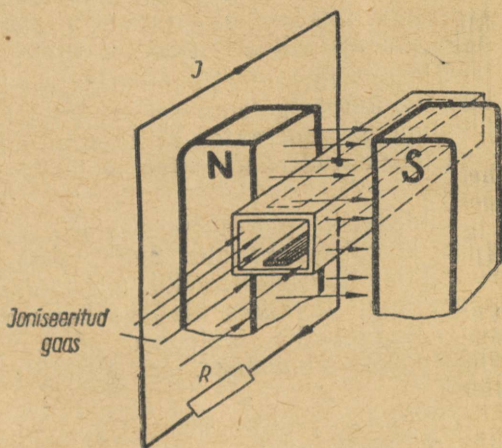
Täiesti uutest, veel väljatöötamisel olevatest kütuselementidest võiks nimetada liitium-vesinikelementi, naatrium-hapnikkelementi ja ka tsink-kloorelementi.

Kütuselemendid võivad leida rakendamist ka põllumajanduses. Kirjanduse andmeil ongi Inglismaal ehitatud traktor, mille 15 kW võimsusega elektriajamat toidab propaan-hapnikkelementide komplekt. Komplekt koosneb 1008 üksikelemendist, mis moodustavad 4 patareid. Iga patarei sisaldab omakorda 28 sektsiooni, igas sektsioonis on 9 elementi. Elementi pinge on 1 V. Seadme üldvõimsus on 15 kW, selle teoreetiline kasutegur 90%.

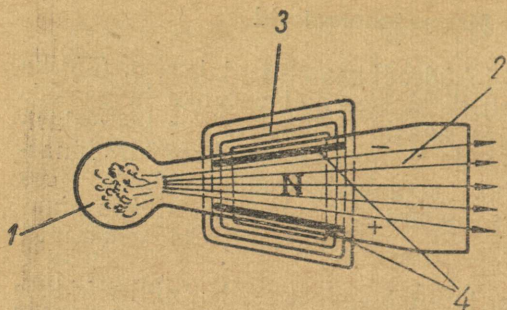
## 2. Plasmageneraatorid

Uurimised magnetohüdrodünaamika alal, s. o. füüsika valdkonnas, mis käsitleb ioniseeritud vedelike ja gaaside liikumist magnetväljas, avasid teadlastele uue tee elektrienergia saamiseks — selle tootmiseks magnetohüdrodünaamilisel meetodil nn. magnetohüdrodünaamilistes ehk plasmageneraatorites (mõnes kirjanduslikus allikas nimetatakse neid ka magnetogasodünaamilisteks generaatoriteks).

Plasmageneraator kujutab endast seadet, milles kütuse põletamisel saadav soojusenergia muundub ioniseeritud gaaside, s. o. plasma abil vahetult elektriliseks. Seejuures genereeritakse elektrienergia samal põhimõttel nagu tavalistes masingeneraatoriteski, s. o. elektromagnetilise induktsiooni teel, mille kohaselt magnetväljas liikuvates juhtmetes indutseerub elektromotoorne jõud. Mõnes plasmageneraatoris leiab kasutamist ka plasmas esinev Halli nähtus. Sel korral nimetatakse plasmageneraatorit Halli generaatoriks. Vahe tavalise masingeneraatori ja plasmageneraatori vahel seisab selles, et viimases puuduvad lii-



Joon. 4—6. Plasmageneraatori põhimõtteline skeem. Elektromagnetilise induktsiooni kohaselt indutseerub magnetväljas liikuv gasis elektromotoorne jõud.



Joon. 4—7. Plasmageneraatori skeem. 1 — põlemiskamber; 2 — ioniseeritud gaasid; 3 — magnetvälja tekitav mähis; 4 — elektrodid.

kuvad osad ja mähiseid asendavad ioniseeritud gaasid, milles indutseerubki elektromotoorne jõud.

Ioniseeritud gaas juhitakse läbi tugeva magnetvälja. Magnetväljas liikuvatele elektrilaenguga osakestele avaldab teatavasti mõju Lorentzi jõud, mille toimel positiivse laenguga osakesed liiguvad ühele elektrodile, negatiivse laenguga osakesed aga teisele. Seetõttu ilmneb elektroodidel potentsiaalivahe (joon. 4—6).

Plasmageneraatori põhilisteks osadeks on põlemiskamber, kus kütuse põletamisel saavutatakse väga kõrge temperatuur, ja generaator, milleks on vahetult põlemiskambri ühendatud ruum, mida läbib väga tugev magnetväli (joon. 4—7).

Lihtsamal plasmageneraatoris voolab ioniseeritud gaas koonilises kanalis. Selle vastaskülgedel asetsevad suurepinnalised elektrodid, mis täidavad siin sama ülesannet nagu tavalises alalisvoolugeneraatoris masinaharjad. Magnetvälja jõujooned on suunatud paralleelselt elektroodide pindadega, ent risti plasma liikumise suuna.

Oluliseks probleemiks plasmageneraatori juures on gaaside ioniseerimine, s. o. plasma tekitamine. Termoionisatsioon nõuab üldiselt väga kõrgeid temperatuure, enamikul gaasidel esineb see alles 5000—6000°C juures. Et saada põlemiskambris positiivsete ionide ja elektronide vajalik kontsentratsioon ka tehniliselt sobivamatel tem-

peratuuridel (2500—3000° C), selleks tuleb gaasile lisada 0,1—1% kergesti ioniseeruvaid metalliaurusid (naatriumi, kaaliumi või tseesiumi) või vastava emiteeriva katoodi abil vabu elektrone. Gaaside ioniseerumist on võimalik suurendada ka elektrilahenduse teel.

Nagu juba tähendatud, indutseerub plasmale selle liikumisel magnetvälja elektromotoorne jõud. Viimane on võrdeline magnetvälja tugevusega ja ioniseeritud gaasi, s. o. plasma liikumise kiirusega.

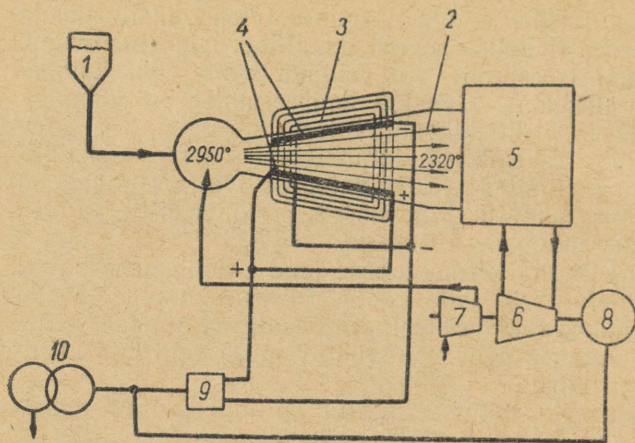
Indutseeritud elektromotoorne jõud kutsub generaatori kinnises vooluringis esile voolu. Elektromotoorset jõudu püütakse suurendada sel teel, et gaaside suunamisel generaatorisse antakse neile võimalikult suur, isegi heli kiirusest suurem kiirus.

Elektrienergia indutseerumisel on ioniseeritud gaasidele pidurdav toime. Seetõttu väheneb gaaside kiirus ja ühes sellega ka nende energiasisaldus.

Plasmageneraatori tööpõhimõtte ei ole üldiselt uus, see leiutati juba XIX sajandil, kuid tema praktilisele rakendamisele on asutud alles tänapäeval.

Mõte kasutada ära magnetväljas liikuva vedeliku juhtivus elektrienergia saamiseks kuulub prantsuse füüsikule Dominique Aragoale, kes väljendas selle kohe pärast induktsooninähtuse avastamist Faraday poolt. Viimane kontrollis Arago ideed, mõõtes Thamesi jões pinget, mis indutseerus jõevees selle liikumise tõttu Maa magnetväljas. Tulemused olid sedavõrd tühised, et praktilisest kasutamisest ei saanud juttugi olla. Ent idee ise ei ununenud. Ja käesoleva sajandi algusest peale kerkib see ühel või teisel kujul jälle esile mitme riigi patendiametis, kusjuures esialgsele mõttele pinge indutseerumisest vedelikes liitub ka idee sama nähtuse esinemisest magnetväljas liikuvates gaasides. Ent täiel määral asuti neid rakendama alles 10—15 aastat tagasi.

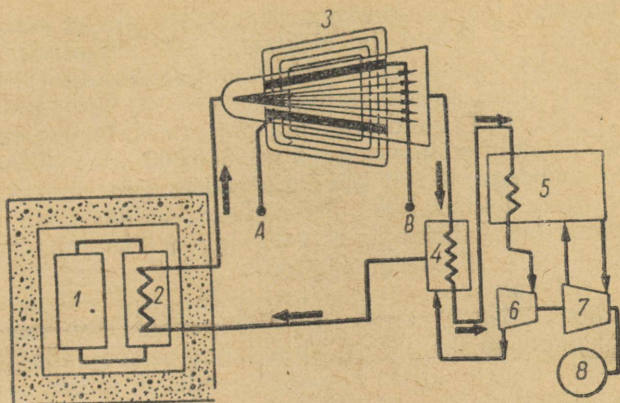
Pidevalt töötavaid plasmageneraatoreid ei ole veel olemas. Seni on ehitatud vaid katseksemlare, sedagi enamasti võimsusega mitte üle 10 kW. Nagu juba tähendasime, on nendes tegemist plasmaga, mille temperatuur on ligi 3000° C. Seda temperatuuri peavad muidugi taluma plasmaga kokkupuutuvate seadmete osad. Materjali, mis vastaks täielikult kõigile püstitatud nõuetele, veel ei ole. See on ka peamiseks põhjuseks, miks seni ehitatud plasmageneraatorite tööperiood on äärmiselt lühike.



Joon. 4—8. Plasmageneraatoriga soojuselektrijaama skeem. 1 — söetolmu punker; 2 — ioniseeritud gaasid; 3 — magnetvälja tekitav mähis; 4 — elektroodid; 5 — katelagregaat; 6 — auruturbiin; 7 — õhukompressor; 8 — elektrigeneraator; 9 — vaheldaja; 10 — peatrafo.

Esimestel katseksemplaridel piirdus see vaid mõne sekundiga, hiljem minutitega. Näiteks mõne aasta eest ameeriklaste poolt ehitatud 10 kW katseseadme tööperiood oli ainult 5 minutit, alles viimasel ajal on suudetud seda pikendada 50 minutini. Kirjanduse andmeil on hiljuti Poola Teaduste Akadeemia Turbiinide Instituudis Gdanskis ehitatud 8-kW-se plasmageneraatori tööperiood juba 60 minutit. Need on kahtlemata julgustavad edusammud, mis lubavad loota, et ei ole kaugel aeg, mil plasmageneraator astub täie õigusega talle kuuluvale kohale tuleviku elektrijaamas.

Et plasmageneraatorist väljuvatel gaasidel on veel suhteliselt kõrge temperatuur ( $2200\text{--}2700^{\circ}\text{C}$ ), siis on mõeldav ühendada plasmageneraator tavalise aurujõuseadmega. Selline kombinatsioon osutub majanduslikult väga sobivaks ja seepärast arvatavasti ka kasutatavaks. Majanduslikel kaalutlustel peetakse otstarbekaks ehitada plasmageneraatorseadmeid võimsusega vähemalt 100 000 kW. Lähteenergia saamiseks võib kasutada kas



Joon. 4—9. Plasmageneraatoriga aatomielektijaama skeem. 1 — tuumareaktor; 2 — soojusvahendaja; 3 — plasmageneraator; 4 — soojuse regeneraator; 5 — katelagregaat; 6 — kompressor; 7 — auruturbiin; 8 — elektrigeneraator.

tahket, vedelat või gaasilist kütust või ka tuumakütust, s. o. saada kõrge temperatuuriga ioniseeritud gaase kütuse põletamisel (joon. 4—8) või viia neid plasmaseisundisse aatomireaktoris eralduva soojuse abil (joon. 4—9). Viimasel juhul võib arvutuste kohaselt seadme kasutegur tõusta 59%-ni.

Joonisel 4—8 on toodud 360 000 kW võimsusega plasmageneraatoriga tahkel kütusel töötava soojuselektrijaama ideekavandi skeem (Ameerika Ühendriigid).

Söetolm juhitakse punkrist 1 põlemiskambrisse, kuhu kompressori 7 abil surutakse ka 2000 °C kuumutatud õhku. Eelsoojendatud õhk võimaldab kütuse põletamisel saavutada umbes 2900—2950 °C temperatuuri. Sama temperatuur on ka kütuse põletamisel saadud gaasidel. Et gaasid seejuures ioniseeruksid, lisatakse nendele veidi kaaliumi. Selle tagajärjel saadaksegi küllaldase elektrijuhtivusega plasma. Põlemiskambrist suundub plasma koonusekujulisse generaatorisse, milles ta saavutab väga suure kiiruse — tuhat meetrit sekundis ja rohkemgi. Sellise kiirusega plasma paiskub läbi tugeva magnetvälja, mille tekitavad vastavad magnetmähised 3. Magnetväli on suuna-

tud risti joonise pinnaga. Plasmas leiduvad laenguga osakesed — ionid ja elektronid — suunduvad Lorentzi jõu toimel vastavatele elektroodidele 4, mille tõttu viimaste vahel tekib potentsiaalivahe.

Sel teel saadakse plasmageneraatori elektroodidelt alalisvoolu võimsusega kuni 360 000 kW. Osa energiat võimsusega 18 000 kW kulutatakse generaatoris magnetväljade tekitamiseks. Ülejäänud valdav osa energiast muundub vaheldajas 9 vahelduvvooluks, mis suunatakse läbi trafo 10 energiasüsteemi.

Plasmageneraatorist väljuvate gaaside temperatuur on umbes 2320 °C. Osa väljuvate gaaside soojusest kasutatakse põlemiskambris antava õhu eelsoojendamiseks, ülejäänud aga tavalises katelagregaadis 5, milles saadav veeaur juhatakse auruturbiini. Auruturbiin 6 käitab kompressorit 7 ja vahelduvvoolugeneraatorit 8.

Plasmageneraatorist väljuvate gaaside soojuse selline ärakasutamine peaks toodud seadme korral andma täiendavalt elektrienergiat võimsusega kuni 107 000 kW.

Joonisel 4—9 on toodud tuumakütusel töötava plasmageneraatoriseadmega soojuselektrijaama skeem [13].

Tuumareaktori soojusvahendajas 2 kõrge temperatuurini kuumutatud gaas (argoon või heelium, millele ioniseerumise hõlbustamiseks lisatakse 1% tseesiumi) ioniseerub täielikult. See juhatakse plasmageneraatorisse, kus ionid ja elektronid liiguvad tugevas magnetväljas vastavatele elektroodidele, andes seal ära oma laengud. Elektroodide vahel tekib kõrge potentsiaalivahe ning plasmageneraator on suuteline andma alalisvoolu, mis suunatakse vaheldajasse, kus see muundatakse vahelduvvooluks. Alles seejärel saab plasmageneraatorites toodetud elektrienergiat suunata üldisesse vahelduvvoolu-elektivõrku.

Plasmageneraatori läbinud gaas aga juhatakse tavalisse katelagregaati 5, millest väljumisel gaas surutakse vastava kompressori 6 abil tagasi tuumareaktorisse. Enne katelagregaati jõudmist läheb plasmageneraatorist tulnud gaas läbi vastava soojusregeneraatori 4, kus osa soojust antakse tuumareaktorisse tagasipöörduvale jahtunud gaasile.

Toodud tüüpi elektrijaama kasutegur peaks ületama 55%.

Kirjeldatud plasmageneraatorite peamiseks puuduseks on see, et nad annavad alalisvoolu. Kas siis seda liiki

generaatorites ei ole võimalik saada vahelduvvoolu? Selgub, et teoreetiliselt on see võimalik. Selleks tuleks alaline magnetväli asendada magnetväljaga, mis muutub ajaliselt siinusseaduse järgi ( $\Phi = \Phi_0 \sin \omega t$ ). See vahelduv magnetväli peaks liikuma plasmaga samas suunas, kuid erineva kiirusega. Plasmas indutseeritakse siis vahelduv elektromotoorne jõud ja see kutsub esile voolu, mille põhjustatud magnetväli lõikub vastava mähisega, tekitades selles juba rakendamist leidva elektromotoorse jõu.

Vahelduva magnetvälja võib tekitada mähise abil, mis on ühendatud järjestikku koormusvooluringiga. Vooluringi lülitatakse ka niisuguse mahtuvusega kondensaator, et loodud võnkeringi resonantsisagedus vastaks võrgusagedusele 50 Hz.

Vahelduvvoolu-plasmageneraatorid on alles väljakujundamisel, neid ei ole veel ehitatud, kuid see toimub kindlasti kõige lähemas tulevikus.

### 3. Termogeneraatorid

Termoelektrilisi nähtusi käsitledes kõnelesime lühidalt ka raadioaparaatide toitmiseks valmistatud termogeneraatoritest.

Suured edusammud pooljuhtide loomise alal ning uute, sealhulgas sünteetiliste ainete ja sulamite ilmumine loob võimalused ka termogeneraatorite väljaarendamiseks. Eriti otsitavad on sellised pooljuhtmaterjalid, millest koostatud termogeneraatorid võiksid töötada ülikõrges temperatuuris.

Seni loodud termogeneraatorite kasutegur ei ole suur, enamikul juhtudel 8—10%. Kaasaegsetel seadistel küünib ta juba 18—19%-ni ja on lootusi viia see tulevikus 20—30%-ni. Sellist veendumust sisendavad alles viimasel ajal pooljuhtidena kasutusele võetud metallkeraamiliste materjalide omadused. Need pooljuhid kujutavad endast ülikõvu, raskesti sulavaid karbiide, boriide, nitriide ja muid seda laadi ühendeid.

Uued materjalid nõuavad ka termoelementide uusi konstruktsioone. Niisugune termoelement koosneb tavaliselt metallkeraamilisest torust ja selles paiknevast vardast. Ühes otsas on toru vardaga kokku sulatatud, teises aga on toru ja varda külge ühendatud juhtmed. Termoelement asub kaitsekeskkonnas — kas vaakumis, inertgaasis või vesinikus. Termoelement, mille metallkeraamiline toru on

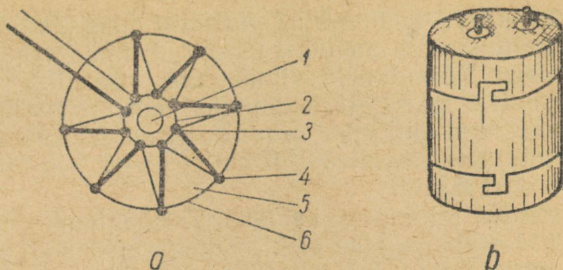
valmistatud molübdeeni ja räni ühendist, torus asuv varras aga boorkarbiidist, talub temperatuuri kuni 1800 °C, kusjuures elemendi termoelektromotoorne jõud küünib kuni 40 mikrovoldini ühe kraadi kohta, ületades seega kaugelt senist kuni 1600 °C temperatuuris kasutatavat plaatina-plaatinaroodiumi termoelementi.

Ühe termoelemendi metallkeraamiline toru valmistatakse titaankarbiidist, varras aga boorkarbiidist. Saavutatav termoelektromotoorne jõud küünib kuni 45 mikrovoldini ühe kraadi kohta. Ent see ei ole veel piir. Termoelement, mis koosneb boor- ja ränikarbiididest, võimaldab koostada elektrienergia tootmiseks täiel määral kohase termogeneraatori. Muidugi oleks enneaegne rääkida elektrijaamast, milles elektrienergiat toodetakse ainult termogeneraatorite abil. Kõne alla võib tulla ainult termogeneraatorite koostöö tuumareaktoriga ja sedagi tuleviku aatomielektrijaamades. Tuumareaktoris eralduv soojus juhitakse siin soojuskandja vahendusel termogeneraatori kuumadele liitekohtadele, kus see muundub elektrienergiaks.

Mingem veelgi kaugemale. Termogeneraatoriks võiks olla ka tuumareaktor. Selleks tuleks termoelemente moodustavad ained kanda reaktoris soojust eraldavatele elementidele, näiteks kapslitele, mis katavad uraanivardaid, või — veelgi parem — anda termoelektrilised omadused otse ainele, millega on segatud või milles on lahustatud tuumakütus (uraan või plutoonium).

Väiksemates termogeneraatorseadistes on mõeldav ära kasutada radioaktiivsete ainete kiirgust. Neeldudes aines põhjustab radioaktiivne kiirgus selle soojenemist. Ajakirjanduse andmeil on välismaal loodud 5 kW võimsusega termogeneraatorseade, milles termoelementide kuumadele liitekohtadele suunatakse  $Po^{210}$  radioaktiivset kiirgust. Seadme kasutegur olevat 10%.

Kui õõnsa metallkerakese sisepind katta mõne radioaktiivse ainega, mis paiskab välja alfaosakesi, siis viimased ei suuda kerakesest lahkuda ja kogu kiirguse energia jääb sinna, mistõttu temperatuur tõuseb kaunis kõrgele — üle 2000 °C. Kui kerakese kuumus kanda üle vastavate termopaaride kuumadele liitekohtadele, tagades samal ajal külmadele liitekohtadele madala temperatuuri, siis tekib termopaaridest koostatud termopatarei klemmidel potentsiaalivahe.



Joon. 4—10. Radioaktiivsel kiirgusel põhinev termopatarei. *a* — patarei skeem; *b* — patarei üldvaade. 1 — metallkera, milles on radioaktiivset ainet; 2 — isolatsioonikiht; 3 — termopaari kuum liitekoht; 4 — termopaari külm liitekoht; 5 — soojusisolatsioon; 6 — väliskest.

Joonisel 4—10 on toodud välismaise termopatarei skeem ja üldvaade. Väikesesse metallist kera on paigutatud radioaktiivne poloonium. Kera on pealt kaetud kuumuskindla elektriisolatsiooniga, mille vastu on surutud järjestikku ühendatud termopaaride kuumad liitekohad. Need termopaarid on koostatud auk- ja elektronjuhtivusega pooljuhtidest. Termopaaride külmad liitekohad on suunatud väljapoole ja nad asetsevad mõnes soojusisolatsioonis, näiteks tsemendis. Kogu seadis on kaetud alumiiniumkestaga. Sellise 40 termopaarist koostatud termopatarei võimsuseks (kui radioaktiivseks aineks on poloonium) kujuneb umbes 9,4 millivatti.

#### 4. Termoemissioongeneraatorid

Seadiseid, mis võimaldavad elektronide termoemissiooni abil muundada soojusenergiat vahetult elektriliseks, nimetatakse termoemissioongeneraatoriteks, sageli ka energia termoelektron- ja termoioonmuundajateks.

Termoemissioongeneraatori leiutas ise seda teadmata 1883. a. kuulus ameerika leidur Thomas Alva Edison (1847—1931). Selle kohta jutustatakse järgmist.

Teatavasti leiutas vene elektrotehnik A. N. Lodõgin elektrihõõglambi. Esmakordselt maailmas valgustasid 1873. a. uued lambid Venemaa pealinna Peterburi tänavat.

1877. a. õnnestus Edisonil hankida mõned Lodõgini valmistatud lambid. Et need ei olnud veel täiuslikud, siis asus Edison neid viimistlema. Sõeniidi valmistamiseks sobiva materjali leidmiseks tehti tuhandeid katseid. Ka siis, kui oli juba organiseeritud hõõglampide tööstuslik tootmine, sooritas Edison nendega aeg-ajalt mitmesuguseid katseid.

Nii toimus see ka 1883. a. Hõõglambil, millega seekord katsetati, puudus elektrootide vahel hõõgniit, elektrootid aga olid painutatud teineteise lähedale. Edison pumpas kolvist õhu välja. Seejärel ühendas ta kolvist väljaulatavad elektrootid tundliku mõõteriistaga ja hakkas ühte elektrooti gaasileegis kuumutama. Kohe näitas mõõteriist pinget. Teise versiooni kohaselt paigutas Edison klaaskolbi hõõgniidi lähedale metallplaadikese ja ühendas selle küttepatarei positiivse poolusega. Kui hõõgniit hakkas hõõguma, läbis vool ka plaadikest. Tolle aja kohta oli see täiesti arusaamatu nähtus. Kuigi Edison ei osanud veel näha oma avastuse praktilist tähtsust, võttis ta sellele siiski patendi. Kõneldakse, et Edisonil olevat kogusummas olnud umbes poolteist tuhat patenti.

Ja selle «igaks juhaks» võetud patendi tõttu peeti teda hiljem ekslikult kuni viimase ajani elektronlambi leiutajaks. Tegelikult kajastub patendi kirjelduses termoemissioongeneraatori tööpõhimõte. Tõsi küll, termoemissioongeneraatori algtüübiks on ju kahe elektrootiga elektronlamp — diod. Kuid erinevalt elektronlambist ei vaja termoemissioongeneraator anoodpinge rakendamist. Seadise töö põhineb termoemissioonil.

Diodi üht elektrooti — katoodi — kuumutatakse kõrge temperatuurini, mille toimel katoodi pinnalt algab elektronide eraldumine (emissioon). Osa elektrone, mida emitteerib katood, pääsebki oma suhteliselt suure kiiruse tõttu anoodile, ilma et elektrootide vahel oleks elektrone kiirendav elektriväli. Teiste sõnadega: anoodvooluringis esineb vool, kuigi anoodile pole rakendatud anoodpinget.

Osa soojusenergiat, mis antakse katoodile kuumutamisel, kandub sel teel anoodile elektrienergiana, ülejäänu aga läheb osalt soojusena anoodile, osalt hajub kadudena ümbruskonda.

Pinge, mida termoemissioongeneraator annab, on umbes 1—2 V, ent üksikute generaatorite ühendamise järjestikku võimaldab saada ka kõrgemat pinget.

Kuigi termoemissioongeneraatori tööpõhimõte ei ole enam uus, asuti seda igakülgsest uurima ja seejärel ka rakendama alles viimasel aastakümnel. Uusimate laboratoorsete seadiste kasutegur on 15—17% ja erivõimsus (s. o. võimsus katoodi pinnauhiku kohta) 15—30 W/cm<sup>2</sup>. On arvata, et need näitajad on tulevikus veelgi kõrgemad: kasutegur umbes 30—40% ja erivõimsus 60—100 W/cm<sup>2</sup>.

Termoemissioongeneraatori kasutegurit saab suurendada nii katoodi temperatuuri tõstmisega kui ka selle materjali valikuga, samuti katoodi ja anoodi vahekauguse vähendamisega.

Elektronide emissiooni käsitlemisel kõnelesime, et suure hulga elektronide liikumisel katoodilt anoodile kujuneb anoodi lähedal ruumlaeng. See negatiivne ruumlaeng takistab uute elektronide liikumist anoodile, mistõttu väheneb ka generaatorist saadav elektrienergia. Nimetatud pahe kõrvaldamiseks täidetakse elektroodidevaheline ruum termoemissioongeneraatoris tavaliselt tseesiumiauruga. Tseesiumi positiivsed ioonid, mis tekivad termoionisatsiooni tagajärjel, neutraliseerivadki elektronide poolt anoodi lähedal tekitatud negatiivse ruumlaengu.

Termoemissioongeneraator kujutab endast seadist töötamiseks temperatuuril 1200—2800 °C. Vajaliku elektroniemissiooni kindlustamiseks valmistatakse katood vastavast erimaterjalist: töötamiseks temperatuurivahemikus 2300—2800 °C peamiselt volframist ja tantaalist, töötamiseks temperatuurivahemikus 1600—2200 °C tooriumbikarbiidist (ThC<sub>2</sub>), tsirkoonium- ja uraanmonokarbiidist (ZrC ja UC tahke lahus) või ka volframi ja tooriumi kokkupressitud segust, kuna töötamiseks temperatuurivahemikus 1200—1600 °C valmistatakse termoemissioongeneraatorite katoodid raskesti sulavatest metallidest või pooljuhtidest, mis on kaetud elektrone kergesti emiteeriva kihiga; kõige enam kasutatakse volframkatode, mis on kaetud baariumiga, vahel ka tseesiumiga [16].

Anoodi materjaliks on tavaliselt kas volfram-, hõbe- või vaskhapend.

Termoemissioongeneraatorid on kas vaakumseadised või täidetud gaasi või metalliaurudega. Kõige sagedamini kasutatakse selleks kas tseesiumi, pliid või kaaliumi.

Võrreldes vaakumseadistega on tseesiumiaurudega täidetud termoemissioongeneraatoril mõningaid eeliseid: võimalus teatavates tingimustes genereerida vahelduv-

voolu ja pikem iga. Seevastu on vaakuum-termoemissioon-generaatori eeliseks suurem erivõimsus ja kasutegur.

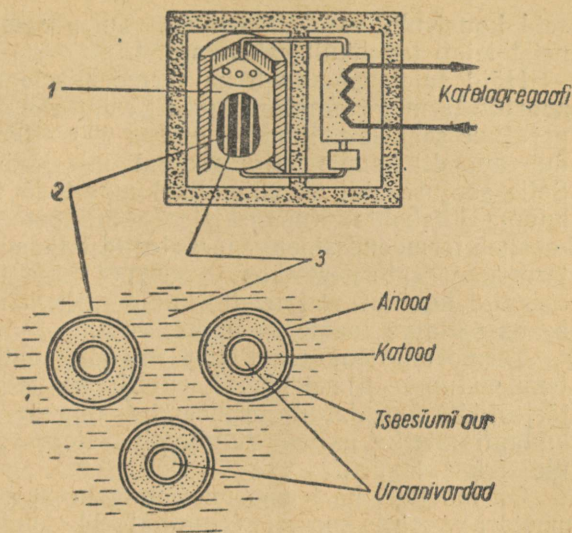
On ehitatud ka päikese soojuskiirguse ärakasutamisel põhinevaid termoemissioongeneraatoreid. Päikeseplatade nimetuse all on nad kujunenud kosmoselaevade põhilis-teks elektrienergiaga varustajateks. Nende kasutegur on 9—10%, mõnedel tüüpidel isegi 14—15%. Arvatakse, et lähemas tulevikus võib see tõusta 17%-ni.

Päikeseplatade nimetust kannavad ka päikese kiirgusel töötavad termogeneraatorid ja fotopingeelemendid, mida kasutatakse samuti kosmoselaevadel.

Välismaiste teadlaste arvates hakatakse termoemis-sioongeneraatoreid rakendama osa aatomielektriijaamade tuumareaktorites eralduva soojusenergia vahetuks muun-damiseks elektriliseks. Tänapäeva aatomielektriijaamades toimub elektrienergia tootmine põhiliselt samal viisil nagu tavalises soojuselektriijaamaski, tuumareaktor vaid asendab soojuselektriijaama küttekollet. Muidugi, koos küttekoldega langeb ära ka tavaline kütus kogu mahuka laomajandu-sega, toitepunktide ja tuhakoristusega. Aatomielektriijaama põhiseadmeteks on seega tuumareaktor, katelagregaat, auruturbiin ja elektrigeneraator.

Termoemissioongeneraatorite kasutamine aatomielektri-jaamades on mõeldav komplektis auruseadmetega. Termo-emissioongeneraator tuleks paigutada tuumareaktorisse nii, et osa reaktoris eralduvat soojusenergiat kulutataks termoemissioongeneraatori katoodi kuumutamiseks. Sel korral oleks aatomielektriijaama põhiseadmete järjestus järgmine: tuumareaktor, termoemissioongeneraator, katel-agregaat, auruturbiin ja elektrigeneraator. Termoemis-sioongeneraatorite rakendamine tõstab aatomielektriijaama kasutegurit; kui auruseadmete kasutegur on umbes 30% ja termoemissioongeneraatori kasutegur samuti 30%, siis võib jaama üldine kasutegur olla umbes 50%.

Termoemissioongeneraatorite ja tuumareaktori koos-tööga on võimalik minna veelgi kaugemale. On mõeldav selline kombinatsioon, mille kohaselt tuumareaktoris soo-just eraldavad elemendid, näiteks tuumakütuse vardad kaetakse kergesti elektrone emiteeriva ainega, mis võimal-dab neid muuta omapärase konstruktsiooniga termoemis-sioongeneraatori katoodideks. Iga niisugust varraskatoodi ümbritseb vastav torukujuline anood, mis on täidetud tsee-



Joon. 4—11. Termoemissioongeneraatorid ehitatuna kokku tuumareaktoriga. 1 — reaktor; 2 — termoemissioongeneraatorid; 3 — soojuskandja.

siumiauruga. Torusid jahutab väljastpoolt torude vahel liikuv soojuskandja (joon. 4—11).

Termoemissioongeneraatorid muundavad osa tuumareaktsioonil eralduvast soojusest vahetult elektrienergiaks. Ülejäänud soojus antakse soojuskandja kaudu auruturbiinseadmele. Soojusvahendaja kahekordse ringlussüsteemi korral (üks ringlussüsteem hõlmab tuumareaktorit ja soojusvahendajat, teine soojusvahendajat ja katelseadet) ümbritseks esimese ringlussüsteemi soojusekandja eespool nimetatud konstruktsiooniga termoemissioongeneraatorite anoode ja annaks saadud soojusenergia soojusvahendajas edasi teisele ringlussüsteemile, milles soojusenergia kandub juba auru abil üle katelseadme turboagregaati. Siin muundub soojus mehaaniliseks energiaks, viimane aga turbiiniga ühendatud elektrigeneraatoris elektrienergiaks.

Analoogilistel kombinatsioonidel on väga mitmesugu-

seid konstruktiivseid lahendusi. Tulevik näitab, milline neist leiab tegelikult rakendamist.

Häid tulemusi annab ka termoemissioongeneraatorite koostöö termogeneraatoritega. Et esimestel on anoodi temperatuur seadise töötamisel umbes 800—1000 °C, siis eraldub anoodil kaunis palju soojust, mis jääb kasutamata. Selle soojuse abil on võimalik kuumutada termoelemendi kuuma liitekohta. Kui elektrienergiat toota seadmes, mis koosneb termoemissioongeneraatoritest (kasutegur 30%) ja termogeneraatoritest (kasutegur 20%), kusjuures esimeste anoodid kuumutavad teiste kuumi liitekohti, siis oleks seadme üldine kasutegur umbes 44%.

Termoemissioongeneraatori anoodi suhteliselt kõrget temperatuuri on mõeldav kasutada ka teise (esimesega järjestikku ühendatud) termoemissioongeneraatori katoodi kuumutamiseks, millega tunduvalt tõstetakse kogu seadme üldist kasutegurit.

On mõeldav ka termoemissioongeneraatori ja reaktiivmootori vaheline koostöö. Generaatori katoodi kuumutaksid sel korral mootori heitgaasid. Termoemissioongeneraator kujutab endast kahekordsete seintega õõnsat, umbes 30 cm pikkust silindrit, mille seintevaheline kinnine siseruum on täidetud tseesiumiauruga. Silindri sisemine läbimõõt on umbes 4,5 cm. Generaatori seinad on erinevatest metallidest: sisemine (see on generaatori katoodiks) on valmistatud molübdeenist, väline (anood) aga vasest.

Generaatorit läbides kuumutavad reaktiivmootori heitgaasid katoodi umbes 2200 °C. Selle temperatuuri toimel hakkab katoodi pinnalt hulgaliselt eralduma elektrone ja lendama anoodile. Nii tekib elektroodide vahel potentsiaalivahe ja seadis annab pidevalt voolu. Niisuguse termoemissioongeneraatori kasutegur on esialgu 8%, võimsus 0,25 kW.

Et kirjeldatud generaatori anood soojeneb umbes 250—300 °C, siis võiks selle soojuse ära kasutamiseks termoemissioongeneraatori ehitada kokku termogeneraatoriga, nii et viimase kuumad liitekohad asuksid üsna termoemissioongeneraatori anoodi lähedal.

## 5. Termotuumareaktsioonil eralduva energia vahetult elektrienergiaks muundamise võimalusest

Kaugema tuleviku küsimustest pakub kahtlemata huvi termotuumareaktsioonil eralduva energia vahetult elektriliseks muundamise võimalus. Termotuumareaktsioon kujutab endast kõrges temperatuuris toimuvat kergete elementide aatomituumade ühinemise protsessi. Seejuures eraldub väga palju energiat, tunduvalt suuremal määral kui raskete elementide (uraani, plutooniumi, tooriumi jt.) aatomituumade lagundamisel. Et toimuks kahe aatomituumade ühinemine, peavad tuumad sedavõrd lähenema, et nende vahel hakkaksid mõjuma tuumajõud. Alles siis tõmbuvad nad teineteise poole ja ühinevad uue elemendi aatomituumaks. Tuumajõudude mõjupiirkond on umbes  $1,8 \cdot 10^{-13}$  cm. Kaks aatomituumade peavad seepärast lähenema niivõrd, et nende vahe ei ületaks  $3,6 \cdot 10^{-13}$  cm. Sellel kaugusel avalduvad aatomituumade positiivsete osakeste, s. o. prootonite vahel ka suured elektrilised tõukejõud. Nende ületamiseks peabki aatomituumadel olema väga suur kineetiline energia. See saavutatakse osakeste kuumutamiseega väga kõrge temperatuurini. Niisugune temperatuur valitseb paljudel tähtedel, sealhulgas ka Päikesel.

Arvutused näitavad, et Päike oleks juba ammu kustunud, kui tal ei esineks pidevalt kulgevaid ja energiat eraldavaid protsesse. Nendeks saavad olla ainult elementide sünteesi ja lagundamise reaktsioonid.

Arvatakse, et Päikese sisemuse temperatuur künib mitmesaja miljoni kraadini. Ka valitseb seal väga kõrge rõhk — kuni mitukümmend miljardit atmosfääri. Sellistes tingimustes ei saa juttugi olla molekulidest ja aatomitest, vaid ainult plasmast.

Põhiliselt leidub Päikesel vesinikku, heeliumi, süsinikku ja lämmastikku; teisi elemente esineb vähe. Kõige rohkem on vesinikku ja heeliumi, juba üksi vesinik moodustab umbes 50% Päikese gaasilisest koostisest. Seepärast arvatakse, et Päikesel ja tähtedel toimuvateks termotuumareaktsioonideks on heeliumi moodustumise reaktsioonid. Need protsessid kujutavad endast tegelikult tervet reaktsioonide tsükli. Ühe niisuguse tsükli kohaselt ühineb vesiniku aatomituum (prooton) süsiniku aatomituumaga. Sellele järgneb terve seeria aatomituumade muundumise reaktsioone. Tsükli lõppsaaduseks on heeliumi ja süsiniku

aatomituumad. Seega jääb termotuumareaktsioonide tsükli alustanud süsiniku aatomituum lõpuks muutumata, neljast vesinikutuumast aga moodustub heeliumituum. Kõigi nende reaktsioonide käigus vabaneb palju energiat.

Nimetatud termotuumareaktsioonide tsükli kõrval on võimalik ka niisugune tsükkel, mille käigus vesinikutuumad liituvad vesiniku isotoobi deuteeriumi aatomituumaks, viimase liitumisel veel ühe prootoniga saadakse heeliumi kerge isotoobi  ${}^2\text{H}^3$  aatomituum. Selle reaktsiooniga ei lõpe veel tsükkel. Heeliumi kerge isotoobi  ${}^2\text{H}^3$  aatomituum liitub heeliumi  ${}^2\text{He}^4$  aatomituumaga, andes berülliumi  ${}^4\text{Be}^7$  tuuma, mis muundub edasi liitiumituumaks, ja alles ühe prootoniga liitumise tagajärjel saame tsükli lõppsaadusena kaks heeliumi aatomi tuuma.

On võimalik, et heeliumituumade süntees toimub Päikesel üheaegselt mõlema kirjeldatud reaktsioonidetsükli kohaselt.

Kuigi need reaktsioonide tsüklid kulgevad Päikesel väga aeglaselt — arvatakse, et igaüks kestab vähemalt miljoneid aastaid —, toimub neid üheaegselt lugematu arv ja see tagabki tohtu energiahulga pideva vabanemise, mis teeb Päikese kiirguse praktiliselt ammendamatuks. Arvutus näitab, et 1 kg heeliumi moodustumisel eraldub umbes 48 miljonit kilovatt-tundi energiat. Niisuguse tohtu energia inimkonna hüvanguks rakendamise eesmärk meelitabki tänapäeval teadlasi keskendama kogu tähelepanu reguleeritavate termotuumareaktsioonide teostamisele tehnilikes tingimustes. See ülesanne ei ole sugugi kerge. On ju jutt miljonikraadistest temperatuuridest.

Kas on üldse võimalik saavutada sellist temperatuuri? Ja kui olekski, siis missugune aparatuur peaks säärasele kuumusele vastu?

Seoses nende küsimustega meenub järgmine lugu, mida jutustatakse Thomas Alva Edisonist. Kuulus ameerika leiur kõnelnud meelsasti isiklikult igaühega, kes soovinud hakata tööle tema laboratooriumis. Eriti pärinud ta igalt uult inimeselt tema teaduslike huvide ja kavatsuste kohta. «Mul on väga hea idee,» jutustanud üks noormees, «tahan leiutada universaallahusti, niisuguse, mis lahustab kõik ained, mis iganes olemas... Mul puuduvad ainult raha ja võimalused selle kavatsuse teostamiseks!»

«Universaallahusti?» imestanud Edison ja lisanud siis:

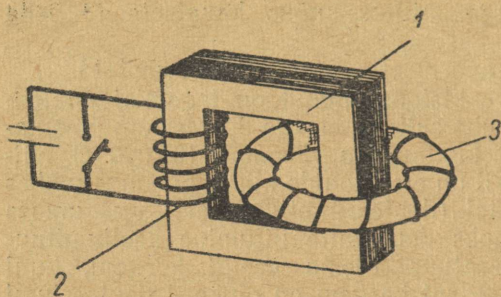
«Väga hea idee, aga millises nõus kavatsete te seda hoida?»

Sellele ei olevat noormees osanud midagi vastata.

Ka termotuumareaktsiooni puhul on tegemist analoogiliste raskustega. Juba selleks, et viia deuteerium plasmaolukorda, tuleb teda kuumutada vähemalt 100 000 °C. Nii-sugusel temperatuuril on elektronide kiirus plasmas umbes 4500 km/s, deutronitel (deuteeriumituumadel) aga umbes 1000 km/s. Et toimuks deutronite liitumine heeliumituumaks, peaks temperatuur olema veelgi kõrgem, kuni 370 miljonit kraadi. Pisut kergem on olukord deuteeriumi ja triitiumi (vesiniku raskem isotoop, aatomkaal umbes 3) segu korral, sest nendevahelise termotuumareaktsiooni tekkimiseks vajalik temperatuur on umbes 50 miljonit kraadi. Kuid ega seegi ole vähe. Peamisteks probleemideks seoses juhitava termotuumareaktsiooniga on seega ülikõrgete temperatuuride saavutamine ja plasma isoleerimine, s. o. lahendusruumi seintest eemalhoidmine. Tehniliselt on see teataval määral lahendatud. Plasma tekitamiseks on isegi mitu võimalust. Plasma hoidmise «nõu» aset aga täidab, nii imelik kui see ka ei ole, magnetväli.

Kõige lihtsam seade plasma tekitamiseks on järgmine. Võetakse toru ja täidetakse sobiva gaasiga. Toru ühes otsas eraldatakse õhukese metallvaheseinaga väike osa, mis täidetakse paukgaasiga. Viimase plahvatamisel metallvahesein puruneb ja rõhulaine levib piki toru, tekitades selles kõrget temperatuuri ning ühes sellega ka plasmat. Teise viisi kohaselt saab plasmat traadi pihustamisel vaakumis. Selleks asetatakse kahe elektroodi vahele peenike traat, millest juhitakse läbi kondensaatoripatarei tugev vooluimpulss. Suure energiahulga silmapilksel eraldumisel pihustub traat ja tekib väga kõrge temperatuuriga plasma. Säilitamiseks tuleb seda hoida kokku puutumast seadme seintega. Seda võimaldab liikuvate laengute ümber tekkiv magnetväli. Rööbiti asetsevad vooluga juhtmed teatavasti tõmbuvad. Analoogiline nähtus ilmneb ka plasma korral. Plasmat moodustavaid laenguga osakesi surub magnetväli üksteise ligi.

Seepärast väärib erilist tähelepanu selline (elektrodünaamiline) plasma tekitamise ja säilitamise viis, milles leiab ära kasutamist plasma ümber kujuneva magnetvälja eespool nimetatud toime (nn. pintšefekt). Nii-suguse plasma tekitamise viisi põhimõte on järgmine.



Joon. 4—12. Plasmareaktori skeem. 1 — trafo südamik; 2 — primaarmähis; 3 — toroid, milles hõrendatud gaasist kujuneb plasma.

Väga tugeva vooluimpulsiga esilekutsutud gaaslahenduse puhul tekivad plasma tõmbub magnetvälja toimel silindrilise või rõngakujulise lahenduskambri telje kohal kokku kitsaks helendavaks ribaks. Seejuures muundub plasma kineetiline energia soojuseks. Tekkivad kõrge temperatuur ja rõhk põhjustavad aga plasmariba laienemist. Magnetvälja ja temperatuuri ning rõhu vastupidise toime vaheldumisel hakkab plasma pulseerima, kusjuures kokkutõmbumisel tekivad temperatuur künib mitme miljoni kraadini.

Et viimati kirjeldatud plasma tekitamise viisiga on saadud kõige paremaid tulemusi, siis toimuvad tänapäeval juhitava termotuumareaktsiooni katsed peamiselt selle alusel.

Vastavad katseseadmed — reaktorid — ehitatakse trafo põhimõttel. Trafo sekundaarmähis kujutab endast sel puhul toroidi, milles kujunebki plasma. Ühes sellises seadmes (joon. 4—12) on toroid koostatud üksteisest isoleeritud ühemeetrise läbimõõduga alumiiniumrõngastest. Toroid, mille üldiseks läbimõõduks on kolm meetrit, on täidetud hõrendatud deuteeriumiga (hõrendus  $10^{-4}$  mm Hg).

Primaarmähise vooluringi on ühendatud kondensaatori-patarei, mille mahtuvus on 1600 mikrofaradit ja pinget 25 000 V. Iga 10 sekundi järel vooluring hetkeks suletakse ja toroidis olevat hõrendatud gaasi läbib umbes 0,005 sekundi jooksul vool tugevusega kuni 200 000 A. Selline vool põhjustab deuteeriumi sedavõrd suure kuu-

menemise, et toroidis tekib plasma. Nagu juba tähendasime, kujuneb suure kiirusega liikuvatest laetud osakestest koosneva plasma ümber tugev magnetväli. Viimane surub plasma toroidi telje kohal kokku ja selle temperatuur tõuseb surve tõttu veelgi kõrgemale. Katsetel on sel teel saadud kuni 5 miljoni kraadiseid temperatuure [27].

Plasmavoolu suunamiseks toroidis kasutatakse samuti magnetvälja, mis saadakse toroidi ümber oleva mähisega. See magnetväli on suunatud piki toroidi telge ja moodustab plasmale omapärase katte.

Juba plasma tekkimisel moodustub ka teda võõna ümbritsev tugev magnetväli, mis surub plasma kokku. Kõrge temperatuuri ja rõhu toimel plasmariiba aga laieneb, jahtub ja katkeb.

Plasma uuesti tekitamiseks tuleb trafo primaarmähisesse anda uus võimas impulss. Kui seda mähist toita üksteisele kindlas sageduses järgnevate impulssidega, siis hakkab ka plasmaga kaasnev magnetväli pulseerima sama sagedusega.

Kui toroidi ümber asetada vastav mähis, siis indutseerub viimases elektromotoorne jõud. Sel viisil on võimalik plasma abil muundada soojusenergiat vahetult elektriliseks.

Niisugust elektriijaama ei ole muidugi veel olemas, kuid pole kahtlust, et tulevikus leiab ka see elektrienergia tootmise viis mingil määral kasulikku rakendamist.

Tekib küsimus: kas ei ole mingit võimalust heeliumi sünteesimiseks tavalises temperatuuris? Langeksid siis ju ära kõik raskused, mis on seotud kõrge temperatuuri saavutamiselega. Tuleb välja, et niisuguseid reaktsioone, mille käigus vesiniku aatomituumad liidetakse tavalises temperatuuris heeliumi aatomituumadeks, võimaldavad elementaarosakesed, mida nimetatakse mesoniteks.

Mesonid tekivad kiirendusseadmetes kiirendatud prootonite või neutronite vastastikusel mõjutamisel. Nad eksisteerivad väga lühikest aega, ainult mõni miljondik sekundit. Kuid sellegi lühikese aja jooksul võib vesiniku aatomituum haarata mesoni oma mõjupiirkonda ja siis hakkab see elektronitaoliselt ümber vesiniku aatomituumale tiirlema. Nii tekib mesoaatom. Et mesoni mass on palju suurem elektroni massist, siis asub ta mesoaatomis ka vastavalt palju lähemal tuumale kui elektron tavalises vesiniku

aatomis. Mesoaatomi läbimõõt on palju väiksem tavalise vesiniku aatomi läbimõõdust. See aga loob aatomituumadele võimaluse läheneda üksteisele nii väikestele vahe- maadele, kus hakkavad juba mõjuma tuumajõud, s. o. tekivad tingimused termotuumareaktsiooni kulgemiseks tavalises temperatuuris.

Käesoleval ajal ei saa seda sünteesireaktsiooni veel kasutada energeetilistel eesmärkidel, sest mesonite tekitamine on liiga keerukas protsess, mis vajab palju rohkem energiat, kui sünteesireaktsioon seda ise annab. Ka esineb selle reaktsiooni teostamisel palju tehnilist laadi raskusi.

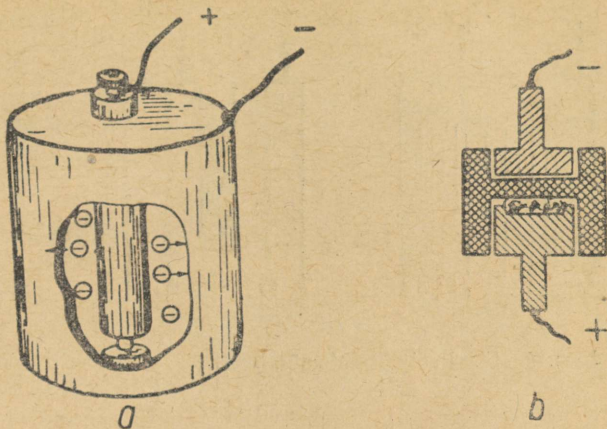
Ent senised saavutused juhitavate sünteesireaktsioonide alal lubavad siiski loota, et lähemate aastakümnete jooksul lahendatakse ka see probleem täielikult.

Kuidas võiks sellisel sünteesireaktsioonil eralduvat energiat muuta vahetult elektriliseks, selle kohta puudub veel ettekujutus. Kuid on kindel, et tulevik annab vastuse ka sellele küsimusele.

## 6. Mõningaid uusi pingeallikaid

Väga huvitavale soojusenergia elektriliseks muundamise viisile sattusid hiljuti täiesti juhuslikult ameerika insenerid. Uhes «Westinghouse'i» firma laboratooriumis viimistleti metallipindade emailiga katmise tehnoloogiat. Metallesemid jahutati sulaemaili kastmise järel vastava režiimi kohaselt aeglaselt toatemperatuurini. Kuuma eseme juhuslikul puudutamisel tundis üks töötaja torkeid, nagu oleks tegemist kerge elektrilöögiga. Juhtum äratas huvi ja lähemal uurimisel selguski, et kuumä emailikihi ja metalli vahel tekib potentsiaalivahe. Avastatud nähtus kasutati ära seadises, mis kuumutatuna 200—750 °C muundab soojuse elektrienergiaks.

Uus pingeallikas koosnes erilise emailiga kaetud raudvardast, millele kanti õhuke hõbedakiht. Raud ja hõbe olid seega elektroodideks, kuum email aga elektrolüüdiks, milles tekkisid elektrijuhtivust võimaldavad vabad ioonid. Pingeallika optimaalseks töötemperatuuriks osutus 650° C, võimsus hõbeda pinna ühe ruutsentimeetri kohta 0,2 yatti ja pinge 1 V. Teistest välismaal kasutatavatest uut tüüpi pingeallikatest võiks nimetada radioaktiivsel kiirgusel põhinevaid aatomipatareisid. Nende võimsus on

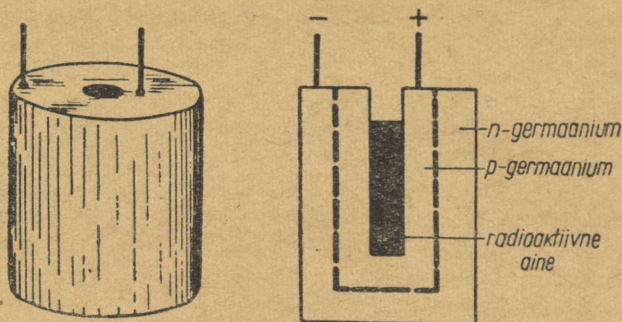


Joon. 4—13. Aatomipatarei. *a* — radioaktiivne aine on kantud sisemisele vardale; *b* — radioaktiivne aine asetseb alumise elektroodi süvendis.

küll väga väike, ainult mõni miljondik vatti, kuid sellele vaatamata köidavad nad üha enam tähelepanu, olles suhteliselt lihtsa ehitusega, töökindlad ja väga pika eaga — üle paarikümne aasta. Allpool kirjeldame mõnda neist.

Joonisel 4—13, *a* toodud aatomipatarei meenutab pealt näha väikest, mõne sentimeetri pikkust taskulambipatareid. Ta koosneb õõnsast metallsilindrist ja selle keskel asuvast vardast. Vardale on kantud radioaktiivse strontsiiumi kiht, mis eraldab beetakiirgust, s. o. elektrone. Varras ja silinder on teineteisest isoleeritud. Vardalt eralduvatel elektronidel on väga suur kineetiline energia ja nad tungivad kergesti silindri metalli. Seetõttu kujuneb silindril elektronide üleküllus, vardal aga nende puudus — varras omandab positiivse elektrilaengu, silinder aga negatiivse. Elektroodidevaheline pinge tõuseb kuni 150 000 voltdini. Sellist aatomipatareid võib koormata vooluga kuni  $10^{-12}$  amprit, kusjuures tema iga pideva töö korral on kuni 25 aastat.

Joonisel 4—13, *b* kujutatud aatomipatarei koosneb vilgukivist või plastmassist silindrist, mida poolitab 0,5 mm paksune vahesein. Silindri mõlemas otsas paikneb masiivne metallektrood. Alumise elektroodi ülemise osa



Joon. 4—14. Pooljuht-aatomipatarei.

süvendis on radioaktiivne aine (strontsiumi või ütriumi preparaat), mis saadab välja beetakiirgust.

Selle aatomipatarei pinge võib tõusta kuni 10 000 vol-dini, koormusvool aga  $5 \cdot 10^{-11}$  A.

Pooljuhtide abil saadakse järgmise konstruktsiooniga aatomipatarei. Elektron- ja aukjuhtivusega pooljuhist (kas ränist või germaaniumist) valmistatakse silinder selliselt, et väljaspool asub elektronjuhtivusega, seespool aga aukjuhtivusega kiht (joon. 4—14). Silindri keskele asetatakse radioaktiivne aine, mis paiskab välja elektrone (beetakiirgust). Tungides pooljuhti kutsuvad elektronid selles esile sekundaaremissiooni, s. o. vabastavad suurest hulgast pooljuhi aatomitest elektrone. Sel teel p-germaaniumist vabastatud elektronid liiguvad n-germaaniumi ja kuhjuvad seal, moodustades negatiivse elektrilaengu. Samal ajal tekivad p-germaaniumis augud ja siin kujuneb positiivne laeng.

Radioaktiivse ainega kasutatakse ka selles aatomipatareis strontsiumi. Saadav võimsus on siiski väike: ränist aatomipatareil 0,23 mikrovatti, germaaniumist aatomipatareil aga kõigest 0,0033 mikrovatti.

Väga väike võimsus — see on kõikide seda liiki pingelallikate üldiseks puuduseks.

Välismaal on ehitatud ka niisuguseid patareid, milles radioaktiivne aine kiiritab vastavat luminofoori, see hakkab helendama ja ränifotopingeelement muundab selle valguskiirguse elektrienergiaks.

Üks niisugune patarei sisaldas 5 g radioaktiivse pro-metiumi isotoopi 147. Kuigi patarei oli kapseldatud plast-massist kesta, mille peal oli veel metallkaitsekest, oli ta tavalise peavalutableti suurune. Patarei võimsus oli 0,02 W, mis on külialdane taskuraadioaparaadi toitmi-seks. Niisuguse patarei iga on umbes 3 aastat.

## 7. Kvantgeneraatorid

Raadiolokatsiooniga tegelevad eriteadlased on kordu-valt tähele pannud, et väga lühikesed raadiolained ei pöördu tagasi raadiolokaatorisse, vaid hajuvad ümbritse-vas keskkonnas. Uurimised näitasid, et ultralühilained neelduvad paljudes gaasides, kusjuures iga gaas neelab ainult teatava lainepikkusega elektromagnetilist kiirgust, seega ka raadiolaineid. Näiteks veeaurus, mida leidub Maad ümbritsevas õhkkonnas, neelduvad 1,3-sentimeetris-ed, ammoniaagiaurudes aga 1,27-sentimeetrised raadio-lained.

Tekib küsimus: kui gaasid neelavad elektromagnetilist kiirgust, kas ei ole nad siis võimelised seda ka kiirgama? Selgub, et teatavates tingimustes nad teevadki seda.

Igas gaasis, olgu see looduses esinev hapnik, vesinik või mõni muu, leidub alati väike osa ergastatud aatomeid ehk, nagu neid teisiti nimetatakse — aktiivseid aatomeid (ülejäanud neutraalseid, s. o. ergastamata aatomeid nime-tatakse ka passiivseteks).

Gaasi aktiivsed ja passiivsed aatomid vahetavad kok-kupõrkamisel oma osad: aktiivne aatom kiirgab välja energiakvandi, muutudes selle tagajärjel passiivseks, pas-siivne aga, neelates selle energiakvandi, muutub oma-korda aktiivseks, kusjuures nii ühtede kui ka teiste üld-arv jääb endiseks. Seejuures sama gaasi aatomid kiirga-vad ja neelavad täpselt ühesuguseid kvante. Umbes nii-viisi toimub see ka molekulides.

Passiivne aatom neelab ergastamisel ainult ühe ener-giakvandi, mis vastab teatava kindla lainepikkuse ja sagedusega elektromagnetilisele võnkumisele. Muutudes energia juurdesaamisel aktiivseks, ei saa sama aatom nee-lata teist energiakvanti, vaid vastupidi, kui sellist aatomit kiiritada, vabastab ta varem neelatud kvandi, mis on täp-selt niisamasugune kui energiakvant, millega seda ergas-

tatud aatomit kiiritati. Sel teel saadud kiirgust nimetatakse indutseeritud kiirguseks, kiirgust aga, mis kutsub seda esile, stimuleerivaks.

Kui kiiritada gaasi, milles on nii aktiivseid kui ka passiivseid molekule, siis võib ühesuguse tõenäolisusega esineda kas indutseeritud kiirgus või antud kiirguse neeldumine. Ühe või teise nähtuse esinemise määrab vastavate osakeste ülekaal. Kui ülekaalus on passiivsed osakesed, s. o. kui enamik osakesi asub energia põhitasemetel, siis kiirguse energiakvandid — fotonid — neelduvad gaasis. On aga ülekaalus aktiivsed osakesed, s. o. kui enamik gaasi molekule või aatomeid on ergastatud ja asub seetõttu kõrgematel energiatasemetel, siis saab esineda indutseeritud kiirgus.

Looduses toimuvad need energia vahetuse protsessid väga aeglaselt. Võib kesta miljoneid aastaid, enne kui passiivne aatom<sup>o</sup> kohtab ning neelab vastava aktiivse aatomi poolt vabastatud energiakvandi. Ent sellekohaste tingimuste loomisega osutub võimalikuks kiirendada neid protsesse, sundida aktiivseid aatomeid ja molekule vabastama ergastamisel saadud energia vastava indutseeritud kiirgusena. Seadiseid, milles see toimub, nimetatakse molekulaar- ehk kvantgeneraatoriteks. Väliskirjanduses kasutatakse nende kohta ka nimetust maser. See lühend on tuletatud kvantgeneraatori ingliskeelse nimetuse esimestest tähtedest: *microwave amplification by stimulated emission of radiation* (kiirguse stimuleeritud emissiooni põhimõttel töötav mikrolainevõimendi).

Kuigi indutseeritud kiirgust tunti saksa füüsiku A. Einsteini tööde järgi juba aastail 1916—1917, ei leidnud ta kaua mingit praktilist rakendamist. Hulk aastaid hiljem, umbes 1940. a., vihjas nõukogude füüsik V. A. Fabrikant võimalusele võimendada indutseeritud kiirguse abil valgust. Ja 1951. a. esitasid füüsikud F. A. Butajeva, M. M. Vudõnski ja V. A. Fabrikant juba meetodi elektromagnetiliste lainete võimendamiseks. Samal ajal tegeldi analoogiliste küsimustega ka mujal: C. H. Townes, H. J. Zeiger ja J. P. Gordon Ameerika Ühendriikides ja J. Weber Kanadas.

1954. a. ehitasid nõukogude teadlased N. G. Bassov ja A. M. Prohhorov ning nendest sõltumatult eespool nimetatud ameerika füüsikud esimesed kvantgeneraatorid sentimeeterlainete tekitamiseks.

Esijoones tuli lahendada kaks põhiküsimust: kuidas kindlustada aktiivsete gaasiosakeste arvuline ülekaal ja kuidas sundida neid vabastama ergastamisel saadud energiat.

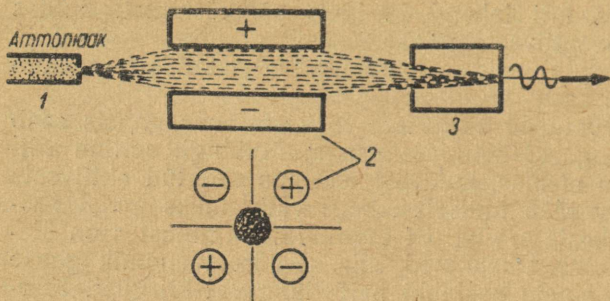
Võiks arvata, et aktiivsete osakeste arvu gaasis saab suurendada gaasi kuumutamiseega. Muidugi, selline võimalus on ju olemas, kuid sel teel suurendatud aktiivsete osakeste arv jääb üldiselt ikkagi väiksemaks gaasi passiivsete osakeste arvust. Et tavalistes tingimustes on ülekaalus passiivsed osakesed, siis seepärast enamik gaase ja ka muid aineid neelabki neile langevat kiirgust. Kuumutamiseega saavutatav osakeste ergastamine põhjustab ainult spontaanset kiirgust, mistõttu kuumutatud kehad ja ained helendavadki.

Esimese püstitatud põhiküsimuse ratsionaalseks lahendamiseks on kaks teed: kas ergastada vastavaid osakesi abikiirgusega või juhtida passiivseid osakesi kõrvale, koondades samal ajal kokku aktiivseid. Abikiirguse allikadena kasutatakse peamiselt sellekohaseid gaaslahendusimpulsslampe, aktiivseid ja passiivseid osakesi eraldatakse aga ebaühtlase elektri- või magnetvälja abil.

Kui näiteks hõrendatud gaasi juhtida joonisel 4—15 kujutatud kondensaatori silindriliste elektrootide vahele, siis sirgjooneliselt liiguvad aktiivsed osakesed, olgu need molekulid või aatomid, koonduvad edasiliikumisel elektriväljas kitsaks kimbuks, passiivsed aga kalduvad kõrvale. Selgitame seda lähemalt.

Kondensaatori elektriväli mõjutab gaasi molekule selliselt, et kõrgema energiatasemega aktiivsete molekulide energia mõningal määral suureneb, madalama energiatasemega passiivsete molekulide energia aga väheneb. Et iga süsteem püüab kõige madalama potentsiaalse energiaga olukorra poole, siis suunduvad gaasi passiivsed molekulid tugevama elektrivälja piirkonda, kus nende energia väheneb, aktiivsed molekulid aga, vastupidi, liiguvad võimalikult nõrgemasse elektrivälja. Seetõttu koonduvadki aktiivsed molekulid kondensaatori telje kohale, passiivsed aga varraste vahele.

Tarvitseb nüüd anda aktiivsetele osakestele kerge tõuge ja nad vabastavadki ergastamisel saadud energia. Sellise tõuke saavad osakesed resonantsinähtuse põhjal seadises, mida nimetatakse resonaatoriks. Viimane kujutab endast õõnt, mille metallseinad peegeldavad hästi



Joon. 4—15. Kvantgeneraatori skeem. 1 — gaasi juurdevoolu toru; 2 — kondensaator; 3 — resonator.

elektromagnetilisi laineid. Kui resonatorisse suunata gaasi, milles on aktiivseid molekule, siis tingituna mõnede ergastatud molekulide spontaanselt üleminekust ergastamata seisundisse, tekib resonatoris nõrk elektromagnetiline väli. Iga resonator häälestatakse ainult teatava sagedusega elektromagnetilisele võnkumisele, käesoleval juhul sellisele, mida on võimelised andma resonatorisse suunatud gaasi aktiivsed molekulid. Resonantsinähtuse tõttu tugevneb resonatori elektromagnetilise välja võnkumine niivõrd, et kutsub esile molekulide indutseeritud kiirguse, s. o. sunnib gaasi aktiivseid molekule vabastama nende liigse energia sama lainepikkusega elektromagnetilise võnkumisena (näiteks ammoniaagi kasutamisel 1,27 cm raadiolainetena).

See protsess areneb laviinitaoliselt, sest igast aktiivsest molekulist vabanenud foton peegeldub mitu korda resonatori seintelt, kohtub alata aktiivsete molekulidega ja sunnib neid vabastama samasuguseid footoneid, need omakorda stimuleerivad teisi aktiivseid molekule vabastama uusi footoneid jne. On tähelepanuväärne, et footoni stimuleeriv toime ei ole mingil määral seotud energiakuluga. Möödudes ergastatud aatomist või molekulist lühendab foton nende ergastatud seisundi kestust, mistõttu aktiivne osake kiirgab välja footoni ja muutub selle tagajärjel jälle passiivseks.

Kui kvantgeneraatorisse juhtida elektromagnetilisi laineid, mille pikkus vastab temast saadava elektromagneti-

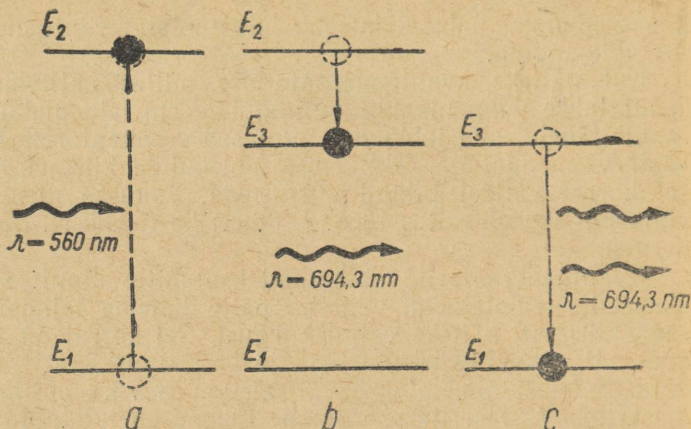
lise võnkumise lainepikkusele, siis töötab kvantgeneraator võimendina.

Kui näiteks kvantgeneraatorisse, milles aktiivainena kasutatakse ammoniaaki, suunata 1,27 cm lainepikkusega raadiolaineid, siis lahkuvad viimased resonaatorist tugevasti võimendatuna. Aktiivsete molekulide kiirgus liitub sel korral väljast tulnud kiirgusega. Esimese niisuguse võimendi skeemi esitas 1956. a. ameerika füüsik N. Bloembergen.

Kvantgeneraatorite abil saadakse mitte ainult sentimeetrise raadiolaineid, vaid ka palju lühema lainepikkusega kiirgust, näiteks valguskiirgust. Sel korral on tegemist valguskvantgeneraatoriga ja ka valguskvantvõimendiga. Esimesi nimetatakse väliskirjanduses ka optilisteks maseriteks ja laseriteks. Viimane lühend on tuletatud valguskvantgeneraatori ingliskeelse nimetuse esimestest tähtedest: *light amplification by stimulated emission of radiation* (kiirguse stimuleeritud emissiooni põhimõttel töötav valgusvõimendi). Need lühendnimetused on võetud nüüd kasutusele ka teistes keeltes. Valguskvantgeneraatori põhimõtte avaldasid 1958. a. ameerika füüsikud C. H. Townes ja A. L. Schawlow. Nõukogude Liidus olid selle loojateks füüsikud N. G. Bassov, B. M. Vul, J. M. Popov ja A. M. Prohhorov [23].

Esimese töötava valguskvantgeneraatori konstrueeris 1960. a. ameerika füüsik T. H. Maiman. Aktiivaineks ei olnud siin gaas nagu esimeses kvantgeneraatoris, vaid tahke aine kristall. Kristall võeti kasutusele järgmistel kaalutlustel. Et tahkes kehas on aatomeid ühe mahuühiku kohta palju rohkem kui hõrendatud gaasis, siis võib ka aktiivosakeste tihedus siin olla palju suurem. See aga võimaldab saavutada suurema võimsusega indutseeritud kiirgust.

Esimeses valguskvantgeneraatoris kasutati tehiserubiini monokristalli, milles oli lisandiks 0,05% kroomi. See hele-roosa rubiin kujufab endast alumiiniumoksiidi  $Al_2O_3$ , milles mõned alumiiniumioonid on asendatud kroomioonidega. Ergastamata seisundis asuvad kroomioonid kõige madalamail energiatasemel, s. o. põhitasemel, sest nende energiasisaldus on siis kõige väiksem. Kui rubiinkristall neelab talle suunatud rohelist valguskiirgust (lainepikkusega 560 nanomeetrit), siis kroomioonid ergastuvad. Mõned neist vabastavad spontaanselt ergastamisel

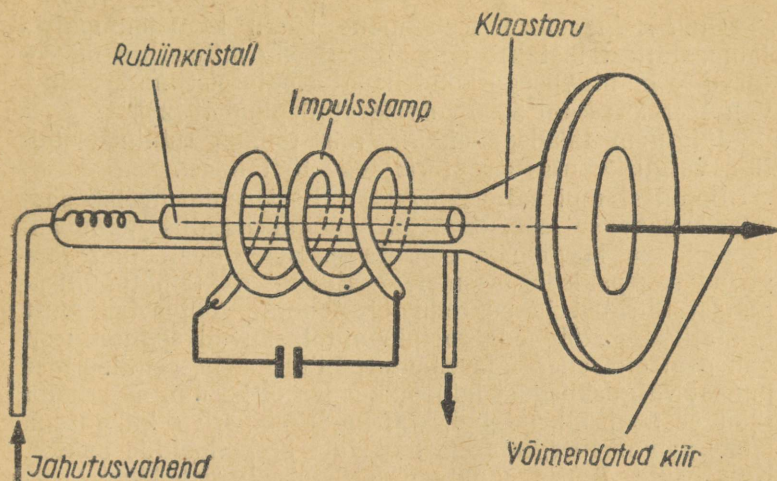


Joon. 4—16. Rubiinkristallis sisalduvate kroomioonide käitumine kristalli kiiritamisel. *a* — kroomioon siirdub ergastamise tagajärjel kõrgemale energiatasemele  $E_2$ . *b* — kroomioon langeb vahepealsele energiatasemele  $E_3$ ; valguskiirgust ei esine. *c* — kroomioon laskub stimuleeriva kiirguse mõjul energia põhitasemele  $E_1$ ; kaasneb indutseeritud valguskiirgus.

saadud energia ja laskuvad tagasi põhitasemeile. Enamik ergastatud kroomioone aga laskub vahepealseile energiatasemeile. Sellel üleminekul ei eraldu valguskiirgust; vabanev energia antakse üle kristallivõrele, millega suurendatakse ainult ionide soojusvõnkumist. Vahepealseil energiatasemeil püsivad kroomioonid väga lühikest aega, vaid mõne millisekundi. Seepäele laskuvad nad spontaanselt põhitasemeile, vabastades ergastamisel saadud energia punase valguskiirgusena, mille lainepikkus on 694,3 nanomeetrit.

See ongi rubiinkristalli iseloomulik punane fluorestsentskiirgus. Mille poolest siis erineb sellest indutseeritud kiirgus?

Kroomioonide laskumise kiirus kõrgemalt energiatasemelt  $E_2$  (joon. 4—16) vahepealsele energiatasemele  $E_3$  on palju suurem kui kiirus, millega ionid laskuvad vahepealselt energiatasemelt  $E_3$  põhitasemele  $E_1$ . Seepärast, kui kroomioonide kiirus üleminekul põhitasemelt kõrgemale energiatasemele on suurem ionide laskumise kiiru-



Joon. 4—17. Rubiinkristalliga valguskvantgeneraatori skeem.

sest vahepealselt tasemelt põhitasemele, siis tekib vahepealsel energiatasemel aktiivsete ioonide kuhjumine. Viibinud lühikest aega vahepealsel energiatasemel, hakkavad mõned kroomioonid spontaanselt laskuma põhitasemele, vabastades ergastamisel saadud energia 694,3 nm lainepikkusega punase valguskiirgusena, mille energiakvant vastab täpselt energiatasemete  $E_3$  ja  $E_1$  vahele. See kiirgus stimuleerib ülejäänud, vahepealsel energiatasemel olevaid aktiivseid ioone laskuma põhitasemele palju varem, kui see toimuks iooni eespool kirjeldatud spontaansel üleminekul, s. o. andma indutseeritud kiirgust. Indutseeritud kiirgus on seepärast palju intensiivsem kui fluorestsentskiirgus.

Joonisel 4—17 on toodud rubiinkristalliga valguskvantgeneraatori skeem. Tehisrubiini monokristallist on valmistatud pulk, mille pikkus on umbes 50 mm ja läbimõõt 5 mm. Rubiinipulga mõlemad otsad on poleeritud ja lihvitud tasapinnaliseks ja paralleelseks. Nad on ka hõbetatud, mistõttu nad moodustavad peegelpinnad. Ühe otsa hõbekate on õhem ja seepärast on ta poolläbipaistev (laseb läbi kuni 5% valgust). Rubiinipulk asetseb klaastorus, mida jahutatakse vedela heeliumiga, sest valguskvantgeneraatori töötamisel rubiin kuumeneb.

Ümber klaastoru teeb mõne keeru ksenoonimpulsslamp, millest lastakse läbi elektrilaeng mitmesaja mikrofaradise mahtuvusega kondensaatoripatareist, mida eelnevalt laetakse kuni 5000-voldise alalispingeni [23].

Jälgigem tähelepanelikult, mis toimub rubiinikristalliga valguskvantgeneraatoris selle töötamisel.

Impulsslambi valguskiirgus, millest rubiin neelab peamiselt rohelise osa, ergastab rubiinikristallis leiduvaid kroomioone kõrgemale energiatasemele. Sealt nad langevad vahepealsele tasemele, eraldades nähtamatut infrapunast kiirgust ja suurendades ionide soojusvõnkumist kristallivõres. Mõned kroomioonid laskuvad spontaanselt vahepealselt energiatasemelt põhitasemele, emiteerides punast valguskiirgust lainepikkusega 694,3 nm, mis, nagu juba eespool tähendatud, esineb stimuleeriva kiirgusena teiste samal energiatasemel olevate kroomioonide suhtes. Kuigi suurem osa spontaanselt emissioonist läheb valguskvantgeneraatoris kaduma, sest footoneid levib igas suunas ja enamasti väljub ka kristallist, siiski see väike osa, mis levib piki pulga telge, ei välju, vaid, peegeldudes otspindadelt, hakkab kristallis edasi-tagasi liikuma. Need footonid stimuleerivadki vahepealsel energiatasemel olevaid ergastatud kroomioone. Seega täidab rubiinikristall valguskvantgeneraatoris sama ülesannet, mida täitis gaasiga töötavas kvantgeneraatoris resonator.

Energia vabanemine indutseeritud kiirgusena areneb rubiinikristallis laviinitaoliselt: iga uus vabanev foton, olles kristallis vabanenud esimese footoni täpne teisik, stimuleerib koos teiste footonitega aktiivsete kroomioonide laskumist energia põhitasemele. Footonid lendavad rubiinipulgas lugematuid kordi edasi-tagasi, peegeldudes selle otspindadelt. Kaduma läheb vaid tühine arv footoneid, mille liikumissuund ei ühti kristalli pikiteljega. Aja vältel, mida hinnatakse mõnekümnele tuhandikule sekundile, kujuneb rubiinikristallis võimas monoliitne punane valgus, mis väljub läbi poolläbipaistva otspinna ja paiskub kitsa kiirtekimbuna kaugusse.

Juba esimestel katsetel selliste valguskvantgeneraatoritega said ameeriklased sedavõrd koondatud valguskiire, mille heledus ületas rohkem kui miljon korda päikesekiire heleduse niisama kitsal sagedusribal. Need katsed näitasid, et sellist valguskiirt on võimalik suunata väga kaugemale, ilma et ta väga palju hajuks. Ühe valguskvantgene-

raatori abil saadi näiteks nii kitsas ja ühtlasi võimas kiirtekimp, mis 40 kilomeetri kaugusel kiirgajast kujundas valgussõõri läbimõõduga 60 m. Et saada niisama suurt valgussõõri tavalise helgiheitja abil, peaks selle peegli läbimõõt olema 150 m. Rubiinikristalliga valguskvantgeneraatoris võib teoreetiliselt saada niivõrd kontsentreeritud valguskiire, mille hajumine on praktiliselt alla ühe sajandiku nurgamõõdukraadi. Niisugust valguskiirt on võimalik suunata näiteks Kuule, mis asub Maast üle 380 000 km kaugusel. Katsel, mille ameerika teadlased tegid 1962. a. suvel, kujunes Kuu pinnal valguslaik läbimõõduga 3 km.

Eespool kõnelesime, et valguskvantgeneraator võib töötada ka võimendina. Sel korral on rubiinipulga mõlema otspinna hõbekattes väike ava: ühes võimendatava valguskiire sisenemiseks, teises väljumiseks. Punase valguskiirguse (lainepikkusega 694,3 nm) suunamisel kristallile hakkavad ksenoonimpulsslambi abil ergastatud kroomioonid kohe vabastama ergastamisel saadud energiat sama lainepikkusega punase valguskiirgusena; viimane liitub kristallile suunatud kiirgusega, mistõttu võimendist väljubki tugevasti võimendatud punane valguskiirgus. Stimuleeriva kiirgusena esineb siin valguskvantvõimendisse sisenev valguskiirgus.

Seni loodud valguskvantgeneraatorite ja -võimendite võimsus on siiski veel suhteliselt väike. Ent on lootusi, et seadiste edasise viimistlemisega ja edasiarendamisega suudetakse suurendada ka nende võimsust. Kirjanduse andmeil ehitati alles hiljuti rubiinikristalliga valguskvantvõimendi, milles võimendatud punase valguse võimsus väljumisel moodustab 10 kW. Selles võimendis kasutatakse hõbetatud tahkudega rubiinikristalli serva pikkusega 2,5 cm. Lisandi ionide ergastamine toimub ksenoonkrüptonimpulsslambi abil, mis annab eredat rohelist valgust. Lambi impulsvõimsus on 1 MW. Valguskiirguse võimendus on umbes 4–5-kordne, kasutegur 1%.

Rubiin ei ole ainuke kristalliline aine, mis võimaldab ehitada valguskvantgeneraatoreid ja -võimendeid. Häid tulemusi annavad ka uraani- või samaariumilisandiga kaltsiumfluoriidi kristallid. Esimene võimaldab saada indutseeritud kiirgust lainepikkusega 2490 nm, teine lainepikkusega 708 nm.

Arendatakse edasi ka gaasiga töötavaid kvantgeneraatoreid. Nende kasutegur loodetakse tõsta juba lähemal

ajal 10%-ni. Seda liiki kvantgeneraatoritel on rida eelseid. Nad võimaldavad saada pidevat indutseeritud kiirgust, kuna näiteks rubiinikristalliga töötavad valguskvantgeneraatorid emiteerivad valgust lühikeste impulssidena. Pidevat töörežiimi takistab rubiinikristalli kuumenemine, samuti ergastatud kroomioonide ülemäära kiire arvuline vähenemine vahepealsel energiatasemel. Nii ühel kui ka teisel põhjusel ei saa valguskvantgeneraatorit pidevalt kasutada. Gaasiga töötavatel generaatoritel neid raskusi ei ole. Tarvitatakse ka gaasisegusid, mis võimaldavad saada mitme erineva sagedusega indutseeritud kiirgust. Näiteks neooni ja heeliumi segu vahekorras 10 : 1 võimaldas saada sellekohases valguskvantgeneraatoris viie erineva lainepikkusega infrapunast kiirgust: 1118, 1153, 1160, 1199 ja 1207 nm. Kõige intensiivsem neist oli kiirgus lainepikkusega 1153 nm.

Peamine erinevus gaasiga ja kristalliga töötava valguskvantgeneraatori vahel seisneb ergastamisiisis. Kristalliga generaatoris toimub see välise kiirguse, gaasiga seadises aga gaaslahenduse abil. Neooni ja heeliumi seguga valguskvantgeneraator kujutab endast meetripikkust kvartstoru, mille otstes on valgust peegeldavad plaadid. 30-megahertsise kõrgsagedusgeneraatori abil tekitatakse hõrendatud gaasisegus huumlahendus. Elektrivälja toimel heelumiaatomid ergastuvad, s. o. siirduvad kõrgemale energiatasemele. Kokkupõrkamisel neooniaatomitega annavad heelumiaatomid nendele ergastamisel saadud energia, viies neid sel teel omakorda kõrgemale energiatasemele. Nii ergastatakse neooniaatomeid pidevalt. Laskumisel vahepealsele madalamale energiatasemele kiirgavad neooniaatomid footoneid. Analoogiliselt valguskiire võimendumisega rubiinipulgas moodustavad ka piki gaasiga täidetud toru suunduvad footonid, reflekteerudes peegelotsplaatidelt ja liikudes torus edasi-tagasi, lõpuks väga tugeva koondatud infrapunase kiire, mis paiskub välja läbi poolläbipaistva otsplaadi.

Lõpuks paar sõna kvantgeneraatorites saadava indutseeritud kiirguse kasutamisest.

Koondatuna ühte punkti võib kvantgeneraatorist väljuv kiirtekimp anda sadade tuhandete kraadideni küündivat temperatuuri. Milliseks võimsaks tööriistaks võib kujuneda selline ülikuum valgustäpp! Sellega saaks väga kergesti lõigata ja keevitada ka kõige raskemini sulavaid

metalle ja kivimeid. Ja mitte üksi valguskimbu kõrge temperatuur, vaid ka valgusrõhk leiab tulevikus kindlasti rakendamist. Juba esimestes sellekohastes seadistes saadud valguskiir surus kergesti läbi paberi- ja plastikaatlehe, mis siis rääkida tuleviku kvantgeneraatoritest, milles saadava valguskiirguse võimsus ja vastavalt ka valgusrõhk on kindlasti tuhandeid kordi suurem.

Ent veel suuremat huvi pakub võimalus rakendada võimast valguskiirt energeetikas, näiteks energia traadita edasiandmiseks. Eespool kõnelesime, et rubiinikristalliga kvantgeneraatorist väljuv kiirtekimp hajub suhteliselt vähe; 40 km kaugusel valgusallikast oli kiirte hajumine vaid 60 m. Kui võtta arvesse, et gaaskiirgaja kasutamine võimaldab vähendada kiirte hajumist umbes 10 korda, siis ei tundugi enam fantaasiana mõte rakendada sellist kiirtekimpu energia otseseks ülekandmiseks. Muidugi, asi ei ole üldiselt nii lihtne, kui see esimesel pilgul võib näida. Tuleb ju koos sellega lahendada rida küsimusi nii elektrienergia muundamise alal valgusenergiaks kui ka ümberpöördult, kuigi siin on nii mõndagi juba tehtud.

Ei saa puudutamata jätta ka võimalust, mida pakuvad võimsad valguskiired kaugsideks. Kosmilise side jaoks muutuvad kvantgeneraatorid otse asendamatuks. On avaldatud näiteks arvamust, et Maa ja Marsi vahelist telefonikõnet võimaldava raadiojaama võimsus peaks olema vähemalt miljon vatti. Kui samaks otstarbeks kasutada valguskvantgeneraatori tugevasti koondatud valguskiirt, siis piisaks sadu tuhandeid korda väiksemast võimsusest, võib-olla isegi ühest vatist.

---

Alustasime oma ülevaadet kaugest minevikust, ajajärgust, millest on järel vaid üksikuid säilmeid. Ent huvi ja püsivus viisid meid samm-sammult edasi. Nii jõudsimegi teaduse algelistelt, alles kujunevatelt kitsastelt radadelt lõpuks tänapäeva avarale maanteele. Sooritades seda pikka teekonda, võisime veenduda, kuidas sajandite jooksul kanti väikeste kübemekestena visalt kokku väärtusi teaduse varasalve. Olime tunnistajaiks, kuidas teadlased sooritasid katseid, viisid läbi mõõtmisi ja avastasid uusi tõdesid. Kogu aeg jälgisime tähelepanelikult nende saavutusi ja eksimusi. See andis meile ettekujutuse sellest ainulaadsest vaearikkast protsessist, mille käigus talletati tähelepanekuid, kogemusi, uusi fakte, loodi hiljem hüpoteese ja teaduslikke teooriaid, mis võimaldavad nüüd seletada mõndagi elektrinähtust, avada nende olemust.

Tähelepanelik lugeja võis muidugi märgata, et mitte kõigile eespool kirjeldatud nähtustele ei ole antud ühevõrra ammendavat seletust, et nii mõnestki huvitavast küsimusest on möödunud pooleldi vaikides või käsitletud neid suhteliselt pealiskaudselt, mistõttu ka nende füüsikaline olemus pole täiesti avatud, kuigi esimesed kokkupuuted nendega ulatuvad kaugesse minevikku. Ja samas on nähtusi, mille avastamise kirjeldus sunnib tahtmatult küsima: kuidas võis see ometi juhtuda, et niisugusele lihtsale asjale ei ole tulnud varem?

Ei tohi unustada, et teaduse areng ei kulge ühtlaselt, sujuvalt tõusvas joones kogu teadusharu ulatuses, vaid hüppeliselt üksikute läbimurretena kord ühes, kord teises küsimusteringis. Paraku kujuneb tihti nii, et tormiliselt areneva tehnika huvides mõnigi nähtus leiab rakendamist

enne, kui teadlased on suutnud sellele anda täiesti ammen-dava seletuse. Loodus ei loovuta ju kergesti oma saladusi. Seepärast on nähtusi, mille olemuse väljaselgitamiseks kulub mitte üksikuid aastaid, vaid tihti aastakümneid ja rohkem.

Tõsiasi, et kõik ained koosnevad aatomitest, aimati juba paar tuhat aastat tagasi. Vähemalt paarsada aastat tagasi kujunes see kindlaks veendumuseks. Ent aatomi ehituse saladustesse suutis inimene tungida alles veidi vähem kui seitsmekümne aasta eest, kui avastati radio-aktiivsus ja seejärel ka elektron.

Tänapäeval ei leidu meil vist ühtki majapidamist, mil-les ühel või teisel viisil ei kasutataks elektrienergiat, töös-tusest kõnelemata. Elektronid on seega juba laialdaselt rakendatud inimese teenistusse. Ent milline on elektroni ehitus, milline on aatomi teiste koostisosakeste struktuur, sellest ei tea ka teadlased veel kuigi palju. On küll püsti-tatud üksikuid hüpoteese ja arvamusi, aga see on seni ka kõik.

Niisama vähe on teada aatomisiseeste tuumajõudude olemusest, olgugi et aatomituumade lagundamisel vabanev energia leiab juba laialdast kasutamist aatomielektrijaa-mades.

Nii mõnigi lugeja on kindlasti näinud virmalisi — suurepäraselt värviküllast loodusnähtust, mis vahetevahel esineb ka meie laiuskraadil. Selle olemus on nüüd välja selgitatud: see on atmosfääri kõrgemates kihtides esinev huumlahendus, sama, mis paneb helendama äriakendel mitmevärvilised reklaamvalgustorud.

Tavalisest välgust ei tarvitse vist enam kõneldagi: siin on tegemist looduses esineva võimsa sädelahendu-sega. Aga keravälg? Mida kujutavad endast need õhus hõljuvad tulekerad, mis mõnikord tekivad tavalise välgu järel? Teadlaste arvamused ei lange siin veel sugugi kokku. Keravälgu olemust õigupoolest alles selgitatakse.

Veel kümme aastat tagasi puudus täiesti seletus ka ülijuhtivuse kohta, olgugi et see avastati juba 1911. a. Rahuldava teooria, kuigi puhtmatemaatilisel kujul, püsti-tas akadeemik N. Bogoljubov alles viis aastat tagasi. Selle üle ei tule sugugi imestada, sest viiekümne aasta eest ei olnud teadus selleks veel võimeline. Toimus ju hoogne hüpe teoreetilise füüsika vallas alles XX sajandi esimesel poolel. Esijoones avaldus see relatiivsusteooria

ja kvantmehaanika väljatöötamises. Need kujunesid kindlaks alusmüüriks, millel põhiliselt rajanebki tänapäeva füüsika ja mis võimaldab anda ka edaspidi tõepäraseid seletusi paljudele nii uutele kui ka varem avastatud nähtustele. Kestab ju teaduse pidurdamatu areng ka tänapäeval. Nii mõnigi uus saavutus teadusepõllul võib seejärel põhjustada uute loodusnähtuste avastamist, uute elektrinähtuste tundmaõppimist ja samas aidata kaasa ka nende üksikute elektrinähtuste olemuse avamisele, mille kohta tänapäeval veel puudub seletus.

---

1. H. Esop jt. Üldine elektrotehnika. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn, 1954.
2. R. Peierls. Looduse seadused. Eesti Riiklik Kirjastus, Tallinn, 1962.
3. А. С. Бернштейн. Термоэлектричество. Государственное издательство технико-теоретической литературы. Москва, 1957.
4. Н. Н. Боголюбов, В. В. Толмачев, Д. В. Ширков. Новый метод в теории сверхпроводимости. Издательство Академии наук СССР. Москва, 1958.
5. О. Б. Брон. Электромагнитное поле как вид материи. Государственное энергетическое издательство. Москва, 1962, Ленинград.
6. Б. М. Вул. Сегнетоэлектричество. Издательство Академии наук СССР. Москва, 1956.
7. И. Р. Геккер, В. И. Юрьев. Субмиллиметровые волны. Государственное энергетическое издательство. Москва, 1961. Массовая радиобиблиотека.
8. А. Я. Глибэрман, А. К. Зайцева. Кремниевые солнечные батареи. Государственное энергетическое издательство. Москва, 1961. Массовая радиобиблиотека.
9. О. К. Давтян. Проблема непосредственного превращения химической энергии топлива в электрическую. Издательство Академии наук СССР. Москва, 1947.
10. А. Ф. Иоффе. Полупроводники и их применение. Издательство Академии наук СССР. Москва, 1956.
11. С. И. Исаев и Н. О. Пушков. Полярные сияния. Издательство Академии наук СССР. Москва, 1958.
12. Е. А. Коленко. Термоэлектрические охлаждающие приборы. Издательство Академии наук СССР. Москва, 1963, Ленинград.
13. А. С. Кривоzub. Магнитогидродинамические генераторы. «Промышленная энергетика» 1960, № 12, стр. 45—46.
14. В. Г. Кузнецов. Эволюция основных идей электродинамики. Издательство Академии наук СССР. Москва, 1963.
15. Г. Л. Мартин. Физические основы электротехники. (Перевод с английского). Государственное энергетическое издательство. Москва, 1961.
16. Н. Д. Моргулис. Термо-электронный (плазменный) преобразователь энергии. Государственное издательство литературы в области атомной науки и техники. Москва, 1961.

17. О. А. Мяздриков, В. Е. Манойлов. Электреты. Государственное энергетическое издательство. Москва, 1962, Ленинград.
  18. А. Ф. Плонский. Пьезоэлектричество. Государственное издательство технико-теоретической литературы. Научно-популярная библиотека, выпуск 60. Москва, 1956.
  19. К. А. Путилов. Курс физики, том II. Учение об электричестве. Государственное издательство физико-математической литературы. Москва, 1959.
  20. К. А. Путилов и В. А. Фабрикант. Курс физики, том III. Оптика. Атомная физика. Ядерная физика. Государственное издательство физико-математической литературы. Москва, 1960.
  21. И. Н. Фатеев. Электроэнергетика. Государственное энергетическое издательство. Москва, 1960.
  22. С. Э. Фриш и А. В. Тиморева. Курс общей физики, том II. Электрические и электромагнитные явления. Государственное издательство физико-математической литературы, Москва 1961.
  23. А. Шавлов, С. Фогель, Л. Дальберджер. Оптические квантовые генераторы (лазеры). (Перевод с английского.) Издательство иностранной литературы. Москва, 1962.
  24. Н. Blanke. Kraft und Wärmewirtschaft in der Verfahrenstechnik. «Wärme», 1961, Band 68, Heft 3, lk. 74—85.
  25. W. Conrad. Elektronen verändern die Welt. Urania Verlag, Leipzig-Jena, 1959.
  26. Joseph Kaye and John A. Welsh. Direct Conversion of Heat to Electricity. New York, London. John Wiley & Sons, Inc. 1960.
  27. Н. Lindner. Grundriss der Atom- und Kernphysik. Fachbuchverlag Leipzig, 1959.
  28. E. Randall. Unconventional Power Sources. Electro-Tehnology, 1961, Nr. 2, August, lk. 54—62, Nr. 3, September, lk. 85—94.
-

Saateks	3
I. VEIDI AJALUGU JA PÕHIMOISTEID	
Merevaik ja magnet	5
Katsed ja avastused	7
Elektrodünaamika sünd	13
Kas magneti abil saab tekitada elektrivoolu?	18
Salapäraseid kiired	22
Nii määrati elektroni laeng	25
Lorentzi jõud	27
Elektromagnetiline väli	32
Kui fotonid pommitavad ainet	37
Elektroniemissioon	44
II. NÄHTUSI, MIDA PÕHJUSTAB KEHADE ELEKTRISEERUMINE	
Berliini professori avastus	47
Termoelektriline külmutus	53
Mida töötab sädemepump?	60
Mis on senjettelektrik?	65
Jaapani välitelefoni saladus	67
Elektrokonveksiooninähtused	70
Mõningaid dielektrilisest polarisatsioonist tingitud nähtusi	73
Elektromotoorse jõu tekkimisest galvaanielementides	74
III. ELEKTRIVOOLUL, SAMUTI ELEKTRIVOOLU JA MAGNETVÄLJA VASTASTIKUSEL TOIMEL PÕHINEVAID NÄHTUSI	79
Aine elektrijuhtivusest	80

Hämmastav avastus: külm kaotab takistuse . . . . .	85
Elektrivool juhtivais vedelikes . . . . .	91
Polarisatsiooninähtus . . . . .	94
Gaaslahendus . . . . .	97
Huumlahendus . . . . .	101
Kaarlahendus . . . . .	105
Sädelahendus . . . . .	106
Koroonalahendus . . . . .	112
Elektrivoolu levimise kiirusest juhtmeis . . . . .	114
Elektrivoolu ja magnetvälja vastastikune toime . . . . .	116
Pinnaefekt . . . . .	119

IV. PERSPEKTIIVSEMATEST ELEKTRIENERGIA TOOT- MISE MEETODITEST . . . . .	121
1. Kütuselemendid . . . . .	126
Süsinikelement . . . . .	129
Vesinikelement . . . . .	130
Generaatorigaaselement . . . . .	132
Biokeemiline ehk orgaaniline kütuselement . . . . .	133
2. Plasmageneraatorid . . . . .	135
3. Termogeneraatorid . . . . .	141
4. Termoemissioongeneraatorid . . . . .	143
5. Termotuumareaktsioonil eralduva energia vahetult elektrienergiaks muundamise võimalusest . . . . .	149
6. Mõningaid uusi pingeallikaid . . . . .	154
7. Kvantgeneraatorid . . . . .	157
Järelsõna . . . . .	168
Kasutatud kirjandus . . . . .	171



Каск Карл Йоханнесович  
ЗАНИМАТЕЛЬНЫЕ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

На эстонском языке  
Оформление Э. Тали

Издательство «Ээсти Раамат»  
Таллин, Пярнуское шоссе, 10

Populaarteadusliku kirjanduse toimetus

Toimetaja R. Mägi

Kunstiline toimetaja H. Tikand

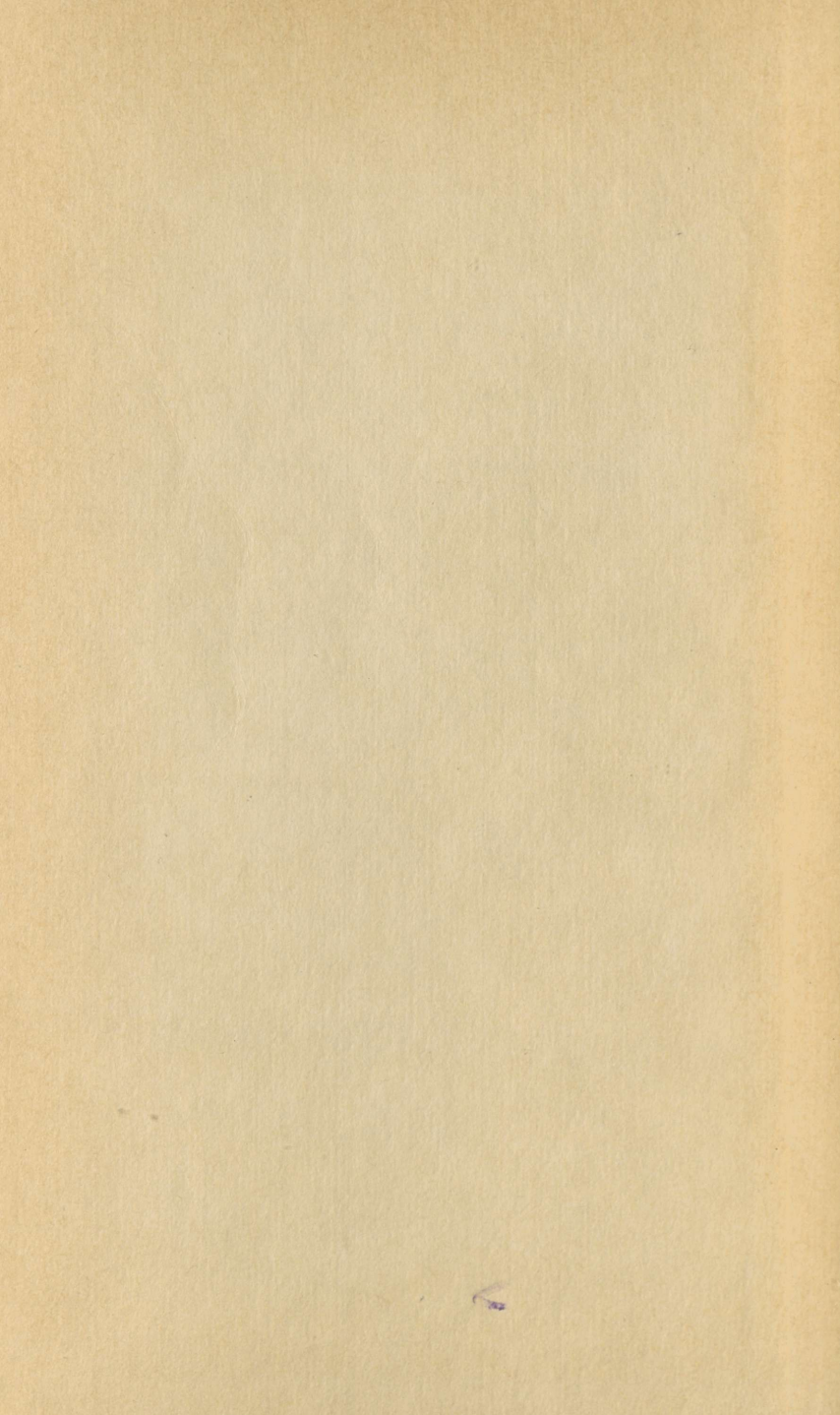
Tehniline toimetaja O. Lau!

Korrektorid H. Kull ja S. Ridala

Ladumisele antud 13. VI 1964. Trükkimisele antud  
6. X 1964. Paber 54×84, 1/16. Trükipoognaid 11. Tingtrüki-  
poognaid 9. Arvestuspoognaid 9,68. Trükiary 5000. MB-05699.  
Tellimise nr. 5036. Hans Heidemanni nim. trükikoda, Tartu,  
Olikooli 17/19. I

Hind 44 kop.







44 kop.

A-26226

TÜ RAAMATUKOGU



1 0300 00379083 1

44 kop.

A-26226



K. KASK • HUVITAVOID ELEKTRINÄHTUSI

K. KASK



# uvitavaid elektrinähtusi