

**Kalev Tarkpea
Henn Voolaid**

ELEKTRO- MAGNETISM

**Füüsika õpik
gümnaasiumile**

Väljaandja kinnitab õppematerjali vastavust kehtivale gümnaasiumi riiklikule õppekavale ning haridus- ja teadusministri poolt õppekirjandusele kehtestatud nõuetele.

Kalev Tarkpea, Henn Voolaid

Elektromagnetism. Füüsika õpik gümnaasiumile
Veebiõpik <http://õpik.füüsika.ee>

Retsenseerinud Riina Murulaid, Madis Reemann

Toimetanud Kaido Reivelt
Keeletoimetaja Triinu Lehtoja
Korrektuuri teinud Lauri Kaldamäe
Küljendanud Atko Remmel
Joonised teinud Nils Austa
Pildid joonistanud Urmas Nemvalts

Fotod ja illustratsioonid:
Sven-Erik Enno, Mikk Noorkõiv, Veiko Hani, NOAA, CERN, Lõuna-Kalifornia Edison,
The Royal Institution/Bridgman Art Library/NY, TDS Co., Ltd, Eesti Füüsika Selts,
Richard Megna/Fundamental Photographs, www.amasci.com, <http://www.magnet.fsu.edu>,
physiscope.ch, Elsevier.

ISBN 978-9949-9331-7-4

Autoriõigus: Kirjastus Maurus, Eesti Füüsika Selts 2013

Teine, parandatud trükk 2014. Juurdetrükk 2019

www.kirjastusmaurus.ee

Kõik õigused käesolevale väljaandele on seadusega kaitstud. Ilma autoriõiguse omaniku kirjaliku loata pole lubatud ühtki selle väljaande osa paljundada ei mehaaniliselt ega muul viisil.

SISUKORD

1. Elektriväli ja magnetväli

1.1	Elektromagnetismi uurimisaine	8
1.1.1.	Sissejuhatus elektromagnetnähtuste füüsikasse	8
1.1.2.	Elektromagnetismi uurimise ajaloost	9
1.1.3.	Elektromagnetismi kursuse struktuur	10
1.2.	Elektrilaeng	11
1.2.1.	Elektrilaengu mõiste	11
1.2.2.	Positiivsed ja negatiivsed laengud	11
1.2.3.	Elementaarlaeng	12
1.2.4.	Laengu jäävuse seadus	13
1.2.5.	Elektrit juhtivad ja mittejuhtivad ained	14
1.2.6.	Elektrivool ja voolutugevus	15
1.3.	Coulombi seadus	18
1.3.1.	Coulombi katsed	18
1.3.2.	Coulombi seadus. Punktilaeng	19
1.3.3.	Elektrikonstant	20
1.4.	Ampère'i seadus	22
1.4.1.	Magnetväli. Püsिमagnetid	22
1.4.2.	Voolu magnetväli. Ampère'i seadus	24
1.5.	Elektrivälja tugevus ja magnetinduktsioon	27
1.5.1.	Elektrivälja tugevus	27
1.5.2.	Magnetinduktsioon	29
1.5.3.	Punktilaengu väljatugevus ja sirgvoolu magnetinduktsioon	31
1.5.4.	Elektri- ja magnetvälja omaduste võrdlus	32
1.6.	Väljade visualiseerimine	34
1.6.1.	Elektrivälja jõujooned	34
1.6.2.	Homogeenne elektriväli	36
1.6.3.	Magnetvälja jõujooned	37
1.6.4.	Homogeenne magnetväli	38
1.7.	Elektrivälja potentsiaal ja pinge	39
1.7.1.	Töö ja potentsiaalne energia elektriväljas	39
1.7.2.	Elektrivälja potentsiaal	42
1.7.3.	Ekvipotentsiaalpinnad	42
1.7.4.	Elektriline pinge ja selle seos väljatugevusega	43

2. Elektromagnetväli

2.1. Ühele osakesele mõjuv magnetjõud	48
2.1.1. Elektromagnetilise induktsiooni nähtus	48
2.1.2. Lorentzi jõud	48
2.2. Pööriselektriväli ja induktsiooni elektromotoorjõud	51
2.2.1. Induktsioonivool ja pööriselektriväli	51
2.2.2. Magnetväljas liikuva juhtmelõigu otstel tekkiv pinge	53
2.2.3. Induktsiooni elektromotoorjõud	54
2.3. Faraday katsed	57
2.3.1. Püsimagneti liikumine juhtme suhtes	57
2.3.2. Vooluga juhtme liikumine teise juhtme suhtes	58
2.3.3. Voolu muutumine juhtmes	59
2.4. Faraday induktsiooniseadus	60
2.4.1. Induktsiooni elektromotoorjõudu mõjutavad suurused	60
2.4.2. Magnetvoo mõiste	62
2.4.3. Faraday induktsiooniseadus	63
2.5. Lenzi reegel. Induktsiooniseaduse rakendused	65
2.5.1. Lenzi reegel	65
2.5.2. Induktsiooniseaduse rakendusi	67
2.6. Induktiivsus ja mahtuvus	68
2.6.1. Endainduktsiooni elektromotoorjõud	68
2.6.2. Induktiivsuse mõiste	70
2.6.3. Elektrimahtuvus. Kondensaatorid	72
2.7. Elektromagnetvälja energia	75
2.7.1. Elektrivälja energia	75
2.7.2. Magnetvälja energia	76
2.8. Elektromagnetiline levitatsioon	79

3. Elektromagnetlained

3.1. Elektromagnetvälja levik elektromagnetlainetena	82
3.1.1. Elektri- ja magnetväli elektromagnetlaines	82
3.1.2. Elektromagnetlainete skaala	83
3.1.3. Optika	87
3.2. Valguse kirjeldamine	89
3.2.1. Elektromagnetlaine ja valguslaine	89
3.2.2. Valguse värvus ja lainepikkus	91
3.2.3. Valguse dualism	93
3.3. Elektromagnetlainete omadused	97
3.3.1. Elektromagnetlainete difraktsioon ja interferents	97
3.3.2. Difraktsiooni ja interferentsi rakendusi	100
3.4. Polariseeritud valgus	106
3.4.1. Polariseeritud valgus, selle saamine ja omadused	106
3.4.2. Polariseeritud valguse rakendused	108

4. Valguse ja aine vastastikmõju

4.1. Geomeetriline optika	112
4.1.1. Geomeetrilise optika põhiseadused	112
4.1.2. Valguse peegeldumine	113
4.1.3. Valguse murdumine	113
4.1.4. Valguse murdumisseadus	115
4.1.5. Kujutise tekitamine läätse abil	119
4.1.6. Läätsede valem	122
4.2. Valguse dispersioon ja selle kasutamine	127
4.2.1. Valguse dispersioon	127
4.2.2. Spektroskoop	129
4.3. Valguse teke ja liigid	131
4.3.1. Valguse kiirgumine	131
4.3.2. Soojuskiirgus ja luminesents	132
4.3.3. Spektraalanalüüs	134
4.4. Kuidas saada nähtamatuks	137

Õpiku lugejale

Käesolev õpik käsitleb elektromagnetilise vastastikmõju seaduspärasusi, mille tundmine aitab meil mõista väga paljude loodusunähtuste tekkimist. Nendel seaduspärasustel põhineb ka elektriliste ja optiliste seadmete töö, mida me oma igapäevases elus pidevalt kasutame. Seega on vastavad teadmised nii tunnetusliku kui ka rakendusliku väärtusega.

Õpiku põhitekst on mustas, täiendtekstid **sinises** kirjas. Esmakordselt esinevad tähtsad mõisted on tekstis **rasvases kirjas**, tähtsamad laused põhitekstis on välja toodud **punase tekstina**. **Küsimused-ülesanded** on paigutatud alajaotuste lõppu, nendele järgnevad peatushüüuga **STOPPI!** tähistatud lühikokkuvõtted.

Aadressilt <http://õpik.füüsika.ee> leiame ka käesoleva õpiku veebiversiooni, s.o e-õpiku, kus lisaks täisteksti lugemisele saate vaadata asjakohaseid videoid ja animatsioone, uurida simulatsioone ning vastata kordamisküsimustele.

Head õpiisu!



1

ELEKTRIVÄLI JA MAGNETVÄLI



Vastus peitub selles peatükis.

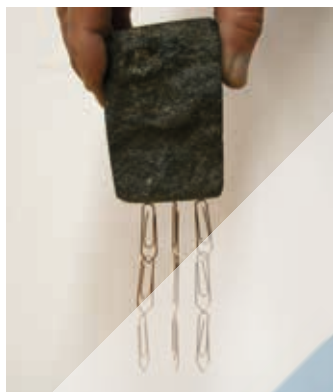
Miks on otsene välgutabamus harilikult surmav? Kas äikese ajal tuleks puu alla varju ronida või lagedal väljal seista? Kas mõistlikum on rahulikult seista, kükitada või joosta? Miks inimestel juuksed püsti tõusevad, kas see on ohu märk? Miks on äikesetormi ajal lehmad, hobused ja lambad tavaliselt suuremas ohus kui inimesed? On palju lugusid sellest, kuidas kuulus USA teadlane ja riigimees Benjamin Franklin lennutas läheneva äikesetormi ajal tuulelohet, et näidata selle loodusnähtuse elektrilisi omadusi. Miks välg teda ei tapnud?

Kas äikesepilve saaks põhimõtteliselt ka kompassiga leida?





Kreeka teadlane Thales tegi merevaigu ja udusulgedega katseid umbes 600 e.m.a.



Looduslik magnet e Magnesia kivi.



Maailm elektrivalguses.

1.1. Elektromagnetismi uurimisaine

1.1.1. Sissejuhatust elektromagnetnähituste füüsikasse

Tänapäeval ümbritsevad meid kõikjal esemed ja nähtused, mille iseloomustamisel kasutame sõna *elekter*. See sõna on jõudnud meieni kreeka keelest. Nii nimetasid vanad kreeklased kuldse läikega metallisulamit ja ka sellega väliselt sarnast ainet merevaiku (kr *elektron*). Nad märkasid, et villase riidega hõõrutud merevaigutükk suudab kergeid ainekübemeid enda külge tõmmata. Ajapikku hakati kõiki selliseid loodusnähtusi nimetama merevaigu-sarnasteks ehk *elektrilisteks*.

Kreeka päritoluga on ka sõna *magnet*. Magnesia kivil (kr *Magnetis lithos*) tunti vanas Kreekas kivimit, mis oli suuteline raudesemeid enda külge tõmbama. Elektrilise ja magnetilise tõmbejõu sarnasusest lähtuvalt oli vana- ja keskajal kombeks arvata, et need jõud põhimõtteliselt ei erinegi. Alles uusaegsetes esimestes teaduslikes käsitlustes hakati elektri- ja magnetnähtusi selgelt omavahel eristama. 19. sajandi keskel avastati, et elektrilistel ja magnetilistel jõududel on siiski ühine allikas. Elektri- ja magnetnähtused on looduses toimiva üldise **elektromagnetilise vastastikmõju** avaldumisvormid. *Jõud, millega me oma igapäevases elutegevuses vältimatult kokku puutume, on valdavalt elektromagnetilise päritoluga.* Nendeks on näiteks elastsusjõud, hõõrdejõud ja ka elusorganismide lihaskiud. Elektrijõud hoiavad koos lihtsaimad aatomid. Vedeliku või gaasi molekulideks, tahkisteks ja keerulisteks orgaanilisteks ühenditeks liidab aatomeid keemiline side, mis on samuti tingitud elektromagnetilisest vastastikmõjust.

Elektromagnetjõudude kaks tähtsaimat tehnilist rakendust on elektroenergeetika ning elektriline side- ja infotehnika. **Elektroenergeetika** hõlmab kogu inimtegevust elektrienergia tootmisel, ülekandel ja kasutamisel. Elektri jaamades muudetakse elektrienergiaks mingi osa kütuse põlemisel vabanevast soojusest, voolava vee kiineetilisest energiast või koguni aatomituumade seoseenergiast. Neid jaamu nimetatakse seetõttu vastavalt soojus-, hüdro- ja tuumaelektrijaamadeks. Päikesepatarei muundab elektrienergiaks valguskiirguse energiat. Taskulambipatareis, autoakus ja teistes keemilistes vooluallikates saadakse elektrienergiat keemilisel reaktsioonil vabaneva energia arvelt.

Tarvitis leiab aset vastupidine protsess. Elektrienergia muundub mehaaniliseks energiaks (elektrimootoris), valguskiirguse energiaks (elektrilambis), soojuseks (kütteseadmes) või mingiks muuks energiaks liigiks. *Elektrienergia on mugav vaheli loodusest ammutatava ja inimtegevuses kasutatava energia vahel.* Seda soodustab asjaolu, et elektrienergiat saab

üle kanda juhtmete abil. Pole vaja mingeid rihmu, võlle ega hammasrattaid.

Elektrienergia suurima puudusena võiks nimetada raskusi suurte energiakoguste salvestamisel. Elektrilise energia tootmine ja tarbimine peavad toimuma samaaegselt.

Elektroenergeetikast veelgi kiiremini areneb tänapäeval **elektromagnetiline infotehnika**. See hõlmab andmete, kõne, muusika või muu sellise esitamist ja ülekandmist elektromagnetilise signaalina. Samas on ka tegemist info elektrilise, magnetilise või optilise salvestamise ning töötlemisega. Elektriliste infotöötlus- ja sidesüsteemide kiiretoimelisuse aluseks on elektromagnetilise vastastikmõju suur levimiskiirus – kuni $3 \cdot 10^8$ m/s.

Käesolev õpik käsitleb elektromagnetilise vastastikmõju seaduspärasusi, mille tundmine aitab meil mõista väga paljude loodusnähtuste tekkimist. Nendel seaduspärasustel põhineb ka elektriliste ja optiliste seadmete töö, mida me oma igapäevases elus pidevalt kasutame. Seega on vastavad teadmised nii tunnetusliku kui ka rakendusliku väärtusega.

1.1.2. Elektromagnetismi uurimise ajaloost

Elektromagnetismi teadusliku uurimise algatajaks peetakse Inglise arsti ja füüsikut William Gilbertit. Aastal 1600 ilmus trükist tema töö *De magnete...*, mille täieliku pealkirja võib eesti keelde tõlkida nii: kujul: „Magnetist, magnetilistest kehadest ja suurest magnetist – Maast“. Gilbertist oli juttu juba põhikooli elektriõpetuse kursuses. Seal mainiti ka Benjamin Franklinit, kes lõi esimese tervikliku elektrinähtuste teooria, esimest bioelektromagnetismi uurijat Luigi Galvanit ning esimese vooluallika loojat Alessandro Voltat. Põgusalt oli juttu Ohmi seaduse avastajast Georg Simon Ohmist ning voolu magnetvälja esmauurijast Hans Christian Örstedist.

Käesolevas kursuses on aga aukohal elektrostaatika põhiseaduse formuleerija Charles Coulomb, magnetostaatika põhiseaduse formuleerija André Marie Ampère, elektromagnetilise induksiooni avastaja Michael Faraday ning kõiki elektromagnetnähtusi kirjeldava ühtse teooria looja James Clerk Maxwell. Eestimaalt pärit mehena pälvis meie erilist tähelepanu ka Emil Lenz, induksioonivoolu suunda määrava reegli formuleerija.

Valgusnähtuste teaduslik käsitlus sai alguse 17. sajandil, kui Isaac Newton püstitas hüpoteesi valgusest kui silmale nähtamatute osakeste voost, mis levivad ühtlases keskkonnas sirgjooneliselt. Neid osakesi nimetas ta korpuskuliteks, mida võib pidada nüüdisaegsete kvantide eelkäijateks.

Mõni aasta pärast Newtonit püstitas Christiaan Huygens teise hüpoteesi, mille kohaselt valgus levib lainetena. Ta arvas, et valguslaine levimiseks on vajalik mingi eriline keskkond,



Elektrienergia suurima puudusena võiks nimetada raskusi suurte energiakoguste salvestamisel.



Kas tulevikus saame oma ekraanid pärast tööd kokku rullida?



William Gilbert näitab elektrikatseid kuninganna Elisabeth I õukonnas.



Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806)



Isaac Newton (1642–1727)



James Clerk Maxwell
(1831–1879)



mis täidab kogu universumi. Seda ainet nimetati eetriks. Tänapäeval on teada, et mingit erist, valguse levimiseks vajalikku keskkonda ei eksisteeri ja valgus levib ka tühjuses.

Aastal 1802 tegi Thomas Young katseid, mis näitasid, et kitsast avast läbi minnes kaldub valgus oma esialgselt levimissuunast kõrvale, valguse teel oleva tõkke taha. Kuna veelained levivad ka tõkete, näiteks kivide taha, siis Youngi katse tõestas, et valgusel on laineline olemus.

Järgmise olulise sammu valguse laineteoorias tegi James Clerk Maxwell, kes 1865. a tõestas teoreetiliselt, et on olemas elektromagnetlained, mis levivad ka tühjuses ja seda kiirusega $3 \cdot 10^8$ m/s. See tulemus langes küllalt hästi kokku tolleks ajaks määratud valguse kiirusega. Sellest järelendas Maxwell, et valgus on elektromagnetlaine.

Nüüdisaegsele valguse kvantteooriale pani aluse 1900. a Max Planck, kes võttis kasutusele valgusosakesed ehk kvandid. Muidu ei suutnud ta teoreetiliselt seletada tahkete kehade kiirgusspektreid. Planck pidas kvante vaid teooriat lihtsustavateks abivahenditeks.

Albert Einstein näitas 1905. a, et kvandid on reaalselt olemas, ta seletas nende abil ära fotoefekti katsed, mida laineteooria ei suutnud seletada.

Sellest alates on selge, et valgusnähtusi pole võimalik kirjeldada ainult lainete või ainult osakeste abil. On nähtusi, mida saab seletada lainete abil ja teisi nähtusi saab seletada kvantide abil. On ka selliseid nähtusi, mida saab seletada nii lainete kui ka kvantide abil. Tutvume nendega põgusalt ka käesoleva kursuse raames.

Kõigi ülalnimetatud füüsikute eluloolised andmed on leitavad Vikipeediast.

1.1.3. Elektromagnetismi kursuse struktuur

Me alustame elektromagnetismi õppimist tutvumisest **staa-tilise** ehk ajas muutumatu **elektrivälja** ning **magnetväljaga**. Saame teada, mida on nende kahe välja kirjeldustes ühist ja mida erinevat. Tutvume kummagi välja põhiseadusega (Coulombi ja Ampère'i seadused) ning peamiste neid välju iseloomustavate vektorsuurustega, milleks on elektrivälja tugevus E ja magnetinduksioon B . Kursuse teises osas vaatleme elektri- ja magnetvälja muutumist ajas. Elektromagnetilise induktiooni nähtuse uurimisel selgub meile, et elektriväli ja magnetväli on ühtse **elektromagnetvälja** kaks piirjuhtu. Tutvume ka välja energiat salvestavate seadmetega, milleks elektrivälja korral on kondensaator ja magnetvälja puhul induktiivpool. Kursuse kolmandas osas uurime elektromagnetvälja levikut **elektromagnetlainetena**. Vaatleme valguse tekkimisel ja kadumisel ilmnevaid valguse osakese-omadusi ning valguse levimisel avalduvaid laineomadusi. Õpime kirjeldama vastavaid optilisi nähtu-

si: interferentsi, difraktsiooni ja polarisatsiooni. Kursuse neljandas osas vaatleme **valguse ja aine vastastikmõju**. Põhiteemadeks on geomeetiline ehk kiirteoptika, valguse levimiskiiruse erinev muutumine eri ainetes ja valguse tekkeprotsessid. Käsitleme valguse kahte peamist tekke mehhanismi: soojuskiirgust ja luminesentsi.

1.2. Elektrilaeng

1.2.1. Elektrilaengu mõiste

Lihtsaim elektrinähtus, mida me kõik kindlasti kogenud oleme, seisneb kehade elektriseerumises nende vastastikusel hõõrdumisel. Elektriseerunud kehade vahel mõjub jõud. Näiteks liibub kuivale nahale kunstkiust valmistatud särk. Pärast pestud ja kuivade juuste kammimist tõmbuvad juuksed kammi külge. Elektriseerunud kehade kohta öeldakse ka, et nad on laadunud või omandanud elektrilaengu.

Elektrilaeng ehk edaspidi lihtsalt **laeng** (tähis q või Q) on mingit keha iseloomustav füüsikaline suurus. *Laeng näitab, kui tugevasti keha osaleb elektromagnetilises vastastikmõjus*. Laengu olemasolu kehal saab kindlaks teha vaid elektri- ja magnetjõudude põhjal.

Sõna *laeng* kasutatakse õige mitmes tähenduses. Esiteks nimetatakse laenguks keha **omadust** osaleda elektromagnetilises vastastikmõjus. Rääkides elementaarosakese laengust, peame silmas selle osakese omadust osaleda elektri- ja magnetnähtustes. Sõna *laeng* teine tähendus on nimetatud omadust kirjeldav **füüsikaline suurus**. Kõneldes *laengu suurusest*, rõhutame laengu mõõtmise võimalikkust. Laengu kui suuruse mõõtmine on aga tegelikult kehade võrdlemine nende laengu kui omaduse põhjal. Peale selle mõistetakse füüsikas laengu all ka niisuguste **osakeste kogumit**, millel on olemas laeng kui omadus. Näiteks räägitakse ruumi mingis osas paiknevast laengust või siis laengu liikumisest. Neid väljendeid tuleb aga käsitleda lühenditena. Tegelikult on jutt ikkagi laengut omavate osakeste paiknemisest või liikumisest.

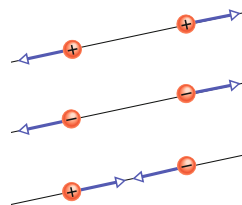
1.2.2. Positiivsed ja negatiivsed laengud

Juba 9. klassi elektriõpetuse kursusest teame, et looduses on kahte liiki laenguid. Neid on kokkuleppeliselt hakatud nimetama **positiivseteks ja negatiivseteks**. Selline nimetusviis võimaldab laengu liiki väljendada märgiga arvvaartuse ees (+ või -).

Meile mehaanika kursusest tuttav gravitatsioonijõud on ainult tõmbejõud. Samas tuntakse ka vaid ühte liiki „gravitatsioonilaengut”, mida on kombeks nimetada massiks. Elektrijõud võivad aga olla nii tõmbe- kui ka tõukejõud. Seega peab ka laenguid olema kahte liiki. Laengu arvvaartus määrab jõu suuruse, märk aga suuna. *Samanimeliselt laetud kehade vahel mõjub tõukejõud, erinevaste laengute*



Elektriseeritud kehade vahel mõjub jõud – laetud elektrisultani paberiribad tõukuvad üksteisest ning moodustavad koheva kera.



Samamärgiliselt laetud kehade vahel mõjub tõukejõud, erimärgiliselt laetud kehade vahel aga tõmbejõud.

Katse 1.1.

Võtame tüki alumiiniumfooliumi ehk rahvapäraselt „hõbepaberit”. Lõikame fooliumist riba ning keerame ta ümmarguse pliitsi ümber rulli. Torkame nõelaga fooliumtorukese sisse kaks auku ja kinnitame nende abil torukese külge niidi. Paneme torukese selle niidi otsa rippuma. Seejärel puudutame torukest klaaspulgaga, mis on naha või siidriidega hõõrumise teel positiivselt laetud. Otsekohe tõukub toruke klaaspulgast eemale, sest klaaspulgal ja torukesel on samanimeline, täpsemalt positiivne laeng.

Seejärel viime rippuva fooliumtorukese lähedusse villase riidega hõõrutud plastmasskeha, näiteks kammi või joonlaua. Märkame, et toruke tõmbub selle eseme poole. Võime väita, et plastmasskehal on torukese ja seega ka klaaspulga suhtes erinevat liiki laeng – negatiivne laeng. Kui toruke on korraks puutunud vastu negatiivse laenguga plastmasskeha, siis tõukub ta sellest otsekohe eemale. Järelikult neutraliseeris plastmasskehalt torukesele üle tulnud negatiiv-

J.1.1. Katse esimene faas



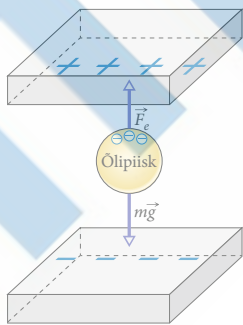
J.1.2. Katse teine faas



ne laeng täielikult senise positiivse ja oli koguni viimasest arvuliselt suurem, laadides ka torukese negatiivselt. Sellest annab tunnistust plastmasskeha ja torukese vahel mõjuv tõukejõud.

korral aga tõmbejõud.

Elektrit mittejuhtiva niidi otsas ripuvad kerged metallfooliumist keha nimetatakse sageli **elektripendliks**. Ka meie nimetame seda nii.



J.1.3. Millikani katse skeem. Õlipiisa käitumise laetud plaatide vahel määrab sellele kogunenud elementaarlaengute arv.

1.2.3. Elementaarlaeng

Füüsikalise looduskäsitluse aluste kursuses õpitud atomistliku printsiibi põhjal teame, et ainel on olemas osakesed, mis pole jagatavad veel väiksemateks osakesteks. Kuna laeng on osakese omadus, siis ei tohiks ka laeng olla kuitahes väike.

Laengu jagatavuse küsimust asus 20. sajandi algul uurima ameerika füüsik Robert Andrews Millikan [millikän]. Ta vaatles mikroskoobi abil tillukesti laetud õlipiisku, millele mõjus vertikaalselt üles suunatud elektrijõud. Kui see jõud tasakaalustas piisa raskusjõu, jäi piisk mikroskoobi vaateväljas seisma.

Olles mõõtnud piisa ruumala ning teades õli tihedust, suutis Millikan määrata piisa massi ja raskusjõu, järelikult ka elektrijõu. Selle põhjal leidis Millikan piisa laengu (näide 2.3). Ta märkas peagi, et kõik tema katsetulemused olid

mingi kindla laengu väärtuse täisarv-kordsed.

Vähimat katseliselt tuvastatavat laengu väärtust on hakatud nimetama **elementaarlaenguks** (e). 20. sajandil tehti kindlaks, et kõigi ainete aatomid koosnevad **prootonitest**, **neutronitest** ja **elektronidest**. Prootonid ja neutronid moodustavad aatomi tuuma, mille ümber liiguvad elektronid. Prootonil on laeng $+e$, elektronil $-e$, neutronil laeng puudub. Seega on iga keha laengu suurus nende osakeste laengute summa.

Tänapäeval on selgunud, et elementaarlaeng siiski päris elementaarne ei ole. On teada, et nii prooton kui ka neutron koosnevad kolmest **kvargist**. Kvargi elektrilaeng on kas $+2/3 e$ või $-1/3 e$. Näiteks prootoni koostiskvarkide laengud on $+2/3 e$, $+2/3 e$ ja $-1/3 e$. Seevastu neutroni koostisesse kuuluvad kvargid laengutega $+2/3 e$, $-1/3 e$ ja $-1/3 e$. Kuna vabu kvarke seni katseliselt avastatud ei ole, siis võime rahumeeli pidada elementaarlaengut e vähimaks looduses esinevaks terviklikuks laenguks.

Keemiast teame, et aatomi tuum käitub keemilistes reaktsioonides stabiilse tervikuna. Aatomi kuuluvus kindlale elemendile on määratud prootonite arvuga tuumas. Neutraalses aatomis on elektrone ja prootoneid ühepalju. Elektronide lisandumisel aatomisse moodustub **negatiivne ioon** ja elektronide lahkumisel **positiivne ioon**. See võimaldab mõista kehade elektriseerumist hõõrdumisel. Sõltuvalt vastavate ainete aatomite ehitusest võivad väliskihi elektronid ehk valentselektronid ühelt kehalt teisele üle minna. Keha, mis saab elektrone juurde, **laadub negatiivselt**. Seevastu keha, millelt elektronid ära rebiti, **laadub positiivselt**, sest tema aatomi-tuumade positiivne laeng on osaliselt tasakaalustamata. Elementaarlaenguga osakeselt ei saa tema laengut ära võtta nii, nagu elektriseerimisel rebitakse kehalt lahti elektrone. Laeng on osakesele sama kindlalt omane suurus nagu mass. Kui näiteks elektronil ei oleks laengut $-e$, siis ta polekski enam elektron. Negatiivse elementaarlaengu olemasolu on üks tunnustest, mis määrab elektroniks nimetatava osakese.

Elementaarlaengu jagamatuses avaldub atomistlik printsiip.

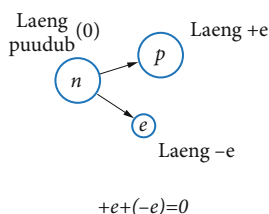
1.2.4. Laengu jäävuse seadus

Mehaanikast teame, et impulss ja energia on suletud süsteemis jäävad suurused. Elektrinähtuste uurimisel selgub, et ka elektrilaeng on jääv. Laeng ei teki ega kao. Kehade süsteemi kogulaeng saab muutuda vaid laetud osakeste sisenemisel süsteemi või väljumisel sellest. Kui laetud osakeste niisugust liikumist ei toimu, nimetatakse süsteemi **elektriliselt isoleerituks**. Tegemist on tüüpilise **suletud süsteemiga**. Selle mõistega tutvusime juba füüsikalise looduskäsitluse aluste kursuses.

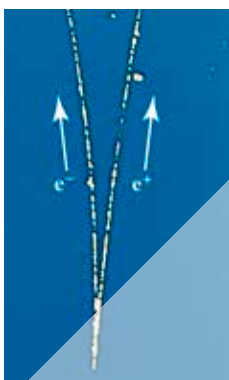
Laengu jäävuse seadust pole kuigi lihtne rangelt tõestada. Vastavas katses peaks ju mõõtemääramatus olema väiksem elementaarlaengust. Paljud erinevad elektrinähtused



Kaasaegne elementaarosakeste teooria ütleb, et prooton koosneb kolmest eri „värvi“ kvargist (joonisel tähistatud u ja d-ga).



J.1.4. Neutroni (n) lagunemine prootoniks (p) ja elektroniks (e). Lagunemise tulemusena süsteemi kogulaeng ei muutu.



**Foto elektroni ja positroni trajektoori-
de mullidest tekkinud jälgedest mullikambris.
Osakeste paar tekkis gamma-
kiirguse toimele, mis sisenes
kambrisse läbi selle põhja.**



**Osad materjalid juhivad elekt-
rit paremini, osad halvemini.
Näiteks kumm on mittejuht,
vask aga väga hea juht. Ena-
miku ülejäänud ainete elektri-
juhtivus jääb nende kahe
vahele.**

on aga seletatavad vaid lähtudes laengu jäävusest. Seetõttu usuti laengu jäävuse seaduse kehtivusse juba ammu enne elektronide ja prootonite avastamist.

Selgeid viiteid laengu jäävuse seadusele leiame keemiast. Tervikuna neutraalne keedusoola (NaCl) kristall dissotsieerub lahustumisel vees positiivseteks naatriumi ja negatiivseteks kloori ionideks (Na^+ ja Cl^-), mida tekib ühepalju.

Laengu jäävuse seadus sai füüsikas lõpliku kinnituse alles osakeste vahel toimuvate muundumisreaktsioonide uurimisel. Selgus, et laetud osakeste teke või kadumine nendes reaktsioonides on võimalik vaid paarikaupa. Uue positiivse osakese tekkimisel ilmub ka negatiivne osake. Nii näiteks tekivad vaba neutroni lagunemisel üheaegselt positiivne prooton ja negatiivne elektron (J.1.4). Neutron ongi siin see elektriliselt isoleeritud süsteem, millest oli juttu eespool.

Laengu jäävus väljendab maailma üldist keskmist elektrilist neutraalsust. Kujutlegem hetkeks, mis juhtuks, kui kõigis kehaes oleksid ühte liiki laenguga osakesed ülekaalus. Sel juhul mõjuksid ju kõigi kehade vahel elektrilised tõukejõud. Seda me aga looduses ei näe. Meid ümbritsevad kehad on tavaliselt neutraalsed. Positiivse ja negatiivse laenguga osakesi on neis ühepalju. Kui üks keha saab positiivse laengu, siis laadub mingi teine keha negatiivselt. Kehade laengute summa jääb muutumatuks. Aga see ju ongi laengu jäävus.

Niisiis kehtib **laengu jäävuse seadus: elektriliselt isoleeritud süsteemi kogulaeng on jääv suurus.**

1.2.5. Elektrit juhtivad ja mittejuhtivad ained

Hõõrdeelektrit uurides märkame kohe, et ained erinevad oma elektrijuhtivuse poolest. Kui näiteks kuivad juuksed kammi külge tõmbuma hakkavad, siis võime sellest jagu saada kammi niisutades. Seega on kraanivesi elektrit juhtiv aine. Läbi tema lahkuvad laetud osakesed kammilt. Puhas (destilleeritud) vesi aga ei juhi elektrit. Samuti ei õnnestu meil tavaliselt hõõrumise teel laadida märki esemeid ja metallkehi, sest tasakaalustamata laeng lahku-
b neilt. Laenguga osakesed liiguvad läbi eseme ja seejärel läbi meie käte.

Inimkeha juhib elektrit suhteliselt hästi. Metalle ei õnnestu hõõrumise teel elektriseerida just seetõttu, et nii ese kui ka seda hoidev käsi juhivad elektrit. Olles tõmmanud kätte kummikinda, võime elektriseerida ka metallet. Kumm elektrit ei juhi ning laeng püsib esemel.

Põhikooli elektriõpetuse kursusest teame, et metall ja kraanivesi sisaldavad arvukalt *liikumisvõimelisi laetud osakesi* ehk **vabu laengukandjaid**. Sõnaga *vaba* tähistame seejuures laetud osakese võimet liikuda elektrijõudude toimel kogu vaadeldava keha või ainekoguse piires. Nagu kõik aineosakesed, nii osalevad ka laengukandjad kaootilises soojusliikumises. Kui aga neile mõjub kindla suunaga elekt-

rijõud, hakkavad nad täiendavalt liikuma ka selle jõu mõjul.

Vabade laengukandjate sisalduse järgi jagunevad ained kolme rühma: juhid, dielektrikud (ehk mittejuhid või ka iso-laatorid) ja pooljuhid.

Juhid on *ained, milles vabade laengukandjate arv on väga suur*. See ei erine oluliselt aatomite (või molekulide) üldarvust. Tüüpilised juhid on metallid, kuna valentselektronid pole neis seotud ühegi kindla aatomiga ja on järelikult vabadeks laengukandjateks. Elektrit juhtivates vedelikes (näiteks kraanivees) täidavad vabade laengukandjate osa keemiliste lisandite ioonid.

Dielektrikud ehk **mittejuhid** *sisaldavad väga vähe vabu laengukandjaid* ning seetõttu on neis tekkiv elektrivool reeglina väga nõrk. Vabade laengukandjate puudumine gaasilises või vedelas dielektrikus on enamasti põhjustatud sellest, et dielektriku aatom või molekul on elektriliselt neutraalne süsteem. Elektrijõud ei suuda laetud osakesi sellest süsteemist välja rebida. Tahke dielektrik võib küll koosneda erimargiliselt laetud ioonidest, aga elektrijõud ei suuda neid liikuma panna.

Pooljuhid on saanud nime vahepealse elektrijuhtivuse järgi juhtide ja dielektrikute kui kahe äärmuse vahel. *Laengukandjad ei ole pooljuhtides küll alati vabad, kuid neid saab suhteliselt kergesti vabadeks muuta*. Seetõttu on pooljuhtidele iseloomulik vabade laengukandjate arvu tugev sõltuvus temperatuurist, pealelangevast valgusest, lisandite sisaldusest põhiaines jne. Pooljuhi elektrijuhtivus on nende tingimuste muutmise teel reguleeritav. See pooljuhtide väärtuslik omadus leiab laialdast kasutamist nüüdisaegses elektroonikas.

Kindlaid piire ainete kolme rühma vahel pole. Näiteks on metallis vabade laengukandjate arv aatomite üldarvust tavaliselt suurem, sest aatomil võib olla väliskihis mitu elektroni, mis saavad muutuda vabadeks laengukandjateks. Ainet loetakse aga juhiks veel ka siis, kui mitme tuhande aatomi või molekuli kohta tuleb vaid üks vaba laengukandja. Nii on see näiteks kraanivee korral. Pooljuhtides on vabade laengukandjate arv aatomite arvust väiksem ligikaudu miljon korda, dielektrikutes aga reeglina üle miljardi korra.

Veel tuleb märkida, et sõna *juht* kasutatakse nii elektrit juhtiva aine kui ka sellest ainest valmistatud keha tähistamiseks.

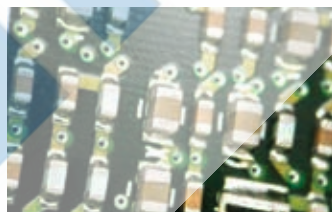
1.2.6. Elektrivool ja voolutugevus

Laengukandjate suunatud liikumist nimetatakse **elektrivooluks**.

Voolu tekkimiseks on vajalik nii vabade laengukandjate olemasolu kui ka nende liikumist põhjustav jõud. Elektrivoolu iseloomustavaks suuruseks on voolutugevus **I**. **Voolutugevus** näitab, kui suur laeng läbib ajaühikus juhi ristlõiget

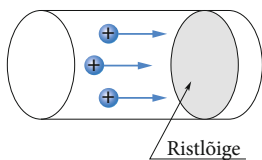


Eesti ja Soome vahelise merekaabli Estlink ristlõige. Vasest juhtivate kihtide vahel on dielektriku kiht (pildil must).

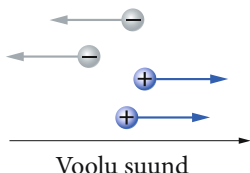


Pooljuhtide omadustel põhineb suur osa tänapäevasest elektroonikast.

$$I = \frac{q}{t}. \quad (1.1)$$



J.1.5. Juht ja tema ristlõige.



J.1.6. Elektrivoolu kokkuleppelise suuna määramine.

Ristlõike all mõistetakse seejuures voolu suunaga ristuva lõike pinda (J.1.5). **Voolu suunaks** on kokkuleppeliselt valitud *positiivsete laengukandjate liikumise suund*. Negatiivsed laengukandjad (näiteks elektronid metallis) liiguvad seega voolu kokkuleppelisele suunale vastupidises suunas (J.1.6).

On oluline mõista, et pole üldse tähtis, kumma märgiga laengukandjad realselt aines liiguvad. Nii positiivsete laengukandjate liikumine paremale kui ka negatiivsete liikumine vasakule joonisel 1.6 tähendab üht ja sedasama voolu suunda. Liikuvate laengukandjate märgi määramine on võimalik vaid keerulisemates katsetes. Tavalise vooluringi korral me laengukandjate märki teada ei saagi, aga see asjaolu ei sega vooluringide uurimist.

Voolutugevuse ühikuks on **üks amper** (1 A). Amper on SI süsteemi elektriline põhiühik. See tähendab, et kõik teised elektriliste suuruste mõõtühikud tuletatakse tema abil. Amper defineeritakse vooluga juhtmete magnetilise vastastikmõju kaudu (p.1.4.2). Voolutugevuse I leidmiseks peame juhi ristlõiget läbiva laengu q jagama selleks kuluva ajaga t (valem 1.1). Laeng ise on seega esitatav voolutugevuse ja aja korrutisena

$$q = I t. \quad (1.2)$$

Viimase seose põhjal on defineeritud elektrilaengu SI-ühik üks kulon (1 C). Kui voolutugevus juhis on üks amper, siis läbib ühe sekundi jooksul juhi ristlõiget laeng suurusega **üks kulon**. Järelikult

$$1 \text{ C} = 1 \text{ A} \cdot 1 \text{ s}.$$

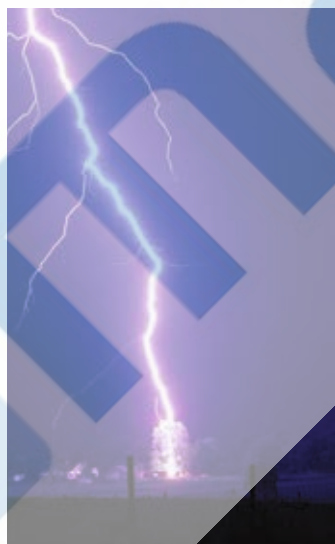
Elementaarlaengu väärtus on $1,6021892 \cdot 10^{-19}$ kulonit. Praktistes arvutustes piisab reeglina täpsusest

$$1e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}.$$

Üks kulon on väga suur laeng. Kammi või klaaspulka elektriseerides anname talle laengu, mille suurusjärk on üks nanokulon kuni üks mikrokulon ($1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$). Tabelis 1.1 on toodud mõned iseloomulikud voolutugevused:

Tabel 1.1.

Elektrinähtus või elektriseade	Voolutugevus
Biovoolud elusorganismides	alla 10^{-6} A
Raadio, CD-mängija, muusikakeskus	0,01–0,1 A
Võrgutoitega elektrilambi või taskulambi hõõgniit	0,2–0,5 A
Autolaterna hõõgniit, tänavavalgusti	1–5 A
Elektripliidi või soojapuhuri küttekeha	2–20 A
Trammi või elektrirongi mootor, auto käiviti	100–500 A
Keevitusagregaat	100–1000 A
Välgu helendav kanal	kuni 10^6 A



Voolutugevus välgukanalis on väga suur.

Maksimaalset laengut, mille vooluallikas suudab vooluringist läbi viia, nimetatakse sageli vooluallika **mahutavuseks** (mitte mahtuvuseks!) ja teda mõõdetakse amper-tundides. Kui voolutugevus juhis on üks amper, siis läbib ühe tunni jooksul juhi ristlõiget laeng üks amper-tund ($1\text{ A} \cdot \text{h}$).

Kuna ühes tunnis on 3600 sekundit, siis
 $1\text{ A} \cdot \text{h} = 1\text{ A} \cdot 3600\text{ s} = 3600\text{ C}$.

Näide 1.1.

Leiame, millise aja jooksul suudab auto käivitit toita aku, mille mahutavus on $50\text{ A} \cdot \text{h}$. Käiviti tarbib voolu 200 A .

Antud:

$$q = 50\text{ A} \cdot \text{h}$$

$$I = 200\text{ A} = 2 \cdot 10^2\text{ A}$$

$$t = ?$$

Lahendus: $50\text{ A} \cdot 3600\text{ s} = 1,8 \cdot 10^5\text{ C}$

valem 1.1:

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

$$t = \frac{1,8 \cdot 10^5\text{ C}}{2 \cdot 10^2\text{ A}} = 9 \cdot 10^2\text{ s} = 900\text{ s}$$

Vastus: aku suudab käivitit toita maksimaalselt 900 sekundi ehk 15 minuti jooksul.

Igaüks, kes autodega lähemalt kokku on puutunud, teab hästi, et tegelikult ei saa käivitel nii kaua töötada lasta. Miks see nii on, selgub *energia* kursuses.

Küsimusi ja ülesandeid

- Oletagem, et laenguid on mitte kahte, vaid koguni kolme liiki. Nimetagem neid A-, B- ja C-laenguteks. Samaliigiliselt laetud kehade (näiteks A ja A) vahel mõjuvad teatavasti tõukejõud. Seega oleks A-, B- ja C-laengute eristamisel mõtet vaid juhul, kui A- ja B-laengu ning A- ja C-laengu korral mõjuvad tõmbejõud erineksid. Niisugust erinevust seni leitud ei ole. Mida ütleb selline tulemus laenguliikide arvu kohta?
- Lugesdes mingit elektrilast teksti (näiteks käesolevas õpikus), püüdke iga kord sõna *laeng* juures määrata, kas seda sõna on kasutatud keha omaduse, mõõdetava suuruse või laetud osakeste kogumi tähenduses.
- Millisele sõna *laeng* tähendusele taanduvad lõppkokkuvõttes kõik teised tähendused?

STOPP!

- Laeng on füüsikaline suurus, mis näitab, kui tugevasti keha osaleb elektromagnetilises vastastikmõjus.
- Looduses leidub kahte liiki laenguid, mida nimetatakse positiivseteks ja negatiivseteks (+ ja -). Samamargiliselt laetud kehade vahel mõjub tõukejõud, erimargiliselt laetud kehade korral aga tõmbejõud.



3. Vähimat võimalikku laengu väärtust nimetatakse elementaarlaenguks e .
4. Kehtib laengu jäävuse seadus: elektriliselt isoleeritud süsteemi kogulaeng on jääv suurus.
5. Elektrivooluks nimetatakse laengukandjate suunatud liikumist.

1.3. Coulombi seadus

1.3.1. Coulombi katsed

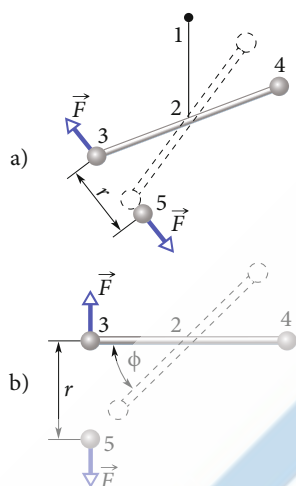
Elektrijõude asus 1784. aastal mõõtma Charles de Coulomb. Mõõteseadmena kasutas ta **väändkaalu** ehk torsioonkaalu. Väändkaalu töö aluseks on mõõdetava jõu võrdlemine peenikese traadi väändel tekkiva elastsusjõuga. Coulombi poolt kasutatud väändkaalu korral (J.1.7) rippus traadi (1) küljes horisontaalne mittejuhtiv varras (2), mille ühes otsas paiknes uuritav metallkuulike (3), teises otsas aga kuulikest tasakaalustav raskus (4). Vardaga ristuva jõu rakendumisel kuulikesele pöördus varras seni, kuni traadi väände elastsusjõud tasakaalustas kuulikesele mõjuva jõu. Coulomb tegi kindlaks, et nurk φ , mille võrra varras joonisel punktiiriga kujutatud tasakaaluasendist välja pöördus, oli võrdeline jõuga. See võimaldas pöördenuurga kaudu jõudu mõõta. Oma katsete korraldamisel lähtus Coulomb eeldusest, et varda küljes paikneva, algselt neutraalse kuulikes (3) puudutamisel teise täpselt samasuguse, kuid laetud kuulikesega (5) jaotub laeng kahe kuulikes vahel võrdselt. Coulomb mõõtis kuulikeste vahel mõjuva jõu F ja suurendas kuulikeste vahekaugust kaks korda. Selle tulemusena vähenes jõud neli korda. Nüüd suurendas Coulomb kuulikeste vahekauguse esialgsega võrreldes kolmekordseks ja veendus selles, et jõud oli üheksa korda esialgsest väiksem. Seega vahekaugusel r mõjus laetud kuulikeste vahel jõud F , vahekaugusel $2r$ jõud $F/4$, vahekaugusel $3r$ jõud $F/9$ jne. Tulemus oli esitatav ka kujul

$$r^2 F = (2r)^2 F/4 = (3r)^2 F/9 = \dots = \text{const.}$$

Nii võis Coulomb teha järelduse, et laetud kehade vahekauguse ruudu ja elektrijõu korrutis on konstantne, teiste sõnadega: laetud kehade vahel mõjuv elektrijõud on pöördvõrdeline kehade vahekauguse ruuduga

$$F = \frac{\text{const}}{r^2}.$$

Selleks et uurida kuulikeste muutumatu vahekauguse korral jõu sõltuvust laengu suurusest, juhtis Coulomb ühelt vaadeldavalt kuulikeselt laengu ära ning viis kuulikesed uuesti kokku puutesse. Kui esialgu oli mõlemal kuulikesel laeng q ,



J.1.7. Coulomb'i väändkaalu ehk torsioonkaalu põhimõtte-skeem: a) vaade poolküljelt, b) vaade ülalt.



Coulomb'i kasutatud katse-seade.

siis nüüd jäi mõlemale kuulikesele laeng $q/2$. Kuulikeste vahel mõjuv jõud aga oli sama vahekauguse korral esialgselt neli korda väiksem, seega $F/4$. Sellise protseduuri kordamisel jäi kuulikestele laeng $q/4$, jõud aga kahanes väärtuseni $F/16$. Coulomb mõistis, et kui laeng kahaneb mingi arv kordi, siis jõud kahaneb see arv ruudus kordi. Teisiti öeldes: jõu ja laengu ruudu jagatis on konstantne

$$\frac{F}{q^2} = \frac{F/4}{(q/2)^2} = \frac{F/16}{(q/4)^2} = \dots = \text{const.}$$

Coulomb järelendas, et jõud on võrdeline laengu ruuduga

$$F = \text{const } q^2.$$

Teatavasti on mingi arvu ruudu leidmine korrutamise erijuht. Selle põhjal võis Coulomb nüüd väita, et erinevalt laetud kehade vahel mõjuv jõud on võrdeline laengute korrutisega.



Katse 1.2.

Me võime Coulomb'i poolt kasutatud „laengu poolitamise meetodit“ rakendada ka ise. Selleks valmistame kaks ühesugust, ligikaudu meetripikkuste riputusniitidega elektripendlit (katse 1.1) ja paneme nad kõrvuti rippuma, nii et pendlite fooliumtorukesed oleksid tasakaaluasendi korral õrnas kontaktis. Kui me nüüd anname ühele torukesele laengu, siis jaotub see otsekohe kahe torukese peal võrdselt ning torukesed hakkavad oma samanimeliste laengute tõttu tõukuma. Selle tõukejõu suurus on määratav raskusjõuga võrdlemi-

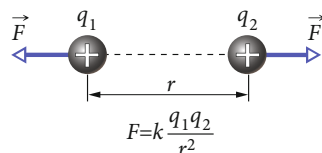
se teel sarnaste kolmnurkade meetodil, kui kummagi fooliumtorukese mass on eelnevalt ära mõõdetud. Pool torukeste tasakaalulisest vahekaugusest on niidi pikkusest väiksem seesama arv kordi, kui mitu korda on elektrijõud väiksem torukese raskusjõust. Puudutades ühte torukest korraks käega, juhime laengu tema pealt omaenda kehasse. Tõukejõud kaob ja torukesed puutuvad korraks kokku, mille tulemuseks puutumata jäänud torukese laeng q jaotub võrdselt mõlemale torukesele. Kumbki toruke on omandanud laengu $q/2$.

1.3.2. Coulombi seadus. Punktlaeng

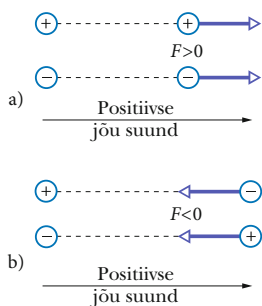
Coulomb jõudis gravitatsiooniseadusega väga sarnase tulemuseni: kahe laetud keha vahel mõjuv elektrijõud F_e on võrdeline kummagi keha laenguga ja pöördvõrdeline kehade vahekauguse ruuduga

$$F_e = k \frac{q_1 q_2}{r^2}, \quad (1.3)$$

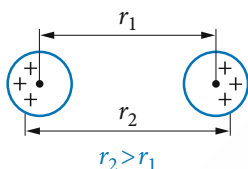
kus k on võrdetegur. See jõud mõjub laetud kehi ühendava sirge sihis ning sõltub ainest, milles laetud kehad asuvad. Jõud on suurim vaakumis, aga peaaegu niisama suur on ta ka õhus. Jõud on samanimeliste laengute jaoks tõukejõud ja erinimeliste laengute korral tõmbejõud. Jõu mõjumise siht on kehade asukohtadega määratud. Järelikult on jõul kui vektoril vaid kaks võimalikku suunda. Jõu suunda antud sihil võib kirjeldada jõu arvvaartuse ees paikneva märgiga



Kahe laetud keha vahel mõjuv elektrijõud on võrdeline kummagi keha laenguga ja pöördvõrdeline kehade vahekauguse ruuduga.



J.1.8. Kahe laetud keha vahel mõjuva jõu märgi määramine:
a) samamärgilised laengud – jõud positiivne, b) erimärgilised laengud – jõud negatiivne.



J.1.9. Kehade tsentrite vahekauguse r_1 ja laengute vahekauguse r_2 erinevus.



J.1.10. Punktlaengu mõiste selgitus.

(+ või –). See omakorda on leitav laengute märkide põhjal. Niisiis tähistab F_e valemis 1.3 ja ka edaspidi jõuvektori pik-kust, mis võib olla nii positiivne kui ka negatiivne.

Me vaatleme ühele laetud kehale mõjuvat jõudu positiiv-sena, kui see on suunatud teisest kehast eemale. Negatiivseks loeme jõudu aga siis, kui see on suunatud teise keha poole. Samanimeliste laengute korrutis on valemis 1.3 alati posi-tiivne. Seega mõjub samanimeliselt laetud kehade vahel posi-tiivne jõud ehk tõukejõud. Erinimeliste laengute korrutis on negatiivne ning kehade vahel mõjub negatiivne jõud ehk tõmbejõud (J.1.8). Sellise kokkuleppega vabaneme vajadu-sest kasutada jõudu sisaldavates valemities vektorkuju.

Kõigi Coulombi katsete kirjeldustes nimetasime vahe-kauguseks kuulikeste tsentrite vahelist kaugust. Kui kuu-likeste läbimõõt on tühiselt väike võrreldes kuulikeste vahekaugusega, pole selle asjaolu rõhutamine eriti tähtis. Kui aga kuulikeste läbimõõt on vahekaugusele lähedane, siis tuleb vahekauguse mõistet täpsustada. Omavahelise tõuku-mise tõttu asetuvad samamärgilist laengut kandvad osakesed kummagi kuulikesse sellesse ossa, mis jääb teisest kuulikesest võimalikult kaugemale (J.1.9). Selle tagajärjel on laengutevahe-line kaugus kuulikeste tsentrite vahekaugusest suurem.

Kuulikeste vahel mõjuv jõud on aga Coulombi seaduse põhjal väiksem sellest jõust, millega mõjutaksid teineteist kuulikeste tsentrites paiknevad laengud. Sõna *laeng* tähen-dab siin mõistagi laetud osakeste kogumit. Coulombi sea-dus on lühidalt ja täpselt sõnastatav vaid niisuguste *laetud kehade jaoks, mille mõõtmed on tühised võrreldes kehade vahekaugusega*. Selliseid laetud kehi nimetatakse **punkt-laenguteks** (J.1.10). Punktlaeng mängib elektriõpetuses sama rolli, mis punktmass *mehaanika* kursuses. Mistahes keha võib käsitleda punktlaenguna juhul, kui laengu jao-tumise keha osade vahel tohib antud ülesandes arvestama-ta jätta. Keha laengut vaadeldakse siis koondununa ühte punkti. Mingi keha võib ühes ülesandes esineda punktlaen-guna, teises aga mitte. Näiteks on laetud veepiisake äikese-pilve ja Maa vahel vaadeldav punktlaenguna. Piisa pinna lähedal asuva üksiku iooni jaoks aga laetud veepiisk kind-lasti punktlaeng ei ole.

1.3.3. Elektrikonstant

Avaldades valemist 1.3 võrdeteguri k , saame

$$k = \frac{F_e r^2}{q_1 q_2}.$$

Tegur k võrdub arvuliselt jõuga, mis mõjub vaakumis kahe teineteisest 1 m kaugusel paikneva punktlaengu 1 C vahel (J.1.11). Katsetes on kindlaks tehtud, et see jõud oleks $9 \cdot 10^9$ N ehk niisuguse keha raskusjõud, mille mass on pea-