

Riina Murulaid

Elektromagnetism

Õpik gümnaasiumile



Sisukord

Sissejuhatus	7
1. Elektriväli	8
1.1. Elektrilaeng	9
1.2. Coulomb'i seadus	12
1.3. Elektriväli	16
1.4. Elektrivool ja voolutugevus	23
1.5. Elektrivälja töö ja energia	26
1.6. Elektrivälja potentsiaal ja pinge	29
1.7. Elektrivälja tugevus ja pinge	34
1.8. Kondensaator	39
<i>Kordame üle!</i>	45
2. Magnetväli	50
2.1. Püsimagnet	51
2.2. Vooluga juhtme magnetväli	54
2.3. Magnetinduktsioon ja vooluga juhtmele mõjuv magnetjõud	57
2.4. Elektrimootor	61
2.5. Magnetjõud kahe vooluga juhtme vahel. Ampère'i seadus	64
2.6. Magnetvälja mõju liikuvale laetud osakesele. Lorentzi jõud	66
2.7. Elektrivoolu genereerimine	71
2.8. Faraday induktsiooniseadus	74
2.9. Generaator	80
2.10. Magnetvälja energia	82
<i>Kordame üle!</i>	84
3. Elektromagnetväli	90
3.1. Elektromagnetlainete genereerimine	91
3.2. Elektromagnetlaineid kirjeldavad suurused	94
3.3. Elektromagnetlainete spekter	97
3.4. Elektromagnetlainete neeldumine	101
3.5. Elektromagnetlainete polarisatsioon	103
3.6. Elektromagnetlainete interferents	106
3.7. Difraktsioon	110
3.8. Elektromagnetlainete murdumine	114
3.9. Spektraalanalüüs	120
3.10. Valgusallikad	126
3.11. Elektromagnetlainete energia ja footon	129
<i>Kordame üle!</i>	134
Õpiku arvutusülesannete vastused	140
Indeks	142

Sissejuhatuseks õpiku kasutajale

Sa avasid just gümnaasiumi füüsika elektromagnetismi kursuse õpiku. Õpikus on kolm suuremat peatükki: „Elektriväli“, „Magnetväli“ ja „Elektromagnetväli“. Igast peatükist leiad nii teoreetilisi selgitusi kui ka praktilisi näiteid teemade kohta, mis on seotud lisaks füüsikale ka meditsiini, muusika, tehnika, keemia, bioloogia ja mitmete teiste valdkondadega.

Õpikus on kokku 29 alapeatükki, igaühes on eristatavad järgmised osad:

- teoreetiline osa on musta kirjaga valgel taustal ja sisaldab valemeid ning jooniseid, mis on olulised antud teemast aru saamiseks ja selle omandamiseks;
- näidisülesanded ja katsed on musta kirjaga helerohelisel taustal. Näidisülesanded on sageli ka rakenduslikeks näideteks. Katseid saab kas ise järele teha, vaadata näitkatsena või tutvuda video vahendusel;
- rakendused ja näited on musta kirjaga heleoranžil taustal. Need muudavad teema elavamaks ja avavad füüsika seotust teiste valdkondadega;
- harjutusülesanded on iga peatüki lõpus musta kirjaga sinisel taustal. Arvutusülesannete vastused on toodud õpiku lõpus.

„KORDAME ÜLE!“ – iga suurem teema lõpeb kordava osaga, mis sisaldab teoreetilist kokkuvõtet definitsioonide, valemite, näidete ja joonistega.

Kui soovid

- 1) teada saada, kuidas töötavad näiteks röntgenaparaat, elektrikitarr, mürasummutavad kõrvaklapid, või
- 2) mõista, kuidas spektrid ja nähtused, nagu difraktsioon ja polarisatsioon, aitavad avardada meie teadmiste silmapiiri, olgu nendeks teadmised mikroosakeste maailmast, universumist või meie enda Maa kohta, või
- 3) selgeks saada, kuidas töötavad elektrimootorid, kondensaatorid ja generaatorid,

on see õpik just sulle!

Suure austusega

Riina Murulaid



Sissejuhatus

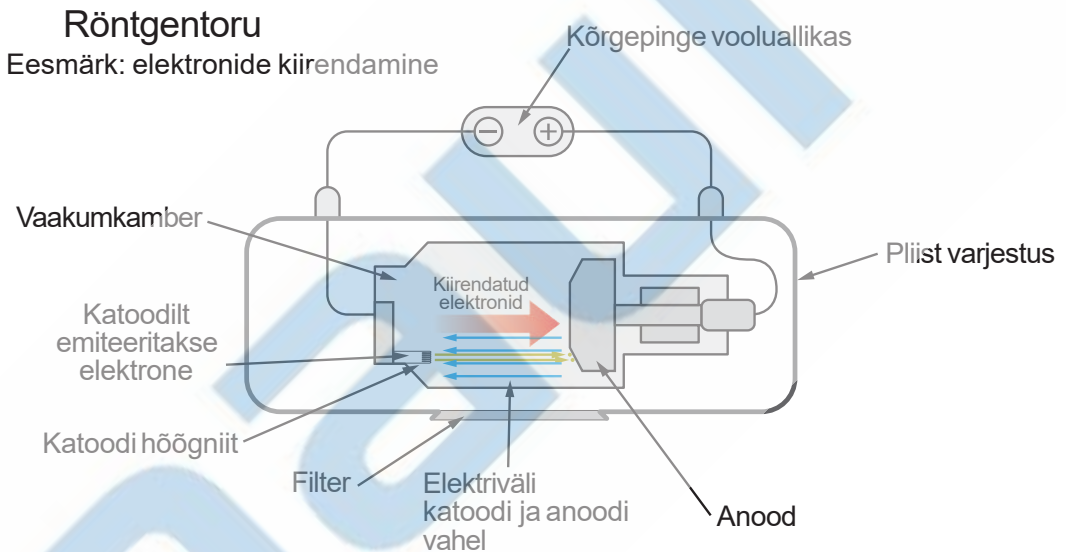
„Elame infoväljas“, „käime reede öhtuti väljas“, „voogav viljaväli“ – need ütlused on meile tuttavad nii tavasuhtlusest kui ka aja- ja ilukirjandusest. Tänapäeva teaduses on mõistel **väli** suur tähtsus, moodustades koos mõistetega **energia**, **aatom**, **kiirus** sõnahulga, mida kohtab enamikus füüsika-alastes teaduspublikatsioonides ja populaarteaduslikes kirjatükkides.

Välja mõistega oleme varasemalt kokku puutunud põhikoolis. 9. klassi elektriõpetuse tundides räägiti nii elektri- kui ka magnetväljast, seostades vastavaid välju neis mõjuvate jõududega. Põhikooli mehaanika kursuses tutvusime raskusjõuga ning gümnaasiumi mehaanika kursustes lisandus mõiste „gravitatsiooniväli“.

Selles õpikus tuleb juttu elektromagnetnähtusi seletavast elektromagnetväljast. Kui õppida ühte eelpool nimetatud väljadest põhjalikumalt tundma, on võimalik teha järeldusi teiste kohta. Nii on kõikide väljade ühine omadus vahendada vastastikmõju, samuti levivad kõik väljad ruumis absoluutkiirusega $c = 299792458 \frac{\text{m}}{\text{s}}$.

Ühes ruumipunktis võib koos olla mitu erinevat välja. Kui ainet on suhteliselt lihtne uurida ja tajuda, siis väljadega on asi keerulisem. Samas on magnetvälja olemasolu uurida teistest lihtsam: kui suruda kokku magnetite samanimelisi pooluseid, tuleb rakendada jõudu, mis võib olla märkimisväärselt suur. Surumise ajal võib tajuda magnetitevahelist n-ö elastset ala. Selles alas ongi magnetväli ja me tunnetame seda läbi jõu, sest oleme pannud kaks magnetit omavahel vastastikmõjusse ja seda mõju vahendab magnetväli.

1. ELEKTRIVÄLI



Joonis 1.1. Röntgentoru ehitus ja tööpõhimõte.

Elektrivälja kasutatakse laetud osakeste kiirendamiseks. Üks tuntumaid elektronide kiirendeid on **röntgentoru** ehk **röntgenlamp**. Röntgenlambis kiirendatakse väga tugeva elektrivälja abil elektrone, mida emiteerib katood. Suure kineetilise energia saanud elektronid põrkavad vastu anoodi. Elektronide kineetiline energia muutub väga tugeval pidurdusel röntgenkiirguse energiaks. Spetsiaalse filtri abil filtreeritakse välja madalama energiaga röntgenkiirgus, mis neelduks kudedes neid kahjustades. Vabaneb röntgenkiirgus, mis sobib röntgenpildi tegemiseks.

1.1. Elektrilaeng



Positiivse ja negatiivse (laengu) ristiisaks võib lugeda Benjamin Franklini (1706–1790), kes oli ühtlasi ka piksevarda leiutaja ja Ameerika Ühendriikide iseseisvusdeklaratsiooni üks autoreid. Franklin tähistas mõistega „positiivne elekter“ siidiriidega hõõrutud klaasist pulgale tekkinud elektrilaengut, ja mõistega „negatiivne elekter“ karusnahaga hõõrutud eboniitpulgalaengut.

Kehade laadumine on seotud vabade elektronide ümberpaiknemisega kehas. Kui muidu neutraalsel kehal on elektrone liiga palju, on keha laetud **negatiivselt**, ja kui neutraalne keha on elektrone ära andnud, on see laetud **positiivselt**.

Olgu meil tegemist kahe metallkeraga. Laeme ühe neist positiivselt, teise negatiivselt. Laenguid võib saada, kui kasutada Franklini ülal kirjeldatud elektriseerimise viise. Kuna metallkerad on erinimeliselt laetud, esineb nende vahel tõmbejõud. Metallis saavad aatomi väliskihi elektronid liikuda kogu uuritava ainetüki piires ja nii paiknevad **elektrijõudude** tõttu laengud keradel ümber (joonis 1.2). Elektrijõud mõjuvad nii laetud kehade kui ka metallis olevate elektronide vahel. Mõlemal juhul vahendab jõudusid elektriväli.



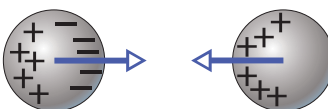
Joonis 1.2. Erinimeliselt laetud metallkerade tõmbumine.

Kui laadida neutraalsed kerad uuesti, seekord mõlemad samanimeliselt, näiteks negatiivse laenguga, siis tekib kehade vahel tõukejõud (joonis 1.3). Ka laengud metallkera pinnal vahetavad asukohta.



Joonis 1.3. Samanimeliselt laetud metallkerade tõukumine.

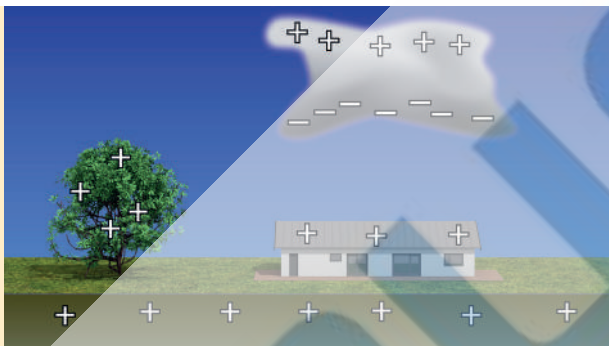
Kolmandal juhul jätame ühe metallkera neutraalseks, aga teise laeme positiivselt. Kuigi üks on neutraalne, võib täheldada kehadevahelist tõmbejõudu. Põhjuseks on vabade laengute ümberasetumine elektrit juhtivas kehas väliste elektrijõudude tõttu, mistõttu keha pind laadub teise kehaga võrreldes vastasmärgiliselt (joonis 1.4). Sellist nähtust nimetatakse **elektriliseks või elektrostaatiliseks induksiooniks** (ld *inducere* 'esile kutsuma, põhjustama').



Joonis 1.4. Neutraalse ja positiivselt laetud kera tõmbumine.

Me kõik oleme kokku puutunud elektrilise induktsiooniga, saades n-ö särtsu elektrit juhtivatelt pindadelt. Ka äikese tekkimine on seotud elektrilise induktsiooniga.

Äikesepilvede laadumisprotsess on seotud õhumasside liikumisega üksteise suhtes, mille käigus toimub õhumassiivides asuvate pilveosakeste – lumekristallide, raheterade – vastastikune hõõrdumine ja selle tulemusena nende laadumine. Positiivselt laetud lumekristallide ja negatiivselt laetud raheterade pilvesisel liikumisel ja raskuse järgi kuhjumisel laaduvad ka pilve osad.



Joonis 1.5. Laeng äikesepilves.

Negatiivselt laetud ja raskemad raheterad on pigem pilve alaosas ja kergemad positiivselt laetud lumekristallid ülaosas (joonis 1.5). Äike tekib, kui elektrivälgi muutub küllalt tugevaks. Äikesepilvedes mõõdetud elektrivälja tugevusest ei piisa siiski välgu tekkimiseks, vaja läheks veelgi tugevamaid elektriväljasid ja seetõttu on atmosfääriteadlaste arvates vaja lisafaktorina päikesetuuli (suure energiaga laetud osakeste voog) või atmosfääri enda jääklaengut ja polariseeritust. Äikeselöögi kestvus on u 0,2 sekundit ja selle ajaga liigub välgus kuni 30 impulssi.

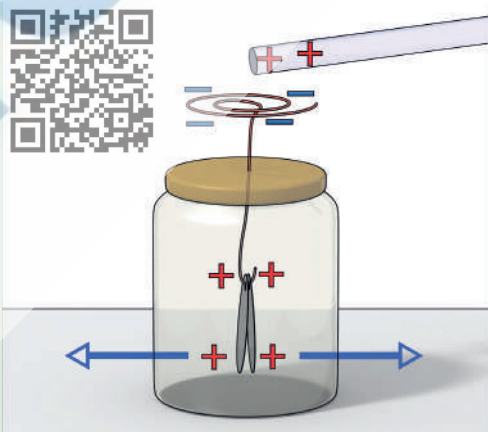
Katsed elektrooskoobiga

Elektroskoop on katseseade, millega saab uurida kehade laenguid ja elektrilist induktsiooni. Lihtsa elektrooskoobi saab valmistada järgmistest vahenditest: umbes 5 dl klaasanum (keeduklaas või klaaspurk), õhuke foolium, plastikkaas või muu plastikust kate, jämedam (0,8 mm) vasktraat ja teipi.

Fooliumist lõigatakse umbes 4–5 cm pikkused ovaalid, mille ühte otsa tehakse avad. Vasktraat keritakse ühest otsast spiraaliks ja teine ots surutakse läbi plastikkaane ning tehakse otsa väike konks. Konksu külge riputatakse fooliumovaalid. Seejärel suletakse purk kaanega ja fikseeritakse teibiga katseseadme osad. Seade ongi valmis.

Elektrilise induktsiooni uurimiseks tuleb vaskspiraalile lähendada elektriliselt laetud keha, nt õhupall, klaaspulk või joonlaud, ja uurida fooliumlehekeste käitumist.

Elektroskoopi saab laadida ka laengut jagades. Selleks tuleb laetud kehaga puudutada vaskspiraali.



Joonis 1.6. Elektrooskoobi laadimine.

Mõistel „elektrilaeng“ on mitu tähendust. Siiani käsitlesime elektrilaengut kas keha omaduse või portsu laetud osakeste tähenduses. Elektrostaatikas on olulisel kohal elektrilaengu kui füüsikalise suuruse mõiste.

Elektrilaeng füüsikalise suurusena iseloomustab, kui tugevasti osaleb laetud keha elektromagnetilises vastastikmõjus.

Elektrilaengu tähis on q või Q ja ühik on 1 kulon, lühendina C.

1 kulon on väga suur laeng. Äikesepilve laengud võivad olla suurusjärgus 100 C. Kui meie juuksed on „elektrit täis“, siis on juuksekarvade laengu väärtused vahemikus 1 nC – 1 pC.

Kõige väiksemat vabalt eksisteerivat elektrilaengut looduses nimetatakse elementaarlaenguks e .

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

$q = -1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ on elektroni laeng ja $q = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$ on prootoni laeng.

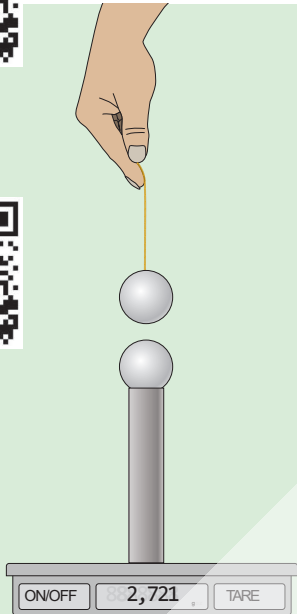
Keemias kasutatakse ionide tähistamisel suhtelisi laenguid, mis näitavad, mitu korda oniooni laeng suurem elementaarlaengust. Näiteks naatriumi kation on Na^+ ja sulfiidi anioon S^{2-} . Kui suhteliste laengute asemel kasutada elektrilaengu väärtusi, on naatriumi katiooni laenguks $q_{\text{Na}^+} = +1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, sest naatriumi aatom on ühe elektroni loovutanud. Sulfiidioonil on laenguks $q_{\text{S}^{2-}} = -3,2 \cdot 10^{-19} \text{ C}$, sest väevli aatom on liitnud kaks elektroni.

ÜLESANDED

1. Elektroskoop. Uuri joonist 1.6 või valmista ise elektroskoop ja vasta küsimustele.
 - a) Selgita, miks fooliumist lehed üksteisest eemalduvad.
 - b) Kas fooliumlehed saavad töötada elektroskoobina ka ilma klaaspurgi ja plastikkaaneta, kui riputame need nailonniidiga statiivi külge? Põhjenda vastust. Kui oled elektroskoobi ise ehitanud, tee katse!
2. Olgu meil kaks teineteisest kaugel asuvat metallist kuuli. Üks on laadimata, teine on laetud negatiivselt. Joonesta, kuidas paiknevad kuulidel elektrilaengud,
 - a) kui kuulid viia teineteisele lähemale, aga mitte kokku;
 - b) kui panna kuulid teineteise vastu.
3. Kui suur laeng kulonites on Ca^{2+} ja Cl^- ioonidel?
4. Kaks laetud metallkera laengutega $3 \mu\text{C}$ ja $-6 \mu\text{C}$ ühendati omavahel metallvarda. Milline laeng jäi mõlemale metallkerale peale metallvarda eraldamist?



1.2. Coulomb'i seadus



Joonis 1.7. Elektrijõudude mõõtmine.

Katse elektrijõudude mõõtmiseks

Joonisel 1.7 on kujutatud tundlikku kaalu, millele on asetatud alus, mis on vähemalt 15 cm kõrge, ja aluse peal seisvat laetud kuuli. Kui laetud kuulile lähendada teine kuul, mis on laetud vastasnimeliselt, siis kaalu näit väheneb. Kaalu esialgset näitu saab muuta mitut moodi. Üks võimalus on anda kehadele rohkem laengut või seda vähendada. Teine võimalus on viia kuuli lähemale kaalul asuvale kuulile või eemaldada kuulid üksteisest. Kolmas võimalus on panna vastastikmõjusse samanimeliselt laetud kuulid. Sellest eksperimentidest saab järeldada, et a) laetud kuulide vahel mõjub elektriline jõud, b) see jõud sõltub nii kehade laengust kui ka nendevahelisest kaugusest ja c) me saame mõjuvat jõudu kaudselt mõõta.

18. sajandil uuris elektrilisi jõudusid Charles-Augustin de Coulomb (1736–1806), kes silmapaistva insenerina konstrueeris oluliselt tundlikuma seadme, kui on kujutatud joonisel 1.7. Coulomb'i mõõtmistulemustest **selgus, et lisaks laengute väärtusele muutub laetud kehade vaheline jõud pöördvõrdeliselt kauguse ruuduga**. Seda nimetataksegi **Coulomb'i seaduseks**.

Coulomb'i seadus matemaatilisel kujul:

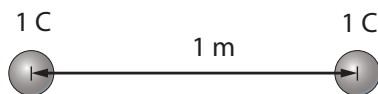
$$F \approx \frac{q_1 q_2}{r^2}.$$

Kui tahame arvutada kahe laetud keha vahel mõjuvat jõudu, saame kasutada valemit:

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

kus k on **Coulomb'i konstant**, mille väärtus on $k = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2}$.

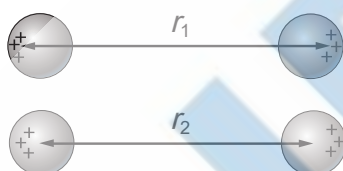
Et paremini mõista Coulomb'i konstandi tähendust, uurime järgmist skeemi (joonis 1.8).



Joonis 1.8. Kaks keha laengutega $+1\text{ C}$ ja kehad on asetatud üksteisest ühe meetri kaugusele.

Skeemil on kujutatud kaks keha laengutega $+1\text{ C}$ ja kehad on asetatud üksteisest ühe meetri kaugusele. Kuna tegu on samanimeliste laengutega, esineb kehade vahel tõukejõud ja selle jõu väärtuseks on $9 \cdot 10^9\text{ N}$. See on väga suur jõud ja nii lähedale üksteisele on ühekulonilisi laenguga kehi võimatu asetada. Seega, ühekuloniline laeng on väga suur laeng.

Eelmises peatükis uurisime elektrilise induktsiooni nähtust ja sellega seoses peame täpsustama, mida kaugus r täpsemalt tähendab. Uurime joonist 1.9.



Joonis 1.9. Laengutevaheline kaugus r_1 on suurem kehadevahelisest kaugusest r_2 .

Elektrilise induktsiooni tõttu nihkuvad laengud ka keha sees. Seega laengutevaheline kaugus r_1 on suurem kehade vahelisest kaugusest r_2 . Seetõttu saame Coulomb'i seadust rakendada vaid siis, kui kehade mõõtmed on võrreldes kehadevahelise kaugusega tühiselt väikesed. Seetõttu kasutatakse elektrostaatikas tihti **punktlangu** mõistet.

Punktlanguks nimetatakse laetud kehi, mille mõõtmed on tühiselt väikesed võrreldes nende vahekaugusega. Teisiti, punktlang on keha, mille elektrilangu võib vaadelda koondununa ühte punkti.

Coulomb'i seadust kirjeldav valem kehtib vaakumis. Kui laetud kehad asuvad keskkonnas, on nendevaheline jõud väiksem. Näiteks vees on laengutevaheline jõud ligikaudu 80 korda nõrgem, kui see oleks vaakumis.

Füüsikas nimetatakse suurust, mis näitab, mitu korda on antud keskkonnas elektrijõud nõrgemad võrreldes vaakumiga, selle keskkonna dielektriliseks läbitavuseks, tähis ϵ (kreeka tähestiku lühike e – epsilon).

Toatemperatuuril on vee dielektriline läbitavus ligikaudu 80. Õhu dielektriline läbitavus erineb vaakumi läbitavusest väga vähe ja seega $\epsilon_{\text{õhk}} = 1$. Tabelist 1.1 on näha, et on materjale, mille dielektriline läbitavus on sadu, isegi tuhandeid kordi suurem vaakumi dielektrilisest läbitavusest.

Tabel 1.1. Mõnede materjalide dielektrilised läbitavused.

Materjal	Dielektriline läbitavus
Vaakum	1,0
Õhk	1,0006
Õli	2,2
Polüetüleen	2,26
Taruvaik	2,8
Kvarts	3,78
Vesi	80
Kaltsiumtitanaat	168
Baariumtitanaat	1250

Elektrilaengute liikumise ja ülekandega seotud olukordade mõtestamisel on vaja silmas pidada ka **elektrilaengu jäävuse seadust**, mis väidab, et **elektriliselt isoleeritud süsteemi kogulaeng on jääv suurus. Laeng võib tekkida ja kaduda vaid paarikaupa (+q ja -q üheskoos).**

1. näidisülesanne

Olgu ühel metallkeral laeng 10 nC ja teisel -4 nC. Metallkerad on ühesuurused ja võrdse massiga. Metallkerad viidi kontakti ja eemaldati siis uuesti teineteisest.

- Kui suure laengu sai kumbki metallkera?
- Kuidas muutus kehade vastastikmõju?

Lahendus

a) Kuna tegu on samasuguste parameetritega metallist seadmetega, toimub kokkupuutel laengu ülekanne, mille tulemusena laengud võrdsustuvad. Looduses keh-tiva laengu jäävuse seaduse järgi on kehade kogulaeng enne ja pärast laengu-ülekannet võrdne. Antud juhul $10 \text{ nC} + (-4 \text{ nC}) = 6 \text{ nC}$ enne ja 6 nC ka pärast kokkupuudet ning seega saavad mõlemad elektroskoobid laengu 3 nC .

b) Kui katse alguses olid elektroskoobid laetud erinimeliselt, siis pärast kokkupuudet on nad laetud samanimeliselt. Seega muutus elektroskoopide-vaheline tõmbe-

jõud tõukejõuks. Vastastikmõju muutus $\frac{40}{9} \approx 4$ korda nõrgemaks. Arvesse

võttes Coulomb'i seadust, võrdleme ainult laengute korrutisi, sest kehadevaheli-sed kaugused on samad ja ei mõjuta tulemust.

2. näidisülesanne

Hinda jõudu kahe äikesepilve vahel, kui ühel pilvel on laeng -10 C ja teisel 20 C . Pilvede keskosad on teineteisest 5 km kaugusel.

Lahendus

Arvutame jõu, kasutades Coulomb'i seadust.

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad F = 9 \cdot 10^9 \text{ Nm}^2\text{C}^{-2} \frac{-10\text{C} \cdot 20\text{C}}{(5 \cdot 10^3\text{m})^2} = \underline{\underline{-7 \cdot 10^4 \text{ N}}}$$

Negatiivne vastus näitab, et tegu on tõmbejõududega positiivsete ja negatiivsete laengute vahel.

Kuna lähteandmed on antud ühe tüvenumbri täpsusega, on ka vastuses ainult üks tüvenumber. Samuti on tegu väga ligikaudsete andmetega, sest saame hinnata vaid pilvede laetud piirkondade ligikaudset vahekaugust, samuti on ka laengud hinnangulised.

Vastuseks saime üsna suure väärtuse $F = 70000\text{ N}$. Küsimus on, mida see jõud teeb pilvedega. Vastuse saamiseks kasutame Newtoni teist seadust $F = ma$ ja leiame kiirenduse a . Selleks peaksime omakorda hindama pilve massi, mis võib ulatuda tuhandete tonnideni.

Kui pilve mass on 10^6 kg , siis kiirendus, mis tekib meie poolt arvatud jõu mõjul, on 10^{-1} ms^{-2} . See on võrreldes pilvede loomuliku liikumisega tühine, järelikult nimetatud elektrijõud pilvede liikumist ei mõjuta. Kindlasti on pilvedevaheline elektriline tõmbejõud veelgi väiksem, sest kõik äikesepilved sisaldavad nii positiivselt kui ka negatiivselt laetud piirkondi ja seetõttu on kogulaeng oluliselt väiksem.

ÜLESANDED

- Hinnake, kui suur jõud mõjub kahe elektriseeritud juuksekarva vahel, kui juuksekarvade laenguteks 10^{-9} C ja kahe karva vaheline kaugus 1 mm . Kas arvatud jõud paneb juuksekarva liikuma?
- Kaks ühesuurust metallkuuli laengutega $12\text{ }\mu\text{C}$ ja $4\text{ }\mu\text{C}$ on teineteisest ühe meetri kaugusel. Metallkuulid ühendati korraks ja eemaldati taas ühe meetri kaugusele.
 - Kas kehadevaheline jõud muutus suuremaks või väiksemaks? Mitu korda?
 - Kuidas muutus jõudude suund?
- Keedusoolakristallis asuvad ioonid üksteisest $0,3\text{ nm}$ kaugusel, vesilahuses aga 10 nm kaugusel.
 - Mitu korda on Na^+ ja Cl^- vahelised jõud soolakristallis suuremad jõududest vesilahuses?
 - Miks kristalliseerub sool lahusest välja, kui suurem osa vett välja aurutada?
- Valmistage kaks alumiiniumfooliumist toru pikkusega 4 cm ja läbimõõduga 1 cm . Riputage need niitude abil statiivide külge ja elektriseerige laetud plastikjoonlauaga ühte või mõlemat torukest. Uurige erinevaid toimeid. Kirjeldage ja põhjendage eksperimendi tulemusi.