

Eesti Füüsika Selts

ELEKTROMAGNETISM  
Füüsika õpik gümnaasiumile

Kalev Tarkpea  
Henn voolaid

1. Elektriväli ja magnetväli .....	4
1.1 Elektromagnetismi uurimisaine .....	4
1.1.1. Sissejuhatus elektromagnetnähtuste füüsikasse .....	4
1.1.2. Elektromagnetismi uurimise ajaloost .....	5
1.1.3. Elektromagnetismi kursuse struktuur .....	6
1.2. Elektrilaeng .....	6
1.2.1. Elektrilaengu mõiste .....	6
1.2.2. Positiivsed ja negatiivsed laengud .....	7
1.2.3. Elementaarlaeng .....	7
1.2.4. Laengu jäävuse seadus .....	8
1.2.5. Elektrit juhtivad ja mittejuhtivad ained .....	9
1.2.6. Elektrivool ja voolutugevus .....	10
1.3. Coulomb'i seadus .....	13
1.3.1. Coulomb'i katsed .....	13
1.3.2. Coulomb'i seadus. Punktlaeng .....	14
1.3.3. Elektrikonstant ja aine dielektriline läbitavus .....	15
1.4. Ampère'i seadus .....	17
1.4.1. Magnetväli. Püsimagnetid .....	17
1.4.2. Voolu magnetväli. Ampère'i seadus. ....	19
1.5. Elektrivälja tugevus ja magnetinduktsioon .....	22
1.5.1. Elektrivälja tugevus .....	22
1.5.2. Magnetinduktsioon .....	23
1.5.3. Punktlaengu väljatugevus ja sirgvoolu magnetinduktsioon .....	25
1.5.4. Elektri- ja magnetvälja omaduste võrdlus .....	26
1.6. Väljade visualiseerimine .....	29
1.6.1. Elektrivälja jõujooned .....	29
1.6.2. Homogeenne elektriväli .....	30
1.6.3. Magnetvälja jõujooned .....	31

1.6.4. Homogeenne magnetväli .....	32
1.7. Elektrivälja potentsiaal ja pinge.....	33
1.7.1. Töö ja potentsiaalne energia elektriväljas.....	33
1.7.2. Elektrivälja potentsiaal.....	36
1.7.3. Ekvipotentsiaalpinnad.....	36
1.7.4. Elektriline pinge ja selle seos väljatugevusega.....	37
2. Elektromagnetväli .....	41
2.1. Ühele osakesele mõjuv magnetjõud.....	41
2.1.1. Elektromagnetilise induktsiooni nähtus.....	41
2.1.2. Lorentzi jõud.....	42
2.2. Pööriselektriväli ja induktsiooni elektromotoorjõud .....	44
2.2.1. Induktsioonivool ja pööriselektriväli .....	44
2.2.2. Magnetväljas liikuva juhtmelõigu otstel tekkiv pinge.....	46
2.2.3. Induktsiooni elektromotoorjõud.....	48
2.3. Faraday katsed .....	49
2.3.1. Püsimagneti liikumine juhtme suhtes .....	50
2.3.2. Vooluga juhtme liikumine teise juhtme suhtes.....	51
2.3.3. Voolu muutumine juhtmes.....	52
2.4. Faraday induktsiooniseadus .....	52
2.4.1. Induktsiooni elektromotoorjõudu mõjutavad suurused .....	52
2.4.2. Magnetvoo mõiste.....	54
2.4.3. Faraday induktsiooniseadus .....	55
2.5. Lenzi reegel. Induktsiooniseaduse rakendused.....	57
2.5.1. Lenzi reegel.....	57
2.5.2. Induktsiooniseaduse rakendusi .....	59
2.6. Induktiivsus ja mahtuvus .....	60
2.6.1. Endainduktsiooni elektromotoorjõud.....	60
2.6.2. Induktiivsuse mõiste .....	62
2.6.3. Elektrimahtuvus. Kondensaatorid.....	63
2.7. Elektromagnetvälja energia .....	68
2.7.1. Elektrivälja energia .....	68
2.7.2. Magnetvälja energia.....	69
3. Elektromagnetlained .....	70
3.1. Elektromagnetvälja levik elektromagnetlainetena.....	70
3.1.1. Elektri- ja magnetväli elektromagnetlaines .....	70

3.1.2. Elektromagnetlainete skaala .....	72
3.1.3. Optika.....	76
3.2. Valguse kirjeldamine .....	79
3.2.2. Valguse värvus ja lainepikkus .....	82
3.2.3. Valguse dualism (1h).....	84
3.3. Elektromagnetlainete omadused .....	88
3.3.1. Elektromagnetlainete difraktsioon ja interferents (1h) .....	88
3.3.2. Difraktsiooni ja interferentsi rakendusi (1h).....	92
3.4. Polariseeritud valgus (1h).....	98
3.4.1. Polariseeritud valgus, selle saamine ja omadused .....	98
3.4.2. Polariseeritud valguse rakendused.....	100
4. Valguse ja aine vastastikmõju.....	103
4.1. Geomeetiline optika.....	103
4.1.1. Valguse peegeldumine ja murdumine (1h).....	103
4.1.2. Valguse murdumisseadus (1h).....	107
4.1.3. Kujutise tekitamine läätse abil (1h) .....	110
4.1.4. Läätsede valem (1h).....	115
4.2. Valguse dispersioon ja selle kasutamine (2h).....	118
4.2.1. Valguse dispersioon.....	118
4.2.2. Spektroskoop ja spektraalanalüüs .....	121
4.3. Valguse teke ja liigid (1h).....	125
4.3.1. Valguse kiirgumine.....	125
4.3.2. Soojuskiirgus ja luminesents .....	127
Vastuseid.....	129

# 1. Elektriväli ja magnetväli

## 1.1 Elektromagnetismi uurimisaine

### 1.1.1. Sissejuhatus elektromagnetnähtuste 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. k. - *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 kivina (kr. k. - *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 lihasjõud. Elektrijõud hoiavad koos lihtaine aatomeid. 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. Elektriijaamades muudetakse elektrienergiaks mingi osa kütuse põlemisel vabanevast soojusest, voolava vee kineetilisest energiast või koguni aatomituumade seoseenergiast. Neid jaamu nimetatakse seetõttu vastavalt soojus-, hüdro- ja tuumaelektriijaamadeks. Päikese- patarei 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 energia liigiks. Elektrienergia on mugavaks vahelülis 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 kujul: *Magnetist, magnetilistest kehadest ja suurest magnetist - Maast*. Gilbertist oli juttu juba põhikooli *Elektriõpetuses*. 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 Ohm'ist ning voolu magnetvälja esmauurijast Hans Christian Örstedist.

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

Selle kursuse sisuks on ka valgusnähtused. Aga teadlastel kulus palju aega, kuni sai selgeks, et ka valgus on elektromagnetnähtus.

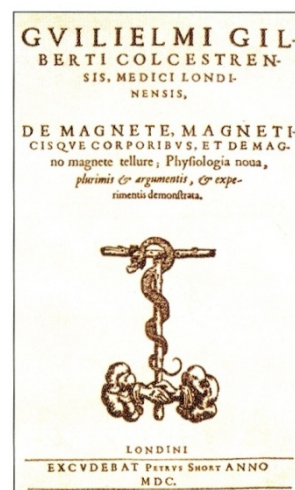
Valgusnähtuste teaduslik käsitlus sai alguse 17. sajandil, kui I. Newton püstitas hüpoteesi valgusest kui silmale nähtamatute osakeste voost, mis levivad ühtlases keskkonnas sirgjooneliselt. Neid osakesi nimetas ta korpuskuliteks, mida võib pidada nüüdisaegsete kvantide eelkäijateks.

Mõned aastad pärast Newtonit püstitas C. Huygens teise hüpoteesi, mille kohaselt valgus levib lainetena. Ta arvas, et valguslaine levimiseks on vajalik mingi eriline keskkond, mis täidab kogu universumi. Seda ainet nimetati eetriks. Tänapäeval on teada, et mingit erilist, valguse levimiseks vajalikku keskkonda ei eksisteeri ja valgus levib ka tühjuses.

Aastal 1802 tegi T. Young katseid, mis näitasid, et kitsast avast läbi minnes kaldub valgus oma esialgsest 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 J. C. 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 järeldas Maxwell, et valgus on elektromagnetlaine.

Nüüdisaegsele valguse kvantteooriale pani aluse 1900.a. M. Planck, kes loobus valguse laineteooriast ja võttis kasutusele valgusosakesed ehk kvandid. Muidu ei



W. Gilberti *De Magnete* tiitel-leht

suutnud ta teoreetiliselt seletada tahkete kehade kiirgusspektreid. Planck pidas kvante vaid teooriat lihtsustavateks abivahenditeks.

A. Einstein näitas 1905.a., et kvandid on realselt olemas, sest 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 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 **staatilisest** ehk ajas muutumatu **elektrivälja** ning **magnetväljaga**. Saame teada, mida on nende kahe välja kirjeldustes ühist ja mida erinevat. Tutvume kummagi välja põhiseadusega (Coulomb'i ja Ampère'i seadused) ning peamiste neid välju iseloomustavate vektorsuurustega, milleks on elektrivälja tugevus  $E$  ja magnetinduktsioon  $B$ . Kursuse teises osas vaatleme elektri- ja magnetvälja muutumist ajas. Elektromagnetilise induktsiooni nähtuse uurimisel selgub meile, et elektrivälja ja magnetvälja 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 nähtusi: 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 tekkemehhanismi: soojuskiirgust ja luminesentsi.

## 1.2. Elektrilaeng

### 1.2.1. Elektrilaengu mõiste

Lihtsaim elektrinähtus, mida me kõik kindlasti kogunud 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 elementaariosakese 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 *Elektriõpetusest* 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 tõukejõud. Seega peab ka laenguid olema kahte liiki. Laengu arvvaartus määrab jõu suuruse, märk aga suuna. Samanimeliselt laetud kehade vahel mõjub tõukejõud, erinimeliste laengute korral 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.

Foto 1 – katse esimene faas

J1.1

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. Järelt neutraliseeris plastmasskehalt torukesele üle tulnud negatiivne laeng täielikult senise positiivse ja oli koguni viimasest arvuliselt suurem, laadides ka torukese negatiivselt. Sellest annab tunnistust plastmasskeha ja torukese vahel mõjuv tõukejõud.

Foto 2 – katse teine faas

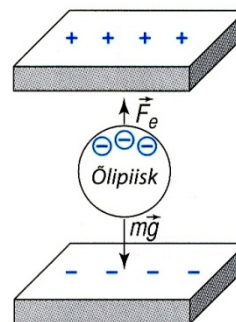
J.1.2

Elektrit mittejuhtiva niidi otsas rippuvat kerget metallfooliumist keha nimetatakse sageli **elektripendliks**. Ka meie toimime edaspidi nii.

### 1.2.3. Elementaarlaeng

*Füüsikalise looduskäsitluse aluste (FLA)* 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 tillukesi laetud õlipiisku, millele mõjus vertikaalselt üles suunatud elektrijõud. Kui see jõud tasakaalustas piisa raskusjõu, jäi piisk mikroskoobi vaateväljas seisma (J. 1.3.).



J. 1.3. Millikani katse skeem.

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 prooton kui 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 aatomituumade 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 määravad 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

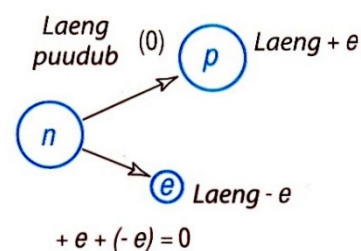


süsteemi **elektriliselt isoleerituks**. Tegemist on tüüpilise **suletud süsteemiga**. Selle mõistega tutvusime juba *Füüsikalise looduskäsitluse aluste* kursuses.

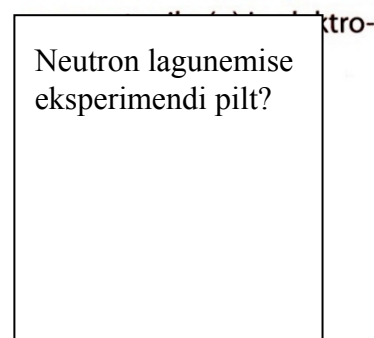
Laengu jäävuse seadust pole kuigi lihtne rangelt tõestada. Vastavas katses peaks ju mõõtemääramatus olema väiksem elementaarlaengust. Kuid paljud erinevad elektri-nähtused on seletatavad vaid lähtudes laengu jäävusest. Seetõttu usuti laengu jäävuse seaduse kehtivusse juba ammu enne elektronide ja prootonite avastamist.

Selgeid viiteid laengu jäävuse seadusele leiame keemiast. Tervikuna neutraalne keedusoola (NaCl) kristall dissotsieerub lahustumisel vees positiivseteks naatriumi ja negatiivseteks kloori ionideks ( $\text{Na}^+$  ja  $\text{Cl}^-$ ), 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.1.5). Neutron ongi siin see elektriliselt isoleeritud süsteem, millest oli juttu eespool.



**J.1.5.** Neutroni ( $n$ ) lagunemi-



Laengu jäävus väljendab maailma üldist keskmist elektrilist neutraalsust. Kujutlegem hetkeks, mis juhtuks, kui kõigis kehades 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 niisutamise teel. 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 märgi esemeid ja metallkehi, sest tasakaalustamata laeng lahkub neilt. Laengut omavad 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 metalle. Kummi elektrit ei juhi ning laeng püsib esemel.

Põhikooli *Elektriõpetusest* teame, et metall või kraanivesi sisaldavad arvukalt liikumisvõimelisi laetud osakesi ehk **vabu laengukandjaid**. Sõnaga *vaba* tähistame seejuures laetud osakese võimet liikuda elektrijõudude toimele kogu vaadeldava keha

või ainekoguse piires. Nagu kõik aineosakesed, nii osalevad ka laengukandjad kaootilises soojusliikumises. Kui aga neile mõjub kindla suunaga elektrijõud, hakkavad nad täiendavalt liikuma ka selle jõu mõjul.

Vabade laengukandjate sisalduse järgi jagunevad ained kolme rühma: juhid, dielektrikud (ehk mittejuhid) 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 heaks näiteks elektriliselt neutraalsest süsteemist. Elektrijõud ei suuda laetud osakesi sellest süsteemist välja rebida. Tahke dielektrik võib küll koosneda erimärgiliselt laetud ioonidest, aga elektrijõud ei suuda neid liikuma panna.

**Pooljuhid** on saanud oma 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, pealangevast valgusest, lisandite sisaldusest põhiaines jne. Pooljuhi elektrijuhtivus on nende tingimuste muutmise teel reguleeritav. See pooljuhtide väärtuslik omadus leiab laialdast kasutamist kaasaegses 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. Kuid ainet loetakse 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.

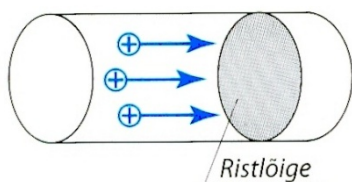
Veel tuleb märkida, et sõna *juht* kasutatakse nii elektrit juhtiva aine kui ka sellest ainest valmistatud keha tähistamiseks.

### 1.2.6. Elektrivool ja voolutugevus

Laengukandjate suunatud liikumist nimetatakse **elektrivooluks**.

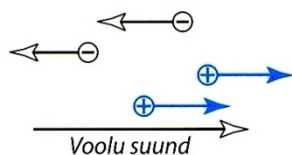
Voolu tekkimiseks on seega vajalik nii vabade laengukandjate olemasolu kui ka nende liikumist põhjustav jõud. Elektrivoolu iseloomustavaks suuruseks on voolutugevus  $I$ . **Voolutugevus** näitab, kui suur laeng läbib ajaühikus juhi ristlõiget

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



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

liiguvad seega voolu kokkuleppelisele suunale vastupidises suunas (J.1.7).



**J. 1.7.** Elektrivoolu kokkuleppelise suuna määramine.

On oluline mõista, et pole üldse tähtis, kumma märgiga laengukandjad realselt aines liiguvad. Nii positiivsete laengukandjate liikumine paremale kui negatiivsete liikumine vasakule joonisel 1.7 viib ühe ja sama lõpptulemuseni. 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 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. Praktilistes 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 ( $1 \mu\text{C} = 10^{-6} \text{ C}$ ).

Allpool on toodud mõned iseloomulikud voolutugevused:

**Tabel 1.1.**

Elektrinähtus või elektriseade	Voolutugevus
Biovoolud elusorganismides	alla $10^{-6} \text{ A}$
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

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  $200 \text{ A}$ .

Antud:

$$q = 50 \text{ A} \cdot \text{h} = 50 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} = 1,8 \cdot 10^5 \text{ C} \quad \text{valem 1.1: } I = \frac{q}{t} \rightarrow t = \frac{q}{I}$$

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

\_\_\_\_\_

$t = ?$

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

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 elektri-alast 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?

**STOP**

1. Laeng on füüsikaline suurus, mis näitab, kui tugevasti keha osaleb elektromagnetilises vastastikmõjus.
2. Looduses leidub kahte liiki laenguid, mida nimetatakse positiivseteks ja negatiivseteks (+ ja -). Samamärgiliselt laetud kehade vahel mõjub tõukejõud, erimärgiliselt 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. Coulomb'i seadus

### 1.3.1. Coulomb'i 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.

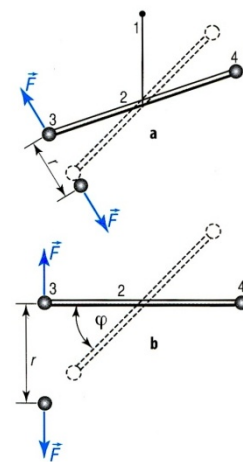
Coulomb'i poolt kasutatud väändkaalu korral (J. 2.1) rippus traadi (1) küljes horisontaalne mittejuhtiv varras (2), mille ühes otsas paiknes uuritav metallkuulike (3), teises otsas aga kuulikest tasakaalustav raskus (4). Vardaga ristuva jõu rakendumisel kuulikesele pöördus varras seni, kuni traadi väände elastsusjõud tasakaalustas kuulikesele mõjuva jõu. Coulomb tegi kindlaks, et nurk  $\varphi$ , mille võrra varras joonisel punktiiriga kujutatud tasakaaluasendist välja pöördus, oli võrdeline jõuga. See võimaldas pöördnurga kaudu jõudu mõõta. Oma katsete korraldamisel lähtus Coulomb eeldusest, et varda küljes paikneva, algselt neutraalse kuulikesega (3, J.2.1) puudutamisel teise täpselt samasuguse, kuid laetud kuulikesega (5 lisada number joonisele!) jaotub laeng kahe kuulikesega 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 esialgsuga võrreldes kolmekordseks ja veendus selles, et jõud oli üheksa korda esialgselt 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, ehk 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 suuruselt, juhtis Coulomb ühelt vaadeldavalt kuulikeselt laengu ära ning viis kuulikesed uuesti kokkupuutesse. Kui esialgu oli mõlemal kuulikesel laeng  $q$ , siis



J. 2.1. Coulomb'i väändkaalu põhimõtteskeem:  
a) vaade poolküljelt,  
b) vaade ülalt.

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 järeldas, 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 võrdlemise 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 tulemusena puutumata jäänud torukese laeng  $q$  jaotub võrdselt mõlemale torukesele. Kumbki toruke on omandanud laengu  $q/2$ .

Foto katses

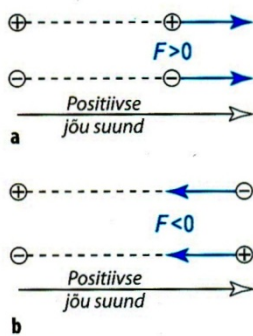
### 1.3.2. Coulomb'i seadus. Punktlaeng

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

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

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 arväärtuse ees paikneva märgiga (+ või -). See omakorda on leitav laengute märkide

põhjal. Niisiis tähistab  $F_e$  valemis 1.3 ja ka edaspidi jõuvektori pikkust, mis võib olla nii positiivne kui ka negatiivne.

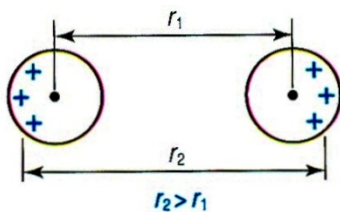


**J. 2.2.** Kahe laetud keha vahel mõjuva jõu märgi määramine:  
 a) samamärgilised laengud – jõud positiivne,  
 b) erimärgilised laengud – jõud negatiivne.

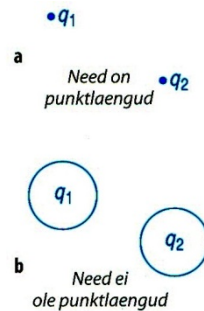
Me vaatleme ühele laetud kehale mõjuvat jõudu positiivsena, kui see on suunatud teisest kehast eemale. Negatiivseks loeme jõudu aga siis, kui see on suunatud teise keha poole. Samanimeliste laengute korrutis on valemis 1.3 alati positiivne. Seega mõjub samanimeliselt laetud kehade vahel positiivne jõud ehk tõukejõud. Erinimeliste laengute korrutis on negatiivne ning kehade vahel mõjub negatiivne jõud ehk tõmbejõud (J.2.2). Sellise kokkuleppega vabaneme vajadusest kasutada jõudu sisaldavates valemites vektorkuju.

Kõigi Coulomb'i katsete kirjeldustes nimetasime vahekauguseks kuulikeste tsentrite vahelist kaugust. Kui kuulikeste 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 tõukumise tõttu asetuvad samamärgilist laengut kandvad osakesed kummagi kuulikese sellesse ossa, mis jääb teisest kuulikesest võimalikult kaugemale (J. 2.3). Selle tagajärjel on laengutevaheline kaugus kuulikeste tsentrite vahekaugusest suurem.

sele lähedane, siis tuleb vahekauguse mõistet täpsustada. Omavahelise tõukumise tõttu asetuvad samamärgilist laengut kandvad osakesed kummagi kuulikese sellesse ossa, mis jääb teisest kuulikesest võimalikult kaugemale (J. 2.3). Selle tagajärjel on laengutevaheline kaugus kuulikeste tsentrite vahekaugusest suurem.



**J. 2.3.** Kehade tsentrite vahekauguse  $r_1$  ja laengute vahekauguse  $r_2$  erinevus.



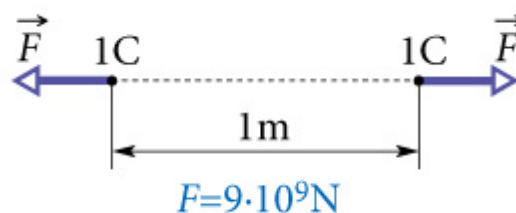
**J. 2.4.** Punktlaengu mõiste selgitus.

Kuulikeste vahel mõjuv jõud on aga Coulomb'i seaduse põhjal väiksem sellest jõust, millega mõjutaksid teineteist kuulikeste tsentrites paiknevad laengud. Sõna *laeng* tähendab siin mõistagi laetud osakeste kogumit. Coulomb'i seadus on lühidalt ja täpselt sõnastatav vaid niisuguste laetud kehade jaoks, mille mõõtmed on tühised võrreldes kehade vahekaugusega. Selliseid laetud kehi nimetatakse **punktlaenguteks** (J. 2.4). Punktlaeng mängib elektriõpetuses sama rolli, mis punktmass *Mehaanika* kursuses. Mistahes keha võib käsitleda punktlaenguna juhul, kui laengu jaotumise keha osade vahel tohib antud ülesandes arvestamata jätta. Keha laengut vaadeldakse siis koondununa ühte punkti. Mingi keha võib ühes ülesandes esineda punktlaenguna, teises aga mitte. Näiteks on laetud veepiisake äikesepilve ja Maa vahel vaadeldav punktlaenguna. Piisa pinna lähedal asuva üksiku iooni jaoks aga laetud veepiisk kindlasti punktlaeng ei ole.

### 1.3.3. Elektri konstant ja aine dielektriline läbitavus

Avaldades valemist 1.3 võrdeteguri  $k$ , saame

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



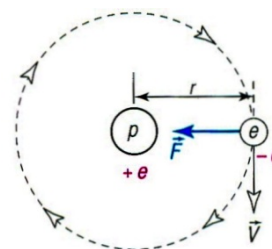
Tegur  $k$  võrdub arvuliselt jõuga, mis mõjub vaakumis kahe teineteisest 1 m kaugusel paikneva punktlaengu 1 C vahel (J. 2.5) See jõud on  $9 \cdot 10^9 \text{ N}$  ehk niisuguse keha raskusjõud, mille mass on peaaegu miljon tonni. Nii koletule jõule ei suuda vastu panna ükski terastross ega mingi muu ühenduslüli. On ju raske rongi mass “ainult” mõni tuhat tonni ja suure laeva mass ulatub mõnekümne tuhande tonnini. Järelikult on üks kulon väga suur laeng.

Võrdetegur  $k$  Coulomb’i seaduses on seega vaakumi korral esitatav kujul

$$k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}$$

### Näide 1.2.

Leiame Coulomb’i seaduse kohaselt elektrijõu  $F_e$ , millega ringjoonelisel orbiidil liikuv elektron ja ringjoone tsentris paiknev prooton mõjutavad teineteist vesiniku aatomi planetaarses mudelis (J.2.6). Osakeste vahekauguseks loeme vesiniku aatomi raadiuse, mis Bohri mudeli kohaselt on  $5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$ .



J. 2.6. Vesiniku aatomi skeem: p – prooton, e – elektron.

Antud:

$$r = 5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m}$$

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

$$q_1 = e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C}; \quad q_2 = -e; \quad k = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2}; \quad F_e = -k \frac{e^2}{r^2}$$

$F_e = ?$  (miinusmärk näitab, et tegemist on tõmbejõuga)

$$F_e = -9 \cdot 10^9 \frac{\text{N} \cdot \text{m}^2}{\text{C}^2} \frac{(1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C})^2}{(5,3 \cdot 10^{-11} \text{ m})^2} \approx -8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}.$$

Vastus. Elektroni ja prootoni vahel mõjub elektriline tõmbejõud  $8,2 \cdot 10^{-8} \text{ N}$ .

Nende osakeste vahel mõjuv gravitatsioonijõud on samas vaid  $3,7 \cdot 10^{-47} \text{ N}$ . Seega on elektrijõud vesiniku aatomis gravitatsioonijõust suurem üle  $2 \cdot 10^{39}$  korra.

### Küsimusi ja ülesandeid

1. Mille poolest sarnanevad ja milles erinevad gravitatsioonijõud ja elektrijõud?



2. Kui suur laeng peaks olema Maal ja Kuul, et elektrijõud suudaks hoida Kuud tiirlemas samal kaugusel Maast, millel teda tegelikult hoiab gravitatsioonijõud? Kuu mass on ligikaudu  $7,3 \cdot 10^{22}$  kg, Maa mass aga  $6,0 \cdot 10^{24}$  kg. Gravitatsioonikonstandi väärtus on  $6,67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2$ .
3. Tehke joonis, mis selgitaks elektripendlitega teostatud katsed 1.2.
4. Kaks fooliumtorukest, kumbki massiga 0,1 grammi, riputati 1 m pikkuste niitide otsa, mis olid kinnitatud ühes ja samas punktis (katse 1.2). Ühesuuruse laengu andmisel torukestele eemaldusid nad 6 cm kaugusele teineteisest. Kui suure laengu sai kumbki toruke?
5. Coulomb'i lähenemisviisi jäljendades juhtis katsetaja ühelt eelmises ülesandes vaadeldud fooliumtorukeselt laengu ära oma kehasse. Selle peale pörkusid torukesed korraks kokku, teisele torukele alles jäänud laeng jaotus mõlema torukese vahel võrdselt ja torukesed eemaldusid uuesti teineteisest. Milline oli torukeste uus tasakaaluline vahekaugus?
6. Täpsete kaalude olemasolu korral määrake kasutatavate fooliumtorukeste massid ja teostage ülesannetes 4 ja 5 käsitletud katsed iseseisvalt, püüdes joonlauaga ära mõõta torukeste vahekaugused (mõistagi neid seejuures puudutamata). Katsetulemuste kooskõla arvutustega tõestab Coulomb'i seaduse kehtivust.

## STOP

1. Punktlaenguteks nimetatakse laetud kehi, mille mõõtmed on tühiselt väikesed võrreldes nende vahekaugusega.
2. Kaks punktlaengut mõjutavad teineteist jõuga, mis on võrdeline nende laengute korrutisega ja pöördvõrdeline laengutevahelise kauguse ruuduga (Coulomb'i seadus). Jõud on suunatud piki laenguid ühendavat sirget ja sõltub ainest, milles laengud asuvad.

## 1.4. Ampère'i seadus

### 1.4.1. Magnetväli. Püsimagnetid.

Juba 9. klassi *Elektriõpetuses* oli juttu sellest, et vooluga juhet ümbritseb magnetväli. Elektrivool on aga laengukandjate suunatud liikumine. Seega tekib laengukandjate liikumise tulemusena magnetväli.

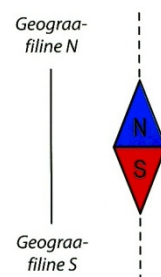
**Magnetväljaks** nimetatakse laetud osakeste liikumisel tekkivat jõuvälja. Paigalseisev laeng (laetud keha) kutsub esile elektrivälja, liikuv laeng (elektrivool) aga täiendavalt ka magnetvälja. Seega on magnetvälja olemasolu mingi vaatleja jaoks niisama suhteline kui liikumine ise.

Samas pole magnetnähtuste tekkimiseks sugugi alati vaja elektrivoolu. Esmase kogemuse magnetismiga on igaüks meist saanud mitte voolu vaid just püsimagneti magnetvälja kaudu.

**Püsimagnet** on olemuslikult magnetvälja omav keha. Selle magnetvälja tekitavad osakesed, millest püsimagnet koosneb. Nii elektron, prooton kui ka neutron tekitavad juba üksnes oma olemasoluga magnetvälja. Seejuures määrab püsimagneti omadused eelkõige elektronide olemuslik magnetväli.

Aineosakese omamagnetväli on seotud osakese sisemise liikumise ehk spinniga. Nimetus tuleneb spinni tõlgendamisest aineosakese pöörlemisena ümber oma telje (ingl.k. *to spin* - pöörlema). Seda pöörlemist ei saa peatada. Võib vaid muuta pöörlemistelje asendit ruumis. Spinniga kaasneb alati kindel magnetväli, mis on suunatud piki pöörlemistelge. Spinn on osakest sama kindlalt iseloomustav suurus nagu laeng või mass. Seetõttu käsitletakse spinni omalaadse "pöörlemislaenguna". Spinnil puudub lihtne klassikaline mudel, mis kirjeldaks kõiki katsetulemusi. Seetõttu oleme sunnitud leppima üpris ebakonkreetse määratlusega „sisemine liikumine“.

Püsimagneti juures võib tinglikult eristada kahte piirkonda, mille mõttelisi keskmeid nimetatakse põhjapooluseks ja lõunapooluseks (tähisted vastavalt N ja S). Tähistusviis tuleneb väikese pöördumisvõimelise püsimagneti ehk **magnetnõela** käitumisest Maa magnetväljas. Nimelt on magnetnõelal kalduvus orienteeruda ehk asetuda ligikaudu piki geograafilist põhja-lõuna suunda (J.4.3).



J. 4.3. Magnetnõela orienteerumine Maa magnetväljas.

Orienteerunud magnetnõela seda otsa, mis näitab geograafilist põhjasuunda, on hakatud nimetama magnetnõela või püsimagneti **põhjapooluseks** ja magnetnõela geograafiliselt lõunapoolset otsa **lõunapooluseks**.

Magnetnõela kindlaviisiline asetumine magnetväljas määrab magnetvälja kirjeldava vektoriaalse suuruse ehk  $B$ -vektori suuna.  $B$ -vektorist tuleb lähemalt juttu punktis 1.5.2.

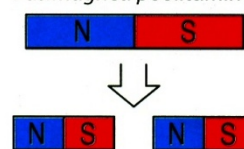
Juba 13. sajandil tehti kindlaks, et ühe püsimagneti põhjapoolus ja teise lõunapoolus tõmbuvad, sama liiki poolused aga tõukuvad. See tulemus oli pöördelise tähtsusega, kuna tavakogemuse kohaselt püsimagnet vaid tõmbab raudesemeid enda poole.

Raudesemete tõmbumist püsimagneti mistahes pooluse suunas põhjustab rauatüki ajutine muutumine magnetiks. Seejuures tekitab püsimagneti üks poolus just rauatüki endapoolses küljes vastupidise magnetpooluse ja kutsub niimoodi esile tõmbejõu.

Nähtust, mille korral magnetvälja paigutamise tulemusena hakkab aine ka ise tekitama magnetvälja, nimetatakse aine **magneetumiseks**.

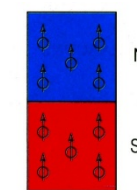
Magnetpooluste uurimisel avastati veel, et püsimagneti poolitamise tulemuseks ei ole mitte kaks lahutatud magnetpoolust vaid kaks uut püsimagnetit, millel on kummalgi oma põhjapoolus ja oma lõunapoolus (J. 4.5). See näitab selgesti pooluste tinglikkust. Järelikult on sarnasus kahe märgiga elektrilaengute ja kahte liiki magnetpooluste vahel vaid näiline. Erimärgilisi elektrilaenguid on ju võimalik ruumis lahku viia, magnetpoolustega seda aga teha ei saa.

Püsimagneti poolitamine



J. 4.5. Püsimagneti poolitamine: tulemuseks on kaks uut püsimagnetit.

Arvestades, et püsimagneti väli on põhjustatud osakeste omamagnetväljadest, on niisugune tulemus aga kergesti mõistetav. Koosnevad ju kõik püsimagneti piirkonnad ühtedest ja samadest osakestest. Järelikult ei saagi püsimagneti osade vahel põhimõttelist erinevust olla. Magnetpooluste eristamisega kirjeldatakse vaid püsimagneti poolt tekitatava magnetvälja suunda (J. 4.6).

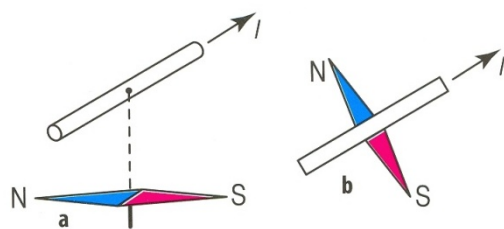


↑ Osake ja tema magnetvälja suund

J. 4.6. Osakeste ühesuunalised omamagnetväljad püsimagnetis.

Pärast seda, kui Coulomb oli 1785. aastal avastanud elektrijõu pöördvõrdelise sõltuvuse laetud kehade vahekauguse ruudust, asus ta korraldama samalaadseid katseid püsimagnetitega. Coulomb jõudis järeldusele, et ka magnetpooluste vahel mõjuv jõud on pöördvõrdeline poolustevahelise kauguse ruuduga. Niisiis on jõu sõltuvus vastastikmõjus olevate kehade vahelisest kaugusest ühesugune nii elektrijõu kui magnetjõu korral.

### 1.4.2. Voolu magnetväli. Ampère'i seadus.



J.4.7 Oersted'i katse: a) vaade poolkülgelt, b) vaade ülalt

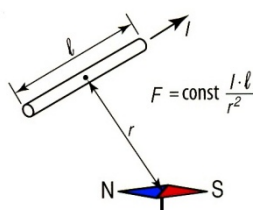
Elektrivoolu magnetvälja uurimise alguseks võib lugeda aastat 1820, mil oma töö põhitulemuse avaldas taani füüsik Hans Christian Oersted [örsted]. Nimelt avastas Oersted, et juhet läbiv elektrivool avaldab magnetnõelale orienteerivat mõju. Magnetnõel pöörduv juhtmega ristuvasse asendisse.

Orienteerunud magnetnõel ei ole aga risti mitte ainult juhtme endaga, vaid ka

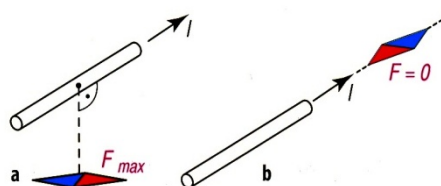
tasandiga, mille määravad juhe ning magnetnõela keskmise kinnituspunkt (J. 4.7).

See oli tõeliselt üllatav tulemus. Kõik 19. sajandi alguseks tuntud jõud olid ju suunatud piki teineteist mõjutavate kehade keskmiseid ühendavat sirget. Seetõttu arvati, et vooluga juhe võiks magnetnõela ühte poolust tõmmata ja teist tõugata. Nagu näeme, on magnetnõelale mõjuvad jõud hoopis risti juhet ja magnetnõela ühendava sirglõiguga.

Oersted'i katse vallandas elektrivoolu magnetvälja uurimisel tõelise laiviini. Juba samal 1820. aastal avastasid prantslased Jean-Baptiste Biot [bioo] ja Felix Savart [savaar], et vooluga juhtme mingi lõigu poolt magnetnõela mingile kindlale poolusele mõjuv ja magnetnõela pöörav jõud on võrdeline vaadeldava juhtmelõigu pikkusega ning voolutugevusega juhtmes (J.4.8).



J. 4.8. Biot' ja Savart'i katse skeem.



J. 4.9. Juhtmelõigu poolt magnetnõelale mõjuva jõu sõltuvus nõela asukohast: a) magnetnõel paikneb juhtmelõigu keskristsirgel, b) magnetnõel paikneb juhtmelõigu pikendusel.

Samas osutus see jõud pöördvõrdeliseks juhtmelõigu ning magnetnõela vahelise kauguse ruuduga, nii nagu Coulomb'i seaduse kohaselt kahe punktlaengu vahel mõjuv jõud. Biot ja Savart leidsid ka, et magnetjõud on tugevaim juhul, kui magnetnõel paikneb vaadeldava juhtmelõigu keskristsirgel. Kui aga magnetnõel asetseb juhtmelõigu pikendusel (juhtmega samal sirgel), siis muutub nõelale mõjuv jõud nulliks (J. 4.9). Biot ja Savart mõõtsid magnetjõudu, lastes magnetnõelal võnkuda oma tasakaaluasendi ümber. Mida kiirem (suurema sagedusega) see võnkumine on, seda tugevam on tasakaaluasendi poole suunatud magnetjõud. Täpsemalt öeldes on magnetjõud võrdeline magnetnõela võnkesageduse ruuduga.

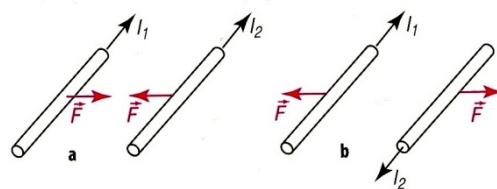
Lähtudes teadmisest, et elektrivool on suuteline mõjutama püsिमagnetit, on loomulik küsida, kas ka kaks vooluga juhett teineteist magnetjõuga mõjutavad. Veel samal 1820. aastal näitas André Marie Ampère, et see on tõesti nii. Ampère tuli esimesena mõttele, et magnetvälja tekitab laengukandjate liikumine. Enne teda püüti voolu magnetvälja taandada püsिमagnetit väljale. Nimelt arvati, et voolu tekitamine juhtmes muudab juhtme mingil viisil püsिमagnetiks. Ampère aga esitas julgelt vastupidise hüpoteesi: just püsिमagnetit väli on põhjustatud tema sees kulgevatest ringvooludest. Hiljem selgus, et Ampère'il oli selles ka üks jagu õigus. Mõnede ainete magnetilised omadused on tõesti määratud neis moodustunud vooluringide magnetväljaga.

Ampère uuris kõigepealt kahe juhtme vastastikmõju juhtmete muutumatu pikkuse ja vahekauguse korral ning avastas järgmised seaduspärasused:

1. Kui kaks juhtmelõiku paiknevad erinevates tasandites, kuid risti nende keskpunkte ühendava lõiguga, kusjuures paiknemistasandi määravad kummagi juhtme jaoks juhe ise ja ühenduslõik – siis juhtmelõikude vahel mõjuv jõud sõltub nurgast nende vahel.

Paralleelsete juhtmete korral on jõud maksimaalne. Ristuvate juhtmete keskmete vahel jõudu ei mõju.

2. Kui paralleelsetes juhtmetes kulgevad samasuunalised voolud, siis mõjub juhtmete vahel tõmbejõud. Vastassuunaliste voolude korral mõjub tõukejõud (J. 4.11).



J. 4.11. Paralleelsete juhtmelõikude vahel mõjuvad jõud: samasuunaliste (a) ja vastassuunaliste (b) voolude korral.

3. Jõud on alati risti juhtmelõiguga, millele ta mõjub.

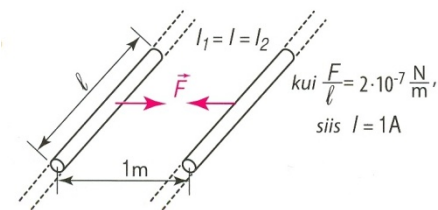
Seega on voolude vastastikmõju mingis mõttes vastupidine laengute vastastikmõjule. Teatavasti mõjub samanimeliste laengute vahel tõukejõud, samasuunaliste voolude vahel aga tõmbejõud. Vastandmargilised laengud tõmbuvad teineteise poole, vastandlike suundadega voolud aga tõukuvad teineteisest eemale. Järgnevalt asus Ampère välja selgitama paralleelsete sirgjuhtmete vastastikmõju sõltuvust nende pikkusest ja vahekaugusest. Ta tegi kindlaks, et juhtmete vahel mõjuv magnetjõud  $F_m$  on võrdeline voolutugevustega  $I_1$  ja  $I_2$  kummaski juhtmes ning vaadeldava juhtmeosa pikkusega  $l$ . Samas osutus see jõud pöördvõrdeliseks juhtmete vahekaugusega  $r$ . Katsete tulemused võis Ampère kokku võtta valemisse

$$F_m = K \frac{I_1 I_2 l}{r}, \quad (1.7)$$

milles sisalduv konstant  $K$  üldjuhul sõltub ainest, kus juhtmed asuvad.

Ampère'i seaduse (valem 1.7) kaudu on määratud voolutugevuse ühik amper (1 A).

Kui kahe paralleelse, lõpmata pika ja lõpmata peenikese sirgjuhtme vahel, mille vahekaugus on üks meeter ja milles voolab ühesuguse tugevusega vool, mõjub vaakumis juhtmete pikkuse iga meetri kohta jõud  $2 \cdot 10^{-7}$  njuutonit, siis on voolutugevus juhtmetes üks amper (J. 4.13). Valemis 4.1 sisalduva konstandi  $K$  väärtus on vaakumi korral seega  $2 \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ .



J. 4.13. Voolutugevuse mõõtühikut 1 A määrav katse.

Lõpmata pikki ja peenikesi juhtmeid tegelikkuses mõistagi olemas ei ole. Seetõttu loetakse ampri etalonkatse teostatuks seda paremini, mida suurem on juhtmete vahekaugus võrreldes nende läbimõõduga ning mida pikemad on omakorda juhtmed võrreldes nende vahekaugusega. Amper on SI elektriliseks põhiühikuks. Selle kaudu tuletatakse kõigi teiste elektriliste suuruste mõõtühikud. Samas on ampri definitsioon niivõrd pikk, et lõppu välja jõudes kipub algus juba meelest minema. Seepärast ei tasuks teda mitte luuletuse kombel pähe õppida, vaid püüda silme ees hoida joonist 4.13.

### Näide 1.3.

Leiame magnetjõu, millega mõjutavad teineteist elektrilise õhuliini kaks juhet, kui kummaski on parajasti vool tugevusega 100 A, juhtmete vaheline kaugus on 1 m ja elektripostide vahekaugus on 200 m. Sõnaga *parajasti* rõhutame seejuures asjaolu, et elektriliini juhtmetes voolab tavaliselt vahelduvvool, mille tugevus ajas perioodiliselt muutub. Meie aga vaatleme voole ja seega ka jõudu mingil kindlal ajahetkel.

Antud:

$$I_1 = I_2 = 100 \text{ A}$$

$$r = 1 \text{ m}$$

$$l = 200 \text{ m}$$

$$\text{valem 1.7: } F_m = K \frac{I_1 I_2 l}{r}$$

$$F_m = ? \quad F_m = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \cdot \frac{(100 \text{ A})^2 \cdot 200 \text{ m}}{1 \text{ m}} = 0,4 \text{ N}$$

Vastus. Elektri juhtmete vahel mõjuv magnetjõud on 0,4 N ühe postivahe kohta.

Nagu näeme, võib magnetjõu elektriliinis tavaliselt arvestamata jätta, sest ta on väga nõrk. 0,4 N on kõigest sellise keha raskusjõud, mille mass on ligikaudu 40 grammi. Juhtmete endi mass on aga mitusada kilogrammi.

### Küsimusi ja ülesandeid

1. Milline põhimõtteline erinevus on elektrostaatilistel ja magnetilistel jõududel?
2. Kuidas muudab magnetjõud peenest ja venivast traadist valmistatud juhtmeringi mõõtmeid? Juhtme soojuspaisumist mitte arvestada.
3. Vooluallika klemmide külge ühendatud elastne juhe on pandud ümber vooluallikast kaugel paikneva posti ning vooluallika postist eemaldamise teel sirgu tõmmatud. Mitu korda muutub selle juhtme kahe osa vahel mõjuv jõud voolutugevuse kahekordsel suurendamisel?

### STOP

1. Magnetväljaks nimetatakse laetud osakeste liikumisel tekkivat jõuvälja.
2. Püsimagnet on olemuslikult (ka elektrivoolu puudumisel) magnetvälja omav keha.

3. Püsimagneti juures eristatakse tinglikult kahte piirkonda, mille mõttelisi keskmeid nimetatakse põhjapooluseks ja lõunapooluseks. Erinimeliste magnetpooluste vahel mõjub tõmbejõud, samanimeliste pooluste vahel aga tõukejõud.
4. Vooluga juhtme magnetväljas pöördub magnetnõel juhtmega risti (Oersted katse).
5. Kui paralleelsetes juhtmetes kulgevad samasuunalised voolud, siis mõjub juhtmete vahel tõmbejõud. Vastassuunaliste voolude korral mõjub tõukejõud.
6. Kahe paralleelse sirgjuhtme vahel mõjuv jõud on võrdeline juhtmete pikkusega ning voolutugevustega juhtmetes. See jõud on ka pöördvõrdeline juhtmete vahelise kaugusega. Võrdeteguri väärtus on vaakumi korral  $2 \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$ .

## 1.5. Elektrivälja tugevus ja magnetinduktsioon

### 1.5.1. Elektrivälja tugevus

Aine ja tema olekute kirjeldamiseks kasutatakse mitmesuguseid füüsikalisi suursi, millest mõned on meile ka juba põhikoolist tuttavad. Välja võib samuti kirjeldada mingi suuruse abil. Kuna välja olemasolu tuleb esile jõe kaudu, siis on mõistlik elektri- ja magnetvälja iseloomustada jõuga, mis mõjub selles väljas mingile kindlale kehale.

Jõud  $F_{12}$ , millega ühe punktlaengu  $q_1$  poolt tekitatav elektrivälja mõjutab teist punktlaengut  $q_2$  sõltub Coulomb'i seaduse (valemi 1.3)

$$F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

kohaselt mõlema laengu suurusest. Seega ei sobi jõud kirjeldama elektrivälja, mida tekitab esimene punktlaeng  $q_1$ . Elektrivälja iseloomustava suuruse väärtused ei tohi ju sõltuda vahendist (proovikehast laenguga  $q_2$ ), mida me kasutame välja olemasolu tuvastamiseks. Kui me jagame proovikehale mõjuva jõu  $F_{12}$  selle keha laenguga  $q_2$ , siis saame suuruse, mis tõepoolest ei sõltu enam laengust  $q_2$ . See ongi esimese keha poolt tekitatava elektrivälja tugevus  $E_1$

$$E_1 = \frac{F_{12}}{q_2}. \quad (1.10)$$

**Elektrivälja tugevus** näitab, kui suur jõud mõjub selles väljas ühikulise positiivse laenguga kehale. Väljatugevus on vektoriaalne (suunda omav) suurus. Seetõttu võib väljatugevust lühidalt nimetada ka **E-vektoriks**. Edaspidi teeme nii eelkõige siis, kui soovime rõhutada väljatugevuse vektoriaalsust. Kui aga jutt on E-vektori pikkusest (moodulist), siis ütleme lihtsalt: **väljatugevus E**. Topeltindeksiga jõu tähises  $F_{12}$  rõhutame, et tegemist on jõuga, mis mõjub esimese keha poolt teisele kehale.

E-vektori kokkuleppelise **suuna** määrab elektrivälja tugevuse definitsioonis sisalduv sõna *positiivne*. Kuna kahe positiivselt laetud keha vahel mõjub tõukejõud, siis on positiivse laenguga keha poolt tekitatud elektrivälja tugevus vektorina suunatud sellest kehast eemale. Me võiksime valemis 1.10 kasutada vektorimärke, sest proovikeha laengu  $q_2$  positiivsuse tõttu on jõud  $F_{12}$  ja väljatugevus  $E_1$  vektoritena samasuunalised. Negatiivse laenguga keha mõjutab positiivset proovilaengut  $q_2$  tõmbejõuga, mistõttu vastav elektrivälja tugevus on vektorina suunatud negatiivse laenguga keha poole.

Üldiselt tuleb vektoriaalsete suuruste tähiseid käesoleva õpiku valemities siiski mõista kui vastavate vektorite pikkusi. Pikkuse negatiivsus tähendab aga seda, et vektor on suunatud vastupidiselt kokkuleppelisele positiivsele suunale. Näiteks on jõud  $F_{12}$  ja väljatugevus  $E_1$  negatiivse laenguga väljatekitaja korral valemis 1.10 mõlemad negatiivsed. Valemite lihtsuse nimel hoidume vektorimärkide kasutamisest.

Valemi 1.10 põhjal on elektrivälja tugevuse ühikuks **üks njuuton kuloni kohta** (1 N/C). Üks njuuton kuloni kohta on sellise elektrivälja tugevus, milles punktlaengule suurusega 1 C mõjub jõud 1 N. Praktikas see esitus eriti kasutamist ei leia. Rohkem on levinud sama mõõtühiku teine esitusviis – üks volt meetri kohta (1 V/m). Sellega tutvume lähemalt punktis 1.6.

Elektrivälja tugevuse kohta võib tuua mõned näited.

**Tabel 1.2.**

Väli:	Väljatugevus (N/C või V/m)
põleva elektrilambi hõõgniidis	400-600
õhus vahetult enne välgulööki	kuni $5 \cdot 10^5$
sädeme tekkimisel kuivas õhus	$3 \cdot 10^6$
elusa raku membraanis (puhkeseisundis)	$2 \cdot 10^7$
vesiniku aatomissee kuuluva elektroni asukohas	$5 \cdot 10^{11}$

Edaspidi tuleb meil korduvalt väljatugevuse  $E$  kaudu leida kehale laenguga  $q$  selles väljas mõjuvat elektrijõudu  $F$ . Valemi 1.10 põhjal

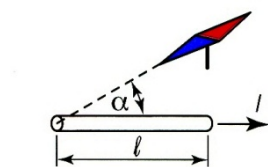
$$F = q E, \quad (1.11)$$

jõud on laengu ja väljatugevuse korrutis. Indekseid me enam ei kasuta, sest valemis 1.11 sisalduv väljatugevus  $E$  ei pruugi enam olla põhjustatud konkreetsest punktlaengust ega üldse mingist ühest kindlast kehast. See on enamasti paljude eri väljade tugevuste summa.

Eespool veendusime selles, et laeng täidab Coulomb'i seaduses sama rolli, mida mass gravitatsiooniseaduses. Võrdlemist jätkates võiksime küsida, milline *Mehaanika* kursusest tuntud suurus vastab elektrivälja tugevusele  $E$ . Pole kuigi raske märgata, et selleks suuruseks on raskuskiirendus  $g$ . Raskuskiirendus näitab, kui suur raskusjõud  $mg$  mõjub ühikulise massiga kehale. Analoogiliselt näitab elektrivälja tugevus meile, kui suur elektrijõud  $q E$  mõjub selles väljas ühikulise laenguga kehale.

### 1.5.2. Magnetinduktsioon

Kui uurime katseliselt vooluga juhtme käitumist mitte ainult teise juhtme magnetväljas (p.1.4.2) vaid suvalise päritoluga väljas, siis võime järeldada, et juhtmelõigule mõjuv magnetjõud  $F_m$  on alati võrdeline juhet läbiva voolu tugevusega  $I$ , juhtmelõigu pikkusega  $l$  ja siinusega nurgast  $\alpha$  voolu suuna ning magnetvälja suuna vahel (J. 4.16)



J. 4.16. Ampère'i seaduses esinevad suurused.

$$F_m = B I l \sin \alpha. \quad (1.12)$$

Meenutagem siinkohal, et magnetvälja suuna määrab selles väljas orienteerunud magnetnõel. Peagi veendume, et seos 1.12 on Ampère'i poolt tuletatud valemi 1.7 üldistus, mis arvestab ka magnetvälja suunda ja ei eelda enam magnetvälja tekitajana vooluga juhett. Seetõttu nimetatakse valemit 1.12 sageli **Ampère'i seaduseks**, ehkki Ampère ise kasutas kuju 1.7.

Jõu suuna määramiseks Ampère'i seaduses võib kasutada **vasaku käe reeglit**. See väidab, et kui vasaku käe väljasirutatud sõrmed osutavad voolu suunda ja magnetväli on suunatud peopessa, siis väljasirutatud põial näitab juhtmelõigule mõjuva jõu suunda. Vooluga juhtmele mõjuv magnetjõud on suunatud alati risti nii voolu kui ka magnetvälja suunaga. Nüüd märkame, et meil on mõtet avaldada valemist 1.12 võrdetegur  $B$ , tehes seda juhul, kui magnetväli on voolu suunaga risti ( $\alpha = \pi/2$  ja  $\sin \alpha = 1$ ). Me saame, et

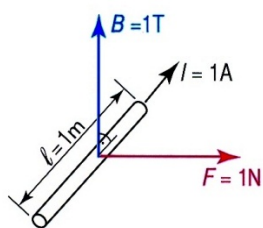
$$B = \frac{F_m}{I l}, \quad (1.13)$$

suurus  $B$  näitab uuritavas magnetväljas mingile kindlale kehale (vooluga juhtmele) mõjuvat jõudu. Seega on ta sobiv kasutamiseks magnetvälja iseloomustava suurusena. Suurust  $B$  on hakatud nimetama magnetinduksiooniks.

**Magnetinduksioon  $B$  näitab magnetjõudu  $F_m$ , mis mõjub ühikulise vooluga ja ühikulise pikkusega juhtmelõigule selle juhtmega ristivas magnetväljas.**

Magnetinduksioon on vektoriaalne suurus ja tema suunda näitab magnetväljas orienteerunud magnetnõela põhjapoolus (joon. 4.16).

Kuna magnetinduksiooni üldlevinud tähiseks on  $B$ , siis võib teda lühidalt nimetada ka  **$B$ -vektoriks**. Pole raske märgata, et  $B$ -vektor on analoogiline elektrivälja kirjeldava  $E$ -vektoriga. Mõlemad on defineeritud jõu kaudu, mis mõjub proovikehale. Erinevus on vaid selles, et  $E$ -vektori suund ühtib laetud proovikehale mõjuva jõu mõjumise sihiga,  $B$ -vektor on aga proovijuhtmele mõjuva jõu suunaga risti. Viimane asjaolu muudab täiesti võimatuks vektorimärkide kasutamise valemites 1.12 ja 1.13. Allpool (p.1.5.4) saab ka selgemaks, miks  $B$ -vektori pikkuse defineerimisel kasutatakse vooluga juhett, suuna määramisel aga püsomagnetit.



J. 4.19. Magnetinduksiooni mõõtühikut 1 T määrav katse.

Magnetinduksiooni SI-ühikut nimetatakse horvaadi päritoluga ameerika elektrotehniku Nikola Tesla (1856-1943) järgi teslaks. Kui juhtmele, mille pikkus on üks meeter ja milles kulgeb vool tugevusega üks amper, mõjub selle juhtmega ristuva magnetvälja poolt jõud üks njuuton, siis on välja magnetinduksioon **üks tesla** (1 T) (J. 4.19).

Seega valemi 1.13 kohaselt

$$1 \text{ T} = \frac{1 \text{ N}}{1 \text{ A} \cdot 1 \text{ m}}.$$



Üks tesla on väga suur magnetinduksioon. Seetõttu mõõdetakse Maal esinevate magnetväljade induksioone tavaliselt milli- ja mikroteslades. Keskmise suurusega püsिमagnetі pinna lähedal on magnetinduksioon mõnikümmend milliteslat. Tabelis 1.3. on toodud veel mõned näited magnetinduksiooni väärtuste kohta.

**Tabel 1.3.**

Magnetinduksioon:	
Maa pinnal	$10^{-5}$ T
Päikese pinnal	$10^{-3}$ T
Teleri toitetrafo südamikus	0,1–1 T
Ülijuhtiva elektromagnetі südamikus	10–50 T
Kosmoses, neutronitest koosneval tähel	$10^8$ T

### 1.5.3. Punktlaengu väljatugevus ja sirgvoolu magnetinduksioon

Coulomb'i seaduse 1.3 ja valemi 1.10 abil saame punktlaengu  $q_1$  elektrostaatilise välja tugevuse esitada kujul

$$E_1 = \frac{F_{12}}{q_2} = \frac{k \frac{q_1 q_2}{r^2}}{q_2} = k \frac{q_1}{r^2}. \quad (1.14)$$

Seega on punktlaengu  $q_1$  väljatugevus võrdeline selle laengu suurusega ning pöördvõrdeline laengu ja uuritava punkti vahekauguse  $r$  ruuduga.

Teades Oerstedі katse kirjelduse (p.1.4.2) põhjal seda, kuidas on suunatud sirgvoolu magnetväli, võime nüüd omavahel seostada Ampère'i seaduse kaks kuju (1.7 ja 1.12) ning ühtlasi avaldada vooluga sirgjuhtme poolt tekitatava magnetinduksiooni. Kahe paralleelse juhtme korral on ühe juhtme magnetväli teise juhtmega risti (J. 4.21).

Seega nurk  $\alpha$  valemis 1.12 on täisnurk ja  $\sin \alpha = 1$ . Vastavalt avaldub esimese juhtme poolt teisele mõjuv jõud kujul

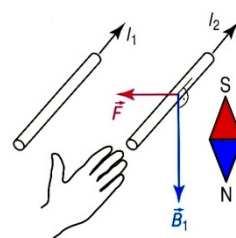
$$F_{12} = B_1 I_2 l,$$

kus  $B_1$  on esimese juhtme magnetinduksioon teise juhtme asukohas ja  $I_2$  on voolutugevus teises juhtmes. Kuna jõud avaldub samas ka valemiga 1.7

$$F_{12} = K \frac{I_1 I_2 l}{r},$$

siis saame

$$B_1 = \frac{F_{12}}{I_2 l} = \frac{K \frac{I_1 I_2 l}{r}}{I_2 l} = K \frac{I_1}{r} \quad (1.15)$$



**J. 4.21.** Seos Ampère'i seaduse kahe kuju vahel. Ühe juhtme magnetväli  $B_1$  mõjutab teist juhet jõuga  $F$ .

Vooluga sirgjuhtme poolt tekitatav magnetinduktsioon on võrdeline voolutugevusega juhtmes ning pöördvõrdeline kaugusega juhtmest. Valemi 1.15 juures tuleb arvestada, et  $l$  on selle juhtmeloigu pikkus, millele vaadeldav jõud mõjub. Vaikimisi eeldatakse magnetinduktsiooni  $B_1$  tekitava (joonisel vasakpoolse) juhtme lõpmatut pikkust.

#### Näide 1.4.

Leiame magnetinduktsiooni, mida tekitab näites 1.3 käsitletud õhuliini üks juhe teise asukohas. Juhtmete vahekaugus on 1 m ja neis kulgeb vool 100 A.

Antud:

$$I_1 = 100 \text{ A}$$

$$r = 1 \text{ m} \quad \text{valem 1.15:} \quad B_1 = K \frac{I_1}{r}; \quad K = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2}$$

$$B_1 = ? \quad B_1 = 2 \cdot 10^{-7} \frac{\text{N}}{\text{A}^2} \cdot \frac{100 \text{ A}}{1 \text{ m}} = 2 \cdot 10^{-5} \text{ T} = 20 \mu\text{T}$$

Vastus. Üks juhe tekitab teise asukohas magnetinduktsiooni 20 mikrotleslat.

Nii elektri- kui magnetväljas kehtib **superpositsiooniprintsiip** ehk **liitumise põhimõte**. Selle printsiibi kohaselt võrdub elektrivälja korral laetud kehade süsteemi väljatugevus üksikutest kehadest põhjustatud väljatugevuste vektoriaalse summaga. Magnetväljas võrdub väljatekitajate (püsomagnetite või vooluga juhtmete) süsteemi magnetinduktsioon üksikutest väljatekitajatest põhjustatud magnetinduktsioonide vektoriaalse summaga. Veel lihtsamalt öeldes: nii  $E$ -vektoreid kui  $B$ -vektoreid tuleb vektoriaalselt liita.

Superpositsiooniprintsiip tuleneb otseselt välja omadusest mitte segada teist välja ehk siis *Füüsikalise looduskäsitluse aluste* kursuses vaadeldud tõrjutusprintsiibist. Täpsemalt tuleneb see küll tõrjutusprintsiibi mittekehtivusest väljade korral. Kui mingile kehale mõjub korraga mitu välja, siis liituvad vektoriaalselt nendest väljadest tingitud jõud. Piltlikult öeldes: väljad ei lähe omavahel konflikti. Nad jagavad omavahel ära võimaluse vaadeldavat keha jõuga mõjutada. Lõpptulemuses kajastub aga loomulikult rohkem selle välja mõju, mis ise on tugevam. Konkreetselt uurime superpositsiooniprintsiibi rakendamist punktis 1.6.

#### 1.5.4. Elektri- ja magnetvälja omaduste võrdlus.

Elektri- ja magnetvälja kirjeldused tunduvad esmapilgul üksjagu erinevat.  $E$ -vektori suund ühtib laetud proovikehale mõjuva jõu mõjumise sihiga,  $B$ -vektor on aga proovijuhtmele mõjuva jõu suunaga risti. Punktlaengu elektrivälja tugevus ( $E$ -vektori pikkus) on pöördvõrdeline vahekauguse  $r$  ruuduga välja tekitava punktlaengu ja uuritava väljapunkti vahel (valem 1.14). Lõpmata pika sirgjuhtme magnetinduktsioon ( $B$ -vektori pikkus) on aga pöördvõrdeline selle kaugusega esimeses astmes (valem 1.15). Need erinevused tulenevad looduse objektiivsest omadusest. Magnetväljal lihtsalt on kaks erinevat tekitajat: laetud osakeste suunatud liikumine (elektrivool) ja osakeste omamagnetväli, mis põhjustab püsomagnetite välja. Kui magnetvälja kirjeldav suurus  $B$  oleks defineeritud lähtuvalt vaid ühest välja tekitajast, siis oleks teise

tekitajaga seotud nähtuste kirjeldamine ääretult raske. Seetõttu on kaasajal  $B$ -vektori pikkus määratud vooluga juhtme, suund aga püsिमagneti (magnetnõela) abil.

Magnetvälja algne kirjeldus ehitati üles sarnasusele punktlaengute ja magnetpooluste käitumise vahel. Magnetismi tehnilised rakendused aga osutusid üha rohkem seotuks elektrivooluga, mistõttu elektriliseks põhiühikuks valiti amper ja  $B$ -vektori pikkus defineeriti süsteemis SI vooluga juhtmele mõjuva jõu kaudu. See tingis magnetvälja silindrilise sümmeetria: kõigis vooluga juhtmest (kui silindri teljest) ühesugusel kaugusel paiknevates punktides on sama magnetinduktsioon. Seevastu punktlaengu elektrivälja sümmeetria on sfääriline: kõigis punktlaengust (kui sfääri tsentrist) ühesugusel kaugusel asuvates punktides on sama elektrivälja tugevus. Sfääri pindala ( $4\pi r^2$ ) on võrdeline raadiuse ruuduga, silindri külgpindala ( $2\pi r l$ ) on aga võrdeline raadiusega esimeses astmes.

**Tabel 1.4.** Elektrivälja ning magnetvälja võrdlev käsitlus.

Elektriväli	Magnetväli
<p>Mõju põhiseadus on <b>Coulomb</b>'i seadus: <math>F_{12} = k \frac{q_1 q_2}{r^2}</math>, kus</p> <p><math>F_{12}</math> on jõud, millega esimene keha mõjutab teist, <math>r</math> – kehade vahekaugus, <math>q_1</math> ja <math>q_2</math> – kehade laengud.</p> <p>Eeldatakse, et vaadeldavaid kehi võib lugeda punktlaenguteks.</p>	<p>Mõju põhiseadus on <b>Ampere</b>'i seadus: <math>F_{12} = K \frac{I_1 I_2}{r} l</math>, kus</p> <p><math>F_{12}</math> – jõud, millega kahe lõpmata pika ja paralleelse sirgjuhtme korral esimene juhe mõjutab teise juhtme lõiku pikkusega <math>l</math>, <math>r</math> – juhtmete vahekaugus, <math>I_1</math> ja <math>I_2</math> – voolutugevused juhtmetes.</p>
<p>Välja kirjeldab <b>väljatugevus</b> (<math>E</math>-vektor) <math>E = \frac{F}{q}</math>. SI ühik on <math>1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}</math> ehk <b>volt meetri kohta</b>.</p>	<p>Välja kirjeldab <b>magnetinduktsioon</b> (<math>B</math>-vektor) <math>B = \frac{F}{I l}</math>. SI ühik on <b>tesla</b> <math>1 \text{ T} = 1 \text{ N/(A m)}</math> ehk njuuton ampri ja meetri kohta.</p>
<p><b>Punktlaengu</b> <math>q_1</math> väljatugevus teise punktlaengu <math>q_2</math> asukohas</p> $E_1 = \frac{F_{12}}{q_2} = k \frac{q_1 q_2}{r^2 q_2} = k \frac{q_1}{r^2}.$	<p><b>Sirgvoolu</b> <math>I_1</math> magnetinduktsioon teise vooluga juhtmelõigu asukohas</p> $B_1 = \frac{F_{12}}{I_2 l} = K \frac{I_1 \cdot I_2}{r I_2 l} = K \frac{I_1}{r}.$

Homogeenset välja ning elektri- ja magnetvälja jõujooni uurime lähemalt allpool (p.1.6). Olgu veel märgitud, et suur kõlaline erinevus välja jõu kaudu kirjeldavate vektorsuuruste nimetustes (elektrivälja tugevus  $E$  ja magnetinduktsioon  $B$ ) tuleneb samuti asjaolust, et magnetvälja algne kirjeldus ehitati üles sarnasusele punktlaengute ja magnetpooluste käitumise vahel. **Magnetvälja tugevuseks** nimetatakse suurust, mis on elektrivälja tugevuse analoogiks magnetpooluste-põhises magnetvälja käsitluses. Kuna see käsitlus ei ole kooskõlas tänapäeval domineeriva ühikusüsteemiga SI, siis me seda lähemalt ei vaatle.

## Küsimusi ja ülesandeid

1. Reastage mõisted *elektriväli*, *elektromagnetväli* ja *elektrostaatiline väli* nende üldisuse järjekorras. Mis on mille alaliigiks?
2. Oletagem, et Kuud hoiab Maa ümber tiirlemas elektrijõud (ül 3, p. 1.3). Milline peaks siis olema meile mõjuva Maa elektrivälja tugevus? Maa laengut võib vaadelda koondununa Maa keskpunkti. Maa raadiuseks loeme 6370 km.
3. Vaatleme sirgjuhet, mis mingis punktis pöördub täisnurga all paremale. Millise suunaga magnetvälja tekitab pöördepunktile eelnev juhtmeosa pöördepunktile järgneva osa asukohas?
4. Vaatleme sama sirgjuhet, mis eelmises ülesandes. Millise suunaga magnetvälja tekitab pöördepunktile järgnev juhtmeosa pöördepunktile eelneva osa asukohas?
5. Kas samas tasandis täisnurga all suunda muutva juhtme kaks teineteise suhtes ristuvat osa mõjutavad teineteist magnetjõuga? Kui jah, siis kuidas on see jõud suunatud?
6. Kuidas muudaks magnetjõud eelmises probleemis kirjeldatud juhtme kuju, kui juhe oleks piisavalt elastne?

## STOP

1. Elektrivälja tugevus  $E$  näitab, kui suur jõud mõjub selles väljas ühikulise positiivse laenguga kehale.
2. Elektrivälja tugevus on vektoriaalne suurus ja seda võib nimetada ka  $E$ -vektoriks.  $E$ -vektori suund ühtib positiivse laenguga kehale mõjuva jõu suunaga.
3. Vooluga juhtmele mõjuv jõud  $F$  on võrdeline juhete läbiva voolu tugevusega  $I$ , juhtme pikkusega  $l$  ning siinusega nurgast  $\alpha$  voolu suuna ja magnetvälja suuna vahel:  $F = B I l \sin \alpha$ .
4. Kui vasaku käe väljasirutatud sõrmed osutavad voolu suunda ja magnetväli on suunatud peopessa, siis väljasirutatud põial näitab juhtmelõigule mõjuva jõu suunda (vasaku käe reegel).
5. Magnetjõud on suunatud alati risti nii voolu kui ka magnetvälja suunaga.
6. Magnetinduktsioon  $B$  näitab jõudu, mis mõjub ühikulise vooluga ja ühikulise pikkusega juhtmele selle juhtmega ristavas magnetväljas.
7. Magnetinduktsioon on vektoriaalne suurus ja seda võib nimetada ka  $B$ -vektoriks.  $B$ -vektori suunda näitab magnetväljas orienteerunud magnetnõela põhjapoolus.
8. Kui juhtmele, mille pikkus on 1 m ja milles kulgeb vool tugevusega 1 A, mõjub selle juhtmega ristuva magnetvälja poolt jõud 1 N, siis on välja magnetinduktsioon üks tesla (1 T).
9. Elektriliselt või magnetiliselt aktiivsete kehade süsteemi korral tuleb vastavalt  $E$ - või  $B$ -vektori pikkuse leidmiseks üksikute väljatekitajate  $E$ - või  $B$ -vektoreid liita (superpositsiooniprintsiip).

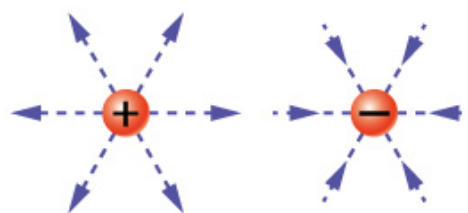
## 1.6. Väljade visualiseerimine

### 1.6.1. Elektrivälja jõujooned

Elektri- ja magnetväli pole meie meeleorganitega vahetult tajutavad. Välja olemasolu avaldub vaid tema mõjus aine osakestele. Samas võib aga korraldada katseid, milles väikesed ainekübemed moodustavad  $E$ - või  $B$ -vektoriga paralleelseid jooni. Neid jooni on hakatud nimetama vastava vektori joonteks või vastava välja **jõujoonteks**. Jõujooned võimaldavad meil tekitada vahetult nähtavaid välja mudeleid. Teisisõnu – nad võimaldavad elektri- või magnetvälja visualiseerida. Ei tohi unustada, et jõujooni looduses tegelikult pole. Nad on vaid inimeste poolt välja mõeldud abivahendiks välja kirjeldamisel. Magnetvälja jõujoontest oli juttu juba põhikooli *Elektriõpetuses*, kuna nende katseline uurimine on tehniliselt hulga lihtsam. Meie aga alustame elektrivälja jõujoontest.

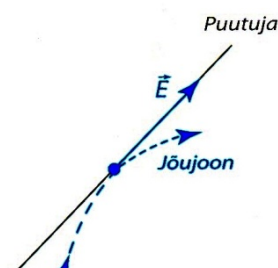
**Elektrivälja jõujoon** on mõtteline joon, mille igas punktis on  $E$ -vektor suunatud piki selle joone puutujat.  $E$ -vektori suund määrab ka jõujoone suuna, mida markeeritakse noolekesega jõujoonel (J. 2.12). Jõujoone üldlevinud tähiseks joonistel ongi noolekesega katkendjoon, mille läheduses paikneb viide konkreetse välja vektorile (täht  $E$  või  $B$ ). Seal, kus väli on tugevam, paiknevad jõujooned tihedamalt. See võimaldab võrrelda väljatugevusi ruumi eri osades.

Kui punktlaengu läheduses ei leidu teisi laetud kehi, siis täidab seda ruumi vaid punktlaengu enda elektriväli. Positiivse punktlaengu  $E$ -vektor on suunatud laengust eemale ja negatiivse punktlaengu  $E$ -vektor laengu poole. Niisiis väljuvad positiivse punktlaengu elektrivälja jõujooned laengu asukohast nagu päikesekiired. Negatiivse punktlaengu välja jõujooned aga tulevad laengu asukohta kokku.



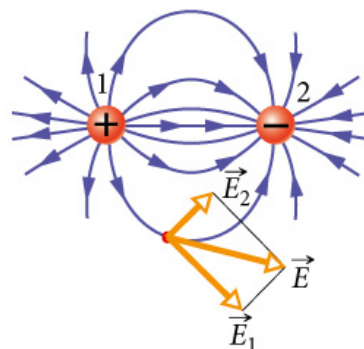
Sageli väidetakse, et positiivselt laetud keha elektrivälja jõujooned lähevad kehalt lõpmatusse ning negatiivse laenguga keha välja jõujooned tulevad lõpmatusest. Pärin nii see siiski ei ole. Laengu jäävuse seaduse (p. 1.2.4) põhjal teame, et kui on olemas positiivne, siis peab kuskil olema ka negatiivne laeng.

Positiivse laenguga kehalt väljuvad elektrivälja jõujooned kulgevad kindlasti mingitele negatiivsetele laengutele. Kui negatiivse laenguga kehad on väga kaugel, siis nende olemasolu positiivselt laetud keha läheduses tunda ei ole ning punktlaengu elektrivälja jõujoonte pilt on tsentraalsümmeetriline.



Kahe või enama punktlaengu või muu laetud keha piisavalt väikese vahekauguse korral liituvad superpositsiooniprintsiibi kohaselt nende kehade poolt tekitatud elektriväljade  $E$ -vektorid.

Summaarse elektrivälja ehk resultantvälja  $E$ -vektori leidmise näitena vaatleme kahest ühesuurusest kuid erinimelisest punktlaengust koosnevat süsteemi (J. 2.14). Positiivse punktlaengu väljatugevus  $E_1$  on joonisel negatiivse laengu väljatugevusest  $E_2$  suurem



seetõttu, et vaadeldav punkt paikneb laengule  $+q$  lähemal kui laengule  $-q$ . Liites analoogiliselt  $E$ -vektoreid teistes punktides, saame resultantvälja jõujoonte täieliku pildi. Näiteid erinevate kehade ja nende süsteemide elektrivälja jõujoonte konstrueerimisest võib leida aadressil <http://www.fyysika.ee/opik/index.php> → *Elekter ja magnetism* → *Elektrostaatika simulatsioon* <http://www.falstad.com> (Paul Falstad).

Neid elektrivälja jõujoonte pilte saab ka katseliselt kontrollida, kasutades tahke aine kübemeid, mis paiknevad vedelas dielektrikus. Suurepäraselt sobivad selleks mannaterad õlis. Mannaterad asetuvad elektriväljas piki jõujooni ridadesse. Nii on saadud jõujoonte pildid ja nende saamist kirjeldavad videod, mis on leitavad aadressil

<http://www.fyysika.ee/opik/index.php> → *Elekter ja magnetism*

Mannaterade eksperimendi fotod

### 1.6.2. Homogeenne elektriväli

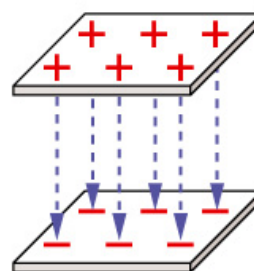
Eemaldumisel punktlaengust väheneb punktlaengu väljatugevus valemi 1.14 kohaselt niisamuti nagu kooskõlas *Mehaanika* kursuses õpituga väheneb raskuskiirendus eemaldumisel Maast. Maapinnal asetsevad kehad on aga kõik ligikaudu ühesugusel kaugusel Maa keskpunktist. Seetõttu võib raskuskiirenduse väärtust Maa pinnal lugeda konstantseks. Jättes Maa pinna kõveruse arvestamata, võime lugeda muutumatuks ka raskuskiirenduse suuna. Raskusjõu välja nimetatakse sel juhul **homogeenseks** (kr. k. *homogenes* - ühtlane, ühesugune).

Ka elektriväli võib olla homogeenne. Homogeense välja  $E$ -vektor on kogu vaadeldavas ruumis ühesuguse pikkuse ja suunaga ning välja jõujooned on omavahel paralleelsed sirged, mille vahekaugus ei muutu.

Elektriväli on homogeenne näiteks kahe paralleelse ühtlaselt laetud tasase plaadi vahel, mille pinnahükiul paiknevad suuruselt võrdsed ja vastandmärgilised laengud, plaatide vahekaugus on tühiselt väike võrreldes plaatide joonmõõtmetega ja uuritav piirkond asub piisavalt kaugel plaadi äärest (ääre mõju ei avaldu, J.2.19). Selline elektriväli tekib plaatkondensaatoris, millega tutvume lähemalt allpool (p. 2.6.3).

Katseline jõujoonte pilt ja selle saamist kirjeldav video on leitavad aadressil

<http://www.fyysika.ee/opik/index.php> → *Plaatkondensaatori elektrostaatiline väli*. Plaatkondensaatoris tekkivat elektrivälja tasub detailsemalt uurida põhjusel, et kondensaator on üks tähtsamatest elektrostaatika rakendustest.



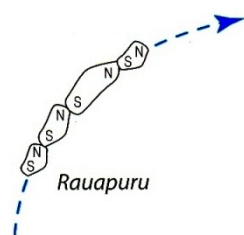
Simulatsiooni pöidlapilt

Mannateradest moodustuvate ridade omavaheline paralleelsus ja ridade keskeltläbi konstantne vahekaugus näitavad, et elektriväli kahe ühtlaselt laetud plaadi vahel on homogeenne. Samas näeme ka, et väljaspool plaatidevahelist ruumi mannaterade reastumist ei toimu. Seega puudub seal elektriväli. Kui ühe plaadi mingil pinnaosal paikneva positiivse laengu jaoks asetseb sama suur negatiivne laeng vahetus

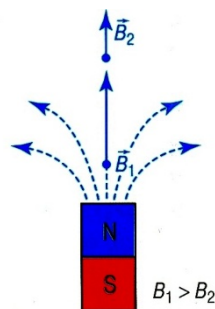
läheduses naaberplaadi sama suurel pinnaosal, siis moodustavad need kaks laengut tervikuna neutraalse süsteemi, mis süsteemist väljapoole ulatuvat elektrivälja ei tekita. Piltlikult öeldes: iga *pluss* on juba “oma” *miinuse* leidnud ja “lisa otsida” pole enam vaja. “Miinuse otsimist” ehk positiivse laengu ülehulka süsteemis väljendaks selles näites süsteemist väljapoole suunduv jõujoon, mida me aga katses ei tuvasta.

### 1.6.3. Magnetvälja jõujooned

Analoogiliselt elektrivälja jõujoontega kasutatakse ka magnetvälja kirjeldamiseks jõujooni. **Magnetvälja jõujoon** on mõtteline joon, mille igas punktis on  $B$ -vektor suunatud piki selle joone puutujat (analoogiliselt joonisega 2.12). Jõujoonel on ka suund, mis ühtib  $B$ -vektori suunaga antud punktis ja mida järelkult näitab orienteerunud magnetnõela põhjapoolus. Järelkult on võimalik magnetvälja jõujoonte kuju uurida piisavalt suure hulga magnetnõelte abil. Veel paremini saab jõujoonte paigutust nähtavaks muuta rauapuruga. Rauapuru kübemed käituvad magnetväljas nagu väikesed magnetnõelad. Nad pöörduvad oma pikima mõõtmega magnetvälja suunas, üritades püsomagnetite kombel moodustada ahelaid, milles ühe tükikese põhjapoolus on tõmbunud vastu teise lõunapoolust. (J. 4.24). Sellised ahelad kujutavadki magnetvälja jõujooni.



**J. 4.24.** Rauapuru osakeste asetumine piki magnetvälja jõujoont.



**J. 4.25.** Püsिमagneti pooluse läheduses on magnetväli tugevam ja jõujooned paiknevad seal tihedamalt.

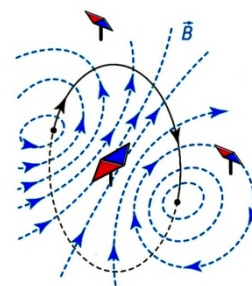
Ka magnetvälja korral võimaldavad jõujooned võrdlevalt hinnata väljavektori pikkust ruumi eri piirkondades. Seal, kus jõujooned paiknevad tihedamalt, näiteks püsिमagneti ühe pooluse läheduses (J. 4.25), on magnetinduktsioon suurem ja proovikehale mõjuvad tugevamad magnetjõud.

Korraldades Oersted'i katse (p.1.4.2) vertikaalse sirgjuhtme abil, millest ühesugusel kaugusel horisontaalsel alusplaadil paikneb suur hulk magnetnõelu (**joonis või foto**), võime veenduda selles, et magnetvälja jõujooned ümbritsevad vooluga juhett kontsentriliste ringjoontena. Välja suuna määramiseks jõujoonel kasutatakse mitmeid mnemotehnilisi võtteid, millest levinuimaks on kaasajal **parema käe rusikareegel**. See väidab, et kui rusikasse tõmmatud parema käe väljasirutatud põial näitab voolu suunda, siis neli kõverdunud sõrme näitavad selle voolu magnetvälja suunda (**joonis**).

Ka magnetinduktsiooni kohta kehtib superpositsiooniprintsiip ehk liitumise põhimõte. Selle järgi on kehade süsteemi poolt tekitatud magnetvälja  $B$ -vektor võrdne üksikute kehade  $B$ -vektorite summaga. Ehk teisiti: erinevate kehade poolt mingis punktis tekitatud magnetväljade  $B$ -vektoreid tuleb resultantvälja  $B$ -vektori saamiseks liita.

Seda põhimõtet illustreerib hästi **ringvoolu** magnetvälja jõujoonte määramine (J. 4.29).

Parema käe rusikareeglit rakendades veendume selles, et vooluga ringjuhtme kõik osad tekitavad ringi keskpunktis piki ringjuhtme telge suunatud magnetvälju. Ringjuhtme teljel on resultantväli on just ringvoolu keskpunktis kõige tugevam, sest keskpunkt on kõigile ringjuhtme osadele lähim telje punkt ning just keskpunktis on kõigi ringjuhtme osade magnetväljad omavahel paralleelsed. Näeme, et ringvoolu magnetvälja jõujooned ei ole ise küll rangelt ringjoonelised, kuid nad on siiski kinnised kõverad.



J. 4.29. Vooluga ringjuhtme magnetvälja jõujooned.

Ringvoolu magnetvälja suuna määramiseks võib samuti kasutada **parema käe rusikareeglit**, mis nüüd kõlab järgmiselt: kui rusikasse tõmmatud parema käe neli kõverdatud sõrme näitavad ringvoolu suunda mingis juhtmekeerus, siis väljasirutatud põial näitab selle voolu magnetvälja suunda. Seega tuleb üleminekul sirgvoolu magnetvälja juurest ringvoolu magnetvälja käsitlemisele parema käe rusikareeglis sõnad *vool ja magnetväli* omavahel ära vahetada. Ringjuhtme magnetvälja jõujoonte katseline pilt on leitav aadressil <http://www.fyysika.ee/opik/index.php> → *Magnetvälja jõujooned - ringvoolu magnetväli*

Ringjuhtme magnetvälja eksperimentaalne pilt

#### 1.6.4. Homogeenne magnetväli

Kõrvutasetsevatest keerdudest koosneva juhtme pooli ehk **solenoidi** korral (**joonis**) liituvad solenoidi teljel paljude ringvoolude samasuunalised magnetväljad. Seetõttu on resultantväli solenoidi sees väga tugev. Vooluga solenoidi magnetvälja jõujoonte katseline pilt ja selle saamist selgitav video <http://www.fyysika.ee/opik/index.php> → *Magnetvälja jõujooned - vooluga pooli magnetväli (foto veerisele?)* näitavad meile, et rauapuru kübemed moodustavad vooluga solenoidi sees solenoidi teljega paralleelseid ja ühtlase tihedusega ridu. Seega on magnetväli vooluga solenoidi sees homogeenne. Jõujoonte hajumine solenoidi otste juures näitab, et seal magnetväli mõnevõrra nõrgeneb. Samas puudub magnetväli väljaspool solenoidi (solenoidi kõrval) peaaegu täiesti, sest mitte mingit rauapuru reastumist me seal ei tähelda. Olukord on analoogiline elektrivälja puudumisega väljaspool plaatkondensaatorit (p. 1.6.2).

Mõistagi sõltub magnetvälja suund solenoidis voolu suunast ja on määratav parema käe rusikareegli abil, analoogiliselt ringjuhtme välja juhuga. Vooluga solenoidis tekkivat homogeenset magnetvälja tasub detailsemalt uurida põhjusel, et solenoid on üks tähtsamatest magnetismi rakendustest. Me puutume sellega veel korduvalt kokku käesoleva õpiku 2. osas.

Jõujoonte teema lõpetuseks tutvugem püsिमagneti välja jõujoonte katselise pildi ja selle saamist selgitava videoga <http://www.fyysika.ee/opik/index.php> →

*Magnetvälja jõujooned - sirgмagneti magnetväli ja U-magneti magnetväli (fotod veerisele?)*. Näeme, et püsिमagneti magnetvälja jõujooned kulgevad väljaspool magnetit põhjapooluselt lõunapoolusele. (**kas ka joonis?**) Läbides ka magnetit ennast, moodustavad nad ikkagi kinnisi kontuure, niisamuti nagu voolujuhtmete puhul. Seega ei ole olemas punkte, kus magnetvälja jõujooned algaksid või lõpeksid.



Välja, mille jõujooned on kinnised (alguse ja lõputa), nimetatakse solenoidaalseks väljaks ehk **pöörisväljaks**. Seega magnetväli on pöörisväli.

### Küsimusi ja ülesandeid

1. Kui Ampère'i kombel oletada, et püsिमagnetі magnetvälja põhjustavad väikesed ringvoolud, siis kuidas peaksid paiknema nende ringvoolude teljed?
2. Millised on magnetkraana eelised ja puudused võrreldes tavalise kraanaga?
3. Miks ei saa valjuhääldis püsिमagnetі asemel kasutada lihtsalt magneetuvat raudsüdamikku nagu elektromagnetis?
4. Sirgjuhtme lõigule pikkusega 20 cm, milles kulgeb vool tugevusega 5 A, mõjub magnetvälja poolt jõud 0,2 N. Milline on välja magnetinduktsioon, kui juhtme kõrvale paikneva kompassi nõel moodustab juhtmega nurga 30 kraadi?
5. 1 m pikkuse vaskjuhtme otsad kinnitati lapiku patarei klemmide külge ning juhe jagati kaheks omavahel paralleelseks osaks, mis paiknesid 1 cm kaugusel teineteisest. Kui suur jõud mõjub juhtme kahe osa vahel, kui patarei tekitab juhtmes voolu tugevusega 4 A?
6. Raudnaelale keriti tihedalt keeru kõrvale 100 keerdu vaskjuhet läbimõõduga 0,3 mm. Kui suur on magnetinduktsioon naelas, kui juhtmes kulgeb vool tugevusega 2 A? Raua magnetiliseks läbitavuseks lugeda 200.

### STOP

1. Elektrivälja jõujoon on mõtteline joon, mille igas punktis on  $E$ -vektor suunatud piki selle joone puutujat.
2. Magnetvälja jõujoon on mõtteline joon, mille igas punktis on  $B$ -vektor suunatud piki selle joone puutujat.
3. Homogeenseks nimetatakse välja, mille jõujooned on omavahel paralleelsed ja konstantse tihedusega (naaberjoonte vahekaugusega).
4. Kui rusikasse tõmmatud parema käe väljasirutatud põial näitab voolu suunda, siis neli kõverdatud sõrme näitavad selle voolu magnetvälja suunda (parema käe rusikareegel).
5. Solenoidiks nimetatakse kõrvutiasetsevatest keerdudest koosnevat juhtmepooli. Vooluga solenoidis tekib homogeenne magnetväli.
6. Magnetvälja jõujooned on alguse ja lõputa. Magnetväli on pöörisväli.

## 1.7. Elektrivälja potentsiaal ja pinge

### 1.7.1. Töö ja potentsiaalne energia elektriväljas.

Elektrivälja võib iseloomustada mitte ainult jõuga, mis temas mõjub ühikulise laenguga kehale, vaid ka tööga, mida see jõud võib ära teha. Juba põhikoolis õpitud suuruseks, mis kirjeldab elektrivälja töö kaudu, on **pinge**. Üldiselt tähendab sõna *pinge* alati seda, et kohe võib midagi juhtuda. Mõelgem siinkohal väljenditele *pingeline olukord* või *suhted on pingestunud*. Seal, kus on tegu elektrilise pingega, võib meie teele juba jääda silt: *Kõrgepinge, elukardetav!* Mis siis ikkagi on pinge?

Mehaanika kursusest teame, et **tööks** nimetatakse jõu ja selle mõjumise suunal sooritatud nihke korrutist. Kui keha sooritab jõu  $F$  mõjul nihke  $s$ , siis töö avaldub kujul

$$A = F s \cos \alpha, \quad (1.18)$$

kus  $\alpha$  on nurk jõu ja nihke suundade vahel.

Asume uurima tööd, mida teeb kahe erinimeliselt laetud metallplaadi vahel esinev homogeenne elektrivälja punktlaengu  $q$  nihutamisel. Seejuures lähtume sarnasusest Maa raskusvälja ja homogeenne elektrivälja vahel. Vaatleme müüritl kõrgusega  $h$  alla pudenevat kivi massiga  $m$ . Kivi kukub raskusväljas vaba langemise kiirendusega  $g$ , sest talle mõjub raskusjõud  $m g$  (J. 2.23).

Kivi langeb raskusjõu suunas. Järelikult töö valemis (1.18)  $\alpha = 0$  ja  $\cos \alpha = 1$ . Maapinnale jõudmise hetkeks on kivi sooritanud nihke  $s$  ning raskusväli on seega teinud töö, mis on jõu  $m g$  ja sooritatud nihke  $s$  (või kõrguse  $h$ ) korrutis  $A = m g h$ .

Kivi võib lohistada või veeretada ka mööda horisontaalset maapinda. Raskusvälja tööd see aga ei mõjuta, sest jõud ei tee tööd liikumisel jõuga ristuvast (valemis 1.18  $\alpha = \pi/2$  ja  $\cos \alpha = 0$ ).

Laengut  $q$  omava keha liikumine homogeenne elektriväljas toimub samal viisil (J. 2.24). Kehale mõjub elektrijõud  $F_e$ , mis on valemi (1.11) kohaselt esitatav laengu ja väljatugevuse korrutisena  $q E$ . Kui keha on sooritanud selle jõu suunalise nihke  $s$  (või läbinud pikkuse  $d$ ) siis elektrivälja on teinud töö  $A$ , mis on jõu ja läbitud tee pikkuse korrutis:  $A = q E d$ .

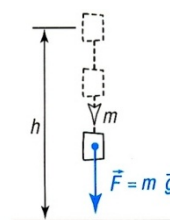
Laetud keha võib samuti liikuda elektrijõuga ristuvast suunas. Elektrivälja tööd see aga ei mõjuta. Ei raskusväljas ega elektriväljas ei sõltu töö liikumistee ehk trajektoori kujust. Ta sõltub ainult jõujoone sihis läbitud pikkusest (vastavalt  $h$  või  $d$ ).

Välja, milles töö ei sõltu liikumistee kujust, nimetatakse **potentsiaalseks väljaks**, kuna tema kirjeldamisel võib kasutada potentsiaalse energia ja potentsiaali mõisteid.

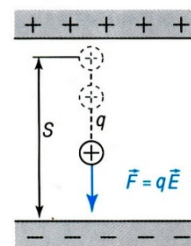
Potentsiaalne energia on tingitud keha vastastikmõjust teiste kehadega välja vahendusel. Kui keha asend võimaldab väljal teha keha nihutamises tööd, siis on kehal potentsiaalne energia (lad. k. *potentis* - suuteline, võimeline). Välja jõudude mõjul liikuva keha potentsiaalne energia kahaneb, sest töö varu kulutatakse ära.

Potentsiaalse energia nulltasemeks on loomulik valida keha niisugune asend, millest keha antud ülesande tingimustes enam välja jõudude mõjul edasi liikuda ei saa. Toodud näites on selleks negatiivselt laetud plaadi asukoht (J. 2.26).

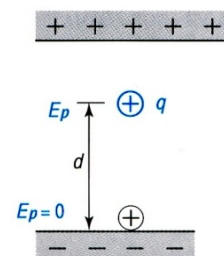
Raskusjõu väljas aga on potentsiaalse energia loomulikuks nulltasemeks maapind. Sealt ei ole enam võimalik edasi kukkuda ja raskusjõud rohkem tööd teha ei saa.



J. 2.23. Massi  $m$  omava keha kukkumine raskusväljas. Kehale mõjub raskusjõud  $F = m g$ .



J. 2.24. Laengut  $q$  omava keha liikumine homogeenne elektriväljas. Kehale mõjub elektrijõud  $F = q E$ .



J. 2.26. Laengut  $q$  omava keha potentsiaalne energia kaugusel  $d$  nulltasemest.

Kui kogu potentsiaalne energia liikumisel ära kulutatakse, siis on tema algväärtus võrdne välja poolt tehtud tööga. Raskusväljas kehtib seega *Mehaanikast* hästi tuntud valem  $E_p = m g h$ . Punktlaengu  $q$  potentsiaalne energia homogeenises elektriväljas avaldub vastavalt kujul

$$E_p = q E d, \quad (1.19)$$

kus  $d$  on punktlaengu kaugus energia nulltasemest või pikkus, mille laetud keha saab nulltasemeni liikudes läbida. Kuna indeksita  $E$  tähistab elektrifüüsikas alati väljatugevust, siis hakkame edaspidi energia tähistamiseks kasutama  $E$ -tähte koos energia liigile viitava indeksiga (siin näiteks kujul  $E_p$ ). Väljatugevuse tähisena toimiva  $E$ -tähe juures kasutame indekseid vaid erandjuhtudel, mil väljatugevuse ja energia segiajamine on välistatud.

Nagu näeme, sisaldab energia valem nii raskus- kui elektriväljas kõigepealt vaadeldavat keha iseloomustavat suurust ( $m$  või  $q$ ), seejärel välja tugevuse kirjeldajat ( $g$  või  $E$ ) ning lõpuks vaadeldava punkti kaugust energia nulltasemest ( $h$  või  $d$ ).

Tööd, mis tehakse punktlaengu  $q_2$  nihutamisel teise punktlaengu  $q_1$  poolt tekitatud elektriväljas, ei saa enam avaldada lihtsa korrutisena. Põhjuseks on asjaolu, et laengute vahel mõjuv jõud ei ole konstantne. See jõud sõltub Coulomb'i seaduse kohaselt laengute vahelisest kaugusest  $r$ . Jõud muutub liikumise käigus ja me ei tea enam, millise jõu me peame valemisse 1.18 panema. Kuna töö ja energia arvutamine läheb niisugusel juhul üle koolimatemaatika piiride, siis me seda siin ei esita. Arvutuse tulemuseks on potentsiaalse energia avaldis

$$E_p = q_2 E_1 r, \quad (1.20)$$

mis meenutab konstantse tugevusega välja korral saadud valemit 1.19. Erinevus on vaid selles, et liikuva laengu  $q_2$  kaugus potentsiaalse energia nulltasemest on asendatud laengu  $q_2$  kaugusega välja tekitavast punktlaengust  $q_1$ . Saadud tulemus näitab ühtlasi seda, et ka mittehomoogeenses elektriväljas ei sõltu töö liikumistee kujust. Ta sõltub vaid alg- ja lõpp-punkti asukohast. Nii raskusväli kui ka elektrostaatiline väli on potentsiaalsed.

Nüüd jääb üle vaid küsida, mis on sel kõigel pistmist kodus kasutatava elektri-energiaga. Kui kummaline see ka ei tundu, on seos siiski olemas. Elektriseadmetes liiguvad laengukandjad elektrivälja jõudude mõjul. Laengukandjad liiguvad sealt, kus nende potentsiaalne energia on suur, sellisesse piirkonda, kus energia on väiksem. Seejuures teeb elektriväli meile vajalikku tööd.

### Näide 1.5.

Taskulambipirni hõõgniit on 6,5 mm pikkune ja elektrivälja tugevus temas on 700 N/C. Leiame, kui palju tööd teeb elektriväli laengukandjate nihutamisel hõõgniidis ühe tunni jooksul, kui voolutugevus lambis on 0,26 A.

Antud:

$$E = 700 \text{ N/C}$$

$$A = q E d$$

$$d = 6,5 \text{ mm} = 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

$$q = I t \quad (\text{valem 1.2})$$

$$t = 1 \text{ h} = 3600 \text{ s}, \quad I = 0,26 \text{ A}$$

$$A = ?$$

$$A = I t E d$$

$$A = 0,26 \text{ A} \cdot 3600 \text{ s} \cdot 700 \text{ N/C} \cdot 6,5 \cdot 10^{-3} \text{ m} \approx 4260 \text{ J} \approx 4,3 \text{ kJ}.$$

Vastus. Laengukandjate nihutamisel hõõgniidis teeb elektrivälja ühe tunni jooksul töö 4,3 kJ.

Niisama suure töö teeb raskusväli näiteks juhul, kui keha massiga 100 kg kukub alla 4,3 meetri kõrguselt, seega ligikaudu teise korruse aknast. Ilmselt ei sooviks keegi meist siis parajasti all olla.

### 1.7.2. Elektrivälja potentsiaal

Me jõudsime äsja järeldusele, et laetud keha liikumisel elektriväljas tehtav töö võib olla üks ja seesama liikumisel mööda täiesti erinevaid teid. Järelikult pole olulised ka  $E$ -vektori pikkuse ja suuna muutused liikumise käigus. Näiteks ei sõltu elektrilambi põlemine üldse lambi hõõgniidi kujust ja  $E$ -vektori suuna muutumisest piki hõõgniiti. Oluline on vaid energia, mis vabaneb laengukandjate läbiminekul hõõgniidist.

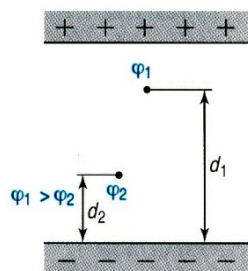
Seetõttu on elektrivälja iseloomustamiseks võetud kasutusele veel üks suurus – välja potentsiaal.

Väljatugevus  $E$  näitab teatavasti ühikulise positiivse laenguga kehale vaadeldavas punktis mõjuvat jõudu. **Potentsiaal**  $\varphi$  aga näitab, kui suur on selles punktis ühikulise positiivse laenguga keha potentsiaalne energia. Elektrivälja mingi punkti potentsiaali leidmiseks tuleb jagada sellesse punkti paigutatud laengu potentsiaalne energia  $E_p$  laengu suurusega  $q$ ,

$$\varphi = \frac{E_p}{q}. \quad (1.21)$$

Seejuures tähistab sõna *laeng* mõistagi *laetud keha* või *laetud osakeste kogumit*.

Potentsiaal on skalaarne ehk suunata suurus, nii nagu rõhk või temperatuur.



J. 2.27. Erineva potentsiaaliga punktid homogeenses elektriväljas.

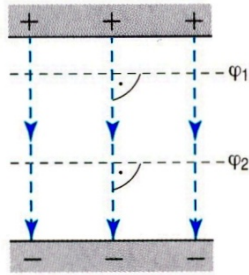
Paigutades potentsiaali definitsioonivalemisse (1.20) energia avaldise  $E_p = q E d$  (valem 1.18), saame homogeense välja potentsiaali (J. 2.27) avaldada kujul

$$\varphi = \frac{q E d}{q} = E d. \quad (1.22)$$

Kehade tegelik liikumine ei sõltu kuigivõrd potentsiaali nulltaseme asukohast. Seetõttu võib potentsiaali nulltaseme valida lähtuvalt konkreetse ülesande tingimustest. Reeglina valitakse selleks punkt, millest laetud keha elektrivälja mõjul enam edasi liikuda ei saa. Elektrotehnikas loetakse tavaliselt nulliks Maa potentsiaal või siis elektriseadme maandatud metallkorpuse potentsiaal.

### 1.7.3. Ekvipotentsiaalpinnad

Ühesugust potentsiaali omavate elektrivälja punktide hulka nimetatakse ekvipotentsiaalpinnaks.



**J. 2.30.** Jõujooned ja ekvipotentsiaalipinnad kahe ühtlaselt laetud plaadi vahel.

Homogeenses elektriväljas kahe erimärgiliselt laetud plaadi vahel (J. 2.30) on ekvipotentsiaalpindadeks plaatidega paralleelsed tasandid. Potentsiaal muutub kõige kiiremini liikumisel piki elektrivälja jõujoont. Liikumisel jõujoonega ristuv suunas jääb potentsiaal konstantseks.

Ekvipotentsiaalipinnad on alati jõujoontega risti. Jõujooned ja ekvipotentsiaalipinnad on kaks eri vahendit elektrivälja kirjeldamiseks. Nad on nagu kaks erinevat keelt, mis annavad edasi üht ja sama mõtet.

#### 1.7.4. Elektriline pingeline ja selle seos väljatugevusega

Keha liikumine potentsiaalse välja kahe punkti vahel ei sõltu punktide potentsiaalide absoluutsest suurusest. Ta sõltub vaid nende punktide potentsiaalide vahest. Nii näiteks voolab jõgi ühtemoodi aeglaselt tasasel kõrgustikualal (platool) ja merelähedasel madalal tasandikul. Voolu kiirust ei määra mitte absoluutne kõrgus (merepinnast), vaid jõe vaadeldava lõigu otspunktide kõrguste vahe. Analoogiliselt on ka laengukandjate liikumise kiirus elektriväljas määratud potentsiaalide vahega.

Elektrivälja kahe punkti potentsiaalide vahet nimetatakse **elektriliseks pingeks**  $U$ . Potentsiaali definitsiooni (valemi 1.21) kohaselt võib pinget avaldada kujul

$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = \frac{E_{p1} - E_{p2}}{q}.$$

$E_{p1}$  ja  $E_{p2}$  on seejuures laengut  $q$  omava keha potentsiaalse energia väärtused elektrivälja kahes punktis. Nende väärtuste vahe võrdub tööga, mida teeb väli selle keha nihutamisel ühest punktist teise. Järelikult

$$U = \frac{A}{q}, \quad (1.24)$$

kahe punkti vaheline pingeline näitab, kui suurt tööd teeb elektrivälja ühikulise positiivse laenguga keha viimisel ühest punktist teise. Laetud keha liikumisel piki jõujoont on keha nihe võrdne teekonna algus- ja lõpupunkti vahekaugusega  $d$  ning tehtav töö avaldub kujul  $A = q E d$ . Järelikult valemi 1.24 põhjal

$$U = \frac{A}{q} = \frac{q E d}{q} = E d. \quad (1.25)$$

Siit tuleneb praktiline eeskiri elektrivälja tugevuse leidmiseks. Nimelt saame elektrivälja tugevuse, jagades kahe punkti vahelise pingeline  $U$  nende punktide vahekaugusega  $d$ , mis on mõõdetud piki välja mõjumise suunda. Seega

$$E = \frac{U}{d}. \quad (1.26)$$

Valem 1.26 on täiesti täpne homogeenses elektriväljas. Mittehomoogeenses väljas annab ta keskmise väljatugevuse vaadeldavas piirkonnas.

Valemiga 1.24 on määratud potentsiaali ja pinge ühik volt (1 V). Elektrivälja kahe punkti vahel on pinge üks volt, kui laengu 1 C viimisel ühest punktist teise tehakse töö 1 J. Seega

$$1 \text{ V} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C}} .$$

Samast seosest tuleneb töö ja energia ühik elektronvolt (1 eV). Kuna valemi 1.23 põhjal  $A = q U$ , siis **üks elektronvolt** on töö, mida teeb elektrivälja elementaarlaengut omava osakese (elektroni) viimisel ühest punktist teise, kui pinge nende punktide vahel on üks volt.

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

Üks elektronvolt on järelikult sama arv kordi väiksem ühest džaulist kui mitu korda elementaarlaeng on väiksem ühest kulonist. Elektronvolt on sobivaks töö ja energia ühikuks mikromaailma protsesside kirjeldamisel, millega tutvume gümnaasiumi füüsikakursuse lõpus.

Valemi 1.25 abil on saadud elektrivälja tugevuse SI-ühik volt meetri kohta (1 V/m). See on identne valemist (1.10) tuleneva ühikuga 1 N/C, sest

$$1 \frac{\text{V}}{\text{m}} = \frac{1 \text{ J}}{1 \text{ C} \cdot 1 \text{ m}} = \frac{1 \text{ N} \cdot 1 \text{ m}}{1 \text{ C} \cdot 1 \text{ m}} = 1 \frac{\text{N}}{\text{C}} .$$

**Üks volt meetri kohta** on sellise elektrivälja tugevus, milles potentsiaal muutub liikumisel piki välja suunda igal meetril ühe voldi võrra.

Pinge ja potentsiaali teema lõpetuseks meenutagem *Füüsikalise looduskäsitluse aluste* kursust, milles tutvusime **töö** kui protsessi kirjeldava suuruse ja **potentsiaalse energia** kui süsteemi olekut (seisundit) kirjeldava suurusega. Pole raske märgata, et *Elektromagnetismis* kirjeldab protsessi **pinge**, olukorda elektrivälja mingis punktis aga **potentsiaal**. Protsess viib süsteemi ühest olekust teise, mistõttu töö on kahe potentsiaalse energia vahe ning pinge – kahe potentsiaali vahe. Samas võib potentsiaale vaadelda kui pingesid mingi ühise kokkuleppelise nulltaseme suhtes.

Elektrivälja tugevus juhtiva keha pinna lähedal sõltub pinna kujust. Teraviku ümbruses saavutab väljatugevus väga suure väärtuse, sest teravik käitub punktlaenguna, millele lähenemisel ekvipotentsiaalpindade vahekaugused kiiresti vähenevad (p.1.7.3). Valemi 1.26 kohaselt põhjustab see väljatugevuse suurenemist. Elektrivälja tugevnemisega teravike läheduses võib kaasneda laengu äravool teravikelt, sest õhk teraviku ümber muutub elektrit juhtivaks. Vastavalt püütakse kõrgepingeseadmetes vältida teravaid nurki ja väljaulatavaid osi. Ka välgueelne elektrivälja õhus on kõige tugevam maast lähtuva teraviku läheduses. Seetõttu on hoonetele parimaks kaitseks **piksevarras**. Välgulöök tabab suure tõenäosusega eelkõige piksevarrast, aga mitte hoonet.

Kui välg lööb maasse, siis on maapinna potentsiaal välgust tabatud kohas hetkeks oluliselt erinev Maa üldisest potentsiaalist. Selle tagajärjel muutub potentsiaal piki maapinda lähenemisel välgust tabatud kohale. Mida rohkem on inimese üks jalg välgutabamuse asukohale lähemal kui teine, seda suurem potentsiaalide erinevus (pinge) tekib tema kahe jala vahel. Niisugust pinget nimetatakse **sammupingeks**.

Sammupinge võib esineda ka elektrijuhtmestiku rikke tagajärjel. Igatahes on elektriohu korral soovitatav liikuda võimalikult lühikeste sammudega, et vältida suure sammupinge tekkimist.

Äikese ajal pole soovitatav ujuda või sõita paadiga. Välisantenni kasutamise korral ei maksa äikese ajal vaadata telerit. Tasub hoiduda ahju kütmisest, kuna suitsusammas sisaldab harilikust õhust oluliselt rohkem laetud osakesi. Seetõttu võib välg tema kaudu majja sisse lüüa.

### Näide 1.6.

Leiame, kui mitu kompenseerimata laenguga elektroni on õlipiisal läbimõõduga  $1 \mu\text{m}$  Millikani katses (p. 1.2.3), kui piisk püsib paigal elektriväljas tugevusega  $5 \text{ kV/m}$ . Õli tiheduseks loeme  $780 \text{ kg/m}^3$ . Arvestame, et pindpinevusjõu mõjul omandab piisk ligikaudu kera kuju. Olgu otsitav elektronide arv  $z$ .

Antud:

$$D = 1 \mu\text{m} = 10^{-6} \text{ m} \quad V = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{D}{2}\right)^3 = \frac{4}{3} \pi \frac{D^3}{8} = \frac{\pi}{6} D^3 \quad (\text{kera ruumala})$$

$$\rho = 780 \text{ kg/m}^3 \quad m = \rho V \quad (\text{tiheduse definitsioon})$$

$$E = 5 \text{ kV/m} = 5 \cdot 10^3 \text{ V/m} \quad q = z e \quad (\text{piisa kogulaeng})$$

$$e = 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \quad m g = q E \quad (\text{tasakaalu tingimus})$$

$$\rho V g = z e E, \quad \text{millest}$$

$$z = ? \quad z = \frac{\rho V g}{e E} = \frac{\pi D^3 \rho g}{6 e E}$$

$$z = \frac{3,14 \cdot (10^{-6} \text{ m})^3 \cdot 780 \text{ kg/m}^3 \cdot 9,81 \text{ m/s}^2}{6 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19} \text{ C} \cdot 5 \cdot 10^3 \text{ V/m}} = 5$$

Vastus. Piisal on 5 liigset elektroni.

Kahjuks pole Millikani katse nõnda teostatav. Nimelt ei ole mikroskoobi skaala abil enam võimalik mõõta piisa diameetrit suurusjärgus  $1 \mu\text{m}$ . Miks see nii on, saab selgeks käesoleva õpiku 3. peatükis. Tunduvalt suuremal piisal on aga elektrone juba nii palju, et elementaarlaeng on mõõtmisveast väiksem. Sel juhul ei tule elementaarlaengu olemasolu enam esile.

Et elementaarlaengu suurus siiski ära mõõta, uuris Millikan mitte paigalseisvaid vaid ühtlaselt langevaid õlipiisku. Sel juhul tasakaalustasid elektriline jõud ja hõõrdejõud kahe peale kokku piisa raskusjõu. Mõõtes langemise kiirust ja teades hõõrdetegurit, suutis Millikan määrata piisa läbimõõdu ja seega ka piisa laengu. Vastavaid arvutusi me siin aga ei käsitle.

### Küsimusi ja ülesandeid

1. Kas kahe ühtlaselt laetud metallplaadi vahel tekkivas elektriväljas võiks potentsiaalse energia nulltaseme paigutada ka positiivselt laetud plaadi asukohta?

2. Ühe tunni jooksul teeb elektriväli auto lähitule lambi hõõgniidis töö 150 kJ. Seejuures on voolutugevus hõõgniidis 3,4 A ja elektrivälja tugevus 900 V/m. Leida hõõgniidi pikkus.
3. Kui palju on ühelt metallelektroodilt väljunud elektroni energia kasvanud teise elektroodini jõudmisel, kui elektroodide vahekaugus on 10 cm ja nende vahel on elektriväli tugevusega 20 kV/m? Vastus anda elektronvoltides.
4. Milline raskusvälja kirjeldav suurus on analoogiline elektrivälja potentsiaalile? Võrrelgem valemeid  $E_p = m g h$  ja  $E_p = q E d$  ning potentsiaali definitsiooni.
5. Kas maapind äikesepilve all on ekvipotentsiaalpind või mitte?
6. Miks on veest välja ulatuv ujuja pea välgule heaks märklauaks?
7. Kas ühel jalal seistes või hüpates oleme sammupinge eest kaitstud?
8. Kui suur on elektroni potentsiaalne energia vesiniku aatomis, esitatuna elektronvoltides? Kasutage näites 1.2 toodud andmeid ja valemit 1.20.
9. Liikuv prooton tabab teist prootonit, mida loeme paigalseisvaks. Tsentraalsel pörkel on prootonite vähim vahekaugus  $10^{-13}$  m. Milline oli liikuva prootoni algkiirus? Prootoni mass on  $1,67 \cdot 10^{-27}$  kg ja laeng on  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C. Energiakadusid pörkel võib mitte arvestada. Kasutage valemit 1.20.
10. Milline on eelmises ülesandes kirjeldatud liikuva prootoni kineetiline energia elektronvoltides?

## STOP

1. Punktlaengu  $q$  potentsiaalne energia homogeenises elektriväljas tugevusega  $E$  on esitatav kujul  $E_p = q E d$ , kus  $d$  on selle laengu kaugus energia nulltasemest.
2. Elektrivälja potentsiaal näitab, kui suur on vaadeldavas punktis ühikulise positiivse laenguga keha potentsiaalne energia.
3. Ühesugust potentsiaali omavate elektrivälja punktide hulka nimetatakse ekvipotentsiaalpinnaks.
4. Elektrivälja kahe punkti potentsiaalide vahet nimetatakse elektriliseks pingeks. Kahe punkti vaheline pinge näitab, kui suure töö teeb elektriväli positiivset ühikulist laengut omava keha viimisel ühest punktist teise.
5. Kui laengu 1 C viimisel ühest punktist teise teeb elektriväli töö 1 J, siis on pinge nende punktide vahel üks volt (1 V).
6. Üks elektronvolt (1 eV) on töö, mida teeb elektriväli elementarlaengut omava osakese viimisel ühest punktist teise, kui pinge nende punktide vahel on üks volt.
7. Üks volt meetri kohta (1 V/m) on sellise elektrivälja tugevus, milles potentsiaal muutub liikumisel piki jõujoont igal meetril ühe voldi võrra.



## 2. Elektromagnetväli

### 2.1. Ühele osakesele mõjuv magnetjõud

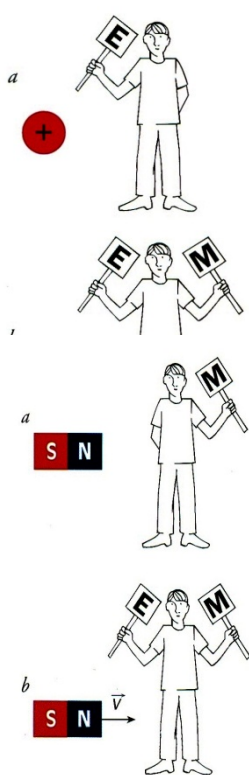
Railgun „A railgun requires a pulsed, direct current power supply. For potential military applications, railguns are usually of interest because they can achieve much greater muzzle velocities than guns powered by conventional chemical propellants. Increased muzzle velocities can convey the benefits of increased firing ranges while, in terms of target effects, increased terminal velocities can allow the use of kinetic energy rounds as replacements for explosive shells.

Thus typical military railgun designs aim for muzzle velocities in the range of 2000 - 3500 m/s with muzzle energies of 5 - 50 MJ. For single loop railguns, these mission requirements require launch currents of a few million amperes, so a typical railgun power supply might be designed to deliver a launch current of 5 MA for a few milliseconds. As the magnetic field strengths required for such launches will typically be approximately 10 T, most contemporary railgun designs are effectively "air-cored", i.e. they do not use ferromagnetic materials such as iron to enhance the magnetic flux.

“

#### 2.1.1. Elektromagnetilise induktsiooni nähtus

Käesolevas peatükis asume käsitlema elektri- ja magnetvälja muutumist ajas. Vaatleme ka kahe välja sügavamaid omavahelisi seoseid ning vastastikuseid muundumisi.



J. 1.2. a – vaatleja registreerib paigalseisva püsिमagneti magnetvälja; b – liikuv püsिमagnet tekitab vaatleja jaoks ka elektrivälja

Seejuures tuleb enamasti eeldada laetud osakeste mitteühtlast (kiirenevat või aeglustuvat) liikumist. Samuti pole elektri- ja magnetvälja enam võimalik vaadelda teineteisest lahus. Tegemist on elektromagnetilist vastastikmõju vahendava ühtse elektromagnetväljaga. Selle välja uurimise muudab keeruliseks protsesside tagasisidestatus. **Tagasiside on nähtus, mille korral ühe füüsikalise suuruse muutumine põhjustab teiste suuruste selliseid muutusi, mis omakorda mõjutavad esimest suurust.** Näiteks põhjustab pendli hälbe suurenemine tasakaaluasendi poole suunatud jõu kasvumist. See jõud aga pidurdab hälbe kasvu ja pendli liikumine aeglustub. Antud juhul pidurdab teise suuruse (jõu) muutus esimese suuruse (hälbe) muutumist. Selle kohta öeldakse, et hälbe muutus on negatiivselt tagasisidestatud. Elektromagnetvälja korral on igasugune elektrivälja muutus tagasisidestatud temaga kaasneva magnetvälja muutuse kaudu. Meenutagem mõttelist katset vaatlejaga, kes suudab registreerida mõlemat välja (p.1.4.1). Kui laetud keha vaatleja suhtes liigub, siis muutub keha elektrivälja vaatleja asukohas ning vaatleja registreerib ka magnetvälja (J. 1.1). Peagi veendume, et see kõik kehtib ka ümberpöördult. Kui magnetvälja tekitaja (püsिमagnet) vaatleja suhtes liigub, siis muutub magnetväli vaatleja asukohas ning vaatleja täheldab ka elektrivälja olemasolu (J.1.2). **Magnetvälja muutumine tekitab elektrivälja. Seda nimetatakse elektromagnetilise induktsiooni nähtuseks.** Märkigem veel,

et võõrsõna *indutseerima* eestikeelseks vasteks ongi *tekitama* või *esile kutsuma*.

Juba põhikooli *Elektriõpetuses* saime teada, et elektromagnetilisel induktsioonil põhineb **generaatori** töö. Teatavasti muundab generaator mehaanilist energiat elektrienergiaks, olles nii keskses rollis elektrienergia tootmisel. Elektromagnetnähtuste tundmaõppimine võimaldab meil mõista seda inimkonnale üliolulist protsessi.

Käesolevas peatükis vaatleme siis lähemalt, kuidas muutuv magnetväli saab tekitada elektrivälja. Loomulikult teeme ka kindlaks, millest sõltub vastav väljatugevus või pinge. Lõpuks uurime, mismoodi võib elektromagnetväljas salvestuda energia.

### 2.1.2. Lorentzi jõud

Selleks, et kirjeldada laengukandjate liikumist elektriväljas, mis tekib magnetvälja muutumisel, peame kõigepealt tutvuma magnetväljas liikuvale laetud osakesele mõjuva jõuga. Seda jõudu nimetatakse hollandi füüsiku Hendrik Antoon Lorentz'i (1853-1928) auks **Lorentzi jõuks**.

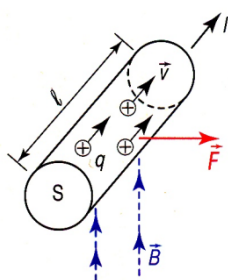
Juhtmelõigule, mille pikkus on  $l$  ja milles kulgeb vool tugevusega  $I$ , mõjub teatavasti magnetväljas induktsiooniga  $B$  magnetjõud  $F_m$ . Selle jõu suurus on leitav Ampère'i seadusest (valem 1.12)

$$F_m = I l B \sin \alpha,$$

kus  $\alpha$  on nurk voolu suuna ja magnetvälja suuna vahel. Voolu olemasolu tähendab laengukandjate suunatud liikumist keskmise kiirusega  $v$ . Mõistagi osalevad laengukandjad ka kaootilises (kindla suunata) liikumises, aga see meid praegu ei huvita. Jõud Ampère'i seaduses summeerub üksikutele liikuvatele laengukandjatele mõjuvatest Lorentzi jõududest. Seega tuleb Lorentzi jõu  $F_L$  leidmiseks jagada juhtmele kui tervikule mõjuv magnetjõud  $F_m$  liikuvate laengukandjate arvuga  $N$ :

$$F_L = \frac{F_m}{N}. \text{ Vaatleme laengukandjaid, mis liiguvad keskmise kiirusega } v \text{ läbi}$$

silindrikujulise juhtmelõigu (J.4.4.2).



**J. 4.42.** Laengukandjate suunatud liikumine vooluga juhtmelõigus. Laengukandjatele mõjub paremale suunatud magnetjõud.

Kui juhtmelõigu pikkus  $l$  on parajasti võrdne korrutisega  $v t$  (*Mehaanika* kursuse valem  $s = v t$ ), siis jõuavad kõik silindris sisalduvad laengukandjad aja  $t$  jooksul juhtmelõigust läbi tagumise otsapinna väljuda.

Laengukandjatel, mis on tagumisele otsale lähemal kui  $l$ , kulub selleks mõistagi seda vähem aega, mida väiksem pikkus neil läbida tuleb, aga aja  $t$  jooksul väljuvad kõik  $N$  laengukandjat. Nende kogulaeng on  $Nq$ , kus  $q$  on ühe laengukandja laeng.

Voolutugevuse definitsiooni (valem 1.1) põhjal saame, et:

$$I = \frac{Nq}{t}. \text{ Järelikult on Lorentzi jõu vektori pikkus esitatav}$$

kujul

$$F_L = \frac{I l B \sin \alpha}{N} = \frac{Nq l}{t N} B \sin \alpha = q v B \sin \alpha,$$

kuna juhtmelõigu pikkuse  $l$  ja laengukandjal selle läbimiseks kulunud aja  $t$  suhe võrdub laengukandja suunatud liikumise kiirusega  $v$ . Niisiis mõjub laengut  $q$  omavale

ja kiirusega  $v$  liikuvale osakesele magnetväljas induksiooniga  $B$  Lorentzi jõud  $F_L = q v B \sin \alpha$ , (2.1)



**J. 4.43.** Lorentzi jõu suuna määramine vasaku käe reegli abil.

kus  $\alpha$  on nurk osakese liikumissuuna (kiirusvektori) ja magnetvälja suuna ( $B$ -vektori) vahel (J. 4.43). Kuna positiivse laenguga osakesed liiguvad voolu kokkuleppelises suunas, siis võib neile mõjuva Lorentzi jõu suuna määrata **vasaku käe reegli** abil, mis antud juhul kõlab järgmiselt. Kui vasaku käe väljasirutatud sõrmed näitavad positiivselt laetud osakese liikumise suunda ja magnetvälja jõujooned tulevad peopessa, siis väljasirutatud põial näitab osakesele mõjuva Lorentzi jõu suunda (J.4.4.3)

Elektroni kui negatiivselt laetud osakese korral on Lorentzi jõu suund eelnevale vastupidine, sest valemisse 2.1 ilmub miinusmärk. Elektronile mõjuva Lorentzi jõu suunda näitab analoogiliselt paikneva **parema käe** põial.

Tasub rõhutada, et Lorentzi jõud mõjub laetud osakele alati risti nii liikumissuuna kui ka magnetvälja suunaga. Seetõttu ei saa Lorentzi jõud liikumisel tööd teha. Ta võib vaid muuta liikumise suunda. Kõige tugevam on Lorentzi jõud liikumissuunaga ristivas magnetväljas. Sel juhul valemis 2.1  $\sin \alpha = 1$  ja järelikult  $F_L = q v B$ .

Kui laengukandja kiirusvektor on risti magnetvälja suunaga ( $B$ -vektoriga), siis paneb Lorentzi jõud vaakumis asetseva laengukandja liikuma piki ringjoont ümber magnetvälja suuna, toimides kesktõmbekiirendust andva jõuna. Kui laengukandja liigub piki magnetvälja suunda ( $v$ - ja  $B$ -vektorid on samasihilised), siis Lorentzi jõudu ei teki, sest valemis 2.1 on  $\sin \alpha = 0$  ja seega ka  $F_L = 0$ .

Kui  $v$ - ja  $B$ -vektorite vahel on suvaline nurk, siis võime laengukandja kiiruse lahutada kaheks komponendiks:  $B$ -vektoriga ristuvaks  $v_r$  ja  $B$ -vektoriga paralleelseks  $v_p$ . Ristuva komponendi olemasolu põhjustab laengukandja täiendava ringjoonelise liikumise ümber magnetvälja suuna. Sellega kaasneb laengukandja liikumine kiirusega  $v_p$  piki magnetvälja suunda. Tulemusena liigub laengukandja mööda kruvijoont (ruumilist spiraali). Nii liiguvad näiteks kosmilise kiiruse laetud osakesed Maa ionosfääris piki spiraale, mille telgedeks on Maa magnetvälja jõujooned. Pannes kosmilise kiiruse osakesed ümber Maa spiraalima, kaitseb Maa magnetväli otsese kosmilise kiiruse eest kõike elusat Maa peal. Ilma magnetväljata ja sellest põhjustatud Lorentzi jõuta poleks elu Maal võimalik.

### Küsimusi ja ülesandeid

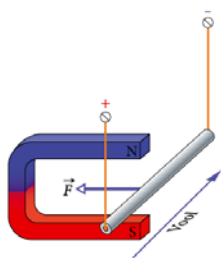
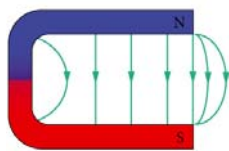
1. Kas Lorentzi jõuga saab laetud osakesi kiirendada?
2. Tehke joonis, mis selgitaks Lorentzi jõu toimimist laengukandjale kesktõmbekiirendust andva jõuna.
3. Kas kaks ühesuguse kiirusega paralleelselt liikuvat elektroni mõjutavad teineteist magnetjõuga?
4. Lähtudes Newtoni II seadusest tuletage valem, mis seoks magnetväljas ringjoonelisel liikuva laetud osakese nurkkiirust  $\omega = 2\pi f = v/r$  magnetinduksiooniga  $B$ .
5. Elektron liigub magnetväljas ringorbiidil ja teeb miljard pööret sekundis. Elektroni mass on  $9,1 \cdot 10^{-31}$  kg ja laeng  $1,6 \cdot 10^{-19}$  C. Kui suur on magnetinduksioon?

## STOP

6. Elektromagnetväljaks nimetatakse elektromagnetilist vastastikmõju vahendavat välja, mille piirjuhtudeks on elektriväli ja magnetväli.
7. Elektromagnetilise induktsiooni nähtuseks nimetatakse elektrivälja tekkimist magnetvälja muutumisel.
8. Laengut  $q$  omavale ja kiirusega  $v$  liikuvale osakesele mõjub magnetväljas induktsiooniga  $B$  Lorentzi jõud  $F_L = q v B \sin \alpha$ , kus  $\alpha$  on nurk osakese liikumisuuna ja magnetvälja suuna vahel.
9. Lorentzi jõud on suunatud alati risti nii liikumise suunaga kui ka magnetvälja suunaga.

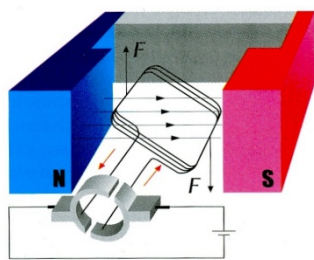
## 2.2. Pööriselektriväli ja induktsiooni elektromotoorjõud

### 2.2.1. Induktsioonivool ja pööriselektriväli

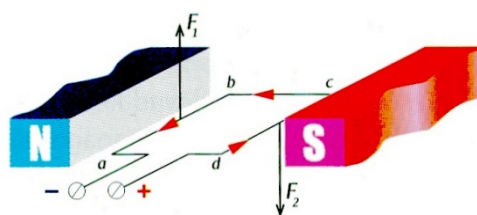


Esmane tutvus elektromagnetilise induktsiooni nähtusega on meil tehtud juba põhikooli *Elektriõpetuses*. Seal piirduti aga induktsiooninähtuse kvalitatiivse (ilma valemiteta) käsitleusega. Käesolevas kursuses püüame juba omavahel siduda asjakohaseid füüsikalisi suurusi. *Elektriõpetuses* alustati teema käsitlemisega magnetjõust, mis U-magneti vertikaalses, ülalt alla suunatud magnetväljas (J.37.3) mõjub meist horisontaalselt eemale suunatud voolu sisaldavale juhtmelõigule (J.37.4).

Teades nüüd juba vasaku käe reeglit, veendugem, et see jõud peabki olema suunatud vasakule. Seejärel vaadeldi *Elektriõpetuses* elektrimootori (J.37.6) mähise ühte keerdu, mille meie poole suunatud vooluga lõigus  $ab$  (J.37.7) mõjus juhtmele üles suunatud magnetjõud, sest magnetväli oli suunatud paremale (N→S, J.37.6).



Joonis 37.6. Elektrimootoris on magneti pooluste vahele paigutatud mähisega raam, mis hakkab pöörlema, kui mähises tekitab elektrivool. Elektrivool juhatakse mähisesse läbi poolrõngaste vastu surutud harjade.



Joonis 37.7. Magnetväljas asuva vooluga juhtmekeeru eri külgedele mõjuvad vastassuunalised jõud.

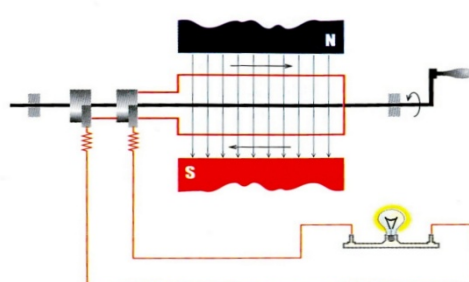
Keeru lõikudele  $ab$  ja  $dc$  mõjuvad jõud panid mootori võlli päripäeva pöörlema.

Lõpuks asuti *Elektriõpetuses* uurima elektrivoolugeneraatorit, mille korral võlli pööras mehaaniline välisjõud ning magnetväljas liikuvaid juhtmelõike sisaldavas mähises tekkis selle tulemusena induktsioonivool. *Elektriõpetuses* aga ei täpsustatud veel induktsioonivoolu suunda ega käsitletud voolutugevust mõjutavaid suurusi.

Meie oleme seni vaadelnud meist eemale kulgeva vooluga juhtmele alt üles suunatud magnetväljas mõjuvat, paremale suunatud magnetjõudu (J.4.4.2). Kohandame nüüd oma käsitlust elektrimootori kirjeldusega *Elektriõpetuses* (J.37.7) ning asume uurima mootori mähisekeeru lõiku  $ab$ , mis generaatorina toimivas mootoris liigub ülespoole

mitte enam magnetjõu vaid masina võlli päripäeva pöörava välisjõu toimel.

Laengukandjad juhtmelõigud  $ab$  liiguvad koos juhtmega. Magnetväljas liikuvatele laetud osakestele mõjub aga teatavasti Lorentzi jõud, mis positiivsetele



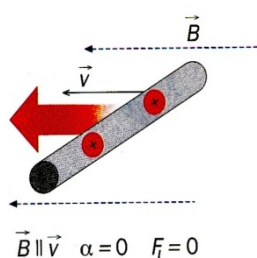
Joonis 38.2. Vahelduvvoolu-generaatoris pannakse mähise raam magnetväljas pöörlema ning raami mähises ja sellega ühendatud juhis tekib induktsoonivool.

laengukandjatele rakendub vasaku käe reegli kohaselt “meist eemale” ehk suunas  $a \rightarrow b$  (vajalik on lisajoonis, millel lõigu  $ab$  juures on näha tõstetud vasak käsi, peopesaga vasakule ning põidlaga tahapoole; on näidatud positiivsed laengukandjad ja nende liikumise suund, vt. J.1.6 ja 1.7).

Analoogiliselt mõjub juhtmelõigud  $cd$  positiivse laengu kandjatele jõud suunas  $c \rightarrow d$  ehk “meie poole”. Järelikult hakkavad positiivsed laengukandjad vaadeldavas juhtmekeerus Lorentzi jõu mõjul liikuma suunas  $a \rightarrow b \rightarrow c \rightarrow d$ . Juhtmekeeru otste  $a$  ja  $d$  ühendamisel moodustub vooluring, milles keeru pööramise tulemusena kulgeb elektrivool. Juhtme liikumine magnetväljas tekitab juhtmes induktsoonivoolu, mille suund on vastupidine mootori korral toiteallika poolt tekitatud voolule. Nende kahe voolu vastassuunalisuses juhtmelõigu sama liikumissuuna korral avaldub Lenzi reegel, millega me hiljem (p.2.5.1) tegeleme pikemalt. Samas ei tohi unustada, et mootori korral on uuritav mähisekeerd tarviti, generaatoris aga vooluallika rollis.

Olgu öeldud, et nii sellel (lisajoonis) kui ka kõigil järgnevatel joonistel on jämeda noolega tähistatud juhtmelõigu liikumise suund. Samuti uurime nii siin kui ka edaspidi positiivsete laengukandjate liikumist, ehkki tegelikult on metalljuhtmes laengukandjateks negatiivsed juhtivuselektronid. Niisugune lihtsustus on põhjendatud, sest voolu suund ühtib voolu tekitava elektrivälja suunaga ega sõltu laengukandjate märgist (p. 1.2.6).

Voolu uuritavas mähisekeerus võib vaadelda tingituna elektriväljast, mille jõujooned on kontuuri  $abcd$  suunalised kinnised jooned. Meenutagem siinkohal *FLA* (Füüsikalise looduskäsitluse aluste) kursust, mida alustasime tõdemusest, et iga vaatleja loob füüsikalise maailmapildi omaenda aistingute või mõõtmistulemuste põhjal. Kui vaatleja täheldab elektrivoolu olemasolu ning teab, et vool on tingitud samas suunas toimivast elektriväljast, siis on vaatleja registreerinud ka elektrivälja. Selle elektrivälja tekkepõhjuseid võib vaatleja edaspidi uurida, kuid tal pole põhjust kahelda välja olemasolus. Magnetvälja muutumisel tekkiva elektrivälja suhtes pole enam rakendatav potentsiaali mõiste. Meil ei ole ju mingit alust eelistada suletud kontuuri mingit kindlat punkti teistele ja väita, et just selle punkti potentsiaal on kõrgem kui mõnel teisel punktil. Tekkiv elektrivälja ei ole potentsiaalne, tema jõujooned on alguse ja lõputa kinnised jooned ehk pöörised. Seetõttu nimetatakse niisugust elektrivälja **pööriselektriväljaks**.



J. 1.5. koos juhtmega magnetvälja suunas liikuvatele laengukandjatele magnetjõud ei mõju.

On märkimisväärne, et kirjeldatud juhul liigub juhtmelõik homogeenes magnetväljas.  $B$ -vektor on liikumistee eri punktides ühesugune nii suuruselt kui suunalt. Miks me siis ikkagi võime rääkida magnetvälja muutumisest juhtmelõigu asukohas? Me teeme seda põhjusel, et juhe liigub magnetvälja tekitaja suhtes risti välja suunaga ning lõikab magnetvälja jõujooni. Näiteks liikumisel magnetvälja suunas juhe jõujooni ei lõika (J. 1.5). Sellisel liikumisel laengu-

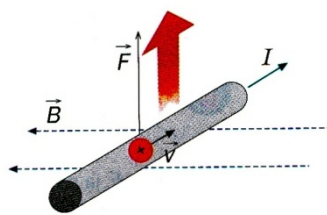
kandjatele magnetjõudu ei mõju, kuna Lorentzi jõu valemis 2.1

$$F_L = q v B \sin \alpha$$

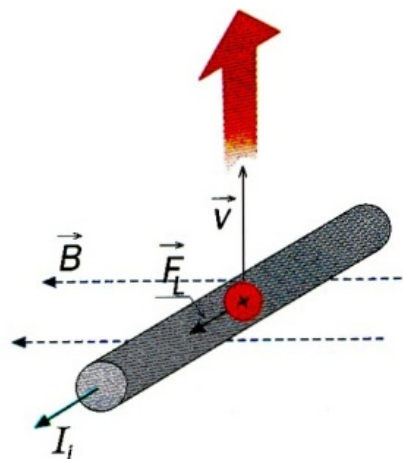
on nurk  $\alpha$  võrdne nulliga. Järelikult ei teki sel juhul ka induksioonivoolu.

### 2.2.2. Magnetväljas liikuva juhtmelõigu otstel tekkiv pinge

Juba põhikooli *Elektriõpetuses* liiguti magnetjõu tekkimise juurest elektromagnetilise induksioonini (p.2.2.1). Seega tasub meil neid kahte nähtust omavahel võrrelda ka siin. Vaatleme veelkord paremale suunatud magnetväljas asetsevat horisontaalset juhtmelõiku (elektrimootori mähise osa *ab*, J.1.6)



J. 1.6. Vooluga juhe hakkab magnetväljas liikuma.



J. 1.7. Juhtmes, mis liigub magnetväljas, tekib vool.

Kui me tekitame selles juhtmes meie poole suunatud voolu  $I$ , siis hakkab juhtmele Ampere'i seaduse ja vasaku käe reegli kohaselt mõjuma ülespoole suunatud magnetjõud. Võimaluse korral hakkab juhe selles suunas liikuma. Kirjeldame nähtust kokkuvõtlikult kujul:

**elektrivool + magnetväli  $\rightarrow$  liikumine.**

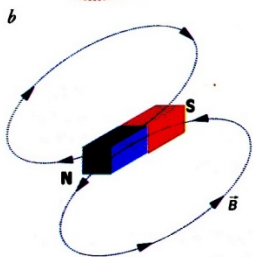
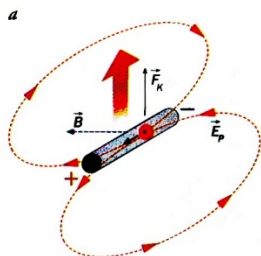
Joonisel 1.7 on aga näha, mis juhtub siis, kui me niisugust magnetväljas asetsevat juhet ise ülespoole liigutame. Laengukandjad juhtmes liiguvad koos juhtmega üles ja neile hakkab mõjuma meist eemale suunatud Lorentzi jõud  $F_L$ . Juhtmes tekib induksioonivool  $I_{ind}$ . Nähtust võib kokkuvõtlikult kirjeldada kujul:

**magnetväli + liikumine  $\rightarrow$  elektrivool.**

Niisiis on elektromagnetilise induksiooni näol tegemist omalaadse pöördprotsessiga magnetjõu tekkimisele.

Pööriselektrivälja jõujooned on kinnised, alguse ja lõputa jooned, nii nagu magnetvälja jõujoonedki. Kõrvaljõu  $F_k$  mõjul liikuvat juhtmelõiku ümbritseb ja läbib pööriselektriväli  $E$  samamoodi nagu magnetväli  $B$  ümbritseb ja läbib püsिमagnetit (J.1.8).

Vaatleme nüüd isoleeritud juhtmelõiku, mis liigub kiirusega  $v$  magnetväljaga ristavas suunas ning on ka ise risti selle suunaga (J. 1. 9). Koos juhtmega üles liikuvatele positiivsetele laengukandjatele (laenguga  $q$ ) mõjub Lorentzi jõud  $F_L = q v B$ . Laengukandjad liiguvad selle magnetjõu mõjul piki juhet tahapoole, aga juhtmest välja nad ei pääse. Juhtme otsad laaduvad erimärgiliselt ja juhtmes tekib ettepoole suunatud elektriväli. Laengukandjate liikumine kestab seni, kuni neile mõjuv



J. 1.8. a – liikuva juhtme pööriselektrivälja  $E_p$ ; b – püsimagneti magnetvälja  $B$ .

elektrijõud  $F_e = q E$  (valem 1.11) magnetjõu tasakaalustab. Vastav elektrivälja tugevus  $E$  on väljendatav pinge kaudu (valem 1.26)

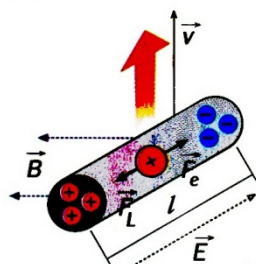
$$E = \frac{U}{l}$$

kus  $l$  on juhtmelõigu pikkus (valemi 1.26 algkujus tähis  $d$ ). Tasakaalu tingimuse  $F_L = F_e$  võib siis esitada kujul

$$q v B = q \frac{U}{l},$$

millest tulenevalt võime juhtmelõigu otstele indutseeritava pinge avaldada kujul

$$U = v l B. \quad (2.2)$$



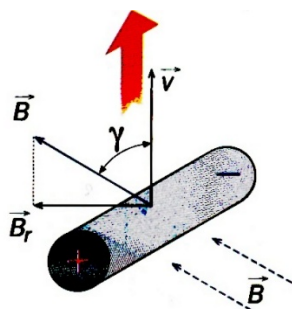
J. 1.9. Elektrijõud  $F_e$  ja magnetjõud  $F_L$  tasakaal liikuvast juhtmelõigus.

Juhul kui juhtme liikumissuund moodustab magnetväljaga mingi nurga  $\alpha$ , mis ei ole täisnurk, siis põhjustab Lorentzi jõudu vaid liikumissuunaga ristuv  $B$ -vektori komponent

$$B_r = B \sin \alpha \quad (J. 1.10)$$

Liikumisel magnetvälja sihis ju teatavasti magnetjõudu ei teki (p. 2.1.3). Indutseeritud pinge avaldis võtab kuju

$$U = v l B_r = v l B \sin \alpha, \quad (2.3)$$



J. 1.10. Pinge tekkimine juhtmes, mille liikumissuund moodustab magnetväljaga nurga  $\gamma$ .

### Näide 2.2.

Tartu-Tallinna kiirrong sõidab kiirusega 108 km/h piki magnetilist meridiaani kulgeval teelõigul. Kui suur pinge tekib elektromagnetilise induktsiooni tõttu vaguniratta telje otstele? Rööbaste vahekaugus on 1524 mm ja Maa magnetinduktsiooni vertikaalkomponent Eestis 48  $\mu\text{T}$ .

**Lahendus.** Rattatelg on vaadeldav kui juhtmelõik, mis on risti nii oma liikumissuuna kui ka magnetinduktsiooni vertikaalkomponendiga  $B_v$ , seejuures

$$B_v = B_r.$$

**Antud:**

$$v = 108 \text{ km/h} = 30 \text{ m/s}$$

$$U = v l B_r$$

$$l = 1524 \text{ mm} = 1,524 \text{ m}$$

$$B_v = 48 \mu\text{T} = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ T}$$

$$U = ? \quad U = 30 \text{ m/s} \cdot 1,524 \text{ m} \cdot 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ T} = 2,2 \cdot 10^{-3} \text{ V} = 2,2 \text{ mV}.$$

**Vastus.** Telje otste vahel tekib pinge 2,2 mV. Praktikas jäetakse see pinge tema väiksuse tõttu arvestamata.

### 2.2.3. Induktsiooni elektromotoorjõud

Eelmises punktis jõudsime magnetvälja tekitaja suhtes liikuvast isoleeritud juhtme-  
lõigus indutseeritud pinge avaldiseni. Seejuures tuginesime oma teadmistele Lorentzi  
jõu kohta. Elektromagnetilise induktsiooni avastajal Michael Faraday’l neid teadmisi  
ei olnud. Faraday uuris kinnisi vooluringe, määrates voolutugevust magnetnõela  
kõrvalekaldumise järgi tasakaaluasendist (Oersted katse, p. 1.4.2). Kuid Faraday  
mõistis, et laengukandjate liikumapanemiseks tuleb teha tööd. Kirjeldamaks  
laengukandjate liikumapanemisel kinnises kontuuris tehtavat tööd hakkas Faraday  
kasutama elektromotoorjõu mõistet (*electromotive force* – EMF, vastav eestikeelne  
lühend EMJ).

**Elektromotoorjõud** (tähis  $\mathcal{E}$  ehk *suur ümmargune E*) iseloomustab üldjuhul  
vooluallikas toimivaid mitteelektrilisi jõude ehk **kõrvaljõude**. Elektrivoolu  
püsimiseks keemilist vooluallikat (patareid või akut) sisaldavas vooluringis tuleb  
vooluallika positiivselt pooluselt ehk plussklemmilt läbi vooluringi miinusklennile  
jõudnud positiivsed laengukandjad viia läbi vooluallika uuesti plussklemmide.  
Järelikult tuleb neid nihutada vastupidiselt elektrijõu suunale. Seda suudavad teha  
ainult kõrvaljõud. **Elektromotoorjõud** on võrdne kõrvaljõudude tööga  $A_k$  ühikulise  
suurusega laengu ühekordsel läbiviimisel kogu vooluringist:

$$\mathcal{E} = \frac{A_k}{q} \quad (2.4)$$

Keemilise vooluallika korral teeb kõrvaljõud selle töö ära vooluallika sees, tekitades  
vooluallika pooluste vahel elektrivälja, mistõttu laengukandjad saavad väljaspool  
vooluallikat ehk vooluringi välisosas liikuda juba elektrijõu mõjul. See energia, mille  
arvel laengukandjad suunatud liikumist takistavate jõudude kiuste kogu vooluringi  
läbivad, tuleb lõppkokkuvõttes kõrvaljõult. Keemilise vooluallika korral on  
laengukandjate liikumine vahetult kõrvaljõu toimel vooluallika sees ja elektrijõust  
põhjustatud laengukandjate liikumine vooluringi välisosas ruumiliselt lahutatud.  
Seepärast võime EMJ käsitleda kui suurimat pinget, mida keemiline vooluallikas on  
suuteline oma klemmidele tekitama. Elektromagnetilise induktsiooni korral võib aga  
üksainus kinnine juhtmerõngas olla üheaegselt nii vooluallika kui vooluringi välisosas  
rollis. Kõrvaljõu ja elektrijõu toimete ruumilist lahutatust ei ole ning potentsiaali ja  
pinge mõistetel puudub sisu, kui tõlgendada pinget vaid elektrijõudude tööna  
ühikulise laengu viimisel ühest punktist teise (p.1.7.4). See ongi peapõhjuseks, miks  
jätkuvalt kasutatakse kõlaliselt mõnevõrra eksitavat mõistet *elektromotoorjõud*. EMJ  
pole ju jõud ja tema ühikuks pole njuuton. EMJ on töö ja laengu suhe ehk pinge ja  
tema ühikuks on volt. Kuid nii öeldes peame mõistma pinge all kõigi liikumapanevate  
jõudude (ka kõrvaljõudude) tööd ühikulise laengu nihutamisel. Olles selles kokku  
leppinud, võime EMJ käsitleda kui kõikide pingete summat kinnises vooluringis.

Seni vaadeldud näidetes on kõrvaljõuks just seesama jõud, mis liigutab juhet või  
pöörab generaatori võlli magnetväljas (vt kommentaari J.1.8 juures).

Mingi juhtmelõigu liigutamisel magnetväljas tuleb teha tööd mitte ainult mehaanilise  
hõõrdejõu ületamiseks, vaid ka laengukandjate liikumapanemiseks selle juhtmega  
ühendatud vooluringis, juhul kui see vooluring on olemas. Elektromagnetilist



induktsiooni võib vaadelda kui omalaadset „lisahõõrdumist“ magnetväljas. Kui induktsioonivool viib positiivse ühikulise laengu üks kord läbi tekkiva vooluringi, siis kõrvaljõu poolt selleks tehtavat tööd nimetatakse induktsiooni elektromotoorjõuks. Ülaltoodu põhjal võib induktsiooni elektromotoorjõudu tõlgendada ka kui pinget, mis tekib katkestuskohas, kui me kasutame elektromagnetilisel induktsioonil põhinevat vooluallikat ja katkestame kuskil vooluringi. Lihtsaimaks selliseks vooluallikaks ongi liikumisel magnetvälja jõujooni lõikav juhtmetükk (p.2.2.2)

### Küsimusi ja ülesandeid

1. Töötava elektrimootori korral liiguvad mähise juhtmekeerud magnetväljas. Järelkult peaks neis indutseeritama pinge, mis mõjub mähist läbivale voolule. Kas vool mähises muutub, kui rootor hakkab pöörlema?
2. Kui vastus eelmisele küsimusele on jaatav, kas siis induktsiooni elektromotoorjõud soodustab või takistab mootori toiteallika tööd?
3. Pooluste läheduses on Maa magnetväli peaaegu vertikaalne (risti Maa pinnaga, vt. p.1.7.6). Seetõttu lõikab polaarpiirkonnas lendava lennuki metallkere Maa magnetvälja jõujooni. Lennukikeret võiks vaadelda magnetväljas liikuva juhtmelõiguna, mille otstel tekib elektromagnetilise induktsiooni teel pinge. Kas suurem pinge indutseeritakse lennuki tiivaotste vahel või lennuki nina ja saba vahel?
4. Kas piki ekvaatorit lendava lennuki kere mingite osade vahel võib elektromagnetilise induktsiooni vahendusel samuti tekkida pinge? Kui jah, siis millised need kere osad on?

### STOP

1. Jõud, mis nihutab juhet magnetväljas, paneb elektromagnetilise induktsiooni teel laengukandjad juhtmes liikuma. Kui liikuv juhe on osa vooluahelast, siis esineb selles ahelas induktsioonivool.
2. Pööriselektiväljaks nimetatakse elektrivälja, mille jõujooned on kinnised jooned ehk pöörisjooned. Selline elektriväli tekib magnetvälja muutumisel.
3. Magnetväljas liikuva juhtmelõigu otstel tekkinud pinge avaldub kujul  $U = v l B \sin \alpha$ , kus  $v$  on juhtmelõigu liikumise kiirus magnetvälja tekitaja suhtes,  $B$  – magnetinduktsioon,  $l$  – juhtmelõigu pikkus ja  $\alpha$  – nurk liikumise suuna ning magnetvälja suuna vahel.
4. Induktsiooni elektromotoorjõuks nimetatakse tööd, mida juhet liigutav kõrvaljõud teeb ühikulise positiivse laengu ühekordseks läbiviimiseks vooluringist.

### 2.3. Faraday katsed

Suure avastuse sünnihetk on teaduse ajaloos harva teada kuupäevalise täpsusega. Elektromagnetilise induktsiooni avastamine kuulub aga nende harvade erandite hulka. See on nii tänu avastuse autori Michael Faraday täpsetele ülestähendustele. 29. augustil 1831 kirjutas Faraday laboripäevikusse, et raudsüdamikule mähitud juhtmepooli ühendamine vooluallikaga kutsub esile lühiajalise voolu ka teises, samale südamikule keritud poolis. Sama aasta 17. oktoobril tehtud sissekanne kõneleb aga

voolu registreerimisest poolis, millele mõjuvat magnetvälja püsimagneti nihutamise teel muudeti.

Juba aastal 1822, kaks aastat pärast elektrivoolu magnetilise toime avastamist Oersted'i ja Ampere'i poolt, tuli Faraday mõttele, et see nähtus peaks esinema ka „tagurpidi“. Kui elektrivool tekitab magnetvälja, kas ei võiks siis magnetvälja abil tekitada elektrivoolu? Aastal 1825 asus Faraday seda oletust katseliselt kontrollima, kuid ei suutnud induksioonivoolu avastada. Faraday ei mõistnud siis veel, et elektrivälja tekitab mitte magnetväli ise, vaid magnetvälja muutumine. Pealegi ei olnud Faraday käsutuses piisavalt tundlikku mõõteriista. Voolu mõõtis Faraday magnetnõela pöördumise järgi vooluga juhtme läheduses (Oersted'i katse).

1831. aasta suvel asus Faraday taas korraldama samalaadseid uuringuid. Nüüd aga tugevdas ta pooli magnetvälja raudsüdamikuga. Magnetvälja järsk muutmine tekitas samal südamikul paiknevas teises poolis vooluimpulsi. Elektromagnetiline induksioon oli avastatud.

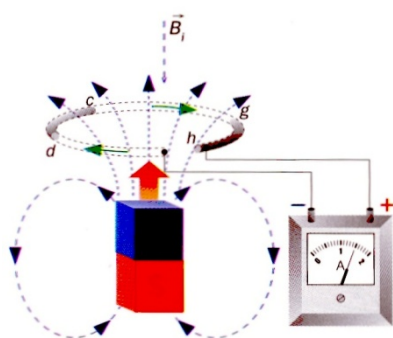
Faraday tegi elektromagnetilise induksiooni uurimisel väga palju katseid. Kui kasutada on tester või mõni muu voolutundlik mõõteriist, siis võib neid katseid vastava huvi olemasolu korral teostada ka kodustes tingimustes. Faraday katseid võiks jagada kolme gruppi, mida järgnevalt ka eraldi vaatleme.

### 2.3.1. Püsimagneti liikumine juhtme suhtes



Põhiliseks katsevahendiks elektromagnetilise induksiooni uurimisel on torukujulisele isoleerivale südamikule keritud juhtmepool. Kõigis allpool kirjeldatud katsetes on vaja koguni kahte niisugust pooli. Pooli võib valmistada ka ise, omades sobiliku jämedusega (0,3-0,5 mm) vasktraati. Sellist traati võib osta enam-vähem suvalisest elektridetailide

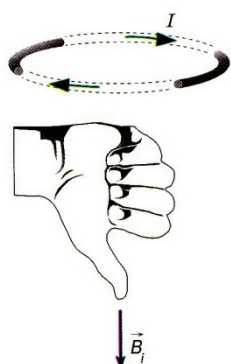
poest. Traat tuleb tihedalt kerida silindrilisele papist või plastikust torukesele. Mähis võiks olla 2-3 cm pikkune ja sisaldada ülestikku vähemalt 5 kihti kõrvuti asetsevad juhtmekeerde. Et mähis traadi elastsuse tõttu laiali ei laguneks, on soovitatav iga kiht pärast kerimise lõpetamist kleepribaga fikseerida. Muutuv magnetväli kutsub poolis esile induksioonivoolu, mida võib registreerida tundliku ampermeetri abil. Magnetvälja on kõige lihtsam muuta, torgates pikergust püsimagnetit pooli sisse.



J. 1.11. Püsimagneti lähendamisel juhtmekeerule tekib selles keerus vool

Kirjeldatud katse on põhimõtteliselt teostatav ka üheainsa juhtmekeeruga. Niisugusel juhul on tekkiv induksioonivool aga niivõrd nõrk, et seda on raske mõõta. Pooli korral liituvad üksikutes keerdudes tekkinud elektromotoorjõud, sest keerud toimivad jadamisi ühendatud vooluallikatena. Seetõttu saame ka mõõtmiseks piisavalt tugeva induksioonivoolu. Voolu indutseerimist üksikus juhtmekeerus selgitab joonis 1.11. Näiteks liigub juhtmelõik  $dc$  täpselt samamoodi paremale suunatud magnetväljas allapoole nagu lõik  $dc$  joonisel 1.4. Lõigus  $dc$  indutseeritakse selle tagajärjel meie poole ( $c \rightarrow d$ ) suunatud vool. Seevastu lõigus  $gh$  kulgeb

induktsioonivool meist eemale ( $g \rightarrow h$ ) ja juhtmekeerus tervikuna (ülalt vaadates) päripäeva.

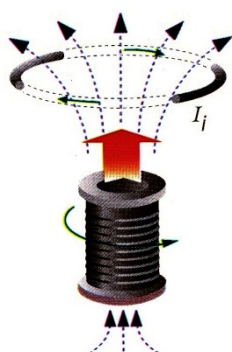


J. 1.12. Voolu magnetvälja suuna määramine

Parema käe rusikareegli (J. 1.12) abil võib veenduda selles, et induktsioonivoolu magnetväli on joonisel suunatud ülalt alla, niisiis vastupidiselt juhtmekeerus tugevnevale püsिमagneti väljale. Induktsioonivool takistab sellesama magnetvälja kasvu, mis voolu esile kutsus. Tasub ka rõhutada, et induktsioonivool on olemas vaid seni, kuni juhtmekeerd püsिमagneti jõujoonte suhtes liigub. Kui lõpeb liikumine, siis saab laengukandjatele mõjuv Lorentzi jõud nulliks, sest  $v = 0$ .

### 2.3.2. Vooluga juhtme liikumine teise juhtme suhtes

Magnetvälja põhjustajana võib püsिमagneti asemel kasutada ka vooluga pooli.



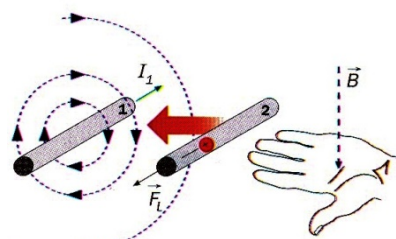
J. 1.13. Vooluga pooli nihutamisel juhtmekeeru suhtes tekib keerus induktsioonivool

Kui me asendame joonisel 1.11 kujutatud katses püsिमagneti pooliga (J. 1.13), siis tekib ülemises juhtmekeerus induktsioonivool täpselt samamoodi nagu püsिमagneti korral. Nii on see muidugi eeldusel, et juhtmekeerd lähendatakse poolile ja pooli magnetväli on suunatud alt üles. Pooli magnetväljal on selline suund juhul, kui vool pooli keerdudes kulgeb ülalt vaadates vastupäeva (meie silme ees vasakult paremale). Induktsioonivool ise on kirjeldatavas katses teatavasti suunatud päripäeva (külgsuunas paremalt vasakule). Seega on induktsioonivoolu suund vastupidine voolu suunale indutseerivat magnetvälja tekitavas poolis. Püüdkem iseseisvalt veenduda selles, et juhtmekeeru kaugenemisel poolist on ka induktsioonivool suunatud vastupäeva. Mõlemad vaadeldavad

voolud on sel juhul samasuunalised.

Katsetamisel südamikuta poolidega võib induktsioonivool osutada liiga nõrgaks. Sel juhul võib voolu tugevdada, paigutades eelnevalt poolide sisse raudsüdamikud (näiteks suured raudpoldid). Rauas on magnetinduktsioon palju suurem kui õhus. Seetõttu on suuremad ka magnetinduktsiooni muutused, millest omakorda sõltub induktsioonivoolu tugevus.

Analoogilised nähtused leiavad aset ka kahe paralleelse sirgjuhtme korral, millest

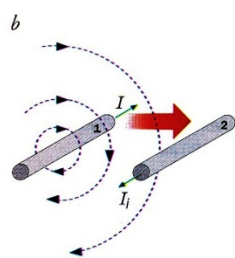
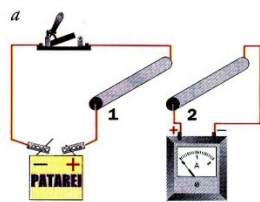


J. 1.14. Vooluga juhtme (1) lähendamisel teisele juhtmele (2) tekib selles juhtmes induktsioonivool

ühes voolab alalisvool (J. 1.14). Kui me nihutame üht juhet teisele lähemale, siis lõikavad vooluga juhtme 1 magnetvälja jõujooned vooluta juhet 2. Vasaku käe reegli kohaselt mõjub positiivsetele laengukandjatele juhtmes 2 meie poole suunatud Lorentzi jõud. Juhtmes 2 tekib seeläbi induktsioonivool, mille suund on vastupidine juhtmes 1 kulgeva voolu suhtes. See arutus jääb kahjuks vaid teoreetiliseks, sest üksiku voolujuhtme magnetväli on väga nõrk ja tekkivat induktsioonivoolu on väga raske mõõta.

### 2.3.3. Voolu muutumine juhtmes

Kõigil seni vaadeldud juhtudel põhjustab elektromagnetilist induksiooni puhtmehaaniline liikumine. Uuritav juhe liigub magnetvälja tekitaja suhtes. See aga ei pea alati nii olema. Magnetvälja võib muuta ka seda välja tekitava voolu muutmise teel juhtmes, nii et juhtmed jäävad paigale. Teatavasti toimis just nii ka Faraday oma esimeses katses.



J. 1.15. Voolu sisselülitamine ühes juhtmes indutseerib vastupidise suunaga voolu naaberjuhtmes:  
a – katseade;  
b – juhtme 1 magnetväli levib juhtme 2 poole

Vaatleme näitena jällegi kahte paralleelset sirgjuhet, millest üks on läbi lüliti ühendatud vooluallikaga (J. 1.15, a). Lüliti sulgemisel suureneb voolutugevus juhtmes nullist kuni mingi lõppväärtuseni  $I$ . Vastavalt kasvab ka selle voolu magnetväli. Magnetvälja tugevnemine on aga samaväärne lähenemisega välja tekitavale juhtmele. Me teame ju (valem 1.15, p.1.5.3), et vooluga sirgjuhtme magnetinduksioon on pöördvõrdeline kaugusega sellest juhtmest.

Niisiis mõjub juhtmest 1 tingitud magnetvälja levik juhtme 2 suunas (joon. 1.15, b) laengukandjatele samamoodi nagu juhtme 2 liikumine juhtme 1 poole. Eelmisest alapunktist teame, et seda laadi liikumine indutseerib juhtmes 2 meie poole suunatud voolu (joon.1.14). Voolu sisselülitamine

juhtmes tekitab vastupidise suunaga voolu naaberjuhtmes. Lõpetuseks märkigem, et kõik senised järeldused oleme me teinud, lähtudes teadmistest Lorentzi jõu kohta. Faraday jõudis samade järeldusteni katsetulemusi üldistades.

## STOP

1. Liikuv püsिमagnet tekitab voolu lähedalasuvas juhtmes.
2. Vooluga juhtme liikumine tekitab magnetvälja vahendusel voolu naaberjuhtmes.
3. Voolu muutus juhtmes tekitab vastava magnetvälja muutuse kaudu voolu naaberjuhtmes.

## 2.4. Faraday induksiooniseadus

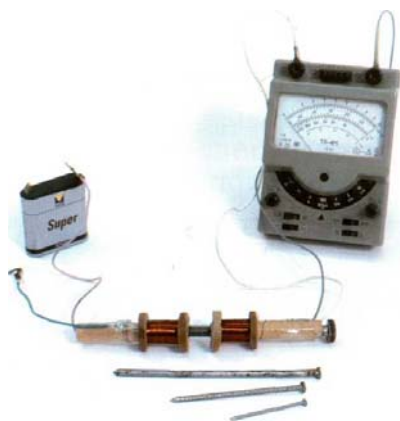
Oleme nüüd päris palju tegelenud pööriselektivälja tekkimisega magnetvälja muutumisel. Aga mis tähendus on üleüldse sõnadel *magnetväli muutub*? Millise füüsikalise suuruse muutumisest on jutt? Elektromagnetilise induksiooni nähtus esineb teatavasti ka homogeenses magnetväljas (p. 2.2.1). Seega ei saa otsitavaks muutuvaks suuruseks olla magnetinduksioon  $B$ . Vajalik suurus tuleb meil alles määratleda. Selleks asume katseliselt uurima, millest sõltub induksiooni elektromotoorjõud.

### 2.4.1. Induksiooni elektromotoorjõudu mõjutavad suurused

#### Katse 2.1.

Paigutame ühisele teljele kaks pooli, mille valmistamist kirjeldati eelmises punktis. Ühendame ühe pooli külge ampermeetri tööitava testri või mingi muu voolutundliku mõõteriista, teises poolis aga tekitame taskulambipatarei abil voolu.

Teise pooli vooluringi sulgemisel täheldame voolu ka esimeses poolis. Seda voolu saame tugevdada, paigutades mõlemasse pooli raudsüdamikku (naela või poldi). Muudame poolide vahekaugust. Märkame, et poolide väiksema vahekauguse korral on tekkiv induksioonivool tugevam. Seega on tegemist ka suurema elektromotoorjõuga. Teame, et pooli (või püsimagneti) poolt tekitatav magnetinduktsioon suureneb poolile lähenemisel (p.1.6.4).



Mida lähemal on poolid teineteisele, seda rohkem muutub voolu sisse- ja väljalülitamisel teise pooli poolt tekitatav magnetinduktsioon esimese pooli asukohas.

Ühtekokku võime järeldada, et suurem elektromotoorjõud tekib poolis siis, kui magnetinduktsioon pooli asukohas rohkem muutub. Täpsemad mõõtmised näitavad, et induksiooni elektromotoorjõud on võrdeline suuruse  $B$  muutusega. Järelikult on elektromagnetilise induksiooni nähtuse kirjeldamiseks vajalik suurus võrdeline magnetinduktsiooniga  $B$ .

### Katse 2.2.

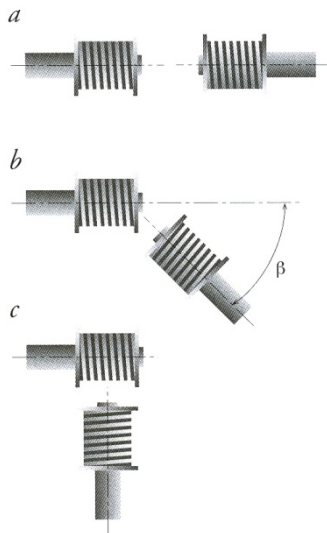
Kasutame neidsamu juhtmepooli koos mõõteriista ja patareiga nagu esimeses katses. Paigutame poolid ühisel teljel otsakuti kokku. Näeme, et voolu tekkimisel teises poolis näitab väga nõrka voolu ka esimese pooli otstel paiknev mõõteriist. Nüüd paigutame poolidesse ühise raudsüdamiku ja kordame katset. Algul kasutame raudsüdamikuna peenikest naela või polti, seejärel aga üha jämedamat. Märkame, et mida suurem on südamiku ristlõikepindala, seda suurem on esimeses poolis tekkiv induksioonivool. Raudsüdamik tugevdab pooli magnetvälja. Piisavalt uue patarei kasutamisel peaks iga kord tekkima sama tugevusega vool. Seega on raudsüdamikus esineval magnetväljal erineva jämedusega südamike korral sama magnetinduktsioon. Tekkiva induksioonivoolu suurenemine igal järgmisel katsel saab olla põhjustatud vaid südamiku ristlõikepindala suurenemisest.

Selgemini öeldes: suureneb see osa esimese pooli üldisest ristlõikepindalast, milles esineb tugevam magnetväli (raudsüdamiku poolt täidetud osa). Magnetväli esimese pooli õhuga täidetud osas on rauaga täidetud osaga võrreldes tühiselt nõrk. Seda tõestab ilma raudsüdamikuta tehtud katse. Võime järeldada, et füüsikaline suurus, mille muutumine on vajalik elektromagnetilise induksiooni tekkimiseks, peab olema (vähemasti ligikaudu) võrdeline pindalaga  $S$ , mida läbivad muutuva magnetvälja jõujooned.

### Katse 2.3.

Paigutame voolutundliku mõõteriistaga ühendatud juhtmepooli lähedusse teise pooli, milles saame taskulambipatarei abil tekitada voolu (J. 1.17). Suurema efekti saamiseks tasub jällegi kasutada poolides raudsüdamikke.

Paigutame poolid nii, et nende telgede vahele jääks mingi nurk  $\beta$ , mida me asume katse käigus muutma. Selgub, et kui poolide teljed ühtivad ja nurk  $\beta$  on null (J.1.17, olukord  $a$ ), siis on tekkiv induksioonivool kõige tugevam. Nullist erineva nurga  $\beta$  korral ( $b$ ) on induksioonivool mõnevõrra nõrgem. Poolide telgede ristseisu korral ( $c$ ) aga ei teki voolu peaaegu üldse. Siin tuleb lisada, et induksioonivoolu täieliku



J. 1.17. Poolide telgede vahelise nurga  $\beta$  muutmine:  
 a)  $\beta = 0$ , b)  $0 < \beta < \pi/2$ ,  
 c)  $\beta = \pi/2$

puudumise saaksime juhul, kui patareiga ühendatava pooli magnetvälja jõujooned kulgeksid ka väljaspool pooli omavahel paralleelselt. Siis ei läbiks nad telgede ristseisu korral üldse esimese pooli keerde. Tegelikult see aga nii ei ole.

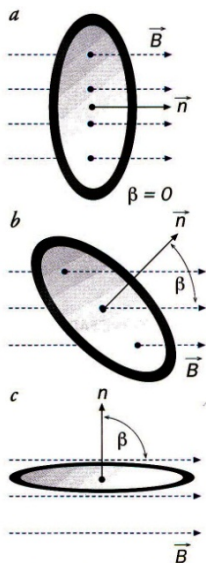
Magnetvälja jõujooned on kinnised jooned. Olles pooli ühest otsast väljunud, pöörduvad nad tagasi ja kulgevad sama pooli teise otsa poole. Seetõttu õnnestub kahe pooli magnetväljade ristseis kõige kindlamalt realiseerida, paigutades ühe pooli teisele risti peale (vt. fotot)

Nagu näeme, sõltub induksioonivool ja järelikult ka induksiooni elektromotoorjõud nurgast  $\beta$  pooli telje ja muutuva magnetvälja suuna vahel. Seda sõltuvust kirjeldav nurgafunktsioon peab olema maksimaalne juhul, kui nurk on null. Ise peab see funktsioon aga nullistuma täisnurga korral. Matemaatikast teame, et selliseks nurgafunktsiooniks on **koosinus**. Pole raske kontrollida, et juhul (a)  $\beta = 0$  ja  $\cos \beta = 1$  ning juhul (c)  $\beta = \pi/2$  ja  $\cos \beta = 0$ .



Pooli teljeks on juhtmekeerdude ühine normaal (keeru tasandiga ristuv sirge). Niisiis peab elektromagnetilise induksiooni esinemisel muutuv suurus olema (vähemasti ligikaudu) võrdeline koosinusega nurgast  $\beta$  juhtmekeeru normaali ja magnetvälja suuna vahel.

## 2.4.2. Magnetvoo mõiste



J. 1.18. Magnetvoo sõltuvus nurgast  $\beta$  magnetvälja suuna (B) ja juhtmekeeru pinna normaali (n) vahel:  
 a)  $\beta = 0$ , b)  $0 < \beta < \pi/2$ ,  
 c)  $\beta = \pi/2$

Ülalkirjeldatud katsete tulemuste kokkuvõtlikuks esitamiseks on võetud kasutusele füüsikaline suurus nimega magnetvoo. **Magnetvoo  $\Phi$  näitab, millisel määral läbivad magnetvälja jõujooned vaadeldavat pinda selle pinna suuruse ja asendi tõttu magnetväljas.** Piltlikult öeldes näitab magnetvoo pinda läbivate jõujoonte arvu. Loomulikult on see arv eelkõige määratud jõujoonte tihedusega, mida teatavasti iseloomustab magnetinduksioon. Mingit kindlat pinda läbib joonte suurema tiheduse korral rohkem jõujooni. Magnetvoo läbi vaadeldava pinna on võrdeline magnetinduksiooniga  $B$ . Samas läheb pinnast rohkem jõujooni läbi ka siis, kui pind ise on suurem ning jääb seetõttu jõujoontele rohkem „ette“. Magnetvoo on võrdeline pinna pindalaga  $S$ . Jõujoonte kindla tiheduse ( $B$ ) ja pinna pindala ( $S$ ) korral sõltub pinda läbiv magnetvoo  $B$ -vektori suunast pinna suhtes. Kui pind on  $B$ -vektoriga risti ( $\beta = 0$ ), siis läbib pinda suurim arv jõujooni (J. 1.18, a). Sel korral on tegemist suurima magnetvoo. Kui nurk  $\beta$   $B$ -vektori ja pinna normaali vahel erineb nullist, siis on pinda läbivate jõujoonte arv väiksem (J. 1.18, b). Seega on väiksem ka magnetvoo. Kui aga nurk  $\beta$  on täisnurk ( $\beta$

$= \pi/2$ ), siis on magnetvälja jõujooned pinnaga paralleelsed. Mitte ükski jõujoon ei läbi pinda. Magnetvoog on null (J. 1.18, c). Magnetvoog on maksimaalne nulliga võrduva nurga  $\beta$  korral ning saab ise nulliks, kui see nurk on täisnurk. Seega on magnetvoog võrdeline koosinusega nurgast  $\beta$  magnetvälja suuna ja pinna normaali vahel.

Kõik ülaltoodu võib kokku võtta magnetvoo definitsioonivalemissse

$$\Phi = B S \cos \beta. \quad (2.5)$$

Magnetvoog on skalaarne (suunata), kuid algebraline suurus. Magnetvoo algebralisis tähendab seda, et sõltuvalt magnetvälja suunast võib voog olla nii positiivne kui ka negatiivne suurus. Magnetvoo mõõtühikuks SI-süsteemis on üks veeber (1 Wb).

**Üks veeber** on magnetvoog, mis läbib  $1 \text{ m}^2$  suurust magnetvälja suunaga ristuvat pinda, kui välja magnetinduksioon on 1 T. Ühe veebri defineerimisel kasutatakse niisiis valemi 2.7 erijuhtu, mil  $\beta = 0$ , seega  $\cos \beta = 1$  ja

$$\Phi = B S. \quad (2.6)$$

Vastavalt

$$1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot 1 \text{ m}^2.$$

### 2.4.3. Faraday induktsiooniseadus

Induktsioonivool ja ka vastav elektromotoorjõud  $\mathcal{E}_i$  on seda suuremad, mida kiiremini (s.t mida lühema ajavahemiku  $\Delta t$  jooksul) magnetvälja muutus toimub.

**Kasutades magnetvoo mõistet, võib kõigi Faraday katsete tulemuse üldistada kujul**

$$\mathcal{E}_i = -k \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

**mis näitab, et induktsiooni elektromotoorjõud on võrdeline magnetvoo muutumise kiirusega.** See ongi elektromagnetilise induktsiooni põhiseadus ehk lihtsalt **Faraday induktsiooniseadus**. Mõistagi on jutt magnetvoost läbi pinna, mis on piiratud vaadeldava juhtmekeeruga. Pooli korral liituvad üksikutes keerdudes tekkivad elektromotoorjõud. Siis tuleb magnetvoo all mõista voogu läbi summaarse keerdudest piiratud pinna ning arvestada ka keerdude magnetväljade vastastikust mõju. Miinusmärk näitab toimuva muutuse suunda.

Võrdetegur  $k$  sõltub mõõtühikute süsteemi valikust. SI-s  $k = 1$  ja järelikult

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta \Phi}{\Delta t}. \quad (2.7)$$

SI korral ei ole induktsiooni elektromotoorjõud mitte ainult võrdeline vaid lausa arvuliselt võrdne magnetvoo muutumise kiirusega. Ühikusüsteem SI ongi loodud nõnda, et elektromagnetilise induktsiooni seaduses võrdetegur puuduks. Just seetõttu ilmub selles süsteemis Coulomb'i seadusesse ühikut omav võrdetegur.

Kasutades Faraday induktsiooniseadust kujul 2.9, võime magnetvoo ühiku 1 Wb defineerida seosest

$$\Delta \Phi = -\mathcal{E}_i \Delta t.$$

Vastavalt on **üks veeber** selline magnetvoo muut, mis ühe sekundi jooksul toimudes tekitab induktsiooni elektromotoorjõu üks volt ( $1 \text{ Wb} = 1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}$ ).

### Näide 2.3.

Papptorukesele keriti 400 keerust koosnev juhtmepool. Pooli otste külge ühendati voltmeetrina toimiv multimeeter ehk tester, mille takistuse võib lugeda pooli takistusega võrreldes lõpmata suureks. Seega toimis pool vooluallikana, mille EMJ oli praktiliselt võrdne testril tekkiva pingega. Kui pooli sisse pisteti 1 sekundi jooksul püsिमagnet ristlõikepindalaga  $0,5 \text{ cm}^2$ , siis häälbis testri osuti väärtuseni 10 mV. Kui palju muutus magnetvoog ühes keerus? Kui suur on magnetinduktsioon selle püsिमagneti sees.

**Lahendus:** Pooli keerud toimivad jadamisi ühendatud vooluallikatena, mille põhjal induktsiooni EMJ kogu poolis

$$\mathcal{E}_i = N \mathcal{E}_1,$$

kus  $\mathcal{E}_1$  elektromotoorjõud ühes keerus ja  $N$  - keerdude arv. Faraday induktsiooni-seadust

$$\mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t}$$

võime siin kasutada ilma miinusmärgita, sest meid huvitab vaid muutuse suurus, mitte suund.

Antud:

$$U \cong \mathcal{E}_i = 10 \text{ mV}$$

$$N = 400$$

$$\Delta t = 1 \text{ s}$$

$$S = 0,5 \text{ cm}^2 = 5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2$$

---

$$\Delta\Phi = ? \quad B = ?$$

Magnetvoo muut:  $\Delta\Phi = \mathcal{E}_i \cdot \Delta t = 25 \mu\text{V} \cdot 1 \text{ s} = 25 \mu\text{Wb}$ .

Kuna magnetvoo algväärtus on null, siis võrdub lõppväärtus  $\Phi$  muuduga  $\Delta\Phi$ . Püsिमagneti magnetväli on paralleelne pooli teljega ning on seega suunatud piki keerdude ühist normaali. Järelikult  $\beta = 0$ ,  $\cos \beta = 1$  ja  $\Phi = B S$ . Sellest

$$B = \frac{\Phi}{S} = \frac{25 \cdot 10^{-6} \text{ Wb}}{5 \cdot 10^{-5} \text{ m}^2} = 0,5 \text{ T}.$$

Vastus: Magnetvoog ühes keerus muutus 25 mikroveebri võrra. Püsिमagneti magnetinduktsioon oli 0,5 teslat.



## Küsimusi ja ülesandeid

1. Millised on kolm peamist viisi elektrienergia saamiseks elektromagnetilise induktsiooni teel? Uurigem valemeid 2.5 ja 2.7.
2. Kas magnetvoo definitsioonivalemis (2.5) võiks koosinuse asemel esineda ka siinus? Millist nurka tuleks siis kasutada?
3. Maanteel liikuvate autode loendamiseks paigutatakse teekatte alla keskmise auto mõõtmetega juhtmekontuur, mille otstel paikneb vooluimpulsse registreeriv seade. Selgitage niisuguse loenduri tööpõhimõtet. Arvestagem, et autokered on valmistatud terasest, mis on ferromagneetik.
4. Kuidas võiks liikluspolitsei eelmises probleemis kirjeldatud loendureid kasutada autode kiiruse mõõtmiseks?
5. Elektromagneti südamik soojeneb, kui voolu magneti mähises korduvalt sisse ja välja lülitada. Miks on see nii?
6. Sisestusmehhanism veab magnetkaarti pangautomaadi sisse kindla kiirusega. Milleks see vajalik on?
7. Jalgratta spidomeetri (kiirusemõõtja) andur kinnitatakse esikahvli külge nii, et ühe kodara küljes paiknev väike püsomagnet mööduks ratta igal tiirul andurist väga lähedalt. Selgitage spidomeetri tööpõhimõtet.

## STOP

1. Magnetvoog  $\Phi$  näitab, millisel määral läbivad magnetvälja jõujooned vaadeldavat pinda. Magnetvoog avaldub kujul  $\Phi = B S \cos \beta$ , kus  $B$  on magnetinduktsioon,  $S$  – pinna pindala ning  $\beta$  – nurk pinna normaali ja magnetvälja suuna vahel.
2. Üks veeber (1 Wb) on magnetvoog, mis läbib  $1 \text{ m}^2$  suurust magnetvälja suunaga ristuvat pinda, kui välja magnetinduktsioon on 1 T. Seega  $1 \text{ Wb} = 1 \text{ T} \cdot 1 \text{ m}^2$ .
3. Kehtib Faraday induktsiooniseadus, mille kohaselt juhtmekontuuris tekkiv induktsiooni elektromotoorjõud on võrdeline magnetvoo muutumise kiirusega.

$$\text{Ühikusüsteemis SI: } \mathcal{E}_i = -\frac{\Delta\Phi}{\Delta t},$$

kus  $\Delta\Phi$  on magnetvoo muutus kontuuris ja  $\Delta t$  – ajavahemik, mille jooksul see muutus toimus.

## 2.5. Lenzi reegel. Induktsiooniseaduse rakendused.

### 2.5.1. Lenzi reegel

Lugedes veel kord Faraday katsete kirjeldusi punktis 2.3, märkame, et magnetvälja kasvu korral sisaldavad need hulgaliselt sõna *vastupidine*. Näiteks püsिमagneti lähendamisel juhtmepoolile on induktsioonivoolu magnetväli vastassuunaline püsिमagneti väljale, mis voolu esile kutsus. Induktsioonivoolu väli takistab magnetvälja kasvu. Poolis tekkiva induktsioonivoolu suund on vastupidine voolu suunale teises poolis, mida esimesele lahendatakse. Voolu sisselülitamine ühes juhtmes indutseerib vastupidise suunaga voolu naaberjuhtmes.

Magnetvälja kahanemise korral on aga kõik teisiti. Püsimagneti eemaldamisel poolist on induktsoonivoolu magnetväli samasuunaline püsimagneti väljale ning takistab magnetvälja kahanemist. Juhtme poolide eemaldamisel teineteisest on ühes poolis indutseeritav vool samasuunaline vooluga teises poolis. Voolu väljalülitamine ühes juhtmes indutseerib samasuunalise voolu naaberjuhtmes. Seega soodustab induktsoonivool alati olemasoleva olukorra säilimist.

Elektromagnetiline induktsoon on alalhoidlik ehk *konservatiivne* nähtus. Seda asjaolu märkas esimesena Emil Lenz (1804-1865), Tartust pärit vene füüsik, rahvuselt baltisakslane. Kogu maailm tunnustab Emil Lenzi teeneid induktsoonivoolu suunda määrava reegli või seaduse formuleerijana. Seetõttu esinebki nimetatud seadus füüsikaõpikutes **Lenzi reegli** või Lenzi seaduse nime all.

Järgnevalt toome ära Lenzi reegli mõned sõnastused:

a) induktsoonivoolu suund on selline, et tema magnetväli kompenseeriks muutust, mis voolu põhjustab;

b) induktsoonivool toimib alati vastupidiselt seda voolu esile kutsuvale põhjusele; ehk pikemalt:

c) kui välismõju tingib magnetvoo kasvu kontuuris, siis on induktsoonivoolu magnetväli välise magnetvälja suhtes vastassuunaline (takistab kasvu). Kui aga välismõju põhjustab magnetvoo kahanemist, siis on induktsoonivoolu magnetväli välise magnetväljaga samasuunaline (takistab kahanemist).

Lenzi reegli levinuim sõnastus on (a), lühimaks võib pidada varianti (b), kõige üksikasjalikumaks aga võimalust (c).

Lenzi reegli analoogiks mehaanikas on väide, et stabiilsele süsteemile mõjuv jõud on suunatud tasakaaluasendi poole. Kui me viime näiteks pendli tasakaaluasendist välja, siis tekib otsekohe jõud  $F$ , mis takistab niisugust muutust. See jõud püüab viia pendlit tagasi tasakaaluasendisse. Samamoodi on lood kuulikesega, mis asetseb nõgusa põhjaga kausis. Kuulikese väljaviimisel kausi madalaimast punktist tekib jõud, mis lükkab kuulikest tagasi tasakaaluasendisse, see tähendab, kausi põhja.

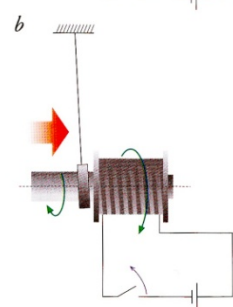
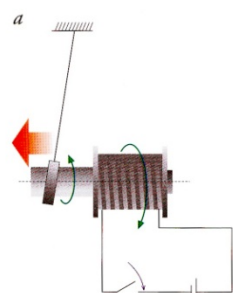
Mõnikord öeldakse ka, et Lenzi reegel väljendab energia jäävuse seadust. Kujutlegem, mis juhtuks siis, kui Lenzi reegel ei kehtiks ja mingist muutusest tingitud induktsoonivool soodustaks muutuse jätkumist. Näiteks püsimagneti lähendamisel juhtme poolile tekiks poolis sel juhul vool, mille magnetväli oleks püsimagneti väljaga samasuunaline. Poolile mõjuv magnetväli tugevneks ja „tagurpidise“ Lenzi reegli kohaselt kasvaks vool seeläbi veelgi. Voolu suurenemine põhjustaks selle kasvu üha kiiremat jätkumist. Tegemist oleks eimillegi arvelt töötava vooluallikaga, niisiis *perpetuum mobile*'ga. Niisugust masinat ei saa aga energia jäävuse seaduse kohaselt olemas olla.

Lenzi reeglit väljendab induktsooniseaduses (valemis 2.9) sisalduv miinusmärk. Kui näiteks juhtmekeerdu läbiv magnetvoo kasvab ( $\Delta\Phi > 0$  valemis 2.9), siis loetakse induktsooni elektromotoorjõudu ja vastavat voolutugevust kokkuleppeliselt negatiivseteks, kuna induktsoonivoolu magnetväli on keerus mõjuvale väljale vastassuunaline (takistab magnetvoo kasvu). Kui aga magnetvoo juhtmekeerus kahaneb ja tema muut on negatiivne ( $\Delta\Phi < 0$ ), siis on need kaks välja samasuunalised.

Induktsioonivool püüab kahanevat magnetvoogu alal hoida. Seetõttu loetakse induktsiooni elektromotoorjõudu ja voolutugevust positiivseteks.

### Katse 2.4.

Kui me oleme eespool (p. 2.3.1) kirjeldatud viisil valmistanud raudsüdamikuga

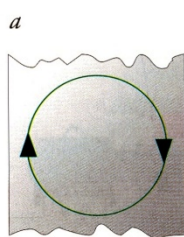


J. 1.21. Voolu tekitamisel poolis tõukub rippuv rõngas poolist eemale (a), voolu katkestamisel aga tõmbub rõngas pooli poole (b)

juhtmepooli, siis saame Lenzi reegli kehtivust üpris lihtsalt kontrollida. Selleks püüame leida vasest, hõbedast või alumiiniumist rõnga, millest kasutatava pooli südamik (raudpolt) takerdumata läbi mahub. Hästi sobib näiteks kerge hõbesõrmus. Paigutame raudsüdamikuga juhtmepooli laual mingile alusele, nii et südamik ulatuks poolist paari sentimeetri pikkuselt välja. Paneme metallrõnga kahe niidiga laualambi või mingi muu raami külge rippuma. Seejuures peab raudsüdamik ulatuma rõnga sisse. Kui me nüüd tekitame südamikuga poolis taskulambipatarei abil voolu, siis nihkub rõngas Lenzi reegli kohaselt poolist eemale, kuna rõngas tekkiv induktsioonivool takistab poolist pärineva magnetvoo kasvu. Seetõttu on induktsioonivool rõngas pooli voolule vastassuunaline (joon. 1.21, a), vastandlike suundadega voolud aga tõukuvad (p. 1.4.2). Loomulikult ei jää rõngas „eemaletõukunud“ asendisse. Kui pooli magnetväli enam ei kasva, siis langeb induktsioonivoolu tugevus nullini ja rõngas naaseb raskusjõu mõjul tasakaaluasendisse. Kui me nüüd poolis voolu katkestame (eemaldame patarei), siis poolist pärinev magnetvoog kahaneb. Induktsioonivoolu magnetväli üritab seda aga Lenzi reegli kohaselt alal hoida (takistab kahanemist). Nüüd on voolude magnetväljad ja seega ka voolud ise samasuunalised (joon. 1.21, b). Samasuunalised voolud aga tõmbuvad. Seetõttu nihkub rõngas pooli poole. Kui poolist pärinev magnetvoog on saanud nulliks (enam ei kahane), siis induktsioonivool katkeb ja rõngas naaseb jällegi raskusjõu mõjul tasakaaluasendisse.

### 2.5.2. Induktsiooniseaduse rakendusi

Ülalkirjeldatud viisil tekivad induktsioonivoolud mitte ainult rippuvas rõngas, vaid ka



J. 1.22. Pöörivooluringid paksum (a) ja õhukeses (b) metallplaadis

suvalise kujuga metallkehas, millele mõjuv magnetväli piisavalt kiiresti muutub. Selliseid voolusid nimetatakse **pöörivooludeks**, kuna neid tekitab elektromagnetilisel induktsioonil esinev pööriselektriväli. Kui mingi metallkeha magnetväljas liigub, siis pöörivoolude olemasolu pidurdab seda liikumist. Keha kui terviku liikumise kineetiline energia läheb üle laengukandjate liikumise energiaks selles kehas.

Võib ka öelda, et laengukandjad liiguvad pööriselektrivälja energia arvel. Elektritakistuse olemasolu tõttu eraldub see energia aga soojusena. Kineetiline energia muundub soojuseks nii nagu tavalisel hõõrdumisel.

Kui elektrienergia üleminek soojuseks pole vajalik, siis püütakse pöörivoolude tekkimist vältida. Seetõttu valmistatakse näiteks trafode südamikke õhukestest teraslehtedest. Õhukeses plekis ei

saa tekkida suuri vooluringe (joon. 1.22), mille korral elektrijuhtivuses osaleks palju laengukandjaid ja mille korral voolutugevus ja seega ka eralduv soojushulk oleksid suured.

Samas võib pöörisvoole aga ka ära kasutada. Näiteks võimaldab pöörisvoolude tekkimisega kaasnev pidurdusefekt kiiresti summutada metallkehade ebasoovitavaid võnkumisi. Selleks piisab võnkuva metalleseme paigutamisest magnetvälja. Vastavat seadet nimetatakse **magnetsummutiks**.

Pöörisvooludel põhineb ka **induktsiooniahju** töö. See seade võimaldab kiiresti kuumutada elektrit juhtivat ainet. Suure sagedusega perioodiliselt muutuva magnetvälja abil tekitatakse aines pöörisvoolud, mille energia vabaneb soojusena. Induktsiooniahju korral ei toimu soojusülekanne ühelt kehalt teisele. Soojus eraldub sellesamas aines, mida kuumutatakse. Seetõttu on induktsiooniahjul väga kõrge kasutegur.

### **Küsimusi ja ülesandeid**

1. Vanemate autode spidomeeter sisaldab rattateljega mehaaniliselt ühendatud püsिमagnetit ja selle vastas paiknevat metallketast. Ketas on omakorda ühendatud spidomeetri osutiga. Mida kiiremini pöörleb püsिमagnet, seda suurema nurga võrra pöörduv samas suunas ketas ja vastavalt ka spidomeetri osuti. Ketta küljes paikneb tagastusvedru, mis ketta pöördumisel pinguldub. Püsिमagnetit peatumisel toob see vedru ketta algasendisse tagasi. Miks püüab püsिमagnet ketast „kaasa vedada“?
2. Tugevat püsिमagnetit on raske liigutada piki alumiiniumplaati, aga magnet plaadi külge kinni ei jää. Miks on see nii?
3. Kas valjuhääldit oleks võimalik kasutada mikrofonina?

### **STOP**

1. Induktsioonivool soodustab alati olemasoleva olukorra säilimist. Kehtib Lenzi reegel, mille kohaselt induktsioonivool toimib alati vastupidiselt voolu esile kutsuvale põhjusele.
2. Lenzi reeglit väljendab miinusmärk Faraday induktsiooniseaduses.

## **2.6. Induktiivsus ja mahtuvus**

### **2.6.1. Endainduktsiooni elektromotoorjõud**

Oleme juba korduvalt täheldanud induktsiooni elektromotoorjõu tekkimist poolis, mille keerde läbivat magnetvoogu väljastpoolt muudetakse. Näiteks katsetes kahe pooliga (p. 2.4.1) toimub see teises poolis voolu sisse- või väljalülitamise teel. Kuid ka magnetvälja tekitavas poolis esineb voolu kasvul või kahanemisel magnetvoo muutus. See muutus tekitab induktsiooni elektromotoorjõu, mis Lenzi reegli kohaselt takistab muutust ning järelikult pidurdab voolu kasvu või kahanemist. Niisiis võib juhtmes induktsiooni elektromotoorjõu tekkimiseks vajalik magnetvoo muutus olla põhjustatud ka voolu muutmise juhtmes endas. Elektromagnetilise induktsiooni nähtuse sellist alaliiki nimetatakse **endainduktsiooniks**.

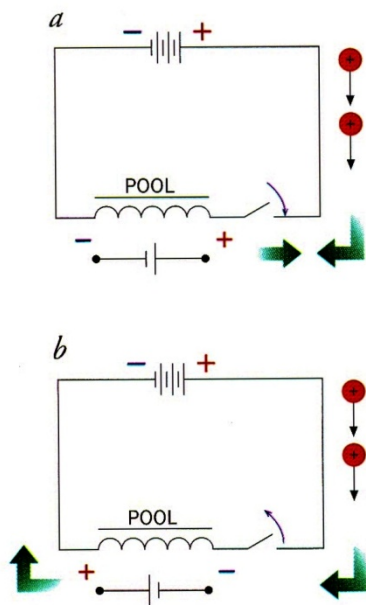
### **Katse 2.5.**



Endainduktsiooni olemasolu kindlakstegemiseks võib kasutada Faraday katsete (p. 2.3) korraldamiseks valmistatud pooli. Ühendame südamikuta pooli otste külge uue lapiku taskulambipatarei. Kui me voolu ahelas katkestame, siis kuuleme praksatust ja märkame katkestuskohas nõrka elektrisädet. Säde on paremini jälgitav, kui teeme katset

häämaras või koguni pimedas toas.

Järelikult tekib ahelas voolu katkestamisel täiendav pinge, mis püüab voolu säilitada.



J. 1.25. *a* – vooluringi sulgemisel muutub pool vooluallikaks, mis takistab voolu kasvu (püüab tekitada patareist tingitud voolu suhtes vastupidise suunaga voolu); *b* – vooluringi katkestamisel takistab pool voolu kahane-mist (püüab voolu alal hoida, tekitab samasuunalist voolu)

Tekkiv pinge rakendub katkestuskohas, sest just seda kohta on liikuvatel laengukandjatel kõige raskem läbida. Seal tuleb teha kõige rohkem tööd. Paigutame nüüd pooli sisse raudpoldi ja kordame katset. Näeme, et tekkinud säde on oluliselt tugevam. Vahemik, milles õhk hakkab elektrit juhtima, on tunduvalt laiem.

Arvestame, et sädelahendus tekib õhus ühe kindla elektrivälja tugevuse juures ( $E = 3 \cdot 10^6$  V/m).

Konstantsel väljatugevusel  $E$  on kahe punkti vaheline pinge  $U$  aga seda kõrgem, mida suurem on nende punktide vahekaugus  $d$  (valem  $U = E d$ ). Seega tekib raudsüdamikuga pooli korral suurem pinge.

Kuna just raudsüdamikuga poolis tekib suurem magnetinduktsioon, siis võib väita, et see pinge sõltub magnetinduktsioonist poolis või pooli kerde läbivast magnetvoost. Pool hakkab voolu muutumisel toimima vooluallikana, mille elektromotoorjõudu nimetatakse endainduktsiooni elektromotoorjõuks. Vooluringi sulgemisel on pooli kui vooluallika polaarsus patarei omale vastupidine (joon.1.25, pool takistab voolu kasvu). Vooluringi katkestamisel aga on pool ja patarei ühesuguse polaarsusega (pool püüab voolu alal hoida).

Nagu näeme, avaldub endainduktsiooni nähtus inertsina laetud osakeste suunatud liikumisele. Endainduktsiooni esinemise korral võtab elektrivoolu tekitamine ja ka

peatamine oluliselt rohkem aega võrreldes juhuga, mil endainduktsioon puudub. Tulemus näitab, et sädet tekitav pinge on (vähemasti osaliselt) põhjustatud voolu katkestamisest poolis. Vool raudsüdamikuga pooli sisaldavas ahelas käitub nagu

raske raudteerong. Sellist rongi ei saa hetkeliselt liikuma panna ega ka järsult peatada. Palju kuulnud kurvad lood õnnetustest raudteeületuskohtadel ongi ju õigupoolest selle tagajärg, et rasket rongi pole võimalik hetkeliselt seisma jätta. Kuid miks vool mõnes ahelas käitub raske rongina, mõnes aga mitte? Millal esineb endainduktsioon? Ka nendele küsimustele annab vastuse äsja korraldatud katse. Endainduktsiooni tekkimiseks peab vooluga kaasnema tugev magnetväli, mis suudab samas mõjutada ka voolu ennast. Täpsemalt öeldes peab vool vaadeldavas juhtmesüsteemis tekitama suure magnetvoo, sest just magnetvoo muutumine kutsub esile induktsiooni elektromotoorjõu.

Raudsüdamikuga juhtme pooli korral on magnetvoog oluliselt suurem kui tühjas poolis.

Seega on endainduktsiooni esinemine määratud voolu suutlikkusega tekitada antud juhtmesüsteemis magnetvoogu. Juhtmesüsteemi vastavate omaduste kirjeldamiseks on kasutusel füüsikaline suurus, mida nimetatakse juhi **induktiivsuseks**.

### 2.6.2. Induktiivsuse mõiste

Ülalpool kirjeldatud katse käigus tekkis raudsüdamikuga pooli sisaldavas vooluringis suur endainduktsiooni elektromotoorjõud. Raudsüdamiku puudumisel oli see aga väiksem. Näeme, et juhi (või vooluringi osa) induktiivsust võib määratleda mingil kindlal voolu muutusel tekkiva endainduktsiooni elektromotoorjõu kaudu. **Juhi induktiivsus**  $L$  näitab, kui suur endainduktsiooni elektromotoorjõud  $\mathcal{E}_e$  tekib selles juhis voolutugevuse ühikulisel muutumisel ajaühiku jooksul

$$L = \left| \frac{\mathcal{E}_e}{\frac{\Delta i}{\Delta t}} \right|. \quad (2.8)$$

Absoluutväärtuse märk selles valemis näitab, et induktiivsust vaadeldakse kokkuleppeliselt vaid positiivse suurusena. Voolutugevuse muut ja endainduktsiooni elektromotoorjõud võivad aga olla ka negatiivsed. Siin ja allpool asume kasutama elektromagnetismi füüsikas üldlevinud kokkulepet, mille kohaselt mingit kindlat või konstantset laengut, pinget, voolutugevust vms elektrilist suurust tähistatakse suur-tähtedega ( $Q, U, I$ ), vastavaid ajas muutuvaid suursi aga väiketähtedega ( $q, u, i$ ). Kuna induktiivsuse mõiste olemuslikult eeldab voolu muutumist ajas, siis on korrektne tähistada voolutugevust väiketähega ( $i$ ). Voolutugevuse muudu  $\Delta i$  ja sellele vastava ajavahemiku  $\Delta t$  suhet valemis 2.10 võib nimetada **voolu muutumise kiiruseks**. Seega näitab juhi induktiivsus meile, kui suur endainduktsiooni elektromotoorjõud tekib selles juhis, kui voolutugevus temas muutub ühikulise kiirusega.

Avaldades valemist 2.10 endainduktsiooni elektromotoorjõu ning kasutades Lenzi reeglit väljendavat miinusmärki, saame

$$\mathcal{E}_e = -L \frac{\Delta i}{\Delta t}. \quad (2.9)$$

Võrdleme nüüd valemist 2.11 Faraday induksiooniseadusega (valem 2.9). Seejuures arvestame, et endainduktsioon on elektromagnetilise induksiooni erijuht, mistõttu valemistes 2.9 ja 2.11 esinevate murdude väärtused ja seega ka nende murdude lugejad on võrdsed:

$$\Delta \Phi = L \Delta i$$

ehk

$$L = \frac{\Delta \Phi}{\Delta i}. \quad (2.10)$$

Juhi **induktiivsus** näitab meile, kui suure magnetvoo muutuse tekitab selle juhi korral ühikuline voolu muutus. Veelgi lihtsamalt öeldes näitab induktiivsus vaadeldava juhtmesüsteemi inertsust temas toimuvate voolu muutuste suhtes.

Endainduktsiooni elektromotoorjõu sõltuvuse voolu muutumise kiirusest avastas aastal 1832 ameerika füüsik Joseph Henry (1797-1878). Seetõttu on valem 2.11 ka tuntud **Henry seaduse** nime all. Kuna Henry jõudis induksiooniseaduseni iseseisvalt, siis nimetatakse elektromagnetilise induksiooni seadust mõnikord ka Faraday-Henry

seaduseks. J. Henry järgi on oma nime saanud induktiivsuse SI-ühik **henri** (1 H).  
Valemite 2.10 ja 2.12 põhjal

$$1\text{H} = \frac{1\text{V}}{\frac{1\text{A}}{1\text{s}}} = \frac{1\text{V} \cdot 1\text{s}}{1\text{A}} = \frac{1\text{Wb}}{1\text{A}}$$

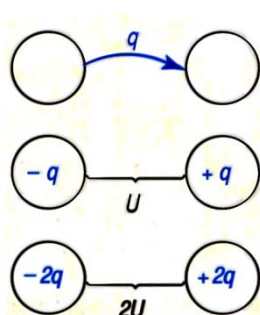
Induktiivsuse definitsioonina võib vaadelda nii valemit 2.10 kui ka valemit 2.12. Paraku peitub valemis 2.12 tema välisele lihtsusele vaatamata väärtõlgenduse oht. Nimelt on valemis 2.12 sisalduv magnetvoog valemi 2.8 abil leitav vaid ühe juhtme-keeru korral. Juhtme pooli keerud aga tugevdavad vastastikku üksteise magnetvälja. Resultantvälja jõujooned läbivad pooli kõiki keerde. Magnetinduksioon poolis ja seega ka magnetvoog läbi keerdude on seda suuremad, mida rohkem keerde on poolil pikkusühiku kohta (p. 1.7.4, valem 1.27). Vastavalt on sel juhul suurem ka pooli induktiivsus. Valemis 2.12 esinevat magnetvoogu nimetatakse siis pooli kogumagnetvooks ehk aheldusvooks ja selle suuruse väljaarvutamine on üldjuhul keeruline protseduur.

### 2.6.3. Elektrimahtuvus. Kondensaatorid

Peagi (p. 2.7.2) veendume selles, et induktiivsus kirjeldab kehade süsteemi võimet säilitada endas elektrivoolu ja seeläbi tekitada magnetvälja. Mõistagi on kasutusel ka füüsikaline suurus, mis iseloomustab kehade süsteemi võimet salvestada endasse laengut ja seeläbi tekitada elektrivälja. Kõnealuseks suuruseks on **elektrimahtuvus**, mida me edaspidi nimetame lihtsalt mahtuvuseks.

Kallates vedelikku ühekõrgustesse kuid erineva läbimõõduga klaasidesse, näeme otsekohe, et laiemasse klaasi mahub rohkem vedelikku. Suurema läbimõõduga anumal on suurem põhja pindala ja seega ka ruumala. Samamoodi on lood erinevate elektrit juhtivate kehade laadimisel. Ühele kehale “mahub” rohkem laengut kui teisele. Järelikult on mõtet võtta kasutusele keha laadumisvõimet kirjeldav suurus, mida nimetatakse keha mahtuvuseks.

Rangelt võttes on mahtuvus alati kahe keha omavaheline mahtuvus. Andes ühele kehale mingi laengu, peame selle mingilt teiselt kehalt ära võtma, kuna kehtib laengu jäävuse seadus.



**J. 2.54.** Pinge tekkimine kahe keha vahel laengu  $q$  viimisel ühelt kehalt teisele.

Vaatleme kahte algselt neutraalset keha. Kui me võtame ühelt kehalt ära laengu  $Q$  ja anname selle teisele kehale, siis omandab esimene keha laengu  $-Q$  ja teine  $+Q$ . Kehade vahel tekib elektriväli ja seega ka potentsiaalide vahe (pinge)  $U$  (J. 2.54). Kuna potentsiaal on võrdeline teda tekitava laenguga (valem 1.22), siis teostades sama toiminguga  $2Q$ , tekitame kehade vahel pinge  $2U$ . Peagi märkame, et laengu ja pinge jagatis jääb kõigis sellelaadsetes katsetes muutumatuks, antud kehade süsteemi iseloomustavaks suuruseks. See ongi vaadeldavate kehade omavaheline mahtuvus.

Kahe keha **omavaheline mahtuvus** näitab, kui suure laengu viimisel ühelt kehalt teisele tekib kehade vahel ühikuline pinge. Mahtuvuse  $C$  leidmiseks tuleb üle viidud laeng  $Q$  jagada tekkiva pingega

$$C = \frac{Q}{U}. \quad (2.12)$$

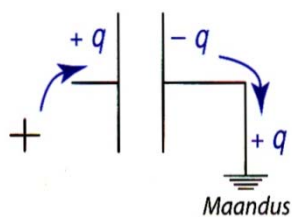
Saavutamaks mahtuvuse definitsiooni suuremat sarnasust induktiivsuse määratlusega (2.12) ja rõhutamaks ajalise muutuse tähtsust võib üleviidavat laengut  $Q$  vaadelda keha laengu lõppväärtuse  $q_2$  ja algväärtuse  $q_1$  vahena:  $Q = q_2 - q_1 = \Delta q$ . Siis on keha iseloomustav laeng  $q$  meile mehaanikast tuntud koordinaadi rollis ja üleviidav laeng  $Q$  vastab kahe koordinaadi vahele ehk teepikkusele. Vaadeldes keha laengut ajast sõltuva suurusena  $q = q(t)$ , peame ajast sõltuvana käsitlema ka kahe keha vahel tekkivat pinget  $u = u(t)$ . Niimoodi võtab kahe keha omavahelise mahtuvuse definitsioon kuju

$$C = \frac{\Delta q}{\Delta u}. \quad (2.13)$$

Nüüd saab meile selgeks elektriseadmete **kaitsemaanduse** põhimõte, millest oli juttu juba põhikooli *Elektriõpetuses*. Maandamisel ühendatakse seadme metallkorpus juhtme abil Maaga. See kaitseb seadme kasutajat elektrilöögi eest juhul, kui seadme korpus satub rikke tagajärjel Maa suhtes pingele alla. Kaitsemaandus juhib seadme korpusele sattunud laengu ära Maasse. Maa on aga niivõrd suure mahtuvusega keha, et talle võib anda kuitahes suure laengu, ilma et tema potentsiaal märgatavalt muutuks. Laeng liigub Maasse läbi maandusjuhtme, mitte aga läbi seadme kasutaja keha. Seega on mingi keha maandamine samaväärne suure augu tegemisega niisuguse anuma põhja, millesse vesi mitte mingil juhul koguneda ei tohi. Kui ka vesi eksikombel satub anumasse, jookseb vesi läbi augu otsekohe maha.

Kehade süsteemi, mis on loodud mingi kindla mahtuvuse saamiseks, nimetatakse **kondensaatoriks**. Lihtsaim kondensaator koosneb kahest elektrit juhtivast plaadist ehk kattest, mille vahel paikneb dielektrikukiht. Kondensaatori mahtuvus näitab, kui suure laengu  $q$  andmisel ühele plaadile suureneb plaatidevaheline pingele  $U$  ühe ühiku võrra. Seega on kondensaatori mahtuvus sisuliselt tema plaatide omavaheline mahtuvus (valem 2.14 või 2.15).

Kondensaatori laadimiseks reeglina ei võeta laengut ühelt plaadilt, et anda seda teisele plaadile. Piisab vaid ühe plaadi laadimisest. Laetud plaadi elektrivälja mõjul hakkavad laengukandjad teisel plaadil ja sellega ühendatud juhtides liikuma. Näiteks laengu  $+Q$  andmisel kondensaatori ühele plaadile omandab teine (algselt neutraalne) plaat sama suure laengu  $-Q$ , sest just siis tasakaalustavad plaatide elektriväljad väljaspool kondensaatorit vastastikku teineteist. Samanimeliste laengute tõukumise tõttu lahkub laeng  $+Q$  teiselt plaadilt. Laengu  $-Q$  saab kergesti teisele plaadile tuua siis, kui plaat on maandatud (J. 2.57) ja laeng  $+Q$  võib lahkuda Maasse.



**J. 2.57.** Laengu  $-q$  indutseerimine kondensaatori maandatud plaadile.

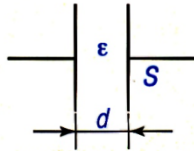
Aga ka voluringis paikneva kondensaatori korral saab laeng teiselt plaadilt alati ära minna. Järelikult on ühe plaadi laadimine samaväärne laengu  $Q$  üleviimisega ühelt plaadilt teisele.

Mahtuvuse ühik SI-süsteemis kannab M. Faraday auks nime *farad*. **Üks farad** (1 F) on sellise keha mahtuvus, millele tuleb anda laeng üks kulon, selleks et suurendada tema potentsiaali ühe voldi võrra. Kondensaatori mahtuvus on 1 F, kui laengu 1 C viimine ühelt plaadilt teisele tekitab plaatide vahel pinget 1 V. Seega



$$1 \text{ F} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}} .$$

Kuna üks kulon on väga suur laeng, siis ka üks farad on väga suur mahtuvus. Seetõttu kasutatakse praktikas enamasti mikro-, nano- ja pikofaradeid ( $1 \text{ fF} = 10^{-15} \text{ F}$ ,  $1 \text{ nF} = 10^{-9} \text{ F}$ ,  $1 \text{ pF} = 10^{-12} \text{ F}$ ).



**J. 2.58.** Plaatkondensaatori mahtuvust määravad suurused.

Mahtuvus sõltub vaadeldavate kehade mõõtmetest, vahekaugusest ja kehadevahelise aine dielektrilisest läbitavusest. Leiame kahest tasaparalleelsest plaadist koosneva kondensaatori mahtuvuse (J. 2.58), lähtudes väljatugevuse avaldisest:

$$E = \frac{Q}{\epsilon_0 \epsilon S} , \quad (\text{valem 1.16})$$

kus  $Q$  on ühe plaadi laeng,  $S$  - plaadi pindala ja  $\epsilon$  - plaatide vahel paikneva aine dielektriline läbitavus. Seega  $Q = \epsilon_0 \epsilon S E$ .

Pinge  $U$  plaatide vahel avaldub kujul

$$U = E d, \quad (\text{valem 1.24})$$

kus  $d$  on plaatidevaheline kaugus. Järelikult mahtuvus

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S E}{E d} = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} . \quad (2.15)$$

Valemist 2.15 tuleneb elektrikonstandi  $\epsilon_0$  enamlevinud mõõtühik **farad meetri kohta** ( $1 \text{ F/m}$ ). See on identne suuruse  $\epsilon_0$  Coulomb'i seaduse põhjal saadud ühikuga  $1 \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2)$  (p. 1.3.3).

Kondensaator täidab vooluringis sama rolli, mis paak veetorustikus. Kondensaatorit kasutatakse voolu ühtlustava seadmena. Kui laetud osakesed mingil põhjusel kondensaatori juures kogunevad, siis salvestab kondensaator laengut, vastupidisel juhul aga annab seda ära. Nii töötab kondensaator **alaldis**, mis muudab seinakontaktist võetava vahelduvpinge elektrikellale või raadiole vajalikuks alalispingeks.

Elektroonikas leiab aga peamiselt kasutamist kondensaatori võime mitte juhtida alalist voolu, kuid lasta läbi vahelduvat. Kondensaator on vajalik ka **võnkeringis**, mille abil saame kõikvõimalike raadio- või telesaatejaamade elektromagnetlainete hulgast välja valida just need, mis kannavad meile huvi pakkuvat programmi. Võnkeringi vaatleme lähemalt edaspidi (p. 2.7.3)

Laialt on levinud **mikrofon**, milles sisaldub kondensaator. Sel juhul on kondensaatori üheks plaadiks õhuke metallkile, mis hakkab helilainete mõjul võnkuma. Võnkumisel muutub plaatide vahekaugus ja valemi 2.17 kohaselt ka kondensaatori mahtuvus. Konstantsel pingel kaasneb mahtuvuse muutumisega valemi 2.14 põhjal laengu muutus. Järelikult peab vooluallikat ja kondensaatorit sisaldavas ahelas tekkima elektrivool. Sellega on helivõnkumised muudetud elektrilisteks võnkumisteks.

Mahtuvuse muutmisel põhineb enamasti ka **arvuti klaviatuuri** töö. Vajutades klahvile, suurendame klahvi taga paikneva kondensaatori mahtuvust ja kutsume nii esile vooluimpulsi. Mahtuvusliku lüliti eeliseks on asjaolu, et temas ei toimu

metalloside vahetat kontakti. Seega jääb ära metalli oksüdeerumise või kulumise mõju lüliti tööle.

Esimese kondensaatori valmistasid teineteisest sõltumatult sakslane Ewald von Kleist (1700-1748) ja hollandlane Pieter van Musschenbroek (1692-1761). Kondensaatori leiutamist on õigem nimetada avastuseks, sest see toimus täiesti juhuslikult. Uurides vee elektriseerumist, tegi Kleist 1745. aastal järgmise katse. Ta laadis raudnaela, mis ulatus välja veega täidetud klaaspudelist. Hoides pudelit ühes käes, puudutas ta kogemata teise käega naela ja sai erakordselt tugeva elektrilöögi. Kleist mõistis, et pudelisse oli kogunenud väga suur laeng. Pudelkondensaatori üheks katteks oli vesi, teiseks aga katsetaja käsi. Pudeli klaaskest toimis dielektrikuna.

Analoogilise katse teostas Musschenbroek 1746. a. hollandi linnas Leidenis. Kuna laiemalt tunduks sai just nimelt tema tulemus, siis hakati kõiki sellelaadseid laengut koguvaid klaasanumaid nimetama **leideni purkideks**.

Leideni purgi konstruktsioonis asendati vesi peagi anuma sisepinda katva metallkilega. Ka välimine kate valmistati metallfooliumist. Nii saadi leideni purk, mis on kooli füüsikakabinetis kasutusel tänapäevani.

### Katse 2.6.

Valmistame ise leideni purgi. Selleks vajame võimalikult õhukeste seintega joogiklaasi. Katame klaasi külgpinna nii seest kui väljast tihedalt alumiiniumfooliumiga. Klaasi ülemises servas jätame mõnemillimeetrise laiusega riba siiski katmata, et sisemine ja välimine fooliumkate oleksid omavahel kindlalt isoleeritud.

Leideni purgi abil võime katseliselt hinnata selle laengu suurust, mille me hõõrumise teel klaaspulgale anda suudame.

### Näide 2.4.

Omavalmistatud leideni purgi sise- ja väliskatte külge kinnitati elektroodid. Välimine kate maandati ja sisemisele anti hõõrutud klaaspulgalt laeng. Seejärel hakati välimist elektroodi sisemisele lähendama. Vahekaugusel 0,5 mm tekkis elektroodide vahel säde. Eeldades, et kuivas õhus tekib sädelahendus väljatugevusel  $3 \cdot 10^6$  V/m, arvutame katetevahelise pinge, leideni purgi mahtuvuse ja klaaspulgalt sisekattele läinud laengu. Kuna katete vahekaugus on palju väiksem leideni purgi läbimõõdust, siis on plaatide kuju kõrvalekalle tasandilisest tähtsusetu ja me võime rakendada plaatkondensaatori mahtuvuse valemit 2.17. Leideni purgina kasutatava klaasi külgpindala on  $200 \text{ cm}^2$ . Klaasi paksus on 1 mm ja dielektriline läbitavus 8.

### Antud:

$$S = 200 \text{ cm}^2 = 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2; d = 1 \text{ mm} = 10^{-3} \text{ m}$$

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}; \quad \epsilon = 8$$

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon S}{d} \quad (\text{valem 2.17})$$

$$d_e = 0,5 \text{ mm} = 5 \cdot 10^{-4} \text{ m}; E = 3 \cdot 10^6 \text{ V/m.}$$

$$U = E d_e \quad (\text{valem 1.24})$$

$$U = ?, C = ?, Q = ?$$

$$C = \frac{Q}{U} \rightarrow Q = CU \quad (\text{valem})$$

2.14)

$$U = 3 \cdot 10^6 \text{ V/m} \cdot 5 \cdot 10^{-4} \text{ m} = 1,5 \cdot 10^3 \text{ V} = 1,5 \text{ kV},$$

$$C = \frac{8,85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m} \cdot 8 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2}{10^{-3} \text{ m}} \approx 1,42 \cdot 10^{-9} \text{ F} \approx 1,4 \text{ nF},$$

$$Q = 1,42 \cdot 10^{-9} \text{ F} \cdot 1,5 \cdot 10^3 \text{ V} = 2,13 \cdot 10^{-6} \text{ C} \approx 2,1 \mu\text{C}.$$

**Vastus:** Leideni purgi mahtuvus on 1,4 nF, katete vahel oli pinge 1,5 kV ja sisemisel kattele anti laeng 2,1  $\mu\text{C}$ .

### Küsimusi ja ülesandeid

1. Lennujaama turvavärv on oma olemuselt juhtmepool, mille otstel paikneb voolu muutusi registreeriv seade. Kuidas teeb turvavärv kindlaks metalleseme olemasolu reisija taskus? Miks ei suuda turvavärv avastada plastikpommi?
2. Kuidas muutub algselt sirge juhtme induktiivsus selle juhtme kerimisel pooliks? Miks on muutus just selline?
3. Milline suurus mängib veeanuma täitmisel sama rolli mis mahtuvus keha laadimisel? Pinge osas on veetaseme kõrgus.
4. Kas kahe keha omavahelist mahtuvust saab leida nende kehade mahtuvuste liitmise teel?
5. Punktlauingu välja potentsiaali valemit 1.22 võib rakendada ka ühtlaselt laetud kera potentsiaali leidmiseks, kusjuures  $r$  on kera raadius ja  $q$  – tema laeng. Mis on selles valemis kera mahtuvuse rollis?
6. Kas üksiku keha mahtuvus on võrdeline tema joonmõõtmega, pindalaga või ruumalaga?
7. Leideni purgi ühe kate pindala on 200 cm<sup>2</sup>, purgi sein paksus 1 mm ja klaasi dielektriline läbitavus 6. Milline pinge tekib katete vahel, kui üks kate maandada ja teisele anda laeng üks mikrokulon?
8. Leideni purk mahtuvusega 1 nF ühendati rööbiti kondensaatoriga, millel enne ühendamist oli laeng 0,6  $\mu\text{C}$  ja pinge katete vahel 200 V. Kui suur pinge tekkis leideni purgi katete vahel? Kui suur laeng läks laetud kondensaatorilt üle purgile?

### STOP

1. Endainduktsiooni nähtuseks nimetatakse elektromagnetilise induktsiooni alaliiki, mille korral magnetvoo muutus on põhjustatud voolu muutusest vaadeldavas juhtmes endas.
2. Juhi induktiivsus näitab, kui suur endainduktsiooni elektromotoorjõud tekib selles juhis voolutugevuse ühikulisel muutumisel ajaühiku jooksul. Induktiivsus näitab ühtlasi kogumagnetvoo muutust juhis juhti läbiva voolu tugevuse ühikulisel muutumisel.

3. Kahe keha omavaheline mahtuvus näitab, kui suure laengu viimine ühelt kehalt teisele tekitab kehade vahel ühikulise pinge.
4. Keha mahtuvus näitab, kui suure laengu andmisel kehale tekib keha potentsiaali ühikuline muutus.
5. Üks farad (1 F) on sellise keha mahtuvus, millele tuleb anda laeng üks kulon, selleks et muuta tema potentsiaali ühe volti võrra.
6. Kondensaatoriks nimetatakse kehade süsteemi, mis on loodud mingi kindla mahtuvuse saamiseks.

## 2.7. Elektromagnetvälja energia

### 2.7.1. Elektrivälja energia

Elektrivälja olemasolu tähendab teatavasti jõu tekkimise võimalikkust. Analoogiliselt väljendab termin *elektrivälja energia* seda, et laetud keha võib elektriväljas omada energiat. Asume uurima, kuidas sõltub elektrivälja energia väljatugevusest või potentsiaalst. Kõige lihtsam on seda teha homogeense välja korral, mis täidab kondensaatori plaatide vahelist ruumi.

Energia olemasolu laetud kondensaatoril pole raske näidata. Kondensaatori lühistamisel tekkiv säde võib olla välguna ere ning kostev pauk kõrvulukustav. Suure mahtuvusega kondensaatori tühjendamist läbi oma keha ei tasu südamehaigetel ja nõrganärvilistel üldse proovida.

Laetud kondensaatori energia on aga tegelikult tema plaatide vahelist ruumi täitva elektrivälja energia. Paremini mõistame seda siis, kui arvestame, et laetud kondensaator sarnaneb kõrge täidetud veenõuga. Avades nõu põhjas oleva kraani, tekitame veejoo. Juga suudab teha tööd, näiteks panna liikuma vesiratta. Seda tööd tehakse mitte veenõu, vaid vee raskusjõu potentsiaalse energia arvelt. Viimane on aga oma sügavamalt olemuselt Maa gravitatsioonivälja energia. Täpselt niisamuti ei tee tööd mitte kondensaator, vaid temas sisalduv elektriväli.

Laetud kondensaator suudab teha tööd tänu sellele, et tööd on tehtud ka tema laadimisel. Kuna katetevaheline pinge muutub laadimise käigus, siis ei saa me tehtavat tööd  $A$  otsekohe leida valemist 1.23

$$A = Q U,$$

sest me ei tea, missugust pinget kasutada. Mida suurem on kondensaatori katetele juba kogunenud laeng, seda suurem on pinge plaatide vahel ja seda rohkem tuleb kondensaatori täiendaval laadimisel tööd teha.

Selleks, et leida kogu tööd, mis tehakse kondensaatori laadimisel, tuleb katetele antud laengut  $Q$  korrutada mitte pinge lõppväärtusega  $U$ , vaid laadimisel esineva keskmise pingega. Pinge kondensaatoril kasvab võrdeliselt laenguga alates nullist kuni lõppväärtuseni  $U$ . Keskmise pinge kui pool algväärtuse ja lõppväärtuse summast on seega  $U/2$ . Laadimisel tehtud töö või kondensaatoris tekitatud **elektrivälja energia** avaldub kujul

$$E_e = \frac{C U^2}{2}, \quad (2.18)$$

kus kogulaeng  $Q$  on mahtuvuse definitsiooni põhjal asendatud korrutisega  $C U$  ning pinge rollis esineb laadimisprotsessi keskmine pinge  $U/2$ .

Oleme leidnud kondensaatori elektrivälja energia sõltuvuse plaatidevahelisest pingest ehk ühe plaadi potentsiaalst teise suhtes. Selle energia võib avaldada ka väljatugevuse kaudu. Kuna

$$U = E d, \quad (\text{valem 1.25})$$

siis plaatide kindla vahekauguse  $d$  korral on pinge  $U$  ja väljatugevus  $E$  omavahel võrdelised. Seega on elektrivälja energia võrdeline ka väljatugevuse ruuduga.

### 2.7.2. Magnetvälja energia

Oleme juba märkinud, et induktiivsuse osa magnetvälja füüsikas sarnaneb mahtuvuse rolliga elektrivälja käsitlemisel. Mõlemad suurused kirjeldavad mingi keha omadusi. Mahtuvus näitab, kui suur on kondensaatori laengu muutus katetevahelise pinge ühikulisel muutumisel, induktiivsus aga näitab, kui suur on magnetvoo muutus juhtmepoolis, kui seda pooli läbiva voolu tugevust ühiku võrra muudetakse.

Kondensaatori ja pooli rollide sarnasuse põhjal on alust arvata, et energiat ei oma mitte ainult laetud kondensaator vaid ka vooluga pool. Samale järeldusele viib meid katse 2.5. punktis 2.6.1. Voolu katkestamine poolis muudab pooli vooluallikaks, mis muundab voolu magnetvälja energiat elektrienergiaks. Just nimelt magnetvälja nõrgenemisel tekib ju voolu (ja seega ka magnetvälja) säilitada püüdev induktsiooni elektromotoorjõud.

Kondensaatoris salvestunud energia sõltub mahtuvusest. Seega võib oodata poolis salvestunud energia samalaadset sõltuvust pooli induktiivsusest. Kuna selle sõltuvuse kuju korrektne tuletamine nõuaks kõrgema matemaatika rakendamist, siis rajame lihtsama käsitlemise uuritava elektrinähtuse sarnasusele mingi tuntud mehaaniknähtusega. Teades, et energia on vaid vooluga poolil, võime seostada pooli energiat liikuvate laengukandjate kineetilise energiaga. Mehaanikast hästi tuntud kineetilise energia avaldis

$$E_k = \frac{mv^2}{2}$$

sisaldab keha kiiruse ruutu. Pooli energia valemis peaks sama rolli mängima suurus, mis on võrdeline laengukandjate suunatud liikumise keskmise kiirusega ning määrab ka otseselt pooli poolt tekitatava magnetvoo. Selliseks suuruseks on voolutugevus. Vooluga pooli energia peaks olema võrdeline voolutugevuse ruuduga.

Kineetilise energia avaldises sisaldub aga ka keha mass. Mass kirjeldab keha inertsust kiiruse muutuste suhtes. Mida suurem on mass, seda rohkem aega kulub keha kiiruse muutmiseks. Näiteks võib kiirusega 5 m/s liikuva lapsevankri peatada hetkeliselt. Raske rongi pidurdusteed on sama kiiruse korral aga juba kümnekond meetrit pikk ja pidurdamine kestab vastavalt kauem.

Juhtmesüsteemi inertsust voolu muutuste suhtes kirjeldab induktiivsus. Seega täidab induktiivsus elektrilaengu liikumisel sama rolli, mida mass mehaanilise liikumise juures. Juhtmepooli energia avaldise koostamisel tuleb kineetilise energia valemis sisalduv mass asendada induktiivsusega. Ühtekokku saame vooluga juhtmepooli energia jaoks valemi

$$E_m = \frac{LI^2}{2} \quad (2.19)$$

Vooluga pooli energiat võib nimetada magnetvälja energiaks (sellest ka tähis  $E_m$ ). Pooli energia on ju olemas tänu sellele, et pooli juhtmes liikuvatele laengukandjatele mõjub pooli enda magnetväli. *Magnetvälja energia* all mõtleme me energiat, mida selles väljas omaks magnetiliselt aktiivne keha.

Kuidas aga sõltub magnetvälja energia magnetinduksioonist? Teatavasti (valem 1.15 p. 1.5.3) on voolutugevus juhtmes ning juhtme poolt tekitatav magnetinduksioon võrdelised. Kui vooluga pooli magnetvälja energia on võrdeline voolutugevuse ruuduga, siis on ta järelikult võrdeline ka magnetinduksiooni ruuduga. Võime järeleda, et nii elektri- kui ka magnetnähtustes on välja energia võrdeline välja jõuparameetri ( $E$  või  $B$ ) ruuduga. See väide kehtib **elektromagnetvälja** kohta tervikuna.

Energeetilises aspektis võime elektromagnetvälja elektri- ja magnetkomponenti kokkuvõtteks võrrelda järgmiselt.

**Tabel 2.1.**

Elektriväli	Magnetväli
<p>Kehade süsteemi võimet tekitada elektrivälja (salvestada laengut) kirjeldab <b>mahtuvus</b></p> $C = \frac{\Delta q}{\Delta u},$ <p>selle SI-ühik on <b>farad</b> <math>1 \text{ F} = \frac{1 \text{ C}}{1 \text{ V}}</math>.</p>	<p>Juhtmesüsteemi võimet tekitada magnetvälja (salvestada voolu) kirjeldab <b>induktiivsus</b> <math>L = -\frac{\mathcal{E}_e}{\frac{\Delta i}{\Delta t}} = \frac{\Delta \Phi}{\Delta i}</math>, selle</p> <p>SI-ühik on <b>henri</b> <math>1 \text{ H} = \frac{1 \text{ V} \cdot 1 \text{ s}}{1 \text{ A}}</math>.</p>
<p><b>Kondensaator</b> on kehade süsteem, mis on loodud kindla mahtuvuse saamiseks</p>	<p><b>Induktiivpool</b> on juhtmesüsteem, mis on loodud kindla induktiivsuse saamiseks</p>
<p><b>Elektrivälja energia</b> kondensaatoris</p> $E_e = \frac{C U^2}{2}$	<p><b>Magnetvälja energia</b> induktiivpoolis</p> $E_m = \frac{L I^2}{2}$

### 3. Elektromagnetlained

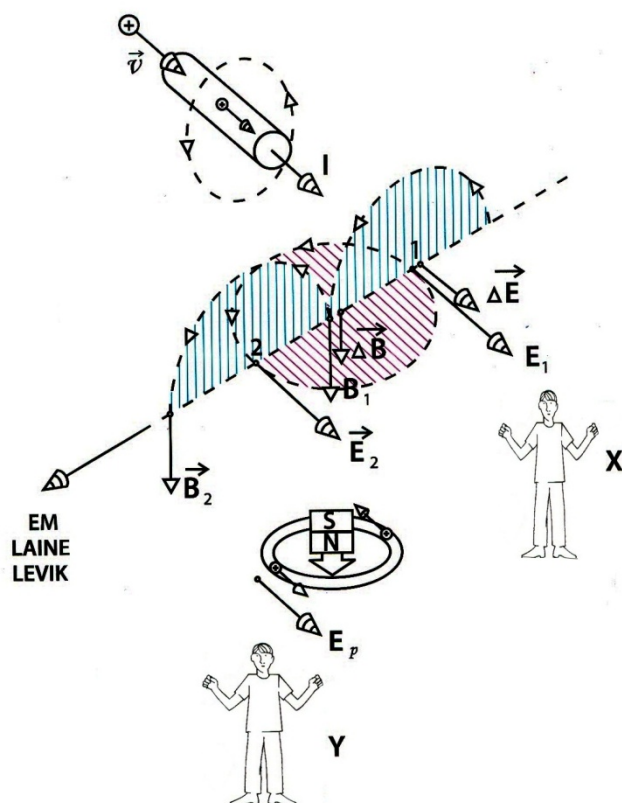
#### 3.1. Elektromagnetvälja levik elektromagnetlainetena

##### 3.1.1. Elektri- ja magnetväli elektromagnetlaines

Elektromagnetvälja ühtse teooria lõi Faraday katsetulemuste põhjal šoti füüsik James Clerk Maxwell. Faraday oli veenvalt näidanud, et magnetvälja muutumisel tekib pööriselektriväli sõltumatult muutuse päritolust. Maxwell oletas, et elektrivälja muutumine põhjustab samamoodi muutuva magnetvälja tekkimise, sõltumatult muutuva elektrivälja päritolust. Maxwelli käsitluse kohaselt jõuab elektrivälja muutus ühest ruumi punktist teise magnetvälja vahendusel. Elektrivälja muutumine ühes punktis põhjustab kõigepealt muutuva magnetvälja ja selle magnetvälja muutus

kutsub elektromagnetilise induktsiooni teel esile elektrivälja muutumise naaberpunktis. See tähendab, et igasugune elektri- või magnetvälja muutus levib ruumis lainena. Just lainele on ju omane kindlate hälbeseisundite järjestikune esinemine laine levikusuunal paiknevates punktides. Tekkivat lainet nimetas Maxwell **elektromagnetlaineks**.

Püüame nüüd joonise 2.44 abil mõista elektromagnetlainete tekkemehhanismi. Lähenev juonise ülemise vasaku nurga poolt vaatlejale  $X$  kiirusega  $v$  liikuv positiivselt laetud keha. Täheldame, et selline liikumine on samaväärne vaatleja  $X$  poole kulgeva vooluga  $I$  joonisel kujutatud juhtmes. Vaatleja  $X$  registreerib tema poole suunatud elektrivälja  $E_1$ , sest tegemist on positiivse laenguga. See väli tugevneb, kuna välja tekitav keha läheneb vaatlejale, väljatugevus aga on teatavasti pöördvõrdeline kauguse ruuduga. Järelikult on ka väljatugevuse muut  $\Delta E$  vektorina suunatud vaatleja  $X$  poole, seega paremale alla. Tugevnev elektriväli tekitab tugevneva magnetvälja, mille jõujooned ümbritsevad parempoolsete pööristena elektrivälja tugevuse muudu vektorit  $\Delta E$ . Nad ümbritsevad punktis 1 vektorit  $\Delta E$  samamoodi, nagu nad joonise vasakpoolses ülemises osas ümbritsevad vooluga juhete, olles suunatud juhtme taga üles ja ees vasakul alla.



J. 2.44. Elektromagnetlainete tekkemehhanism

Seega tekib punktist 1 vasakul alla suunatud ja tugevnev magnetväli magnetinduktsiooniga  $B_1$ . Kuna see väli on tugevnev, siis on alla suunatud ka magnetinduktsiooni muut  $\Delta B$ . Vektoritega  $B_1$  ja  $\Delta B$  samal sihil allpool paiknev vaatleja  $Y$  registreerib tugevnevat magnetvälja samamoodi nagu siis, kui tema poole liiguks ülalt alla püsiv magnet, põhjapoolus ees. Kui see magnet läbiks liikudes juhtmerõngast, siis tekiks selle rõnga parempoolses tagumises ääres tahapoole (vasakule üles) ning rõnga vasakpoolses esiääres ettepoole (paremale alla) suunatud induktsioonivool, mida võib vaadelda põhjustatuna samamoodi suunatud pööriselektriväljast  $E_p$ . Pööriselektrivälja jõujooned ümbritsevad vasakpoolsete pööristena magnetvälja kasvu suunda.

Aga täpselt samamoodi tekib paremale alla suunatud pööriselektrivälgi tugevusega  $E_2$ , ka punktis 2, mis ju samuti jääb horisontaaltasandis paikneva ning  $\Delta B$  suunda ümbritseva pöörise vasakule esiäärele. Võime teha kokkuvõtte: muutuv elektrivälgi tugevusega  $E_1$  on magnetvälja  $B_1$  vahendusel ruumis vasakule ettepoole liikunud. Temast on saanud väli  $E_2$ . Kuid punktis 2 kordub seesama protsess, mis leidis aset punktis 1. Horisontaaltasandis paiknev, paremale ette suunatud elektrivälgi  $E_2$  tekitab endast vasakul eespool vertikaaltasandis paikneva ja alla suunatud magnetvälja  $B_2$ . Võime nentida: magnetväljast  $B_1$  on elektrivälja  $E_2$  vahendusel saanud magnetväli  $B_2$ . Ehk teisisõnu, magnetväli on elektrivälja vahendusel liikunud vasakule ettepoole. Seega elektromagnetväli liigub ruumis lainena algse elektrivälja muutusega ristavas suunas. Elektrivälgi ja magnetväli on laines omavahel risti ja nad mõlemad on ka risti laine levimissuunaga. Eiektromagnetlaine on ristlaine.

Olgu öeldud, et täpselt samamoodi kiirgaks elektromagnetlaineid raadio saateantenn, (p. 2.8.2) mille juhtme tükk paikneb joonise 2.44 vasakpoolses ülemises osas ja mille juhtmes kulgeks ajas muutuv vool. Elektromagnetlained kiirguvad juhtmega ristavas suunas, joonisel 2.44 vasakule alla. Veel tasub märkida, et elektrivälja  $E_2$  ümbritseva magnetvälja  $B_2$  pööriselise jõujoon on laine levikusuunal punktist 2 paremal suunatud üles, seega vastupidiselt elektrivälja  $E_2$  ennast tekitanud magnetväljale  $B_1$ . Selles avaldub Lenzi reegel – indutseeritud magnetväli toimib vastupidiselt teda esile kutsunud põhjusele.

Elektromagnetlainete toime sõltub lainete **sagedusest**  $f$  ehk ajaühikus toimivate võngete arvust või **lainepikkusest**  $\lambda$  ehk naaber-laineharjade vahekaugusest. Nende kahe suuruse seos tuleneb ühtlase liikumise kiiruse valemist  $v = s/t$ . Teepikkuseks  $s$  on laine korral lainepikkus  $\lambda$ , mille läbimiseks kulub aeg  $t$  on võnkeperiood  $T$ . Perioodi pöördväärtus on aga sagedus  $f$ . Seega

$$v = \frac{s}{t} = \frac{\lambda}{T} = \lambda \frac{1}{T} = \lambda f,$$

laine levimiskiirus on lainepikkuse ja sageduse korrutis. Kui tegemist on elektromagnetlainetega vaakumis, siis asendub  $v$  valguse kiirusega vaakumis  $c$  ning lainepikkuse  $\lambda$  all tuleb mõista lainepikkust vaakumis, niisiis

$$\lambda f = c \quad (2.20)$$

Elektromagnetlained peegelduvad metallpindadelt. See tuleneb elektrivälja suutmatusest tungida elektrit juhtivatesse kehadesse. Elektromagnetlained difrageeruvad (levivad lainepikkusele lähedaste mõõtmetega tōkete taha). Nad interfereeruvad (liituvad) ja moodustavad seisulaineid samamoodi nagu helilained või lained kumminōōris. Elektromagnetlainete interferentsist ja difraktsioonist tuleb lähemalt juttu järgmises peatükis. Seal käsitletakse ka katseid, millest järeldub, et elektromagnetlained tekivad ja kaovad kindla energiaga portsjonite ehk kvantide kaupa. Kvante võib vaadelda osakestena, mille energia on võrdeline sagedusega  $f$ .

### 3.1.2. Elektromagnetlainete skaala

Kogu meid ümbritsev ruum on täidetud elektromagnetlainetega. Õnneks me lõviosa nendest ei taju, muidu oleks võimatu aru saada, mis meie ümber toimub.

Elektromagnetlainetel võivad olla väga erinevad omadused ja seepärast on neil ka erinevad nimed. Suurt osa elektromagnetlaineid kutsutakse **kiirgusteks**.



Ühe osa neist lainetest on inimene tekitanud ja pannud need ennast teenima. Näiteks raadiolained kannavad edasi infot, lambivalgus lubab inimestel pimedal ajal näha, infrapunakiirgus ehk infravalgus aitab teleka puldiga mängima panna. Aga ka tavaline vahelduvvool juhtmes tekitab elektromagnetlainet.



Teine osa lainetest aga tekitab niisama, ilma inimese osaluseta. Näiteks Päikeselt tulev ultraviolettkiirgus ehk ultravalgus päevitab meid kenasti pruuniks,

### Elektromagnetlainetega seotud esemed

radioaktiivne kiirgus, mis tekib radioaktiivsete ainete lagunemisel ohustab meie tervist, jaaniusside salapärase kuma rõõmustab meid suveööl.

Peamiseks elektromagnetlainet iseloomustavaks suuruseks on sagedus  $f$ . Laine **sageduseks** nimetatakse ühes sekundis sooritatud täisvõngete arvu. Sageduse mõõtühikuks  $1 \text{ Hz} = 1 \text{ s}^{-1}$ . Elektromagnetlainete korral peetakse silmas  $E$ - või  $B$ -vektori võnkumisi.

Ajaloolisest traditsioonist tulenevalt kasutatakse palju ka lainepikkust  $\lambda$  vaakumis. **Lainepikkus** näitab vähimat kaugust kahe samas võnkefaasis oleva väljapunkti vahel. Näiteks kaugust kahe naabermaksimumi vahel. Lainepikkus mõõtühikuks  $1 \text{ m}$ .

Eespool toodud seose  $\lambda f = c$  (valem 2.20) põhjal on lainepikkus vaakumis ja sagedus omavahel pöördvõrdelised:

$$\lambda = \frac{c}{f}.$$

Kehtib ka seos  $v = \lambda f$ , kus  $v$  on laine kiirus,  $f$  - sagedus ja  $\lambda$  - lainepikkus

### **Näide 2.4**

Leiame sagedusel  $100 \text{ MHz}$  töötava raadiosaatja elektromagnetlainete lainepikkuse vaakumis.

Antud:

$$f = 100 \text{ MHz} = 10^8 \text{ Hz}$$

$$c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$$

$\lambda = ?$

$$\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^8 \text{ m/s}}{10^8 \text{ Hz}} = 3 \text{ m}$$

Vastus. Selle saatja raadiokiirguse lainepikkus on  $3 \text{ meetrit}$ .

Kui elektromagnetlaine levib tühjuses (vaakumis), siis on lainel suurim võimalik kiirus maailmas, mida tähistatakse tähega  $c^1$ , kusjuures  $c = 299\,792\,458 \text{ m/s}$ . Seda

<sup>1</sup> Tähis  $c$  tuleneb kreeka keelse sõna *celeritas* (e.k. kiirus) esitähdest

suurust loetakse absoluutselt täpseks suuruseks, st selle mõõtemääramatus on null. Tihti kasutatakse selle kiiruse ligikaudset väärtust  $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ .

Laine üleminekul ühest keskkonnast teise võib laine kiirus muutuda. See kutsub esile ka lainepikkuse muutumise, kuid laine sagedus sealjuures ei muutu kunagi.

Ülevaate saamiseks kõikvõimalikest elektromagnetlainetest on kombeks paigutada nad sageduse või lainepikkuse järgi astmikule ehk skaalale, mille ühes otsas paiknevad madalsageduslikud ja pikad, teises (parempoolses) otsas aga kõrgsageduslikud ja lühikesed lained. Saame nn **elektromagnetlainete skaala**. Järgnevalt loetletud elektromagnetlainete põhiliigid erinevad (lisaks sagedusele või lainepikkusele) veel saamisviisi, levimise seaduspärasuste ning ainest läbitungimise võime poolest.

**Madalsageduslained** ( $f = 0 \dots 10^4 \text{ Hz}$ ,  $\lambda = 10^4 \text{ m}$  ja enam) on sisuliselt vahelduvvool, millega lähem tutvumine seisab meil ees *Energia* kursuses. Need lained levivad elektrijuhtides. Vaakumis või dielektrikus (näiteks õhus) on vastava elektromagnetvälja energia ja seega ka lainete intensiivsus tühiselt väikesed. Nimetatud põhjusel kantaksegi vahelduvvooluga kaasneva elektromagnetvälja energiat (ehk kõnekeeles lihtsalt elektrienergiat) üle juhtmete abil.

**Raadiolained** ( $f = 10^5 \dots 10^{12} \text{ Hz}$ ,  $\lambda = 10^4 \text{ m} \dots 10^{-4} \text{ m}$ ) on elektromagnetilise infoedastuse põhivahendiks. Võnkumisi tekitab elektrongeneraator ja vastavaid laineid kiirgab raadioantenn. Ajaloolise tava kohaselt jagatakse raadiolainete piirkonda omakorda millimeeter- ja sentimeeterlainealaks lainepikkustega vastavalt 1-10 mm ja 1-10 cm (satelliittelevisiooni ning radarite tööpiirkond), televisiooni detsimeeter- ja meeterlainealaks (lainepikkustega 1-10 dm ja 1-10 m), raadio ultralühilainealaks (levinuium lainepikkus 3 m) ning raadio lühilaine ( $\lambda = 10 \dots 100 \text{ m}$ ), keskaine ( $\lambda = 100 \dots 1000 \text{ m}$ ) ja pikkaine alaks (lainepikkus üle 1000 m).

**Optiline kiirgus** ( $f = 10^{12} \dots 10^{17} \text{ Hz}$ ,  $\lambda = 10^{-4} \text{ m} \dots 10^{-8} \text{ m}$ ) on peaosatäitjaks valgusnähtustel. Optilist kiirgust tekitavad peamiselt aatomite väliskihtide elektronid. Optiline kiirgus jaguneb omakorda ultravalguseks ( $\lambda = 10 \dots 380 \text{ nm}$ ,  $1 \text{ nm} = 10^{-9} \text{ m}$ ), nähtavaks valguseks ( $\lambda = 380 \dots 760 \text{ nm}$ ) ja infravalguseks ( $\lambda = 760 \text{ nm} \dots 1 \text{ mm}$ ). Sellest kõigest tuleb lähemalt juttu järgmises peatükis.

Ultravalgust kirjeldab **UV indeks**, mis näitab ultravalguse intensiivsust ja mille mõõtühikuks on  $1 \text{ mW/m}^2$ . Seda kasutatakse päikesevalguses sisalduva ultravalguse kirjeldamiseks. Kui UV-indeksi väärtus on 1, siis on intensiivsus

$25 \text{ mW/m}^2$ , väärtusele 2 vastab  $50 \text{ mW/m}^2$ , väärtusele 3 vastab  $75 \text{ mW/m}^2$  jne.

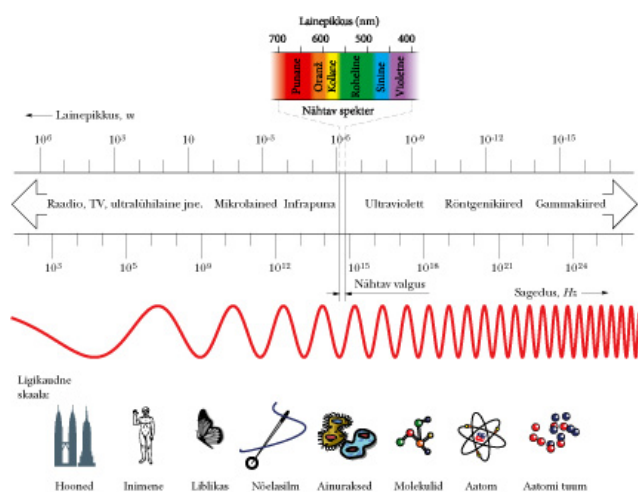
Indeksi suuremate väärtuste korral on ohud suuremad kui väiksemate puhul.

Ultravalgust indeksiga alla 2 võib pidada inimesele ohutuks, väärtustel 3-5 on mõistlik esmakordsel päevitamisel piirduda 30-60 minutiga. Kui indeksi väärtus on üle 5, tuleb päevitamise ja päikese käes töötamisega olla ettevaatlik.

**Röntgenikiirgus** ( $f = 10^{16} \dots 10^{19} \text{ Hz}$ ,  $\lambda = 10^{-8} \text{ m} \dots 10^{-11} \text{ m}$ ) tekib kas kiirete elektronide järsul pidurdumisel või siis protsessidel, milles osalevad aatomite sisekihtide elektronid. Röntgenikiirguse lainepikkuse suurusjärg ühtib aatomite vahekaugusega tahkistes. Meditsiinis leiab laialdast kasutamist röntgenikiirguse võime tungida läbi inimkeha.

**Gammakiirgust** ( $f = 10^{19} \dots 10^{23} \text{ Hz}$ ,  $\lambda = 10^{-11} \text{ m} \dots 10^{-14} \text{ m}$ ) väljastavad radioaktiivsel lagunemisel aatomite tuumad. Gammakiirguse laineomadusi on raske uurida, sest lainepikkus on väiksem aatomi mõõtmetest. Gammalainet pole enam millegagi võrrelda. Gammakiirgus tungib raskusteta läbi peaaegu igast ainest.

Nagu näeme, kaasneb kiirgaja mõõtmete vähenemise a ülaltoodud reas (antenn → molekul → aatomi väliskiht → aatomi sisekiht → tuum) lainepikkuse vähenemine ja sageduse suurenemine. Koos sagedusega suureneb ka kiirguse energia ning läbitungimisvõime.



**Katse Ultra- ja infravalguse demonstreerimine:** ekraanile tekitatakse pidev spekter ja väljaspool nähtavat piirkonda näitavad mõõteriistad kiirguse olemasolu (IP ja UV.)

Peab lisama, et erinevate lainepiirkondade vahel puuduvad täpsed piirid. Jaotuse aluseks on eelkõige laineallikad, kusjuures erinevate laineallikate poolt

tekitatud lainete sagedused kattuvad. Kuid kehtib kindel **seaduspärasus**: mida väiksemad on laineallika mõõtmed, seda lühem on kiirguva laine pikkus.

Kõikidest elektromagnetlainetest näeb inimese silm ainult seda osa, kus laine sagedus jääb vahemikku  $10^{14}$  Hz ...  $10^{15}$  Hz. Sellise sagedusega elektromagnetlainet nimetatakse **valguseks**.

Teistel elusolendel võivad tekitada nägemisaistingu aga teistsuguste sagedustega elektromagnetlained. Näiteks maod tajuvad hästi infravalgust, aga mesilased ultravalgust.

Elektromagnetlaineid tajub inimene lisaks nägemisele ka **soojusena**. Pole ju vaja käega katsuda, kas ahi või radiaator on soe, juba eemalt tunneme, kuidas see “sooja õhkab”. Seda tunnet tekitavad elektromagnetlained, mille sagedus jääb vahemikku  $10^{12}$  Hz ...  $10^{15}$  Hz.

Elektromagnetlaineid kasutab inimene väga paljudes eluvaldkondades. Järgnev loetelu näitab valdkondade kaupa seadmeid või meetodeid, kus kasutatakse elektromagnetlaineid.

**Loodusteadused (bioloogia, füüsika, geoloogia, geograafia, keemia) :** mikroskoobid, pikksilmad, spektroskoopia, refraktomeetria, interferomeetria, difraktomeetria, polarimeetria, röntgendifraktsioon, luminescentsanalüüs, georadarid.

**Astronoomia:** raadioteleskoobid, optilised teleskoobid, röntgenteleskoobid, gammateleskoobid, spektroskoopia.

**Meditiin:** röntgendiagnostika, kiiritusravi, laserteraapia, laserkirurgia, laserskalpellid, endoskoopia, infrapunasaun, IP steriliseerimine, UV desinfitseerimine.

**Kultuur, kunst, sport:** fotoaparaat, filmikaamera, TV kaamera, CD ja DVD mängijad, LCD teler, valgustusseadmed, värvusmuusika, luminescentsvärvid, UV “must valgus”, holograafia, fotofiniš, laserpüssid, kaugusmõõdikud.

**Tehnika:** raadioja TV levi, mobiilside, telefonside, internet, GPS<sup>2</sup>, radarid, päikesepatareid, mikrolaineahjud, kaugjuhtimispuldid, liikumisandurid, laserprinterid, skännerid, arvutihiired, digilauad, laserloodid, pointerid, kaugusmõõdikud, valeraha kontroll, vöötkoodide lugemine, pagasikontroll, termograafia, röntgendefektoskoopia, laserlõikus ja -puurimine, laserkeevitus ja -jootmine, püromeetria, sahharimeetria, gaasianalüsaatorid, elektronoptilised muundurid, kunstteemantite valmistamine mikrolainete abil, laserkülmutus, lasersüüteküünlad autodele, laserablatsioon, infrapunakuivatus.

**Sõjandus:** lasersihikud, pimestavad laserrelvad, öönägemisseadmed, metalliotsijad, ründelaserid.

## **STOP**

1. Elektromagnetväli on elektromagnetilist vastastikmõju vahendav ühtne väli, mille piirjuhtudeks on elektriväli ja magnetväli.
2. Elektromagnetväli levib ruumis elektromagnetlainena, milles elektriväli ja magnetväli perioodiliselt muutuvad.
3. Väljavektorid on elektromagnetlaines risti laine levimise suunaga. Elektromagnetlaine on ristlaine.
4. Elektromagnetlainete põhiliikideks on madalsageduslained, raadiolained, optiline kiirgus, röntgenikiirgus ja gammakiirgus.

### **3.1.3. Optika**

Optika ehk valgusõpetus kirjeldab valguse tekkimist, levimist ja kadumist. Optikas nimetatakse valguse tekkimist **kiirgumiseks** ja valguse kadumist **neeldumiseks**.

Selleks, et **valgus tekiks**, peab olema mingi keha, mis muudab teisi energialiike valguseks. Sellist keha nimetatakse **valgusallikaks**. Näiteks nii hõõglambis kui LED<sup>3</sup>-lambis muudetakse valgusenergiaks elektrienergiat. Kusjuures hõõglambis kiiratakse suurem osa, umbes 80 % muundunud elektrienergiast infravalgusena (soojusena), aga LED-lambis valgusena.

Valguse **levimine** toimub erinevalt vaakumis või mingis keskkonnas ehk aines.

Vaakumis levib valgus nagu ikka elektromagnetlaine: muutuv elektriväli tekitab muutuva magnetvälja ja see omakorda uuesti muutuva elektrivälja ning kõik kordub. Nii kandub valgus ruumis edasi kiirusega  $c$ .

Valguse levimine mingis keskkonnas toimub aga teisiti, sest valguse teele jäävad mitmesugused laetud osakesed nagu ioonid, tuumad või elektronid. Kuna valguslained on elektriväli, siis see võib oma teele jäävaid laetud osakesi mõjutada, sest elektriväljas olevale laengule mõjub alati mingi jõud. Aatomite tuumad ja ioonid on valguslaine elektrivälja jaoks liiga rasked, et neid liigutada, aga elektronid on piisavalt kerged, et neid valguse sagedusega võnkuma panna ( $\square$  10<sup>15</sup> Hz). Kui valguse teele jäävad elektronid on aatomi koosseisus, siis valguse elektriväli annab

---

<sup>2</sup> GPS – Global Positioning System, eesti keeles: Globaalne Punkti Seire.

<sup>3</sup> LED – light-emitting diod, eesti k. valgusdiod.

elektronile energiat juurde ja see ergastub. Ergastatud olekus on elektron ca  $10^{-8}$  s ja seejärel läheb esialgsesse olekusse tagasi. Selle käigus kiiratakse just täpselt sama sagedusega valgust, mis enne ergastas elektroni. See kiiratud valgus levib edasi ja jõuab järgmise aatomis oleva elektronini ning paneb ka selle võnkuma ja kiirgama. Nii see kordub ikka ja jälle ning valgus levib aines edasi. Kahe elektroni vahel liigub valgus kiirusega  $c$ , kuid elektroni võnkuma panekuks ja kiirguseks kulub aega, sellepärast ongi valguse keskmine kiirus aines väiksem kui vaakumis.

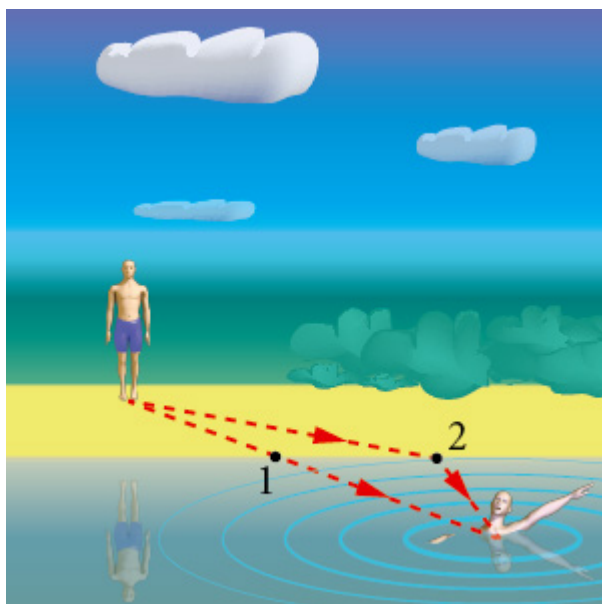
Valguse teele võivad jääda ka elektronid, mis pole aatomi koosseisus, vaid on nn. vabad elektronid. Ka need paneb valguslaine elektrivälja võnkuma, kuid need elektronid ei kiirga selle tulemusena valgust. Neile juurdeantud energia muutub aine siseenergiaks ehk soojuseks. Selliselt muutub valguslaine energia soojusenergiaks ja füüsikas öeldakse, et valgus neeldub aines.

Valgus levib ühtlases ehk homogeenses keskkonnas sirgjooneliselt. Mitteühtlases keskkonnas levib valgus kõverat teed pidi.

Valguse levimise teed saab leida looduses kehtiva printsiibi järgi, mis väidab, et valgus levib teed mööda, mille läbimiseks kulunud aeg on minimaalne. Seda printsiipi tuntakse **Fermat' printsiibina**, sest selle sõnastas 1662.a. prantsuse matemaatik Pierre de Fermat.

Kui keskkond on ühtlane, siis kõige kiiremaks levimisteedeks on sirge, aga kui keskkond ei ole ühtlane, siis pole ka kiireim tee sugugi sirge. Seda väidet saab illustreerida järgmise näitega.

Oletame, et me oleme järve kaldal ja äkki hakkab järves keegi uppuma. Uppujale tuleks appi jõuda nii kiiresti kui võimalik. Kas joosta punkti 1 ja ujuda otsejoones uppujani või on mõni teine variant otstarbekam (vt joonist)?



*Joonis 3.1.1.2. Uppujale jõuab appi kiiremini läbi punkti 2.*

Tuleb arvestada, et inimene jookseb kiiremini kui ujub ja sellepärast tuleks ujumismaad lühendada ja jooksmismaad pikendada. Sellepärast tulekski joosta punkti 1 ja sealt uppujani ujuda. Punkti 2 täpse asukoha saab välja arvutada, aga uppuja päästmisel pole selleks aega ning valik tuleb teha oma sisetunde järgi.

Kui valgus langeb mingile kehale, siis võib valgus kas kehalt peegelduda, kehast läbi minna või

kehas neelduda ja muutuda keha siseenergiaks. Ükski nendest protsessidest ei toimu täielikult. Ka kõige parem peegel ei peegelda valgusest 100 %, mingi osa valgusest siiski neeldub peeglis. Samuti ei lase ka kõige puhtam akn klaas läbi kogu valgust, ikka neeldub mingi osa valgusest klaasis

Kui valgus langeb ainele, mis valgust läbi ei lase ja ei peegelda ka, siis öeldakse, et valgus **neeldus** selles aines. Lihtsamalt öeldes: valgus kadus ära. Aga me teame, et

kehtib **energia jäävuse seadus**, järelikult pidi neeldumisel valgusenergia muutuma mõneks teiseks energialiigiks. Tavaliselt muutub neeldunud valgusenergia siseenergiaks ehk soojuseks. Kuid võib muutuda ka näiteks eletrienergiaks nagu see juhtub **päikesepatareides**.

Valgus ei neeldu aines kunagi täielikult, sest ka kõige mustem pind peegeldab natuke valgust tagasi. See hulk võib olla küll tühine, aga nulliks ei saa see kunagi. Näiteks tahma korral peegeldub sellele langenud valgusest tagasi vähem kui 0,1 %.

### **Katse**

**Valguse neeldumine:** punane laserikiir läbi punase ja sinise klaasi; laserikiire peegeldumine erinevatelt pindadelt (ka tahmalt), võrrelda peegeldunud valguse heledusi.

**Päikesepatarei:** taskulambi pirni süütamine.

### **Küsimusi ja ülesandeid**

1. Reastage pildil 3.1.1.1. olevad esemed neis kasutatavate elektromagnetlainete sageduse järgi.
2. Mille poolest erinevad elektromagnetlained helilainetest?
3. Mida nimetatakse elektromagnetlainete skaalaks?
4. Kuidas me teame, et on olemas silmale nähtamatuid elektromagnetlaineid?
5. Kuidas on omavahel seotud laine kiirus, sagedus ja lainepikkus?
6. Mis juhtub lainet kirjeldavate suurustega, kui laine läheb ühest keskkonnast teise?
7. Kui suur võnkesagedus vastab vaakumis valguse lainepikkusele: a) 760 nm; b) 0,38  $\mu\text{m}$ ?
8. Mitu täisvõnget teeb 1 sekundis vaakumis leviv elektromagnetlaine lainepikkusega: a) 1 km; b) 0,01 nm; ?
9. Meist 6 km kaugusel lööb välku ja müristamist hakkame kuulma 18 s pärast. Kui kaua levib välgu valgus meieni? Kui suur on heli kiirus õhus? Mitu korda on valguse kiirus suurem heli kiirusest?
10. Mille poolest on optika ajaloos olnud tähtsad I. Newton, C. Huygens, T. Young, J. Maxwell, M. Planck ja A. Einstein?
11. Miks öeldakse, et raadiosaateid "antakse eetrisse" ?
12. Mis toimus Eestis 1865.a., kui J. Maxwell esitas elektromagnetlainete teooria?
13. Mis toimus eestis 1905.a., kui A. Einstein seletas fotoefekti valguskvantide abil?

### **STOP**

1. Elektromagnetlaineid võib tekitada nii inimtegevus kui looduslikud protsessid.
2. Elektromagnetlaineid eristatakse sageduse või lainepikkuse järgi.
3. Elektromagnetlainete skaala on diagramm, kus kõik elektromagnetlainete liigid on reastatud sageduse või lainepikkuse järgi.

4. Elektromagnetlainete peamised liigid on: raadiolained, optiline kiirgus (infravalgus, valgus ja ultravalgus), röntgenikiirgus ja gammakiirgus.
5. Laine sageduseks nimetatakse ühes sekundis sooritatud täisvõngete arvu.
6. Lainepikkuseks nimetatakse kaugust välja kahe samas võnkefaasis oleva naaberpunkti vahel.
7. Kehtib seos  $v = \lambda \cdot f$ , kus  $v$  on laine kiirus,  $\lambda$  - lainepikkus ja  $f$  – sagedus.
8. Valgusallikaks nimetatakse keha, kus mingi energialiik muundub valgusenergiaks.
9. Valguse neeldumiseks nimetatakse valgusenergia muundumist mõneks teiseks energialiigiks.

## 3.2. Valguse kirjeldamine

### 3.2.1. Elektromagnetlainet ja valguslainet (1h)

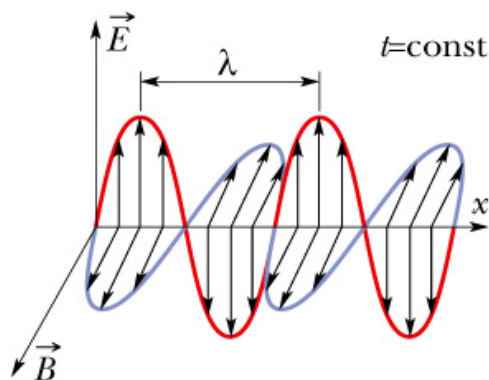
Eelmises peatükis rääkisime, et valgus on üks elektromagnetlainete liik. Kuid valguslainet kirjeldamisel ei kasutata magnetvälja. Räägitakse ainult **E-vektorist** kui **valgusvektorist**. Sellisel lihtsustusel on vähemalt kaks põhjust. Esiteks on kahemõõtmeliste lainete võimalik korralikult paberil või arvutiekraanil kujutada. See on vajalik paljude praktiliste ülesannete lahendamisel, kus tuleb laineid graafiliselt liita või lahutada. Teine põhjus seisneb selles, et valgusaistingu silmas või signaali mõnes tajuris tekitab just valguslainet elektrivälja, mõjudes neis olevatele elektronidele.

Elektromagnetlainet kirjeldakse samade suurustega, mis on meile tuttavad juba mehaaniliste lainete õppimisest: **amplituud, hälve, lainepikkus, periood, sagedus, kiirus, faas**. Lisaks neile aga veel **E-vektor** ja **B-vektor**.

Elektromagnetlainet kirjeldavad võrrandid:

$\vec{E} = \vec{E}_0 \sin 2\pi f t$ , kus  $\vec{E}$  on E-vektori hetkväärtus ehk hälve,  $\vec{E}_0$  selle vektori amplituudväärtus;

$\vec{B} = \vec{B}_0 \sin 2\pi f t$ , kus  $\vec{B}$  on B-vektor,  $\vec{B}_0$  selle amplituudväärtus.



Joonis 3.2.1.1. Elektromagnetlainet komponentide hetkväärtused ehk hälbed piki x-telge

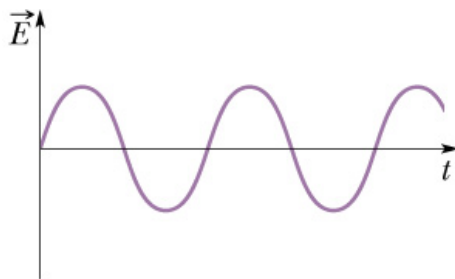
Valguslaineks nimetatakse elektromagnetlainet, mis tekitab inimesel valgusaistingu. Selliste lainete sagedus jääb vahemikku  $3,95 \cdot 10^{14} \dots 7,9 \cdot 10^{14}$  Hz ja lainepikkus vahemikku  $760 \dots 380$  nm.

Valguslainet kirjeldamisel ei kasutata B-vektorit. Teised kasutatavad suurused on samad nagu ikka elektromagnetlainet korral.

**Simulatsioon**  
**elektromagnetlainet ja valguslainet levimisest.**  
 Esimesel juhul peaks olema näha elektri- ja magnetvälja muutumist laine levimisel (kusjuures mõlemad väljad võnguvad samas faasis). Teisel juhul on ainult elektrivälja.

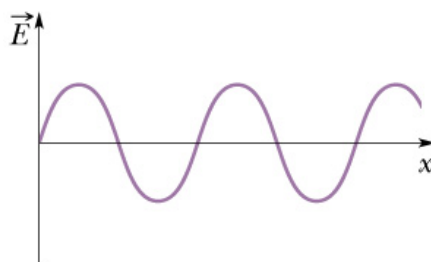
Valguslainet kirjeldab võrrand  $\vec{E} = \vec{E}_0 \sin 2\pi f t$ , kus  $\vec{E}$  on  $E$ -vektor ehk valgusvektor,  $\vec{E}_0$  valgusvektori amplituud ja siinusfunktsiooni argument  $2\pi f t$  on laine **faas**.

Valguslainet saab esitada kaheksuguste graafikutega. Ühel juhul näidatakse, kuidas ühes kindlas ruumipunktis muutub aja jooksul  $E$ -vektori väärtus.



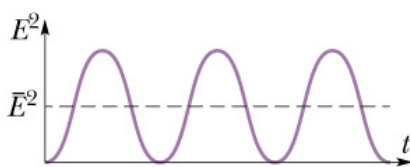
Joonis 3.2.1.2. Valgusvektori muutumine aja jooksul ühes ruumipunktis

Teisel juhul näidatakse, milliseid väärtusi omab  $E$ -vektor ühel ajahetkel mingis ruumisuunas.



Joonis 3.2.1.3. Valgusvektori väärtused piki  $x$ -telge ühel ajahetkel

Kõiki füüsikalisi suurusi peab olema võimalik mõõta. Aga  $E$ -vektori muutumissagedus on ca  $10^{14}$  Hz ja nii kiiresti muutuvat suurust pole võimalik ühegi riistaga mõõta. Sellepärast kasutatakse  $E$ -vektori keskmist väärtust. Täpsemalt öeldes, kasutatakse  $E$ -vektori ruudu keskväärtust  $E_{keskm}^2$ . See on ühe laine korral muutumatu suurus ja seda on võimalik mõõta.



Joonis 3.2.1.4. Valguslaine  $E$ -vektori muutumine ajas. Punktiiriga on tähistatud muutumatu keskväärtus  $E_{keskm}^2$ .

Suurust, mis on võrdeline  $E_{keskm}^2$ -ga, nimetatakse valguslaine tugevuseks ehk **valguse**

**intensiivsuseks:**  $I = k E_{keskm}^2$ , kus  $k$  on võrdetegur. Intensiivsus näitab valgusenergia hulka, mis ajaühikus langeb pinnauhikule. Selle mõõtühikuks on  $1 \frac{J}{s \cdot m^2} = 1 \frac{W}{m^2}$ .

Mida suurem on  $E$ -vektori amplituud, seda suurem on ka  $E_{keskm}^2$  ja seega ka suurem valguse intensiivsus. Selline seos kehtib kõigi elektromagnetlainete korral.

Olukord on sarnane teiste lainetega. Näiteks madalad, väikese amplituudiga veelained ei löhu merkallast, küll aga kõrged lained, millel on rohkem energiat.

Valguslaine ei ole mingisuguse keskkonna võnkumine nagu veelaine on vee võnkumine. Valguse korral muutub ainult  $E$ -vektori väärtus. Järelikult pole valguslaine ka mingeid laineharjasid ega -nõgusid. On ainult  $E$ -vektori ehk valgusvektori maksimaalsed ja minimaalsed väärtused.

Valguse intensiivsuse asemel kasutatakse valgustehnikas mõistet kiiritustihedus, mida mõõdetakse ka ühikutes  $W/m^2$ . Et saada ettekujutus sellise ühiku suurusest, võib aluseks võtta fakti, et südasuve keskpäeval, selge ilmaga on Eestis päikesevalguse intensiivsus ehk kiiritustihedus maapinnal umbes  $1000 W/m^2$ .

Valguse kiirus on erinevates keskkondades erinev. Kehtib seaduspärasus, et mida suurem on keskkonna tihedus, seda väiksem on seal valguse kiirus. Näiteks õhus normaaltingimustel on valguse kiirus  $v = 2,9970 \cdot 10^8$  m/s, mis on praktiliselt võrdne



valguse kiirusega vaakumis. Seevastu ühes suurema tihedusega läbipaistvas aines, teemandis, on valguse kiirus  $1,2403 \cdot 10^8$  m/s.

Tänapäeval on välja töötatud sellised ained, milles valguse kiirus võib muutuda väga väikeseks, ulatudes ainult mõne meetrini sekundis ja on õnnestunud ka valguslaine täiesti seisma panna.

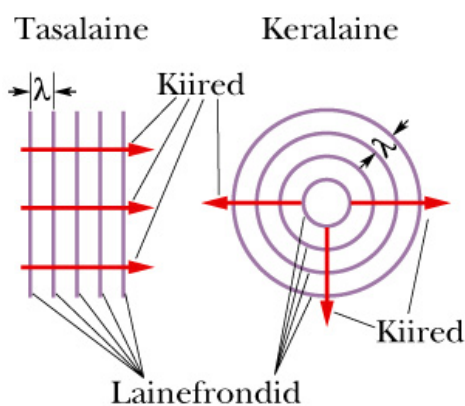
Sellest teatasid 2001.a. USA füüsikud /D. Phillips, *Physics Review Letters*, 29 January, 2001/. Asjahuvilised võiksid täpsemat infot otsida internetist märksõnade "stopping light" või "halting light" järgi.

Elektromagnetlainete nagu ka valguslainete levimist kirjeldatakse samamoodi nagu lainete levimist mehaanikas. Laine levimist ruumis kirjeldab **lainefront** või **lainepind**. Lainepind on pind või joon ruumis, kus kõik laine punktid võnguvad ühes faasis. Näiteks, kui veelaineid ülevalt vaadata, siis lainepindadeks võivad olla kõik laineharjad.

Joonistel esitatakse lainepinnad iga perioodi järel, ehk lainepindade vahekaugus on võrdne ühe lainepikkusega.

Lainepindade kuju järgi nimetatakse ka lainete tüüpe. Räägitakse **keralainetest** ja **tasalainetest**. Esimesel juhul on lainepinnaks kera, mida joonisel kujutatakse ringjoonena. Lainepinnad moodustavad sel juhul kontsentriliste ringide süsteemi. Teisel juhul on lainepinnaks tasand, mida joonisel kujutatakse sirge joonena. Lainepinnad

moodustavad sel juhul paralleelsete sirgete süsteemi.



### Simulatsioon tasa- ja keralaine levimisest

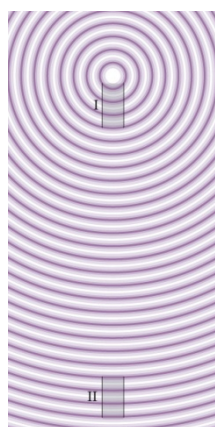
Foto vette vistud kivi ümber levivatest ringlainetest ja rannale jõudvatest sirglainetest meres.

Lainepindade ristsirgeid nimetatakse **kiirteks**.

Joonis 3.2.1.5. Tasalaine ja keralaine kujutamine joonisel.

Punkvalgusallikast hakkab ühtlases keskkonnas levima keralaine. Kui laine on allikast juba väga kaugemale jõudnud, siis muutuvad lainepinnad väiksemas

ruumipiirkonnas paralleelseteks ja seal võib rääkida tasalainest.



Joonis 3.2.1.6. Lainepinnad piirkonnas I on kaarekujulised (keralaine), allikast kaugel, piirkonnas II on lainepinnad sirged (tasalaine).

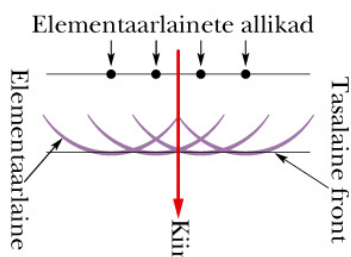
Kui on teada üks lainepind, siis järgmise saab leida, kasutades **Huygensi printsiipi**: lainefroni iga punkt on uue laine allikaks. Neid uusi laineid nimetatakse **elementaar-** või **sekundaarlaineteks**, mis on keralained. Järgmise

### Katse lainevannis.

Veepinnale pannakse ujuk (a' la õngkork) ja tekitatakse laineid: kas ring- või sirglaineid. Siis on näha, et lained levivad allikast kaugemale, aga kork ei liigu edasi. Sellest järeldub, et laine levib,

lainepinna leidmiseks tuleb leida sekundaarlainete puute- ehk mähispind.

**Simulatsioon**  
lainefrondi leidmisest



Joonis 3.2.1.7. Tasalaine pinna leidmine Huygensi printsiibi järgi.

Tõkestamata laine levib ainult frondi esialgse levimise suunas. Teistes suundades lained kustuvad üksteist, st alati leidub mingi sekundaarne allikas, kus võnkumised on vastandfaasis sinna jõudva lainega ja lained

kustuvad. Elektroteooria kohaselt summutab elektroniga vastandfaasis võnkuv elektrivälja elektroni võnkumise ja lõpetab selle kiirguse.

### 3.2.2. Valguse värvus ja lainepikkus

**Valgeks valguseks** nimetatakse Päikeselt tulevat valgust ehk päikesevalgust, mis sisaldab kõikvõimalikke värvilisi valgusi. Sageli öeldakse päikesevalguse asemel päevavalgus, mille all mõistame valgust, mis tuleb päeval ajal nii selgest taevast kui läbi pilvede. Tinglikult võib valgeks pidada ka hõõglambi valgust, kuigi selles on punast ja kollast valgust rohkem kui päevavalguses. Paremini sarnaneb päevavalgusele säästupirni valgus.

Valguse lainepikkus  $\lambda$  on meie jaoks imeväike. Kui kasutada piltlikku võrdlust, siis on valguse lainepikkus žiletitera paksusest keskeltläbi samapalju väiksem kui inimese pikkus on väiksem teletorni kõrgusest.

Sellele vaatamata on erineva lainepikkusega valguslaineid üksteisest eristada küllalt lihtne. Seda saab teha ka silma järgi. On kindlaks tehtud, et erineva lainepikkusega valguslained põhjustavad erinevaid **värvusaistinguid**. Näiteks, kui meie silma satub valgus, mille lainepikkus  $\lambda = 550$  nm, tekib meil mingi värvusaisting. On kokku lepitud, et seda värvust nimetatakse rohelisteks. Kui aga lainepikkus on 650 nm, siis tekib punase värvuse aisting. Inimsilm on nii tundlik, et see võib tajuda erinevaid värvitoone, kui lainepikkus erineb ainult 5 nm võrra.

Tabel 3.2.2.1. Värvuste ja lainepikkuste vaheline seos

Värvus	Lainepikkus, nm
Punane	760.....630
Oranž	630.....600
Kollane	600.....570
Roheline	570.....520
Helesinine	520.....470
Sinine	470.....420
Violetne	420.....380

Kõiki värvusi on võimalik saada, kui liita erinevas vahekorras kahte või kolme põhivärvust. **Põhivärvid on punane (R), roheline (G) ja sinine (B).** Neid värvusi kasutatakse ka televiisori või arvuti ekraanil pildi tekitamiseks.

Värvuste liitmiseks tuleb erinevat värvi valgused näiteks juhtida valgelt ekraanil ühte kohta. Televiisori või arvuti kuvaril on erivärvilised täpikesed ekraanil üksteisele aga nii lähedal, et meie silm ei suuda neid eristada ja nad liituvad meie silmas iseenesest.

Värvuste liitmist ei tohi segi ajada värvide liitmise ehk segamisega. Kui segada punast, rohelist ja sinist värvi, saame tulemuseks mingi tumeda värvi, pruunikas musta.

Värviliste valguste korral kasutatakse nn RGB süsteemi (red, green, blue), kus juba 1931.a. on aluseks värvused, mis vastavad kindlatele lainepikkustele: R = 700,0 nm; G = 546,1 nm; B = 435,8 nm. Neist kaks viimast vastavad elavhõbeda **kiirgusspektris** esinevatele joontele.

Põhivärvuste liitmisel võib saada ka valget valgust. Retsept on järgmine: tuleb liita punast, rohelist ja sinist valgust nii, et nende intensiivsused suhtuksid kui

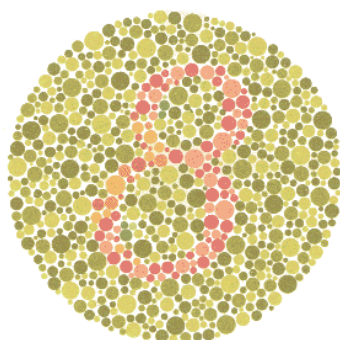
1 : 4,6 : 0,06.

Kuidas aga värvusi liita? Selleks tuleb valgele ekraanile juhtida üheaegselt erinevate lainepikkustega valgusvihud. Nende saamiseks võib kasutada värvilisi klaase, nn. valgusfiltreid, mis pannakse valge valguse allika (näiteks hõõglambi) ette. Punane klaas laseb läbi punast valgust, roheline rohelist ja sinine sinist. Ekraanil värvused liituvad.

Erinevaid värvitoone võib saada ka erinevate värvainete või värvide segamisel. Näiteks on meil midagi vaja värvida rohelisteks, aga rohelist värvi ei ole, küll on aga sinist ja kollast värvi. Mida teha? Tuleb segada kokku sinist ja kollast värvi ning saamegi rohelist värvi. Selline värvide liitmine on nn CMYK süsteemi aluseks, mida kasutatakse värvitruki korral. Tähed lühendis tähistavad: C – tsüaan (sinine); M – magenta (punane); Y – kollane; K – must (K on viimanbe tähts sõnast *black*). Kui RGB süsteemi põhivärvuste segamisel saame valge valguse, siis CMYK süsteemi põhivärvide segamisel saame musta värvi.

**CMYK simulatsioon:** erinevate põhivärvide segamisel saadavad värvid.

Enamik inimesi tajub värvusi ühtviisi, kuid leidub inimesi, kellel esineb



kõrvalekaldumisi normaalsest värvusnägemisest. Neid inimesi nimetatakse värvipimedateks. **Täieliku värvipimeduse** puhul näib kogu maailm must-valgena, kus kõik on kas must, valge või hall. Niisugust värvipimedust esineb väga harva. Rohkem esineb **osalist värvipimedust**. Peamiselt ei suudeta eristada punast ja rohelist värvust. Selle häda all kannatajad näevad kõiki värvusi kahes värvitoonis: kollakas ja sinakas. Niisugust värvipimedust nimetatakse ka

**RGB simulatsioon:** erinevate värvuste saamine põhivärvuste segamisel.

**Katse:** vaadata eri värvidega valgele paberile kirjutatud tekste läbi erinevate valgusfiltrite..

**Demo:** näidata Hg spektri sinist ja rohelist joont kui põhivärvuste etalone.

**daltonismiks.** See on tuletatud inglise keemiku ja füüsiku John Daltoni nimest, kes 1794. a. avastas nähtuse iseenda juures.

**Joonis värvipimeduse kontrollimiseks.**

<http://prillid.wordpress.com/2010/11/06/testi-oma-varvitaju/>

### 3.2.3. Valguse dualism (1h)

Kõik, mida me enda ümber näeme, koosneb mingisugustest ainetest. Aineid on palju, aga kõik nad koosnevad osakestest, milleks on aatomid või molekulid

Aga miks need osakesed püsivad aines koos ja laiali ei valgu? Näiteks kasvõi meie enda kehas. Sellepärast, et neid osakesi hoiavad koos **väljad**, täpsemalt elektri- ja magnetväli. Sellepärast öeldaksegi, et kõik, mida või keda looduses kohtame koosnevad aineist ja väljast. Need on üksteisest lahutamatud. Näiteks pole võimalik ära võtta elektronilt laengut koos elektriväljaga ja jätta järele ainult mingi osakene, millel on elektroni mass.

Ainel ja väljal on väga erinevad omadused. Näiteks mingi osakene asub ruumis kindlas kohas ja tal on kindlad mõõtmed Aga väljal, mida see osake tekitab, ei ole mõõtmeid, see levib üle kogu ruumi. Ja väli levib lainetena.

Seega võib öelda, et kogu loodusel on kahene olemus. Ühelt poolt saab loodust kirjeldada osakestega, mida võib põhimõtteliselt “näha ja katsuda”. Teiselt poolt saab loodust kirjeldada ka väljadega, mida pole näha, kuid mis vahendavad osakeste vahel mõjuvaid jõude. Sellist omaduste kahesust nimetatakse **dualismiks** (lad.k. *duo* – kaks). Looduses vastab igale lainele osake ja iga osakesega kaasneb laine. Näiteks ka elektrone saab kirjeldada lainete abil (vt **De Broglie lained**).

Ka valgust saab kirjeldada kaheti. Siiani oleme rääkinud valgusest kui elektromagnetlainest, mis levib ruumis lainena. Aga selgub, et valgust saab kirjeldada ka osakeste abil, nimelt on olemas valguse osakesed ehk kvandid. Valguse kvanti nimetatakse **footoniks** (kr.k. *phos* – valgus). Valguse kvantiseloom ilmneb selgemalt valguse kiirgumisel (tekkimisel) ja neeldumisel (kadumisel). Laineline olemus tuleb esile peamiselt valguse levimisel.

Footon on osake, millel seisumass on võrdne nulliga, see tähendab, et paigalolekus footon olla ei saa. Ehk teisti öelduna: kui footon peatatakse, siis muutub ta millekski muuks, tema energia muutub mõneks teiseks energialiigiks.

Valguse lainelised ja korpuskulaarsed (osakesetaolised) omadused ühendas omavahel M. Planck 1900.a., kui ta võttis kasutusele valemi

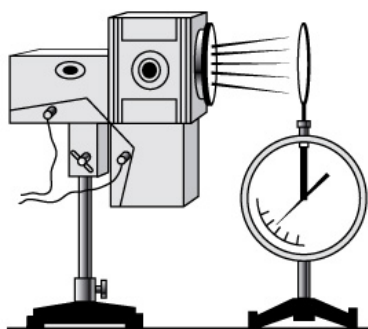
$$E = hf,$$

kus  $E$  on footoni energia,  $f$  vastava valguslaine sagedus ja  $h$  võrdetegur, mida tuntakse **Plancki konstandina**:  $h = 6,6 \cdot 10^{-34}$  J · s. Toodud valem kehtib kõigi elektromagnetlainete korral, mitta ainult valguse puhul.

Ühe footoni energia on nii väike, et seda otseselt mõõta on võimatu. Näiteks sääse ühe tiivalöögi energia on keskmiselt  $10^{12}$  (miljon miljonit)) korda suurem footoni energiast .

Footonite olemasolu tõestati **fotoefekti** katsetega. Fotoefektiks, täpsemalt **välisfotoefektiks** nimetatakse elektronide väljalöömist aineist. On olemas ka **sisefotoefekt**, mille korral valgus lööb elektrone välja aatomist, aga elektronid aineist ei välju.

Välisfotoefekti kasutatakse peamiselt valguse mõõtmise seadmetes, mida nimetatakse **fotoelektronkordistiteks**. Sisefotoefekt on aga näiteks **päikesepatareide** töö aluseks.



Välisfotoefekti uurimiseks kasutame katseseadet, mille skeem on toodud joonisel.

*Joonis 3.2.3.1. Välisfotoefekti katse skeem. Vasakul on valgusallikas, mis kiirgab nii nähtavat- kui ultravalgust, paremal elektroskoop metallplaadiga (näiteks tsinkplaat).*

**Eotoefekti katsed** mis on tekstis kirjeldatud.

Teeme rea katseid, mille tulemused võib kokku võtta järgnevalt:

- Kui elektroskoobiga ühendatud metallplaat laadida negatiivselt, siis selle valgustamisel kaob laeng mõne aja jooksul
- Kui plaat laadida positiivselt, siis laeng valguse toimel ei kao
- Kui me plaati üldse ei lae, siis valguse toimel plaat ei laadu
- Kui asetada valguse teele klaasplaat, siis ei kao ka negatiivselt laetud plaadi laeng

Teeme katsetest järeldused.

Esimene katse näitas, et valguse toimel kadus plaadilt elektrilaeng. Kuna negatiivse laengu kandjad on elektronid, siis võib järeldada, et valgus lõi plaadist välja elektrone.

Viimane katse aga näitas, et kui valguse teel oli klaasplaat, siis ei löödud plaadist elektrone välja. Põhjus on selles, et klaas laseb läbi ainult nähtavat valgust, aga mitte ultravalgust. Järelikult mitte igasugune valgus ei vabasta elektrone, vaid ainult suurema kvandienegiaga valgus ehk ultravalgus. On ju ultravalguse sagedus suurem kui nähtaval valgusel ja seega on ultravalgusel ka suurem kvandienegia. Tuleb märkida, et välisfotoefekt võib esineda üksikute ainete korral ka nähtava valguse toimel.

Kui plaat polnud laetud, siis valguse toimel plaat ei laadunud sellepärast, et väljalöödud elektronid tõmmati plaati tagasi. Põhjus on selles, et enne oli plaadis elektronide negatiivsete laengute ja prootonite positiivsete laengute summa null. Aga elektronide lahkudes jäi ülekaalu prootonite positiivsete laengute summa ja plaat omandas positiivse laengu.

Kui plaat juba on positiivselt laetud, siis tõmmatakse väljalöödud elektrone plaati tagasi veel tugevamini kui laadimata plaadi korral.

Välisfotoefekti avastas 1887.a. H. Hertz, kui ta uuris elektroodide vahel tekkivat **sädelahendust**. Ta märkas, et säde tekkis paremini, kui elektroode valgustada. Põhjalikumalt uuris efekti A. Stoletov 1888.a. Kuid nemad ei osanud nähtust seletada. Seda tegi A. Einstein footonite abil 1905.a. ja talle anti selle eest 1921.a. Nobeli füüsikapremia.

Einsteini teooria sisu võtab kokku valem, mida tuntakse kui **Einsteini valemit fotoefekti kohta**.

$$hf = A + \frac{mv^2}{2},$$

kus  $h$  on Plancki konstant,  $f$  – valguse sagedus,  $A$  – väljumistöö (töö, mida peab valguskvant tegema, et vabastada elektron positiivsete ioonide tõmbejõududest),  $m$  – elektroni mass ja  $v$  – vabanenud elektroni kiirus.

Einstein tõestas footonite olemasolu juba 17 aastat enne seda, kui A. Compton footonid katseliselt avastas.

### Välisfotoefekti simulatsioonid

Seega selgub, et valgusnähtusi seletatakse nii lainete kui kvantide abil ja sageli öeldaksegi, et valgus on olemuselt dualistlik ehk kahene. Täpsem oleks öelda, et mitte valguse olemus ei ole dualistlik, vaid **dualistlik on meie käsitus valgusest**: mõnede nähtuste juures avaldub valguse laineline olemus, teiste korral kvantolemus.

### Valguse laine- ja kvantteooriad ei ole vastandlikud, nad täiendavad teineteist.

Mida see tähendab? Aga seda, et kui me käsitleksime valgust kui ainult elektromagnetilist lainet, siis jääks meile mõistetamatuks mitmed valgusega seotud nähtused nagu juba eespool mainitud fotoefekt või **valguse rõhk**. Siis oleks leiutamata ka **laserid** ja kõik nendega seotu alates laserite kasutamisest meditsiinis ja lõpetades CD ja DVD mängijatega.

### Valguse rõhu simulatsioonid.

Ja kui me käsitleksime valgust kui ainult footonite voogu, siis jääks mõistetamatuks kõik valguse difraktsiooni ja interferentsiga seotud nähtused. Siis oleks leiutamata näiteks võrespektromeetrid, optiliste pindade **selgendavad katted**, **holograafia**, **optiline side** ja palju muud.

Mida väiksem on elektromagnetlainete sagedus  $f$ , seda väiksem on ka kvandi energia  $E$ , sest  $E = hf$ . Ja ühe kvandi energia võib olla nii väike, et sellest ei piisa millegi märkimisväärse tekitamiseks.

Näiteks raadiolainetel, sagedusega 100 MHz, on ühe kvandi energia nii väike, et raadios registreeritava signaali tekitamiseks peab antennini jõudma vähemalt  $10^{10}$  kvanti sekundis. Sellise osakeste arvu puhul on võimatu neid üksteisest eristada ja neid võib käsitleda lainena.

Ka veelaine koosneb ülilipaljustest veemolekulidest, aga keegi ei räägi veeosakeste liikumisest, vaid ikka veelainest.

Kuid suure sagedusega elektromagnetlainete, näiteks  $\gamma$ -kiirguse korral on nende lainelisi omadusi raske märgata. Sel juhul käitub kiirus pigem osakese kui lainena. Näiteks juba ühest  $\gamma$ -kvandist piisab, et esile kutsuda tuumareaktsiooni nagu seda võib teha ka mingi osakene, näiteks neutron.

Valgusel, mis on sageduste poolest raadiolainete ja  $\gamma$ -kiirguse vahepealne, avalduvad nii lainete kui osakeste omadused. See on aga ebatavaline ja harjumatu, sest me ei oska endale midagi taolist ette kujutada. Midagi muud sarnast pole me looduses märganud. Oleme harjunud, et osakene asub ikka mingis kindlas kohas, aga laine levib ruumis edasi. Kuid valguse korral on osake ka samal ajal laine ja laine osake.

Sellise ebatavalise olukorra põhjuseks on fakt, et inimene ei saa vahetult tajuda valguse olemust.

### Küsimusi ja ülesandeid

1. Miks valguse kirjeldamiseks kasutatakse  $E$  vektori ruudu keskväärtust, aga mitte  $E$  vektori keskväärtust?
2. Kui suur on valguse kiirus klaasis, kui on teada, et see moodustab 67 % valguse kiirusest vaakumis?
3. Avaldage valguslaine faas lainepikkuse kaudu.
4. Avaldage valguslaine faas perioodi kaudu.
5. Mille poolest erineb keralaine tasalainest ja mille poolest on sellega sarnane?
6. Mille poolest on lainefront sarnane lainepinnaga ja mille poolest on nad erinevad?
7. Valgel paberil on sinine tekst. Mis värvi valgusega tuleb teksti valgustada, et tekst muutuks loetamatuks? Kontrollige oma oletust katseliselt.
8. Leida valguse suurimale ja vähimale lainepikkusele vastava footoni energia.
9. Valguse sagedus on  $5 \cdot 10^{14}$  Hz. Milline on sellel vastava kvandi energia?
10. Mitme roheline valguse kvandi energiat oleks vaja, et teha ära töö, mis kulub 1 g massiga keha tõstmiseks 1 m kõrgusele. Rohelise valguse lainepikkus on 550 nm.
11. Valgus läheb õhust vette. Sealjuures valguse kiirus väheneb. Mis juhtub valguskvandi energiaga?
12. Footonil kui osakesel on ka mass. Kuidas arvutada footoni massi?
13. Kummal on kvandienergia suurem, kas infravalgusel või ultravalgusel?
14. Kui välisfotoefekti korral lüüakse valguse toimel metallplaadist vabu elektrone välja, siis miks laadimata metallplaat ei laadu ultravalgusega kiiritamisel?

### STOP

1. Valguslaine on elektromagnetlaine, mille kirjeldamiseks ei kasutata magnetvälja.
2. Valguslained kirjeldavad samad suurused mis elektromagnetlainet, v.a.  $B$ -vektor.
3. Valguse intensiivsus on määratud valguslaine  $E$ -vektori ruudu keskväärtusega:  
$$I = k E_{kesk}^2$$
4. Intensiivsus näitab valgusenergia hulka, mis ajaühikus langeb pinnauhikule.
5. Valguse kiirus vaakumis on  $3 \cdot 10^8$  m/s.
6. Lainepind on pind, kus kõik lainepunktid võnguvad samas faasis.
7. Valguslaineid kirjeldatakse kera- või tasalainete abil. Esimestel on lainepinnaks kera pind, teisel juhul tasand.
8. On olemas kolm põhivärvust: punane, roheline ja sinine (RGB), milledest koosnevad kõik teised värvused.
9. Kõik kehad meie ümber koosnevad ainesosakestest, mida hoiavad koos elektri- ja

magnetväljad.

10. Valgusel on nii osakese (kvandi) kui laine omadused. Sellist nähtust nimetatakse dualismiks.

11. Laineomadused avalduvad rohkem siis, kui võnkesagedus on väike.

12. Kvantomadused avalduvad rohkem siis, kui võnkesagedus on suur.

### 3.3. Elektromagnetlainete omadused

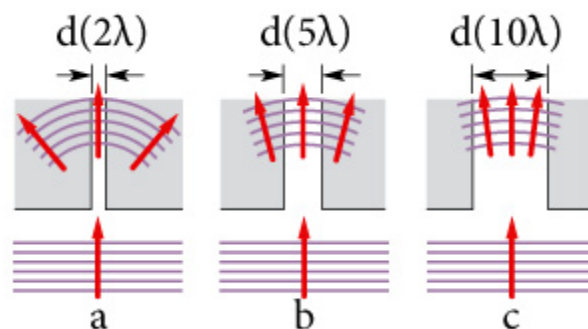
#### 3.3.1. Elektromagnetlainete difraktsioon ja interferents (1h)

Mehaaniliste lainete difraktsiooni ja interferentsi käsitlesime *Mehaanika* kursuses. Tuletame seal õpitut meelde, sest elektromagnetlainete difraktsioon ja interferents on põhimõtteliselt sarnased mehaaniliste lainete difraktsiooni ja interferentsiga.

**Difraktsiooniks** nimetatakse lainete kandumist teele jäävate tõkete taha. Näiteks veelained jõuavad **vees oleva kivi taha**.

Seda olukorda saab modelleerida ka **lainevannis**. Teeme seal katseid **tasalainetega**, mille teele on paigutatud erineva laiusega pilusid. Katses jälgime lainete difraktsiooni.

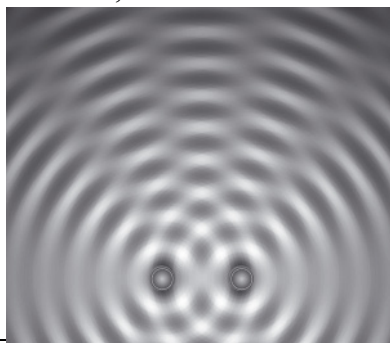
Difraktsioonikatse tulemused on esitatud järgmisel joonisel.



Joonis 3.3.1.1. Veelainete difraktsioon ava läbimisel. Varju piirkonda<sup>4</sup> (hall) kanduvad lained kõige rohkem kitsaima ava korral.

#### **Katse veelainete difraktsioonist lainevannis**

**Interferentsiks** nimetatakse lainete liitumist, mille tulemusena mõnes kohas lained muutuvad suuremaks (amplituud saab suuremaks kui ühe liituva laine amplituud), teises kohas väiksemaks (amplituud väheneb). Näiteks kui visata tiiki samaaegselt kaks kivi, siis kohtudes muutuvad tekkivad lained mõnes kohas suuremaks, teises kohas väiksemaks. Sama saame modelleerida ka lainevannis, kui kasutame kahte keralaine allikat.



#### **Katse veelainete interferentsist lainevannis**

Katse tulemus on toodud joonisel 3.3.1.2.

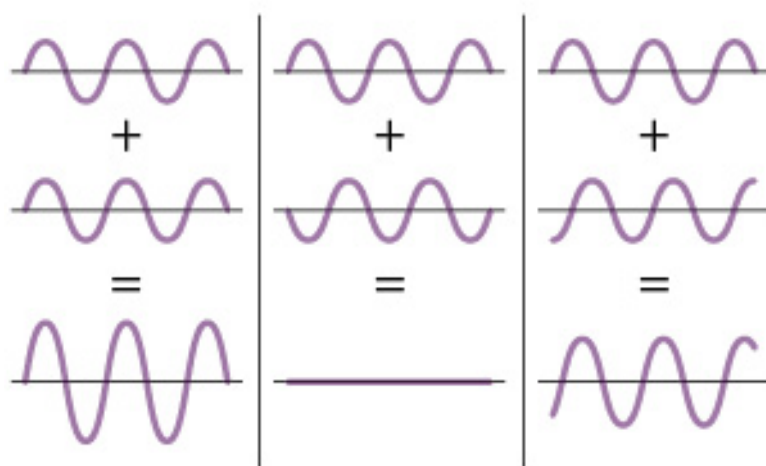
Joonis 3.3.1.2. kahe keralaine liitumise tulemus lainevannis

<sup>4</sup> Varju piirkonnaks nimetame seda ruumi osa tõkke taga, kuhu sirgjooneliselt leviv laine ei satu.



Katses nähtud veelainete **amplituudi** suurenemist või vähenemist mõnes kohas aitab mõista joonis 3.3.1.3. Seal on kujutatud kaks liituvat lainet mingis veepinna punktis. Liitlaine saamiseks tuleb liita lainete **hälbed** igal ajahetkel. Joonisel on toodud kolm juhtu. Joonise osas A on lained täpselt samas faasis, st et lainete miinimumid ja maksimumid esineva täpselt ühel hetkel mõlemas laines. Sellises olukorras tugevdavad lained teineteist maksimaalselt, liitlaine amplituud on võrdne liituvate lainete amplituudide summaga. Joonise osas B on lained täpselt vastandfaasis, st. et ühe laine maksimum esineb täpselt samal ajal kui teisel lanel on miinimum. Sellises olukorras nõrgendavad lained teineteist maksimaalselt, liitlaine amplituud on võrdne liituvate lainete amplituudide vahega.

Loomulikult esineb rohkem selliseid kohti veepinnal, kus lained pole täpselt samas või vastandfaasis. Neis on liitlaine amplituud maksimaalse ja minimaalse vahepealne nagu on see joonise osas C.



Joonis 3.3.1.3. Lainete liitumise tulemusi: A – liituvad lained samas faasis; B – liituvad lained on vastandfaasis; C – liituvad lained on suvalise faasinihkega.

**Simulatsioon**, kus saab jälgida liitlaine amplituudi olenevust lainete faaside vahest.

Selleks, et tekiks interferents, peavad liituvad lained olema **koherentsed**, see tähendab, et lainetel peab olema ühesugune **lainepikkus** ja nende **faaside** vahe ei tohi aja jooksul muutuda.

Difraktsioon ja interferents esinevad ka elektromagnetlainete korral. Meie piirdume nende nähtustega ainult valguse korral. Ja kohe tekivad küsimused, millele polegi lihtne vastata.

Kui esineb **valguse difraktsioon**, siis valgus levib ka tōkete taha. Kas siis peaks olema võimalik näha “nurga taha”?

Kui esineb **valguse interferents**, siis peaks kahe valgusallika korral kuskil valguslained üksteist tugevdama ja kuskil nõrgendama. Kas kahe lambi põlemisel tekivad tühja toa põrandal heledamad ja tumedamad piirkonnad?

Mõlemale küsimusele tuleb vastata eitavalt, sest midagi sellist ei juhtu. Aga miks?

Sellepärast, et me pole arvestanud kaht asjaolu, mida tuleb lainete difraktsiooni ja interferentsi korral arvestada.

**Esiteks**, lained difrakteeruvad (kalduvad sirgjoonelisest levimissuunast kõrvale) ainult siis, kui nende teele jäävad tōkete või avade mõõtmed on võrreldavad lainepikkusega.

Valguse lainepikkus on väga väike ja tavaelus nii väikesi objekte pole või me ei märka neid. Küll aga saab valguse difraktsiooni vaadelda selleks korraldatud katsetes.

### **Lepime kokku, et edaspidi räägime ainult avadest, kuigi kogu jutt kehtib ka tōkete korral**

Ava väiksuse nõude põhjendamine pole lihtne ja sellele annab vastuse ülikooli optikakurcus. Meie piirdume ainult eksperimentaalse fakti konstateerimisega.

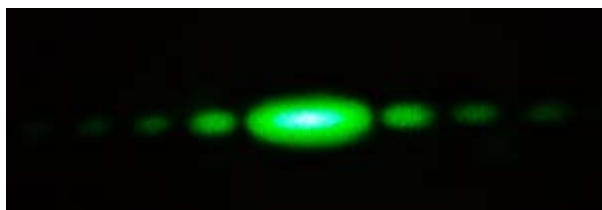
#### **Katse: niidi ja täpi difraktsioon.**

**Katse: ühe pilu difraktsioon.** Kui teha katset laseriga, mille kiir pole laiaks aetud, siis ilmnevad valgustäpid tsentraalsest täpist seda kaugemal, mida kitsam on pilu. Kui pilu laius on paar millimeetrit, siis difraktsiooni ei esine.

**Katse musta filmitüki või paberi sisse žiletiga lõigatud piluga.** Vaatame läbi sellise pilu kaugel (5 – 10 m) asuvat valgusallikat (laelampi, tänavalaternat, küünalt). Muutes painutamiseega pilu laiust, näeme sarnaseid muutusi difraktsioonipildis nagu oli laserikatseski.

Ühe pilu difraktsiooni katsest nägime, et pilust läheb osa laserivalgust otse läbi ja see tekitab difraktsioonipildi keskele nn **tsentraalse täpi**, mis on kõige heledam. Sellest kahele poole jäävad valgustäppida read, kus tsentraalsest täpist kaugenedes täppide heledus järjest väheneb. Need täpid on laserikiire kujutised ekraanil ja see tähendab, et osa valgust ei lähe läbi pilu otse edasi, vaid kaldub erinevatesse suundadesse pärast pilu läbimist.

Kui vähendada pilu laiust, siis vahekaugused täppide vahel suurenevad. Ja kui pilu laiust suurendada, siis täpid tõmbuvad kokku tsentraalse täpi ümber. Pilu suure laiuse (paarist millimeetrist suurem) korral ei ole difraktsioon jälgitav.



*Joonis 3.3.1.4. Laserikiire difraktsioon ühe pilu korral*

**Simulatsioon**, kus on näha difraktsiooni ribade või täppide paigutus pilu laiuse muutmisel

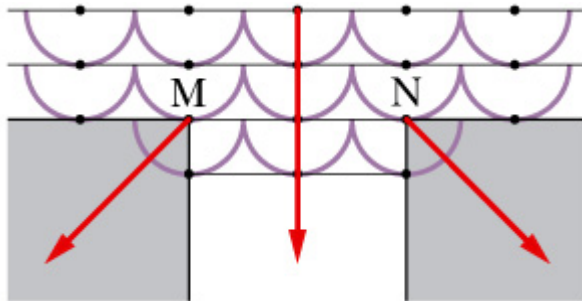
**Teiseks** esineb interferents ainult siis, kui valguslained on koherentsed. Aga tavalised laelambid ei kiirga koherentseid laineid, st neil pole ühesugune lainepikkus ja muutumatu faaside vahe. Selles, et lampidel pole ühesuguse lainepikkusega valgus, saame veenduda palja silmaga. Kui valgusallikas kiirgab mingi kindla lainepikkusega valgust, siis on see valgus ühevärviline. Kui valgus on “valge”, siis on tegemist liitvalgusega, mis koosneb mitmete värvuste segust.

Lainete faaside kindlakstegemine pole silma järgi võimalik, see nõuab juba täpsemat uurimist.

Koherentseid valguslaineid kiirgab **laser**. Sellepärast kasutataksegi interferentsi ja difraktsioonikatsetes peamiselt laserivalgust.

**Katse: kahe pilu interferents laseriga**

Valguse difraktsiooni saab seletada **Huygeni printsiibi** alusel. Joonisel 3.3.1.5. on näidatud tasalainete läbimine kitsast pilust. Varju piirkonda (“nurga taha”, mis on joonisel hall) satub valgus pilu servades olevaist sekundaarlaine allikaist M ja N. Tegelikult on neid sekundaarallikaid muidugi palju rohkem, kust valgus varju piirkonda satub, aga neid kõiki pole joonisel kujutatud.

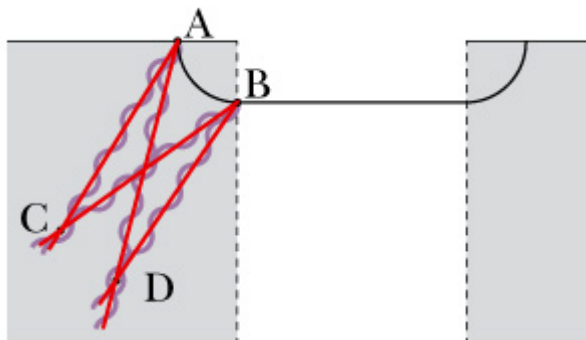


Joonis 3.3.1.5. Valguse läbimine kitsast pilust.

Nii saab seletada valguse levimisest “nurga taha”, aga siis peaks valgus täitma varju piirkonna ühtlaselt. Meie aga nägime valgustäppide rida, kus täppide vahel olid tumedad kohad. Sinna ilmselt valgus ei

sattunud.

Püüame olukorda seletada järgmise joonisega.



Joonis 3.3.1.6. Valgustäppide tekkimine ühe pilu difraktsioonikatses.

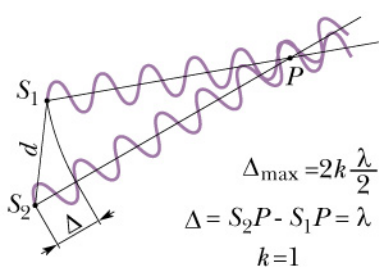
Lainefrondi punktidest A ja B lähtuvad **sekundaarlained**. Need kohtuvad omavahel ja juhul kui lained on samas faasis nagu on punktis C, siis nad tugevdavad teineteist ning tekib valgustäpp. Aga

kui kohtuvad lained on vastandfaasis, siis nad kustutavad teineteise ja tekib tume koht. See, milline on liituvate lainete faaside vahe, oleneb teepikkuste erinevusest, mis laineil tuleb liitumispunkti jõudmiseks läbida, antud juhul AC – BC või AD – BD. Seda teepikkuste erinevust nimetatakse **käiguvaheks**. Järelikult tekivad valgustäpid seal, kus kohtuvad sekundaarlained on samas faasis ja tumedad kohad seal, kus need lained on vastandfaasis. Sarnane olukord tekib ka pilu teises servas, sellepärast ongi täppide rida mõlemal pool tsentraalset täppi.

Kokkuvõtvalt võib öelda, et valguse difraktsioon ja interferents on otsesed tõendid selle kohta, et valgus on laine. Selle tõestamine, et valgus on just elektromagnetiline laine, on juba palju keerulisem.

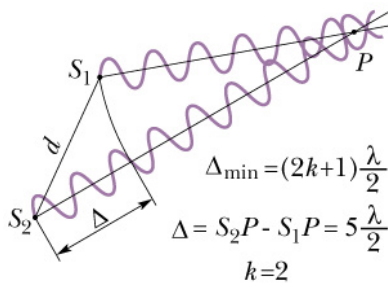
Interferentsi maksimumide ja miinimumide tekkimise tingimused on toodud allpool.

Valguse interferentsimaksimumid tekivad kohtades, kus käiguvahe  $\Delta$  jaoks on täidetud tingimus:



$$\Delta_{\max} = 2k \cdot \frac{\lambda}{2}, \text{ kus } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Joonis 3.3.1.7. Valguse interferentsimaksimumide tekkimine



Kohtades, kus valgust ei ole, on interferentsi miinimumid. Seal on täidetud tingimus

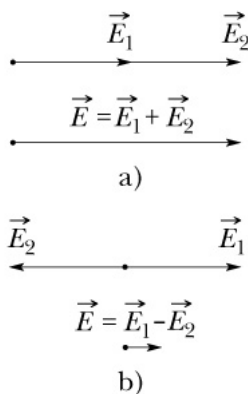
$$\Delta_{\min} = (2k + 1) \cdot \frac{\lambda}{2}, \text{ kus } k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

Joonis 3.3.1.8. Valguse interferentsi miinimumide tekkimine.

### Simulatsioon maksimumide ja miinimumide olenevusest käiguvahest

Tuleb välja, et difraktsioon saab nähtavaks tänu sellele, et pärast pilu läbimist valguslained liituvad ja tugevdavad või kustutavad üksteist. Ja mitmest avast tulevad valguslained saavad liituda ainult sellepärast, et pärast ava läbimist lained kanduvad varju piirkonda. Kõik see näitab, et ei saa rääkida difraktsioonist ilma interferentsita ja vastupidi. Nimetusi difraktsioon ja interferents kasutatakse suuresti ajaloolistel põhjustel, mis sai alguse ajast, kui neid nähtusi ei osatud omavahel siduda.

Kui uurida valguslainete liitumist lähemalt, siis selgub, et lainete kohtumispunkti liituvad lainete  $E$ -vektorid, olenemata sellest, kui palju laineid on. Sellist nähtust nimetatakse elektriväljade superpositsiooniks ja seda kirjeldab **superpositsiooniprintsiip**: summaarne elektrivälja tugevus antud punktis on võrdne kõikide  $E$ -vektorite summaga selles punktis. Superpositsiooniprintsiibi kehtivus on eksperimentaalne fakt, mis iseloomustab looduse omapära ja seda ei ole võimalik põhjendada.



Järgmisel joonisel on toodud näiteid  $E$  – vektorite liitumisest valguslainete kohtumisel.

Joonis 3.3.1.9. Valguslainete  $E$  – vektorite liitumine interferentsi maksimumi (a) ja miinimumi (b) korral

Esimesel juhul on liituvad lained samas faasis ja tulemuseks on valguse **intensiivsuse** suurenemine:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \text{ ehk } E = E_1 + E_2. \text{ Kui } E_1 = E_2, \text{ siis } E = 2E_1 \text{ ja } I = 4I_1.$$

Teisel juhul on liituvad lained vastandfaasides ja tulemuseks on valguse **intensiivsuse** vähenemine:

$$\vec{E} = \vec{E}_1 + \vec{E}_2 \text{ ehk } E = E_2 - E_1. \text{ Kui } E_1 = E_2, \text{ siis } E = 0 \text{ ja } I = 0.$$

### 3.3.2. Difraktsiooni ja interferentsi rakendusi (1h)

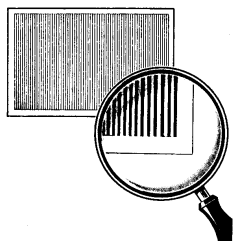
Kindlasti oleme nautinud ilusaid värvilisi seebimulle või uudistanud mitmevärvilisi õlilaike veeloigu pinnal. Ka kiilide ja teiste putukate tiivad sillerdavad päikesevalguses mitmevärviliselt. Kogu see värvidemäng looduses on tingitud valguse interferentsist.

Järgnevalt vaatleme mõningaid interferentsi ja difraktsiooni tehnilisi rakendusi, kus inimene kasutab neid nähtusi oma huvides.

#### Difraktsioonivõre

**Difraktsioonivõre** on optikas laialt kasutatav seade, mis kujutab endast paljude paralleelsete pilude süsteemi. Pilud on kitsad ja nende vahekaugused väikesed, tavaliselt on pilusid ühel millimeetril sadu või tuhandeid. Selliseid võresid valmistati

varem klaasplaadile kriipse graveerides: kriimustaud kohast valgus läbi ei läinud, aga siledast klaasi osast läks valgus läbi, see koht oligi piluks. Sellised graveerimisseadmed olid kallid ja kallid olid ka võred. Tänapäeval kasutatakse võrede valmistamiseks teisi meetodeid, näiteks fotograafiat või **holograafiat** ja võred on suhteliselt odavad.



### Joonis 3.3.2.1. Difraktsioonivõre

Milleks difraktsioonivõret kasutatakse? Difraktsioonivõre abil määratakse valguse lainepikkust ja uuritakse valguse koostist, mille abil on võimalik teada saada ainete koostist. Sellist tegevust nimetatakse **spektraalanalüüsiks**.

Kujutame ette, et võrele langeb liitvalgus, mis koosneb eri värvusega valgustest. Igale värvusele vastab kindla lainepikkusega valgus. Kui selline liitvalgus langeb difraktsioonivõrele, siis igast pilust läbi minnes kalduvad valguslained esialgse levimise teest kõrvale. Mida väiksem on valguse lainepikkus, seda laiem on sellega võrreldes pilu ja seda vähem kaldub niisugune laine pilust läbi minnes otsesuunast kõrvale.

Tulemuseks on see, et erineva värvusega valgused kalduvad võrest läbi minnes erinevatesse suundadesse ja neid on võimalik üksteisest eristada. Me saame teada, millistest komponentidest liitvalgus koosneb.

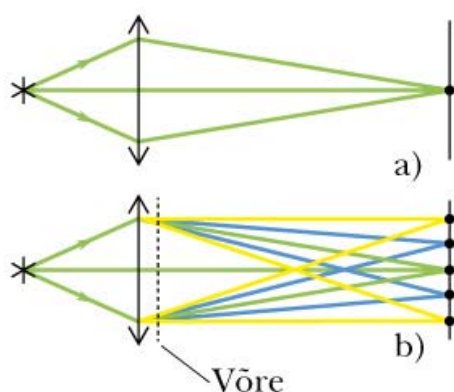
Pilusid peab palju olema sellepärast, et siis on eraldunud valguslained tugevamad (valgus intensiivsem) ja üksteisest paremini eristatavad.

Teeme mõttelise katse, mis võimaldab kindlaks teha, millist värvi valgusi mingi liitvalgus sisaldab. Olgu meil näiteks valgusallikas, mis kiirgab ainult kahte värvi valgust: sinist ja kollast. Koondame valguse läätse abil ekraanile ja näeme seal valgusallika rohelist värvi kujutist (joon. 3.3.2.1. a)). Kujutis on roheline sellepärast, et seal kohtuvad nii sinise kui kollase valguse lained. Aga sinise ja kollase värvuse liitumisel saame rohelse värvuse.

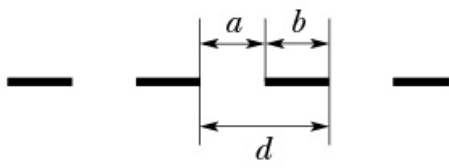
Asetame nüüd valguse tee difraktsioonivõre (joon. 3.3.2.1. b)). Sümmetriateljele jääb ikkagi allika roheline kujutis. Kuid sellest kahele poole tekib rida siniseid ja kollaseid valgusallika kujutisi. Need on tingitud difraktsioonist nagu toimus ühe pilu difraktsiooni katses. Sinise valguse lainepikkus on väiksem kui kollasel valgusel. Sellepärast on pilud sinise valguse jaoks laiemad ja sinine valgus kaldub vähem kõrvale kui kollane.

### Pilt valge valguse difraktsioon CD-lt peegeldumisel

Joonis 3.3.2.1. Liitvalguse lahutamine komponentideks difraktsioonivõrega



Täpsemad uurimused näitavad, et omavahel on kindlal viisil seotud valguse lainepikkus, valguse kõrvalekalde suund pärast võre läbimist ja pilude laius ning nende vaheline kaugus. Kaht viimast suurust kirjeldab **võrekonstant  $d$** , mis on võrdne ühe pilu laiuse  $a$  ja kahe pilu



vahelise kauguse  $b$  summaga:  $d = a + b$  (vt joon. 3.3.2.2.)

Joon. 3.3.2.2. Difraktsioonivõre läbilõige

Valguse tugevnemist saab jälgida kõikides suundades, kus on täidetud tingimus:

$$d \sin \alpha = k\lambda, (k = 0, \pm 1, \pm 2, \dots).$$

Valemis on  $d$  võrekonstant,  $\alpha$  nurk valguse levimissuuna ja sümmeetriatelje<sup>5</sup> vahel,  $k$  difraktsioonimaksimumi järk ja  $\lambda$  valguse lainepikkus. Nurk  $\alpha$  näitab, millistes suundades on jälgitavad **k-ndat järku difraktsioonimaksimumid**. Nende suundade vahele jäävad alad, kus valguslained nõrgendavad üksteist.

Difraktsioonivõre ei tekita valgust juurde ega kaota ära. Võre jaotab talle langeva valgusenergia ümber ja selliselt, et enamus valgusest koondub maksimumidesse. Nende vahele jääb ainult tühine osa valgusest. Mida suurem on pilude arv võres ja mida kitsamad on pilud, seda tugevamad on maksimumid.

### Katse difraktsioonivõre spektri saamine

### Katse valguse difraktsiooni jälginne CD-lt

### Simulatsioon difraktsiooni võre tööst

### Selgendav kate

Kõik me oleme kindlasti märganud, et prilliklaasid või fotoaparaadi objektiiivid paistavad mõne nurga alt vaadates natuke kollakad, rohekad või sinakad. Ilmselt on need pinnad millegagi kaetud, sest puhast klaasi võid vaadata kuidas tahes, mingit värvivarjundit peegeldunud valgusel pole. Milleks on vaja aga prilliklaase ja objektiiive millegagi katta? Aga selleks, et need laseks rohkem valgust läbi. Neid katteid nimetatakse **selgendavateks kateteks**, sest need vähendavad peegeldunud valguse hulka ja sellega suurendavad klaasi läbinud valguse hulka. See muudab tekkiva kujutise selgemaks. Siit ka katte nimi. Selgendavaid katteid kasutatakse ka päikesepatareide katteklasis, et suurendada valguse hulka, mis jõuab energia muundurini.

Sellest, et peegeldumise vähendamine suurendab läbinud valguse hulka, on suhteliselt lihtne aru saada. Kui läbipaistvalt materjalilt, milles valgus ei neeldu, vähem valgust peegeldub, siis peab suurenema sellest materjalist läbi läinud valguse hulk. Sest valgusenergia ei saa ju lihtsalt ära kaduda.

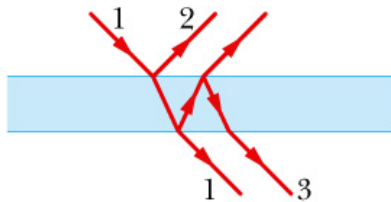
**Katse klaasitükiga, millel on osaliselt kantud selgendav kate.** Peegeldunud valguses on see koht, kus katet pole tumedam kui puhas klaas. Läbiläinud valguses aga on see osa heledam.

Kuidas aga peegelduse vähendamine aitab kujutist selgemaks teha? Alustame sellest, et täpsustame, mida tähendab **selge kujutis**. Kujutis on siis selge ehk hästi nähtav, kui tal on teravad piirjooned ja kujutis on piisavalt hele. Kujutame ette, et me tahame ekraanile projektoriga tekitada mingi kujutise, näiteks Power Pointi slaidi. Siis on mõistetav, et kujutis on seda heledam, mida vähem valgust objektiiivi läätsete pindadelt tagasi peegeldub. Kuidas aga peegeldunud valgus muudab kujutise

<sup>5</sup> Sümmeetriatelg on **tsentraaltäpist** tõmmatud ristsirge võrele.

kontuurid ebareravaiks? See juhtub sellepärast, et peegeldumisel jaotub valgus ümber laiemaks kimbuks, mis ei anna enam teravat kujutist. Olukord on sarnane joonestamisega: kui tahetakse hästi täpselt joonist teha, siis kasutatakse väga teravat pliiatsit, siis on täpselt näha, kust jooned kulgevad.

Valguse hajumist klaasist läbiminekul on kujutatud joonisel 3.3.2.3. Lihtsuse mõttes pole seal kujutatud mingit läätse, vaid siledat klaasitükki.

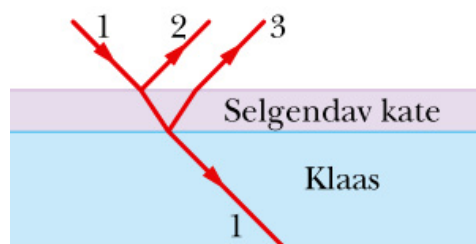


Joonis 3.3.2.3. Valguslaine 1 jaotumine peegeldumisel laineteks 2 ja 3.

Kui mõlemad klaasi pinnad on kaetud selgendavate katetega, siis kaovad ära peegeldunud lained 2 ja 3, mis lähevad mujale kui laine 1.

Muidugi peab ütlema, et peegeldunud valguse osa pole just suur ja seetõttu pole suured ka segavad efektid. Puhtalt klaasi pinnalt peegeldub tagasi sellele risti langevast valgusest umbes 4 %. Kui **langemisnurk** suureneb, siis suureneb ka peegeldunud valguse hulk.

Selgendava katte töö põhineb katte ülemiselt ja alumiselt pinnalt peegeldunud lainete vastandfaasi viimisele. Seda on võimalik teha, kui valida sobival katte aine **murdamisnäitaja** ja kihi paksus.



Joonis 3.3.2.4. Selgendava katte tööprintsip. 1 – kattele langev laine, 2 – katte ülemiselt pinnalt peegelduv laine, 3 – katte alumiselt pinnalt peegelduv laine.

Kui lained 2 ja 3 on vastandfaasis, siis nad kustutavad teineteise ja sellevõrra suureneb kattest läbiläinud valguse hulk. Sobiv katte

paksus on samas suurusjärgus valguse lainepikkusega, seega väga väike. Varem olid selgendavad katted väga õrnad ja riknesid kergesti igasugusel mehaanilisel töötlemisel (näiteks lapiga pühkimisel), kuid nüüdisaegne tehnoloogia võimaldab teha väga vastupidavaid katted.

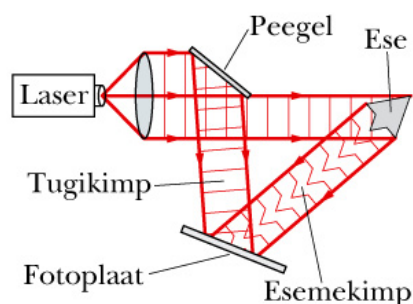
### Simulatsioon selgendava katte tööst.

#### Holograafia

Hologramme kasutatakse tänapäeval küll kunstiteoste esitamisel, küll rahatähtedel või dokumentidel turvaelementidena. Mis aga on **hologramm** ja kuidas teda tehakse? Hologramm on holograafilisel meetodil saadud kolmemõõtmeline ehk ruumiline kujutis. **Holograafia** on esemete ruumilise kujutise fotograafiline jäädvustamine. Selle tulemusena saadakse esemest **ruumiline, 3D pilt**, mida nimetatakse hologrammiks ja mis erineb mitmeti tavalisest fotost.

Fotol jäädvustatakse esemete tasapinnaline, mitteruumiline kujutis. Fotot vaadates tekib küll mingi ruumilisuse mulje, sest harilikult on fotol meile tuttavad asjad ja neid me oskame omale ette kujutada. Ruumilisuse muljet aitavad tekitada ka **perspektiiv**, aga ka varjud fotol. Põhiline erinevus foto ja hologrammi vahel seisneb selles, et fotol pole võimalik näha mingi eseme taga olevat teist eset, aga hologrammil on. Selleks tuleb ainult pead liigutada, et vaadata hologrammi teisest suunast.

Vaatame lähemalt hologrammi valmistamist fotograafilisel meetodil ehk holografeerimist. Mingi eseme holografeerimiseks kasutatakse kahe koherentse valguslainekimbu interferentsi. Nende kimpude saamiseks kasutatakse kumerlääts, mille abil muudetakse kitsas laserikiir laiaks paralleelsete lainete kimbuks. Üks osa sellest kimbust, nn **tugikimp** suunatakse peegliga enne holografeeritava esemei jõudmist fotoplaadile<sup>6</sup> või filmile (joonis 3.2.2.5.)



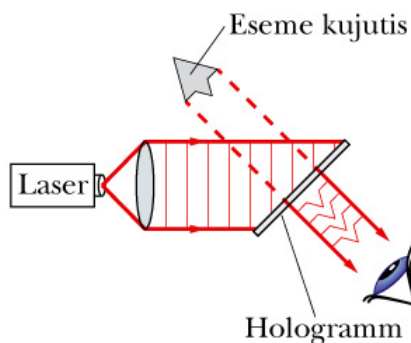
Teine osa suunatakse sinna pärast holografeeritavalt esemelt peegeldumist. See on **esemekimp**.

*Joonis 3.3.2.5. Holografeerimise skeem. Tugikimbus on **lainefrondid** paralleelsed tasandid, esemekimbus on lainefrontidel eseme pinnaga sarnane kuju.*

Tugikimbus olevad lained jõuavad kõik fotoplaadini samas faasis, sest tegemist on tasalainega (paralleelne kimp). Kuid esemekimp ei ole enam tasalaine, sest esemelt peegeldudes võtab lainefront eseme väliskujuga sarnase kuju. Fotoplaadil kimbud kohtuvad ja interfereeruvad, sest laserivalgus on koherentne. Tulemuseks on keerulise kujuga interferentspilt, milles on kajastub eseme ruumiline kujutis.

See pilt salvestatakse fotograafiliselt (ilmutamine, kinnitamine, kuivatamine) ja hologramm ongi valmis.

Hologrammi vaatamiseks kasutatakse ainult tugikimpu, st laiaks muudetud laserikiirte kimp. See kimp suunatakse hologrammile, kus toimub valguse difraktsioon, mis tekitab täpselt samasuguse lainekimbu nagu oli esemekimp.



Kui seda kimpu vaadata, siis näemegi esemega sarnast kujutist (joonis 3.3.2.6.). Tekkinud kujutis on ruumiline.

*Joonis 3.3.2.6. Hologrammi vaatlemise skeem.*

On olemas hologramme, mida näeb päevavalguses. Kuid nende saamiseks on ikka laserit vaja, täpsemalt kolme põhivärvuste vastava valgusega laserit.

Holograafial on mitmeid rakendusi tehnikas, meditsiinis, teaduses. Püütakse luua holograafilist kino ja televisiooni.

Hologrammil on fotoga võrreldes mitmeid erinevaid omadusi:

- lihtne on koopiategemine, sest pole erinevust positiivi ja negatiivi vahel;
- purunemisel säilib igal tükil tervikpilt, sest valmistamisel pole kasutatud koondavat optikat ja pilt on laiali üle kogu kaadri;

<sup>6</sup> Fotoplaadiks nimetatakse klaasplaati, mis on kaetud valgustundliku materjaliga (fotoemulsiooniga).



– ühele fotoplaadile saab jäädvustada palju hologramme, piisab, kui näiteks iga kord enne holografeerimist fotoplaati pisut pöörata.

– kujutise suurust saab muuta, kui muuta vaatamisel kasutatava laseri lainepikkust: mida suurem lainepikkus, seda suurem kujutis;

Holograafia leiutas 1947. a. ungari päritolu füüsik Dennis Gabor, kes sai selle eest 1971. a. Nobeli füüsikapreemia. Hologrammile andes lähtus D. Gabor kreeka keelset, kus “*holos*” tähendab täielik ja “*gramma*” – üleskirjutus. Seega tähendab “*hologramm*” täielikku üleskirjutust.

Tõeliselt täielikuks üleskirjutuseks aga ei saa ka hologrammi pidada, sest see ei kajasta näiteks eseme asukoha, kuju või värvuse muutusi.

Hologrammi selle sõna otseses tähenduses annab nn. aegruumiline ehk 4D holograafia<sup>7</sup>. See meetod lubab salvestada lisaks keha kujule ka selle liikumist, heleduse või värvuse muutumist jne. Aeg-ruumilise holograafia avastasid 1983. a. Eesti TA Füüsika Instituudi teadlased akadeemik Peeter Saari juhtimisel.

Holograafiast on huvitavalt kirjutanud Henn Käämbre oma “Laseriraamatus” (Tln: Valgus, 1978, § 25). Uuemat infot saab näiteks Vikipeediast:

<http://en.wikipedia.org/wiki/Holography>.

### **Küsimusi ja ülesandeid**

1. Millises faasis peavad olema kaks koherentset lainet, et nad: a) tugevdaksid teineteist maksimaalselt? B) nõrgendaksid teineteist maksimaalselt?
2. Kui suur peab olema kahe laine faasivahe, et lained oleksid vastandfaasis?
3. Mida nimetatakse varju piirkonnaks?
4. Miks me ei märka aknast tuppa tuleva valguse kandumist varju piirkonda?
5. Kumb valgus kandub kitsast pilust läbi minnes rohkem kõrvale, kas punane või sinine?
6. Kirjelda, mis juhtub ühe pilu difraktsiooni pildiga, kui pilu laiust muuta.
7. Miks ühe pilu difraktsiooni katses pole varju piirkond täidetud valgusega ühtlaselt, vaid seal esinevad heledad ja tumedad alad?
8. Kui suur peab olema kahe koherentse laine käiguvahe, et lained oleksid: a) samas faasis? b) vastandfaasis?
9. Mis on difraktsioonivõre?
10. Milleks difraktsioonivõret kasutatakse?
11. Miks kalduvad eri värvi valguse lained võret läbides kõrvale erinevates suundades (erinevate nurkade võrra)?
12. Kuidas peegeldumist vähendav selgendav kate teeb kujutise teravamaks?
13. Mis on hologramm?
14. Mida nimetatakse tugikimbuks ja mida esemekimbuks?
15. Miks hologrammi vaatamiseks peab kasutama laserit?

---

<sup>7</sup> 4D – neljadimensionaalne ehk neljamõõtmeline.

## STOP

1. Difraktsiooniks nimetatakse lainete kandumist teele jäävate tõkete taha.
2. Interferentsiks nimetatakse lainete liitumist, mille tulemusena liitlaine amplituud võib suureneda või väheneda võrreldes liituvate lainete amplituudidega.
3. Koherentsed on lained, millel on ühesugune lainepikkus ja mille faaside vahe ei muutu aja jooksul.
4. Difraktsioon ja interferents on otsesteks tõenditeks selle kohta, et valgus on laine.
5. Difraktsioonivõre on seade, mis kujutab endast paljude paralleelsete pilude süsteemi.
6. Difraktsioonivõret kasutatakse valguse lainepikkuse määramiseks ja liitvalguse koostise uurimiseks (spektraalanalüüsiks).
7. Selgendav kate kantakse optiliste detailide pinnale ja see suurendab läbiläinud valguse hulka ning tõstab kujutise kvaliteeti.
8. Holograafia on esemetest ruumilise kujutise saamine ja jäädvustamine.
9. Hologramm on kolmemõõtmeline ehk ruumiline pilt.

### 3.4. Polariseeritud valgus (1h)

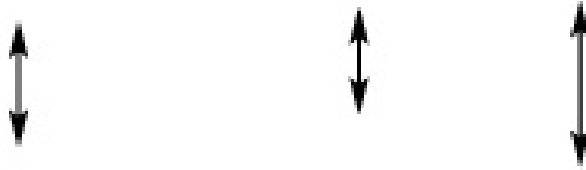
#### 3.4.1. Polariseeritud valgus, selle saamine ja omadused

Olgu meil valgusvoog, kus kõikide lainete levimissuunad on omavahel paralleelsed. Vaatame otse sellele kimbule vastu ja kujutame, et me suudame näha iga laine  $E$ -vektori võnkumist. Siis me näeksime umbes sellist pilti, mis on toodud joonisel 3.4.1.1. Valguslaine  $E$ -vektor võib võnkuda igas sihis, sest üksikute lainete kiirgumine pole milgi viisil kooskõlastatud. Selline on nn. **loomulik valgus**.



##### 3.4.1.1. Loomuliku valguse lainete $E$ -vektorite võnkumised toimuvad igas sihis.

Kui sellise valguse teele asetada seade, mis laseb läbi ainult mingis kindlas sihis, näiteks vertikaalsihis võnkuvaid  $E$ -vektoreid, siis näeksime näiteks sellist pilti. Sellist valgust nimetatakse **polariseeritud valguseks**.



3.4.1.2. Polariseeritud valguse lainete  $E$ -vektorite võnkumised toimuvad paralleelsetes sihtides.

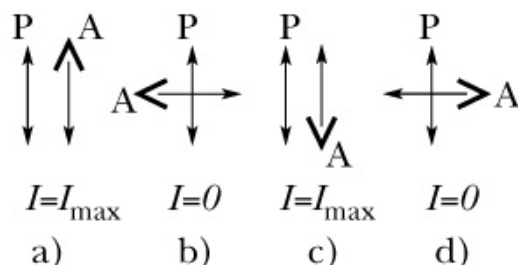
Valgust polariseerivat seadet nimetatakse **polaroidiks**. Loomulik valgus polariseerub läbi polaroidi minnes sellepärast, et see laseb läbi ainult selliseid valguslaineid, mille  $E$ -vektor võngub mingis kindlas sihis või tasandis. Seda tasandit nimetatakse polaroidi **läbilasketasandiks** ehk **polarisatsioonitasandiks**. Kui mingi laine  $E$ -vektor ei võngu läbilasketasandis, siis see laine neeldub polaroidis kas osaliselt või täielikult. Kõik valguslained, mille  $E$ -vektor võngub risti läbilasketasandiga, neelduvad täielikult ja nende energia muutub polaroidi siseenergiaks. Olukord on mõneti sarnane sellega, kui tahate suuski toast õue viia. Siis tuleb uksest läbi minnes suuski püsti hoida, muidu jäävad need ukse piitade taha kinni ja ei saa toast välja.

Seda, kas valgus on polariseeritud või mitte, tehakse kindlaks ka polaroidi abil. Kui vaadata loomulikku valgust läbi polaroidi, siis polaroidi pööramine ümber vaatesuuna ei põhjusta valguse intensiivsuse muutust. Kui aga vaadata polariseeritud valgust, siis polaroidi pööramisel valguse intensiivsus muutub.

On kokku lepitud, et seda polaroidi, mis valgust polariseerib, nimetatakse **polarisaatoriks** ja seda, mille abil tehakse kindlaks valguse polarisatsioon – **analüsaatoriks**.

Uurime lähemalt, kuidas muutub polariseeritud valguse intensiivsus, kui seda valgust vaadata läbi analüsaatori, mida pööratakse ümber vaatesihi. Selleks hoiame polaroidi ühes kindlas asendis ja vaatame sealtn tulnud valgust läbi analüsaatori. Pöörame analüsaatorit ümber vaatesihi, näiteks vastupäeva, ühe täisringi. Olukorda aitab mõista joonis 3.4.1.3, kus on näidatud polarisaatori P ja analüsaatori A neli asendit.

Kui polarisaatori läbilasketasand on vertikaalne ja analüsaatori läbilasketasand on ka vertikaalne, siis on analüsaatorist väljunud valguse intensiivsus maksimaalne (olukorrad a ja c). Kui läbilasketasandid on omavahel risti, siis ei pääse valgus üldse analüsaatorist läbi (olukorrad b ja d). Seega ühe täisringi jooksul esineb kaks intensiivsuse  $I$  maksimumi ja kaks miinimumi.



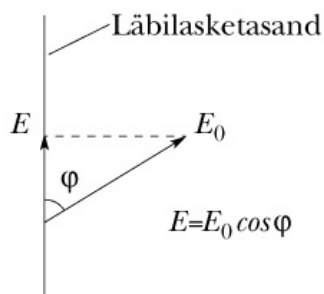
Joonis 3.4.1.3. Analüsaatorit A läbinud valguse intensiivsuse maksimumide ja miinimumide tekkimine analüsaatori pööramisel.

**Katse valguse läbiminekuks kahest järjestikusest polaroidist.** Algul on ainult üks polaroid. Loomulik valgus suunatakse

esimesele polaroidile, kus see polariseerub. Kui seda polaroidi keerata ümber valguse levimissuuna, siis ekraanil valguse intensiivsus ei muutu. Kui asetada esimese polaroidi ja ekraani vahele teine polaroid ja seda keerata, siis on näha, kuidas ekraanil valguse intensiivsus muutub.

Valguse intensiivsuse sõltuvust valguse polarisatsioonitasandi ja analüsaatori läbilasketasandi vahelisest nurgast seletatakse järgmiselt.

Langevu polariseeritud valgus analüsaatorile, mille läbilasketasand on vertikaalne ja mille  $E$ -vektor  $E_0$  moodustab läbilasketasandiga nurga  $\varphi$ . Sel juhul saab analüsaatorit läbida ainult  $E_0$  komponent  $E = E_0 \cos \varphi$  (vt joon 3.4.1.4.)



Joonis 3.4.1.4. Valguslaine  $E$ -vektori komponendi leidmine, mis läbib analüsaatorit.

Kuna valguse intensiivsus  $I \propto E^2$ , saame intensiivsuse avaldiseks  $I = I_0 \cos^2 \varphi$ . Selle seaduse avastas prantsuse füüsik E. Malus 1808.a.

Valgus **polariseerub** mitmetes protsessides, näiteks peegeldumisel või valikulisel neeldumisel, nagu see toimub polaroidides.

Peegeldunud valguse polariseerumises saame veenduda, kui vaatame näiteks lauapinnalt või kilekaantelt peegeldunud valgust läbi analüsaatori. Kui seda pöörata ümber vaatlussuuna, siis mingis analüsaatori asendis kaob peegeldunud valgus. Kui aga vaadata mõnelt metallesemelt peegeldunud valgust, siis see ei kao analüsaatori pööramisel. Kuna laualakk ja kilekaaned on dielektrilisest materjalist, siis meie katse näitab, et peegeldumisel polariseerub ainult dielektrikutelt peegeldunud valgus.

Eriti ilmekalt tuleb erinev polarisatsioon esile autodelt peegeldunud valguse korral: aknaklaasid muutuvad polaroidi mõne asendi korral täiesti mustaks, aga metalloosad säravad kogu aeg.

**Katse peegeldunud valguse polarisatsiooni demonstreerimiseks.** Outilisele kettale on kinnitatud klaasplaat ja sellele lastakse loomulikku valgust. Peegeldunud valgus juhitakse läbi analüsaatori lakke või ekraanile. Kui analüsaatorit pöörata, siis valgus kustub kas täielikult või osaliselt, olenevalt langemisnurgast. Kui klaasplaat asendada metallplaadiga, siis sellist efekti ei ole.

### 3.4.2. Polariseeritud valguse rakendused

#### Polaroidprillid

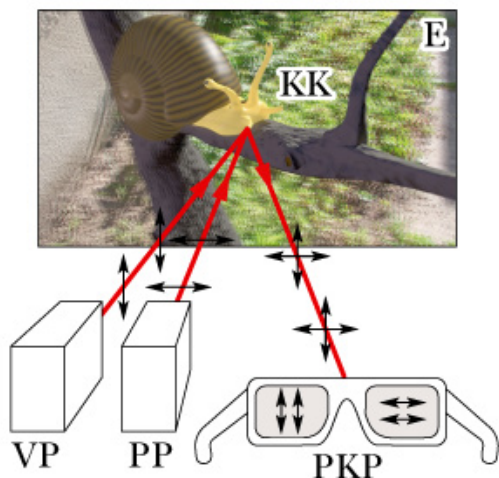
Nagu eespool räägitud, polariseerub valgus dielektrikutelt peegeldumisel. Järelikult mere- või järveveelt peegeldunud päikesevalgus on polariseeritud. Sellepärast kasutatakse mõnedes päikeseprillides silmade kaitseks klaasidele kantud polaroidkilesid. Need vähendavad oluliselt veepinnalt, lumelt või märjalt asfaldilt peegeldunud valguse tugevust. Sellepärast kasutavad polaroid-päikeseprille peamiselt kalamehed, mäesuusatajad või autojuhid. Teistel on nad rohkem edevuse asjad.

Polaroide kasutatakse ka 3D filmide vaatamiseks.

Filmi tegemisel kasutatakse filmimiseks kaht kaamerat üheaegselt. Kaamerad asuvad kõrvuti nagu meie silmadki. Filmi näitamisel kasutatakse kaht projektorit, millest üks näitab vasakpoolse kaameraga tehtud filmi ja teine parempoolse kaameraga tehtud filmi. Mõlemad projektorid on suunatud ekraani ühte kohta. Ruumilise kujutise tekkimiseks peab vaataja nägema vasaku silmaga vasakpoolse kaamera filmitut ja parema silmaga parempoolse kaameraga filmitut. Selle saavutamiseks kasutatakse projektorite ees risti olevate läbilasketasanditega polaroide. Ja vaatajal on ka ees

polaroidklaasidega prillid, mille vasaku klaasi läbilasketasand on sama mis

vasakpoolsel projektoril ning parempoolsel sama mis parempoolsel projektoril.



Joonis 3.4.2.1.. 3D filmi vaatamine. E – ekraan, KK – kujutis, VP – vasakpoolne projektor, PP – parempoolne projektor; PKP – polaroidklaasidega prillid.

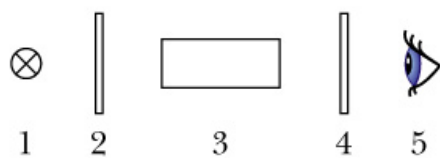
### Polarimeeter

Polarimeeter on seade, mida kasutatakse mõnede ainete kontsentratsiooni määramiseks lahustes. See on võimalik ainult nn **optiliselt aktiivsete ainete** korral, milleks on näiteks suhkur. Optiliselt aktiivsed ained muudavad polariseeritud valguse võnketasandit ,

täpsemalt pööravad E-vektori võnkesihti ümber valguse levimise suuna.

Polarisatsioonitasandi pöördenurk oleneb lahusekihi paksusest ja lahuse kontsentratsioonist. Polarimeeteriga on võimalik mõõta, kui palju pöörduv polarisatsioonitasand lahuse läbimisel. Pöördenurga järgi saab arvutada lahuse kontsentratsiooni.

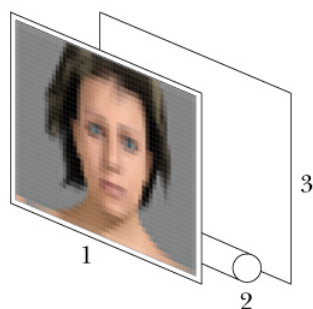
Polarimeetrit kasutatakse peamiselt suhkru kontsentratsiooni määramiseks jookides, veres ja uriinis. Sellist polarimeetrit nimetatakse **sahharimeetriks**.



Joonis 3.4.2.2. Polarimeetri skeem. 1 – valgusallikas, 2 – polarisaator, 3 – uuritav aine, 4 – analüsaator, 5 – vaatleja silm.

### LCD kuvar

LCD kuvareid kasutatakse televiisorites ja arvutites pildi nähtavaks tegemiseks ehk kuvamiseks. LCD (Liquid Crystal Display) kuvari põhiosad on ekraan pikslitega, valge taustvalguse allikas ja valguse hajutaja. Sellelt tulev valgus juhitakse läbi pikslite, mis tekitavad soovitud pildi ekraanile. Pikslid on on paigutatud kindlatesse ridadeks ja veergudeks ning igaüks neist laseb läbi kas punast, rohelist või sinist valgust. Neid värvusi kombineerides on võimalik saada igasuguseid värvitoone.

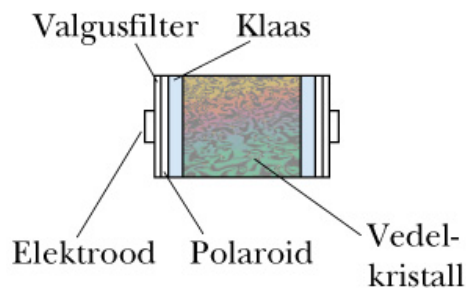


Joonis 3.4.2.3. LCD kuvari põhiosad. 1 – pikslitega ekraan, 2- taustvalguse allikas (päevavalguslamp), 3 – taustvalguse hajutaja.

Pikslite nimi tuleb ingliskeelsetest sõnadest *picture* ja *element*, seega eesti keeles oleks nimi *pildielement*.

Pikslid on imeväikesed, palja silmaga eristamatud. Iga piksel koosneb klaasplaatide vahele pandud

vedelkristallist. Plaatide pinnad on kaetud polaroidkile ja kas punase, roheline või sinise valgusfiltriga (ainega, mis laseb läbi ainult vastavat värvi valgust). Kummalgi pinnal on ka läbipaistvast materjalist elektrood, mis lubab tekitada pikslis elektrivälja.



Piksli pindadel olevate polaroidide läbilasketasandid on omavahel risti ja pingestamata elektrootide korral valgus pikslit ei läbi. Selline piksel paistab ekraanil musta täpina.

Joonis 3.4.2.4. Piksel

Pikslis olev vedelkristall on aine, mis on vedel, aga millel on kristallidele omane struktuur. Elektriväljas muutub vedelkristall optiliselt aktiivseks, st et teda läbiva polariseeritud valguse võnketasand pöörduv. Järelikult pingestatud pikslis ei ole enam polaroidide läbilasketasandid omavahel risti ja pikslit hakkab valgus läbi minema. Polarisaatsioonitasandi pöördenurk oleneb kasutatud pinge suuruselt ja nii saab muuta pikslit läbinud valguse hulka. Selliselt on võimalik tekitada ekraanile erineva heleduse ja värvusega punkte, mis kokku annavad soovitava värvilise kujutise.

### Küsimusi ja ülesandeid

1. Mille poolest polarisaator erineb analüsaatorist?
2. Polarisaator ja analüsaator asetsevad selliselt, et neist valgus läbi ei tule. Mitme kraadi võrra tuleks ühte neist keerata, et läbitulnud valguse intensiivsus oleks maksimaalne? Kumba tuleks keerata?
3. Kuidas kindlaks teha, kas tegemist on polaroidklaasidega päikeseprillidega või mitte?
4. Veepinnalt peegeldunud valgus on osaliselt polariseeritud. Kuidas seda väidet kontrollida?
5. Mis juhtub, kui 3D kinos vaataja prillidel klaasid ära vahetada?
6. Kuidas polaroidpäikeseprillide abil kindlaks teha, millisel autol on metallikvärv?
7. Millest oleneb polarisaatsioonitasandi pöördenurk optiliselt aktiivse aine läbimisel?
8. Mille poolest erineb kinesiograafist tulev valgus LCD-telerist tulevast valgusest?

### STOP

1. Loomulikus valguses võivad valguslainete  $E$ -vektorid võnkuda suvalises sihis.
2. Polariseeritud valguses on kõikide lainete  $E$ -vektorite võnketasandid paralleelsed.
3. Valgust polariseerivat seadet nimetatakse polaroidiks.
4. Kui polariseeritud valgust vaadata läbi polaroidi, siis polaroidi keeramisel ümber vaatesuuna muutub valguse intensiivsus.
5. Dielektrikutelt peegeldunud valgus on polariseeritud, metallidel peegeldunud valgus aga mitte.
6. 3 D kinos kasutatakse polaroidprille ruumilise kujutise nägemiseks.

7. Sahharimeeter on riist suhkru kontentratsiooni määramiseks vedelikes.

## 4. Valguse ja aine vastastikmõju

### 4.1. Geomeetriline optika

**Geomeetriline optika** on optika osa, kus valguslaine asemel kasutatakse valguskiire mõistet. **Valguskiireks** nimetatakse joont ruumis, mis näitab valgusenergia levimise suunda.

Geomeetrilist optikat nimetatakse ka **kiirteoptikaks**.

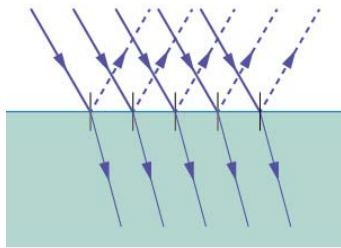
Loobumist valguse laineomadustest saab kasutada juhtudel, kui avad või tõkked valguse teel on palju suuremad valguse lainepikkusest. Sel juhul ei esine difraktsiooni, mis sunniks valgust mitmes suunas levima.

Geomeetrilise optika põhiseadused on:

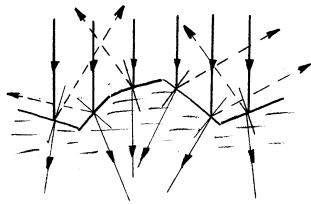
- **Valguse sirgjoonelise levimise seadus:** ühtlases keskkonnas levib valgus sirgjoonelisel. **Katse** Laserikiire levimine mittehomogeenses keskkonnas: küvetis on soolvesi mille kontsentratsioon on eri sügavustel erinev: kiir kõverdub.
- **Kiirte sõltumatuse seadus:** kiired ei mõjuta lõikumisel üksteise liikumist **Katse** On kaks erivärvi valguse allikat (taskulampi filtritega). Suuname nende valgused ekraanile nii, et valgusvihud enne ekraani lõikuksid. Vaatame valguslaike ekraanil kordamööda ja siis samaaegselt. Kas märkame erinevusi? Otsime valge käsiekraaniga üles kimpude lõikumiskoha ja uurime valgust seal, lülitades lampe kordamööda sisse ja välja. Märkame intensiivsuse ja värvuse muutusi.
- **Valguse peegeldumise seadus:** langemisnurk ja peegeldumisnurk on võrdsed **Katse** Laseme tasapeeglile laserikiire ja näitame, kuidas selle abil saab nihutada valguslaiku ekraanil, kui muuta peegli kallet. Suitsu abil teeme kiire nähtavaks. Muudame langemisnurka ja hindame peegeldumisnurka.  
Asendame eelmises katses peegli valge paberiga ja otsime peegeldunud laserikiirt, aga seda enam pole, kuigi peegeldunud valguse kuma on olemas
- **Valguse murdumise seadus:** langemisnurga ja murdumisnurga siinuste suhe on jääv suurus. **Katsed** Laseme laserikiire puhtast õhust puhtasse vette, siis suitsusest õhust sogasesse vette ja jälgime murdumist. Muudame langemisnurka ja jälgime murdumisnurga muutumist.
- **Kiirte pööratavuse printsiip:** kiir läbib süsteemi päri- ja vastassuunas ühte teed mööda. **Katse:** tekitame koondava läätsega ekraanile künla terava kujutise. Siis vahetame ekraani ja künla asukohad ning jälle on ekraanil terav künla kujutis.

#### 4.1.1. Valguse peegeldumine ja murdumine (1h)

Ühtlases keskkonnas levib valgus sirgjoonelisel. Kui aga valguse teele jääb ette mingi keha või läheb valgus üle teise keskkonda, siis valguse levimissuund muutub. Esimesel juhul räägitakse valguse peegeldumisest, teisel juhul valguse murdumisest.



↓ Langev kiir  
 ↓ Peegeldunud kiir  
 ↓ Murdunud kiir



*kasutatav parabolantenn*

Läbipaistvate kehade korrale esinevad mõlemad nähtused korraga.

Kui pind on sile, siis jääb paralleelne kiirtekimp nii peegeldudes kui murdudes paralleelseks.

*Joonis 4.1.1.1. Paralleelse kiirtekimbu peegeldumine ja murdumine siledal pinnal.*

Kui pind ei ole sile, siis paralleelne kiirtekimp ei jää paralleelseks ei peegeldumisel ega murdumisel.

*Joonis 4.1.1.2. Paralleelse kiirtekimbu peegeldumine ja murdumine karedalt pinnalt.*

Aga milline pind on sile? Füüsikud on kindlaks teinud, et pinda võib siledaks lugeda, kui pinna konaruste mõõtmed on väiksemad kui valguse lainepikkus. See tähendab, et pinnal ei või olla muhkusid ja lohke, mille sügavus on suurem kui ca 100 nm ehk kümnetuhandik millimeetrit.

Aga alati ei pea sile peegel olema nii väikeste konarustega. Vaadake või TV parabolantenne. Need pole sugusi väga siledad. Aga tegelikult on konarused palju väiksemad antennile langevate elektromagnetlainete lainepikkusest, mis on

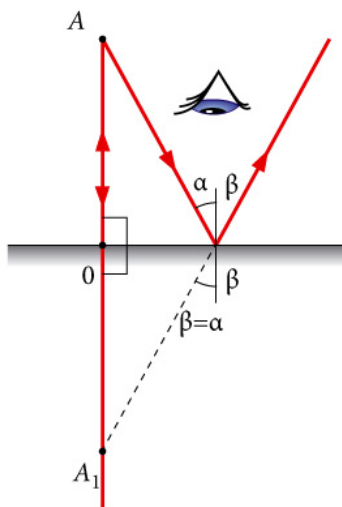
detsimeetri suurusjärgus

Veel pikemate raadiolainete korral võib peegel olla kauniski konarlik ja auklik (vt joonist)

*Joonis 4.1.1.3. Raadiolainete (HF) koondamiseks*

**Katse.** Laserikiire peegeldumine peeglist ja hajumine valgelt paberilt.

### Valguse peegeldumine



Kõik me oleme ennast peeglist vaadanud. Aga kus meie kujutis asub? Kas see on nagu pilt raamis või on ta peegli ees või taga? Füüsikas nimetatakse tasku- või seinapeeglit tasapeegliks. Seega on meil vaja lahendada ülesanne sellest, kus asub eseme kujutis tasapeegli korral. Sellele küsimusele saame vastuse, kui leiame joonise abil kujutise asukoha tasapeeglis.

*Joonis 4.1.1.4. Kujutise asukoha leidmine tasapeegli korral*

Asugu punktikujuline ese punktis A (vt joonis 4.1.1.4.). Selle kujutise asukoha leidmiseks võtame punktist A kaks kiirt AO ja AB. Kuna kiir AO langeb peeglile risti, siis peegeldub ta ka ristsuunas tagasi. Kiir AB peegeldub vastavalt peegeldumisseadusele ( $\alpha = \beta$ ). Peegeldunud kiired hajuvad, ei löiku

omavahel. Järelikult tekib näiv kujutis. Kui me neid hajuvaid kiiri ülalt vaatame, siis



näeme, nagu kiired väljuksid peegli taga asuvast punktist A1. Seal asubki punkti A näiv kujutis.

Järelikult tekib kujutis tasapeegli taha. Aga kui kaugel peegli taga kujutis on?

Sellele küsimusel saame vastuse, kui vaatleme kolmnurki  $\square AOB$  ja  $\square A1OB$ . Neil kolmnurkadel on üks ühine külg ja selle lähisnurgad  $\square AOB$  ja  $\square A1OB$  ning  $\square ABO$  ja  $\square A1BO$  on võrdsed. Järelikult on ka kolmnurgad võrdsed ja  $AO = A1O$ . See tähendab, et punkti A näiv kujutis tekib peegli taha samale kaugusele kui suur on punkti A kaugus peegliini.

Järelikult pole ka meie peeglis nähtav kujutis mitte peeglis, vaid peegli taga.

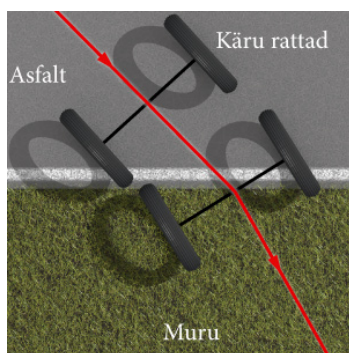
### Katsed

Peegeldumisseadus optilise kettaga. Enda vaatlemine kahest 90 kraadi all olevast peeglist.

**Simulatsioonid** periskoobi, kaleidoskoobi ja nurkpeegli.

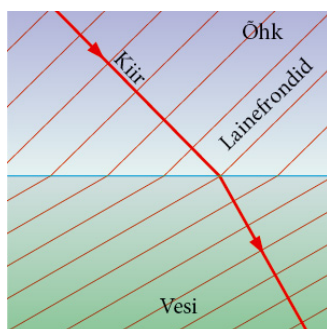
### Valguse murdumine

Kui valguskiir läheb ühest keskkonnast teise, siis kiire suund muutub. Sellist nähtust nimetatakse valguse **murdumiseks**. Põhjuseks on valguse kiiruse muutumine üleminekul teise keskkonda.



Olukorra mõistmiseks kujutame ette olukorda, kus veerev käru liigub asfaldilt põiki pehmele murule. Mis juhtub? Käru muudab oma liikumissuunda, sest ühed rattad jõuavad murule enne kui teised ja murul veerevad rattad halvemini kui asfaldil (vt. joonist). Lihtsuse mõttes vaatame ainult ühe rattapaari liikumist.

Joonis 4.1.1.5. Käru rataste veeremine üleminekul asfaldilt murule.

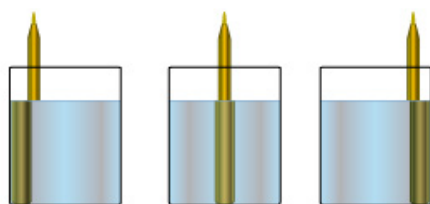


Murule jõudnud ratas läbib sama aja jooksul lühema tee kui asfaldil liikuv ratas ja rattapaari liikumissuund muutub.

Sarnane on olukord ka valguse üleminekul ühest keskkonnast teise. Vaatleme tasalaine üleminekut õhust vette.

Joonis 4.1.1.6. Tasalaine üleminek õhust vette.

Ka nüüd hakkab see osa lainefrontist, mis jõuab vette liikuma aeglasemalt kui õhus liikuv lainefrondiosa. Selle tulemusena muutub ka lainefronsti ristsirge ehk kiire levimise suund.



a) b) c)

**Katse:** valguse murdumine

Pliiats veega täidetud purgis (vt joonis). Seda peaks iga õpilane ise läbi tegema.

### Prisma

Valguse murdumist kasutatakse kõige

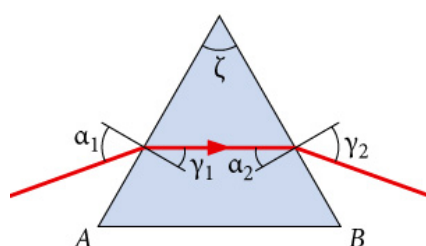
rohkem läätsedes. Kuid palju kasutatakse ka prismsid, mis on tähtis optiline detail mitmetes optikariistades nagu spektromeeter või monokromaator.

Prismaks nimetatakse läbipaistvast materjalist keha, millel on tavaliselt paralleelsed kolmursed põhjad ja servad on risti põhjadega (Vt. fotot).

**Foto. Prisma sellises vates, et oleks näha ruumilisus.**

Primat iseloomustava põhilised suurused on murdev nurk ja alus. Nurka prisma tahkude vahel, kuhu valgus langeb ja kust väljub nimetatakse prisma **murdvaks nurgaks**. Tahku murdva nurga vastas nimetatakse prisma **aluseks**.

Langegu klaasprismale valguskiir õhust nurga  $\alpha_1$  all. Prismasse minnes kiire suund muutub nii, et murdumisnurk  $\gamma_1$  on väiksem langemisnurgast. Kui kiir jõuab teise tahuni, siis on langemisnurk  $\alpha_2$  ja väljumisel prismast on murdumisnurk  $\gamma_2$  suurem langemisnurgast. Prismast väljunud valgus kaldub alati prisma aluse poole.



Joonis 4.1.1.8. Valguse läbimine prisma, kus  $\varphi$  - murdev nurk, AB prisma alus.

**Katse: Valguse läbimine prisma.** Laserikiir suitsuse õhus ja sogases vedelikus. Prismaks kolmekandiline vedelikuga täidetud anum

**Simulatsioonid** plaadi ja prisma

### Küsimusi ja ülesandeid

1. Kuidas tõestada, et valgus levib sirgjooneliselt?
2. Kas võib Päikese peegeldust näha sügava kaevu vees? Miks?
3. Kuidas me teame, et kehadelt peegelduvad kiired kõikvõimalikes suundades?
4. Pärast päikeseloojumist ei pimene kohe, vaid saabub videvik. Miks?
5. Suvel selge ilmaga paistavad järved sinised, pilves ilmaga hallid. Miks?
6. Tiigi ääres seisab inimene ja vaatab peegelduva Kuu kujutist. Kui ta hakkab tiigi kaldale lähenema, kas siis Kuu kujutis nihkub? Kui jah, siis kuhupoole?
7. Miks me ei näe läbi mattklaasi?
8. Mis juhtub murdumisnurgaga, kui langemisnurk suureneb?
9. Kas prisma läbimisel on kiire kõrvalekalle esialgsest levimissuunast suurem väikese või suure murdva nurga korral? Miks?

### STOP

1. Geomeetiline optika on optika osa, kus valguslaine asemel kasutatakse valguskiire mõistet.
2. Valguskiireks nimetatakse joont ruumis, mis näitab valgusenergia levimise suunda.
3. Geomeetrilise optika põhiseadused on valguse sirgjoonelise levimise seadus, kiirtekimpude sõltumatuse seadus, peegeldumise seadus, murdumise seadus ja kiirte pööratavuse printsiip.
4. Peegeldumist ebatasaselt pinnalt nimetatakse valguse hajumiseks.

5. Valguse levimissuuna muutumist üleminekul ühest keskkonnast teise nimetatakse murdumiseks.
6. Tasaparalleelsest plaadist läbi minnes jääb väljuv kiir paralleelseks langeva kiirega.
7. Prismast väljunud valgus kaldub alati prisma aluse poole.

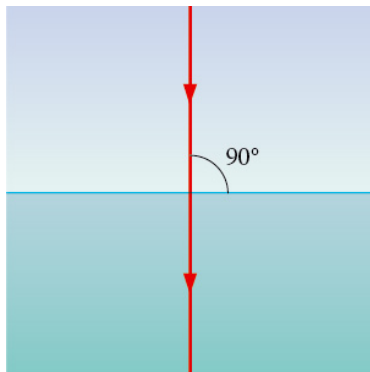
#### 4.1.2. Valguse murdumisseadus (1h)

##### Seos langemis- ja murdumisnurkade vahel

Põhikoolis tutvusime valguse murdumise seaduspärasustega. Nüüd saame teada seaduse, mille kohaselt murdumine toimub. Alustuseks tuletame meelde, kuidas on oleneb valguse murdumisel murdumisnurk langemisnurgast

**Katsed valguse murdumisest** Optilise kettaga hõredamast tihedamasse ja vastupidi. Muudetakse langemisnurka, vaadatakse ka seda mis juhtub, kui valgus langeb pinnale risti.

Katsetest nägime, et langemisnurga suurenedes suurenes ka murdumisnurk ja langemisnurga vähenedes vähenes ka murdumisnurk. Kuid nurkade väärtused olid alati erinevad, välja arvatud olukord kui langemisnurk oli null kraadi, siis oli null kraadi ka murdumisnurk. Ehk lihtsalt öelduna: kui valgus langeb pinnale risti, siis murdumist ei ole ja kiir levib edasi samas suunas mis ennegi.



Joonis 4.1.2.1. Valgus ei muuda levimissuunda keskkondade lahutuspinna risti langedes.

Milline on aga seos langemis- ja murdumisnurkade vahel? Selle seose avastas Hollandi astronoom ja matemaatik Willebrord Snellius, kes 1621.a. sõnastas **valguse murdumisseaduse**: valguse üleminekul ühest keskkonnast teise on langemisnurga ja murdumisnurga siinuste suhe jääv suurus

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \text{const} .$$

Seda konstanti nimetatakse murdumisnäitajaks. Kui keskkond, kust valgus tuleb, on vaakum, siis on tegemist **absoluutse murdumisnäitajaga  $n$** . Teistel juhtudel on tegemist **suhtelise murdumisnäitajaga  $n_s$** .

Eespool nägime, et valgus ei murdu üleminekul ühest keskkonnast teise, kui langemisnurk on null kraadi. Nähtusele saame seletuse murdumisseadusest. Avaldame murdumisnurka sisaldava suuruse

$$\sin \gamma = \frac{\sin \alpha}{\text{const}} .$$

Nüüd on näha, et kui langemisnurk  $\alpha = 0$ , siis ka  $\sin \alpha = 0$ , järelikult ka  $\sin \gamma = 0$  ning seega ka murdumisnurk  $\gamma = 0$ . See tähendabki, et kiir oma levimissuunda ei muuda.

**Simulatsioon valguse murdumisest (üleminekust ühest keskkonnast teise)**

**Absoluutne murdumisnäitaja** iseloomustab ainet samuti nagu selle tihedus või eritakistus. Absoluutne murdumisnäitaja  $n$  oleneb valguse levimise kiirusest antud aines  $v$  ja vaakumis  $c$ :

$$n = \frac{c}{v}.$$

Nagu valemist näha, on absoluutne murdumisnäitaja ilma mõõtühikuta suurus ja näitab, kuipalju on valguse kiirus vaakumis suurem kui antud aines.

Valguse kiirus on vaakumis  $3 \cdot 10^8$  m/s ja vees  $2,25 \cdot 10^8$  m/s. Järelikult vee

$$\text{absoluutne murdumisnäitaja } n_{\text{vesi}} = \frac{3 \cdot 10^8 \frac{m}{s}}{2,25 \cdot 10^8 \frac{m}{s}} = 1,33.$$

Tabel 4.1.2.1. Ainete absoluutseid murdumisnäitajaid

Aine	$n$
Õhk	1,0003
Vesi	1,33
Klaas (eri sordid)	1,4 ... 1,6
Teemant	2,42

Kui valgus tuleb vaakumist ja läheb mingisse keskkonda, siis murdumisseadust saab kirjeldada järgmise valemiga:

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = n = \frac{c}{v}.$$

Aine absoluutse murdumisnäitaja määramine on oluline mitmes eluvaldkonnas. Näiteks optiliste materjalide valmistamisel kas läätsete, selgendavate katete või optiliste valgusjuhtide

tarbeks.

Murdumisnäitaja mõõtmise ehk **refraktomeetria**<sup>8</sup> on oluline meetod ainete analüüsimisel või segudes ainete kontsentratsiooni määramisel. Refraktomeetrilisi mõõtmisi kasutatakse laialdaselt nii jookides (mahlad, veinid) kui tehnilistes vedelikes (jahutusvedelikud, tulekustutusvahud) sisalduvate ainete kontsentratsiooni määramiseks. Näiteks mees sisalduva veehulga määramiseks kasutatakse samuti mee murdumisnäitaja mõõtmisi.

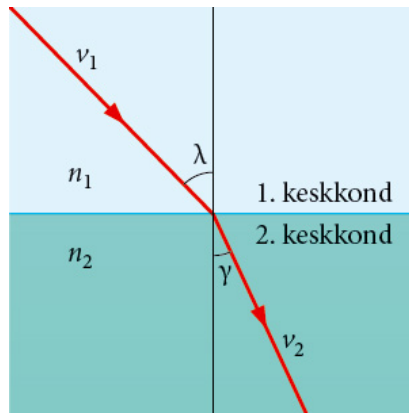
**Suhteline murdumisnäitaja** on määratud kahe keskkonna absoluutsete murdumisnäitajate suhtega. On kokku lepitud, et suhteline murdumisnäitaja näitab teise keskkonna absoluutse murdumisnäitaja suhet esimese keskkonna absoluutsesse murdumisnäitajasse. Esimeseks keskkonnaks nimetatakse seda keskkonda, kust valgus tuleb ja teiseks seda, kuhu valgus läheb.

Seega kahe keskkonna suhteline murdumisnäitaja

$$n_s = \frac{n_2}{n_1},$$

kus  $n_2 = \frac{c}{v_2}$  ja  $n_1 = \frac{c}{v_1}$ , kusjuures  $v_2$  ja  $v_1$  on vastavalt valguse kiirused teises ja esimeses keskkonnas.

<sup>8</sup> Refraktomeetria tuleneb sõnadest *refractus* (ld.) – murtud ja *metreo* (kr.) – mõõdan.



Joonis 4.1.2.2. Valguse murdumine.  $\alpha$ -langemismurk,  $\gamma$ -murdumismurk,  $v_1$  ja  $v_2$  – valguse kiirused 1. ja 2. keskkonnas,  $n_1$  ja  $n_2$  – 1. ja 2. keskkonna absoluutsed murdumisnäitajad.

On võimalik leida ka seos suhtelise murdumisnäitaja ja valguse kiiruste vahel erinevates keskkondades:

$$n_s = \frac{n_2}{n_1} = \frac{\frac{c}{v_2}}{\frac{c}{v_1}} = \frac{v_1}{v_2}.$$

Siit on näha, et kahe keskkonna suhteline murdumisnäitaja näitab, mitu korda valguse kiirus esimeses keskkonnas on suurem kui teises.

Näiteks mingi valgus klaasist vette. Siis on vee suhteline murdumisnäitaja klaasi

suhtes  $n_{vk} = \frac{n_{vesi}}{n_{klaas}} = \frac{1,33}{1,5} = 0,89$ .

Kui aga valgus läheb veest klaasi, siis  $n_{kv} = \frac{n_{klaas}}{n_{vesi}} = \frac{1,5}{1,33} = 1,13$ .

Ainete suhtelised murdumisnäitajad õhu suhtes on praktiliselt võrdsed nende ainete absoluutsete murdumisnäitajatega, sest õhu absoluutne murdumisnäitaja on küllalt suure täpsusega võrdne ühega.

### Näidisülesanne

Valgus läheb veest klaasi. Langemismurk on  $35^\circ$ . Kui suur on murdumismurk?

Andmed: Lahendus

$\alpha = 35^\circ$

$n_1 = 1,33$

$n_2 = 1,5$

Leida:

$\gamma = ?$

$$\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = \frac{n_2}{n_1};$$

$$\sin \gamma = \sin \alpha \cdot \frac{n_1}{n_2};$$

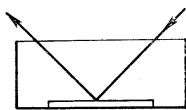
$$\sin \gamma = 0,57 \cdot \frac{1,33}{1,5} = 0,505;$$

$$\gamma = 30^\circ.$$

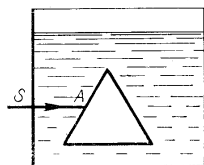
### Küsimusi ja ülesandeid

1. Kõik veekogud, mille põhi on näha, tunduvad tegelikust madalamatena. Miks?
2. Kui suur võib olla maksimaalne murdumismurk? Millisel juhul see võib esineda?
3. Valgus lainepikkusega 600 nm läheb õhust vette ( $n = 1,33$ ). Kui suur on valguse lainepikkus vees?

4. Tühja anuma põhjas on peegel. Kuidas muutub kiire käik, kui anum täita veega?



5. Veeanumas asub õõnesprisma (sees on õhk). Joonestada kiire SA edine käik.



6. Kiir langeb  $60^\circ$  nurga all 2 cm paksusele tasaparalleelsele klaasplaadile. Kui palju on klaasist väljunud kiir nihkunud langenud kiire suhtes? Klaasi absoluutne murdumisnäitaja on 1,6.
7. Valgus läheb veest nuluõlisse. Kui suur on nuluõli murdumisnäitaja vee suhtes? Absoluutsed murdumisnäitajad on nuluõlil 1,52 ja veel 1,33.
8. Millisel juhul on kiire murdumisnurk võrdne langemisnurgaga? Kiir ei lange risti kahe keskkonna lahutuspinnaga.
9. Kui valgus läheb ühest keskkonnast teise, siis muutub valguse kiirus. Kas sellega kaasneb: a) sageduse muutus; b) lainepikkuse muutus; c) nii sageduse kui lainepikkuse muutus?

## STOP

1. Valguse üleminekul ühest keskkonnast teise on langemisnurga ja murdumisnurga siinuste suhe jääv suurus  $\frac{\sin \alpha}{\sin \gamma} = const$ , mida nimetatakse kas absoluutseks või suhteliseks murdumisnäitajaks.
2. Absoluutne murdumisnäitaja näitab, kuipalju on valguse kiirus vaakumis suurem kui antud aines  $n = \frac{c}{v}$ .
3. Suhteline murdumisnäitaja näitab teise keskkonna absoluutse murdumisnäitaja suhet esimese keskkonna absoluutsesse murdumisnäitajasse:  $n_s = \frac{n_2}{n_1} = \frac{v_1}{v_2}$
4. Kui valgus langeb kahe keskkonna lahutuspinnale risti, siis valgus ei murdu, st levib otse edasi.

### 4.1.3. Kujutise tekitamine läätsel abil (1h)

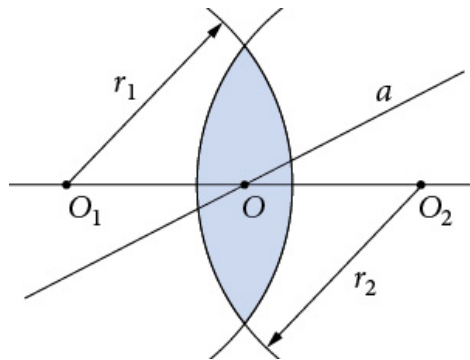
#### Läätsed

**Lääts**<sup>9</sup> on mingi läbipaistev keha, mille pindadeks on kõverpinnad. Meie käsitleme ainult sfäärilisi läätsi, mille korral pindadeks on kahe kerapinna osad. Tavaliselt kasutatakse läätsesid, mille pindade raadiused on võrdsed, st  $r_1 = r_2$  (vt. joonist).

<sup>9</sup> Lääts on nime saanud taime *harilik lääts (Lens culinaris)* vilja kuju järgi.

Tuletame lühidalt meelde olulisema põhikoolis läätse kohta õpitust.

Sirget, mis läbib nende kerade keskpunkte nimetatakse läätse **optiliseks peateljeks**. Kõik teised sirged, mis läbivad läätse keskpunkti on **optilised teljed**.



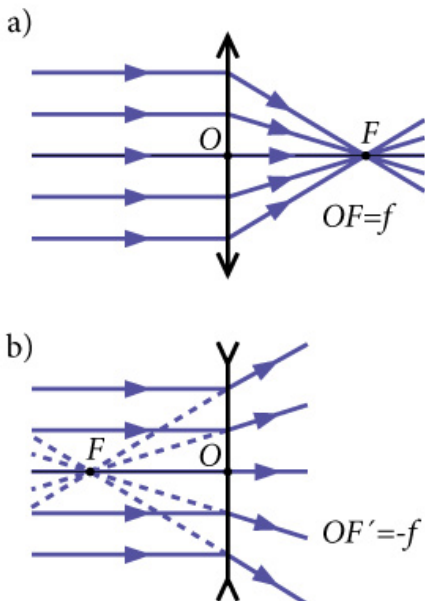
Joonis 4.1.3.1. Läätse ja selle optilised teljed.  $O_1$  ja  $O_2$  – läätse pindu moodustavate kerade keskpunktid,  $r_1$  ja  $r_2$  – nende pindade raadiused,  $O_1OO_2$  – läätse optiline peatelj,  $a$  – läätse üks optiline telg.

Läätsti liigitatakse kumer- ja nõgusläätsedeks. **Kumerläätsed** on keskelt **läätsedeks**. **Nõgusläätsed** on keskelt õhemad kui äärest ja nende tähiseks on xxx. Nõgusläätsel läbi minnes valguskiired hajuvad, sellepärast

nimetatakse selliseid läätsti ka hajutavateks läätsedeks.

Kumerläätsel langevad optilise peateljega paralleelsed kiired lõikuvad pärast läätse läbimist punktis, mida nimetatakse läätse **fookuseks**. Nõgusläätsel korral aga läätsele langevad paralleelsed kiired hajuvad nii, et nende pikendused lõikuvad ühes punktis, mida nimetatakse läätse **näivaks fookuseks**.

Fookusi läbivaid tasandeid, mis on risti optilise peateljega nimetatakse **fokaaltasanditeks**.



Joonis 4.1.3.2. Valguskiirte käik kumerläätses (a):  $O$  – läätse keskpunkt,  $F$  – läätse fookus. Valguskiirte käik nõgusläätses (b):  $O$  – läätse keskpunkt,  $F'$  – läätse näiv fookus.

**Katse: fookuse ja näiva fookuse leidmine optilise ketta abil**

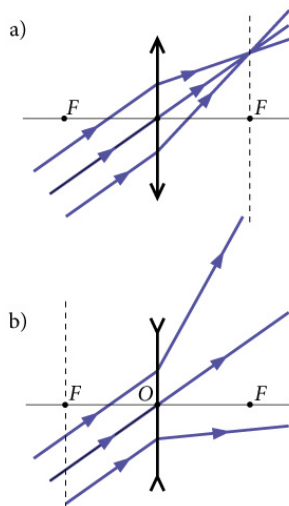
**Probleem**

Kas iga kumerlääts koondab kiiri ja nõguslääts hajutab?

**Katse: õhkläätsed vees.** Asetame õhkläätsed (nõgus ja kumer) kordamööda sogasesse vette ja suuname neile läbi vee paralleelse valgusvihi. Jälgime valguse koondumist ja hajumist vees.

Kuidas katse tulemusi seletada?

Mis juhtub aga siis, kui läätsele langeb paralleelsete kiirte kimp, mis ei ole paralleelne optilise peateljega? Kumerläätsel korral see kiirtekimp koondub fokaaltasandi punktis, mis on määratud läätse keskpunkti läbiva kiirega. Nõgusläätsel korral selline kiirtekimp hajub nii, et kiirte pikendused lõikuvad fokaaltasandi punktis, mis on samuti määratud läätse keskpunkti läbiva kiirega.



Joonis 4.1.3.3. Läätsel kaldu langeva paralleelsete kiirte kimbu läbimine kumerläätsel (a) ja nõgusläätsel (b). Fokaaltasand on kujutatud katkendliku joonega.

Igal läätsel on kaks fookust või näivat fookust, mille kaugused läätsel keskpunktist on võrdsed. Seda kinnitab ka kiirte pööratavuse printsiip, mille kohaselt kiirte käik läbi optilise süsteemi ei olene sellest, kas kiired liiguvad läbi läätsel näiteks vasakult paremale või paremalt vasakule.

Fookuse või näiva fookuse kaugust läätsel keskpunktist nimetatakse **fookuskauguseks**.

Fookuskauguse pöördväärtust nimetatakse läätsel **optiliseks tugevuseks D**, kusjuures  $D = 1/f$ .

Läätsel optilist tugevust mõõdetakse **dioptriates (dpt)**, kusjuures 1 dioptria on sellise läätsel optiline tugevus, mille fookuskaugus on 1 m. Kumerläätsel optilist tugevust loetakse positiivseks, nõgusläätsel oma negatiivseks.

Mida suurem on läätsel optiline tugevus, seda rohkem läätsel koondab või hajutab kiiri. Prilliklaaside tugevust kirjeldav arv pole midagi muud, kui kasutatava läätsel optiline tugevus dioptriates. Kui kellelgi on prillid  $-2,5$ , siis see arv ütleb meile, et tema prillides on nõgusläätsel, mille fookuskaugus on  $\frac{1}{2,5} = 0,4 \text{ m}$ .

### Kujutised

Kumerläätselga saab esemest kujutist ekraanile tekitada, nõgusläätselga ei saa. Aga kui läbi nõgusläätsel eset vaadata, siis seda me näeme.

**Katse kujutise tekitamine ekraanile kumer- ja nõgusläätselga.**

Kujutist, mida on võimalik tekitada ekraanile, nimetatakse **tõeliseks kujutiseks**.

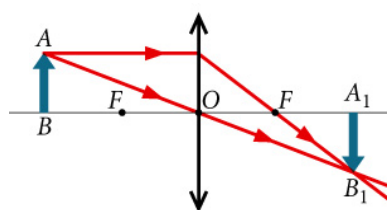
Kujutist, mida me silmaga näeme, aga ekraanile tekitada ei saa, nimetatakse **näivaks kujutiseks**.

Kujutiste ja näivate kujutiste asukohti on võimalik leida graafiliselt, st joonise abil.

### Kujutis kumerläätsel

Kumerläätsel koondab valguskiiri. Kujutise asukoha leidmiseks ehk **kujutise konstrueerimiseks** kasutatakse esemest väljuvatest kiirtest vähemalt kahte järgmisest kolmest:

- optilise teljega paralleelset kiirt, mis pärast läätsel läbimist läheb läbi fookuse;
- fookust läbivat kiirt, mis pärast läätsel läbimist on optilise teljega paralleelne;
- läätsel keskpunkti O läbivat kiirt, mis pärast läätsel läbimist suunda ei muuda.



Joon. 4.1.3.4. Kujutise konstrueerimine kumerläätsel korral. AB – ese, A<sub>1</sub>B<sub>1</sub> – selle kujutis.

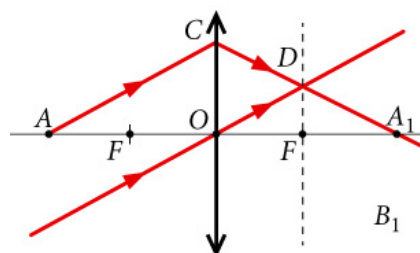
Kuidas leida aga optilisel peateljel oleva punkti kujutise asukohta? Kujutise konstrueerimisel seda ei tehta. Eeldatakse, et kui ese asub risti optilise peateljega, siis on ka eseme kujutis risti optilise



peateljega. Ja nii on ka õige. Aga mida teha siis, kui esemeks ongi punkt optilisel teljel?

Vaatleme kuidas toimub sellise punkti kujutise leidmine kumerläätsel korral. Sel juhul võtame etteantud punktist mingi suvalise kiire lätsele, näiteks AC ja joonistame sellele kiirele paralleelse kiire, mis langeb lätse keskpunkti O. Nüüd on meil kahekiireline paralleelne kiirtekimp, mis langeb lätsele kaldu. Selline kimp koondub fokaaltasandi punktis D. Järelkult sellest punktist läheb läbi ka punktist A väljunud ja lätsele punktis C langenud kiir.

Kujutise asukoha leidmiseks on vaja teada kahe esemest väljunud kiire lõikepunkti teisel pool lätse. Valime teiseks kiireks piki optilist peatelge liikuva kiire AO, mis läbib lätse keskpunkti. See kiir lätse läbimisel oma levimissuunda ei muuda ja levib ikka piki optilist peatelge.



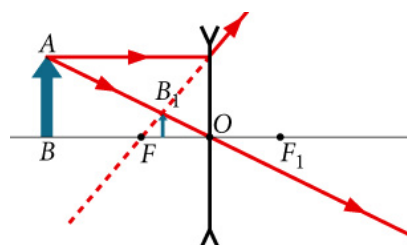
Nii saamegi kujutise asukohaks punkti A1.

Joonis 4.1.3.5. Optilisel peateljel oleva kujutise asukoha leidmine.

### Kujutis nõgusläätses

Nõguslääts hajutab valguskiiri. Kujutise konstrueerimiseks kasutatakse esemest väljuvatest kiirtest vähemalt kahte järgmisest kolmest:

- optilise teljega paralleelset kiirt, mis pärast lätse läbimist läheb edasi nii, et selle pikendus läheb läbi näiva fookuse;
- tagumisse näivasse fookusse  $F_1$  suunatud kiirt, mis pärast lätse läbimist on optilise teljega paralleelne;
- lätse keskpunkti O läbivat kiirt, mis pärast lätse läbimist suunda ei muuda.



Joon.4.1.3.5. Kujutise konstrueerimine nõgusläätsel korral. AB – ese,  $A_1B_1$  – näiv kujutis.

### Praktiline paaristöö

Iga kahe õpilase kohta anda üks kumer- ja üks nõguslääts, millega viiakse läbi ettenähtud katsed. Tulemused protokollitakse.

Õpilased peavad läbi viima järgmised katsed (õpetaja valikul):

- eristama kumera lätse nõgusast
- hindama kumera lätse fookuskaugust valgel paberilehel saadud kujutise abil (aken, Päike või laelamp).
- kontrollima, kas nõgusläätsel saab ka akna, Päikese või laelambi kujutist tekitada paberilehele.
- kindlaks tegema, kumma lätsega saab suurendatud või vähendatud kujutisi
- kindlaks tegema, kumma lätsega saab päripidiseid ja kummaga ümberpööratud kujutisi.
- vaatama akent läbi kumer- ja nõguslätse. Teha järeldus, mis juhul on tegemist tõelise, mis juhul näiva kujutisega

## Küsimusi ja ülesandeid

1. Miks me võime kasutada esemest väljuvaid kiiri ka siis, kui ese pole valgusallikas?
2. Kuidas kontrollida, et esemest väljunud kiired levivad tõesti suvalises suunas?
3. Mis juhtub läätse poolt tekitatud kujutisega, kui pool läätse kinni katta?
4. Kuidas leida kujutise asukohta, kui ese on suurem kui lääts?
5. Miks läbivad kiired läätse keskpunkti suunda muutmata?
6. Antud on kaks läätse: üks kumer, teine nõgus. Kuidas kindlaks teha, kumma fookuskaugus on suurem?
7. Kuidas asetada kaks kumerlääts, et paralleelne kiirtekimp jääks paralleelseks ka pärast mõlema läätse läbimist?
8. Kuidas on võimalik ainult läätsest läbi vaadates otsustada, kumb neist on kumer, kumb nõgus? Lääts võib nihutada silmale lähemale ja kaugemale.
9. Mis juhtub läätse optilise tugevusega, kui lääts asetada vette?
10. Kuidas kindlaks teha kummal kahest koondavast läätsest on suurem optiline tugevus?
11. Konstrueerida kujutisi kumer- ja nõgusläätsedes juhtudel kui ese asub läätsele fookusest kaugemal või lähemal.
12. Ülemine pool nõgusläätsel on kinni kaetud. Konstrueerida eseme kujutis, mis asub läätsele lähemal kui fookuskaugus.
13. Ese asub kumerläätsel kaugemal kui fookuskaugus. Eseme kõrgus on poole suurem läätse raadiusest. Konstrueerida kujutis..

## STOP

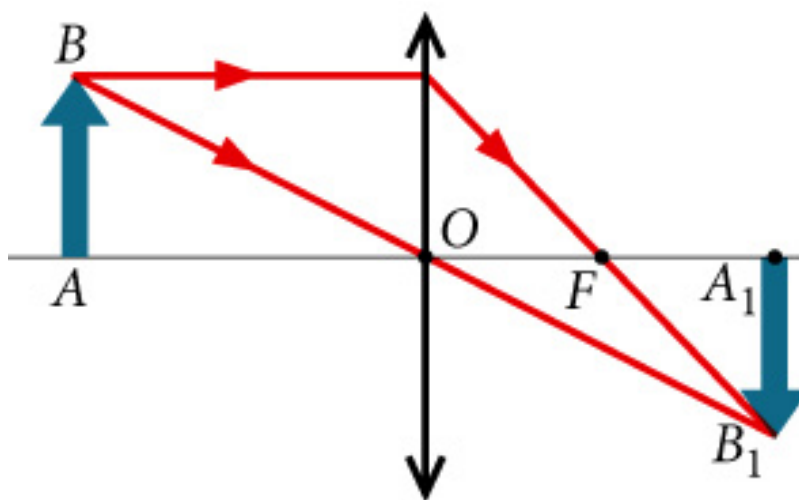
1. Lääts on läbipaistev keha, mille pindadeks on kerapiinna osad ja mille optiline peatelg läbib nende kerade keskpunkte.
2. Kumer- ehk koondav lääts on keskelt paksem kui servast ja ta koondab valgust.
3. Nõgus- ehk hajutav lääts on keskelt õhem kui servast ja ta hajutab valgust
4. Koondaval läätsel on fookus, milleks on koht, kus lõikuvad läätsele langevad paralleelsed kiired pärast läätse läbimist.
5. Hajutaval läätsel on näiv fookus, milleks on koht, kus lõikuvad läätsele langevate paralleelsete kiirte pikendused pärast läätse läbimist.
6. Igal läätsel on kaks fookust või näivat fookust, milledest üks asub ühel pool läätse ja teine teisel pool.
7. Fookuse või näiva fookuse kaugust läätse keskpunktist nimetatakse läätse fookuskauguseks. Koondaval läätsel on see positiivne, hajutaval negatiivne suurus.
8. Läätsel optiline tugevus on fookuskauguse pöördväärtus. Optilise tugevuse ühik on 1 dioptria (dpt), mis on 1 m fookuskaugusega läätsel.
9. Tõelist kujutist on võimalik ekraanile tekitada, näivat ei ole.

10. Kujutise konstrueerimine on kujutise asukoha leidmine eseme asukoha ja läätse fookuse abil. Kasutatakse kas läätse optilise teljega paralleelset kiirt, fookust läbivat kiirt või kiirt, mis läbib läätse keskohta.

#### 4.1. 4. Läätse valem (1h)

**KATSE kujutise asukoha sõltuvus eseme asukohast.** Eseme (hõõglambi) kujutise tekitamine ekraanil. Varieerida eseme ja kumerläätse vahemaad, vaadata, mis juhtub kujutisega. Alata suurest kaugusest. Mingil kaugusel kujutis kaob.

Leiame kumerläätse jaoks avaldise, mis seob omavahel eseme ja läätse keskpunkti vahelise kauguse ehk **esemekaugusekauguse**  $a$ , tekkiva kujutise ja läätse keskpunkti vahelise kauguse ehk **kujutisekauguse**  $k$  ja läätse **fookuskauguse**  $f$ .



Joonis 4.1.4.1. Kujutise tekkimine kumerläätses.  $AO$  – esemekaugus  $a$ ,  $OA_1$  – kujutisekaugus  $k$ ,  $OF$  – fookuskaugus  $f$ ,  $AB$  – eseme pikkus,  $A_1B_1$  – kujutise pikkus.

Lähtume kolmnurkade  $AOB$  ja  $A_1OB_1$  sarnasusest. Need kolmnurgad on sarnased sellepärast, et neil on võrdsed nurgad. Järelikult on võrdsed ka nende vastavate külgede suhted

$$\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{AO}{A_1O} = \frac{a}{k}; \quad (1)$$

Fookuskauguse sissetoomiseks vaatame kolmnurki  $COF$  ja  $B_1A_1F$ . Ka need on sarnased. Miks?

Saame

$$\frac{CO}{A_1B_1} = \frac{OF}{A_1F}.$$

Kuna  $AB = OC$ , siis  $\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{OF}{A_1F}$ . Valem (1) aga andis meile, et  $\frac{AB}{A_1B_1} = \frac{a}{k}$ .

Seega

$$\frac{OF}{A_1F} = \frac{a}{k}.$$

Jooniselt on näha, et  $OF = f$  ja  $A_1F = k - f$ , siis  $\frac{f}{k - f} = \frac{a}{k}$  ja  $kf = ak - af$ . Jagame võrrandi mõlemad pooli suurusega  $fka$  ja saame:

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}.$$

Saadud valemit nimetataksegi **läätse valemiks**. Sellisel kujul on valem õige tõelise kujutise korral.

Näiva kujutise korral on kujutisekaugus  $k$  negatiivne ja valemi kuju on

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{k} = \frac{1}{f}.$$

Kui kujutis on näiv ja ka fookuskaugus on näiv, siis on nii  $k$  kui  $f$  negatiivsed ja valemi kuju on

$$\frac{1}{a} - \frac{1}{k} = -\frac{1}{f}.$$

Selline on valemi kuju nõgusläätse jaoks.

Läätse valem lubab teha järeldusi kujutise asukoha kohta olenevalt eseme asukohast. Vaatleme kolme juhtu kumerläätse korral.

- 1) Asugu ese läätse fookuses, st.  $a = f$ , siis valem omandab kuju  $\frac{1}{f} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}$ . Siit saame, et  $1/k = 0$ , st  $k = \infty$ . Seega juhul, kui ese asub läätse fookuses tekib kujutis lõpmatuses. See tähendab, et läätsesest väljuvad paralleelsed kiired.
- 2) Asugu ese lõpmatuses, st  $a = \infty$ , siis  $k = f$ . See järeldus tuleneb eelmisest tulemusest, kui kasutada kiirte pööratavuse printsiipi. Seega juhul, kui läätsel langevad paralleelsed kiired, tekib kujutis läätses fookuses.
- 3) Asugu ese läätsel lähemal, kui fookuskaugus, st.  $a < f$ . Kujutisekauguse leidmiseks avaldame selle läätses valemist.  $\frac{1}{k} = \frac{1}{f} - \frac{1}{a}$ . Siit  $k = \frac{af}{a - f}$ . Kuna nii  $a$  kui  $f$  on positiivsed ja  $a < f$ , siis peab  $k < 0$ .

Seega juhul, kui ese asub läätses ja sellefookuse vahel, siis on kujutisekaugus  $k$  negatiivne, mis tähendab, et tekib **näiv kujutis**.

Katses nägime, et kujutis võib olla nii suurendatud kui vähendatud. Selle kirjeldamiseks kasutatakse suurenduse mõistet, täpsemalt **joonsuurendust**, mis näitab, mitu korda erinevad kujutise mõõtmed eseme vastavatest mõõtmetest.

Näiteks joonisel 4.1.4.1. suurendus  $s = A_1B_1/AB$ . Kuid valemist (1) näeme, et  $A_1B_1/AB = k/a$ . Seega suurendus

$$s = \frac{k}{a}.$$

Siit on näha, et kui  $k = a$ , siis on  $s = 1$ , st kujutis on sama suur kui ese. Läätses valemist on näha, et sel juhul

$$\frac{1}{a} + \frac{1}{a} = \frac{1}{f} \Rightarrow \frac{2}{a} = \frac{1}{f} \Rightarrow a = 2f.$$

See tähendab, et koondava läätsel korral on kujutis samasuur kui ese siis, kui esemekaugus on võrdne kahekordse fookuskaugusega.

Teisi järeldusi suurenduse kohta võib teha kas valemeid analüüsides või kujutisi konstrueerides. Toome ära mõned kasutamise seisukohast olulisemad tulemused.

- 1) Kui  $a > 2f$ , siis on  $s < 1$ , mis tähendab, et kujutis on esemest väiksem.
- 2) Kui  $f < a < 2f$ , siis  $s > 1$ , mis tähendab, et kujutis on esemest suurem.
- 3) Kui  $a < f$ , siis tekib suurendatud näiv kujutis ja öeldakse, et lääts töötab siis **luubina**.
- 4) Nõgusläätsel korral on alati  $s < -1$ , mis tähendab, et nõguslääts annab alati vähendatud näiva kujutise

### Simulatsioonid kujutise konstrueerimisest ja suurendusest.

#### Luup

Luubi ehk **suurendusklaasina** võib töötada iga kumerlääts, tavaliselt kasutatakse selleks läätsi, mille optiline tugevus jääb vahemikku 10 ...40 dptr. See tagab suurenduse 2,5x...10x. Suuremate suurenduste saamiseks kasutatakse mikroskoopi.

Koondav lääts töötab luubina, kui ese asub läätsel lähemal kui selle fookuskaugus.

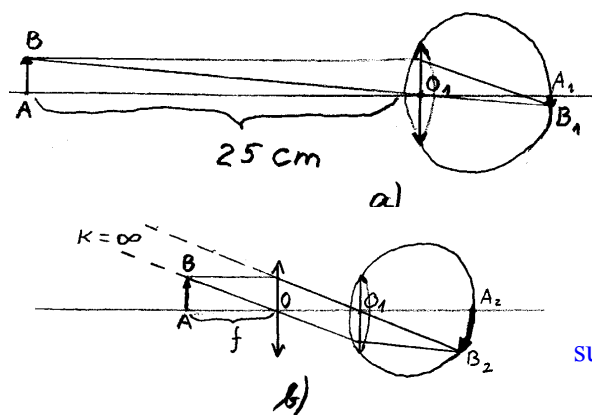
Luup annab esemest päripidise, suurendatud ja näiva kujutise.

Tavaliselt asetatakse ese praktiliselt luubi fookusesse. Sel juhul on luubi suurendus  $s$  määratud järgmise valemiga:

$$s = \frac{\Delta}{f},$$

kus  $\Delta$  on parima nägemise kaugus ja  $f$  luubi fookuskaugus. Parima nägemise kauguseks loetakse 25 cm ja sellepärast peame suurenduse valemis kasutama ka läätsel fookuskaugust sentimeetrites.

#### Katse väikeste esemete vaatamine luubiga.



Joonis 4.1.4.2. Ühe ja sama eseme vaatamine palja silmaga parima nägemise kauguselt (a) ja läbi luubi, kui ese asub luubi fookuses (b).

Kasutades ülaltoodud joonist, tuletame luubi suurenduse valemi.

Luubi suurendus näitab, mitu korda on luubiga vaadates kujutis meie silmas suurem, kui palja silmaga vaadates, seega

$$s = \frac{A_2B_2}{A_1B_1}.$$

Kui silma põhja kujutise piirkonnas lugeda tasandiks, siis saame sarnastest kolmnurkadest ABO1 ja A1B1O1 joonise a) osas:

$$A_1B_1 = \frac{AB \cdot A_1O_1}{25}.$$

Teistest sarnastest kolmnurkadest ABO ja A2B2O1 joonise b) osas saame:

$$A_2B_2 = \frac{AB \cdot A_2O_1}{f}.$$

Silm on mõlemal juhul ühesugune, seega  $A_1O_1 = A_2O_1$ . Nüüd saame

$$s = \frac{A_2B_2}{A_1B_1} = \frac{AB \cdot A_2O_1}{f} \cdot \frac{25}{AB \cdot A_1O_1} = \frac{25}{f}.$$

### Küsimusi ja ülesandeid

1. Kui kaugele kumerläätselt tuleks asetada punktvalgusallikas, et kumerläätselt väljuksid kiired oleksid paralleelsed?
2. Ese asub kumerläätselt 4 cm kaugusel. Läätsel fookuskaugus on 3 cm. Kui kõrge on kujutis, kui eseme kõrgus on 2 cm?
3. Kumerlääts tekitab ekraanile küünlast sellega täpselt samasuure kujutise. Nii küünla kui ekraani kaugus läätsest on 20 cm. Kui suur on läätse optiline tugevus?
4. Ese asub koondavast läätsest 4 cm kaugusel. Kas tekib tõeline või näiv kujutis, kui läätse fookuskaugus on 6 cm?
5. Ese asub hajutavast läätsest 6 cm kaugusel. Kas tekib tõeline või näiv kujutis, kui läätse fookuskaugus on 4 cm?
6. Hajutavast läätsest optilise tugevusega  $-7,5$  dpt asub ese 40 cm kaugusel. Kas tekkiv kujutis on suurendatud või vähendatud? Mitu korda?
7. Koondav lääts fookuskaugusega 15 cm tekitab esemest kolmekordselt suurendatud kujutise. Kui kaugel läätsest asub ese?
8. Kui suure suurenduse annab luup, mille fookuskaugus on 10 cm?

### STOP

1. Koondava läätse korral on läätse valem  $\frac{1}{a} + \frac{1}{k} = \frac{1}{f}$ . Kui on tegemist näiva kujutisega, siis on kujutisekaugus  $k$  negatiivne.
2. Hajutava läätse korral on läätse valem  $\frac{1}{a} - \frac{1}{k} = -\frac{1}{f}$ .
3. Joonsuurendus  $s$  näitab, mitu korda erinevad kujutise mõõtmed eseme vastavatest mõõtmetest, kusjuures  $s = \frac{k}{a}$ .
4. Luup on koondav lääts, mis annab esemest näiva, päripidise ja suurendatud kujutise.

## 4.2. Valguse dispersioon ja selle kasutamine (2h)

### 4.2.1. Valguse dispersioon

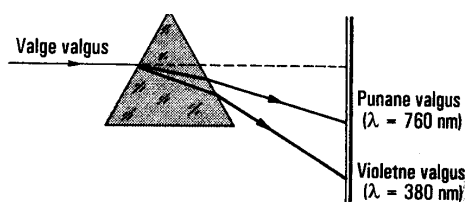
**Katsed:** prisma tekitatud spektrid ekraanil (pidev- ja joonspekter); kaks ühesugust prisma järjestikku ei anna rohkem värve kui üks prisma, aga kui murdvad nurgad on vastupidiselt, kaob spekter;

Katses nägime, et prismast läbi minnes tekib valgest valgusest palju erineva värvusega valgusi. Vanasti, enne Newtonit, arvati, et prisma "värvib" valge valguse

vikerkaarevärviliseks nagu näiteks punane klaas “värvib” valge valguse endast läbi lastes punaseks.

Newton kummutas sellise arvamuse, lastes kord juba prismast läbikainud valgusest ainult üht värvi valguse läbi teise prisma ja sellega ei juhtunud enam midagi. Sellest katsest tegi Newton järelduse, et valge valgus on liitvalgus, mis koosneb paljudest värvilistest valgustest, mida on üksteisest võimalik prisma abil eraldada.

Tänapäeval on teada, et värviliste valguste eraldumine üksteisest on tingitud dispersioonist, milleks nimetatakse aine **absoluutse murdumisnäitaja** sõltuvust valguse sagedusest või lainepikkusest. Mida väiksem on valguse lainepikkus, seda suurem on sellele vastav murdumisnäitaja. Sellepärast kalduvadki prismast läbiminekul kõige rohkem kõrvale violetne ja sinine valgus ja kõige vähem punane valgus..



Joonis 4.2.1.1. Valge valguse läbimine prismast.

**Katse:** roheline valgus murdub rohkem kui punane, selleks lastakse läbi prisma kord punase, kord roheline pointeri kiir ja ekraanil vaadatakse, kumb rohkem on

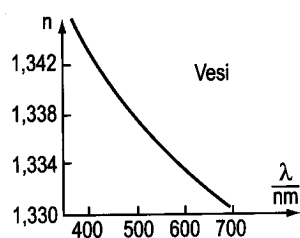
kõrvale kaldunud (langemisnurk peab sama olema).

Dispersiooni jälgimiseks ei pea kasutama just klaasprismat. Prisma saame ka ise valmistada, näiteks kaldu vette asetatud peeglist, millele valgust juhtides võime laes saada vikerkaarevärve.

**Katsed:** vees olev peegel.; vikerkaare tekitamine auguga ekraani ja veeballooni abil;

**Katse** või simulatsioon prismaga valge valguse laotamisest spektriks ja teise prismaga selle liitmine uuesti valgeks valguseks.

Dispersioon on erinevates ainetes erineva suurusega. Kuid murdumisnäitajate erinevused nähtava spektripiirkonna ulatuses on küllalt väikesed, mitte üle mõne protsendi. Kuid sellest piisab, et valgest valgusest kõik vikerkaarevärvid välja meelitada.



Tüüpiline murdumisnäitaja sõltuvus valguse lainepikkusest, nn. **dispersioonikõver** on toodud joonisel 4.2.1.2.

Joonis 4.2.1.2. Vee dispersioonikõver

Miks on aine murdumisnäitaja valguse lainepikkusest?

Vastuse saab kõige lihtsamalt **dispersiooni elektronteooriast**, mida me siiski ei hakka siinkohal esitama..

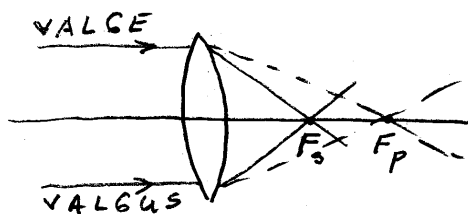
Nähtuse olemust saab seletada ka lihtsamalt, kasutades valguse aines levimise mudelit. Tühjuses levib valgus sellepärast, et elektromagnetlaines muutuv elektriväli tekitab muutuva magnetvälja ning vastupidi. Selliselt muutuvad väljad liiguvad ruumis edasi kiirusega  $c$ . Kui aga valgus satub mingisse keskkonda, siis jäävad valguse tee ette aine osakesed (aatomid, molekulid). Valguslaine elektriväli võib panna aatomite valentsielektronid oma sagedusega võnkuma. Selle tulemusena valgus neeldub aatomis. Aatom ergastub, st saab energiat juurde.

Kui on tegemist läbipaistamatu ainega, siis juurdesaadud energia suurendab aatomi soojusliikumist ja aine soojeneb. Läbipaistvate ainete korral aga mõne aja möödudes neeldumisest (ca  $10^{-8}$  s) kiirgab aatom endise sagedusega valguslaine välja, mis liigub edasi esialgse laine suunas. Järgmise valguse teele jääva aatomi korral kõik kordub.

Seega läbipaistvas aines levib valgus korduvate neeldumiste ja kiirgumiste teel: iga aatomi juures valgus teeb "peatuse". Nii neeldumine kui kiirgumine võtab aega ja sellepärast valguse levimise kiirus aines ongi väiksem kui tühjuses (vaakumis). Mida lähemal on valguslaine sagedus valentselektronide omavõnke sagedusele aatomis, seda suurema amplituudiga pannakse elektron aatomis sooritama sundvõnkeid. Selle tekitamine ja lõppemine võtavad üha rohkem aega. See tähendab "peatuste" pikenedamist ehk levimiskiiruse vähenemist. Aga mida väiksem on valguse kiirus aines, seda suurem on aine absoluutne murdumisnäitaja, sest  $n = c/v$ , kus  $v$  on valguse kiirus aines..

Kuna enamikul läbipaistvatel ainetel on valentselektronide omavõnkesagedused ultravalguse piirkonnas, siis sellele lähenedes nähtava piirkonna poolt hakkab murdumisnäitaja suurenema.

Valguse dispersiooni kasutatakse teaduses ja tehnikas laialt, peamiselt spektromeetrites, millest tuleb juttu allpool. Dispersioon avaldub ka läätsede korral ja põhjustab tekkiva kujutise moonutust, mis ilmneb fotoobjektiivide korral. Põhjus on selles, et läätsede materjal murrab erineva lainepikkusega valguslaineid erinevalt. Sinise valguse lained murduvad läätses rohkem kui punase valguse lained ja sellepärast on fookus sinise valguse jaoks läätsel lähemal kui punase valguse jaoks. Ja tulemuseks on kujutise teravuse ja värvuste moonutumine. Seda nähtust nimetatakse **kromaatiliseks aberratsiooniks**, mida võib eesti keelede tõlkida kui *värviline moonutus*.



Joonis 4.2.1.3. Kromaatiline aberratsioon.  $F_s$  – fookus sinise valguse jaoks,  $F_p$  – fookus punase valguse jaoks.

**Katse:** Kromaatiline aberratsioon, läätsede fookused on erivärvilised.

### Vikerkaar

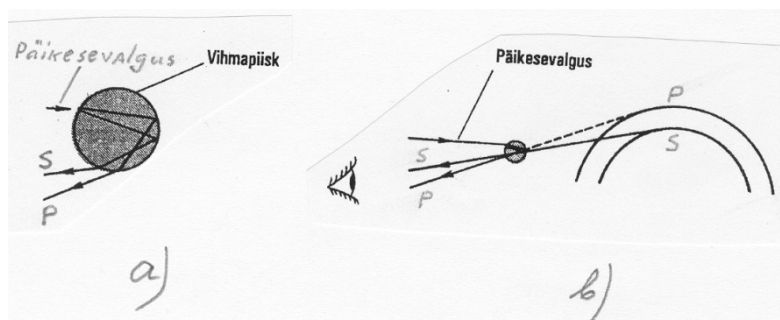
Looduses on dispersiooniga seletuv ilus taevane värvidemäng – vikerkaar.

#### Foto kahekordsest vikerkaarest

**Vikerkaart** võib taevas näha siis, kui üheaegselt paistab päike, kuskil sajab vihma ja meie oleme päikese ja vihmapiilve vahel, nii et päike jääb meie seljataha. Vikerkaart võib näha ka pürskkaevu või muruniisuti piiskades.

Taevas on vikerkaar kõige kõrgem kas hommikul või õhtul, siis kui päike on madalal. Suvisel keskpäeval, kui päike on horisondist kõrgemal kui  $42^\circ$ , ei ole vikerkaar nähtav, sest ta jääb silmapiirist madalamale.

Vikerkaare tekkimisest arusaamiseks on joonisel toodud päikesevalguse **murdamine** ja **peegeldamine** ühes piisas (a) ja vikerkaare nägemine (b).



Joonis 4.2.1.4. Vikerkaare tekkimine. a) päikesevalguse



*murdamine ja peegeldumine vihmapiisas; b) vikerkaare nägemine. S – sinine valgus, P – punane valgus.*

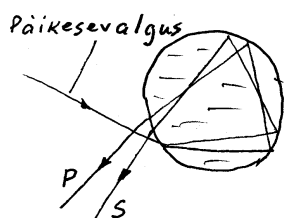
Jälgime vihmapiisa ülaosast sisenenud päikesevalguse teed piisas joonisel 4.2.1.4. a). Osa piisale langevast valgusest peegeldub selle välispinnalt (pole joonisel näidatud). Ülejäänud osa läheb piiska ja murdub vees, kusjuures sinine valgus (S) murdub rohkem kui punane valgus (P). Jõudes piisa tagaküljeni, osa valgust väljub piisast (pole joonisel näidatud) ja osa peegeldub piiska tagasi. Jõudes piisa esiküljeni osa valgust peegeldub piiska tagasi (pole joonisel näidatud) ja osa murdub õhku.

Sarnaselt käitub valgus igas piisas ja me näemegi vikerkaart, sest piisku on palju ja valgus siseneb piiskadesse mitte ainult selle ülaosast, vaid igast kohast. Igale värvusele vastab kindel nurk horisontaalsihi suhtes, kust valgus meie silma jõuab. See nurk ei pea olema just vertikaaltasandis, vaid võib olla suvalises tasandis.



*Joonis 4.2.1.5. Ainult punktiirjoonel asuvad vihmapiisad saavad kindla värvusega valgust vaatleja silma.*

Mõnikord on võimalik näha ka teist vikerkaart, mis on esimese kohal ja kus on värvused vastupidiselt madalamal oleva vikerkaarega (punane äär on allpool kui sinine). Selline vikerkaar tekib siis, kui me näeme ka neid kiiri, mis on sisenenud tilga alaosast ja peegeldunud tilgas enne väljumist kaks korda. Kuna igal peegeldumisel valguse intensiivsus väheneb, siis on nn. **teist järku vikerkaar** palju nõrgem põhivikerkaarest ja on nähtav ainult väga tugeva vihma korral, kui piisku on palju. Ka Päike peab selgelt paistma.



*Joonis 4.2.1.6. Valguse kahekordne peegeldumine vihmapiisas. S – sinine valgus, P – punane valgus.*

**Katse Vikerkaare tekitamine** veega täidetud klaasballooni, auguga ekraani ja tugeva valge valguse allika abil.

Kõrgemat järku vikerkaared on ka olemas, näiteks laboris on saadud kolmteist vikerkaare järku. Aga looduses pole lootust neid näha, sest nad on väga nõrgad ja mõned (näiteks 3. järku vikerkaar) tekivad päikese ümber, kust on neid võimatu näha heleda päikesevalguse taustal.

## 4.2.2. Spektroskoop ja spektraalanalüüs

Esimesena uuris valge valguse koostist teaduslikult I. Newton 1666.a. Ta laskis aknakardinasse tehtud väikesest august päikesevalguse prismale ja sealt toa seinale. Sinna tekkinud vikerkaarevärvides riba nimetaks ta **spektriiks**. Nimi tuleneb ladina keelsest sõnast *spectrum*, mis eesti keeles tähendab *nägemust* või *kujutluspilti*. Hiljem on hakatud spektriiks nimetama diagrammi, mis näitab valguse intensiivsuse jaotumist lainepikkuste või sageduste järgi.

Spektri saamiseks, jälgimiseks ja mõõtmiseks kasutatakse **spektraalriistu**. Neid võib jaotada kahte gruppi: spektromeetriteks ja spektroskoopideks.

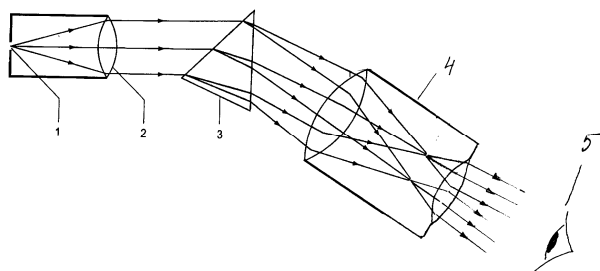
**Spektromeeter** (kr. *metreo* – mõõdan) on riist spektrite mõõtmiseks, st erineva lainepikkusega valguse intensiivsuse määramiseks.

**Pilt:** spektromeeter laboris,

**Spektroskoop** (kr. *skopeo* – vaatlen) on riist spektrite vaatlemiseks.

Meie vaatleme lähemalt spektroskoobi ehitust ja tööd.

### Spektroskoop



Joonis 4.2.2.1. Spektroskoobi ehitus: 1 – sisendpilu, 2 – kollimaatori lääts, 3 – prisma, 4 – pikksilm, 5 – vaatleja silm.

**Simulatsioon:** spektraalriista ehitus ja töö.

Vaatleme lähemalt prisma-spektroskoobi ehitust<sup>10</sup>.

Uuritav valgus suunatakse spektroskoopi läbi kitsa pilu, mille laius on suurusjärgus 0,1 mm. Pilu asub lääts 2 fookuses ja läätsest väljub paralleelne kiirtekimp, mis suunatakse prismale 3.

**Prisma** toimub valguse dispersioon, s.t. erineva värvusega valguslained hakkavad levima erinevais suundades.

Kuna prismale langes paralleelne kiirtekimp, siis prismast väljuvates erivärvilistes kiirtekimpudes on ka kiired paralleelsed. Aga igale värvusele vastav kimp levib erinevas suunas.

Need erivärvilised kiirtekimbud suunatakse pikksilma, millega spektrit vaadeldakse.

### Spektrite liigid

Kui mingi aine panna valgust kiirgama, siis on võimalik vaadelda selle aine **kiirgusspektrit**. Oma olemuselt jaotuvad kiirgusspektrid kahte liiki: pidevspektrid ja joonspektrid.

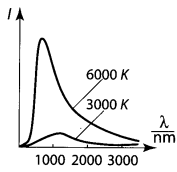
#### Katse pidev ja joonspekter

**Pidevspekter** on selline, kus on esindatud kõik lainepikkused ja spektroskoobis on näha värviline riba. Pideva spektri annavad kõrge temperatuurini kuumutatud tahked kehad ja vedelikud ning tihedad hõõguvad gaasid. Pidevspekter on näiteks Päikese või hõõglambi valgusel.

Tavaliselt esitatakse spektreid diagrammidena, kus näidatakse kiirguse intensiivsuse sõltuvust lainepikkusest või sagedusest.

Pidevspektri kuju ja maksimumi asukoht olenevad aine temperatuurist. Mida kõrgem on temperatuur, seda rohkem valgust kiiratakse. See tähendab, et valguse intensiivsus on suurem ja spekter on kõrgem. Pidevspektri maksimum nihkub temperatuuri tõustes lühemate lainepikkuste poole. See põhjustab ka hõõguva keha värvuse muutumist. Näiteks 700 °C kuumutatud raud hõõgub punaselt, aga temperatuuri järjest tõstes muutub kiirgus oranžikaks ja kollaseks.

<sup>10</sup> Difraktsioonivõrega aparraadi ehitus on põhimõtteliselt samasugune, ainult prisma asemel on võre.



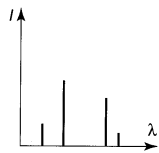
Joonis 4.2.2.2. Tahke aine pidev spekter erinevatel temperatuuridel. I – valguse intensiivsus.

**Joonspekter** on selline, kus ei ole kõigi lainepikkustega valgusi ja spektroskoobis on näha erivärvilised jooned tumedal taustal. Neid jooni nimetatakse **spektrijoonteks**, kiirgusspektri korral ka kiirgusjoonteks. Spektrijoontel on joone või kriipsu kuju sellepärast, et nad on tegelikult spektraalriista sisendpilu kujutised. Kui sisendpiluks oleks ümmargune auk, siis näeksime spektris joonte asemel erivärvilisi ringe.

Joonspektri annavad kõik gaasilised ained madalal rõhul. Joonspektri annab näiteks päevavalguslamp, mis on täidetud elavhõbeda auruga. Selle lambi spektris on tegelikult lisaks spektrijoontele ka pideva spektriga taust ehk **foon**.

Joonspektri diagramm on igale ainele omane ja teistest erinev. Põhjus on selles, et valgus, mida aine kiirgab, tekib aine aatomites või molekulides, kuid need on koostiselt ja ehituselt erinevad ning sellepärast on ka spektrid erinevad. Spektris olev

**kiirgusjoonte** arv ja intensiivsus iseloomustab just selle aine aatomeid. See lubab aineid kiirgusspektrite järgi üksteisest eristada



Joonis 4.2.2.3. Joonspekter. I – valguse intensiivsus

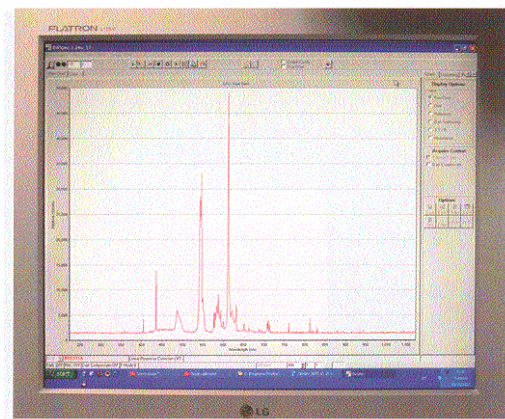
### Pilt pidev- ja joonspektrist

Eespool rääkisime, et iga aine aatomitele on omane kindel joonspekter, mille järgi on võimalik aineid üksteisest eristada. Aga kõikide tahkete ainete soojuskiirguse spektrid on ühel temperatuuril täiesti sarnased pidevspektrid.

Kuidas tekib pidev spekter? Miks nüüd iga aatom ei kiirga ainult kindlate lainepikkustega valgust?

Kiirgab küll, ainult nüüd pole aatomid isoleeritud, st pole üksteisest sõltumatud. Mida see tähendab? See tähendab, et elektronide energiatasemed ei ole igas aatomis täpselt sellised nagu nad üksikus, “normaalses” aatomis. Teiste aatomite elektronide laengud nihutavad elektrijõudude abil natuke vaadeldava elektroni kaugust tuumast, sest elektronid on elektrilaenguga osakesed. Ja kui laetud kehale lähendada teine sama laenguga keha, siis tekib nende vahel tõukejõud ja kehad nihkuvad teineteisest kaugemale. Nii on ka elektronidega aatomis: nende kaugus tuumast muutub teiste aatomite elektronide toimel. Kui aga muutub kaugus tuumast, muutub ka elektroni energia. Nii võibki ergastatud aatom tahkes kehas kiirata hoopis teiste lainepikkustega vaslglaineid kui seda teeb üksik aatom.

Asja muudab veel segasemaks soojusliikumine, sest naaberaatomid lähenevad ning kaugenevad üksteisele juhuslikult ja kogu aeg.

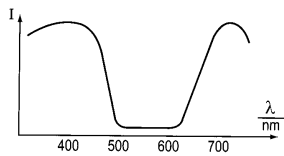


Joonis 4.2.2.4. Päevavalguslambi spekter spektromeetri ekraanil.

### Neeldumisspekter ja selle saamine.

### Neeldumisspektrid (Fraunhoferi jooned)

Lisaks valguse kiirgamisele ained ka neelavad valgust. Seda, millise lainepikkusega valgust ja kui palju mingi



aine neelab, kirjeldab **neeldumisspekter**. See võib olla nii pidev- kui joonspekter.

*Joonis 4.2.2.5. Värvilise klaasi neeldumisspekter. I – valguse intensiivsus.*

Neeldumisspektri saamiseks lastakse valge valgus enne spektraalriista suunamist läbi uuritava aine.

Osutub, et külm gaas neelab täpselt samade lainepikkustega valguslaineid, milliseid see kuumas olekus kiirgab. Öeldakse, et neeldumisspekter on kiirgusspektri “negatiiv”. See tähendab, et neeldumisspektris asuvad neeldumisjooned samades kohtades kui kiirgusspektris on kiirgusjooned.

#### **Joonis 4.2.2.6. Mingi gaasi kiirgus ja neeldumisspekter.**

##### **Spektraalanalüüs. Tekst Kaidolt**

Kui spektrid on erinevate aatomite ja molekulide jaoks erinevad, siis peaks saama neid kasutada ainete keemilise koostise analüüsimiseks. Nii ka tehakse. Vastavat uurimismeetodit nimetatakse **spektraalanalüüsiks** ja seal kasutatakse ainult ainete joonspektreid.

Analüüsimiseks ei piisa spektri vaatlemisest ja sellepärast tuleb kasutada **spektromeetreid**, mille abil saab mõõta erinevate spektrijoonte intensiivsust. Spektraalanalüüs on väga tundlik meetod. Selle abil saab kindlaks teha üliväikesi ainekoguseid mingi teise aine koostises. Eriti häid tulemusi molekulide “äratundmisel” annavad **laserspektroskoopia** meetodid, mis lubavad eristada isegi üksikuid molekule. Taoliste uuringutega tegelevad ka Tartu füüsikud.

Ainete koostise teadmine on oluline mitmetes eluvaldkondades: farmaatsia, mineraloogia, loodushoid, metallurgia, masinaehitus, kriminalistika, rääkimata astrofüüsikast, keemiast, bioloogiast.

Spektraalanalüüsil on keemilise analüüsi meetoditega võrreldes mitmeid eeliseid. Näiteks ei mõjuta spektraalanalüüs erinevalt keemilisest analüüsist ainete keemilist koostist. Samuti piisab analüüsiks väga väikestest ainekogustest. Ainete koostist saab uurida ka eemalt, ilma ainet laborisse toomata. See lubab uurida näiteks taevakehade koostist.

Spektraalanalüüsi abil on kindlaks tehtud Päikese ja tähtede keemiline koostis. Selleks võrreldakse tähtede spektreid meile tuntud keemiliste elementide spektritega. Siiani on tähtedel leitud ainult selliseid keemilisi elemente, mis esinavad ka Maal. See lubab arvata, et kogu Universum koosneb ühesugustest keemilistest elementidest.

##### **Küsimusi ja ülesandeid**

1. Kas vaakumis esineb ka dispersiooni? Miks?
2. Kas ka helilainetel esineb dispersiooni?
3. Prismaga tekitati ekraanile kitsast pilust tulevast valgusest pidev spekter. Mis juhtub spektriga, kui pilu laiust hakata suurendama?
4. Kuidas seletada, et mingi aine aatom kiirgab ja neelab ühe ja sama lainepikkusega valgust?
5. Visandage punase materjali neeldumisspektri graafik.

6. Visandage valgusfiltri neeldumisspekter, kui filter laseb läbi ainult rohelist valgust.
7. Millisena paistavad punased tähed, kui neid vaadata läbi sinise klaasi?
8. Kui iga üksik aatom annab joonspektri, siis miks neist aatomeist koosnev tahke aine annab pidevspektri?
9. Millises ilmakaares võib vikerkaart näha õhtul?

## STOP

1. Dispersiooniks nimetatakse aine absoluutse murdumisnäitaja sõltuvust valguse sagedusest või lainepikkusest.
2. Enamikul ainetest väheneb absoluutne murdumisnäitaja lainepikkuse kasvades.
3. Läätse fookuse asukoht oleneb valguse lainepikkusest.
4. Vikerkaar tekib valguse murdumisest ja peegeldumisest vihmapiiskades.
5. Vikerkaares on kõige kõrgemal punane värvus ja kõige madalamal violetne (lilla) värvus. Teist järku vikerkaares on värvused vastupidised, st. kõige kõrgemal on lilla värvus ja kõige madalamal punane värvus.
6. Spektriiks nimetatakse diagrammi, mis näitab valguse intensiivsuse jaotumist lainepikkuste või sageduste järgi.
7. Spektraalriist on seade spektri saamiseks, vaatlemiseks ja mõõtmiseks.
8. Spektraalriistas kasutatakse valguse komponentideks lahutamiseks kas prisma või difraktsioonivõret.
9. Kiirgusspekter kirjeldab kiirgunud valguse koostist, neeldumisspekter neeldunud valguse koostist.
10. Pidevspektris on esindatud kõik lainepikkused, joonspektris ainult osa.
11. Spektrijoon on spektraalriista sisendpilu kujutis.
12. Spektraalanalüüs lubab spektri põhjal kindlaks teha aine keemilise koostise.

### 4.3. Valguse teke ja liigid (1h)

#### 4.3.1. Valguse kiirgumine

Mida nimetatakse *kiirgumiseks*? See on *kiirguse* levimine. Aga mis on *kiirgus*? See on elektromagnetlainete või osakeste voog. Kuna valgus on ka elektromagnetlaineline, siis võime rääkida valguse kiirgumisest. Aga enne, kui valgus saab kiirguda peab ta tekkima.

On kindlaks tehtud, et valgus tekib aatomites.

Aatomite maailmas, mida nimetatakse ka **mikromaailmaks** kehtivad hoopis teised seadused, kui meile silmaga nähtavas maailmas ehk **makromaailmas**. Näiteks mikromaailmas on mõned füüsikalised suurused **kvantiseeritud**. See tähendab, et nad ei saa omada suvalisi väärtusi, vaid ainult teatud kindlaid väärtusi. Need väärtused saavad üksteisest erineda vaid kindlate suuruste – nn **kvantide** kaupa. Üheks selliseks

suuruseks on energia. Tuleb välja, et aatomid saavad omada ainult teatud kindla väärtusega energiad.

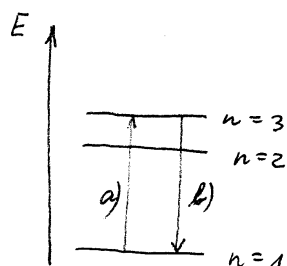
Energia kvantolemus võib ilmned ka makromaaailmas. On selliseid olukordi, kus kehal saavad olla ainult kindlad energia väärtused. Näiteks inimene trepiastmetel omab kas ühele või teisele astmele vastavat potentsiaalset energiat. Kahe astme vahepealset asendit ja vastavat energiat ei õnnestu saavutada.

Aatomi energia on määratud tuuma ja elektronide vastastikmõju energiatega. Mida suuremad on elektronide energiad tuuma suhtes, seda suurem on ka aatomi energia. Elektroni energia aga on seda suurem, mida suurem on elektroni tõenäosim kaugus tuumast. Sarnane olukord valitseb ka näiteks raskusjõu korral: mida kõrgemale maapinnast keha tõsta, seda suuremaks keha potentsiaalne energia muutub..

Kuna elektronid saavad aatomis olla tuumast vaid kindlatel kaugusel, siis see tingib ka aatomi energiatega kvantiseerituse. Miks elektronide kaugused tuumast on kvantiseeritud, seda saame teada kursuses “Mikro- ja megamaailma füüsika”.

Elektronide lubatud energiad kirjeldavad **energiatasemed** ehk **energianivood**.

Joonisel 4.3.1.1. on toodud ühe elektroni mõnede energiatasemete skeem, kus tasemeid kujutatakse horisontaalsete lõikudena. Mida kõrgemal lõik on, seda suurem energia sellisele olekule vastab. Mingile energiatasemele vastav energia väärtus on määratud ühe täisarvuga, mida kutsutakse **peakvantarvuks** ja selle tähiseks on  **$n$** .



*Joonis 4.3.1.1. Elektroni kolm esimest energianiataset.  $E$  – elektroni energia,  $n$  – peakvantarv. Üleminekule a) vastab ergastumine, üleminekule b) vastab valguse kiirgumine.*

Kõige madalam tase vastab elektroni põhiolekule ( $n = 1$ ), kus elektroni tõenäosim kaugus tuumast on minimaalne. Sellises olekus saab elektron olla kuitahes kaua. Teistelt tasemetelt püüab ta esimesel võimalusel üle minna põhiolekusse.

Kui elektron satub mingil põhjusel kõrgemale energiatasemele, siis öeldakse, et aatom on **ergastatud**. Sellele vastab suurem energia kui on aatomil põhiolekus.

Kuna looduses kehtib potentsiaalse energia miinimumi printsiip, siis iga keha või süsteem püüab võimalusel minna üle olekusse, kus selle potentsiaalne energia on minimaalne. Nii ka aatom läheb varsti pärast ergastumist tagasi põhiolekusse, st elektron läheb olekusse, kus ta peakvantarv  $n = 1$ . Aeg, mille jooksul aatom on ergastatud olekus, on keskel läbi  $10^{-8}$ s.

Põhioleku energia on väiksem kui ergastatud oleku energia. Seepärast aatomi energia väheneb põhiolekusse üleminekul ja üleliigne energia kiiratakse aatomist välja elektromagnetilise lainena. Kui see laine on inimese silmale nähtav, räägitakse, et aatom kiirgab valgust.

Iga keemilise elemendi aatomid kiirgavad ainult sellele elemendile iseloomulikku valgust, sest ühe aine kõikidel aatomitel on ühesugune elektronide energiatega süsteem.

Aine aatomid võivad ergastuda ja hakata valgust kiirgama mitmel põhjusel. Meie käsitleme kaht kiirguse liiki: soojuskiirgust ja luminescentsi.

## Simulatsioon Bohri aatomimudelilist

### 4.3.2. Soojuskiirgus ja luminesents

**Soojuskiirgus** on elektromagnetiline kiirgus, kus aatomite ergastumine toimub soojusenergia ehk **siseenergia** arvel. Mida kõrgem on keha temperatuur, seda kiiremini selle aatomid (või molekulid) liiguvad, kas kulgevad või võnguvad. Liikumise käigus võivad aatomid omavahel põrkuda ja selle tulemusena võib mõni elektron aatomis minna tuumast kaugemale. Toimub aatomi ergastamine ja sellele järgnev elektromagnetiline kiirgamine.

Nagu juba eespool on öeldud, on hõõgivate tahkiste ja vedelike kiirgusspekter pidev. Mida kõrgem on keha temperatuur, seda suurem on kiiratava valguse intensiivsus ja seda lühemalaineline on kiiratav valgus.

Samal temperatuuril kiirgavad tumedad kehad rohkem valgust kui heledad kehad.

Soojuskiirguse allikateks on näiteks hõõglamp või lõkkeleek.

**Katse jälgida kuumutatava metallitüki värvuse muutusi.**

**Simulatsioon kiirgusmaksimumi nihkumisest temperatuuri muutudes.**

**Katse** Õõnes metallkera, mille ava paistab toatemperatuuril süsimumstana. Kuumas ahjus, aga auk palju heledam, kui ülejäänud kera.

**Katse** Õõnes metallkuup, mille tahud on erinevat värvi (Leslie kuup), asub paarikümne sentimeetri kaugusel termosambast. Kuupi valatakse kuuma vett ja termosammas hakkab näitama nullist erinevat näitu. Kui kuup keerata anduri poole läikiva pinnaga, on näit kõige väiksem ja musta pinna korral on näit kõige suurem. Kuubi keeramisel peab jälgima, et ei muutuks kaugus andurist.

Soojuskiirgus võib olla ka silmale nähtamatu infravalgus. Seda kiirgavad kõik kehad, mille temperatuur on ümbritseva keskkonna temperatuurist kõrgem (näiteks, radiaator, triikraud, inimkeha). Infravalgust näevad mitmed öise eluviisiga röövlomad. Näiteks lõgismadu, kelle näos olevad soojusandurid lubavad tal jahti pidada ka täielikus pimeduses. On esinenud juhtumeid, kus tapetud lõgismadu on ka pärast surma salvanud inimest kätte, kui see on käe mao pea lähedale pannud. Nimelt käivitavad infrapuna sensorid lõgismaol automaatselt hammustamisrefleksi. Ja kuna roomajate refleksid hääbuvad pärast surma aeglaselt, ongi õnnetusi juhtunud.

Infravalguse toimel põhineb ka termograafia, mille abil tehakse kindlaks näiteks elamute soojuslekked kohad. Nendest kohtadest väljub ka infravalgust mille muudavad inimesele nähtavaks termokaamerad.

Infravalguse kasutamisel põhineb ka öönägemisseadmete, kontaktivabade termomeetrite ja liikumisandurite töö.

**Pilt mis on tehtud termokaameraga**

**Luminesents** on elektromagnetiline kiirgus, kus aatomite ergastamine toimub teiste energialiikide, mitte siseenergia arvel. Kuna luminesentskiirguse tekkimiseks pole vajalik kõrge temperatuur, siis on luminesentsi nimetatud ka "külmaks valguseks". Luminesentsi korral on aatomil mitmeid võimalusi ergastumiseks. Luminesentsi liigitamine ergastamisviiside järgi on toodud tabelis.

**Luminesentsi liigid**

Luminesentsi liik	Ergastamisenergia allikas
Fotoluminesents	Ultravalgus
Katoodluminesents	Kiirete elektronide juga
Radioluminesents	Radioaktiivne kiirgus
Elektroluminesents	Elektriväli
Kemoluminesents	Keemiline reaktsioon
Bioluminesents	Biokeemiline reaktsioon

**Katsed:** luminesentsi liigid (foto-, elektro-, radio-, katood-, bio-); tahkiste ja vedelike luminesents;

Erinevalt soojuskiirgusest ei lõpe luminesents kohe pärast ergastamise lõppu, vaid kestab veel mingi aja, kuigi järjest nõrgenedes. Öeldakse, et luminesentsi korral esineb **järelhelendus**. See võib kesta ainult mõni miljondik sekundit, aga ka mitmeid tunde. Kõik oleneb ainest, mis kiirgab.

**Katse:** järelhelendus;

Luminesentsi kasutatakse näiteks päevavalguslampides ja kompaktpirnides ehk säästupirnides. Neis on lambi sisepind kaetud lumineseeriva aine ehk **luminofooriga**. Torus on elavhõbeda aur, millest elektrivoolu toimel kiirgub ultravalgust, mis ergastab luminofoori aatomeid ja tekib luminesentskiirgus, mis valgustab ümbrust. Sellistes lampides muudetakse valgusenergiaks kuni 80 % kulutatud elektrienergiast. Hõõglampide korral muutub valguseks kuni 15 % elektrienergiast.

Luminesentskiirgus on ka näiteks kollaste tänavalaternate valgus, kus kiirgab naatriumi aur. Aga ka vanemate televiisorite ja arvutite kineskoopkuvarid annavad luminesentskiirgust, mis tekib nende sisepinnal oleva luminofoori pommitamisel kiirete elektronidega.

Luminesents leiab kasutamist veel paljudes eluvaldkondades: ainete kristallstruktuuri ja keemilise koostise analüüsimisel, laserites, haiguste diagnoosimisel proovide põhjal, dokumentide ja rahade turvaelementides, toiduainete kvaliteedi kontrollimisel, mere naftareostuse uurimisel, süvamereloomadel vaenlaste peletamiseks või saagi ligimeelitamiseks, jne.

**Katse:** turvaelemendid dokumentidel ja rahal.

Miks muundub luminesentslampides palju suurem osa juurdeantavast energiast valguseks kui hõõglampides?

Soojuskiirguse korral antakse ergastav energia ainele tervikuna, st. pannakse kiiremini liikuma kõik aine aatomid, suurendades nii aine siseenergiat. Osa sellest energiast läheb elektronide ergastamiseks. Luminesentsi korral antakse aga ergastav energia otse elektronidele ja aine sisenergia ei suurene.



Teame, et mingi keha liigutamiseks on vaja anda talle kineetilist energiat, mis on võrdeline keha massiga. Kuna aatomid on palju massiivsemad elektronidest, siis on selge, et aatomite energia suurendamiseks on palju rohkem välist energiat vaja kui elektroni energia suurendamiseks.

### Küsimusi ja ülesandeid

1. Tooge näiteid makromailmas esinevatest nähustest, kus mingi füüsikaline suurus on kvantiseeritud.
2. Kui elektron läheb üle olekust, mille peakvantarv: a)  $n = 3$  olekusse, kus  $n = 5$ ; b)  $n = 4$  olekusse, kus  $n = 2$ , kas siis toimus ergastumine või kiirgumine?
3. Kas soojuskiirgust on võimalik näha?
4. Kumb radiaator, kas tumedat või heledat värvi annab rohkem sooja?
5. Miks nimetatakse luminesentsi külmaks valguseks?
6. Mis põhjustab jaaniusside helendumist?
7. Nimetage hõõglambi eeliseid ja puudusi võrreldes säästulambiga.

### STOP

1. Kiirgumine on ainest elektromagnetlainete eraldumine.
2. Aatom saab olla ainult kindlate energiatega olekutes, mida kirjeldavad energiatasemed ehk energianivood.
3. Elektronide energiatasemele vastav energia väärtus on määratud täisarvuga  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Seda arvu nimetatakse peakvantarvuks.
4. Olekus, kus elektron on tuumale kõige lähemas võimalikus asendis on  $n = 1$  ja seda olekut nimetatakse põhiolekuks.
5. Kui aatom saab energiat juurde, siis ta läheb mingisse suurema energiaga olekusse ja öeldakse, et aatom ergastus.
6. Kui aatom läheb ergastatud olekust tagasi põhiolekusse või mõnele madalamale energiatasemele, siis kiirgub elektromagnetiline laine või valgus.
7. Soojuskiirgus on elektromagnetiline kiirgus, mille korral aatomite ergastamine toimub siseenergia arvel.
8. Luminesents on elektromagnetiline kiirgus, mille korral aatomite ergastamine toimub teiste energialiikide, mitte siseenergia arvel.
9. Luminesentsile on iseloomilik järelhelendus.

### Vastuseid

#### 3.1.

7.  $3,95 \cdot 10^{14}$  Hz;  $7,9 \cdot 10^{14}$  Hz
8.  $3 \cdot 10^5$ ;  $3 \cdot 10^{19}$
9.  $2 \cdot 10^{-5}$  s; 333 m/s;  $\approx 10^6$  korda

#### 3.2.

2.  $2 \cdot 10^8$  m/s

8.  $2,6 \cdot 10^{-19}$  J,  $5,3 \cdot 10^{-19}$  J

9.  $3,3 \cdot 10^{-19}$  J

10.  $2,8 \cdot 10^{16}$

**4.1.2.**

3. 451 nm

6. 1,1 cm

7. 1,14

**4.1.4.**

2. 3 cm

3. 10 dpt

6. Vähendatud, 4 korda

7. 60 cm

8. 2,5 korda