

Loeng 11. Elektriväli ja magnetväli

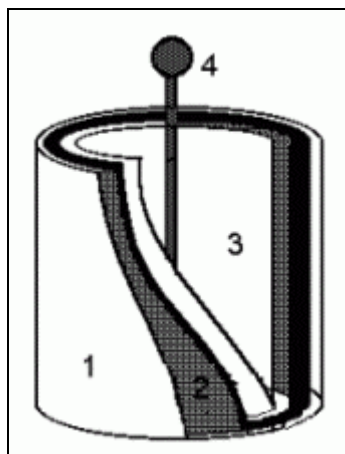
Koolifüüsika järgi on elekter ja magnetism füüsika osa, mis käsitleb laetud kehade (laengute) liikumist. Seega peaks elektriõpetus modelleerima kehade liikumist Newtoni mehaanika vaimus, lisades meie poolt tuntud jõududele uue jõutüübi - laetud kehade vahel mõjuvad **elektrijõud**. Tegelikult on asi keerulisem: elektriõpetuses uuritakse ka **elektromagnetvälja**, mis erinevalt mehaanikakursuses käsitletud jõuväljadest pole mitte matemaatiline abstraktsioon, vaid **reaalselt eksisteeriv materiaalne objekt**.

Meie elektrikursus jaguneb kolmeks teemaks:

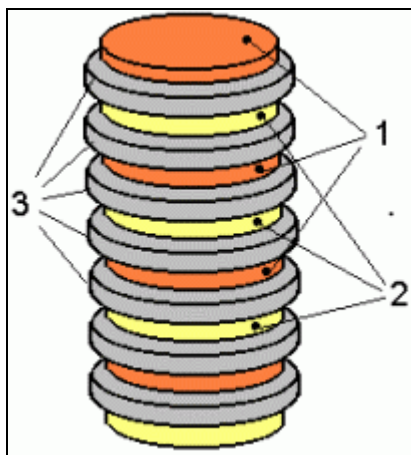
- **Elektrostaatika** käsitleb (seisvate) laengute vastasmõju, siin õpime ka (staatilist) magnetvälja;
- **Alalisvool** uurib laengute liikumist elektriväljas;
- **Elektromagnetism** uurib elektri- ja magnetnähtuste vastastikuseid seoseid.

Ajalooline taust. Antiikajal tunti vaid üht nähtust -- hõõrdumisel kogunevat staatilist laengut. Et staatiline laeng võib koguneda vaid isolatoritel, seostus see tol ajal tuntud elektrit mittejuhtivate ainetega -- eeskätt merevaigu, hiljem ka klaasiga.

Staatilise elektri matemaatiline uurimine algas 18. sajandil, kui selgelt formuleeriti kaht tüüpi laengute olemasolu. Sama sajandi lõpu kaks tähtsat avastust -- kondensaator (Leideni purk, 1785) ja keemiline vooluallikas (Volta samm, 1799), löid eeldused elektri uurimiseks; tehnoloogiliste rakenduste suur hulk kindlustas uurimissuuna rahaliselt.



Leideni purk, "laengukoguja", praeguste kondensaatorite eelkäija. 1 - väline metallkest, 2 - klaaspurk, 3 - vildist või kalevist vaheseib, mida immutati happega. 4 - elektrood, mille kaudu antakse "purgile" laeng.



Volta samm, esimene reaalselt töötav vooluallikas. 1 - vaskketas, 2 - tsinkketas, 3 - vildist või kalevist vaheseib, mida immutati happega. Keemiliste vooluallikate tööpõhimõttest järgmises loengus.

Elektri- ja magnetvälja mõisted toodi füüsikasse selleks, et kirjeldada kehade vahel mõjuvaid elektri- ja magnetjõude. Alles hiljem selgus, et tegu on uut tüüpi materiaalse objekti - elektromagnetvälja - avaldumisvormidega.

Ajalooliselt sai elektriõpetus alguse hõõrdumisel tekkivate staatiliste (paigalseisvate, antud kehaga seotud) elektrilaengute uurimisest.

Elektri- ja magnetnähtuste korrektne matemaatiline kirjeldamine nõuab kvant-teooria kasutamist. Elektrotehnikas võime enamikul juhtudel lähtuda Newtoni mehaanikast. Sel juhul vaadeldakse elektri- ja magnetvälja kui pidevaid, kindlate omadustega (matemaatilisi) vektorvälju.

19. saj. esimene pool tõi kaasa hulgaliselt avastusi

- voolutugevuse sõltuvus juhtme takistusest - Ohm'i seadus 1826,
- voolu soojuslik toime - Joule-Lenz'i seadus 1842,
- voolu magnetväli - Ørsted 1820,
- magnetvälja mõju vooluga juhtmele - Ampere 1820,
- elektromagnetilise induktsiooni nähtus - Faraday 1831,

ning tehnilisi rakendusi

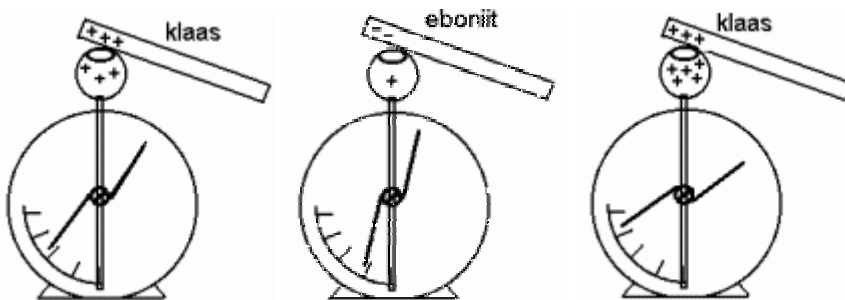
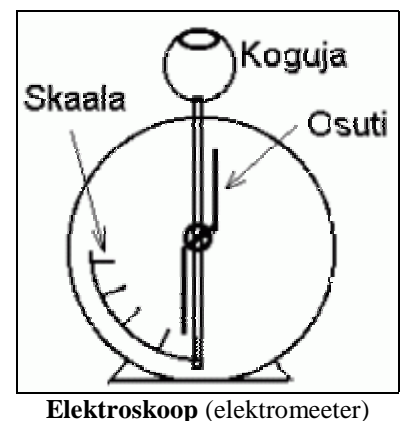
- elektrimootor - M. Jacobi 1834,
- mehaanilise töö muutmise elektromotoorjõuks - elektromagnetilise induktsiooni nähtusel põhinev generaator - 1858.

1876. aastal formuleeris meile juba tuttav J. C. Maxwell oma kuulsa väljavõrrandite süsteemi, viies elektriõpetuse tänapäeva tasemele. Kaasajal kuulub elektriõpetus põhiliselt tehnilise füüsika valdkonda. "Pärisfüüsikas" asendab seda kvantteooria, eriti selle rakendused kristalsete ainete elektriliste omaduste uurimiseks (pooljuhtide kvant-teooria).

Staatiline elekter

Alustame lihtsamast: elektriseerime erinevast materjalist esemeid (klaaspulk, eboniitpulk) ja üritame mõõta neile kogunevat laengut. Laengu mõõtmiseks kasutame elektrooskoopi, mille osuti kõrvalekalle on võrdeline kogujale antud laenguga.

Laeme elektrooskoobi, puudutades tema kogujat laetud klaaspulgaga. Elektrooskoobi osuti kaldub kõrvale, näidates laengu olemasolu. Kui selliselt laetud elektrooskoopi puudutada uuesti klaaspulgaga, siis osuti kõrvalekalle kasvab (laeng suureneb); kui aga puudutada elektrooskoopi laetud eboniitpulgaga, muutub osuti kõrvalekalle hoopis väiksemaks - laeng elektrooskoobil kahaneb.



18. sajandi füüsikud selgitasid toimunut erinevalt. Prantslane Dufay (1733) tõi põhjenduseks kaht liiki elektri olemasolu:

- positiivne (+) -- klaas
- negatiivne (-) -- eboniit.

Ameeriklane Franklin sai hakkama üht tüüpi elektriga: positiivne laeng tähendas elektri ülejääki (laeng suurem keskmisest), negatiivne aga puudujääki (väiksem keskmisest).

Elektrilaengut, mis ei muuda protsessi (katse) käigus oma asukohta, nimetatakse **staatiliseks elektriks** (kr. *statos* - seisev).

Keha, millega on laeng seotud, nimetame (elektriliselt) **laetud kehaks**.

Coulomb'i seadus. (loe: *kulooni*)

1785. a. tuletas prantsuse füüsik Coulomb seaduse, mis kujutas endast Newtoni 100 aastat varem leitud gravitatsiooniseaduse rakendust elektrijõule.

Kaks punktlaengut mõjutavad teineteist jõuga, mis on võrdeline nende kehade laengutega ning pöördvõrdeline nende vahelise kauguse ruuduga.

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2} \longrightarrow F = k \frac{q_1 q_2}{r^2};$$

Seda, et jõud tõepoolest on võrdeline laengu suurusega ning kahaneb võrdeliselt kauguse ruuduga, kontrolliti torsioonkaaludega. Erinevalt gravitatsiooniseadusest võib vastasmõjukuks olla nii tõmbe- kui tõukejõud:

- kui q_1 ja q_2 on sama liiki laengud, siis kehad tõukuvad
- kui laengute märgid on erinevad, (+ -), siis kehad tõmbuvad.

Seda saab kirja panna, kui kasutada meile juba tuntud vektorsümboolikat:

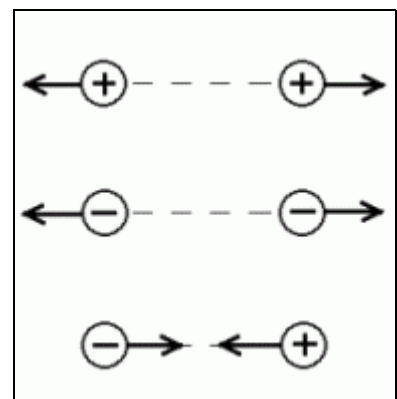
$$\vec{F} = k \frac{q_1 q_2}{r^3} \vec{r}.$$

Võrdetegur k sõltub meie poolt kasutatavast ühikute süsteemist: Gauss'i süsteemis (CGSE) valitakse laengu ühik (LÜ) nii et $k = 1$. See tähendab, et

1 LÜ mõjutab teist kauguselt 1 cm jõuga 1 dn.

Küsimus: Miks punktlaengud? Vaadake eelmise semestri konspektist loengut 5, Jõuväljad.

Samamärgiliste laengute vahel mõjub tõukejõud, erimärgiliste vahel tõmbejõud.



Kaht liiki laengute vahel mõjuvad jõud

SI-süsteemis on laengu ühik defineeritud elektrivoolu tugevuse kaudu:

1C (1 kulon) on laeng, mis läbib juhi ristlõiget sekundis, kui vooutugevus on 1 A (amper).

Seega võrdetegur $k \neq 1$:

$$k_{SI} = 9 \cdot 10^9 \frac{\text{Nm}^2}{\text{C}^2} \text{ ehk } k = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}; \quad \epsilon_0 = 0.885 \cdot 10^{-11} \frac{\text{F}}{\text{m}}$$

Suurust ϵ_0 nimetatakse *elektriliseks konstandiks ehk vaakumi dielektriliseks läbitavuseks*.

Miks nii keeruliselt? SI-süsteem on arendatud nn. praktilisest MKSA-süsteemist, mida kasutati rohkem inseneriasjanduses. Et seal on tegu peamiselt elektrivooluga, on ka ühikud valitud lähtuvalt elektrotehnika põhisuurusest - voolutugevusest. Pealegi võimaldab saadud süsteem kirjeldada elektri- ja magnetnähtusi sama tüüpi suurustega. Ja nagu edaspidi näeme, tulevad neid kirjeldavad valemidki sarnased.

Elektriväli.

Elektrivälja kirjeldamiseks sobib gravitatsioonivälja kirjeldamise meetod.

Elektrivälja tugevus = sellesse punkti asetatud positiivsele ühiklaengule (+1C) mõjuv jõud.

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r^2} \vec{r}$$

Elektrivälja matemaatiline kirjeldus on samasugune kui gravitatsiooniväljal (loeng 5).

Elektrivälja potentsiaal = töö, mida tuleb teha (positiivse) ühiklaengu viimiseks antud väljapunktist sinna, kus väli ei mõju.

$$\varphi = \frac{A}{q} = \frac{1}{q} \int_{r_0}^{\infty} \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} dr = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q}{r_0}$$

NB! Valemite parem pool käib ainult punktlaengute kohta! Tegelik väli võib olla väga keerulise geomeetriaga.

Kuna elektrijõud on konservatiivsed, kehtivad järgmised matemaatilised seosed:

$$A = \Delta E_p = E_{p2} - E_{p1} = q\Delta\varphi$$

$$\Delta\varphi = \int_1^2 \vec{E} d\vec{s}$$

$$\vec{E} = \text{grad}\varphi, \quad (= \nabla\varphi = \frac{d\varphi}{d\vec{r}} = \frac{d\varphi}{dx}\vec{i} + \frac{d\varphi}{dy}\vec{j} + \frac{d\varphi}{dz}\vec{k})$$

Välja graafiline kujutamine.

Jõuväljade - nende hulgas ka elektrivälja "ülesjoonistamiseks" kasutatakse jõujooni ning samapotentsiaalipindu (nimetatakse ka ekvipotentsiaalipindadeks).

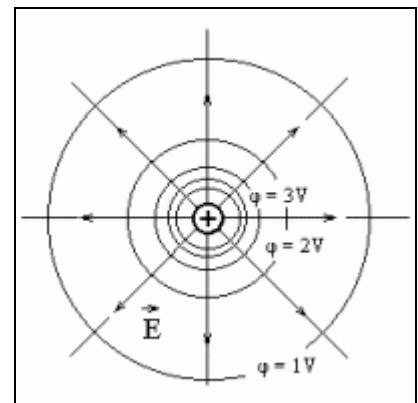
Jõujoon on kõver, mis on kõigis punktides paralleelne väljavektoriga. (Ehk: väljavektor on alati mingi jõujoone puutujaks.)

Kuna pidevas väljas paiknevad jõujooned lõpmata tihedalt (iga ruumipunkti läbib mingi jõujoon), pole kõiki neid võimalik joonisele kanda. Kokkuleppeliselt joonestatakse jõujooned nii, et nende tihedus oleks võrdeline väljatugevusega antud ruumiosas.

Samapotentsiaalipind on kinnine pind, mis ühendab sama potentsiaaliga väljapunkte.

Ka samapotentsiaalipinnad paiknevad lõpmata tihedalt (igal väljapunktil on mingi potentsiaal). Joonisele kantakse tavaliselt potentsiaali kindlatele "ümmargustele" väärtustele vastavad pinnad (tegelikult pindade lõikejooned mingi koordinaattasandiga).

Näitena toome positiivse ühiklaengu välja graafilise pildi. Et jõujooned aitavad mõista välja geometriat, kasutame neid ka edaspidi.



Punktilaengu väljatugevus ja potentsiaal. Mida tugevam on väli (tihedamalt jõujooned) seda kiiremini muutub potentsiaal (seda lähemal on üksteisele samapotentsiaalipinnad).

Elektrivälja kohta kehtivad kaks teoreemi:

- Elektriväljad on sõltumatud; laengule mõjub summaarne väli.

$$\vec{E} = \sum_{i=1}^n \vec{F}_i = \vec{F}_1 + \vec{F}_2 + \dots + \vec{F}_n$$

- Elektrivälja tugevuse voog läbi kinnise pinna on võrdne selle pinna sisse jäävate laengute summaga.

$$\oint \vec{E} d\vec{S} = \frac{1}{\epsilon_0} \sum q_i$$

- Elektrivälja tugevuse ühikuks SI süsteemis on volt meetri kohta (V/m),

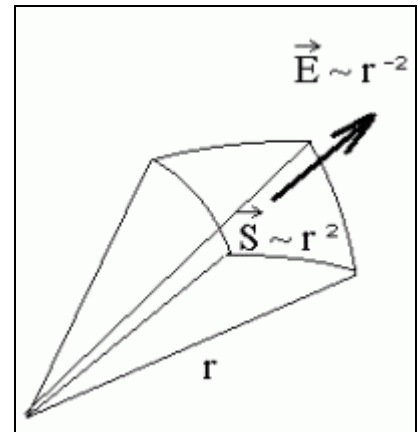
$$[E] = \frac{N}{C} = \frac{V}{m}$$

- potentsiaali ühikuks on volt (V)

$$[\varphi] = \frac{J}{C}$$

Viimast nimetatakse **Gaussi teoreemiks**; pideva ruumlaengu korral on võrrandi paremas pooles summa asemel integraal.

Fundamentaalfüüsikas peetakse Gaussi teoreemi üheks olulisemaks, kuna ta seob jõuväljade valemite pöördruutsõltuvuse (ingl. *inverse square relation*, tähendab, et kaugmõju väheneb allikast eemaldumisel võrdeliselt kauguse ruuduga, valemina $F \sim r^{-2}$) füüsikalise ruumi kolmemõõtmelisusega.



Gaussi teoreem.

Väljatugevuse kahanemise kompenseerib laengut ümbritseva sfääri pinna suurenemine (pindala kasvab võrdeliselt kauguse ruuduga)

Elektriväli aines. Eespool toodud valemite tuletamisel oletasime, et mingid muud kehad peale punktlaengute Q_1 ja Q_2 katses ei osale. Tegelikuses asuvad laengud alati *keskkonnas*, mille elektrilised omadused mõjutavad laengute vahel mõjuvaid jõude, seega ka elektrivälja omadusi üsnagi oluliselt.

Molekulaarfüüsika vaatles aineid (keskkonda) kui punktmasside - molekulide - kogumit. Et molekulidel on elektrilised omadused, tuleb neid omadusi välja arvutamisel arvestada. Eeldame, et ained on elektriliselt neutraalsed, kuid elektriseeritavad; seega kaasneb iga kehaga *varjatud laeng*, mille suurus on arvatav aatomifüüsikast.

Kõik ained sisaldavad laetud osakesi

Ühe kilomooli kohta tuleb keskmiselt laeng

$$Q_{km} = \frac{\mu}{2} N_A \cdot e = \frac{6.02 \cdot 10^{26} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}}{2} \mu \approx 5 \cdot 10^8 \mu \text{ kulonit,}$$

eeldusel, et aatomituuma laeng võrdub poolega massiarvust. Elektriväli aines sõltub nüüd eeskätt sellest, kuid võrd need laengud võivad oma asukohta muuta. Kui mingisugused laengukandjad saavad ruumis vabalt liikuda, nimetame neid *vabadeks laenguteks*; kui mitte, siis *seotud laenguteks*.

Kui laetud osakesed võivad ainetükis vabalt liikuda, nimetatakse ainet elektrit juhtivaks (lühemalt: juhiks) Dielektrikke nimetatakse elektrotehnikas ka isolaatoriteks.

Vastavalt laengute liikuvusele jagunevad ained:

- JUHID
 - Laengud liiguvad vabalt
 - metallid
 - elektrolüüdid
- POOLJUHID
 - Laengud seotud nõrgalt, vabanevad välismõju toimel.
- DIELEKTRIKUD
 - Laengud on seotud kristallvõresse või neutraalsetesse molekulidesse.
 - kristallid
 - vedelikud
 - gaasid

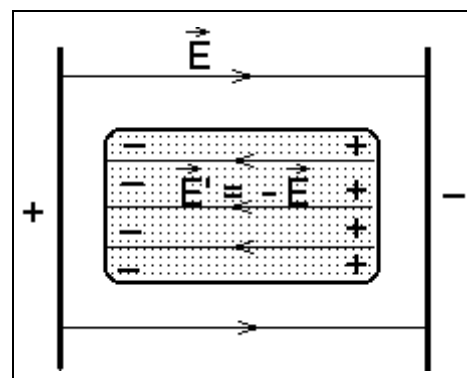
Juht elektriväljas Et laetud osakesed võivad juhis vabalt liikuda, algab elektrivälja mõjul laengute ümberpaiknemine, mis kestab seni, kuni neile mõjuv jõud saab nulliks. See on võimalik, kui:

- väljatugevus juhi sees on null;
- elektrivälja potentsiaal on kogu juhi ulatuses konstantne;
- kõik lisalaengud on koondunud juhi pinnale;
- väljatugevuse vektor juhi pinnal on pinnaga risti.

Neid omadusi saab kasutada elektrivälja kujundamiseks ja laengute salvestamiseks.

Küsimus: Kas oskate neid nelja väidet tõestada?

Vihje: juhtivas keskkonnas olev mikrolaeng jääb paigale alles siis, kui talle mõjuv jõud on null või kui tal pole enam kuhugi liikuda.



Juhtivast ainekha elektriväljas: vabad laengud võtavad sellise asukoha, et väljatugevus juhi sees oleks null.

Ülaltoodust järeldub, et laetud juht omab kindlat, laengust sõltuvat potentsiaali.

See potentsiaal sõltub

- juhile antud laengu suuruselt,
- juhi kujust ja mõõtmetest
- ning teiste juhtide olemasolust antud juhi lähedal.

Viimaseid kolme parameetrit saab kokku võtta laengust sõltumatu kordaja - *mahtuvuse* abil:

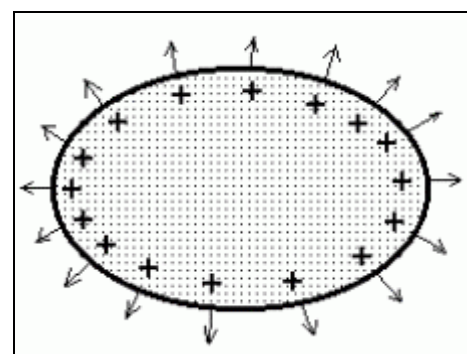
$$\varphi = \frac{1}{C} q; \quad C = \text{mahtuvus}$$

Mahtuvus - juhile antud laeng jagatud juhi potentsiaaliga
Farad (F) - juhi mahtuvus, kui laeng 1 C tõstab tema potentsiaali 1 V võrra.

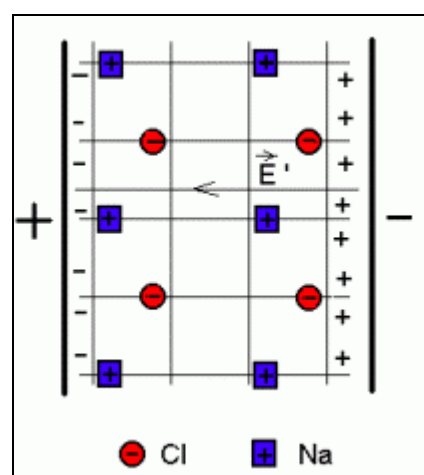
Laengu salvestamiseks ette nähtud seadet nimetatakse *kondensaatoriks*. Kuidas selline riistapuu on valmistatud ja milliseid nippe kasutatakse mahtuvuse suurendamiseks, lugege lisatekstist.

Väli dielektrikus. Kui laenguid ümbritsevaks keskkonnaks on dielektrik, ei saa selles olevad laengud vabalt liikuda. Nimetatakse selliseid laenguid seotud laenguteks, ja see tähendab, et tavaolukorras on neile mõjuvad jõud tasakaalus. Kui lisandub elektriväljast tingitud jõud, leiavad osakesed uue, varasemaga võrreldes nihutatud asendi:

Nagu teame molekulaarfüüsika kursusest, võib keskkonnaks olla tahke vedel või gaasiline aine. Tahkes aines on aatomid või



Laetud elektrijuht: "ülearune" laeng koguneb juhi pinnale nii, et kõigile laetud osakestele mõjuv jõud oleks suunatud risti välispinnaga.



Ioonkristalli (NaCl) polarisatsioon: paigalt nihkunud laengud (positiivne naatriumiioon on nihkunud paremale, negatiivne klooriioon vasakule) tekitavad täiendava elektrivälja E' .

molekulid seotud kristallvõresse. Tihti on tegu **ioonkristalliga**, mis koosneb laetud osakestest - ioonidest. (Näitena võib tuua naatriumkloriidi - tavalise keedusoola kristalli.) Vedelates ja gaasilistes ainetes on molekulid küll vabad, aga nemadki koosnevad laetud osakestest. Kui tekitada aines elektriväli, võtavad need laetud osakesed uue tasakaaluasendi: ioonid nihkuvad oma varasemast asendist, vaba molekul võib ka pöörduda, joondudes välja järgi (vt. joonis).

Mõlemal juhul tekitab laengute nihkumine täiendava elektrivälja, mida nimetatakse **indutseeritud väljaks**. Et see väli on vastassuunaline nihet esile kutsuva väljaga, siis summaarne väli nõrgeneb ning koos välja nõrgenemisega vähenevad ka sellesse välja paigutatud laengutele mõjuvad jõud.

Seda vähenemist on kõige lihtsam kirjeldada, viies Coulomb'i seadusesse ning sellest tuletatud elektrivälja valemitesse sisse kordaja ϵ^{-1} .

Suurust ϵ nimetatakse aine **suhteliseks dielektriliseks läbitavuseks**;

mida suurem on ϵ , seda nõrgemaks jääb väli.

Tavaliselt on dielektrikute suhteline läbitavus kümne ringis, kõige suurem ($\epsilon = 81$) on ta puhtal veel.

Matemaatiliselt saab dielektrikke kirjeldada:

a) Juhul, kui dielektrik on isotroopne ($\vec{E}' \parallel \vec{E}_0$), siis on indutseeritud väli paralleelne ja vastassuunaline algväljaga:

$$\vec{E}' = -\kappa \vec{E}_0,$$

kus κ on *dielektriline vastuvõtlikkus*. Siis

$$\vec{E} = \vec{E}_0 + \vec{E}' = \vec{E}_0 - \kappa \vec{E}_0,$$

$$\vec{E} = \frac{\vec{E}_0}{1 + \kappa} = \frac{1}{\epsilon} \vec{E}_0,$$

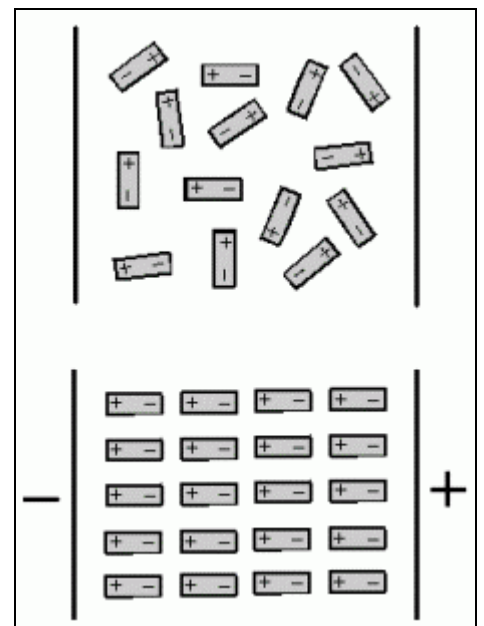
kus ϵ -i ongi ülalmainitud *suhteline dielektriline läbitavus*.

b) Üldjuhul indutseeritud väli ei tarvitse olla välise väljaga paralleelne. Siis kasutatakse polarisatsioonivektorit

$$\vec{P} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{\Delta V} \vec{p}_i,$$

kus $\vec{p}_i = q\vec{l}$ on molekuli dipoolmoment.

Elektriväljas dielektrikud polariseeruvad, mille tulemusena väli nõrgeneb.



Vedela dielektriku polarisatsioon: dipoolmomenti omavad molekulid orienteeruvad välja suunas.

Summaarne väli antakse nüüd *elektrinihke e. elektrilise induktsiooni* vektori

$$\vec{D} = \epsilon_0 \vec{E} + \vec{P}$$

abil.

Kui $\vec{P} \parallel \vec{E}$, siis on elektrinihke vektor samasuunaline elektrivälja vektoriga:

$$\vec{D} = \epsilon \vec{E} + \kappa \epsilon_0 \vec{E} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E}.$$

Suhteline dielektriline läbitavus ϵ on alati suurem ühest.

Dielektrike kohta on kasulik pidada meeles kaht nähtust:

- *Piesoelektriline efekt* - kristalsete ainete mõõtmete muutumine elektrivälja toimel. See nähtus võimaldab lihtsa mehaanika abil luua häid elektrivõngete stabilisaatoreid (kristall resoneerib elektrivõngetele, mille võnkesagedus ühtib kristallplaadi mehaanilise omavõnkesagedusega).
- *Senjettidielektrikud* - prototüübiks nn. Seignette'i sool ($\text{KNaC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$), ained mis sarnaselt magnetväljale ferromagneetikutes säilitavad elektrilise polarisatsiooni ka pärast väljast eemaldamist.

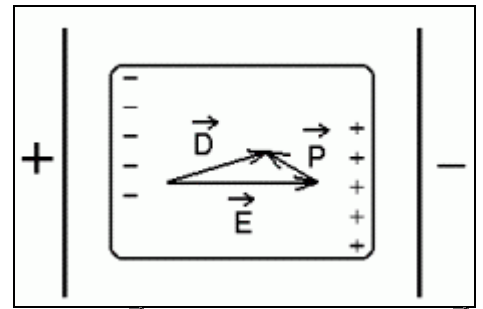
Kui väli on väga tugev (potentsiaalide vahe molekuli piires ületab molekulaarjõud), võib molekul ka puruneda, tekitades vabu laenguid ja muutes seega keskkonna elektrit juhtivaks.

Seda nähtust nimetatakse **läbilöögiks**, vastavat potentsiaalide vahet **läbilöögipingeks**. Elektrotehnikas isolaatoritena kasutatavate ainete jaoks on läbilöögipinge kõige olulisem näitaja. Kuiva õhu jaoks normaalrõhul on läbilöögipinge 10^6 volti meetri kohta.

Magnetväli

Nähtus, mis seisneb teatud kivimite võimes külge tõmmata raudesemeid, oli tuntud Vana-Kreekas ja nimetatud Magnesia linna järgi Väike-Aasias, kus sedalaadi kive leiti. Tänapäeva mõistes on tegemist rauamaagi **magnetiidiga** ($\text{FeO} + \text{Fe}_2\text{O}_3$). Hiina meresõitjad (mõnede allikate järgi ka foiniiklased) tundsid magnetiititüki võimet orienteeruda põhja-lõunasuunas ja kasutasid seda laeva kursil hoidmiseks nähtavate orientiiride puudumisel.

Magnetjõude saab matemaatiliselt kirjeldada *magnetlaengutega*, mis analoogselt elektrilaengutega võivad olla positiivsed või negatiivsed. Et erinevalt elektrilaengutest on magnetlaengud alati paarikaupa, nimetatakse neid tavaliselt *magneti poolusteks*; seejuures vastab positiivsele laengule *põhjapoolus* (orienteerub Maa magnetväli mõjul suunaga põhja) negatiivsele *aga lõunapoolus*



Algväli \vec{E} , polarisatsioonivektor \vec{P} , ja elektrinihke vektor \vec{D} ,

Magnetism avaldub kahel viisil:

- magnetiseeritud kehade vahel mõjuvate jõududena;
- magnetiseeritud kehade orienteerumisena põhja-lõunasuunas.

CGS-süsteem kirjeldab magnetjõude analoogiliselt elektrijõududega

Magnetvälja suund valitakse jällegi plussilt miinusele (põhjapooluselt lõunapoolusele) ja nagu elektrostaatikaski, ühenimelised poolused tõukuvad, erinimelised aga tõmbuvad. Pooluste vahel mõjuvaid jõude saab kirjeldada Coulomb'i seaduse tüüpi seosega:

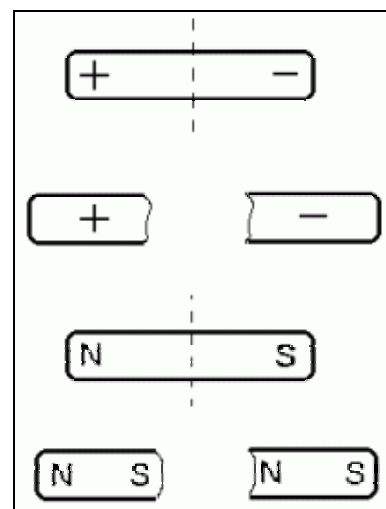
$$\vec{F} = \frac{m_1 m_2 \vec{r}}{r^2 r},$$

kus m_1 ja m_2 tähistavad magnetlaenguid.

Sellise ühikute süsteemi, kus m väljendab magnetlaengut, võttis kasutusele Gauss (magnetiline CGSM-süsteem).

Paraku sellega analoogia piirdubki. Kui elektrilise dipooli poolitamisel saame kaks sõltumatut laengut (positiivse ja negatiivse), siis magnetpulga poolitamisel saame kaks väiksemat, kuid samade omadustega magnetpulka, millel mõlemal on nii põhja- kui ka lõunapoolus.

See tõestab, et magnetlaenguid tegelikult ei eksisteeri ning tegu on sootuks teist tüüpi nähtusega.



Magnetpulga ja elektrilise dipooli erinevus: dipooli poolitamisel saame kaks erinimelist laengut, magnetpulga poolitamisel kaks identset magnetpulka.

Elektrivoolu magnetilised omadused. Magnetväli kui pöörisväli.

1820. a., pärast keemiliste vooluallikate kasutuselevõtmist, tegi H. Ørsted (Oersted) juhusliku avastuse, mis sai tänapäeva magnetismiteooria aluseks. Nimelt märkas ta, et vooluga juhtme lähedusse sattunud magnetnõel pöördus alati juhtmega risti olevasse suunda.

Kui lähtuda oletusest, et jõujoonele asetatud (magnetiline) dipool pöördub otsaga, kus asub positiivne laeng (põhjapoolus) jõujoone suunda, tähendab joonisel kujutatud, et magnetvälja jõujooned vooluga juhtme ümber kujutavad **suletud kõvera**id.

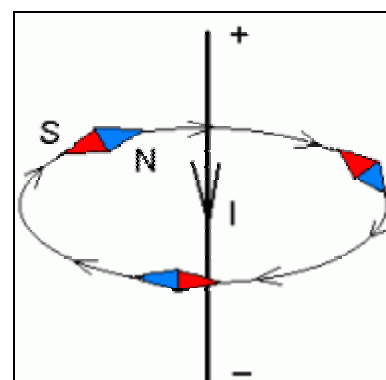
Selline asi on elektrilaengute juures võimatu - elektrivälja jõujooned väljuvad alati positiivsest ja suubuvad negatiivsesse laengusse, st. iga laegut ümbritseb radiaalsete jõujoonte parv. Seevastu kinnine jõujoon tähendab, et allikaks olevat laengut polegi jõujoonel kuhugi panna - kõik joone punktid on samaväärsed (igasse punkti suubub jõujoon ühest ja väljub teisest suunast).

Matemaatilisel väljenduses on esimesel juhul tegemist **allikväljaga** ($\text{div} \vec{A} \neq 0$); teisel juhul aga **pöörisväljaga** ($\text{rot} \vec{A} \neq 0$).

Nagu hiljem näeme, võib elektriväli (allikväli) mõnedel juhtudel käituda pöörisväljana. Selle loogika järgi pole võimatu, et magnetväli (tavaliselt pöörisväli) võiks ka allikväljana esineda.

Neid allikaid - nn. *magnetmonopole* otsivad füüsikud juba mitukümmend aastat, kuid seni tagajärjetult.

Et seletada püsomagnetit (näiteks magnetpulka), tuleb oletada, et selle sees kulgevad ioonid lõunapooluselt põhjapoolusele



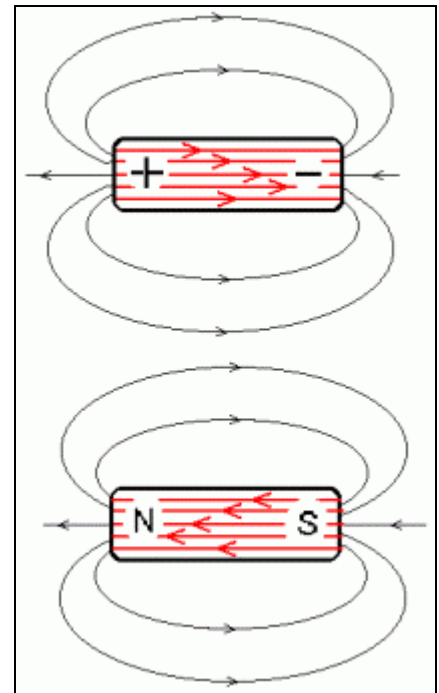
Magnetnõel vooluga juhet ümbritseval kinnisel jõujoonel.

moodustades niiviisi koos pulgast välja jääva osaga kinnise kõvera. Erinevus magnetpulga ja elektrilise dipooli vahel peaks siit näha olema. Samuti põhjus, miks magnetpulka ei saa "poolusteks saagida".

Magnetvälja kirjeldavad suurused. Asjaolu, et magnet esineb alati dipoolina, ei luba väljatugevusena kasutada tavapärast kehale mõjuva jõu ja laengu suhet.

Magnetpulgale (dipoolile) mõjub alati **jõupaar**, mis püüab pöörata dipooli väljasuunaliseks. Järelikult tuleb väljatugevus määrata jõumomendi abil, viimane aga sõltub dipooli orientatsioonist välja suhtes.

SI-süsteemis on magnetvälja iseloomustajaks **magnetilise induktsiooni vektor** \vec{B} , mille täpse defineerimisega saame elektromagnetismi loengus veel tublisti vaeva näha.



Jõujooned magnetpulgast ja elektrilises dipoolis. Pöörake tähelepanu joonte suunale pulga sees.

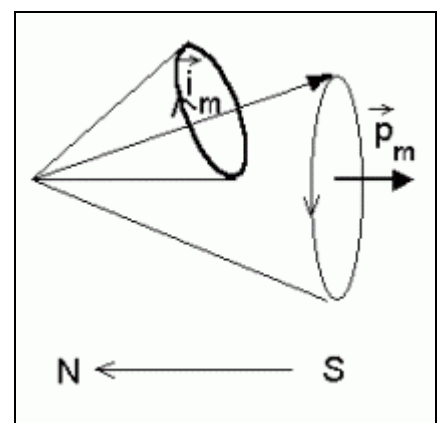
Magneetikud. Et elektriväli sõltus oluliselt keskkonnast, tuleks sedasama oletada ka magnetvälja kohta. Katsetest (kogemusest) teame, et raudsüdamik tugevdab vooluga pooli magnetvälja; üldse on see omadus iseloomulik teatud keemiliste elementide -- nn. ferromagneetikute -- rühmale (ka nende sulamiteleja keemilistele ühenditele). Enamus aineid magnetvälja märgatavalt ei mõjuta.

Klassikalise teooria järgi sisaldavad ained molekulaarseid elektrivoolusid. Selle oletuse tegi Ampere 1820. a.; 100 aastat hiljem leidis see ka teoreetilise kinnituse (tiirlev elektron Rutherford'i aatomimudel). Seega võib molekuli vaadelda *magnetilise dipoolina*, sarnaselt elektrilisele dipoolile dielektrikute teoorias. Polariseerimise vektori asemel defineerime nüüd magneetuvusvektori

$$\vec{j} = \frac{\sum \vec{p}_m}{\Delta V},$$

kus \vec{p}_m on *molekulaarne magnetmoment*.

Edasi tuleb oluline erinevus. Kui dielektrike korral viib polarisatsioon elektrivälja nõrgenemisele laengute vahel (dipoolid orienteeruvad elektriväljale *vastassuunas*), siis magneetikus tähendab magnetdipoolide orienteerumine välja järgi **välja koondumist magneetikusse**.



Pretseesseeriv ringvool ja selle magnetmoment.

Ainete magnetiliste omaduste kirjeldamisel kasutatakse sama süsteemi, mis dielektrike korral.

Seetõttu kirjutatakse

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}',$$

kus $\vec{B}_0 = \mu_0 \vec{H}$ on "algväli", $\vec{B}' = \mu \vec{J}$ aga "indutseeritud väli".
Nüüd saame "puhast magnetvälja" iseloomustava suuruse

$$\vec{H} = \frac{1}{\mu_0} \vec{B} - \vec{J},$$

mida nimetatakse **magnetvälja tugevuseks**. Edasi toimime nagu elektriväljaga: loeme magneetuvuse võrdeliseks magnetvälja tugevusega ($\vec{J} = \chi \vec{H}$, χ on **magnetiline vastuvõtlikkus**) ja asendades selle magnetvälja tugevuse valemis, saame

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \chi \vec{H} \quad \text{ehk} \quad \vec{H}(1 + \chi) = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

Tähistades $1 + \chi = \mu$ (suhteline magnetiline läbitavus), võimegi kirjutada ka magnetvälja jaoks meil juba tuttava valemi

$$\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H} \quad (\text{nagu } \vec{D} = \epsilon \epsilon_0 \vec{E})$$

Suhtelise läbitavuse μ järgi jagunevad ained:

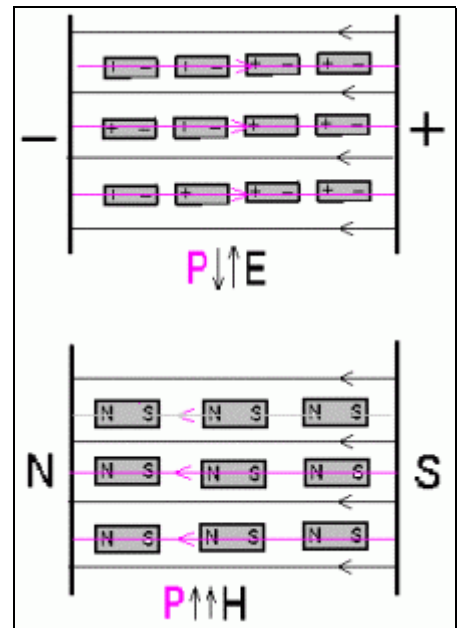
- diamagnetikud, kus $\mu < 1$, $\chi < 0$, st. indukseeritud väli on algväljale vastupidise suunaga,
- paramagnetikud, $\mu > 1$, $\chi > 0$, väljad on samasuunalised,
- ferromagnetikud, $\mu \gg 1$.

Magnetikute klassikaline teooria (elektronteooria) on keeruline, vaieldav ja ebatäpne.

Juhtideeks on asjaolu, et tiirlev elektron omab nii mehaanilist (impulssmoment) kui magnetilist momenti. Et elektroni liikumissuund on vastupidine tema poolt tekitava voolu suunale, on need momendid vastassuunalised. Seetõttu tekitab välise jõuvälja mõju elektronide orbiitide pretsessiooni, millele vastav täiendav magnetmoment on välise välja suunale vastupidine. See nõrgendab summaarset välja, tekitades diamagnetilise efekti, mis on omane kõigile ainetele.

Para- ja ferromagnetismi elektronteooria ei seleta. Lähtutakse oletusest, et molekulil võib lisaks elektroonsele olla veel *magnetiline omamoment*, mis kutsub esile diamagnetikule vastassuunalise magneetumuse.

"Omamomendi" suurus sõltub molekuli ehitusest ja võib olla diamagnetilisest suurem või väiksem. Esimesel juhul "iääh neale"



Magnetiku ja dielektriku polarisatsiooni erinevus:

kuna väli magnetpulga sees on vastassuunaline elektrilise dipooli seesmise väljaga, orienteeruvad "seesmised dipoolid" piki magnetvälja suunda. See tähendab välja tugevnemist -- väli koondub magnetpulga sisse.

omamoment ja aine käitub kui paramagneetik. Kui vastupidi (elektroonne moment suurem molekulaarsest), on tegu diamagneetikuga.

Ferromagnetism, kuigi rakenduslikult tähtis nähtus, on seletatav vaid empiirilisel tasemel.

Et ta on omane vaid kristalsetele ainetele suhteliselt madalal temperatuuril, oletatakse eelnevalt magneetunud kristallikeste, nn. *doomenite*, olemasolu. Välises väljas magneetuvad doomenid ümber, kutsudes esile tugeva indutseeritud välja. See väli on püsiv, st. ei kao välise välja puudumisel.

Temperatuuri tõustes teatud kriitilise väärtuseni (nn. Curie' punkt) aine ferromagneetilised omadused kaovad -- aine hakkab käituma kui paramagneetik. Rauaga juhtub see temperatuuril 768°C , niklil juba 365°C juures.

Curie' punktist kõrgemal temperatuuril muutub ferromagneetik paramagneetikuks.