

Elekter ja magnetism

- Elektrilaeng, elektriväli ja elektrivälja tugevus
- Elektriline potentsiaalne energia, potentsiaal ja pinge
- Elektrivälja töö ja võimsus
- Magnetväli
- Elektromagnetiline induktsioon
- Elektromagnetlained, valgus ja praktiline optika

Elektrostaatika – käsitleb paigalasuvate laengute vastastikmõju ja asetumist

Elektrodünaamika – käsitleb laengute liikumist ja sellega kaasnevaid nähtusi

Elektrilaeng

mõnede elementaarosakeste omadus, mis määrab nende elektromagnetilise vastasmõju:

Tähistus: Q või q

osakeste tasemel:

- elektron: $-e$
 - prooton: $+e$
 - neutron: 0
- (e - elementaarlaeng)

makroskoopilises kehas:

$$Q = N \cdot e$$

(alati täisarv elementaarlaenguid)

$$N = N_+ - N_-$$

Laengu jäävuse seadus: Katsed näitavad, et suletud süsteemis kogulaeng (st + ja – laengute summa) ei muutu.

Elektrilaengu ühik

Ühik SI-süsteemis on **kulon (C)**, mis on defineeritud voolutugevuse ühiku (amper, SI põhiühik) kaudu:

Kulon on laeng läbi juhi ristlõike 1 s jooksul, kui voolutugevus juhis on 1 A.

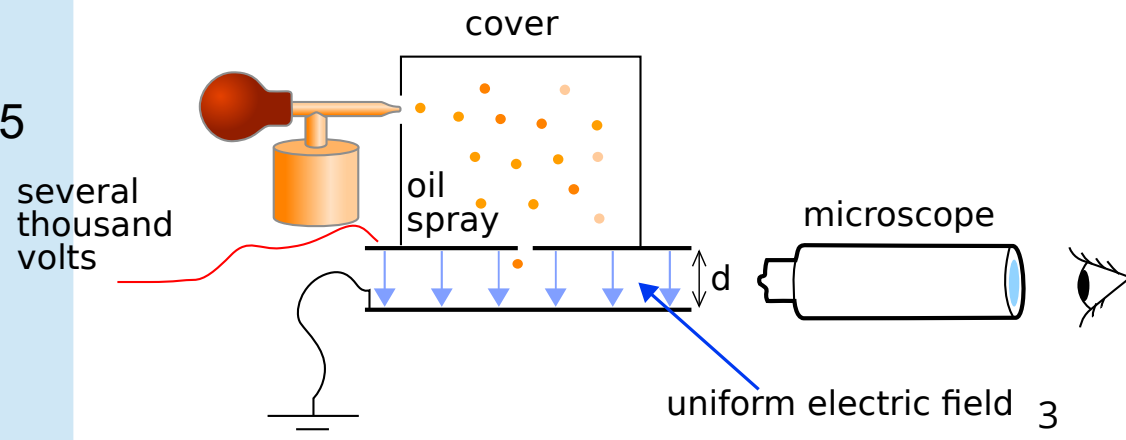
Elementaarlaeng $e = 1.602 \cdot 10^{-19} \text{ C}$

S.t. laeng -1 kulon vastab $6.2 \cdot 10^{18}$ elektronile. (Mitu mooli see on?)

Elementaarlaengu määramine:

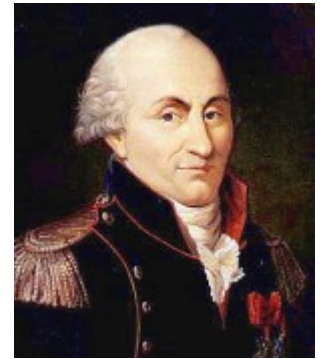
1834 Faraday elektrolüüsiseadused + 1865 Avogadro arvu esialgne määramine võimaldasid hinnata;

1909 – Millikani õlitilgakatse – täpsem väärtus

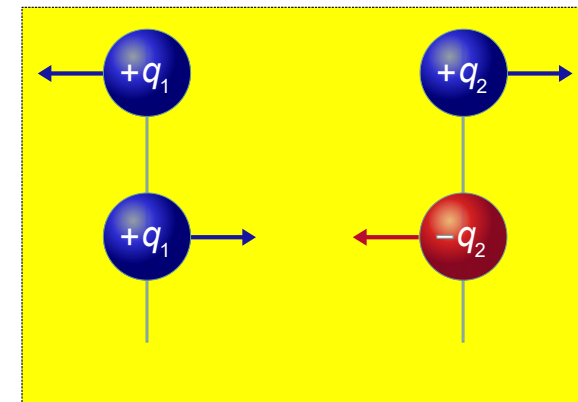
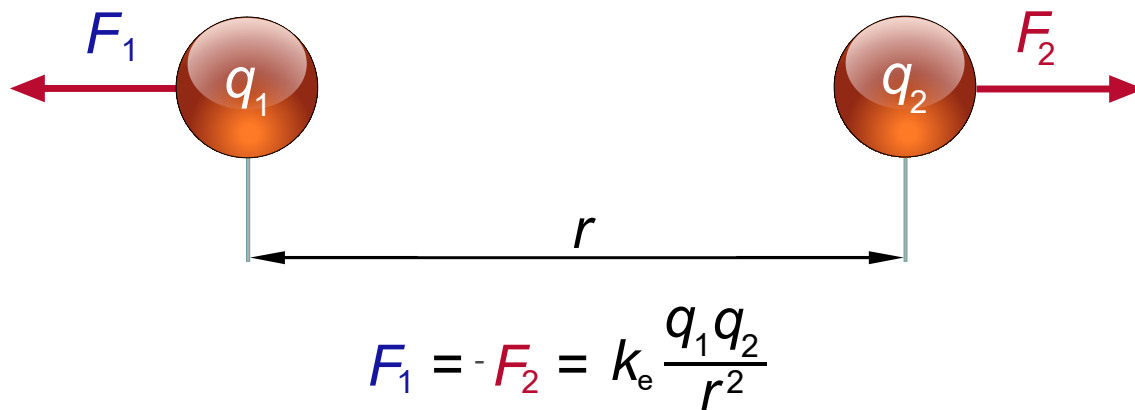


Coulomb'i seadus

Publitseeritud 1785, kuigi juba paar aastat varem jõudis selleni Henry Cavendish



Charles-Augustin de Coulomb
1736-1806



- samamärgilised laengud tõukuvad, erimärgilised tõmbuvad
- jõud on võrdeline mõlema laenguga ja pöördvõrdeline kauguse ruuduga

Coulomb'i konstant:

$$k_{e0} = 9 \cdot 10^9 \text{ N} \cdot \frac{\text{m}^2}{\text{C}^2}$$

Vaakumis $k_e = k_{e0}$

Coulomb'i vs. gravitatsiooniseadus

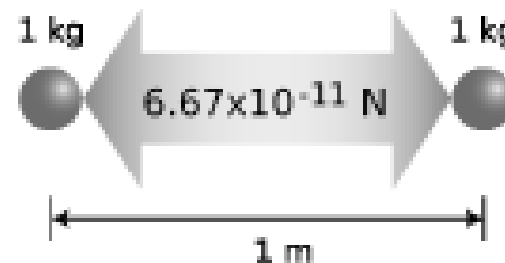
$$F = k_e \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

$$F = -\gamma \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

- märk (gravitatsiooni korral samamärgilised massid tõmbuvad)
- suurusjärk: võrdleme jõudusid vaakumis SI ühikute korral (1 C / 1 kg kaugusel 1 m):

$$|F| = k_{e0} \cdot 1 \frac{C^2}{m^2} = 9 \cdot 10^9 N$$

$$|F| = \gamma \cdot 1 \frac{kg^2}{m^2} = 6.673 \cdot 10^{-11} N$$



S.t. elektrilised jõud on üldjuhul gravitatsioonilistest tunduvalt tugevamad.

Sisulisem oleks võrrelda nt. prootoni ja elektroni vahelist gravitatsiooni- ja elektrilist tõmbejõudu, kasutades nende laenguid ja masse. Leidke vastav info ja proovige, milleni see viib.

Keskkonna dielektriline läbitavus

Keskkonnas laengutevaheline jõud nõrgeneb, mistõttu tuleb kasutusele võtta dielektrilise läbitavuse mõiste.

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

Kirjutame k_e kujul:

$$k_e = \frac{1}{4\pi\varepsilon} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0\varepsilon_s}$$

$\varepsilon = \varepsilon_0\varepsilon_s$

kus ε nimetatakse **keskkonna dielektriliseks läbitavuseks**.
(Tegur $1/4\pi$ on vajalik SI süsteemi ühikute defineerimise eripärade tõttu)

$\varepsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{m}^2\text{N})$ – vaakumi dielektriline läbitavus

ε_s – keskkonna suhteline dielektriline läbitavus

ε_s on dimensioonitu suurus, mis varieerub 1 (vaakum)
ja 81 (destilleeritud vesi) vahel

Valkudes 2-3

Lipiides 2

Võiksime ka kirjutada:

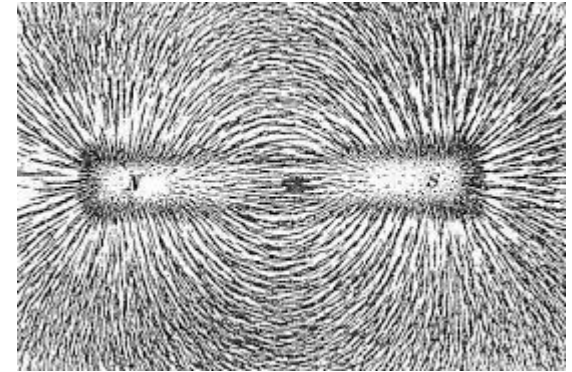
$$F = \frac{k_{e0}}{\varepsilon_s} \frac{q_1 q_2}{r^2}$$

kus k_{e0} on Coulomb'i konstant vaakumis.
Ehk, jõud keskkonnas väheneb ε_s korda.

Füüsikalised väljad

Kuidas jõuab ühe keha elektriline v.
gravitatsiooniline mõju teiseni?

Michael Faraday (1849): neid ümbritsevad väljad.



rauapulbri abil visualiseeritud
magnetvälja jõujooned

	matemaatiliselt	füüsikas
skalaarväli	$E_p = E_p(x, y, z)$ ehk igale ruumipunktile vastab arvväärtus	potentsiaalse energiaga seotud väljad
vektorväli	$\vec{F} = \vec{F}(x, y, z)$ ehk igale ruumipunktile vastab vektor (arvväärtus + suund)	jõuga seotud väljad; seotud vastava skalaarväljaga: $\vec{F} = -grad E_p$

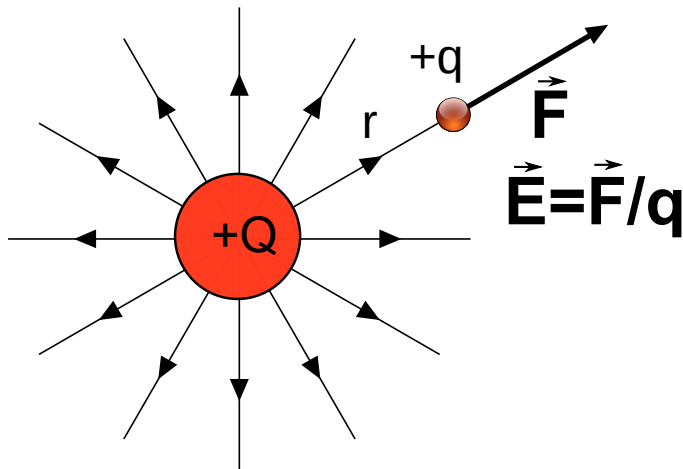
gradient: $grad E_p = (\partial E_p / \partial x, \partial E_p / \partial y, \partial E_p / \partial z)$

vektor, mis osutab E_p kõige kiirema muutumise suunas ja mille pikkus on võrdeline
vastava muutumise (ruumilise) kiirusega

Elektriväli

$$F = k_e \frac{qQ}{r^2}$$

- Võime kujutada, et iga laeng tekitab enda ümber elektrivälja, mis avaldub selle mingisse punkti asetatud proovilaengule mõjuva jõu kaudu.
- Seega, **elektriväli on vektorväli**.
- Elektrivälja **tugevuseks** $\vec{E}$ nimetatakse vastavasse punkti asetatud ühikulisele positiivsele proovilaengule mõjuvat jõudu:



Punktlaengu korral:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q} = k_e \frac{Q}{r^2} \vec{u}_r$$

kus $\vec{u}_r$ on $\vec{F}$ suunaline ühikvektor

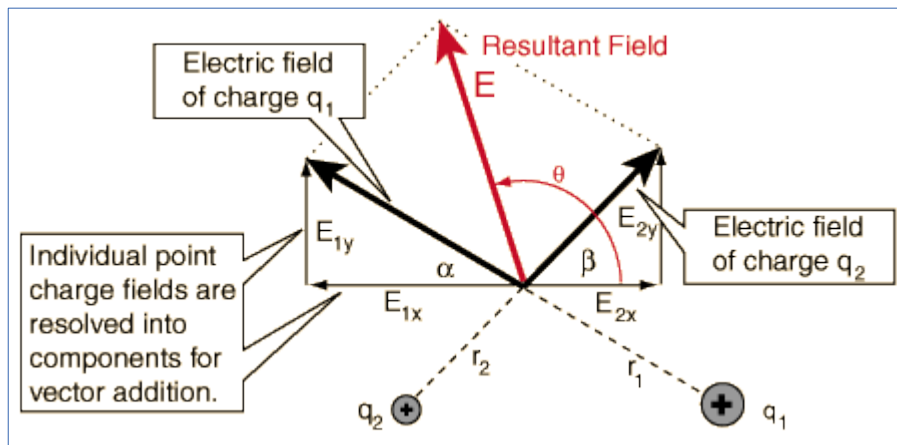
NB: elektriväli ei sõltu proovilaengust.

Elektrivälja ühikuks SI süsteemis on $1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$ (volt meetri kohta)

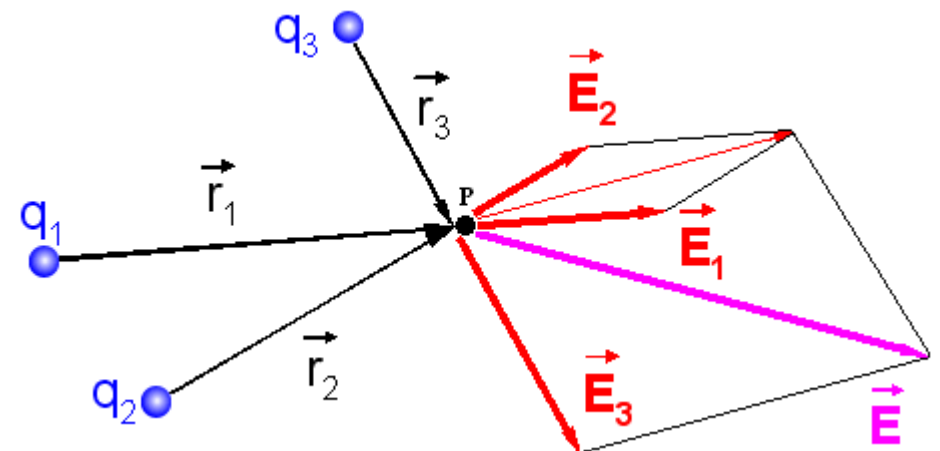
Elektriväljade liitmine

Aga kui meil on mitu punktlaengut?

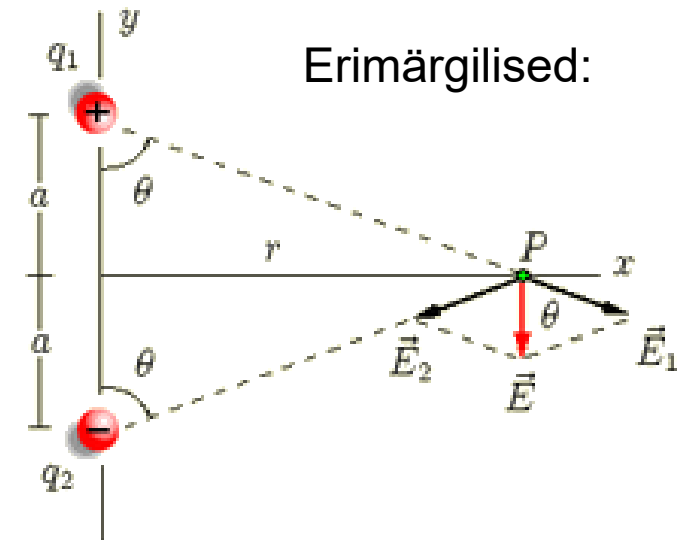
Eri laengute poolt tekitatud väljad liituvad vektoriaalselt:



3 laengut:



Aga kui meil on ühtlaselt laetud pind?

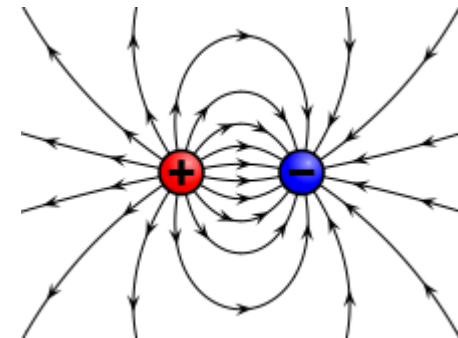
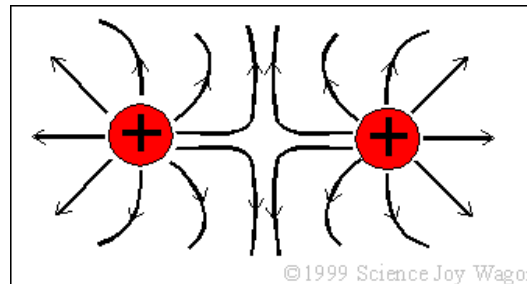
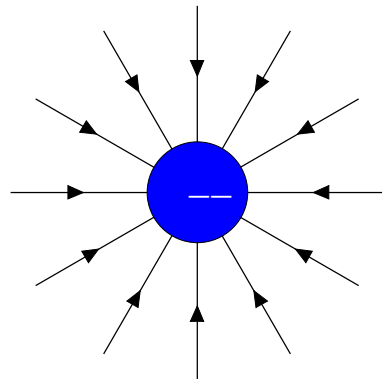


Elektrivälja jõujooned

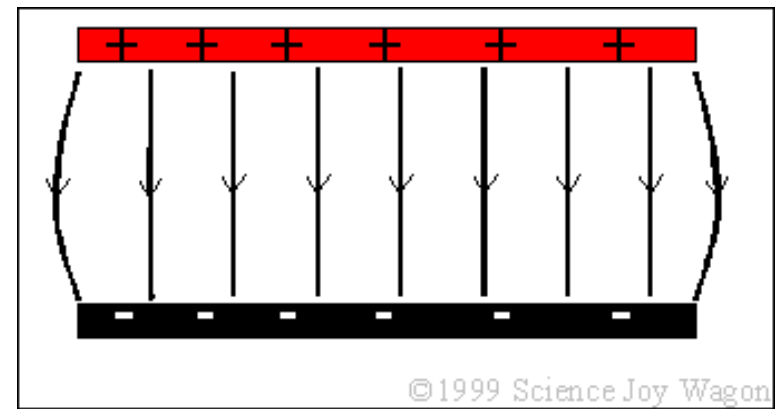
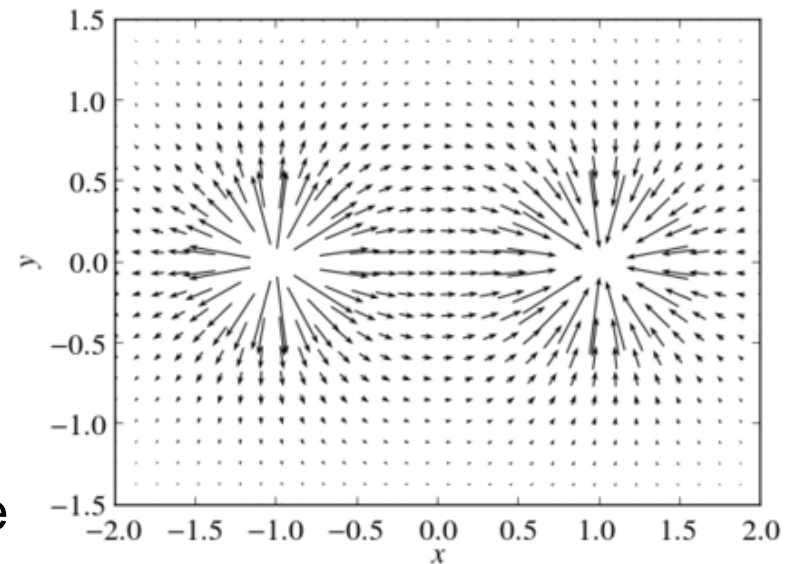
Kuidas elektrivälja visualiseerida?

Võime proovida joonistada välja võimalikult palju vektoreid, aga pilt läheb kirjuks:

Teine võimalus on jõujooned, mille puutuja langeb igas punktis kokku elektrivälja tugevuse vektori suunaga:

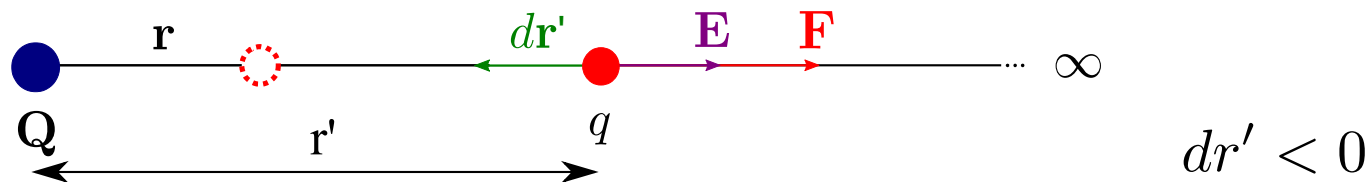


- jõujooned ei ristuvad
- nad algavad ja lõpevad laengutel
- nende tihedus on võrdeline välja tugevusega
- välja suuna annab puutuja



Elektrivälja potentsiaalne energia

- Laengu potentsiaalseks energiaks mingis elektrivälja punktis nimetatakse tööd, mida tuleb teha laengu toomiseks lõpmatuses sellesse punkti.
- Saab näidata, et staatilise laengutesüsteemi korral see töö ei sõltu laengu liikumistrajektooriga.
- Vaatleme laengu q toomist teise laengu Q väljas lõpmatuses kaugusele r :



Töö laengu nihutamiseks väikese teepikkuse dr' võrra: $dA = -F \cdot dr' = -k_e \frac{qQ}{r'^2} dr'$

Kogu töö saamiseks tuleb need elementaartööd liita ehk integreerida:

$$E_{pot}(r) = A(r) = -k_e qQ \int_{\infty}^r \frac{dr'}{r'^2} = k_e \frac{qQ}{r'} \bigg|_{\infty}^r = \boxed{k_e \frac{qQ}{r}}$$

NB! Tõmbuvate laengute
potentsiaalne energia on negatiivne,
tõukuvatel positiivne.

Elektrivälja potentsiaal ja pinge

- Jagades potentsiaalse energia läbi proovilaenguga q , saame suuruse, mida nimetatakse vastava ruumipunkti **potentsiaaliks**.
- Defineeritud kui ühiklaengu lõpmatusest vastavasse punkti toomiseks vajalik töö.
- vrd. $\vec{F} \rightarrow \vec{E}$
- Kuna potentsiaal olemasoleva elektrivälja korral sõltub ainult ruumipunktist ja omab skalaarseid väärtusi, on tegu skalaarväljaga.

$$\varphi = \frac{E_{pot}}{q} \quad , \text{ ühe punktlaengu } Q \text{ korral} \quad \varphi = k_e \frac{Q}{r}$$

Tähistus:
 φ, V, U

Potentsiaali ühik ja pinge

- Potentsiaali ühikuks SI süsteemis on **volt (V)**. $1V = 1J / 1C$
- Kahe punkti potentsiaalide vahet nimetatakse **pingeks**.
- (Väliste jõudude) töö laengu q nihutamiseks ühest punktist teise on võrdeline punktide vahelise pingega:

Tähistus:
 φ, V, U

$$A = E_{pot2} - E_{pot1} = q(\varphi_2 - \varphi_1) = qU_{21}$$

Kui punkti 2 pinge punkti 1 suhtes on 1V, tuleb 1C ümberpaigutamiseks 1→2 teha tööd 1J.

Elektronvolt (eV):

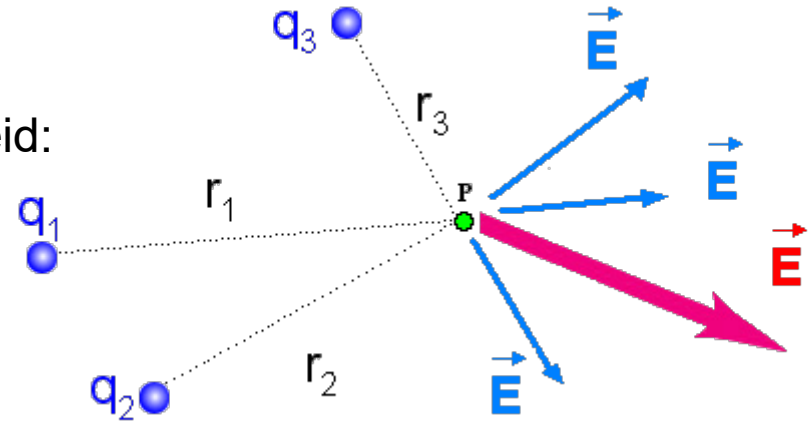
energia, mille elektron omandab, läbides potentsiaalide vahe 1V:

$$1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

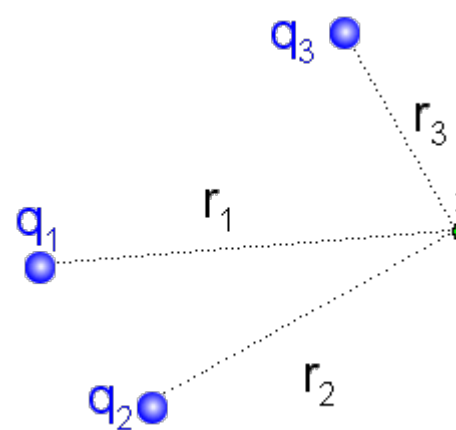
(sama suurusjärg nähtava valguse footoni energiaga)

Potentsiaalide liitmine

Elektrivälja kui vektorvälja puhul tuli liita vektoreid:
(superpositsiooniprintsiip)



Potentsiaaliväljas saame liita
skalaare (ehk lihtsalt arve):

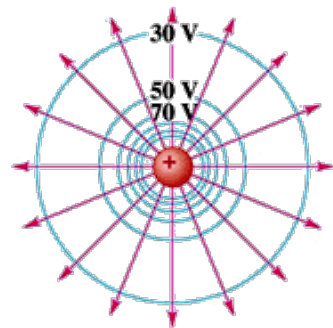

$$\begin{aligned}\varphi_P &= k_e \left(\frac{q_1}{r_1} + \frac{q_2}{r_2} + \frac{q_3}{r_3} \right) \\ &= k_e \sum_i \frac{q_i}{r_i}\end{aligned}$$

Ekvipotentsiaalpinnad

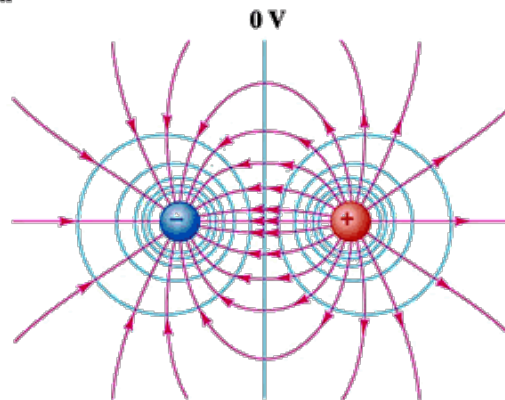
Potentsiaalivälja visualiseerimiseks saab kasutada ekvi- (sama-)potentsiaalpindu, kus sama potentsiaaliga punktid on ühendatud tasanditega (2D pildil joontega).

Ekvipotentsiaalpinnad on igas punktis risti vastavate elektrivälja jõujoontega:

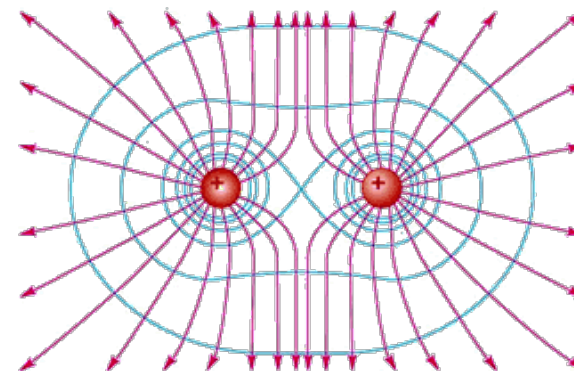
→ Electric field lines
— Cross sections of equipotential surfaces at 20 V intervals



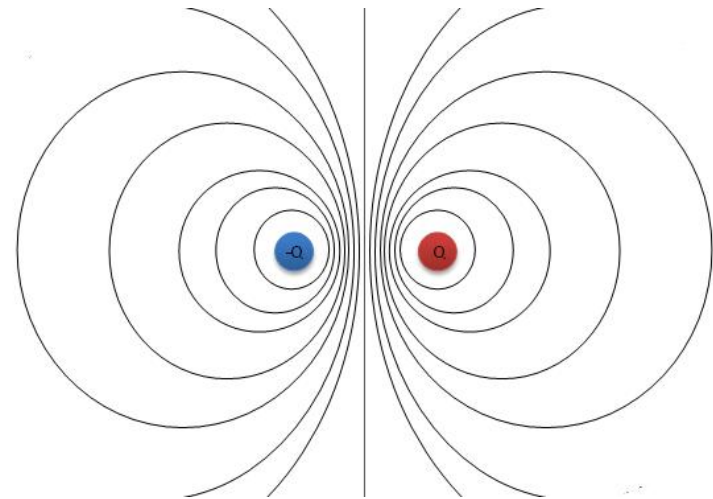
(a) A single positive charge



(b) An electric dipole



(c) Two equal positive charges



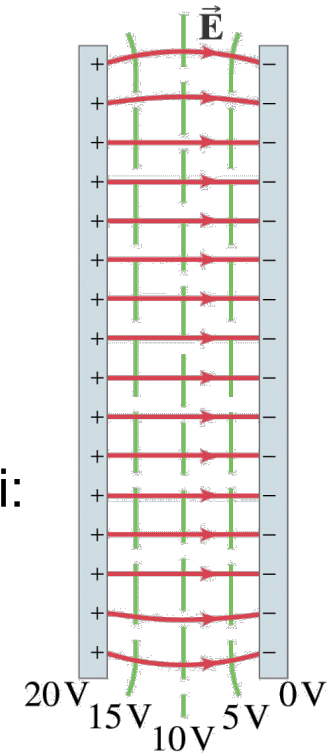
Elektrivälja vektor osutab alati potentsiaali kiireima muutumise suunas:

$$\vec{E} = -\text{grad } \varphi$$

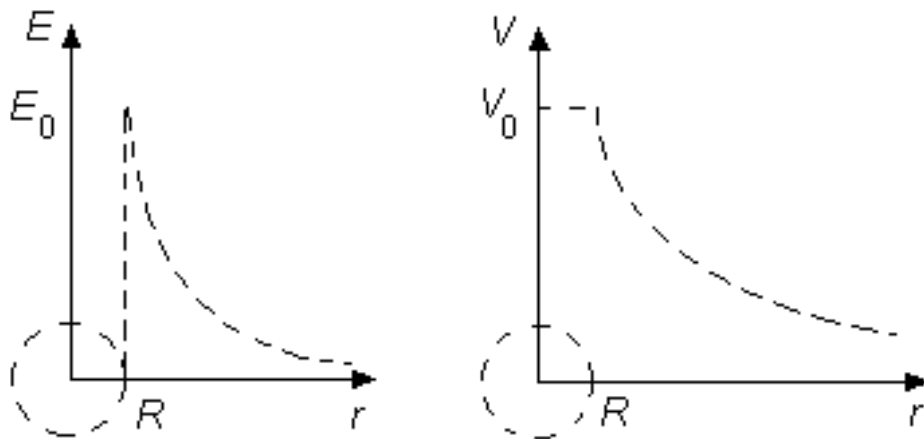
Pinnale jaotunud laengu väli

Laetud elektrijuhis saavad laengud vabalt liikuda, seetõttu tõrjuvad ühemärgilised laengud üksteist juhi pinnale ja pind on ühtlaselt laetud

Kaks paralleelset plaati:



Laetud kera korral kera sees väli puudub ($E = 0$), aga väljaspool on samasugune kui kera keskmises asuva punktlaengu puhul:



Võrdlus gravitatsiooniga

γ – gr. konstant ($6.67 \cdot 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{kg}^{-2}$)
 M – Maa mass ($5.97 \cdot 10^{24} \text{ kg}$)
 R – Maa raadius ($6.37 \cdot 10^6 \text{ m}$)

$$F = \gamma \frac{mM}{r^2} = mg, \text{ kui defineerime raskuskiirenduse}$$

$$g = \gamma \frac{M}{r^2}$$

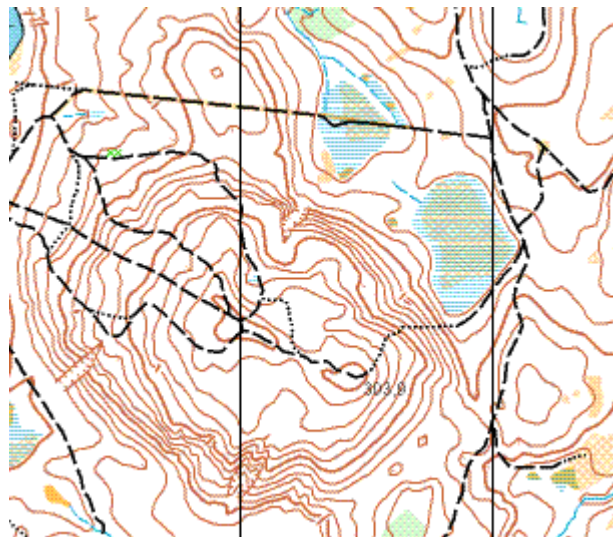
$$g = 9.82 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$$

Maalähedasel piirjuhul, kui $\Delta r \ll r$, on g praktiliselt sõltumatu kõrgusest maapinnast h ($=\Delta r$)

$$E_{pot} = mgh$$

Potentsiaali mõistet siin küll spetsiaalselt ei defineerita, aga see oleks gh , s.t. võib ka lihtsalt kõrgust tarvitada.

Samakõrgusjooned =
ekvipotentsiaalpinnad

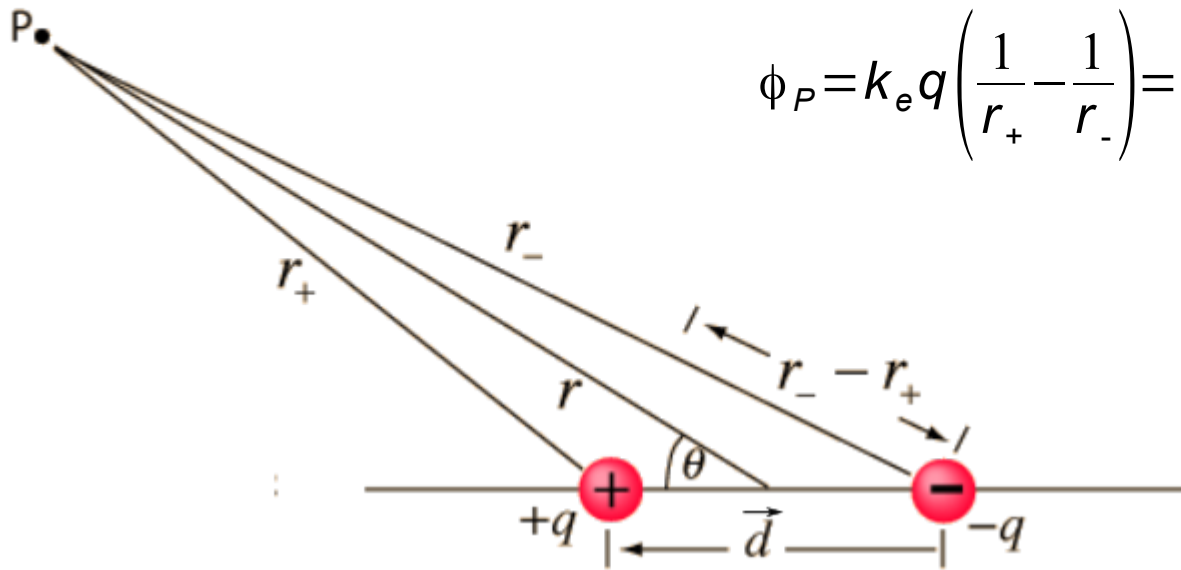


Elektriline dipool

Dipool: kaks teineteise lähedal asetsevat vastasmärgilist laengut.

Dipooli tekitatud potentsiaal punktis P:

$$\phi_P = k_e q \left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-} \right) = k_e q \left(\frac{r_- - r_+}{r_+ r_-} \right)$$



Dipoolmoment:

$$\vec{p} = q \vec{d}$$

Siis dipoolist kaugel ($\gg d$):

$$\phi_P = k_e \frac{\vec{p} \cdot \vec{u}_r}{r^2}$$

$\vec{u}_r$ - r suunaline ühikvektor
NB! nimetajas r^2 , mitte r nagu punktlaengul!

- Dipoolmomendi SI ühik on C·m
- Traditsiooniline ühik on Debye (D):

$$4.8 \text{ D} = 1 \text{e} \cdot 1 \text{\AA}$$

$$(1 \text{\AA} \text{ (ongström)}) = 0.1 \text{ nm} = 10^{-10} \text{ m}$$

$$1 \text{ D} = 3.336 \cdot 10^{-30} \text{ C} \cdot \text{m}$$

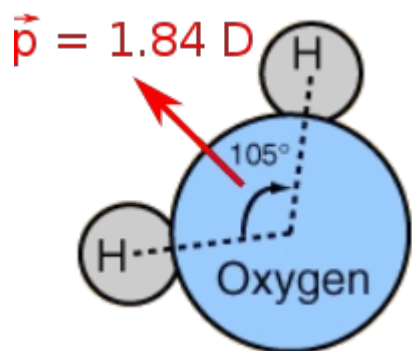
Molekulid kui dipoolid

Dipoolmomenti võime vaadelda ka mitmelaengulises süsteemis:

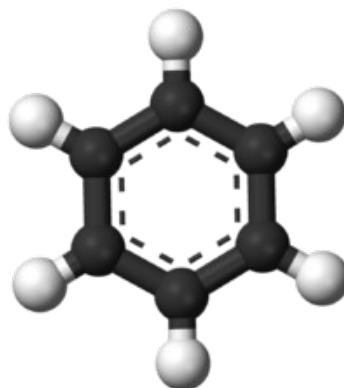
$$\vec{p} = \sum_i q_i \vec{r}_i$$

kus $\vec{r}_i$ on i -nda laengu kohavektor mingist punktist, mille valik summaarselt neutraalse laengusüsteemi puhul (nt. molekul) ei oma tähtsust (võib võtta nt. ühe laengu asukoha).

Nii selgub, et mõnedel molekulidel on olemas staatiline dipoolmoment (nimetame neid polaarseks), teistel (mittepolaarseks) see praktiliselt puudub.



Vesi: polaarne



Benseen: mittepolaarne
(NB: sümmeetria)

Makroskoopiliselt on aine tavaliselt siiski polariseerimata (dipoolmomendid jaotuvad kaootiliselt igas suunas).

Aga välises elektriväljas omandavad ka mittepolaarsed molekulid dipoolmomendi.

Dipoolid elektriväljas

Kuna elektriväljas dipooli positiivsele ja negatiivsele laengule mõjuvad võrdsed ja vastassuunalised jõud ($F = qE$), tekib dipooli pöörav moment $\vec{M} = \vec{p} \times \vec{E}$

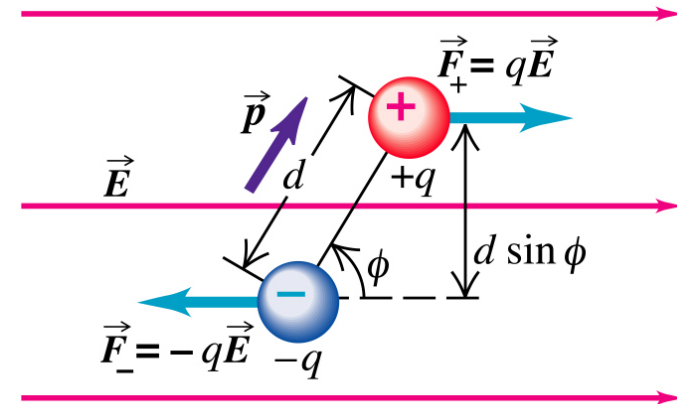
Dielektrikus (polaarses või mitte) tekib välise välja toimetel nn. indutseeritud polarisatsioon, mille tulemuseks on välisega võrdeline ja vastassuunaline elektriväli $E_{\text{ind}} = -\kappa E$

$$E_{\text{aines}} = E_{\text{väline}} - \kappa E_{\text{aines}}$$

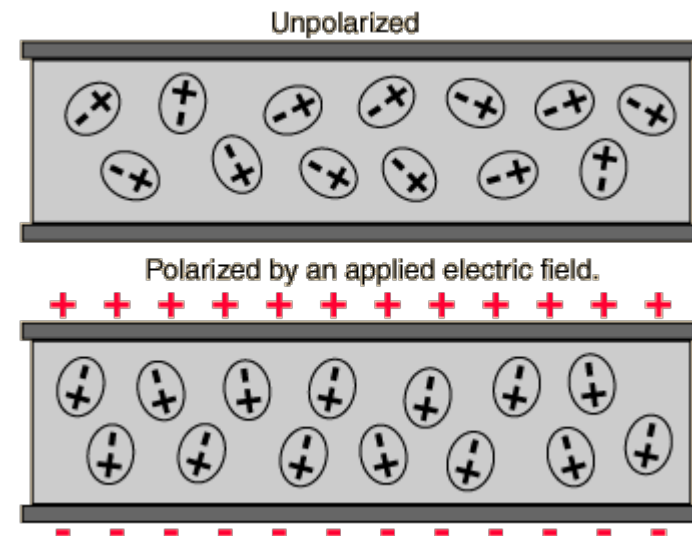
$$E_{\text{aines}} = \frac{E_{\text{väline}}}{1 + \kappa}$$

Näeme, et κ (dielektriline vastuvõtlikkus) on seotud meile tuntud keskkonna suhtelise dielektriline läbitavusega:

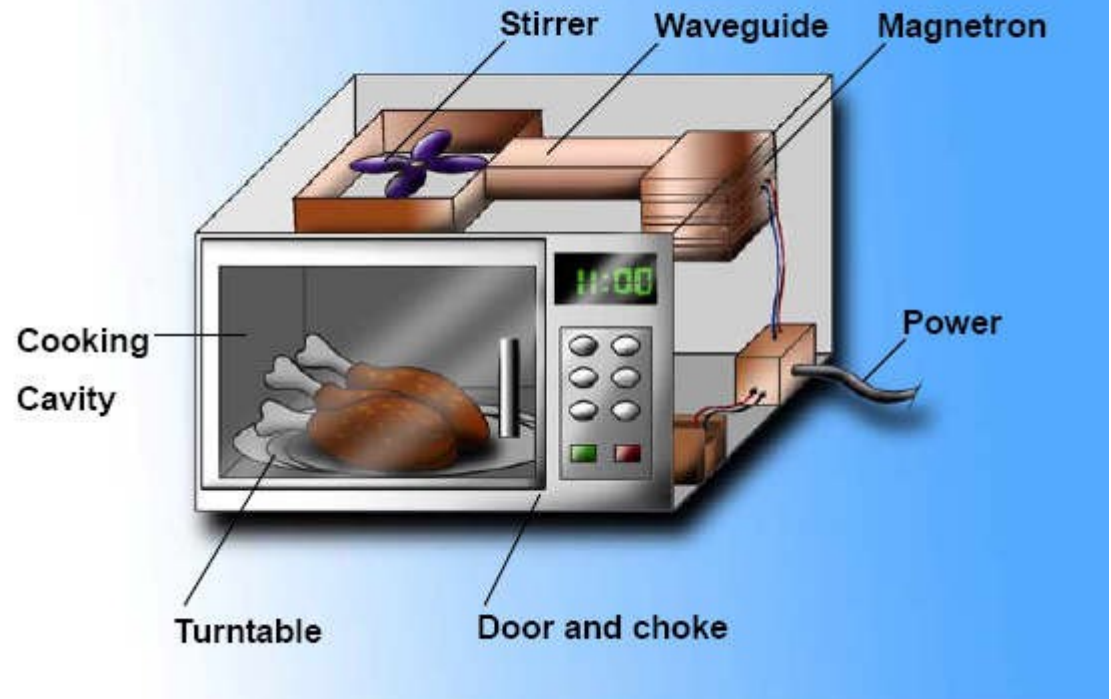
$$\varepsilon_s = 1 + \kappa$$



Polaarsed molekulid:



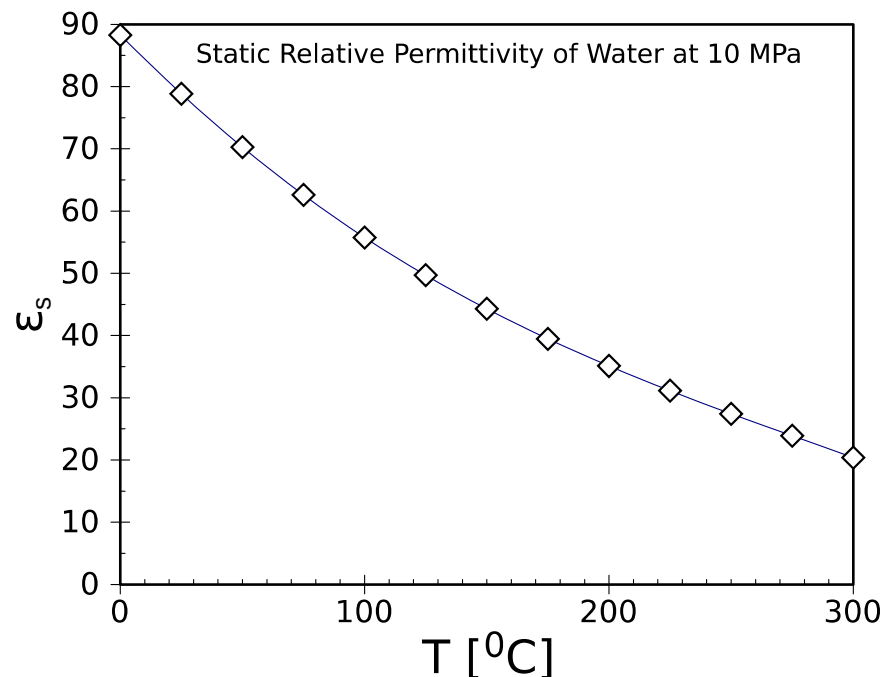
Mikrolaineahi



- Tekitatakse tugev elektromagnetkiirgus raadiolainealas, mis neeldub soojendatavates produktides.
- Neeldumise mehhanismiks on resonants molekulidipoolidega, mis püüavad järgida kiirguse elektrivälja vektorit, mistõttu nende amplituud (vst aine siseenergia) kasvab.
- Seega polaarsemad keskkonnad (nt. vesi) soojenevad rohkem.
- NB! „mikro“ ei tähenda μm lainepikkust, kasutatav lainepikkus on tavaliselt 12.2 cm (2.45 GHz)

Veel dielektrilisest läbitavusest

- Nagu elektriväli, nii ka Coulomb'i jõud, elektrivälja potentsiaalne energia ja potentsiaal vähenevad keskkonnas ε_s korda ($k_e = k_{e0}/\varepsilon_s$)
- Laias laastus on ε_s suurem polaarsemas keskkonnas (ent see sõltub ka muudest teguritest)
- Polaarseste molekulide korral segab indutseeritud polarisatsiooni teket oluliselt soojusliikumine, mistõttu ε_s temperatuuri kasvades väheneb.
- Suhtelisel dielektrilisel läbitavusel on seos ka aine optiliste omadustega (murdumisnäitajaga)

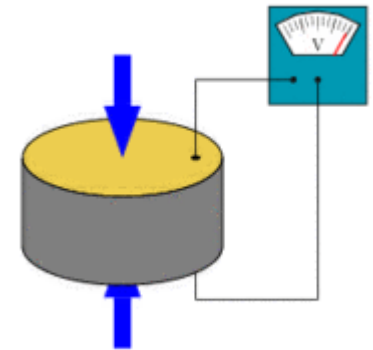
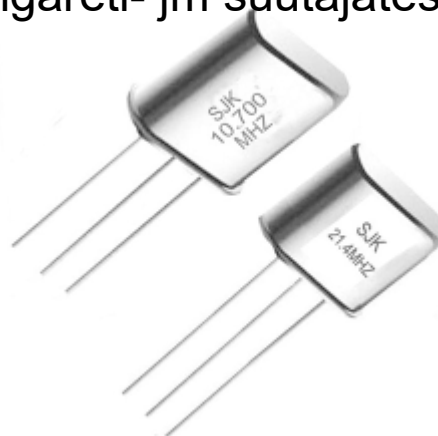
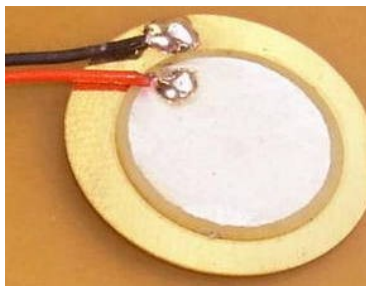


Piesoelektriline efekt

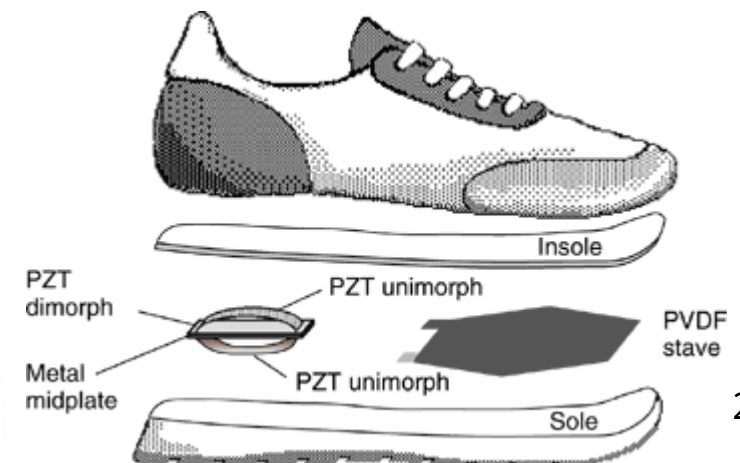
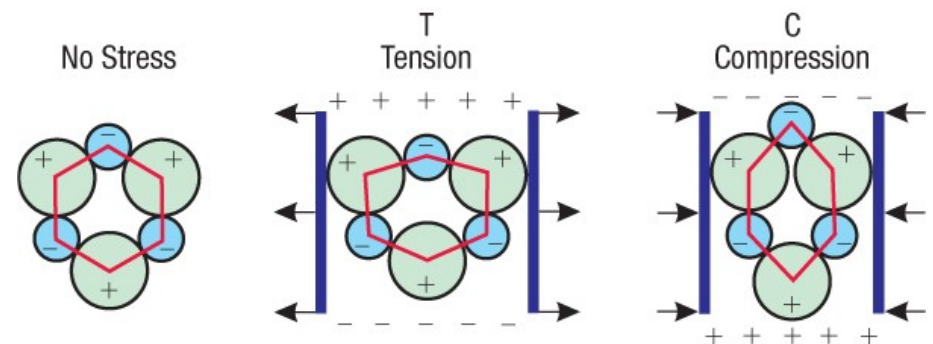
- Teatud kristallides (nt. kvarts, baariumtitanaat) tekib elektriväli välise mehhaanilise rõhu mõjul.
- Töötab ka vastupidi: elektrivälja rakendamisel muutuvad kristalli mõõtmed

Rakendused:

- hääle/ultraheli tekitamine
- täpse sageduse genereerimine
- täppisnihutamine
- kaalud/jõuandurid
- elektrienergia tootmine (jalatsites, põrandas)
- sädeme tekitamine gaasi-, sigareti- jm süütajates
- ...



Piezoelectric Effect in Quartz



Elektriväli juhtides

Juht = vabad laengukandjad (võivad ümber paikneda kuitahes väikese jõu mõjul)

- Väljatugevus juhi sisemuses peab võrduma nulliga
- mis omakorda tähendab, et potentsiaal on konstantne
- ja juhile antud laeng jaotub pinnale (üksteisest võimalikult kaugele)

$$\vec{E} = -grad \varphi$$



Juhtide elektrimahtuvus

- Seega on juhis võimalik salvestada laenguid.
- Kuna elektriväli juhi pinna lähedal sõltub juhis olevast laengust võrdeliselt, siis sõltub sellest võrdeliselt ka juhi potentsiaal ehk töö, mida on vaja teha (täiendada) ühiklaengu toomiseks lõpmatuselt juhi pinnale.
- Vastavat võrdetegurit (laengu ja potentsiaali suhet) nimetatakse juhi elektrimahtuvuseks

$$C = \frac{q}{\varphi}$$

- Ühikuks on **farad** (F). 1 F = 1C / 1V ehk see on juhi mahtuvus, millele laengu 1C juurdeandmine tõstab tema potentsiaali 1V võrra.



Kerakujulise juhi korral: $C = 4\pi\epsilon R$

$\epsilon = \epsilon_0$

sõltub ka kera
ümbritsevast
keskkonnast

Maa(mõõdulise juhi) mahtuvuseks on kõigest ~700 μF

S.t. farad on väga suur mahtuvus...

Kondensaator

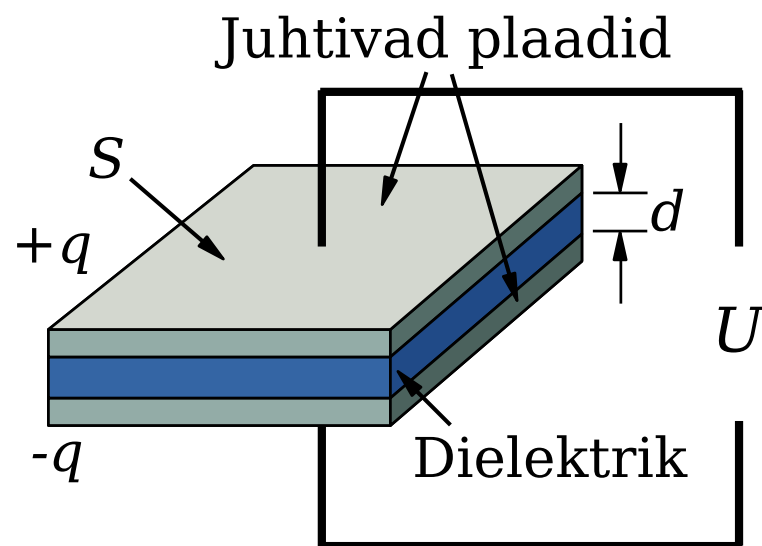
...ja teisest küljest, eraldiseisvad (ird-) juhid ongi üsna väikese mahtuvusega.

Suurema mahtuvuse saavutamiseks võib kasutada kaht lähestikku asetsevat juhtivast materjalist pinda, mille vahel on õhuke dielektriku kiht.

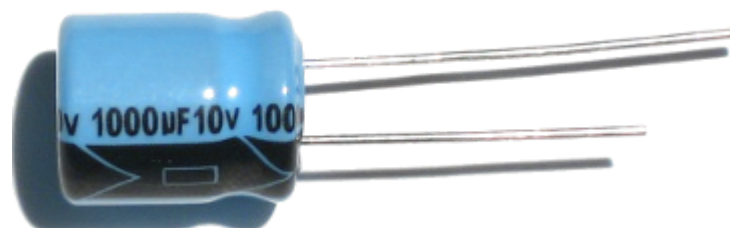
Sellist seadet nimetatakse **kondensaatoriks**.
(ingl.k. capacitor)

Laadimisel omandavad pinnad võrdsed vastasmärgilised laengud.

Potentsiaali rollis on nüüd pindade potentsiaalide vahe ehk nendevaheline pinge (U).



$$C = \frac{q}{U}$$



Plaatkondensaatori mahtuvus:

$$C = \frac{\epsilon_0 \epsilon_s S}{d}$$

Kondensaatoris salvestatud energia

Ehk töö, mis on vajalik mingi laengu Q viimiseks kondensaatori ühelt pinnalt teisele.

Olgu mingil hetkel üle viidud laeng q ja pinge kondensaatoril vastavalt $U = q/C$.

Siis väikese laengu dq ülekandmiseks vajalik elementaartöö on:

$$dW = (\varphi_1 - \varphi_2)dq = U dq = \frac{q}{C} dq$$

Integreerime seda vahemikus $0 \dots Q$:

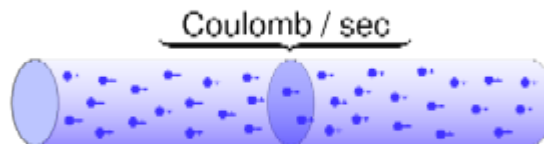
$$W = \frac{1}{C} \int_0^Q q dq = \frac{Q^2}{2C} = \frac{QU}{2} = \frac{CU^2}{2}$$

Elektrivool

- Elektrivool on laengute suunatud liikumine juhis
 - selle saavutamiseks tuleb juhis tekitada (ja säilitada) elektriväli
- Voolutugevus on defineeritud kui juhti ajaühikus läbiv laeng:

$$I = \frac{Q}{t}$$

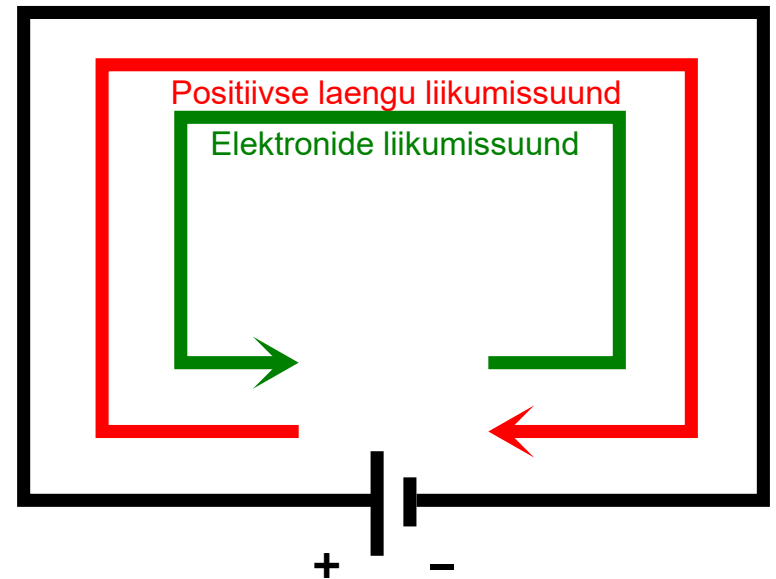
- Voolutugevuse mõõtühikuks SI-süsteemis on **amper (A)**, mispuhul juhti läbib sekundis 1 kulon: $1\text{A} = 1\text{C} / 1\text{s}$
 - seda seost tegelikult kasutasime eespool kuloni defineerimiseks, amper kui põhiühik on defineeritud kahe vooluga juhtme vahel mõjuvate magnetiliste jõudude kaudu.



André-Marie Ampère
(1775-1836)

Elektrivoolu suund

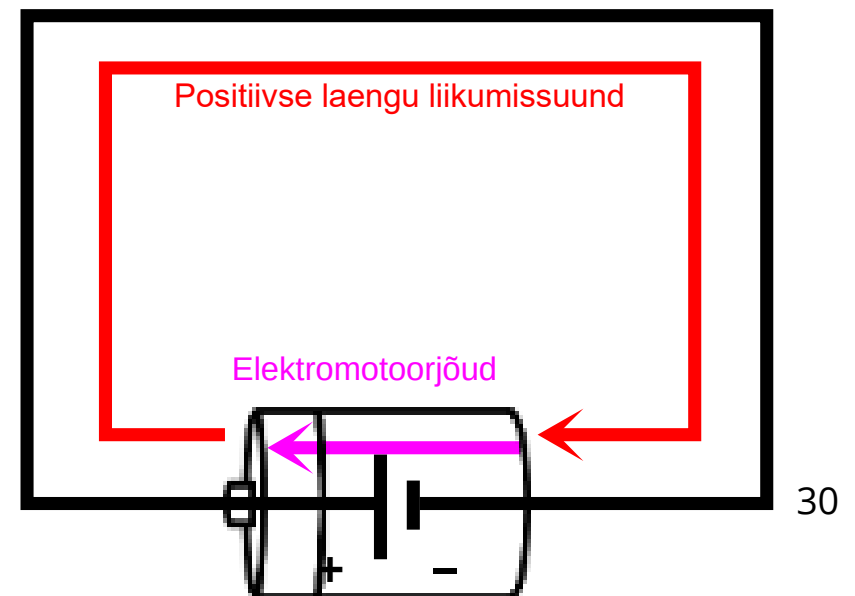
- Elektrivoolu suunaks loetakse kokkuleppeliselt positiivsete laengukandjate liikumissuunda vooluallika poolt tekitatavas elektriväljas.



- Samas valdavas osas juhtidest on laengukandjateks elektronid, s.o. negatiivse laenguga osakesed.
- Sellise kokkuleppe allikaks on Benjamin Franklini kunagine tõlgendus, et laengukandjaid on ainult ühte liiki ja „positiivsus“ tähendab laengu ülejääki, mis loogiliselt voolab sinna, kus on „negatiivsus“ ehk puudujääk.
- Aga kuna laengukandjad võivad olla ka positiivsed (+ioonid, prootonid, „augud“ pooljuhtides), siis tegelikult ongi see suund kokkuleppe küsimus.

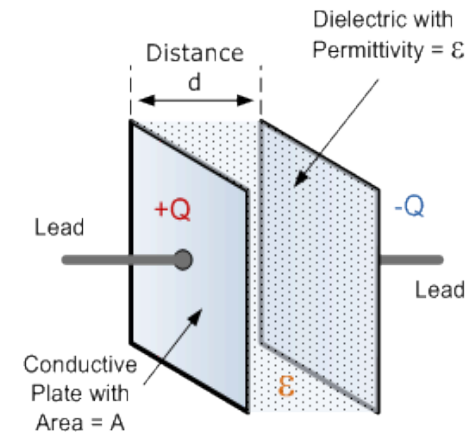
Vooluallikad

- Nagu varem nägime, lihtsalt elektrivälja tekitamine juhis viib kiiresti laengute ümberpaiknemisele nii, et see kompenseeriks välise elektrivälja, mistõttu laengute liikumine (s.o. elektrivool) lakkab.
- Voolu hoidmiseks peab mingi väline mitteelektrostaatilise päritoluga kõrvaljõud laenguid pidevalt väiksema potentsiaaliga otsast (lähtume positiivse liikuva laengu kokkuleppest) suurema potentsiaaliga otsa ümber paigutama.
- Sellise jõu allikaid nimetatakse vooluallikateks. Kõrvaljõudude **tööd ühiklaengu** ümberpaigutamiseks nim. vooluallika elektromotoorjõuks ja mõõdetakse **voltides** (energia(töö) / laeng). NB! segadusttekitav terminoloogia.
- Ideaalne vooluallikas hoiab oma klemmidel elektromotoorjõuga võrdset pinget.
- Nt. patareidele märgitud pinge tähistab tema elektromotoorjõudu.



Reaalseid vooluallikaid

- Kondensaatorit saab kasutada energia salvestamiseks, aga vooluallikana pole ta enamasti väga praktiline:
 - mahtuvus väike (kuigi: superkondensaatorid kuni 10000F (1..3V))
 - isetühjenemine
 - pinge ei püsi konst., vaid tühjenedes väheneb
- Patarei/aku muundab keemilise (nt. redoksreaktsioonil vabaneva) energia elektrienergiaks. Üksikelemendi pinge on 1.2...1.5V. Aku on taaslaetav, patarei üldiselt mitte.
 - Patarei prototüübiks oli Volta sammak (1800) (vahelduvad Zn ja Cu kettad, nende vahel soolvees leotatud papitükid)

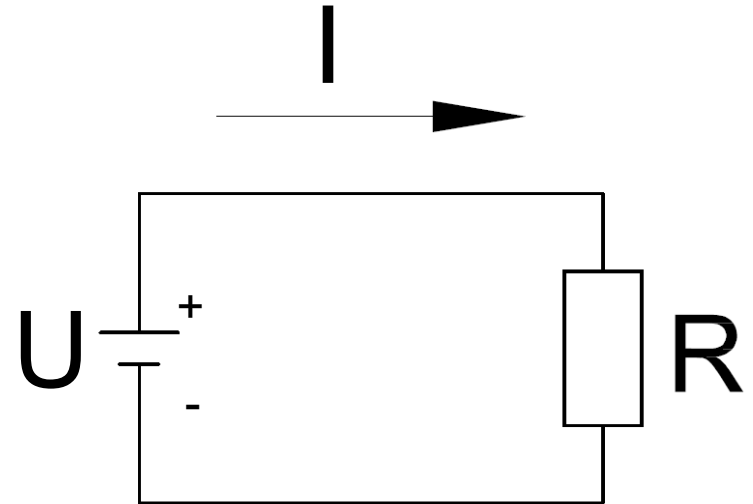


- Mida tähistab patarei mahtuvus (milli)ampertundides „tõlgituna“ SI ühikutesse?
- Kui suurt energiahulka mahutab üks pildil kujutatud 2500 mAh, 1.2V element?

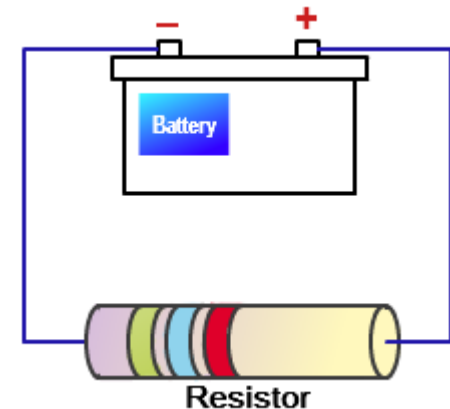
Elementaarvooluring ja Ohmi seadus

- Ohmi seadus (eksperimentaalne):
voolutugevus juhis on võrdeline
pingega (potentsiaalide vahega)
juhi otstel:

$$I = \frac{U}{R}$$



- Võrdeteguri pöördväärtust R nimetatakse juhi / keskkonna takistuseks. SI mõõtühikuks on **oom** (Ω).
- 1 Ω takistusele pinge 1 V rakendamisel voolab seal vool tugevusega 1 A.
- Mitte kõik keskkonnad ja elektrilised seadmed ei allu Ohmi seadusele (nt. hõõglamp, pooljuhtsiirded, gaasilised keskkonnad), head juhid aga üldiselt küll.



Elektrivoolu töö ja võimsus

- Olgu mingi juhi (takistusega R) otstele rakendatud pinge U . Laengu q liigutamiseks läbi selle juhi teevad välja jõud tööd:

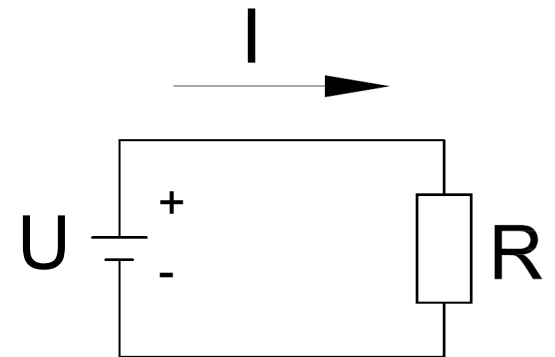
$$A = U \cdot q$$

- Eeldades, et voolutugevus I juhis ei muutu, on aja Δt jooksul juhti läbinud laeng $q = I \cdot \Delta t$ ja sama aja jooksul tehtud töö seega

$$A = U \cdot I \cdot \Delta t$$

- Võimsuse saamiseks tuleb töö ajaga läbi jagada, niisiis

$$N = U \cdot I = I^2 R = \frac{U^2}{R}$$



$$U = I \cdot R$$

$$I = \frac{U}{R}$$

Vastava töö teeb vooluallikas, paigutades laenguid ümber ja see kulub takistuse ületamiseks, s.o. läheb juhi materjali siseenergiaks (soojendamiseks).

Elektrolüüs

- Elektrolüüs on elektrivoolu toimel kulgev (aineid lagundav) redoksprotsess.
- Redoksreaktsioonid toimuvad elektrootodide pinnal.
- Negatiivselt laetud katoodil on elektronide ülejääk, seal toimub positiivsete ionide redutseerimine; positiivselt laetud anoodil on aga elektrone puudu, seal toimub negatiivsete ionide oksüdeerimine.
- Eraldunud aine mass on võrdeline lahust läbinud elektrilaenguga:

$$m = kq = kIt$$

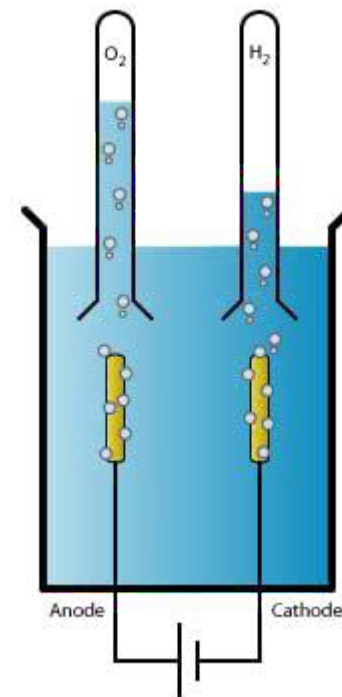
- Võrdetegurit k nimetatakse aine elektrokeemiliseks ekvivalendiks:

$$k = \frac{M}{Fz}$$

M – aine molaarmass

z – valents

$F = eN_A$ - Faraday arv



Faraday arv $F = 96485.34 \text{ C/mol}$ võrdub ühe mooli elektronide laenguga.

Elektroforees

- Paljud suured (bio-)molekulid ja kolloidosakesed omandavad lahuses elektrilaengu (nt. lahusti ionide adsorbeerumise tõttu pinnale).
- Asetades nad elektrivälja viskoosses keskkonnas (nt. geel), omandavad nad mingi konstantse kiiruse, mille juures elektrivälja jõud tasakaalustavad takistusjõu (mis suureneb koos kiirusega).
- Kiirus on tavaliselt pöördvõrdeline osakese suurusega, mis võimaldab sorteerida osakesi suuruse järgi.

Molekuli *liikuvus* on defineeritud kui

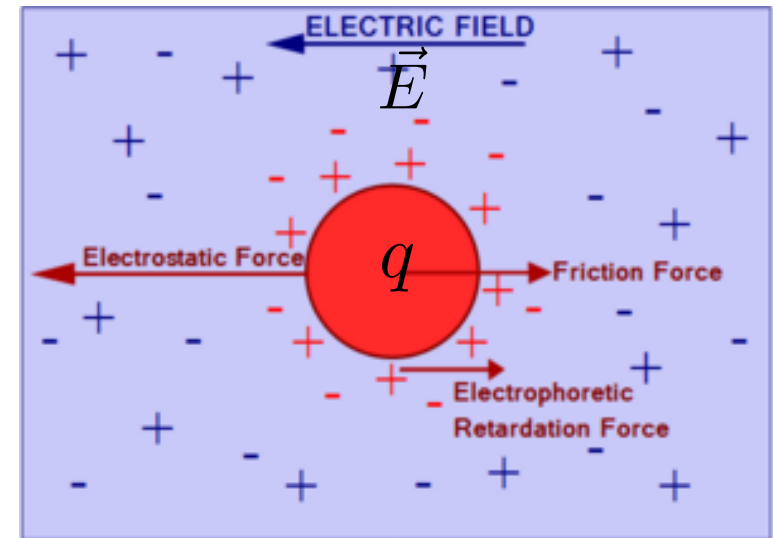
$$\mu = \frac{v}{E} \quad v - \text{liikumise kiirus}$$

Elektri- ja takistusjõudude tasakaalust saame, et

$$\mu = \frac{q}{f} \quad \text{kus } f - \text{sisehõõrdejõud} \\ (F_{takistus} = -vf)$$

Raadiusega R kera jaoks: $f = 6\pi\eta R$

η – keskkonna viskoossus



Elektroforees

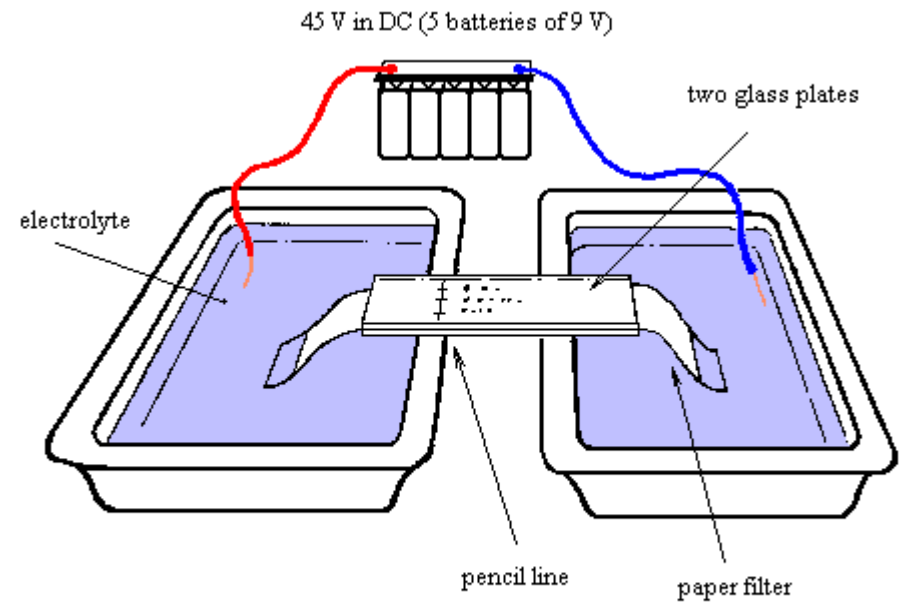
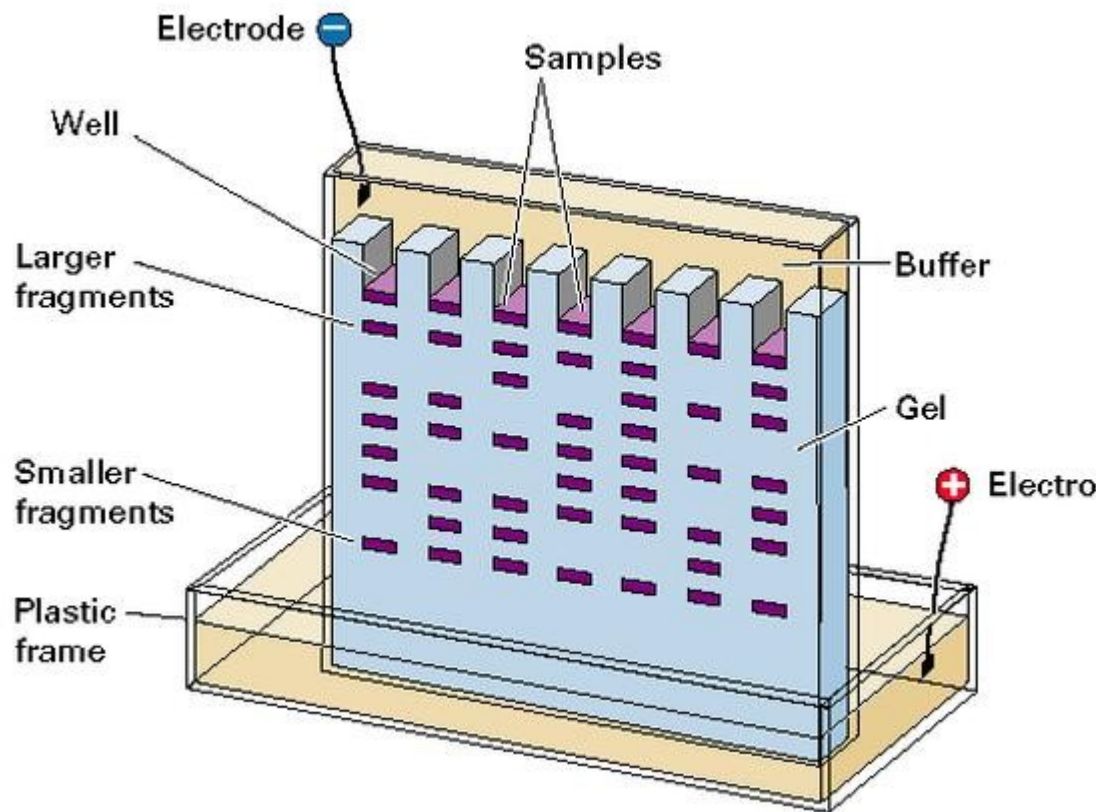
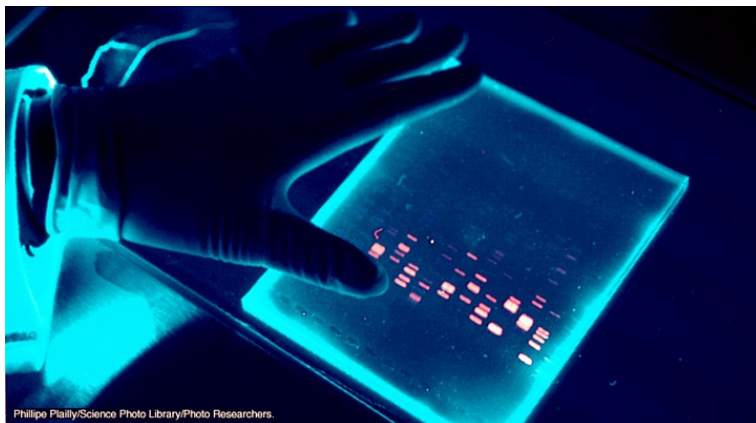
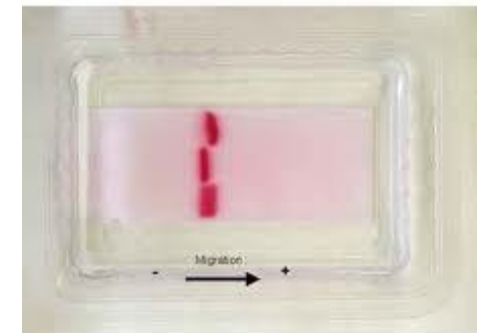
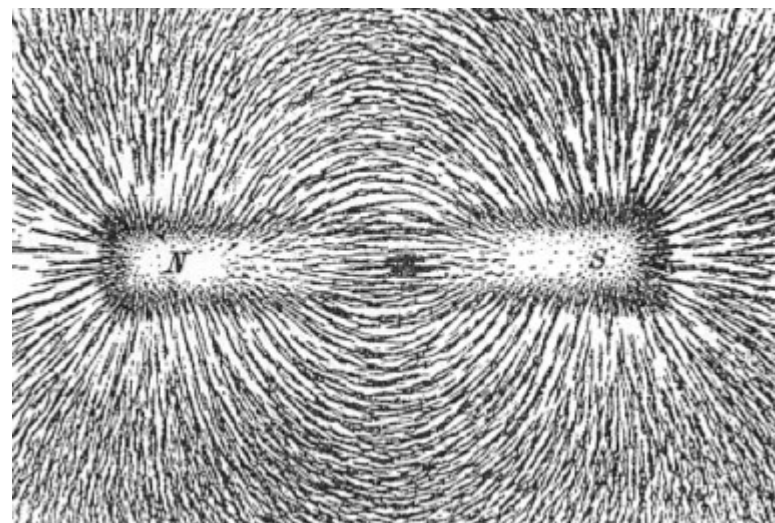
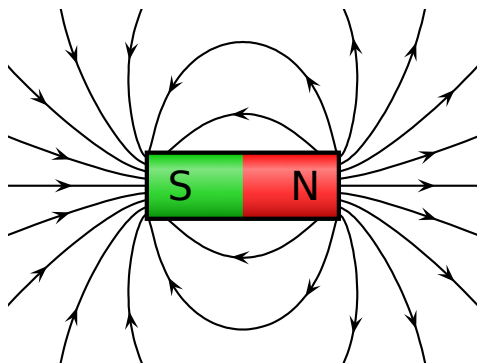


Figure 21 - Apparatus for paper electrophoresis.



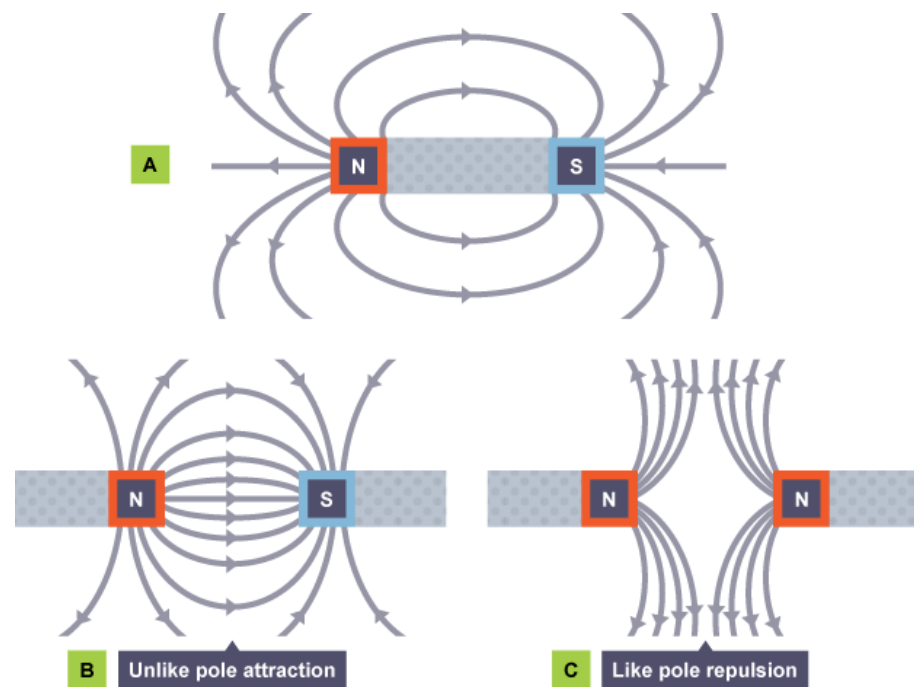
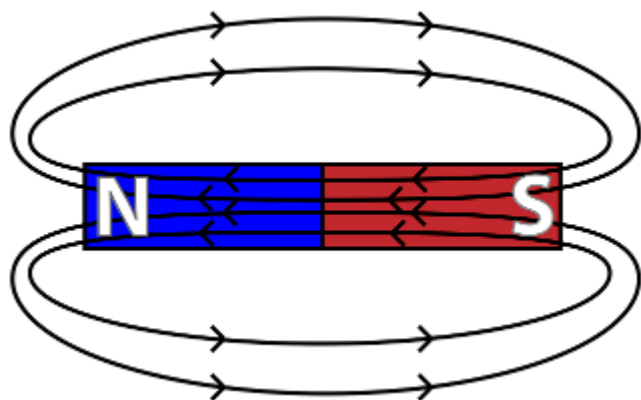
Magnetväli: püsिमagnet

- Tuntuim magnetismi väljendus on ilmselt püsिमagnet.



- Püsिमagneti magnetväli tuleneb laetud osakeste (enamasti elektronide) *spinni* tekitatud magnetväljade orienteerumisest eelistatult ühes suunas.
- Spinni olemust selgitab kvantmehhaanika; mingis lähenduses võib seda kujutada osakese pöörlemisena ($\rightarrow$ ringvool)
- Magneetumine välises magnetväljas on omane ferromagnetilistele materjalidele (nt. Fe, Co, Ni, nende oksiidid, haruldased muldmetallid, nt. Nd, Sm).

Magnetväli



- Magnetil on kaks poolust (vastavalt suhtele Maa magnetväljaga tähistatakse neid N ja S). Sarnased poolused tõukuvad, erinevad tõmbuvad.
- Nagu elektriväli, on ka magnetväli vektorväli, kuid erinevalt elektriväljast ei saa pooluseid käsitleda kui „magnetlaenguid“ („monopooluseid“) - selliseid pole seni veel leitud (kuigi otsitakse).
- S.t. magnetvälja jõujooned ei alga ega lõpe poolustel, vaid on suletud kontuurid.

Magnetvälja tugevus

Mis on see (vektoriaalne) suurus, mille joontest me räägime?

- Magnetvälja eripära on see, et ta mõjutab ainult tema suhtes **liikuvaid** laenguid.
- Sel juhul laetud osakesele magnetvälja tõttu mõjuv jõud $\vec{F}_{magn}$ on **liikumise suunaga risti**.
- Sobiv on defineerida magnetvälja iseloomustav vektor $\vec{B}$ järgneva seose kaudu:

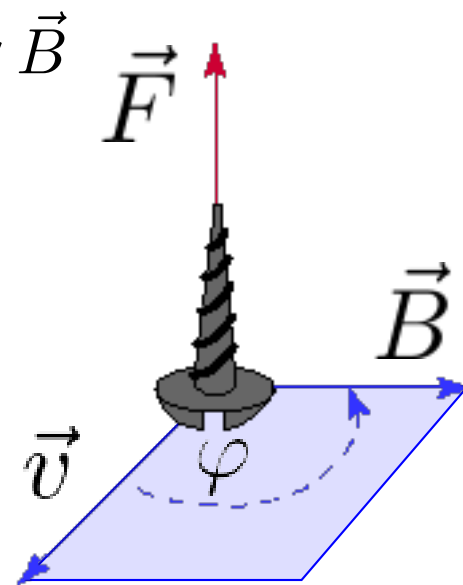
$$\vec{F}_{magn} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

$\vec{v}$ - osakese kiirusvektor

NB! q märk! Negatiivse laengu puhul (nt. elektron) on jõud vastupidine.

Arvestades ka elektrivälja, saame osakesele mõjuva summaarse, nn. **Lorentzi jõu**:

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$



$$|\vec{v} \times \vec{B}| = |v||B| \sin \varphi$$

(rööpküliku pindala)

Heal vektoril mitu nime

- Vektorit $\vec{B}$ nimetatakse eestikeelses kirjanduses tavaliselt mitte magnetvälja tugevuseks, vaid **magnetiliseks induktsiooniks**.
- **Magnetvälja tugevuseks** nimetatakse vektorit $\vec{H}$, mis on (enamasti) $\vec{B}$ -ga võrdeline, kuid arvestab ka keskkonna magnetilisi omadusi:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu_r}$$

Ingliskeelses kirjanduses kohtab erinevaid nimesid, aga $\vec{B}$, $\vec{H}$ kui tähised on siiski küllalt püsiva tähendusega.

Alternative names for $\vec{B}$

- Magnetic flux density
- Magnetic induction
- Magnetic field

Alternative names for $\vec{H}$

- Magnetic field intensity
- Magnetic field strength
- Magnetic field
- Magnetizing field

$$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$$

- vaakumi magnetiline läbitavus

μ_r – keskkonna suhteline magnetiline läbitavus; enamusel keskkondadest ≈ 1 , ferromagneetikutel mitu tuhat

Magnetvälja ühikud

- $\vec{B}$ SI ühik on **tesla** (T):

$$[B] = \frac{[F]}{[q][V]} = \frac{\text{N}\cdot\text{s}}{\text{C}\cdot\text{m}} = \frac{\text{kg}}{\text{A}\cdot\text{s}^2} = T$$

- Kasutatakse ka Gaussi (G): $1 \text{ G} = 10^{-4} \text{ T}$
 - umbes Maa magnetvälja suurusjärg
- $\vec{H}$ SI ühikuks on A / m

$$\vec{F}_{\text{magn}} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

Maa magnetväli: 25..65 μT

Külmkapimagnet: 5 mT

Nd-magneti pinnal: 1.2 T

Magnetresonantstomograaf:
kuni 7 T (tavaliselt 1.5T)

Ülijuhtmagnetid: rekord 33.8 T

Osakese liikumine magnetväljas

- Laetud osake liigub magnetväljas mööda ringjoone kaart, kuna tekib liikumisega ristsuunaline kiirendus.
- Positiivse ja negatiivse laenguga osakesed pöörduvad eri suunas.
- Pöörderaadius sõltub ka osakese massist.

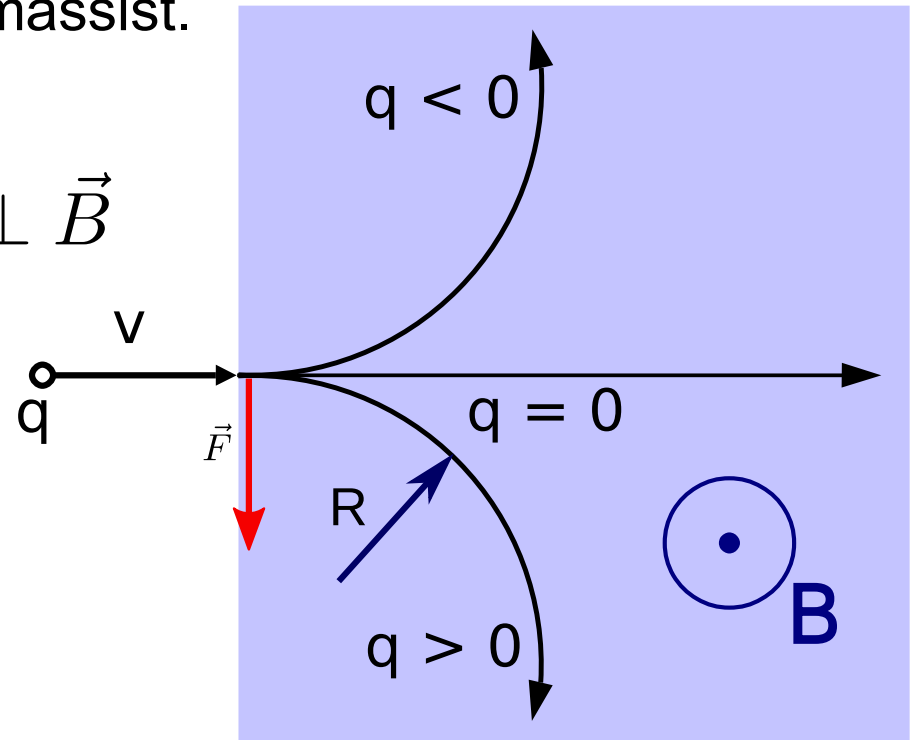
$$\vec{F} = m\vec{a} = q\vec{v} \times \vec{B}$$

ristsuunaline kiirendus:

$$a = \frac{qvB}{m} = \frac{v^2}{R}$$

$$R = \frac{mv}{qB} \quad \text{s.o. võrdeline massiga}$$

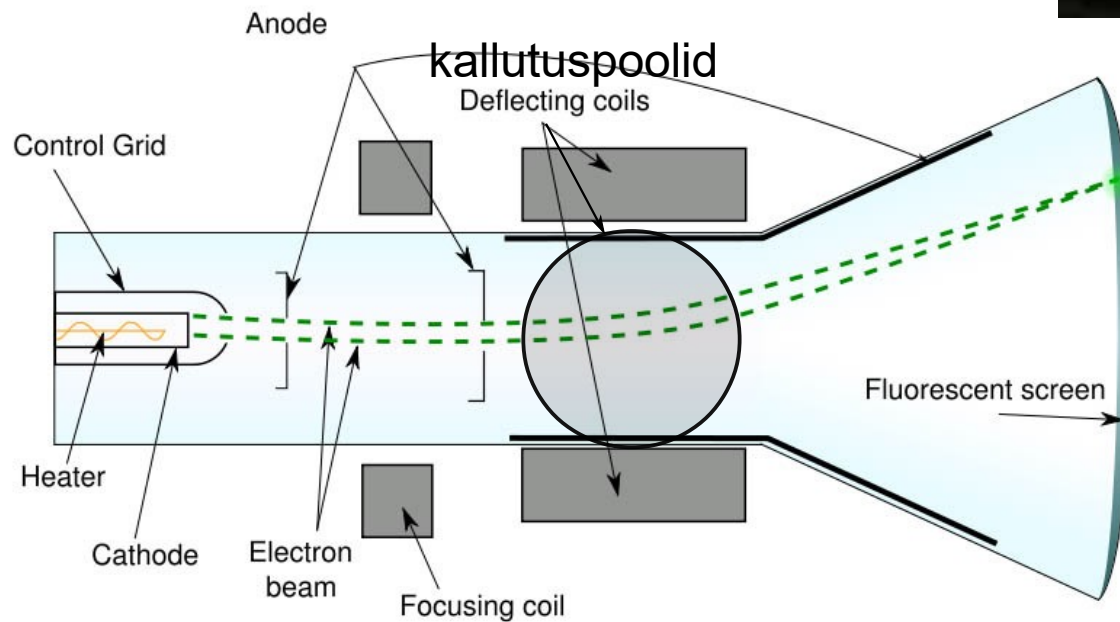
$$\vec{v} \perp \vec{B}$$



Kui $\vec{v}$ ja $\vec{B}$ pole täpselt risti, on trajektoor spiraalikujuline.

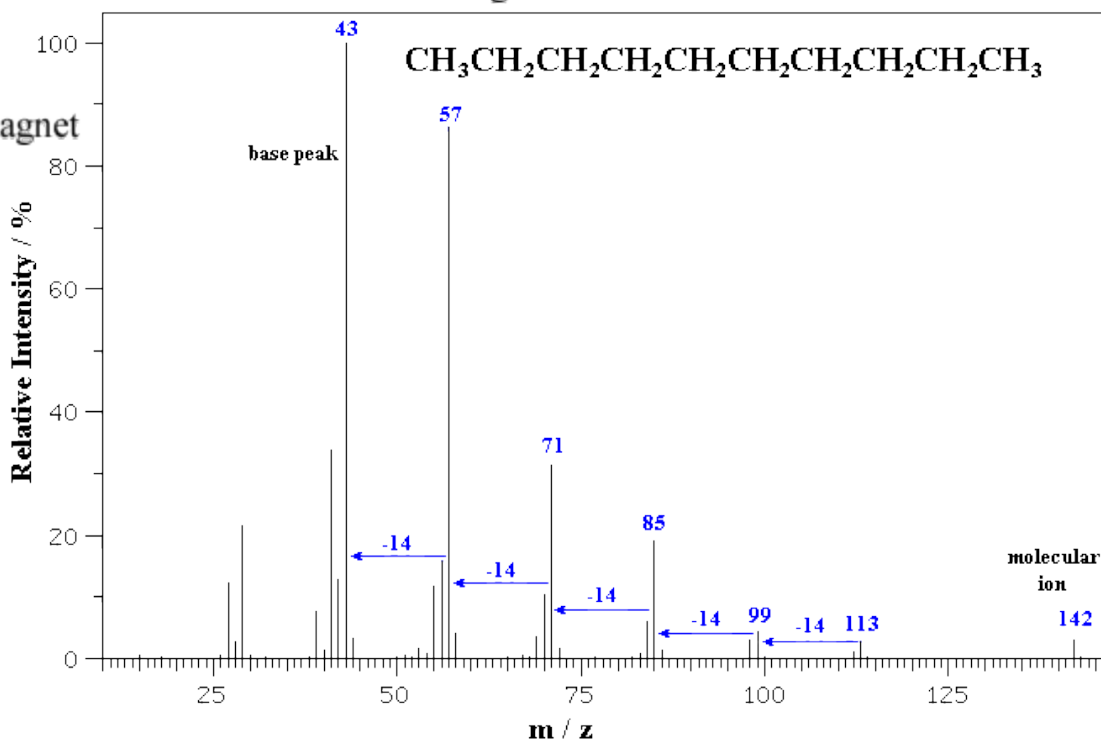
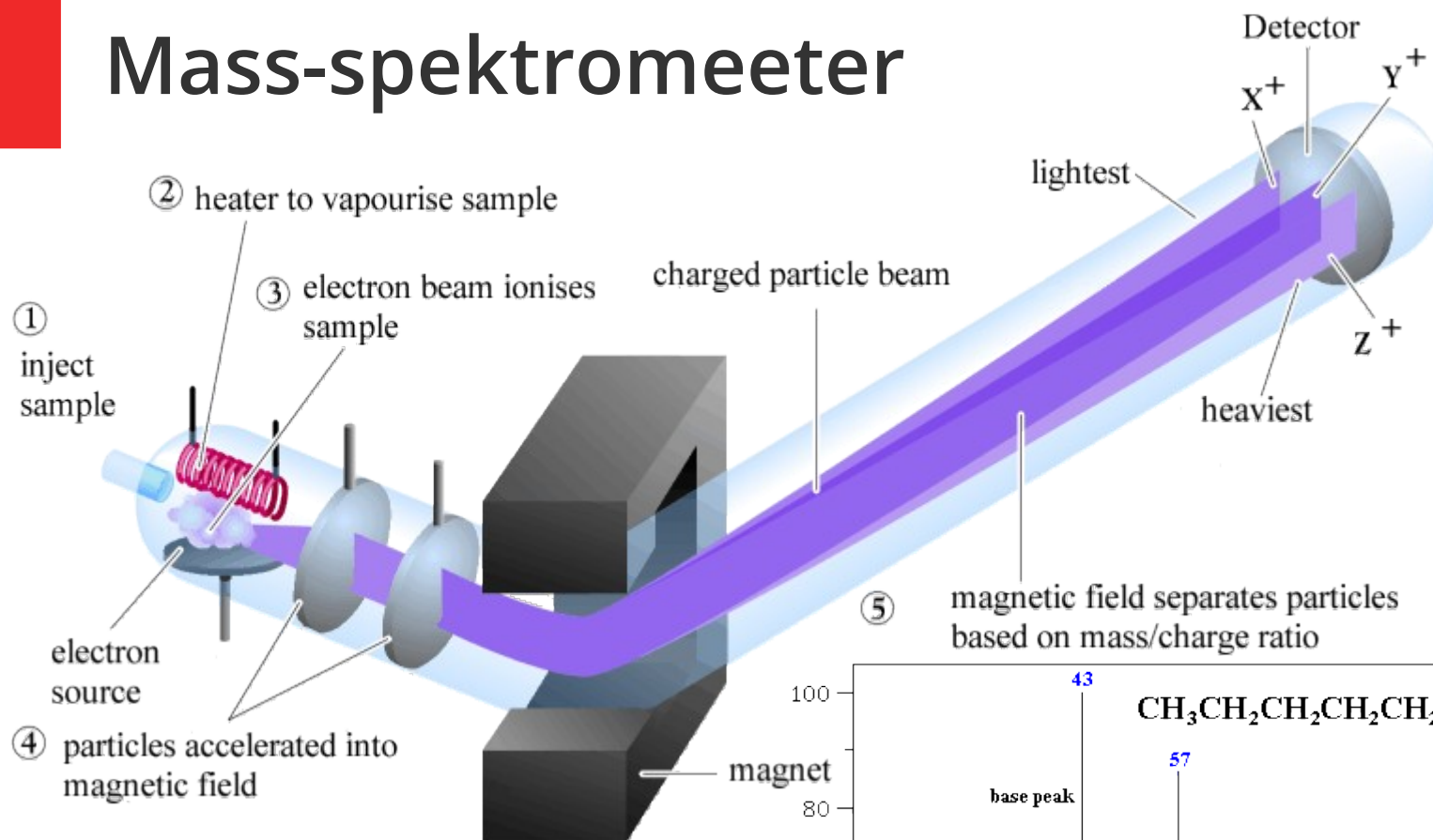
Magnetvälja kasutusi

Elektronkiire kallutamine kineskoobis:



Milline on kujutatud juhul magnetvälja suund kallutuspoolide vahel?

Mass-spektromeeter

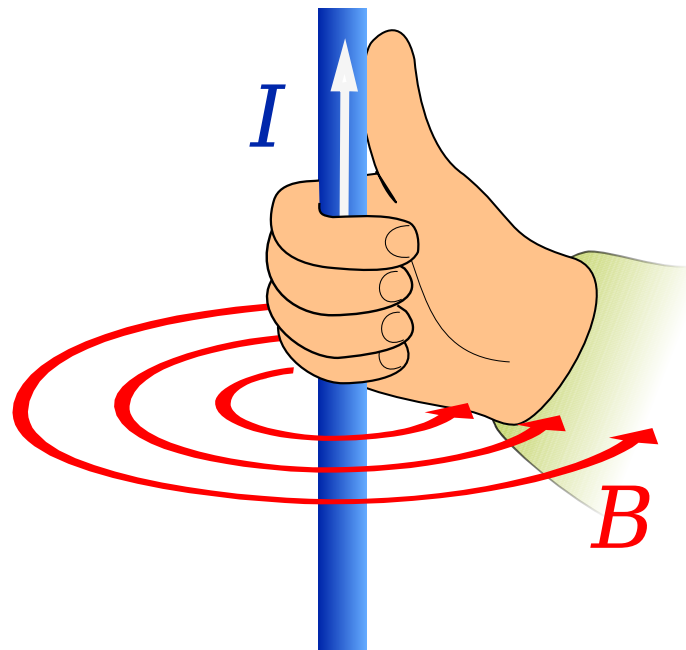
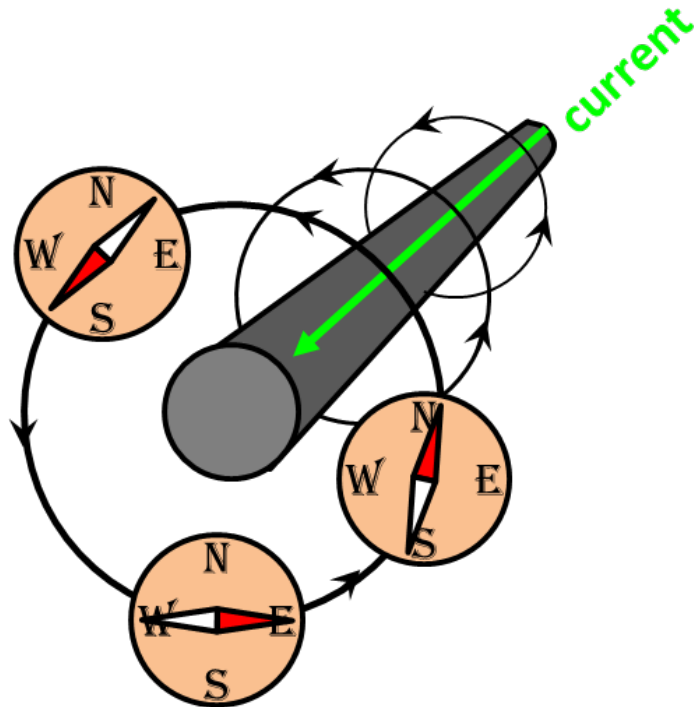


Eraldab ioonid mass/laeng suhte järgi

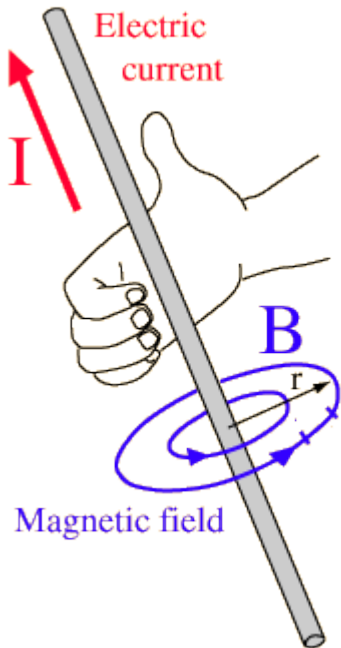
Antud juhul ioniseeritakse aine elektronkiire abil

Voolu magnetväli

- Kui ühtpidi magnetväli mõjutab liikuvaid laenguid, siis selgub, et kehtib ka vastupidine: liikuvad laengud tekitavad magnetvälja.
- Elektrivooluga juhti ümbritseb magnetväli, mille jõujooned on kontsentrilised ringid ümber juhi.
- Välja suunda saab määrata praktikas väikese magnetnõelaga ja teoreetiliselt parema käe (või kruvi-) reegluga.



Voolu magnetvälja tugevus



Kaugusel r vooluga juhtmest avaldub magnetiline induksioon järgmiselt:

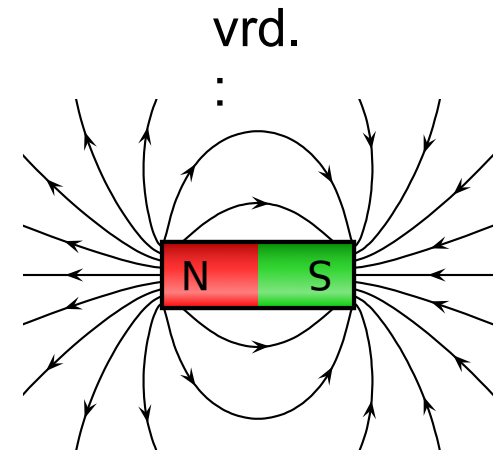
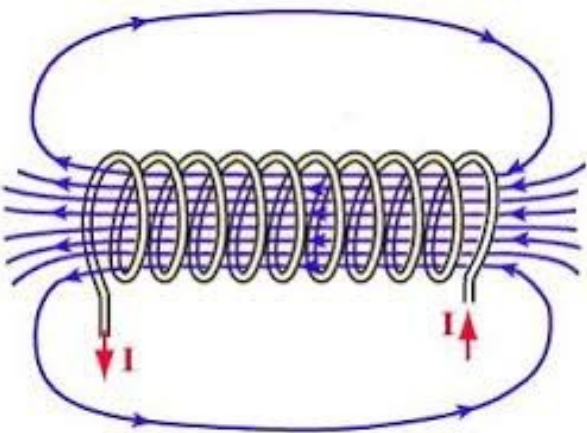
$$B = \frac{\mu_0 \mu_r}{2\pi} \frac{I}{r}$$

Pika pooli (solenoidi) keskel on magnetväli praktiliselt ühtlane:

$$B = \mu_0 \mu_r n I$$

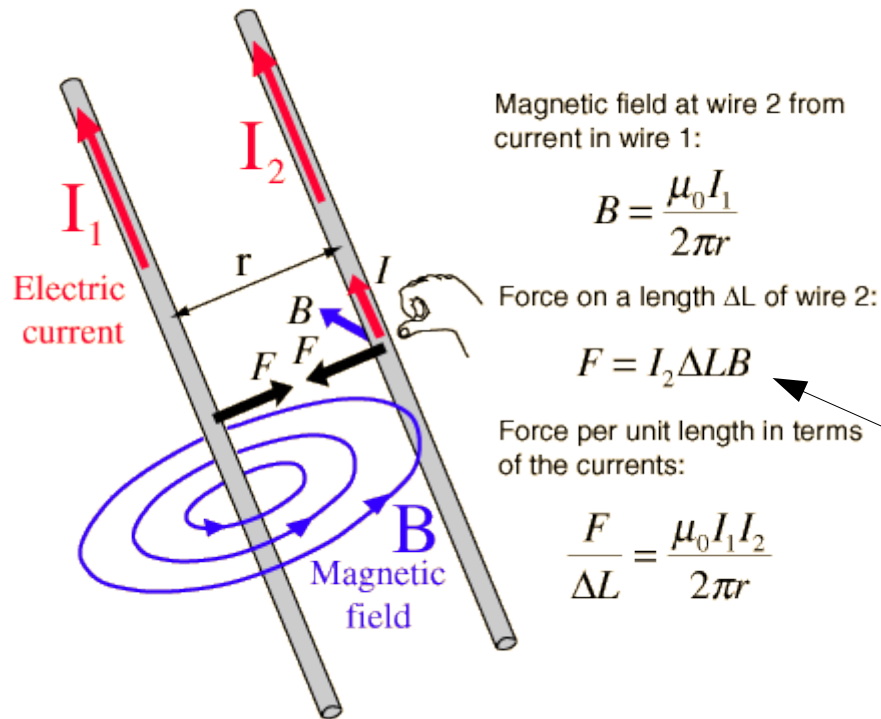
n – keerdude arv
pikkusühiku (SI-s meetri)
kohta

Suure μ_r korral
(ferromagneetikud) väli
võimendub.



Jõud kahe vooluga juhtme vahel

- Kaks kõrvutiasuvat vooluga juhet mõjutavad teineteist, kuna asuvad teineteise poolt tekitatavas magnetväljas.



Magnetic field at wire 2 from current in wire 1:

$$B = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi r}$$

Force on a length ΔL of wire 2:

$$F = I_2 \Delta L B$$

Force per unit length in terms of the currents:

$$\frac{F}{\Delta L} = \frac{\mu_0 I_1 I_2}{2\pi r}$$

Jõud juhtme pikkusühiku kohta on:

$$\frac{F}{\Delta L} = \frac{\mu_0 \mu_r I_1 I_2}{2\pi r}$$

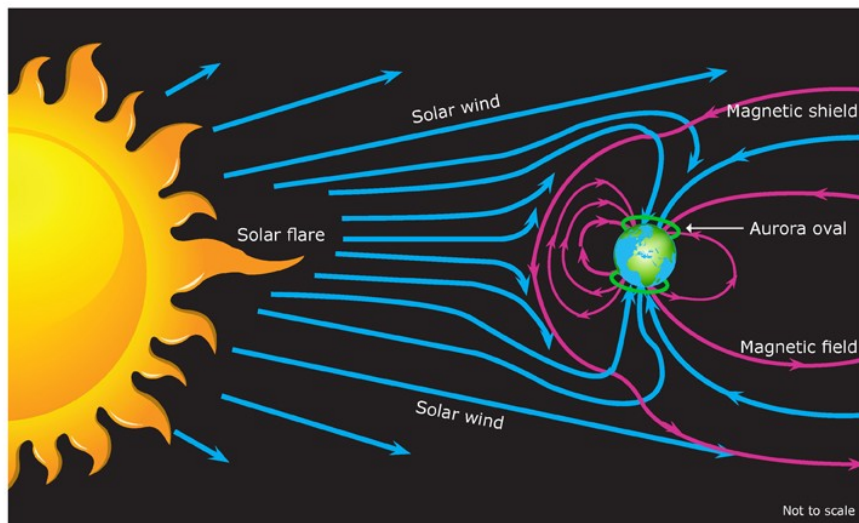
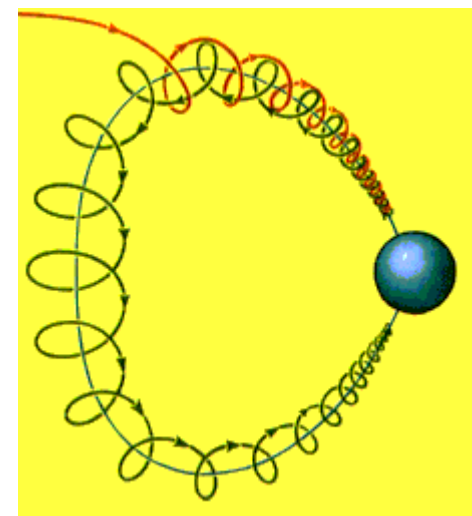
$$F = qvB = q \frac{\Delta L}{\Delta t} B = \frac{q}{\Delta t} \Delta L B = I_2 \Delta L B$$

Ampri definitsioon: sellise muutumatu voolu tugevus, mis, kulgedes mööda kahte paralleelset pikka vaakumis teineteisest 1 m kaugusel paiknevat sirgjuhti, tekitab nende vahel pikkuse iga meetri kohta jõu $2 \cdot 10^{-7}$ N

vaakumis $\mu_r = 1$ ja $\frac{\mu_0}{2\pi} = 2 \cdot 10^{-7} \frac{V \cdot s}{A \cdot m}$

Maa magnetväli

- Maa magnetvälja tekitajateks on tema vedela tuuma konvektsioonivoolud ($\sim 10^{12}$ A)
- Magnetvälja tugevus (induktsioon) on 25..65 μT
- Magnetväli kaitseb Maa atmosfääri ja biosfääri kosmosest (eelkõige Päikeselt) tulevate kõrge energiaga laetud osakeste (nn päikesetuule) eest.

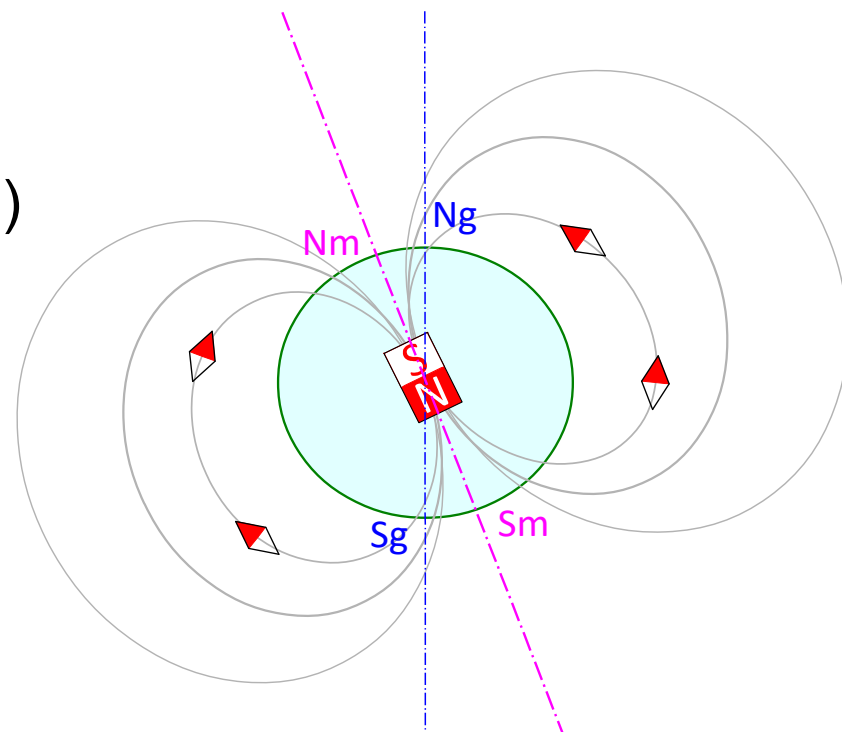


© Copyright. 2014. University of Waikato. All rights reserved.
www.sciencelearn.org.nz

- Ilma magnetväljata hävitaks päikesetuul tasapisi kogu Maa atmosfääri.
 - Arvatakse, et nii on juhtunud Marsil.

Magnetvälja muutumine ajas

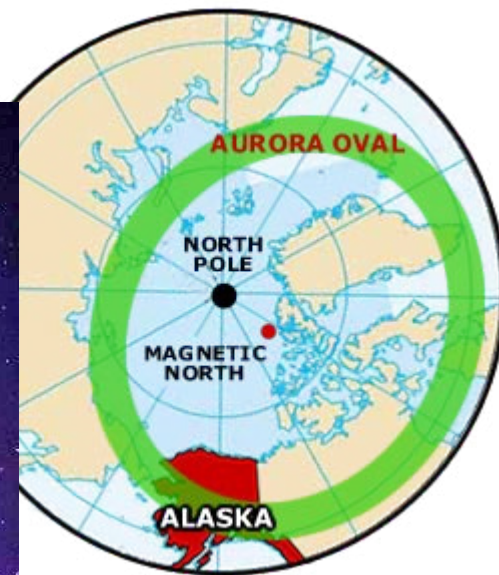
- Maa magnetpoolus ei lange kokku geograafilise poolusega.
- Magnetpooluse asukoht muutub ka aja jooksul.
- Keskmiselt kord ~450000 aasta jooksul (aga üsna ebaühtlaste ajavahemike järel) toimub suhteliselt lühikese aja jooksul täielik magnetiliste pooluste vahetus.
- Pange tähele, et *Maa magnetiline põhjapoolus* vastab tegelikult *Maa magnetvälja lõunapoolusele* (kuna vastaspoolused tõmbuvad).



On leitud, et mitmed loomaliigid (ja ka mõned bakterid) on suutelised tundma Maa magnetvälja ja seda mingil määral ka kasutavad.

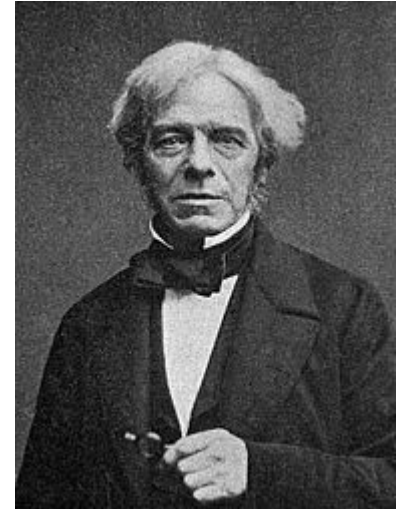
- vt. Magnetoception

Virmalised



- Jälgitav 10...20° ribas ümber magnetpooluse (aga nn. magnetormide ajal ka väiksematel laiuskraadidel), kus Maa magnetvälja poolt lõksustatud laetud osakesed sisenevad atmosfääri ja ergastavad seal gaasi molekule, mis kiirgavad nähtavat valgust.
- punane, roheline – molekulaarne O, sinine – ioniseeritud N_2 .

Michael Faraday (1791 - 1867)

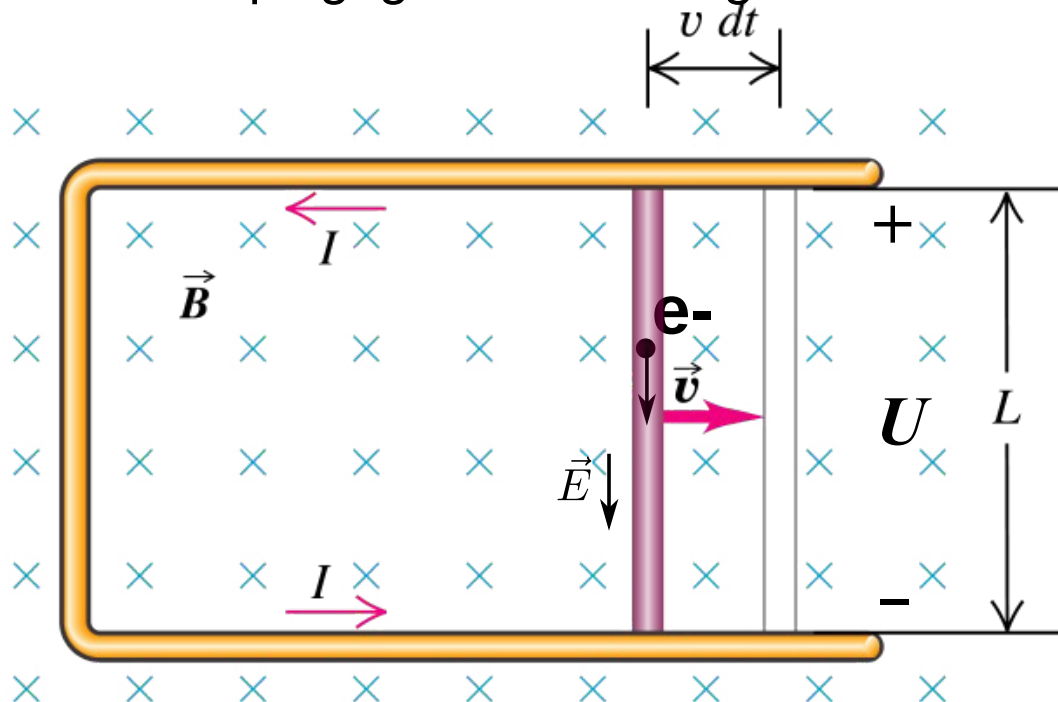
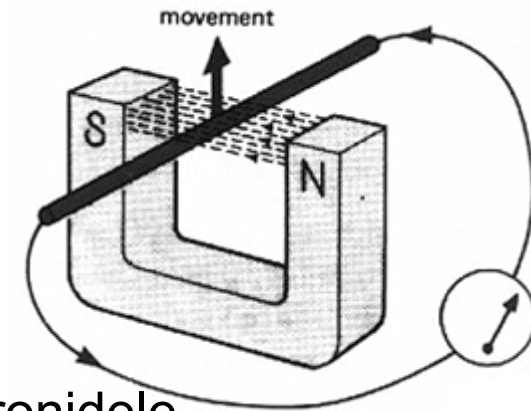


- Oli pärit lihtrahva hulgast, ei saanud formaalset haridust. Oli aktiivne iseõppija.
 - Õnnestus saada assistendikoht Humphry Davy juures Londoni Kuninglikus Instituudis. Hiljem sai ise Davy asemel selle direktoriks.
 - Tegeles palju nii keemia kui elektrinähtustega. Tähtsamaks avastuseks oli induktsiooninähtus, kui ta avastas, et liigutades magnetit pooli suhtes, tekib selles elektrivool. See pani aluse kaasaegsele elektromagnetismile.
- Induktsiooniseadus
 - Elektrolüüsi seadused
 - Mahtuvuse ühik

Elektromagnetiline induktsioon

Kombineerime veel olemasolevat informatsiooni:

- Juhis on palju vabu laenguid (elektrone).
- Liigutades juhti (nt. juhet) risti magnetväljaga, mõjub elektronidele kui liikuvatele laengutele jõud, mis paneb nad liikuma magnetväljale ja juhi liikumisele ristuv suunas.
- Seega tekib juhtme otste vahel pinge, mille väärtus on selline, et tema mõju elektronidele tasakaalustab magnetiliste jõudude mõju.
- Selle pingega saaks midagi kasulikku teha!



$$|\vec{F}_{el}| = |\vec{F}_{magn}|$$

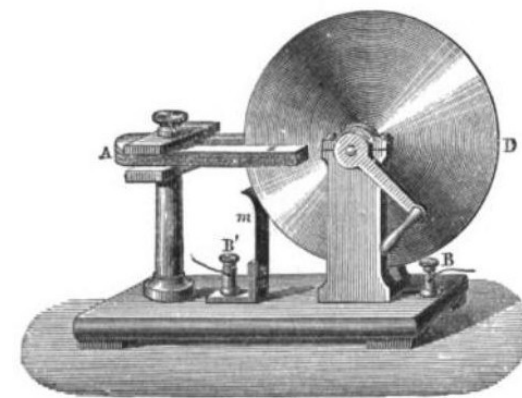
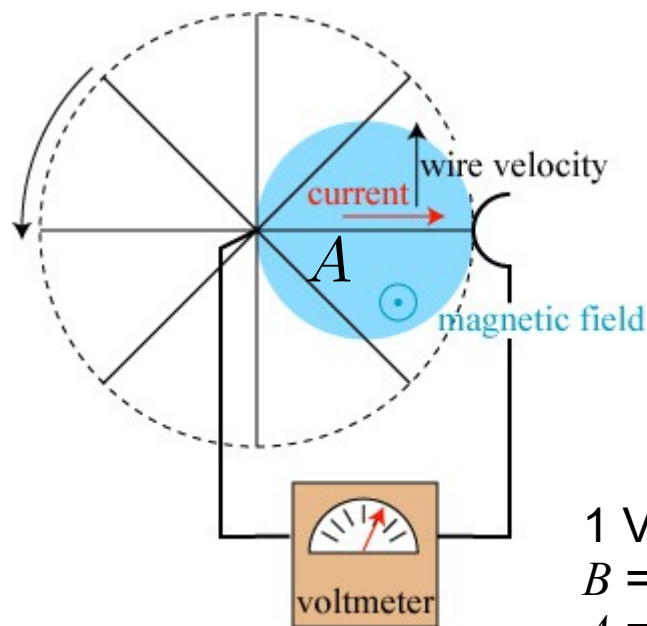
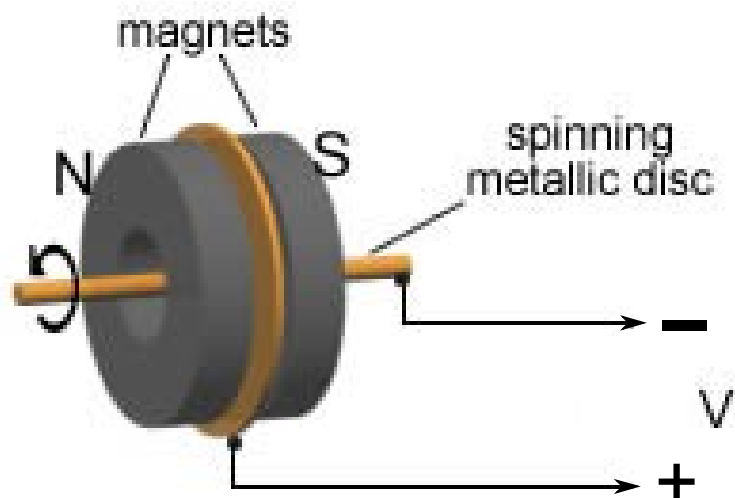
$$qE = qvB$$

$$U = -EL \quad (\vec{E} = -\text{grad } U)$$

$$|U| = vBL$$

Faraday ketas

Üks idee eeltoodud meetodil elektrit genereerida oleks lihtsalt keerutada juhtivast materjalist ketast tugevas magnetväljas:



$$U = B A f$$

f – pöörlemis-
sagedus

1 V saamiseks nt.:

$B = 1 \text{ T}$ (Nd magnet)

$A = 0.01 \text{ m}^2$ (~CD mõõtu)

$f = 100$ pööret / s

Selgub aga paar huvitavat asjaolu (Faraday paradoks):

- Kui keerutada magnetit, aga ketas seisab paigal, siis pinget ei teki.
- Kui keerutada magnetit ja ketast koos (nii et üks on teise suhtes paigal), siis pinge tekib.

Kes seletaks?

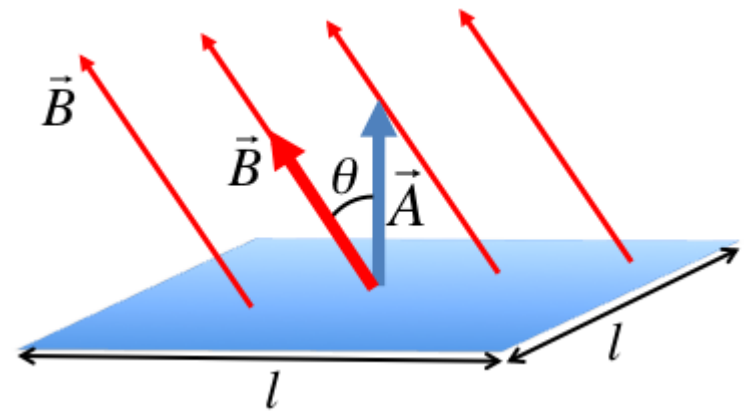
Magnetvoog

Magnetilise induktsiooni $\vec{B}$ ja mingi pinna A $\vec{B}$ -ga ristuva komponendi korrutist nimetatakse **magnetvooks** (Φ) läbi pinna A .

$$\Phi = \vec{B} \cdot \vec{A} = BA \cos \theta$$

$\vec{A}$ - normaalisuunaline vektor pikkusega A

Magnetvoo SI ühikuks on veeber (Wb)
(= 1 T · m²)



Faraday induktsiooniseadus

Induktsiooniseadus: Juhtivas kontuuris indutseeritud pinge (elektromotoorjõud) on võrdne kontuuri läbiva magnetvoo muutumise kiirusega.

$$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt}$$

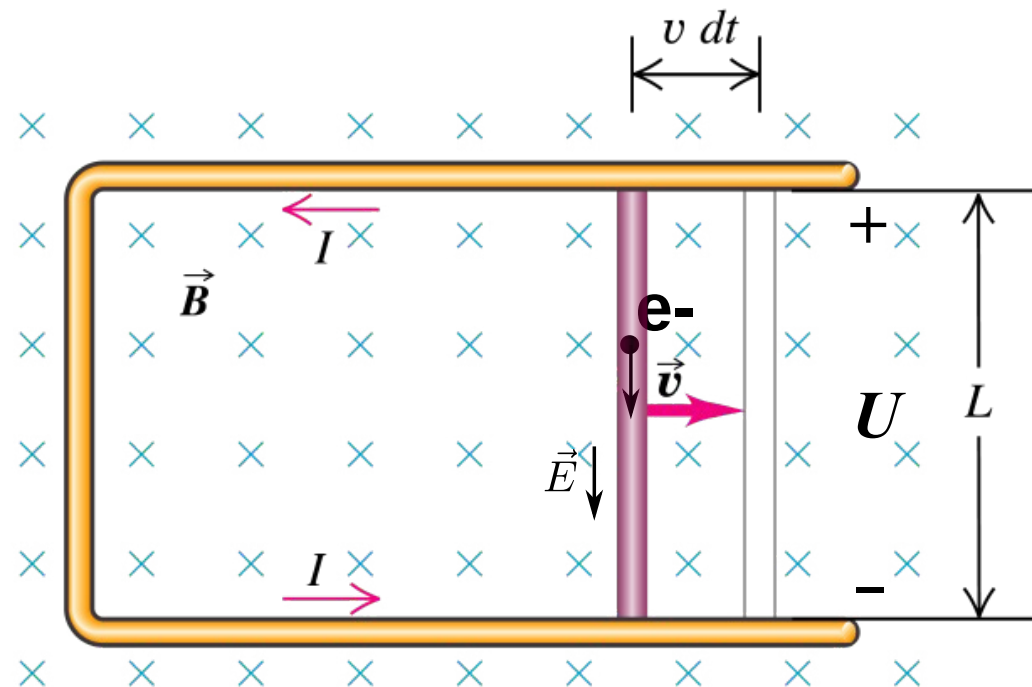
Lenzi reegel: indutseeritud vool on alati suunatud selliselt, et tema poolt tekitatav magnetväli takistab magnetvoo muutumist. Sellest tuleneb miinusmärk induktsiooniseaduses.

Vaatame uuesti eelnevat näidet:

- aja dt jooksul suureneb kontuuri pind $Lvdt$ võrra
- voog seega $d\Phi = BLvdt$ võrra

$$|U_{ind}| = \left| -\frac{d\Phi}{dt} \right| = BLv$$

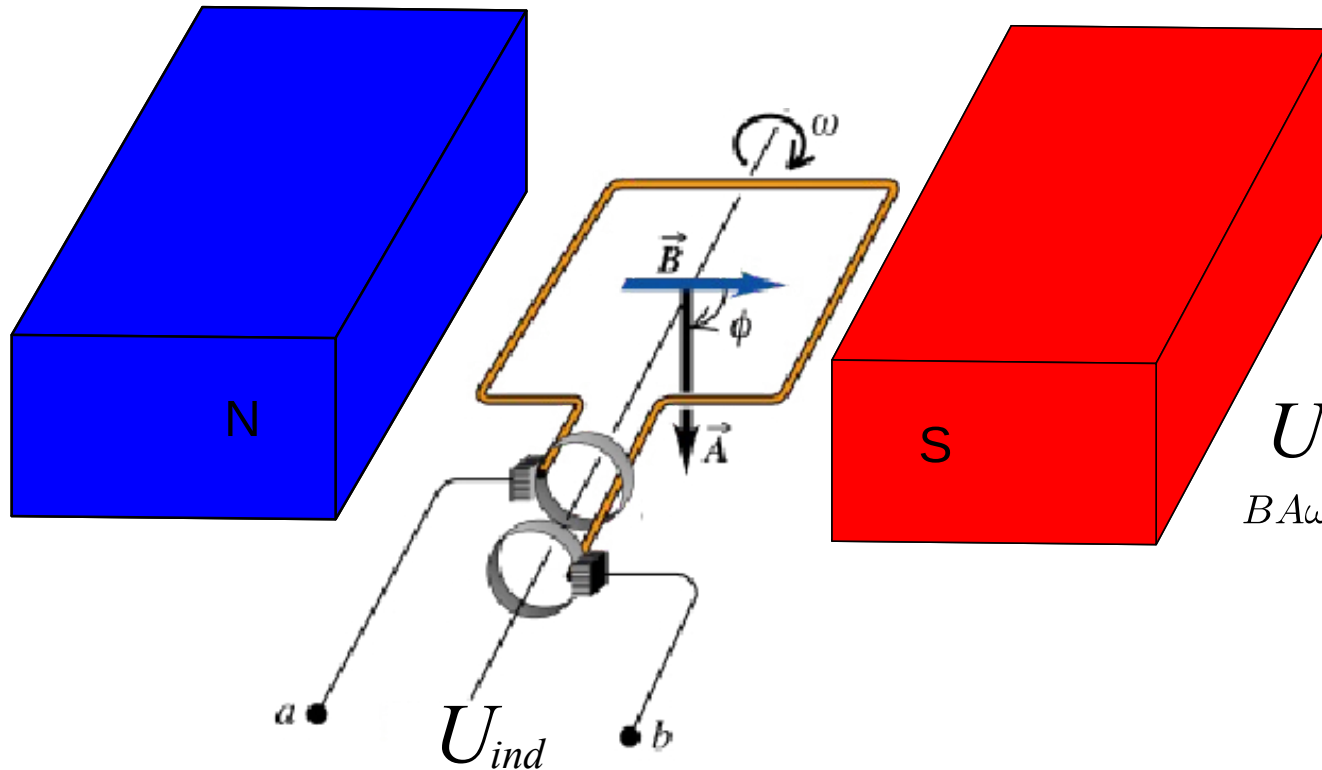
s.o. sama tulemus. Induktsioonivoolu suund on selline, et tema tekitatud magnetväli kontuuri sees on vastupidine välisele.



Vahelduvvoolugeneraator

s.o. kui ajas muutub:

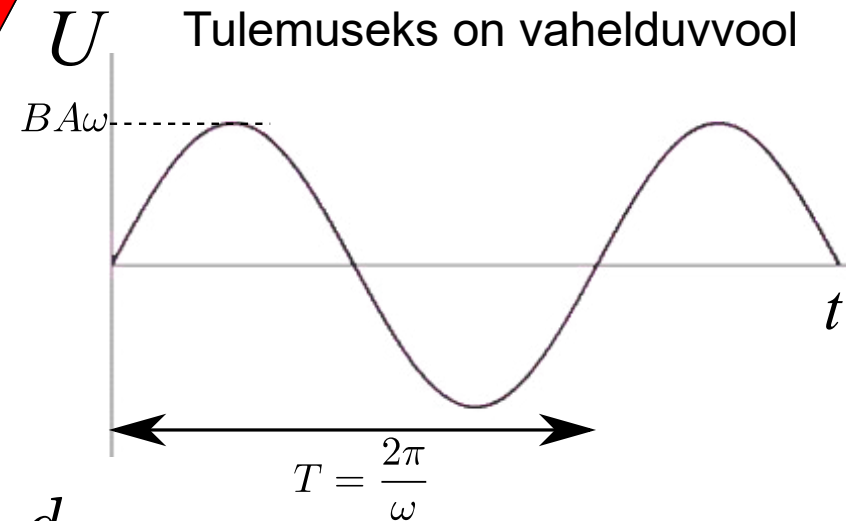
- magnetväli
- kontuuri pindala või
- nendevaheline nurk, tekib kontuuris induksioonivool.



Raam pindalaga A pöörleb nurkkiirusega ω

$$\phi = \omega t$$

Tulemuseks on vahelduvvool

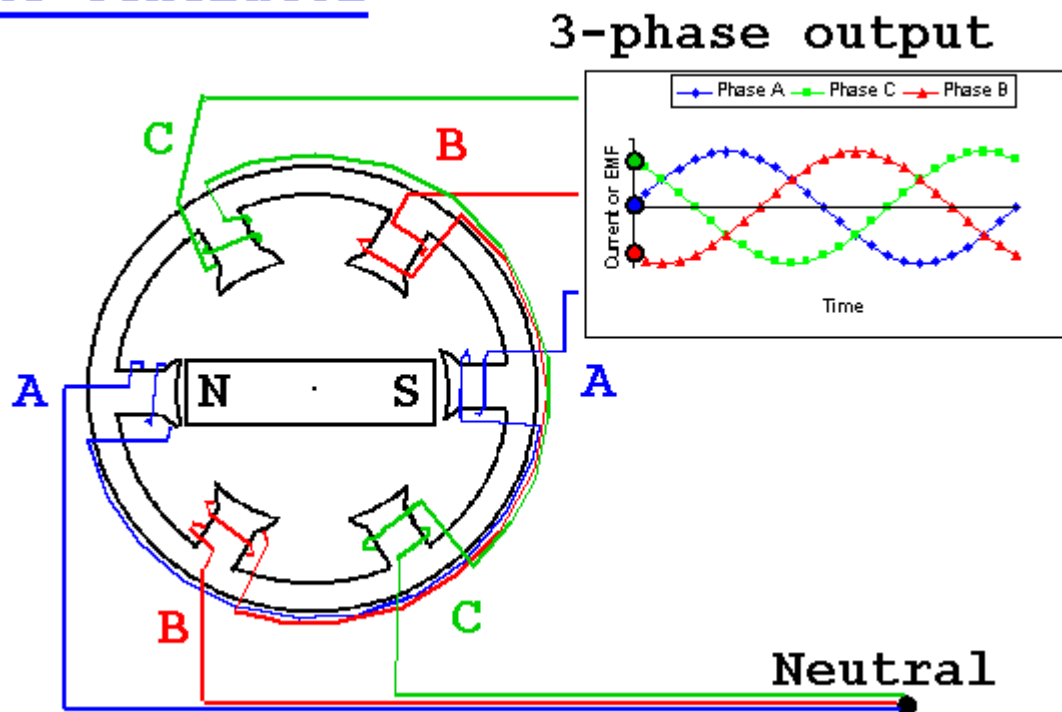


$$U_{ind} = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt}(\vec{B} \cdot \vec{A}) = -BA \frac{d}{dt} \cos \omega t = BA\omega \sin \omega t$$

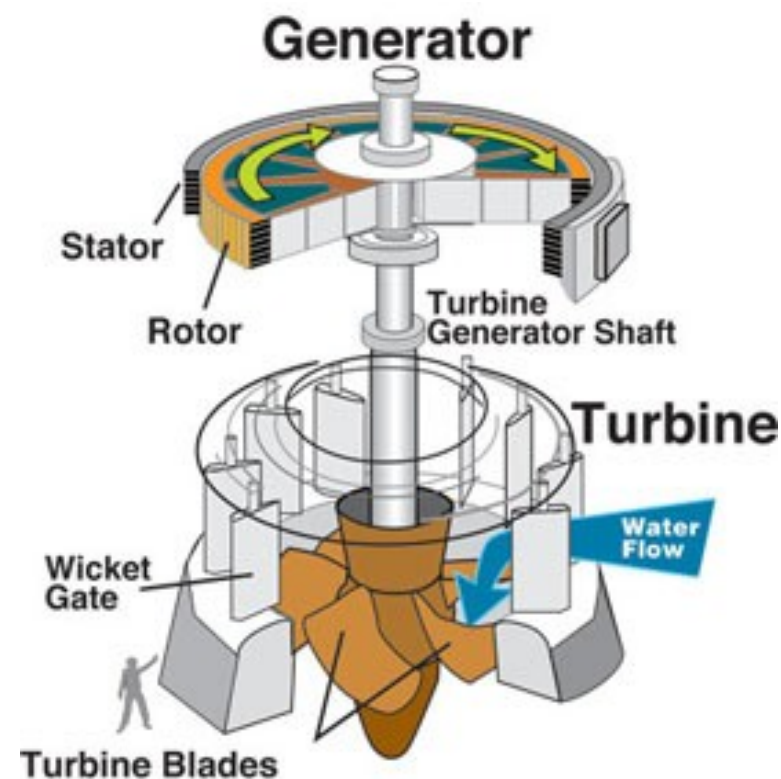
- N keeruga raami (mähise) korral korrutub ka U_{ind} N -ga (keerud on järjestikku ühendatud!)

Generaatorid

The Generator



T. Davies 2002



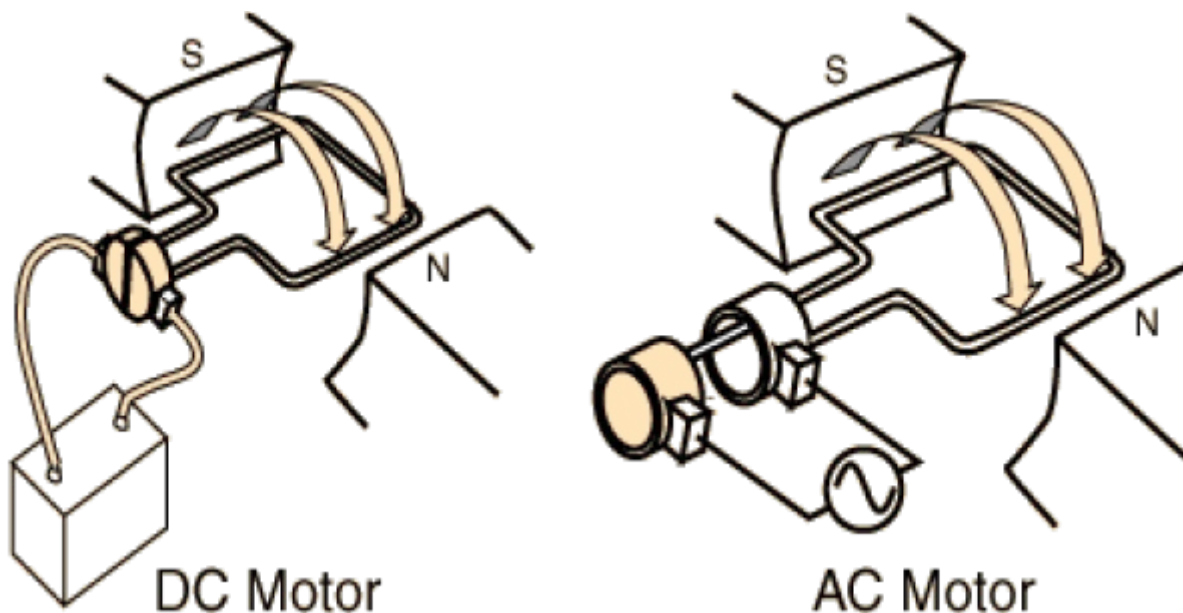
- Praktilisem on tekitada voolu seisvates (staatori) mähistes (lihtsam ühendada)
- Samas ka rootoris kasutatakse sageli elektro-, mitte püsimagnetit.
- > 95% elektrienergiast toodetakse elektromagnetilise induktsiooni teel.

$$\omega = 2\pi f$$

$$f = 50 \text{ Hz (mõnedes riikides 60 Hz)}$$

Mootorid

Enamus induktsioonil põhinevatest generaatoritest on samas kasutatavad ka mootorina

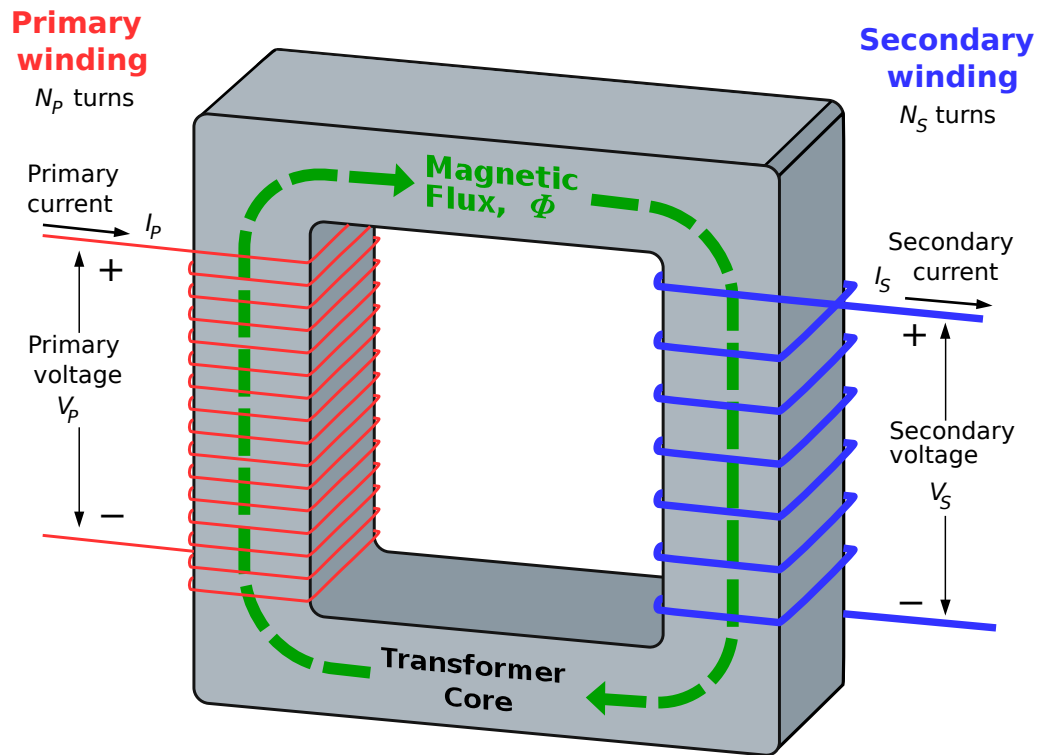


Alalisvoolumootoril (generaatoril) on sujuvuse (pinge ühtluse) huvides rootoril pooluskingi rohkem kui kaks:



Transformaator

ehk trafo

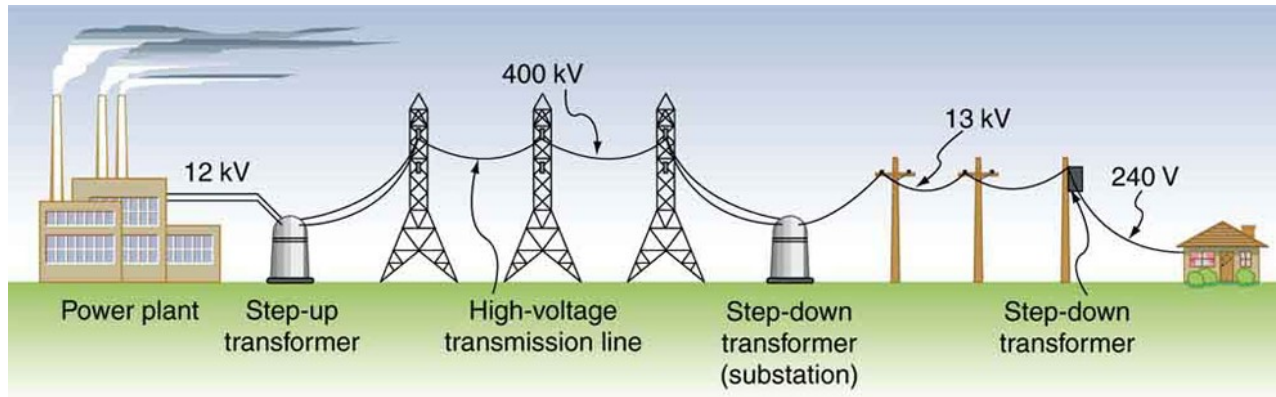


$$\frac{V_P}{V_S} = \frac{N_P}{N_S}$$

Energia jäävuse seadus:

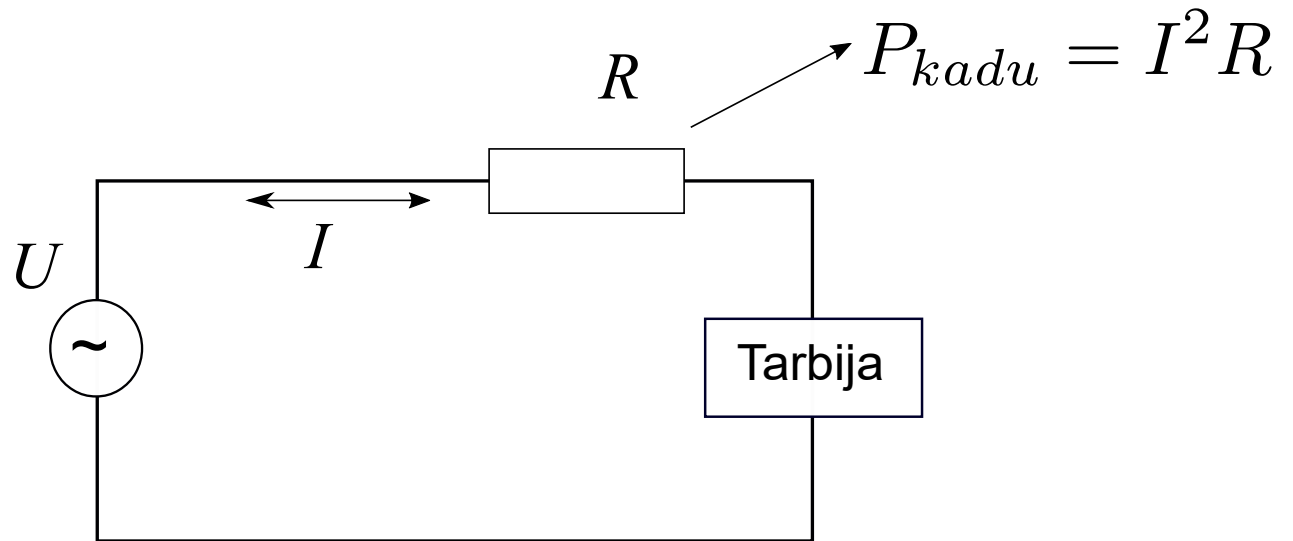
$$P = I_P V_P = I_S V_S$$

Elektrienergia ülekandmine



- Kõrge pinge:

$$P = UI = \text{const}$$



- Vahelduv- vs alalispinge?

Alalispinge puhul oleks:

- sünkroniseerimine võrguga lihtsam
- vähem kaablimaterjali (2 juhet 3 faasi asemel)
- kadusid mõnevõrra vähem

Aga:

- pingemuundamine keerukas / kulukas
- tuleb mingil hetkel vahelduvpingeks tagasi muuta

Elektri ja magnetismi ühendamine

- James Clerk Maxwell (1831-1879).
- Uurides Faraday töid, tuli järeldusele, et energia ülekanne elektri- ja magnetväljades toimub valguse kiirusel.
- See viis ta mõttele, et valgus võibki olla elektri- ja magnetvälja ühendus.
- Muutuv elektriväli tekitab muutuva magnetvälja ja vastupidi. Nii võivad nad levida ka vaakumis üksteist üleval hoides.
- Teooria esialgse kuju formuleeris Maxwell 1861-1862.



J. Clerk Maxwell

Maxwelli võrrandid



Mõnda neist me (veidi teisel kujul) juba tunneme.

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\varepsilon_0}$$

Gaussi teoreem, kirjeldab välja ümber elektrilaengu.

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0$$

Gaussi teoreem magnetvälja jaoks, kirjeldab asjaolu, et magnetväljal allikad („magnetlaengud“) puuduvad.

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$$

Faraday induksiooniseadus, kirjeldab, kuidas muutuv magnetväli tekitab muutuva elektrivälja.

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \left(\vec{J} + \varepsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \right)$$

Ampère'i seadus, kirjeldab, kuidas muutuv elektriväli tekitab muutuva magnetvälja.

$$\nabla = \left(\frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y}, \frac{\partial}{\partial z} \right) \quad - \text{gradientoperaator (nabla)}$$

$\vec{J}$ - voolutiheduse vektor

ρ - laengutihedus