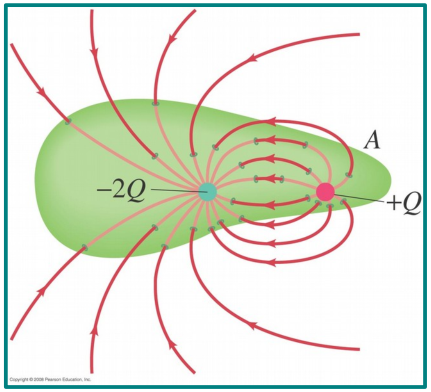
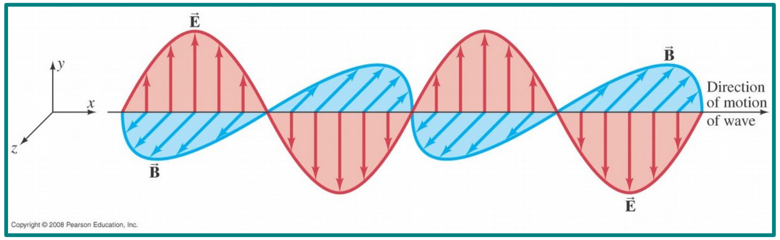
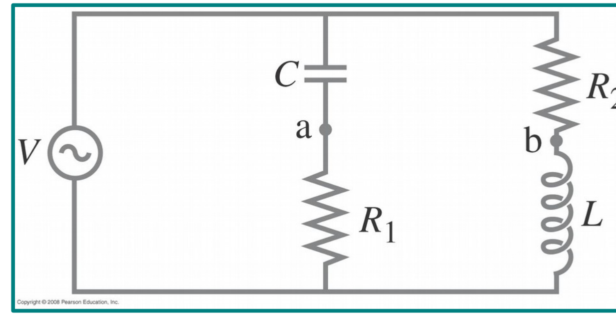
PHYS-A3131 Sähkömagnetismi (ENG1) (5 op)

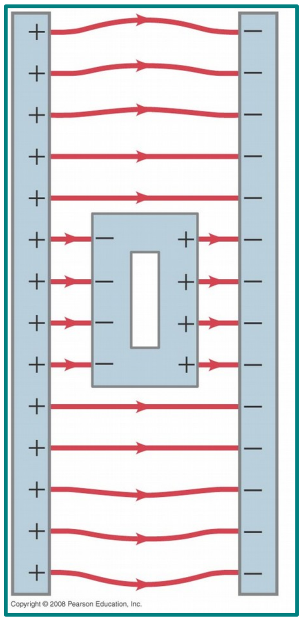


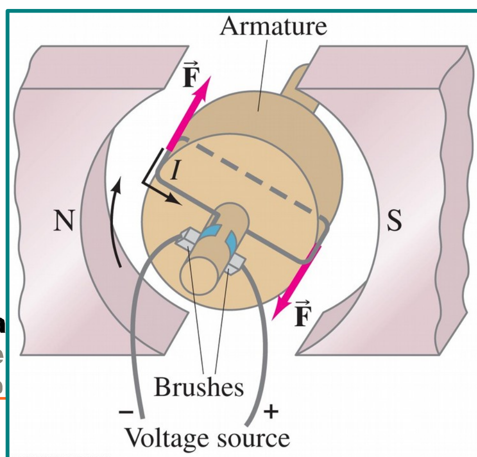


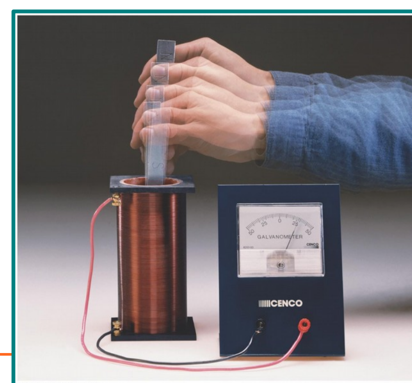


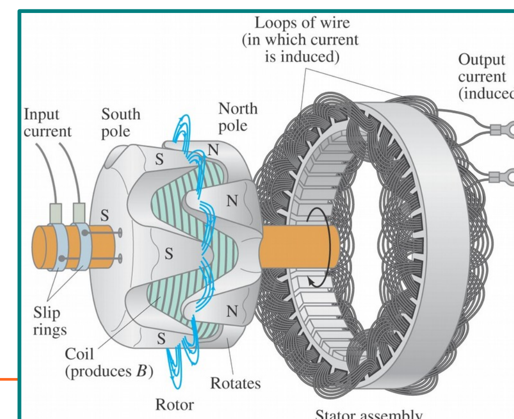
Sisältö:

- Sähköiset vuorovaikutukset
- Magneettiset vuorovaikutukset
- Sähkö- ja magneettikenttä
- Sähkömagneettinen induktio
- Sähkömagneettinen aaltoliike
- Ajasta riippuvat tasa- ja vaihtovirtapiirit









Osaamistavoitteet

<u>Kurssin suoritettuaan opiskelija osaa</u>

1. suorittaa fysikaalisia mittauksia ja analysoida saamiaan tuloksia,
2. laskea varausjakauman aiheuttaman sähkökentän ja potentiaalieron yksinkertaisissa geometrioissa,
3. laskea sähkövirran aiheuttaman magneettikentän ja varattuun hiukkaseen tai virtajohtimeen kohdistuvan voiman magneettikentässä,
4. määrittää induktiojännitteen sekä indusoituneen sähkökentän,
5. määrittää virrat, jännitteet ja tehot vaihtovirtapiireissä,
6. tunnistaa sähkömagneettisen säteilyn aaltoliikkeenä eteneviksi sähkö- ja magneettikentiksi.

Suorittaminen

Viisi komponenttia

1. *Harjoitukset*: 2 x 2 h / vko 5 viikon ajan, palautus STACK-järjestelmään MyCoursesissa
2. *Luentojen esitehtävät*: viikoittain ennen luentoja, palautus MasteringPhysics-järjestelmään MyCoursesissa
3. *Luennot*: 2 x 2 h / vko 5 viikon ajan
4. *Viikon kertaustehtävät*: palautus MyCoursesissa luentoviikon päätteeksi
5. *Laboratoriotyöt*: harjoittelupaketti + 2 työtä, 1 laboratoriossa ja 1 etänä

Arvostelu (yhteensä 100 pistettä)

1. Tentti: 6 tehtävää, enintään 30 pistettä
2. Harjoitukset: enintään 30 pistettä
3. Luentojen esitehtävät, enintään 10 pistettä
4. Viikon kertaustehtävät, enintään 10 pistettä
5. Laboratoriotyöt: suoritettava hyväksytysti: enintään 20 pistettä

Yhteensä enintään 4 x tenttipisteet

Järjestelmät

MyCourses

- Luentomateriaali
- Harjoitustehtävät ja niiden vastaukset
- Viikon kertaustehtävien palautus
- Etäopetuksen linkit
- Tiedotus, ym.

Stack (MC:ssä)

- Satunnaistetut versiot tehtävistä
- Tehtävien palautus
  - Palautuksen takaraja: harjoitusviikon jälkeinen keskiviikko klo 03.00

MasteringPhysics (MC:ssä)

- Luentojen aiheisiin johdattavia tehtäviä
- Palautetaan ennen tiistain luentoa

Tämän vuoden erikoisuudet

- Luennot järjestetään etäluentoina tavallisiin luentoaikoihin (ti 10-12, ke 10-12).
- Harjoitukset järjestetään etäopetuksena. Harjoitusryhmiä on 4 ja kunkin koko on 50 opiskelijaa.
- Laboratoriotöitä järjestetään yksi työ laboratoriossa ja toinen työ etänä.
- Helmikuun tentti järjestetään etätenttinä. Tämän vuoksi arvosteluasteikko on hyväksytty / hylätty.

<u>Ilmoittautuminen Oodissa</u>

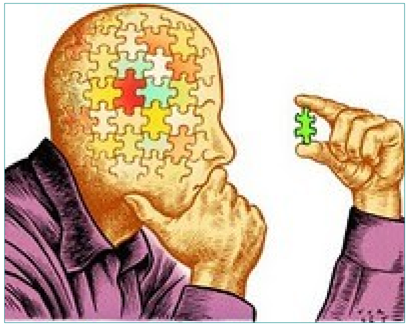
- Ilmoittaudu kurssin luennoille.
- Ilmoittaudu *yhteen* harjoitusryhmään, jos aikomuksenasi on käydä harjoituksissa.
- Ilmoittaudu *yhteen* laboratorioryhmään

Viikon rakenne

- Luennot:
  - Luentojen esitehtävä ennen tiistain luentoa (MC/MP)
  - Luennot ti ja ke klo 10-12 (MC/Zoom)
  - Viikon kertaustehtävä viikon loppuun mennessä (MC)
- Harjoitukset: 2 x 2h / vko: Zoom ja Zulip, palautus Stackiin (MC)
  - Sarja auki ke klo 6.00 – seuraavan viikon ke klo 3.00
- Laboratoriotyöt: harjoittelupaketti, yksi lähilabra ja yksi etälabra

Luennot

- Luennoilla keskeisiä ovat kurssin käsitteet → näiden hallintaa testataan myös tentissä
- Luennoilla käytetään metodia, jossa kaikki läsnäolijat pääsevät osallistumaan
- Käsitteiden oppiminen paranee, jos niitä joutuu käyttämään aktiivisesti



Fysiikan opinnot kanditasolla

Termodynamiikka (periodi I)

Pakolliset

Sähkömagentismi (periodi III)

Aineen rakenne (periodi IV / I+II)

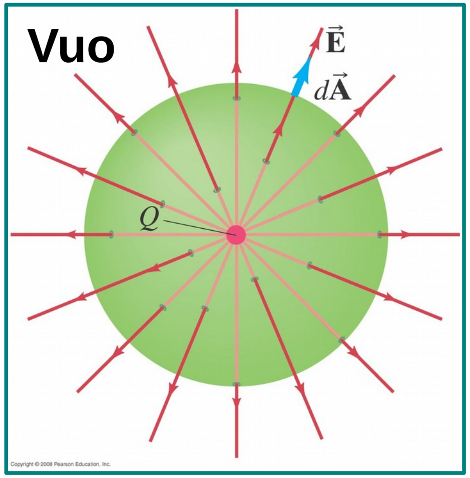
Sivuaine

- Termodynamiikka ja statistinen fysiikka
- Sähkömagneettisen kenttäteorian perusteet
- Kvanttimekaniikka
- Materiaalifysiikka

Tarvitaanko matematiikkaa?

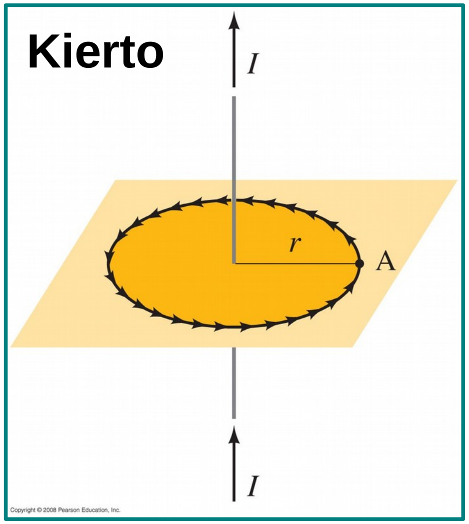
Sähkömagnetismin teoria on kirjoitettu erilaisella matematiikalla kuin esimerkiksi termodynamiikan (tai osin mekaniikankin).

1. *Vektorikentät ja niiden integraalit*

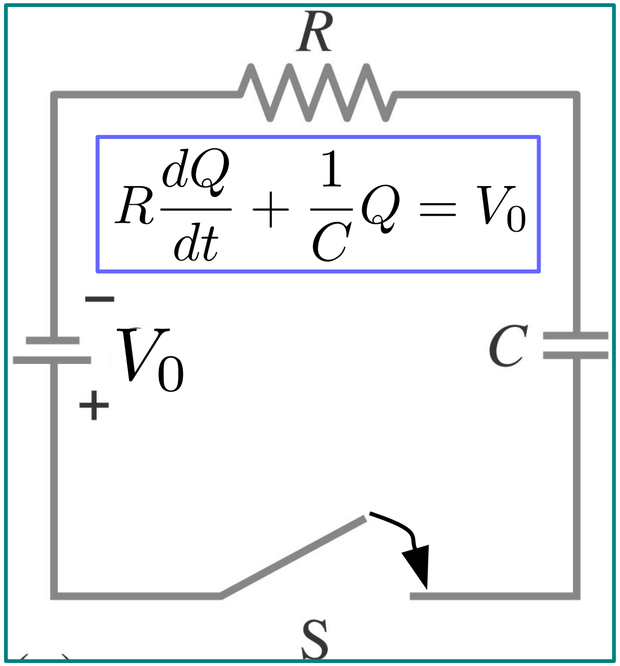


$$\int_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \int_A \vec{E} \cdot \vec{n}\, dA$$

$$\oint \vec{B} \cdot d\vec{\ell} = \oint \vec{B} \cdot \vec{t}\, d\ell$$



2. *Differentiaaliyhtälöt*



$$R\frac{dQ}{dt} + \frac{1}{C}Q = V_0$$

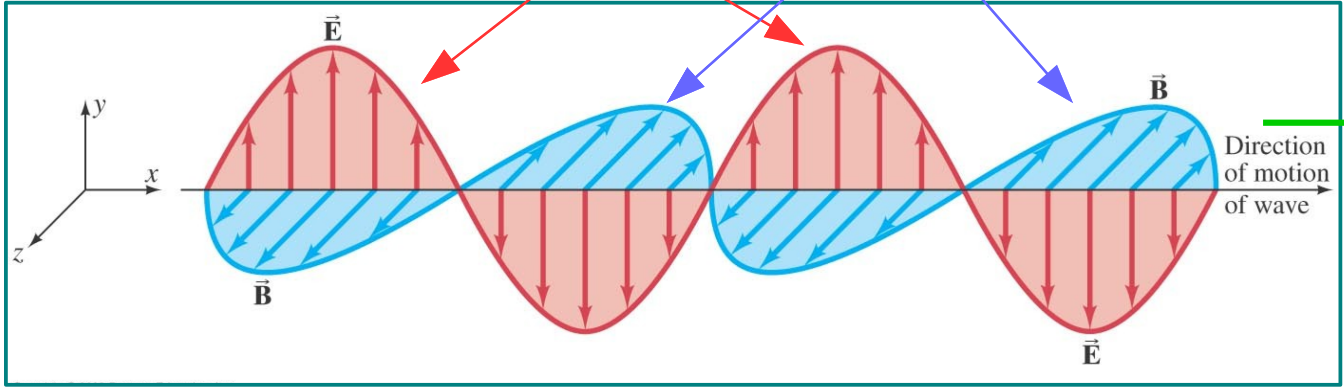
MC:ssä on koko kurssin ajan auki bonusharjoitus, jossa näitä käsitteitä voi harjoitella

Osa I: Sähkö- ja magnetismioppi sekä sähkömagneettinen aalto

Sähkö- ja magnetismioppia säätelevät Maxwellin yhtälöt (4 kpl) ja Lorenzin voima (varaukseen kohdistuva voima)

Näiden seurauksena syntyy (mm.) sähkömagneettinen aalto

Aallossa on kohtisuoria sähkö- ja magneettikenttiä



Aalto etenee tähän suuntaan valon nopeudella

Edetessään aalto kuljettaa mukanaan energiaa ja liikemäärää

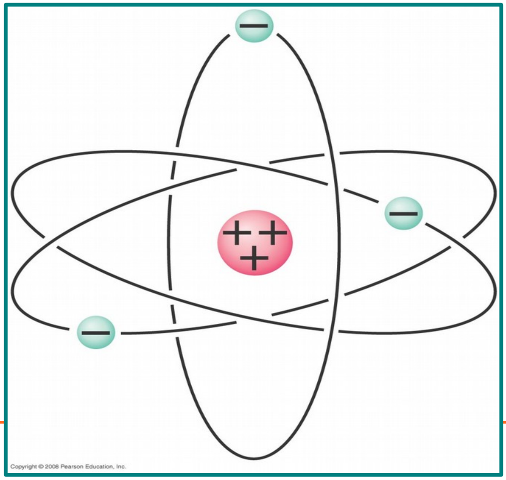
Kysymyksiä seuraaville viikoille:

- Mistä tällainen aalto oikein koostuu eli mitä ne kentät ovat?
- Miksi aalto yleensä etenee? Miksi se etenee juuri valon nopeudella?
- Miten aalto syntyy? Millaiset ilmiöt luovat kentät?

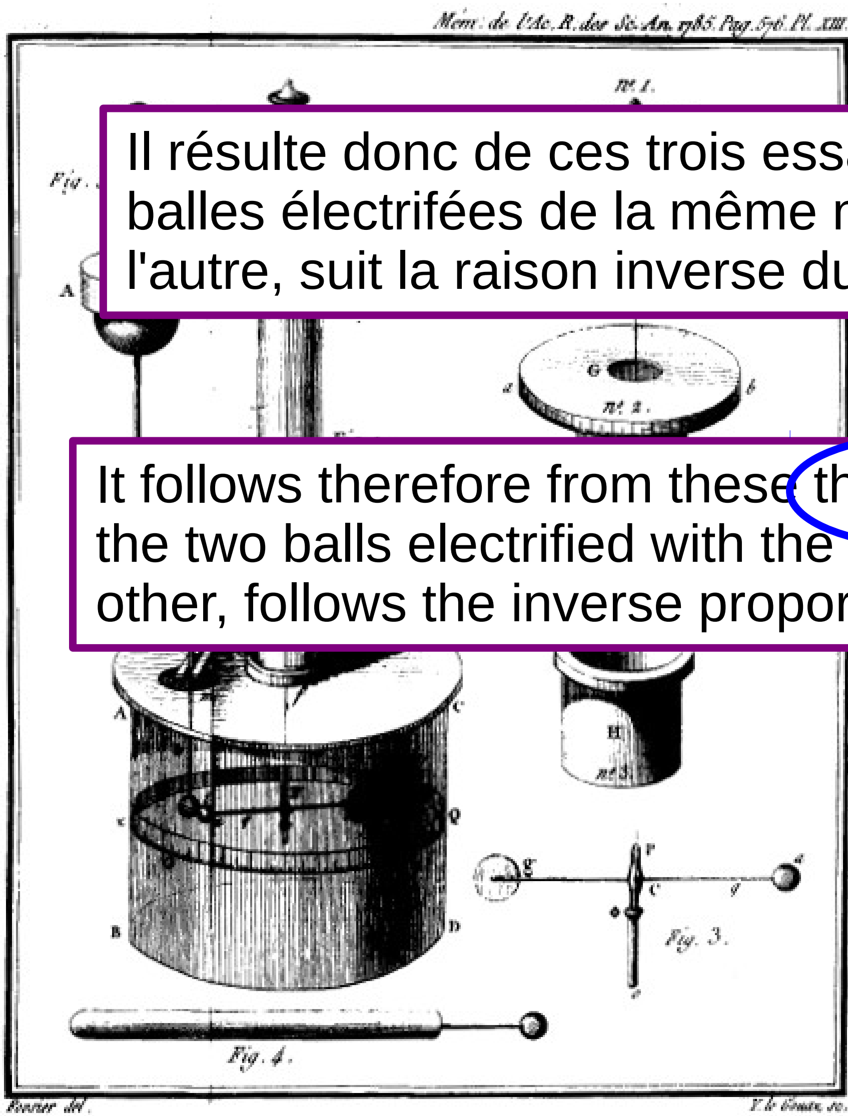
Sähköstatiikka

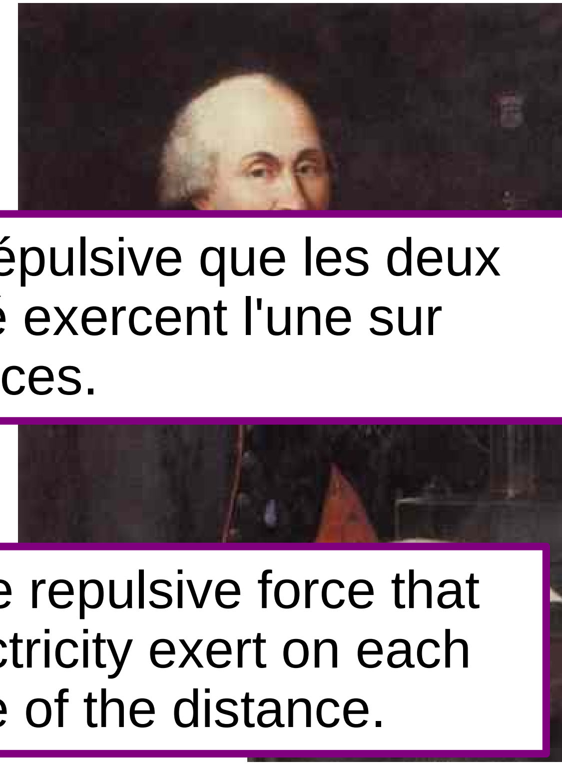
Mitä tiedämme sähköstä?

1. *Sähkövaraus* on aineen ominaisuus. Sitä on kahdenlaista: *positiivista* ja *negatiivista*.
2. Sähkövaraus ilmenee varattujen kappaleiden välisenä voimana, ns. *Coulombin voimana*.
3. Sähköisen voiman välittäjä on *sähkökenttä*.
4. Kun sähkövarausta siirretään sähkökentässä, tehdään työtä. Koska staattinen sähkökenttä on konservatiivinen, samalla muuttuu varauksen potentiaalienergia. *Sähköpotentiaali* kuvaa kentän osuutta muutoksessa.



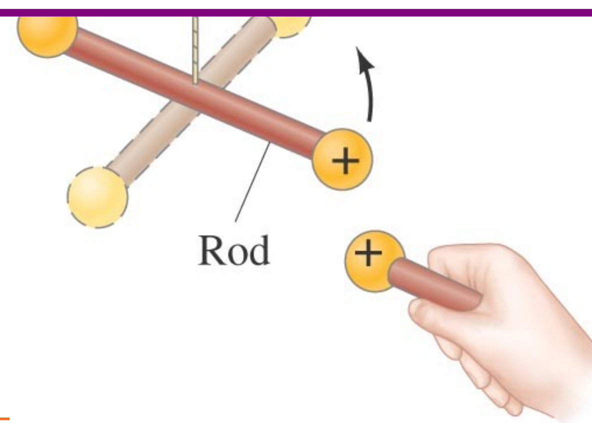
Sähköstatiikka: Coulombin voima





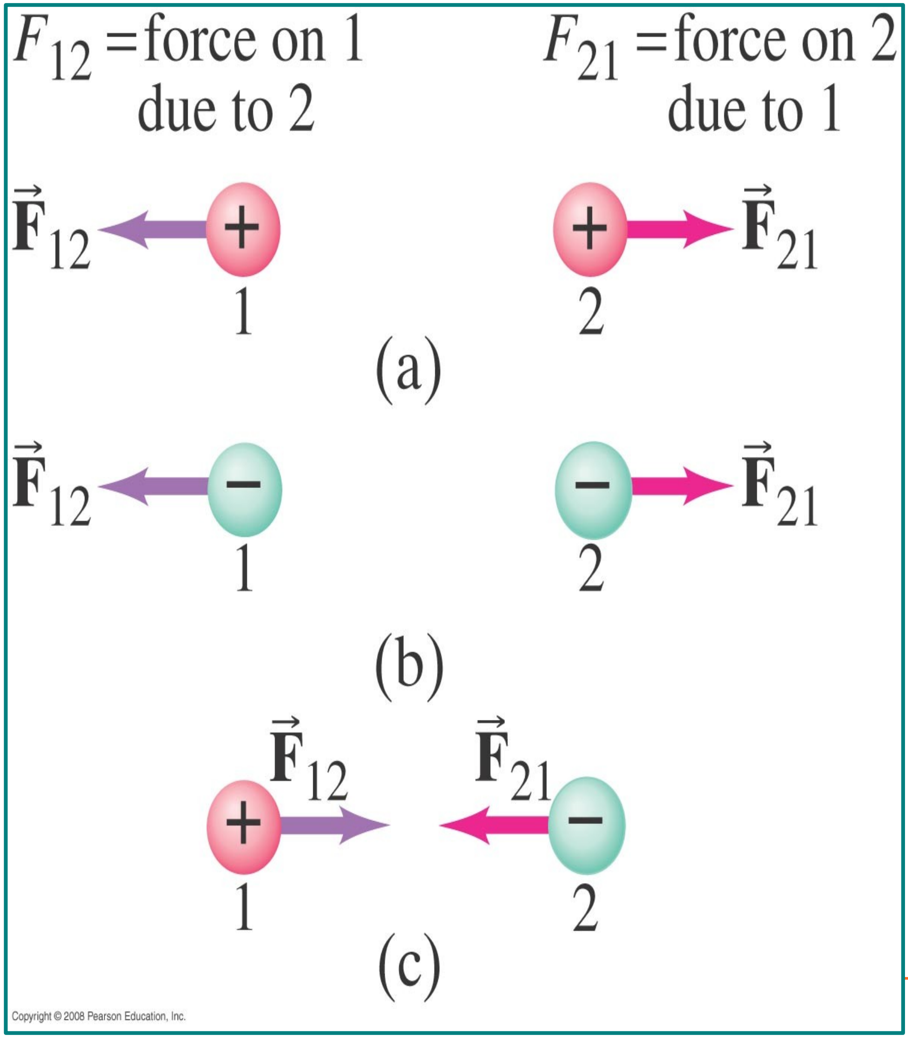
Il résulte donc de ces trois essais, que l'action répulsive que les deux balles électrifées de la même nature d'électricité exercent l'une sur l'autre, suit la raison inverse du carré des distances.

It follows therefore from these three tests, that the repulsive force that the two balls electrified with the same kind of electricity exert on each other, follows the inverse proportion of the square of the distance.



ustin de Coulomb
6 – 23.8. 1806)

Sähköstatiikka: Coulombin voima



$$F_{12} = k\frac{Q_1 Q_2}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q_1 Q_2}{r^2}$$

$$k = 8{,}99 \cdot 10^9 \ \mathrm{Nm^2/C^2}$$

$$\epsilon_0 = 8{,}85 \cdot 10^{-12} \ \mathrm{C^2/Nm^2}$$

Tyhjiön permittiivisyys

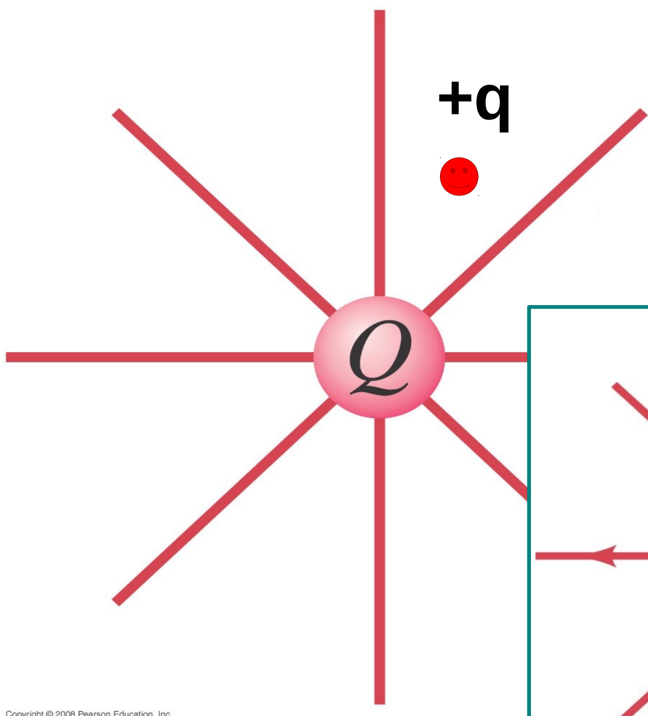
$$\vec{F}_{12} = k\frac{Q_1 Q_2}{r_{12}^2}\hat{r}_{12}$$

Varauksesta toiseen osoittava yksikkövektori

Sähköstatiikka: Sähkökenttä[1]

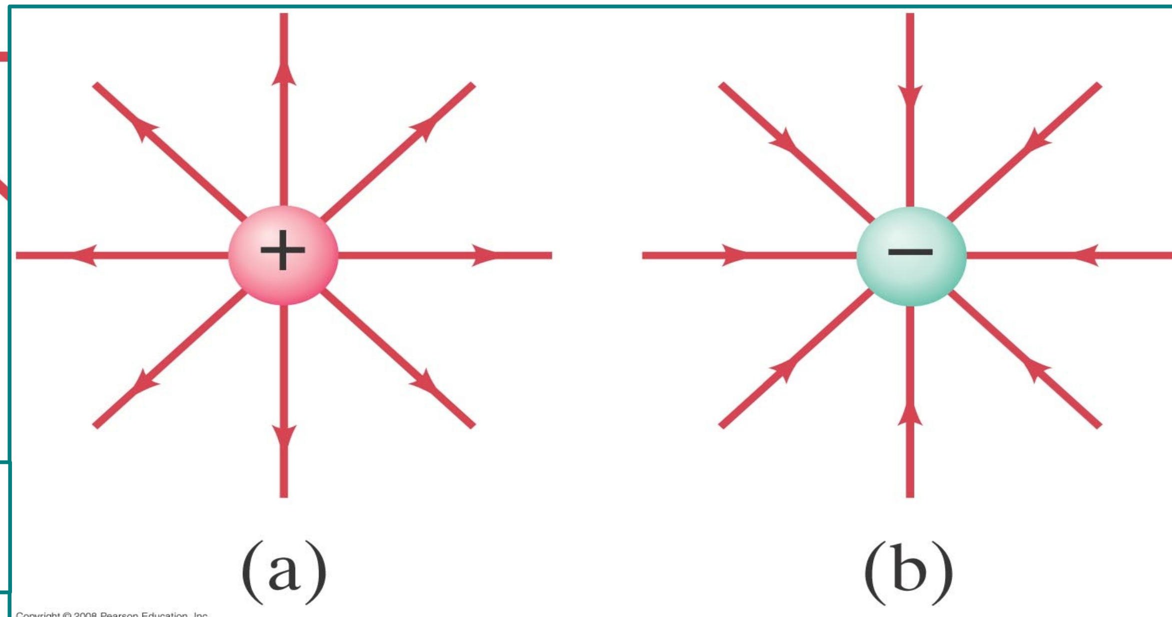
Mutta miten varaukset vaikuttavat toisiinsa?

Vastaus***:*** ***sähkökentän*** avulla
(Michael Faraday, FRS (1791 – 1867))



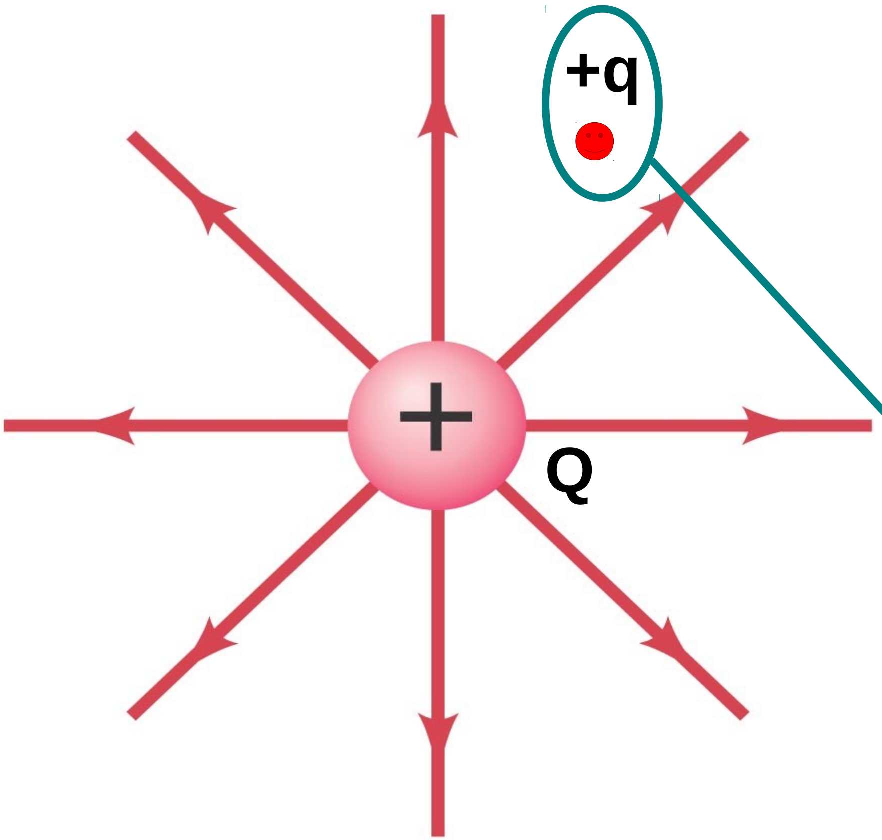
$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Jokaisesta varauksesta lähtee sähkökenttä, jonka muut varaukset tuntevat Coulombin voimana.



[1]Suomeksi myös joskus *sähkökentän voimakkuus*

Sähköstatiikka: Sähkökenttä



Pistevarauksen kenttä:

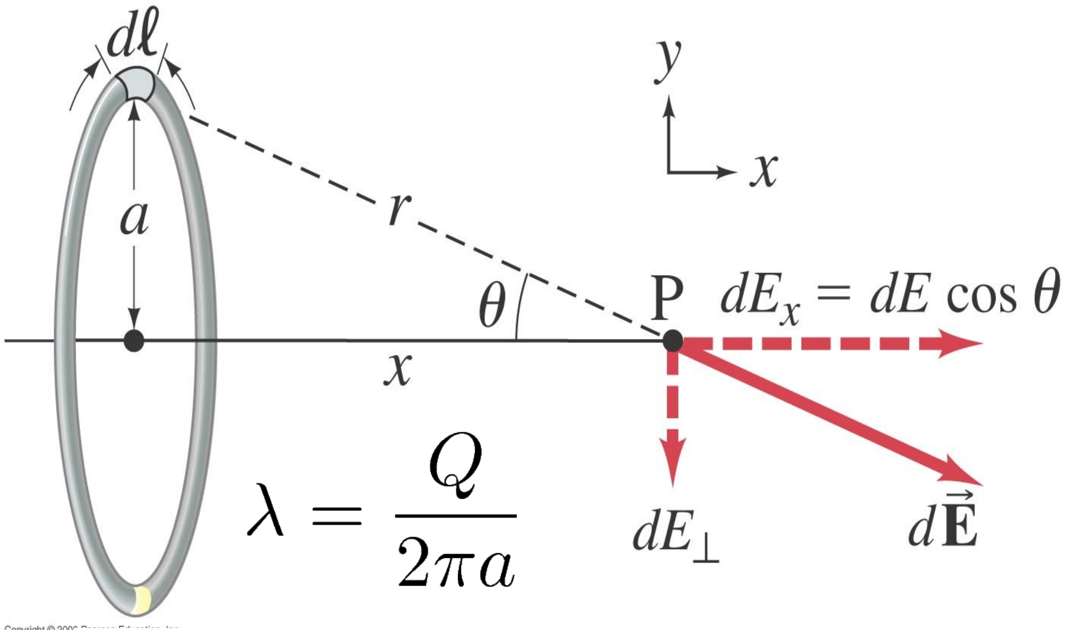
$$F = k\frac{qQ}{r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{qQ}{r^2}$$

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

Testivaraus

Sähköstatiikka: Sähkökenttä

Useamman varauksen aiheuttama kenttä lasketaan yhteen (superpositioperiaate)



$$dE = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{dQ}{r^2}$$

$$dQ = \lambda\, d\ell$$

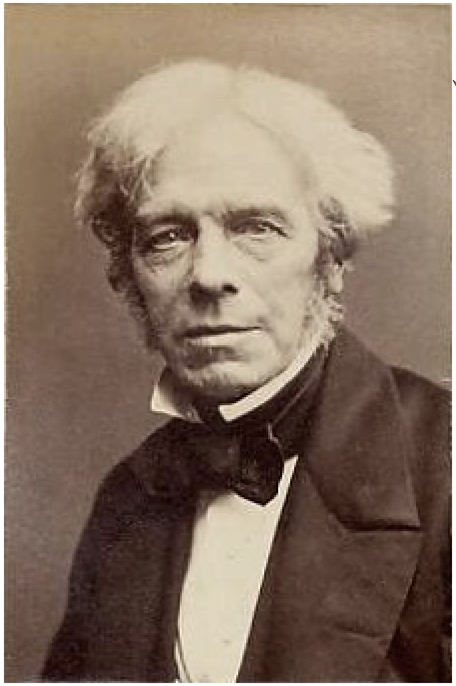
$$\lambda = \frac{Q}{2\pi a}$$

$$(x^2 + a^2)^{\frac{1}{2}} \qquad \frac{x}{r}$$

$$E = E_x = \int dE_x = \int dE\cos\theta = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\lambda\int\frac{d\,\ell}{r^2}\cos\theta$$

$$E = \frac{\lambda}{4\pi\epsilon_0}\frac{x}{(x^2+a^2)^{\frac{3}{2}}}\int_0^{2\pi a} d\,\ell = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Qx}{(x^2+a^2)^{\frac{3}{2}}}$$

Sähköstatiikka: Sähkökenttä ja Occamin partaveitsi



Michael Faraday
FRS (1791 – 1867)

Sähkökenttä selittää, *miten* sähkövaraukset vuorovaikuttavat.
Se on yksinkertaisin ja käyttökelpoisin selitys.
Lisäksi samanlainen kenttä selittää *gravitaation*.
Kaikki väliaineeseen perustuvat selitykset ovat monimutkaisempia.

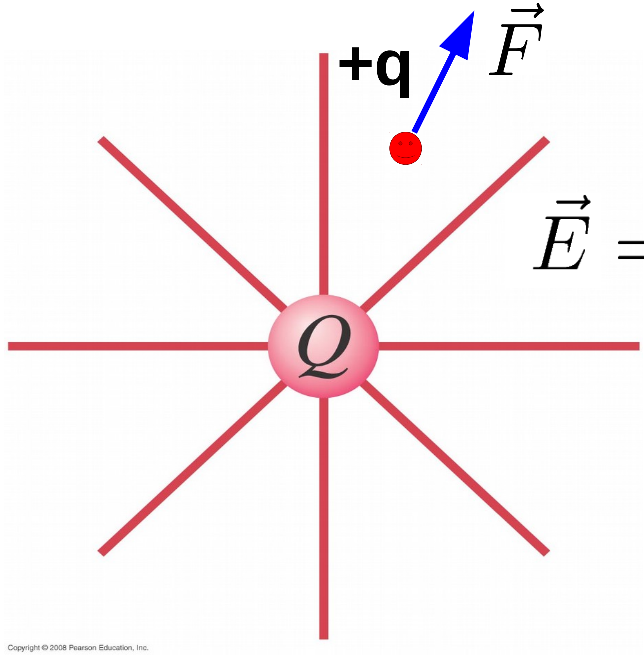
Ilmiötä selittävien tekijöiden määrän tulee olla mahdollisiman vähäinen.
Teorioiden tulee olla mahdollisimman yksinkertaisia.

Wilhelm Ockhamilainen
(n. 1285 - 1349)

Vektorikenttä

Fys.

- Selittää vuorovaikutuksen
- On fysikaalinen objekti
- Syy ja seuraukset mielenkiintoisia



$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q}$$

Mat.

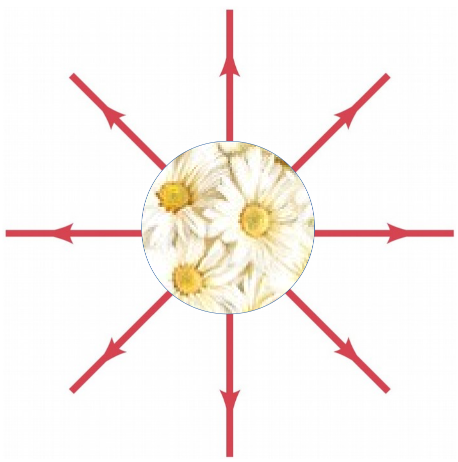
$$\vec{E}(x,y,z) = E_x(x,y,z)\hat{\imath} + E_y(x,y,z)\hat{\jmath} + E_z(x,y,z)\hat{k}$$

- Kuvaus $f : \mathbb{R}^3 \to \mathbb{R}^3$
- Annettu, ei synny mistään
- Ominaisuudet mielenkiintoisia

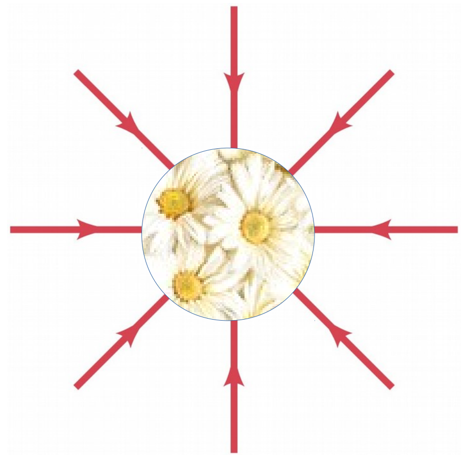
Oikeastaan sama asia. Molemmilla voi laskea. Niitä voi mm.:
- Derivoida
- Integroida

Sähkökenttä: Minkälainen kokonaisvaraus on piilossa?

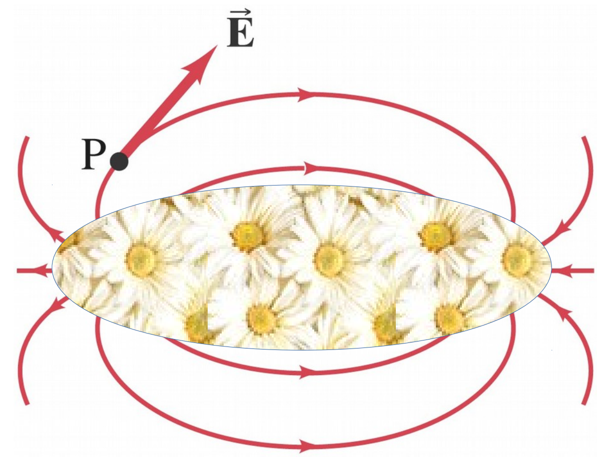
A



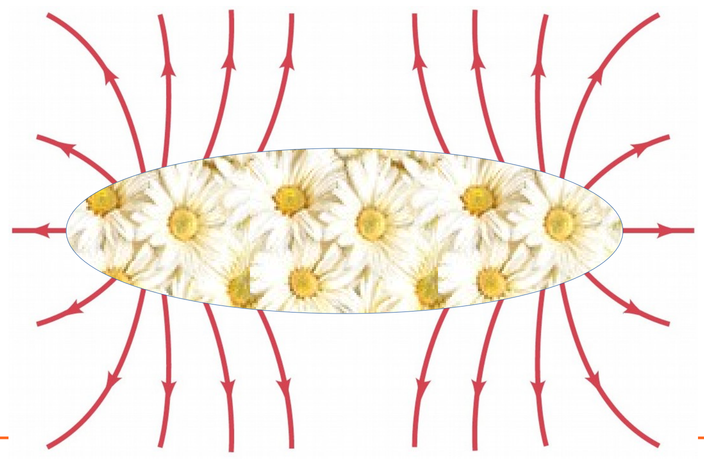
B



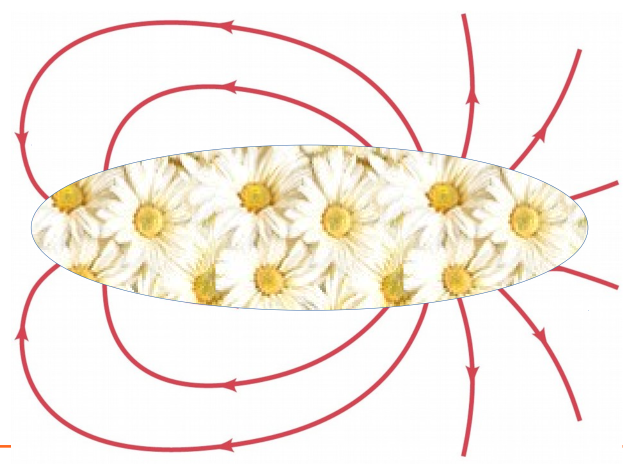
C



D



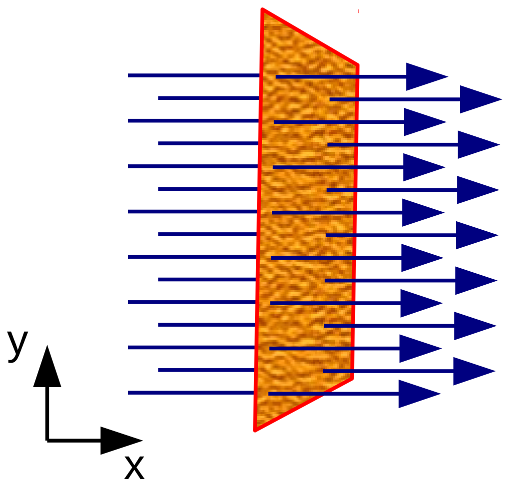
E



Sähkökenttä: Vuo

Kentän vuo **pinnan** läpi kuvaa sitä, kuinka suuri on pinnan läpäisevä kokonaiskenttä.

Tapaus 1:



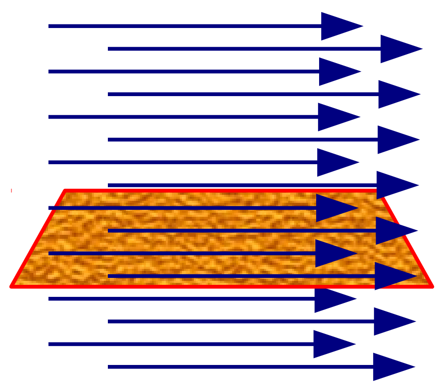
Kenttä: $\vec{E} = E\vec{i}$

Pinta-ala: A

Pinnan yksikkönormaali:

$$\hat{n} = \vec{i}$$

Tapaus 2:



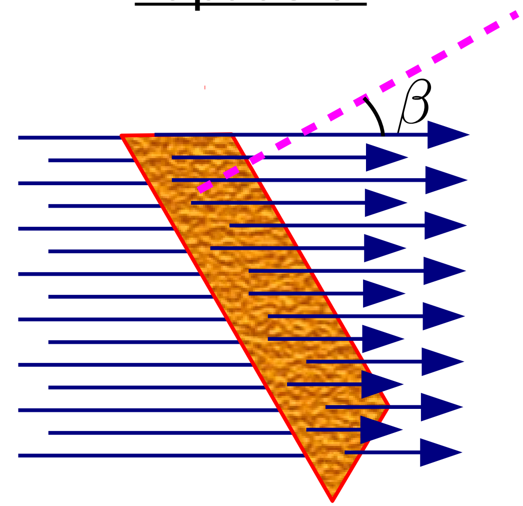
Kenttä: $\vec{E} = E\vec{i}$

Pinta-ala: A

Pinnan yksikkönormaali:

$$\hat{n} = \vec{j}$$

Tapaus 3:



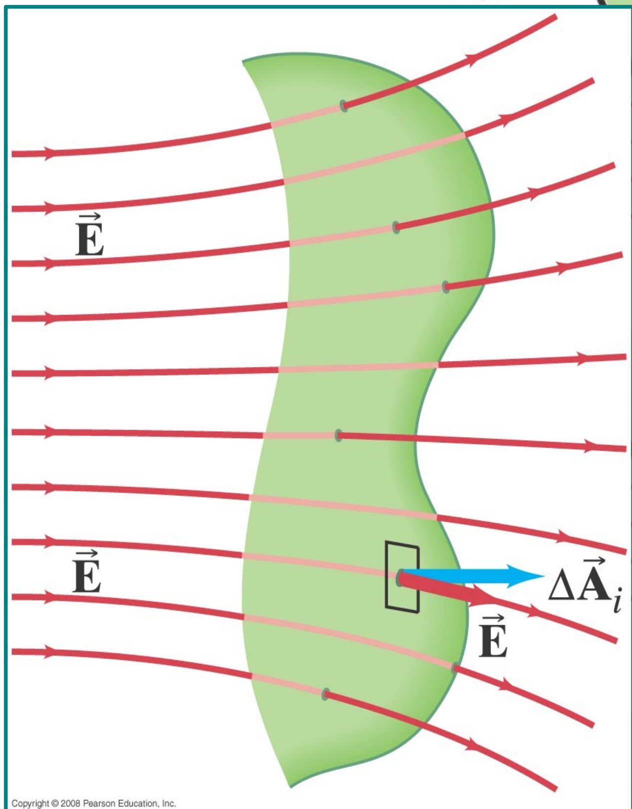
Kenttä: $\vec{E} = E\vec{i}$

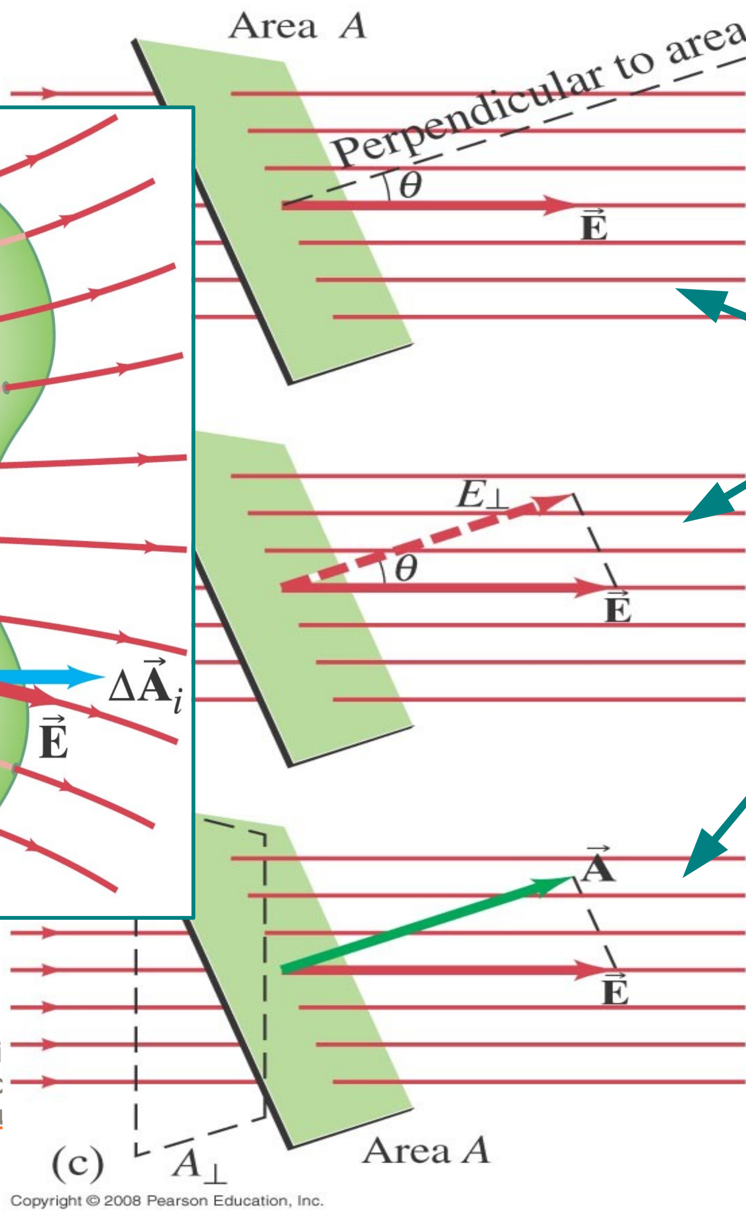
Pinta-ala: A

Pinnan yksikkönormaali:

$$\hat{n} = \cos\beta\vec{i} + \sin\beta\vec{j}$$

Sähkökenttä: Vuo ja Gaussin laki





Kentän *vuo* levyn läpi:

$$\Phi_E = EA\cos\theta$$

eli

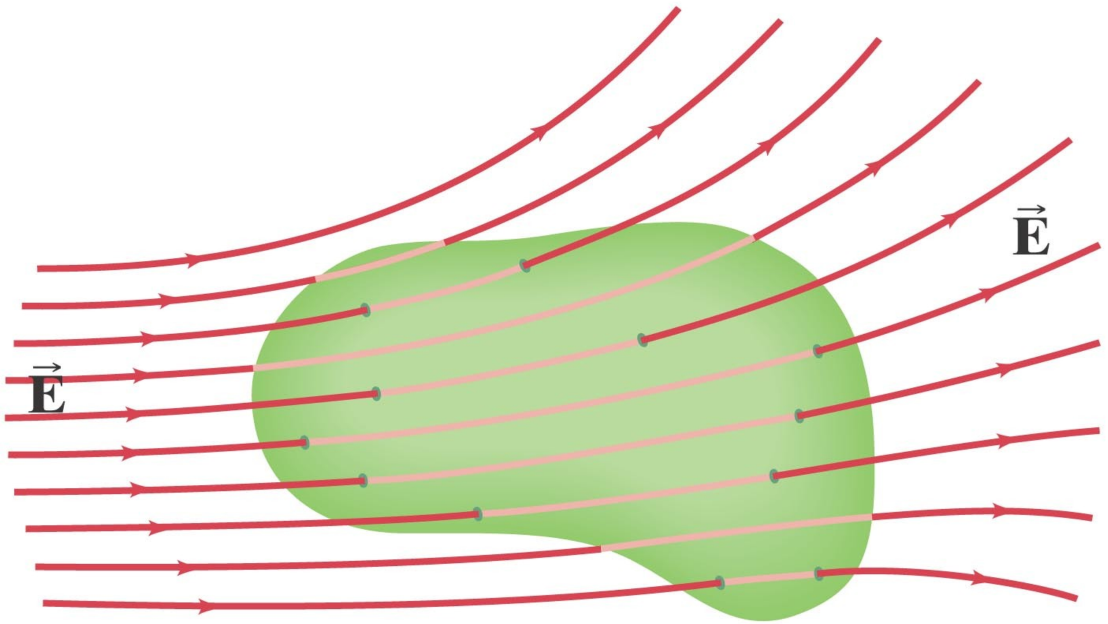
$$\Phi_E = \vec{E}\cdot\vec{A}$$

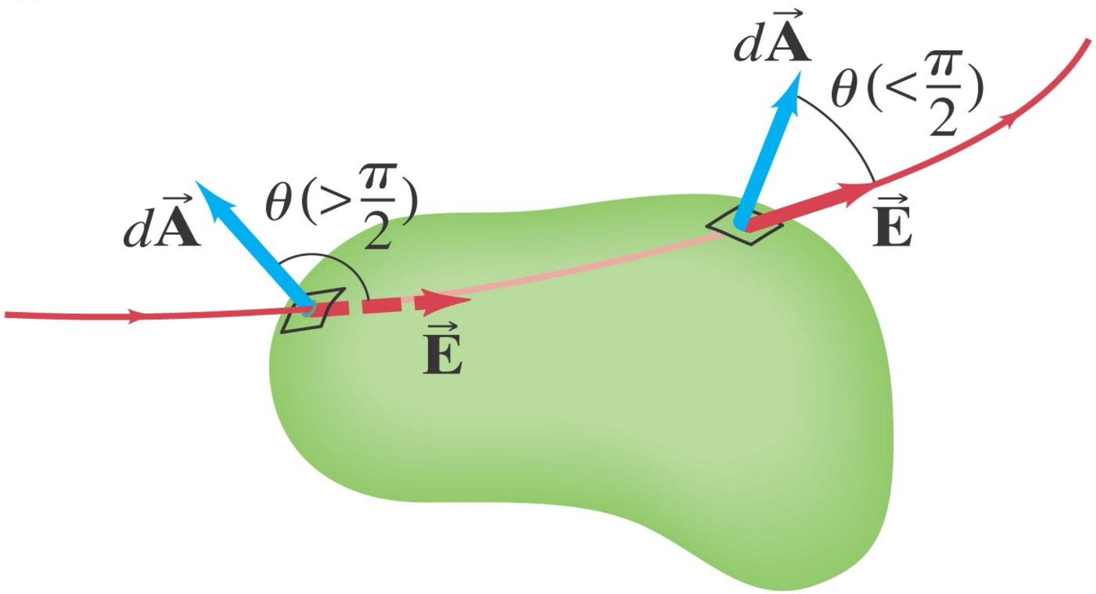
ja yleisesti

$$\Phi_E = \int_A \vec{E}\cdot d\vec{A}$$

$$= \int_A \vec{E}\cdot\vec{n}\,dA$$

Sähkökenttä: Vuo ja Gaussin laki





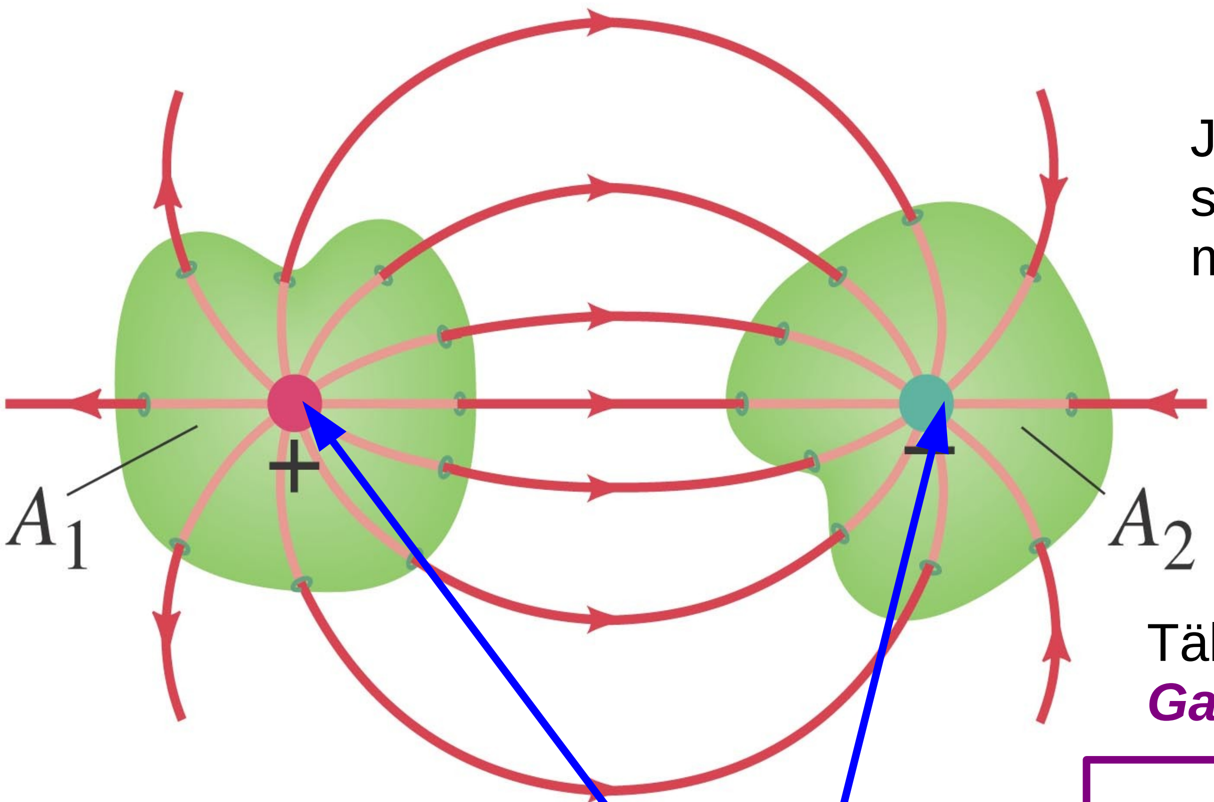
Sähkökenttä lähtee *sähkövarauksesta* ja päättyy siihen.

Ilman varausta *suljetusta pinnasta* menee yhtä suuri *vuo* sisään kuin tulee ulos:

$$\Phi_E = \int_A \vec{E} \cdot d\vec{A}$$

$$= \int_A \vec{E} \cdot \vec{n}\, dA = 0$$

Sähkökenttä: Vuo ja Gaussin laki



Jos pintojen sisälle jää sähkövarausta, tilanne muuttuu.

Tällöin pätee
Gaussin laki sähkökentälle:

$$\boxed{\Phi_E = \int_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\mathrm{encl}}}{\epsilon_0}}$$

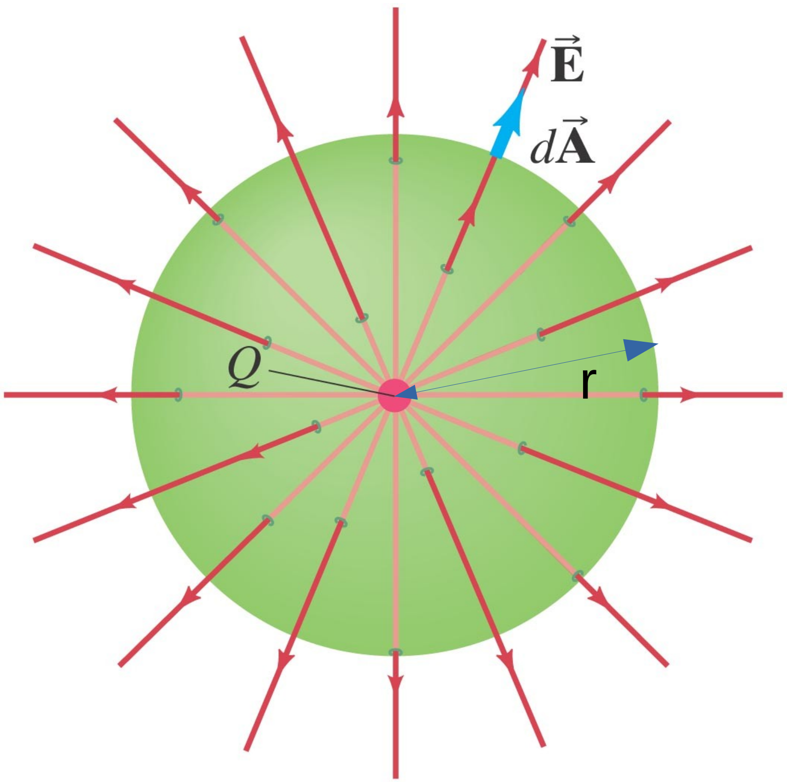
Pinnan (usein kuvitteellisen) sisään jäänyt varaus.

Sähkökenttä: Gaussin laki

Mitä tämä tarkoittaa?

$$\boxed{\Phi_E = \int_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \frac{Q_{\mathrm{encl}}}{\epsilon_0}}$$

1. Sähkökenttä syntyy yhä sähkövarauksesta. (hyvä)
2. ~~Onko tämä~~ sama kenttä kuin aiemmin? (hyvä~~, jos olisi)~~

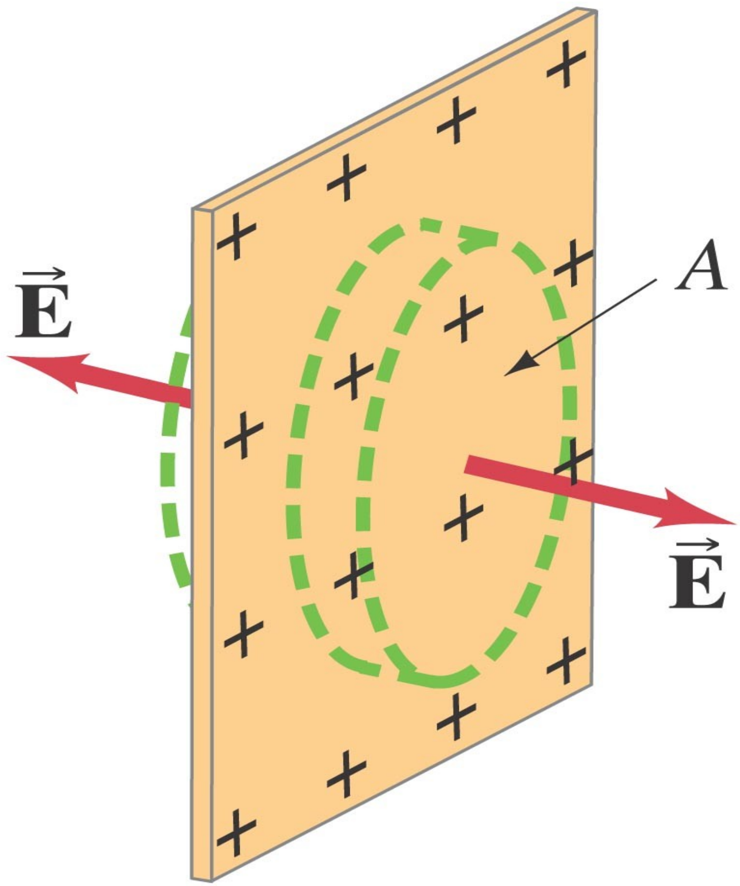


$$\Phi_E = \int_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = \int_{\mathrm{pallo}} E\, dA$$

$$= E \int_{\mathrm{pallo}} dA = E\, 4\pi r^2$$

$$E = \frac{Q_{\mathrm{encl}}}{\epsilon_0} \frac{1}{4\pi r^2} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_{\mathrm{encl}}}{r^2}$$

Sähkökenttä: Gaussin laki



Ääretön varattu eristelevy,
pintavaraustiheys eli varauskate
σ = Q/A

$\vec{E} \,||\, \vec{n}$ E riippuu vain etäisyydestä levyyn

$$\int_A \vec{E} \cdot d\vec{A} = E \int_A dA = 2EA$$

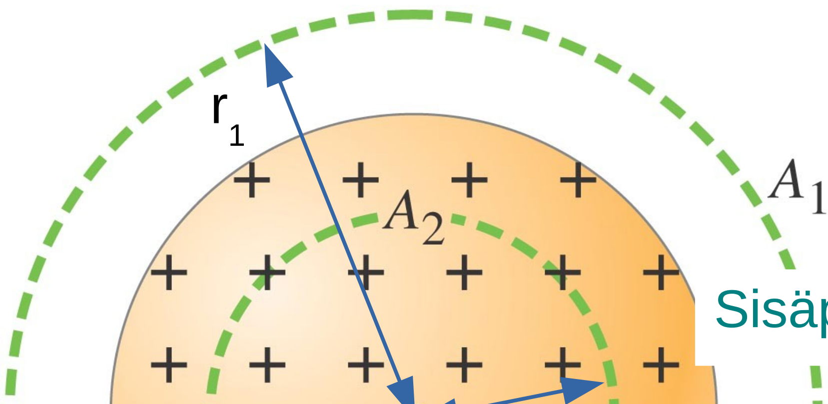
$$2EA = \frac{Q}{\epsilon_0} = \frac{\sigma A}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{\sigma}{2\epsilon_0}$$

Sähkökenttä: Gaussin laki

Symmetria ➡ $\begin{cases} \vec{E} \,||\, \vec{r} \\ E = E(r) \end{cases}$

Tasaisesti varattu eristepallo varaus = Q



Ulkopuolella: pinta A_1

$$\int_{A_1} \vec{E} \cdot d\vec{A} = E(4\pi r_1^2) = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

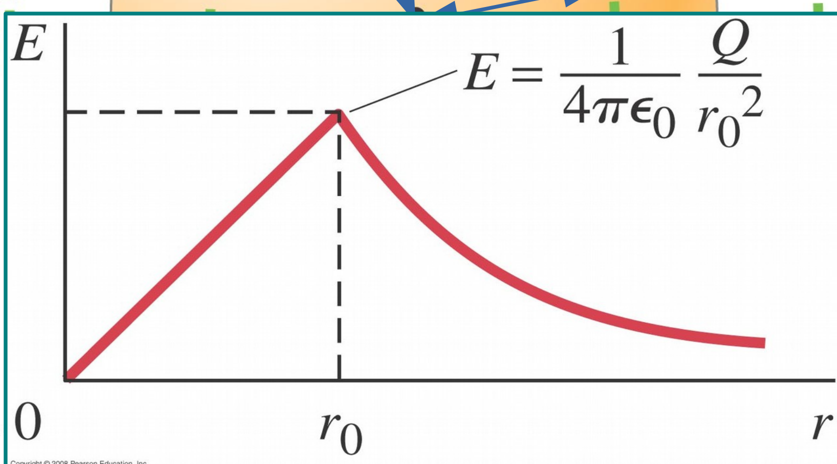
$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r_1^2}$$

Sisäpuolella: pinta A_2

$$Q_{\text{encl}} = \frac{V_2}{V}Q = \frac{r_2^3}{r_0^3}Q$$

$$E(4\pi r_2^2) = \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0} = \frac{r_2^3}{r_0^3}\frac{Q}{\epsilon_0}$$

$$E = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{Q}{r_0^3}r_2$$



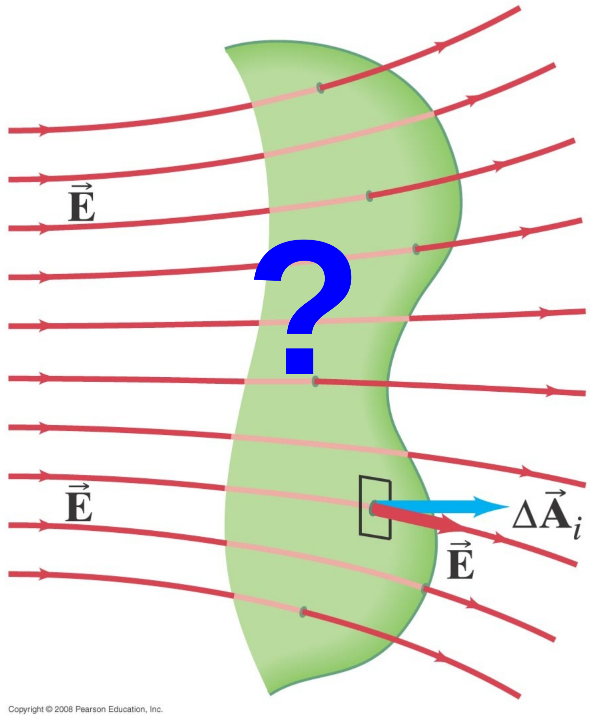
Gaussin laki: Onko vuolla väliä

Tarvitaanko vuon käsitettä ja koko Gaussin lakia?

Vuolla on tärkeä rooli:

1. Sähköstatiikassa
2. Magnetismissa
3. Lämmönjohtumisopissa
4. Virtausopissa
5. Kvanttimekaniikassa

Oleellinen osa tekniikassa merkittävää fysiikkaa

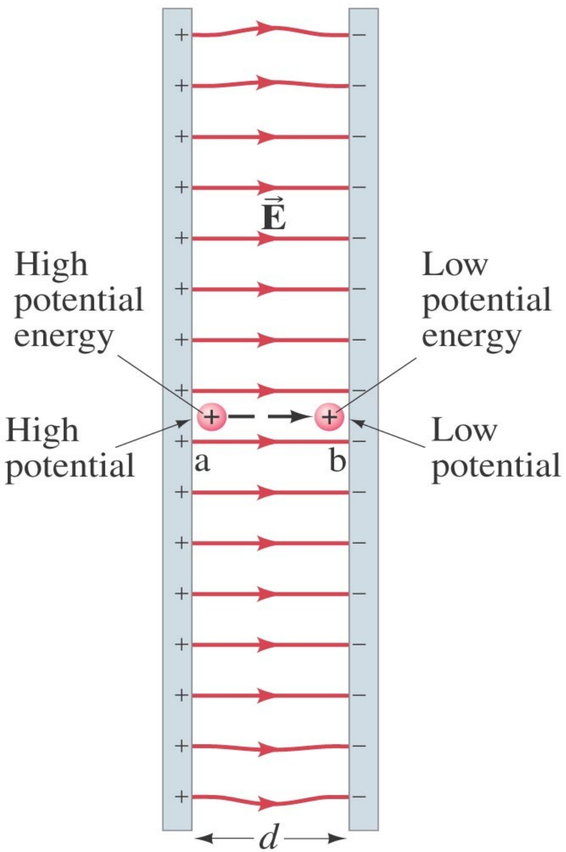


Lisäksi: Gaussin lauseesta (mat.) seuraa, että

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\partial}{\partial x}E_x + \frac{\partial}{\partial y}E_y + \frac{\partial}{\partial z}E_z = \frac{\rho}{\epsilon_0}$$

eli tulipa taas (osittais)differentiaaliyhtälö.

$$\Phi_E = \int_A \vec{E} \cdot d\vec{A} \stackrel{?}{=} \frac{Q_{\text{encl}}}{\epsilon_0}$$



Sähkökenttä: työ ja potentiaalienergia

Kun sähkökenttä kohdistaa voiman varaukseen ja varaus liikkuu, tehdään työtä.

Paljonko?

$$W = \int_A^B \vec{F} \cdot d\vec{\ell} = \int_A^B q\vec{E} \cdot d\vec{\ell}$$

Sähkövoima on *konservatiivinen*, joten on olemassa *sähköinen potentiaalienergia U*

$$W = q\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = -(U_B - U_A) = -q\left(\overbrace{\frac{U_B}{q}}^{V_B} - \overbrace{\frac{U_A}{q}}^{V_A}\right)$$

ΔV on *(sähkö)jännite*

V on *(sähkö)potentiaali*

$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{\ell} = \Delta V$$

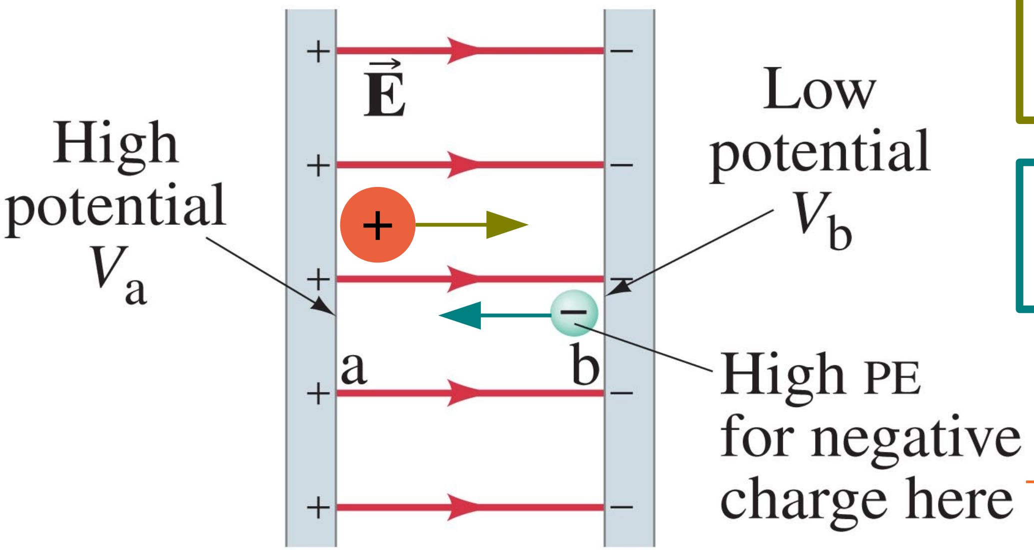
Sähkökenttä, potentiaali ja työ

Aiemmasta (ja mekaniikasta) tiedämme nyt:

1. Sähkökentän varaukseen tekemä työ W = -q ΔV
2. Kenttä saadaan potentiaalin avulla:

3D
$$\vec{E} = -\nabla V = -\frac{\partial}{\partial x} V \vec{\imath} - \frac{\partial}{\partial y} V \vec{\jmath} - \frac{\partial}{\partial z} V \vec{k}$$

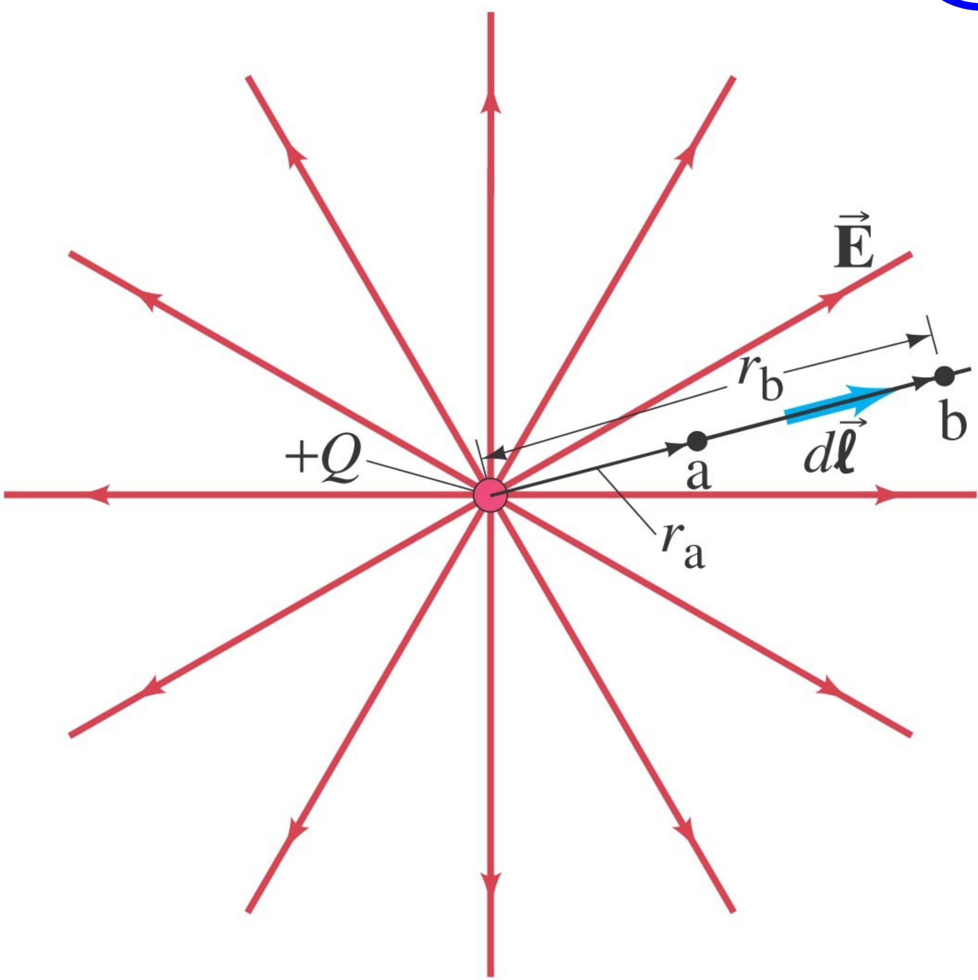
1D
$$E = -\frac{d}{dx} V$$



Positiivinen varaus: q > 0, ΔV < 0
→ W = -q ΔV > 0

Negatiivinen varaus: q < 0, ΔV > 0
→ W = -q ΔV > 0

Potentiaali ja sähkökenttä: pistevaraus



$$V_b - V_a = -\int_a^b \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$$

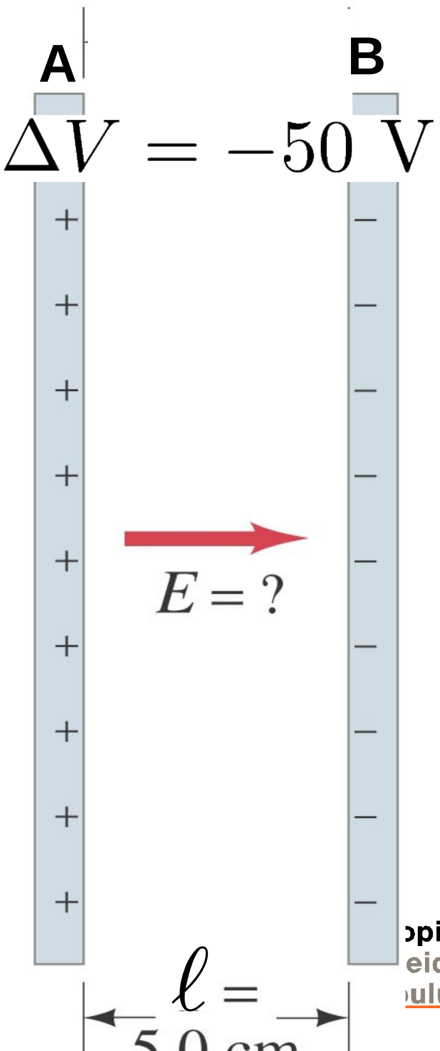
$$= -\frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \int_{r_a}^{r_b} \frac{1}{r^2}\, dr$$

$$= \frac{Q}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r_b} - \frac{1}{r_a} \right)$$

$$\boxed{V(r) = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q}{r}}$$

kun asetetaan V(∞) = 0

Potentiaali ja sähkökenttä: tasaisesti varautut levyt



Tiedämme edeltä: sähkökenttä E on vakio

$$V_B - V_A = -\int_A^B \vec{E} \cdot d\vec{\ell}$$

$$= -E\ell = \Delta V$$

$$E = \frac{-\Delta V}{\ell} = 10\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{cm}} = 1000\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}}$$

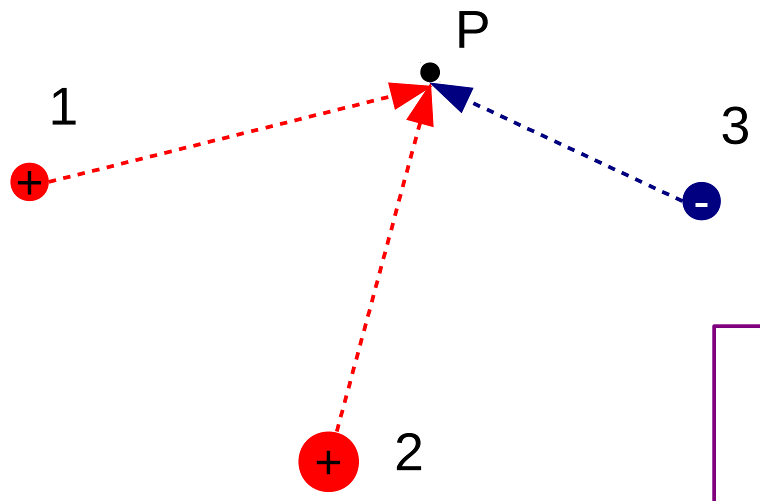
Huomaa yksiköt:

Potentiaalin muutos pituusyksikköä kohden

$$1\ \frac{\mathrm{V}}{\mathrm{m}} = 1\ \frac{\mathrm{N}}{\mathrm{C}}$$

Varaukseen kohdistuva voima

Usean varauksen kenttä ja potentiaali: superpositioperiaate



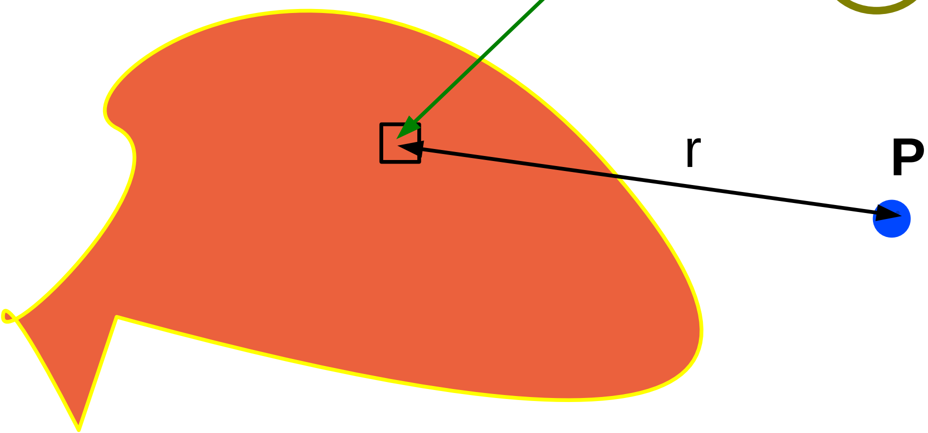
$$\begin{cases} \vec{E}_P = \vec{E}_{1P} + \vec{E}_{2P} + \vec{E}_{3P} \\ V_P = V_{1P} + V_{2P} + V_{3P} \end{cases}$$

Jokainen varaus (1,2,3) tuottaa oman kenttänsä ja potentiaalinsa pisteessä P. Kokonaiskenttä ja -potentiaali ovat näiden summa.

Potentiaali: jakautunut varaus

$$dq = \rho\, d\mathcal{V}$$

tilavuusalkio



$$dV = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\frac{dq}{r}$$

$$V_P = \frac{1}{4\pi\epsilon_0}\int_{\text{kappale}}\frac{dq}{r}$$