

14. Elfält och Materia

Lärandemål:

- Kunna förklara skillnaden mellan en ledare och en isolator, och grafiskt kunna rita polarisationen av båda materialen i ett yttre elfält
- Kunna förklara varför det är en attraktiv kraft mellan en laddad och en oladdad kropp
- Kunna beräkna drifhastigheten för laddade partiklar i en ledare
- Kunna förklara varför summaelfältet inne i en ledare i jämvikt måste vara noll
- Matematiskt kunna relatera polarisabiliteten (inducerade dipolmomentet) till det omgivande elfältet



Vad händer med materia i elfält?

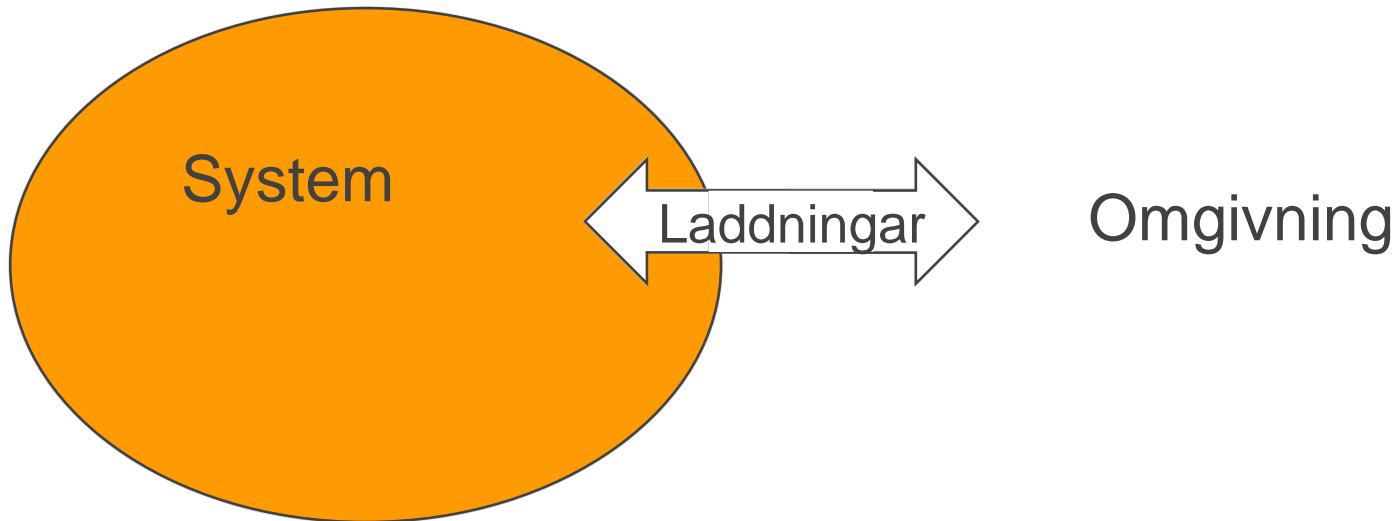
Ledare, isolatorer

Hur överförs laddning mellan kroppar?

Hur laddas och urladdas kroppar?



Laddning bevaras



Summaladdningen för systemet
och omgivning bevaras



Isolatorer (eriste)

- Elektronerna bundna till atomerna eller molekylerna i materialet
- Laddning kan inte röra sig genom isolatorn

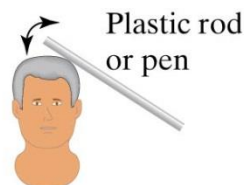
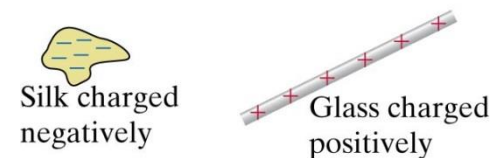
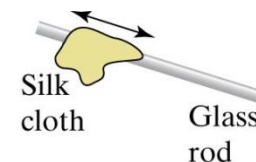
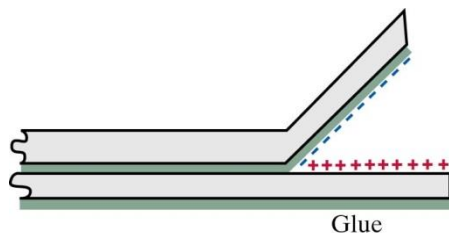
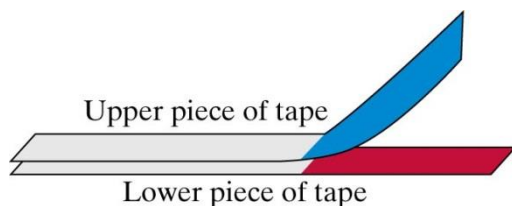
Ledare (johdin)

- Materialet har laddningar som kan lätt röra på sig

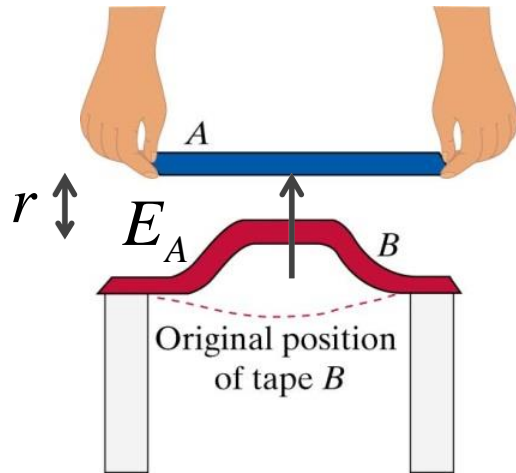
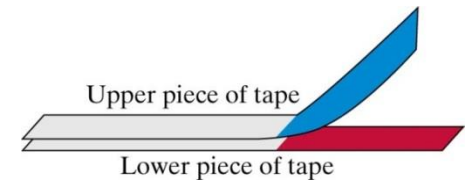


Hur laddas isolatorer?

Mekanism	Energi som behövs
Bryta en kemisk bindning	$\sim 2 - 5 \text{ eV}$
Avlägsna en elektron	$\sim 10 \text{ eV}$
Avlägsna en proton	$\sim 10^6 \text{ eV}$



Hur stor är laddningen på isolatorer?



20 cm

1 cm



$$\frac{A}{A_{atom}} \approx \frac{2 \times 10^{-3} \text{ m}^2}{4 \times 10^{-20} \text{ m}^2} \approx 5 \times 10^{16} \text{ atomer}$$

$$\frac{Q}{e} \approx \frac{10^{-8} \text{ C}}{1.6 \times 10^{-19} \text{ C}} \approx 6 \times 10^{10} \text{ extra laddningar}$$

$$F_{elect} \approx F_{grav}$$

$$\Rightarrow E_A Q_B \approx mg$$

$$|\bar{E}_A| \approx \frac{Q_A}{4\pi\epsilon r^2}$$

$$\Rightarrow \frac{Q_A Q_B}{4\pi\epsilon r^2} \approx mg$$

$$\Rightarrow Q \approx \sqrt{\frac{(1.5 \times 10^{-3} \text{ kg})(9.8 \text{ N/kg})(0.025 \text{ m})^2}{9 \times 10^9 \text{ Nm}^2 / \text{C}^2}}$$

$$\approx \underline{\underline{10^{-8} \text{ C}}}$$

$$\left(|\bar{E}_A| \approx \frac{Q_A}{4\pi\epsilon r^2} \approx \underline{\underline{10^5 \text{ N/C}}} \right)$$

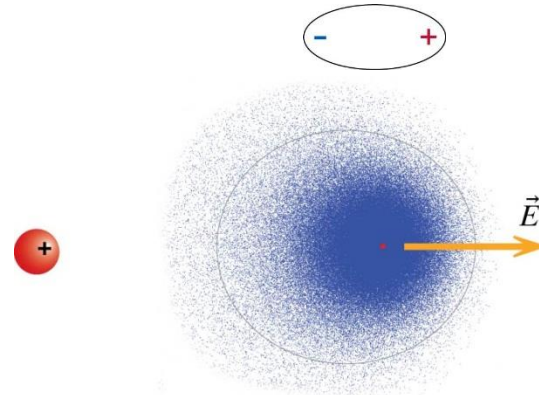
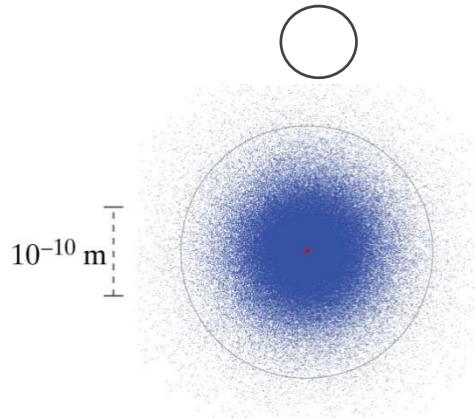
$$\frac{e}{\text{Atomer}} \approx \frac{6 \times 10^{10}}{5 \times 10^{16}} \approx \underline{\underline{10^{-6}}}$$

ca. var miljonte yttatom har fått en extra laddning

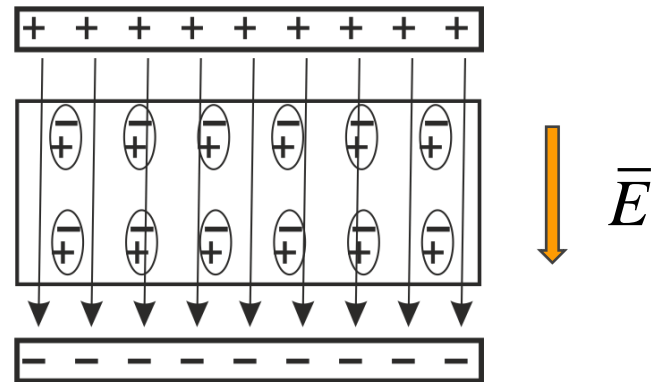


Polarisation

Det yttre elfältet resulterar i en liten förskjutning av elektronerna relativt till de positiva laddningarna. Elektriska **dipoler** blir inducerade i materialet. Man säger att materialet **polariseras**



Isolator (Elfält = 0)



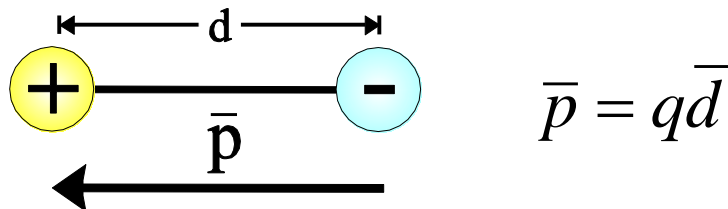
Polarisabilitet

Polarisationen (förskjutning av elektronerna relativt till de positiva laddningarna) är proportionellt till det omgivande elfältet.

Dipolmomentet blir: $\bar{p} = \alpha \bar{E}$

Konstanten α kallas för "polarisabilitet" för ett givet material och dess värde bestäms experimentellt

Från föregående kapitel:
elektrisk dipolmoment



Vad är accelerationen för en neutral He atom på ett avstånd av $0.1 \mu\text{m}$ från en proton?



$$m_{\text{He}} \sim 6.64e-27 \text{ kg}$$

$$\alpha_{\text{He}} \sim 2.3e-41 \text{ Cm}/(\text{N}/\text{C})$$

$$|e| \sim 1.6e-19 \text{ C}$$

$$\frac{1}{4\pi\epsilon} \approx 9.0e9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$$

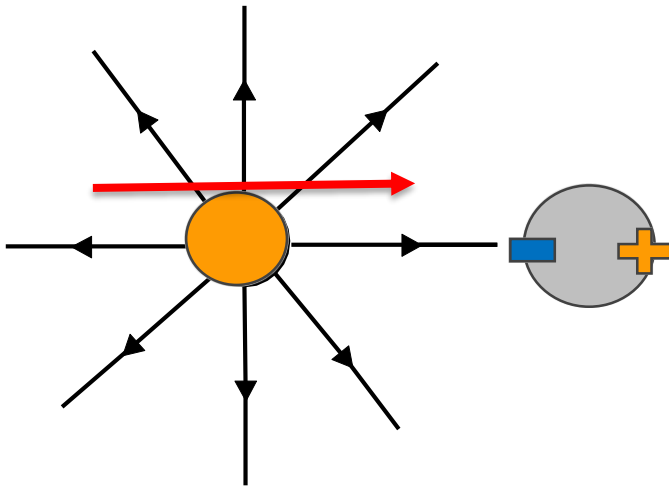
$$\vec{E} = \frac{Q}{4\pi\epsilon r^2} \hat{r}$$

$$\vec{p} = \alpha \vec{E}$$

$$|E_{\text{axel}}| = \frac{1}{4\pi\epsilon} \frac{2p}{r^3}$$



Vad är accelerationen för en neutral He atom på ett avstånd av $0.1 \mu\text{m}$ från en proton?



1) Elfältet från protonen mot höger $|E_p| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{|e|}{r^2}$ *

2) He polariseras till en dipol $|p| = \alpha |E_p|$ **

3) Elfältet från He dipolen mot höger $|E_{He}| = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2|p|}{r^3}$

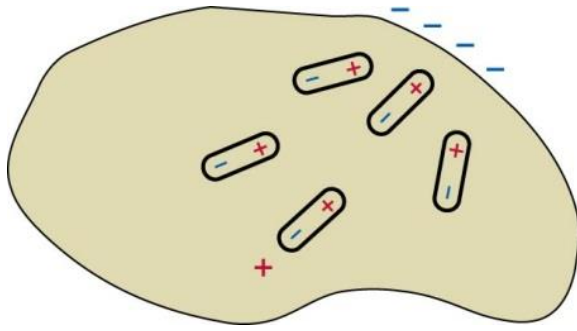
** , * $\Rightarrow |E_{He}| = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{2\alpha|e|}{r^5}$

4) Protonen känner en kraft mot He dipolen (mot höger) $|F_p| = |e| |E_{He}|$

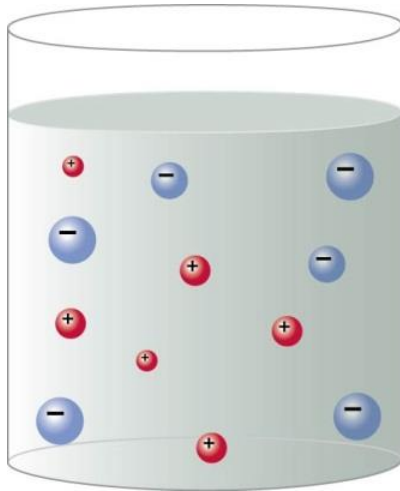
5) He dipolen känner en motkraft (mot vänster) $|F_p| = -|F_{He}|$

6) He dipolen accelereras mot vänster $|a_{He}| = \frac{|F_{He}|}{m_{He}} = \left(\frac{1}{4\pi\epsilon_0}\right)^2 \frac{2\alpha|e|2}{m_{He}r^5} \sim \underline{\underline{1440 \text{ m/s}^2}}$

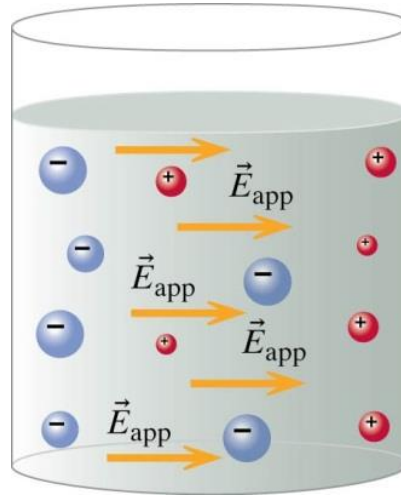




För en isolator, kan laddningarna vara ojämnt fördelade och ett konstant elfält kan uppstå

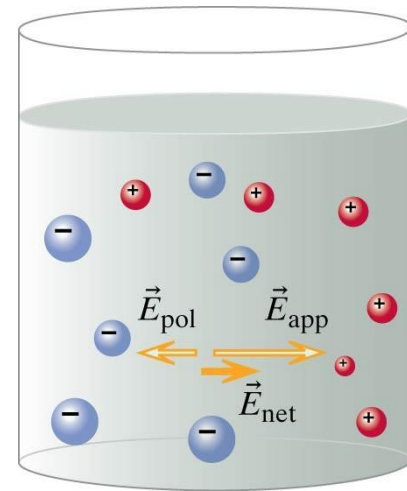


Drifhastighet
för jonerna = 0



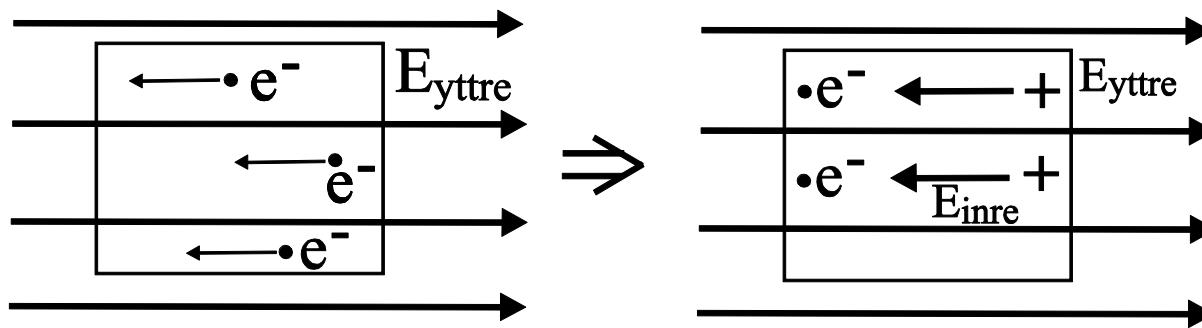
$$\bar{v} = u\bar{E}_{Net}$$

Där u är jonens mobilitet (m/s/N/C)



Laddningar i ledare

I en ledare, rör sig elektronerna mycket lätt, så att ett yttre elfält distribuerar dessa elektroner inne i ledaren. Ifall vi har ett yttre elfält, kommer de mobila elektronerna att röra sig mot elfältet, och ett inre elfält uppstår. Detta elfält kommer att bli så att det totala elektriska fältet inne i ledaren är noll



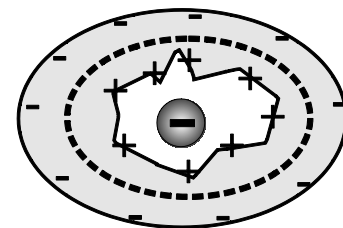
$$E_{totala} = E_{yttre} + E_{inre} = 0$$



En ledaren har en total laddning $+10 \text{ nC}$.

Inne i ett hål i ledaren har vi en från ledaren isolerad laddning av storleken -16 nC . Vad blir summaladdningarna på kavitetens yta och på ledarens yta?

Eftersom elfältet inne i ledaren är noll, måste summaladdningen inne i ovalen vara noll.



Laddningen inne i kaviteten är -16 nC , så att laddningen på kavitetens yta måste vara $+16 \text{ nC}$. Den totala laddningen för ledaren är: $+10 \text{ nC} \equiv Q_{\text{yta}} + Q_{\text{kavitet yta}}$

$$\longrightarrow Q_{\text{yta}} \equiv +10 \text{ nC} - Q_{\text{kavitet yta}} \equiv +10 \text{ nC} - 16 \text{ nC} \equiv \underline{\underline{-6 \text{ nC}}}$$



I övre figuren bredvid ser vi ett elektroskop, som består av en isolerad stålboll som är fäst i ett stålrör i vars ända finns två mycket tunna guldsivor som hänger i gångjärn.

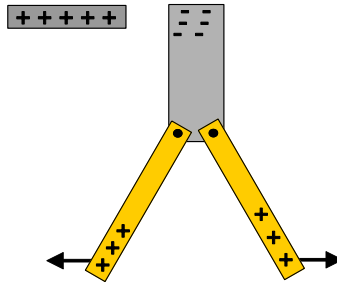
- Elektroskopet förs nära ett positivt laddat glasrör (nedre figuren), och guldsivorna repellerar varandra. Förklara och rita diagram varför detta sker.
- Elektroskopet förs nu långt ifrån glasröret och elektroskopets stålboll rör snabbt ett metallblock, så att guldsivorna repellerar varandra. Nu förs elektroskopet bort från metallblocket nära den positivt laddade glasstaven igen. Vad vi nu observerar är att guldsivorna ännu repellerar varandra, men kommer lite närmare varandra då vi närmar oss glasstaven. Var metallblocket positivt eller negativt laddat, eller neutralt? Förklara resultatet.



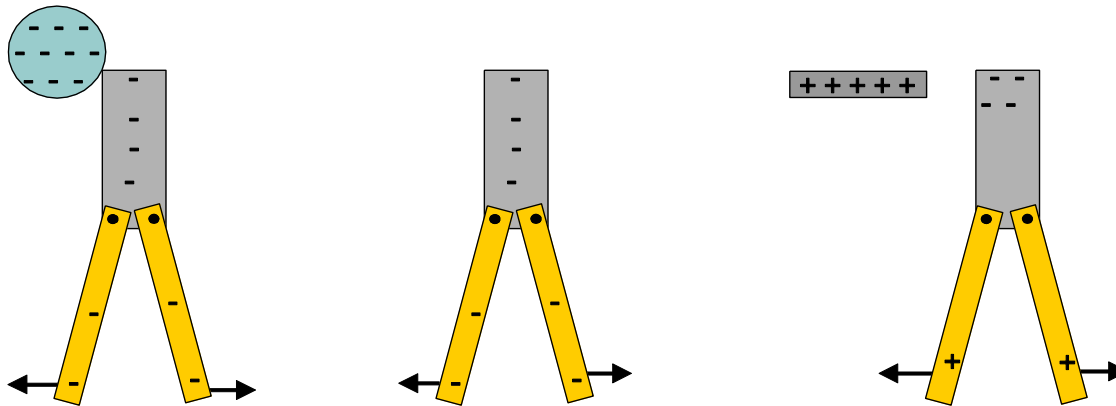
isolerad=eristetty, hänger i gångjärn=roikkuu saranassa, repellerar=hylkii



a) Elektroskopet polariseras, och de positiva guldsnivorna repellerar varandra

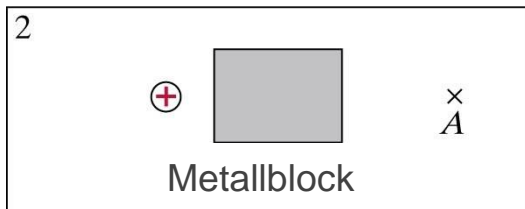


b)



Nu när glasröret är nära, har guldsnivorna mindre positiv laddning, vilket betyder att elektroskopet har negativ laddning. Metallblocket var negativt laddat





1. Ett metallblock sätts mellan den positiva laddningen och punkt A. Vilken riktning har elfältet från endast metallblocket vid A?
2. Vilken riktning har summaelfältet från laddningen och metallblocket vid A?
3. Vilken av följande påståenden (a-c) är rätt då vi tittar på elfältet endast från laddningen vid punkten A (metallblocket är ännu där emellan)
 - a) Den är mindre eftersom blocket är i vägen
 - b) Den är samma som utan blocket
 - c) Den är noll eftersom elfältet från laddningen inte kan gå genom metallblocket
4. Vad är elfältet inne i metallblocket?

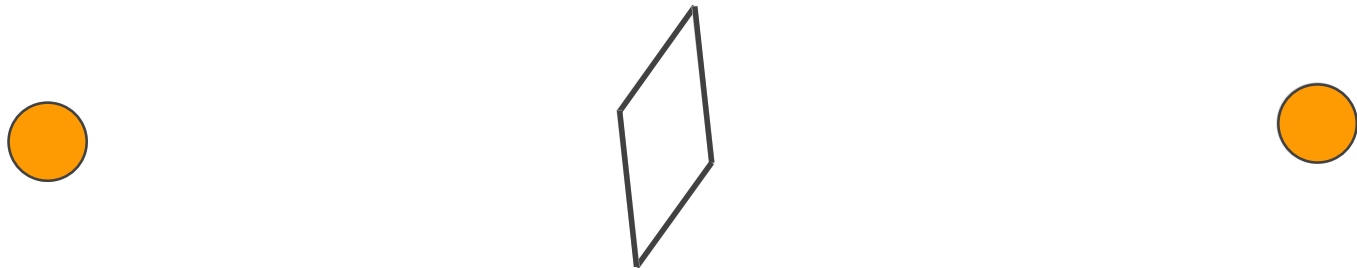


Mellan två protoner har vi ett pappersark. Hur förändras kraften mellan protonerna p.g.a. pappersarket?

a) Pappersarket närmare den ena protonen



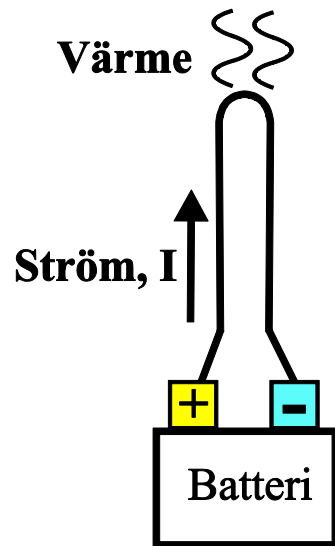
b) Pappersarket mitt emellan protonerna



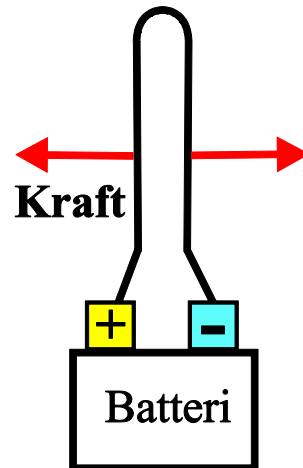
Elektrisk ström

Alla använder elektricitet, men vad är elektricitet egentligen?

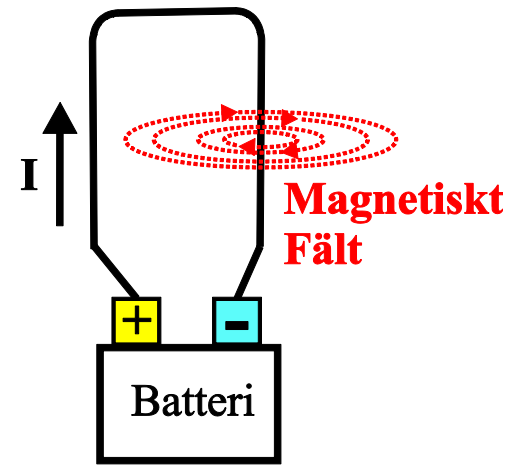
Tre exempel på hur man kan observera elektricitet



Värme från ledningen



Kraft mellan ledningarna



Magnetiskt fält runt ledningen

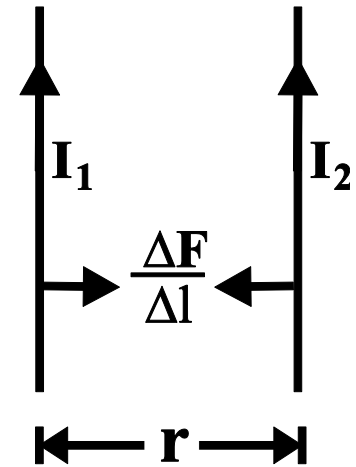


Enheten för elektrisk ström

Mellan två strömbärande ledningar finns en kraft

- Kraften proportionellt till strömmarna: I_1, I_2
- Kraften proportionellt till inversa avståndet: $1/r$

$$\longrightarrow \frac{dF}{dl} = k \frac{I_1 I_2}{r}$$

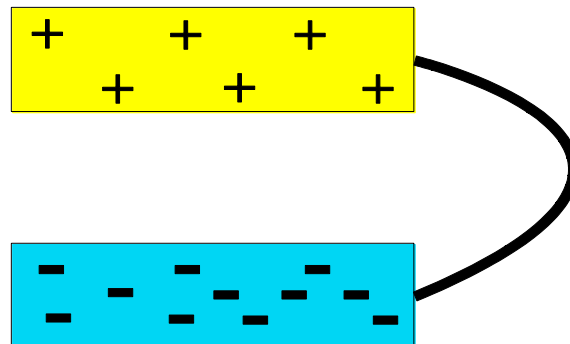
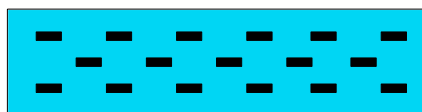
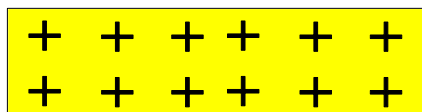


Definitionen för SI enheten för ström **ampere A**

*Den konstanta strömmen ampere är strömmen som producerar
En kraft 2×10^{-7} N/m mellan två parallella oändligt långa ledare
Som är i vakuum på avståndet 1 m från varandra.*



Laddningsbärare



← Acceleration

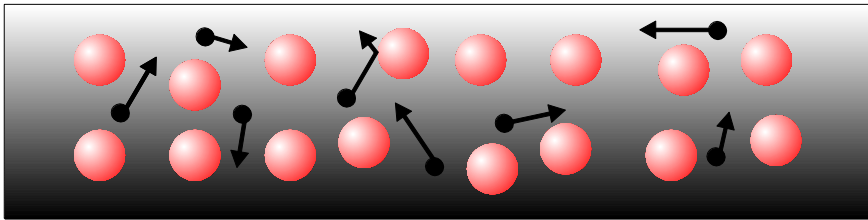
Elektronen är laddningsbäraren i metaller



Mikroskopiska tolkningen av ström

Ström blev definierad som orsak till kraft mellan två ledningar.
Vi skall nu koppla ihop ström med laddningar i rörelse.

Fria elektroner rör sig hela tiden i en ledare ($\sim 10^6$ m/s)



- Metallatom
- elektron

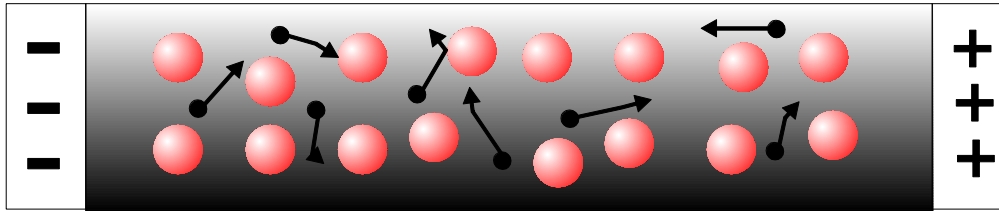
Ingen spänningsskillnad mellan ändorna



Kaotisk rörelse: ingen ström



Mikroskopiska tolkningen av ström



Spänningsskillnad V mellan ändorna →

Kollektiv nettorörelse:
Ström

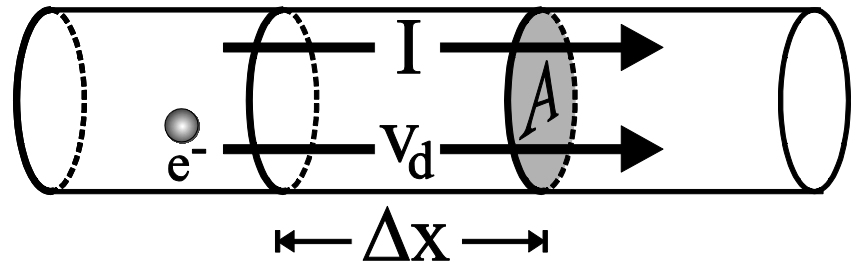
Ström definieras som laddning dQ som går genom en tvärsnittsarea i en ledare under ett tidsintervall dt

$$I = \frac{dQ}{dt}$$

$$[I] \equiv \text{C/s} \equiv \text{A (ampere)}$$



Exempel



Uppskatta drifhastigheten

för elektronerna i en koppartråd med diametern 1 mm och strömmen 1 A.

Elektrondensiteten för koppar är ca. 10^{29} elektroner/m³

Arean för tråden är: $A = \pi (d/2)^2$. På tiden Δt går elektronerna (med laddningen $|e|$) en sträcka $\Delta x = v_d \Delta t$

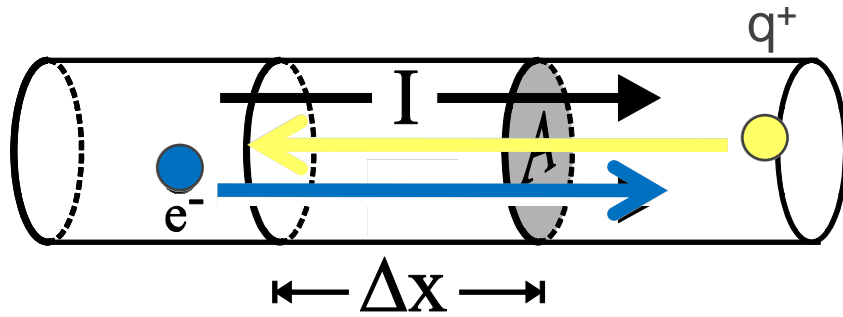
Summaladdning som går genom den gråa ytan A i figuren på tiden Δt blir volymen gånger laddningsdensiteten:

$$\Delta Q = \Delta V \rho^- |e| = A \Delta x \rho^- |e| = A v_d \Delta t \rho^- |e| \quad \Rightarrow$$

$$I = \frac{\Delta Q}{\Delta t} = A v_d \rho^- |e|$$

$$\Rightarrow v_d = \frac{I}{A \rho^- |e|} \approx \underline{\underline{0.1 \text{ mm/s}}}$$





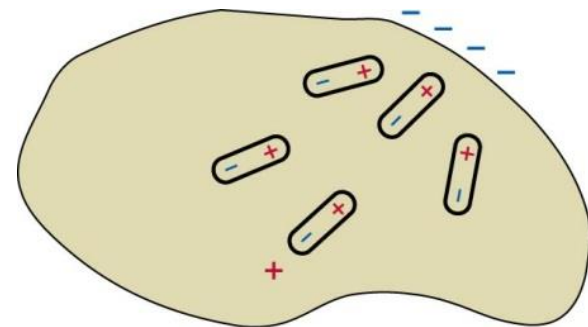
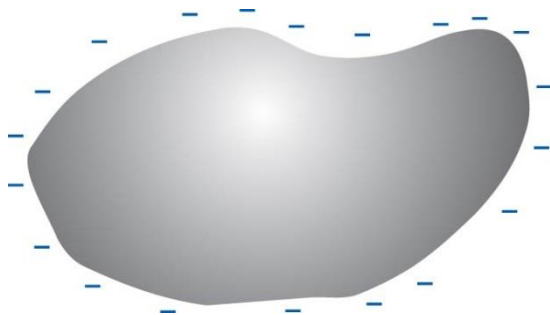
$$I = Av^-_d \rho^- |e| + Av^+_d \rho^+ |e|$$

Positiva laddningar kan vara joniserade atomer eller s.k. hål (elektron som saknas)

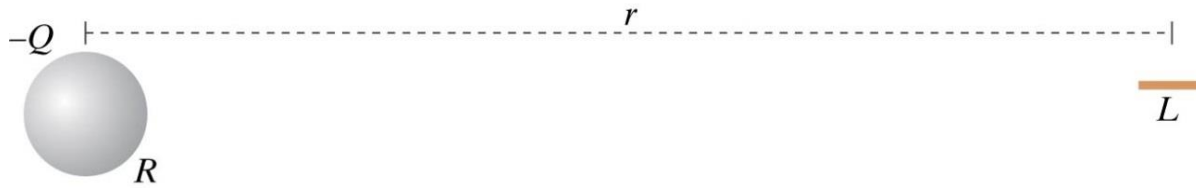
	Ämne	Resistivitet (Ωm)
Ledare	Silver (Ag)	1.5×10^{-8}
Halvledare	Kisel (Si)	30
Isolator	Glas	$10^{11} - 10^{13}$



	Ledare	Isolator
Mobila laddningar	Ja	Nej
Polarisation	Alla mobila laddningar rör på sig	Atomer eller molekyler polariseras
Jämvikt	$E = 0$ inne	E olika 0 inne
Platsen för extra laddning	Bara på ytan	Var som helst inne eller på materialet



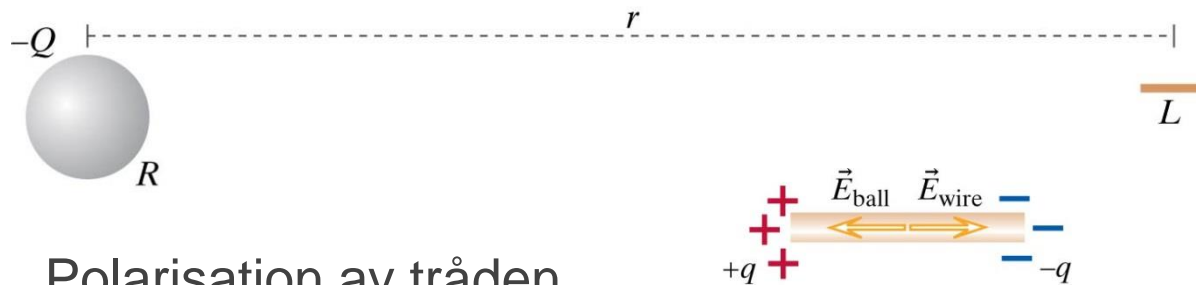
En metallboll som har radien $R=5 \text{ mm}$ har en negativ laddning $Q=-10^{-9} \text{ C}$ är på avståndet $r=10 \text{ cm}$ från en neutral koppartråd med längden $L=4 \text{ mm}$



Beräkna kraften på koppartråden mot metallbollen

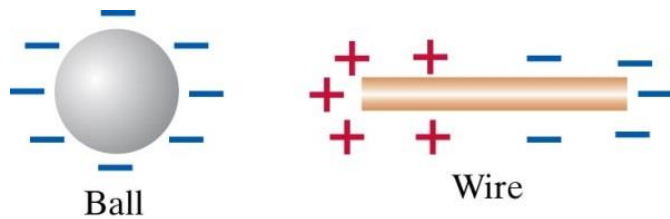


En metallboll som har radien $R=5 \text{ mm}$ har en negativ laddning $Q=-10^{-9} \text{ C}$ är på avståndet $r=10 \text{ cm}$ från en neutral koppartråd med längden $L=4 \text{ mm}$



Beräkna kraften på koppartråden mot metallbollen

Polarisation av tråden



$$F_{\text{boll}} = F_{\text{tråd}}$$

$$F_{\text{boll}} = Q_{\text{boll}} E_{\text{tråd}}$$

Dipol: $q?$

$$E_{\text{tråd}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{2qL}{r^3}$$

Elfältet inne i tråden = 0

$$E_{\text{Tot}} = E_{\text{boll}} + E_{+q} + E_{-q}$$

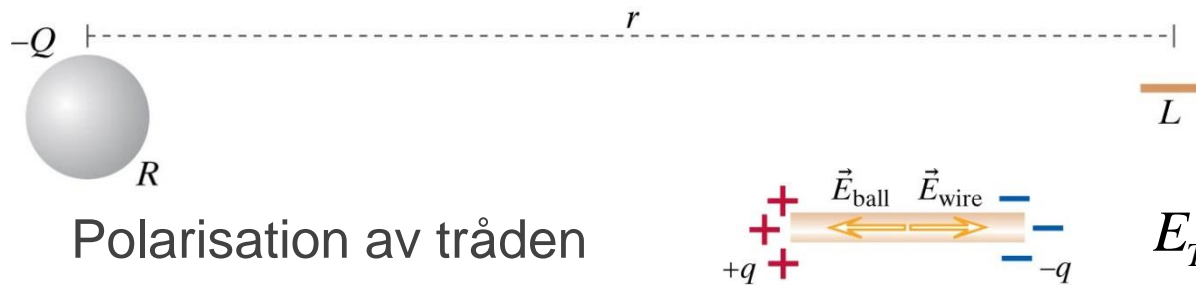
$$q \approx \frac{Q}{8} \left(\frac{L}{r} \right)^2$$

$$0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[-\frac{Q}{r^2} + \frac{2q}{(L/2)^2} \right]$$

$$\Rightarrow F_{\text{tråd}} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q^2 L^3}{4r^5} \approx \underline{\underline{1.4 \times 10^{-11} \text{ N}}}$$



En metallboll som har radien $R=5 \text{ mm}$ har en negativ laddning $Q=-10^{-9} \text{ C}$ är på avståndet $r=10 \text{ cm}$ från en neutral koppartråd med längden $L=4 \text{ mm}$



Beräkna kraften på koppartråden mot metallbollen

Polarisation av tråden

$$E_{\text{Tot}} = E_{\text{boll}} + E_{+q} + E_{-q}$$

Elfältet inne i tråden = 0

$$\Rightarrow 0 = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left[-\frac{Q}{r^2} + \frac{2q}{(L/2)^2} \right]$$

$$\Rightarrow q \approx \frac{Q}{8} \left(\frac{L}{r} \right)^2$$

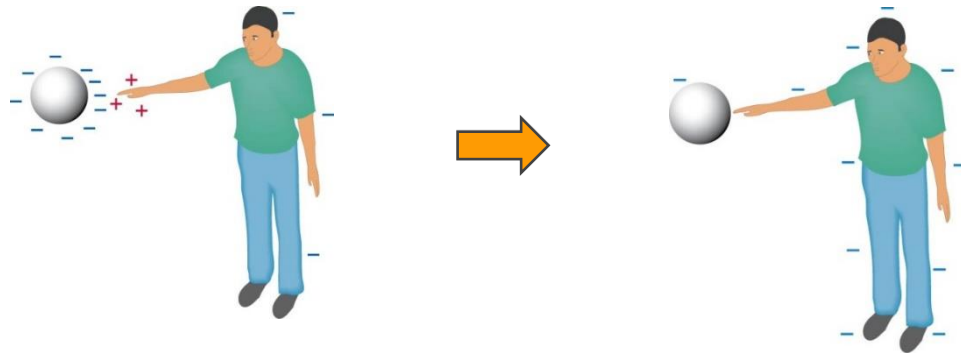
Alternativt till dipolelfältet i förra sliden

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon} Qq \left[\frac{1}{\left(r - \frac{L}{2}\right)^2} - \frac{1}{\left(r + \frac{L}{2}\right)^2} \right]$$

⇒ Ger samma svar då $r \gg L$



Hur urladdas material?



Laddningar överförs
vid rörelse



En laddad kropp kan behålla sin laddning längre då
luftfuktigheten är låg.

Varför (och hur) neutraliseras laddade kroppar snabbare då
luftfuktigheten är hög?



Lärandemål:

- Kunna förklara skillnaden mellan en ledare och en isolator, och grafiskt kunna rita polarisationen av båda materialen i ett yttre elfält
- Kunna förklara varför det är en attraktiv kraft mellan en laddad och en oladdad kropp
- Kunna beräkna drifhastigheten för laddade partiklar i en ledare
- Kunna förklara varför summaelfältet inne i en ledare i jämvikt måste vara noll
- Matematiskt kunna relatera polarisabiliteten (inducerade dipolmomentet) till det omgivande elfältet

