Inst. for fysikk 2015 **TFY4155/FY1003 Elektr. & magnetisme**

Øving 1, løsningsskisse.
Ladninger og Coulombs lov.

Oppgave 1. Ladning i kopper.

a) $m = \rho V = \rho \pi R^2 d = 8,92 \cdot 10^3 \mathrm{kg/m^3} \cdot \pi (0,10\,\mathrm{m})^2 \cdot 2,0 \cdot 10^{-3}\,\mathrm{m} = 8,92 \cdot 10^3 \mathrm{kg/m^3} \cdot 62,8 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m^3} = \underline{0,560\,\mathrm{kg}}$.

b) Koppers molvekt er $M_{\mathrm{Cu}} = (29 + 34,54)\,\mathrm{g/mol} = 63,54\,\mathrm{g\,mol^{-1}}$ og dermed masse per kopperatom:
$m_{\mathrm{atom}} = M_{\mathrm{Cu}}/N_{\mathrm{A}} = 63,54\,\mathrm{g\,mol^{-1}}/6,02 \cdot 10^{23}\,\mathrm{mol^{-1}} = 1,06 \cdot 10^{-22}\,\mathrm{g} = \underline{1,0556 \cdot 10^{-25}\,\mathrm{kg}}$.

Alternativt: $m_{\mathrm{atom}} = 29 \cdot m_{\mathrm{p}} + 34,54 \cdot m_{\mathrm{n}} + 29 \cdot m_{\mathrm{e}} = 63,54 \cdot 1,67 \cdot 10^{-27}\,\mathrm{kg} + 29 \cdot 9,11 \cdot 10^{-31}\,\mathrm{kg} = 1,06 \cdot 10^{-25}\,\mathrm{kg} + 2,6 \cdot 10^{-29}\,\mathrm{kg} = \underline{1,06 \cdot 10^{-25}\,\mathrm{kg}}$.
Elektronenes masse er $2,5 \cdot 10^{-4}$ av kjernens og altså uten betydning.

c) $n_{\mathrm{Cu}} = m/m_{\mathrm{atom}} = 0,560\,\mathrm{kg}/1,06 \cdot 10^{-25}\,\mathrm{kg} = \underline{5,28 \cdot 10^{24} = 8,78\,\mathrm{mol}}$.

d)
$q_{\mathrm{p}} = 29 \cdot n_{\mathrm{Cu}} \cdot e = 29 \cdot 5,28 \cdot 10^{24} \cdot 1,60 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C} = \underline{2,45 \cdot 10^7\,\mathrm{C}}$.
$q_{\mathrm{e}} = 29 \cdot n_{\mathrm{Cu}} \cdot (-e) = 29 \cdot 5,28 \cdot 10^{24} \cdot (-1,60 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}) = \underline{-2,45 \cdot 10^7\,\mathrm{C}}$.
Totalladningen er null.

e) Uniform ladning σ_0 per flateenhet og areal πR^2 gir total ladning

$$Q = \sigma_0 \pi R^2 = 20\,\mu\mathrm{C/m^2} \cdot \pi (0,10\,\mathrm{m})^2 = \underline{0,628\,\mu\mathrm{C}}.$$

Det vil her kanskje være fristende å bruke totalt areal $2\pi R^2$ for skiva. Men husk dette er en svært tynn skive (tenk f.eks. ett atomlag), og en oppgitt flateladning σ_0 må da tolkes som gjort her. (*Spør studass* hvis du er i tvil om hvordan en oppgave skal tolkes!)

Altså andel $0,628\,\mu\mathrm{C}/2,45 \cdot 10^7\,\mathrm{C} = 2,6 \cdot 10^{-14}$ av ladning av alle elektroner i skiva, som også er lik andelen av elektroner som er fjernet. Disse elektroner er fjernet helt ytterst i overflata av metallet, som vi skal ta opp litt seinere i kurset.

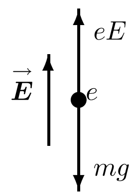
f)

$$\begin{aligned} Q &= \int_{\mathrm{skive}} dq = \int_0^R \sigma_0 \,(1 - r/R) \cdot 2\pi r \cdot dr \\ &= 2\pi\sigma_0 \left(\frac{1}{2} r^2 - \frac{1}{3}\frac{r^3}{R} \right)\Bigg|_0^R = 2\pi\sigma_0 \left(\frac{1}{2}R^2 - \frac{1}{3}R^2 \right) = \underline{\frac{1}{3}\sigma_0 \pi R^2}. \end{aligned}$$

Oppgave 2. Gravitasjonskraft – elektrisk kraft.

a) Oljedråpen har

$$\begin{aligned} \text{ladning} \quad e &= 1,602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}, \quad \text{og} \\ \text{masse} \quad m &= \rho \frac{4}{3}\pi r^3 = 0,80 \cdot 10^3\,\mathrm{kg/m^3} \cdot \frac{4}{3}\pi \,(1,00 \cdot 10^{-6}\,\mathrm{m})^3 = 3,351 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{kg}\,. \end{aligned}$$



Elektrisk kraft må virke oppover og når ladningen er positiv må elektrisk felt peke oppover. Tyngdekrafta er lik den elektriske krafta når

$$m\,g = eE,$$

som gir nødvendig elektrisk feltstyrke

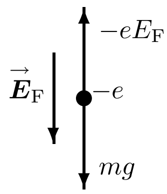
$$E = \frac{m\,g}{e} = \frac{3,351 \cdot 10^{-15}\,\mathrm{kg} \cdot 9,81\,\mathrm{m/s^2}}{1,602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}} = 2,052 \cdot 10^5\,\mathrm{N/C} = \underline{205\,\mathrm{kN/C}}.$$

b) Fluoridionet har

$$\begin{aligned} \text{ladning} \quad -e &= -1,602 \cdot 10^{-19}\,\mathrm{C}, \quad \text{og} \\ \text{masse} \quad m_{\mathrm{F}} &= \frac{19\,\mathrm{g\,mol^{-1}}}{6,02 \cdot 10^{23}\,\mathrm{mol^{-1}}} = 3,16 \cdot 10^{-23}\,\mathrm{g} = 3,16 \cdot 10^{-26}\,\mathrm{kg}\,. \end{aligned}$$

Massen kan også beregnes fra $m_{\mathrm{F}} = 19\,m_{\mathrm{p}}$, der $m_{\mathrm{p}} = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg er protonmassen (som er omtrent like stor som nøytronmassen).

Elektrisk kraft må virke oppover og når ladningen er negativ må elektrisk felt peke nedover. Tyngdekrafta er lik den elektriske krafta når



$$m_F\, g = eE,$$

som gir nødvendig elektrisk feltstyrke

$$|E_F| = E_F = \frac{m_F\, g}{e} = \frac{3,16 \cdot 10^{-26}\,\text{kg} \cdot 9,81\,\text{m/s}^2}{1,602 \cdot 10^{-19}\,\text{C}} = 1,94 \cdot 10^{-6}\,\text{N/C} = \underline{1,9\,\mu\text{N/C}}.$$

c) Jordas felt 100 N/C er mye større enn svaret for E i b) som opphevet tyngdekrafta, slik at et fritt fluoridion vil forsvinne oppover i atmosfæren inntil feltet er avtatt til $1,9\,\mu$N/C. (Atmosfæren er positivt ladd, atmosfære pluss jordkloden er totalt nøytralt. Derfor avtar E-feltet utover i atmosfæren og er lik null utenfor.)
For oljedråpen går elektrisk kraft og tyngdekrafta i samme retning, slik at dråpen vil falle mot jorda. (Men ganske langsomt pga. stor luftmotstand for den lille dråpen.) Siden jordas felt 100 N/C $\ll$ 205 kN/C er elektrisk kraft mye mindre enn tyngdekrafta.

d) Gravitasjonstiltrekning: $F_g = G\dfrac{m_F\, m_F}{r^2}$ og elektrisk frastøtning: $F_e = k\dfrac{ee}{r^2}$, slik at

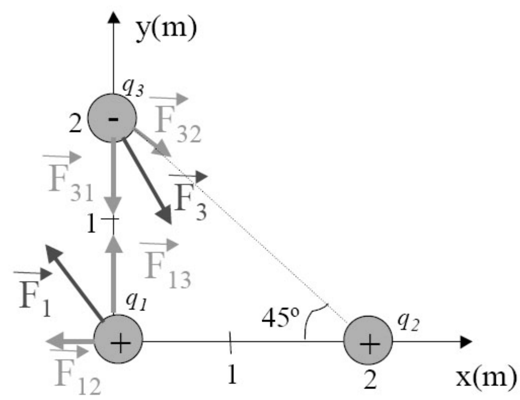
$$\underline{\frac{F_e}{F_g} = \frac{k}{G}\frac{e^2}{m_F^2}} = \frac{9,0 \cdot 10^9\,\text{m/F}}{6,67 \cdot 10^{-11}\,\text{Nm}^2\text{kg}^{-2}} \frac{(1,602 \cdot 10^{-19}\,\text{C})^2}{(3,16 \cdot 10^{-26}\,\text{kg})^2} = \underline{3,5 \cdot 10^{33}}$$

og er uavhengig av avstanden mellom ionene. (Sjekk gjerne enhetene i siste uttrykket! Alternative enheter for k først i øvingstekst.) Gravitasjonskraft mellom ioner er altså helt uten betydning.

Oppgave 3. Punktladninger I.

Dette er mest en oppgave i vektorregning. Krafta på q_1 kommer fra tilstedeværelse av ladningene q_2 og q_3. Vi finner krafta fra q_2 og q_3 separat og adderer dem vektorielt etterpå for å finne den totale krafta på q_1 (superposisjonsprinsippet). Det samme gjør vi for å beregne krafta på q_3.
Krafta på q_1 blir :

$$\vec{F}_1 = \vec{F}_{12} + \vec{F}_{13} = k \cdot q_1 \left[\frac{q_2}{r_{12}^2}\,\hat{\mathbf{r}}_{12} + \frac{q_3}{r_{13}^2}\,\hat{\mathbf{r}}_{13}\right]$$



I figuren er krefter tegnet inn i den retningen de virker ifølge oppgitte ladninger, f.eks. vil $\vec{F}_{13}$ peke i positiv y-retning. Merk at $\hat{\mathbf{r}}_{12}$ (retning fra q_2 til q_1) peker i negativ x-retning og $\hat{\mathbf{r}}_{13}$ i negativ y-retning:

$$\hat{\mathbf{r}}_{12} = -\hat{\mathbf{i}} \quad \text{og} \quad \hat{\mathbf{r}}_{13} = -\hat{\mathbf{j}}$$

Innsatt verdier finner vi

$$\begin{aligned}\vec{F}_1 &= 9,0 \cdot 10^{-9}\ \text{Nm}^2/\text{C}^2 \cdot 2,0 \cdot 10^{-9}\,\text{C}\left[\frac{2,0 \cdot 10^{-9}\,\text{C}}{(2,0\,\text{m})^2}(-\hat{\mathbf{i}}) + \frac{-3,0 \cdot 10^{-9}\,\text{C}}{(2,0\,\text{m})^2}(-\hat{\mathbf{j}})\right] \\ &= \underline{-9,0 \cdot 10^{-9}\ \text{N} \cdot \hat{\mathbf{i}} \ + \ 13,5 \cdot 10^{-9}\ \text{N} \cdot \hat{\mathbf{j}}} = \underline{(-9,0 \cdot \hat{\mathbf{i}} \ + \ 14 \cdot \hat{\mathbf{j}})\ \text{nN}}\,.\end{aligned}$$

$|F_1| = \sqrt{9,0^2 + 13,5^2} \cdot 10^{-9}$ N $= 16,2$ nN $=$ $\underline{16\ \text{nN}}$ og har retning som vist på figuren, med vinkel $\theta = \arctan 13,5/9,0 =$ $\underline{56°\ \text{med } x\text{-aksen}}$.

Krafta på q_3 blir helt analogt:

$$\vec{F}_3 = \vec{F}_{31} + \vec{F}_{32} = k \cdot q_3 \left[\frac{q_1}{r_{31}^2}\,\hat{\mathbf{r}}_{31} + \frac{q_2}{r_{32}^2}\,\hat{\mathbf{r}}_{32}\right]$$

Her er $r_{32}^2 = r_{12}^2 + r_{13}^2$ og enhetsvektorene

$$\hat{\mathbf{r}}_{31} = \hat{\mathbf{j}} \quad \text{og} \quad \hat{\mathbf{r}}_{32} = -\cos 45°\,\hat{\mathbf{i}} + \sin 45°\,\hat{\mathbf{j}} = \frac{1}{2}\sqrt{2}(-\hat{\mathbf{i}} + \hat{\mathbf{j}})$$

Innsatt verdier:

$$\begin{aligned}\vec{F}_3 &= 9,0 \cdot 10^{-9}\ \text{Nm}^2/\text{C}^2 \cdot (-3,0 \cdot 10^{-9}\,\text{C})\left[\frac{2,0 \cdot 10^{-9}\,\text{C}}{(2,0\,\text{m})^2}\,\hat{\mathbf{j}} + \frac{2,0 \cdot 10^{-9}\,\text{C}}{(2,0\,\text{m})^2 + (2,0\,\text{m})^2} \cdot \frac{1}{2}\sqrt{2}(-\hat{\mathbf{i}} + \hat{\mathbf{j}})\right] \\ &= -13,5 \cdot 10^{-9}\ \text{N} \cdot \hat{\mathbf{j}} \ + \ 4,77 \cdot 10^{-9}\ \text{N} \cdot \hat{\mathbf{i}} \ - \ 4,77 \cdot 10^{-9}\ \text{N} \cdot \hat{\mathbf{j}} \\ &= 4,77 \cdot 10^{-9}\ \text{N} \cdot \hat{\mathbf{i}} \ - \ 18,27 \cdot 10^{-9}\ \text{N} \cdot \hat{\mathbf{j}} \quad = \underline{(4,8 \cdot \hat{\mathbf{i}} \ - \ 18 \cdot \hat{\mathbf{j}})}\ \text{nN}\,.\end{aligned}$$

$|F_3| = \sqrt{4,77^2 + 18,27^2} \cdot 10^{-9}$ N $= 18,88\,\text{nN} = \underline{19\,\text{nN}}$ og har retning som vist på figuren, med vinkel $\theta =$ arctan $18,27/4,77 = 75,4°$ med x-aksen, dvs. $\underline{14,6° \text{ med } y\text{-aksen}}$.

Oppgave 4. Punktladninger II.

a) Størrelsene på kreftene er gitt av Coulombs lov, der kreftene er negative når de er tiltrekkende og positive når frastøtende. Med $r_{12} = r_{13} = r_{23} = r = 0,10$ m (likesidet trekant) får vi følgende tre likningene for å bestemme de tre ladningene q_1, q_2 og q_3:

$$\begin{aligned} F_{12} &= k\frac{q_1 q_2}{r^2} = -5,40\,\text{N} \\ F_{13} &= k\frac{q_1 q_3}{r^2} = 15,0\,\text{N} \\ F_{23} &= k\frac{q_2 q_3}{r^2} = -9,0\,\text{N}\,. \end{aligned}$$

En måte å løse disse er ved å ta forholdet

$$\frac{F_{13}}{F_{23}} = \frac{q_1}{q_2} = -\frac{15,0}{9,0} \qquad \Rightarrow \qquad q_2 = -\frac{9,0}{15,0} \cdot q_1$$

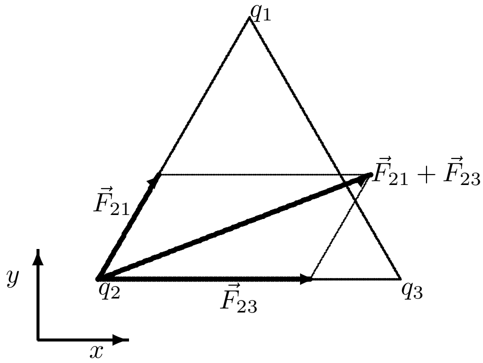
og sette inn q_2 i F_{12}:

$$F_{12} = -k\,\frac{q_1^2}{r^2}\,\frac{9,0}{15,0} \equiv -5,40\,\text{N} \qquad \Rightarrow \qquad q_1^2 = \frac{15,0}{9,0} \cdot \frac{1}{k} \cdot r^2 \cdot 5,40\,\text{N} = 1,001 \cdot 10^{-11}\,\text{C}^2\,.$$

(Tegnet $\equiv$ betyr "må være lik ifølge kravene".) Nå er det gitt at q_1 er negativ. Ladningen q_1 er da: $\underline{q_1 = -3,16\,\mu\text{C}}$.

Fra forholdet mellom q_2 og q_1 fra tidligere finnes : $\underline{q_2 = -\frac{9,0}{15,0} q_1 = 1,90\,\mu\text{C}}$.

Ladning q_3 beregnes da fra en av ligningene for F_{13} eller F_{23} og gir: $\underline{q_3 = -5,27\,\mu\text{C}}$.



b) For at nettokrafta på ladningen q_2 ved introduksjon av en fjerde ladning q_4 skal bli null, må q_4 plasseres slik at kraftvirkningen $\vec{F}_{24}$ oppveier $\vec{F}_{21}$ og $\vec{F}_{23}$. Matematisk gir dette vektorlikningen:

$$\vec{F}_2 = \vec{F}_{24} + \vec{F}_{21} + \vec{F}_{23} \equiv 0 \qquad \Rightarrow \qquad \vec{F}_{24} = -(\vec{F}_{21} + \vec{F}_{23})$$

Løser uttrykkene ved å dele opp i x- og y-komponenter. Vinklene i en likesidet trekant er $\theta = 60° = \pi/3$, og vi får

$$\begin{aligned} \vec{F}_{24} &= -(\vec{F}_{21} + \vec{F}_{23}) \\ &= -|F_{21}| \cdot (\cos\pi/3 \cdot \hat{\mathbf{i}} + \sin\pi/3 \cdot \hat{\mathbf{j}}) - |F_{23}| \cdot (\cos 0 \cdot \hat{\mathbf{i}} + \sin 0 \cdot \hat{\mathbf{j}}) \\ &= -(5,40\,\text{N} \cdot 0,50 \cdot \hat{\mathbf{i}} + 5,40\,\text{N} \cdot 0,866 \cdot \hat{\mathbf{j}}) - 9,0\,\text{N} \cdot \hat{\mathbf{i}} \\ &= -11,7\,\text{N} \cdot \hat{\mathbf{i}} - 4,68\,\text{N} \cdot \hat{\mathbf{j}}\,. \end{aligned}$$

Med negativ x- og y-komponent må krafta $\vec{F}_{24}$ på 2 fra 4 virke i retning ned mot venstre (sydvest). Når både ladning q_2 og q_4 er positive er kraften frastøtende og ladning q_4 må plasseres nordøst for q_2, på forlengelseslinja av vektoren $\vec{F}_{24}$ angitt over, som har vinkel $\theta = \arctan 4,68/11,7 = 22°$ med x-aksen.

Avstanden fra q_2 er avhengig av hvor stor ladningen q_4 er, men følgende må gjelde:

$$|\vec{F}_{24}| = k\frac{q_2 q_4}{r_{24}^2} \equiv \sqrt{11,7^2 + 4,68^2}\ \text{N} = 12,6\,\text{N} \quad \text{altså} \quad \frac{q_4}{r_{24}^2} \equiv \frac{12,6\,\text{N}}{k q_2} = 7,38 \cdot 10^{-4}\,\text{C/m}^2\,.$$

$\mathcal{A}.\mathcal{M}$i. 2. jan. 2015.