

FY6017 Elektromagnetisme. Institutt for fysikk, NTNU.
Løsningsforslag til øving 5.

Oppgave 1

I det første eksperimentet er $B = 0$. Da er Newtons 2. lov

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= m\mathbf{a} = q\mathbf{E} \\ \Rightarrow \frac{d\mathbf{v}}{dt} &= \frac{q}{m}\mathbf{E} \\ \Rightarrow \mathbf{v}(t) &= \mathbf{v}(0) + \frac{q}{m}\mathbf{E}t = \frac{d\mathbf{r}}{dt} \\ \Rightarrow \mathbf{r}(t) &= \mathbf{r}(0) + \mathbf{v}(0)t + \frac{q}{2m}\mathbf{E}t^2\end{aligned}$$

Her er det naturlig å velge $t = 0$ idet partikkelen entrer området med $E \neq 0$, og dessuten velge origo i denne posisjonen:

$$\mathbf{r}(0) = (x_0, y_0) = (0, 0)$$

Her er hastigheten

$$\mathbf{v}(0) = v \hat{x}$$

når vi legger x -aksen mot høyre. y -aksen legger vi oppover, slik at

$$\mathbf{E} = -E \hat{y}$$

(dvs med $E > 0$) Partikkelbanen inne i feltet blir altså en parabel, akkurat som når vi kaster en masse i tyngdefeltet. Hastigheten i x -retning påvirkes ikke slik at

$$x(t) = vt$$

mens partikkelen får en konstant akselerasjon i y -retning, dvs forflytningen i y -retning som funksjon av t må være bestemt ved

$$y(t) = -\frac{q}{2m}Et^2$$

Partikkelen vil forlate området der $E \neq 0$ ved tidspunktet

$$t_L = \frac{x(t_L)}{v} = \frac{L}{v}$$

Vertikalposisjonen er da

$$y(t_L) = -\frac{q}{2m}E\frac{L^2}{v^2}$$

Allerede nå kan vi konkludere med at $q < 0$ dersom $y(t_L) > 0$.

Distansen fra $x = L$ til $x = L + D$ tilbakelegges deretter uten påvirkning av noen krefter, med retning i forhold til x -aksen gitt ved vinkelen α , der

$$\tan \alpha = \frac{v_y(t_L)}{v_x(t_L)} = \frac{-(q/m)E(L/v)}{v} = -\frac{qEL}{mv^2}$$

Vi må dessuten ha

$$\tan \alpha = \frac{y - y(t_L)}{D}$$

der y er treffpunktet på detektoren, ved $x = L + D$.

Eksperimentet gjentas nå med samme E -felt, men vi skrur nå på et magnetfelt B med retning inn i planet inntil partiklene ikke avbøyes av feltene. Det må bety at den elektriske krafta (oppover) akkurat balanseres av en magnetisk kraft (nedover). Altså:

$$\begin{aligned}\mathbf{F} &= q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0 \\ \Rightarrow E &= vB \\ \Rightarrow \frac{1}{v} &= \frac{B}{E}\end{aligned}$$

Dermed:

$$\begin{aligned}\frac{y - y(t_L)}{D} &= -\frac{qEL}{mv^2} = -\frac{qEL}{m} \cdot \frac{B^2}{E^2} \\ \Rightarrow y + \frac{q}{2m}EL^2\frac{B^2}{E^2} &= -\frac{qEL}{m} \cdot \frac{B^2}{E^2}D \\ \Rightarrow yE &= -\frac{q}{m} \cdot B^2 \left(DL + \frac{1}{2}L^2 \right) \\ \Rightarrow \frac{q}{m} &= -\frac{yE}{B^2 \left(DL + \frac{1}{2}L^2 \right)}\end{aligned}$$

Dvs,

$$a = \frac{E}{B^2 (DL + L^2/2)}$$

Oppgave 2

Ionenenes hastighet når de kommer inn i magnetfeltet er gitt ved at endringen i potensiell energi gjennom spenningsforskjellen V tilsvarer endringen i ionenes kinetiske energi:

$$eV = \frac{1}{2}mv^2 \Rightarrow v = \sqrt{\frac{2eV}{m}}$$

Sentripetalakselerasjonen inne i magnetfeltet er

$$a = \frac{v^2}{r}$$

slik at Newtons 2. lov gir

$$F = m\frac{v^2}{r} = evB \Rightarrow r = \frac{mv}{eB}$$

Baneradius for en partikkel med masse m blir

$$r = \frac{1}{B} \sqrt{\frac{2Vm}{e}}$$

altså proporsjonal med $\sqrt{m}$. Baneradier og masser for de ulike isotopene må altså forholde seg til hverandre på følgende vis:

$$\frac{r_i}{r_j} = \sqrt{\frac{m_i}{m_j}}$$

der $i, j = 79$ eller 81 .

Dersom ionenes treffpunkt på den fotografiske platen skal være adskilt med (minst) en avstand $a = 1.0$ cm, må forskjellen i banenes *diameter* være 1.0 cm. Vi får:

$$a = 1.0 \text{ cm} = 2(r_{81} - r_{79}) = 2r_{79} \left(\sqrt{\frac{m_{81}}{m_{79}}} - 1 \right)$$

Det gir

$$r_{79} = \frac{a}{2} \left(\sqrt{\frac{m_{81}}{m_{79}}} - 1 \right)^{-1} = 0.5 \text{ cm} \cdot \left(\sqrt{\frac{81}{79}} - 1 \right)^{-1} \simeq 39.7 \text{ cm}$$

og

$$r_{81} = r_{79} + \frac{a}{2} \simeq 40.2 \text{ cm}$$

Vi kan nå bestemme hvor sterkt magnetfelt som kan brukes for å få disse baneradiene:

$$B = \frac{1}{r_{81}} \sqrt{\frac{2Vm_{81}}{e}} = \frac{1}{0.402} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 400 \cdot 81 \cdot 1.67 \cdot 10^{-27}}{1.6 \cdot 10^{-19}}} = 0.065 \text{ T}$$

Dette representerer øvre grense for B : Et sterkere magnetfelt vil redusere både r_{79} og r_{81} , men r_{81} mest, slik at treffpunktene kommer nærmere hverandre. Samtidig skal ikke $d_{81} = 2r_{81}$ overstige instrumentets fysiske begrensning gitt ved $L = 250 \text{ cm}$. Det tilsvarer en minsteverdi på magnetfeltstyrken:

$$B_{\min} = \frac{1}{L/2} \sqrt{\frac{2Vm_{81}}{e}} = \frac{1}{1.25} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 400 \cdot 81 \cdot 1.67 \cdot 10^{-27}}{1.6 \cdot 10^{-19}}} = 0.021 \text{ T}$$

Vi kan med andre ord benytte et magnetfelt i området 21 til 65 mT.

Oppgave 3

I stor avstand fra strømsløyfa kan vi sette

$$x^2 + R^2 \simeq x^2$$

Dermed blir magnetfeltet tilnærmet lik

$$B(x) \simeq \frac{\mu_0 I R^2}{2x^3}.$$

Strømsløyfas magnetiske dipolmoment er

$$m = IA = I \cdot \pi R^2,$$

så vi kan skrive dette magnetfeltet på formen

$$B(x) = \frac{\mu_0 m}{2\pi x^3}.$$

Det er vel verdt å sammenligne dette resultatet med det elektriske feltet på akse til en elektrisk dipol, i stor avstand x fra dipolen:

$$E(x) = \frac{p}{2\pi\epsilon_0 x^3},$$

der p er dipolens elektriske dipolmoment. Altså nøyaktig samme resultat, med m istedetfor p og μ_0 istedetfor $1/\epsilon_0$. Det er mange analogier mellom elektrostatiske og magnetostatiske!

Oppgave 4

1) $\mathbf{F} = I\mathbf{L} \times \mathbf{B}$, slik at kraftparet nummerert med 1 blir korrekt. **A**.

2) Magnetisk kraft og elektrisk kraft vil her virke i motsatt retning, enten partiklene har negativ eller positiv ladning. A og B kan dermed ikke være riktige. Med null kraft totalt (ingen avbøyning) er $qE = qvB$, dvs

$$v = E/B = 10^4/50 \cdot 10^{-3} = 2 \cdot 10^5 \text{ m/s} = 200 \text{ km/s. D.}$$

3) Elektronets hastighet er (i absoluttverdi) $v = \sqrt{v_0^2 + v_0^2} = \sqrt{2}v_0$. Sirkelbanens radius blir derfor $r = mv/qB_0 = \sqrt{2}m_ev_0/eB_0$. **B.**

4) $B = \mu_0 nI = 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot (2000/0.3142) \cdot 2 \text{ T} = 16 \text{ mT. B.}$

5) En regulær sekskant med sidekanter 1 cm har areal $1.5 \cdot \sqrt{3} \simeq 2.6 \text{ cm}^2$, som multiplisert med en strøm 1.0 A gir magnetisk dipolmoment 2.6 A cm^2 . **C.**