

16. Gibanje nabojev v električnem polju

Vsebina poglavja: sila na naelektrjen delec v električnem polju, enačba gibanja, odklon naelektrnega delca v električnem polju, energija delca med gibanjem, ohranitev energije, primerjava med gravitacijsko in električno silo, eksperimenti J.J. Thomsona s katodno cevjo.

Če se naboj nahaja v električnem polju in ima možnost gibanja, se giblje v skladu s silami, ki delujejo na naboj. V splošnem velja enačba gibanja

$m\vec{a} = \sum_i \vec{F}_i$, kjer pod vsoto vseh sil upoštevamo električno, mehnično, kemično silo itd. Mi

se bomo predvsem posvetili električni sili na naboje. V tem primeru gibanje naboja določimo z upoštevanjem zveze:

$$m\vec{a} = Q\vec{E}$$

Pospešek a je vektor, ki ima tri komponente, in je enak časovnemu odvodu hitrosti, ta pa časovnemu odvodu poti, torej velja $m\vec{a} = m \frac{d}{dt} \left(\frac{d\vec{r}}{dt} \right) = Q\vec{E}(\vec{r}, t)$ ali na kratko $m\ddot{\vec{r}} = Q\vec{E}$. V

splošnem moramo trajektorijo gibanja delcev določiti s pomočjo reševanja sistema treh diferencialnih enačb. Pogosto pa je mogoče določiti pozicijo delca z uporabo osnovnih zvez, kar bomo prikazali kar na primeru.

Primer: V homogeno polje 2000 V/m usmerimo elektron s hitrostjo 10^6 m/s, ki vpade prečno na smer polja. Določimo odklon elektrona iz vpadne smeri po preletu polja za 1 cm.

Izračun: Elektron nadaljuje pot v smeri leta pred vpadom v polje s hitrostjo 10^6 m/s, za 1 cm poti pa potrebuje časa $t = \frac{x}{v_x} = \frac{1 \text{ cm}}{10^6 \text{ m/s}} = 10^{-8} \text{ s}$. Obenem v prečni smeri nanj deluje električna

sila in torej pospešek $a_y = \frac{Q_e \cdot E}{m} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As} \cdot 2 \cdot 10^3 \text{ V/m}}{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg}} = 3,52 \cdot 10^{14} \text{ m/s}^2$, odklon v tej

smeri pa bo enak $y = \frac{a_y \cdot t^2}{2} = \frac{3,52 \cdot 10^{14} \text{ m/s}^2 \cdot (10^{-8} \text{ s})^2}{2} = \underline{\underline{17,58 \text{ mm}}}$.

SLIKA: Elektron prileti v električno polje in se ukloni.

Energija delca med gibanjem.

In kako je z energijo tega delca med gibanjem? Zgornjo enačbo integriramo v smeri poti in dobimo

$$\int_{T_1}^{T_2} m\vec{a} \cdot d\vec{l} = \int_{T_1}^{T_2} Q\vec{E} \cdot d\vec{l}$$

Če izvajanje poenostavimo le na gibanje v eni smeri (recimo X), se zgornja zveza poenostavi v

$$m \int_{T_1}^{T_2} \frac{dv}{dt} dx = m \int_{T_1}^{T_2} \frac{dx}{dt} dv = m \int_{T_1}^{T_2} v dv = Q \int_{T_1}^{T_2} \vec{E} \cdot d\vec{l} \text{ iz česar sledi } \boxed{\frac{mv_2^2}{2} - \frac{mv_1^2}{2} = Q(V(T_1) - V(T_2))}.$$

V splošnem pa bo $v^2 = (v_x^2 + v_y^2 + v_z^2)$. Če to zvezo napišemo nekoliko drugače, dobimo

$$\frac{mv_1^2}{2} + QV(T_1) = \frac{mv_2^2}{2} + QV(T_2) \text{ oziroma}$$

$$\boxed{W_{\text{kin}}(T_1) + W_{\text{pot}}(T_1) = W_{\text{kin}}(T_2) + W_{\text{pot}}(T_2)}$$

Enačbo preberemo kot: **Energija se med gibanjem ohranja, se pa pri tem pretvarja iz kinetične v potencialno ali obratno.**

Na naboj, ki se giblje v smeri polja deluje pospešek, torej sem mu povečuje hitrost in s tem kinetična energija, hkrati pa se mu zmanjšuje potencialna energija.

Primer: Elektron prileti s hitrostjo 10^6 m/s v zaviralno homogeno polje, ki ga vzpostavimo z napetostjo med vzporednima elektrodama oddaljenima za 10 cm. Določimo potrebno napetost med elektrodama, da se bo delec ustavil na polovici razdalje med elektrodama.

Izračun: Na začetku bo imel elektron le kinetično energijo $\frac{mv_1^2}{2}$, potencialna energija pa je enaka nič. Ko se elektron ustavi na sredini med elektrodama, bo njegova kinetična energija enaka nič, potencialna pa bo enaka $Q\frac{U}{2}$. Potrebno napetost torej določimo iz izenačitve energij na začetku in na koncu (ko se elektron ustavi na polovici razdalje med elektrodama je njegova hitrost enaka nič):

$$\frac{mv_1^2}{2} = Q\frac{U}{2}. \text{ Sledi:}$$

$$U = \frac{mv_1^2}{Q} = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \text{ kg} (10^6 \text{ m/s})^2}{1,6 \cdot 10^{-19} \text{ As}} = \underline{\underline{5,69 \text{ V}}}.$$

Vprašanje:

Zakaj je v konkretnem primeru razdalja med elektrodama nepomembna?

Kaj se »zgodí z elektronom po ustavitvi«? Odg.: Polje ga bo pospešilo nazaj in izstopil bo iz polja z enako hitrostjo, kot je v polje vstopil.

Primerjava gravitacijske in električne sile.

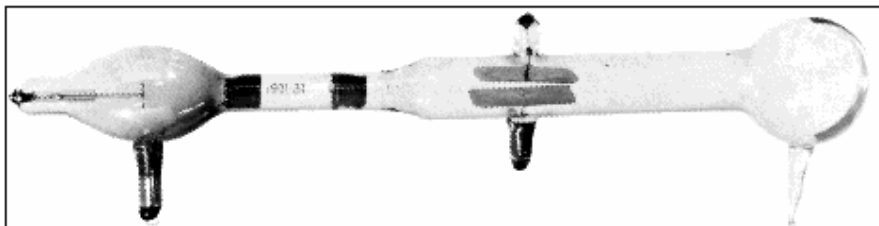
Kako velika je električna sila v primerjavi s silo gravitacije? Vzemimo kar prvi primer in primerjamo velikost sile polja in sile gravitacije, če je elektron v polju 2 kV/m:

$$\frac{F_e}{F_g} = \frac{Q_e E}{mg} = \frac{1,6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^3}{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot 9,8} = \underline{\underline{3,59 \cdot 10^{13}}}$$

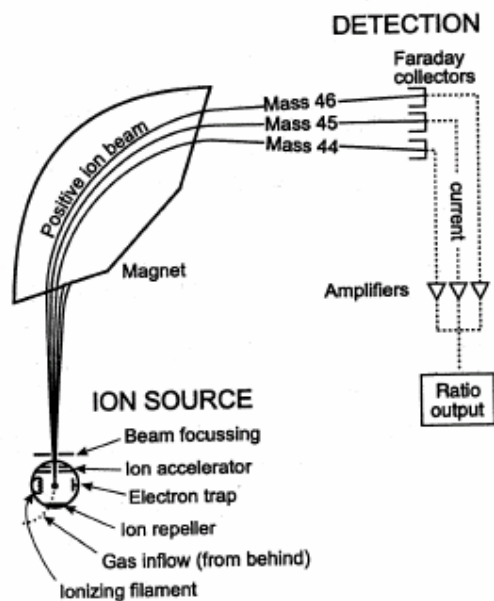
Ugotovimo, da je v tipičnih primerih (že pri majhnem električnem polju) električna sila mnogo večja od gravitacijske.

2. eksperiment Josepha Johna Thomsona (1856 - 1940).

JJ Thomson je Nobelov nagrajenec za fiziko za leto 1906. Nagrado je dobil za odkritje elektrona, kar mu uspelo z ekperimenti s katodno cevjo. V enem od teh eksperimentov je uspel odkriti, da so elektroni negativno naelektreni, saj se odklanjajo v električnem polju vzpostavljenim med dvema elektrodama, ki sta postavljeni prečno na smer leta elektrona. Za razliko od drugih raziskovalcev, ki so opravljali podobne eksperimente, je njemu leta 1897 to uspelo pokazati zato, ker je uspel zrak v katodni cevi v zadostni meri razredčiti (doseči dovolj nizek tlak), da se niso elektroni, ki jih je »izstreljeval« iz katode (katodni žarki), pred prehodom do fluorescenčnega zaslona zadeli v molekule zraka. V nadaljnjih eksperimentih je s kombinacijo delovanja električnega in magnetnega polja ugotovil razmerje med maso elektrona in njegovim nabojem. Pokazal je tudi, da ima vodik le en elektron. JJ Thomsonu pripisujemo izum masnega sprektrometra, naprave, s pomočjo katere je mogoče razpoznavati kompozicijo snovi iz razmerja med maso in nabojem (masni spekter).



SLIKA: Katodna cev, s pomočjo katere je JJ Tomson dokazal obstoj in naravo katodnih žarkov (elektronov).



SLIKA: Koncept masnega sprektrometra. Vir: Wikipedia.