17.6. Ravni vodič u homogenom magnetskom polju

Vidjeli smo ranije da je sila kojom polje djeluje na naboj u gibanju (Lorentzova sila) $\boldsymbol{F} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$. Struja u vodiču predstavlja gibanje mnoštva naboja pa je sila na vodič kojim teče struja

$$\boldsymbol{F} = Ne\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \quad ,$$

gdje je $\boldsymbol{v}$ driftna brzina, a broj pokretnih naboja u vodiču je $N = nSl$. n je koncentracija nosilaca naboja, S je poprečni presjek vodiča, a l duljina vodiča. Budući da je $\boldsymbol{v}$ u istom smjeru kao vodič ($\boldsymbol{v} \parallel \boldsymbol{l}$), možemo prebaciti oznaku vektora s v na l. Dakle, sila je $\boldsymbol{F} = Sven \cdot \boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B}$, odnosno

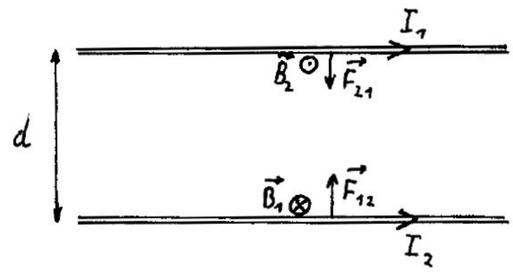
$$\boldsymbol{F} = I \cdot \boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B} \quad .$$

U slučajevima kad polje nije homogeno ili ako vodič nije ravan, gledamo silu na djelić vodiča $d\boldsymbol{l}$:

$$d\boldsymbol{F} = Id\boldsymbol{l} \times \boldsymbol{B} \quad .$$

17.6.1. Sila između dva duga ravna vodiča

Promotrimo dva duga paralelna vodiča međusobno udaljena d kroz koje teku struje. Kakvo je međudjelovanje tih vodiča? Neka struje teku u istom smjeru (kao na slici).



Polje koje stvara struja I_1 na udaljenosti d ima jakost

$$B_1 = \frac{\mu_0 I_1}{2\pi d} \quad .$$

To polje djeluje na struju I_2 silom

$$F_{12} = I_2\, l\, B_1 = \frac{\mu_0 I_1\, I_2\, l}{2\pi d} \quad .$$

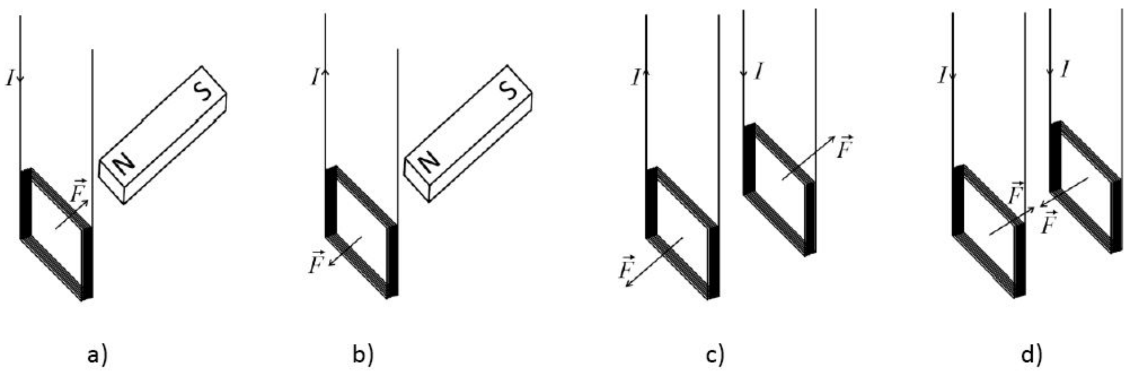
Naravno, zbog trećeg Newtonovog zakona, struja I_2 djeluje na struju I_1 silom istog iznosa, a suprotnog smjera ($\boldsymbol{F}_{21} = -\boldsymbol{F}_{12}$). Ako struje teku u istom smjeru, sila među vodičima je privlačna, a ako struje teku u suprotnim smjerovima, sila je odbojna.

POKUS: Na grafoskopu gledamo dva paralelna vodiča. Kad pustimo struje u istom smjeru, vodiči se privlače. Ako pustimo struje u suprotnim smjerovima, vodiči se odbijaju.

Definicija osnovne SI jedinice amper (A):

Jedan amper (1A) *je struja koja mora teći kroz dva vrlo duga ravna paralelna vodiča udaljena* 1m *da bi među njima postojala sila* $2 \cdot 10^{-7}$N *po dužnom metru vodiča.*

17.7. Magnetski dipolni moment



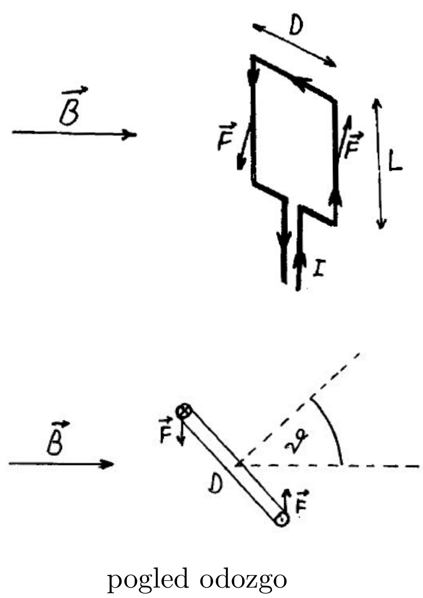
POKUS: Zavojnica kojom teče struja ponaša se kao magnet: a) Možemo ju privući permanentnim magnetom; b) Ako promijenimo smjer struje, možemo ju odbijati permanentnim magnetom; c) Dvije paralelne zavojnice će se odbijati ako njima struje kruže u suprotnim smjerovima; d) Dvije paralelne zavojnice će se privlačiti ako njima struje kruže u istom smjeru.

Kružna petlja kojom teče struja ponaša se kao magnetski dipol. Možemo definirati polove S i N analogno permanentnim magnetima.

Ponašanje strujne petlje u homogenom magnetskom polju

Pogledajmo kako se strujna petlja ponaša ako ju postavimo u homogeno magnetsko polje. Radi jednostavnosti, zamislimo pravokutnu petlju površine $L \times D$. Neka se petlja može rotirati oko vertikalne osi koja predstavlja simetralu stranice D pravokutnika. Neka je homogeno magnetsko polje $\boldsymbol{B}$ horizontalno (tj., okomito na os rotacije. Zavojnicom teče struja I.

Neka je petlja zakrenuta pod kutom ϑ u odnosu na smjer polja $\boldsymbol{B}$. Sila na svaku bočnu stranicu petlje duljine L je po iznosu $F = ILB$. Budući da struje teku u suprotnim smjerovima, te sile su suprotne, a udaljenost njihovih hvatišta je D. Te sile čine *par sila* jer ne leže na istom pravcu, tj., postoji moment sile $\boldsymbol{M} = \boldsymbol{D} \times \boldsymbol{F}$. Iznos tog momenta sile je $M = DF \sin\vartheta = DILB \sin\vartheta$.



pogled odozgo

(Sile na gornju i donju stranicu duljine D su suprotne i leže na istom pravcu pa se njihovo djelovanje poništava.) Površina petlje je $S = L \cdot D$ pa je moment sile $\boldsymbol{M} = I\boldsymbol{S} \times \boldsymbol{B}$, gdje $\boldsymbol{S}$ predstavlja vektor površine petlje.

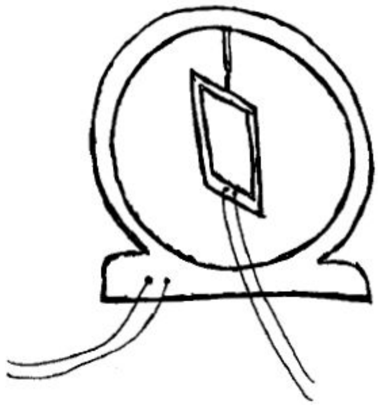
Sada možemo definirati *magnetski dipolni moment* strujne petlje:

$$\boldsymbol{\mu} = I \cdot \boldsymbol{S} \quad .$$

Ako petlja ima n zavoja, onda njezin magnetski dipolni moment iznosi $\boldsymbol{\mu} = nI \cdot \boldsymbol{S}$.

Kad se magnetski dipolni moment $\boldsymbol{\mu}$ nalazi u vanjskom magnetskom polju $\boldsymbol{B}$, na njega djeluje moment sile

$$\boldsymbol{M} = \boldsymbol{\mu} \times \boldsymbol{B} \quad .$$



POKUS: Dipolna petlja zakreće se u magnetskom polju.

Potencijalna energija magnetskog dipola

Promjena potencijalne energije pri zakretanju magnetskog dipola od kuta $\boldsymbol{\vartheta}_1$ do $\boldsymbol{\vartheta}_2$ jednaka je radu uloženom na svladavanje momenta sile:

$$\Delta E_p = \int_1^2 \boldsymbol{M} d\boldsymbol{\vartheta} = \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} M d\vartheta \quad .$$

Ovdje smo oznake vektora mogli maknuti jer su $\boldsymbol{M}$ i $\boldsymbol{\varphi}$ u istom smjeru (u smjeru osi rotacije). Iznos momenta sile je $|\boldsymbol{\mu} \times \boldsymbol{B}| = \mu \cdot B \sin\vartheta$ pa je

$$\Delta E_p == \int_{\vartheta_1}^{\vartheta_2} \mu \cdot B \sin\vartheta d\vartheta = -\left(\mu \cdot B \cos\vartheta_2 - \mu \cdot B \cos\vartheta_1\right) \quad .$$

Apsolutni iznos potencijalne energije određen je do na konstantu. Imamo slobodu izbora referentne vrijednosti energije. Dogovorno, radi jednostavnosti, kažemo da je $E_p = 0$ kada je $\vartheta = 90°$, tj., kada je $\boldsymbol{\mu} \perp \boldsymbol{B}$. S tim dogovorom potencijalna energija za bilo koji kut iznosi $E_p = -\mu \cdot B \cos\vartheta$, odnosno

$$E_p = -\boldsymbol{\mu} \cdot \boldsymbol{B} \quad .$$

Energija je najniža kad su $\boldsymbol{\mu}$ i $\boldsymbol{B}$ u istom smjeru. Tada je dipol u položaju stabilne ravnoteže, a potencijalna energija je negativna.

Veza magnetskog dipolnog momenta i kutne količine gibanja
(za one koji žele znati malo više)

Zamislimo nabijenu česticu koja se giba po kružnici radijusa r u ravnini xy. Neka je naboj čestice q, a masa m. Kutna količina gibanja te čestice je $\boldsymbol{L} = mr^2\boldsymbol{\omega} = mr^2\omega\hat{k}$.

Gibanje čestice možemo shvatiti kao kružnu struju. U svakom periodu $T = 2\pi/\omega$ prođe naboj q. Struja je onda

$$I = \frac{q}{T} = \frac{q\omega}{2\pi} \quad ,$$

a vektor površine kružnice je $\boldsymbol{S} = \hat{k} \cdot r^2\pi$ ($\boldsymbol{S}$ je paralelan s $\boldsymbol{L}$ i s $\boldsymbol{\omega}$). Magnetski dipolni moment te struje je

$$\boldsymbol{\mu} = I \cdot \boldsymbol{S} = q\frac{r^2}{2}\boldsymbol{\omega} \quad .$$

Usporedimo li dipolni moment i kutnu količinu gibanja, dobivamo relaciju:

$$\boldsymbol{\mu} = \frac{q}{2m}\boldsymbol{L} \quad ,$$

koja pokazuje usku povezanost te dvije veličine. Iako smo ovu relaciju izveli na primjeru iz klasične fizike, treba napomenuti da ona vrijedi i kad se promatraju kvantni fenomeni.