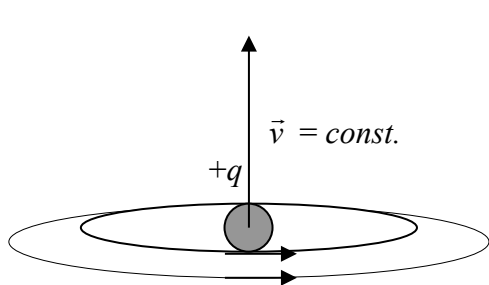


Magnetno polje – jez. smer

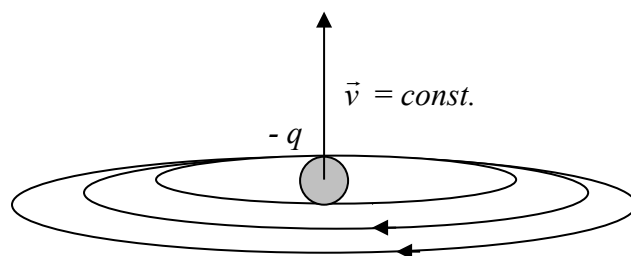
Uvod

Izvor magnetnog polja je svako naelektrisano telo koje se kreće stalnom brzinom ili provodnik sa stalnom strujom.

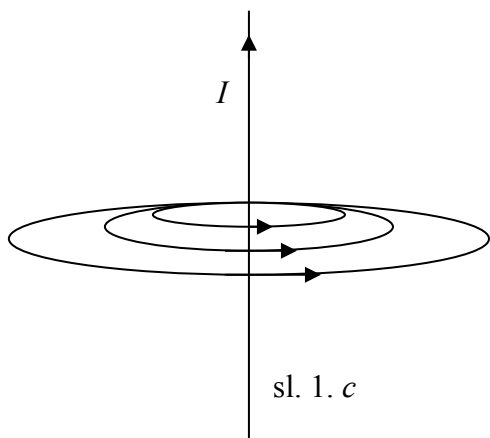
Magnetno polje spada u vrtložna polja jer ga prikazujemo kružnim linijama sile.



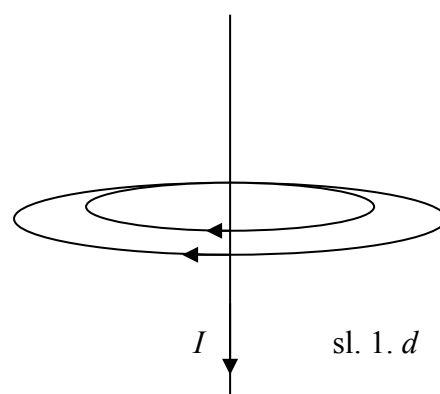
sl. 1. a



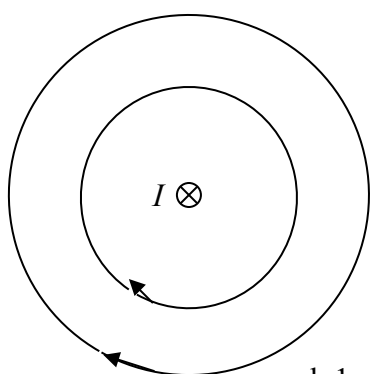
sl. 1. b



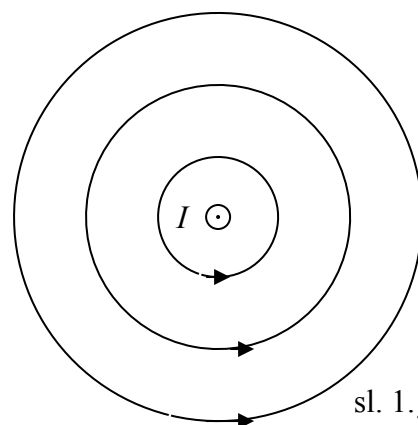
sl. 1. c



sl. 1. d



sl. 1. e



sl. 1. f

Na sl. 1. prikazan je način crtanja linija sile magnetnog polja: pod *a* i *b* za naelektrisanu česticu koja se kreće stalnom brzinom, pod *c* i *d* pravolinijskog provodnika koji leži u ravni slike i pod *e* i *f* pravolinijskog provodnika koji je normalan na ravan slike.

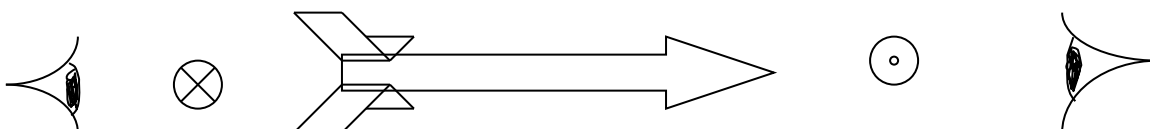
Linije sile su uvek u ravni normalnoj na pravac kretanja naelektrisanog tela, tj. na pravac duž koga je provodnik.

Broj linija sile je proizvoljno veliki (ili mali), ali po dogovoru veći broj gušćih linija sile prikazuje jače magnetno polje.

Kod određivanja smera linija sile strujnih provodnika korišćeno je Amperovo pravilo desne ruke: ako je ispružen palac desne ruke se poklopljen sa smerom struje u provodniku, tada savijeni prsti određuju smer linija sile magnetnog polja.

Kada se uzme u obzir da je jednosmerna struja usmereno kretanje slobodnih elektrona kroz međuatomski prostor metalnog provodnika i da je smer struje izabran tako da bude suprotan smeru kretanja elektrona u provodniku, jasno je da je i u slučaju kretanja naelektrisane čestice (sl. 1. a i b) takođe korišćeno Amperovo pravilo desne ruke.

Slučaj prikazan na sl. 1. e i f se često koristi zato što je u većini slučajeva važnije videti na slici položaj linija sile nego položaj provodnika. Jasno je da je realno prikazivanje oba položaja nemoguće zbog nepostojanja treće dimenzije na crtežu. U ova dva slučaja koristi se sledeći dogovor za prikazivanje smera struje u provodniku (isto pravilo se inače koristi i za prikazivanje vektora) :



sl. 2.

Ako smer struje (vektor) zamislimo kao strelicu (recimo za pikado), tada ako je gledamo spreda vidimo njen vrh kao tačku, a otpozadi vidimo njena ukrštena pera.

U magnetnom polju deluje magnetna (Lorencova ili Amperova) sila. Ako deluje na naelektrisanu česticu koja se kreće stalnom brzinom tada se obično naziva Lorencova sila, a kada deluje na provodnik sa stalnom strujom obično se naziva Amperova sila.

Magnetna sila može biti: privlačna, odbojna i indiferentna (necentralna, tj. ni privlačna ni odbojna). Sva ova tri slučaja ćemo imati u narednim lekcijama.

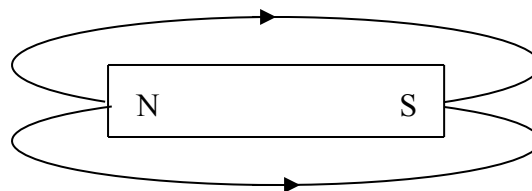
Prema magnetnim osobinama sve materijale delimo u četiri grupe:

- magnetit
- feromagnetni
- paramagnetni
- dijamagnetni

Magnetit je ruda gvožđa Fe_3O_4 , a to znači da se nalazi u zemljinoj kori. Ovaj materijal je po svojim magnetnim osobinama izuzetan u odnosu na druge prirodne materijale obzirom da je to jedini prirodni materijal koji oko sebe ima stalno magnetno polje. Drugim rečima magnetit predstavlja stalan (permanentan) magnet. Uzrok stalnog magnetnog polja oko magnetita su stalne mikrovrtložne struje u magnetitu. Naime njegovi slobodni elektroni u međuatomskom prostoru se kreću u krug pri čemu je smer njihovog kretanja isti. Magnetna polja svih ovih mikrovrtložnih struja se – s obzirom na njihov isti smer – sabiraju u ukupno magnetno polje celog magnetita. No uzrok ovakvog jedinstvenog ponašanja elektrona u magnetitu nije poznat.

Komad magnetita uvek ima dva pola: severni – N (north) i južni – S (south). Ako približimo dva komada magnetita jedan drugome između njih će delovati magnetna sila: privlačna – ako su polovi raznoimeni i odbojna – između istoimenih polova.

Linije sile su usmerene od severnog ka južnom polu.



sl. 3.

Feromagnetni su gvožđe Fe , kobalt Co i nikal Ni . Feromagnetni imaju sledeće tri osobine koje ih izdvajaju od drugih materijala:

1. Jako se privlače sa magnetitom
2. Mogu se privremeno namagnetisati. Npr. gvozdeni predmet se može namagnetisati ako ga protrljamo komadom magnetita. No ova namagnetisanost traje samo nekoliko minuta. Međutim, neke vrste čelika je moguće trajno namagnetisati.
3. Svojim prisustvom značajno pojačavaju spoljašnje magnetno polje.

Feromagnetne osobine su naročito jako izražene kod gvožđa, pa se prema njemu ovi materijali i nazivaju: ferum (lat.) – gvožđe.

Svi ostali materijali spadaju u para ili dijamagnete.

Paramagneti su svi materijali koji se slabo privlače sa magnetitom. To su, recimo, neparni elementi periodnog sistema.

Dijamagneti su svi materijali koji se slabo odbijaju sa magnetitom. Primer su parni elementi iz periodnog sistema.

Vektor indukcije magnetnog polja \vec{B} (T)

Indukcija magnetnog polja je veličina koja određuje jačinu magnetnog polja. Postoji posebna veličina koja se naziva jačina magnetnog polja H , ali se ona retko koristi. Veza između indukcije i jačine je:

$$B = \mu_0 \cdot H$$

gde je $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A} = 12.56 \cdot 10^{-7} \frac{Tm}{A}$ – apsolutna magnetna permeabilnost vakuuma.

Vektor indukcije u datoj tački magnetnog polja se crta duž tangente na liniju sile magnetnog polja koja prolazi kroz tu tačku i ima isti smer kao ta linija sile, što je i prikazano na sl. 4. Ako je izvor magnetnog polja provodnik sa strujom jačine I , tada se za izračunavanje magnetne indukcije B koristi:

Bio – Savarov zakon

$$B = k^l \cdot \frac{2 \cdot I}{a} = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2 \cdot I}{a}$$

gde je k^l magnetna konstanta čija

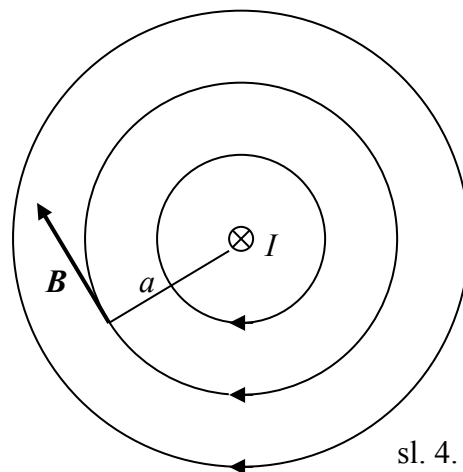
vrednost za vakuum iznosi:

$$k^l = 10^{-7} \frac{Tm}{A},$$

ali je njena vrednost u drugim sredinama različita, I je jačina struje u provodniku, dok je a rastojanje tačke u kojoj određujemo indukciju polja od provodnika sa strujom.

Bio – Savarov zakon čitamo: Indukcija magnetnog polja (jačina magnetnog polja) u datoj tački je direktno srazmerna jačini struje u provodniku, a obrnuto srazmerna rastojanju od provodnika do te tačke. Indukcija zavisi i od vrste sredine u kojoj se provodnik nalazi (preko vrednosti konstante k^l).

Jedinica magnetne indukcije je *Tesla* (T). Ovo je dosta velika jedinica tako da su do sada najjača izazvana magnetna polja od oko 50 T. Prosečna jačina Zemljinog magnetnog polja iznosi: $2 \cdot 10^{-5} T$.



sl. 4.

Magnetni fluks Φ_m (Wb)

Magnetni fluks kroz datu površinu (S) je jednak broju prodora linija sile magnetnog polja kroz tu površinu.

Magnetni fluks je određen obrascem:

$$\Phi_m = \vec{B} \cdot \vec{S}$$

tj. određen je kao skalarni proizvod: vektora indukcije (jačine) magnetnog polja i vektora zadate površine.

Kao što je poznato \vec{B} ima pravac tangente na liniju sile magnetnog polja u datoj tački, dok mu je smer isti sa smerom te linije sile. Ako su linije sile magnetnog polja pravolinijske (kao što je slučaj u prostoru između dva suprotna magnetna pola), tada \vec{B} ima isti pravac i smer sa njima.

Iz matematike znamo da je vektor date površine \vec{S} , vektor čija je napadna tačka u centru te površine, a čiji pravac je normalan na ovu površinu. Smer ovog vektora zavisi od načina obeležavanja ove površine i u ovom slučaju nije bitan.

Za izračunavanje magnetnog fluksa koristimo sledeći obrazac:

$$\Phi_m = B \cdot S \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

koji je u skladu sa zakonom skalarnog množenja, gde je:

$$\alpha = \angle(\vec{B}, \vec{S}).$$

Magnetni fluks (a to znači broj prodora linija sile kroz datu površinu) je direktno srazmeran jačini magnetnog polja i površini, a od ugla zavisi na složen kosinusni način:

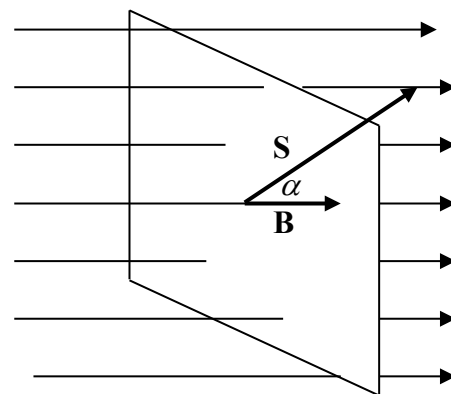
$$\alpha = 0^\circ \Rightarrow \Phi_{m,\max}$$

$$\alpha \uparrow (0^\circ \rightarrow 90^\circ) \Rightarrow \Phi_m \downarrow$$

$$\alpha = 90^\circ \Rightarrow \Phi_m = 0$$

$$\alpha \uparrow (90^\circ \rightarrow 180^\circ) \Rightarrow \Phi_m \uparrow$$

$$\alpha = 180^\circ \Rightarrow \Phi_{m,\max} \dots$$



sl. 5.

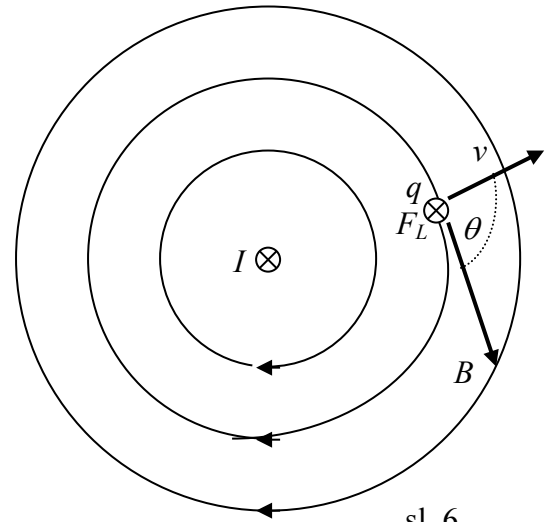
Direktnu srazmeru fluksa i jačine magnetnog polja je lako razumeti ako imamo na umu da se jače magnetno polje uvek, po dogovoru u fizici, prikazuje gušće raspoređenim linijama sile.

Najlakše je razumeti direktnu srazmeru fluksa i površine, jer će povećana površina sigurno zahvatiti veći broj linija sile.

Zavisnost fluksa od ugla je najteže shvatiti, ali ako zamislite da izvestan broj linija sile magnetnog polja prolazi kroz površinu pod pravim uglom (tada je $\alpha = 0^\circ$, ili $\alpha = 180^\circ$, koja je vrednost ugla od ove dve, zavisi od smeru vektora površine) tada je fluks maksimalan, a to nam kaže i obrazac (1) zato što je $\cos 0^\circ = \cos 180^\circ = 1$, a to je maksimalna vrednost kosinusa ugla. Ako počnete da okrećete tu površinu vrednost ugla α će se menjati, ali će se broj prodora linija sile kroz tu površinu smanjivati sve dok površinu ne okrenete tako da linije sile budu sa njom paralelne. Tada je $\alpha = 90^\circ$, a nema više ni jednog prodora kroz tu površinu – pa je i fluks kroz nju tada jednak nuli – a isto je i po obrascu (1) zato što je $\cos 90^\circ = 0$.

Lorencova sila \vec{F}_L (N)

U ovoj lekciji razmatramo delovanje magnetnog polja indukcije B – a čiji je izvor provodnik sa strujom jačine I i koji je normalan na ravan slike – magnetnom silom na česticu koja nosi naelektrisanje q i koja se kreće stalnom brzinom v . Ta magnetna sila se u ovom slučaju naziva Lorencova sila. Na sl. 6. Lorencova sila nije ni privlačna ni odbojna već vuče česticu paralelno sa telom provodnika, što znači da je u ovom slučaju magnetna sila indiferentna.



sl. 6.

Lorencova sila se određuje iz sledećeg vektorskog proizvoda:

$$\vec{F}_L = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}.$$

Njena brojna vrednost je:

$$F_L = q \cdot v \cdot B \cdot \sin \theta.$$

Dakle, Lorencova sila je direktno srazmerna: naelektrisanju i brzini čestice kao i jačini magnetnog polja, dok od ugla θ zavisi na složen sinusni način:

$$\theta = 0^\circ \Rightarrow F_L = 0$$

$$\theta \uparrow (0^\circ \rightarrow 90^\circ) \Rightarrow F_L \uparrow$$

$$\theta = 90^\circ \Rightarrow F_{L,\max}$$

$$\theta \uparrow (90^\circ \rightarrow 180^\circ) \Rightarrow F_L \downarrow$$

$$\theta = 180^\circ \Rightarrow F_L = 0 \quad \text{itd.}$$

Zanimljivo je da ova zavisnost znači da pri kretanju čestice po liniji sile na nju ne deluje Lorencova sila. Naime, kada se kreće niz liniju sile tada je: $\theta = 0^\circ \Rightarrow F_L = 0$, a kada se kreće uz nju tada je: $\theta = 180^\circ \Rightarrow F_L = 0$.

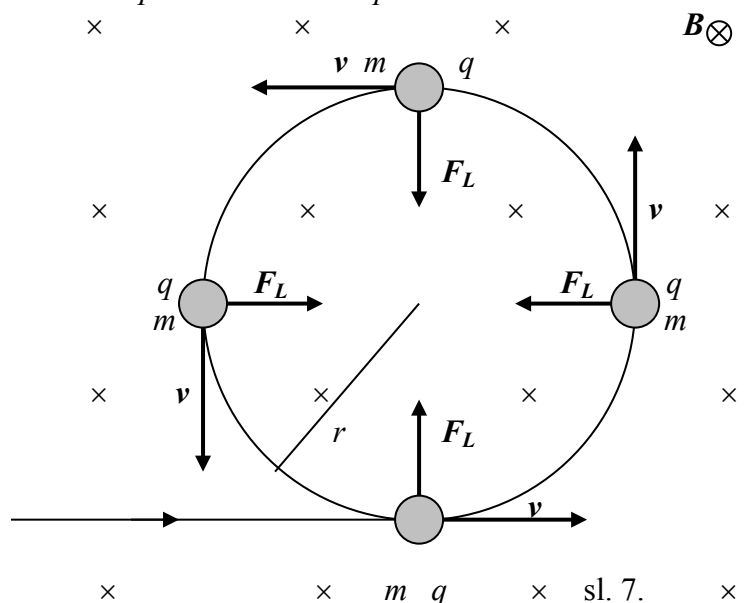
Pravac i smer Lorencove sile određuje se pravilom desne ruke. Na ispruženom dlanu desne ruke, prvo se palac otkloni u levo tako da se nađe pod pravim uglom u odnosu na kažiprst. Zatim se srednji, domali i mali prst saviju zajedno napred, dok se ne nađu pod pravim uglom u odnosu na kažiprst. Tada se palac i kažiprst poklope sa odgovarajućim vektorima na slici:

$$\begin{array}{ccccccc} \vec{F}_L & = & q & \vec{v} & \times & \vec{B} & \\ \text{3 prsta} & & & \text{palac} & & \text{kažiprst} & \\ & & \times & & \times & & \times \quad B \otimes \end{array}$$

Na sl. 7. prikazan je slučaj kada pozitivno naelektrisana čestica uleti u magnetno polje čije su linije sile normalne na ravan slike. Ako vektor brzine čestice i vektor magnetne indukcije zaklapaju prav ugao tada Lorencova sila neprekidno skreće česticu sa pravolinijske putanje i izaziva njeno kružno kretanje. Na taj način Lorencova sila postaje centripetalna: $F_L = F_{cp}$. Sledi:

$$q \cdot v \cdot B \cdot \sin 90^\circ = m \cdot \frac{v^2}{r}, \quad \text{tj.}$$

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}. \quad (1)$$



sl. 7.

Ciklotron

Prethodni slučaj koji je razmatran na sl. 7. je slučaj na kome se zasniva rad uređaja za ubrzavanje naelektrisanih mikro čestica, a to je ciklotron.

Ciklotron se sastoji od dva metalna duanta koji su priključeni na generator naizmjenične struje. Zbog toga se naelektrisanje duanata periodično menja u smislu da je u jednom trenutku jedan pozitivan, a drugi negativan, a onda se polaritet okrene itd. To u prostoru između duanata stvara, po smeru, promenljivo električno polje.

Normalno na ravan slike deluje stalno magnetno polje indukcije B .

U ciklotronu je vakuum, da vazduh ne bi ometao kretanje mikročestice koja se u njemu ubrzava.

Zadatak promenljivog električnog polja je da ubrzava naelektrisanu česticu gore – dole. Međutim

kada ne bi bilo magnetnog polja pozitivno naelektrisana čestica (npr. proton) bi se kretala pravolinijski gore – dole, jureći za minusom, a bežeći od plusa. Pritom bi se – pri promeni polariteta duanata – proton uvek zaustavio u gornjoj, tj. donjoj mrtvoj tački ($M T$ na slici), a onda iznova započinjao ubrzavanje sa početnom brzinom jednakom nuli. Dakle, zadatak magnetnog polja je da spreči pravolinijsko kretanje gore – dole, što bi inače neminovno dovelo do zaustavljanja protona u mrtvim tačkama. Prisustvo spoljašnjeg magnetnog polja indukcije B znači da će na proton delovati Lorencova sila i da će ona saviti njegovu putanju. Zbog toga kada proton stigne u mrtvu tačku – bočno prokliza kroz nju i na taj način sačuva prethodno stečenu brzinu.

Frekvencija naizmjenične struje, koja izaziva promenljivo električno polje između duanata je tako podešena da do obrtanja polariteta duanata dolazi u trenutku kada proton prolazi kroz mrtvu tačku.

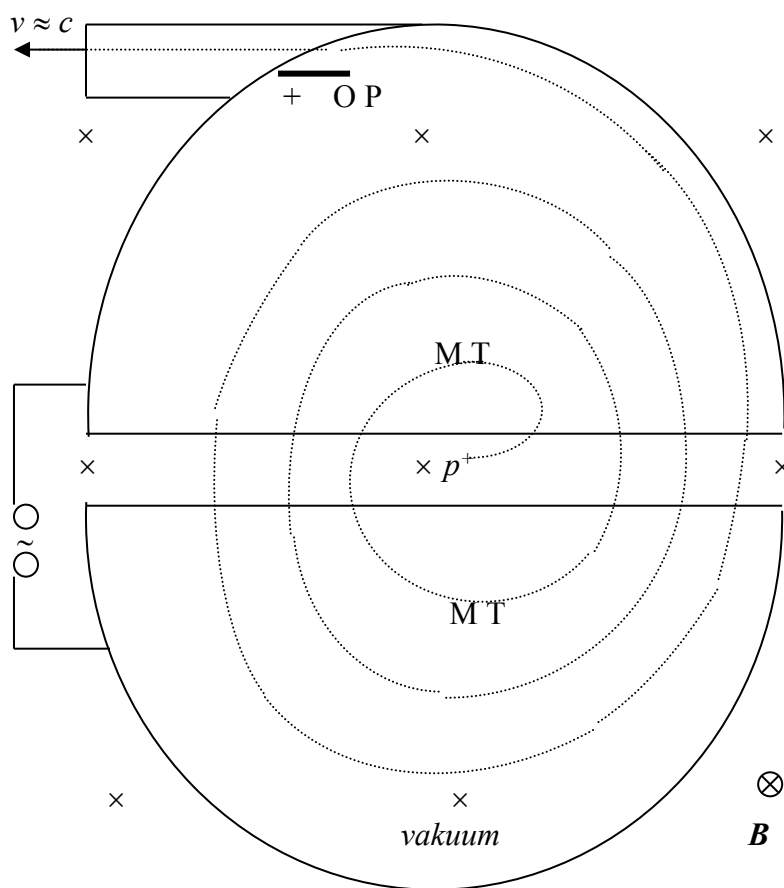
Kako u svakom narednom krugu proton povećava brzinu, dolazi do povećanja poluprečnika njegove putanje, što sledi iz obrasca:

$$r = \frac{m \cdot v}{q \cdot B}$$

Zato putanja protona nije kružnica, nego spirala koja se širi sa povećanjem njegove brzine.

Kada proton napokon stigne do unutrašnjeg zida duanata on prođe iznad otklonske pločice ($O P$ na slici) koja je pozitivna i koja ga spreči da nastavi spiralno kretanje. Brojna vrednost njenog pozitivnog naelektrisanja je tako podešena da ga odbojnom Kulonovom silom izbacila u željenom pravcu.

Očigledno je da veličina ciklotrona određuje do koje je brzine moguće ubrzavati naelektrisane čestice u njemu. Zato se grade veliki ciklotroni. Najveći ciklotron danas se nalazi u institutu CERN u Ženevi. Ovaj ciklotron ima tunele – kroz koje se čestice ubrzavaju – duge 27 km.



sl. 8.

Amperov zakon

U ovoj lekciji razmatramo delovanje magnetnog polja indukcije B magnetnom silom na provodnik zahvaćene dužine l kroz koji protiče stalna struja jačine I . Ova magnetna sila se naziva Amperova sila F_A .

U ovom slučaju važi Amperov zakon:

$$\vec{F}_A = I \cdot \vec{l} \times \vec{B},$$

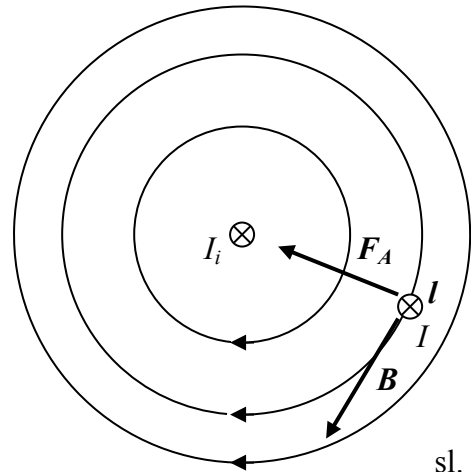
ili u skalarnom obliku:

$$F_A = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \beta.$$

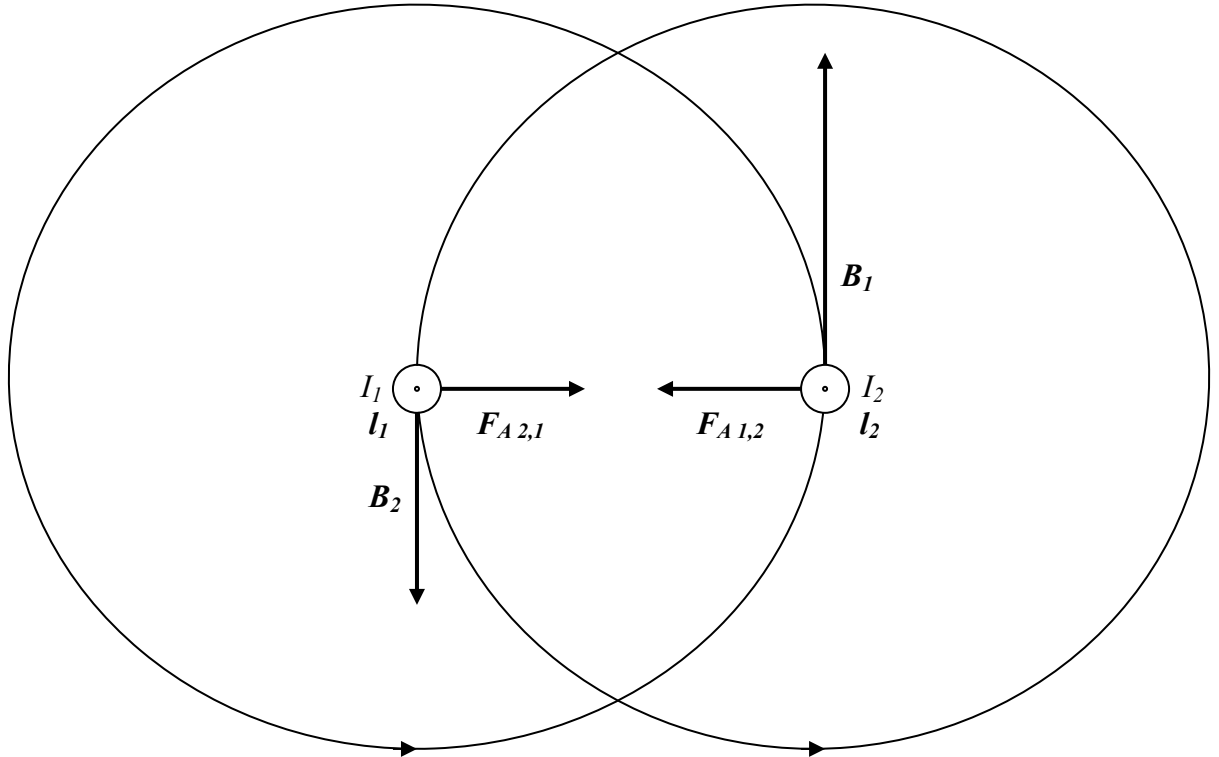
β je ugao između tela provodnika i vektora magnetne indukcije \vec{B} .

Skalarni oblik Amperovog zakona možemo pročitati na sledeći način: Amperova sila je direktno srazmerna jačini struje i zahvaćenoj dužini provodnika, kao i jačini magnetnog polja, a od ugla β zavisi na složen sinusni način (kako ova zavisnost izgleda može se videti u prethodnoj lekciji). Pod zahvaćenom dužinom provodnika se smatra onaj deo njegove dužine koji se nalazi unutar spoljašnjeg magnetnog polja. Ova dužina se uzima kao vektor, a dogovor je da je njen smer isti kao i smer struje u provodniku.

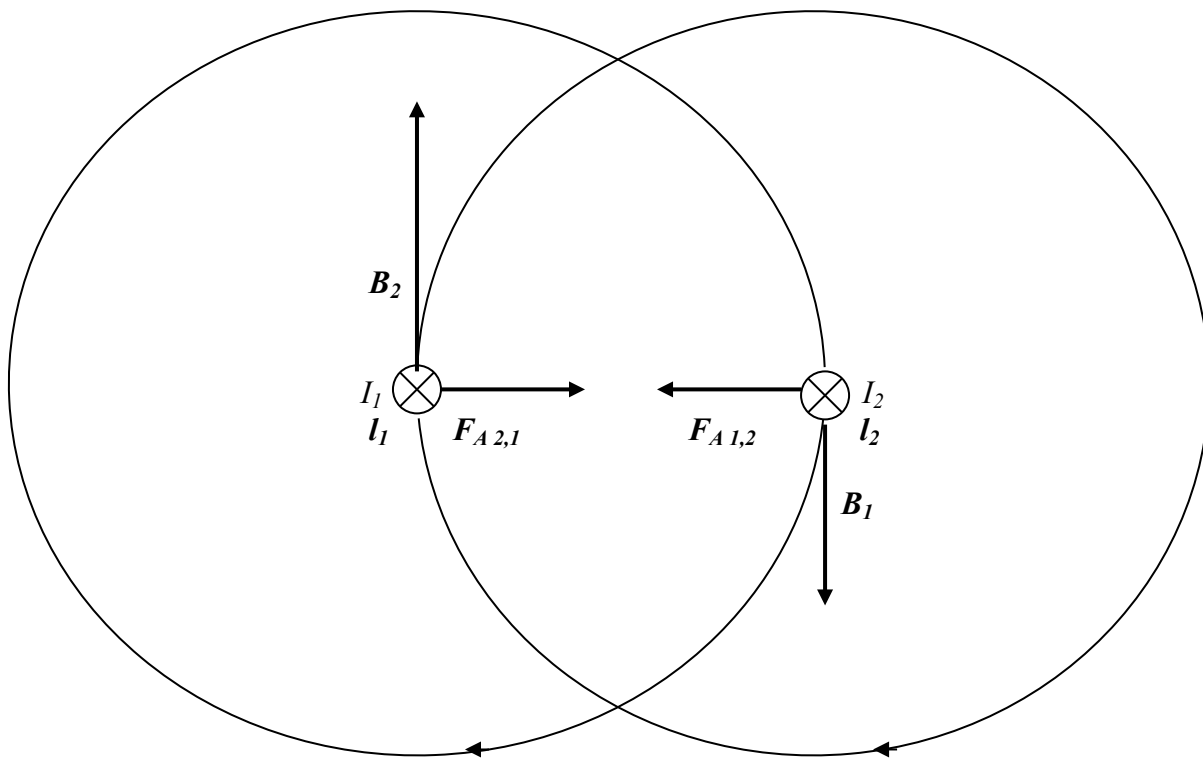
Međutim na sl. 9. prikazana je samo jedna polovina istine, a to je da provodnik koji je izvor magnetnog polja deluje na drugi provodnik Amperovom silom. U stvarnosti ova dva provodnika uzajamno deluju jer su oba izvori magnetnih polja. Njihovo uzajamno delovanje je prikazano na narednim slikama (sl. 10.)



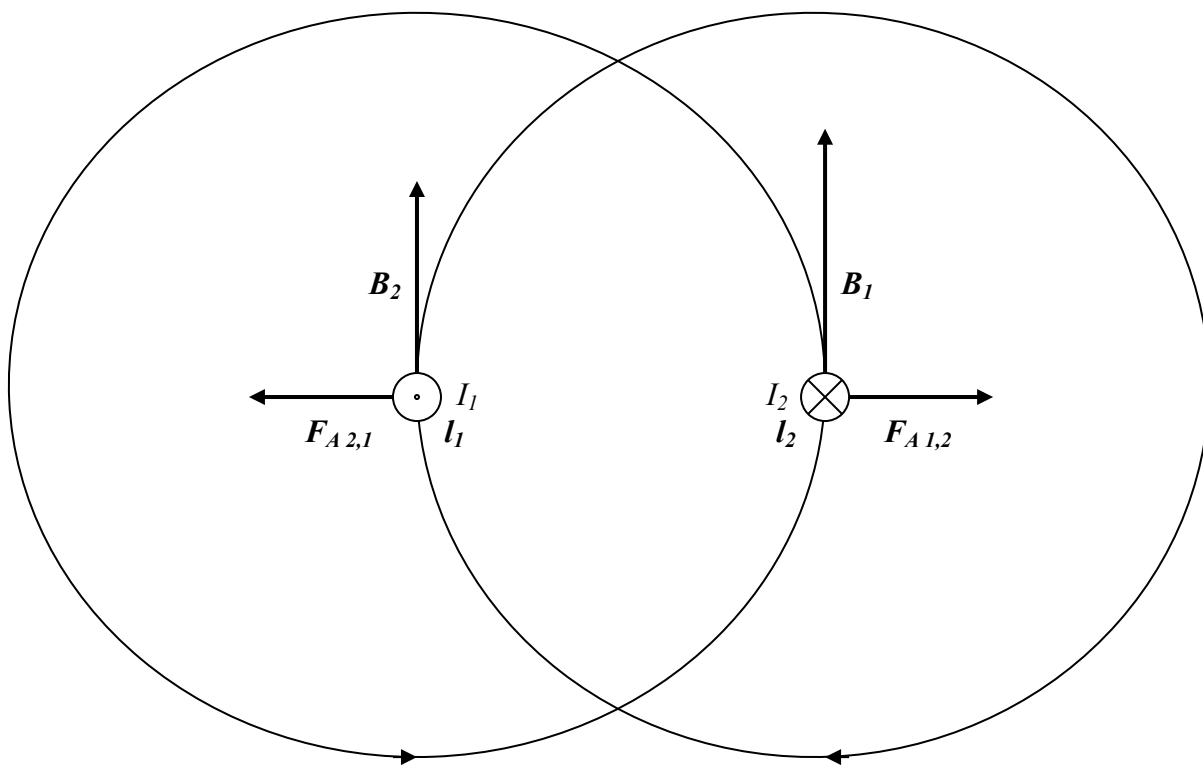
sl. 9.



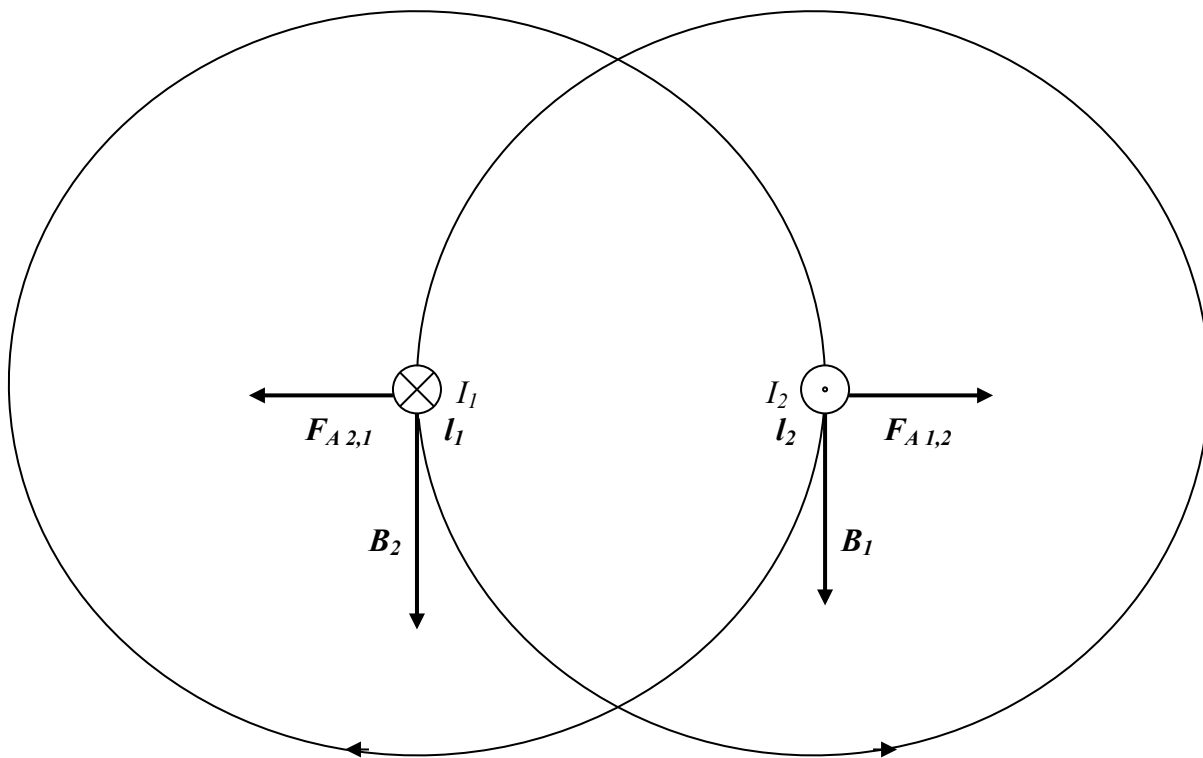
sl. 10. a



sl. 10. *b*



sl. 10. *c*



sl. 10. *d*

Za određivanje pravca i smera Amperove sile opet je korišćeno pravilo desne ruke:

$$\vec{F}_A = I \vec{l} \times \vec{B}$$

3 prsta palac kažiprst

Na sl. 10. *a, b, c* i *d* oba provodnika su izvori sopstvenih magnetnih polja i svaki od njih se nalazi u magnetnom polju onog drugog, što je uslov da uzajamno deluju po Amperovom zakonu. Te dve Amperove sile možemo shvatiti i kao akciju i reakciju. Po Amperovom zakonu obrasci za ova dva dejstva su:

$$\vec{F}_{A2,1} = I_1 \cdot \vec{l}_1 \times \vec{B}_2 \quad \text{i} \quad \vec{F}_{A1,2} = I_2 \cdot \vec{l}_2 \times \vec{B}_1 .$$

Na sl. 10. prikazani su svi mogući slučajevi rasporeda dva paralelna pravolinijska strujna provodnika, a prethodni obrasci važe za sve te slučajeve.

Iz ovih primera se može zaključiti da je Amperova sila privlačna uvek kada je smer struje u provodnicima isti (sl. 10. *a* i *b*), a da je odbojna kada su smerovi struja u dva provodnika suprotni (sl. 10. *c* i *d*).