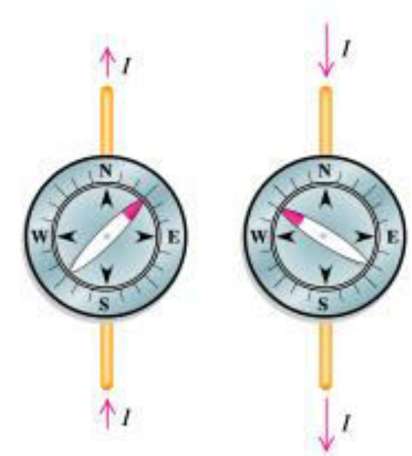
ELEKTROMAGNĒTISMS

....ir fizikas daļa, kas aplūko

elektrisko strāvu mijiedarbību, resp.,

elektriski lādētu daļiņu un lādiņu *sistēmu* mijiedarbību,

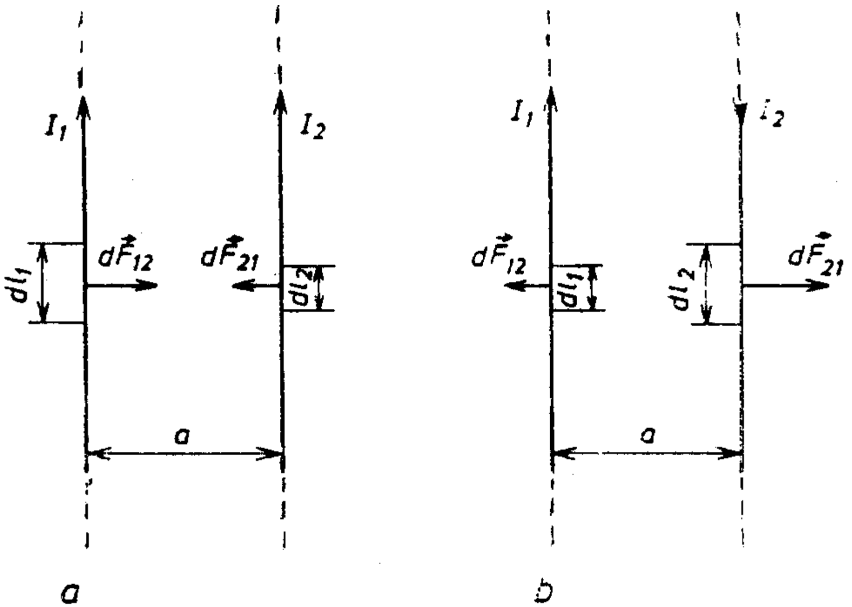
ja tie atrodas kustībā aprakstam izraudzītā atskaites sistēmā.



Lauku, kas eksistē telpā ap elektrisko līdzstrāvu (kustībā esošiem lādiņiem) sauc par ***magnētisko lauku***.

Paralēlu strāvu mijiedarbības spēks.

Apskatīsim mijiedarbības spēku starp diviem tieviem, paralēliem, gariem vadiem



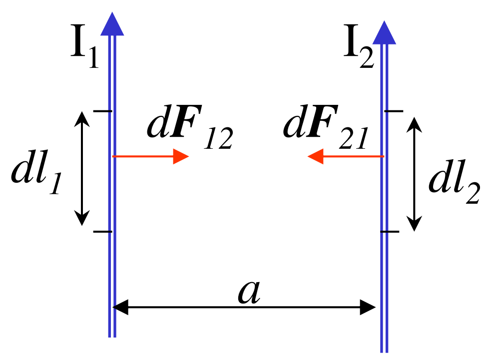
Strāvas spēks $d\vec{F}_{12}$, kas darbojas uz strāvas vada elementu dl_1 ir proporcionāls strāvām I_1, I_2, kā arī elementa garumam dl_1 un apgriezti proporcionāls attālumam a starp vadiem, t.i.,

$$dF_{12} = \frac{k_1 I_1 I_2 d\lambda_1}{a}$$

kur k_1 prop. koef.

AMPĒRA likums paralēlām (un anti - paralēlām) strāvām

Analogi elementam dl_2 $\quad dF_{21} = \dfrac{k_1 I_1 I_2 d\lambda_2}{a}$



SI sistēmā $k_1 = \mu_0/(2\pi)$, ja vadi atrodas vakuumā, kur μ_0 magnētiska konstante.

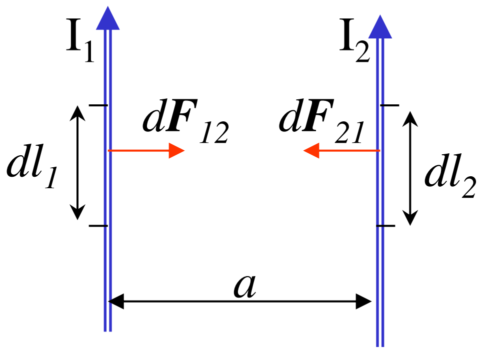
Apzīmējot $dF_{12}/dl_1 = dF_{12}/dl_2 = f$ var rakstīt, ka strāvas vada garuma vienībai pieliktais spēks vakuumā:

$$\boxed{f_{VAK} = \frac{dF}{d\lambda} = \frac{\mu_0}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{a}}$$

Attiecību $f/f_{vak} = \mu$ sauc par vides relatīvo mag. caurlaidību.

Tādējādi Ampēra likums ir:

$$f = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi}\frac{I_1 I_2}{a}$$



jeb $$F = \frac{\mu_0 \mu}{2\pi} \cdot \frac{I_1 I_2 l}{a}$$

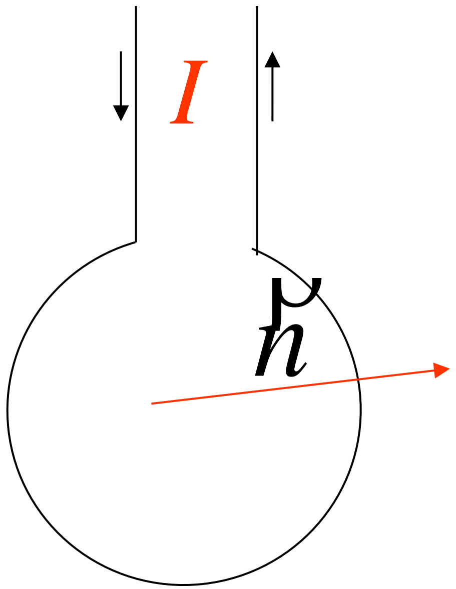
$\mu\mu_0 = \mu_a$ – absolūtā magnētiskā caurlaidība. Vakuumam $\mu = 1$ un $\mu_a = \mu_0$ un tādēļ

μ_0 sauc arī par vakuuma absolūto magnētisko caurlaidību.

Ampērs ir tādas nemainīgas strāvas stiprums, kurai plūstot pa diviem taisniem, paralēliem, bezgalīgi gariem, tieviem riņķveida šķēluma vadiem, ja tie novietoti vakuumā 1 m attālumā viens no otra, uz katru vada garuma vienību – metru darbojas 2×10^{-7} N liels spēks.

$$\mu_0 = 4\pi10^{-7}\ [N/A^2] = 4\pi10^{-7}\ [H/m]$$

Strāvas kontūrs magnētiskajā laukā, tā magnētiskais moments.



Ja magnētiskajā laukā ienes kontūru, pa kuru plūst strāva, un kontūrs var brīvi griezties, tas orientējas un ieņem stabilu līdzsvara stāvokli.

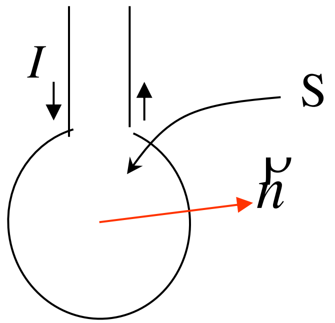
$\vec{n}$ - kontūra normāles vienības vektors,

I – strāva kontūrā

S - kontūra laukums.

Tādēļ, mazu izmēru strāvas kontūru, kuru iespējams novietot "dotajā punktā", var izmantot par zondi magnētiskā lauka lokālo īpašību pētīšanai.

Strāvas kontūrs magnētiskajā laukā, tā magnētiskais moments.



Uz kontūru, ja tas ir izvirzīts no līdzsvara stāvokļa par leņķi α, magnētiskais lauks darbojas ar ***spēka momentu*** $\vec{M}$, kas cenšas kontūru atgriezt līdzsvara stāvoklī.

Vektora $\vec{M}$ modulis ir $M = B\,I\,S\,\sin\alpha.$

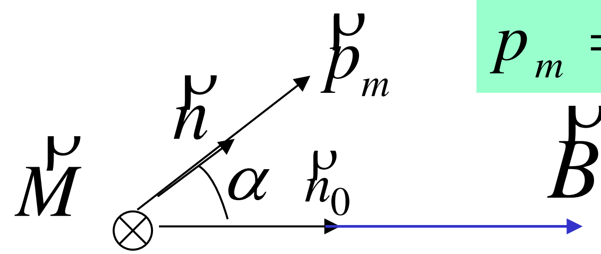
Kur **B** [T] proporcionalitātes koeficents ***magnētiskā lauka indukcijas modulis***.

Kontūra raksturošanai lieto *vektoru* strāvas kontūra ***magnētisko momentu***:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$

Sekojoši:

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B}.$$



Ja $\vec{p}_m \perp \vec{B}$,tad spēka moments $\vec{M} = \vec{M}_{max}$.

$\vec{n}$ - kontūra normāles vienības vektors,

I – strāva kontūrā

S - kontūra laukums.

• Par ārēju magnētisko lauku uzskata lauku ko rada strāvas vai magnēti; un to raksturo ar magnētiskā lauka *intensitāti* **H** [A/m]; un tas ir no vides īpašībām neatkarīgs parametrs.

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu\mu_o}.$$

• Vielas (jeb magnētiķa) magnetizēšanās pakāpi t.i., spēju radīt savu iekšēju magnētisko lauku raksturo vielas tilpuma vienības *magnetizācija* **J** [A/m].

• Ja viela ievietota ārējā mag. laukā, tās magnētisko stāvokli raksturo *magnētiskā uzņēmība [grieķu Chi]* **χ = J/H**. Ir vielas kurām **χ = χ(H).**

• Magnētiķī pastāv rezultējošais mag. lauks, kuru rada kā ārējais lauks, tā arī pati viela.Te rezultējošo mag. lauku raksturo ar tā *indukciju* **B** [T].

$$\vec{B} = \mu_0(1+\chi)\vec{H} = \mu_0\mu\vec{H}$$

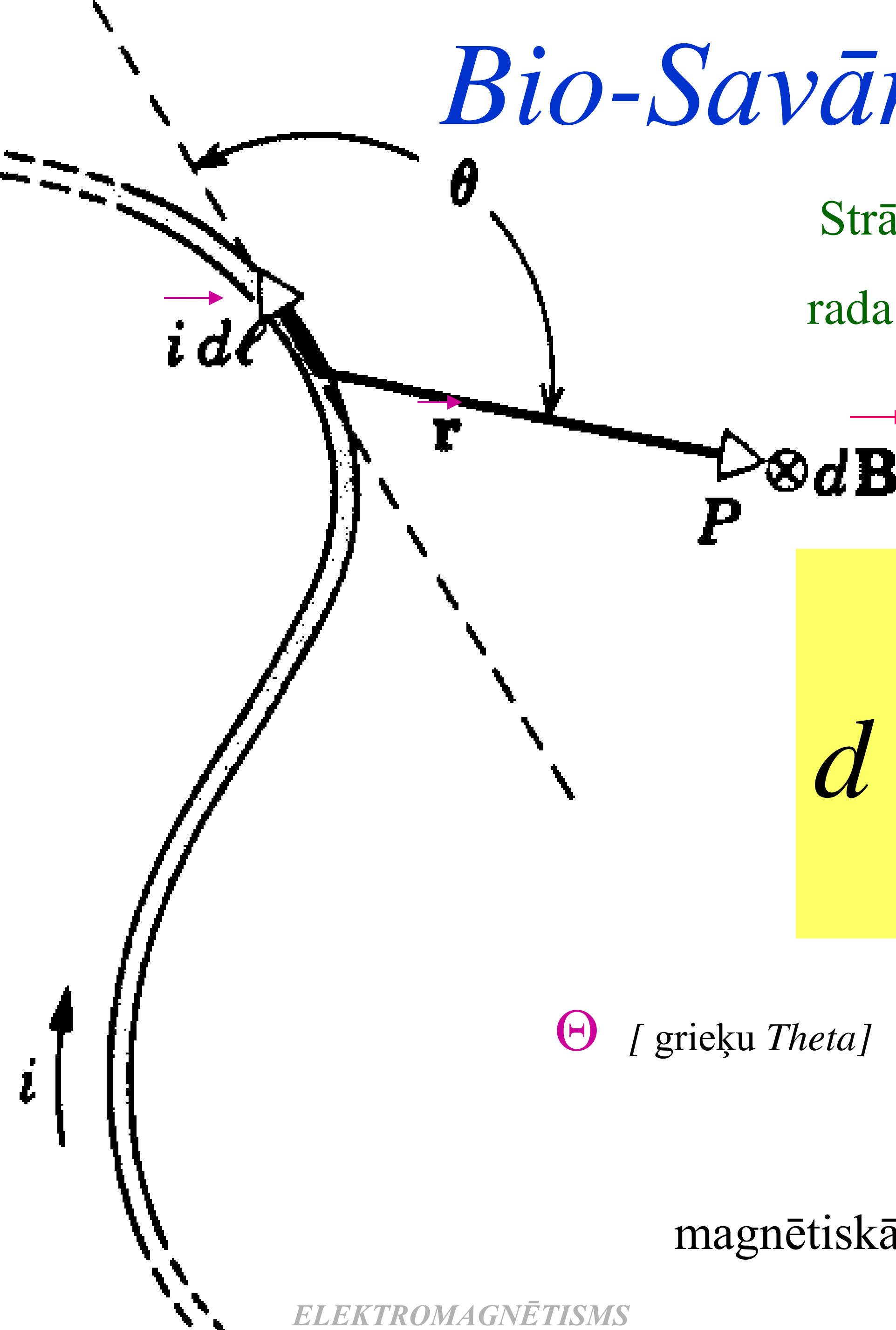
Atkarībā no μ: diamagnētiķi μ < 1, paramagnētiķi μ > 1, feromagnētiķi μ >> 1.

Magnētiskam laukam ir spēkā superpozicijas princips.

Ja magnētisko lauku rada vienlaikus vairākas strāvas, tad rezultējošo indukciju var noteikt, vektoriāli saskaitot to lauku indukcijas, kurus rada katra strāva atsevišķi, kad pārējās strāvas neplūst, t. i.,

$$\boxed{\vec{B} = \sum_{i=1}^{N} \vec{B}_i}$$

Bio-Savāra-Laplasa likums.



Strāva ***i***, kas plūst ***vada elementā*** $d\vec{l}$,

rada (.)-ā P, kuru raksturo ***rādiuss-vektors*** $\vec{r}$

magnētiskā lauka ***indukciju*** $d\vec{B}$

$$d\vec{B} = \mu\mu_0 \frac{id\vec{l}\times\vec{r}}{4\pi r^3}$$

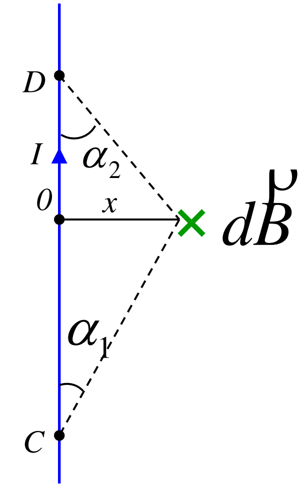
Θ *[grieķu Theta]* leņķis starp $d\vec{l}$ un $\vec{r}$

magnētiskā lauka *intensitāte* $dH = \dfrac{idl\sin\Theta}{4\pi r^2}$

Bio-Savara-Laplasa likuma pielietojumi:

- Galīgā garuma vadam

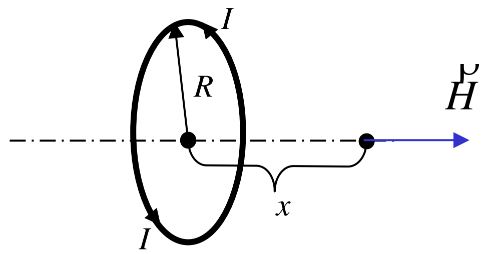
$$H = I\,\frac{\cos\alpha_1 + \cos\alpha_2}{4\pi x}$$



2. Riņķveida elektriskās strāvas magnētiskais lauks.

- Attālumā x no strāvas vada centra

$$H = \frac{IR^2}{2\cdot(R^2 + x^2)^{3/2}}$$

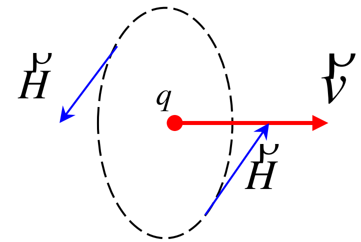


- Riņķa līnijas centrā ($x = 0$)

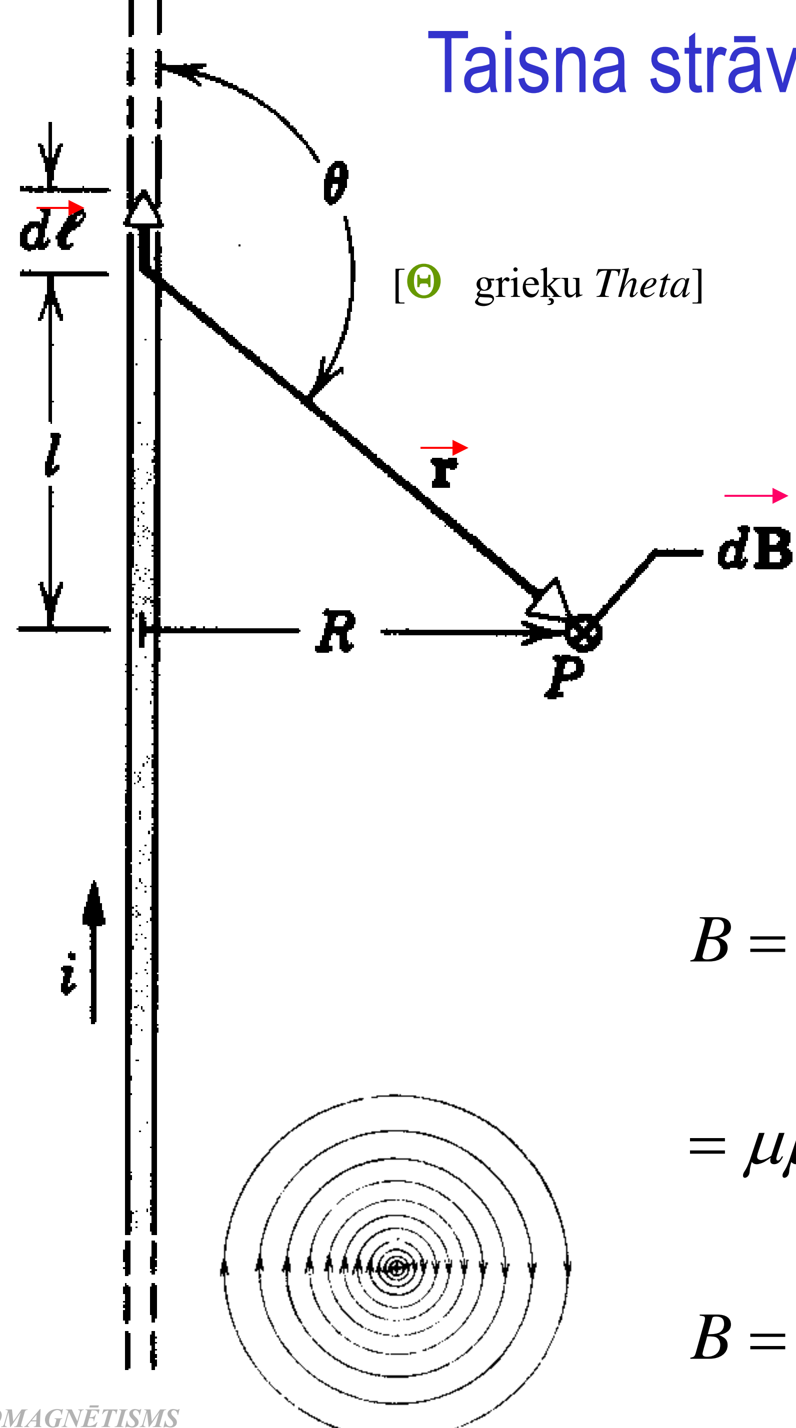
$$H = \frac{I}{2R}$$

3. Atsevišķa kustībā esoša elektriskā lādiņa magnētiskais lauks

$$\vec{H} = \frac{1}{4\pi}\cdot\frac{q\vec{v}\times\vec{r}}{r^3}$$



Taisna strāvas vada magnētiskais lauks.



[Θ grieķu *Theta*]

$$dB = \mu\mu_0 \frac{idl \sin\Theta}{4\pi r^2}$$

$$B = \int dB = \mu\mu_0 \frac{i}{4\pi} \int_{l=-\infty}^{l=+\infty} \frac{\sin\Theta dl}{r^2}$$

$$\sin\Theta = \sin(\pi - \Theta) = \frac{R}{\sqrt{l^2 + R^2}}$$

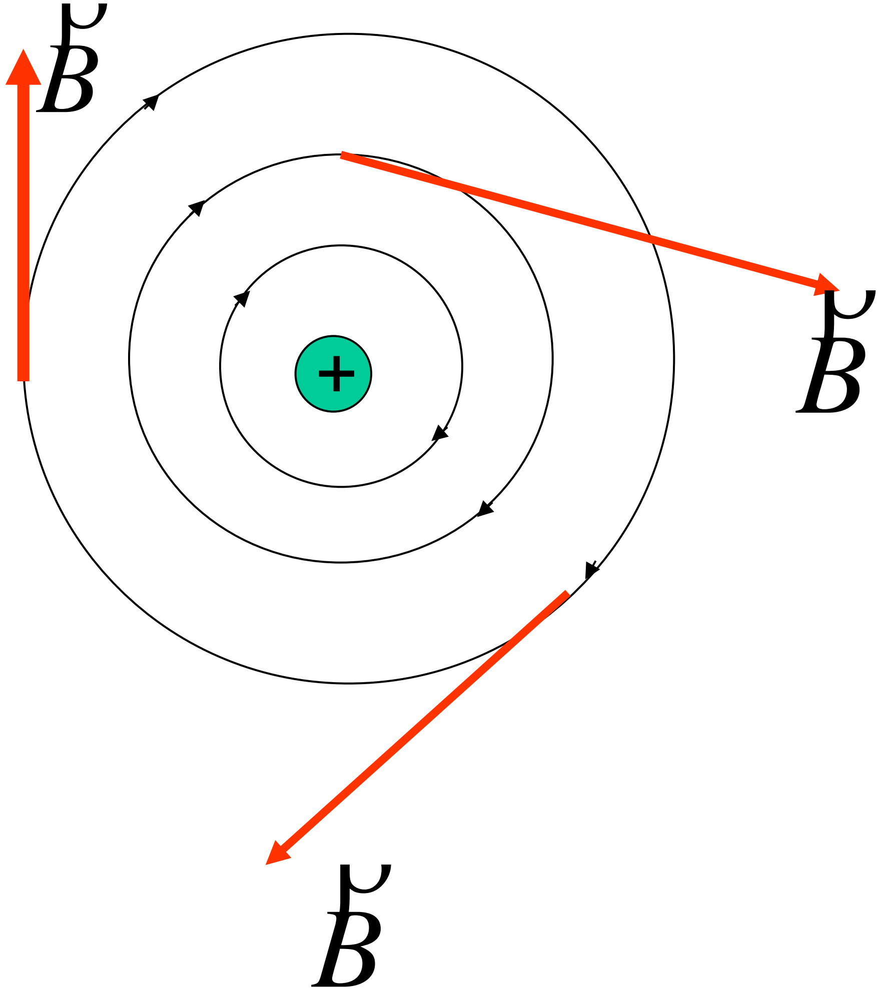
$$r = \sqrt{l^2 + R^2}$$

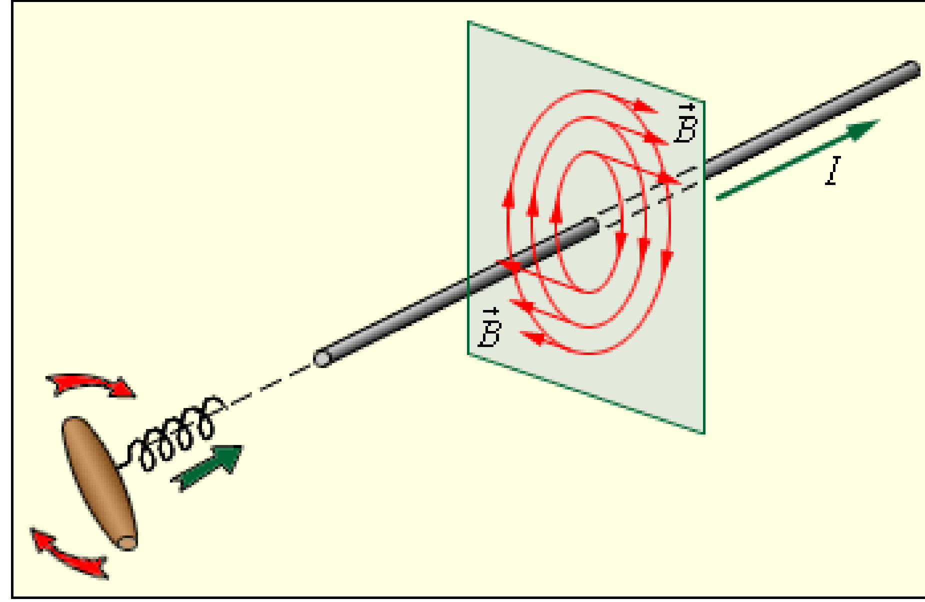
$$B = \mu\mu_0 \frac{i}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \frac{Rdl}{(l^2 + R^2)^{3/2}} =$$

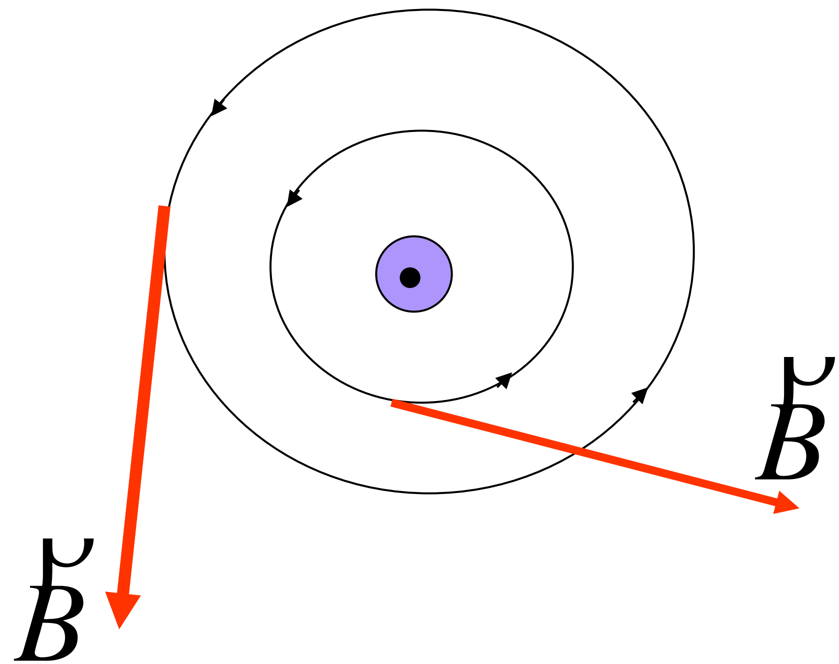
$$= \mu\mu_0 \frac{i}{2\pi R} \frac{l}{(l^2 + R^2)^{1/2}} [\, l = +\infty; l = -\infty \,]$$

$$B = \mu\mu_0 \frac{i}{2\pi R}$$

Bio-Savara likums.


B
B
B


B
B
I


B
B

Piemērs

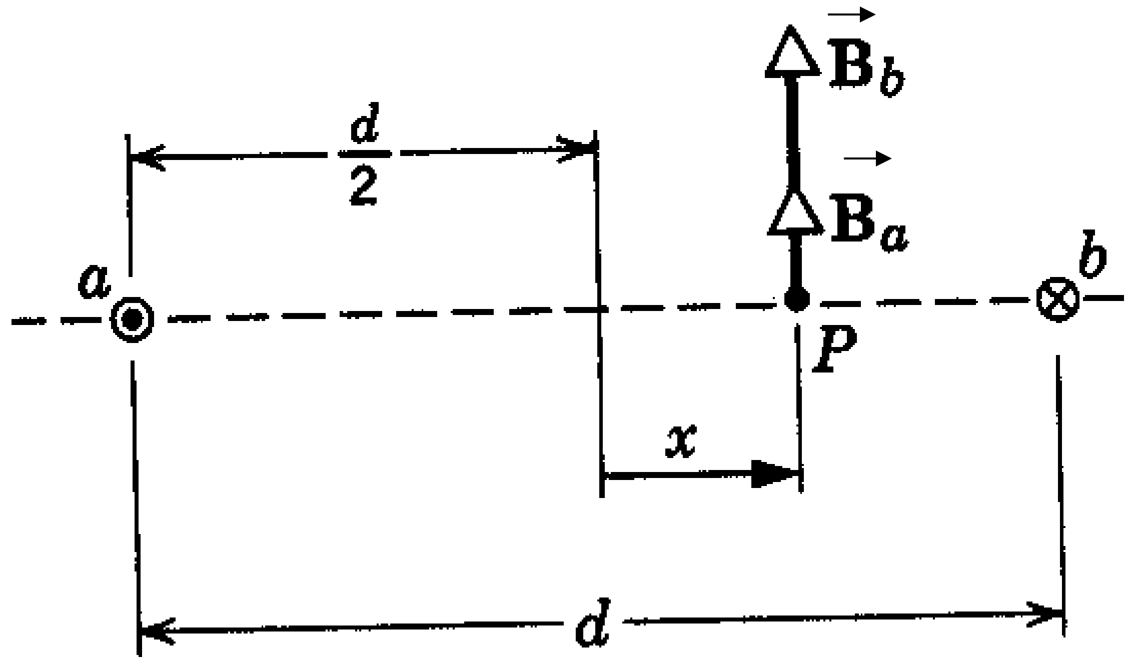
Noteikt magnētiskā lauka indukciju B telpas (.)-ā, kas atrodas attālumā r = 2 cm no vada pa kuru plūst strāva i = 80 A; μ = 10.

$$B = \mu\mu_0 \frac{i}{2\pi R}$$

Bio-Savara likums.

$$B = \frac{10 \times (4\pi \times 10^{-7} T \cdot m / A)(80A)}{(2\pi)(2 \times 10^{-2} m)} = 8mT$$

Piemērs. Pa diviem paralēliem vadiem vakuumā starp kuriem ir attālums d = 0,1 m plūst vienāda, bet pretēja virziena līdzstrāva i = 10 A. Noteikt magnētiskā lauka indukciju B (.)-ā P, kas atrodas attālumā x = d/10 no abu vadu viduspunkta.



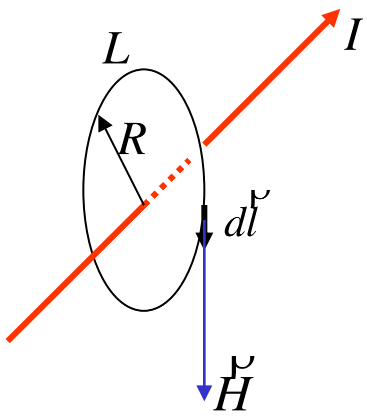
Magnētiskam laukam ir spēkā superpozicijas princips

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^{N} \vec{B}_i .$$

$$B(x) = B_a + B_b$$

$$B(x) = \frac{\mu_0 i}{2\pi(\frac{d}{2} + x)} + \frac{\mu_0 i}{2\pi(\frac{d}{2} - x)} = \frac{2\mu_0 i d}{\pi(d^2 - 4x^2)}$$

Magnētiskā lauka intensitātes vektora cirkulācija C_H.



Magnētiskā lauka intensitātes vektora $\vec{H}$ cirkulācija C_H telpā ap taisnu bezgalīgi garu vadu, izmantojot par noslēgtā kontūra L - *mag. lauka līniju ar rādiusu R*.

$$C_H = \oint_L \vec{H} d\vec{l}$$

Ja C = 0 , tad lauks ir potenciāls, bet ja C ≠ 0, tad lauks ir virpuļains.

Te $\vec{H} \uparrow\uparrow d\vec{l}$ un tādēļ, $\vec{H} d\vec{l} = Hdl$, bet H = I/(2πR) un te $\oint_L dl = 2\pi R$ ir riņķa līnijas garums. Sekojoši:

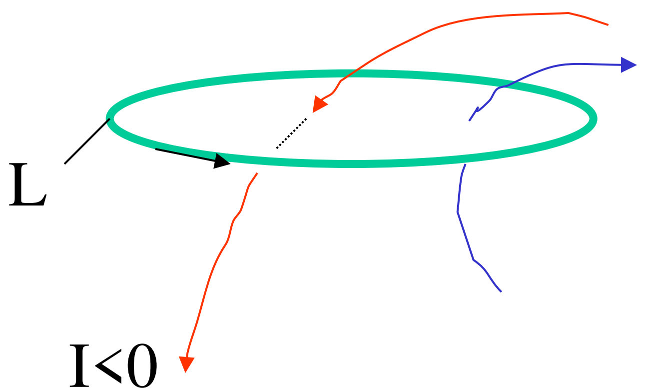
$$C_H = I.$$

Tas rāda, ka mag. lauks ap taisnu strāvas vadu ir virpuļlauks, t.i., nepotenciāls lauks.... un vispārīgi jebkurš **mag. lauks ir *virpuļlauks***.

$d\vec{l}$ - kontūra L elements

Pilnās strāvas likums.

Magnētiskā lauka intensitātes vektora cirkulācija C_H pa noslēgtu kontūru ir vienāda ar kontūru aptverošo strāvu algebrisko summu.



$$C_H = \oint_L \vec{H}\, d\vec{l} = \sum_{i=1}^{N} i_i$$

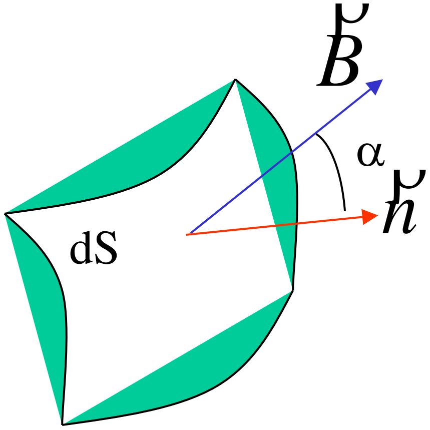
Fizikālu lielumu, kuru izsaka integrālis

$$\oint_L \vec{H}\, d\vec{l} = \varepsilon_m$$

sauc par ***magnetodzinējspēku*** jeb **MDS**.

$d\vec{l}$ - kontūra L elements

Magnētiskā lauka indukcijas vektora plūsma.



$$d\Phi_m = \vec{B}\,\vec{n}\,dS \qquad [\mathrm{Wb}].$$

[Φ - grieķu ***Phi***]; $\vec{n}$ - virsmas ārējās normāles vektors.

$$\vec{B}\,\vec{n} = B\cos\alpha = B_n \qquad \text{un} \qquad d\Phi_m = B_n dS$$

$$\Phi_m = \int_S \vec{B}\,\vec{n}\,dS = \int_S B_n dS$$

Ja $\alpha < \pi/2$, tad $d\Phi_m > 0$; ja $\alpha > \pi/2$, tad $d\Phi_m < 0$;

no virsmas izejošā plūsma ir pozitīva, bet ieejošā negatīva.

GAUSA teorēma.

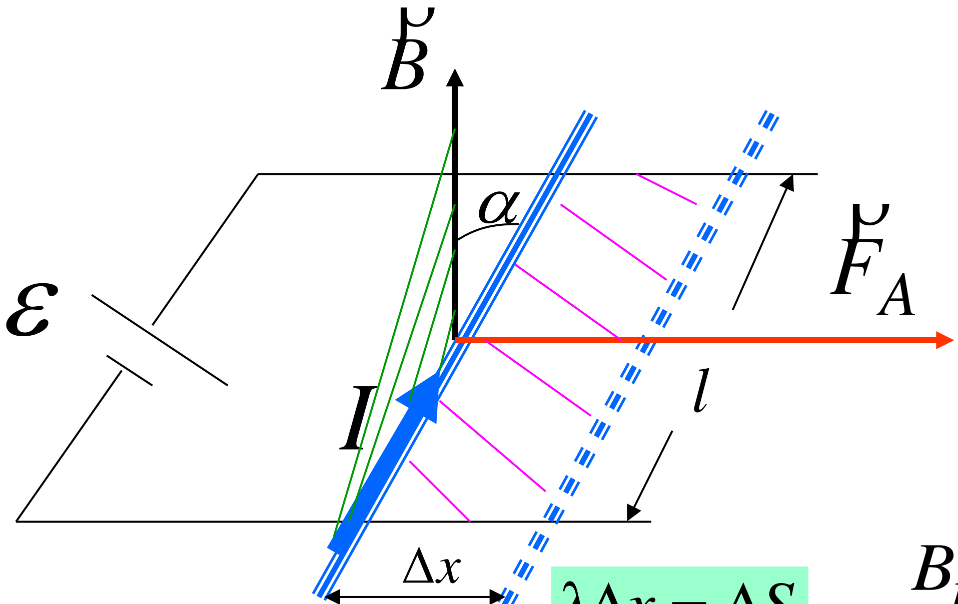
Magnētiskā plūsma, kas iet caur noslēgtu virsmu, ir vienāda ar nulli.

$$\oint_S \vec{B}\,\vec{n}\,dS = 0$$

Ampēra spēks

Spēks ar kādu mag. lauks iedarbojas uz strāvas vadu sauc par ***Ampēra spēku***.

$$\boxed{F_A = I\lambda B \sin\alpha}$$



$$\boxed{\vec{F}_A = I\vec{\lambda}\times\vec{B}}$$

$$\lambda\Delta x = \Delta S$$

$$B_n \Delta S = \Delta\Phi_m$$

Magnētiskā lauka indukcijas vektora plūsma

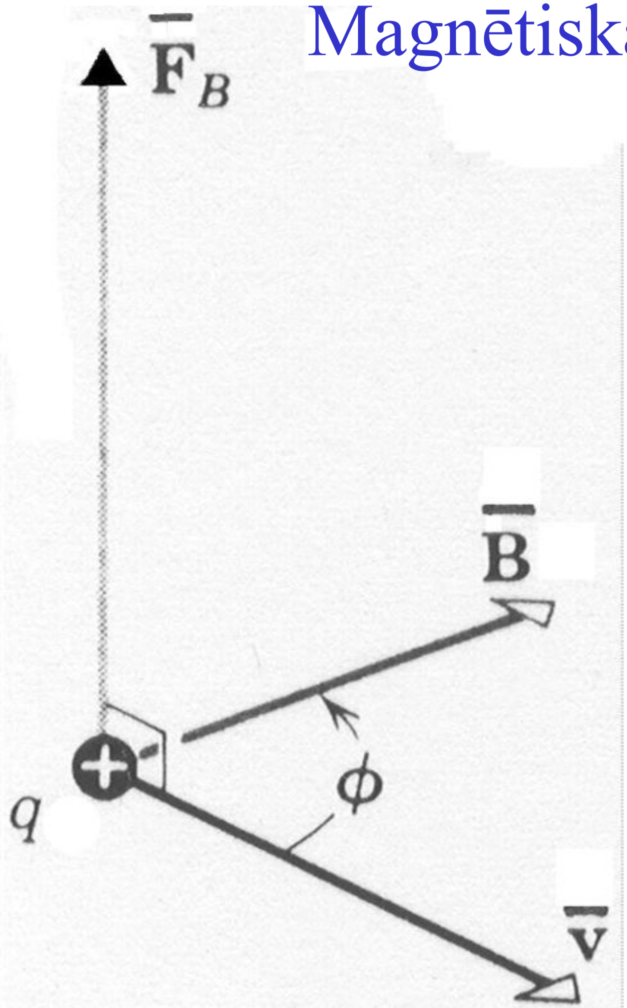
[Φ - grieķu ***Phi***];

Strāvas kontūra pārvietošanas darbs $\Delta A = F_A \Delta x$

Tādēļ: $\Delta A = I\Delta\Phi_m$

$$\boxed{dA = Id\Phi_m}$$

Magnētiskā lauka iedarbība uz kustībā esošu lādiņu



[Φ -grieķu *Phi*]

Uz lādiņnesēju q, kas kustas magnētiskā laukā ar ātrumu v darbojas spēks:

$$\vec{F}_B = q\,\vec{v} \times \vec{B}$$

t.i., $\vec{F}_B \perp \vec{v}$.

$$Ja\ \ \Phi \angle \vec{B}\,;\vec{v},\ \ tad:\ F_B = qvB\sin\Phi.$$

Ja telpas (.)-ā, kurā atrodas lādiņš q, vienlaikus eksistē arī elektriskais lauks ar intensitāti E, tad uz lādiņu vēl darbojas spēks

$$\vec{F}_e = q\,\vec{E},$$

tad lādiņam pielikto kopspēku sauc par ***Lorenca spēku***.

$$\vec{F} = q\,\vec{E} + q\,\vec{v} \times \vec{B}.$$

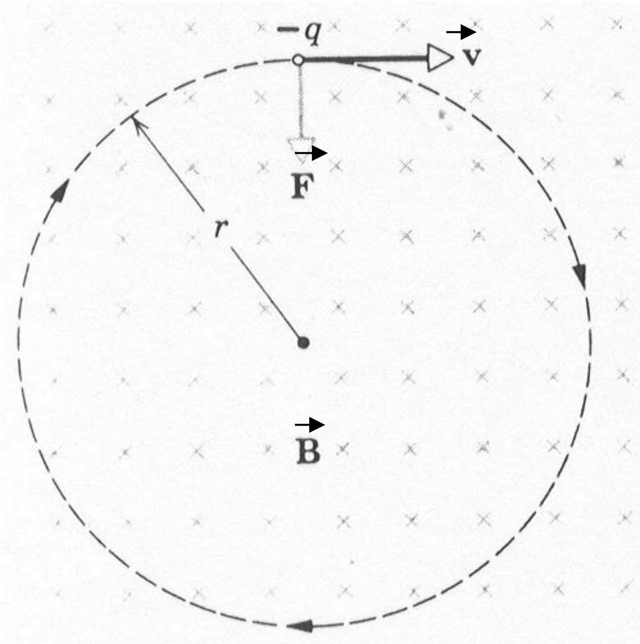
<u>Piemērs:</u> Nemainīgs magnētiskas lauks B = 1,5 T darbojas horizontālā virzienā no dienvidiem uz ziemeļiem. Vertikālā virzienā uz leju magnētiskajā laukā ielido protons kura enerģija ir 5 MeV. Cik liels spēks darbojas uz protonu?

B = 1,5 T W_k = 5 MeV $m = 1{,}7 \times 10^{-27} kg$ $q = 1{,}6 \times 10^{-19} C$	Protona kinētiskā enerģija $W_k = (5 \times 10^6\ \mathrm{eV})(1{,}6 \times 10^{-19}\ \mathrm{J/eV}) = 8 \times 10^{-13}\ \mathrm{J}$. Protona ātrumu nosakām no sakarības $W_k = mv^2/2$; t.i.:
F = ?	

$$v = \sqrt{\frac{2W_k}{m}} = \sqrt{\frac{2(8 \times 10^{-13} J)}{1{,}7 \times 10^{-27} kg}} = 3{,}1 \times 10^7 m/s$$

$$F = qvB\sin\Phi = (1{,}6 \times 10^{-19} C)(3{,}1 \times 10^7 m/s)[\sin(\pi/2)] = 7{,}4 \times 10^{-12} N$$

Elektriski lādēta daļiņa homogēnā nemainīgā magnētiskā laukā



Negatīvi lādēta daļiņa ar ātrumu v ielido nemainīgā magnētiskā laukā.

$$\vec{B} \perp \vec{v}$$

1. Uz daļiņu darbojas spēks:

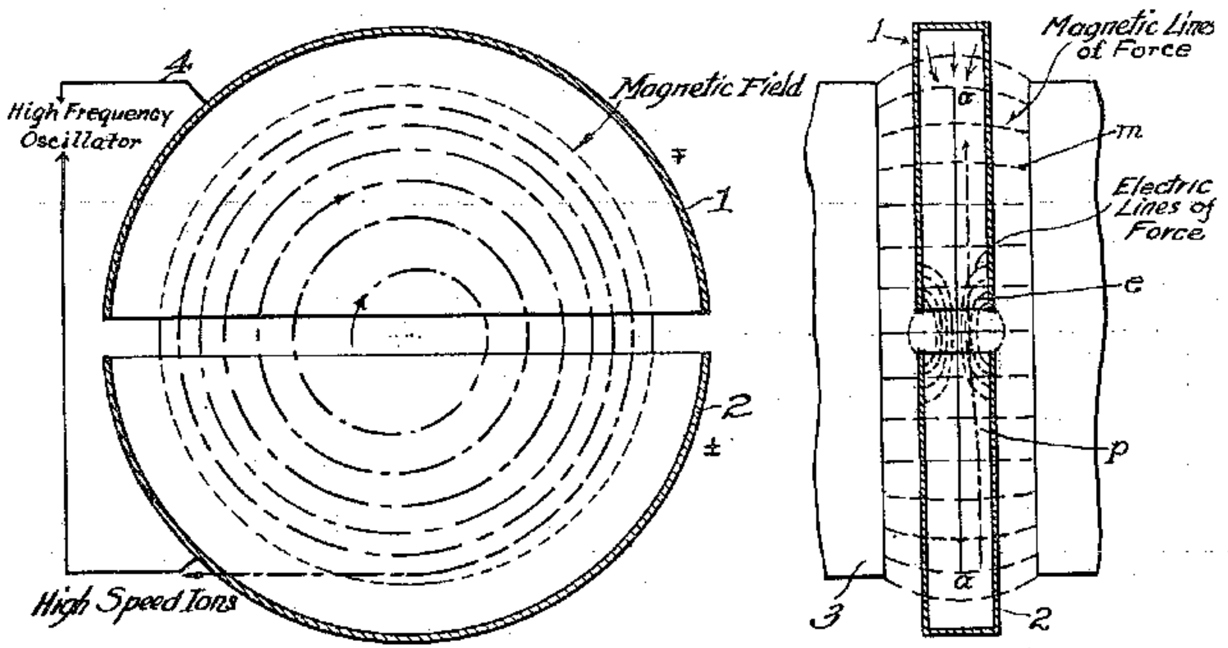
$$\vec{F} = q\,\vec{v} \times \vec{B},$$

kas liek daļiņai rotēt plaknē pa riņķveida orbītu.

2. Saskaņā ar Ņūtona II lik. $F = ma = mv^2/r$

$$qvB = \frac{mv^2}{r} \rightarrow r = \frac{mv}{qB}.$$

$$\omega = \frac{v}{r} = \frac{qB}{m}$$



$$f = \frac{\omega}{2\pi} = \frac{qB}{2\pi m}$$

ciklatrona frekvence.

Tātad, ja elektriski lādēta daļiņa ielido magnētiskā laukā ar ātrumu v virzienā, kas ir perpendikulārs magnētiskā lauka līnijām B, tad šī daļiņa vienmērīgi *rotē telpā pa riņķa līniju* ar radiusu R.

Spēks $\vec{F}_B = q\,\vec{v} \times \vec{B}$

maina tikai daļiņas ātruma virzienu, un tas nozīmē, ka šis spēks darbu neveic.

Tāpēc šīs daļiņas kinētiskā enerģija, kustoties magnētiskā laukā nemainās.

Homogēns magnētiskais lauks neiedarbojas uz daļiņu, kas kustās magnētiskās indukcijas līniju virzienā.

Ja lādētas daļiņas ātrums vērsts zem leņķi α attiecībā pret magnētiskās indukcijas vektoru, tad tā kustību var uzskatīt par superpozīcijas kustību :

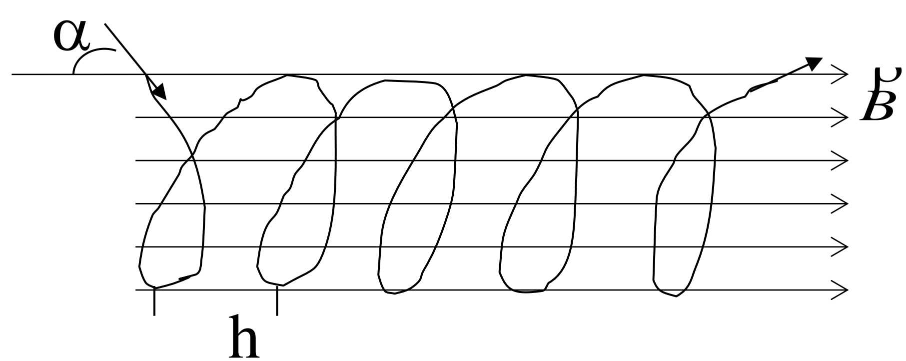
1) vienmērīga lineāra kustība lauka virzienā ar ātrumu $v_{II} = v\cos\alpha$;
2) vienmērīga rotācijas kustība. Plaknē, kas perpendikulāra laukam ar ātrumu $v_{\perp} = v\sin\alpha$.

Abu kustību saskaitīšanas rezultātā rodas kustība pa spirāli, kuras ass paralēla magnētiskās indukcijas līnijām.

Vītnes līnijas solis ir

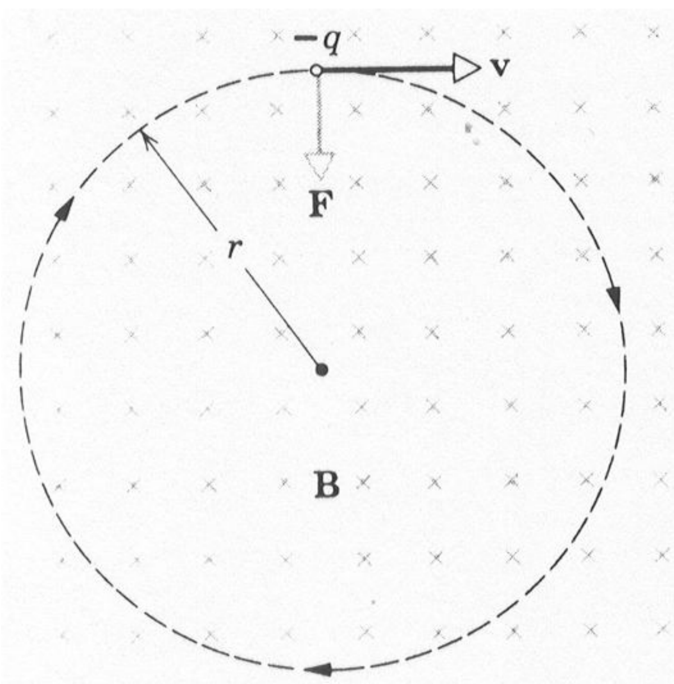
$$h = v_{II}T = \vec{v}T\cos\alpha$$

$$h = \frac{2\pi m\vec{v}\cos\alpha}{\vec{B}\cdot q}.$$



daļiņa kustas pa spirāli un no magnētiskā lauka atkal iziet.

Piemērs: *10 eV elektrons vakuumā riņķo plaknē, kas ir perpendikulāra homogēnam statiskam magnētiskam laukam ar indukciju $B = 10^{-4}$ T. Noteikt orbītas rādiusu, ciklatrona frekvenci un elektrona apriņķošanas periodu!*



$W_k = 10$ eV

$B = 10^{-4}$ T

$q = 1,6 \times 10^{-19}$ C

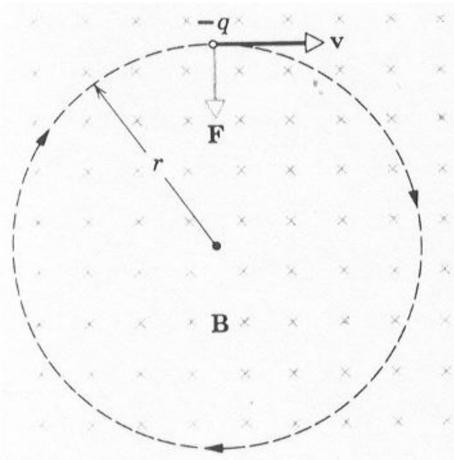
$m = 9,1 \times 10^{-31}$ kg

$r = ?$; $f = ?$

$T = ?$

$$W_k = (10\ \text{eV})(1,6 \times 10^{-19}\ \text{J/eV}) = \dots\dots\dots\ \text{J}$$

Piemērs: *10 eV elektrons vakuumā riņķo plaknē, kas ir perpendikulāra homogēnam statiskam magnētiskam laukam ar indukciju B = 10⁻⁴ T. Noteikt orbītas rādiusu, ciklatrona frekvenci un elektrona apriņķošanas periodu!*



$$r = \frac{mv}{qB}; \quad v = ?$$

W_k =10 eV

$B = 10^{-4}$ T

$q = 1,6 \times 10^{-19}$C

$m = 9,1 \times 10^{-31}$kg

r = ?; f = ?

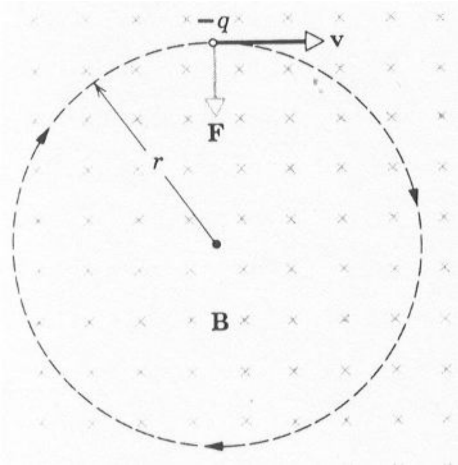
T = ?

$$W_k = \frac{mv^2}{2} \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2W_k}{m}} = 1,9 \times 10^6 (m/s)$$

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{(9,1 \times 10^{-31} kg)(1,9 \times 10^6 m/s)}{(1,6 \times 10^{-19} C) \times 10^{-4} T} = 0,11\, m$$

Piemērs: *10 eV elektrons vakuumā riņķo plaknē, kas ir perpendikulāra homogēnam statiskam magnētiskam laukam ar indukciju B = 10^{-4} T. Noteikt orbītas rādiusu, ciklatrona frekvenci un elektrona apriņķošanas periodu!*

$$r = \frac{mv}{qB}; \quad v = ?$$



$$W_k = \frac{mv^2}{2} \quad \rightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2W_k}{m}} = 1{,}9 \times 10^6 \, (m/s)$$

$$r = \frac{mv}{qB} = \frac{(9{,}1\times10^{-31} kg)(1{,}9\times10^6 m/s)}{(1{,}6\times10^{-19} C)\times10^{-4} T} = 0{,}11\, m$$

W_k =10 eV

B = 10^{-4} T

q = 1,6 × 10^{-19}C

m =9,1 × 10^{-31}kg

r = ?

T = ?

$$f = \frac{qB}{2\pi m} = \frac{(1{,}6\times10^{-19} C)\times10^{-4} T}{2\pi(9{,}1\times10^{-31} kg)} = 2{,}8\times10^6\, Hz = 2{,}8\, MHz$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{2{,}8\times10^6\, Hz} = 3{,}6\times10^{-7}\, s = 0{,}36\, \mu s$$