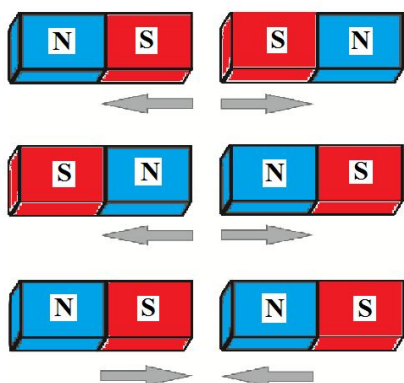


МАГНИТНО ПОЛЕ НА ПОСТОЯНЕН ЕЛЕКТРИЧЕН ТОК. ИНДУКЦИЯ И ИНТЕНЗИТЕТ НА МАГНИТНОТО ПОЛЕ. ЗАКОН НА БИО-САВАР-ЛАПЛАС. МАГНИТНА ИНДУКЦИЯ НА ПРАВ ТОК, КРЪГОВ ТОК И СОЛЕНОИД.

Магнетизъм - раздел от физиката, който изучава едно от основните взаимодействия в природата – взаимодействието между движещи се електрични заряди, наречено *магнитно взаимодействие*.

Исторически развитието на магнетизма започва преди около 3000 години, когато в местността Магнезия (Мала Азия) са открити късове руди, които могат взаимно да се привличат един към друг. Тези руди получават името на местността и са наречени *магнити*.



Всеки магнит има два полюса – северен (N) и южен (S), които могат да съществуват само като свързана двойка. При изучаване на взаимодействието на два къса от рудата е установено, че *едноименните полюси се отблъскват*, а *разноименните - се привличат*.

Подобно на електричните сили и магнитните сили действат на разстояние, т.е. магнитните взаимодействия също имат свой посредник – *магнитното поле*.

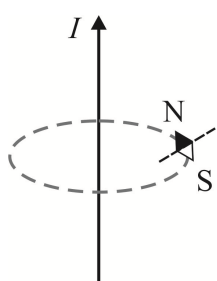
МАГНИТНО ПОЛЕ НА ПОСТОЯНЕН ЕЛЕКТРИЧЕН ТОК

С няколко експериментални опита е установено, че около всеки проводник, по който тече ток или около всеки движещ се електричен заряд възникват нови свойства.

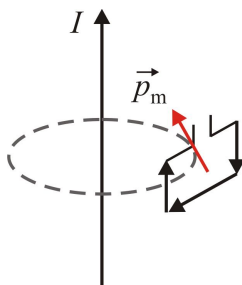
Опит 1: Магнитна стрелка поставена до проводник, по който тече електричен ток се завърта. Това е *опитът на Оерстед*, проведен през 1820 г.

Опит 2: Правоъгълна рамка, по която тече електричен ток, поставена до проводник, по който тече електричен ток, се завърта.

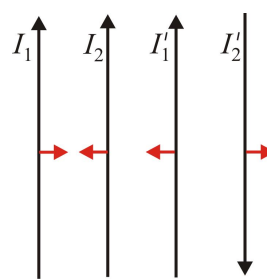
Опит 3: Два проводника, по които тече електричен ток, поставени успоредно един на друг, се привличат или отблъскват в зависимост от посоката на тока в проводниците. С този опит през 1820 г. Андре-Мари Ампер формулира така наречения *закон на Ампер*.



Опит 1.
Магнитна стрелка до проводник с ток.



Опит 2.
Правоъгълна рамка до проводник с ток.



Опит 3.
Два проводника, по които тече ток.

За да се обяснят наблюдаваните явления, най-напред Оерстед е предположил, че в пространството около всеки проводник, по който тече електричен ток, се поражда **постоянно магнитно поле**. Когато вместо магнитна стрелка (опит 1), в магнитното поле на проводника с ток се постави друг проводник, по който тече ток (правоъгълна рамка (опит 2) или прав проводник (опит 3)), то върху него също действат магнитни сили, подобни на тези, създадени от постоянните магнити. Следователно, магнитното поле се създава не само от постоянни магнити, но и от електрични (макро) токове (движещи се заряди).

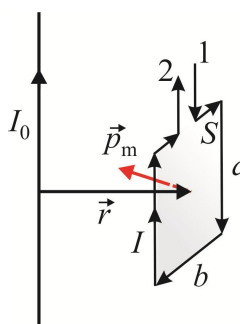
Почти по-същото време Ампер изказва предположение, което по-късно експериментално се потвърждава: полето на постоянните магнити се създава от елементарни (микро) токове в магнитите, породени от движещите се около ядрата на атомите електрони. Следователно, двата начина за създаване на магнитното поле – постоянен магнит и движещи се електрични заряди, имат един и същ произход – протичане на електричен ток, съответно микро- или макроток.

Така около всеки движещ се електричен заряд или електричен ток винаги има две полета - **електрично и магнитно**. Важно е да се отбележи, че **неподвижните електрични заряди създават само електростатично поле и не създават магнитно поле**.

Пробна рамка

Установено е, че действието на магнитното поле върху проводник с ток зависи от неговата форма, размери и посоката на тока. Затова за охарактеризиране на магнитното поле се разглежда действието му върху напълно определен проводник, по който тече ток, наречен **токова рамка** или **пробна рамка**.

Пробната рамка представлява плосък токов проводников контур, по който тече ток, с много малки размери (a, b) в сравнение с разстоянието ($\vec{r}$) от тока, създаващ магнитното поле до точката, в която се изследва това магнитно поле, т.е. $a, b \ll r$.



Входящият (1) и изходящият (2) проводник на пробната рамка са практически долепени и действията на магнитното поле върху тях взаимно се компенсират. Токът I през рамката е достатъчно малък, така че да не изменя изследваното магнитно поле, създадено от тока I_0 .

Величината, характеризираща пробната рамка се нарича **магнитен момент** и се дефинира с уравнението:

$$\vec{p}_m = I \vec{S} = IS \vec{n} \quad (1)$$

където I е големината на тока, протичащ по рамката, S е площта на рамката, а $\vec{n}$ е нормалата към площта на рамката.

Магнитният момент е векторна величина, с посока на нормалата, към площта на рамката. Тази посока се определя по **правилото на десния винт**.

ИНДУКЦИЯ НА МАГНИТНОТО ПОЛЕ

За да се изследва магнитното поле, в него се поставя пробна рамка. Наблюдава се завъртане на рамката в определена посока докато магнитният ѝ момент $\vec{p}_m$ се насочи по посока на магнитното поле. Ако се промени посоката на тока I в рамката, тя се завърта в обратна посока.

Следователно, магнитното поле се характеризира със сили, които създават **въртящ момент** $\vec{M}$, който действа на пробната рамка. Опитно е установено, че въртящият момент е максимален, когато векторът $\vec{p}_m$ на рамката е перпендикулярен на посоката на магнитното поле. Експериментално е установено, че ако в дадена точка на изследваното магнитно поле, създадено от тока I_0 се поставят различни пробни рамки с различни магнитни моменти, действащите им максимални въртящи моменти ще бъдат различни:

$$\begin{aligned} p_{m1} &\rightarrow M_1^{\max} \\ p_{m2} &\rightarrow M_2^{\max} \\ &\dots\dots\dots, \end{aligned}$$

но отношението $\frac{M^{\max}}{p_m}$ ще бъде едно и също за всички пробни рамки, т.е.

$$\frac{M_1^{\max}}{p_{m1}} = \frac{M_2^{\max}}{p_{m2}} = \text{const}.$$

Следователно, това отношение не зависи от пробната рамка и е характеристика само на магнитното поле. Така се въвежда физичната величина **магнитна индукция или индукция на магнитното поле** $\vec{B}$, която характеризира магнитното поле във всяка точка от пространството.

Големината на магнитната индукция B се дефинира като максималният въртящ момент, действащ на пробна рамка с единичен магнитен момент:

$$B = \frac{M^{\max}}{p_m} \quad (2)$$

Посоката на магнитното поле съвпада с посоката, която сочи северният полюс на магнитната стрелка. Това е посоката и на магнитната индукция.

Векторът на магнитната индукция $\vec{B}$ е свързан с въртящия момент по следния начин:

$$\vec{M} = \vec{p}_m \times \vec{B} \quad \text{или} \quad M = p_m B \sin \alpha \quad (3)$$

Следователно, въртящият момент на магнитните сили зависи от векторите на магнитния момент на пробната рамка и на индукцията на магнитното поле, както и от ъгъла между тях α .

- Когато $\vec{p}_m$ е по посока на $\vec{B}$, то въртящият момент е нула: $M_{\min} = 0$ ($\alpha = 0^\circ$, $\sin \alpha = 0$).
- Когато $\vec{p}_m$ е перпендикулярно на $\vec{B}$, то въртящият момент е максимален:
 $M = M_{\max}$ ($\alpha = 90^\circ$, $\sin \alpha = 1$). Така за $M_{\max}$ се получава:
 $M_{\max} = p_m B \sin 90^\circ = p_m B$.

Мерната единица за магнитна индукция е тесла – Т.

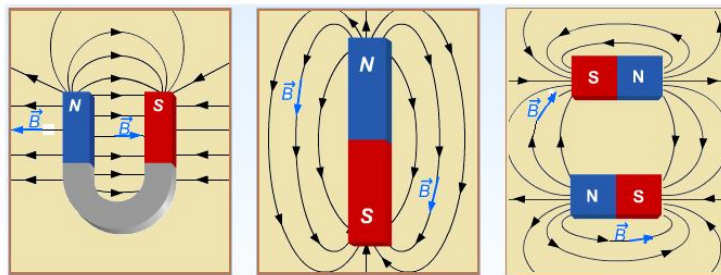
Индукцията на магнитното поле е една **тесла (Т)**, когато то действа с магнитна сила един нютон (N) върху проводник с дължина един метър (m), по който тече ток един ампер (A): $1T = \frac{1N}{A.m}$.

Силови линии

За геометрично изобразяване на магнитната индукция се въвеждат **магнитни силови линии**, наречени **индукционни линии**.

Магнитните силови линии са линии, във всяка точка на които, векторите $\vec{B}(\vec{H})$ са тангенциални и са насочени по допирателната към линията, преминаваща през тази точка.

Силовите линии на постоянен магнит излизат от северния му полюс (N) и влизат в южния му полюс (S). Силовите линии на магнитното поле, създадено от различни конфигурации на проводници, по които тече електричен ток са различни. Гъстотата на силовите линии в дадена безкрайно малка област показва колко силно е магнитното поле в тази област. Магнитните силови линии се онагледяват чрез прах от железни стърготини посипан върху картон или плексиглас. На фигурата са показани силовите линии на постоянен подковообразен магнит, на постоянен пръчковиден магнит и на система от два постоянни пръчковидни магнита.



Магнитните силови линии са **затворени линии** или **идват от безкрайността и се втичат пак в безкрайността** (силовата линия не започва никъде в полето и не завършва никъде в него). Това е свързано с факта, че в природата не съществуват магнитни заряди, аналогични на електричните заряди. Поле със затворени силови линии се нарича вихрово поле. Следователно, **магнитното поле е вихрово поле**.

ИНТЕНЗИТЕТ НА МАГНИТНОТО ПОЛЕ

Когато проводникът с ток се намира в дадена материална среда, наред с макротоковете, съществуват и микротокове, които могат да бъдат източници на магнитни полета. Според хипотезата на Ампер, микротоковете се създават от кръговото движение на електроните около ядрата на атомите, изграждащи съответното вещество. Подобно на пробната рамка с ток, тези микротокове се характеризират с магнитен момент на атома и при поставянето им във външно магнитно поле се ориентират по определен начин. Така магнитното поле, създадено от микротоковете на даденото вещество, в зависимост от неговите магнитни свойства, може да усилва или отслабва външното магнитно поле. В резултат на това, магнитните полета в различните вещества при едно и също външно магнитно поле ще са различни.

Затова се въвежда една нова векторна величина, независеща от свойствата на средата и характеризираща магнитното поле, създадено от макротоковете - **интензитет на магнитното поле**.

Интензитетът на магнитното поле $\vec{H}$ се дефинира с уравнението:

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu} \quad (4)$$

където μ_0 е **магнитната проницаемост на вакуума** или **магнитна константа** и има числена стойност: $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Н/м}$, а μ е **относителната магнитна проницаемост на средата (веществото)** и е безразмерна величина.

Мерната единица за интензитет на магнитното поле е ампер на метър: $[H] = \frac{A}{m}$.

- За вакуум магнитната индукция се дава с формулата: $\vec{B}_{\text{вак.}} = \mu_0 \vec{H}$.
- Когато средата не е вакуум, магнитната индукция се дава с формулата: $\vec{B} = \mu \mu_0 \vec{H}$.

Магнитната проницаемост на средата показва колко пъти индукцията на магнитното поле B в средата е по-голяма от индукцията на магнитното поле $B_{\text{вак.}}$ във вакуум и може да се представи със следната формула: $\mu = \frac{B}{B_{\text{вак.}}}$.

За повечето вещества $\mu \approx 1$, като за диамагнетиците е $\mu < 1$, а за парамагнетиците $\mu > 1$. Феромагнетиците са вещества, които имат голям собствен магнитен момент и са с добри магнитни свойства, като за тях $\mu \gg 1$.

В теорията на магнитното поле на постоянните токове, понятието магнитно поле се въвежда чисто условно, както и в теорията на електростатиката, понятието електростатично поле се въвежда условно. Това е така, защото:

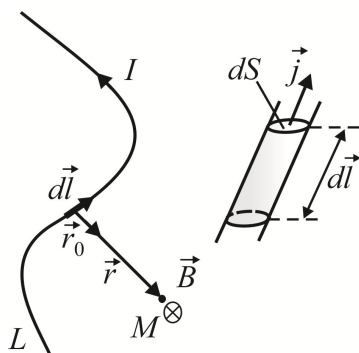
- Магнитното поле на постоянните токове е неразривно свързано със съществуването на токовете.
- Електростатичното поле е неразривно свързано със съществуването на електричните заряди.

Следователно, в пространството има магнитно поле или електростатично поле, ако има електрични токове или електрични заряди и отсъства, ако ги няма. По-дълбок физичен смисъл имат променливите с времето електрично поле и магнитно поле. Тези полета са една обективна реалност, тъй като могат да съществуват във и независимо от зарядите и токовете и взаимно да се пораждат.

ЗАКОН НА БИО-САВАР-ЛАПЛАС

След откритието на Оерстед, френските физици Жан Батист Био и Феликс Савар провеждат серия от експерименти и установяват връзката между индукцията на магнитното поле в дадена точка от пространството (във вакуум) и тока, който създава полето. Резултатите от техните експериментални изследвания са обобщени от френския физик и математик Пиер-Симон Лаплас, който определил математическия израз на опитно установените зависимости. Този израз сега се нарича закон на Био-Савар-Лаплас.

За определяне на магнитната индукция на проводник, по който тече ток I се използва подход, аналогичен на този, използван за определяне на електричното поле на наелектризирано тяло във вакуум.



За целта ще бъде разгледан проводник с произволна форма, по който тече постоянен ток I . Проводникът мислено се разделя на безкрайно малки части. Всяка част се характеризира с малък линейен елемент $d\vec{l}$, като $|d\vec{l}| \ll |\vec{r}|$ ($\vec{r}$ е разстоянието от елемента до точката, в която се изследва магнитното поле).

Въвежда се векторната величина **токов елемент** $d\vec{I} = Id\vec{l}$, с посока на постоянния ток I и големина: $dI = Idl$.

Законът на Био-Савар-Лаплас изразява магнитната индукция на поле, създадено от токовия елемент $d\vec{I}$ на проводник, по който тече постоянен ток I , в произволна точка на разстояние r от него:

$$d\vec{B} = k \frac{I d\vec{l} \times \vec{r}_0}{r^2}, \quad (5)$$

където $\vec{r}_0$ е единичен радиус-вектор, указващ посоката на вектор $\vec{r}$.

Посоката на вектора $d\vec{B}$ съвпада с посоката на векторното произведение $d\vec{l} \times \vec{r}_0$.

Коефициентът на пропорционалност k в система СИ (SI) е:

$$k = \frac{\mu_0}{4\pi}$$

След заместване с $k = \frac{\mu_0}{4\pi}$ в уравнение (5) се получава:

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_0}{r^2} \quad (6)$$

- Посоката на вектора $d\vec{B}$ се определя от факта, че векторите $d\vec{l}$, $\vec{r}_0$ и $d\vec{B}$ образуват дясна тройка. Това означава, че $d\vec{B} \perp d\vec{l}$; $d\vec{B} \perp \vec{r}_0$. Следователно, векторът $d\vec{B}$ е перпендикулярен на равнината на чертежа.
- Големината на $d\vec{B}$ се определя по формулата $dB = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \frac{dl \sin(\angle d\vec{l}, \vec{r}_0)}{r^2}$, т.е. тя е пропорционална на големината на тока: $dB \sim I$.

Съществува определена аналогия между магнитната индукция, изразена със закона на Био-Савар-Лаплас и интензитетът на електростатичното поле, който може да се изрази чрез закона на Кулон:

- токовете елементи, на които мислено се разделя проводник, по който тече електричен ток, създават магнитно поле, а точковите заряди, от които е съставено наелектризирано тяло - електрично поле;

- магнитната индукция на токов елемент намалява обратнопропорционално на квадрата на разстоянието, аналогично на интензитета на електричното поле;
- големината на магнитната индукция dB е правопрпорционална на големината на токовия елемент dI , а интензитетът на електричното поле dE – на големината на точковия заряд dq .

За да се намери пълното магнитно поле, създадено от целия проводник в т. M е необходимо да се интегрира по дължината му L . За целта се използва **принципът за суперпозиция на $d\vec{B}$** и се получава:

$$\vec{B} = \int_L d\vec{B} = \frac{\mu_0 I}{4\pi} \int_L \frac{d\vec{l} \times \vec{r}_0}{r^2} \quad (7)$$

МАГНИТНО ПОЛЕ НА ПРАВ ТОК, КРЪГОВ ТОК И СОЛЕНОИД

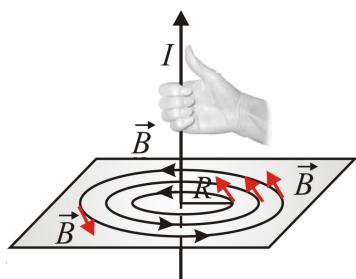
Като се използва законът на Био-Савар-Лаплас и принципът за суперпозиция, съответно уравнения (5), (6) и (7) може да се намери индукцията на магнитното поле, създадено от различни конфигурации на проводници, по които тече постоянен електричен ток. Ще бъдат разгледани три различни частни случая.

• прав ток

Разглежда се праволинеен проводник с определена дължина, по който тече ток I . След прилагане на уравнения (6) и (7) за конкретния случай, за големината на магнитната индукция $\vec{B}$ на полето в произволна точка M , създадено от безкраен праволинеен проводник, по който тече постоянен ток I , на разстояние R от проводника се получава:

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \quad (8)$$

Уравнение (8) показва, че магнитната индукция на безкраен праволинеен проводник, по който тече ток, в дадена точка, зависи от големината на тока и от разстоянието от точката до проводника. Това означава, че във всички точки от пространството, намиращи се на еднакво разстояние R от проводника, магнитната индукция B има постоянна големина.



Следователно, силовите линии са концентрични окръжности, обхващащи проводника. Във всяка точка от затворената силова линия (с определен радиус R), големината B на вектора на магнитната индукция има една и съща стойност. Векторът на магнитната индукция $\vec{B}$ е перпендикулярен на равнината, определена от векторите $d\vec{l}$ и $\vec{r}_0$.

Посоката на $\vec{B}$ се определя от **правилото на свитите пръсти на дясната ръка**.

Правило на свитите пръсти на дясната ръка – ако проводникът се хване с дясната ръка, така че палецът да показва посоката на тока в него, а свитите пръсти да го

обхванат, то свитите пръсти ще показват посоката на силовите линии на магнитното поле.

- **кръгов ток**

Разглежда се проводник с форма на окръжност с радиус a , по който тече постоянен ток I . След прилагане на уравнения (6) и (7) за конкретния случай, за големината B на магнитната индукция $\vec{B}$ на полето в произволна точка M , от оста z , която е перпендикулярна на окръжността и минава през нейния център O , се получава:

$$B = B_z = \frac{\mu_0 I}{2} \frac{a^2}{(a^2 + z^2)^{3/2}} \quad (9)$$

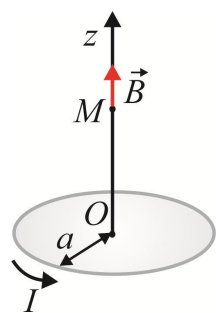
Посоката на магнитната индукция $\vec{B}$ в т. M се определя от векторното произведение в уравнение (6) и от уравнение (7). При означената посока на тока, векторът $\vec{B}$ е насочен по посока на оста z .

За големината на магнитната индукция в центъра на кръга т. O , където $z = 0$ от уравнение (9) се получава:

$$B_0 = \frac{\mu_0 I}{2a} \quad (10)$$

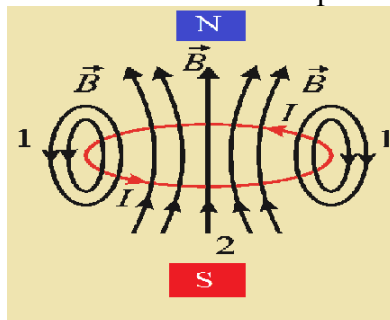
В случая когато $z \gg a$, от уравнение (9) след кратки преобразувания, за големината на магнитната индукция се получава:

$$B_\infty = \frac{\mu_0 I a^2}{2z^3} \quad (11)$$



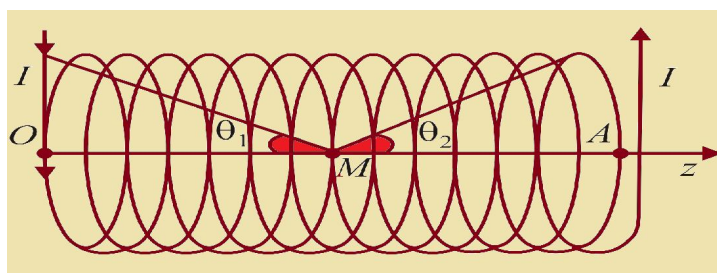
Магнитите силови линии в случай на кръгов ток са два вида:

- 1 – затворени линии, които обхващат проводника;
- 2 – линии, които идват от безкрайността и отиват в безкрайността.



- **соленоид – намотка**

Разглежда се проводник във форма на соленоид (N на брой кръгови намотки), по който тече постоянен ток I .



След прилагане на уравнения (6) и (7) за конкретния случай, за големината на магнитната индукция $\vec{B}$ на полето в произволна точка M , се получава:

$$B = \frac{\mu_0 n I}{2} (\cos \theta_1 + \cos \theta_2) \quad (12)$$

където n е броят навивки на единица дължина $n = \frac{N}{l}$ (l е дължината на соленоида OA).

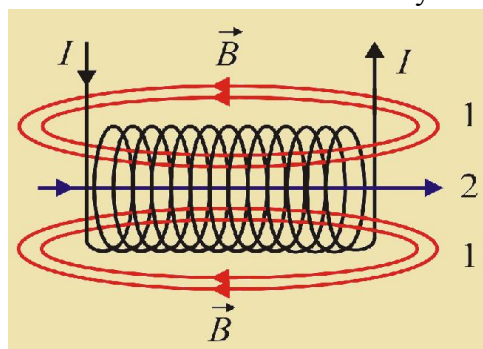
Ъглите θ фиксират положението на т. M спрямо краищата на соленоида.

При безкраен соленоид ъглите са равни, клонящи към нула: $\theta_1 = \theta_2 \rightarrow 0^\circ$, следователно $\cos \theta_1 = \cos \theta_2 = 1$. Замествайки в уравнение (12), за магнитната индукция се получава:

$$B_\infty = \mu_0 n I \quad (13)$$

От уравнение (13) следва, че магнитната индукция на безкраен соленоид зависи линейно от големината на протичащия ток и от броя навивки на единица дължина. Ако в соленоида се постави вещество с относителна магнитна проницаемост μ , то коефициентът на пропорционалност ще е $\mu_0 \mu$. Ако веществото е феромагнетик с голяма относителна магнитна проницаемост μ , то магнитната индукция силно ще нарастне и ще се получи силен електромагнит.

Магнитите силови линии в случай на соленоид са два вида:



- 1 – затворени линии, които обхващат проводника;
- 2 – линии, които идват от безкрайността и отиват в безкрайността.