ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
Физика-техникалық факультеті

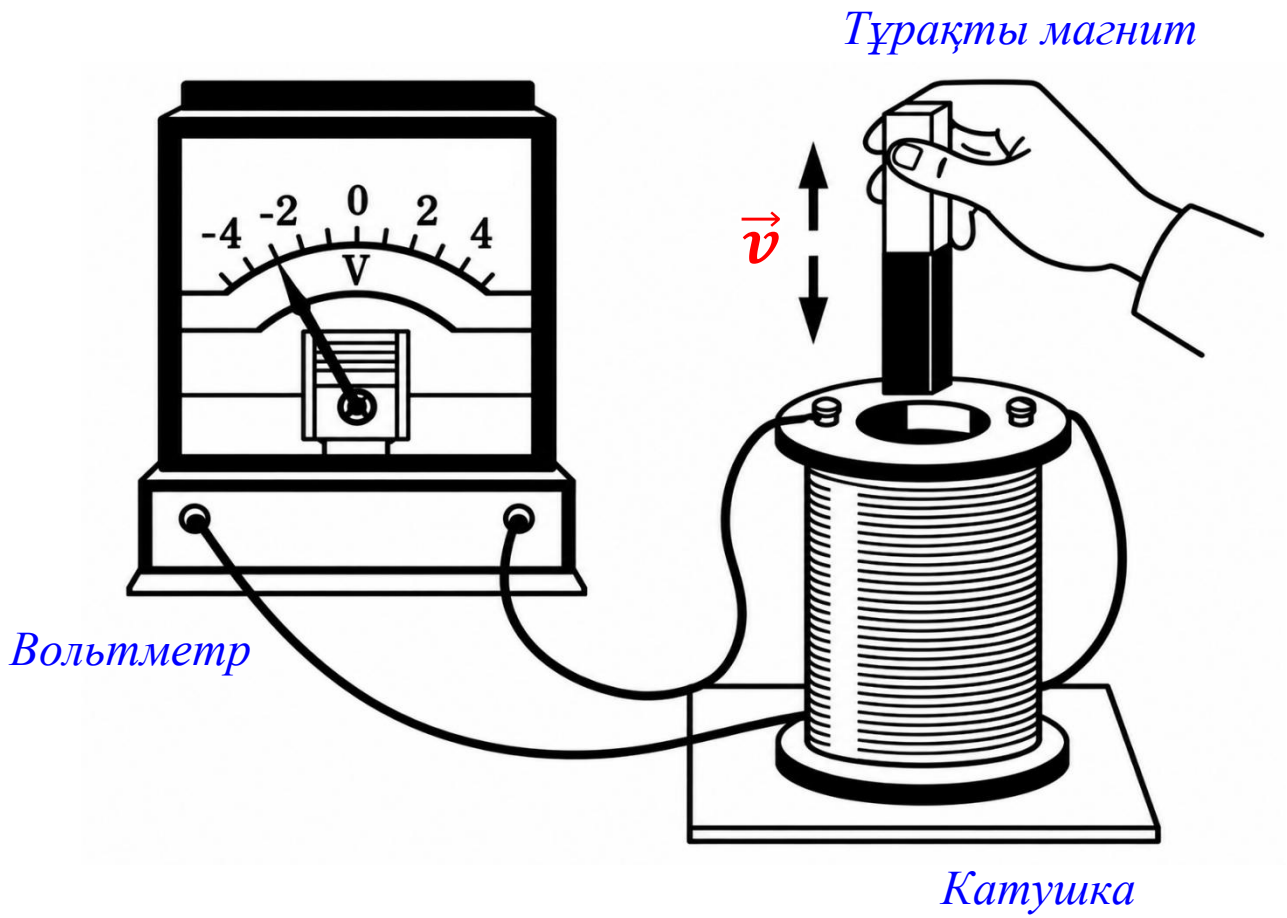
ЭЛЕКТР ЖӘНЕ МАГНЕТИЗМ

Профессор Досболаев М.Қ.
merlan@physics.kz

Электр магниттік индукция заңын зерттеудегі Фарадей тәжірибесі



Майкл Фарадéй
(1791-1867)



Электр магниттік өріс кеңістігінде орналасқан нүктелік зарядқа әсер ететін Лоренц күші (1892)

Нүктелік зарядқа әсер ететін күш оның кеңістіктегі орнынан бөлек жылдамдығынада тәуелді:

$$\vec{F}_{\text{Л}} = \vec{F}_{\text{э}} + \vec{F}_{\text{м}} = q\vec{E} + q\left[\vec{v}\times\vec{B}\right] \quad (1)$$



Хе́ндрик А́нтон Ло́ренц
(1853-1928)

Лоренц күші әмбебап. Ол тұрақты, сол сияқты айнымалы электрлік және магниттік өрістер үшін де жарамды. Сонымен қатар заряд жылдамдығының кез-келген шамасы үшін де қолданылады.

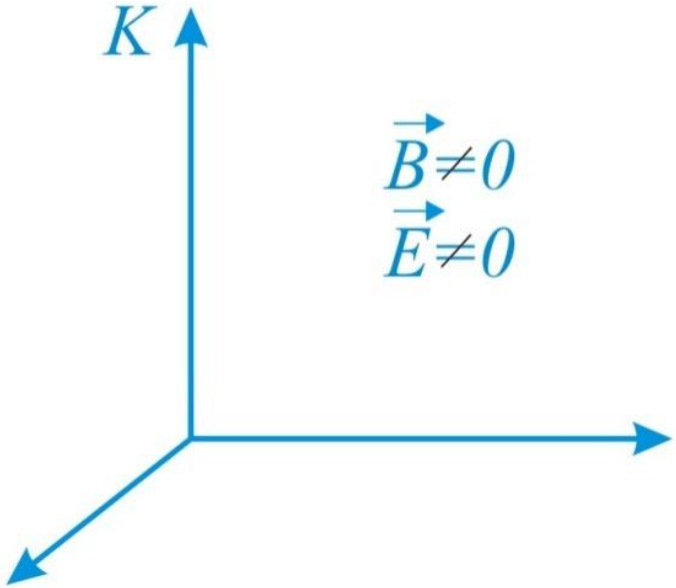
B – магнит өрісінің индукциясы; v – заряд қозғалысының жылдамдығы

Магнит өрісі туралы

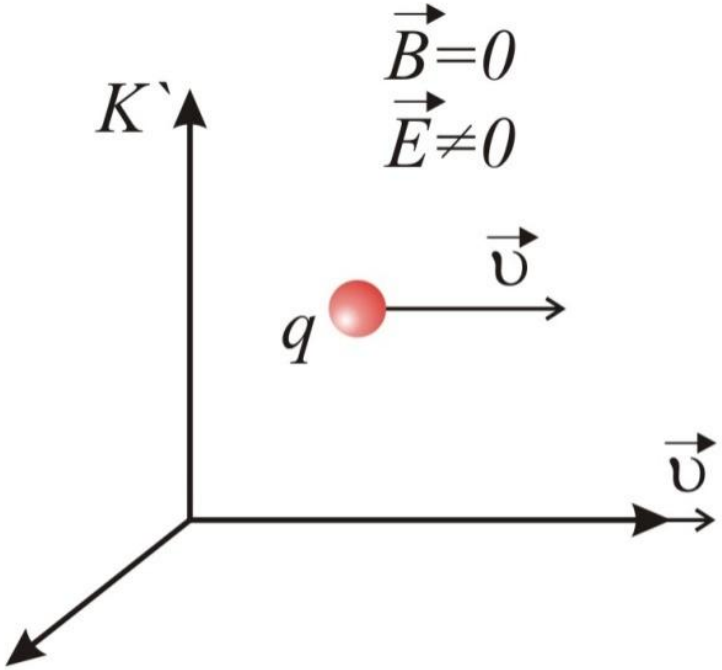


- Электр өрісі сияқты энергияға және массаға ие.
- Электрлік әсерлесу өткізгіште зарядтар болған кезде пайда болады және олардың шамасына тәуелді; ал магнит өрісі өткізгіштегі зарядқа емес токқа (қозғалыстағы зарядтар) байланысты әсерлесуге түседі, және осы ток күшіне тәуелді.
- **Магнит өрісі тек қозғалыстағы зарядтармен әсерлеседі.**
- **Магниттік күш зарядтың жылдамдық векторына әрқашан перпендикуляр бағытталған, сол себепті зарядқа қатысты жұмыс жасамайды.**
- Магнит өрісін магнит тілшесі немесе осы өрістегі зарядтар қозғалысы арқылы анықтап бақылауға болады.

Магнит өрісіне қатысты санақ жүйесін таңдау



1 сурет



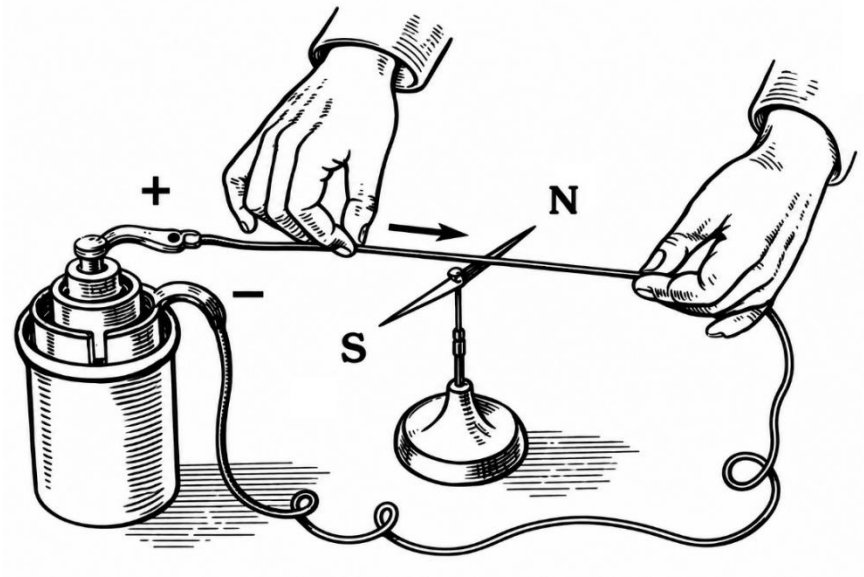
2 сурет

$$\vec{F}_{\text{Л}} = \vec{F}_{\text{э}} + \vec{F}_{\text{м}} = q\vec{E} + q\left[\vec{v}\times\vec{B}\right] \quad (1)$$

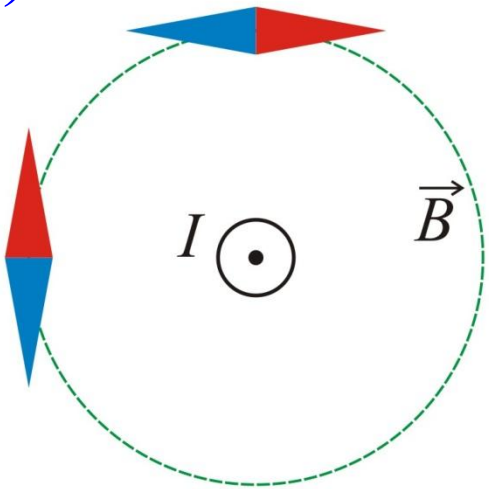
Эрстед тәжірибесі (1820)



Ханс Кристиан Э́рстед
(1777-1851)



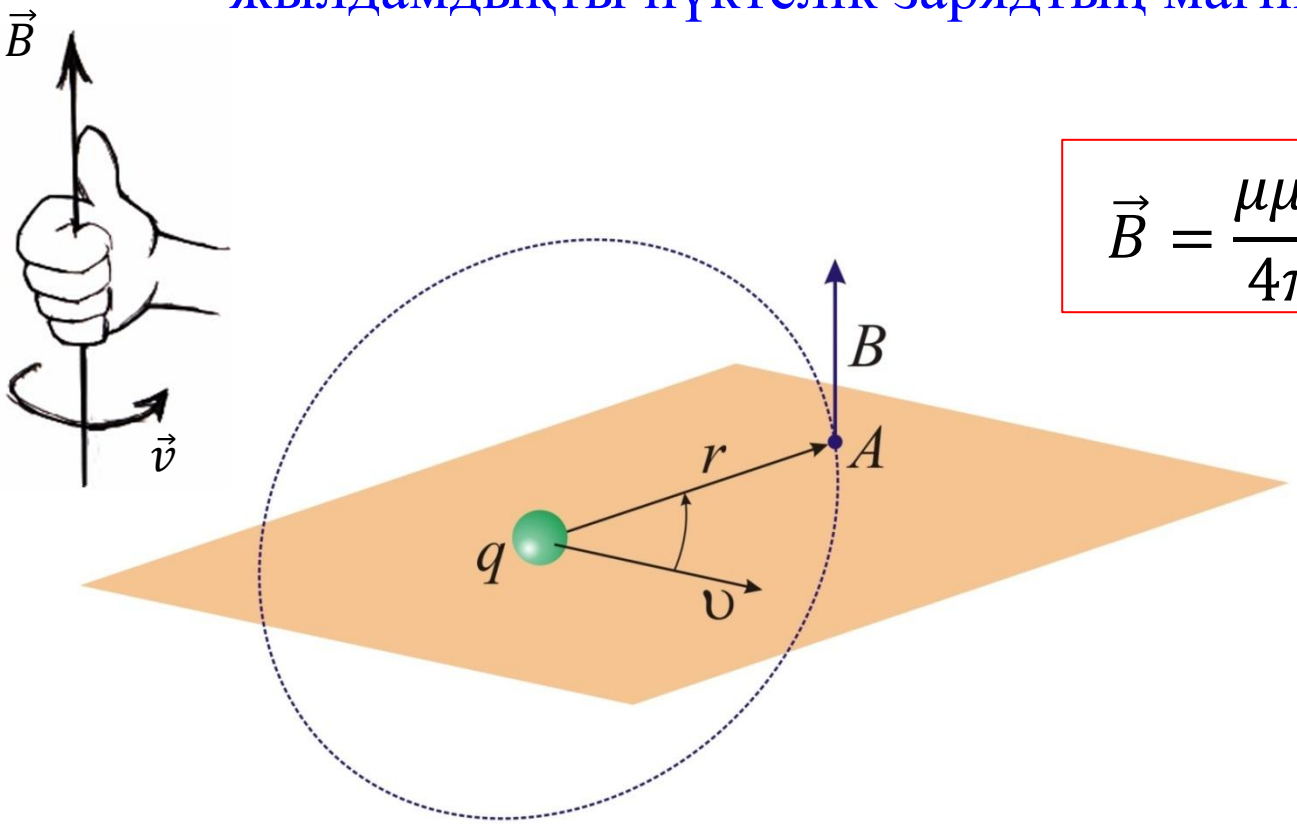
3 сурет



4 сурет. тілше токқа әрқашан перпендикуляр

Тұрақты электр тогының магниттік тілшеге әсері. Тілше токқа перпендикуляр орналасуға тырысады. Кез-келген тогы бар өткізгіштердің айналасында магнит өрісі пайда болады

Вакуумдағы релятивистік емес (Ньютон механикасы) жылдамдықты нүктелік зарядтың магниттік өрісі:



$$\vec{B} = \frac{\mu\mu_0}{4\pi}\frac{q[\vec{v}\times\vec{r}]}{r^3}\ [\text{Тл}] \quad (2)$$

$$\frac{\mu_0}{4\pi} = 10^{-7}\left[\frac{\text{Гн}}{\text{м}}\right]$$

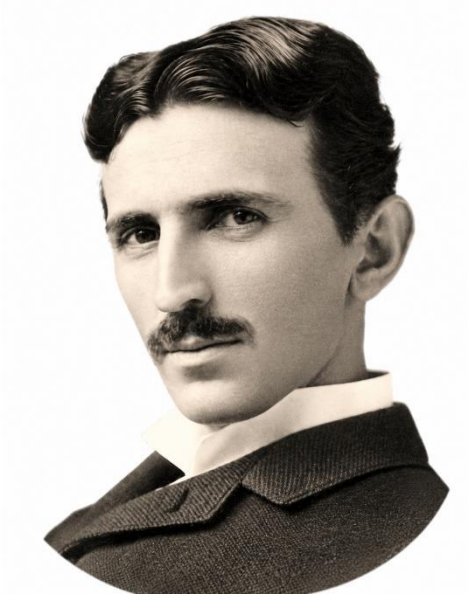
$$\mu_{\text{вакуум}} = 1$$

5 сурет

Радиус-векторының ұшы қозғалмайды, ал басы $\vec{v}$ жылдамдықпен қозғалып бара жатыр, осы себепті $\vec{B}$ векторы бақылау нүктесінің орнымен қатар уақытқа да тәуелді

μ_0 – магниттік тұрақты, μ – ортаның магниттік өтімділігі, $\vec{r}$ – q зарядтан бақылау нүктесіне (A) дейін жүргізілген радиус-вектор.

Магнит индукциясының $(\vec{B})$ өлшем бірлігі [Тл]



Nikola Tesla
(1856 – 1943)

Индукциясы 1 Тл магнит өрісінде орналасқан ұзындығы 1 метр, бойынан 1 А ток өтіп жатқан өткізгішке 1 ньютон күш әсер етеді

$$1\text{Н}=1\text{А}\cdot 1\text{м}\cdot 1\text{Тл}$$

$$1\text{Тл}=1\text{Н}/(1\text{А}\cdot 1\text{м})=1\text{Н}/(\text{А}\cdot\text{м})$$

Жердің магнит өрісі ≈ 10 мкТл.

А.В. Бармасов. 17 бет.

Релятивистік емес жылдамдықпен қозғалатын заряд үшін

Релятивистік емес жылдамдықпен қозғалатын нүктелік зарядтың электр өрісі:

$$\vec{E} = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\frac{q\vec{r}}{r^3} \quad (3)$$

Релятивистік емес жылдамдықпен қозғалатын нүктелік зарядтың магнит өрісі:

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q[\vec{v}\times\vec{r}]}{r^3}\ [\text{Тл}] \quad (2)$$

$$\vec{B} = \varepsilon_0\mu_0[\vec{v}\times\vec{E}] = \frac{[\vec{v}\times\vec{E}]}{c^2} \quad (4)$$

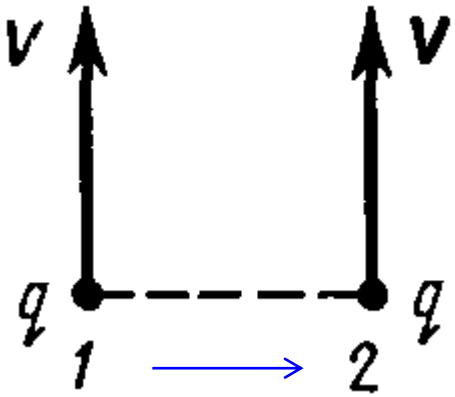
$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0\mu_0}}$ – электр динамикалық тұрақты (вакуумдағы жарық жылдамдығына тең шама)

Бағыттас және параллель қозғалыстағы екі зарядтың электрлік және магниттік әсерлесу күштерін салыстыру

$$F_м = qvB \ (5) \qquad F_э = qE \ (6)$$

2 зарядтың жылдамдығы

2 заряд орналасқан жердегі 1 заряд тудыратын Е және В



6 сурет. 1 зарядтың 2 зарядқа әсері

$$\frac{F_м}{F_э} = \frac{vB}{E} \ (7) \qquad B = \frac{vE}{c^2} \ (4)$$

$$\frac{F_м}{F_э} = \left(\frac{v}{c}\right)^2 \ (8)$$

$v = 300$ км/с болғанның өзінде бұл қатынас 10^{-6} тең болады, демек магниттік күш электрліктен миллион есе кіші

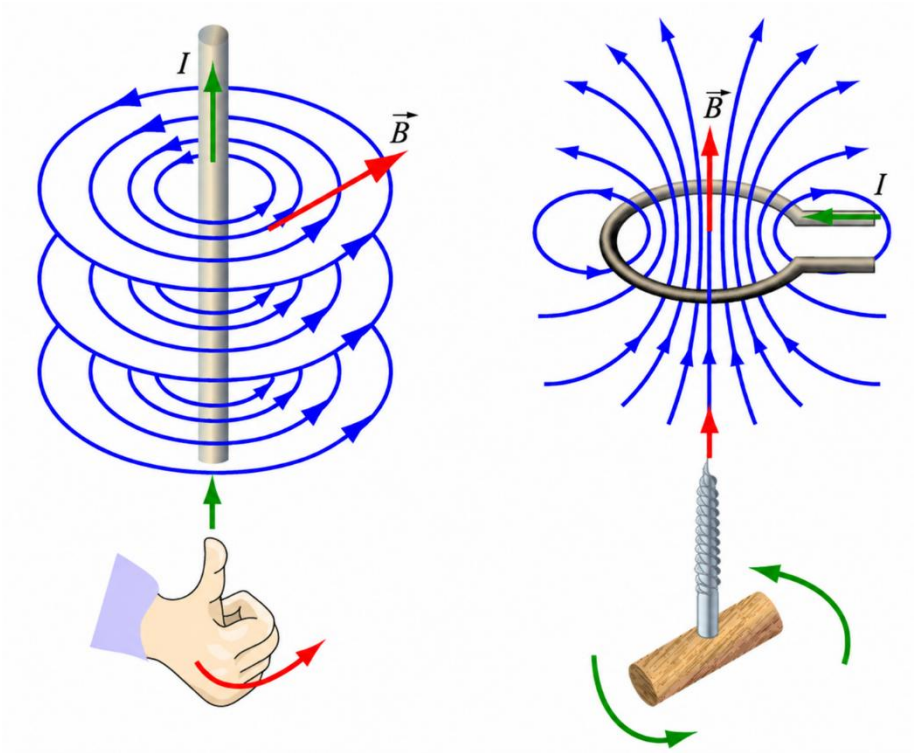
Магниттік өрісті ескеру қаншалықты маңызды?



1. Жарық жылдамдығына жақын жылдамдықпен қозғалатын зарядтық ағын бар. (8) формула релятивистік жылдамдық үшін де жарамды.
2. Өткізгіш бойымен электрондардың тасымалдануы бар. Олардың жылдамдығы секундына ондаған мм, демек $\left(\frac{v}{c}\right)^2 \approx 10^{-24}$. Бірақ өткізгіштегі оң және теріс зарядтардың күшті тепе-теңдігінен ол жерде электрлік өріс болмайды деп есептейміз, сондықтан әсер етуші күш тек магниттік күш. Сонымен қатар өткізгіш бойымен жүретін ток күші көп болғанда магниттік күштің де үлесі жоғары болады.

Магнит индукциясы $\vec{B}$, магнит өрісінің күштік сипаты, оны магниттік күш сызықтары арқылы кескіндеуге болады. Магнит өрісінің күш сызықтары әрқашан тұйық



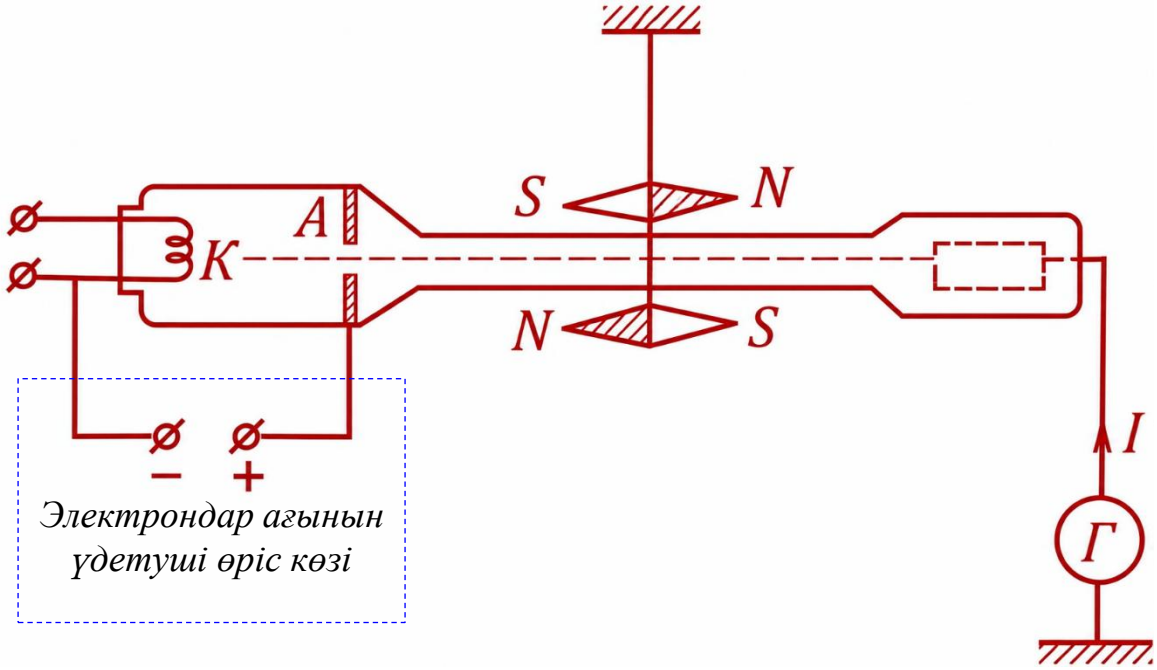


Оң бұранда ережесі

Иоффе тәжірибесі. 1911 ж. Түтікшедегі зарядталған бөлшектер ағынының магниттік тілшеге әсері оның бұрылу бұрышы арқылы анықталды

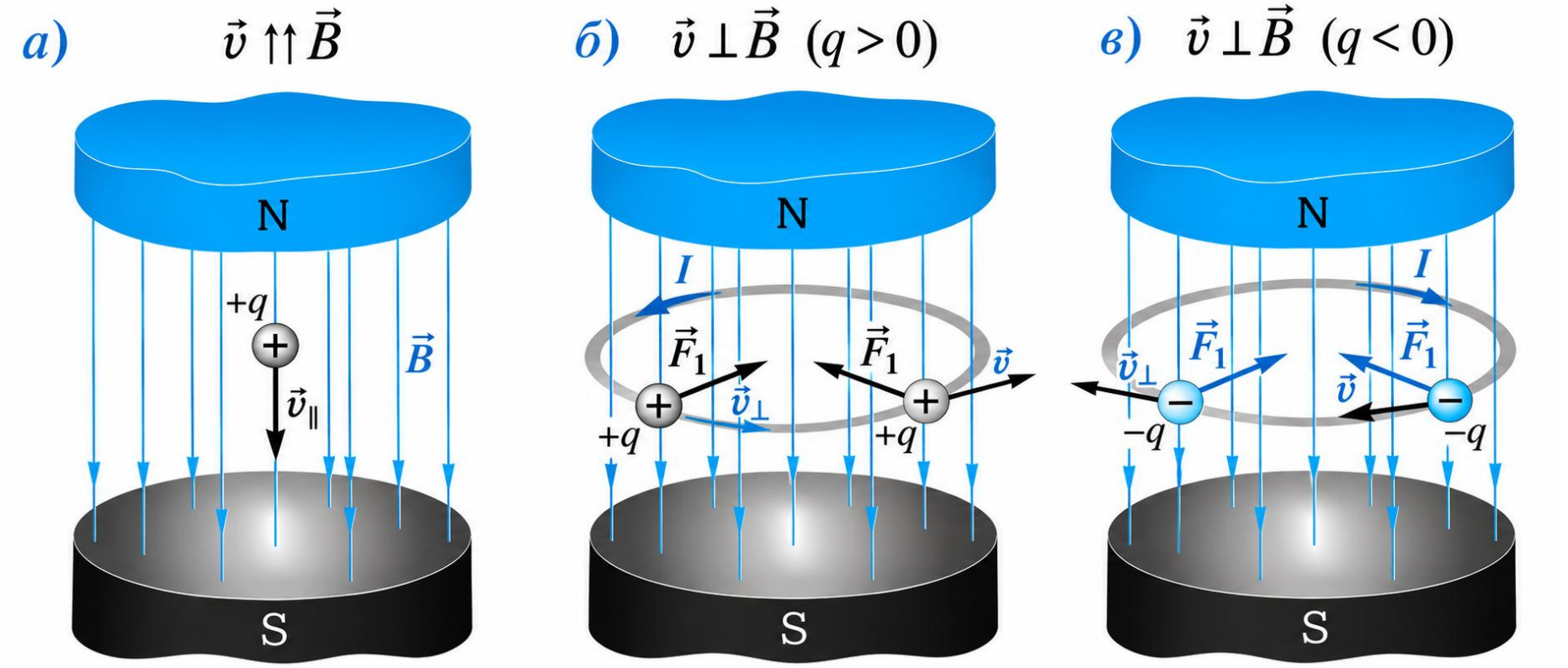


Абра́м Фёдорович Ио́ффе
(1880-1960)



Иоффе қондырғысының схемасы. К – катод, А – анод, Г – ток күшін өлшеуге арналған аспап.

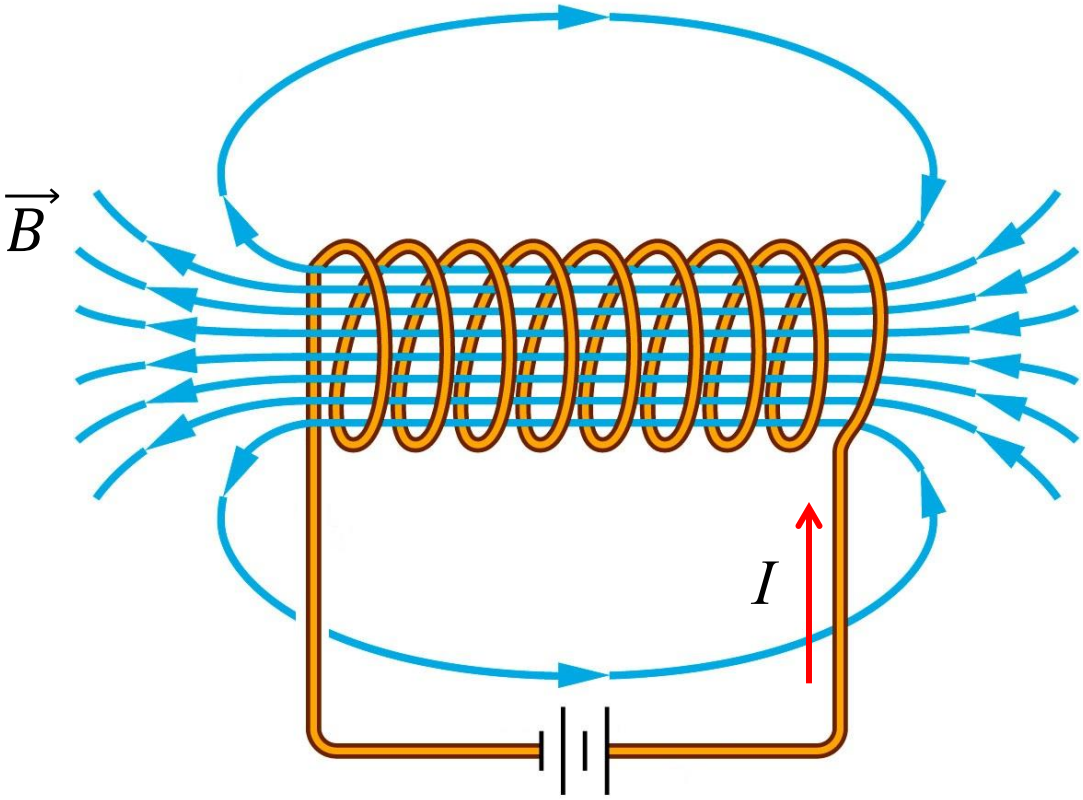
Магнит өрісінде қозғалған зарядқа әсер ететін Лоренц күшінің $F_M = qvB \cdot \sin(\alpha)$ бағыты



7 сурет

$r = \frac{mv}{qB}$ (9) – шеңбер радиусы; $T = \frac{2\pi m}{qB}$ (10) – айналу периоды

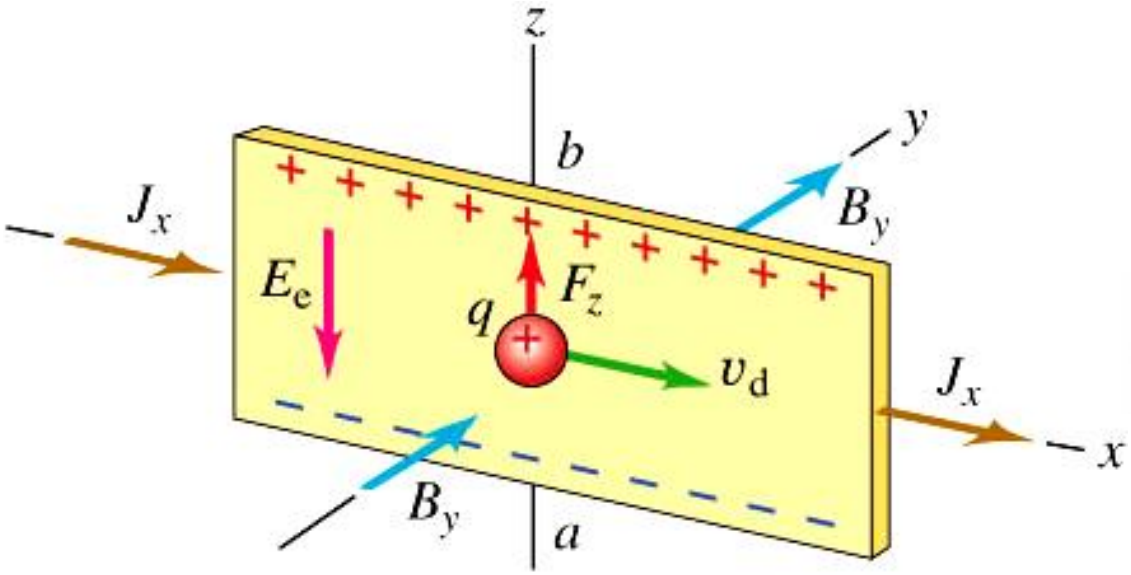
Соленоид және оның магниттік өрісі



Холл эффектісі (1879)



8 сурет.
Холл датчигі



9 сурет. Холл эффектісін түсінуге. Әлсіз магниттік өріске (B) перпендикуляр орналасқан өткізгіш алтын пластина



Э́двин Ге́рберт Холл
(1855-1938)

$$F_э = F_м \Longrightarrow eE = evB \Longrightarrow E = vB \ (11)$$

$$j = env \Longrightarrow v = \frac{j}{en} \ (12)$$

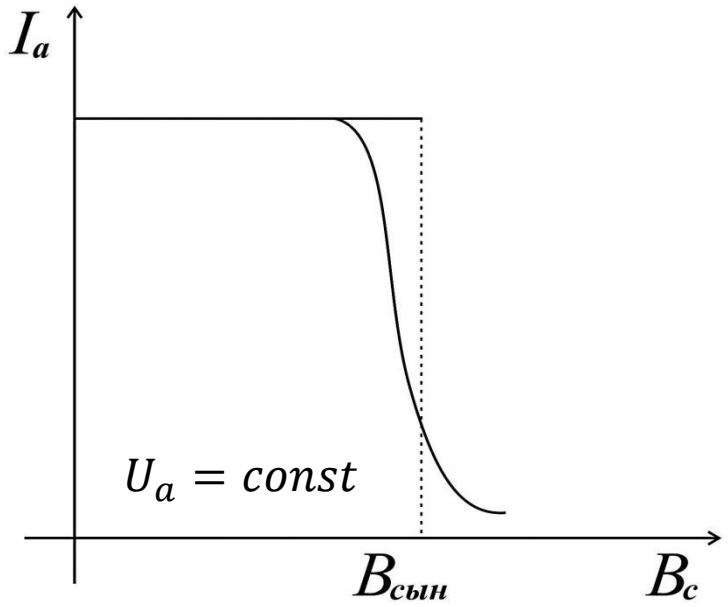
$$E = \frac{1}{en} jB \ (13)$$

$$R_{H(\text{мет})} = 10^{-9} \frac{\text{м}^2}{\text{Кл}}$$

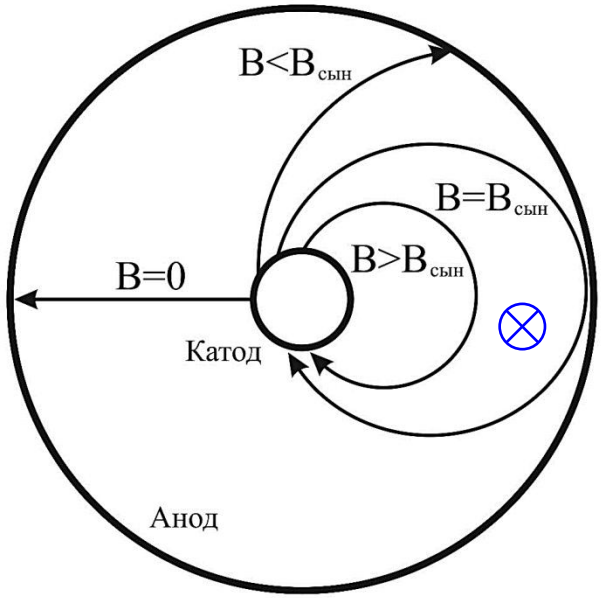
$$R_{H(\text{ж.ө.})} = 0{,}1 \frac{\text{м}^2}{\text{Кл}}$$

$R_H = \frac{1}{en}$ – Холл тұрақтысы

Электрон зарядының оның массасына қатынасын $\left(\frac{e}{m}\right)$ магнетронық әдіспен анықтау



Анод тогының (I_a) соленоид өрісінен тәуелділігі

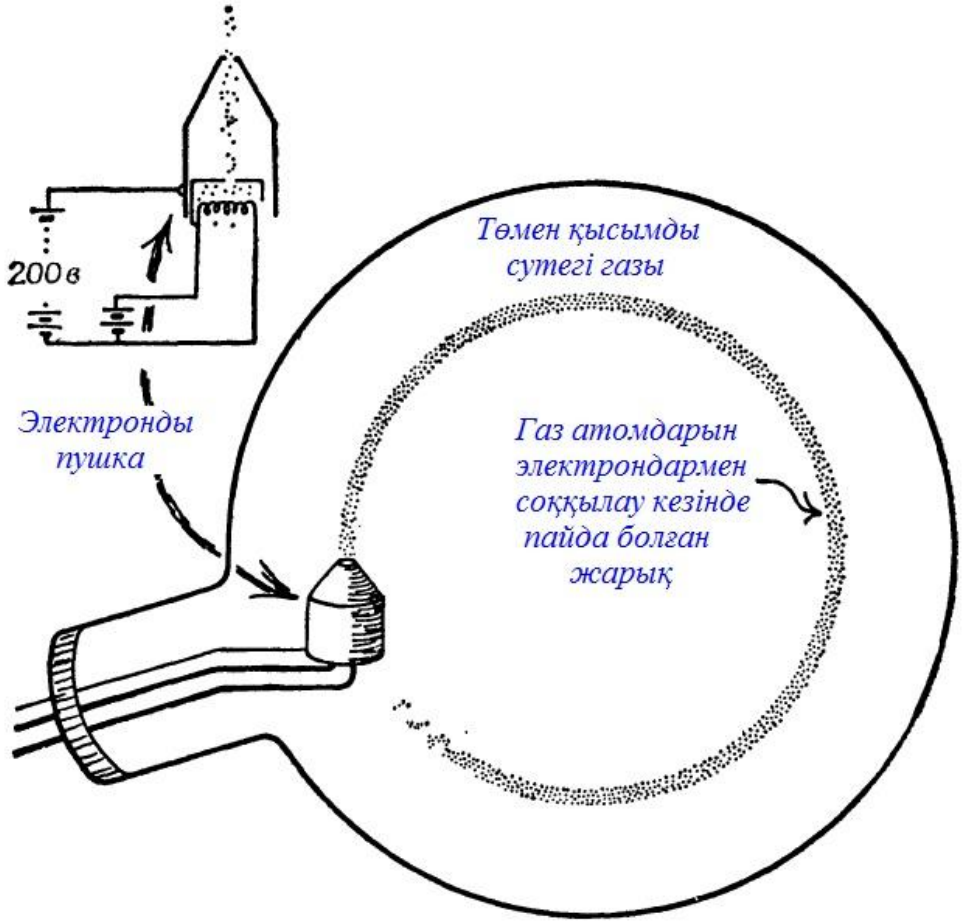


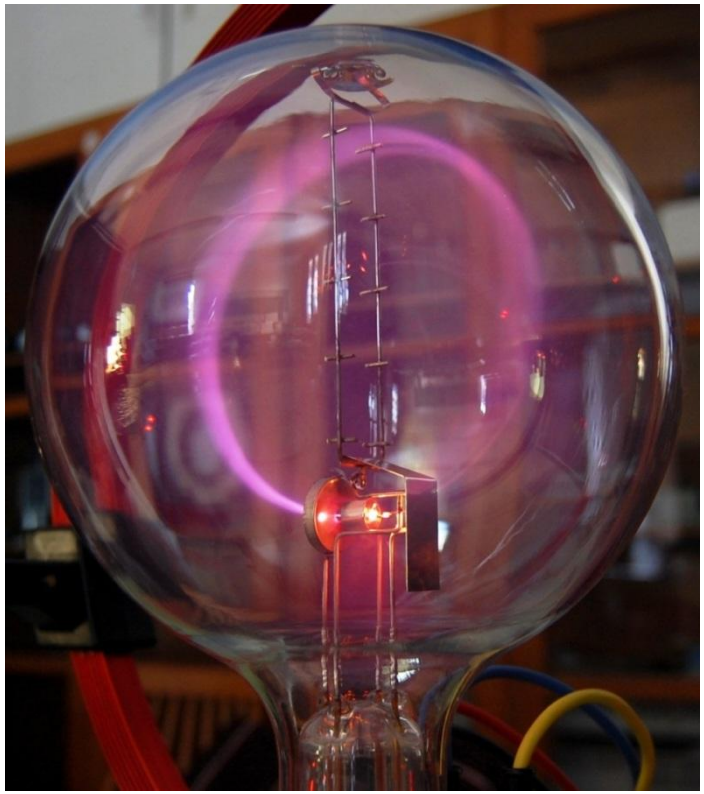
Вакуумдық диодтың көлденең қимасы

$$\frac{e}{m} \approx \frac{8U_a}{B_{сын}^2 r_a^2}$$

U_a – анод кернеуі; B_c – соленоидтың магнит индукциясы; r_a – анод радиусы

Электр магниттік өрістердегі электрондар ағынының шеңбер тәрізді траекториясы

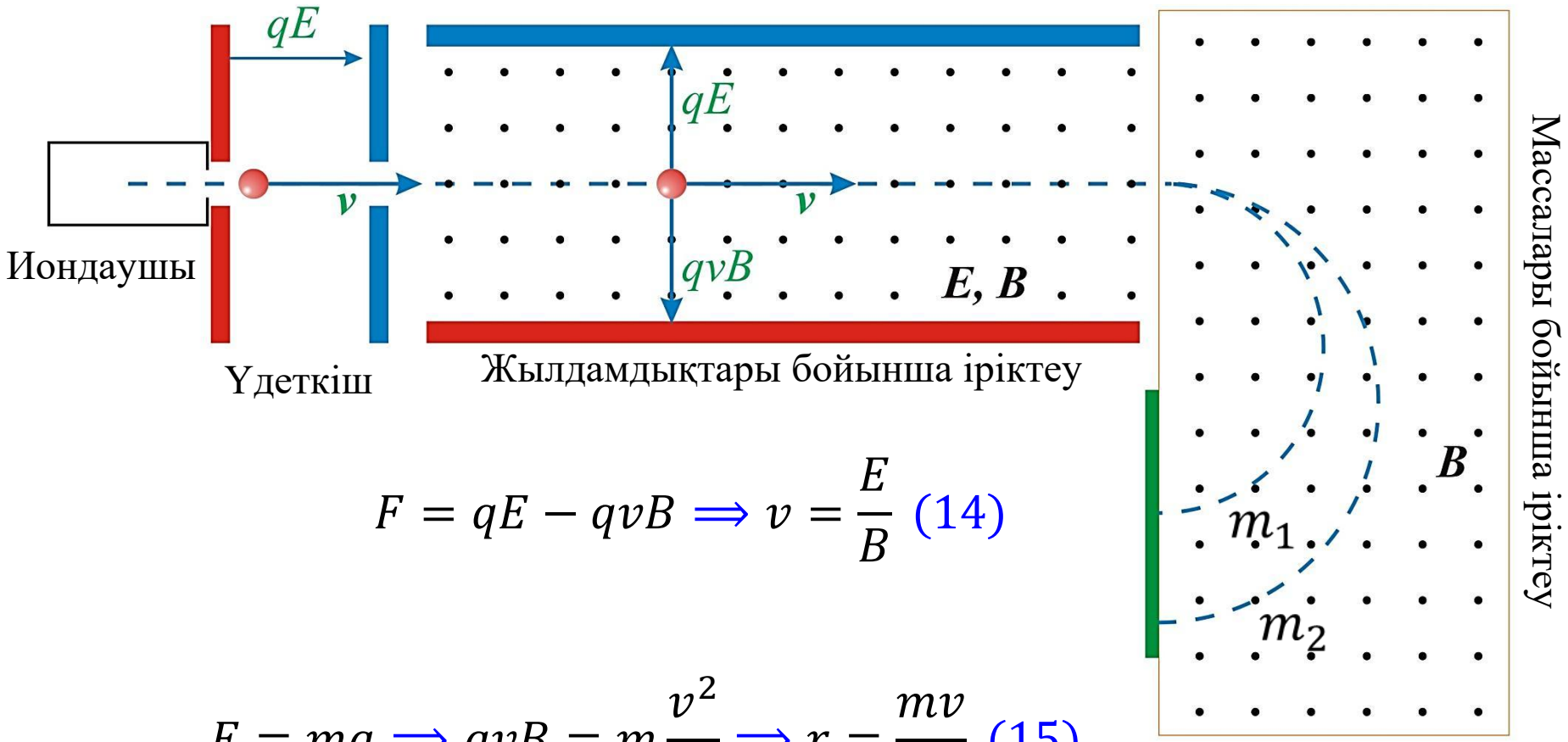




Магнит өрісіне орналасқан газдық разряд

http://www.encyclopedia-magnetica.com. Эрик Роджерс, 285 бет

Масс-спектрометр



$$F = qE - qvB \Rightarrow v = \frac{E}{B} \quad (14)$$

$$F = ma \Rightarrow qvB = m\frac{v^2}{r} \Rightarrow r = \frac{mv}{qB} \quad (15)$$

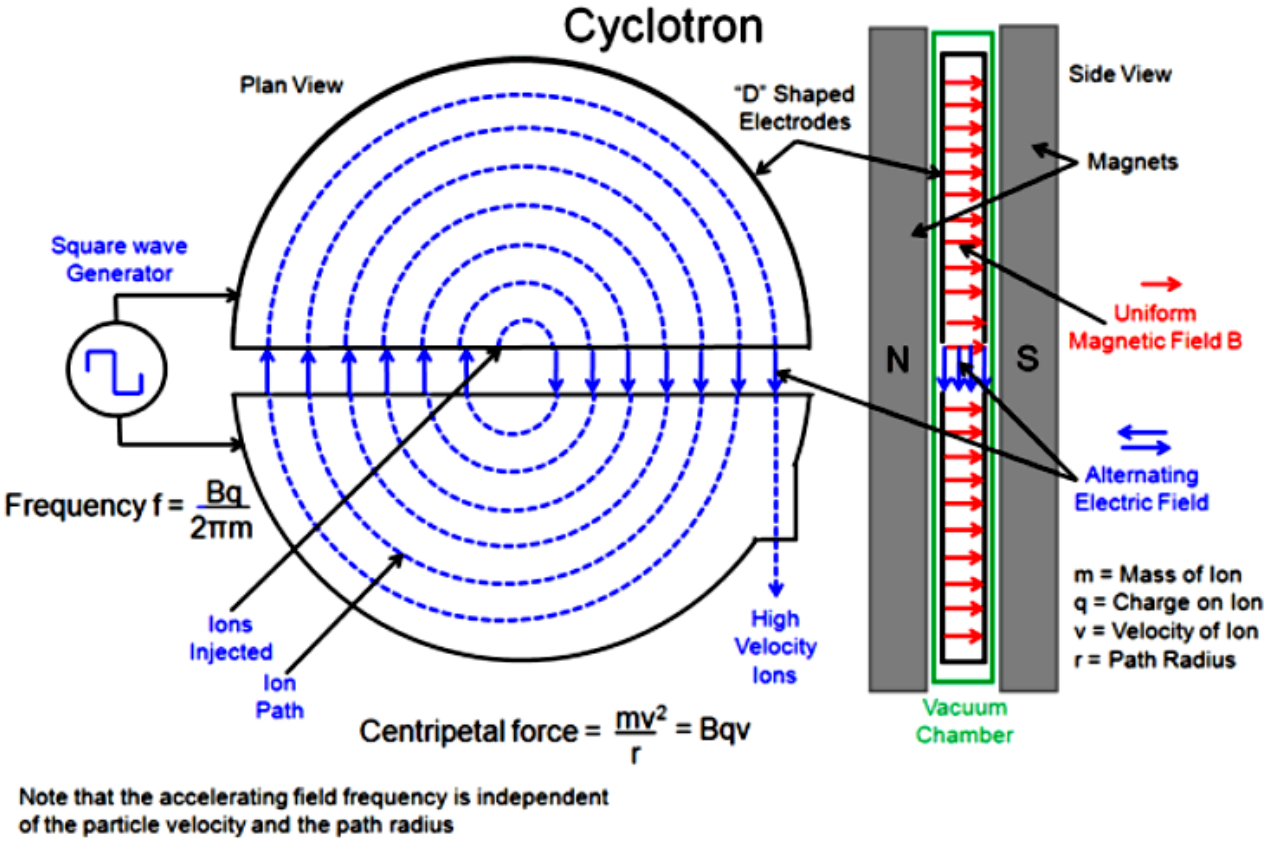
$a = \frac{v^2}{r}$ – центрге тартқыш үдеу

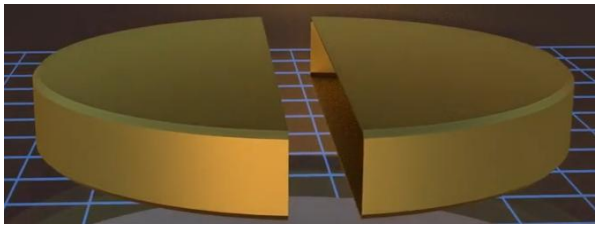
Циклотрон (1929)

зарядтарды (протон) үдетуге арналған құрылғы

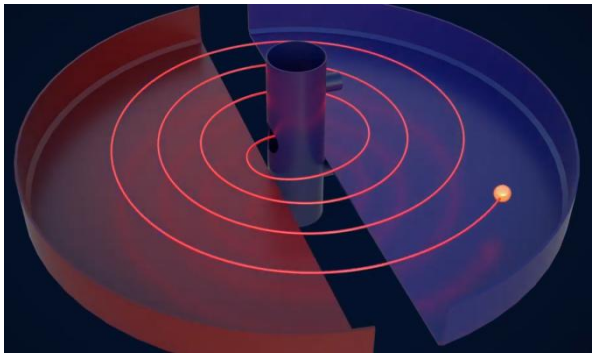


Эрнест Орландо Лоуренс (1901-1958).
Нобель сыйлығы (1939)





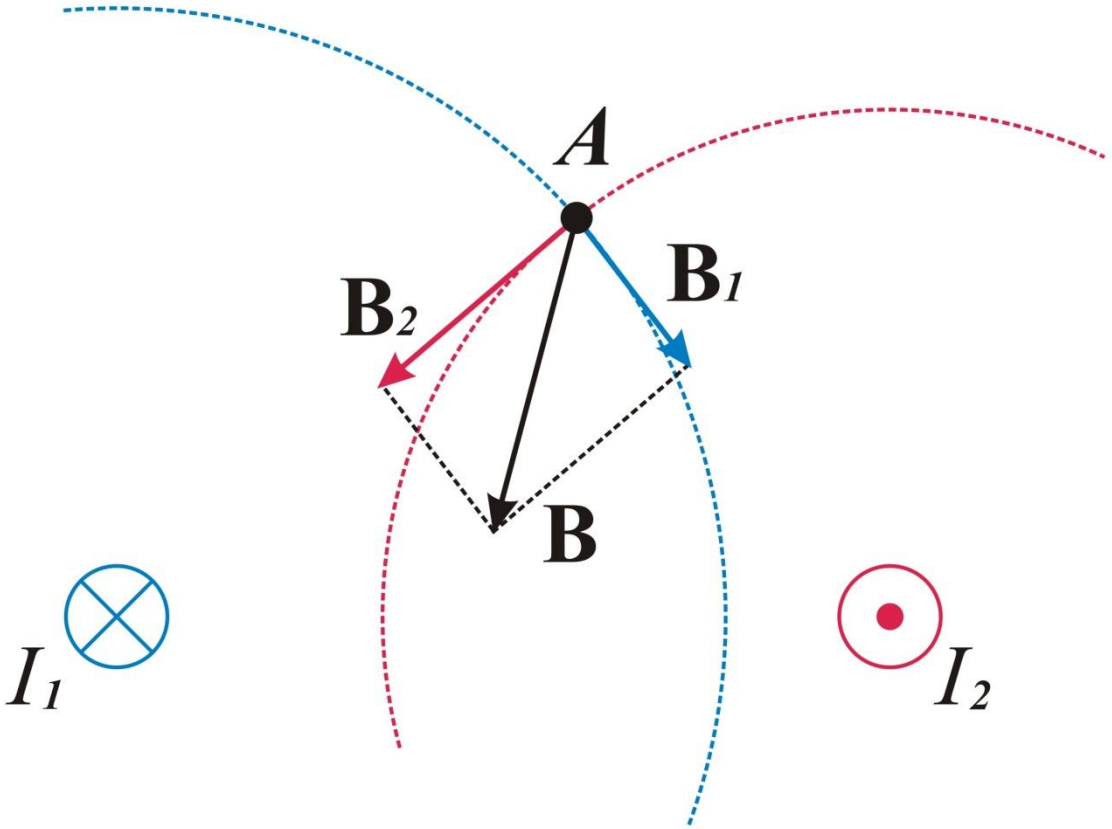
Дуанттар (электродтар)



$a = \frac{v^2}{r}$ – центрге тартқыш үдеу

Магниттік өрістердің суперпозиция принципі

Бірнеше токтар немесе қозғалыстағы зарядтар тудыратын қортқы магнит өрісі осы әрбір ток немесе қозғалыстағы зарядар тудырған магнит өрістерінің векторлық қосындысына тең:



$$B = \sum B_i . (16)$$

10 сурет

Био-Савар-Лаплас заңы

(тұрақты электр тогы тудыратын магнит өрісін анықтау)



Жан-Бати́ст Био́
(1774-1862)

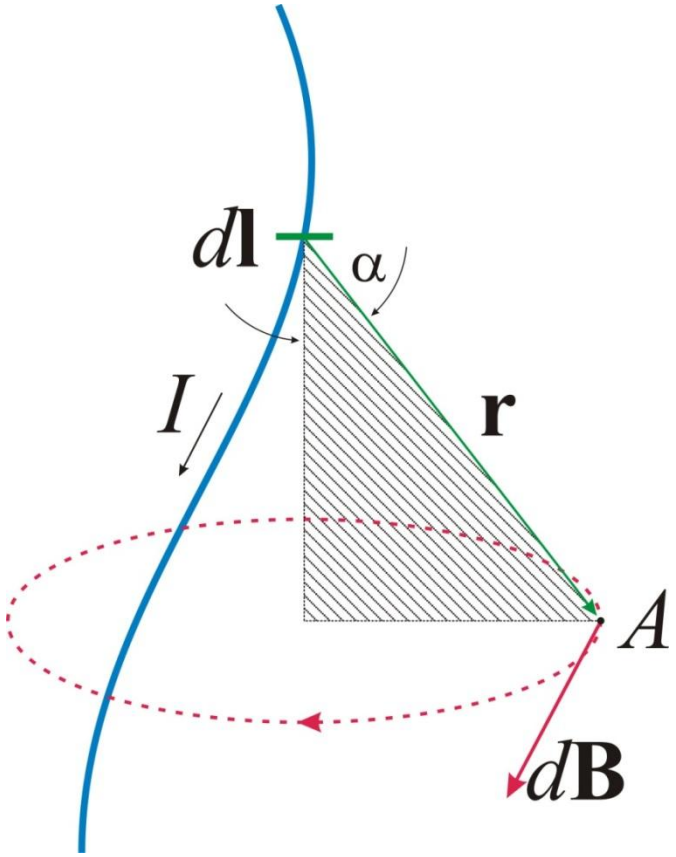


Феликс Савар
(1791-1841)



Пьер-Симо́н, маркиз де
Лапла́с (1749-1827)

Вакуумдағы тогы бар өткізгіштің магнит өрісін анықтау



11 сурет

$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{q[\vec{v}\times\vec{r}]}{r^3} \quad (2)$$

$$q \to \rho \mathrm{d}V \qquad \rho\vec{v} \to \vec{j}$$

$$\mathrm{d}\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{[\vec{j}\times\vec{r}]\mathrm{d}V}{r^3} \quad (17)$$

$$j\mathrm{d}V = j\mathrm{d}S \cdot \mathrm{d}l = I \cdot \mathrm{d}l$$

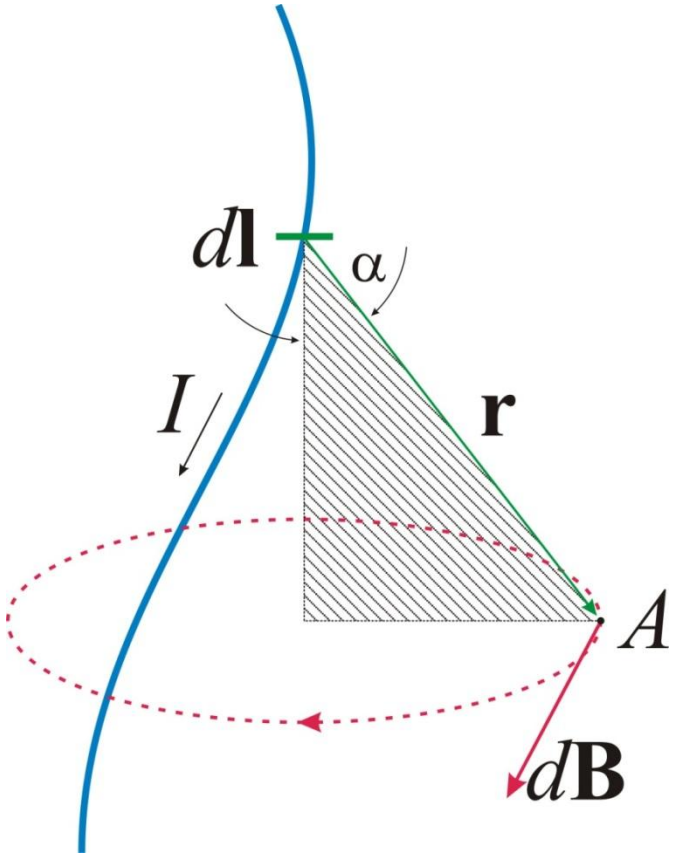
$$\vec{j}\mathrm{d}V = I\mathrm{d}\vec{l}$$

Био-Савар-Лаплас заңы:

$$\mathrm{d}\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I[\mathrm{d}\vec{l}\times\vec{r}]}{r^3} \quad (18)$$

$\mathrm{d}V -$ өткізгіш бөлігінің элементар көлемі; $j\mathrm{d}V -$ токтың көлемдік элементі; $I\mathrm{d}l -$ токтың сызықты элементі

Вакуумдағы тогы бар өткізгіштің магнит өрісін анықтау, Био-Савар-Лаплас заңы:



11 сурет

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\left[d\vec{l}\times\vec{r}\right]}{r^3} \quad (18)$$

Толық магниттік өріс токтың барлық элементтері бойынша интегралдау нәтижесінде алынады:

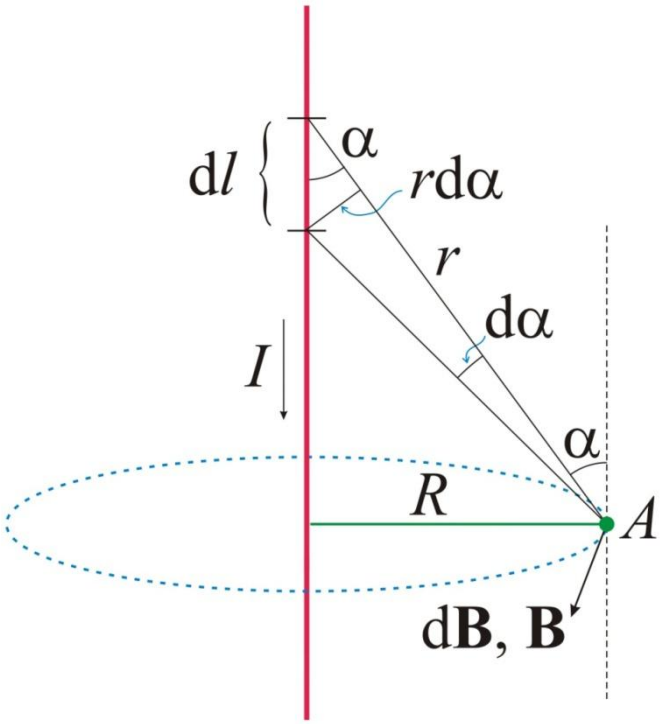
$$\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\int\frac{I\left[d\vec{l}\times\vec{r}\right]}{r^3} \quad (19)$$

jdV – токтың көлемдік элементі; Idl – токтың сызықты элементі

Шексіз түзу токтың магнит өрісі

A нүктесінде барлық ток элементтері тудыратын $\mathrm{d}\vec{B}$ векторының бағыты (18) формула бойынша бір бағытта. Сондықтан $\mathrm{d}\vec{B}$ векторларын қосуды олардың модульдерін ($\mathrm{d}B$) қосумен алмастырсақ болады:

$$\mathrm{d}\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\left[\mathrm{d}\vec{l}\times\vec{r}\right]}{r^3} \quad (18)$$



12 сурет. Түзу ток

$$\mathrm{d}\vec{l}\times\vec{r} = \mathrm{d}l r \sin\alpha$$

$$\mathrm{d}B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I\cdot \mathrm{d}l\sin\alpha}{r^2} \quad (20)$$

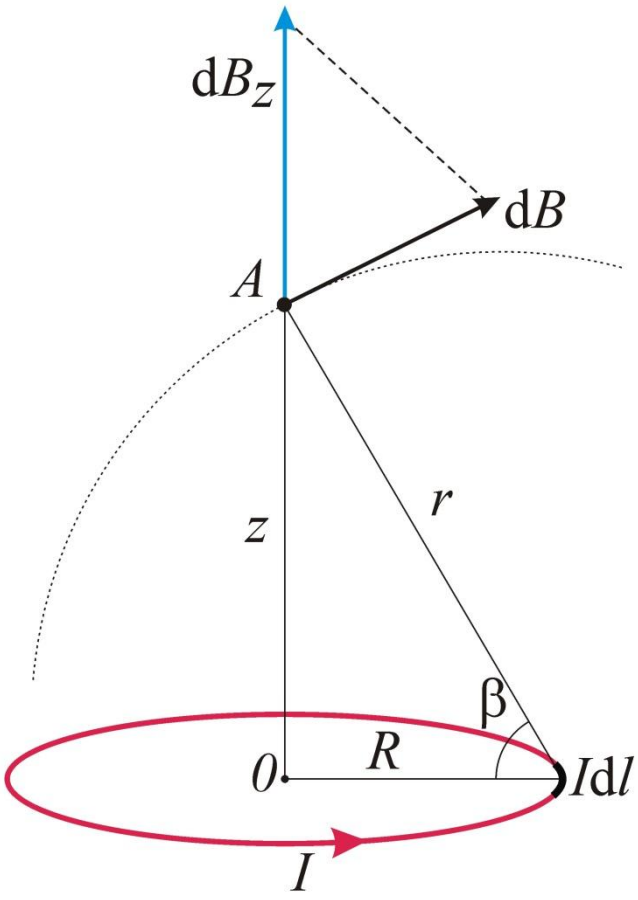
$$r = \frac{R}{\sin\alpha}; \qquad \mathrm{d}l = \frac{r\mathrm{d}\alpha}{\sin\alpha}$$

$$\mathrm{d}B = \frac{\mu_0 I}{4\pi R}\sin\alpha\mathrm{d}\alpha \quad (21)$$

α бойынша 0-ден π-ге дейін интегралдаймыз:

$$\vec{B} = \int \mathrm{d}\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{I}{R}\int_0^{\pi}\sin\alpha\mathrm{d}\alpha = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2I}{R} \quad (22)$$

Дөңгелек токтың өсіндегі магнит өрісін анықтау



13 сурет. Дөңгелек ток

Токтың $Id\vec{l}$ элементі $d\vec{B}$ векторын тудырады:

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{l}\cdot\sin\alpha}{r^2} \quad (20)$$

Қорытқы $\vec{B}$ векторы $d\vec{B}$ векторлардың z өсіне проекцияларының қосындысы:

$$d\vec{l}\vec{r}\cdot\sin\left(\frac{\pi}{2}\right) = d\vec{l}\vec{r}\cdot 1$$

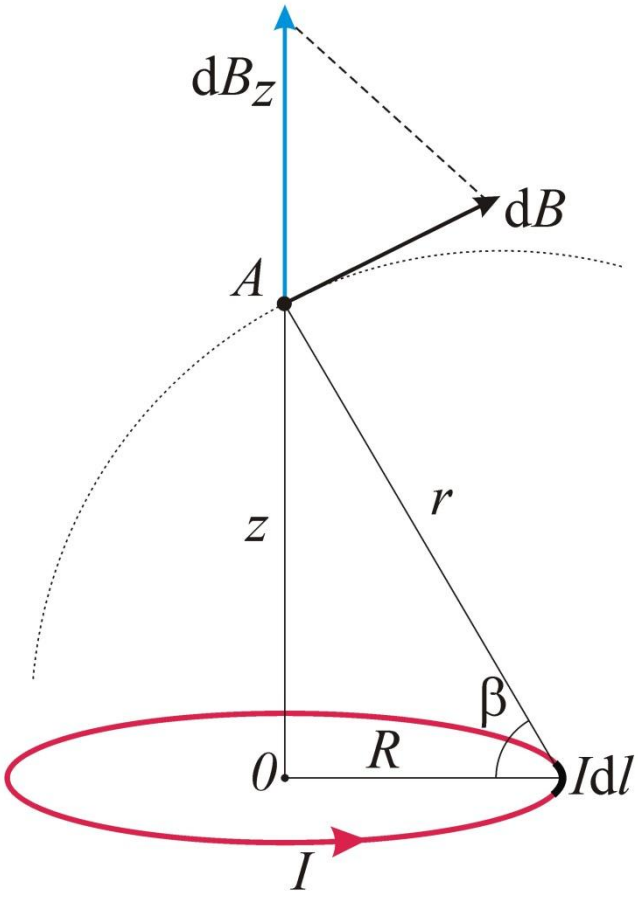
$$dB_z = dB\cos\beta = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{Id\vec{l}\cdot\cos\beta}{r^2} \quad (23)$$

$$\cos\alpha = \frac{R}{r}; \qquad r^2 = z^2 + R^2$$

$d\vec{l}$ элементтері бойынша интегралдаймыз: $\int d\vec{l} = 2\pi R$

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\pi R^2 I}{(z^2+R^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 R^2 I}{2(z^2+R^2)^{3/2}} \quad (24)$$

Дөңгелек токтың өсіндегі магнит өрісін анықтау



13 сурет. Дөңгелек ток

$$B_{z=0} = \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\pi I}{R} = \frac{\mu_0 I}{2R}. \quad (25)$$

$$B_{z\gg R} \approx \frac{\mu_0}{4\pi}\frac{2\pi R^2 I}{z^3} = \frac{\mu_0 R^2 I}{2z^3}. \quad (26)$$