ӘЛ-ФАРАБИ АТЫНДАҒЫ ҚАЗАҚ ҰЛТТЫҚ УНИВЕРСИТЕТІ
Физика-техникалық факультеті

ЭЛЕКТР ЖӘНЕ МАГНЕТИЗМ

Профессор Досболаев М.Қ.
merlan@physics.kz

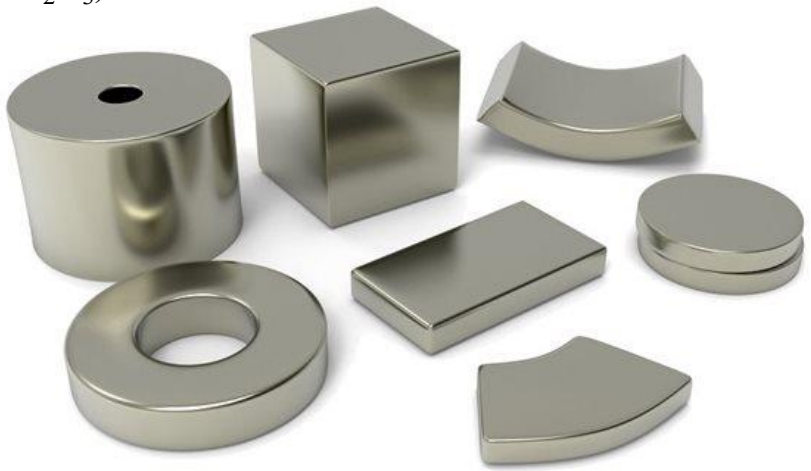
Магнетит – табиғи, спонтанды (ішкі себептерге байланысты өздігінен пайда болатын) магниттік қасиетке ие заттар



1 сурет. Табиғи магнит – магнетит
31% FeO + 69%Fe_2O_3)



2 сурет. Альнико – алюминии (10%), никель (19%), кобальт (18%) жене темір (53%) қорытпасы

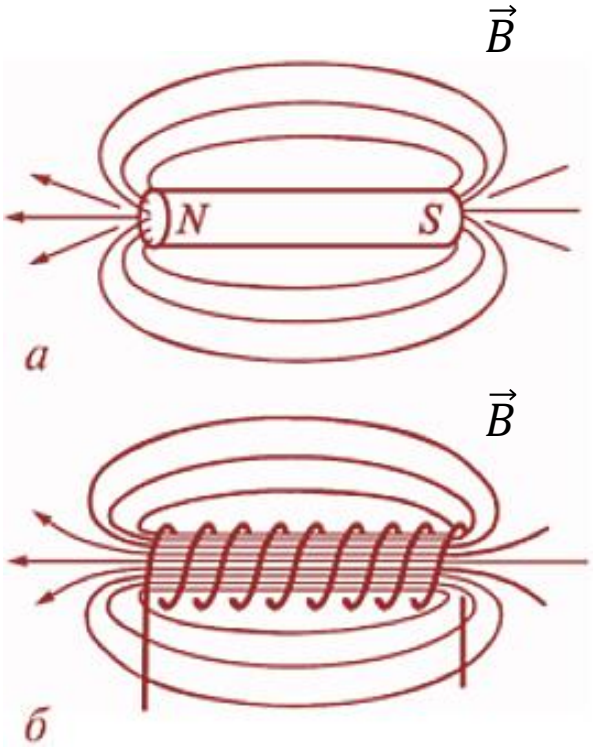


3 сурет. Неодим (Nd) магниті - неодим, бор жене темір қорытпасы

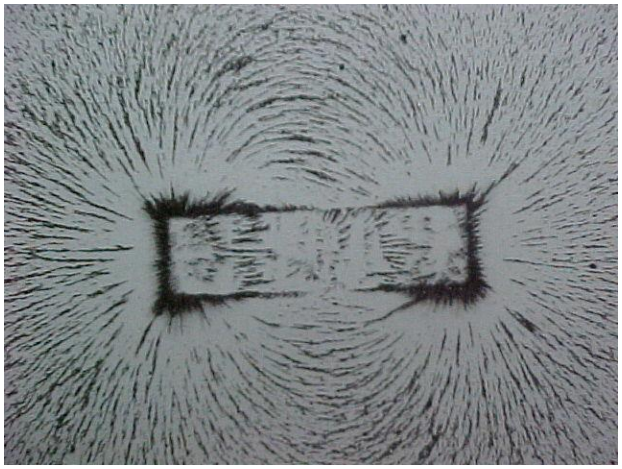
Заттардағы магнит өрісі туралы Ампер гипотезасы



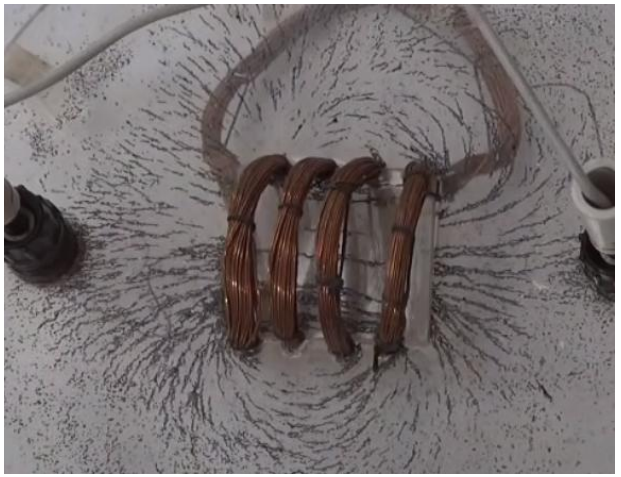
Андре-Мари Ампер
(1775 – 1836)



4 сурет.
а – тұрақты магнит, б – соленоид



4` сурет. Тұрақты магнит өрісі

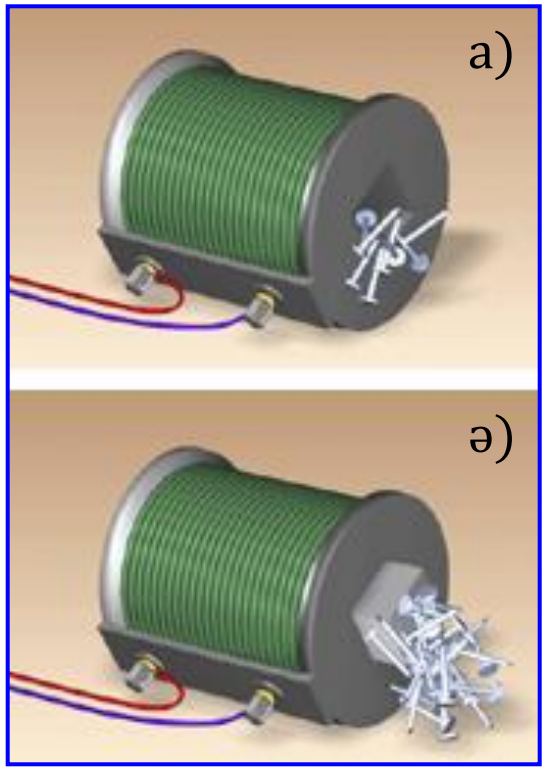


4`` сурет. Соленоид өрісі

https://www.youtube.com/watch?v=FFDLzfHWCac

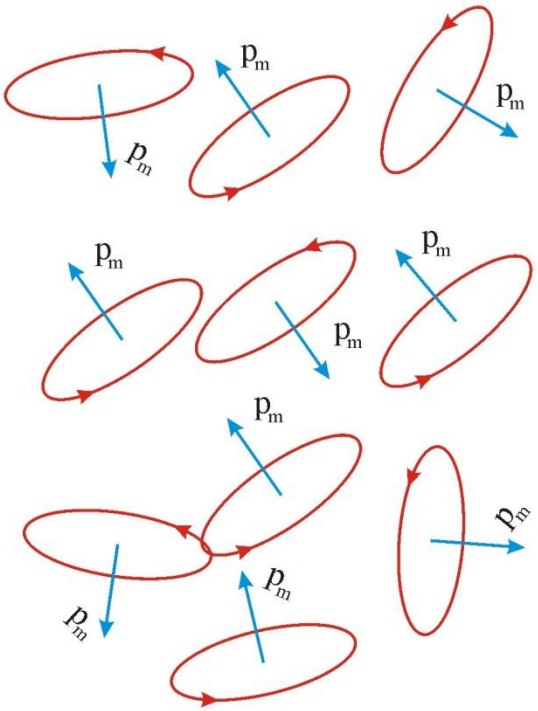
Магнит өрісіндегі заттар

$$\mu = \frac{B}{B_{\text{вакуум}}} = \frac{B}{H}$$

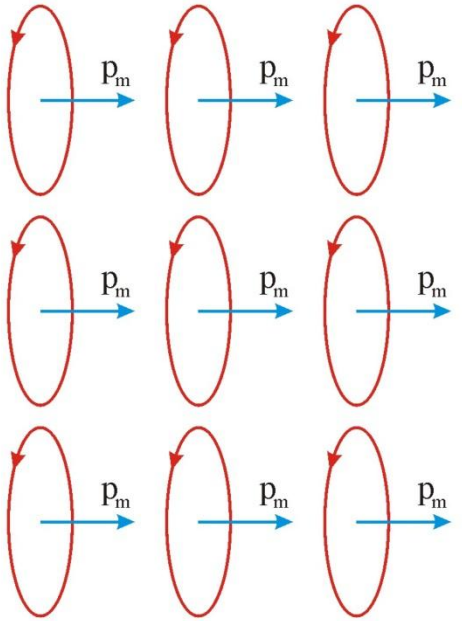


5 сурет

а) $\vec{B}_0 = 0;\ \vec{B}` = 0$



ә) $\vec{B}_0 \neq 0;\ \vec{B}` \neq 0$



6 сурет

Қорытқы магнит өрісі: $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}`$ (1)

p_m – магниттік момент; μ – ортаның магниттік өтімділігі; H – тогы бар катушка туғызатын магнит өрісінің кернеулігі (5а сурет)

Заттарды магниттік қасиеттеріне сай жіктеу

Әлсіз магниттелетін

(Парамагнетиктер)

Вольфрам, алюминий, титан, платина, цезий, литий, оттегі, азот тотығы, сілтілік металдар және т.б.

(Диамагнетиктер)

Азот, сутегі, германий, кремний, су, инертті газдар, алтын, күміс, мыс, көміртегі, NaCl және т.б.



Күшті магниттелетін

(Ферромагнетиктер)

Темір, никель, кобальт және олардың қорытпалары



Майкл Фарадей
1848 жылы енгізді

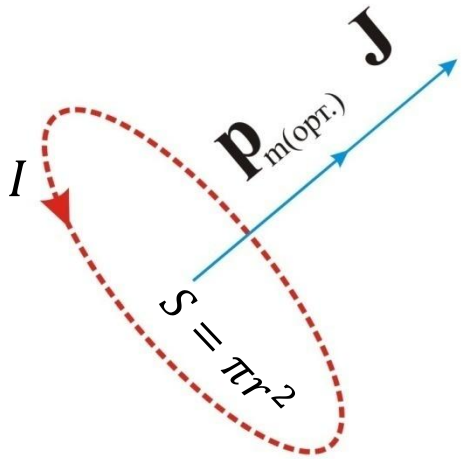
Заттардың магниттелгіштігі $(\vec{J})$

Магнетиктердің магниттелу деңгейін бірлік көлемдегі магниттік момент сипаттайды, бұл шаманы *магниттелгіштік* деп аталады:

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V}\sum \vec{p}_m \quad (2)$$

немесе

$$\vec{J} = \frac{1}{V}\sum_{i}^{N} \vec{p}_{i,m}\left[\frac{\text{А}}{\text{м}}\right] \quad (2*)$$



7 сурет. Молекулалық микроток

$$\vec{J} = n\langle \vec{p}_m \rangle \quad (3)$$

$\vec{J}$ және $\langle \vec{p}_m \rangle$ векторлары бағыттас.

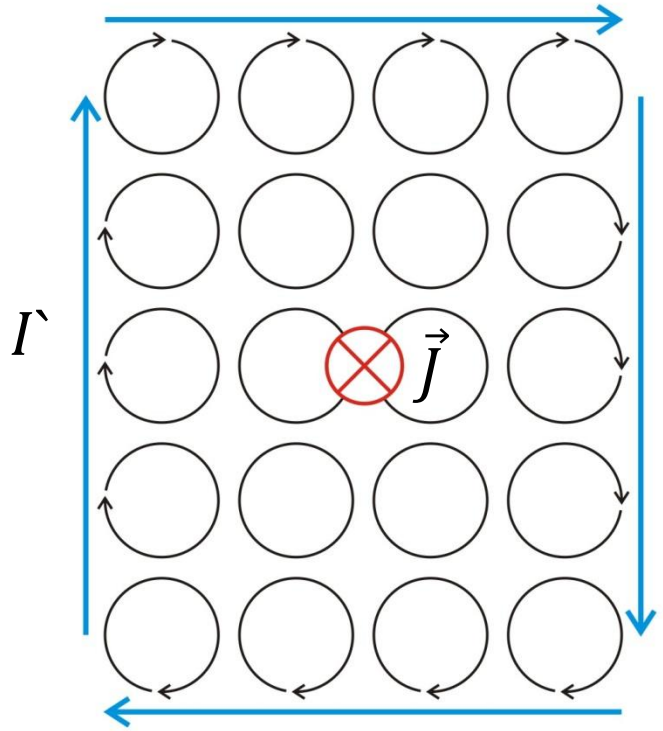
Молекулалық микротоктың магниттік моменті:

$$\vec{p}_m = IS\vec{n} = \frac{e\omega}{2\pi}\cdot S \cdot 1 = \frac{e\vec{v}}{2\pi r}\cdot \pi r^2 \equiv \frac{e\vec{v}r}{2} \quad (4)$$

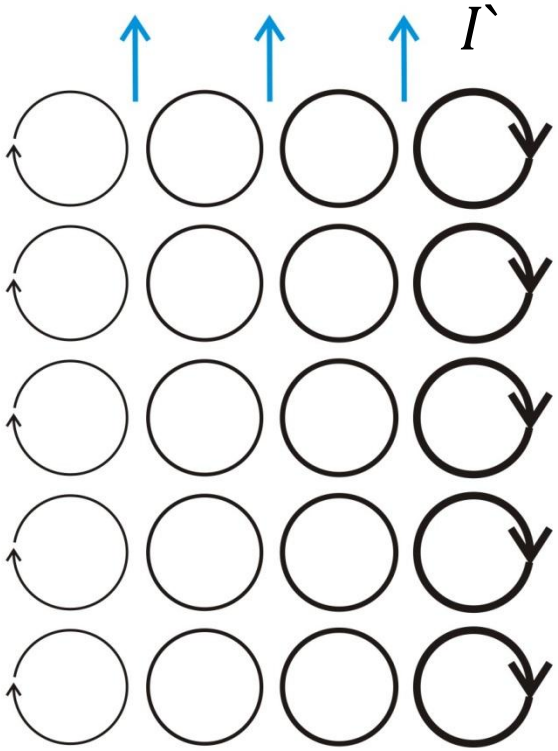
$\vec{p}_{i,m}$ – i-ші жекеленген атомның магниттік моменті
n – молекулалардың концентрациясы;
$\langle \vec{p}_m \rangle$ – бір молекуланың орташа магниттік моменті;
$\vec{n}$ – S бетке түсірілген нормальдың бірлік векторы;
$\omega = \frac{\vec{v}}{r}$ – бұрыштық жиілік
$\vec{v}$ – сызықты жылдамдық

Макроскопиялық (микротоктар жиынтығы) магниттелу тогы (*I`*)

$$I` \rightarrow \vec{J}$$



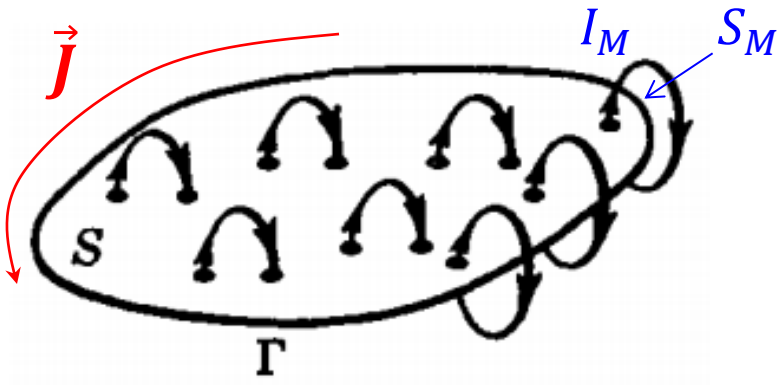
8а сурет. Біркелкі ортада беттік магниттелу тогы пайда болады



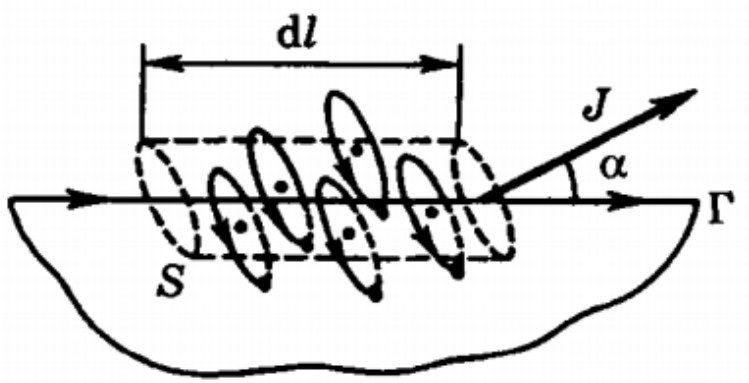
8ә сурет. Біркелкі емес ортада көлемдік магниттелу тогы пайда болады

$\vec{J}$ векторы оң бұранда ережесіне сай анықталады

$I`$ магниттелу тогымен $\vec{J}$ векторы арасындағы байланыс



9 сурет. Молекулалық токтар



10 сурет. Г *контурының бөлігі*

Қиғаш цилиндр көлемі: $\mathrm{d}V = S_M cos\alpha \mathrm{d}l$

S бетті бір рет тесіп өтетін магниттелу тогы:

$$\mathrm{d}I` = I_M n \mathrm{d}V \quad (5)$$

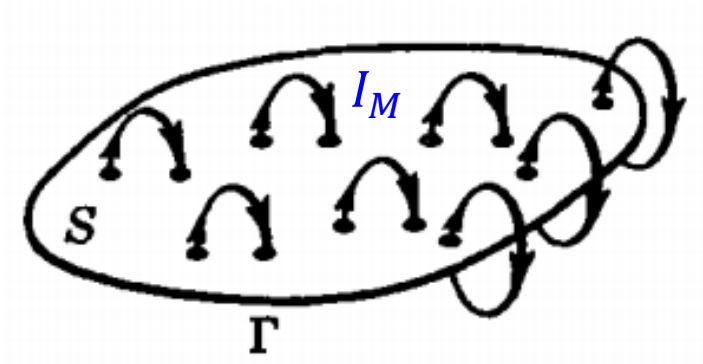
$$\mathrm{d}I` = I_M n S_M cos\alpha \mathrm{d}l = J cos\alpha \mathrm{d}l \quad (6)$$

$$\langle \vec{p}_m \rangle = I_M S_M$$

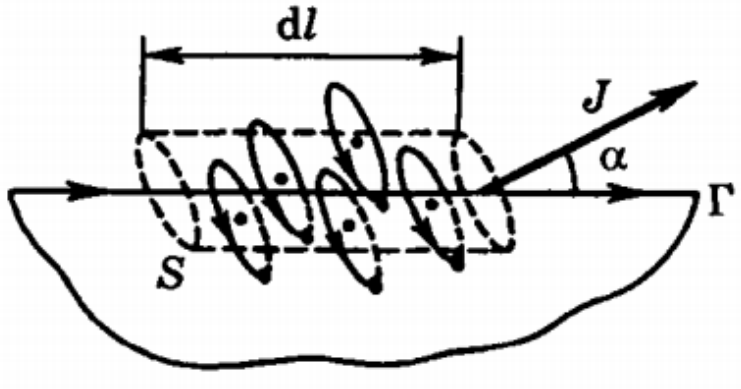
$$\vec{J} = n\langle \vec{p}_m \rangle \quad (3)$$

I_M – молекулалық токтар;
α – $\mathrm{d}l$ мен J векторы арасындағы бұрыш;
n – молекулалар концентрациясы;
S_M – молекулалық ток қамтып жатқан аудан

$\vec{J}$ векторының құйындылығы



9 сурет. Молекулалық токтар



10 сурет. Γ *контурының бөлігі*

$$\mathrm{d}I` = I_M n S_M cos\alpha \mathrm{d}l = J cos\alpha \mathrm{d}l \quad (6)$$

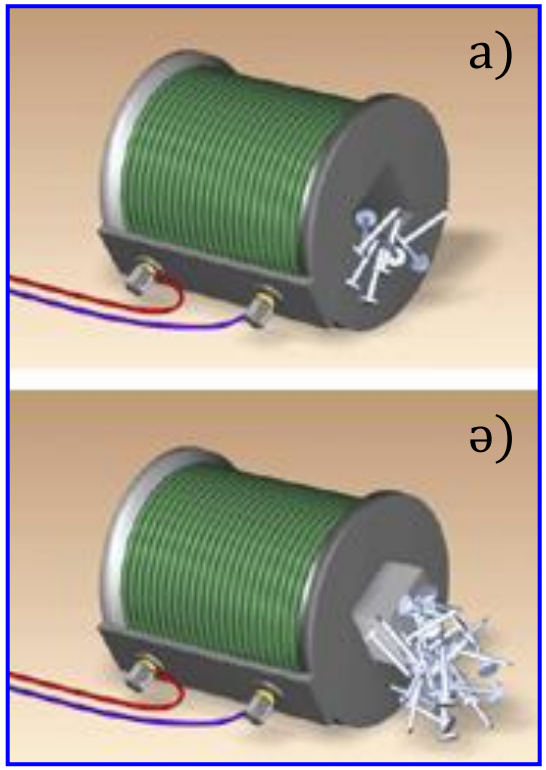
$$\oint \vec{J}\mathrm{d}\vec{l} = I` \quad (7)$$

– стационар жағдай үшін, қандайда бір контурмен $\vec{J}$ векторының циркуляциясы, осы контур қамтып жатқан магниттелу токтарының алгебралық суммасына тең.

Егер магнетик біркелкі емес болса $\rightarrow I` = \int \vec{j} d\vec{S}$

$$\mathrm{rot}\vec{J} = \vec{j`} \quad (7^{*})$$

Тұрақты токтың магнит өрісі үшін $\vec{H}$ векторының құйындылығы



5 сурет

$$\oint \vec{B}\mathrm{d}\vec{l} = \mu_0(I + I`) \quad (8)$$

$$\oint \vec{j}\mathrm{d}\vec{l} = I` \quad (7)$$

$$\oint \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{j}\right)\mathrm{d}\vec{l} = I \quad (9)$$

$\vec{B}$ және $\vec{H}$ векторлары бір контурда орналасқан

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{j} = \vec{H}$$

$$\oint \vec{H}\mathrm{d}\vec{l} = I \quad (10)$$

– қандайда бір контур бойымен $\vec{H}$ векторының циркуляциясы осы контур қамтып жатқан өткізгіштік токтардың алгебралық суммасына тең.

$$\mathrm{rot}\vec{H} = \vec{j} \quad (11)$$

$I`$ – магниттелу тогы

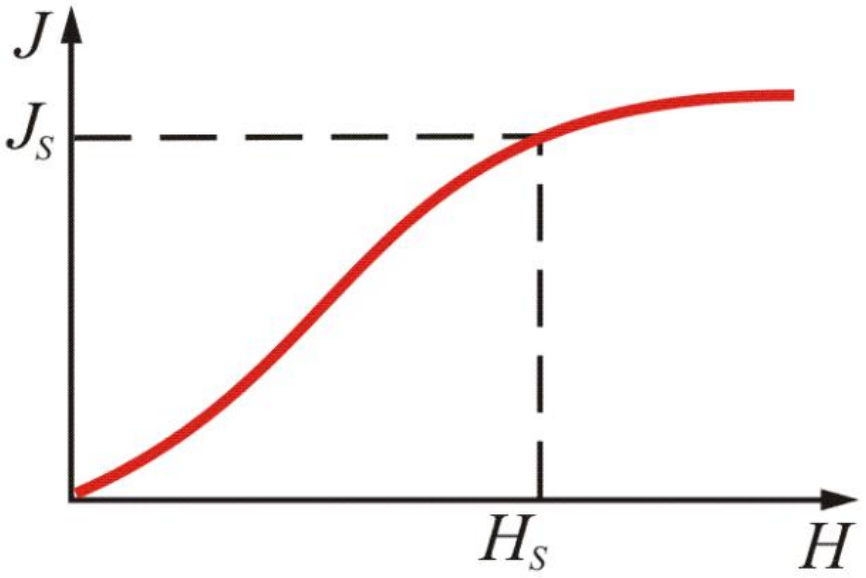
$\vec{H}$ және $\vec{J}$ векторлары арасындағы байланыс әлсіз магнетиктер үшін сызықты

$$\vec{J} = \chi \vec{H} \quad (12)$$

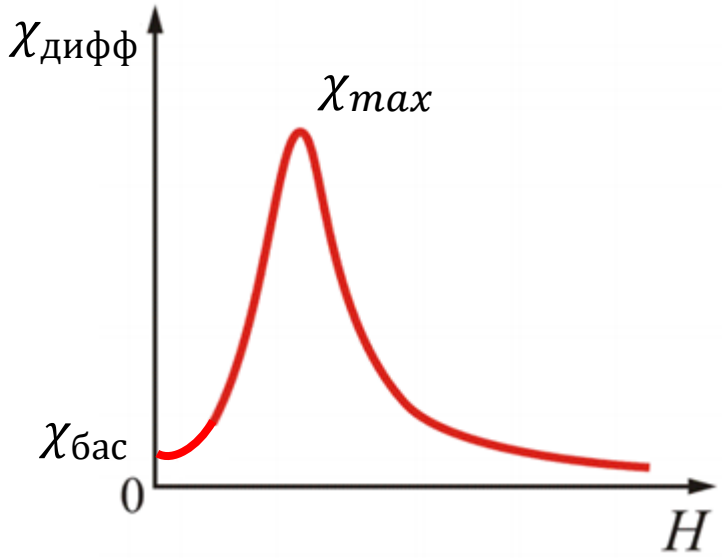
Парамагнетиктер үшін: $\vec{J} \uparrow\uparrow \vec{H}$ $(\chi > 0)$;

Диамагнетиктер үшін: $\vec{J} \uparrow\downarrow \vec{H}$ $(\chi < 0)$;

Ферромагнетиктер үшін: $\vec{J} \uparrow\uparrow \vec{H}$ $(\chi \gg 0)$.



11 сурет. Ферромагнетиктер үшін магниттелу қисығы



12 сурет. Столетов қисығы

χ – магниттік алғырлық

$\vec{H}$ және $\vec{B}$ векторлары арасындағы байланыс әлсіз магнетиктер үшін сызықты

$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} = \vec{H} \quad \Leftarrow \quad \vec{J} = \chi\vec{H} \quad (12)$$

$$\Downarrow$$

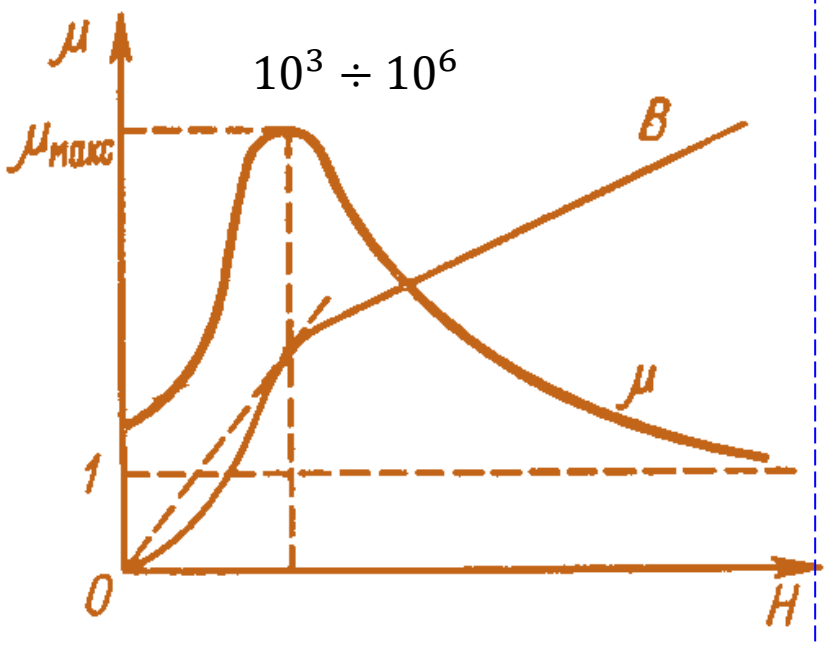
$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \chi\vec{H} = \vec{H}$$

$$\Downarrow$$

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

$$\Downarrow$$

$$\boxed{\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \quad (13)} \quad \Leftrightarrow$$



13 сурет. Ферромагнетиктер үшін магниттелу қисығы

Ферромагнетиктер үшін: ($\mu \gg 1$);

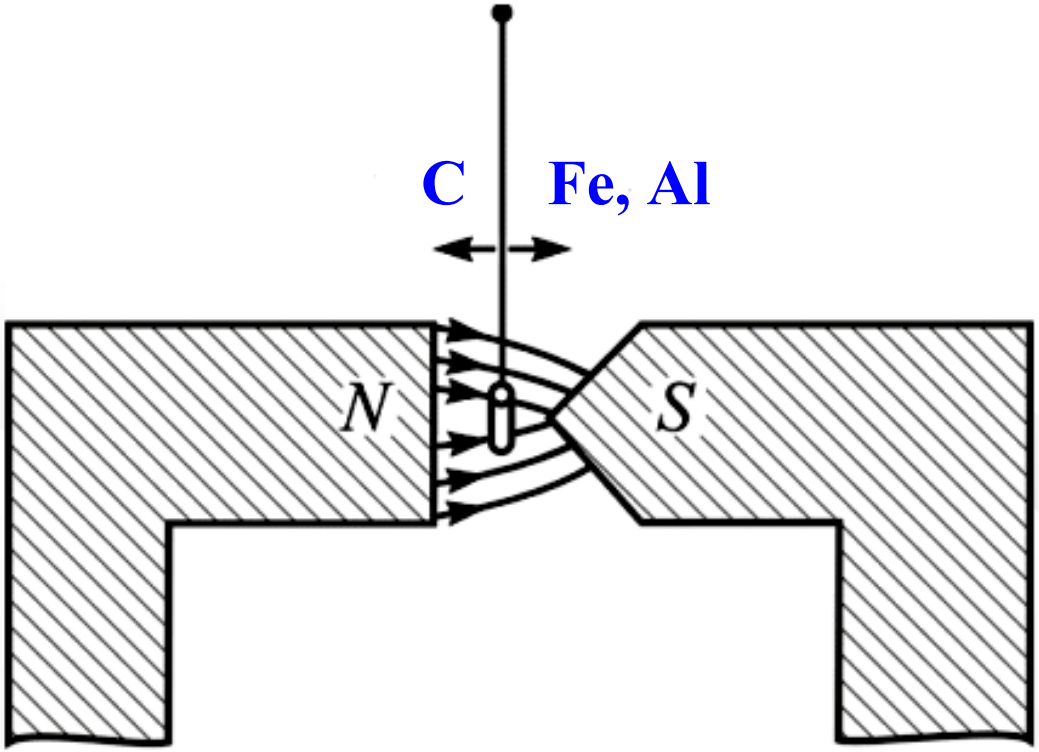
Парамагнетиктер үшін: ($\mu \gtrsim 1$);

Диамагнетиктер үшін: ($\mu \lesssim 1$).

μ – ортаның магниттік өтімділігі

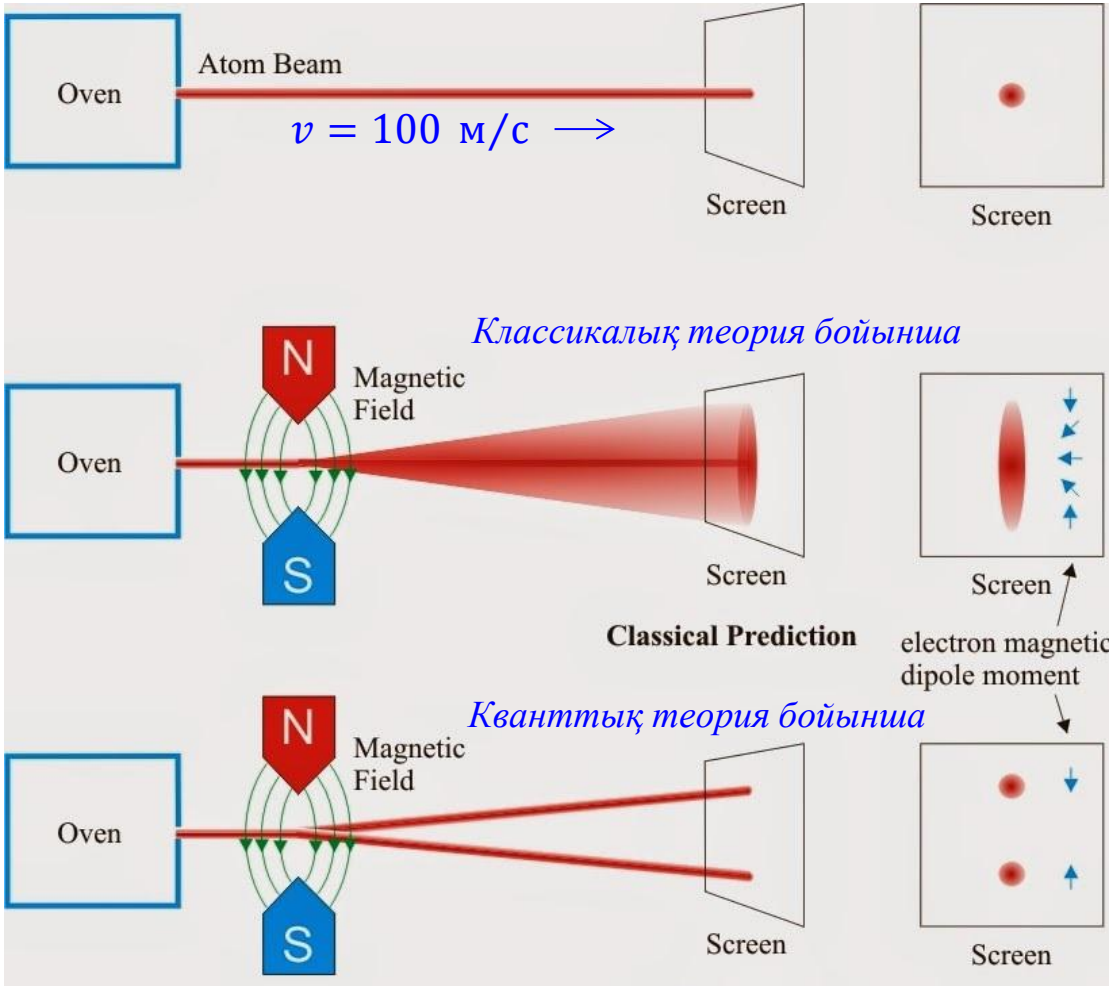
Саймон Монк. 2018. 163 бет.

Біркелкі емес магнит өрісіндегі заттар

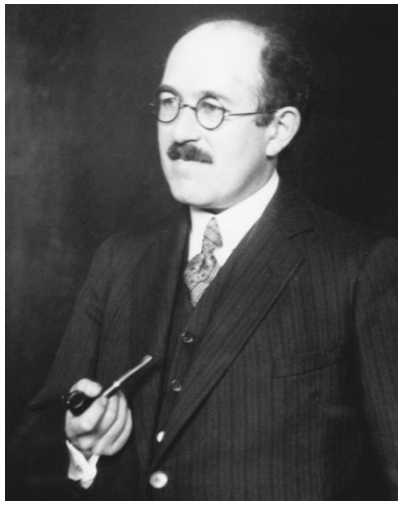


14 сурет.
Парамагнетиктер үшін: $\vec{J} \uparrow\uparrow \vec{H}$;
Диамагнетиктер үшін: $\vec{J} \uparrow\downarrow \vec{H}$;
Ферромагнетиктер үшін: $\vec{J} \uparrow\uparrow \vec{H}$

Штерн және Герлах тәжірибесі (1922)



15 сурет. Бұл тәжірибе атомдардың магниттік моментінің проекциясы квантталатынын дәлелдеді



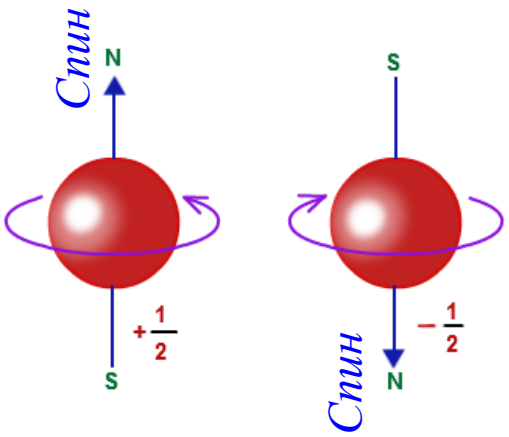
Отто Штерн (1888-1969)



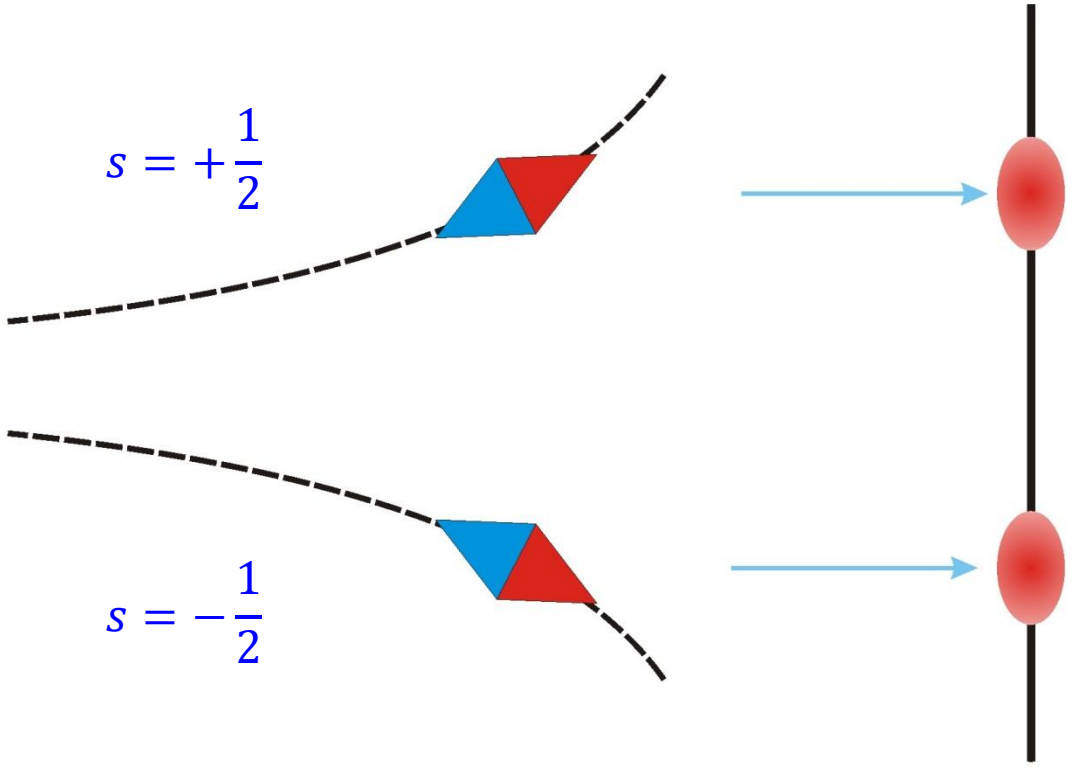
Ва́льтер Ге́рлах (1889-1979)

$\vec{L}_p$ – импульс моменті; $\vec{P}_m$ – магниттік момент

Сыртқы магнит өрісінде спин проекциясы тек екі мәнге ие: +1/2 және -1/2.



16 сурет



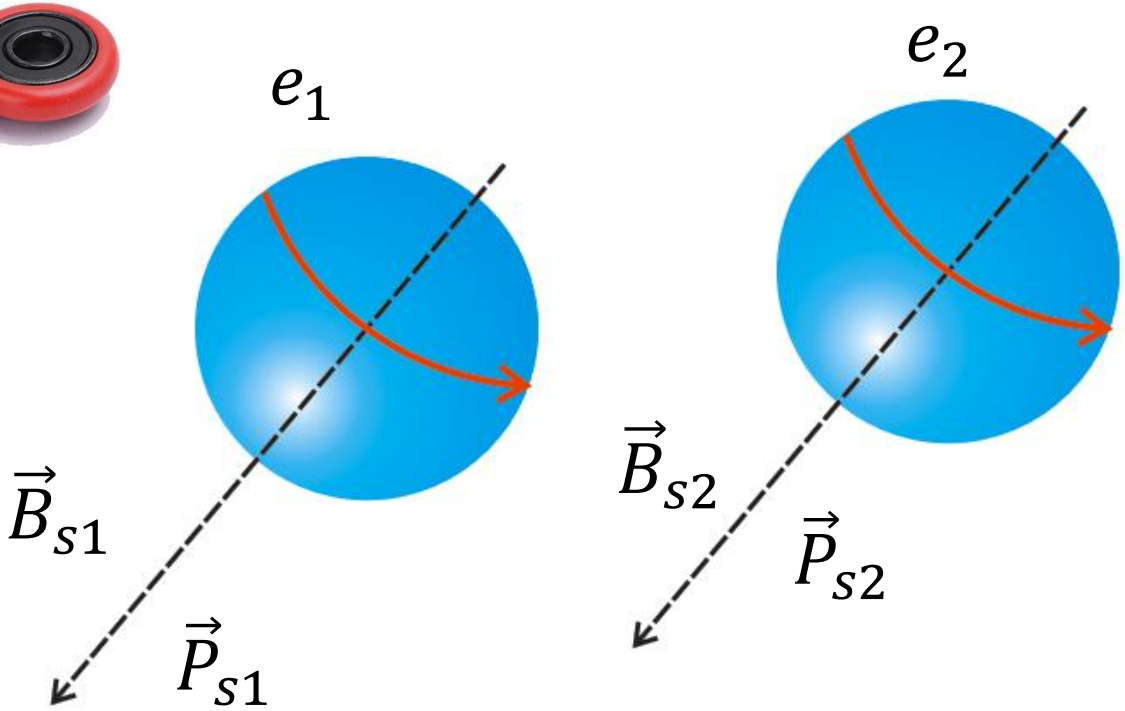
17 сурет

Жоғарыдағы эксперимент кезінде атомдық шоқтың тек екіге бөлінуі электронның спинінің болуымен байланысты болып шықты. Спин дегеніміз, заряд және масса сияқты электронның ажырамас қасиеті. Сыртқы магнит өрісінде спин проекциясы тек екі мәнге ие +1/2 және -1/2.

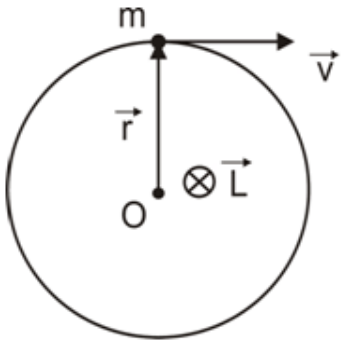
$\vec{L}_p$ – импульс моменті; $\vec{P}_m$ – магниттік момент

Электрондар спині $\left(\vec{L} = [\vec{r}m\vec{v}]\right)$





18 сурет

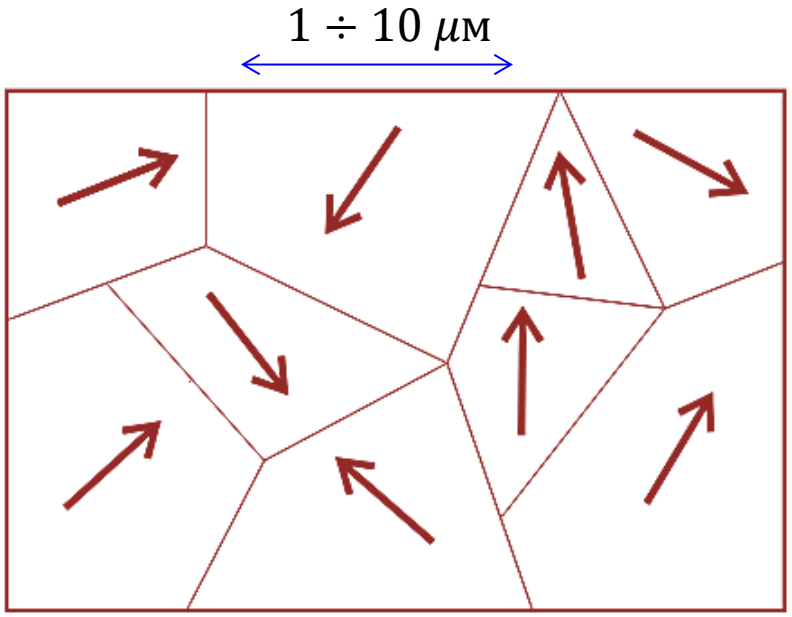


19 сурет

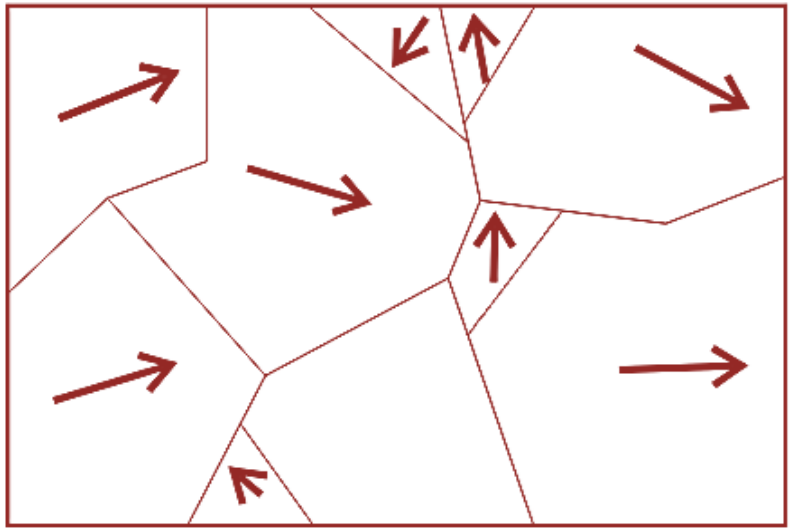
Өз өсін айнала қозғалып тұрған кез-келген денеде энергия қоры сақталады, осы энергия қорының шамасы «спинмен» сипатталады. Яғни электрон меншікті импульс моменті бар: $\vec{L} = [\vec{r}m\vec{v}]$. Осындай электрондар квантық орын алмасу заңына (күшіне) сай жұптасып, біріге алады, өйткені ол энергетикалық тұрғыдан тиімді, осылайша спиндік магниттік өрістері бағыттыс болатын топ құрылады.

$\vec{L}_p$ – импульс моменті; $\vec{P}_s$ – спиннің магниттік моменті

Магниттік домендер және олардың $\vec{B}_0$ әсерінен бағдарлануы



20а сурет. $\vec{B}_0 = 0$

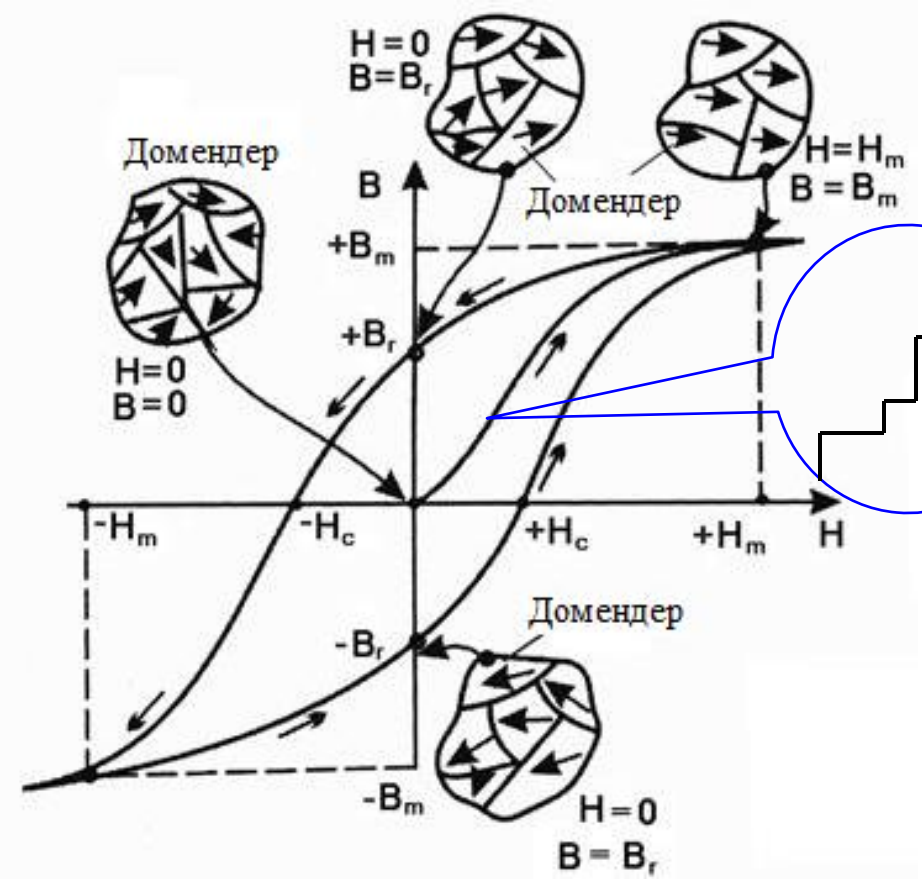


20ə сурет. $\vec{B}_0 \neq 0$

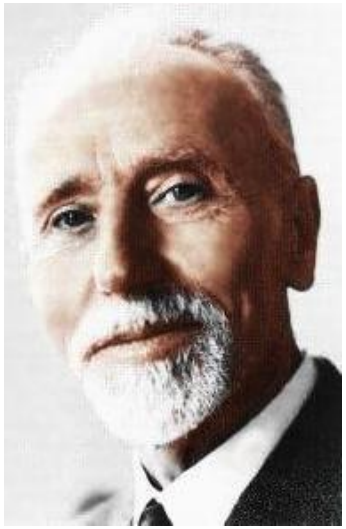
Домен дегеніміз, магниттік кристалдағы спонтанды біркелкі магниттелу векторы $(\vec{J})$ ретпен бағдарланған макроскопиялық аймақ. Оның орташа өлшемі $1 \div 10$ μм.

$\vec{B}_0$ – сыртқы магнит өрісі

Ферромагнетиктер үшін гистерезис қисығы



Баркгаузен эффектісі. 1919



Ге́нрих Гео́рг Баркга́узен (1881-1956)

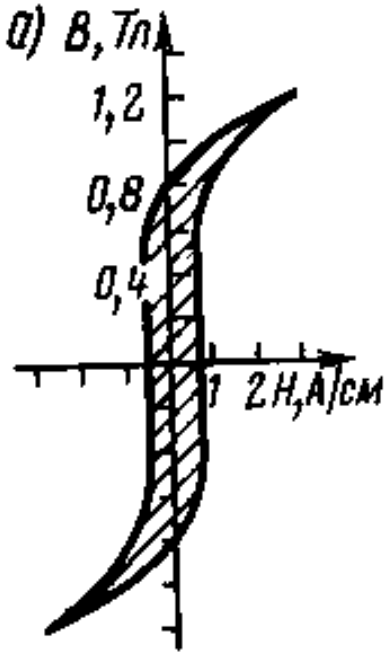
21 сурет

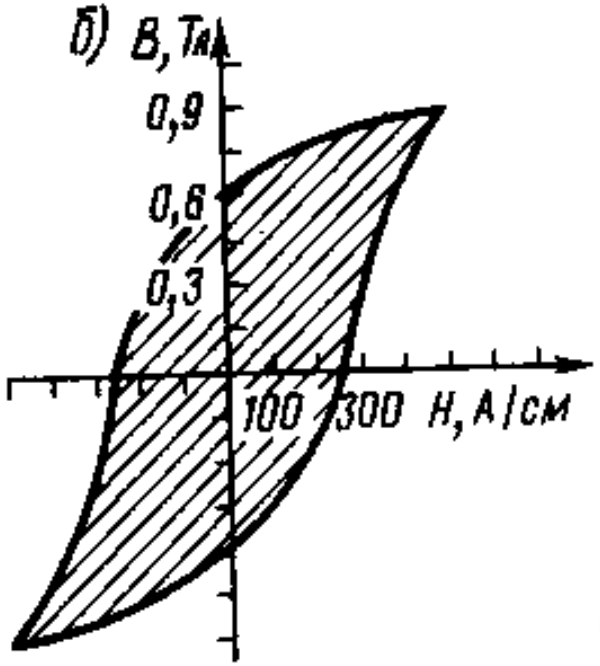
Қайта магниттелу кезіндегі жұмыс:

$$A_{\text{П}} = \frac{N_1 R_2 C k_x k_y}{2\pi r_T R_1 N_2 S_2} S_{\text{П}}$$

B_r – қалдық магнетизм; H_c – коэрцитивті күш

Ферромагнетиктер үшін гистерезис қисығы



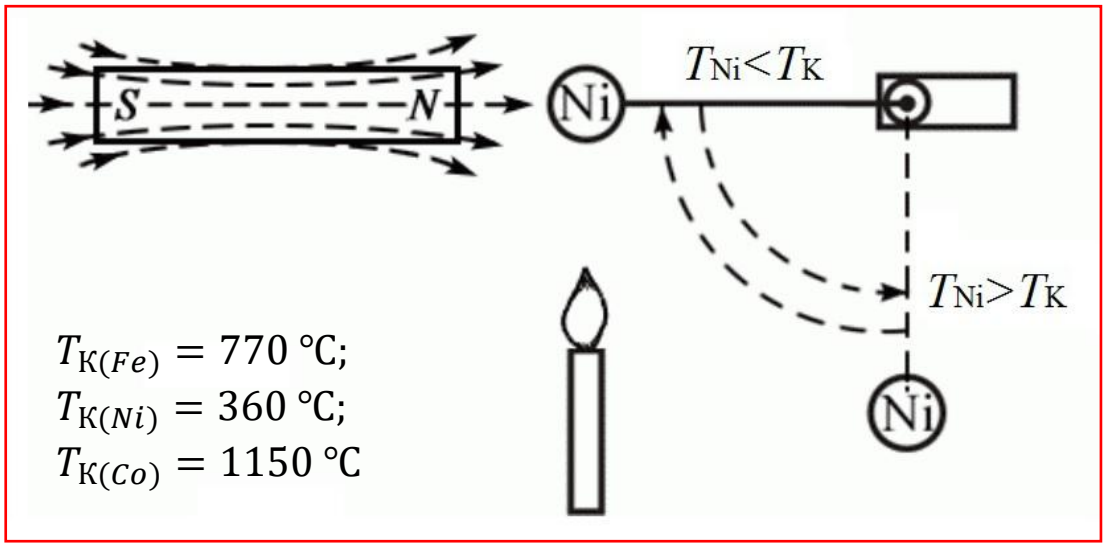


22а сурет. Магнитті-жұмсақ материалдар үшін. Электр магниттер

22ә сурет. Магнитті-қатаң материалдар үшін. Тұрақты магниттер

H – магнит өрісінің кернеулігі

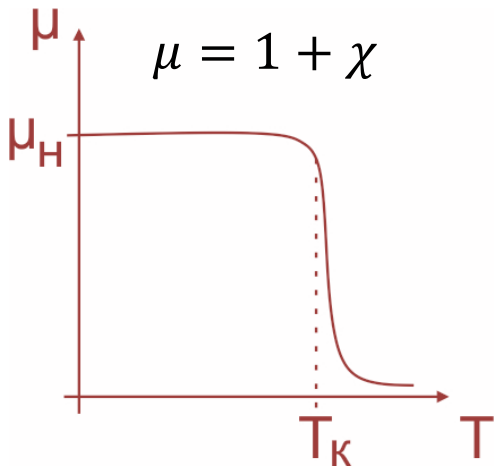
Ферромагнетиктер үшін Кюри температурасы



23 сурет



Пьер Кюри́ (1859-1906)



24 сурет

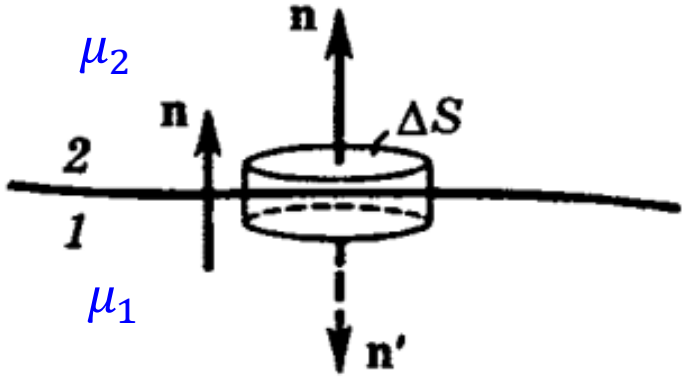
Кюри-Вейсс заңы: $\chi = \dfrac{C}{T - T_K}$

C – Кюри тұрақтысы (материал)

С.Г. Калашников. 2003. §110

$\vec{H}$ және $\vec{B}$ векторларының нормаль құраушылары үшін шекаралық шарттар

$\vec{B}$ векторының ағыны үшін Гаусс теоремасы: $\oint \vec{B}\, d\vec{S} = 0$



біртекті орталар шекарасы

$$B_{2n}\Delta S + B_{1n`}\Delta S = 0 \ (14)$$

$\vec{B}$ векторының проекцияларын n нормальға бағыттасақ: $B_{1n`} = -B_{1n}$ (15)

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \ (13)$$

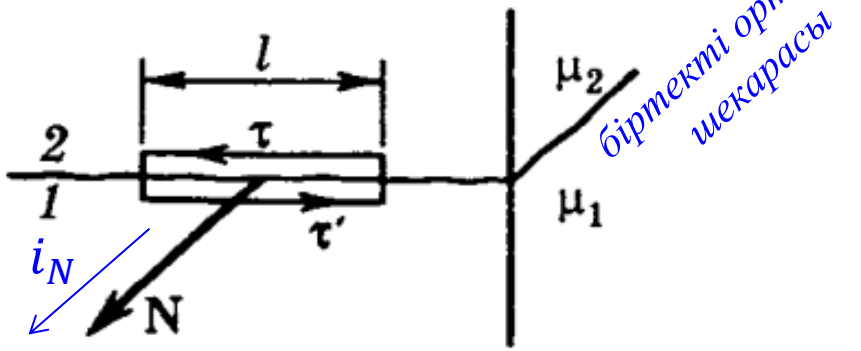
$$\mu_1\mu_0 H_{1n} = \mu_2\mu_0 H_{2n}$$

$$B_{2n} = B_{1n} \ (16)$$

$$\frac{H_{1n}}{H_{2n}} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \ (17)$$

$\vec{H}$ және $\vec{B}$ векторларының тангенциал құраушылары үшін шекаралық шарттар

$\vec{H}$ векторының құйындылығы үшін теорема: $\oint \vec{H}\, d\vec{l} = I$



$$H_{2\tau} l + H_{1\tau'} l = i_N \quad (18)$$

$\vec{H}$ векторының екі бағыттағы проекцияларын екінші ортадағы τ жанамасының орты бойынша алсақ:

$$H_{1\tau} = -H_{1\tau'} \quad (19) \qquad H_{2\tau} + H_{1\tau} = i_N \quad (20)$$

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H} \quad (13)$$

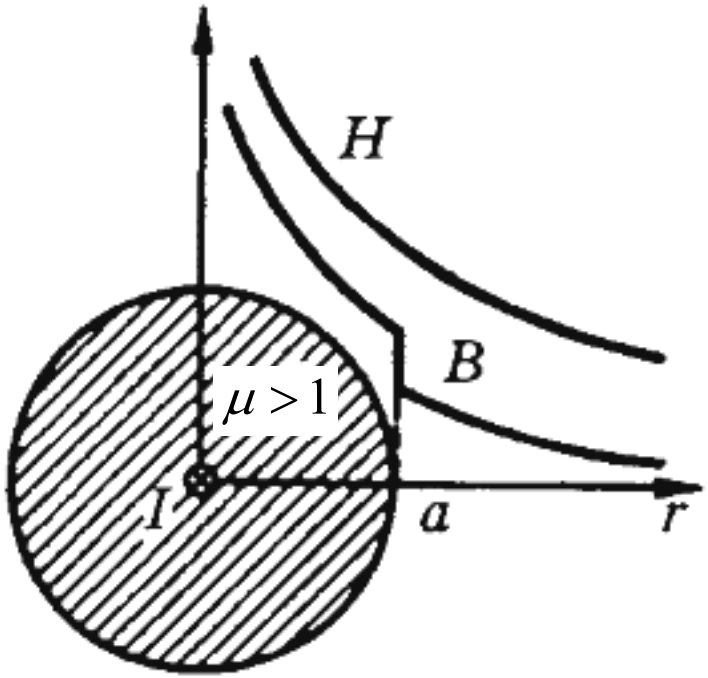
$$\frac{B_{1\tau}}{\mu_1\mu_0} = \frac{B_{2\tau}}{\mu_2\mu_0}$$

$$H_{2\tau} = H_{1\tau} \quad (21)$$

$$\frac{B_{1\tau}}{\mu_1} = \frac{B_{2\tau}}{\mu_2} \quad (22)$$

N – оң нормаль; i_N – токтың N нормальға проекциясы

Магнетик өсіндегі тұзу токтың өрісі



$$\oint \vec{B}\mathrm{d}\vec{l} = \mu_0\left(I + I^{`}\right) \quad (8) \qquad I^{`} = ?$$

$$\oint \vec{H}\mathrm{d}\vec{l} = I \quad (10)$$

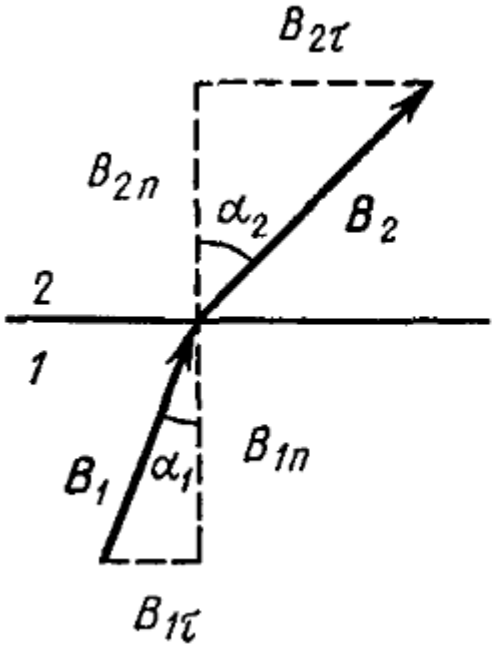
$$H2\pi r = I$$

$$H = \frac{I}{2\pi r}$$

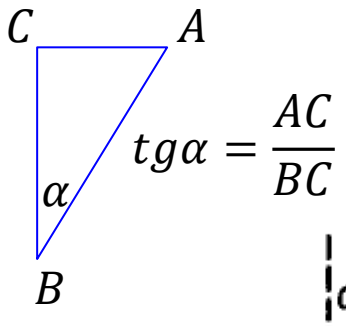
$$B = \mu\mu_0 H = \mu\mu_0 \frac{I}{2\pi r}$$

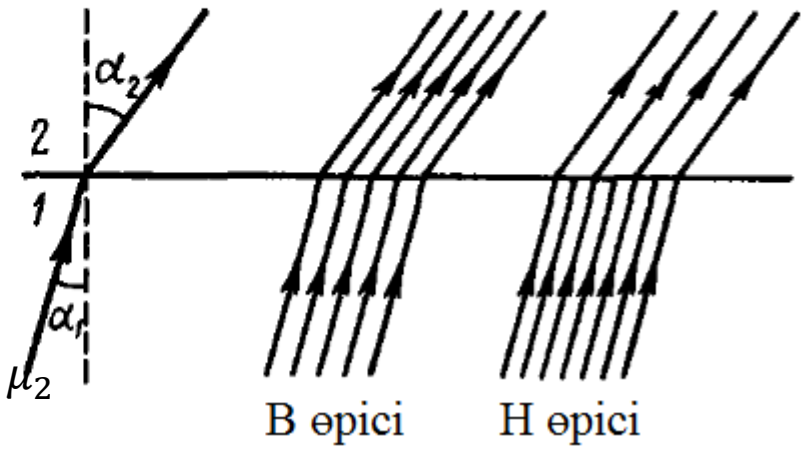
$I^{`}$ – макроскопиялық магниттелу тогы

Шекарадағы $\vec{B}$ векторы сызықтарының сынуы



25 сурет





26 сурет

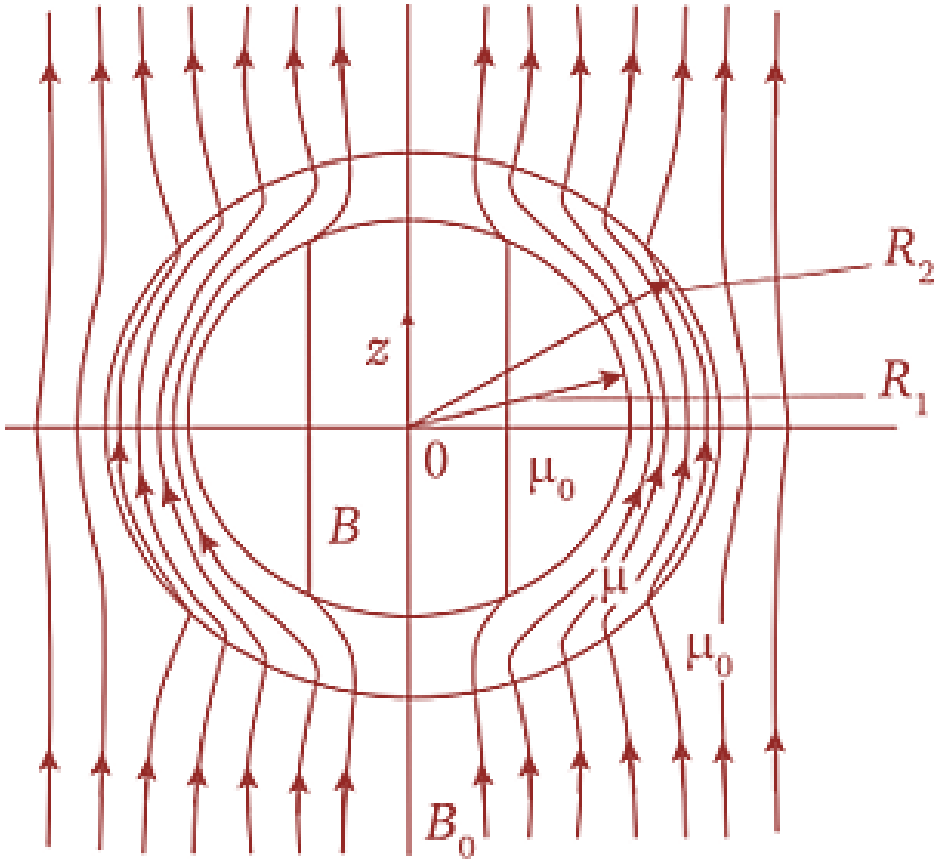
$$\frac{tg\alpha_2}{tg\alpha_1} = \frac{\frac{B_{2\tau}}{B_{2n}}}{\frac{B_{1\tau}}{B_{1n}}} \quad (23)$$

$$B_{2n} = B_{1n} \quad (16)$$

$$\frac{B_{1\tau}}{\mu_1} = \frac{B_{2\tau}}{\mu_2} \quad (22)$$

$$\frac{tg\alpha_2}{tg\alpha_1} = \frac{\mu_2}{\mu_1} \quad (24)$$

Магниттік экран (қорған)



$$B = B_0 \frac{1}{1 + \frac{2}{9}\left(1 - \frac{R_1^3}{R_2^3}\right)\left(\frac{\mu_0}{\mu} + \frac{\mu}{\mu_0} - 2\right)} \quad (25)$$

С.Г. Калашников. 2003. §108

Магниттік экран (қорған)



Аспаптың магнитті электрлік жүйесі экрандалған

