

Физика. Занятие №5, 07.10.2024

Рудяк А.С., СГУ им. Чернышевского
2 курс, «Программная инженерия»

Саратов, 2024

Содержание

Опыт Эрстеда и Эйхенвальда	2
Опыт Иоффе (1911)	2
Свойства магнитного поля	3
Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле	7
Силовые линии магнитного поля	7
Законы магнитного поля	8
Магнитное поле в веществе	11

Опыт Эрстеда и Эйхенвальда

В опыте Эрстеда стрелка стремится расположиться перпендикулярно проводнику с током.

В опыте Эйхенвальда обосновано взаимодействие конвекционного тока и движение магнитной стрелки

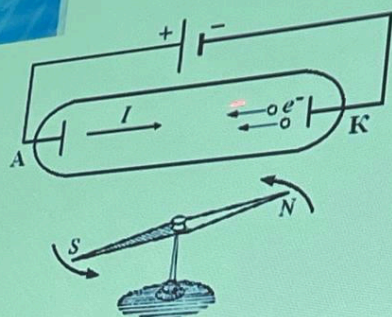


Опыт Иоффе (1911)

Взаимодействие движущихся заряженных частиц (электронов) и магнитной стрелки. Эксперименты показывают:

1. Движущиеся относительно системы отсчета заряды (токи) создают магнитное поле
2. Магнитное поле действует на движущиеся заряды, а на неподвижные не действует.

Опыт Иоффе (1911)



Взаимодействие движущихся заряженных частиц (электронов) и магнитной стрелки.

Эксперименты показывают.

- 1) Движущиеся относительно системы отсчета заряды (токи) создают магнитное поле.
- 2) Магнитное поле действует на движущиеся заряды, а на неподвижные не действует.

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

(Цитата) Под неподвижными зарядами мы подразумеваем не полностью неподвижные заряды (так как полностью неподвижных не существует), здесь подразумеваются неподвижные заряды в том плане, что у них не происходит ни магнитного, ни электрического смещения, то есть отсутствует работа по перемещению их в пространстве.

Свойства магнитного поля

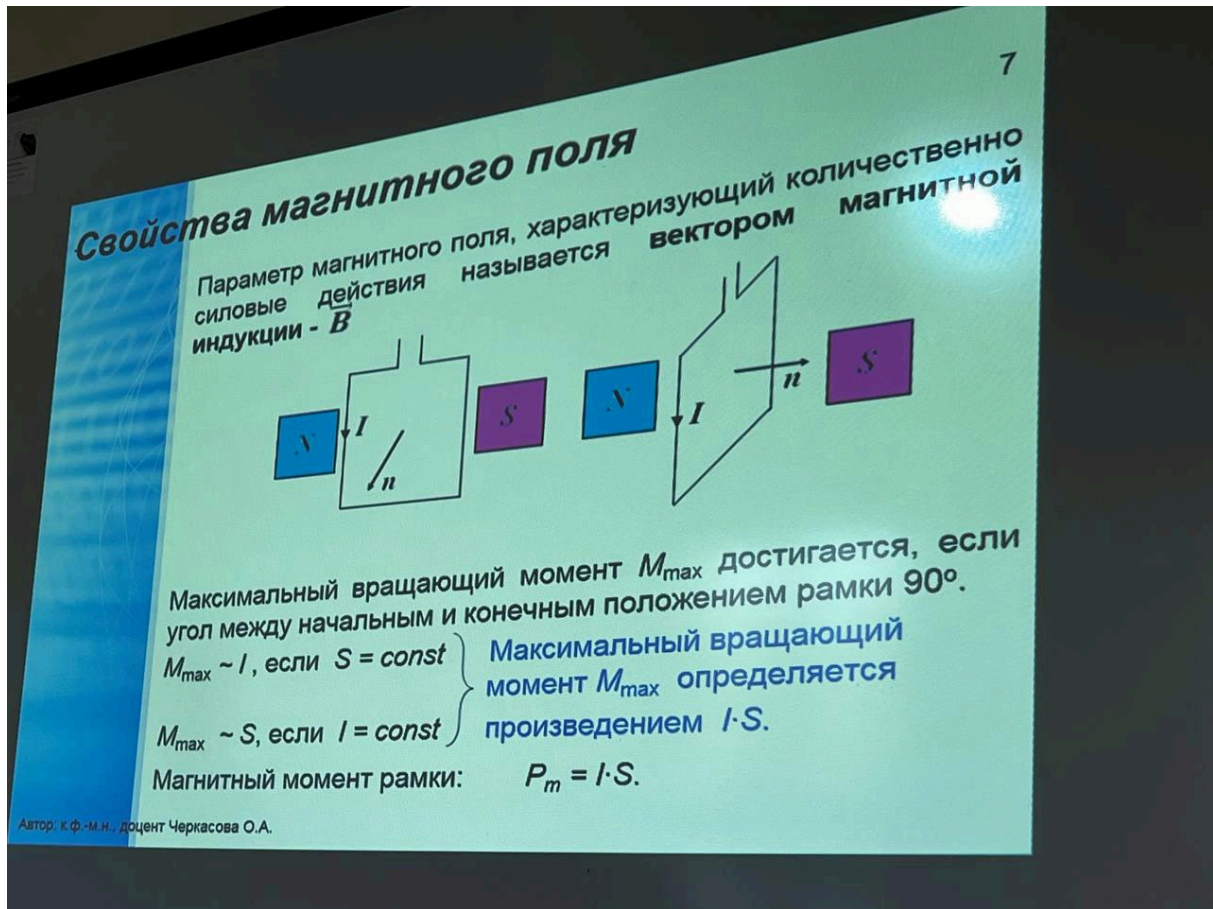
Классическая модель:

- Это особое состояние материи, способное полностью заполнять пространство и проникать в другие поля и вещества
- Магнитное поле действует ориентирующе на магнитную стрелку
- Магнитное поле действует ориентирующе на замкнутый ток (рамка, виток)
- Магнитное поле действует с некоторой силой на линейный ток
- Магнитное поле действует с некоторой силой на движущийся заряд

Динамическое свойство магнитного поля:

- Изменяющееся во времени магнитное поле создает электрическое поле

Параметр магнитного поля, характеризующий количественно силовые действия называется **вектором магнитной индукции** — \vec{B}



Максимальный вращающий момент M_{\max} достигается, если угол между начальным и конечным положением рамки 90° .

$$M_{\max} \sim I, \text{ если } S = \text{const} \quad (1)$$

$$M_{\max} \sim S, \text{ если } I = \text{const} \quad (2)$$

отсюда следует, что **Максимальный вращающий момент M_{\max} определяется произведением $I \cdot S$**

Магнитный момент рамки:

$$P_m = I \cdot S \quad (3)$$

Так как рамка характеризуется ориентацией в пространстве, то магнитный момент (величина, определяющая необходимую силу тока и разрешенное сечение) — величина векторная:

$$\vec{P}_m = P_m \vec{n} = IS \vec{n} \quad (4)$$

Для любой точки пространства отношение M_{\max} и P_m величина постоянная.

$$\frac{M_{\max}}{P_m} = \frac{M_{\max}}{IS} = B \quad (5)$$

Данную величину можно вывести из закона Ампера и закона Лоуренса

Сила Ампера:

При перемещении проводника под действием F_a на расстояние dx совершается работа:

$$dA = F_A dx = IB l dx = IB dS = Id\Phi \quad (6)$$

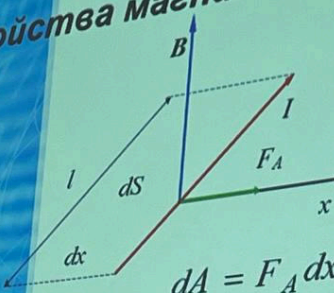
$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}$ — магнитный поток сквозь поверхность dS , которую прочерчивает проводник при своем движении.

Если $I = \text{const}$: $A = I \Delta\Phi$

Если $B = \text{const}$: $A = \int_S Id\Phi$

9

Свойства магнитного поля



Сила Ампера:

При перемещении проводника под действием F_A на расстояние dx совершается работа:

$$dA = F_A dx = IB \underbrace{l dx}_{dS} = I \underbrace{B dS}_{d\Phi} = Id\Phi.$$

$\Phi = \int_S \vec{B} d\vec{S}$ — магнитный поток сквозь поверхность dS , которую прочерчивает проводник при своем движении.

Если $I = \text{const}$:
 $A = I \cdot \Delta\Phi.$

Если $B = \text{const}$:
 $A = \int_S Id\Phi.$

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Закон Ампера в векторной форме:

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}] \rightarrow B = \frac{dF}{Idl} \quad (7)$$

$\alpha = 0$, то $dF = 0$, $\alpha = \frac{\pi}{2}$, то $dF = \max$

Магнитное поле не действует на ток, текущий вдоль силовой линии индукции

На одну заряженную частицу в элементе тока Idl действует сила Лоренца:

$$F_{\text{л}} = \frac{dF}{dN} \quad (8)$$

Магнитное поле...
силовой линии индукции.

На одну заряженную частицу в элементе тока Idl действует сила Лоренца:

$$F_{\text{л}} = \frac{dF}{dN},$$

$$\left. \begin{aligned} dN &= ndV = nSdl. \\ I &= jS \\ j &= qnv \\ \vec{v} &\uparrow\uparrow d\vec{l} \end{aligned} \right\} dF = [qn \vec{v} Sdl, \vec{B}] = q n \underbrace{Sdl}_{\substack{dV \\ dN}} [\vec{v}, \vec{B}]$$

ент Черкасова О.А.

$$F_{\text{л}} = |q|vB \sin(\alpha) \quad (9)$$

$\vec{F}_{\text{л}} \perp \vec{v} \Rightarrow$ Сила Лоренца не может совершить работу над зарядом, она может лишь изменить направление вектора его скорости.

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}] \quad (10)$$

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

12

Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле

✓ $\alpha = 0^\circ$.
Траектория движения – прямая линия.

✓ $\alpha = 90^\circ$.

$$F_{\text{Л}} = qvB = ma_{\text{ц}} = \frac{mv^2}{R} \Rightarrow$$

$$\Rightarrow qB = \frac{mv}{R}; \quad v = \frac{qBR}{m}.$$

$$T = 2\pi \left| \frac{m}{q} \right| \cdot \frac{1}{B}$$

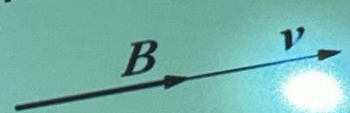
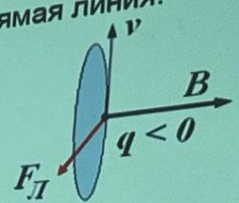
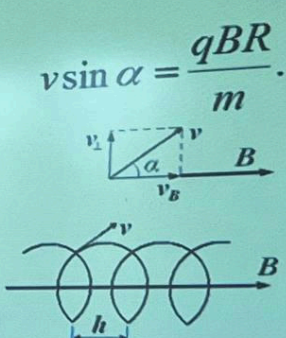
Траектория движения – окружность

✓ $0^\circ < \alpha < 90^\circ$

$$F_{\text{Л}} = qv_{\perp}B = \frac{mv_{\perp}^2}{R} \Rightarrow qB = \frac{mv \sin \alpha}{R}; \quad v \sin \alpha = \frac{qBR}{m}.$$

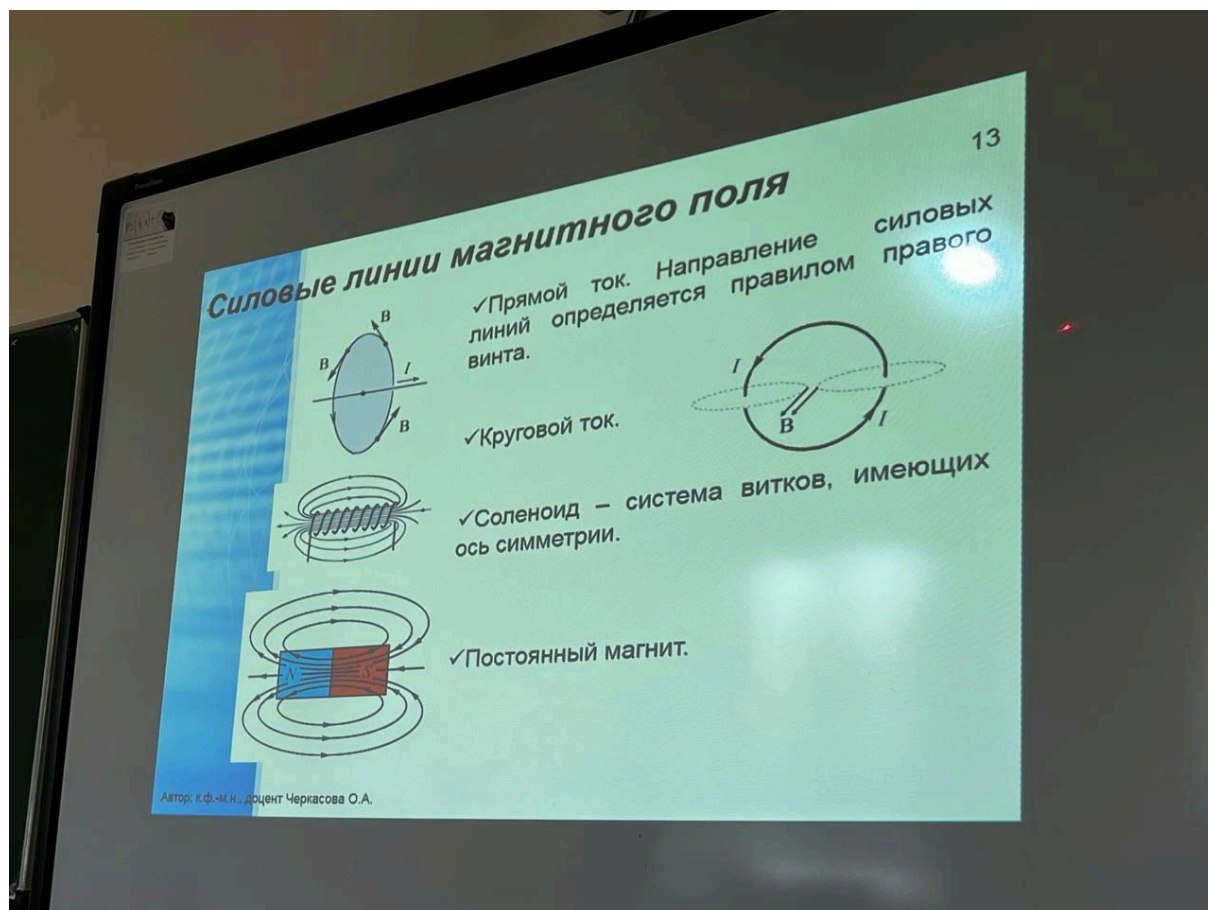
$$T = \frac{2\pi R}{v \sin \alpha} = \frac{2\pi R \cdot m}{qBR} = 2\pi \left| \frac{m}{q} \right| \frac{1}{B}.$$

$$h = v_B T = \frac{2\pi}{B} \left| \frac{m}{q} \right| v \cos \alpha.$$

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

Силовые линии магнитного поля



- Прямой ток. Направление силовых линий определяется правилом правого винта.
- Круговой ток
- Соленоид — система витков, имеющих ось симметрии.
- Постоянный магнит.

Законы магнитного поля

1. Закон Гаусса Силовые линии магнитного поля замкнуты. По теореме О.-Г:

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = \int_V \text{div} \vec{B} dV \quad (11)$$

$$\text{div} \vec{B} = 0 \quad (12)$$

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0 \quad (13)$$

2. Закон Био-Савара-Лапласа Био и Савар экспериментально определили, что индукция зависит от:

1. тока I , протекающего по проводнику,
2. формы и размера проводника,
3. положения точки относительно проводника,
4. состояния окружающей среды (магнитной проницаемости)

Лаплас учел векторный характер магнитного поля и предположил, что

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i = \int_l d\vec{B}_i \quad (14)$$

$$d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3} \quad (15)$$

, где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Гн / м, Н/А²] — магнитная постоянная

Отношение магнитной индукции в среде $B_{\text{среда}}$ к магнитной индукции в вакууме B_0 называется **относительной магнитной проницаемостью среды**:

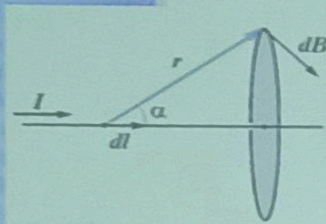
$$\mu = \frac{B_{\text{среда}}}{B_0} \quad (16)$$

Если $\mu < 1$, то среда — диамагнетик Если $\mu > 1$ — парамагнетик Если $\mu \gg 1$ — ферромагнетик

Законы магнитного поля

15

2. Закон Био-Савара-Лапласа



Лаплас учел векторный характер магнитного поля и предположил, что

$$\vec{B} = \sum_{i=1}^n \vec{B}_i = \int_l d\vec{B}_i \quad d\vec{B} = \frac{\mu\mu_0 I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3},$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ [Гн / м; Н/А²] – магнитная постоянная

Отношение магнитной индукции в среде $B_{\text{среда}}$ к магнитной индукции в вакууме B_0 называется **относительной магнитной проницаемостью среды**:

$$\mu = \frac{B_{\text{среда}}}{B_0}$$

Если $\mu < 1$, то среда – диамагнетик,
 $\mu > 1$ – парамагнетик,
 $\mu \gg 1$ – ферромагнетик.

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

H – вектор напряженности магнитного поля, измеряемая в СИ [А / м]

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H} \quad (17)$$

$$d\vec{H} = \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3} \quad (18)$$

– закон Био-Савара-Лапласа для H.

3. Эффект Холла Через золотую пластину пропусклся ток I, перпендикулярно было направлено магнитное поле индукцией B. Между верхними гранями возникала разность потенциалов $\Delta\varphi$, величина которой была пропорциональна I, B и обратно пропорциональна ширине пластины b.

Законы магнитного поля

16

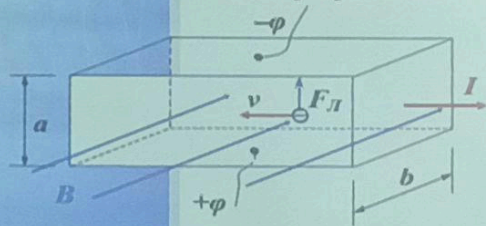
2. Закон Био-Савара-Лапласа

H – вектор напряженности магнитного поля, измеряемая в СИ [А / м]

$$\vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}$$

$$d\vec{H} = \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{4\pi r^3} \quad \text{Закон Био – Савара – Лапласа для } H$$

3. Эффект Холла



Через золотую пластину пропусклся ток I ; перпендикулярно было направлено магнитное поле индукцией B ; между верхними гранями возникала разность потенциалов $\Delta\varphi$, величина которой была пропорциональна I , B и обратно пропорциональна ширине пластины b .

Если $B = 0$, то $\Delta\varphi = 0$.

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

В металле или полупроводнике с током, помещенном в магнитное поле, перпендикулярное к вектору плотности тока j , возникает поперечное электрическое поле и разность потенциалов $\Delta\varphi$. Причина – сила Лоренца.

$$F_{\perp} = q\nu B = qE \Rightarrow E = \nu B \quad (19)$$

$$\Delta\varphi = E\alpha \quad (20)$$

$$I = jS = qn\nu\alpha b \Rightarrow \nu = \frac{I}{qn\alpha b} \quad (21)$$

$$\Delta\varphi = \frac{IB}{qn\alpha} = \frac{1}{qn} \cdot \frac{IB}{b} \quad (22)$$

$$\Delta\varphi = R_H \frac{IB}{b} \quad (23)$$

$R_H < 0$, проводимость n – типа (электронный полупроводник)

$R_H > 0$, проводимость p – типа (дырочный полупроводник)

Магнитное поле в веществе

Дополнения к физической модели:

- Магнитные свойства вещества зависят от магнитных свойств его атомов и молекул
- Орбитальное вращение электронов можно рассматривать как замкнутый ток

1. Круговой ток обладает орбитальным магнитным моментом

$$I = \frac{q}{t} = \frac{e}{T} = ef \quad (24)$$

, f — частота вращения электрона по орбите.

Магнитное поле в веществе 18

Дополнения к физической модели:

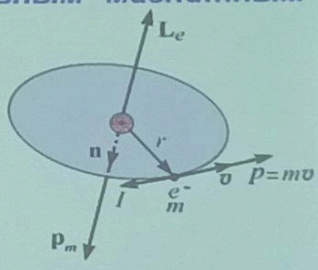
- ✓ магнитные свойства вещества зависят от магнитных свойств его атомов и молекул;
- ✓ орбитальное вращение электронов можно рассматривать как замкнутый ток

1. Круговой ток обладает **орбитальным магнитным моментом**

$$I = \frac{q}{t} = \frac{e}{T} = ef,$$

f - частота вращения электрона по орбите.

$$\vec{p}_m = IS\vec{n} = ef\vec{S},$$

$$\vec{p}_m \uparrow\uparrow \vec{n}.$$


S — площадь орбиты,
 \vec{n} — нормаль к S (направление определяется правилом правого винта).

Автор: к.ф.-м.н., доцент Черкасова О.А.

$$\vec{p}_m = IS\vec{n} = ef\vec{S} \quad (25)$$

$$\vec{p}_m \uparrow\uparrow \vec{n} \quad (26)$$

, S — площадь орбиты. \vec{n} — нормаль к S (направление определяется правилом правого винта).

2. Обладает орбитальным механическим моментом импульса

$$L_e = m\nu r = pr = \left(\begin{array}{l} \nu = \frac{2\pi r}{T} = 2\pi r f \\ S = \pi r^2 \end{array} \right) = 2mfS \quad (27)$$

$$\vec{L}_e = [\vec{r}, \vec{p}] \Rightarrow \vec{p}_m \uparrow\downarrow \vec{L}_e \quad (28)$$

$$\bar{p}_m = -\frac{e}{2m}\bar{L}_e \quad (29)$$

— гиромагнитное отношение орбитальных моментов

3. В квантовой механике показано, что кроме орбитальных моментов p_m, L_e электрон обладает собственным механическим моментом импульса L_{es} , называемым спином.
4. Спину электрона соответствует спиновый (собственный) магнитный момент:

$$\bar{p}_{ms} = \pm \frac{1}{2}h \rightarrow \bar{p}_{ms} \uparrow \downarrow \bar{L}_{es} \quad (30)$$