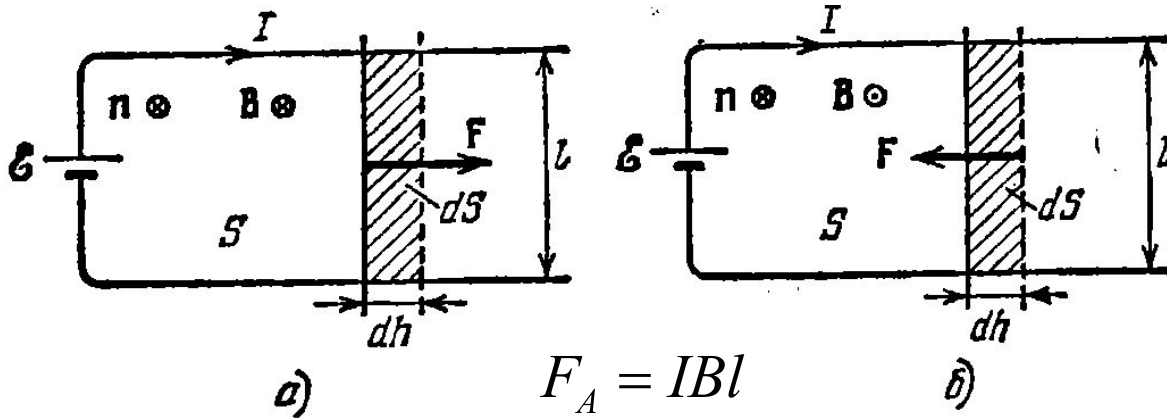


1. Протокол. Листочек с номерами вопросов и задач.
2. Графики – миллиметровка.
3. Выводы – у каждого свои.
4. Не Вы выбираете работу, а она Вас!
5. К аттестации (~02.11):
Сделать 4 работы, Сдать 3 работы

Работа по перемещению тока в МП



Контур с током образован неподвижными проводами и скользящей по ним перемычкой длины l .

\mathbf{B} однородно и перпендикулярно плоскости тока.

$$F_A = IBl$$

Перемещение перемычки вправо на

$$dh \quad dA = F_A dh = IBldh = IBdS$$

$$\Phi = \int \mathbf{Bn}dS = BS$$

n - положительная нормаль

Б)

$$dA = -F_A dh = -IBldh = -IBdS$$

$$\Phi = \int \mathbf{Bn}dS = -BS$$

При перемещении перемычки поток получает положительное приращение dS , т.о.

$$d\Phi = Id$$

При перемещении перемычки поток получает отрицательное приращение dS , т.о.

$$d\Phi = -IBndS$$

$$\Phi = \int IdA = I \int d = (\Phi_2 - \Phi_1)$$

Магнитное поле в веществе

Намагничивание магнетика

Всякое вещество способно под действием внешнего магнитного поля приобретать магнитный момент, т.е. намагничиваться. Эти вещества называют **МАГНЕТИКОМ**. Такое вещество создает свое магнитное поле \mathbf{B}' , которое накладывается на внешнее \mathbf{B}_0 :

$$\mathbf{B} = \mathbf{B}_0 + \mathbf{B}'$$

B – магнитная индукция.

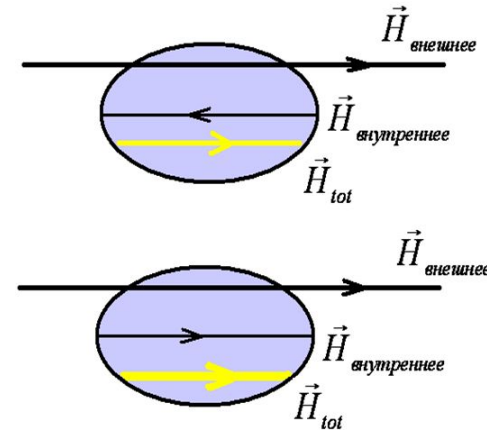
$$B \sim H, \quad B = \mu\mu_0 H$$

Причина намагничивания тел (предположение Ампера)

Существование молекулярных токов (циркуляция круговых токов в молекулах вещества) наличие у каждого тока магнитного момента, создающего свое МП.

Без внешнего МП: молекулярные токи ориентированы произвольно, общее суммарное поле = 0.

При наличии внешнего поля: моменты молекул направленно ориентируются в пространстве, суммарный магнитный момент не равен 0.



Намагниченность

Таким образом, вещество, помещенное во внешнее магнитное поле, приобретает дополнительный магнитный момент – **намагничивается**.

Количественная характеристика намагниченного состояния вещества – **намагниченность**, магнитный момент единицы объема вещества:

$$J = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n P_{mi}$$

Где P_{mi} – магнитный момент i -го атома из числа n атомов, содержащихся в объеме ΔV .

Намагниченность изотропной среды пропорциональна **напряженности** внешнего магнитного поля:

$$J = \chi H$$

χ – **магнитная восприимчивость среды** – характеризует магнитные свойства вещества.

Безразмерная величина $\mu = 1 + \chi$ – относительная магнитная проницаемость среды или просто магнитная проницаемость

МАГНЕТИКИ

ДИАМАГНЕТИКИ

вещества, намагничивающиеся против направления внешнего МП. В отсутствие внешнего МП диамагнетики немагнитны.
 $|\chi_M| \sim 10^{-11} \text{ м}^3/\text{моль}$

ПАРАМАГНЕТИКИ

вещества, которые намагничиваются в направлении внешнего магнитного поля. Относятся к слабомагнитным веществам.
 $|\chi_M| \sim 10^{-10} \text{ м}^3/\text{моль}$

ФЕРРОМАГНЕТИКИ

Сильномагнитные вещества.
 $|\chi_M| \sim 1 \text{ м}^3/\text{моль}$

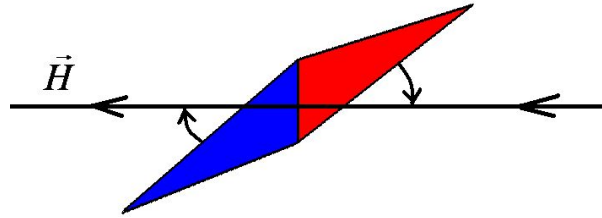


Магнитный момент

Силовое действие внешнего магнитного поля на магнит тем больше, чем выше напряженность магнитного поля H .

Однако сила, с которой действует магнитное поле на различные магниты, помещенные поочередно в одну и ту же точку поля, оказывается различной – она зависит от магнитных качеств самого магнита. Магнитные качества магнита (или магнетика) определяет **магнитный момент** (или магнитный дипольный момент). $p_m = ISn$

Поведение магнитной стрелки в магнитном поле:



Стрелка ориентируется вдоль поля и занимает устойчивое положение равновесия – потенциальная энергия минимальна.

За единицу магнитного момента принимают **магнитный момент ($Aм^2$)** такого магнита, для поворота оси которого на 90° от направления поля напряженностью в 1 эрстед ($79,5 A/m$) требуется затратить работу, равную одному эргу (10^{-7} Дж).

Орбитальный ток

Электрон, движущийся по орбите в атоме эквивалентен замкнутому контуру с **орбитальным током**:

$$I = \frac{e}{t},$$

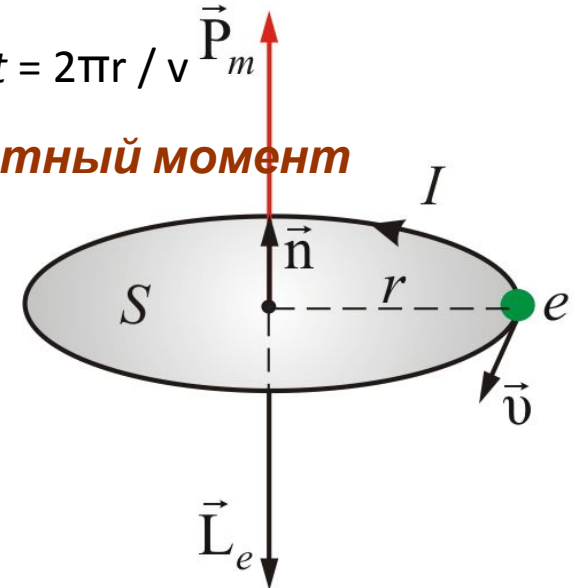
где e – заряд электрона, время его вращения по орбите: $t = 2\pi r / v$

Орбитальному току соответствует **орбитальный магнитный момент электрона**

$$p_m = IS = \frac{e\pi r^2 v}{2\pi r} = \frac{evr}{2}$$

S – площадь орбиты

v – скорость электрона



Электрон, движущийся по орбите имеет **орбитальный момент импульса** mvr который имеет противоположное направление по отношению к P_m .

Отношение магнитного момента к механическому (моменту импульса) – называется **гиромагнитным отношением**:

$$\frac{p_m}{L_e} = \gamma = -\frac{e}{2m}$$

Магнитомеханические явления

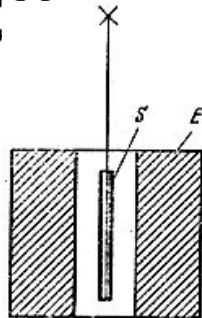
1. Намагничивание магнетика приводит к его вращению

Экспериментально подтвердили Эйнштейн и де Хаас

При намагничивании стержня из магнетика, магнитные моменты е устанавливаются по полю, а механические против него. Возникает суммарный механический момент электронов $\sum M_i$.

Момент импульса системы «стержень-электроны» должен остаться постоянным. Возникает момент импульса стержня $-\sum$ он приходит во вращение!

$$\gamma = -\frac{e}{m}$$



2. Вращение магнетика приводит к его намагничению

Экспериментально подтвердил Барнетт

Приводил железный стержень в очень быстрое вращение вокруг оси и измерял возникающее при этом намагничение.

$$\gamma = -\frac{e}{m}$$

У е существует собственный механический (спин) и магнитный (спиновый) момент!!! – это неотъемлемые свойства е!!!

$$\hbar = \frac{h}{2\pi} \quad M_{se} = \frac{\hbar}{2} \quad p_{\text{вн}e} = -\frac{e\hbar}{2m} = -\mu$$

Электрон в магнитном поле. Диамagnetизм

В магнитном поле с индукцией \vec{B} на электрон, движущийся по орбите, эквивалентной замкнутому контуру с током, действует момент сил:

$$\mathbf{M} = [\mathbf{p}_m \mathbf{B}]$$

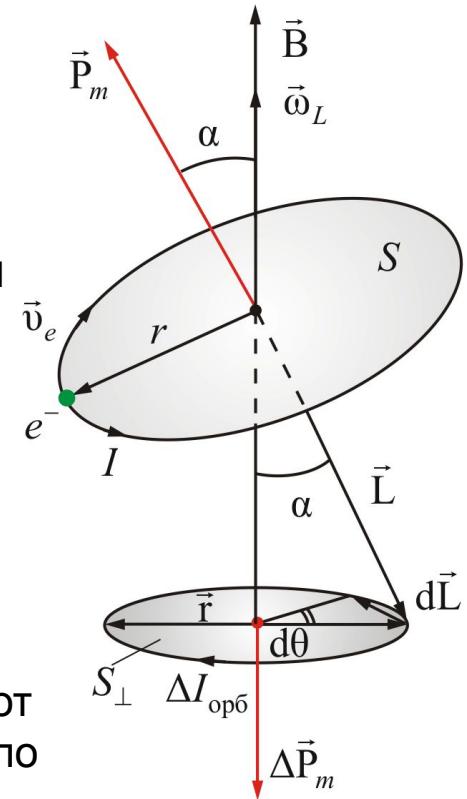
Этот момент сил стремится установить орбитальный магнитный момент электрона по направлению поля. При этом механический момент импульса направлен против поля.

Под действием момента \vec{M} векторы \vec{p}_m и \vec{L} совершают прецессию вокруг направления вектора магнитной индукции.

Это Ларморовская прецессия:

$$\vec{\omega}_L = \frac{e}{2m} \vec{B}$$

Угловая скорость прецессии зависит только от индукции магнитного поля и совпадает с ней по направлению.



Теорема Лармора. Для отдельной частицы или множества частиц справедлива теорема: если на систему частиц, обладающих одинаковым отношением электрического заряда к массе, наложить постоянное магнитное поле \vec{B} , то магнитные моменты этих частиц $\vec{P}_{\text{магн}}$ будут прецессировать относительно поля \vec{B} с частотой

Дополнительный орбитальный ток.

Прецессия орбиты электрона в атоме приводит к появлению дополнительного орбитального тока, направленного противоположно току I

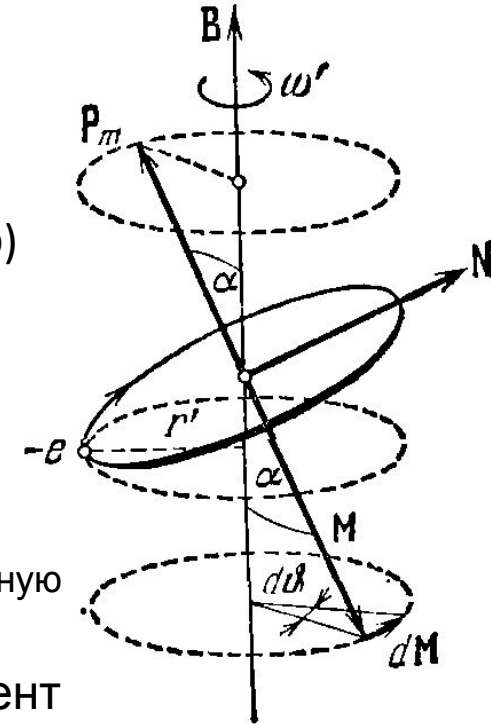
$$\Delta I_{орб} = e \frac{\omega_L}{2\pi}$$

и соответствующего ему наведенного (индуцированного) орбитального магнитного момента ΔP_m

$$\Delta P_{орб} = -\Delta I S_{\perp} = -\frac{e^2 S_{\perp}}{4\pi m} B$$

где S_{\perp} – площадь проекции орбиты электрона на плоскость, перпендикулярную вектору.

Знак минус говорит, что наведенный магнитный момент противоположен вектору магнитной индукции.



1. Под действием внешнего МП происходит прецессия электронных орбит с ларморовской частотой.
2. В следствии прецессии возникает наведенный орбитальный момент.
3. Если у атомов есть собственный магнитный момент, внешнее магнитное поле еще и ориентирует их по направлению поля, при этом возникающий положительный момент (по полю) может быть больше наведенного и магнетик ведет себя как парамагнетик.

Диамagnetизм (есть во всех магнетиках)

Диамagnetизм (от греч. *dia* – расхождение) – свойство веществ намагничиваться против приложенного магнитного поля.

Диамagnetиками называются вещества, магнитные моменты атомов которых в отсутствии внешнего поля равны нулю, т.к. магнитные моменты всех электронов атома взаимно скомпенсированы (например инертные газы, водород, азот, NaCl, Bi, Cu, Ag, Au и др.).

При внесении диамagnetического вещества в магнитное поле его атомы приобретают наведенные магнитные моменты ΔP_m **направленные противоположно вектору** .

Вектор магнитной индукции собственного магнитного поля , создаваемого диамagnetиком при его намагничивании во внешнем поле , **направлен в сторону** $\vec{B}_{внеш}$ **противоположную** $\vec{B}_{внутр}$. Поэтому

$|\chi_M| \sim 10^{-11}$ м³/моль – магнитная восприимчивость среды.

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \approx 1$$

– магнитная проницаемость диамagnetика.

Парамагнетизм

Парамагнетизм (от греч. *para* – возле) – свойство веществ во внешнем магнитном поле намагничиваться в направлении этого поля.

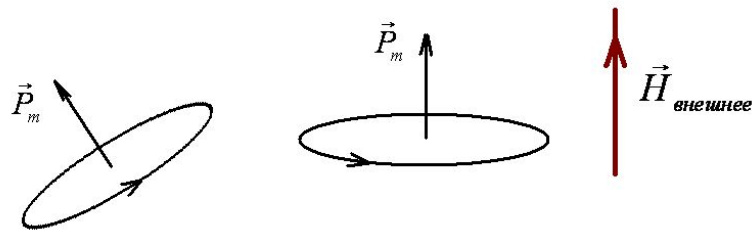
Внутри парамагнетика к действию внешнего поля прибавляется действие наведенного внутреннего поля.

Парамагнетиками - вещества, атомы которых имеют в отсутствие внешнего магнитного поля, отличный от нуля магнитный момент \vec{p}_m .

Эти вещества намагничиваются в направлении вектора $\vec{H}_{внешн}$.

Наличие магнитного момента, отличного от нуля свидетельствует о том, что в парамагнетике изначально текут круговые токи. Под действием внешнего магнитного поля они ориентируются так, что их плоскости перпендикулярны направлению поля.

В отсутствие внешнего магнитного поля **намагниченность парамагнетика $J = 0$** , так как векторы \vec{p}_m разных атомов ориентированы беспорядочно из-за теплового движения.



$$\chi > 0$$

$$\mu = \frac{B}{H} \geq 1$$

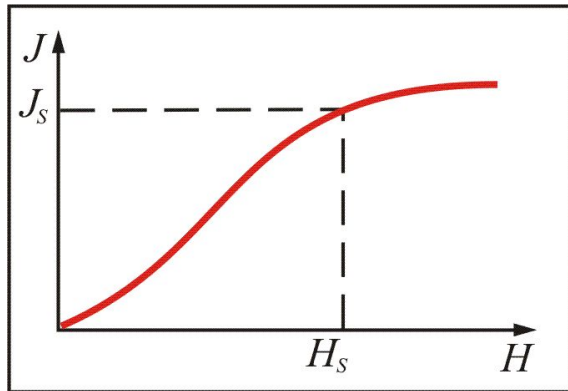
Ферромагнетизм. Гистерезис. Д

Ферромагнетики – класс веществ, которые обладают собственным магнитным полем даже в отсутствие внешнего магнитного поля.

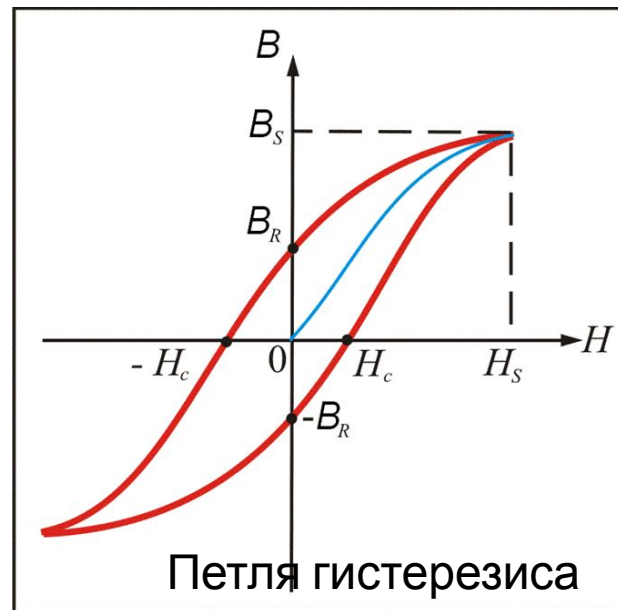
Намагниченность и магнитная индукция ферромагнетиков растут с увеличением напряженности магнитного поля нелинейно!

У ферромагнетиков магнитная восприимчивость положительна и очень велика

$$\mu = \frac{B}{\mu_0 H} \gg 1$$



Кривая намагниченности ФМ, у которого первоначально $P_m=0$.



Петля гистерезиса

B_S – индукция насыщения
 B_R – остаточная индукция
 H_c – коэрцитивная сила.

Синяя кривая – основная или нулевая кривая намагниченности

Напряженность H_c магнитного поля, полностью размагниченного ферромагнетика, называется **коэрцитивной силой**.

Она характеризует способность ферромагнетика сохранять намагниченное состояние.

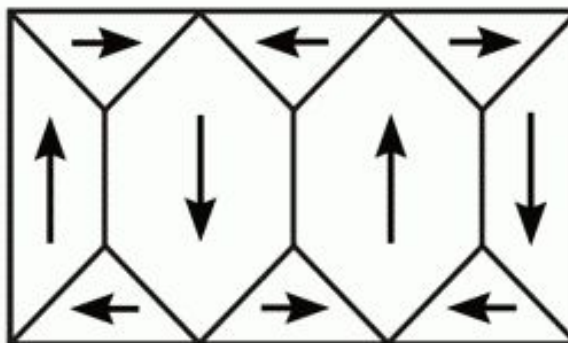
Доменная структура ферромагнетика

Электрон как квантовый объект обладает собственным механическим и магнитным моментами. *Эти магнитные моменты взаимодействуют между собой в пределах монообластей – доменов.*

Это приводит к самопроизвольному намагничиванию доменов.

Весь большой исходный кусок железа разбит на множество очень маленьких ($10^{-2} \div 10^{-3}$ см), полностью намагниченных областей – доменов.

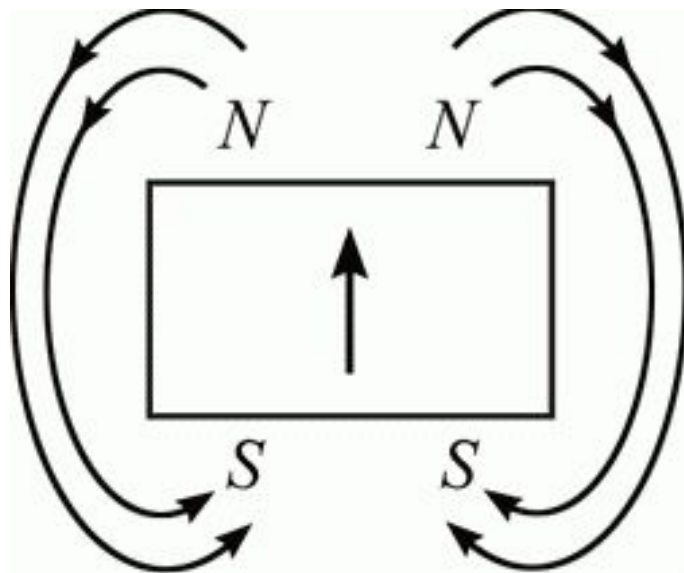
Векторы намагниченности доменов в отсутствие внешнего магнитного поля ориентированы произвольно, поэтому *полный магнитный момент ферромагнитного материала равен нулю.*



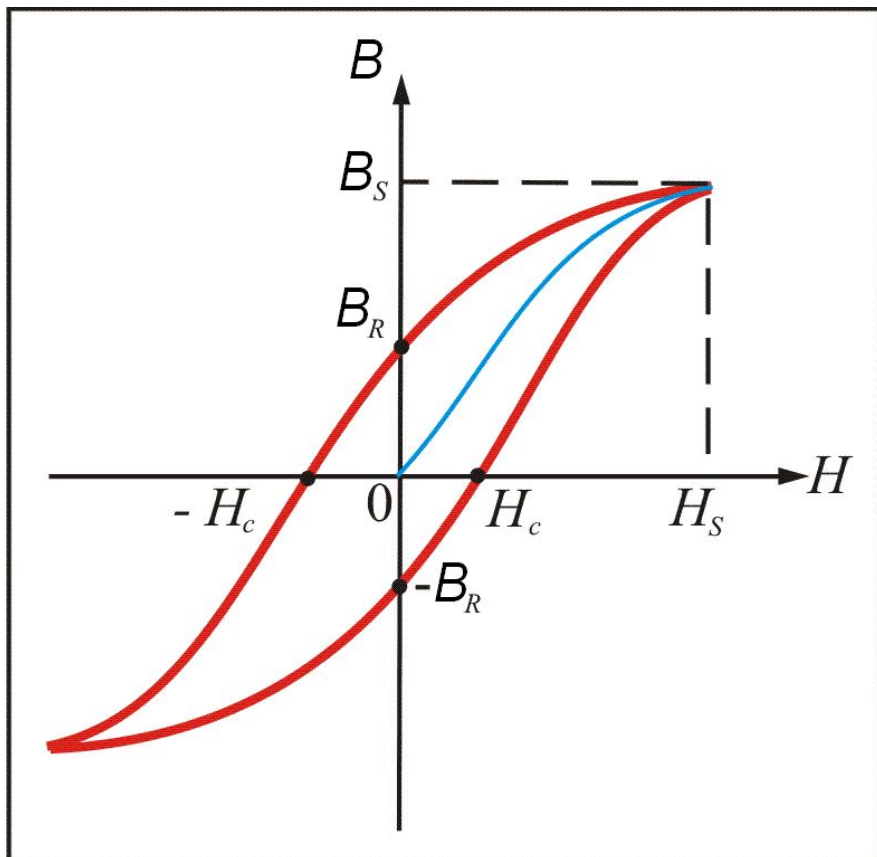
Разбиение на доменные структуры соответствует минимуму свободной энергии куска ферромагнетика.

Во внешнем магнитном поле в ферромагнетике начинается движение доменных стенок. Они перемещаются так, чтобы областей с ориентацией вектора намагниченности по полю стало больше, чем областей с противоположной ориентацией.

Такое движение доменных стенок понижает энергию ферромагнетика во внешнем магнитном поле. По мере нарастания магнитного поля весь кристалл превращается в один большой домен с магнитным моментом, ориентированным по полю.



Явление гистерезиса. Петля гистерезиса



B_S – индукция насыщения

B_R – остаточная индукция

H_c – коэрцитивная сила.

Синяя кривая – основная или нулевая кривая намагничения

Напряженность H_c магнитного поля, полностью размагниченного ферромагнетика, называется **коэрцитивной силой**.

Она характеризует способность ферромагнетика сохранять намагниченное состояние.

Большой коэрцитивной силой (широкой петлей гистерезиса) обладают **магнитотвердые магнетики**, используемые для изготовления постоянных магнитов. Малую коэрцитивную силу имеют **магнитомягкие магнетики** (используются для изготовления трансформаторов). В последних малы энергетические потери на перемагничивание.

Демонстрация явления гистерезиса

***Явление
электромагнитной
индукции***

Квазистационарное электромагнитное поле

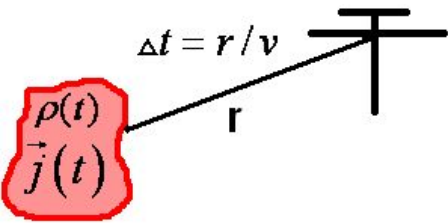
- Переменные электромагнитные поля вызываются переменными источниками: $\rho(t)$, $\vec{j}(t)$
- В этом случае $\frac{d}{dt} \neq 0$
- Действует концепция близкодействия.

$$\Delta t = \frac{r}{v}$$

Скорость переноса возмущения определяется свойствами среды.

При изучении квазистационарных полей временем задержки будем пренебрегать по сравнению с периодом изменения в источнике.

$$\Delta t \ll T$$



Концепция дальнодействия:
изменения в полях мгновенно следуют за изменениями в источнике.

Представители:

закон Кулона,

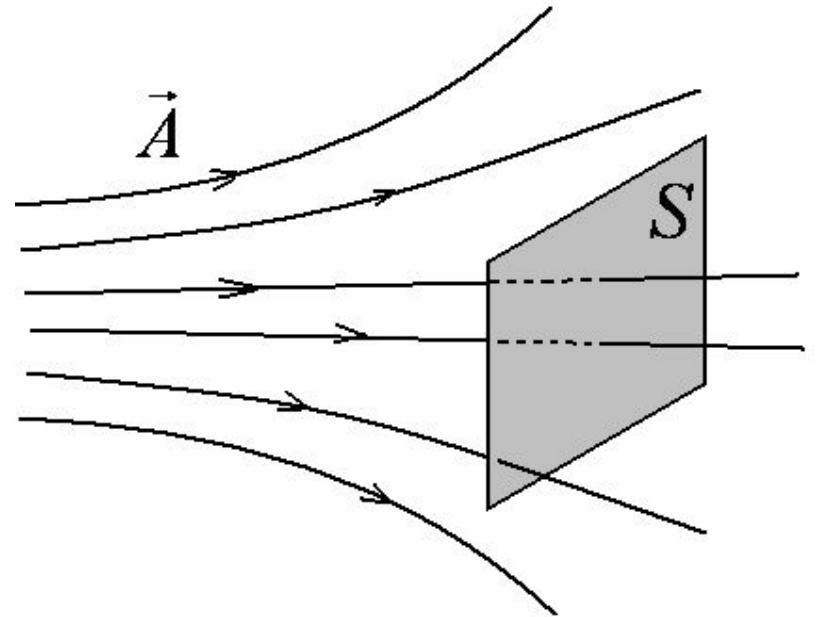
закон Био-Савара-Лапласа.

Концепция близкодействия:
изменения в полях запаздывают по сравнению с изменениями в источнике на время, необходимое для переноса возмущения от источника к приемнику.

Понятие магнитного потока

Поток вектора любого поля:
$$\Phi = \int_S \vec{A} dS$$

Φ - поток вектора \vec{A} через замкнутую поверхность S

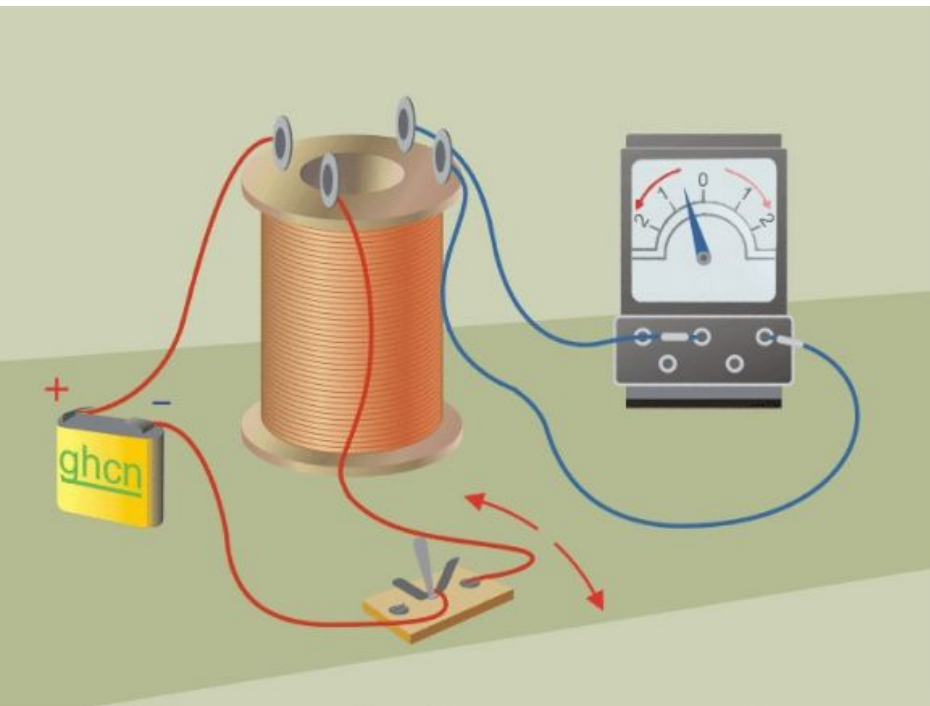


Для магнитного потока:
$$\Phi = \int_S \mu_0 \vec{H} dS$$

Поток вектора какого-либо поля – это количество линий поля, пересекающих замкнутую поверхность

Опыт Фарадея

1831 г. Фарадей обнаружил, что в замкнутом проводящем контуре при изменении потока магнитной индукции через поверхность, ограниченную этим контуром, возникает электрический ток. Это явление называют **электромагнитной индукцией**, а ток – **индукционным**.



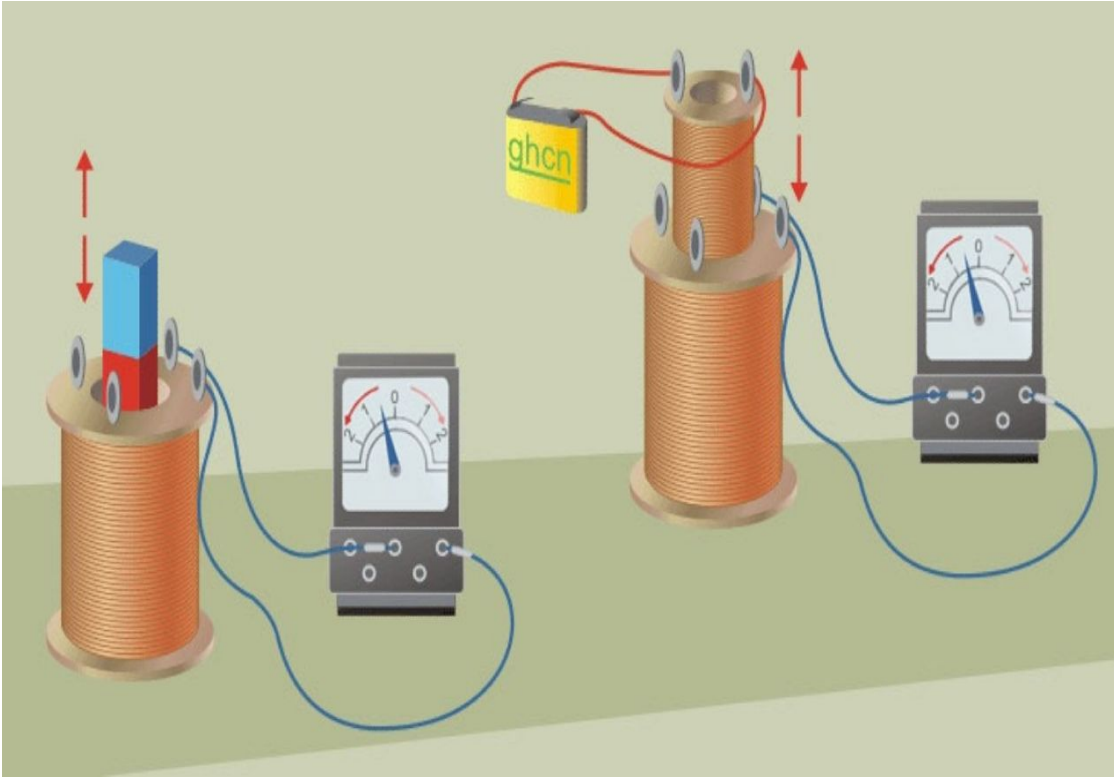
Опыт Фарадея.

Электрический ток создает вокруг себя магнитное поле. А возможно ли обратное явление, когда магнитное поле является источником электрического тока? Положительный ответ на этот вопрос удалось получить М. Фарадею 29 августа 1831 года, когда он обнаружил явление **электромагнитной индукции**. Сам Фарадей так описывал свое открытие: «На широкую деревянную катушку была намотана медная проволока и между витками ее намотана проволока, изолированная от первой хлопчатобумажной нитью. Одна из этих спиралей была соединена с гальванометром, а другая - с сильной батареей. При замыкании цепи удавалось заметить внезапное действие на гальванометре, и то же самое замечалось при прекращении тока».

Демонстрация опыта

Явление электромагнитной индукции

Индукционный ток возникает в контуре независимо от того, каким образом там меняется магнитное поле.



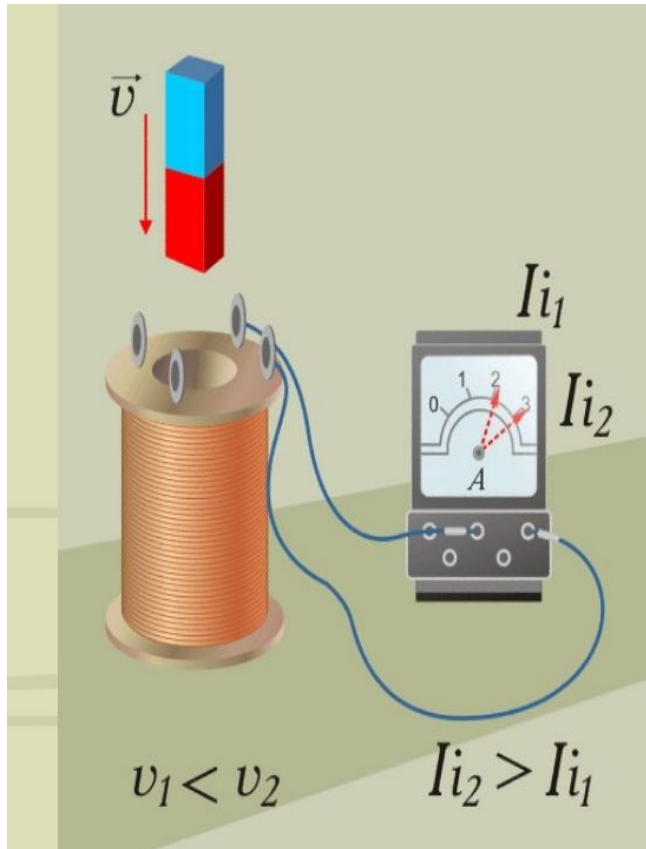
Способы изменения
поля:

1. Перемещаем проводник с током;
2. Меняем поле с помощью постоянного магнита;
3. Перемещаем сам контур или изменяем его площадь.

меняем магнитный поток!!!

при всяком изменении магнитного потока, пронизывающего площадь замкнутого контура, в этом контуре возникает индукционный электрический ток. Значит в контуре действует индуцированное электрическое поле и соответственно ЭДС.

Величина индукционного тока



Опыты показывают, что **величина индукционного тока** определяется скоростью изменения магнитного потока: чем быстрее изменяется магнитный поток, тем больше сила индукционного тока. Чем быстрее вдвигается или выдвигается магнит в катушку, тем быстрее изменяется магнитный поток, и тем больше сила индукционного тока.

Однако при одинаковой скорости и величине изменения магнитного потока индукционный ток в разных проводниках может отличаться, поскольку сопротивление проводников может быть различным.

$$\varepsilon_1 = - \frac{d\Phi}{dt}$$

**Закон
электромагнитной
индукции Фарадея**

ЭДС индукции в контуре равна по величине скорости изменения потока вектора напряженности магнитного поля, пронизывающего этот контур.

Правило Ленца

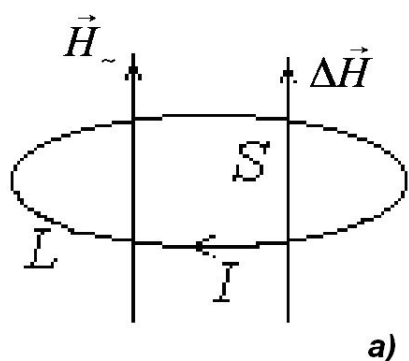
Закон электромагнитной индукции: $\xi_i = -\frac{\Phi}{dt}$

Знак минус в этом законе выражает **правило Ленца**:

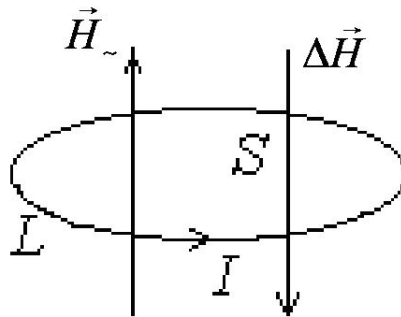
Возникающий индукционный ток имеет такое направление, при котором он своим магнитным полем противодействует причине, его вызывающей.

Это означает, что индукционный ток всегда препятствует изменению магнитного потока.

Правило Ленца позволяет легко определять направление индукционного тока по знаку изменения магнитного поля:



а)



б)

Правило Ленца



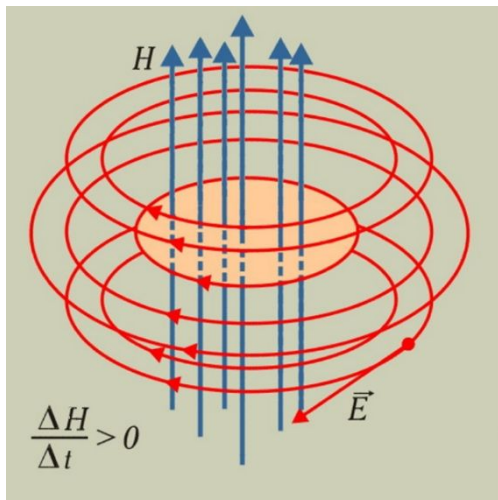
Связь электрического и магнитного поля

$$\Phi(t) = \mu_0 \int_S \vec{H} d\vec{S}$$

$$\xi_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\mu_0 \frac{d}{dt} \int_S \vec{H} d\vec{S} = -\mu_0 \int_S \frac{d\vec{H}}{dt} d\vec{S}$$

$$\xi_i = \oint_L \vec{E} d\vec{l} \longrightarrow \oint_L \vec{E} d\vec{l} = -\mu_0 \int_S \frac{d\vec{H}}{dt} d\vec{S}$$

Это фундаментальная связь **магнитного и электрического поля**: изменение магнитного поля в точке со временем вызывает возникновение и изменение электрического поля в пространстве !!!



Линии напряженности такого электрического поля замкнуты – оно является **вихревым**. Т.е. оно **НЕ ПОТЕНЦИАЛЬНО** в отличие от электростатического поля.

Работа сил этого вихревого электрического поля по замкнутому контуру не равна нулю !!!

Явление самоиндукции

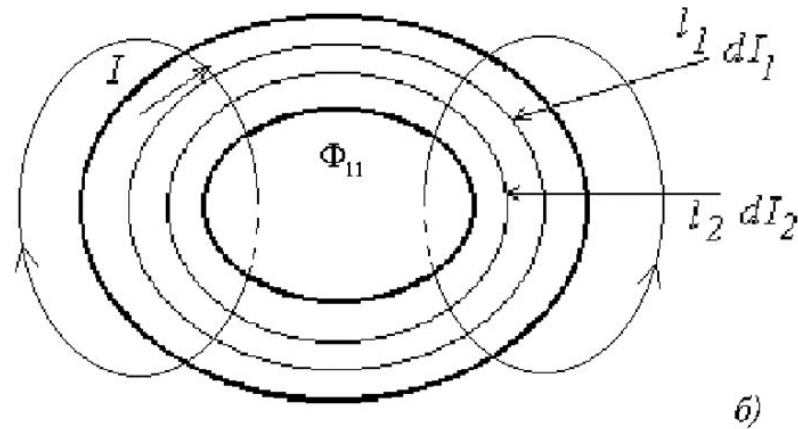
Фарадей – изменение магнитного потока в контуре приводит к возникновению ЭДС индукции, препятствующей возникновению тока в контуре

при изменении силы тока в контуре в нем возникает ЭДС индукции, препятствующая этому изменению – явление самоиндукции

Магнитный поток, сцепленный с контуром, зависит не только от силы тока в нем, но и от размеров и формы контура, а также от магнитных свойств окружающей среды. Однако во всех случаях он пропорционален силе тока, протекающего в контуре, т.е.

$$\Phi = LI$$

где L – коэффициент пропорциональности, называемый индуктивностью контура, и зависящий только от геометрических свойств контура и магнитных окружающей среды



$$\xi_i = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d(LI)}{dt} = -L \frac{dI}{dt}$$

**Демонстрация
явления
самоиндукции**

Магнитная энергия тока.

Рассмотрим цепь с соленоидом (внутри соленоида $B = \mu\mu_0 nI$) и сопротивлением R . При замыкании ключа в цепи установится ток I .

Если ключ разомкнуть, то некоторое время через R будет течь убывающий ток, поддерживаемый ЭДС самоиндукции в соленоиде.

Работа этого тока равна:

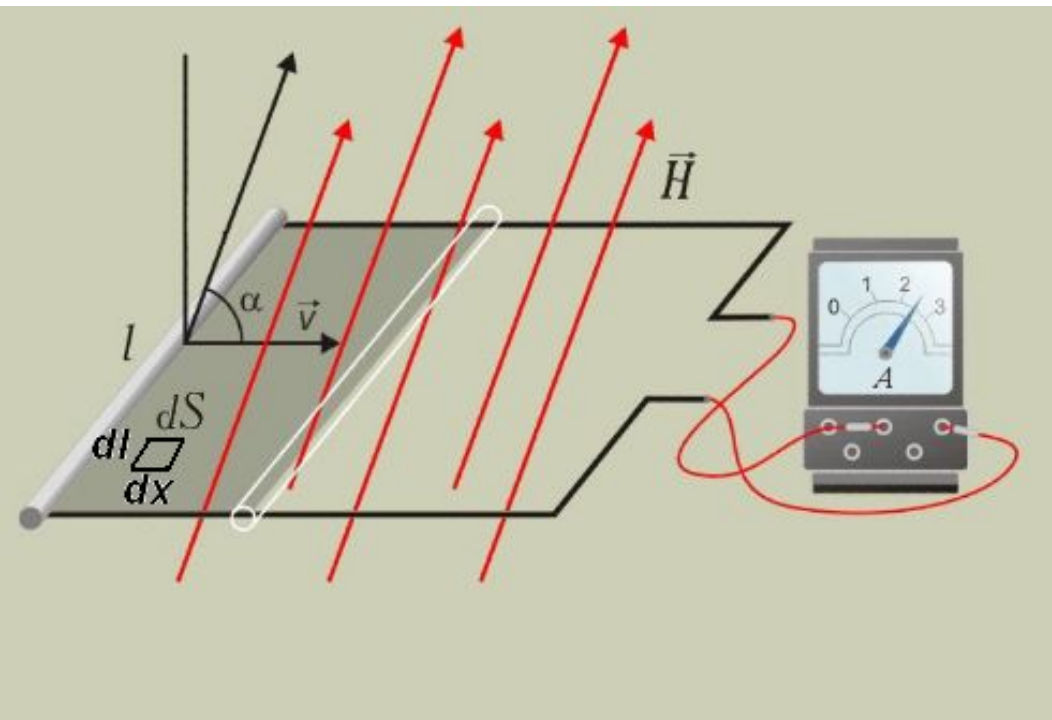
$$dA = \xi_i I dt = - \frac{d\Phi}{dt} I dt = -I d\Phi = -IL dl$$
$$A = - \int_I^0 LI dl = \frac{LI^2}{2}$$

Эта работа идет на изменение внутренней энергии проводников (их нагрев), поэтому магнитное поле, которое было вокруг соленоида, исчезает. Никаких других изменений в окружающих телах не происходит, следовательно носителем энергии является МП:

$$W = \frac{L I^2}{2}$$
$$L = \mu_0 \mu n^2 V$$
$$H = nI \quad - - I = \frac{H}{n}$$
$$W = \frac{\mu_0 \mu n^2 V H^2}{2n^2} = \frac{\mu_0 \mu H^2 V}{2}$$

$w = \frac{\mu_0 H^2}{2}$

ЭДС индукции в движущемся проводнике



ЭДС в движущемся проводнике возникает благодаря действию закона э/м индукции Фарадея, поскольку при движении проводника площадь контура с током изменяется (меняется величина магнитного потока).

По другому: ЭДС возникает при движении проводника в магнитном поле, т.к. на заряды в проводнике действует сила Лоренца. Они перемещаются к разным концам проводника в зависимости от знака заряда.

Проводник длиной l и сопротивлением R движется в магнитном поле H .

Величина возникшего индукционного тока:

$$I_K = \frac{\nu B l \sin \alpha}{R_0}$$

$$I_K R_0 = E = \frac{A_{cm}}{q} = \frac{F_L l}{q} = \frac{q B \nu l \sin \alpha}{q} = B \nu l \sin \alpha$$

Уравнения Максвелла

$$\oint_S \mathbf{E} d\mathbf{S} = \frac{1}{\varepsilon_0} \sum q$$

Теорема О-Г

$$\oint_S \mathbf{B} d\mathbf{S} = 0$$

Отсутствие магнитных зарядов,
замкнутость силовых линий МП

$$\oint_L \mathbf{E} dl = -\mu_0 \int_S \frac{dH}{dt} dS$$

Связь Э и М полей

$$\oint_S \mathbf{H} dl = \int_S \mathbf{j} d\mathbf{S} + \frac{d}{dt} \int_S \mathbf{D} d\mathbf{S}$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \varepsilon_0 \mathbf{E}$$

$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ Ток смещения, возникающее при изменении магнитного потока,
переменное электрическое поле.