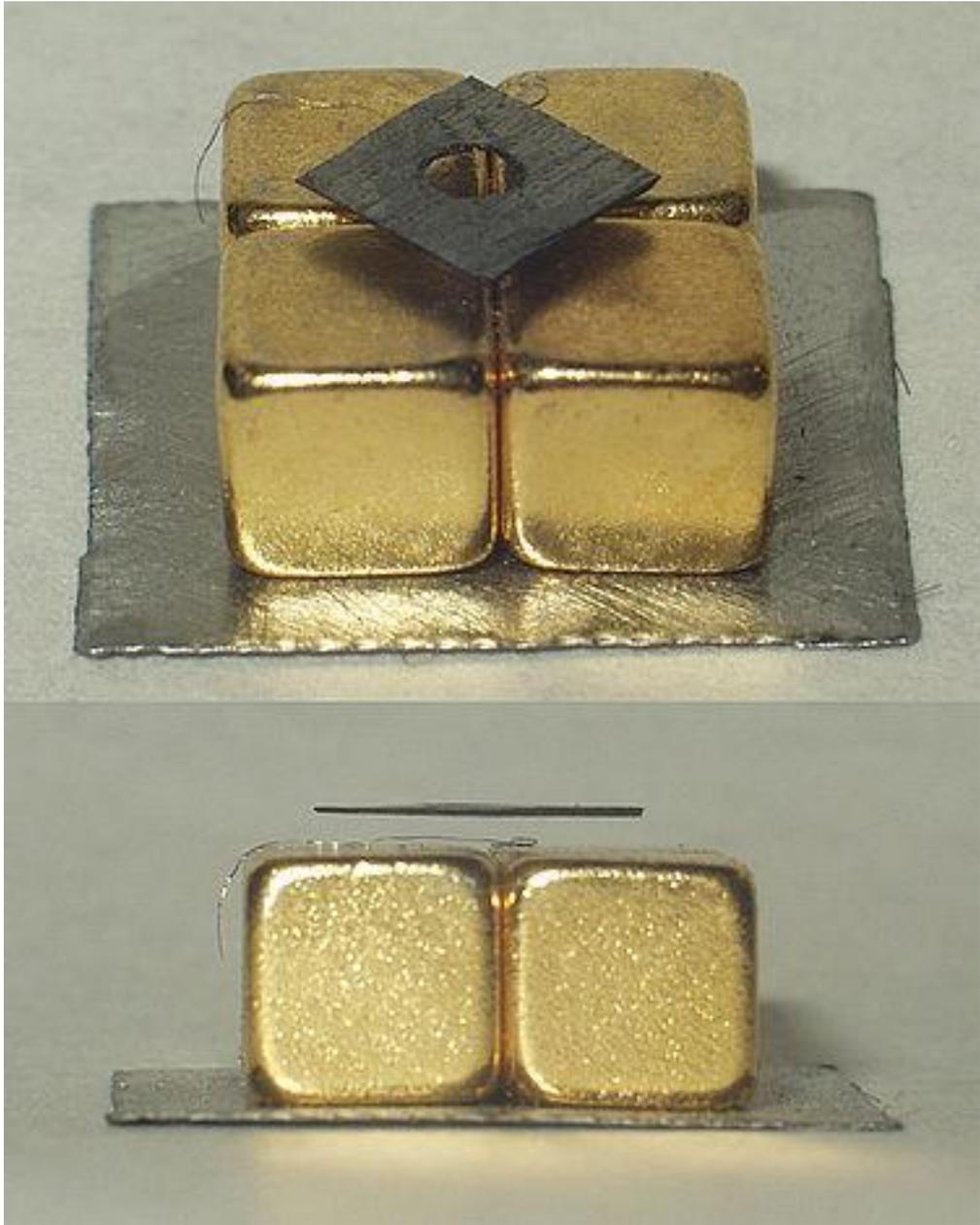


# Действие магнитного поля на токи

## Магнитное поле в веществе

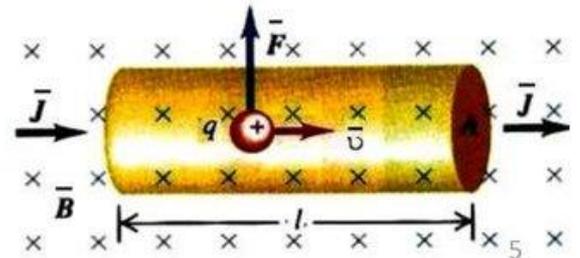
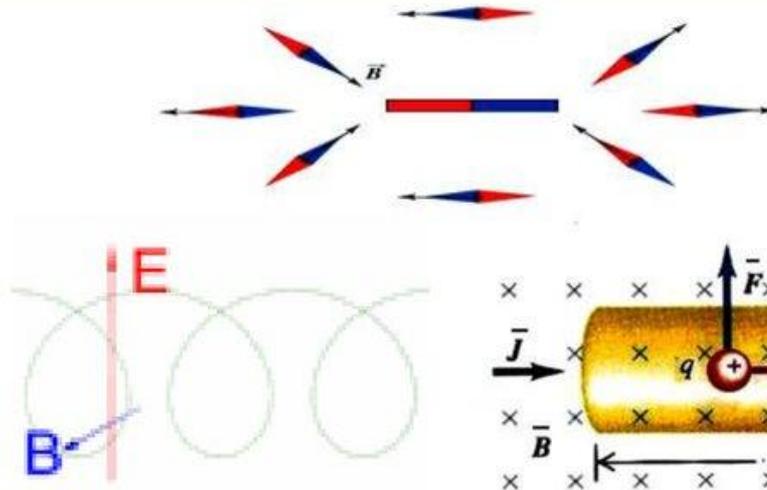
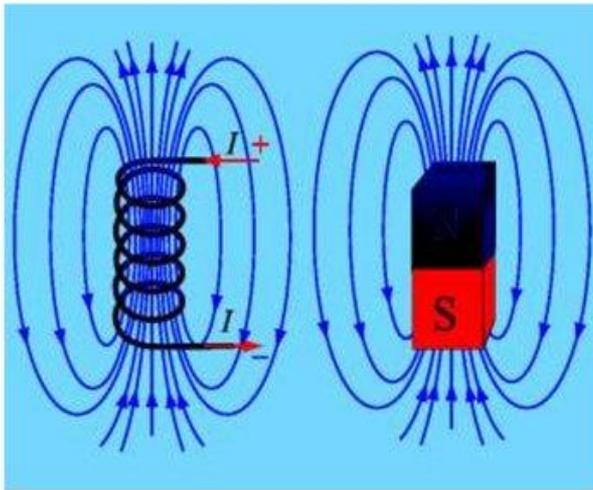
При подготовке  
практического занятия  
использованы слайды открытого  
доступа Интернета



# Магнитное поле и его характеристики

## Магнитное поле

– силовое поле в пространстве, окружающем токи и постоянные магниты. Магнитное поле обнаруживают по его силовому воздействию на магнитную стрелку, проводник с током или движущийся заряд.



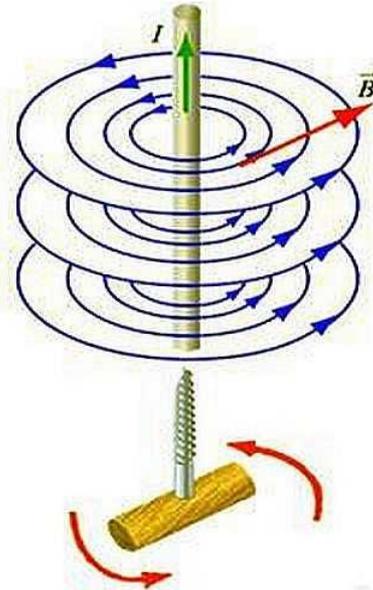
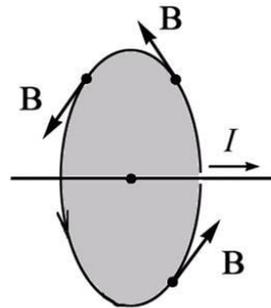
# Магнитное поле создается движущимися в проводнике зарядами – проводником с током

## Силовые линии магнитного поля

Линии, касательные к которым в каждой точке совпадают с направлением вектора магнитной индукции  $\vec{B}$ , называются **силовыми линиями** магнитного поля.

- **Прямой ток.**

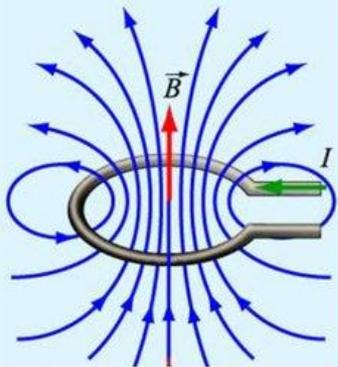
Направление силовых линий определяется **правилом правого винта**.



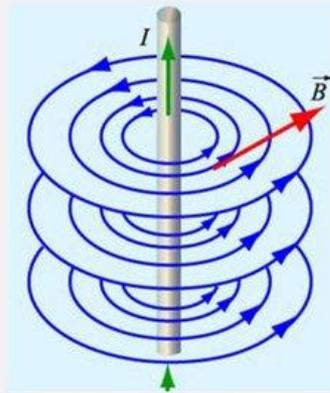
# Магнитное поле (примеры силовых линий)

## Непотенциальность магнитного поля

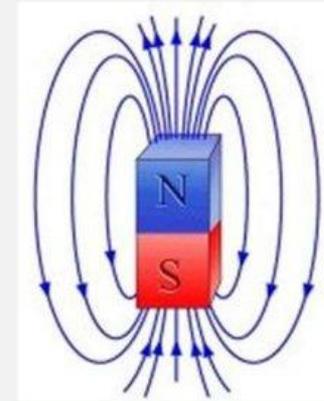
Линии магнитной индукции замкнуты



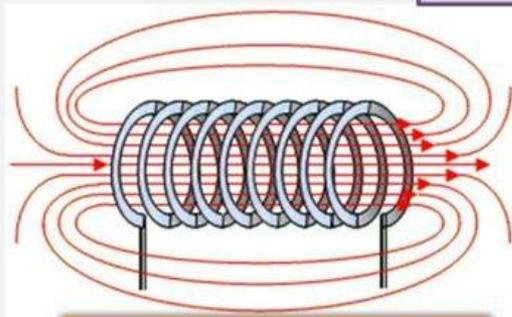
Поле кругового тока



Поле прямого провода



Поле полосового магнита



Поле соленоида

## Часть 1. Сила Лоренца и сила Ампера

Магнитное поле действует с силой на движущуюся заряженную частицу, при этом сила прямо пропорциональна произведению четырех величин – заряда, скорости заряда, магнитной индукции и синуса угла между вектором скорости и вектором магнитной индукции

$$\vec{F} = q[\vec{V}, \vec{B}]$$

$$F = q \cdot V \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Магнитное поле действует с силой на проводник с током, при этом сила прямо пропорциональна произведению четырех величин – силы тока, длины проводника, магнитной индукции и синуса угла между вектором длины и вектором магнитной индукции

$$\vec{F} = I[\vec{l}, \vec{B}]$$

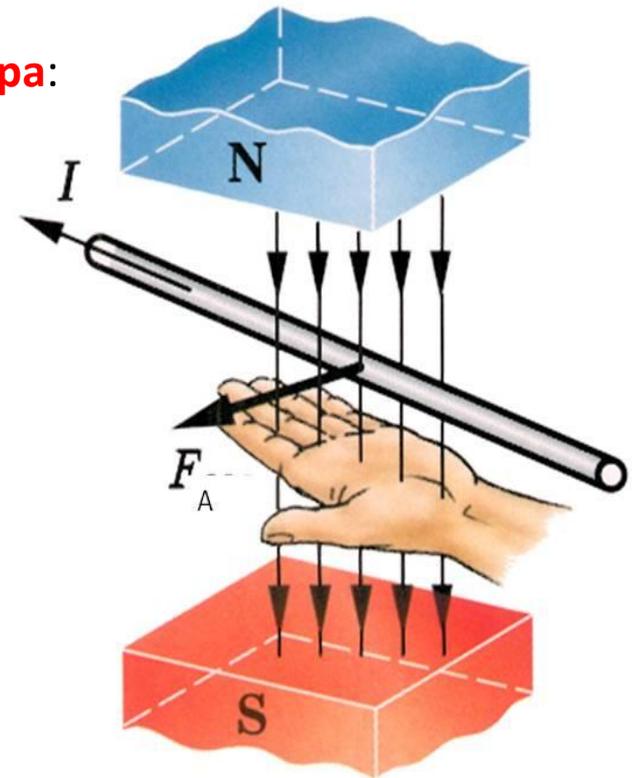
$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha$$

# Направление силы Лоренца и силы Ампера

**Правило левой руки для силы Лоренца:** если левую руку расположить так, чтобы силовые линии МП входили в ладонь, а четыре пальца совпадали с направлением движения заряженной (+) частицы, то отогнутый под 90 градусов большой палец укажет направление силы Лоренца, действующей на положительную заряженную частицу

**Правило левой руки для силы Ампера:**

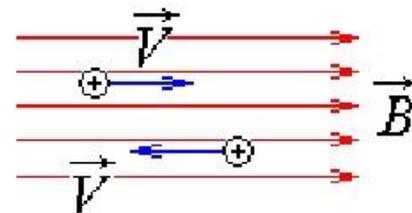
Если левую руку поместить так, чтобы четыре вытянутых пальца были направлены по направлению тока, а линии вектора магнитной индукции входили в ладонь, то отогнутый на 90° большой палец укажет направление силы Ампера



## Действие магнитного поля на проводник с током и движущуюся заряженную частицу

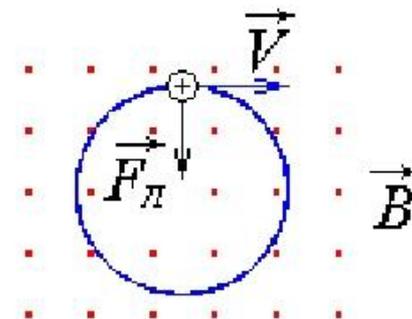
$V \parallel B$  В этом случае  $\alpha = 0, \sin \alpha = 0, F_{Л} = 0.$

Заряженная частица движется равномерно вдоль линий магнитной индукции



$V \perp B$  В этом случае  $\alpha = 90^0, \sin \alpha = 1, F_{Л} = qVB, F_{Л} \perp B.$

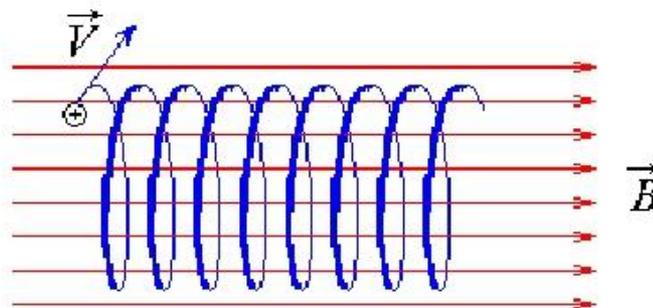
Заряженная частица движется по окружности в плоскости перпендикулярной линиям магнитной индукции



Заряженная частица влетает в магнитное поле под произвольным углом к линиям магнитной индукции.

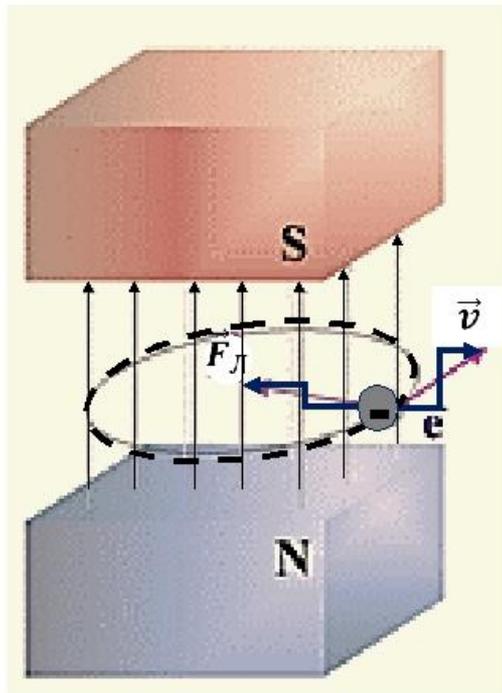
$$0 < \alpha < 90^0$$

В данном случае траектория движения заряженной частицы представляет собой винтовую линию.



## Магнитное поле (сила Лоренца) искривляет траекторию движения заряженной частицы

Сила Лоренца - сила, действующая со стороны магнитного поля на движущуюся электрически заряженную частицу



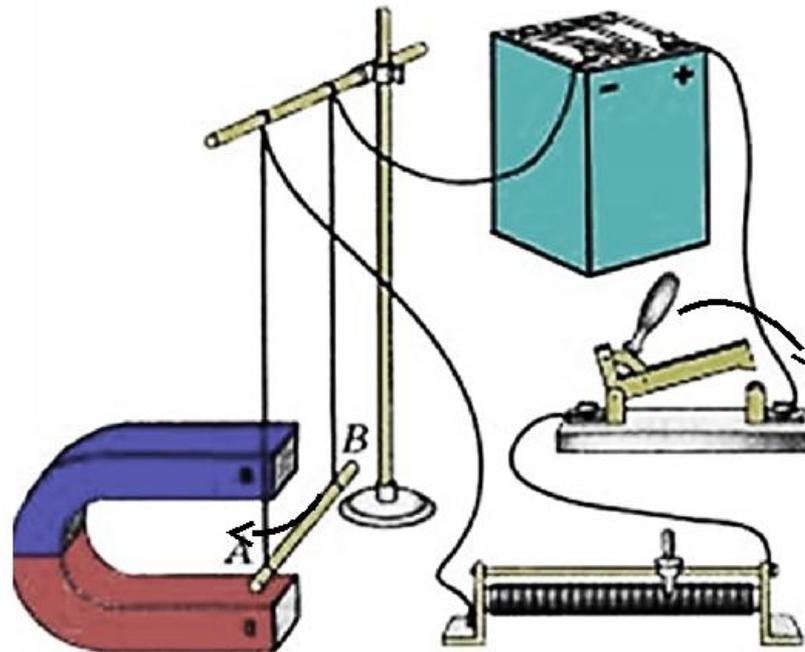
$$F_L = |q|vB \sin \alpha$$

$$\sin \alpha = (\vec{B}, \vec{v})$$

# Сила Ампера

## ПРЯМОЛИНЕЙНЫЙ ОТРЕЗОК ПРОВОДНИКА С ТОКОМ В МП

### Действие магнитного поля на проводник с током



# Сила Ампера

Прямолинейный отрезок проводника с током  
в магнитном поле

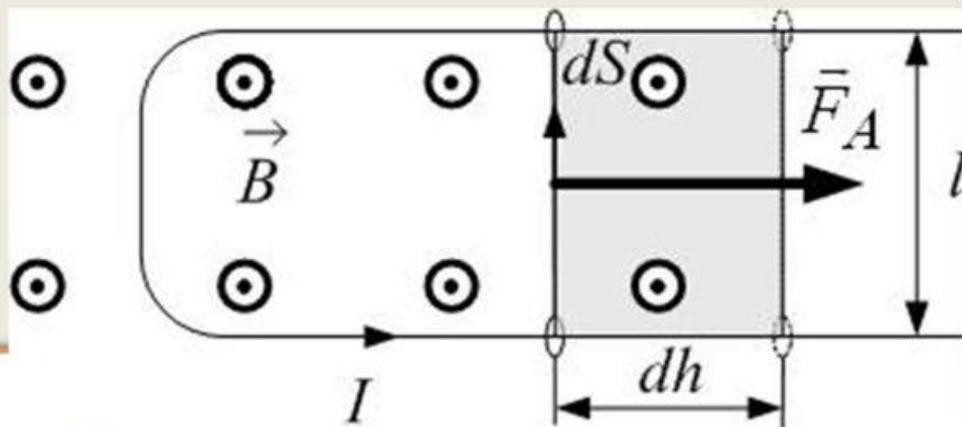
(рассчитать силу Ампера не сложно, если знать  
силу тока, длину проводника, магнитную индукцию и угол между двумя векторами)

Магнитное поле действует с силой на проводник с током, при этом сила прямо пропорциональна произведению четырех величин – силы тока, длины проводника, магнитной индукции и синуса угла между вектором длины и вектором магнитной индукции

$$\vec{F} = I [\vec{l}, \vec{B}]$$

$$F = I \cdot l \cdot B \cdot \sin \alpha$$

Работа по  
перемещению  
проводника с током  
в магнитном поле



Работа силы Ампера:

$$dA = F_A \cdot dh = I \cdot l \cdot B \cdot dh = I \cdot B \cdot dS = I \cdot d\Phi$$

$$dA = I \cdot d\Phi$$

заметённая проводником  
в процессе движения  
площадь

Если ток не меняется:  $\Delta A = I \cdot \Delta\Phi$

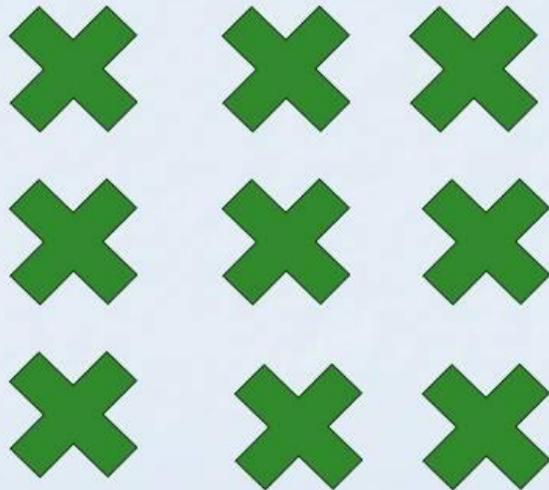
Работа по перемещению проводника с током в магнитном поле равна произведению силы тока на изменение магнитного потока  
(на пересечённый проводником магнитный поток)

## Проверьте себя

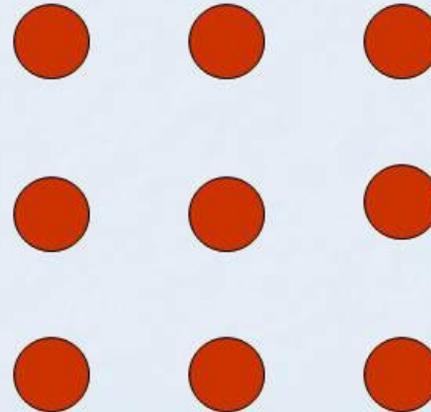
Для изображения магнитного поля пользуются следующим:

Если линии однородного магнитного поля расположены перпендикулярно к плоскости чертежа и направлены:

от нас за чертеж, то их изображают крестиками

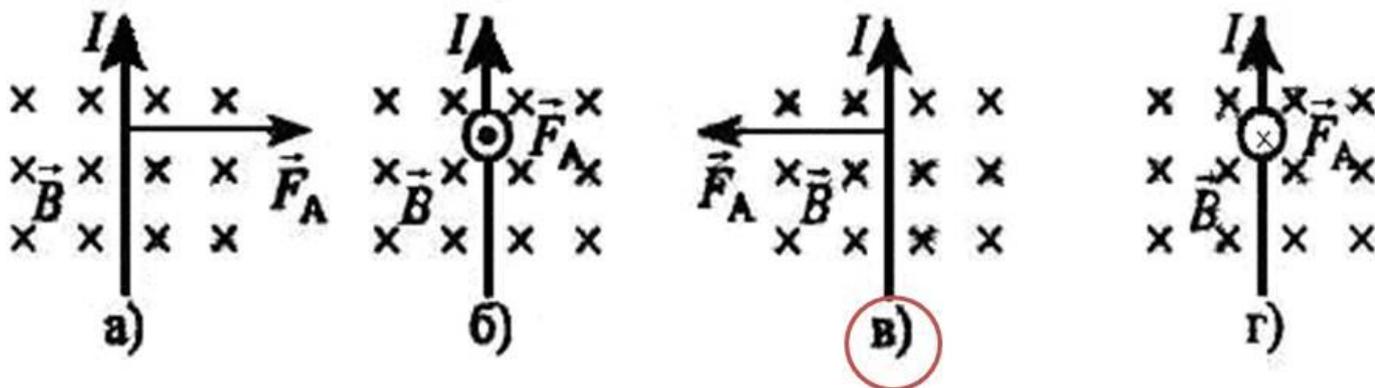


из-за чертежа к нам — то точками



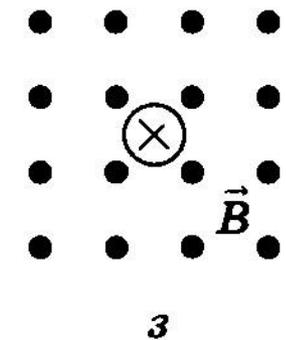
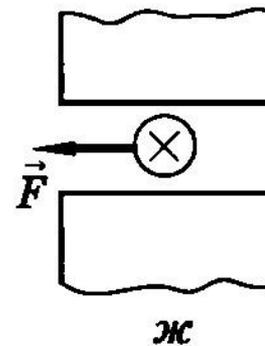
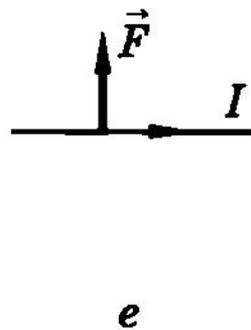
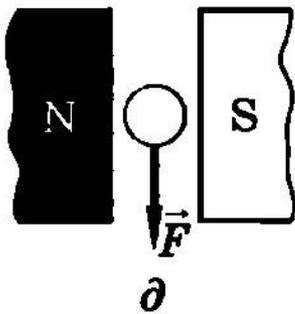
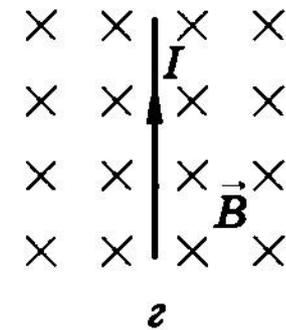
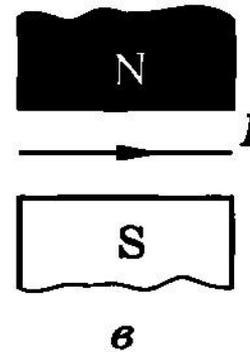
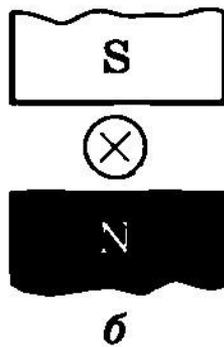
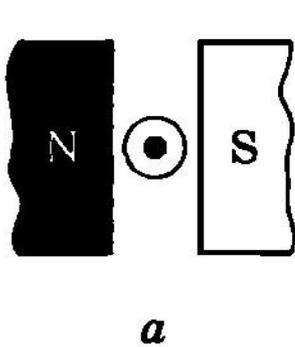
## Проверьте себя

В магнитное поле помещен проводник с током. На рис. представлены варианты направления силы Ампера. Выберите правильный вариант



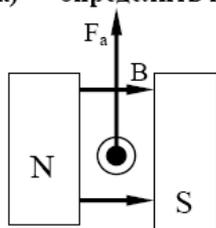
## Проверьте себя:

на некоторых рисунках необходимо указать силу Ампера, на других – направление силовых линий магнитного поля

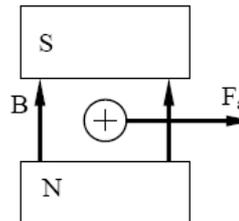


№ 839(829).

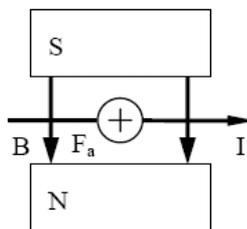
- а), б), в), г), з) — указать направление силы Ампера;  
 д) — определить направление тока в проводнике;  
 е), ж) — определить направление магнитного поля  $\vec{B}$ .



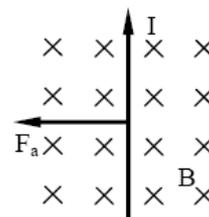
а)



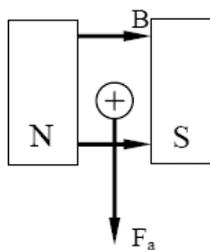
б)



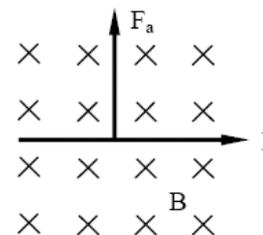
в)



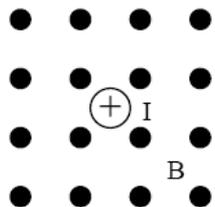
г)



д)

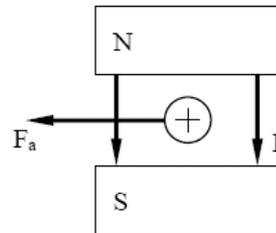


е)



$F_a = 0$ , т.к.  $F_a \parallel I$

ж)

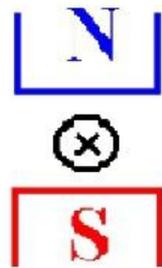


з)

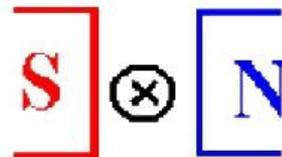
Ответы:

## Проверьте себя

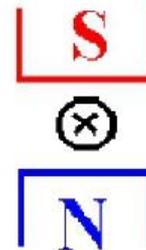
Определить направление силы Ампера.



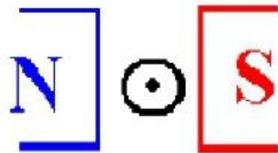
1



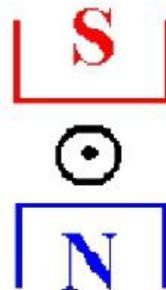
2



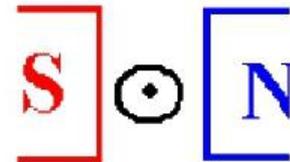
3



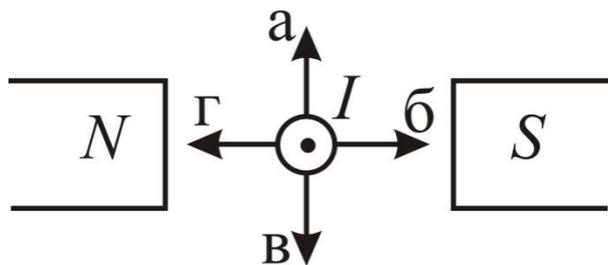
4



5

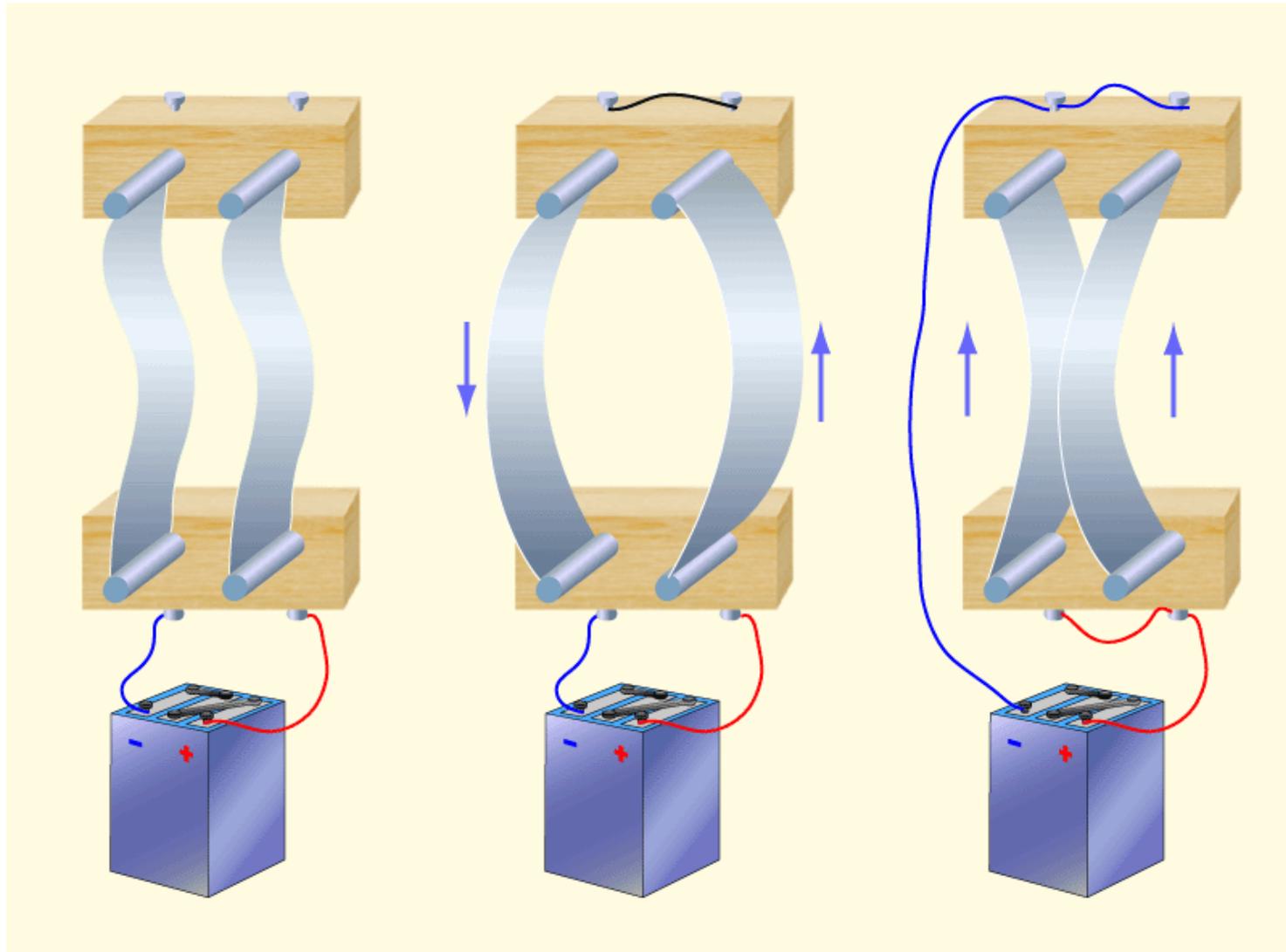


6

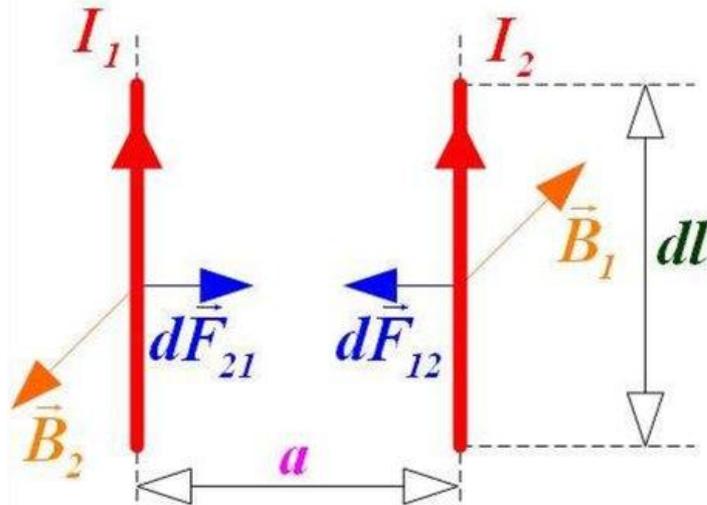


?

## ДВА ПРОВОДНИКА С ТОКОМ



# **ЗАКОН АМПЕРА**



В 1820 г. Ампером А.М. было установлено, что **на элементарный участок  $dl$  проводника с током  $I$ , помещенного в магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$** , действует сила

$$\vec{dF} = I [\vec{dl}, \vec{B}]$$

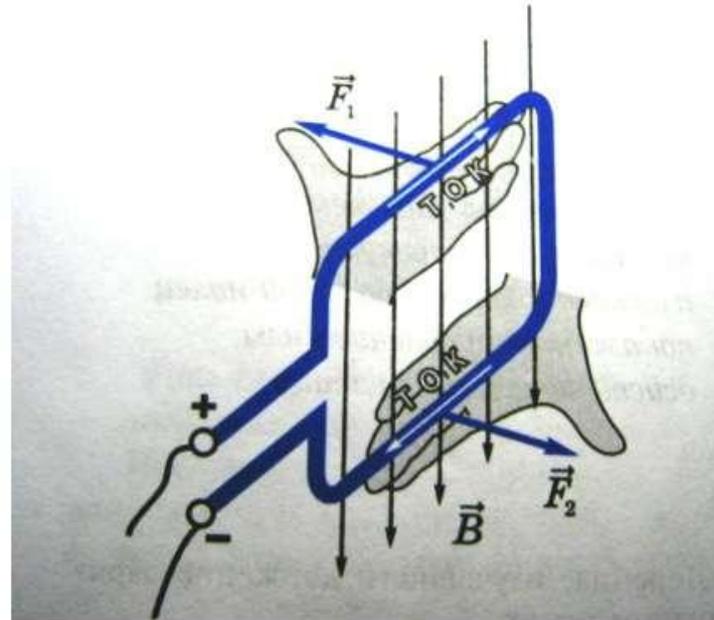
Данную силу еще называют силой Ампера.

Используя данное выражение можно получить, что сила взаимодействия двух бесконечных параллельных прямолинейных проводников с током в вакууме **равна**

$$dF_{12} = I_2 B_1 dl = \frac{\mu_0}{4\pi} \cdot \frac{2 I_1 I_2}{a} \cdot dl$$

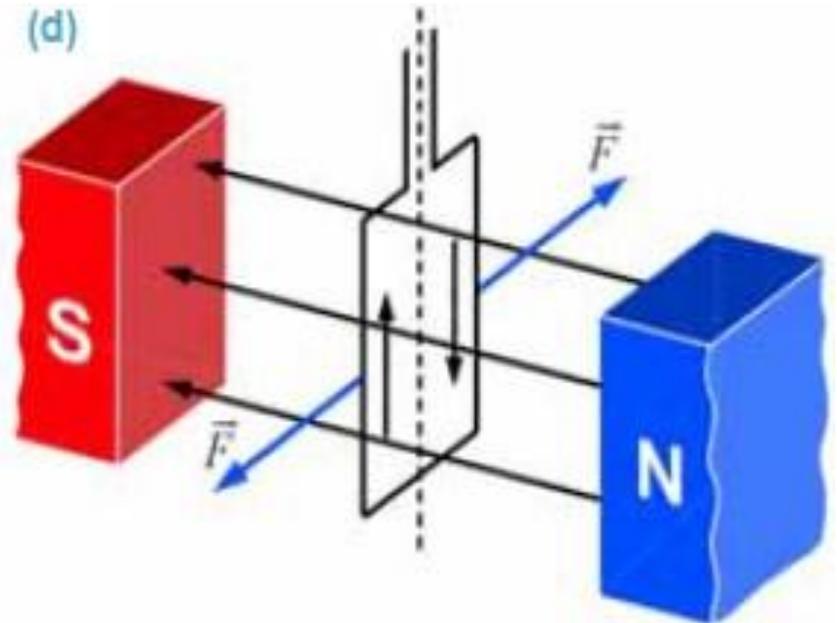
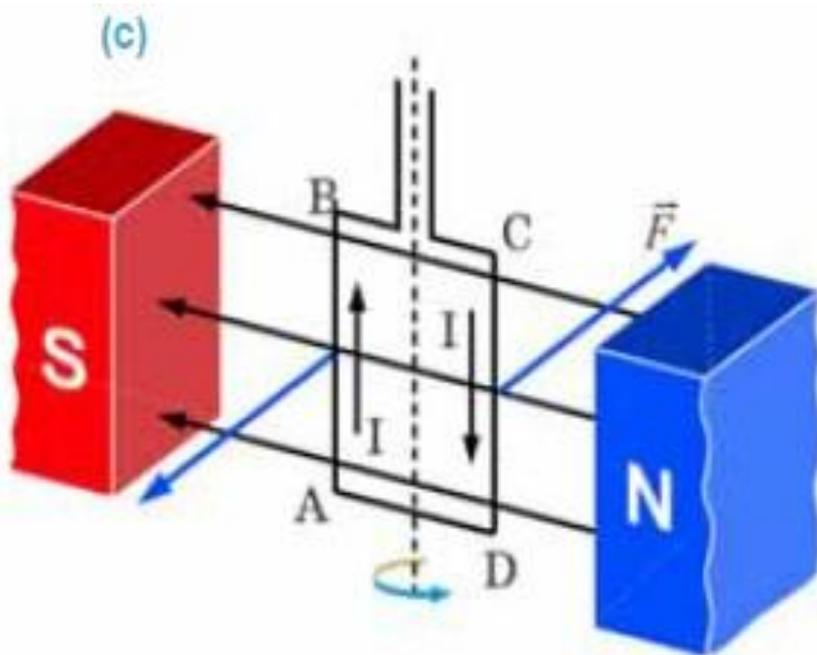
# Рамка с током в магнитном поле

Если в магнитное поле поместить не прямолинейный проводник, а рамку с током, то рамка повернется.



# Рамка (контур) с током в магнитном поле

## ПРЯМОУГОЛЬНАЯ РАМКА С ТОКОМ В МП



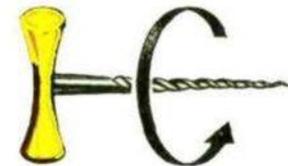
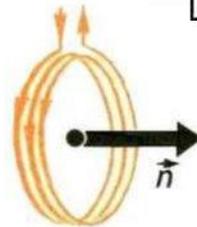
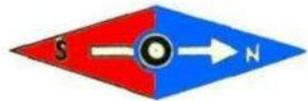
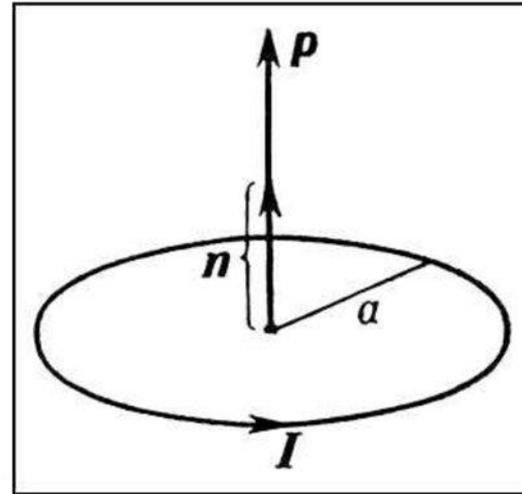
## Рамка (контур) с током в магнитном поле

### МАГНИТНЫЙ МОМЕНТ КОНТУРА С ТОКОМ

$$\vec{p}_m = IS\vec{n}; \quad p_m = IS;$$

$$[p_m] = 1A \cdot m^2.$$

$|\vec{n}| = 1$  - единичная нормаль



# Рамка (контур) с током в магнитном поле

## РАМКА (КОНТУР) С ТОКОМ В МП

### Магнитный момент

Действие магнитного поля на пробный ток в данном случае выражается в возникновении **вращающего момента  $M$**  при отклонении контура от положения равновесия. Для характеристики такого воздействия можно использовать величину  $p_m$ , называемую **дипольным магнитным моментом**:

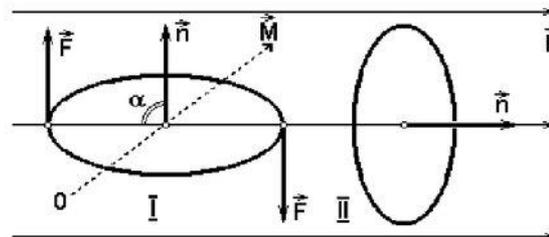
$$p_m = IS,$$

где  $S$  – площадь пробного контура с током.

Пробный контур определяется также ориентацией в пространстве. Следовательно, **магнитный момент** правильней представлять в виде вектора, направленного параллельно вектору положительной нормали  $n$ :

$$p_m = ISn,$$

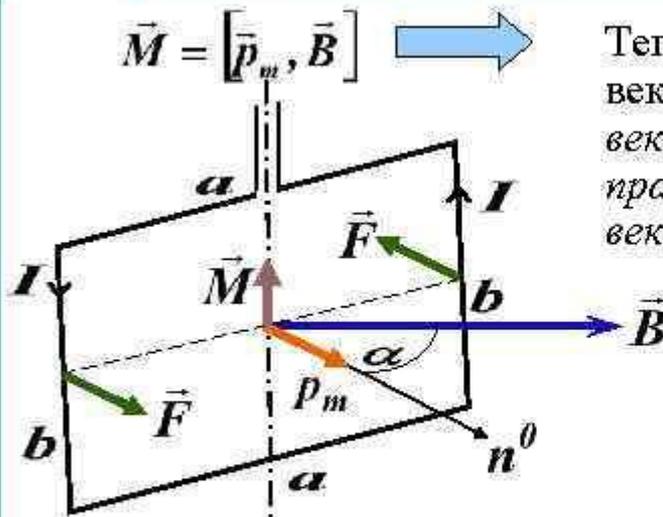
**Магнитный момент измеряется в единицах ампер-квадратный метр ( $A \cdot m^2$ ).**



# Рамка (контур) с током в магнитном поле

## РАМКА (КОНТУР) С ТОКОМ В МП

### КОНТУР С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ



Теперь легко определить направление вектора  $\vec{M}$ , вспомнив правило: векторы  $\vec{p}_m$ ,  $\vec{B}$  и  $\vec{M}$  образуют правовинтовую ортогональную тройку векторов.

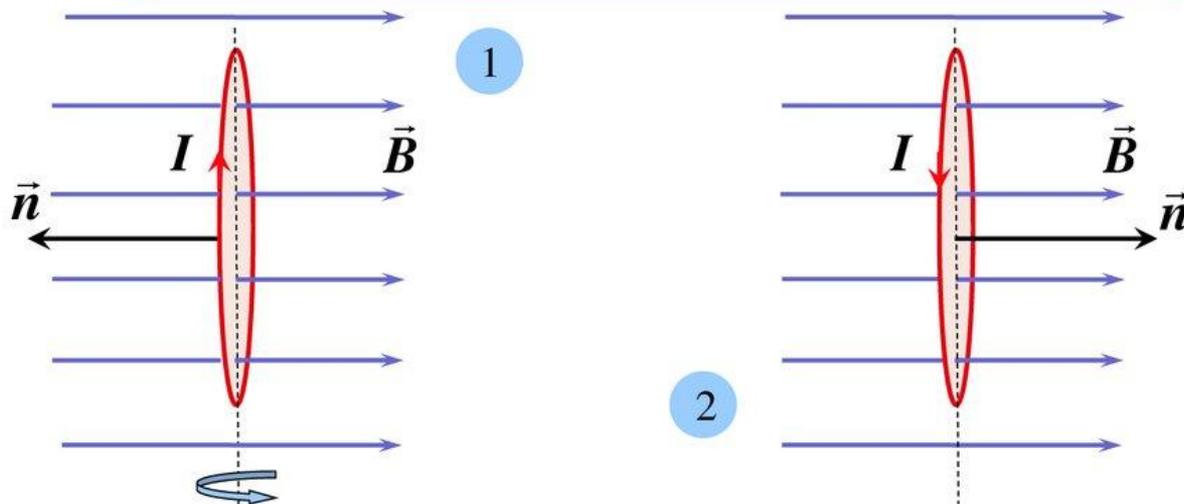
Вращающий момент направлен по оси вращения контура,  $\perp$  плоскости, в которой размещаются векторы магнитного момента и магнитной индукции.

*Вращающий момент, действующий в однородном магнитном поле на контур с током, стремится сориентировать его перпендикулярно к силовым линиям магнитного поля.*

# Рамка (контур) с током в магнитном поле

## РАМКА (КОНТУР) С ТОКОМ В МП

### РАБОТА ПО ПЕРЕМЕЩЕНИЮ ПРОВОДНИКА С ТОКОМ В МАГНИТНОМ ПОЛЕ



$$\left. \begin{aligned} A &= I(\Phi_2 - \Phi_1), \\ \Phi_2 &= BS \\ \Phi_1 &= -BS \end{aligned} \right\}$$

$$A = I[BS - (-BS)] = 2IBS$$

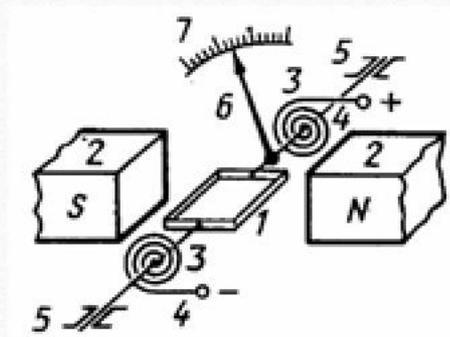
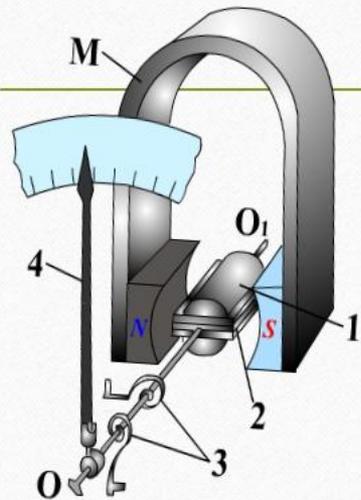
$$A = 2IBS$$

## Применение силы Ампера

Рамка с током поворачивается и останавливается, почему?  
От чего зависит угол, на который повернется рамка с током?

### Электроизмерительные приборы

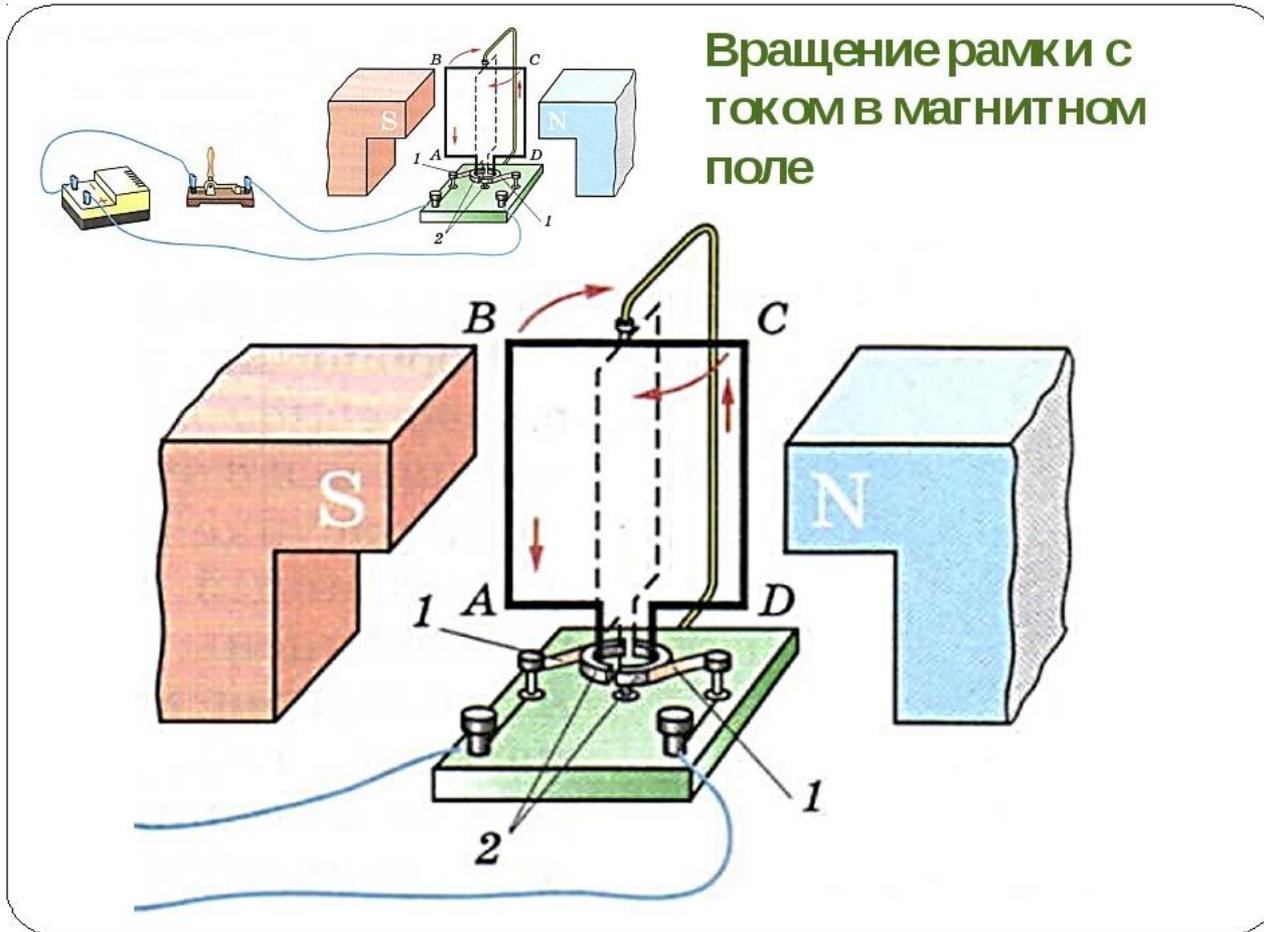
Свойство рамки с током вращаться в магнитном поле используется в электроизмерительных приборах



## Еще пример применения силы Ампера

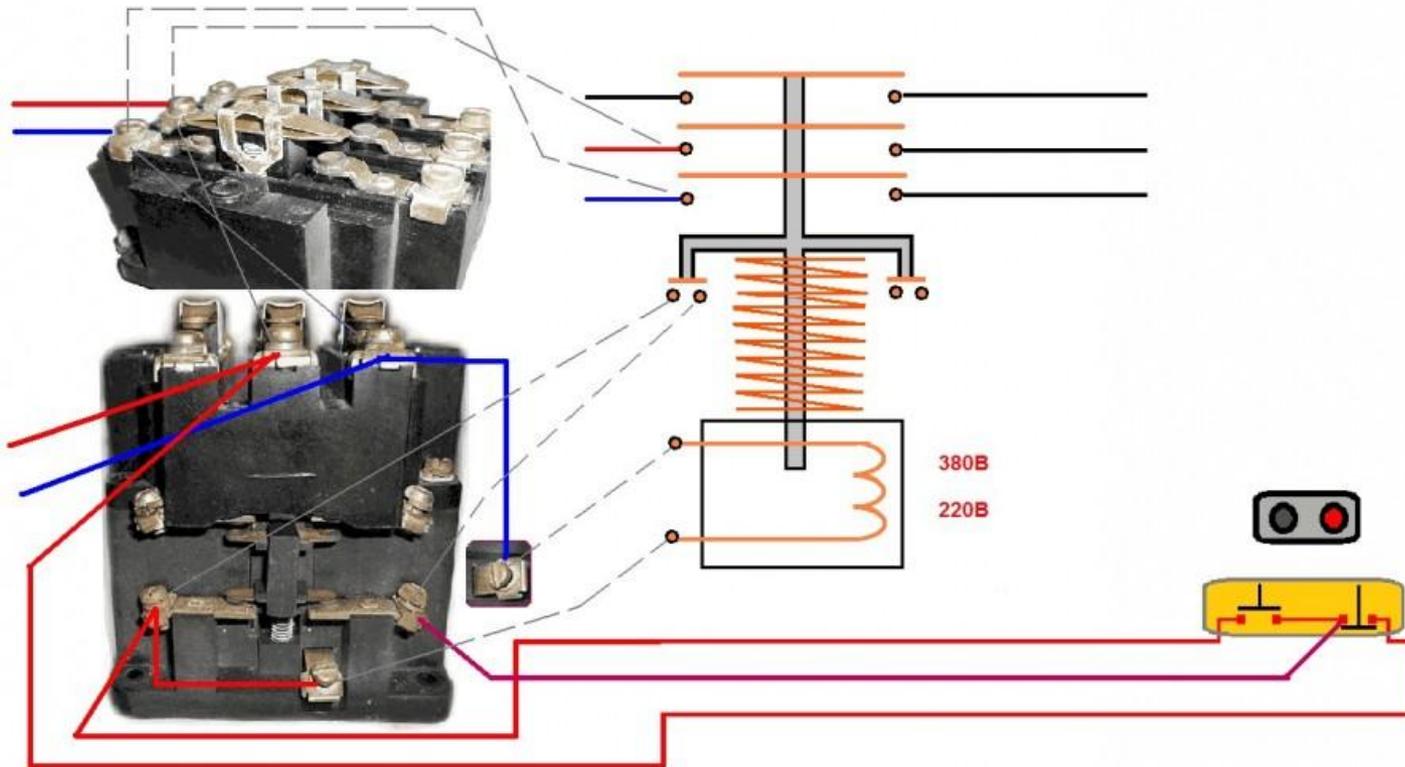
Почему рамка с током вращается?

Она должна под действием силы Ампера повернуться и остановиться, почему не останавливается?



## Еще пример применения силы Ампера

Движением контактов управляют специальные катушки. На катушки подается управляющее напряжение. В зависимости от конструкции оно может быть разной величины. Благодаря проходящему через них току срабатывает электромагнит и якорь с силой размыкает или замыкает сеть. Где применить?

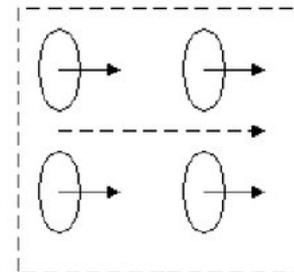
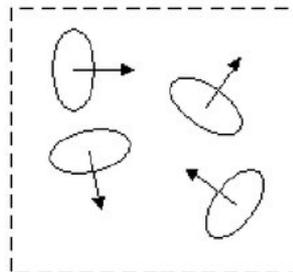


## Часть 2. Пример проявления сил Ампера в природе – действие сил Ампера на круговые микротоки в веществе

### Магнитное поле в веществе

#### Магнетики

- В отсутствии магнитного поля молекулярные токи ориентированы хаотически.
- Под действием магнитного поля магнитные моменты молекул приобретают преимущественную ориентацию – **вещество намагничивается.**



# Пример проявления сил Ампера в природе – действие сил Ампера на круговые микротоки в веществе

## Магнитное поле в веществе

### Намагниченность

- Магнитный момент единицы объема называется **намагниченностью**. 
$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i \in \Delta V} \vec{p}_{m_i}$$

- **Намагниченность** связана с **напряженностью** магнитного поля 
$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$$

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad \chi - \text{магнитная восприимчивость}$$

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

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

$$\mu = (1 + \chi) - \text{относительная магнитная проницаемость}$$

## Пример проявления сил Ампера в природе – действие сил Ампера на круговые микротоки в веществе

### Магнитное поле в веществе

## Магнетики

- Магнитная проницаемость показывает во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции магнитного поля в вакууме  $\mu = \frac{B}{B_0}$
- Напряженность магнитного поля внутри магнетика совпадает с напряженностью внешнего магнитного поля

$$\vec{H}_0 = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \frac{\vec{B} - \mu_0 \vec{J}}{\mu_0} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} = \vec{H}$$

- Различные вещества в той или иной степени способны к **намагничиванию**.
- Слабромагнитные вещества – **пара- и диамагнетики**, сильномагнитные – **ферромагнетики**.

## Пример проявления сил Ампера в природе – действие сил Ампера на круговые микротоки в веществе

### Магнитное поле в веществе

## Магнетики

- У парамагнетиков  $\mu > 1$ , у диамагнетиков  $\mu < 1$ .  
Отличие  $\mu$  от единицы у пара- и диамагнетиков чрезвычайно мало. Например, у алюминия, который относится к парамагнетикам,  $\mu - 1 \approx 2,1 \cdot 10^{-5}$ , у хлористого железа ( $\text{FeCl}_3$ )  $\mu - 1 \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$ .
- К **парамагнетикам** относятся также платина, воздух и многие другие вещества.
- К **диамагнетикам** относятся медь ( $\mu - 1 \approx -3 \cdot 10^{-6}$ ), вода ( $\mu - 1 \approx -9 \cdot 10^{-6}$ )

# Пример проявления сил Ампера в природе – действие сил Ампера на круговые микротоки в веществе

## Магнитное поле в веществе

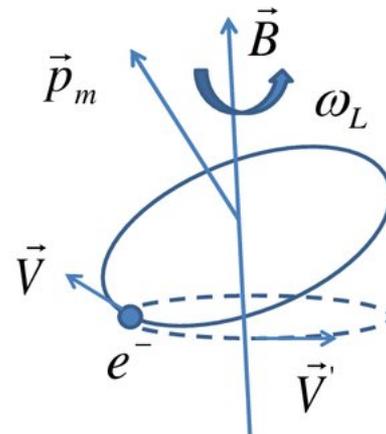
### Диамагнетизм и парамагнетизм

- Во внешнем поле на круговой ток действует вращательный момент, стремящийся установить магнитный момент по полю.
- Плоскость вращения электрона поворачивается – **прецессия Лармора**

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

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M}; \quad \vec{L} = J \cdot \vec{\omega}$$

$$\omega_L = \frac{p_m B}{L}$$



Пример проявления сил Ампера в природе – действие сил Ампера на круговые микротоки в веществе

**Магнитное поле в веществе**

## **Диамагнетизм и парамагнетизм**

- Под действие внешнего магнитного поля происходит ***прецессия*** электронных орбит.
- Обусловленное прецессией дополнительное вращение приводит к возникновению ***индуцированного магнитного момента, направленного против поля.***
- Если атом обладает собственным магнитным моментом (много больше, чем индуцированный) – ***парамагнетик.***
- Если результирующий собственный магнитный момент атома равен нулю – ***диамагнетик.***

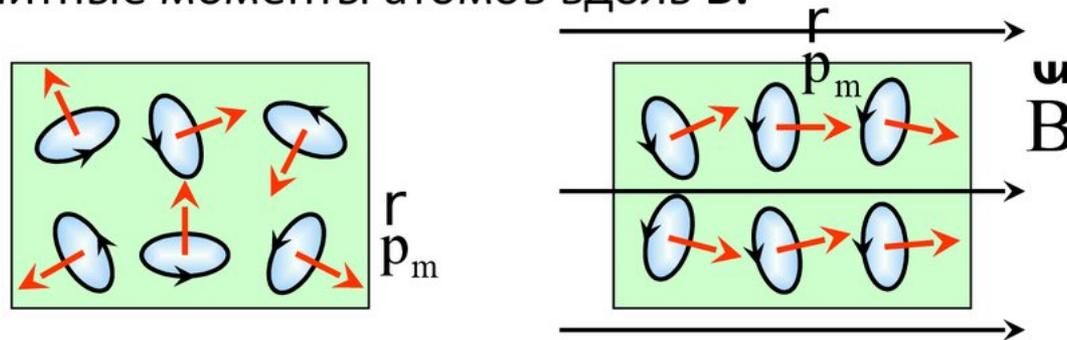
# Пример проявления сил Ампера в природе – действие сил Ампера на круговые микротоки в веществе

## Магнитное поле в веществе

**Парамагнетики** – это вещества, состоящие из атомов (молекул), имеющих магнитный момент и в отсутствие внешнего магнитного поля.

В отсутствие магнитного поля магнитные моменты всех атомов разориентированы.

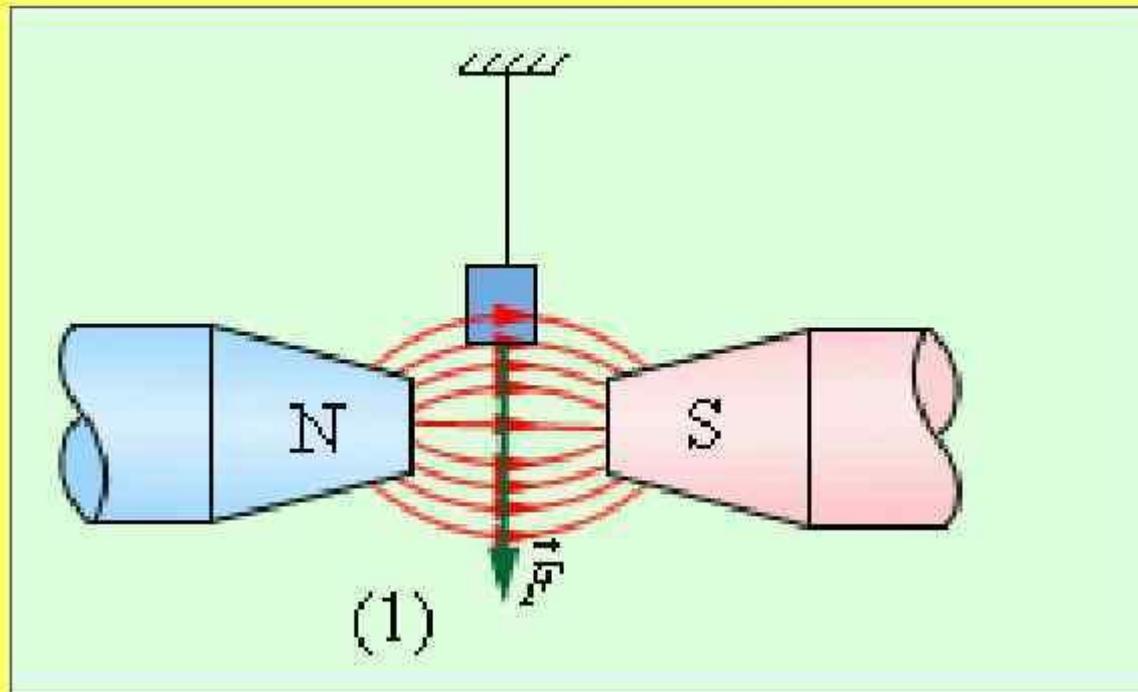
Внешнее магнитное поле стремится установить магнитные моменты атомов вдоль **B**.



Пример проявления сил Ампера в природе – действие сил Ампера на круговые микротоки в веществе

**Магнитное поле в веществе**

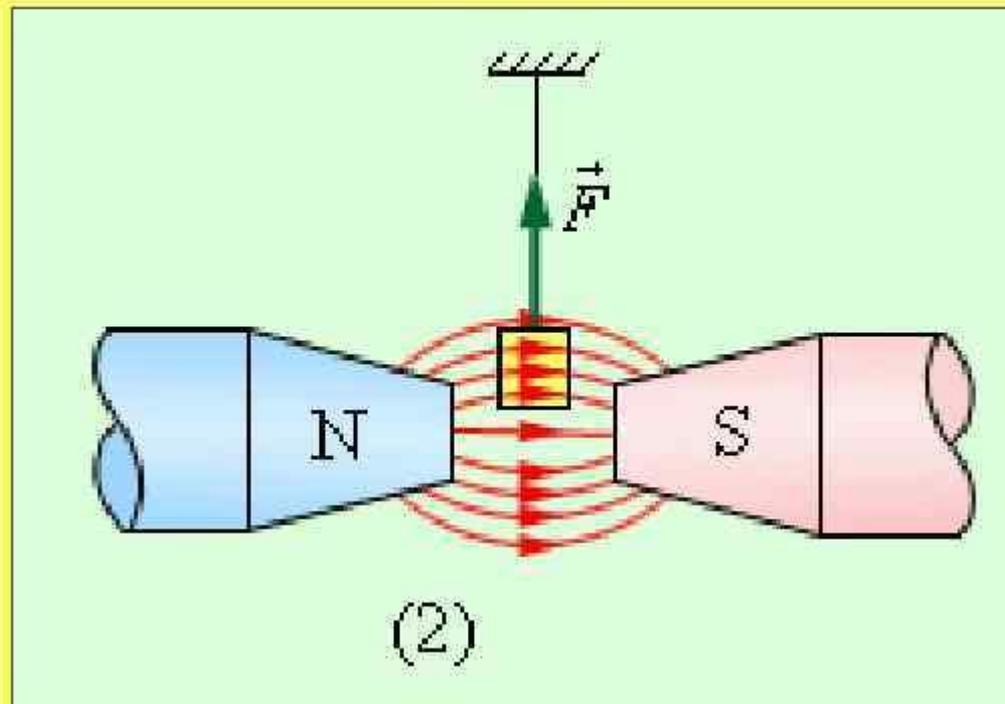
**Парамагнетик** втягивается в неоднородное магнитное поле



Пример проявления сил Ампера в природе – действие сил Ампера на круговые микротоки в веществе

**Магнитное поле в веществе**

**Диамагнетик** выталкивается из неоднородного магнитного поля

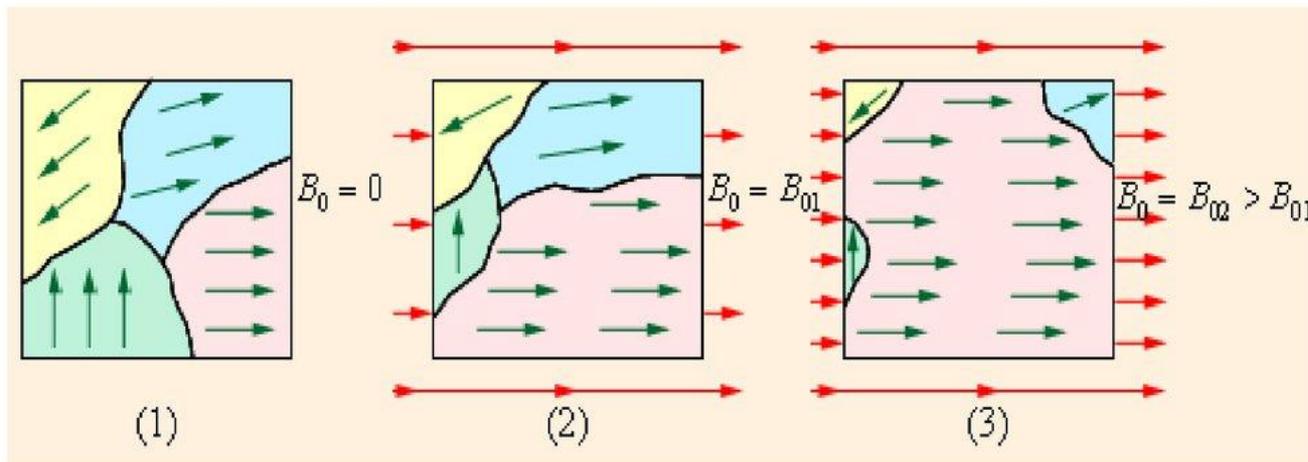


Объяснить свойства ферромагнетиков  
может квантовая физика

**Магнитное поле в веществе**

## Ферромагнетики

- **Ферромагнетики** – это вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, температуры.
- Области **спонтанного намагничивания** – домены (1-10 мкм).

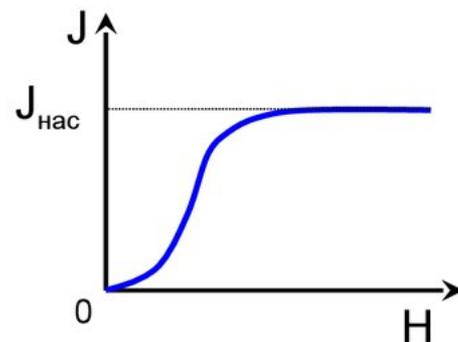
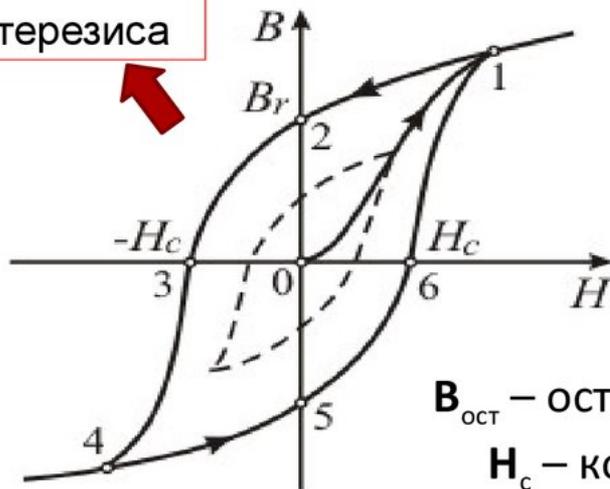


# Объяснить свойства ферромагнетиков может квантовая физика

## Магнитное поле в веществе

**Ферромагнетики** – вещества, способные обладать намагниченностью и в отсутствие внешнего поля.

петля  
гистерезиса



$B_{\text{ост}}$  – остаточная намагниченность;  
 $H_c$  – коэрцитивная сила – поле, способное размагнитить ферромагнетик.

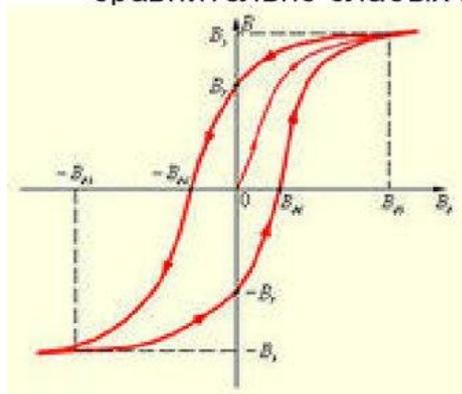
# Объяснить свойства ферромагнетиков

## может квантовая физика

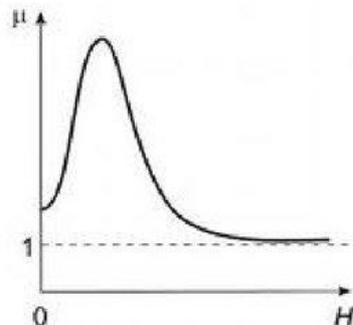
### Магнитное поле в веществе

#### Ферромагнетики

Существуют вещества, способные сильно намагничиваться в сравнительно слабых в внешних полях, называемые ферромагнетиками



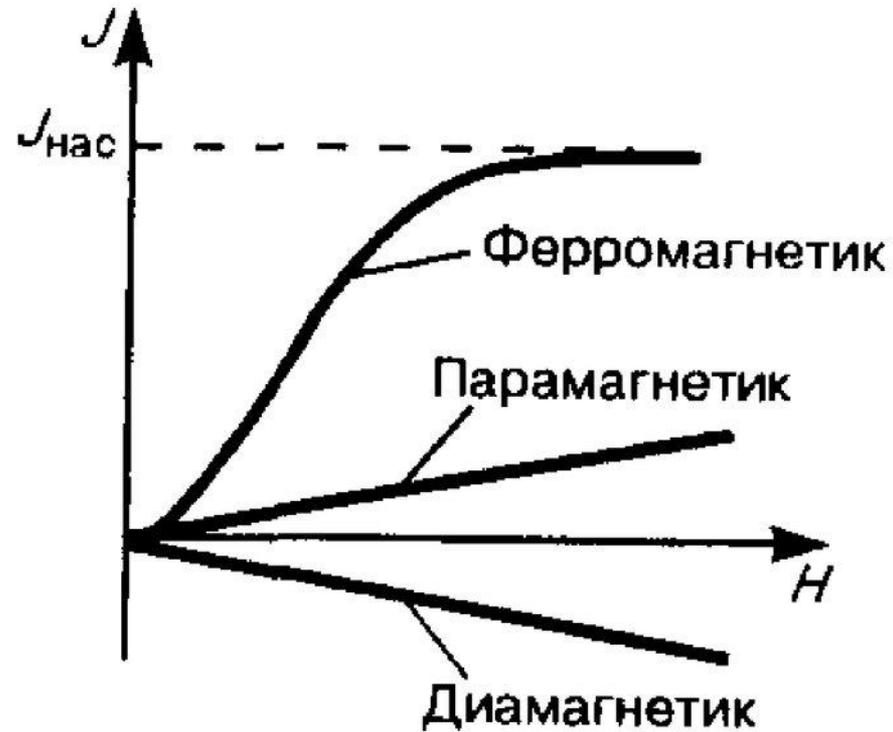
- а)  $\mu$  - велико ( $\sim 5 \cdot 10^3 - 8 \cdot 10^5$ );
- б)  $B(H)$  – нелинейна, т.е.  $\mu = \mu(H)$ ;
- в) Наблюдается гистерезис:  $B_r$  - остаточная индукция,  $H_c$  - коэрцитивная сила;
- г) имеют точку Кюри – температуру перехода из ферромагнитного в парамагнитное состояние



К ферромагнетикам относятся некоторые металлы: железо, никель, кобальт, ряд сплавов: пермаллой (78% Ni, 22% Fe), супермаллой (79% Ni, 16% Fe, 5% Mo), сплав железа с кремнием (96,7% Fe, 3,3% Si), алнико (51% Fe, 24% Co, 14% Ni, 8% Al, 3% Cu) и большое количество других. К ферромагнетикам относятся также ферриты, относящиеся к керамикам и обладающие очень высоким удельным электрическим сопротивлением

## Основные свойства магнетиков

### Магнитное поле в веществе



## Основные свойства магнетиков

### Магнитное поле в веществе

**Магнетики** можно разделить на три основные группы: *диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.*

*Если магнитное поле слабо усиливается в веществе, то такое вещество называется парамагнетиком*

$$\mu = \frac{B}{B_0} > 1 \quad (\text{Ce}^{3+}, \text{Pr}^{3+}, \text{Ti}^{3+}, \text{V}^{3+}, \text{Fe}^{2+}, \text{Mg}^{2+}, \text{Li}, \text{Na})$$

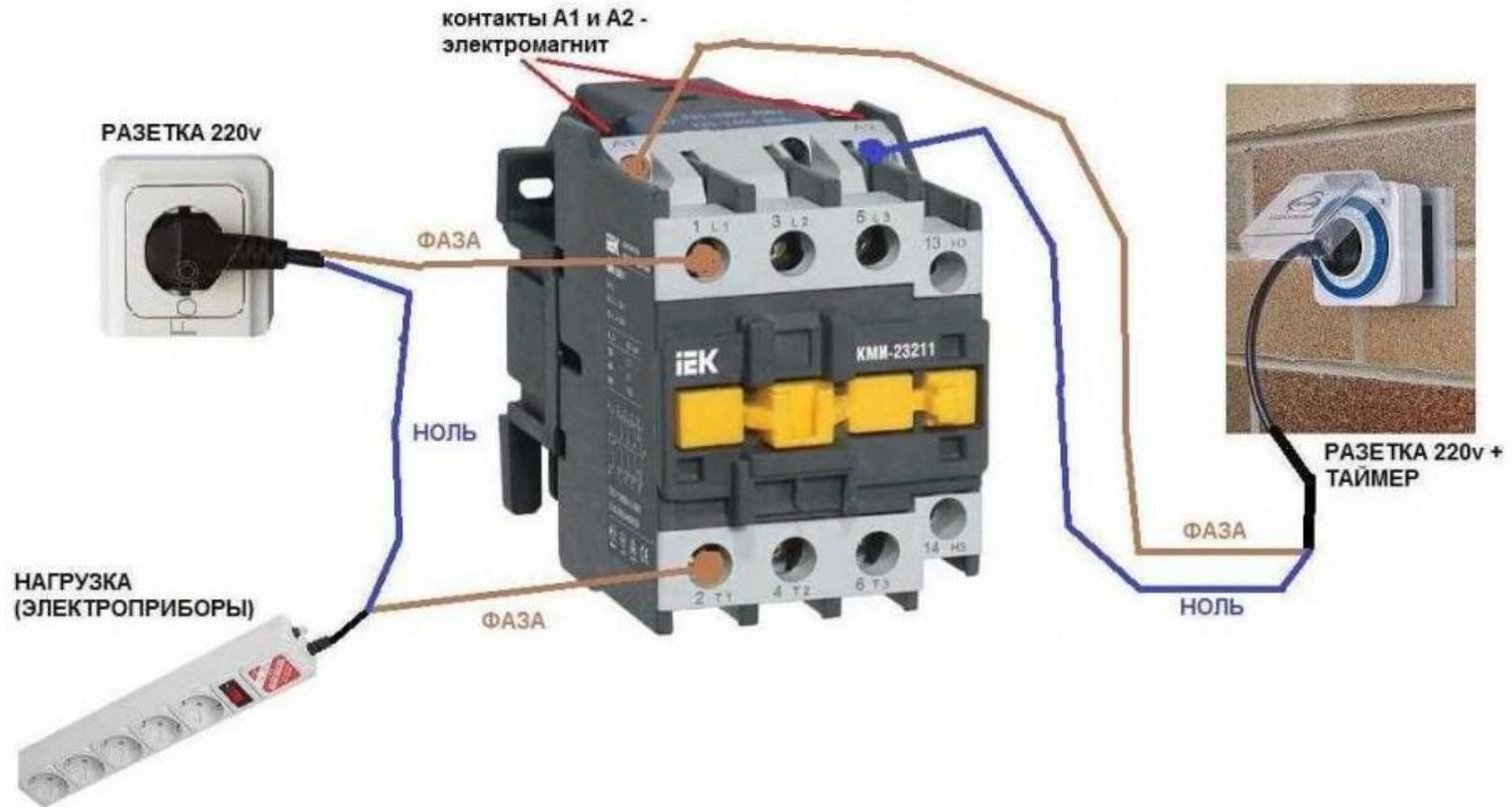
*если ослабевает, то это диамагнетик*

$$\mu = \frac{B}{B_0} < 1 \quad (\text{Bi}, \text{Cu}, \text{Ag}, \text{Au} \text{ и др.}).$$

*Вещества, обладающие сильными магнитными свойствами называются ферромагнетиками*

$$\mu = \frac{B}{B_0} \gg 1 \quad (\text{Fe}, \text{Co}, \text{Ni} \text{ и пр.}).$$

*постоянные магниты.*



«Всегда правильного включения в ситуацию»!