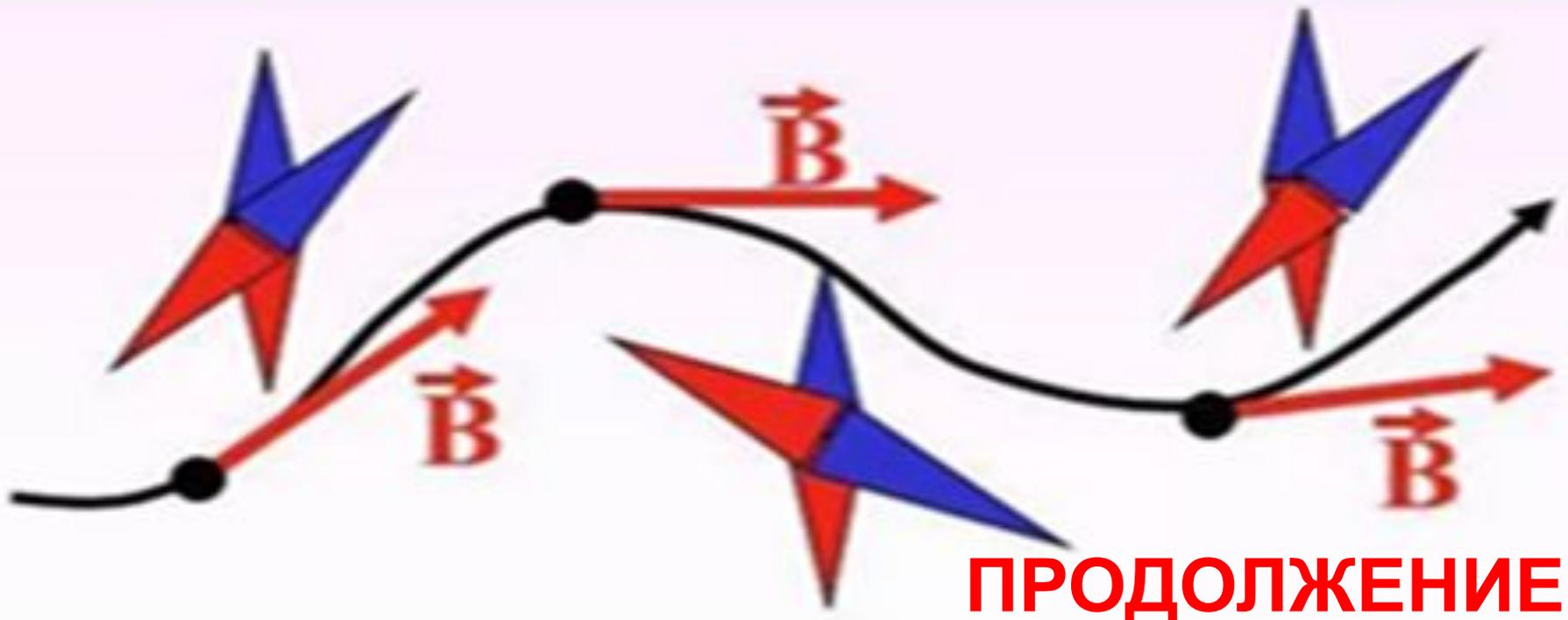


МАГНИТНОЕ ПОЛЕ



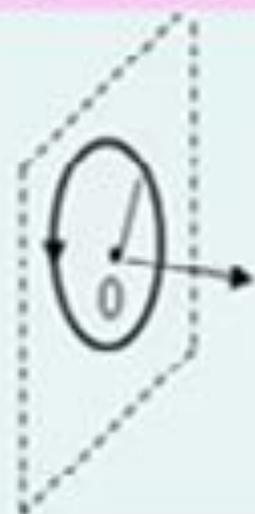
Магнитное поле - одна из форм электромагнитного поля. Магнитное поле создаётся движущимися электрическими зарядами и спиновыми магнитными моментами атомных носителей магнетизма (электронов и протонов).

Вектор магнитной индукции B - основная характеристика магнитного поля, аналогичная вектору напряжённости электрического поля.

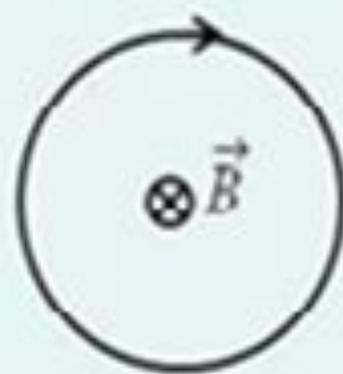
Магнитное поле на оси кругового витка с током



Магнитное поле в центре кругового витка с током



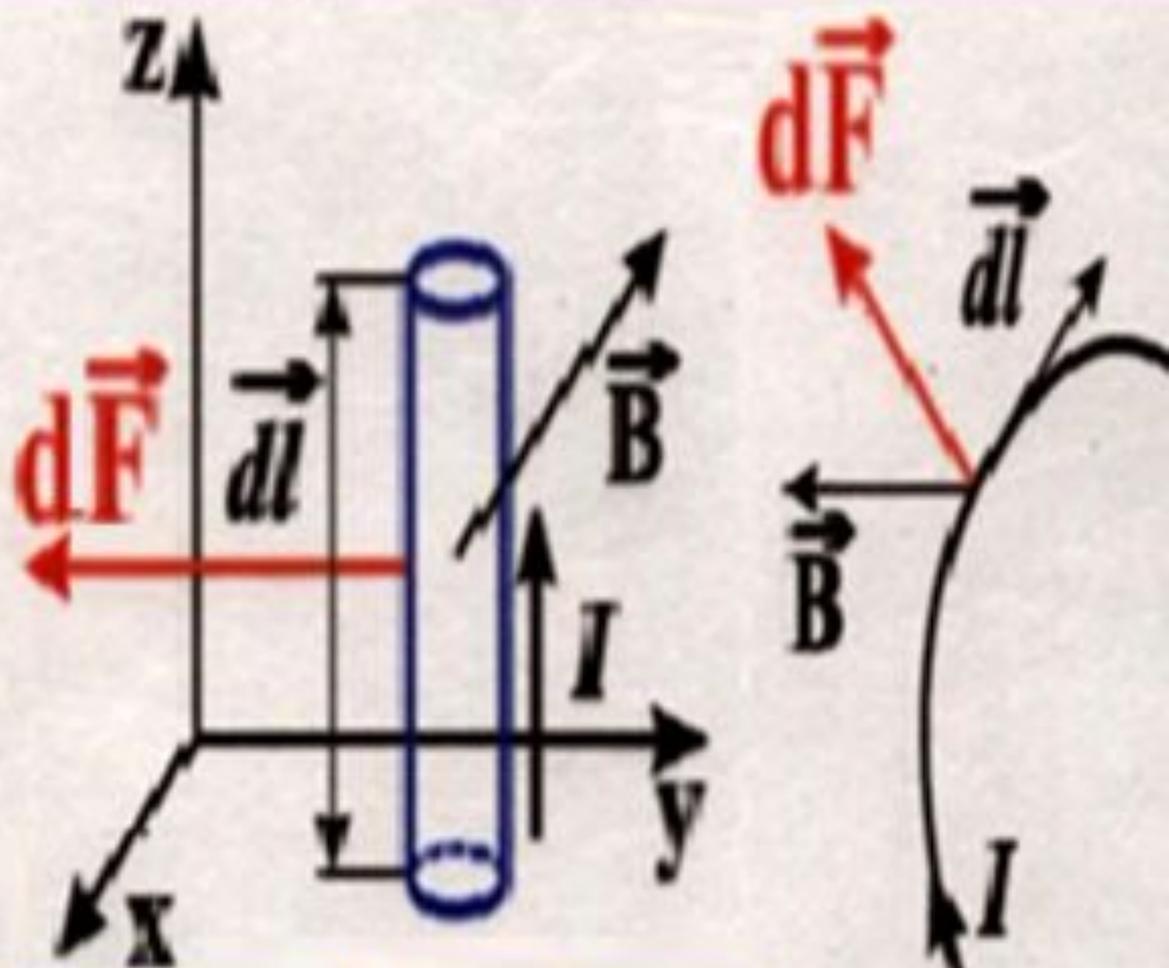
$$B = \frac{\mu_0 I}{2R}$$



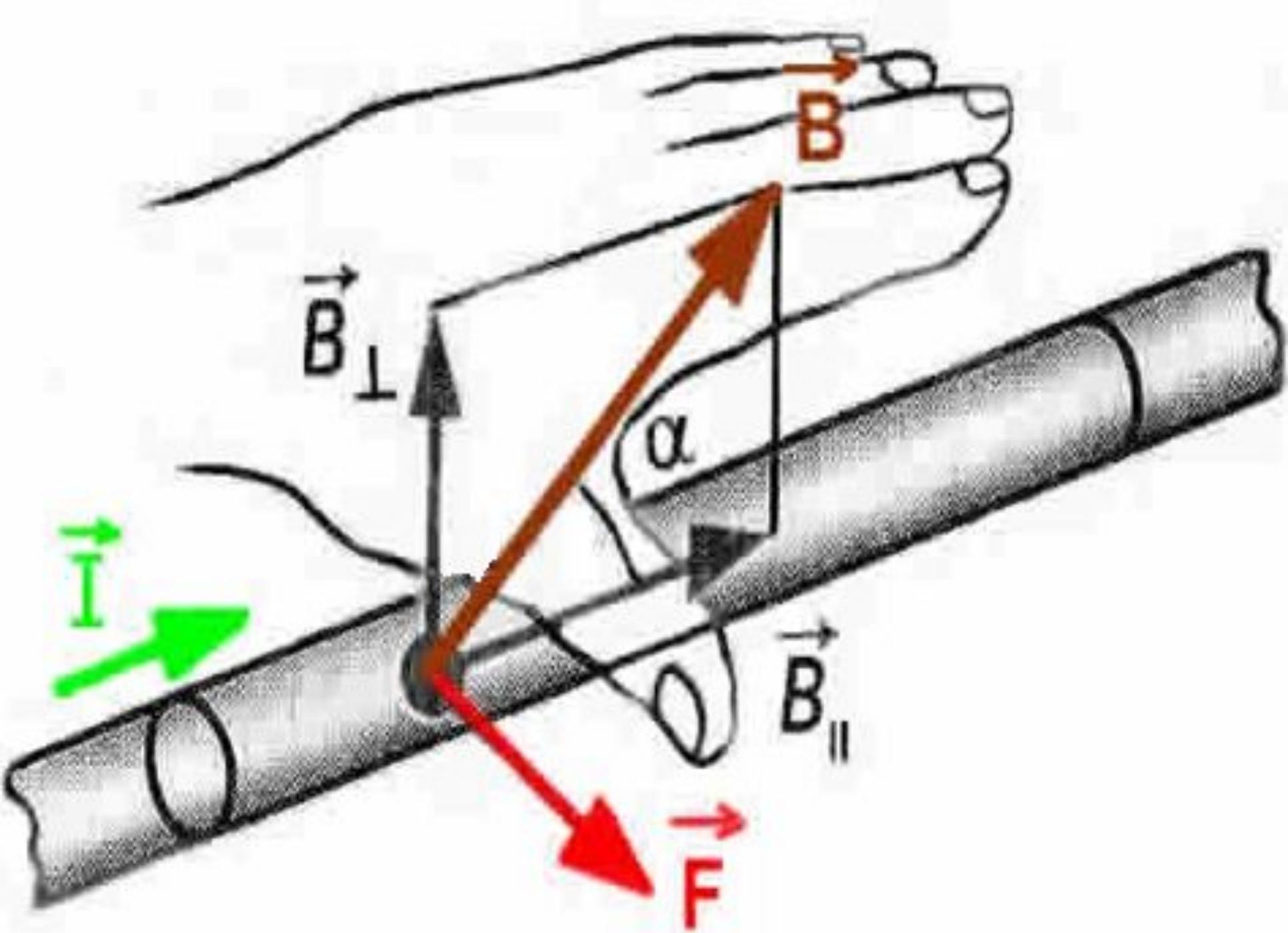
Сила Ампера - сила, с которой магнитное поле действует на проводник с током.

Сила Ампера

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



$$dF = I \cdot B \cdot dl \cdot \sin \alpha$$



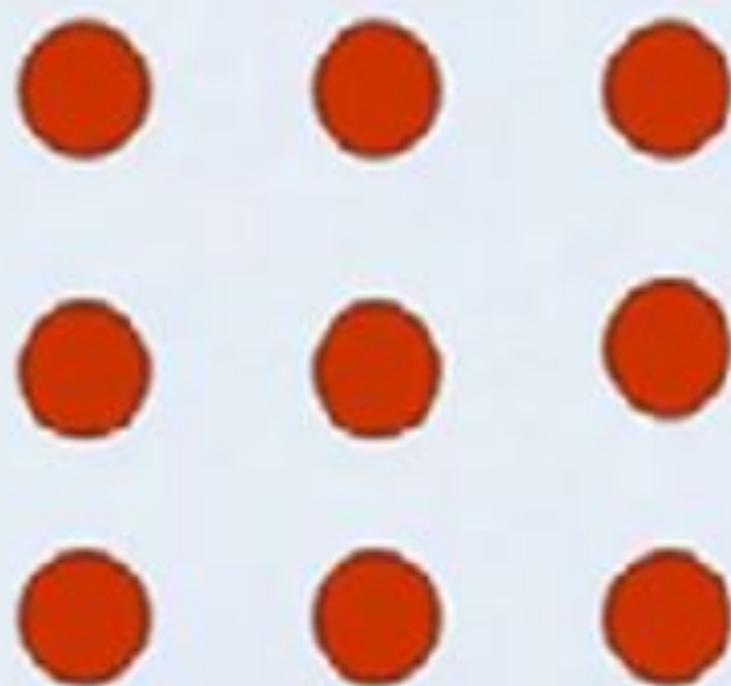
Для изображения магнитного поля пользуются следующим:

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

от нас за чертеж, то их изображают крестиками



из-за чертежа к нам – точками

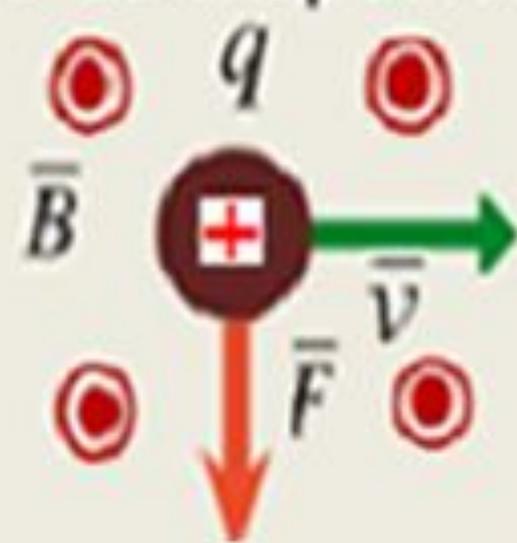


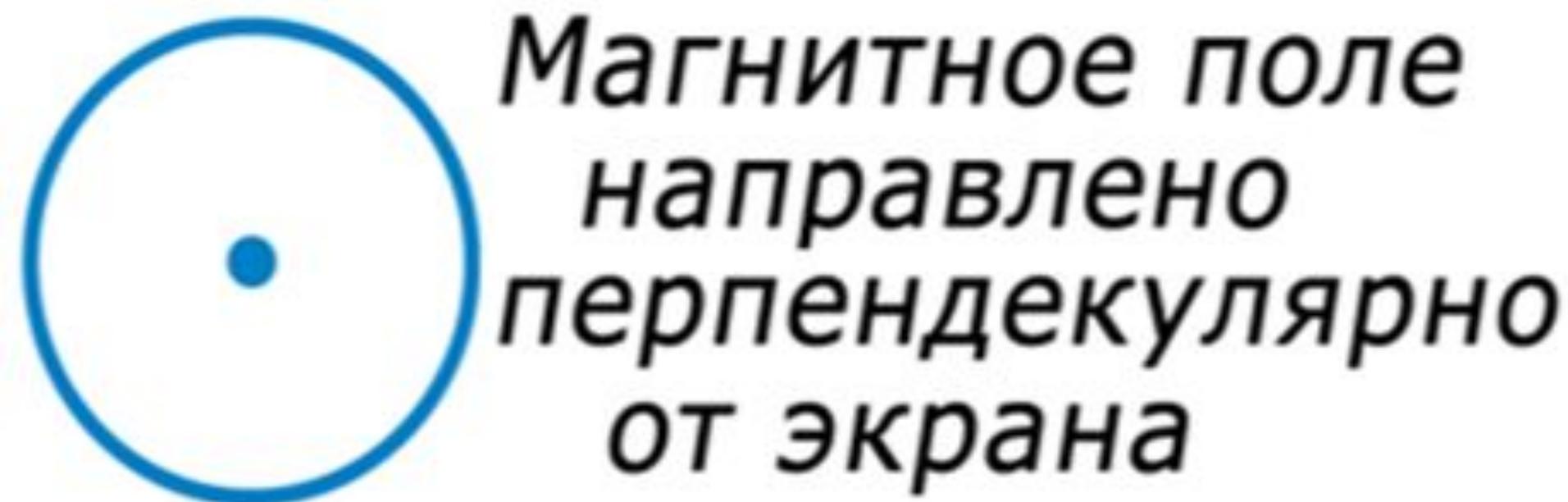
ДЕЙСТВИЕ МАГНИТНОГО ПОЛЯ НА ДВИЖУЩИЙСЯ ЗАРЯД

Магнитное поле действует не только на проводники с током, но и на отдельные движущиеся заряды.

Сила действующая на электрический заряд q , движущийся в магнитном поле \vec{B} со скоростью \vec{v} называется — **Сила Лоренца**

$$\vec{F} = q\vec{v}\vec{B}$$





действие магнитного поля на
движущийся электрический заряд

Сила Лоренца

$$F = q\vec{B}\vec{v}\sin\alpha$$

$$\alpha = (B, v)$$

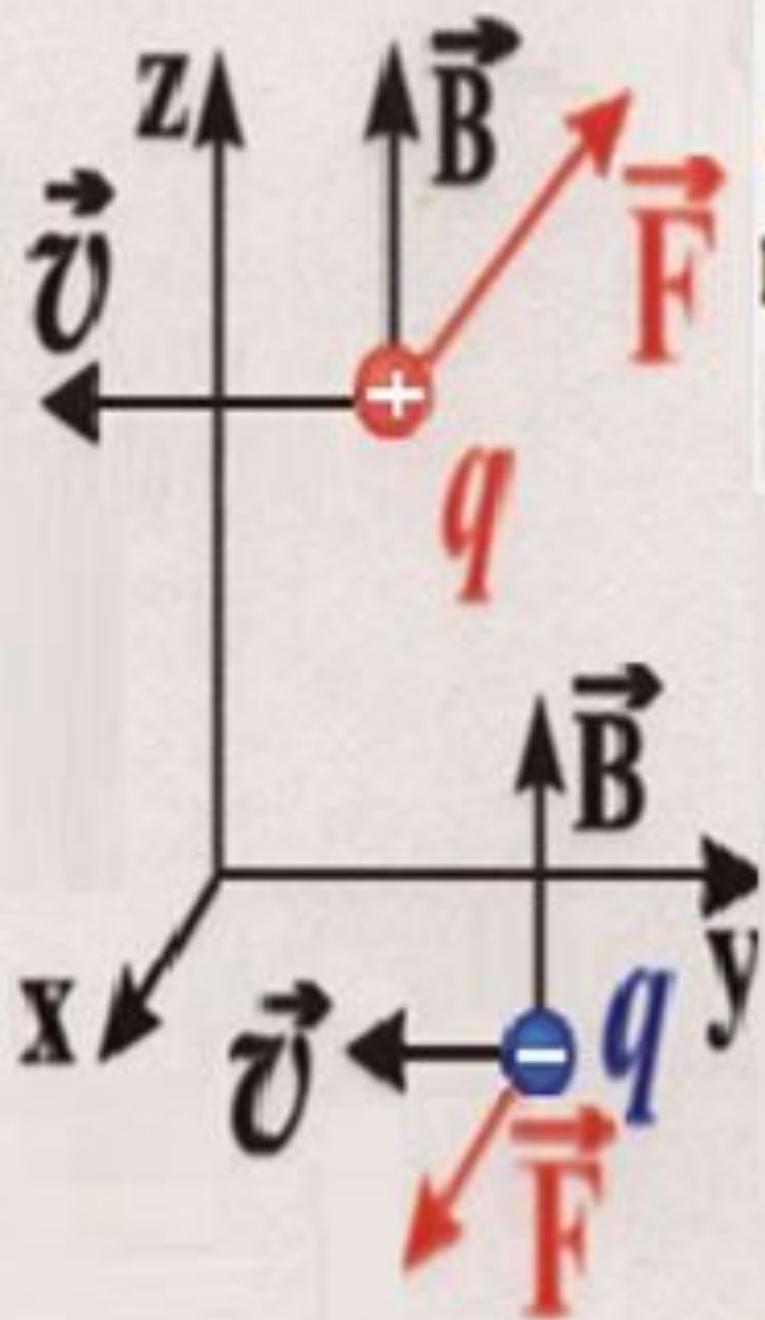


Сила Лоренца-

сила, с которой магнитное поле действует на движущуюся в нем заряженную частицу.

$$d\vec{F} = I [d\vec{l}, \vec{B}] \quad \left. \begin{array}{l} \text{сила} \\ \text{Ампера} \end{array} \right\} \vec{F} = q [\vec{V}, \vec{B}]$$
$$I = \frac{dq}{dt} \quad \vec{V} = \frac{d\vec{l}}{dt}$$

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



Сила действующая со стороны магнитного поля на движущийся заряд перпендикулярна направлению его движения и вектору магнитной индукции.

Сила Лоренца

$$\vec{F} = q [\vec{v} \vec{B}]$$

Раз поле перемещает заряды, следовательно, оно обладает силой. *Введем вектор напряженности вихревого электрического поля \vec{E}' .*

Сила с которой поле действует на заряд: $\vec{F}' = q\vec{E}'$

Но когда заряд движется в магнитном поле, на него действует сила Лоренца $\vec{F}' = q[\vec{v}, \vec{B}]$

Эти силы должны быть равны—закон сохранения энергии:

$$q\vec{E}' = -q[\vec{v}, \vec{B}], \text{ отсюда}$$

$$\vec{E}' = -[\vec{v}, \vec{B}]$$

Здесь \vec{v} - скорость движения заряда q относительно \vec{B}

Но для явления электромагнитной индукции важна скорость изменения магнитного поля \vec{B} .

Поэтому можно записать: $\vec{E}' = -[\vec{v}_B, \vec{B}]$

\vec{v}_B -скорость движения поля относительно заряда.

Сила Лоренца

действующая на движущийся в электромагнитном поле заряд:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v} \times \vec{B}]$$

Первый компонент не зависит от скорости движения заряда и называется электрической составляющей силы Лоренца:

$$\vec{F}_E = q\vec{E}$$

Второй компонент называется магнитной составляющей силы Лоренца, возникает только при движении заряда:

$$\vec{F}_M = q[\vec{v} \times \vec{B}]$$

Теорема о циркуляции вектора индукции магнитного поля

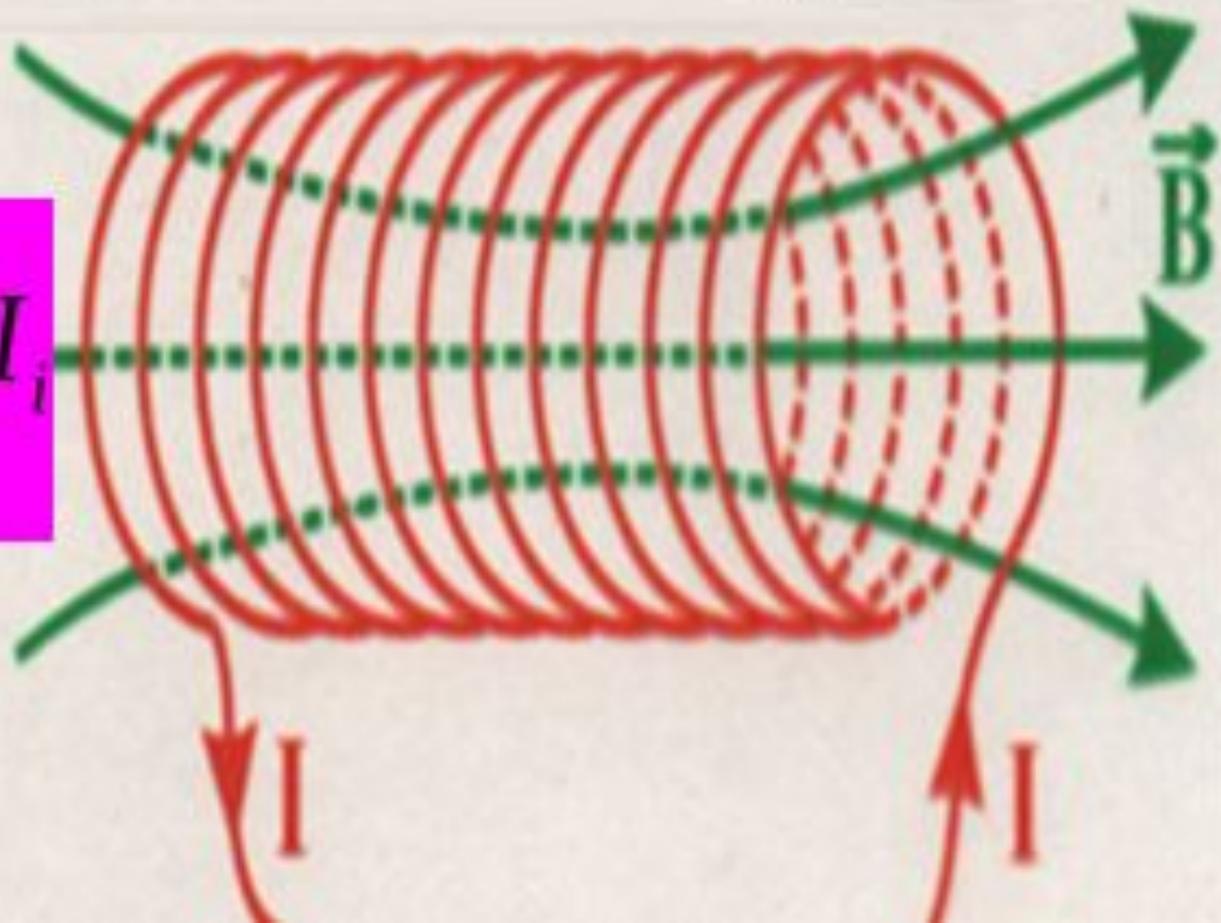
в интегральной форме: *циркуляция вектора индукции магнитного поля в вакууме по произвольному замкнутому контуру равна сумме токов, охватываемых этим контуром, умноженной на магнитную постоянную*

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^N I_i$$

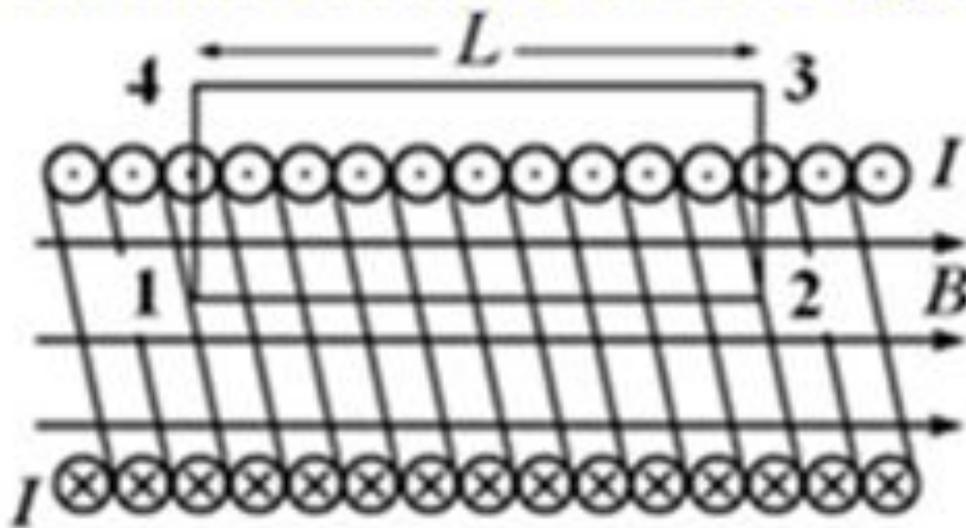
Магнитному полю нельзя приписывать потенциал, как электрическому полю. Этот потенциал не был бы однозначным: после каждого обхода по контуру он получал бы приращение $\mu_0 I$.

Циркуляция вектора \vec{B} по произвольному контуру
равна алгебраической сумме токов, охватываемых
контуром, умноженной на μ_0 .

$$\oint_L \vec{B} \cdot d\vec{l} = \mu_0 \sum_{i=1}^n I_i$$



Магнитное поле длинного соленоида



Возьмем замкнутый прямоугольный контур 1-2-3-4.

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \int_1^2 \vec{B} d\vec{l} + \int_2^3 \vec{B} d\vec{l} + \int_3^4 \vec{B} d\vec{l} + \int_4^1 \vec{B} d\vec{l} = BL$$

$1 \vec{B} \uparrow \uparrow d\vec{l}$
 $2 \vec{B} \perp d\vec{l}$
 $3 B=0$
 $4 \vec{B} \perp d\vec{l}$

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 N_L I$$

$$BL = \mu_0 N_L I \Rightarrow B = \frac{\mu_0 N_L I}{L} = \mu_0 n I$$

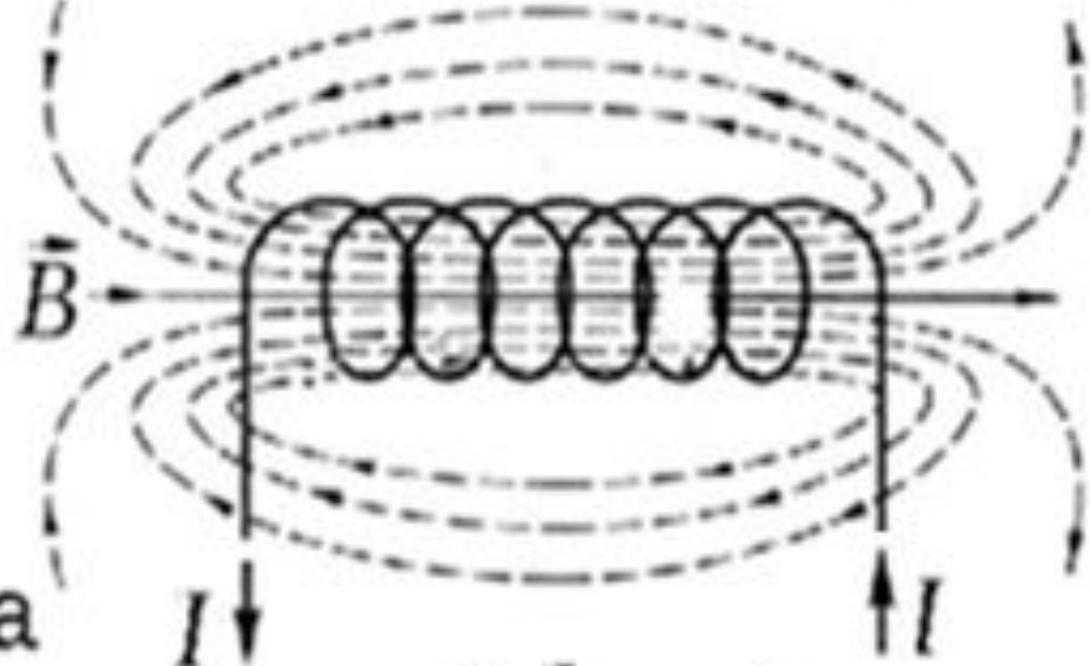
n – число витков соленоида на единицу длины L

Магнитное поле
внутри соленооида

$$B = \frac{\mu_0 NI}{L}$$

N – число витков

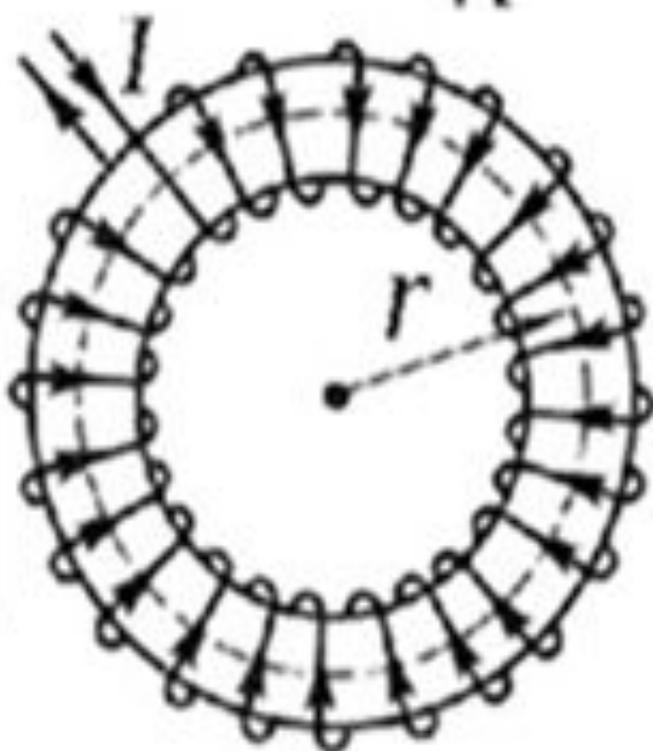
L – длина соленооида



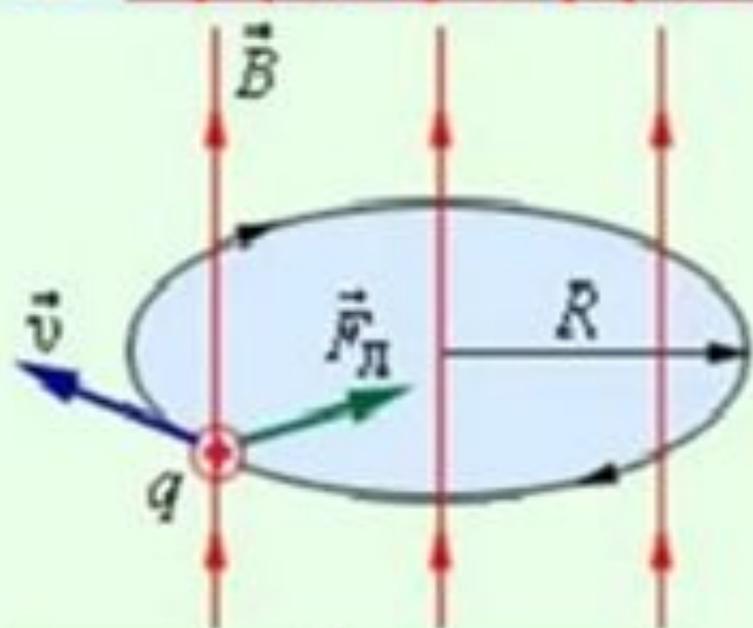
Магнитное поле внутри
тороида

$$B \cdot 2\pi r = \mu_0 NI \quad B = \frac{\mu_0 NI}{2\pi r}$$

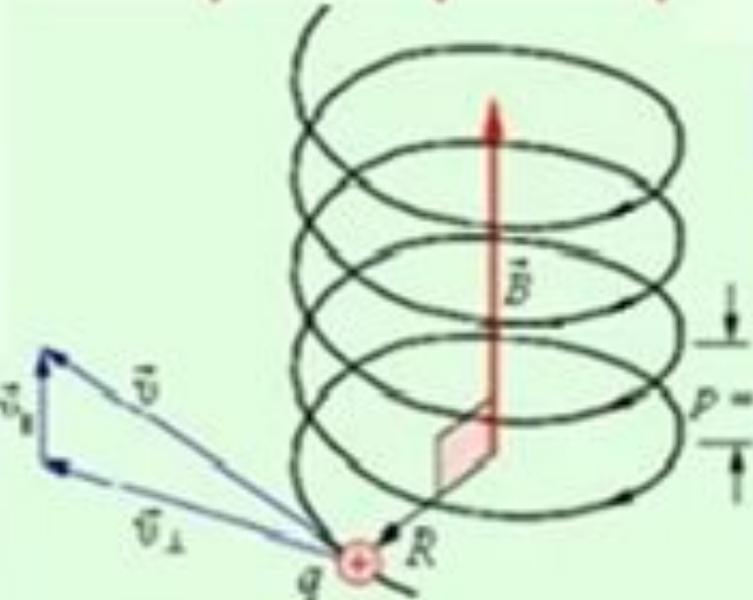
Поле вне тороида отсутствует



Движение заряженной частицы в однородном магнитном поле



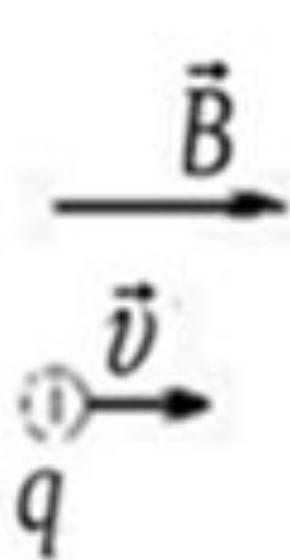
Если частица влетает в однородное магнитное поле *перпендикулярно* линиям магнитной индукции, то она начинает двигаться по *окружности*.



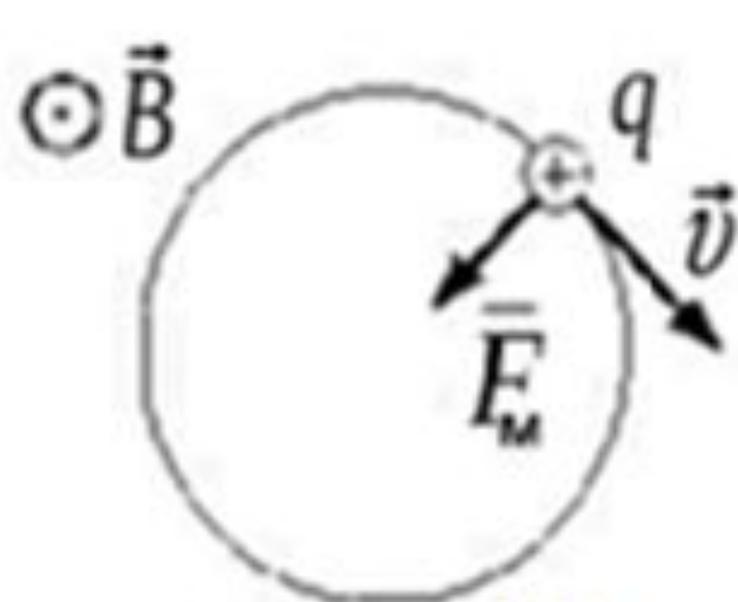
Если частица влетает в магнитное поле *под углом* к силовым линиям, то она начинает двигаться по *винтовой линии*, охватывающей силовые линии магнитного поля.

Модуль магнитной силы Лоренца зависит от направления движения заряда в магнитном поле:

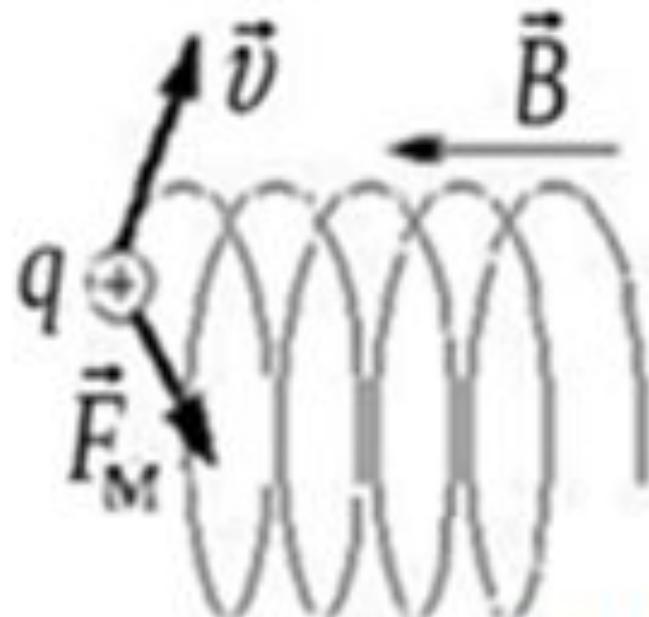
$$F_M = qvB \sin \alpha$$



$$\alpha = 0$$



$$\alpha = \pi/2$$



$$0 < \alpha < \pi/2$$

$$v = \text{const}, a_{\tau} = 0,$$

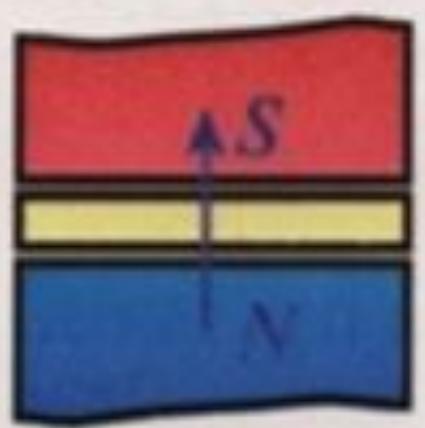
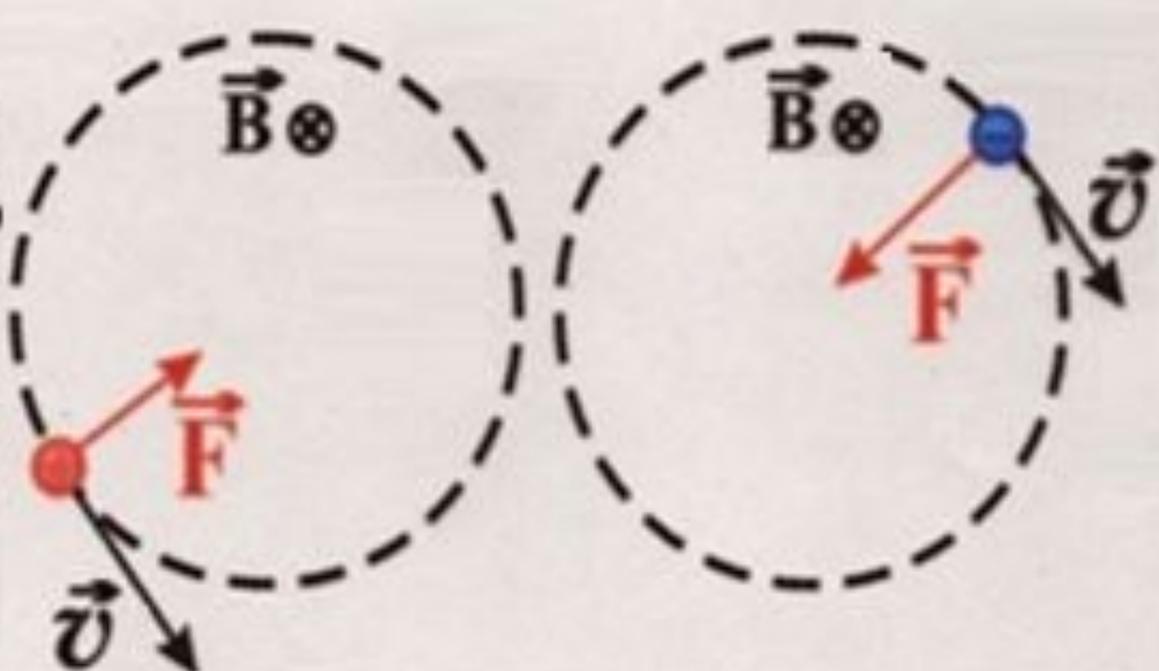
$$a_n = \frac{F}{m} = \frac{qvB}{m}, a_n = \frac{v^2}{R},$$

$$R = \frac{mv}{qB}, T = \frac{2\pi m}{qB},$$

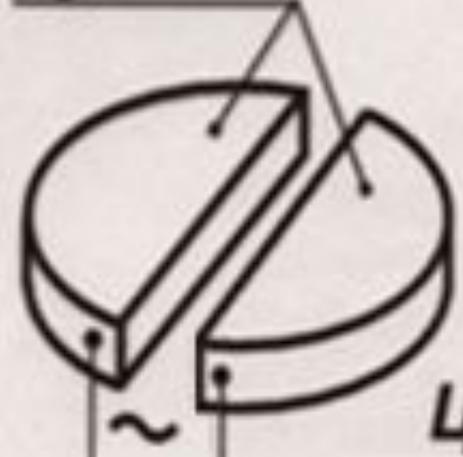
$$v = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m}.$$

Частота
не зависит
от скорости.

Движение заряженной частицы
в однородном магнитном поле.



дуанты

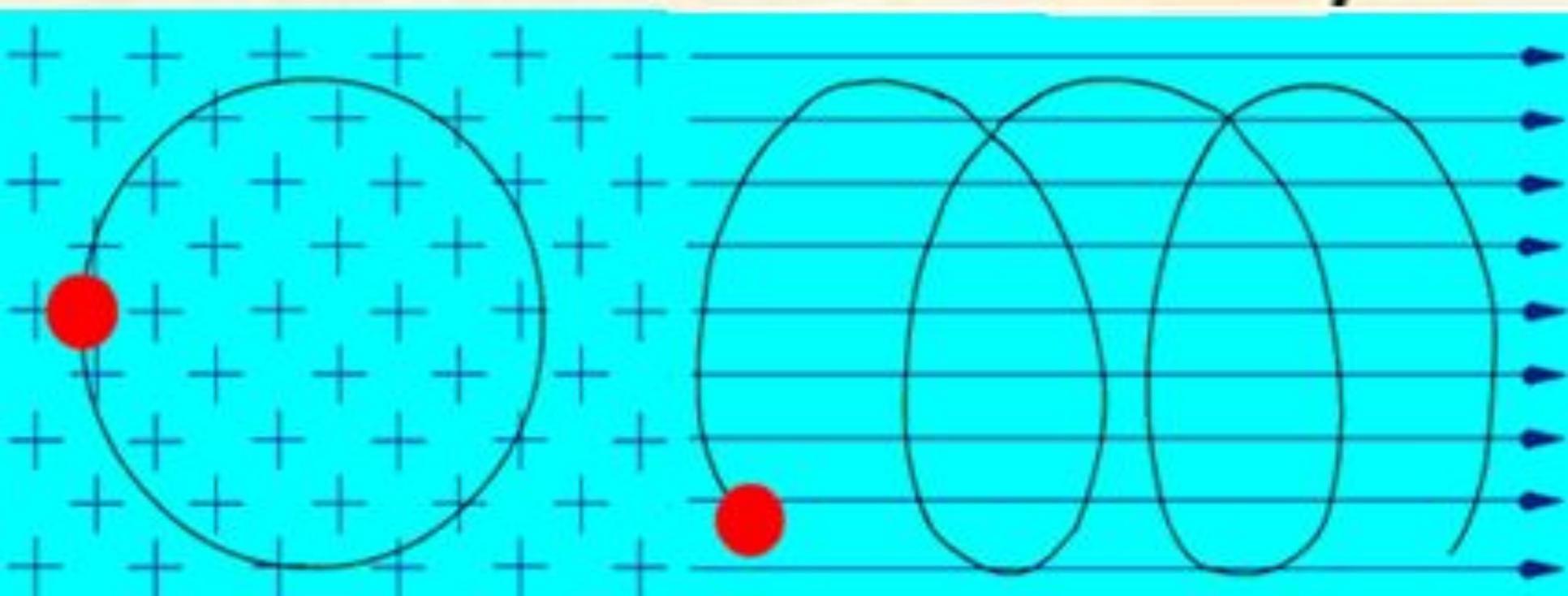


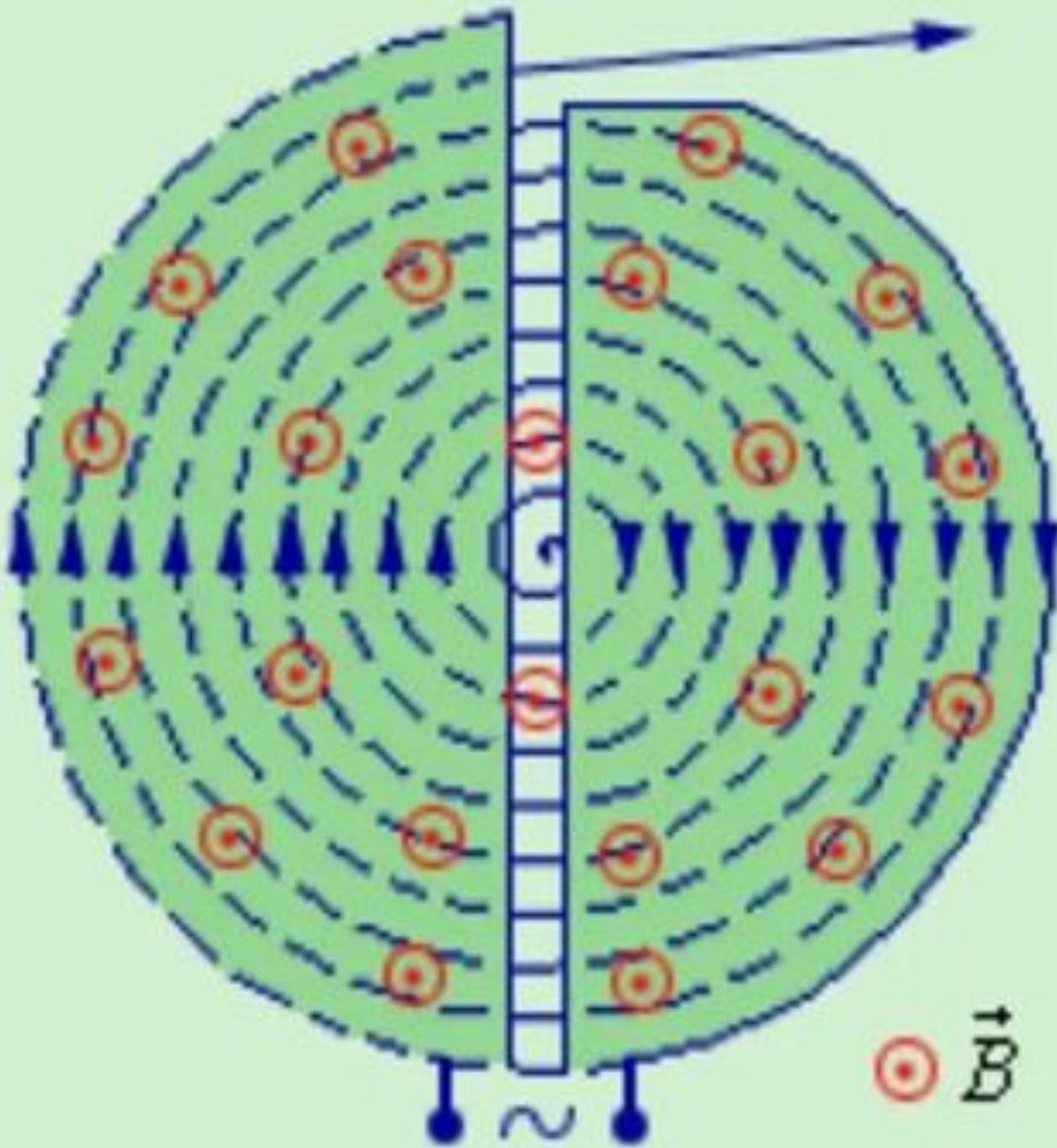
Циклотрон



Радиус R траектории движения

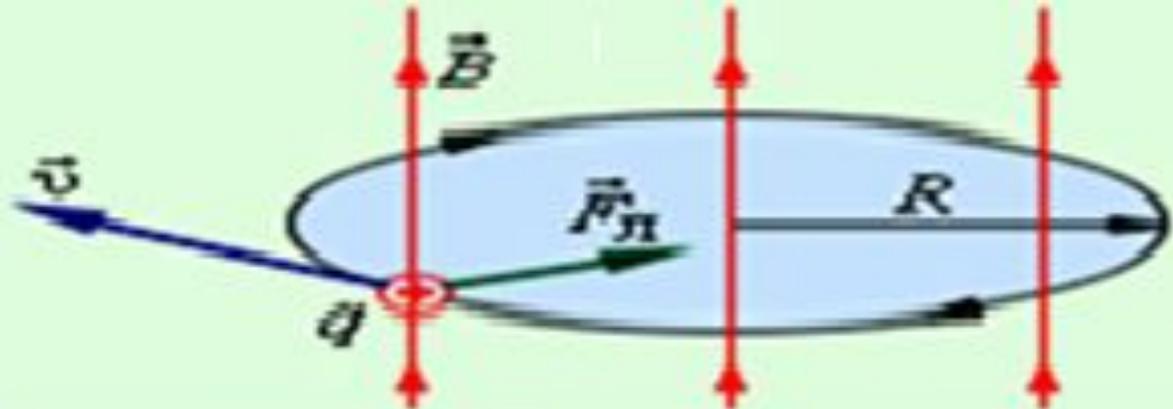
заряда по окружности: $R = \frac{mv}{qB}$





ДВИЖЕНИЕ
ЗАРЯЖЕННОЙ
ЧАСТИЦЫ В
ЦИКЛОТРОНЕ

↑Ω

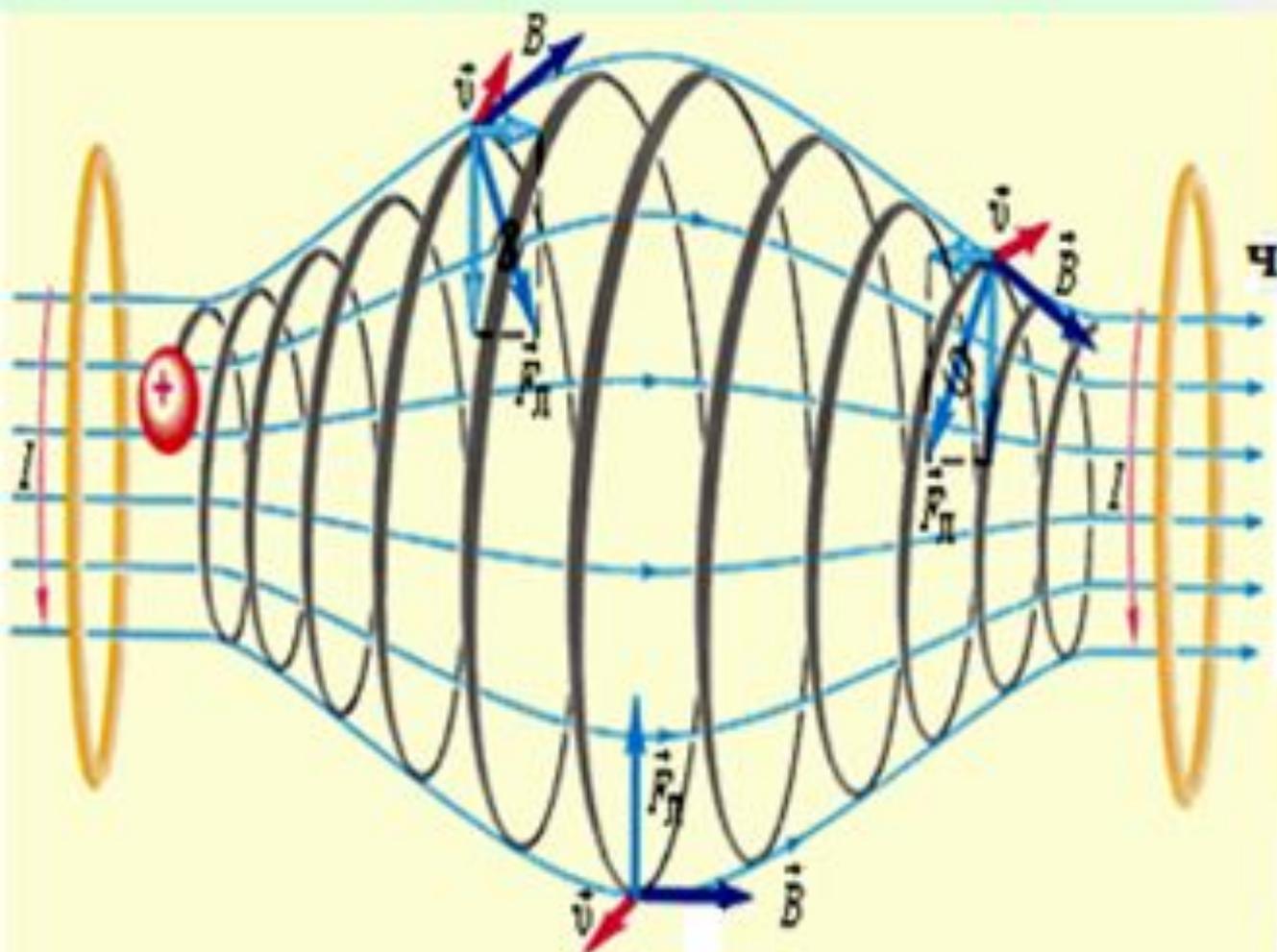


**Круговое движение
заряженной частицы
в однородном
магнитном поле.**

**Магнитная
«бутылка».**

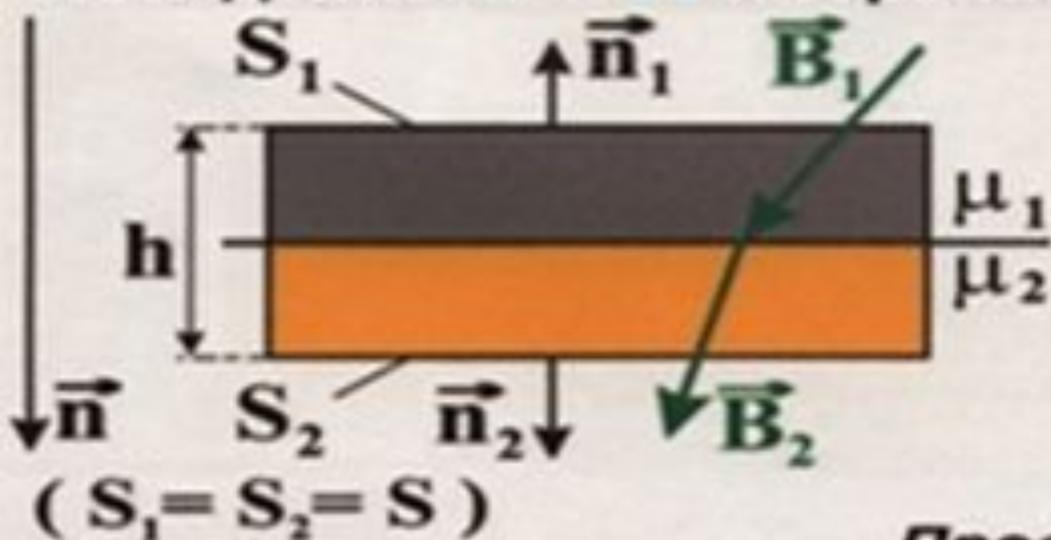
Заряженные

**частицы не выходят
за пределы
«бутылки».**



**Магнитное поле
«бутылки» может
быть создано с
помощью двух
круглых катушек
с током.**

Поведение \vec{B} и \vec{H} на границе раздела магнетиков



$$\int_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

При $h \rightarrow 0$

$$\Phi = \vec{B}_{1n_1} S_1 + \vec{B}_{2n_2} S_2 = 0$$

$$= (\vec{B}_{1n_1} + \vec{B}_{2n_2}) S = 0$$

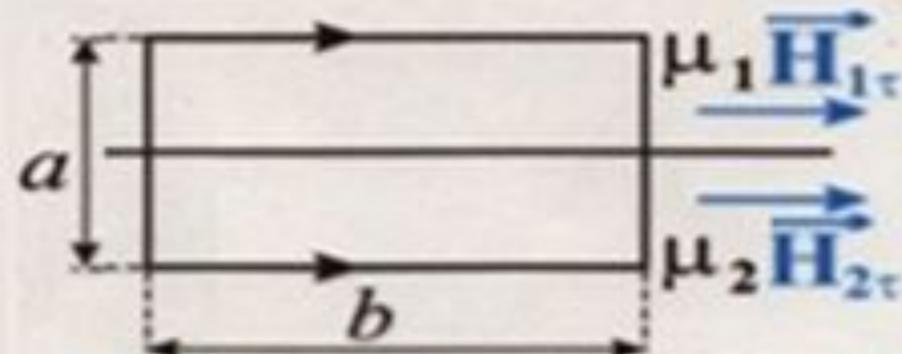
Отсюда $\vec{B}_{1n_1} = -\vec{B}_{2n_2}$

Проектируя на \vec{n} , получаем:

$$\vec{B}_{1n} = \vec{B}_{2n}$$

т.к. $\mu_0 \mu_1 \vec{H}_{1n} = \mu_0 \mu_2 \vec{H}_{2n}$,

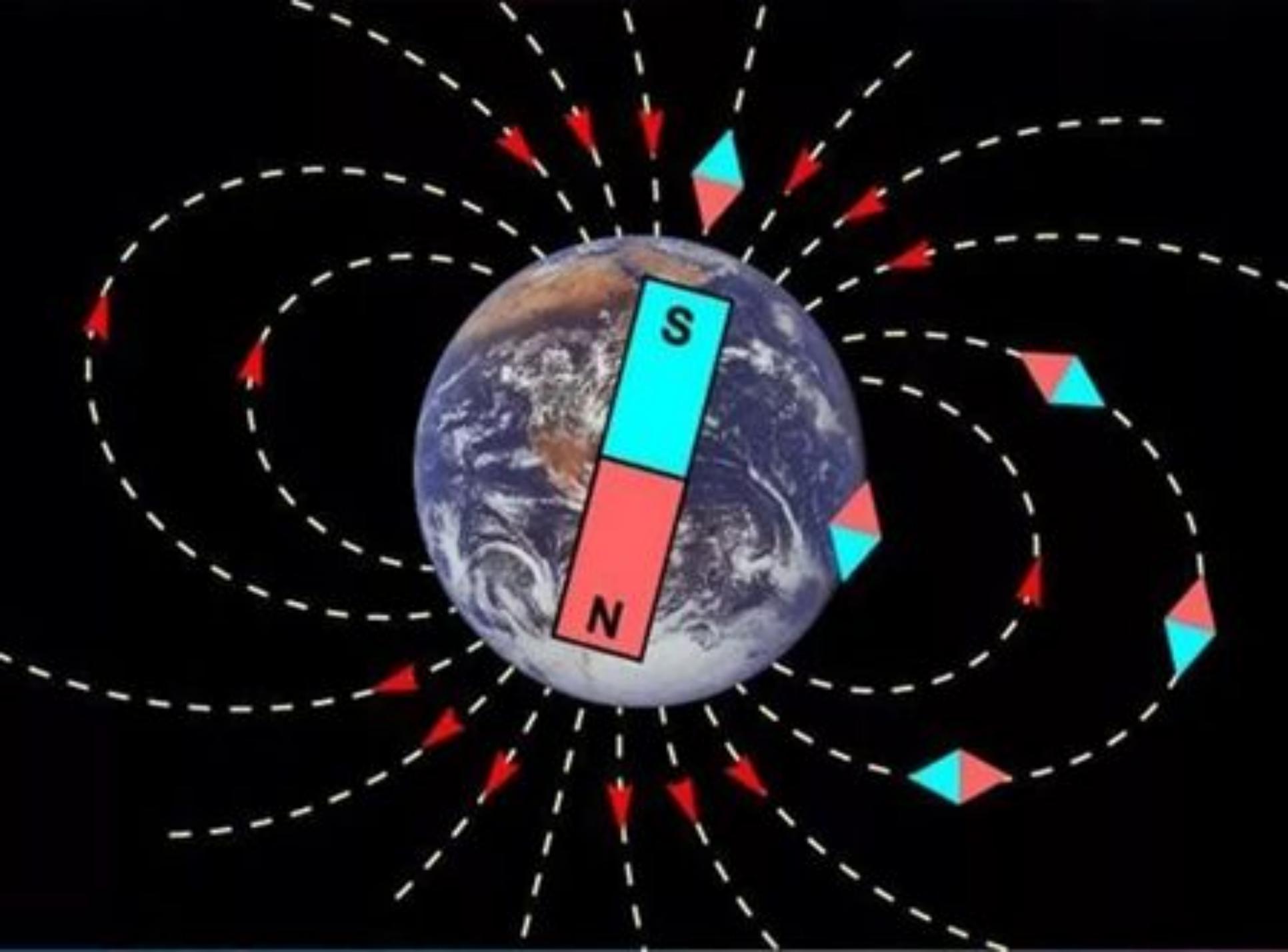
то $\frac{H_{1n}}{H_{2n}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$



$$\oint \vec{H} d\vec{l} = \int \vec{j} d\vec{S}, \text{ при } \vec{j} = 0, a \rightarrow 0, H_{1t} b - H_{2t} b = 0$$

Отсюда $H_{1t} = H_{2t}$

Т.к. $\frac{B_{1t}}{\mu_0 \mu_1} = \frac{B_{2t}}{\mu_0 \mu_2}$, то $\frac{B_{1t}}{B_{2t}} = \frac{\mu_1}{\mu_2}$



Магнитное поле Земли похоже на поле намагниченной сферы с магнитной осью, наклоненной на $11,5^\circ$ к оси вращения *Земли*.

Южный магнитный полюс Земли, к которому притягивается северный конец стрелки компаса, не совпадает с Северным географическим полюсом.

Северный магнитный полюс Земли расположен в Антарктиде.

Напряженность магнитного поля на полюсах больше чем на экваторе.

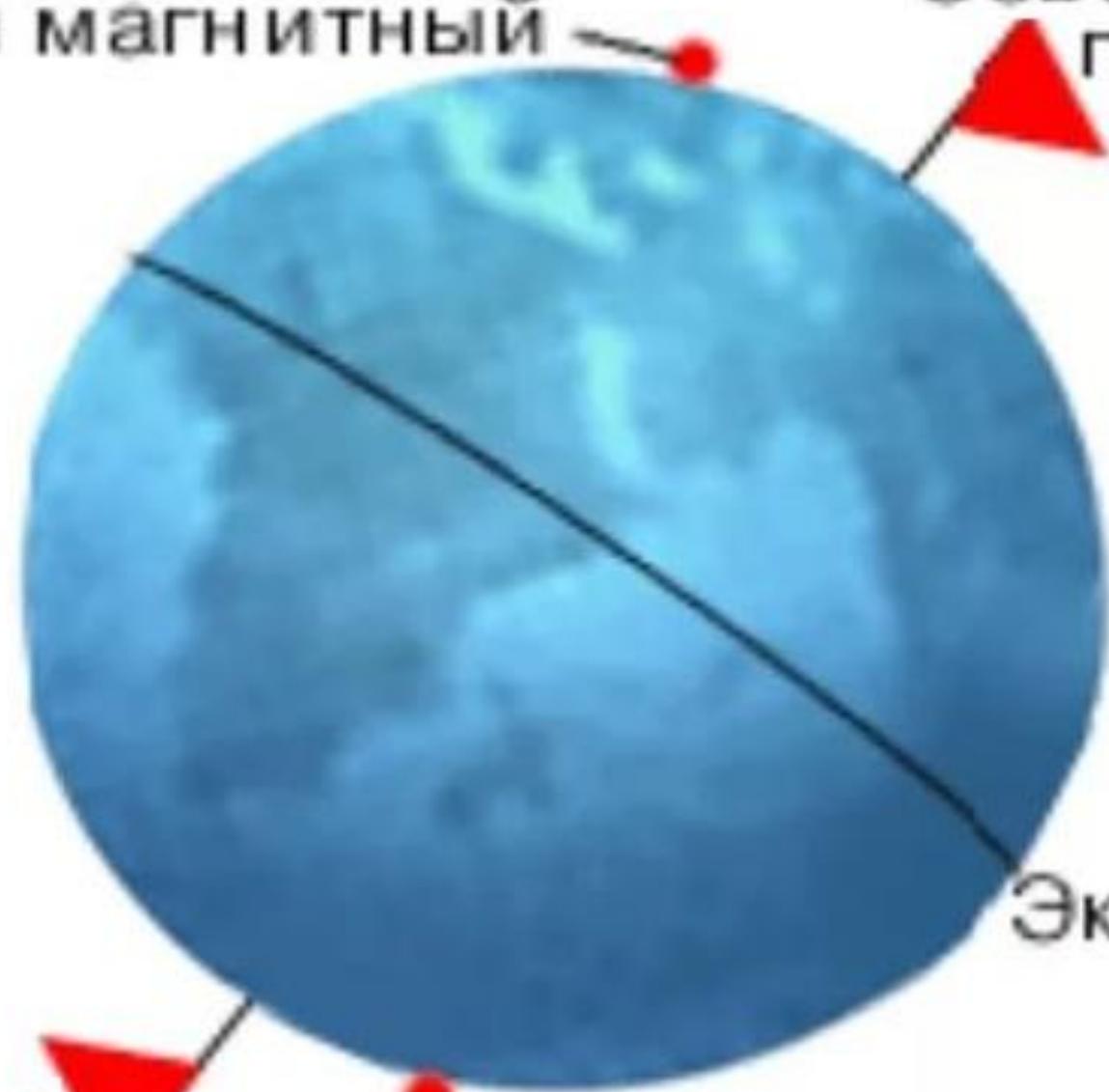
Магнитные полюсы Земли не совпадают с её географическими полюсами. Южный магнитный полюс Земли удалён от Северного географического полюса примерно на 2100км.

Северный магнитный полюс Земли находится вблизи Южного географического полюса, на 66,5град. Ю.Ш. и 140град. В.Д.



Южный магнитный
полюс

Северный
полюс



Экватор

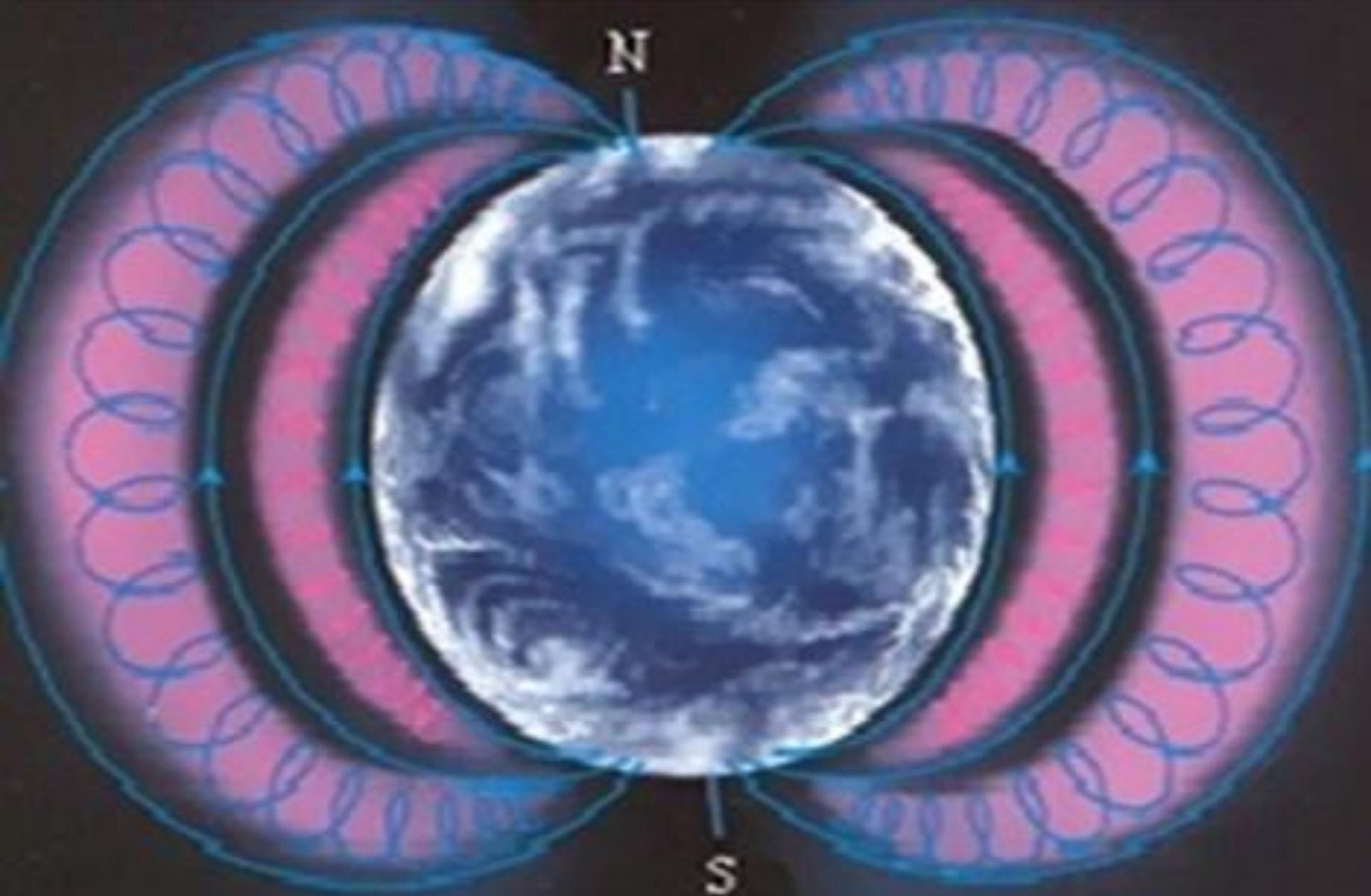
Южный
полюс

Северный магнитный
полюс



Район Земли, где расположен Южный полюс, Антарктида, участок суши, покрытый толстым слоем льда. Самый яркий представитель животного мира Антарктиды-пингвин.

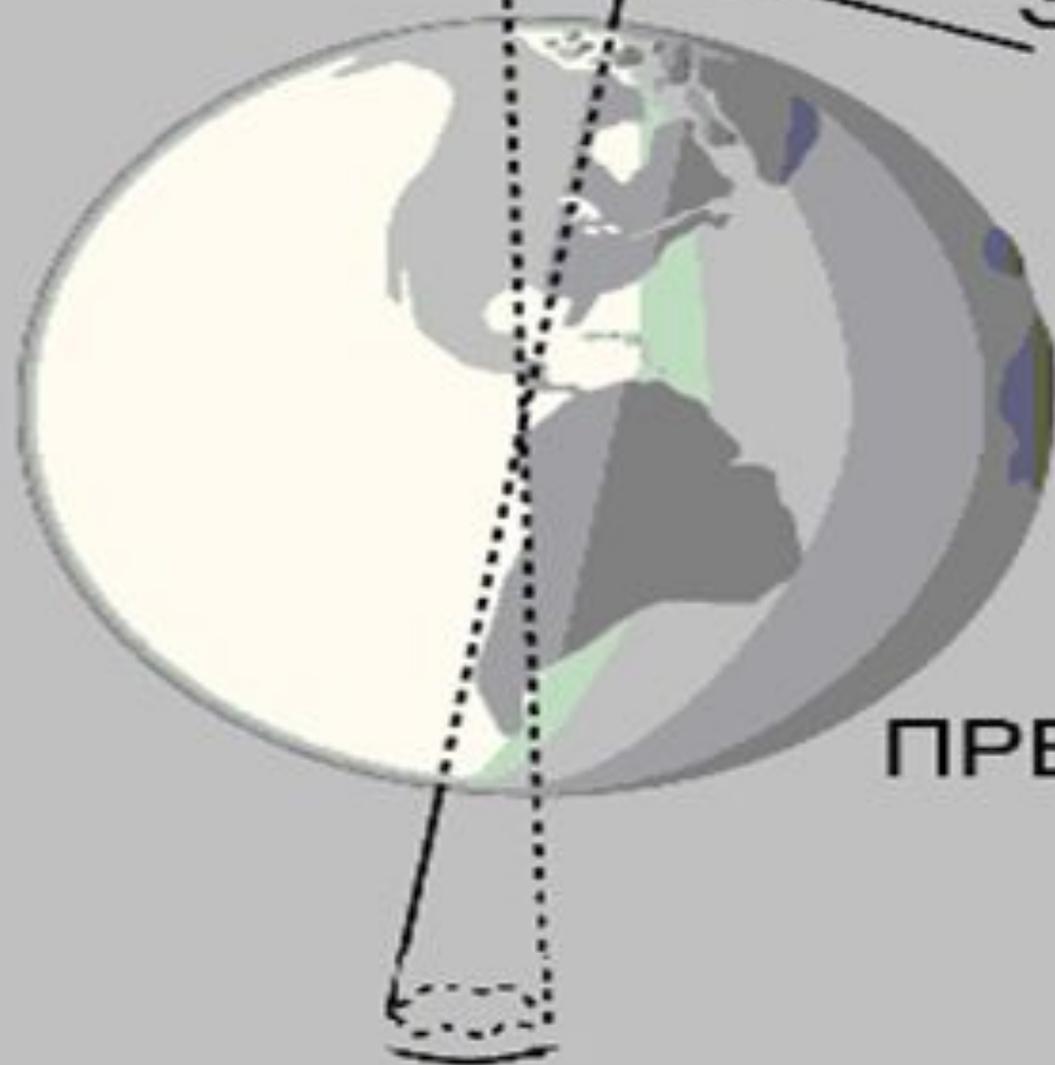
РАДИАЦИОННЫЕ ПОЯСА ЗЕМЛИ



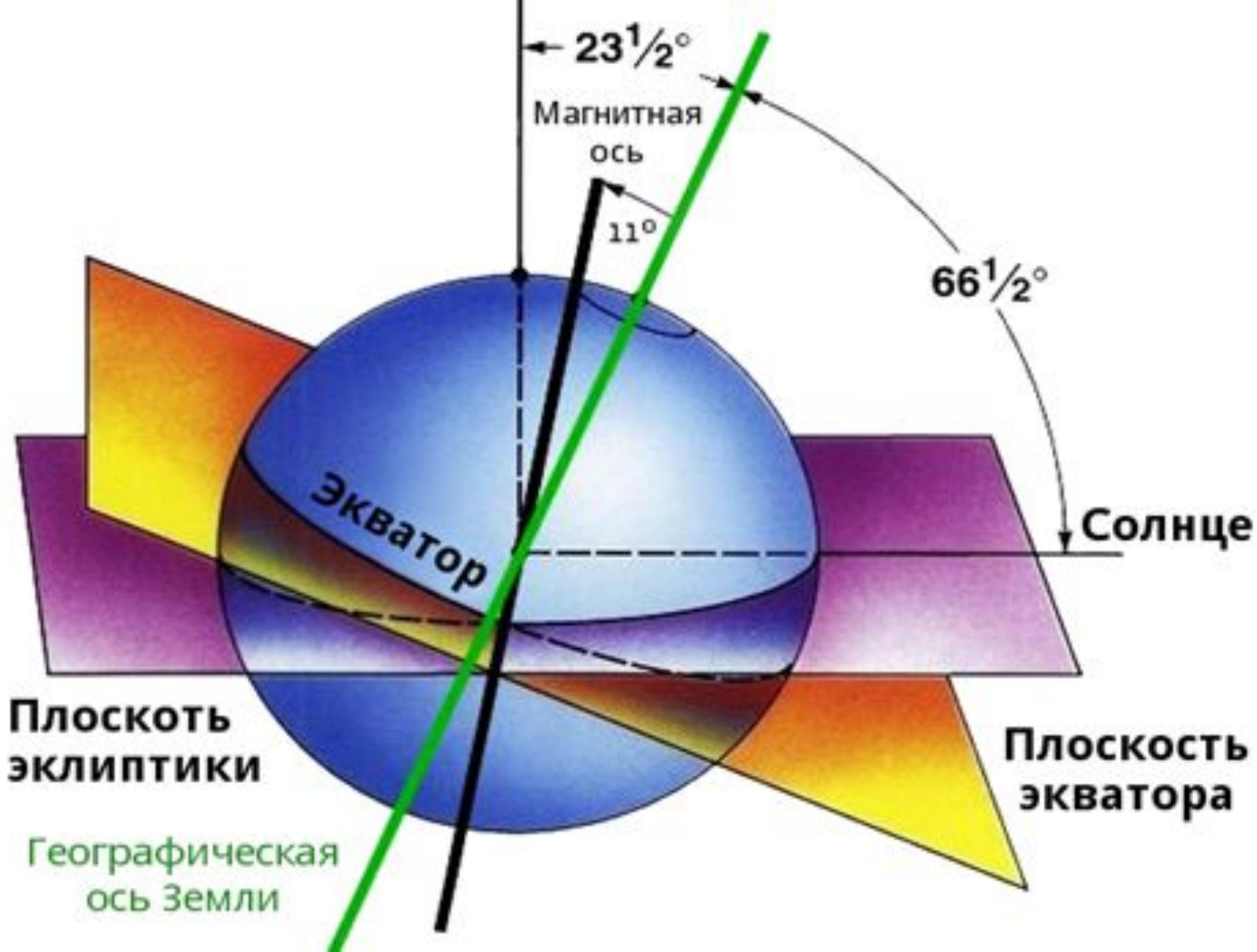
Направление
прецессии

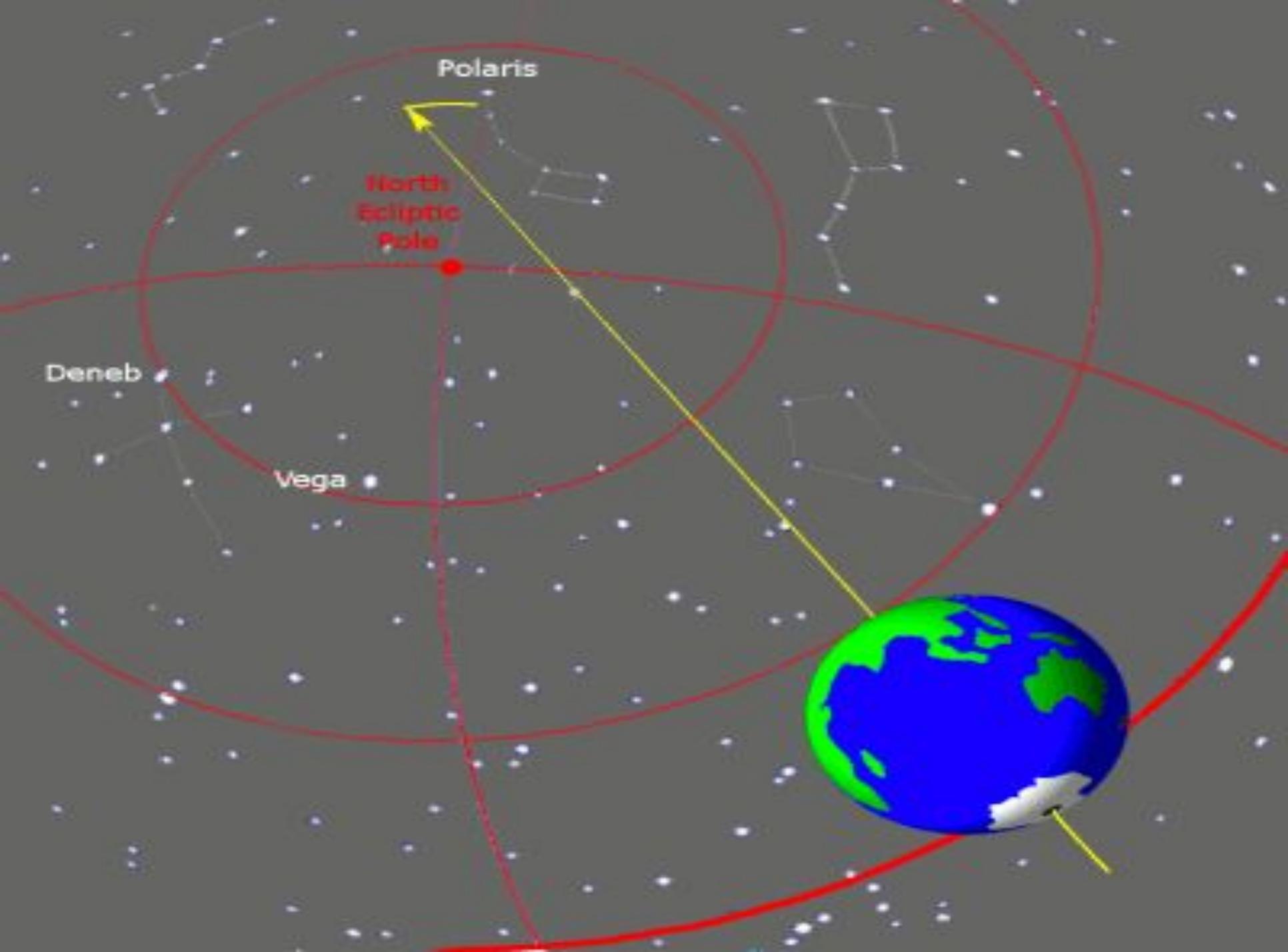
Конус
прецессии

Земная
ось



ПРЕЦЕССИЯ





Polaris

North
Ecliptic
Pole

Deneb

Vega

ДРЕЙФ ЮЖНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЮСА ЗЕМЛИ



Дрейф магнитного полюса





Смена магнитных полюсов Земли происходит каждые 500 тысяч лет и более, а последняя инверсия произошла 780.000 лет назад. На протяжении геологической истории планеты земное магнитное поле изменяло полярность более 100 раз.

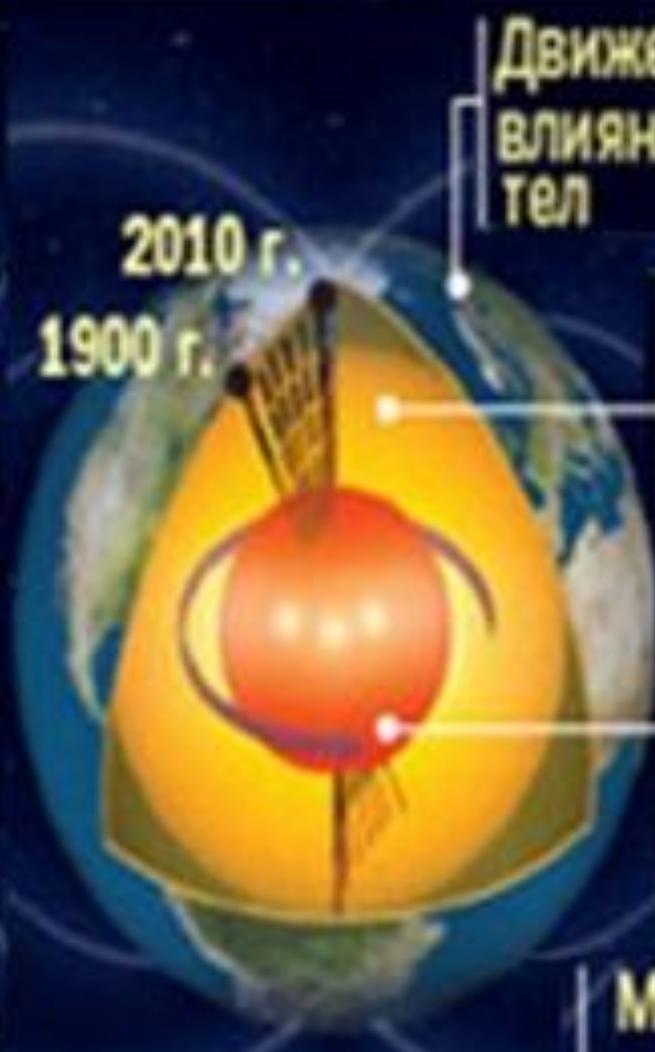
Вот что широко обсуждалось в прессе в 2012 году.

Ученые (а также и мировые лидеры...) знают о предстоящей смене полюсов планеты Земля. Процесс смены полюсов на нашей планете (активная фаза) начался с 2000 года и продлится до декабря 2012 года. Кстати, эта дата указана в календаре древних Майя как "конец Света" - Апокалипсис?!

ПОЧЕМУ ПРОИСХОДИТ ДРЕЙФ ПОЛЮСОВ?

За 150 лет северный магнитный полюс сместился на 110 км, и каждый год движение полюсов ускоряется.

Даже при теперешней скорости к 2050 г. Северный полюс будет в Сибири.

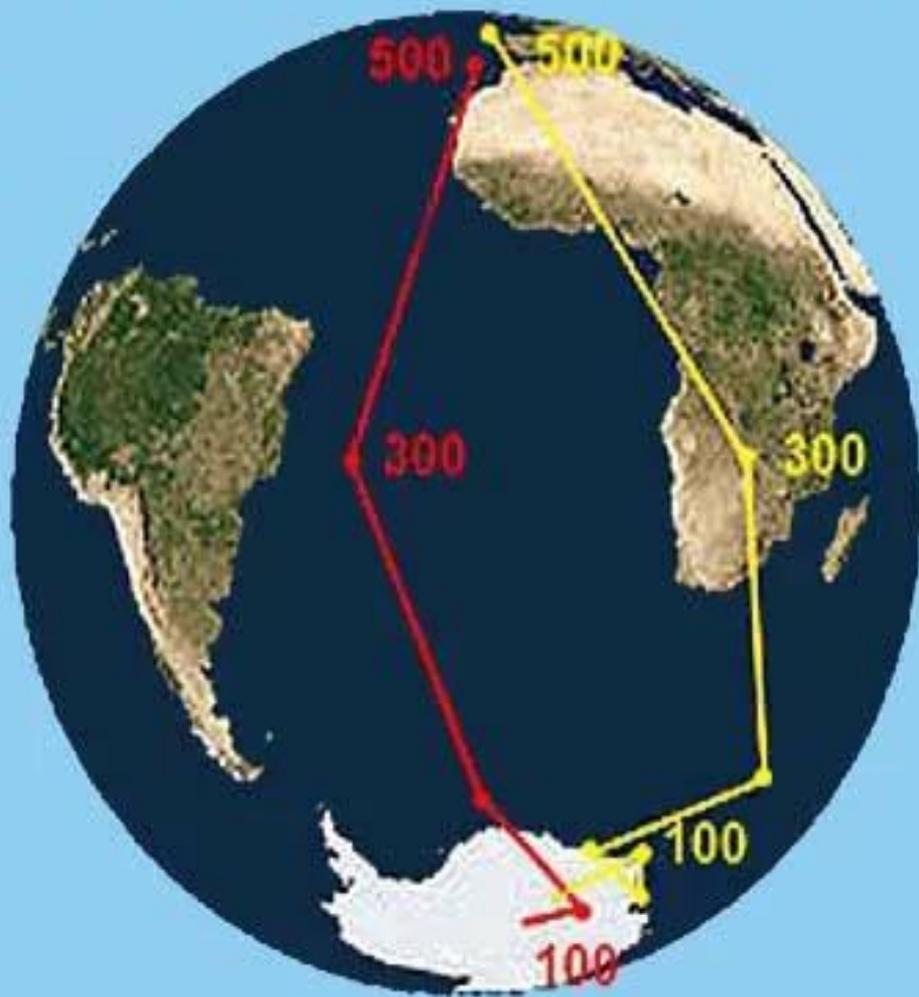


Движение Земли подвержено влиянию других космических тел

Жидкое внешнее ядро передаёт с задержкой колебания оболочки

Твёрдое металлическое ядро вращается медленнее, ось вращения смещается

Магнитное поле слабеет. За последние 150 лет оно ослабло на 10%.

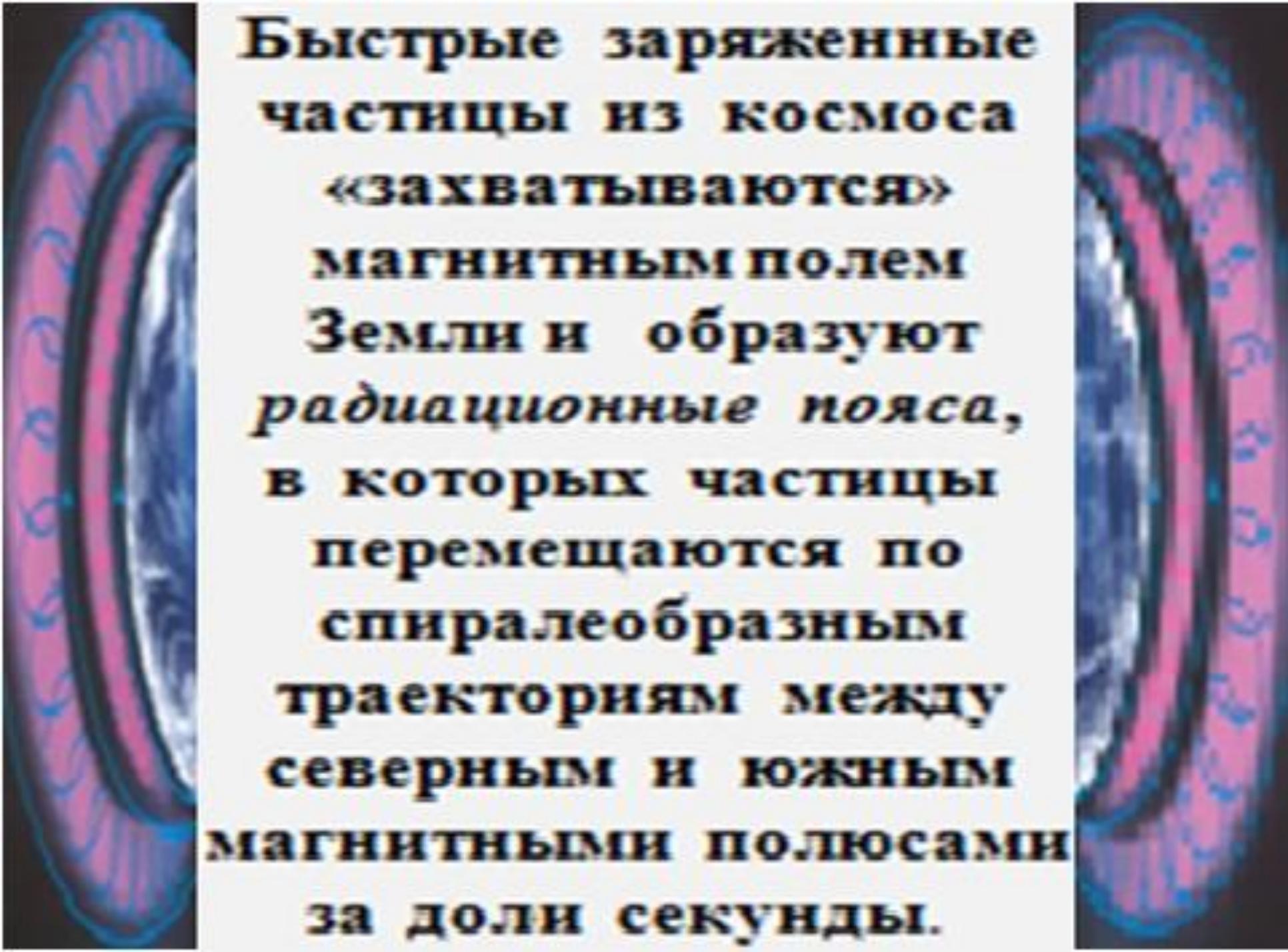


Дрейф южного полюса по палеомагнитным данным

— по образцам Африки

— по образцам Южной Америки

(цифры - млн. лет назад)

The image features a central text block flanked by two vertical diagrams. Each diagram shows a cross-section of Earth with a pinkish-red outer ring representing the magnetosphere and a blue wavy line representing the magnetic field lines. The text explains that fast-moving charged particles from space are captured by Earth's magnetic field and form radiation belts. These particles travel in spiral paths between the magnetic poles.

**Быстрые заряженные
частицы из космоса
«захватываются»
магнитным полем
Земли и образуют
радиационные пояса,
в которых частицы
перемещаются по
спиралеобразным
траекториям между
северным и южным
магнитными полюсами
за доли секунды.**

Магнитная ловушка

Магнитное поле защищает Землю от огромного количества заряженных частиц, падающих на Землю со стороны Солнца. Они захватываются магнитным полем



Земли и под действием силы Лоренца движутся по сложным траекториям, колеблясь между северным и южным магнитными полюсами Земли, вызывая у полюсов свечение атмосферы.

**В полярных областях
зараженные частицы
вторгаются в
верхние слои атмосферы,
вызывая полярные сияния.
Радиационные пояса Земли
простираются на расстояния
от 500 до десятков земных
радиусов.**

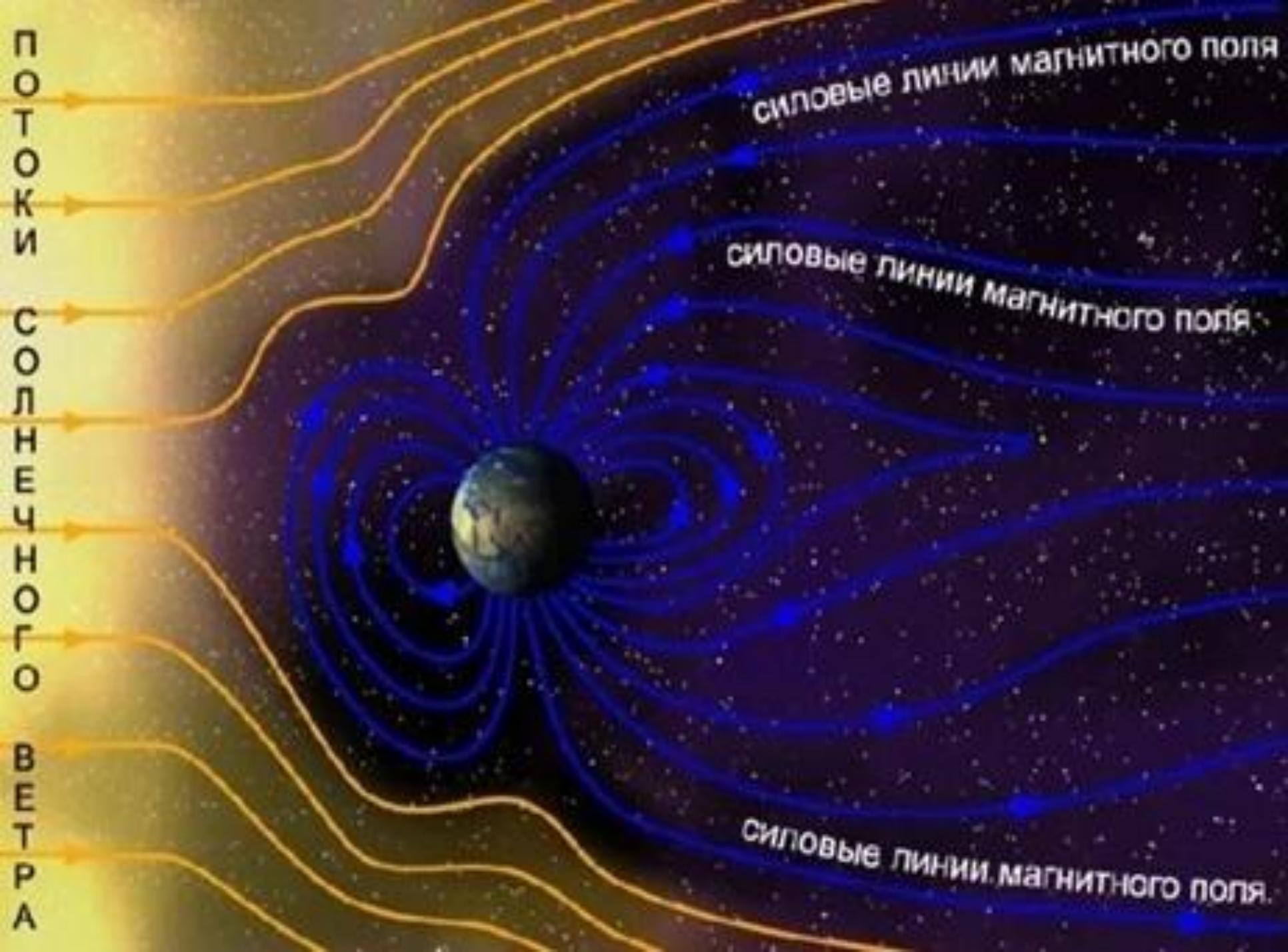
Магнитные бури.



Если на Солнце происходит вспышка, то усиливается солнечный ветер. Это возмущает земное магнитное поле и приводит к магнитной буре.

Характеристики магнитного поля изменяются и колеблются в течение многих часов, а потом восстанавливаются до прежнего уровня. Магнитные бури часто начинаются внезапно и одновременно по всему земному шару.





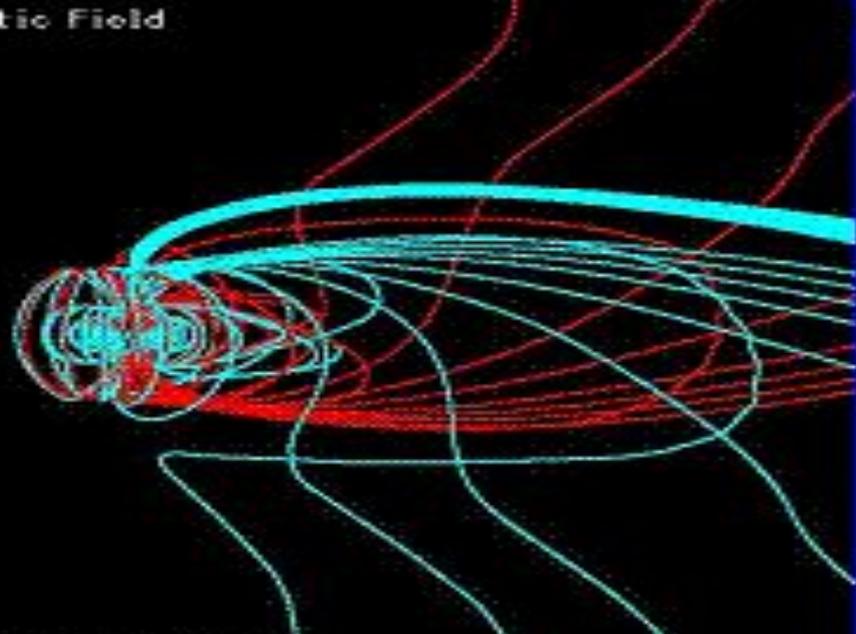
ПОТОКИ
СОЛНЕЧНОГО
ВЕТРА

силовые линии магнитного поля

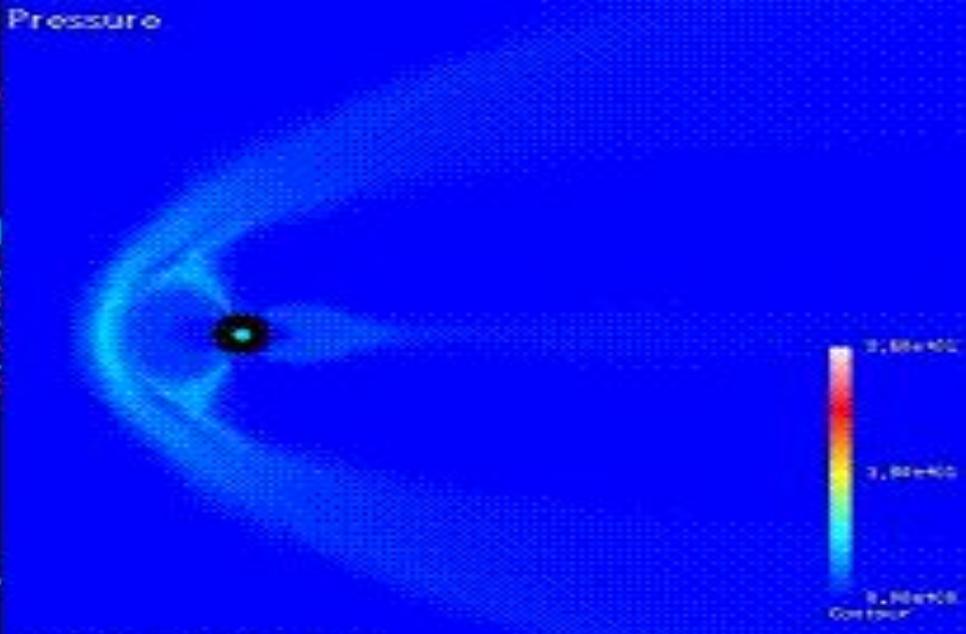
силовые линии магнитного поля

силовые линии магнитного поля

Magnetic Field

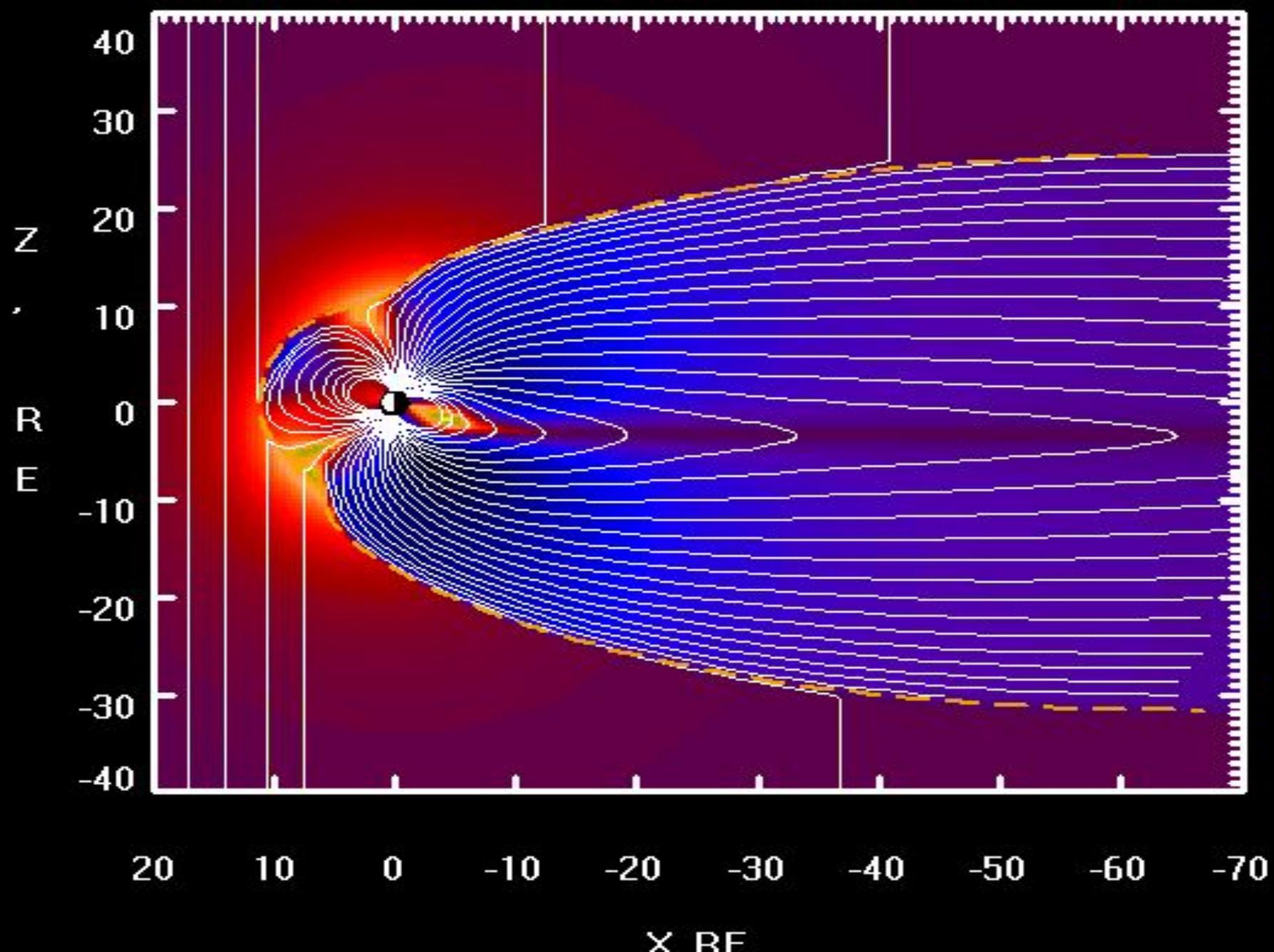


Pressure



Пролетающие мимо Земли частицы солнечного ветра создают дополнительные магнитные поля.

Магнитные бури причиняют серьёзный вред: они оказывают влияние на радиосвязь, многие измерительные приборы показывают неверные результаты.





Результатом взаимодействия

солнечного ветра с магнитным полем

Земли является полярное сияние.

Вторгаясь в земную атмосферу, частицы

солнечного ветра (в основном электроны

и протоны) направляются магнитным

полем и фокусируются. Сталкиваясь

с атомами и молекулами атмосферного

воздуха, они ионизируют и возбуждают их, в результате

возникает свечение, которое называют полярным сиянием.

Магнитные свойства вещества

Ампер объяснил магнетизм веществ существованием молекулярных токов.

магнитные свойства тела можно объяснить циркулирующими внутри него токами.



СЛАБОМАГНИТНЫЕ
ВЕЩЕСТВА

СИЛЬНОМАГНИТНЫЕ
ВЕЩЕСТВА

ДИАМАГНЕТИКИ

ПАРАМАГНЕТИКИ

ФЕРРОМАГНЕТИКИ

Водород

Бензол

Вода

Медь

Стекло

Кварц

Каменная соль

Висмут

Графит

Азот

Воздух

Кислород

Эбонит

Алюминий

Вольфрам

Платина

Железо

Никель

Кобальт

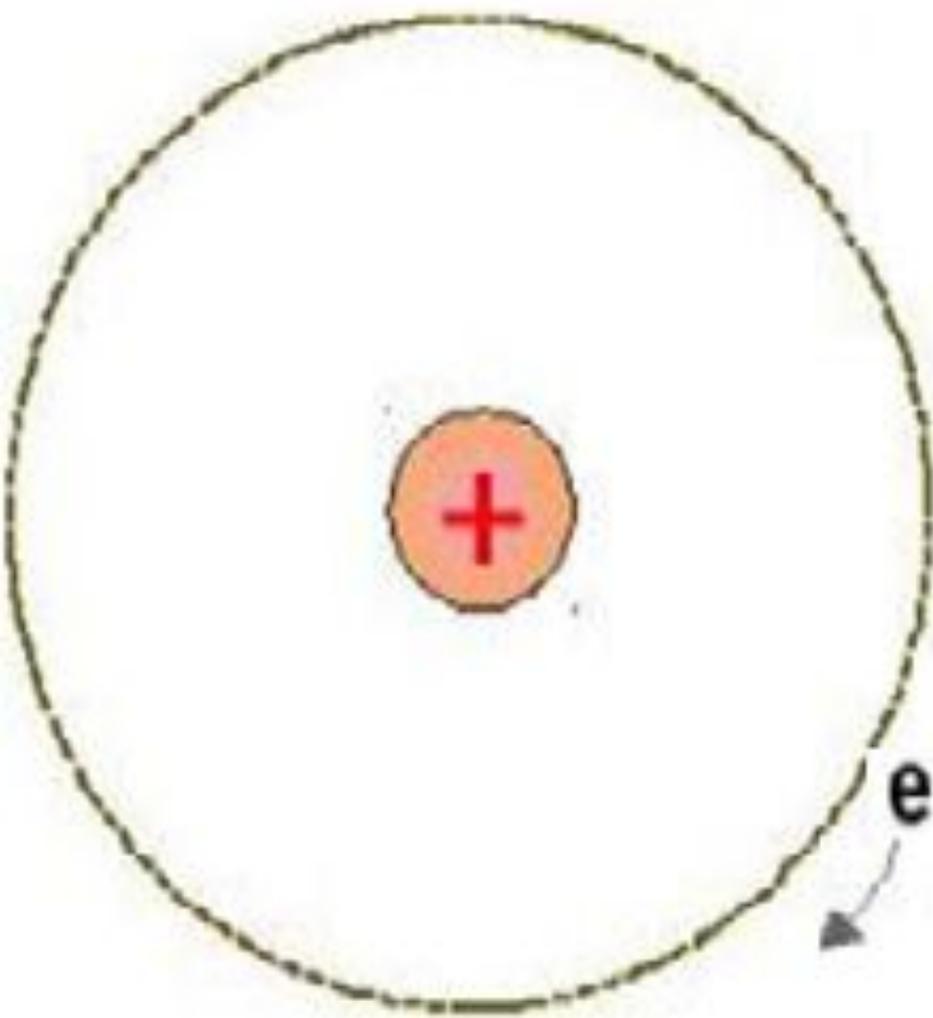
$\mu \gg 1$

$\mu \geq 1$

$\mu \leq 1$

μ - магнитная проницаемость вещества

Гипотеза Ампера



В каждом атоме имеются заряженные частицы – электроны. Движение электронов представляет собой круговой ток, порождающий магнитное поле.

Магнитные свойства вещества можно объяснить циркулирующими внутри него замкнутыми токами. Эти токи образуются движением электронов в атомах и молекулах.

Во внешнем магнитном поле происходит *упорядочение молекулярных токов*, вследствие чего в веществе возникает «собственное» магнитное поле.

В отсутствии внешнего магнитного поля молекулярные токи располагаются хаотично и магнитное поле в веществе ими не создается.



Магнитное поле в веществе

В плоскости сечения перпендикулярной оси стержня атомный ток представляет микроскопический кружок, причем все микротоки текут в одном направлении – против часовой стрелки.

В местах соприкосновения атомов молекулярные токи противоположно направлены и компенсируют друг друга. Нескомпенсированными остаются токи, текущие по поверхности материала, создавая некоторый микроток, возбуждающий в пространстве поле, равное полю, созданному всеми молекулярными токами.

Магнитное поле в веществе является суперпозицией двух полей: внешнего магнитного поля, создаваемого макротоками и внутреннего или собственного, магнитного поля, создаваемого микротоками.

Характеризует магнитное поле в веществе вектор \vec{B} , равный геометрической сумме

\vec{B}_0 - создаваемого макротоками и

\vec{B}_c - создаваемого микротоками:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_c$$

МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

Магнитная индукция в среде складывается из индукции внешнего магнитного поля и собственной магнитной индукции вещества:

$$\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{B}_C$$

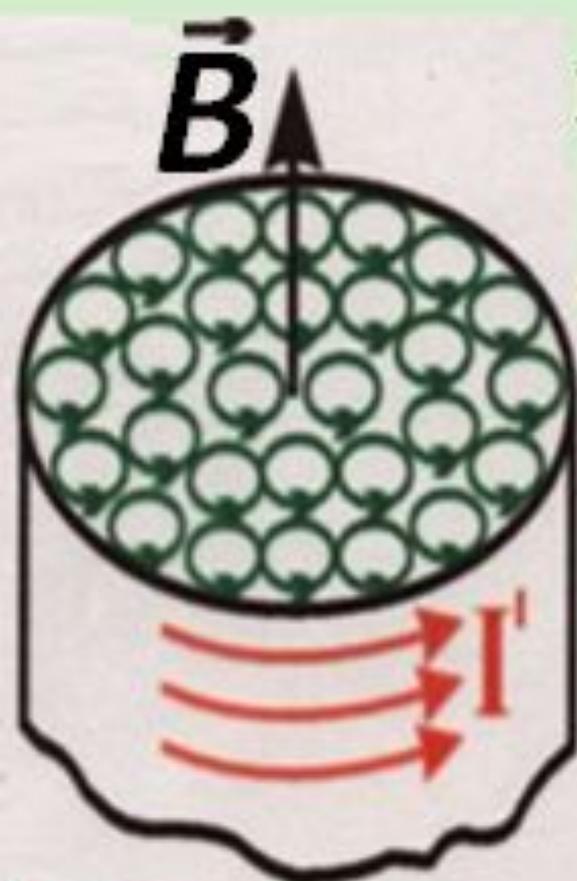
$$\vec{B}_C = \chi \vec{B}_0$$

$$\mu = (1 + \chi)$$

$$\mu = \frac{B}{B_0}$$

χ - магнитная
восприимчивость
среды

μ - магнитная
проницаемость среды



ДИАМАГНЕТИК

$$\vec{B}_C \downarrow \uparrow \vec{B}_0$$

$$B_C \ll B_0$$

$$\chi < 0 \quad |\chi| < 1$$

ПАРАМАГНЕТИК

$$\vec{B}_C \uparrow \uparrow \vec{B}_0$$

$$B_C < B_0$$

$$\chi > 0$$

ФЕРРОМАГНЕТИК

$$\vec{B}_C \uparrow \uparrow \vec{B}_0$$

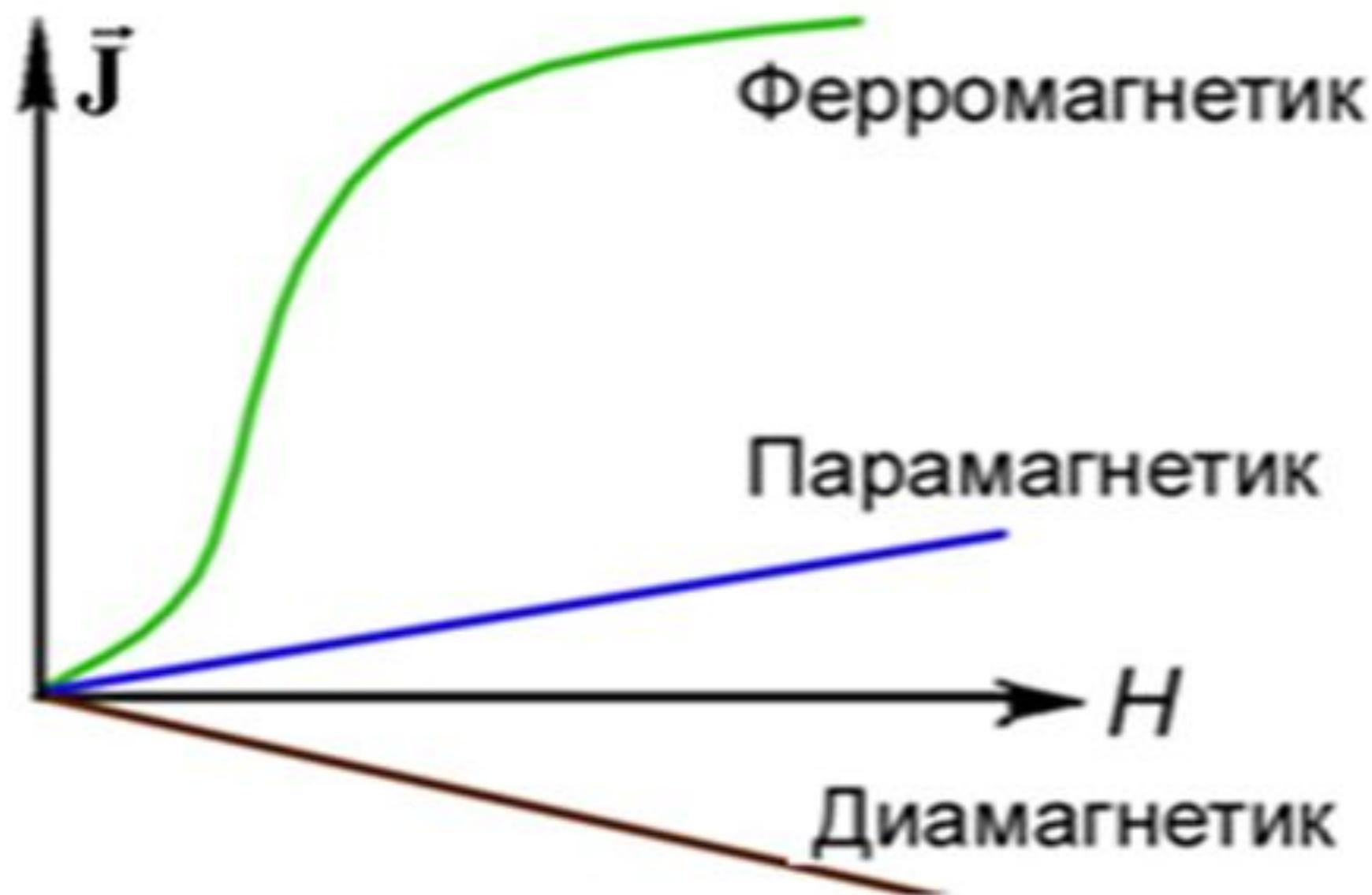
$$B_C \gg B_0$$

$$\chi \gg 1$$

Количественной характеристикой намагниченного состояния вещества служит **намагниченность** \vec{J} , равная отношению магнитного момента малого объема вещества к величине этого объема:

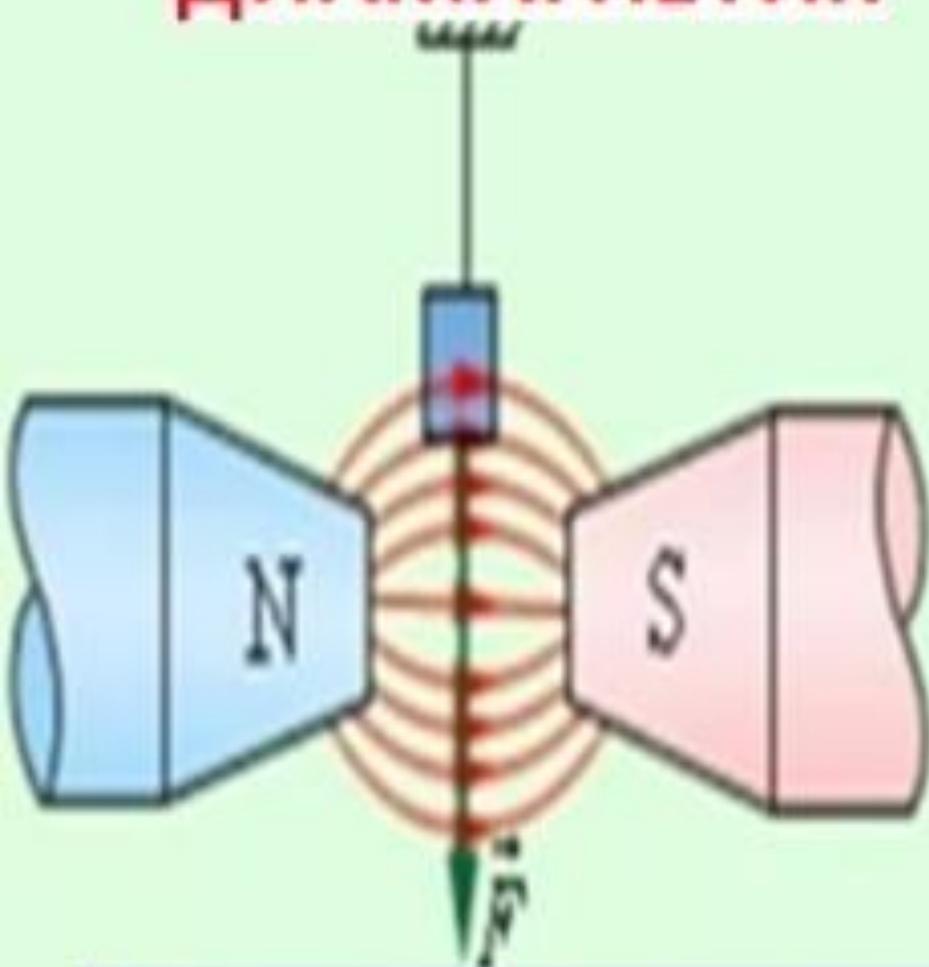
$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{P}_{mi},$$

Где \vec{P}_{mi} – магнитный момент i -го атома из числа N атомов, содержащихся в объеме ΔV .

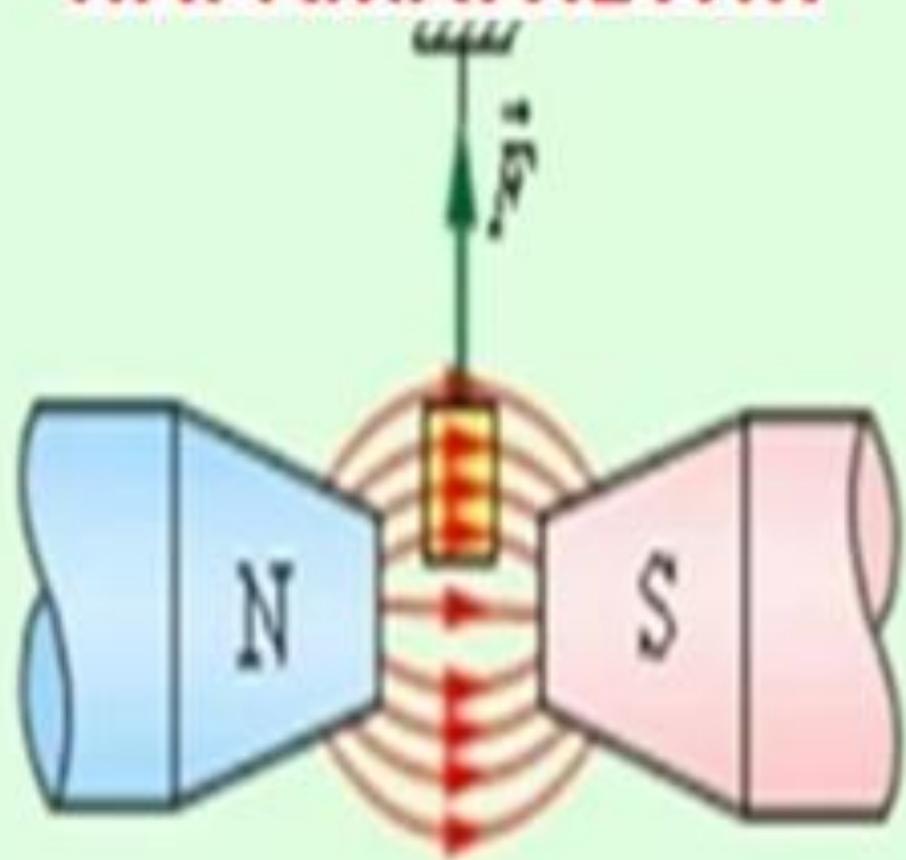


Кривые намагничивания диамагнетика, парамагнетика и ферромагнетика

ДИАМАГНЕТИК



ПАРАМАГНЕТИК

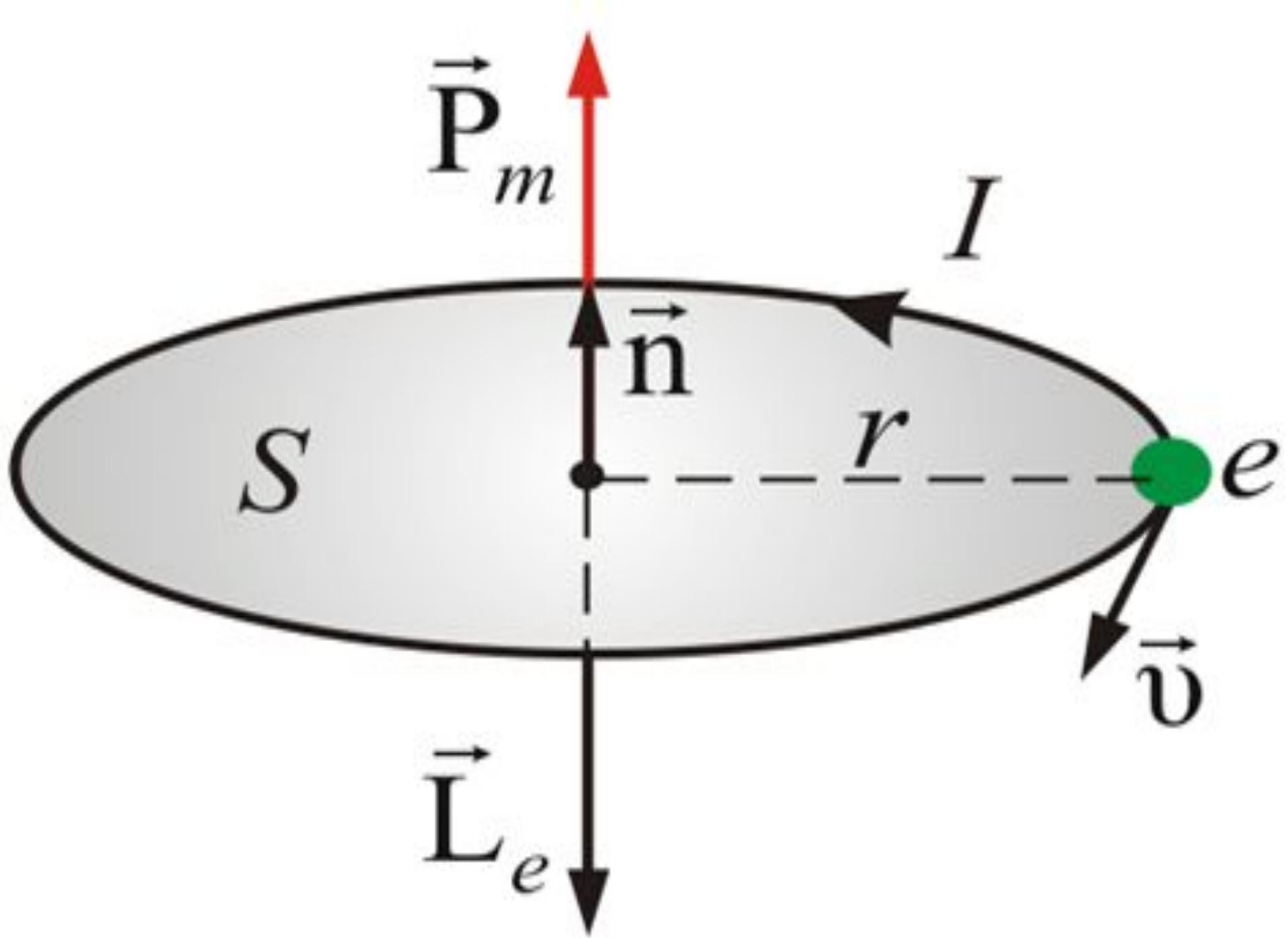


Парамагнетики втягиваются в область поля, диамагнетики – выталкиваются

Магнитные свойства вещества определяются магнитными свойствами электронов и атомов.

Магнетики состоят из атомов, которые в свою очередь состоят из положительных ядер и вращающихся вокруг них электронов.





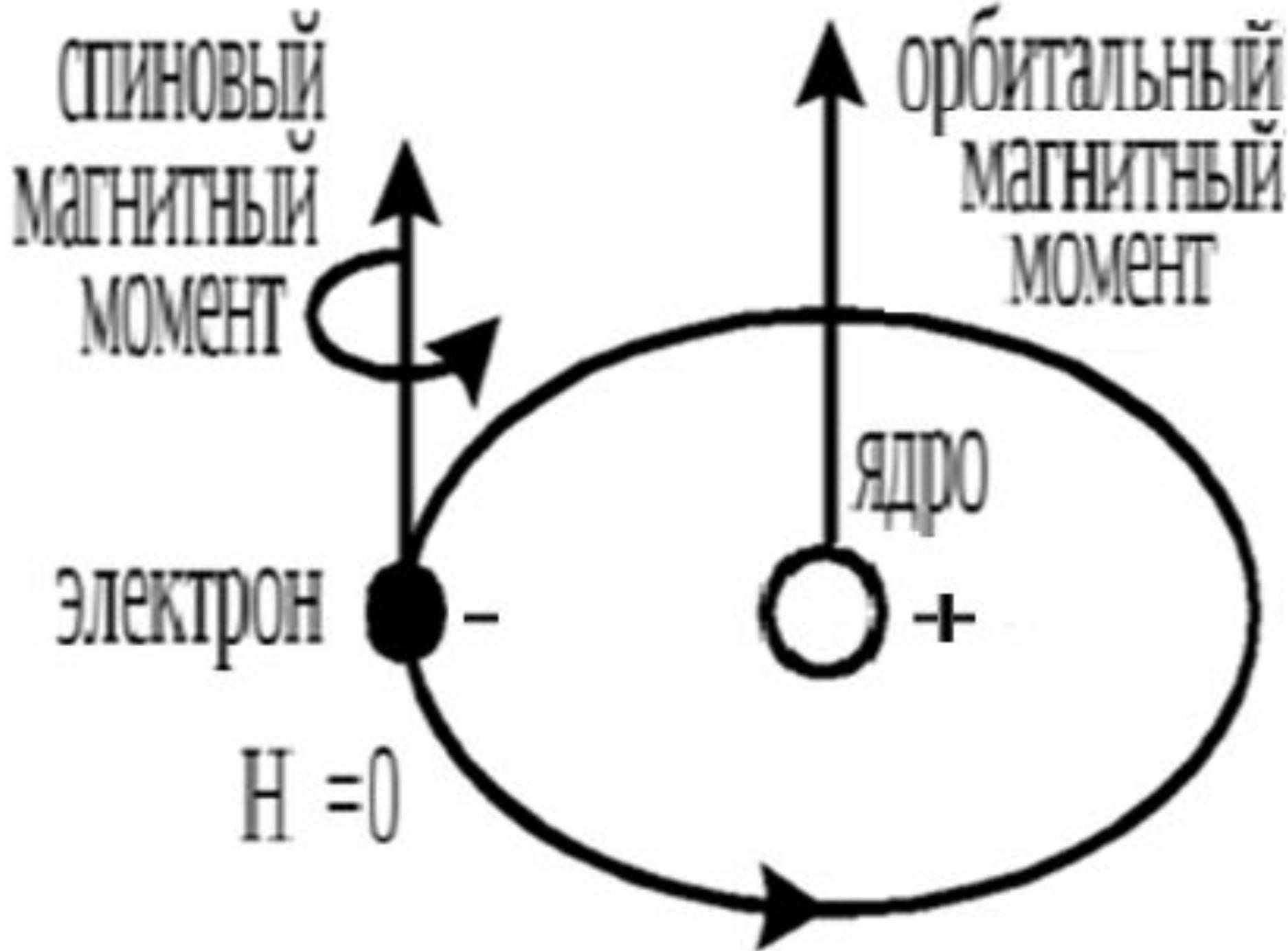
Электрон, движущийся по орбите в атоме эквивалентен замкнутому контуру с орбитальным током $I = ev$, где e – заряд электрона, v – частота его вращения по орбите.

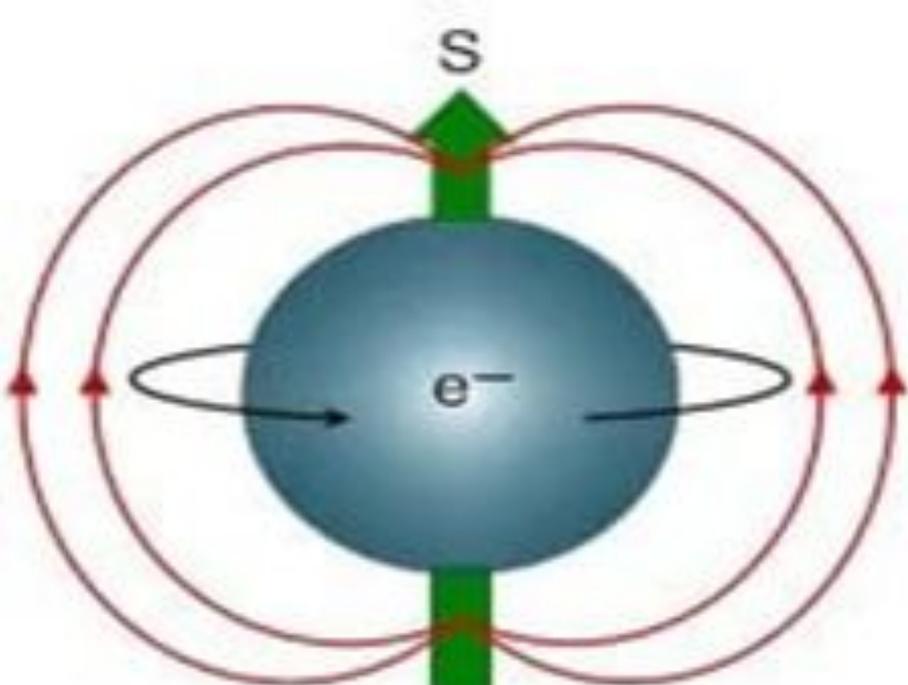
Орбитальному току соответствует **орбитальный магнитный момент** электрона.

$$\vec{P}_m = IS \vec{n} = evS\vec{n} = \frac{e\omega}{2\pi} S\vec{n} = \frac{e\omega r}{2\pi} S\vec{n} = \frac{e\mathcal{J}}{2\pi} S$$

Где S - площадь орбиты электрона,
 \vec{n} - единичный вектор нормали к S .

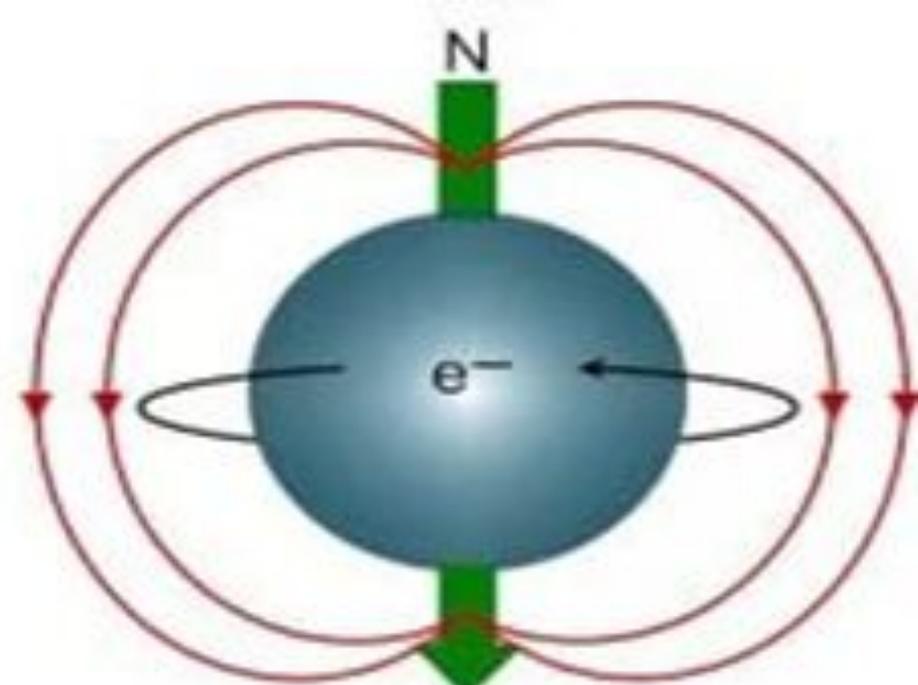






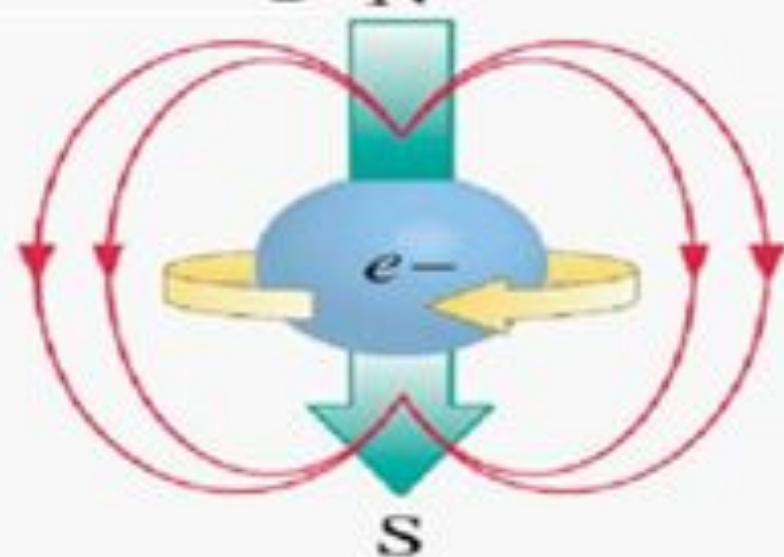
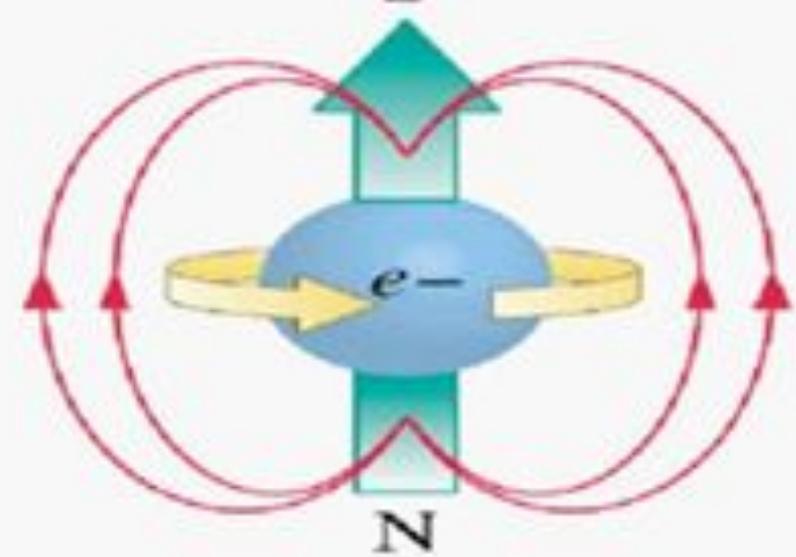
$$m_s = +\frac{1}{2}$$

S
N

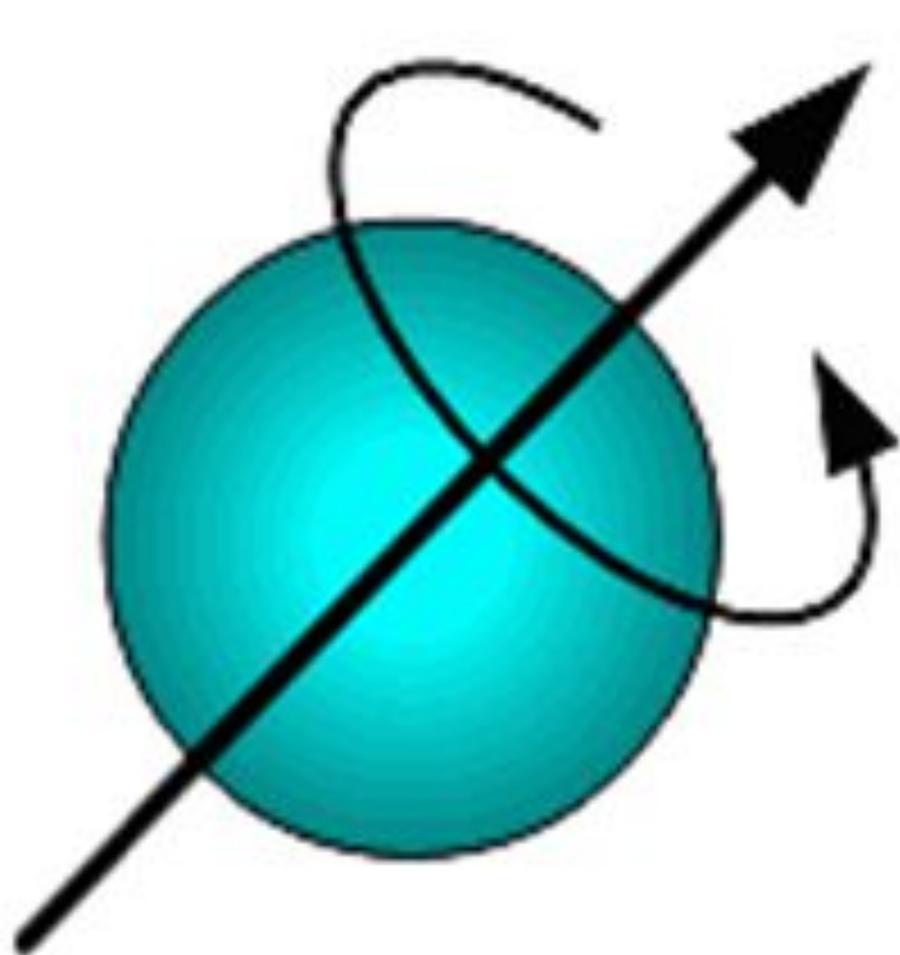


$$m_s = -\frac{1}{2}$$

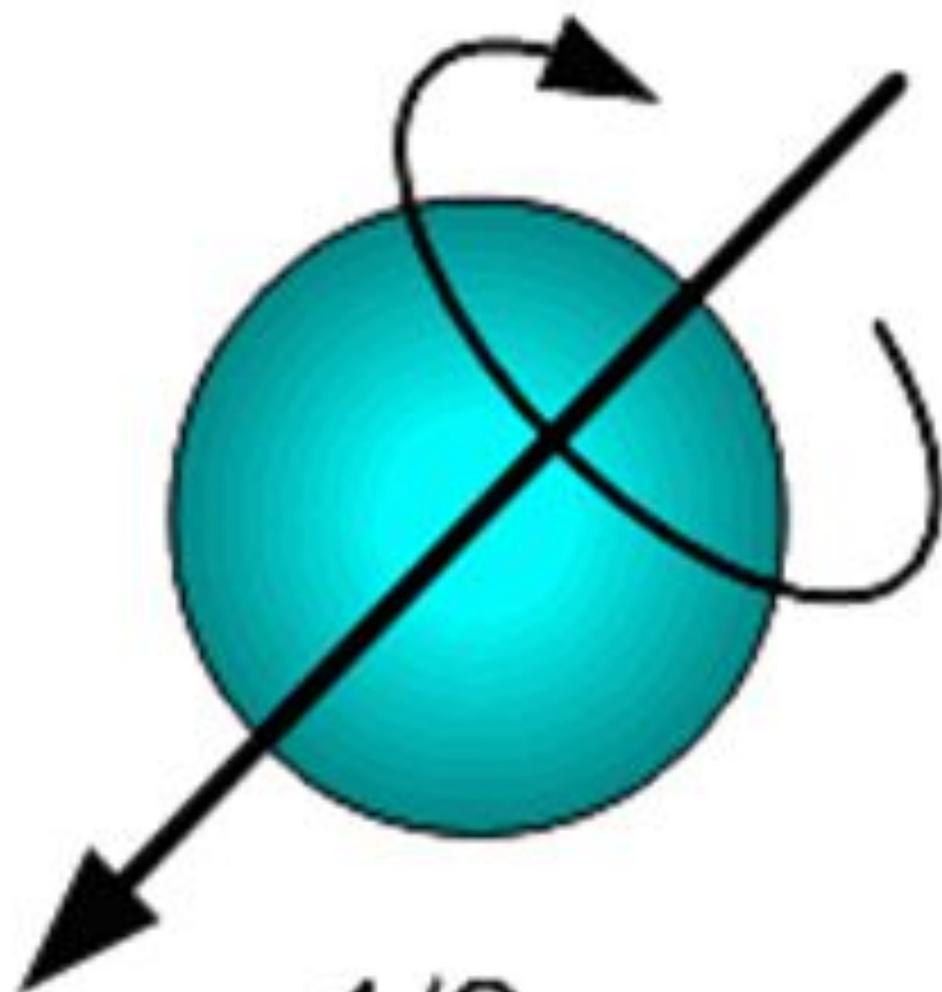
S
N



СПИН ЭЛЕКТРОНА



$+1/2$



$-1/2$

Проекция спинового магнитного момента электрона на направление вектора индукции магнитного поля может принимать только одно из двух значений:

$$P_{m_{sB}} = \pm \frac{e\hbar}{2m} = \pm \mu_B,$$

где μ_B – **квантовый магнитный момент электрона – магнетон Бора.**

Орбитальным магнитным моментом атома называется геометрическая сумма орбитальных магнитных моментов всех электронов атома

$$\vec{P}_m = \sum_{i=1}^Z \vec{P}_{m_i}.$$

Магнитные свойства железа обусловлены собственным магнитным моментом электронов

$$P_{ms} = -\frac{e}{m} \cdot \frac{\hbar}{2} = -\mu_B$$

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m} = 0,927 \cdot 10^{-23} \text{ Дж / Тл} - \text{магнетон Бора}$$

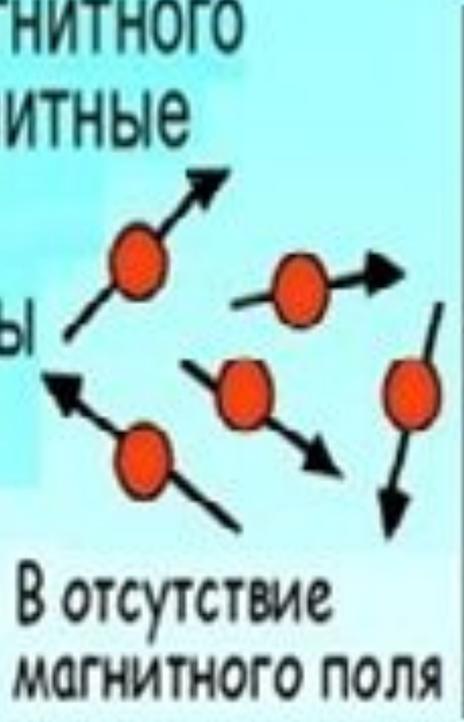
Магнитный момент атома \vec{P}_{mi} равен сумме орбитальных и собственных магнитных моментов электронов, входящих в его состав (магнитный момент ядра мал).

Суммарный магнитный момент магнетика:

$$\vec{P}_m = \sum_i \vec{P}_{mi}$$

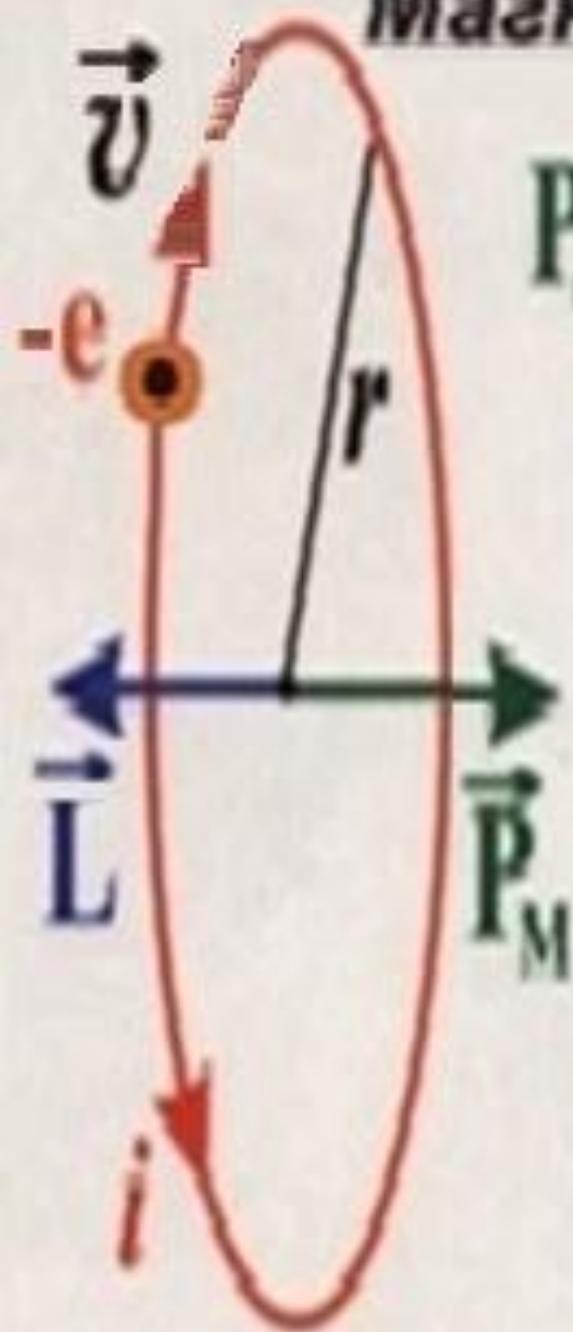
Ориентация электронных спинов в магнитном поле

В отсутствие внешнего магнитного поля механические и магнитные спиновые моменты электронов ориентированы случайным образом



В присутствии внешнего магнитного поля они могут быть ориентированы только двумя способами:
по полю или **против поля.**

Магнитомеханические явления



$$P_{em} = \frac{evr}{2} \quad \text{— орбитальный магнитный момент электрона}$$

$$L_e = mvr \quad \text{— орбитальный момент импульса электрона}$$

$$\frac{P_{em}}{L_e} = -\frac{e}{2m} \quad \text{— гиромагнитное отношение}$$

$$\vec{P}_{em} = -\frac{e}{2m} \vec{L}$$

Электрон обладает собственным моментом импульса, модуль которого $L_{es} = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$ ($\hbar = \frac{h}{2\pi}$, h - постоянная Планка) и собственным магнитным моментом: $\vec{P}_{MS} = -\frac{e}{m} \vec{L}_{es}$

где e/m - гиромагнитное отношение спиновых моментов.

Орбитальный магнитный момент атома:

$$\vec{P}_M = \sum_{i=1}^z \vec{P}_{mi}$$

\vec{P}_{mi} - магнитный момент i -ого электрона, z - число электронов

Орбитальный момент импульса атома:

$$\vec{L}_M = \sum_{i=1}^z \vec{L}_{mi}$$

\vec{L}_{mi} - орбитальный момент импульса i -ого электрона

$$\vec{P}_M = -\frac{e}{2m} \vec{L}_M$$

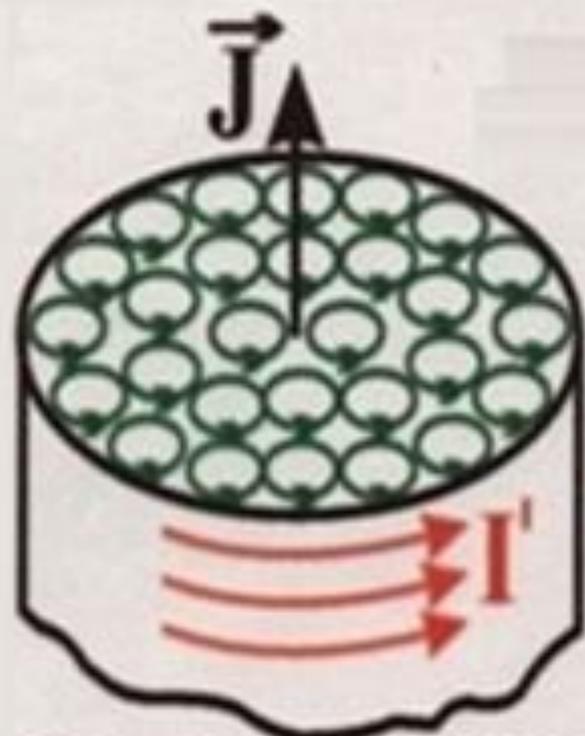
Вектор намагниченности магнетика

$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_i^N \vec{P}_{Mi}$$

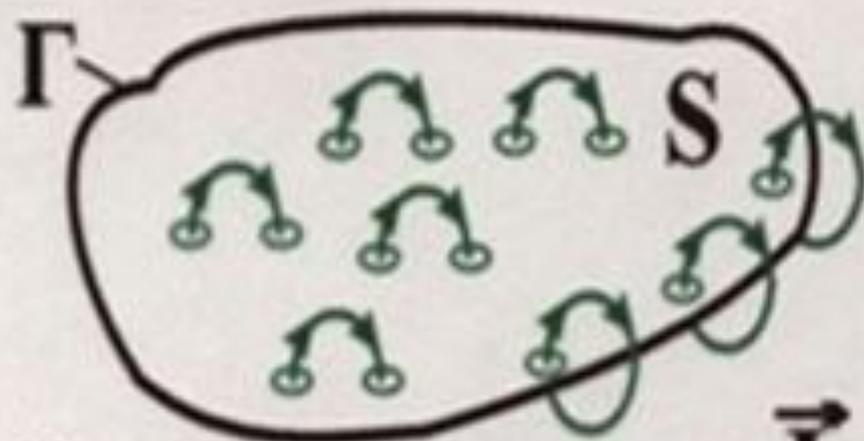
\vec{P}_{Mi} - магнитный момент i -ой молекулы,
 N - число молекул в объеме ΔV

$$\vec{J} = n \langle \vec{P}_M \rangle$$

n - концентрация молекул,
 $\langle \vec{P}_M \rangle$ - средний наведенный магнитный момент одной молекулы



Ток намагничивания I'



Циркуляция вектора \vec{J}

$$\oint \vec{J} d\vec{l} = I'$$

Магнитное поле в веществе
Алгебраическая сумма **микротоков** связана с циркуляцией вектора намагниченности

соотношением
$$I_{\text{микро}} = \oint_L \mathbf{J} d\mathbf{l},$$

тогда закон полного тока можно записать

в виде
$$\oint_L \left(\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} \right) d\vec{l} = I_{\text{макро}}$$

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

напряженностью магнитного поля.

Теорема о циркуляции вектора \vec{H}

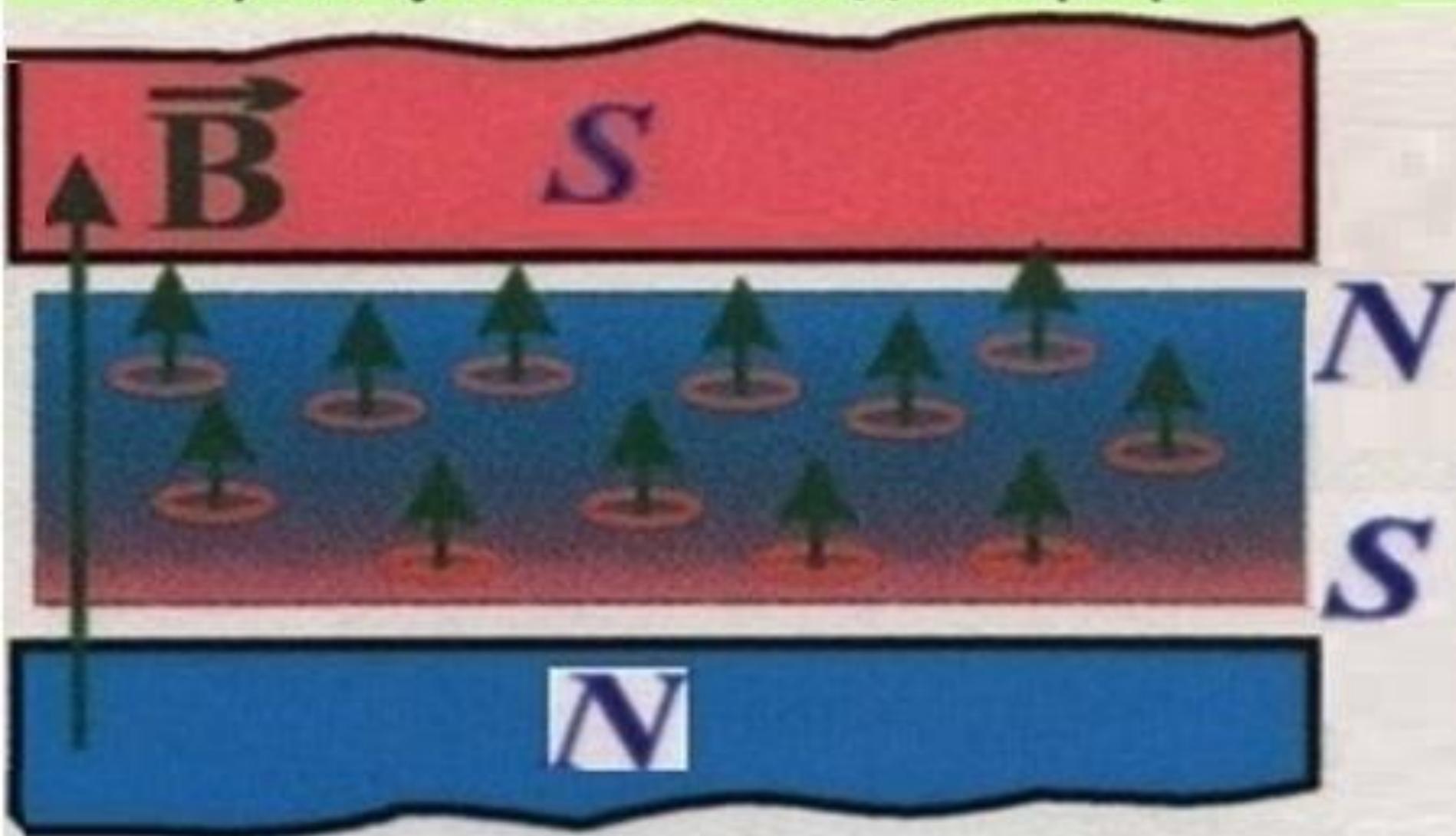
$$\oint \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 \sum I = \mu_0 (I + I'), \text{ где } I - \text{ток проводимости}$$

Поскольку $I' = \oint \vec{J} d\vec{l}$, то $\oint (\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}) d\vec{l} = I$

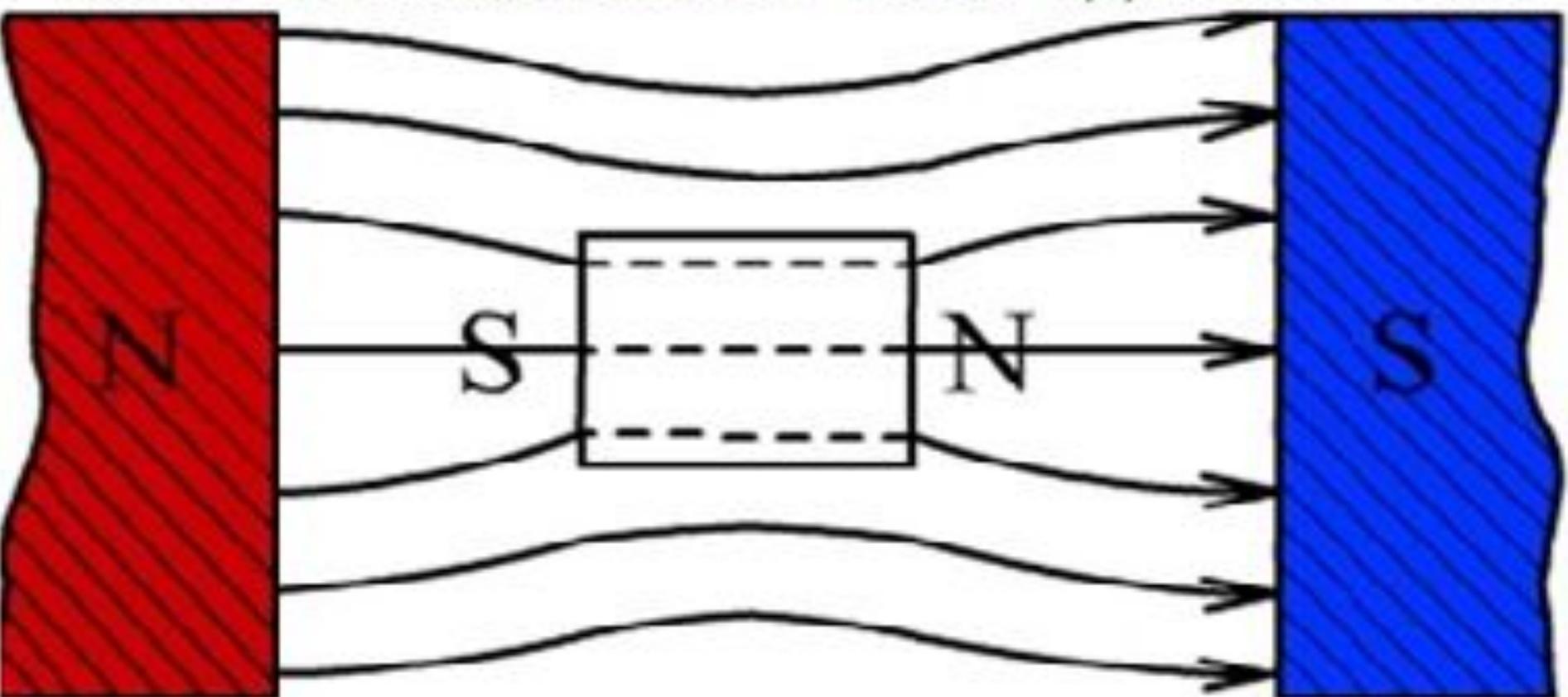
$$\frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} = \vec{H} - \text{вектор напряженности.}$$

Тогда $\oint \vec{H} d\vec{l} = I = \int_S \vec{j} d\vec{S}$

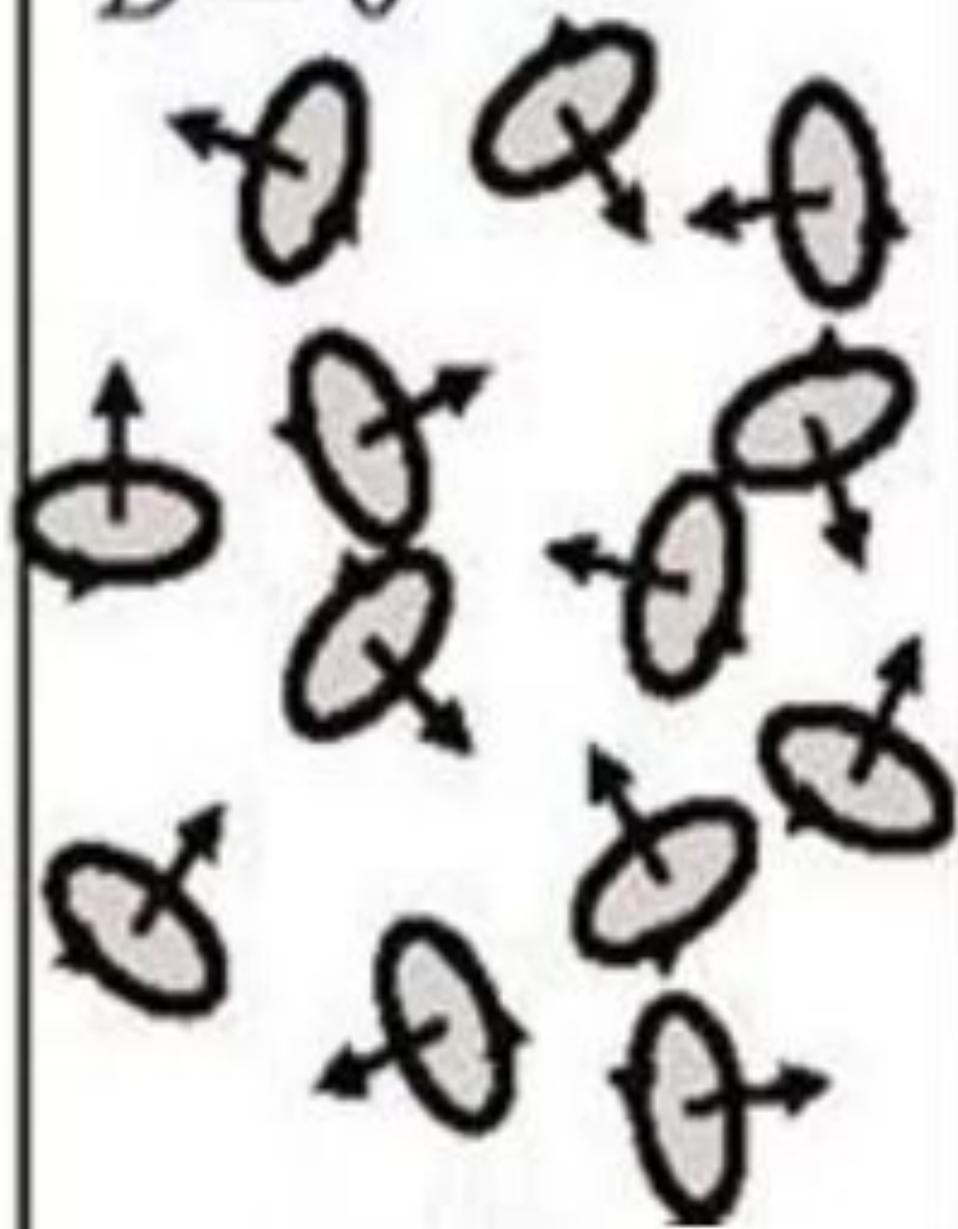
Парамагнетики - слабомагнитные вещества, магнитная проницаемость которых чуть больше единицы: $\mu > 1$



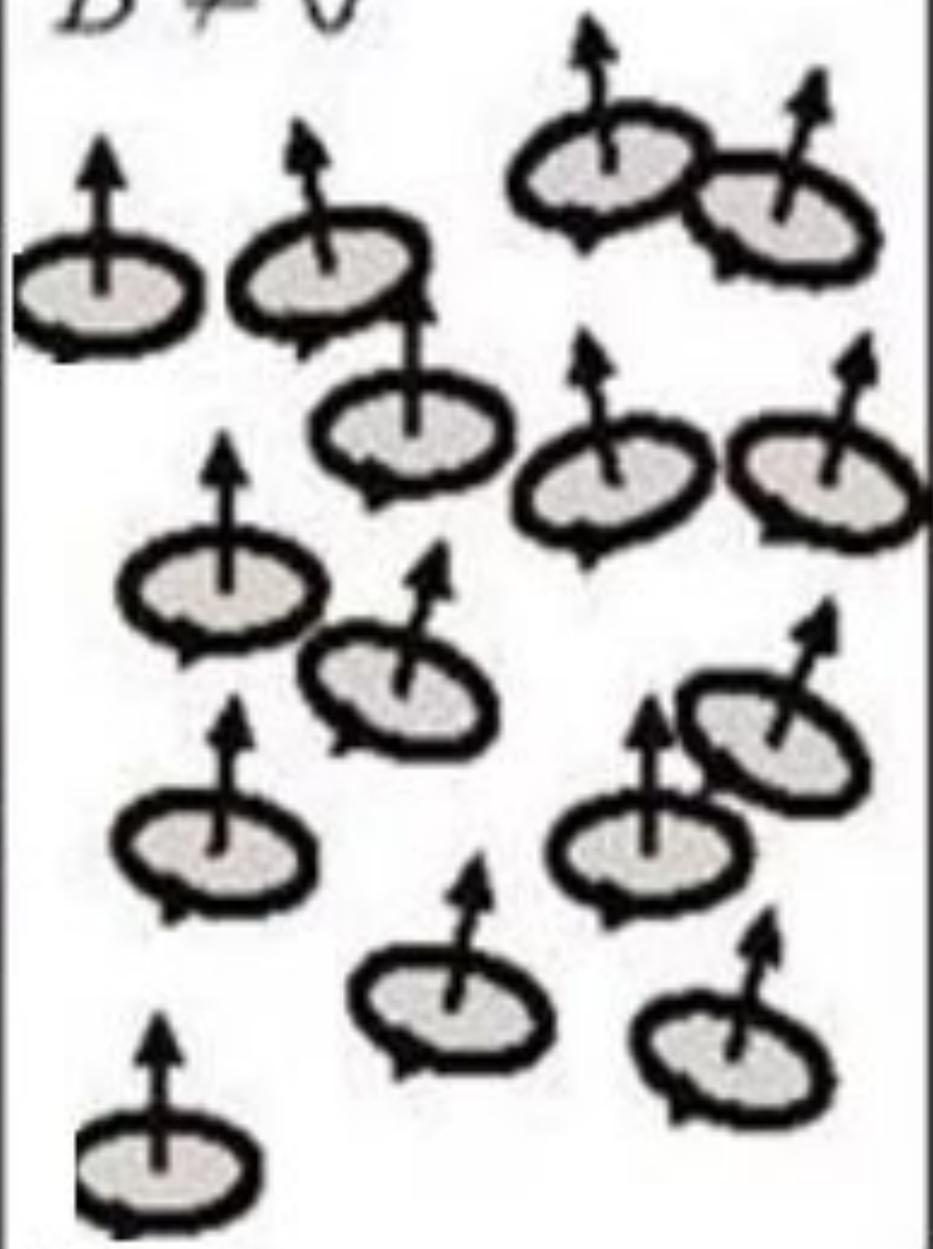
Парамагнетиками называются вещества, которые, попав в магнитное поле, несколько усиливают его. Объясняется это тем, что частицы парамагнетиков обладают собственным магнитным полем, образованным вращением электронов в атомах. Это магнитное поле подобно полю кругового тока.

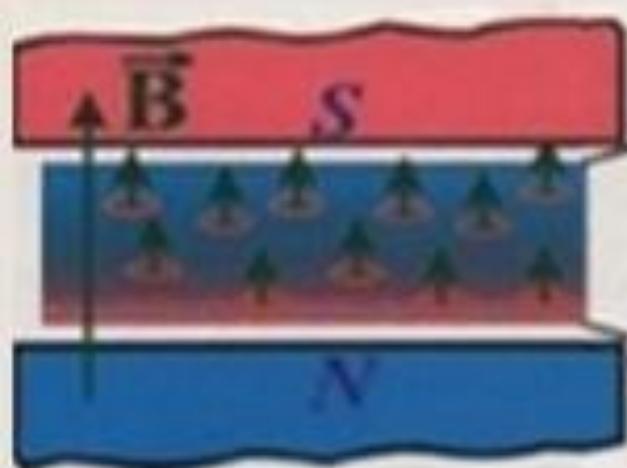


$$\vec{B} = \vec{0}$$



$$\vec{B} \neq \vec{0}$$





Магнитное поле ориентирует магнитный момент \vec{P}_M атомов: прецессия затухает, угол между \vec{B} и \vec{P}_M убывает. Это возможно благодаря установлению теплового равновесия.

Ланжевэн установил, что $J = n_0 P_M L(a)$,

При $a \ll 1$ где $a = P_M B / kT$, $L(a)$ - функция Ланжевэна,

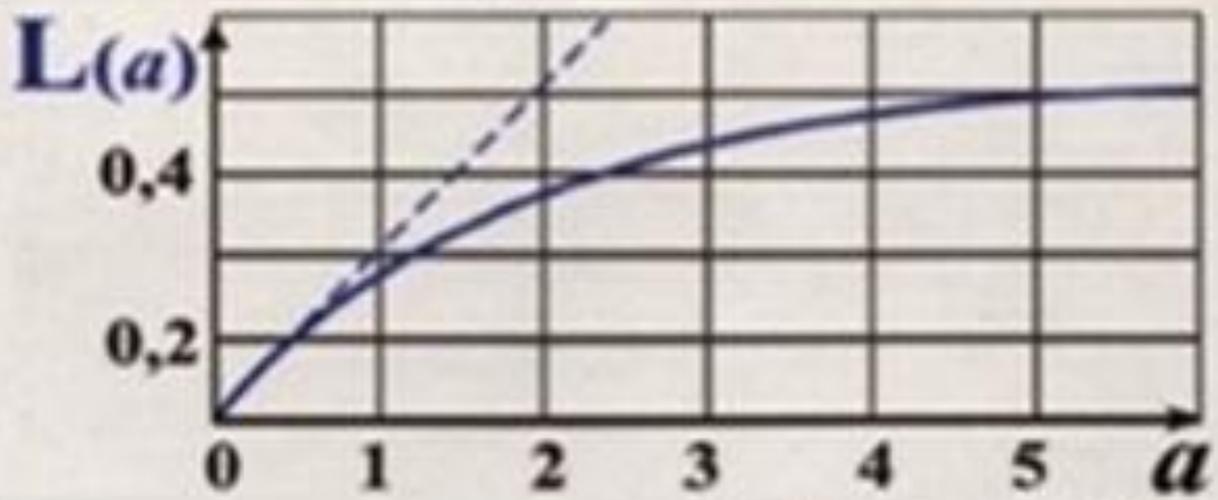
$$L = \frac{a}{3} \text{ и}$$

n_0 - число молекул в единице объема.

$$\vec{J} = \frac{n_0 P_M^2}{3kT} \vec{B}$$

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

$$(\chi \div 10^{-5} - 10^{-3})$$



Парамагнетик (жидкий кислород) втягивается в поле. Образуется "перемычка":



Диамагнетизм

Вектор намагниченности в диамагнетике равен:

$$\vec{J} = \frac{\Delta n \vec{P}'_{Ma}}{\Delta V} = n_0 \vec{P}'_{Ma} = -\frac{n_0 e^2 z \langle S_{\perp} \rangle}{4\pi m} \vec{B},$$

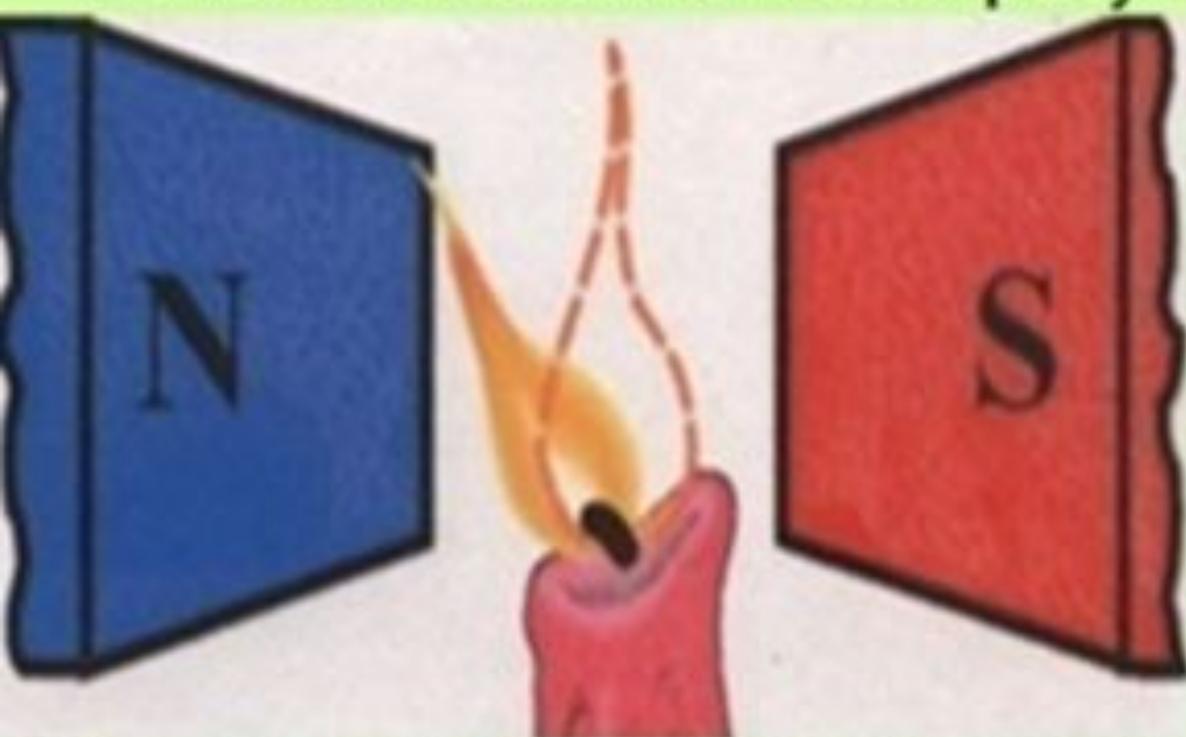
где Δn - число атомов в объеме ΔV ,

$n_0 = \Delta n / \Delta V$ - число атомов в единице объема

Обозначив $\frac{n_0 e^2 z \langle S_{\perp} \rangle \mu_0}{4\pi m} = \chi$, получим:

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

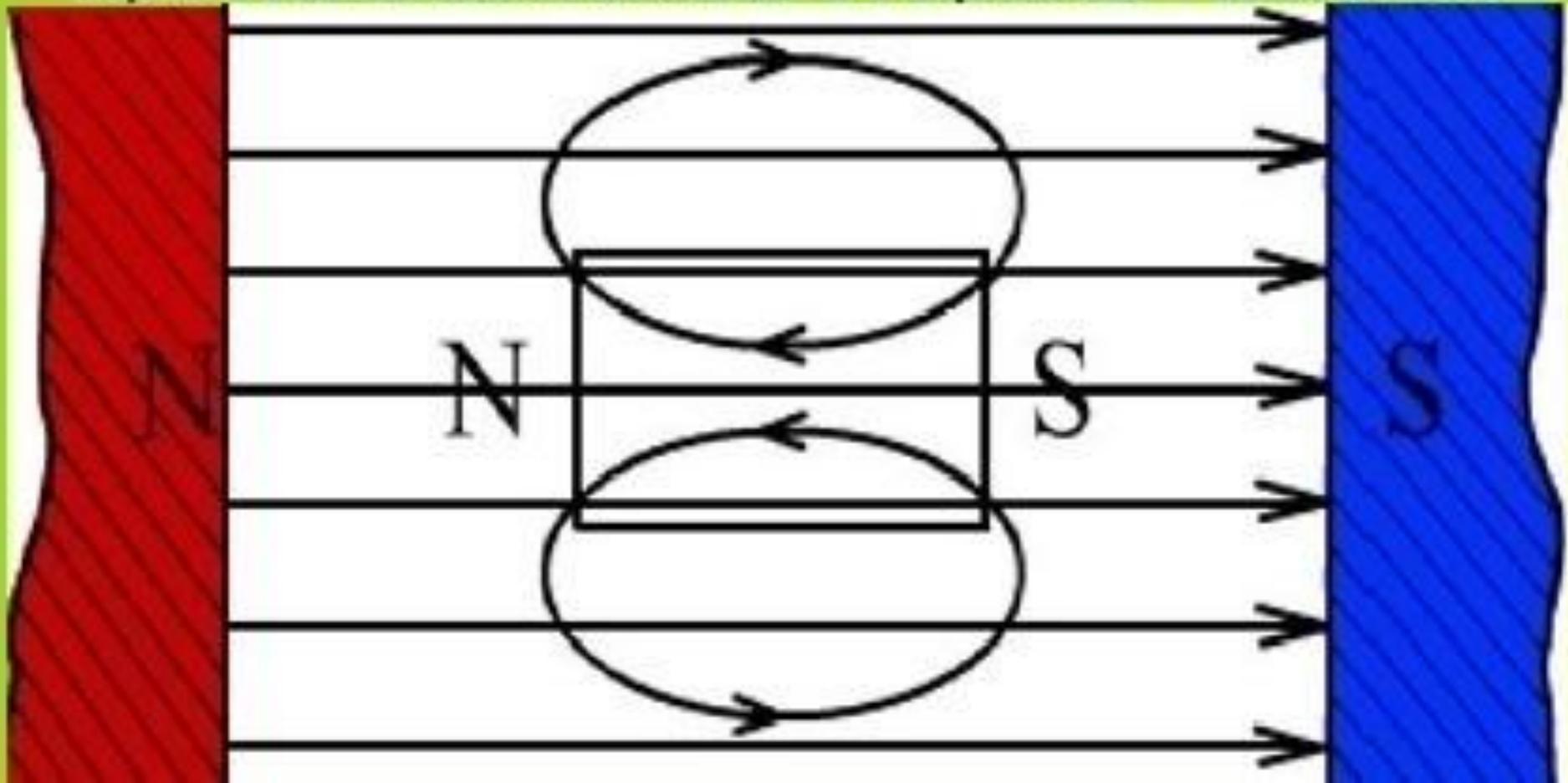
Диамagnetики – слабомагнитные вещества,
магнитная проницаемость которых $\mu < 1$.
Намагничиваются навстречу магнитному полю.



Диамagnetики
вода $\mu = 0,9999991$
медь $\mu = 0,99999897$
золото $\mu = 0,9999961$
этиловый спирт
 $\mu = 0,99999927$

Пламя свечи (продукт сгорания –
диамagnetик) выталкивается в
область более слабого поля.

Диамагнетик в магнитном поле намагничивается таким образом, что на его конце, где входят линии внешнего поля, образуется северный полюс, а с противоположной стороны - южный



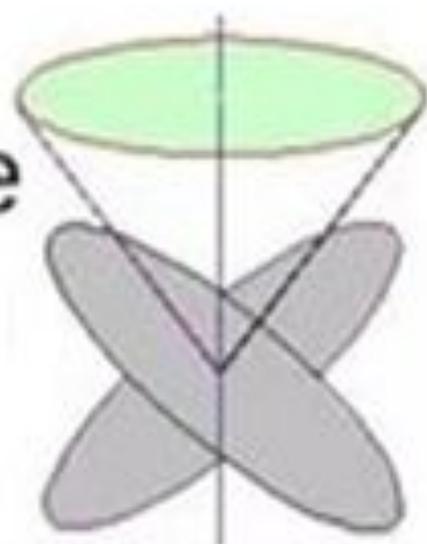
Подавляющее большинство веществ являются диамагнетиками. Диамагнетизм проявляется тогда, когда атомы и молекулы не имеют магнитного момента в отсутствие магнитного поля, а намагниченность создается только за счет действия магнитного поля на электроны молекул.

В **диамагнетиках** собственные магнитные моменты молекул равны нулю.

При внесении диамагнетика в магнитное поле происходит поворот орбит электронов так, что возникшие магнитные моменты ориентируются против поля (в соответствии с правилом Ленца).

Результирующее магнитное поле в диамагнетиках ослабляется.

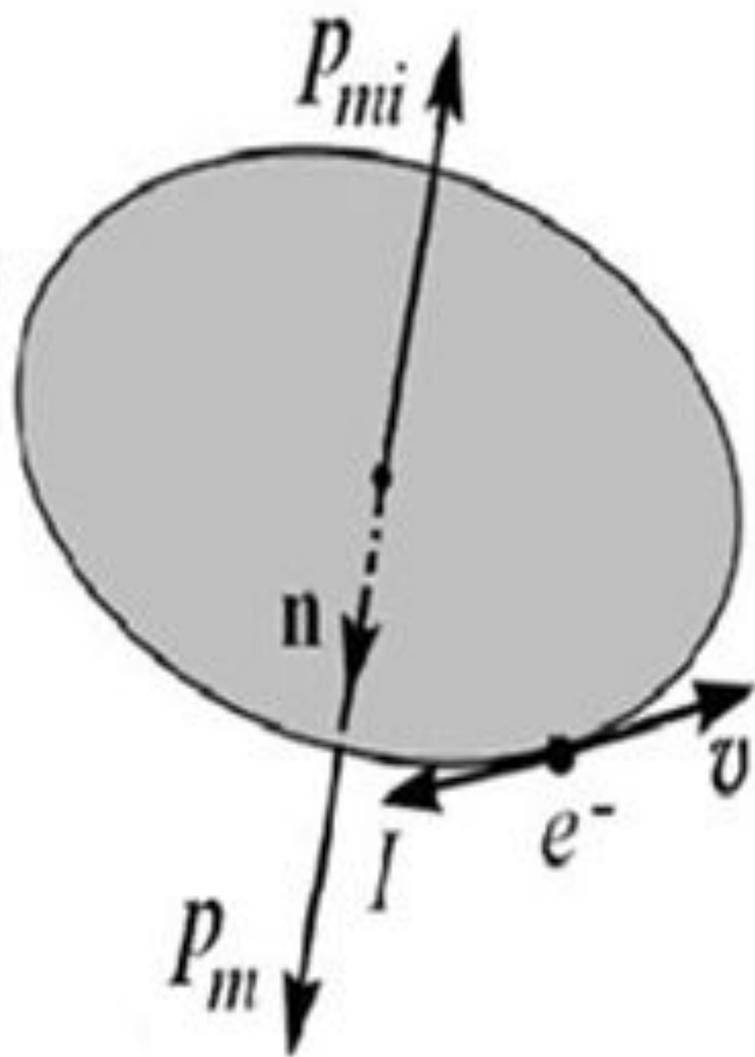
Электронная орбита атома под действием магнитного поля B_0 совершает прецессионное движение, что эквивалентно появлению кругового тока, который индуцирует дополнительное магнитное поле. Индуцированные магнитные поля всех атомов (молекул) складываются, образуя **собственное магнитное поле** вещества.

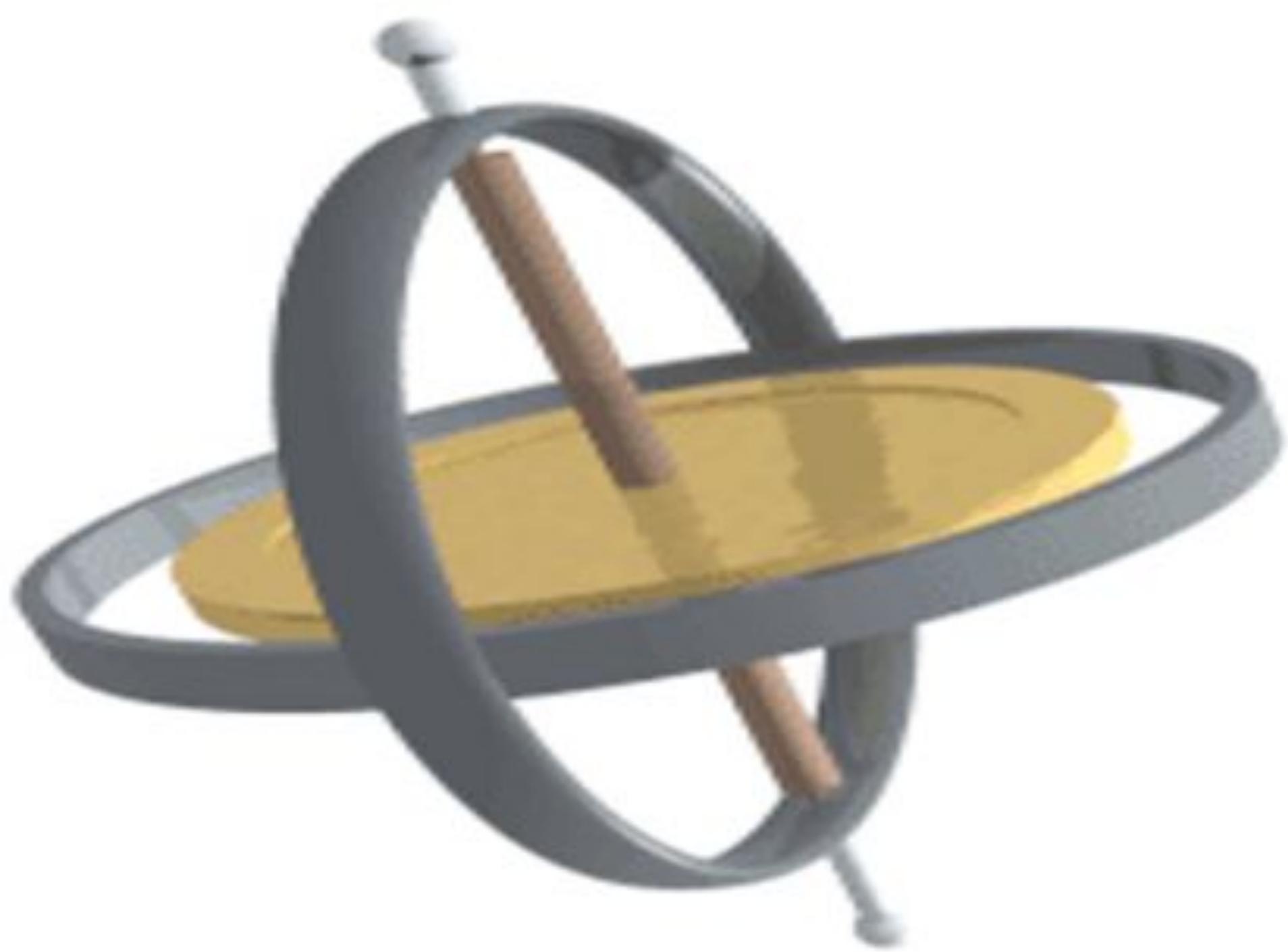


По правилу Ленца
собственное магнитное
поле вещества направлено
противоположно внешнему
полю и ослабляет его.

Эффект ослабления
внешнего магнитного поля
магнитным полем,
индуцированным в атоме,

называется **диамагнитным**, а вещества, в
которых он наблюдаются – **диамагнетиками**.







Прецессия орбиты индуцирует магнитный момент электрона $\vec{P}'_M = \vec{I}' S_{\perp}$, где $\vec{I}' = e \frac{\omega_z}{2\pi}$, а S_{\perp} - площадь проекции орбиты на плоскость перпендикулярную вектору \vec{B} .

$$\vec{P}'_M = \frac{e^2 S_{\perp} \vec{B}}{4\pi m}$$

По направлению вектор \vec{P}'_M противоположен вектору \vec{B}

$$\vec{P}'_M = -\frac{e^2 S_{\perp} \vec{B}}{4\pi m}$$

Индукцированный магнитный момент атома:

$$\vec{P}'_{Ma} = -\frac{e^2 z \langle S_{\perp} \rangle \vec{B}}{4\pi m} \quad \text{где } z \text{ - число}$$

электронов в атоме, $\langle S_{\perp} \rangle$ - среднее значение площади проекций орбит всех электронов атома на плоскость перпендикулярную вектору \vec{B} .

При внесении диамагнитного вещества в магнитное поле его атомы приобретают наведенные магнитные моменты.

В пределах малого объема ΔV диамагнетика наведенные магнитные моменты $\Delta \vec{P}_m$ всех атомов одинаковы и направлены **противоположно вектору** \vec{B} .

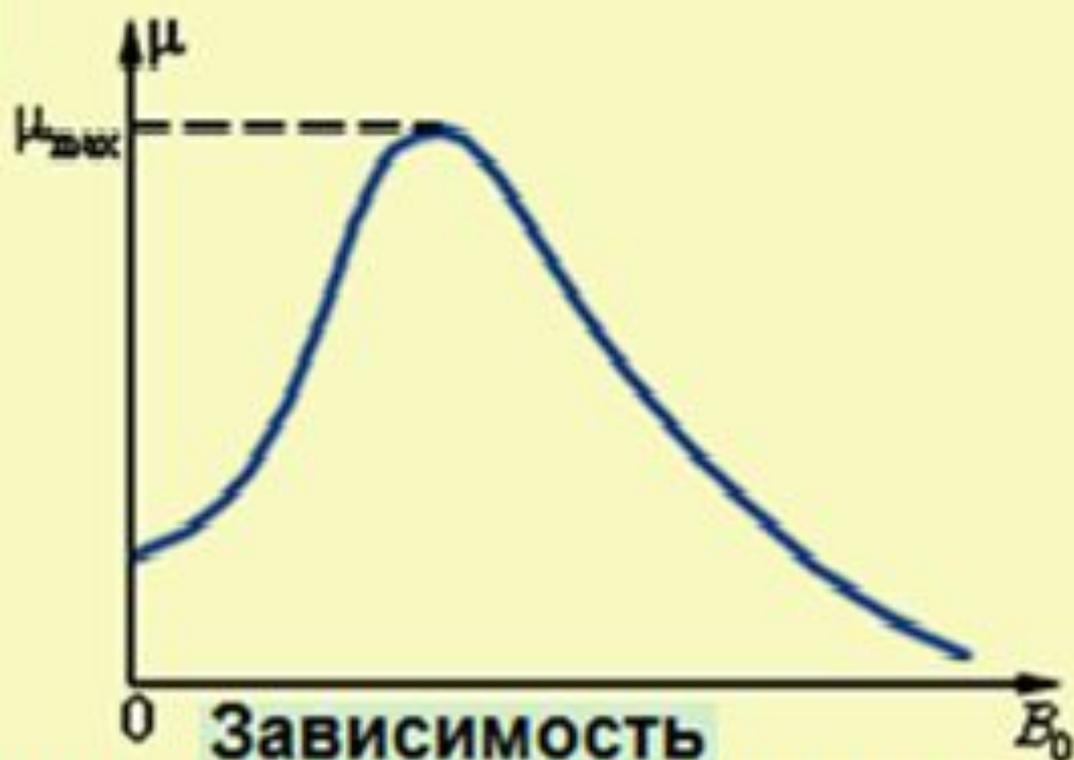
Вектор намагниченности диамагнетика

равен
$$\vec{J} = \frac{n \Delta \vec{P}_m}{\Delta V} = n_0 \Delta \vec{P}_m = \frac{\vec{B}}{\mu_0} \chi = \vec{H} \cdot \chi,$$

Сверхпроводники – идеальные диамагнетики

Магнитное поле вообще не проникает
внутри сверхпроводника. Это означает что
сверхпроводник является идеальным
диамагнетиком. Т.к. магнитная индукция
внутри проводника равна нулю, то по
формуле: $\vec{B} = \mu \vec{B}_0$, магнитная
проницаемость сверхпроводника также
равна нулю.

Ферромагнетики – вещества, у которых магнитная проницаемость $\mu \gg 1$. Ферромагнетики намагничиваются и создают собственное магнитное поле, которое может в сотни тысяч раз превышать внешнее поле.



Зависимость магнитной проницаемости ферромагнетика от внешнего магнитного поля.

Для ферромагнетика существует определенная температура (*точка Кюри*), выше которой ферромагнитные свойства исчезают, вещество становится парамагнитным. У железа, точка Кюри 770°C , у кобальта 1130°C , у никеля 360°C .

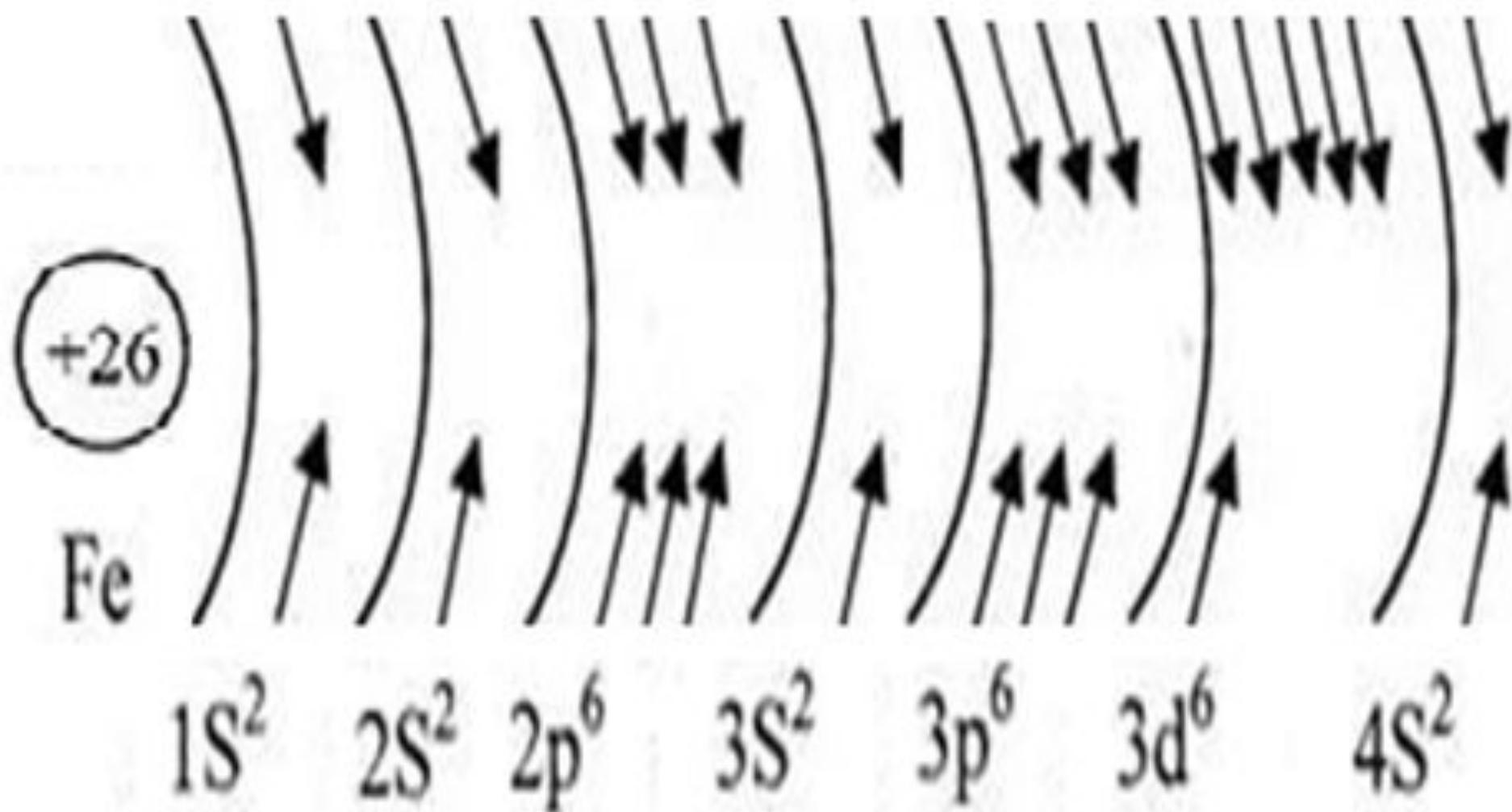
Ферромагнитные свойства проявляются только у веществ, атомы которых обладают постоянным спиновым магнитным моментом (атомы с недостроенными внутренними электронными оболочками).

Типичными ферромагнетиками являются переходные металлы.

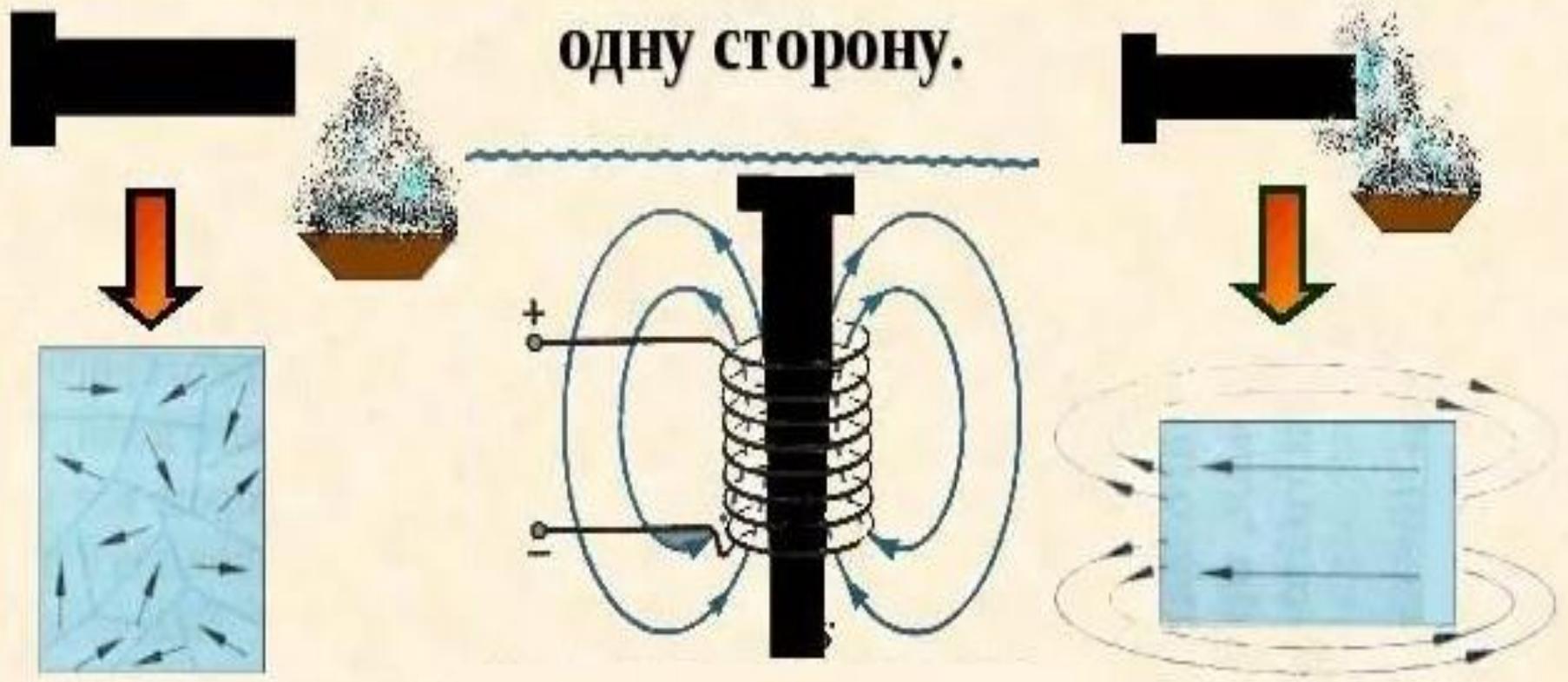
В ферромагнетиках происходит резкое усиление внешних магнитных полей.

Ферромагнетиками являются Fe, Co, Ni, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, а также соединения ферромагнитных материалов с неферромагнитными.

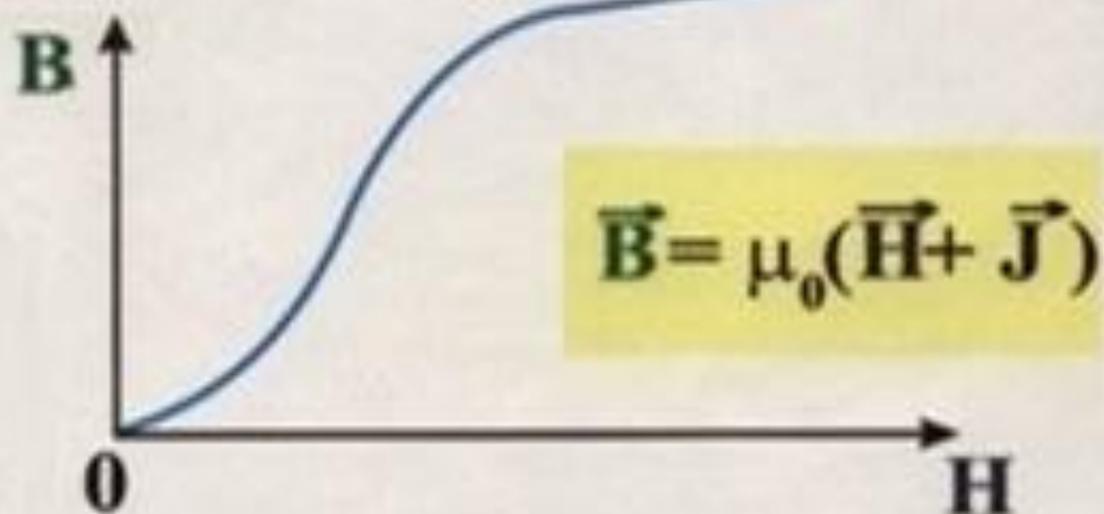
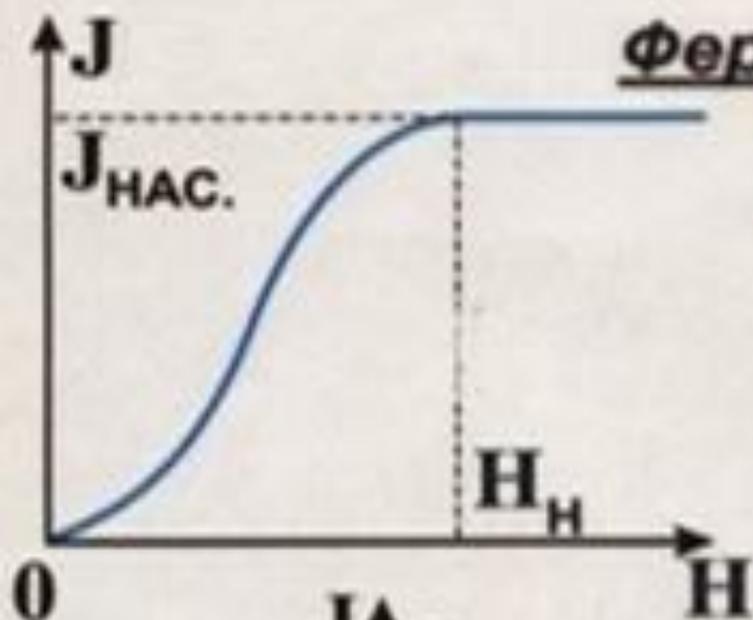
ЭЛЕКТРОННЫЕ ОБОЛОЧКИ АТОМА ЖЕЛЕЗА



Атомы железа обладают способностью объединяться в магнитные группы, где атомные магнитные поля направлены в одну сторону. В размагниченном состоянии направления магнитных полей этих групп беспорядочны, а в магните – они выстраиваются в одну сторону.



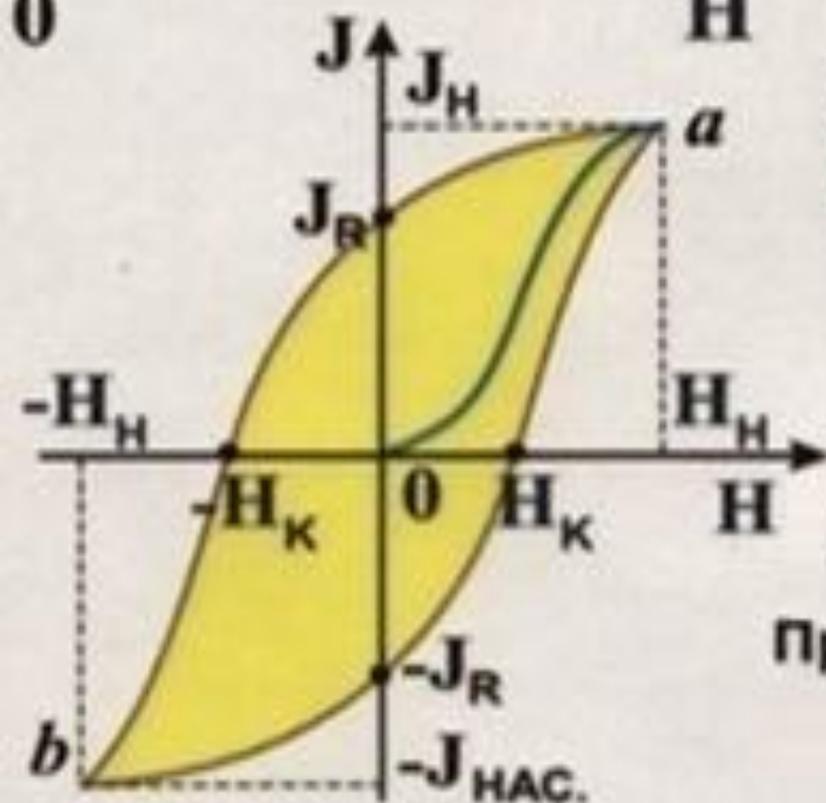
Ферромагнетизм



Когда J достигает насыщения,
 B растет по линейному закону

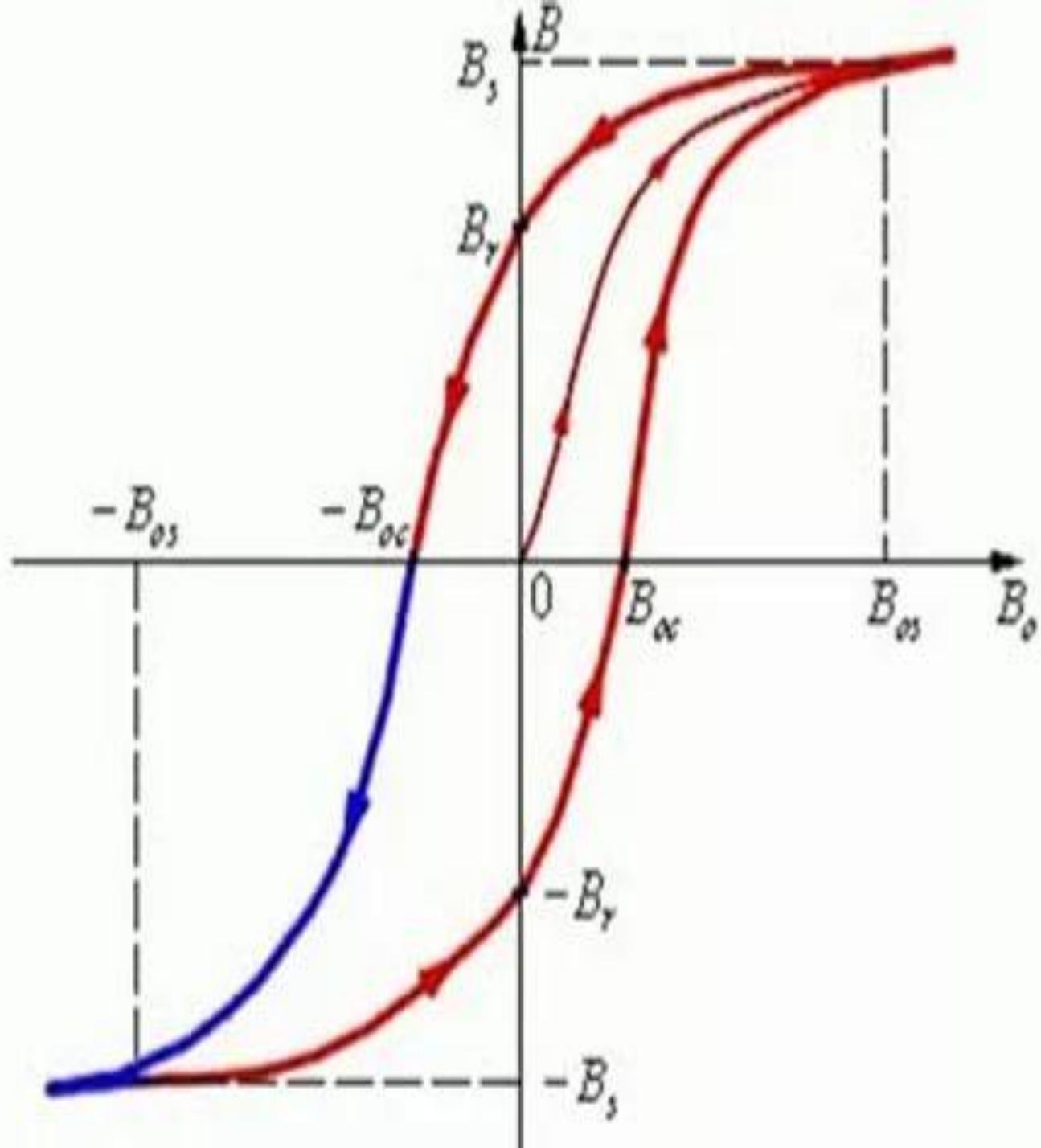
$$\vec{B} = \mu_0 \vec{H} + \text{const}$$

(const = $\mu_0 J_H$)



H_K - коэрцитивная сила.
 J_R - остаточная намагниченность.

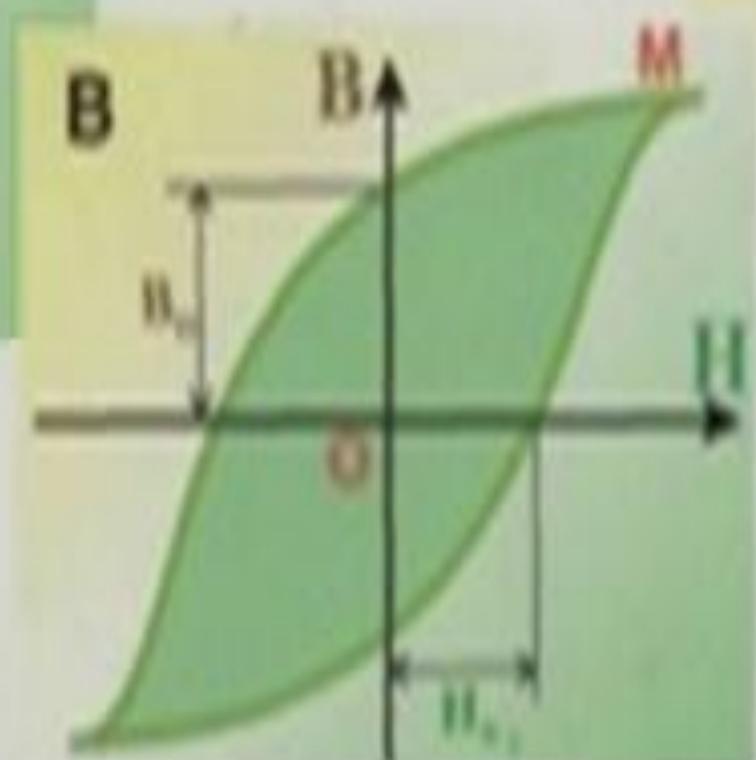
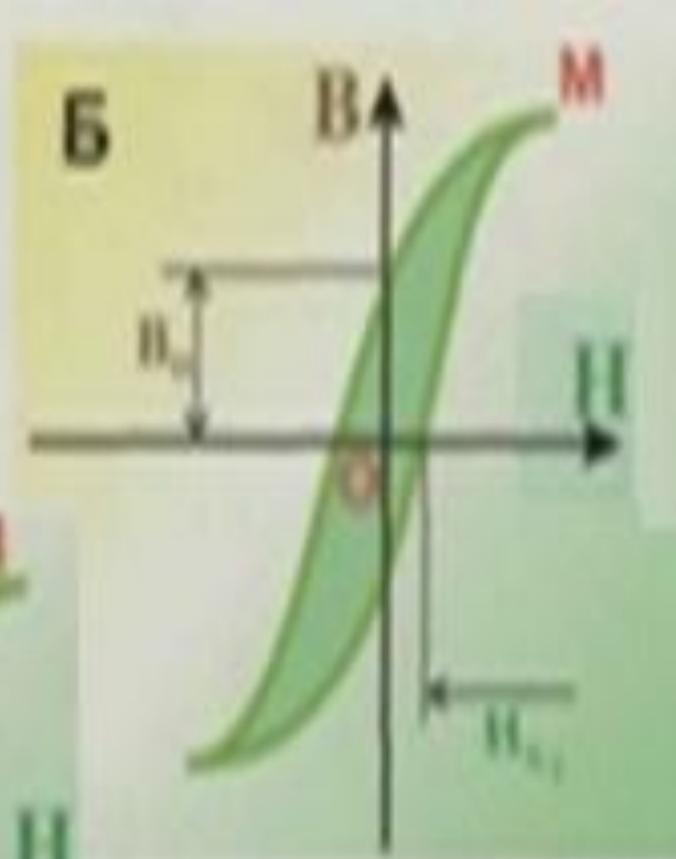
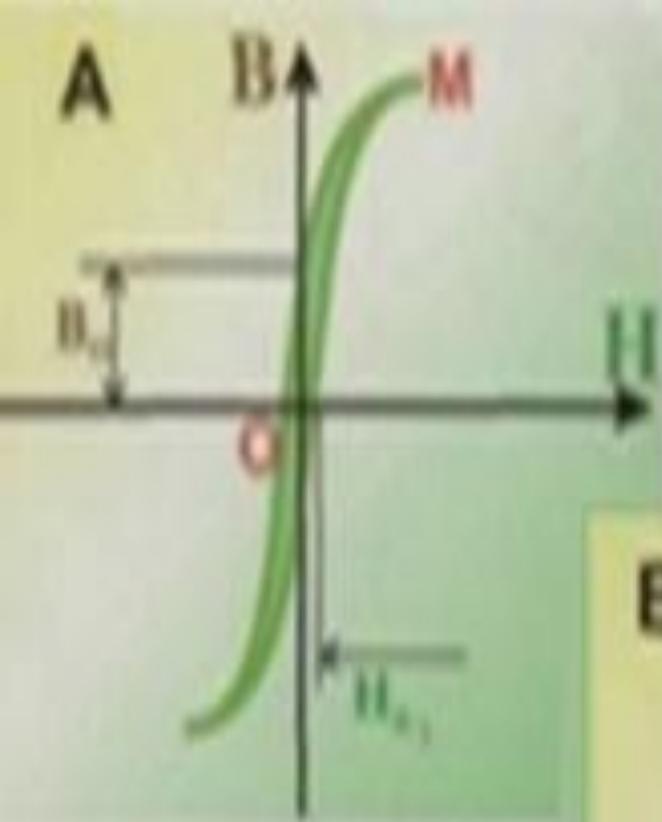
При температурах выше точки Кюри
ферромагнетик становится
парамагнетиком.



Магнитный гистерезис ферромагнетиков

Магнитный гистерезис - это зависимость магнитной индукции \vec{B} ферромагнетика от напряженности магнитного поля \vec{H}

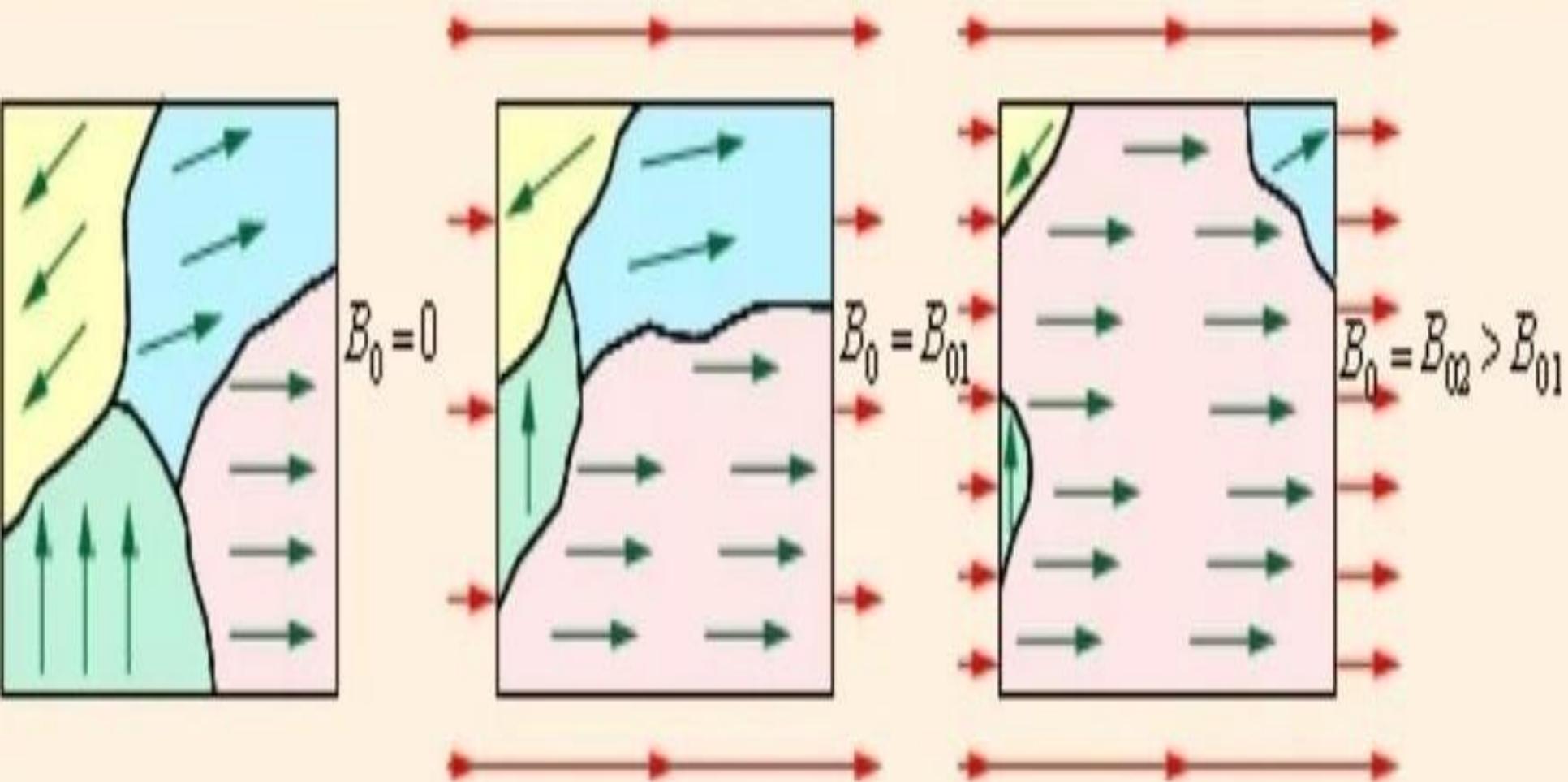




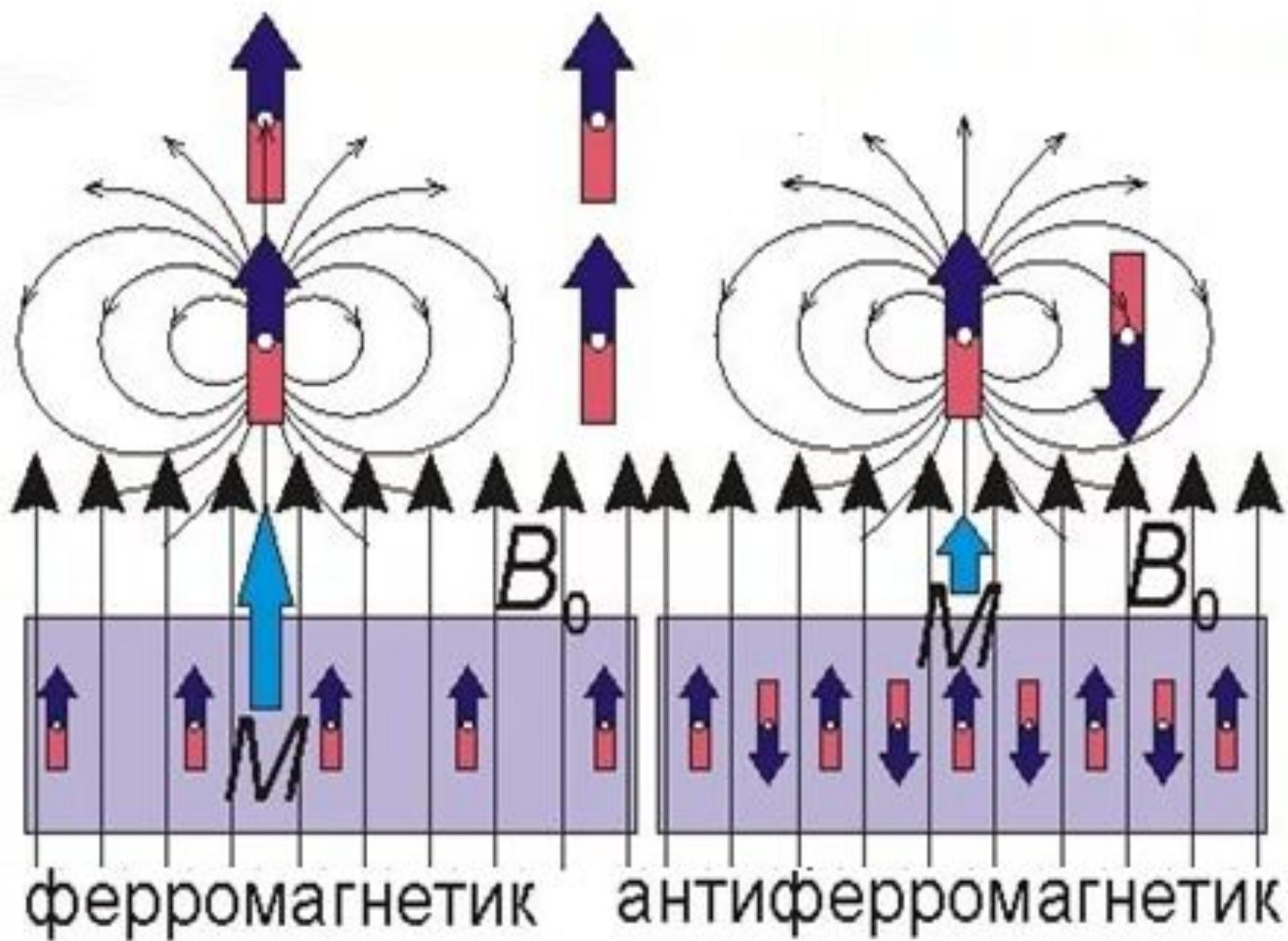
A - отожженное железо **Б** - мягкое железо **В** - сталь

Самопроизвольно намагниченные
области размером порядка

$10^{-2} - 10^{-4}$ см



Каждый домен – небольшой постоянный магнит



Применение магнитных свойств веществ

Изготовление постоянных магнитов.

Трансформаторы, электродвигатели.

Ферритовые антенны, сердечники.

Элементы оперативной памяти в
вычислительной технике.

Изготовление магнитных лент.

Сравним с циркуляцией вектора E

$$\oint E_l dl = 0$$

Магнитному полю нельзя приписывать потенциал, как электрическому полю. Этот потенциал не был бы однозначным: после каждого обхода по контуру он получал бы приращение $\mu_0 I$.

магнитное поле Земли

НАПРАВЛЕНИЕ ВРАЩЕНИЯ ЗЕМЛИ
вокруг своей оси

**Южный
магнитный
полюс Земли**

**удалён от
Северного
географического
полюса**

**примерно на
2100 км.**

