

НАМАГНИЧЕВАНИЕ ВЕЩЕСТВА
МОДЕЛЬ МОЛЕКУЛЯРНЫХ ТОКОВ
ВЕКТОР НАМАГНИЧИВАНИЯ
ОБЩИЙ ВИД ТЕОРЕМЫ О ЦИРКУЛЯЦИИ
ДЛЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ
ПРИ НАЛИЧИИ ВЕЩЕСТВА
МАГНИТНАЯ ПРОНИЦАЕМОСТЬ И
ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ВЕЩЕСТВ
КЛАССИФИКАЦИЯ МАГНИТНЫХ
МАТЕРИАЛОВ
МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Бигалиев Альберт

119 гр

Магнитное поле

Магнитное поле – это особый, отличный от вещества, вид материи, через которую передается действие магнита на другие тела. Оно обладает следующими характерными свойствами:

- вызывает ориентацию магнитной стрелки;
- намагничивает некоторые вещества (железо, сталь и др.);
- заставляет двигаться проводник, по которому течет электрический ток;
- вызывает образование ЭДС в проводнике, движущемся относительно магнитного поля.

Проявление магнитного поля

Магнитное поле проявляется в воздействии на магнитные моменты частиц и тел, на движущиеся заряженные частицы (или проводники с током). Сила, действующая на движущуюся в магнитном поле электрически заряженную частицу, называется силой Лоренца.

которая всегда направлена перпендикулярно к векторам \mathbf{v} и \mathbf{B} . Она пропорциональна заряду частицы q , составляющей скорости \mathbf{v} , перпендикулярной направлению вектора магнитного поля \mathbf{B} , и величине индукции магнитного поля B . В системе единиц СИ сила Лоренца выражается так:

$$\mathbf{F} = q [\mathbf{v} , \mathbf{B}] \quad (1)$$

В системе единиц СГС:

где квадратными скобками обозначено векторное произведение.

$$F = \frac{q}{c} [v, B] \quad (2)$$

Также (вследствие действия силы Лоренца на движущиеся по проводнику заряженные частицы) магнитное поле действует на проводник с током.

Сила, действующая на проводник с током называется силой Ампера. Эта сила складывается из сил, действующих на отдельные движущиеся внутри проводника заряды

Графическое изображение магнитного поля

магнитные поля изображают графически при помощи магнитных силовых линий – это такие линии, направление которых в каждой точке совпадает с направлением действия магнитных сил.

Направление и расположение силовых линий можно наглядно представить, пользуясь железными опилками, равномерно рассыпанными на листе бумаги, помещенном в магнитное поле.

Свойства магнитных линии:

магнитные силовые линии замкнуты на себя и никогда не пересекаются;

магнитные силовые линии стремятся сократиться до наименьшей длины, то есть обладают свойством продольного напряжения;

одинаково направленные линии отталкиваются, противоположно направленные – притягиваются, то есть обладают свойством бокового распора;

направление силового действия магнитных линий совпадает с направлением северного конца магнитной стрелки, помещенной в поле.

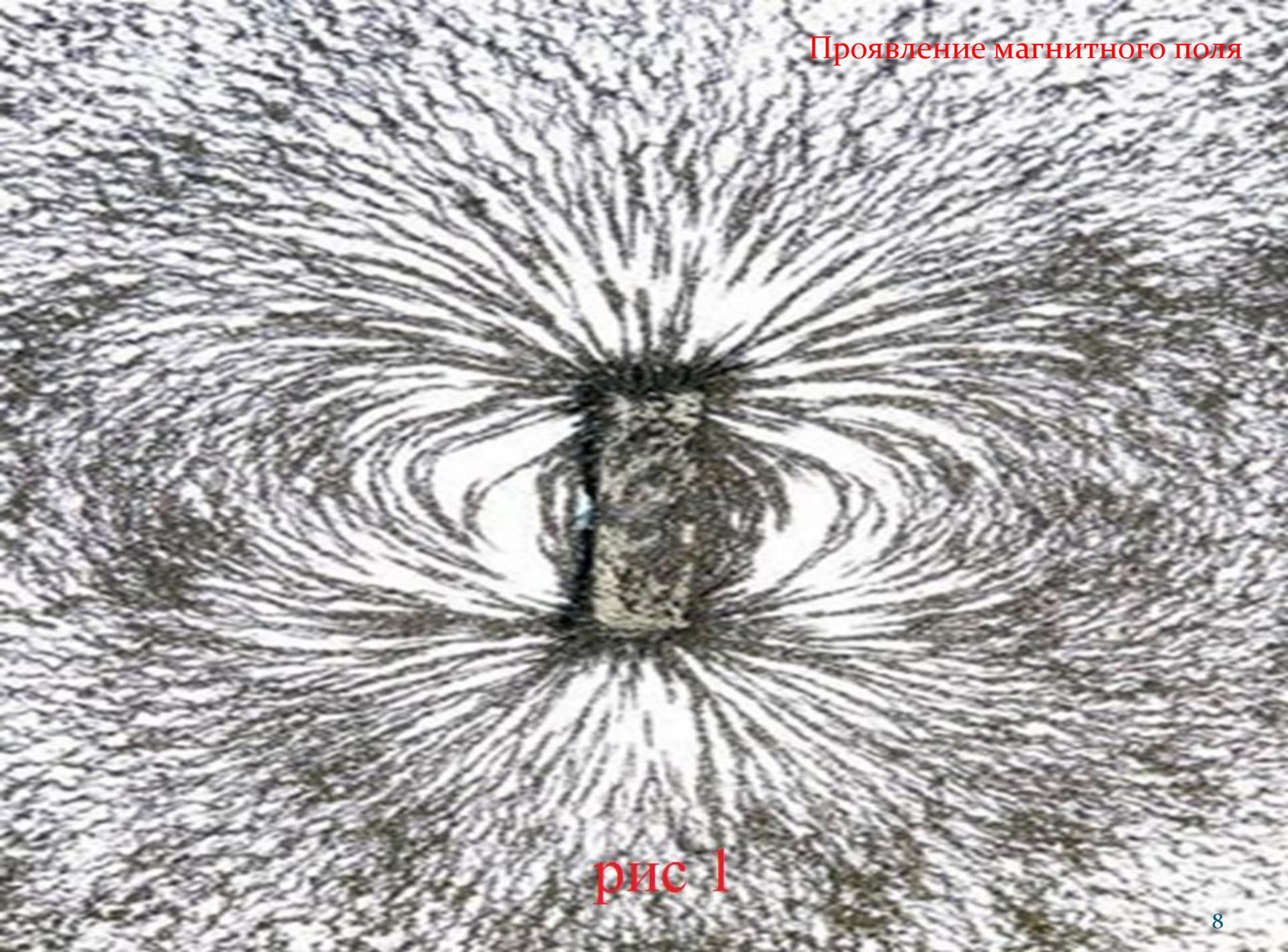


рис 1

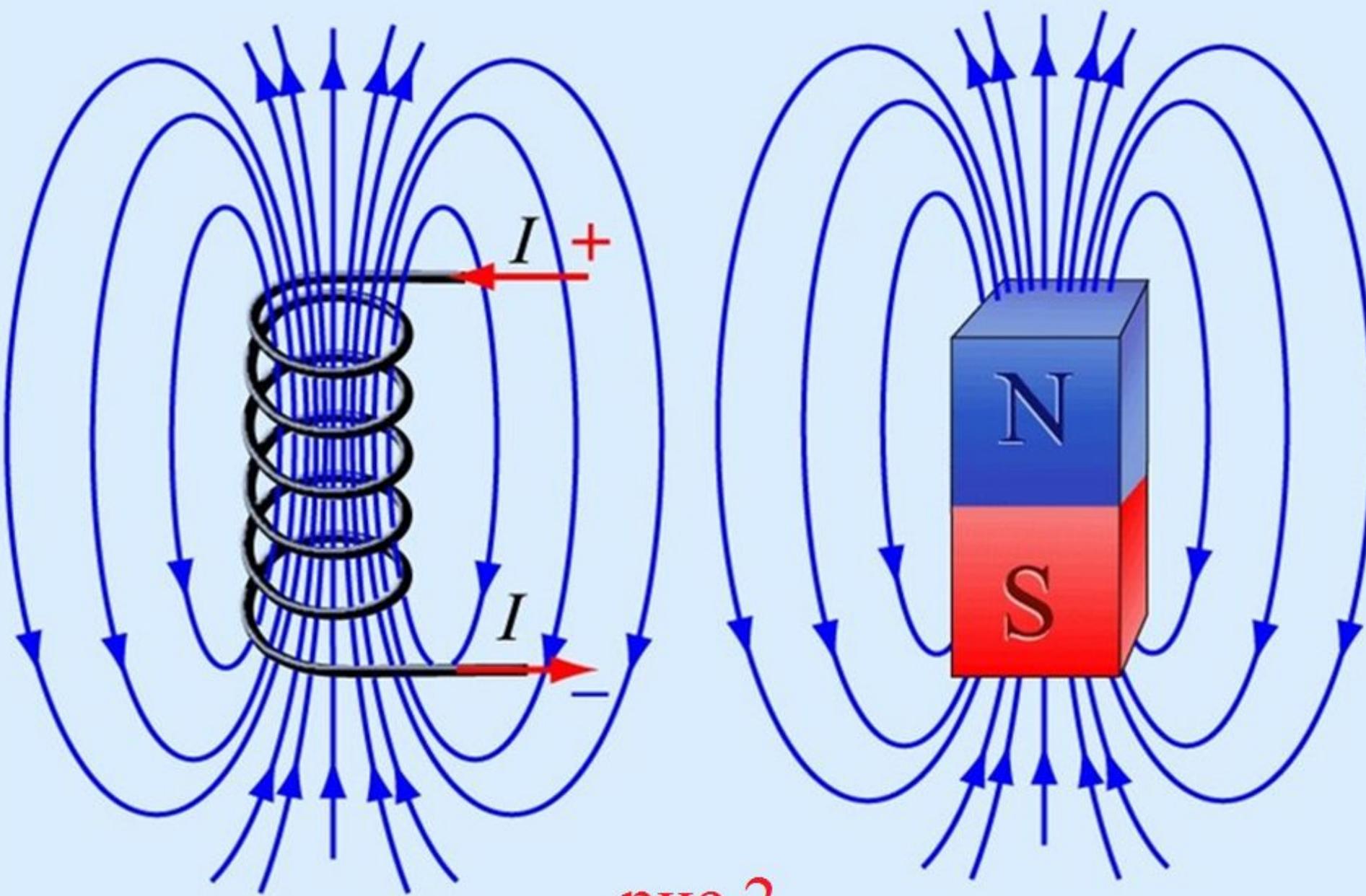


рис 2

Основными величинами, характеризующими магнитное поле, являются:

- **магнитная индукция,**
- **магнитный поток,**
- **магнитная проницаемость,**
- **напряженность магнитного поля.**

Намагничивание вещества

Наличие вещества приводит к изменению магнитного поля. Причина состоит в том, что все тела под действием магнитного поля начинают проявлять магнитные свойства – намагничиваются и сами создают магнитное поле

Таким образом, при наличии вещества в любой точке пространства

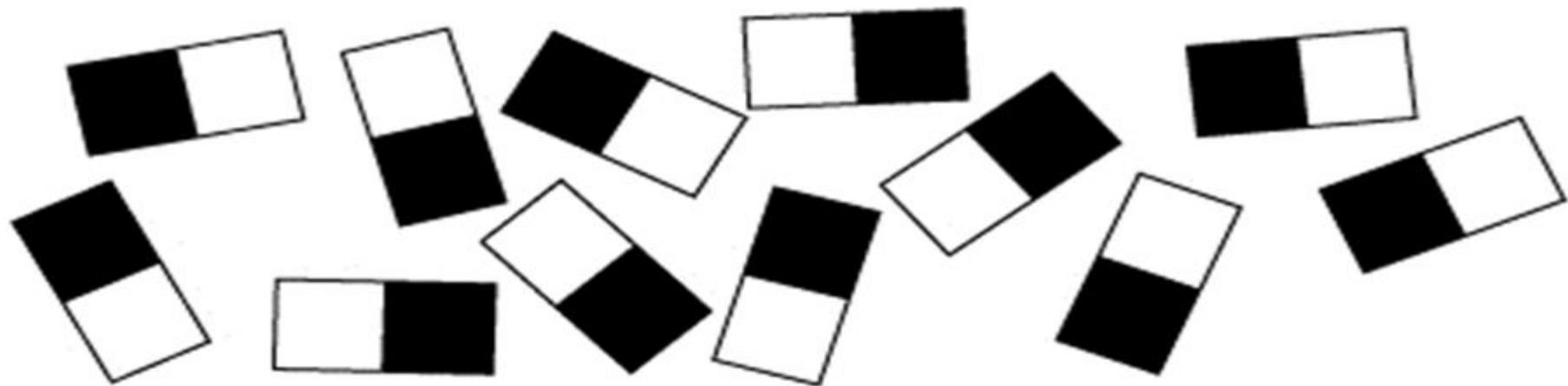
$$\overline{B} = \overline{B}_\circ + \overline{B}^\blacktriangle (3)$$

\overline{B}_\circ магнитная индукция, обусловленная токами в проводниках

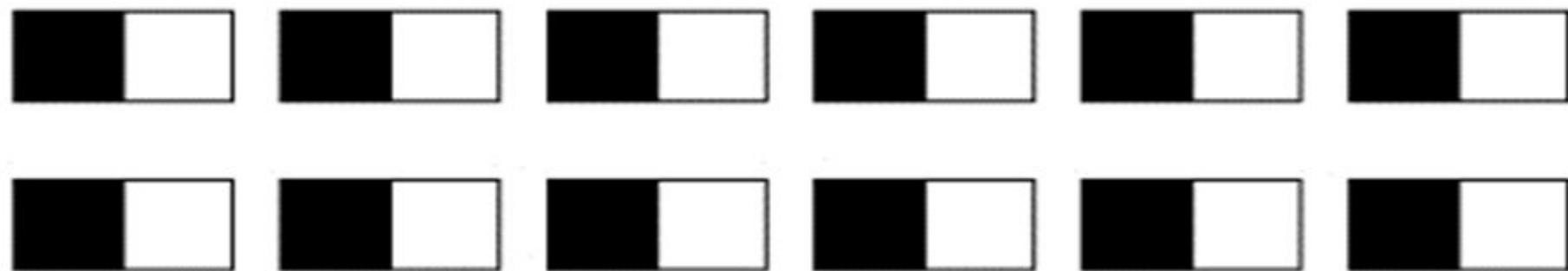
$\overline{B}^\blacktriangle$ Магнитная индукция, обусловленная намагниченным веществом

Любое тело, в том числе и магнитное, состоит из мельчайших частиц — молекул. В отличие от молекул немагнитных тел, молекулы магнитного тела обладают магнитными свойствами, представляя собой молекулярные магнетики. Внутри магнитного тела эти молекулярные магнетики расположены своими осями в различных направлениях, в результате чего само тело никаких магнитных свойств не проявляет. Но если эти магнетики заставить повернуться вокруг своих осей так, чтобы они своими северными полюсами были обращены в одну сторону, а южными в другую, то тело приобретет магнитные свойства, т. е. станет магнитом.

Процесс, в результате которого магнитное тело приобретает свойства магнита, называется **намагничиванием**.



a



б

рис 3

Н

← Направление поля

Поле \vec{B} существенно зависит от свойств вещества, поэтому возникает необходимость ознакомиться с поведением вещества в магнитном поле.

При построении теории магнитного поля мы будем исходить из заведомо упрощенной модели намагничивания вещества – модели молекулярных токов Ампера.

Опыты Эрстеда

Классический опыт, проведённый в 1820 году Эрстедом и являющийся первым экспериментальным доказательством воздействия электрических токов на магниты.



1184. ØRSTED. (See No. 4377.)

Ганс Христиан Эрстед помещал над магнитной стрелкой прямолинейный металлический проводник, направленный параллельно стрелке. При пропускании через проводник электрического тока стрелка поворачивалась почти перпендикулярно проводнику. При изменении направления тока стрелка разворачивалась на 180° . Аналогичный разворот наблюдался, если провод переносился на другую сторону, располагаясь не над, а под стрелкой.

Основываясь на работах Эрстеда, Ампер создал модель молекулярных токов.

Модель была создана задолго до открытия электронов, что заставляет удивиться гениальности Ампера.

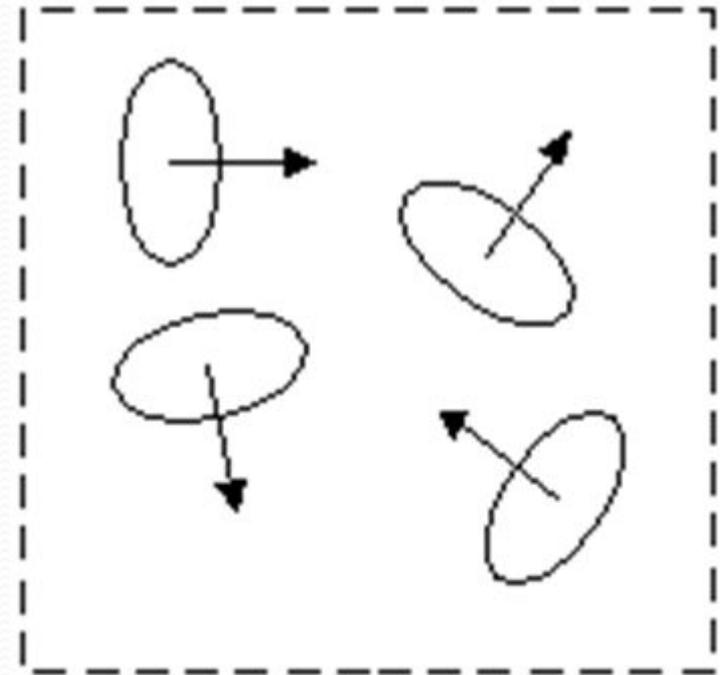


Модель молекулярных токов Ампера

1. В веществе имеются *микроскопические замкнутые токи*
2. без поля магнитные моменты ЭТИХ ТОКОВ *ориентированы хаотически*
3. без поля суммарный магнитный момент в объеме *равен нулю*
4. магнитные моменты молекулярных токов *ориентируются вдоль поля*

Намагничивание вещества

Без поля *суммарный*
Магнитный момент
 в объеме ΔV равен нулю



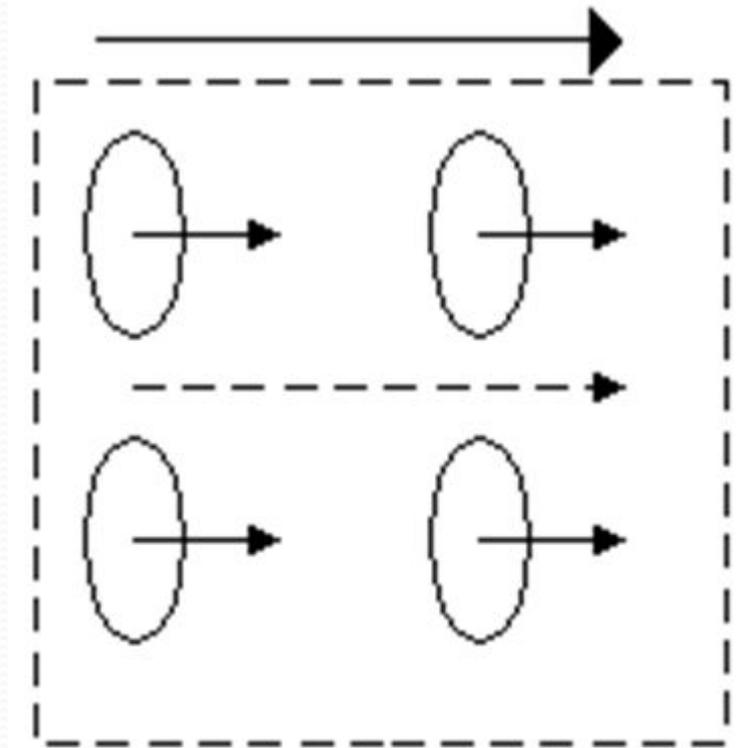
$$\bar{\mathbf{B}} = 0 \quad \blacktriangle V$$

рис 4

поле малый элемент объема ΔV
 приобретает
магнитный момент -
 вещество намагничивается

магнит. момент
 молекуляр. токов

$$J = \frac{\sum_i p_M^i}{\Delta V} \quad (4)$$



$\overline{B} \neq 0$ $\blacktriangle J$

рис 5

Вектор намагничивания

Суммарный магнитный момент единицы объема называется **намагниченностью** и определяется выражением:

$$\mathbf{J} = \frac{\sum_i \mathbf{p}_M^i}{\Delta V} \quad (4)$$

Единица в СИ 1 А/м (ампер на метр)

$$[P] = [I] * [S] = \text{А м}^2$$

$$[J] = [P] / [V] = \text{А / м}$$

В большинстве случаев значение намагниченности оказывается пропорциональным величине магнитного поля

$$J \sim \chi H \quad (5)$$

где коэффициент пропорциональности χ носит название **магнитной восприимчивости**.

неупорядоченные магнетики

(поля не слишком сильные,
температуры не слишком низкие)

$$J \sim B \quad (6)$$

магнитоупорядоченные магнетики:

1. микроскопические магнитные моменты взаимно Упорядочены / ориентированы
2. упорядочены **в отсутствие внешнего магнитного поля**
3. внутренние взаимодействия квантовой природы

Молекулярные токи и вектор намагничивания

1. без магнитного поля **суммарный молекулярный ток** через макроскопическую площадку **равен нулю**
2. в магнитном поле **появляются макроскопические молекулярные токи**

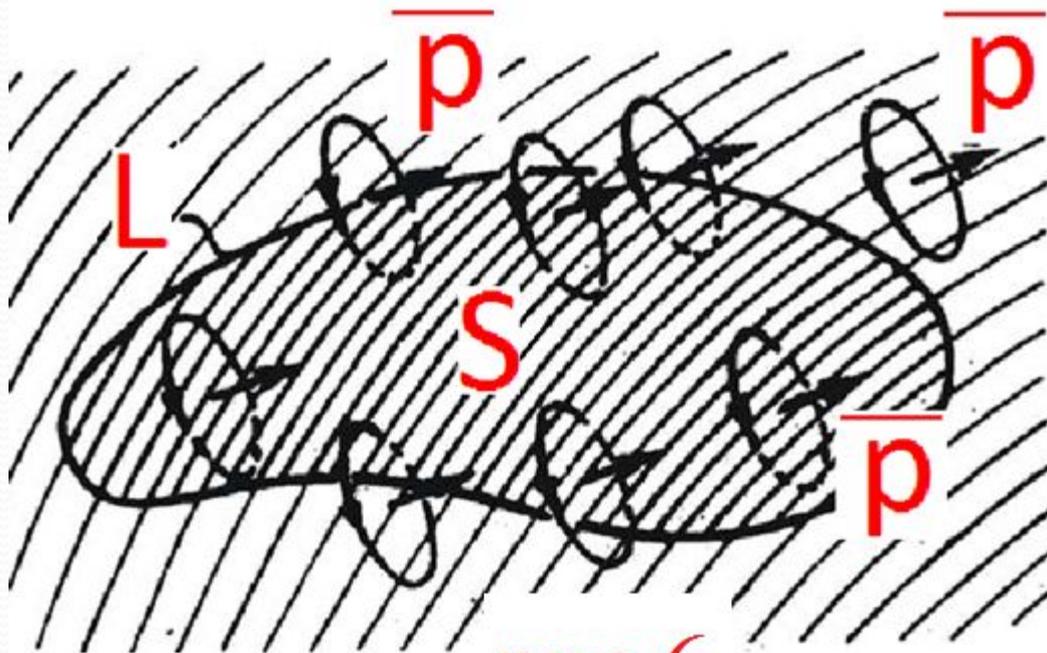


рис 6

вклад в ток I_m дадут только молекулярные токи, охватывающие контур L

Вклад ΔI^M в ток I^M от молекулярных токов охватывающих элемент ΔL

$$\Delta V = S \Delta l \cos \alpha$$

$$J = i S n_0$$

$$\Delta I^M = i n_0 \Delta V = J_1 \Delta l$$

$$I^M = \oint_i \Delta l \, dl \quad (7)$$

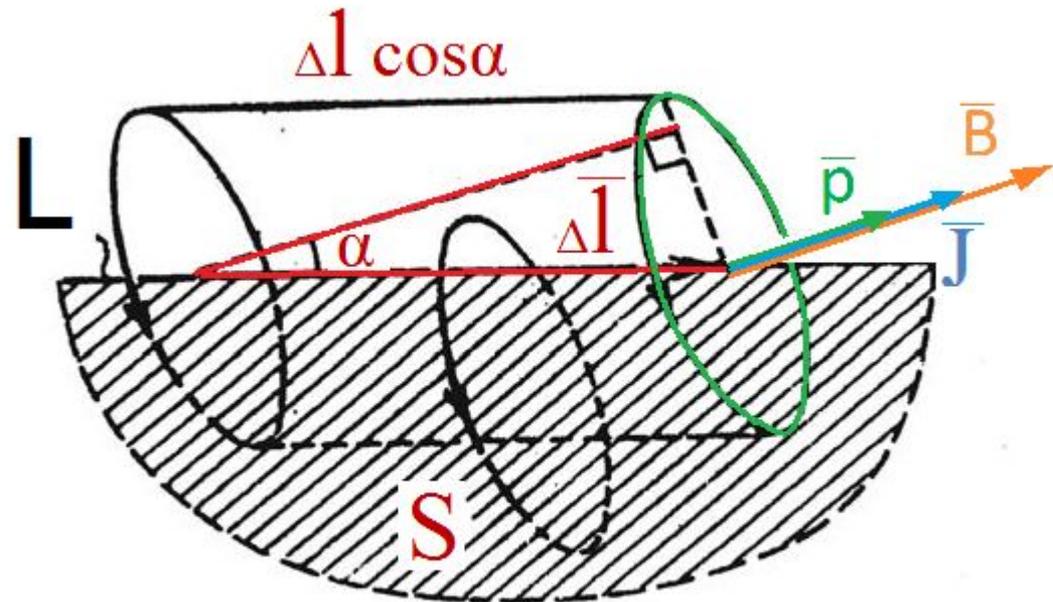


рис 7

Поверхностная плотность молекулярных токов и вектор намагничивания

В поверхностном слое образуется макроскопический поверхностный молекулярный ток



проекция вектора намагничивания на поверхность определяется поверхностной плотностью тока

$$\vec{j}_{\text{пов}}^M = \vec{J}_t$$

поверхностные молекулярные токи возникают всегда

объёмные молекулярные токи возникают в неоднородных магнетиках

ОБЩИЙ ВИД ТЕОРЕМЫ О ЦИРКУЛЯЦИИ ДЛЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВЕЩЕСТВА

Циркуляция магнитного поля постоянных токов по всякому замкнутому контуру пропорциональна сумме сил токов, пронизывающих контур циркуляции.

ОБЩИЙ ВИД ТЕОРЕМЫ О ЦИРКУЛЯЦИИ ДЛЯ ПОСТОЯННОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ ПРИ НАЛИЧИИ ВЕЩЕСТВА

магнитные свойства обусловлены молекулярными токами:

токи в провод. I

упоряд. молек. ток I^M

$$\oint_l B_l dl = \mu_0 (\sum_k I_k + I^M) \quad (8) \quad I^M = \int_l J_l dl \quad (11)$$

$$\oint_l (B_l / \mu_0 - J_l) dl = \sum_k I_k \quad (9) \quad \bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_0} - \bar{J} \quad (12)$$

$$\oint_l H_l dl = \sum_k I_k = \oint_s j_n dS \quad (10)$$

токи в проводниках

напряженность магнитного поля в вакууме

$$\bar{H} = \frac{\bar{B}}{\mu_0} \quad (13)$$

Магнитная проницаемость

Магнитная проницаемость — физическая величина, характеризующая связь между магнитной индукцией и напряжённостью магнитного поля в веществе.

Впервые встречается в работе Вернера Сименса «Beiträge zur Theorie des Elektromagnetismus» («Вклад в теорию электромагнетизма») в 1881 году.

В общем случае зависит как от свойств вещества, так и от величины и направления магнитного поля.

Обычно обозначается греческой буквой μ . Может быть как скаляром (у изотропных веществ), так и тензором (у анизотропных). В общем виде вводится следующим образом:

$$B_i = \mu_{ij} H_j \quad (14)$$

Для изотропных веществ справедливо:

$$B = \mu H \quad (15)$$

в системе СИ вводят как размерную (абсолютную), так и безразмерную (относительную) магнитные проницаемости:

$$\mu_r = \frac{\mu}{\mu_0} \quad (16)$$

где μ_r - относительная, а μ - абсолютная магнитная проницаемость, μ_0 - магнитная постоянная (магнитная проницаемость вакуума).

Магнитная проницаемость связана с магнитной восприимчивостью χ следующим образом:

$$\mu = 1 + \chi \quad (17)$$

Вообще говоря магнитная проницаемость зависит от частоты изменения намагничивающего поля, но при сравнительно низких частотах (небольшой быстроте изменения поля) ее можно (обычно) считать в этом смысле константой. Магнитная проницаемость вещества зависит от температуры, причем по-разному для разных типов магнетиков.

Магнитная восприимчивость

величина, характеризующая связь намагниченности вещества с магнитным полем в этом веществе. М. в. в статических полях χ на отношению намагниченности вещества M к напряжённости H намагничивающего поля

$$\chi = \frac{M}{H} \quad (18)$$

χ - величина безразмерная.

удельной магнитной восприимчивости, равной восприимчивости единицы массы вещества.

В СИ удельная восприимчивость измеряется в обратных килограммах (кг^{-1}).

$$\chi_{\text{уд}} = \chi / \rho \quad \text{где } \rho - \text{плотность вещества}$$

молярная магнитная восприимчивость

определяется как восприимчивость одного моля вещества и измеряется в обратных молях (моль^{-1}).

$$\chi = \chi_{\text{уд}} * M \quad \text{где } M \text{ — молекулярная масса вещества}$$

Закон Кюри

физический закон, описывает магнитную восприимчивость парамагнетиков, которая при постоянной температуре для этого вида материалов приблизительно прямо пропорциональна приложенному магнитному полю. *Закон Кюри* постулирует, что при изменении температуры и постоянном внешнем поле, степень намагниченности парамагнетиков обратно пропорциональна температуре:

$$M = C \frac{B}{T} \quad (19)$$

M — получаемая намагниченность материала;
 B — магнитное поле, измеренное в Теслах;
 T — абсолютная температура в Кельвинах;
 C — постоянная Кюри данного материала.

Это соотношение, полученное экспериментально Правило Кюри, выполняется только при высоких температурах или слабых магнитных полях. В обратном случае — то есть при низких температурах или при сильных полях — намагниченность не подчиняется этому закону.

Реальные объекты могут обладать как положительными, так и отрицательными магнитными восприимчивостями.

Примером веществ с отрицательной восприимчивостью могут служить диамагнетики — их намагниченность по направлению противоположна приложенному магнитному полю. Положительной восприимчивостью обладают, например, парамагнетики и ферромагнетики

Классификация магнитных материалов

1. Магнитонеупорядоченные
2. Магнитоупорядоченные

магнитонеупорядоченные (диамагнетики, парамагнетики):

- отсут. внутренние взаимодействия, вызывающие упорядочение микроскопических магнитных моментов
- намагниченность равна нулю в отсутствии магнитного поля
- намагничивание происходит под действием внешнего поля
- большинство веществ с изотропной структурой

магнитоупорядоченные (ферромагнетики):

- кристаллические вещества с анизотропной структурой
- *внутренние (обменные) взаимодействия* квантовой природы приводят к взаимной ориентации магнитных моментов без поля
- отличное от нуля (большое) намагничивание без поля
- различные типы упорядочения (ферромаг., антиферромаг. и т. д.)

Диамагнетики

Диамагнетизм (от греч. Dia – расхождение и магнетизм) – свойство веществ намагничиваться навстречу приложенному магнитному полю

Диамагнетиками называют вещества, магнитные моменты атомов которых в отсутствии внешнего поля равны нулю, т.к. магнитные моменты всех электронов атома взаимно скомпенсированы (инертные газы, водород, азот, NaCl и др)

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

В пределах малого объема ΔV изотропного диамагнетика наведенные магнитные моменты $\Delta \bar{P}_m$ всех атомов одинаковы и направлены противоположно вектору \bar{B}
 Вектор намагниченности диамагнетика равен

$$\bar{J} = \frac{n \Delta \bar{P}_m}{\Delta V} = n_0 \Delta \bar{P}_m = \frac{\bar{B}}{\mu_0} \chi = \bar{H} \chi \quad (20)$$

Для всех диамагнетиков $\chi < 0$

Таким образом, вектор $\vec{B}_{\text{внутр}}$ магнитной индукции собственного магнитного поля, создаваемого диамагнетиком при его намагничивании во внешнем поле $\vec{B}_{\text{внеш}}$ направлен в сторону, противоположную $\vec{B}_{\text{внеш}}$ (в отличие от диэлектриков в электрическом поле)

У диамагнетиков $\chi \sim 10^{-6} - 10^{-5}$

Парамагнетики

Парамагнетизм (от греч. Para – возле, рядом и магнетизм) – свойство веществ во внешнем магнитном поле намагничиваться в направлении этого поля, поэтому внутри парамагнетика к действию внешнего поля прибавляется действие наведенного внутреннего поля

Парамагнетиками называются вещества, атомы которых имеют в отсутствии внешнего магнитного поля, отличный от нуля магнитный момент \bar{P}_m

Они намагничиваются в направлении вектора $\bar{B}_{\text{внеш}}$

В отсутствии внешнего магнитного поля намагниченность парамагнетика $J = 0$, так как векторы \vec{P}_{mj} разных атомов ориентированы беспорядочно.

При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле, происходит преимущественная ориентация собственных магнитных моментов атомов \vec{P}_{mj} по направлению поля, так что парамагнетик намагничивается.

Значения χ для парамагнетиков положительны ($\chi > 0$) и находится в пределах 10^{-5} - 10^{-3} , то есть, примерно как и у диамагнетиков.

Ферромагнетики

К ферромагнетикам (ferrum - железо) относятся вещества, магнитная восприимчивость которых положительна и достигает значений $10^4 - 10^5$

Намагниченность $\bar{J} = \bar{H} \chi$ и магнитная индукция

$\bar{B} = (\bar{H} + \bar{J}) \mu_0$ ферромагнетиков растут с увеличением напряженности магнитного поля

нелинейно, и в полях $8 * 10^3$ А/м намагниченность ферромагнетиков достигает предельного значения, а вектор магнитной индукции растет линейно с \bar{H}

$$\bar{B} = \bar{J}_m \mu_0 + \bar{H} \mu_0 \quad (21)$$

Ферромагнитные свойства материалов проявляются только у веществ в твердом состоянии, атомы которых обладают постоянным спиновым или орбитальным магнитным моментом, в частности у атомов с недостроенными внутренними электронными оболочками

Типичные представители переходные металлы

В ферромагнетиках происходит резкое усиление внешних магнитных полей

Существенным отличием ферромагнетиков от диа- и парамагнетиков является наличие у ферромагнетиков самопроизвольной (спонтанной) намагниченности в отсутствие внешнего магнитного поля

Наличие у ферромагнетиков самопроизвольного магнитного момента в отсутствии внешнего магнитного поля означает, что электронные спины и магнитные моменты атомных носителей магнетизма ориентированы в веществе упорядоченным образом

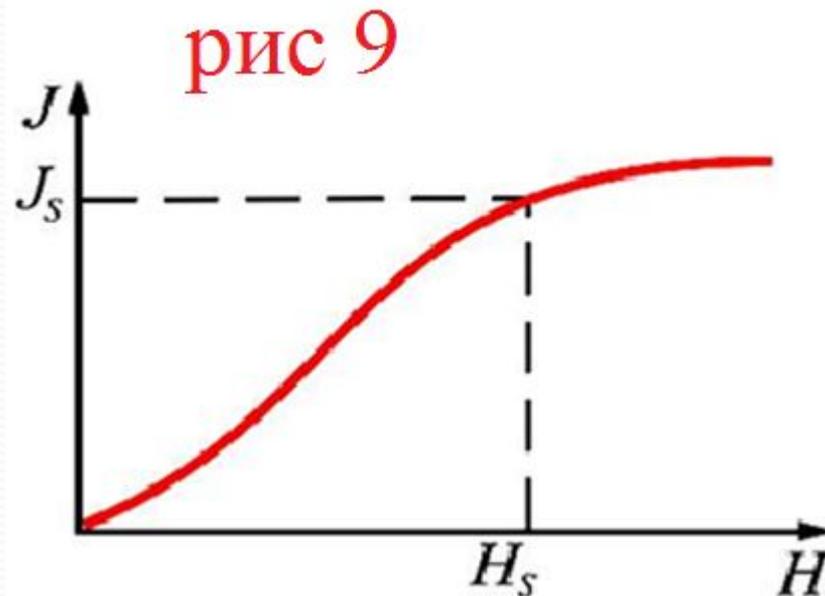
Ферромагнетики это вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, температуры.

Ферромагнетики, в отличие от слабо магнитных диа- и парамагнетиков, являются сильно магнитными веществами:

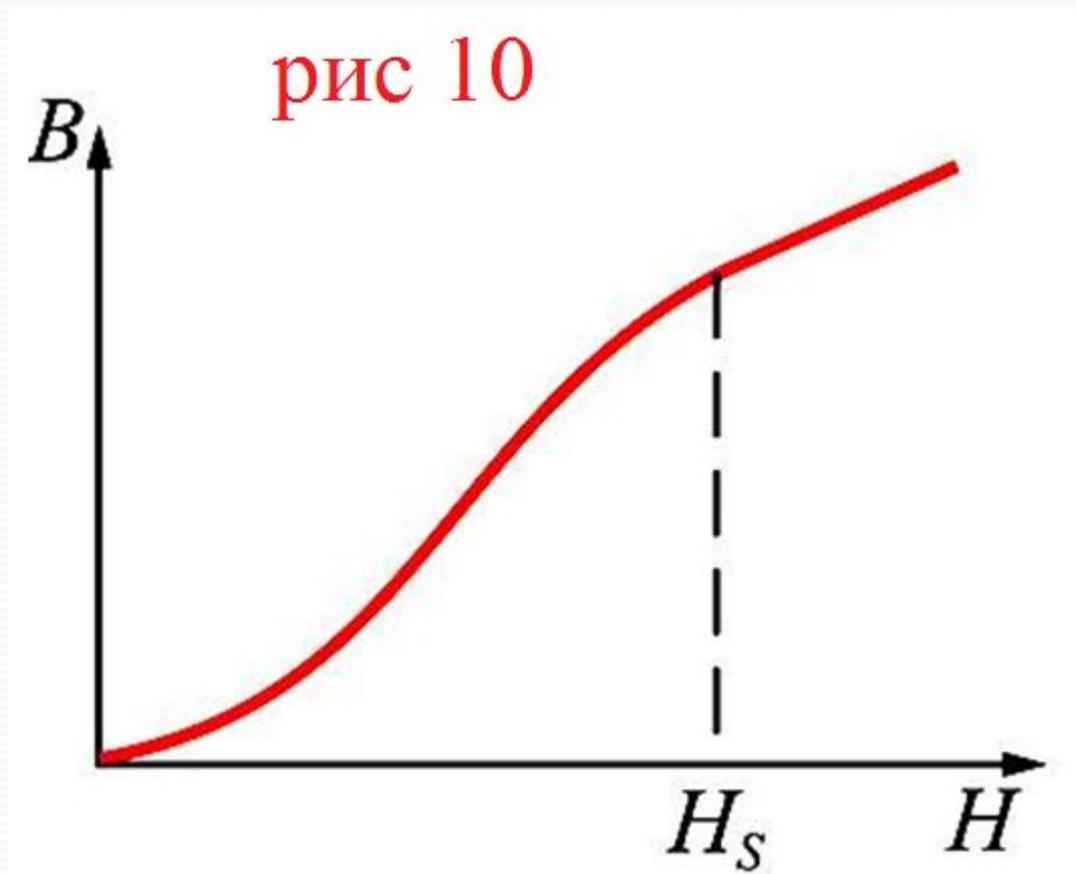
внутреннее магнитное поле в них может в сотни раз превосходить внешнее поле

Основные отличия магнитных свойств ферромагнетиков

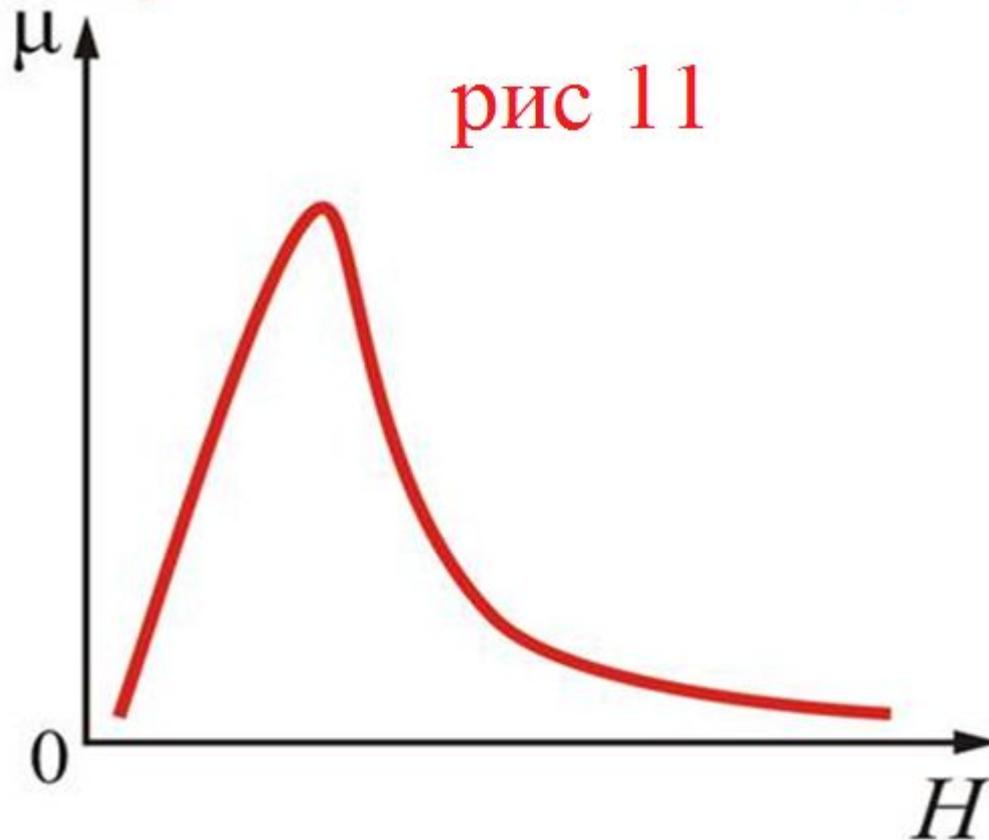
1) Нелинейная зависимость намагниченности от напряженности магнитного поля H (рисунок). Как видно из рисунка при $H > H_s$ наблюдается магнитное насыщение.



2) При $H < H_s$ зависимость магнитной индукции B от H нелинейная, а при $H > H_s$ – линейна.



Зависимость относительной магнитной проницаемости от H имеет сложный характер (рисунок), причем максимальные значения μ очень велики (10^3 - 10^6).



У каждого ферромагнетика имеется такая температура называемая **точкой Кюри** (T_K), выше которой это вещество теряет свои особые магнитные свойства.

Наличие температуры Кюри связано с разрушением при $T > T_K$ упорядоченного состояния в магнитной подсистеме кристалла – параллельной ориентации магнитных моментов.

Для никеля температура Кюри равна 360°C

Существование магнитного гистерезиса.

На рисунке показана **петля гистерезиса** – график зависимости намагниченности вещества от напряженности магнитного поля H .

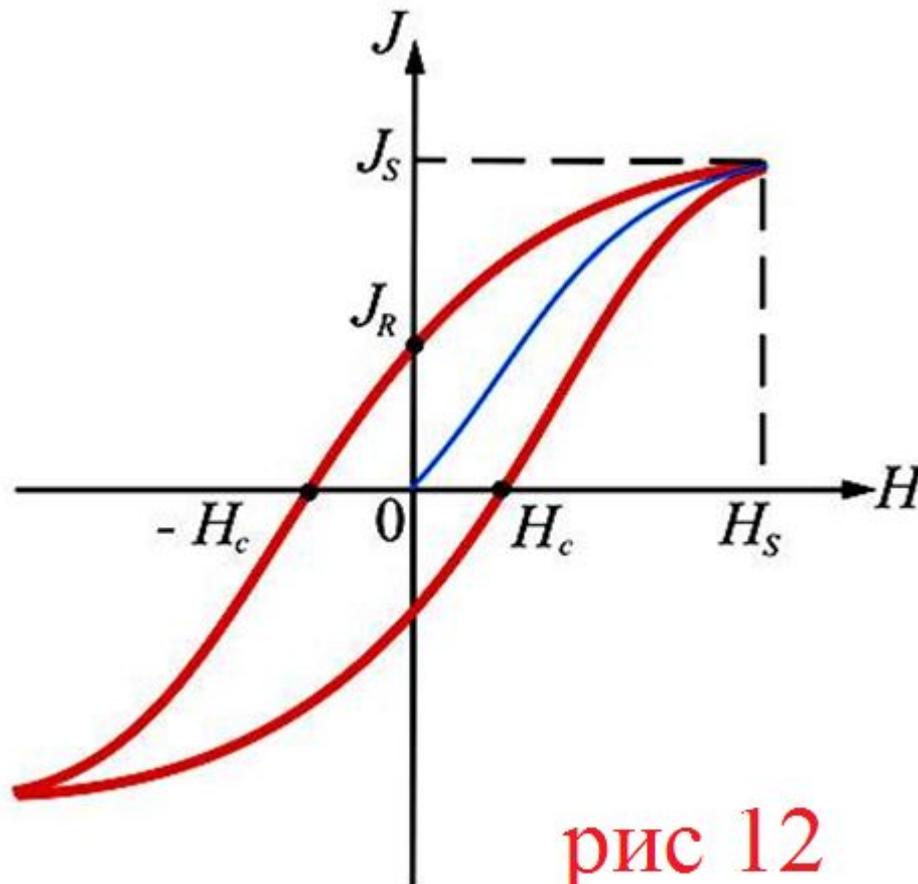


рис 12

Намагниченность J_S при $H = H_S$ называется намагниченностью насыщения.

Намагниченность $\pm J_R$ при $H = 0$ называется остаточной намагниченностью (что необходимо для создания постоянных магнитов).

Напряженность $\pm H_S$ магнитного поля, полностью размагниченного ферромагнетика, называется коэрцитивной силой.

Она характеризует способность ферромагнетика сохранять намагниченное состояние.

Большой коэрцитивной силой (широкой петлей гистерезиса) обладают магнитотвердые материалы.

Малую коэрцитивную силу имеют магнитомягкие материалы.

Измерение гиромагнитного отношения для ферромагнетиков показали, что элементарными носителями магнетизма в них являются спиновые магнитные моменты электронов.

Самопроизвольно при $T < T_K$ намагничиваются лишь очень маленькие монокристаллы ферромагнитных материалов, например никеля или железа.

Широкое распространение в радиотехнике, особенно в высокочастотной радиотехнике получили ферриты – ферромагнитные неметаллические материалы – соединения окиси железа с окислами других металлов.

Ферриты сочетают ферромагнитные и полупроводниковые свойства, именно с ЭТИМ связано их применение как магнитных материалов в радиоэлектронике и вычислительной технике.

Ферриты обладают высокими значениями намагниченности и температурами Кюри.

Магнитное поле Земли

Известно, что планета Земля представляет собой гигантский постоянный магнит, северный полюс которого находится в южном полушарии Земли, а южный – на севере Канады, примерно в 1500 км от северного географического полюса. Несовпадение магнитных и географических полюсов приводит к тому, что стрелка компаса не указывает точно на полюс. Это явление известно как **склонение**. Для Москвы склонение – восточное, оно составляет $6,5^\circ$.

Установлено, что магнитное поле Земли оказывает влияние на сезонные миграции зверей и птиц . Менее известным фактом является то, что поле Земли защищает все живое на планете от убийственного действия космической радиации, создавая вокруг планеты радиационные пояса. Нижний радиационный пояс находится на высоте 200–600 км, тогда как верхний простирается до 1500 км. Кроме того, магнитное поле Земли отклоняет потоки частиц от Солнца в области, прилегающие к полюсам, вызывая **полярные сияния**.

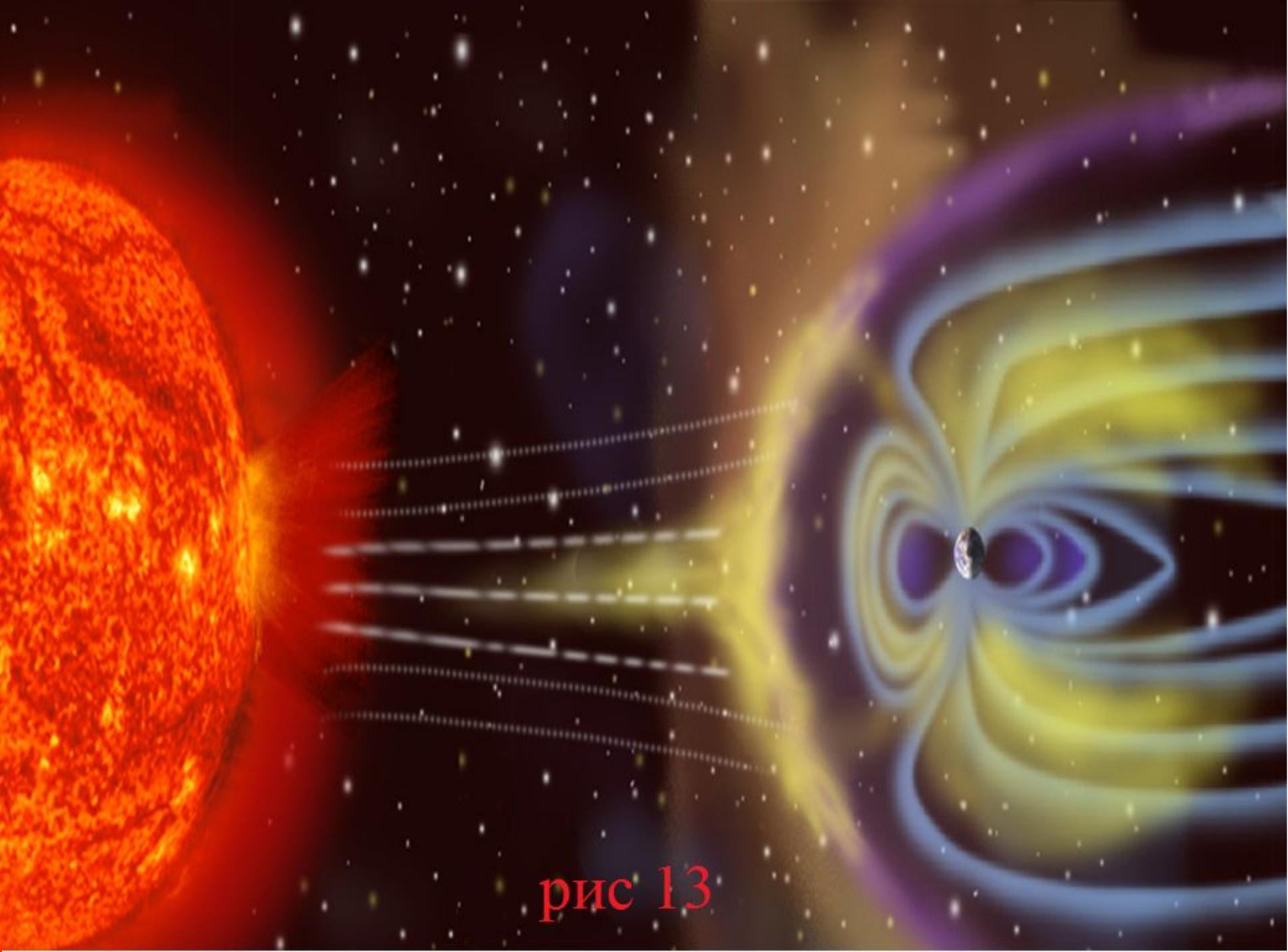
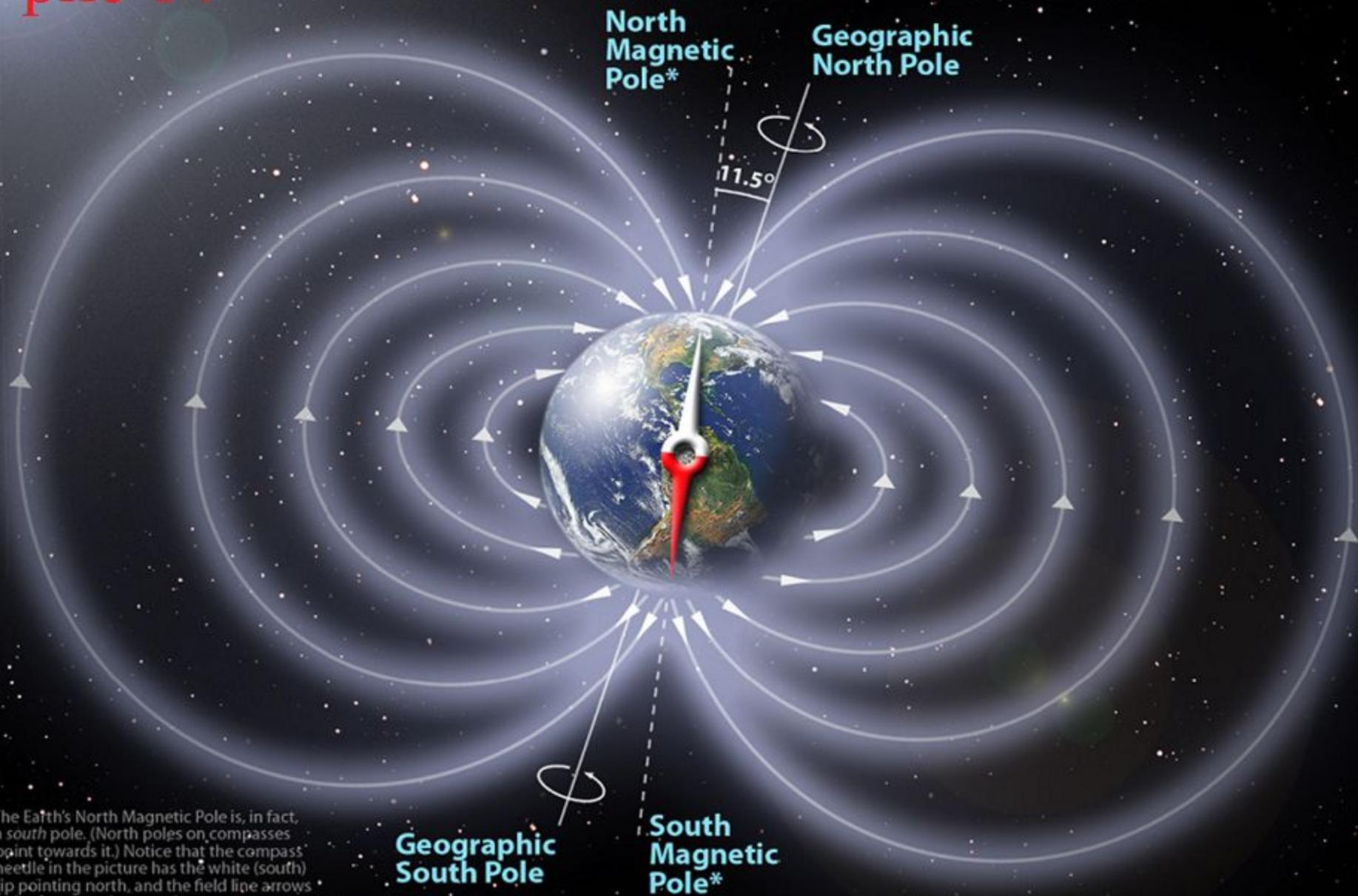


рис 13

Существует ряд гипотез, объясняющих возникновение магнитного поля Земли. В последнее время получила развитие теория, связывающая возникновение магнитного поля Земли с протеканием токов в жидком металлическом ядре. Подсчитано, что зона, в которой действует механизм «магнитное динамо» находится на расстоянии 0,25...0,3 радиуса Земли

рис 14

The Earth's Magnetic Field



*The Earth's North Magnetic Pole is, in fact, a *south* pole. (North poles on compasses point towards it.) Notice that the compass needle in the picture has the white (south) tip pointing north, and the field line arrows point from south to north.

Larger versions of this image are available: contact peter.reid@ed.ac.uk

Peter Reid, 2007

Смещение магнитных полюсов регистрируется с 1885 года. За последние 100 лет магнитный полюс в южном полушарии переместился почти на 900 км и вышел в Индийский океан.

С 1973 по 1984 год его пробег составил 120 км, с 1984 по 1994 год — более 150 км. Хотя эти данные расчётные, они подтверждены замерами северного магнитного полюса.

По данным на начало 2007 года, скорость дрейфа северного магнитного полюса увеличилась с 10 км/год в 1970-х годах до 60 км/год в 2004 году.

Напряжённость земного магнитного поля падает, причём неравномерно. За последние 22 года она уменьшилась в среднем на 1,7 %, а в некоторых регионах — например, в южной части Атлантического океана, — на 10 %.

В некоторых местах напряжённость магнитного поля, вопреки общей тенденции, даже возросла.

В прошлом инверсии магнитных полюсов происходили многократно и жизнь сохранилась. Вопрос в том, какой ценой. Если, как утверждается в некоторых гипотезах, во время перестановки полюсов магнитосфера Земли на некоторое время исчезнет, то на Землю обрушится поток космических лучей, что представляет опасность для обитателей суши и тем большую, если исчезновение магнитосферы будет сопряжено с истощением озонового слоя. Обнадёживает тот факт, что во время инверсии магнитного поля Солнца, произошедшего в марте 2001 года, полного исчезновения солнечной магнитосферы зафиксировано не было.

Литература

1. <http://dic.academic.ru>
2. <http://ru.wikipedia.org>
3. <http://revolution.allbest.ru>
4. <http://www.physbook.ru>
5. И.В. Савельев, Курс общей физики, том 2.
Электричество, волны, оптика. М. Наука, 1982 г.
6. Белов Д. В. Электромагнетизм и волновая оптика
Изд. МГУ 1994 г. 210 стр