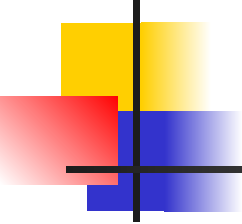


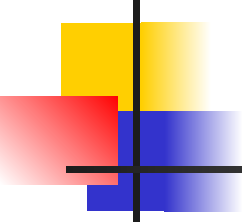
# МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

- **1. Магнитные моменты электронов и атомов**
- **2. Атом в магнитном поле**
- **3. Диамагнетики и парамагнетики в магнитном поле**
- **4. Магнитное поле в веществе**
- **5. Ферромагнетики**

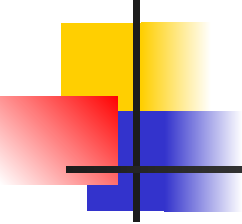
# Магнитные моменты электронов и атомов

- 
- Различные среды при рассмотрении их магнитных свойств называют **магнетиками**.
  - Все вещества в той или иной мере взаимодействуют с магнитным полем.
  - У некоторых материалов магнитные свойства сохраняются и в отсутствие внешнего магнитного поля.
  - Намагничивание материалов происходит за счет токов, циркулирующих внутри атомов – вращения электронов и движения их в атоме.
  - Поэтому намагничивание вещества следует описывать при помощи реальных атомных токов, называемых «амперовскими» токами.

# Магнитные моменты электронов и атомов

- 
- В отсутствие внешнего магнитного поля магнитные моменты атомов вещества ориентированы обычно беспорядочно, так что создаваемые ими магнитные поля компенсируют друг друга.
  - При наложении внешнего магнитного поля атомы стремятся сориентироваться своими магнитными моментами  $\vec{\mu}_m$  по направлению внешнего магнитного поля, и тогда компенсация магнитных моментов нарушается, тело приобретает магнитные свойства – намагничивается.

# Магнитные моменты электронов и атомов

- 
- Большинство тел намагничивается очень слабо и величина индукции магнитного поля  $B$  в таких веществах мало отличается от величины индукции магнитного поля в вакууме .
  - Если магнитное поле слабо усиливается в веществе, то такое вещество называется *парамагнетиком*.
  - если ослабевает, то это *диамагнетик*.
  - Но есть вещества, обладающие сильными магнитными свойствами.
  - Такие вещества называются *ферромагнетиками*

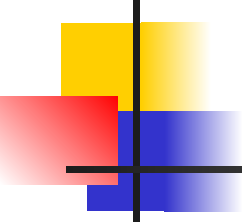
# Магнитные моменты электронов и атомов

- Эти вещества способны сохранять магнитные свойства и в отсутствие внешнего магнитного поля, представляя собой постоянные магниты.

$$\mu = \frac{B}{B_0} \gg 1$$

- Все тела при внесении их во внешнее магнитное поле **намагничиваются** в той или иной степени, т.е. создают собственное магнитное поле, которое накладывается на внешнее магнитное поле.

# Магнитные моменты электронов и атомов

- 
- 
- **Магнитные свойства вещества определяются магнитными свойствами электронов и атомов.**
  - **Магнетики** состоят из атомов, которые в свою очередь состоят из положительных ядер и, условно говоря, вращающихся вокруг них электронов.

# Магнитные моменты электронов и атомов

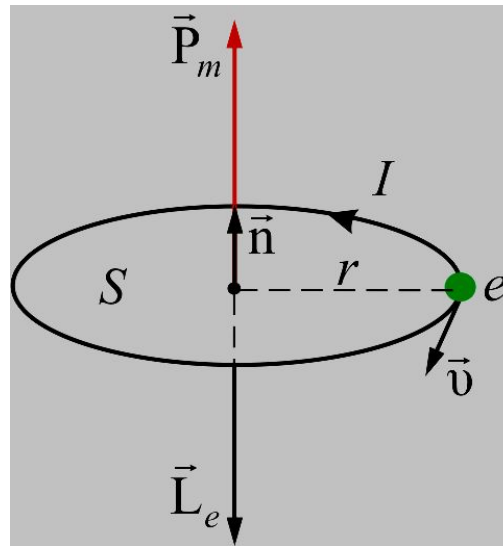
- Электрон, движущийся по орбите в атоме эквивалентен замкнутому контуру с орбитальным током  $I = ev$ ,
- где  $e$  – заряд электрона,  $v$  – частота его вращения по орбите.
- Орбитальному току соответствует **орбитальный магнитный момент** электрона.

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

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

# Магнитные моменты электронов и атомов

- На рисунке показано направление орбитального магнитного момента электрона.





# Магнитные моменты электронов и атомов

- Электрон, движущийся по орбите имеет **орбитальный момент импульса**, который имеет противоположное направление по отношению к  $\mathbf{P}_m$  и связан с ним соотношением 
$$\mathbf{P}_m = \gamma \mathbf{L}_e.$$
- Здесь, коэффициент пропорциональности  $\gamma$  называется **гиромагнитным отношением орбитальных моментов** и равен

$$\gamma = -\frac{e}{2m},$$

- где  $m$  – масса электрона.

# Магнитные моменты электронов и атомов

- Кроме того, электрон обладает **собственным моментом импульса**, который называется **спином электрона**

- Спину электрона  $\hbar/2$  соответствует спиновый магнитный момент электрона, направленный в противоположную сторону:

- Величину  $\frac{\mu_{ms}}{\mu_{es}}$  называют **гиромангнитным отношением спиновых моментов**

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

# Магнитные моменты электронов и атомов

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

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

- где  $\mu_B$  – *квантовый магнитный момент электрона – магнетон Бора.*
- *Орбитальным магнитным моментом атома* называется геометрическая сумма орбитальных магнитных моментов всех электронов атома

$$\mathbf{P}_m = \sum_{i=1}^Z \mathbf{P}_{mi},$$

# Магнитные моменты электронов и атомов

- где  $Z$  – число всех электронов в атоме – порядковый номер элемента в периодической системе Менделеева.
- *Орбитальным моментом импульса  $L$  атома* называется геометрическая сумма моментов импульса всех электронов атома:

$$\mathbf{L} = \sum_{i=1}^Z \mathbf{L}_{ei}.$$

# Атом в магнитном поле

- При внесении атома в магнитное поле с индукцией  $\vec{B}$  на электрон, движущийся по орбите эквивалентной замкнутому контуру с током, действует момент сил  $\vec{M}$

$$\vec{M} = [\vec{P}_m, \vec{B}]$$

- При этом изменяется орбитальный момент импульса электрона:

$$\frac{d\vec{L}_e}{dt} = [\vec{P}_m, \vec{B}] = [-\gamma \vec{B}, \vec{L}_e]$$

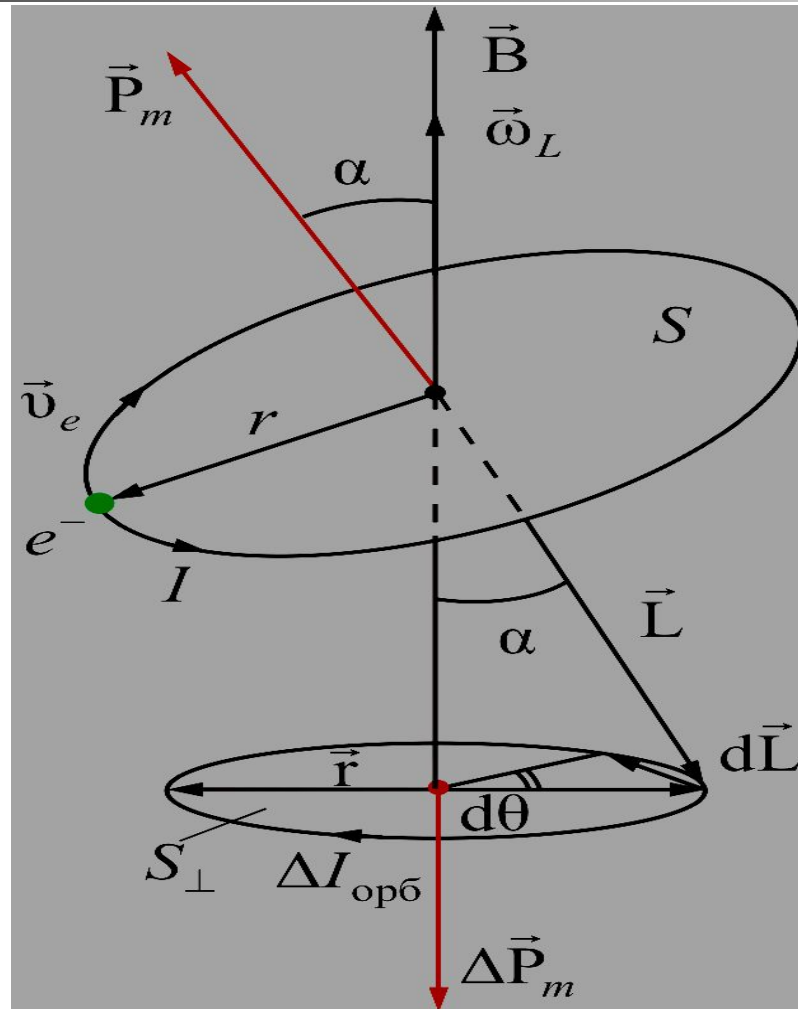
# Атом в магнитном поле

- Аналогично изменяется вектор орбитального магнитного момента электрона

$$\frac{d\mathbf{P}_m}{dt} = [-\gamma \mathbf{B}, \mathbf{P}_m]$$

- Из этого следует, что векторы  $\mathbf{L}_e$  и  $\mathbf{P}_m$ , и сама орбита *прецессирует* вокруг направления вектора  $\mathbf{B}$ .
- На рисунке показано прецессионное движение электрона и его орбитального магнитного момента, а также дополнительное (прецессионное) движение электрона.

# Атом в магнитном поле



# Атом в магнитном поле

- Эта прецессия называется *Ларморовской прецессией*.
- Угловая скорость этой прецессии зависит только от индукции магнитного поля и совпадает с ней по направлению.  
$$\vec{\omega}_L = \frac{e}{2m} \vec{B}.$$
- *Теорема Лармора:* единственным результатом влияния магнитного поля на орбиту электрона в атоме является прецессия орбиты и вектора  $\vec{p}_m$  – орбитального магнитного момента электрона с угловой скоростью  $\vec{\omega}_L$  вокруг оси, проходящей через ядро атома параллельно вектору индукции магнитного поля.



# Атом в магнитном поле

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

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

- и соответствующего ему наведенного орбитального магнитного момента  $\Delta P_m$

$$\Delta P_m = -\Delta I_{\text{орб}} S_{\perp} = -\frac{e^2 S_{\perp}}{4\pi m} B,$$

# Атом в магнитном поле

- Где  $S_{\perp}$  – площадь проекции орбиты электрона на плоскость, перпендикулярную вектору  $\vec{B}$ .
- Знак минус говорит, что  $\Delta P_m$  противоположен вектору  $\vec{B}$ .
- Тогда общий орбитальный момент атома равен:

$$\Delta P_m = -\frac{e^2 Z S_{\perp}}{4\pi m} \vec{B}$$

# Магнитное поле в веществе

- При изучении магнитного поля в веществе различают два типа токов – **макротоки и микротоки**.
- **Макротоками** называются токи проводимости и конвекционные токи, связанные с движением заряженных макроскопических тел.
- **Микротоками** (молекулярными токами) называют токи, обусловленные движением электронов в атомах, молекулах и ионах.
- Магнитное поле в веществе является суперпозицией двух полей: внешнего магнитного поля, создаваемого макротоками и внутреннего или собственного, магнитного поля, создаваемого микротоками.

# Магнитное поле в веществе

- Характеризует магнитное поле в веществе вектор, равный геометрической сумме  $\vec{B}_{\text{внеш}}$  и  $\vec{B}_{\text{внутр}}$  магнитных полей:

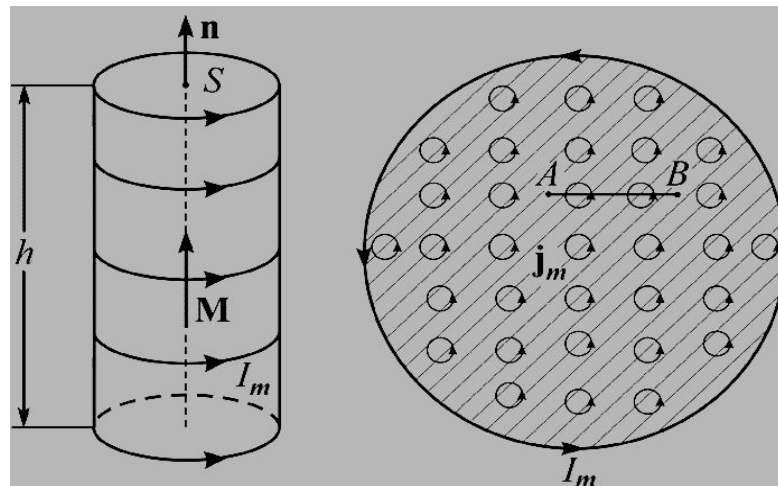
$$\vec{B} = \vec{B}_{\text{внеш}} + \vec{B}_{\text{внутр}}.$$

- Количественной характеристикой намагниченного состояния вещества служит векторная величина – **намагниченность**  $\vec{J}$  равная отношению магнитного момента малого объема вещества к величине этого объема:

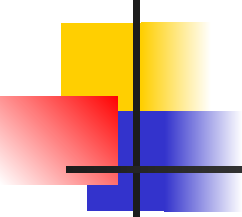
$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{P}_{mi},$$

# Магнитное поле в веществе

- Для того чтобы связать вектор намагниченности среды с током, рассмотрим равномерно намагниченный параллельно оси цилиндрический стержень длиной  $h$  и поперечным сечением  $S$  (рисунок).
- Равномерная намагниченность означает, что плотность атомных циркулирующих токов внутри материала повсюду постоянна.



# Магнитное поле в веществе

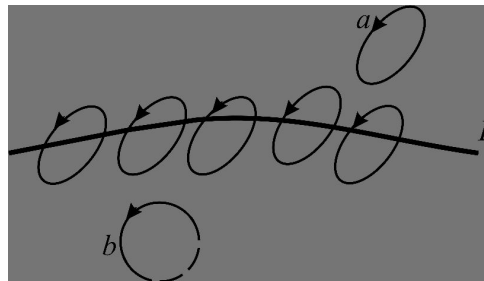
- 
- Каждый атомный ток в плоскости сечения стержня, перпендикулярной его оси, представляет микроскопический кружок, причем все микротоки текут в одном направлении – против часовой стрелки.
  - В местах соприкосновения отдельных атомов и молекул молекулярные токи противоположно направлены и компенсируют друг друга.
  - Нескомпенсированными остаются лишь токи, текущие вблизи поверхности материала, создавая на поверхности материала некоторый микроток, возбуждающий во внешнем пространстве магнитное поле, равное полю, созданному всеми молекулярными токами.

# Магнитное поле в веществе

- Закон полного тока для магнитного поля в вакууме можно обобщить на случай магнитного поля в веществе:

$$\oint_L \mathbf{B} d\mathbf{l} = \mu_0 (I_{\text{макро}} + I_{\text{микро}}),$$

- где  $I_{\text{микро}}$  и  $I_{\text{макро}}$  – алгебраическая сумма макро- и микротоков сквозь поверхность, натянутую на замкнутый контур  $L$ .
- Вклад в  $I_{\text{микро}}$  дают только те молекулярные токи, которые нанизаны на замкнутый контур  $L$ .



# Магнитное поле в веществе

- Алгебраическая сумма сил **микротоков** связана с циркуляцией вектора намагниченности соотношением

$$I_{\text{микро}} = \oint_L \mathbf{j} d\Gamma,$$

- тогда закон полного тока можно записать в виде

$$\int_L \left( \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{j} \right) d\Gamma = I_{\text{макро}}.$$

- Вектор  $\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} - \mathbf{j}$
- называется **напряженностью магнитного поля**.



# Магнитное поле в веществе

- Таким образом, **закон полного тока** для магнитного поля в веществе утверждает, что **циркуляция вектора напряженности** магнитного поля вдоль произвольного замкнутого контура  $L$  равна алгебраической сумме макротоков сквозь поверхность натянутую на этот контур:

$$\int_L \mathbf{H} d\mathbf{l} = I_{\text{макро}}.$$

- Намагниченность изотропной среды с напряженностью связаны соотношением:

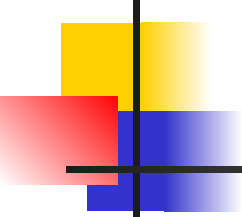
$$\mathbf{J} = \chi \mathbf{H}.$$

# Магнитное поле в веществе

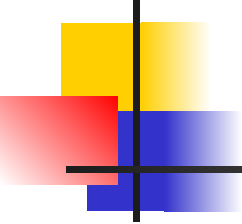
- где  $\chi$  – коэффициент пропорциональности, характеризующий магнитные свойства вещества и называемый *магнитной восприимчивостью среды*.
- Он связан с магнитной проницаемостью соотношением :

$$\mu = 1 + \chi$$

# Диамагнетики и парамагнетики в магнитном поле

- 
- Микроскопические плотности токов в намагниченном веществе чрезвычайно сложны и сильно изменяются даже в пределах одного атома.
  - Но во многих практических задачах столь детальное описание является излишним, и нас интересуют средние магнитные поля, созданные большим числом атомов.
  - Как мы уже говорили, магнетики можно разделить на три основные группы: **диамагнетики, парамагнетики и ферромагнетики.**

# Диамagnetики и парамагнетики в магнитном поле

- 
- **Диамagnetизм** (от греч. dia – расхождение и магнетизм) – свойство веществ намагничиваться навстречу приложенному магнитному полю.
  - **Диамagnetиками называются вещества,** магнитные моменты атомов которых в отсутствии внешнего поля равны нулю, т.к. магнитные моменты всех электронов атома взаимно скомпенсированы (например инертные газы, водород, азот, NaCl и др.).

# Диамагнетики и парамагнетики в магнитном поле

- При внесении диамагнитного вещества в магнитное поле его атомы приобретают наведенные магнитные моменты.
- В пределах малого объема  $\Delta V$  изотропного диамагнетика наведенные магнитные моменты  $\Delta P_m$  всех атомов одинаковы и направлены *противоположно вектору*  $\vec{B}$
- Вектор намагниченности диамагнетика равен

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

# Диамагнетики и парамагнетики в магнитном поле

- 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 диэлектрика в электрическом поле).
- У диамагнетиков  $\chi \sim 10^{-6} \div 10^{-5}$ .

# Диамагнетики и парамагнетики в магнитном поле

- **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 отсутствие внешнего магнитного поля, отличный от нуля магнитный момент  $\vec{P}_m$ .
- Эти вещества намагничиваются в направлении вектора  $\vec{B}_{\text{внеш}}$

# Диамагнетики и парамагнетики в магнитном поле

- В отсутствии внешнего магнитного поля намагниченность парамагнетика  $J = 0$ , так как векторы  $\vec{P}_{mi}$  разных атомов ориентированы беспорядочно.
- При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле, происходит преимущественная ориентация собственных магнитных моментов атомов  $\vec{P}_{mi}$  по направлению поля, так что парамагнетик намагничивается.
- Значения  $\chi$  для парамагнетиков положительны ( $\chi > 0$ ) и находятся в пределах  $\sim 10^{-5} \div 10^{-3}$ , то есть, примерно как и у диамагнетиков.

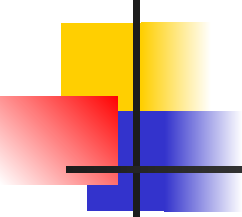


# Ферромагнетики

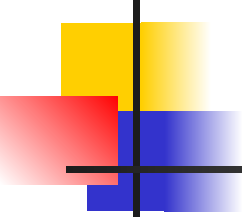
- К **ферромагнетикам** (*ferrum* – железо) относятся вещества, магнитная восприимчивость которых положительна и достигает значений  $10^4 - 10^5$ .
- Намагниченность  $\vec{J} = \chi \vec{H}$  и магнитная индукция  $\vec{B} = (\vec{H} + \vec{J})\mu_0$  ферромагнетиков растут с увеличением напряженности магнитного поля нелинейно, и в полях  $\sim 8 \cdot 10^3$  А/м намагниченность ферромагнетиков достигает предельного значения, а вектор магнитной индукции растет линейно с  $\vec{H}$ :

$$\vec{B} = \vec{J}_m \mu_0 + \vec{H} \mu_0.$$

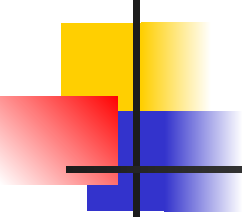
# Ферромагнетики

- 
- **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.**
  - **Типичными ферромагнетиками являются переходные металлы.**
  - **В ферромагнетиках происходит резкое усиление внешних магнитных полей.**
  - **Причем для ферромагнетиков сложным образом зависит от величины магнитного поля.**
  - **Типичными ферромагнетиками являются Fe, Co, Ni, Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Tm, а также соединения ферромагнитных материалов с неферромагнитными.**

# Ферромагнетики

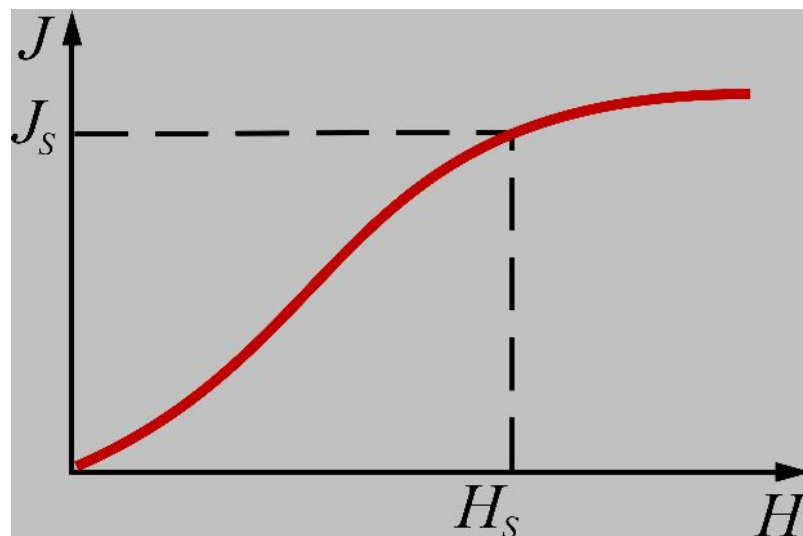
- 
- **Существенным отличием ферромагнетиков от диа- и парамагнетиков является наличие у ферромагнетиков самопроизвольной (спонтанной) намагниченности в отсутствие внешнего магнитного поля.**
  - **Наличие у ферромагнетиков самопроизвольного магнитного момента в отсутствие внешнего магнитного поля означает, что электронные спины и магнитные моменты атомных носителей магнетизма ориентированы в веществе упорядоченным образом.**

# Ферромагнетики

- 
- *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.**

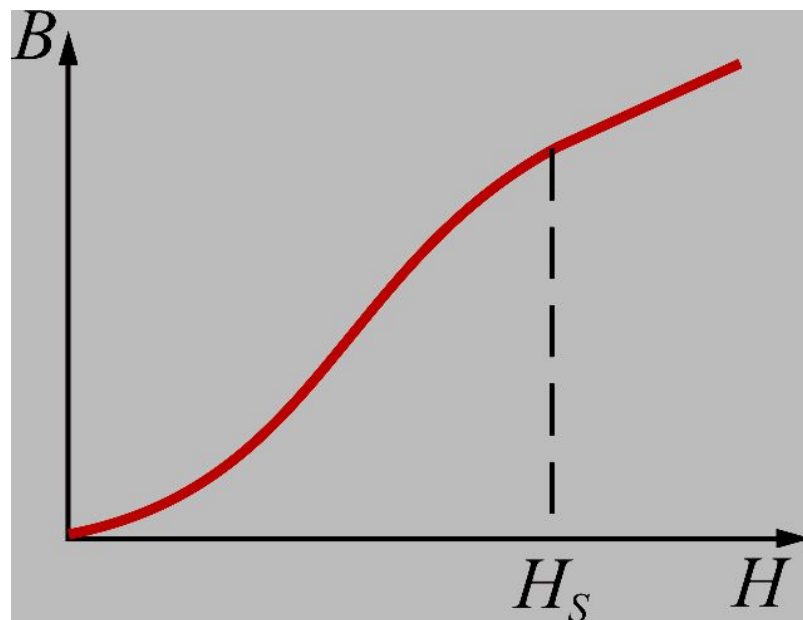
# Ферромагнетики

- **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.**



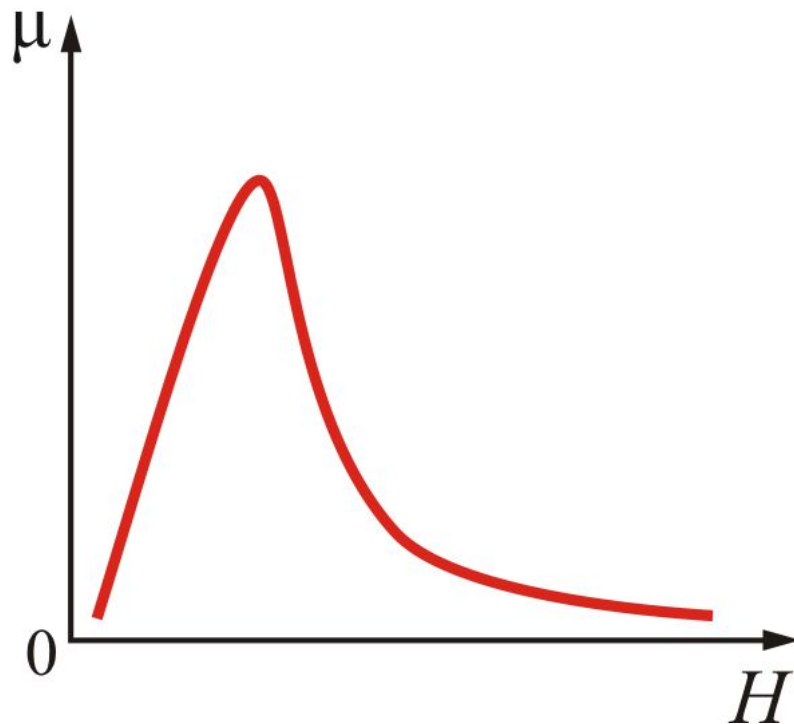
# Ферромагнетики

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

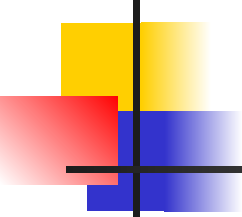


# Ферромагнетики

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



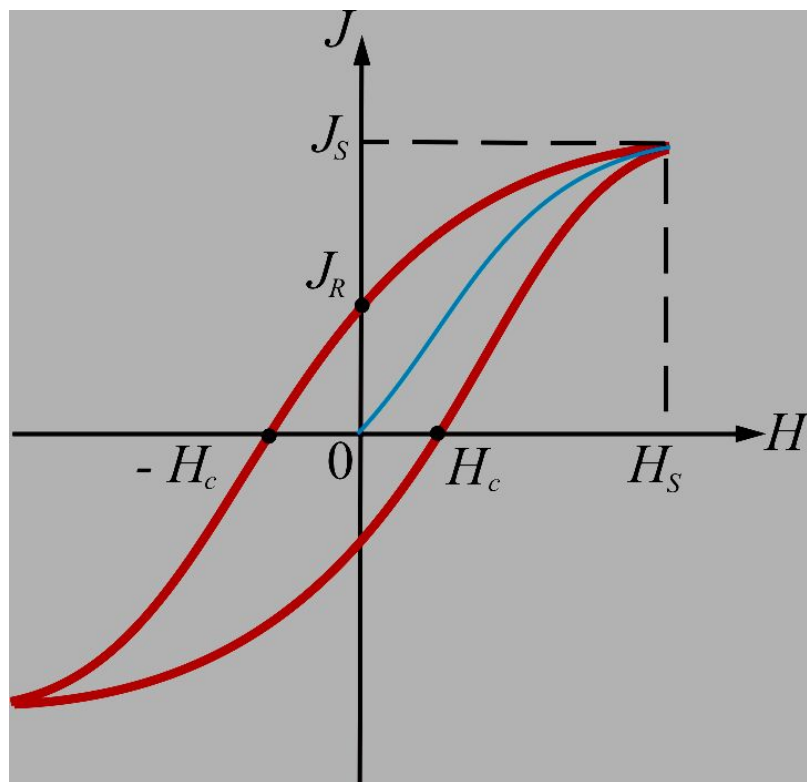
# Ферромагнетики

- 
- 4) 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 °С.



# Ферромагнетики

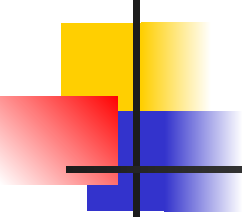
- 5) **Существование магнитного гистерезиса.**
- На рисунке показана **петля гистерезиса** – график зависимости намагниченности вещества от напряженности магнитного поля  $H$ .



# Ферромагнетики

- 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 магнитного поля, полностью размагниченного ферромагнетика, называется **коэрцитивной силой**.
- Она характеризует способность ферромагнетика сохранять намагниченное состояние.

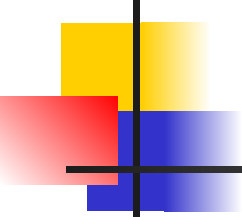
# Ферромагнетики

- 
- Большой коэрцитивной силой (широкой петлей гистерезиса) обладают ***магнитотвердые материалы.***
  - Малую коэрцитивную силу имеют ***магнитомягкие материалы.***
  - Измерение гиромангнитного 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.

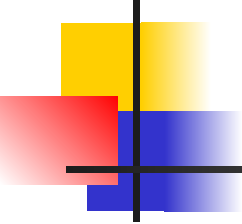
# Ферромагнетики

- Для того чтобы постоянными магнитными свойствами – постоянным магнитом стал большой кусок железа, необходимо его намагнитить, т.е. поместить в сильное магнитное поле, а затем это поле убрать. Оказывается, что при  $T < T_K$  большой исходный кусок железа разбит на множество очень маленьких (  $10^{-2} \div 10^{-3}$  см ), полностью намагниченных областей – доменов.
- Векторы намагниченности доменов в отсутствие внешнего магнитного поля ориентированы таким образом, что полный магнитный момент ферромагнитного материала равен нулю.

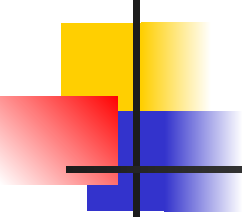
# Ферромагнетики

- 
- Если бы в отсутствие поля кристалл железа был бы единым доменом, то это привело бы к возникновению значительного внешнего магнитного поля, содержащего значительную энергию (рисунок 6.11, а).
  - Разбиваясь на домены, ферромагнитный кристалл уменьшает энергию магнитного поля.
  - При этом, разбиваясь на косоугольные области (рисунок 6.11, г), можно легко получить состояние ферромагнитного кристалла, из которого магнитное поле вообще не выходит.

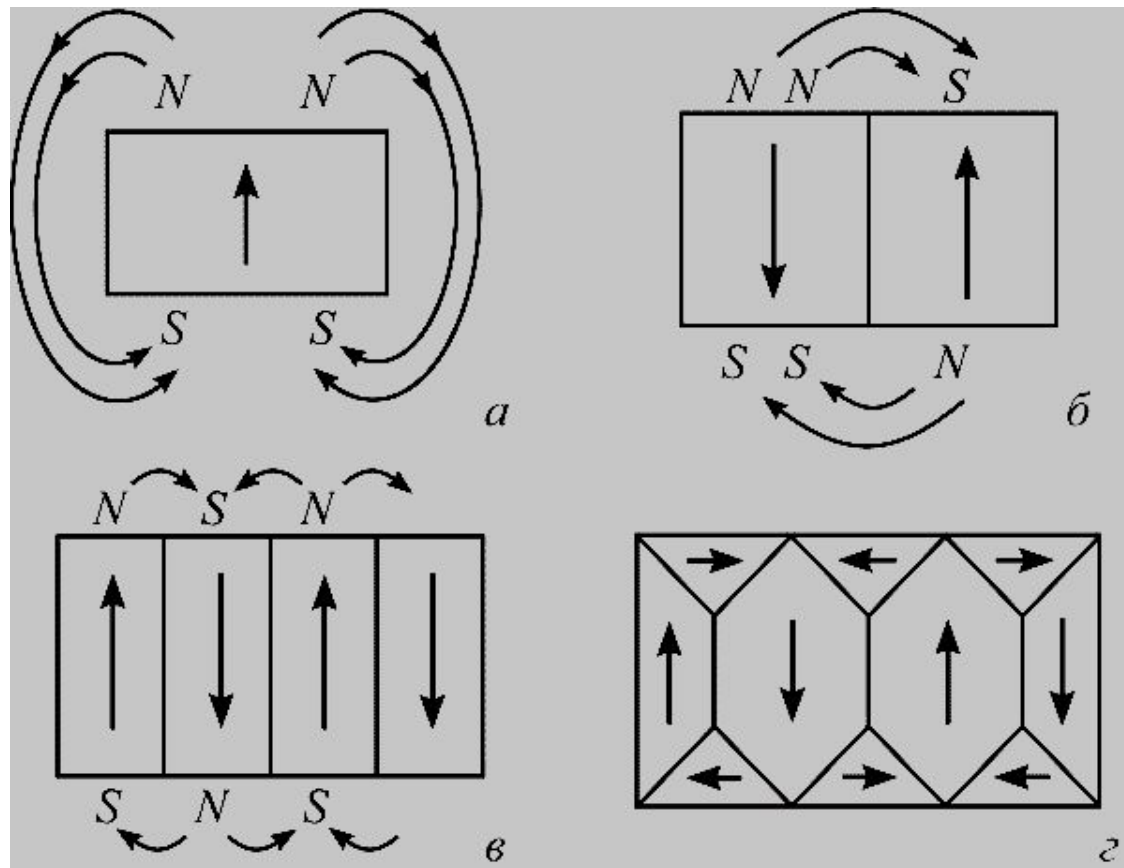
# Ферромагнетики

- 
- В целом в монокристалле реализуется такое разбиение на доменные структуры, которое соответствует минимуму свободной энергии ферромагнетика.
  - Если поместить ферромагнетик, разбитый на домены, во внешнее магнитное поле, то в нем начинается движение доменных стенок.
  - Они перемещаются таким образом, чтобы областей с ориентацией вектора намагниченности по полю стало больше, чем областей с противоположной ориентацией (рисунок 6.11, б, в, г).
  - Такое движение доменных стенок понижает энергию ферромагнетика во внешнем магнитном поле.

# Ферромагнетики

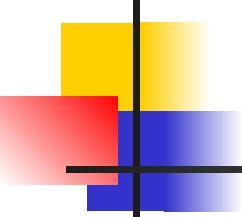
- 
- По мере нарастания магнитного поля весь кристалл превращается в один большой домен с магнитным моментом, ориентированным по полю (рисунок ).
  - В реальном куске железа содержится огромное число мелких кристалликов с различной ориентацией, в каждом из которых имеется несколько доменов.
  - Ферромагнитные материалы играют огромную роль в самых различных областях современной техники.

# Ферромагнетики

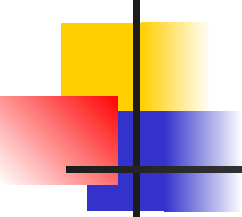




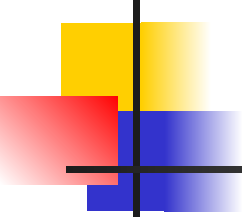
# Ферромагнетики

- 
- **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.**

# Ферромагнетики

- 
- В реальном куске железа содержится огромное число мелких кристалликов с различной ориентацией, в каждом из которых имеется несколько доменов.
  - Ферромагнитные материалы играют огромную роль в самых различных областях современной техники.
  - *Магнитомягкие материалы* используются в электротехнике при изготовлении трансформаторов, электромоторов, генераторов, в слаботочной технике связи и радиотехнике;
  - *магнитожесткие материалы* применяют при изготовлении постоянных магнитов.

# Ферромагнетики

- 
- **Магнитные материалы широко используются в традиционной технологии записи информации в винчестере..**
  - **Магнитное вещество 2 нанесено тонким слоем на основу твердого диска 3.**
  - **Каждый бит информации представлен группой магнитных доменов (в идеальном случае – одним доменом).**
  - **Для перемагничивания домена (изменения направления вектора его намагниченности) используется поле записывающей головки 4 (5 – считывающая головка).**
  - **Энергия, необходимая для записи, зависит от объема домена и наличия дополнительных стабилизирующих слоев, препятствующих самопроизвольной потере информации.**
  - **При этом используется запись на вертикально ориентированные домены и достигается плотность записи до .**



# Контрольные вопросы

---

1. **Магнитный момент электрона и атома**
2. **Атом во внешнем магнитном поле.**
3. **Прецессия электронной орбиты во внешнем магнитном поле. Теорема Лармора.**
4. **Объяснение диамагнетизма. Почему все вещества обладают диамагнитными свойствами**
5. **Объяснение парамагнетизма.**