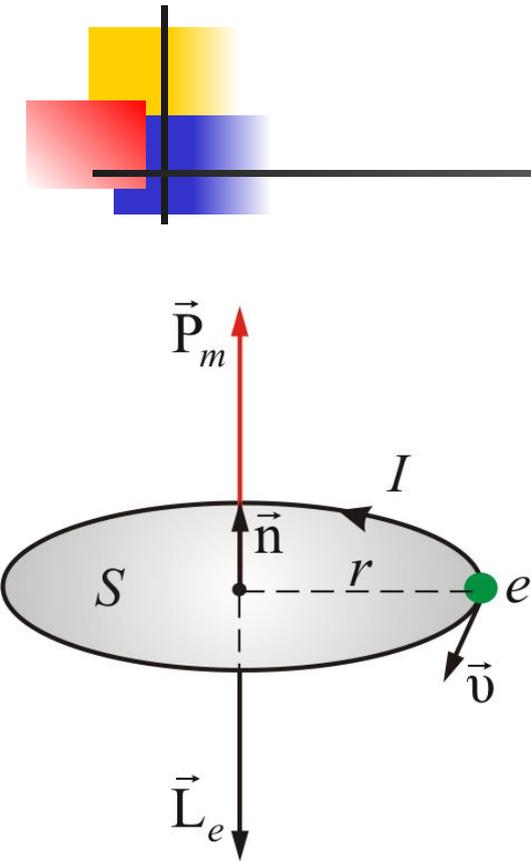


2. Магнитные моменты атомов. Гиромагнитное отношение.



- 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:**

$$P_m = IS \vec{n} = evS \vec{n} = \frac{e\omega}{2\pi} S \vec{n} = \frac{e\omega r}{2\pi r} S \vec{n} = \frac{e v \hbar}{2\pi r} S,$$

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

2. Магнитные моменты атомов. Гиромангнитное отношение

- Электрон, движущийся по орбите имеет **орбитальный момент импульса**,

$$\vec{L}_e = \vec{r} \times m\vec{v}, \quad L_e = mvr = m\omega r^2 = 2m\nu S,$$

который имеет противоположное направление по отношению к \vec{P}_m и связан с ним соотношением

$$\vec{P}_m = \gamma \vec{L}_e.$$

- Здесь, коэффициент пропорциональности γ называется **гиромангнитным отношением орбитальных моментов** и равен

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

где m – масса электрона.

3. Спиновый момент электрона

- **В опыте Эйнштейна и де Хааса**

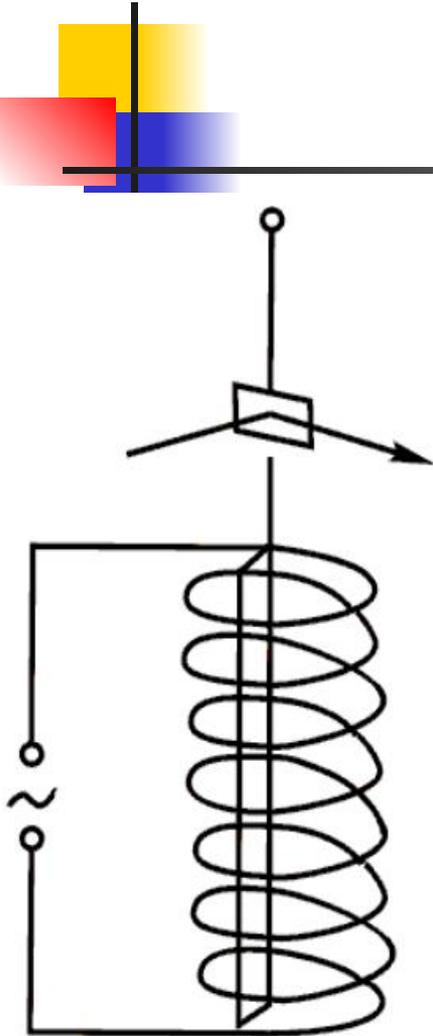
железный стержень подвешивался на упругой нити и помещался внутрь соленоида. Соленоид питался переменным током, частота которого подбиралась равной собственной частоте механических колебаний системы. При намагничивании стержня нить закручивалась на угол, который можно было измерить, наблюдая смещение светового зайчика от зеркала, укрепленного на нити.

- Из данных опыта было вычислено *магнитомеханическое соотношение*:

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

- Таким образом, знак заряда носителей, создающих молекулярные токи, совпал со знаком заряда e^- .

- **Барнетт** приводил железный стержень в очень быстрое вращение вокруг его оси и измерял возникающее при этом намагничение. Из результатов этого опыта также была получена величина γ_s .



3. Спиновый момент электрона

- В дальнейшем выяснилось, что кроме орбитальных моментов электрон обладает *собственным механическим моментом импульса (спином)* L_{es} и *собственным (спиновым) магнитным* P_{ms} *моментом*, для которых

$$P_{ms} = \gamma_s L_{es} \Rightarrow \text{спину электрона}$$

соответствует *спиновый магнитный момент*, направленный в противоположную сторону.

- Было установлено, что спин имеет *квантовую природу* и не связан с движением электрона как целого.

- Модуль спина электрона $L_{es} = \sqrt{S(S+1)} = \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{h}{2\pi} = \frac{\sqrt{3}}{2} \hbar$,

где $S = 1/2$ – **спиновое квантовое число** электрона.

- Величину γ_s называют **гиромангнитным отношением спиновых моментов**

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

3. Спиновый момент электрона

- 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 μ_B – квантовый магнитный момент электрона – магнетон Бора.

- **Орбитальным магнитным моментом атома** называется геометрическая сумма орбитальных и спиновых магнитных моментов всех электронов атома

$$P_m = \sum_{i=1}^Z P_{mi} + \sum_{i=1}^Z P_{msi},$$

где Z – число всех электронов в атоме – порядковый номер элемента в периодической системе Менделеева.

- **Орбитальным моментом импульса L атома** называется

геометрическая сумма орбитальных и спиновых моментов импульса всех электронов атома:

$$L = \sum_{i=1}^Z L_{ei} + \sum_{i=1}^Z L_{esi}.$$



3. Спиновый момент электрона

- Магнитный момент атома складывается из *орбитальных и собственных моментов*, входящих в его состав *электронов*, а также из **магнитного момента ядра** (*который обусловлен магнитными моментами входящих в состав ядра элементарных частиц – протонов и нейтронов*). Магнитный момент ядра значительно меньше момента электрона, поэтому им можно пренебречь и считать, что магнитный момент атома равен векторной сумме магнитных моментов электронов.

4. Действие магнитного поля на электронные орбиты атомов и молекул. Ларморова прецессия электронных орбит.

- 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}

$$\vec{M} = \vec{P}_m \times \vec{B}$$

- При этом изменяется орбитальный момент импульса электрона:

$$\frac{d\vec{L}_e}{dt} = \vec{P}_m \times \vec{B} = -\gamma \vec{B} \times \vec{L}_e.$$

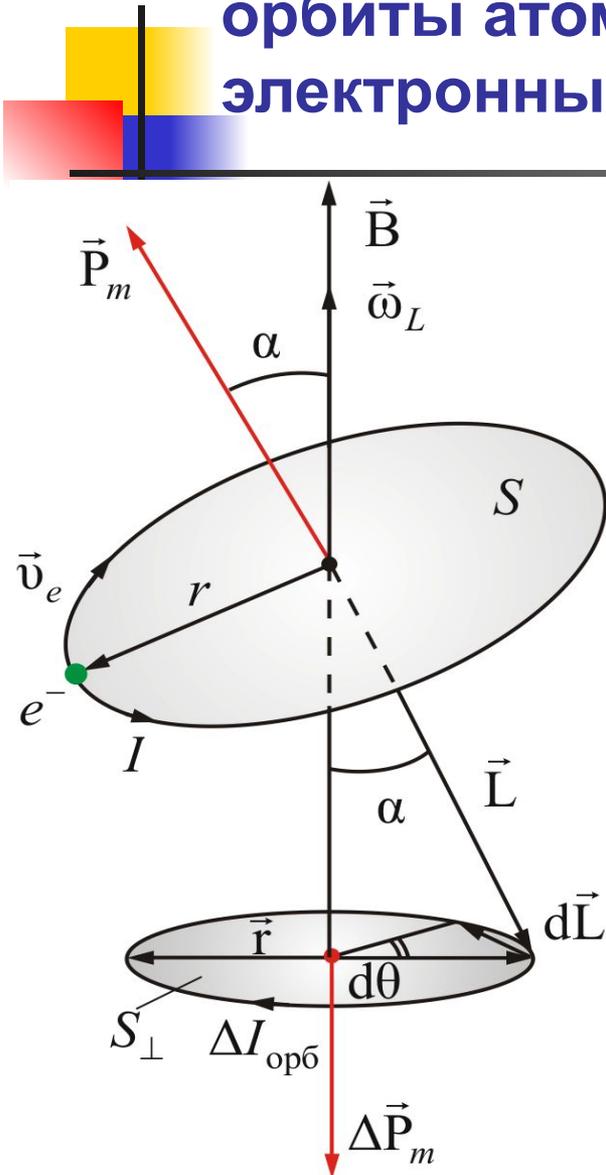
С учетом $\vec{P}_m = \gamma \vec{L}_e \Rightarrow \vec{L}_e = \frac{\vec{P}_m}{\gamma} \Rightarrow$

$$\frac{d\vec{P}_m}{dt} = -\gamma \vec{B} \times \vec{P}_m.$$

4. Действие магнитного поля на электронные орбиты атомов и молекул. Ларморова прецессия электронных орбит.

- Из механики: $\vec{v} = \frac{d\vec{r}}{dt} = \vec{\omega} \times \vec{r}$ и сравнивая с $\frac{d\vec{P}_m}{dt} = -\gamma \vec{B} \times \vec{P}_m$
- Под влиянием внешнего магнитного поля векторы \vec{L}_e и \vec{P}_m орбитальных моментов электрона в атоме вращаются с угловой скоростью $\vec{\omega}_L = \frac{e}{2m} \vec{B}$ вокруг направления вектора \vec{B} , описывая соосные круговые конические поверхности с общей вершиной в точке O орбиты и осью, параллельной \vec{B} , т. е. совершают **прецессионное движение** вокруг оси параллельной \vec{B} .
- Эта прецессия называется **Ларморовской прецессией**.

4. Действие магнитного поля на электронные орбиты атомов и молекул. Ларморова прецессия электронных орбит.



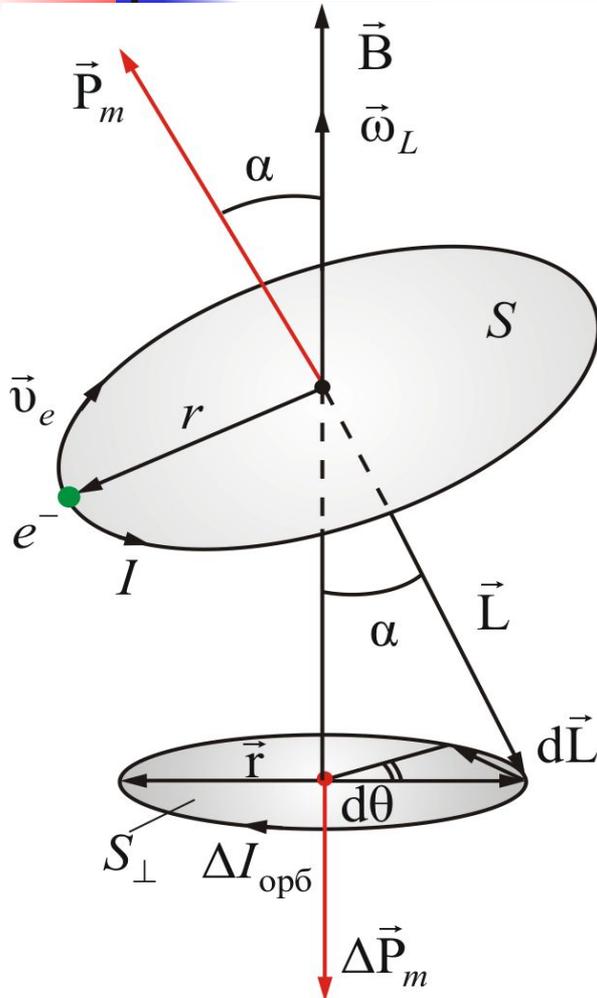
Рассмотрим какую – либо электронную орбиту атома помещенного во внешнее магнитное поле. На орбиту действует вращательный момент $\vec{M} = [\vec{P}_m \vec{B}]$, стремящийся установить магнитный момент электрона \vec{P}_m по направлению поля (при этом механический момент \vec{L} устанавливается против поля). Под действием момента \vec{M} векторы \vec{L} и \vec{P}_m совершают прецессию вокруг направления вектора магнитной индукции \vec{B}

Прецессия – дополнительное вращение устойчивой системы одинаковых заряженных частиц (электронов атомов), возникающее при наложении на систему однородного постоянного магнитного поля, направление

4. Действие магнитного поля на электронные орбиты атомов и молекул. Ларморова прецессия электронных орбит.

- **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 ω_L вокруг оси, проходящей через ядро атома параллельно вектору \vec{B} индукции магнитного поля.

4. Действие магнитного поля на электронные орбиты атомов и молекул. Ларморова прецессия электронных орбит.



- Угловую скорость прецессии называют **частотой ларморовой прецессии** или **ларморовой частотой**. Ларморова частота не зависит ни от угла наклона орбиты по отношению к направлению магнитного поля, ни от радиуса орбиты или скорости электрона и, следовательно, для всех электронов, входящих в состав атома, одинакова.
- Прецессия орбиты обуславливает *дополнительное движение электрона вокруг направления поля*.

Атом в магнитном поле

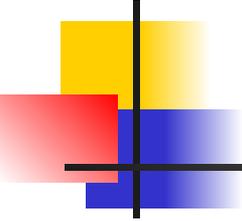
- Прецессия орбиты электрона в атоме приводит к появлению дополнительного орбитального тока, направленного противоположно току I

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

- и соответствующего ему наведенного орбитального магнитного момента ΔP_m

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

Магнитные моменты электронов и атомов

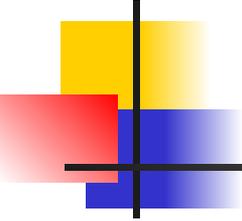
- 
-
- Большинство тел намагничивается очень слабо и величина индукции магнитного поля B в таких веществах мало отличается от величины индукции магнитного поля в вакууме .
 - Если магнитное поле слабо усиливается в веществе, то такое вещество называется **парамагнетиком**.
 - если ослабевает, то это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

Атом в магнитном поле

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

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

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:

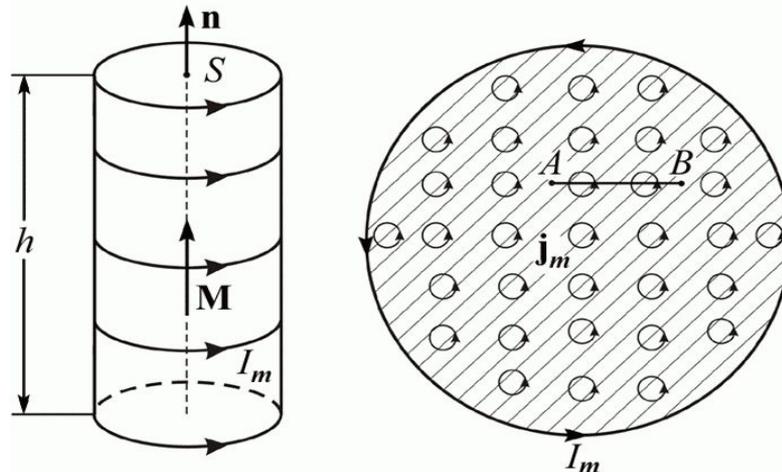
$$\vec{B} = \vec{B}_{\text{внеш}} + \vec{B}_{\text{внутр}}.$$

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

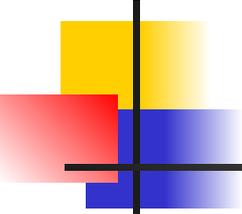
$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{P}_{mi},$$

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

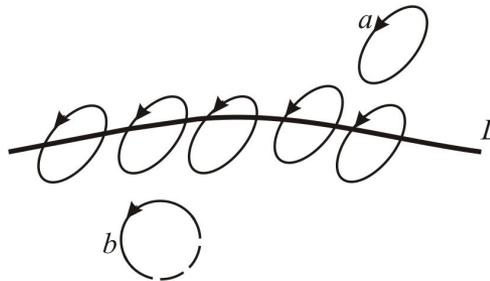
- 
- Каждый атомный ток в плоскости сечения стержня, перпендикулярной его оси, представляет микроскопический кружок, причем все микротоки текут в одном направлении – против часовой стрелки.
 - В местах соприкосновения отдельных атомов и молекул молекулярные токи противоположно направлены и компенсируют 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 микротокков 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

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

- тогда закон полного тока можно записать в виде

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

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

Магнитное поле в веществе

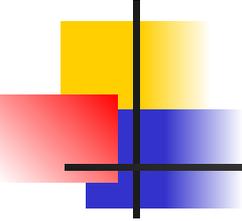
- Таким образом, **закон полного тока** для магнитного поля в веществе утверждает, что **циркуляция вектора напряженности** магнитного поля вдоль произвольного замкнутого контура L равна алгебраической сумме макротоков сквозь поверхность натянутую на этот контур:

$$\int_L \vec{H} dl = I_{\text{макро}}.$$

- Намагниченность изотропной среды с напряженностью связаны соотношением:

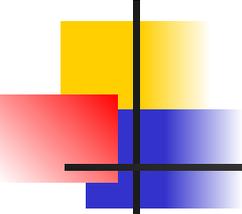
$$\vec{J} = \chi \vec{H}.$$

Магнитное поле в веществе

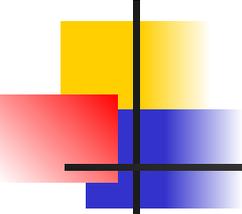
- 
- где χ – коэффициент пропорциональности, характеризующий магнитные свойства вещества и называемый *магнитной восприимчивостью среды*.
 - Он связан с магнитной проницаемостью соотношением :

$$\mu = 1 + \chi$$

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

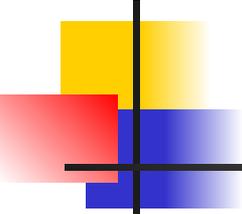
- При внесении диамагнитного вещества в магнитное поле его атомы приобретают наведенные магнитные моменты.
- В пределах малого объема ΔV изотропного диамагнетика наведенные магнитные моменты ΔP_m всех атомов одинаковы и направлены *противоположно вектору* \vec{B}
- Вектор намагниченности диамагнетика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

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

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 P_m .
 - Эти вещества намагничиваются в направлении вектора $B_{\text{внеш}}$

Диамагнетики и парамагнетики в магнитном поле

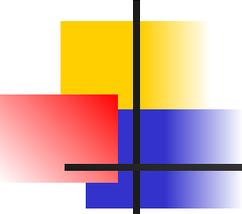
- В отсутствии внешнего магнитного поля намагниченность парамагнетика $J = 0$, так как векторы \vec{P}_{mi} разных атомов ориентированы беспорядочно.
- При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле, происходит преимущественная ориентация собственных магнитных моментов атомов \vec{P}_{mi} по направлению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

Ферромагнетики

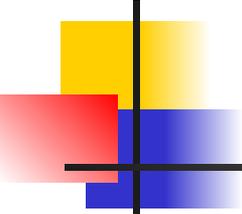
- К **ферромагнетикам** (*ferrum* – железо) относятся вещества, магнитная восприимчивость которых положительна и достигает значений $10^4 - 10^5$.
- Намагниченность $\vec{J} = \chi \vec{H}$ и магнитная индукция $\vec{B} = (\vec{H} + \vec{J})\mu_0$ ферромагнетиков растут с увеличением напряженности магнитного 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} :

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

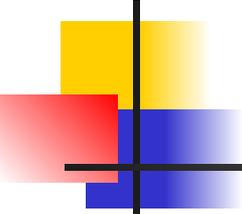
Ферромагнетики

- 
- **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

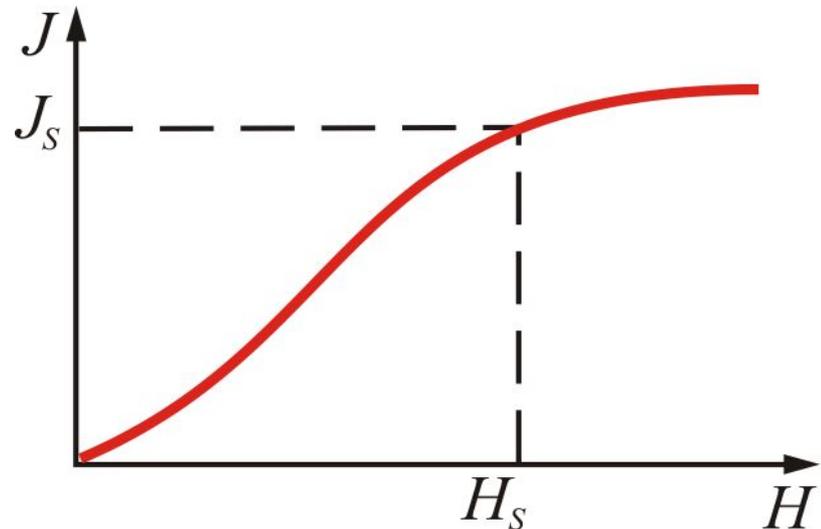
- 
- **Существенным отличием ферромагнетиков от диа- и парамагнетиков является наличие у ферромагнетиков самопроизвольной (спонтанной) намагниченности в отсутствие внешнего магнитного поля.**
 - **Наличие у ферромагнетиков самопроизвольного магнитного момента в отсутствие внешнего магнитного поля означает, 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.**

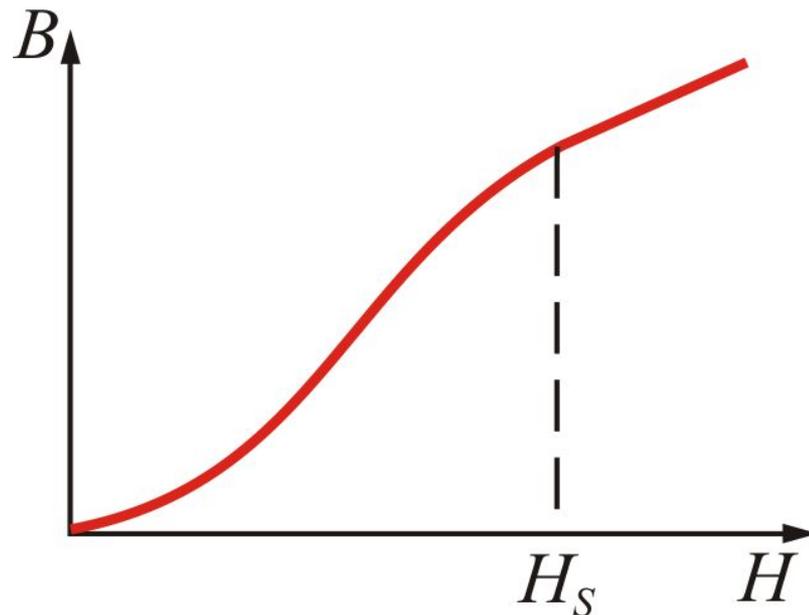
Ферромагнетики

- **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.**



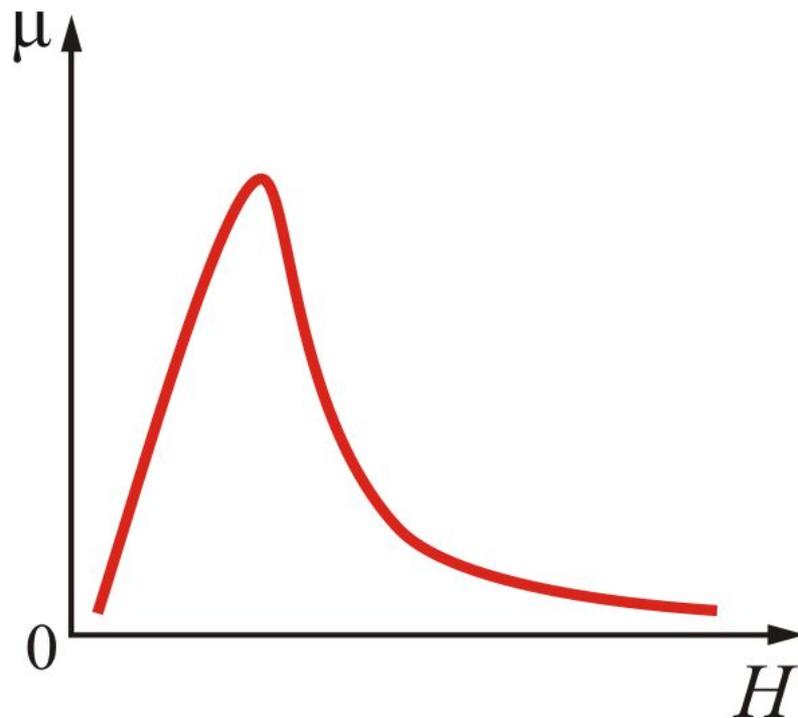
Ферромагнетики

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

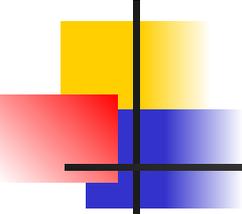


Ферромагнетики

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

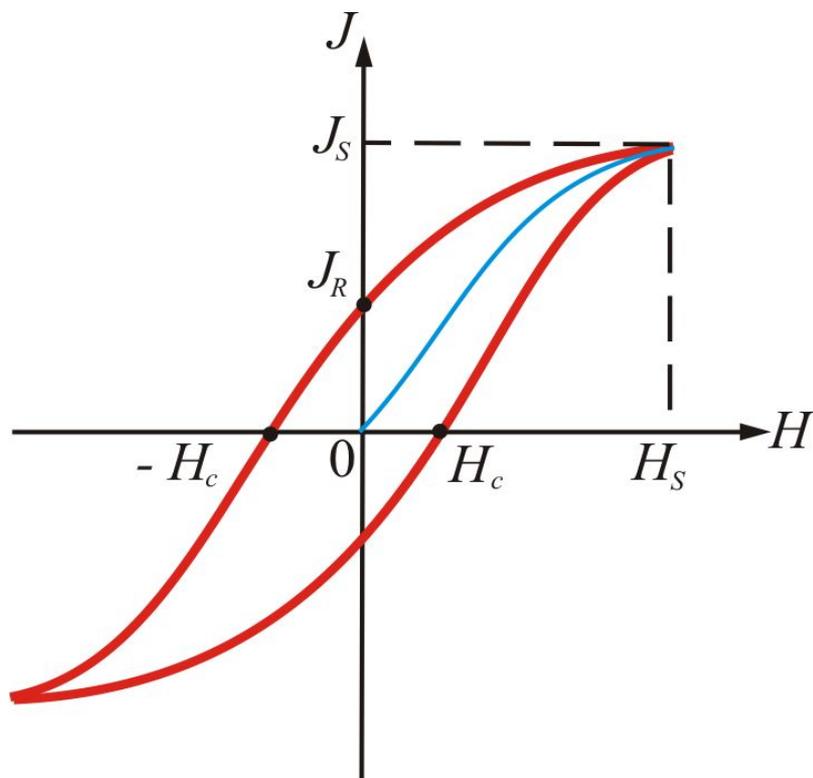


Ферромагнетики

- 
- 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

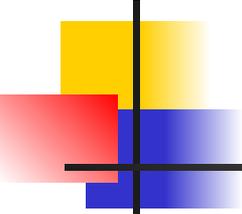
- 5) **Существование магнитного гистерезиса.**
- На рисунке показана **петля гистерезиса** – график зависимости намагниченности вещества от напряженности магнитного поля H .



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.

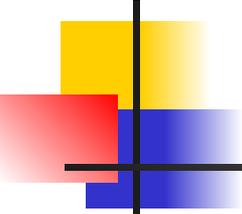
Ферромагнетики

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

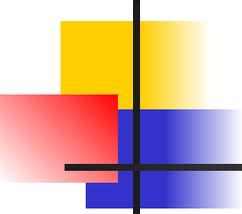
Ферромагнетики

- 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.

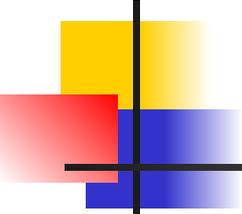
Ферромагнетики

- 
- 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.

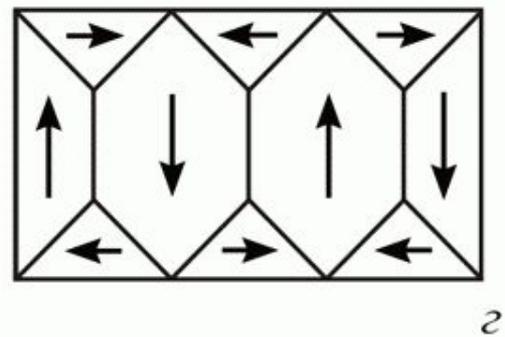
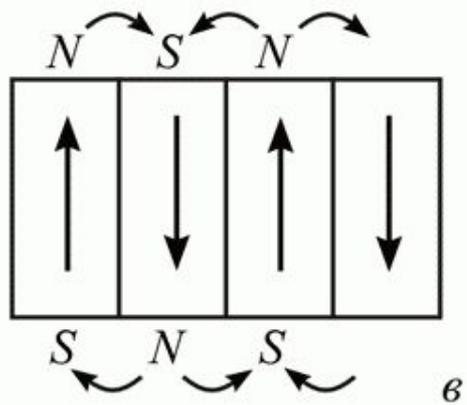
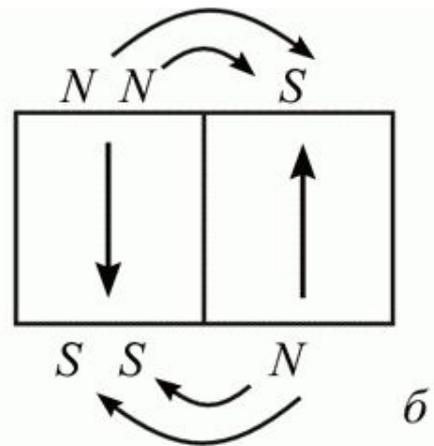
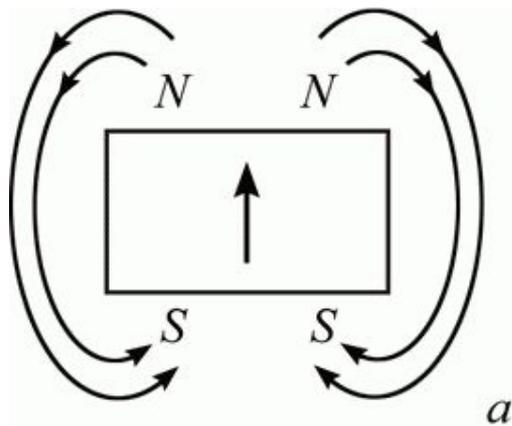
Ферромагнетики

- 
- 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.

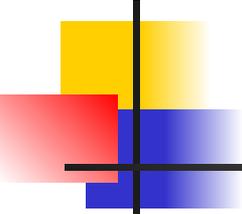
Ферромагнетики

- 
- 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.

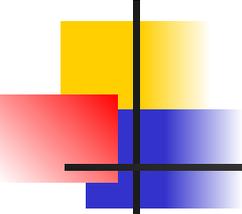
Ферромагнетики



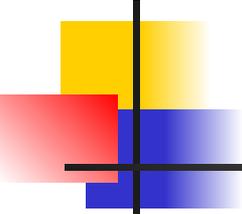
Ферромагнетики

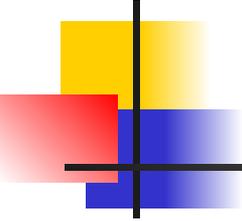
- 
- **Широкое распространение в радиотехнике, особенно в высокочастотной радиотехнике получили ферриты – ферромагнитные неметаллические материалы – соединения окиси железа с окислами других металлов.**
 - **Ферриты сочетают ферромагнитные и полупроводниковые свойства, именно с этим связано их применение 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.**