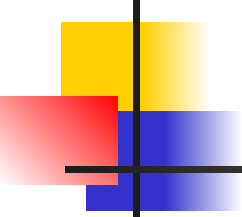


МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ВЕЩЕСТВА

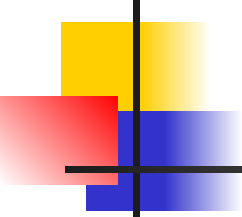


- 1. Магнитные моменты электронов и атомов
- 2. Атом в магнитном поле
- 3. Диамагнетики и парамагнетики в магнитном поле
- 4. Магнитное поле в веществе
- 5. Ферромагнетики

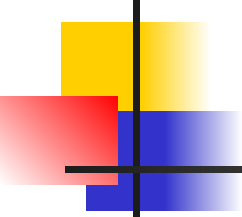
Магнитные моменты электронов и атомов

- 
- 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.

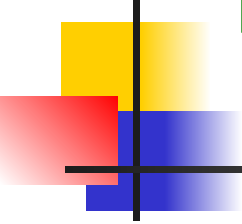
Магнитные моменты электронов и атомов

- 
- 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{p}_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**

Магнитная проницаемость


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

Отношение $\frac{B}{B_0}$ называется магнитной проницаемостью среды.

(\vec{B} – вектор магнитной индукции в однородной среде;

\vec{B}_0 – вектор магнитной индукции в той же точке пространства в вакууме.)

В однородной среде магнитная индукция равна:

$$\vec{B} = \mu \vec{B}_0$$

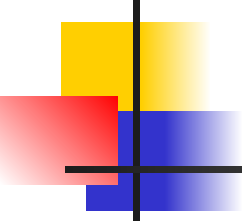
Магнитные моменты электронов и атомов

- 
- 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

$$I = ev,$$

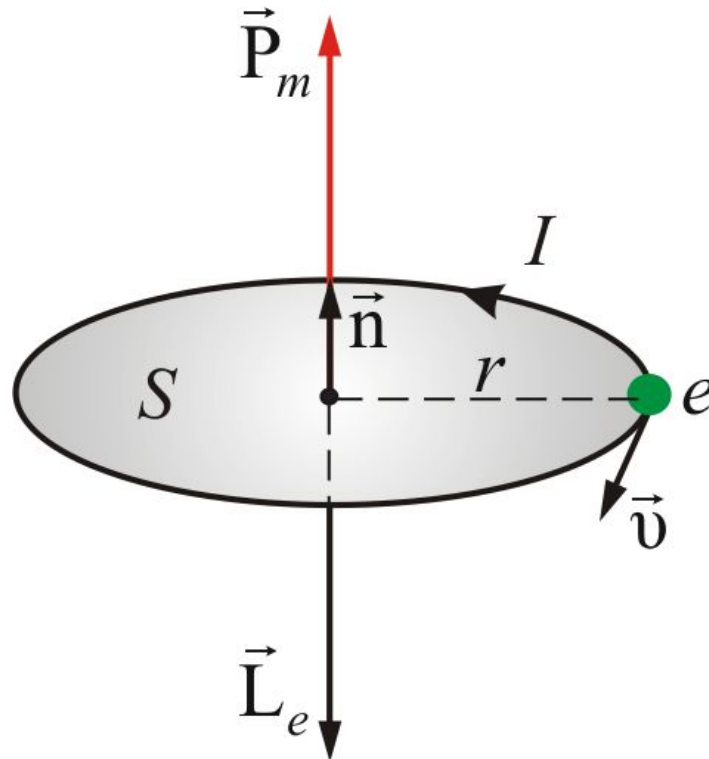
- где e – заряд электрона, v – частота его вращения по орбите.
- Орбитальному току соответствует **орбитальный магнитный момент** электрона.

$$\vec{P}_m = IS \vec{n} = evS\vec{n}$$

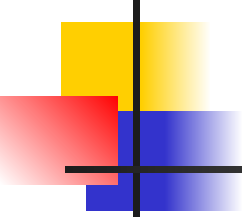
- Где S - площадь орбиты электрона, \vec{n} - единичный вектор нормали к S .

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 γ называется **гиромагнитным отношением орбитальных моментов** и равен

- где m – масса электрона.
$$\gamma = -\frac{e}{2m},$$

Магнитные моменты электронов и атомов

- Кроме того, электрон обладает **собственным моментом импульса**, который называется **спином электрона**
- Спи́ну электрона соответствует спиновый магнитный момент электрона, направленный в противоположную сторону:

$$\mathbf{L}_{es}$$

$$\mathbf{P}_{ms} = \gamma_s \mathbf{L}_{es}.$$

- Величину γ_s называют **гиромагнитным 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 μ_B – *квантовый магнитный момент электрона – магнетон Бора.*
- *Орбитальным магнитным моментом атома* называется геометрическая сумма орбитальных магнитных моментов всех электронов атома

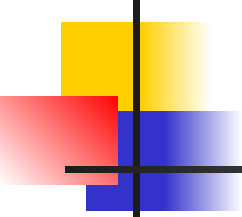
$$\mathbf{P}_m = \sum_{i=1}^Z \mathbf{P}_{mi},$$

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

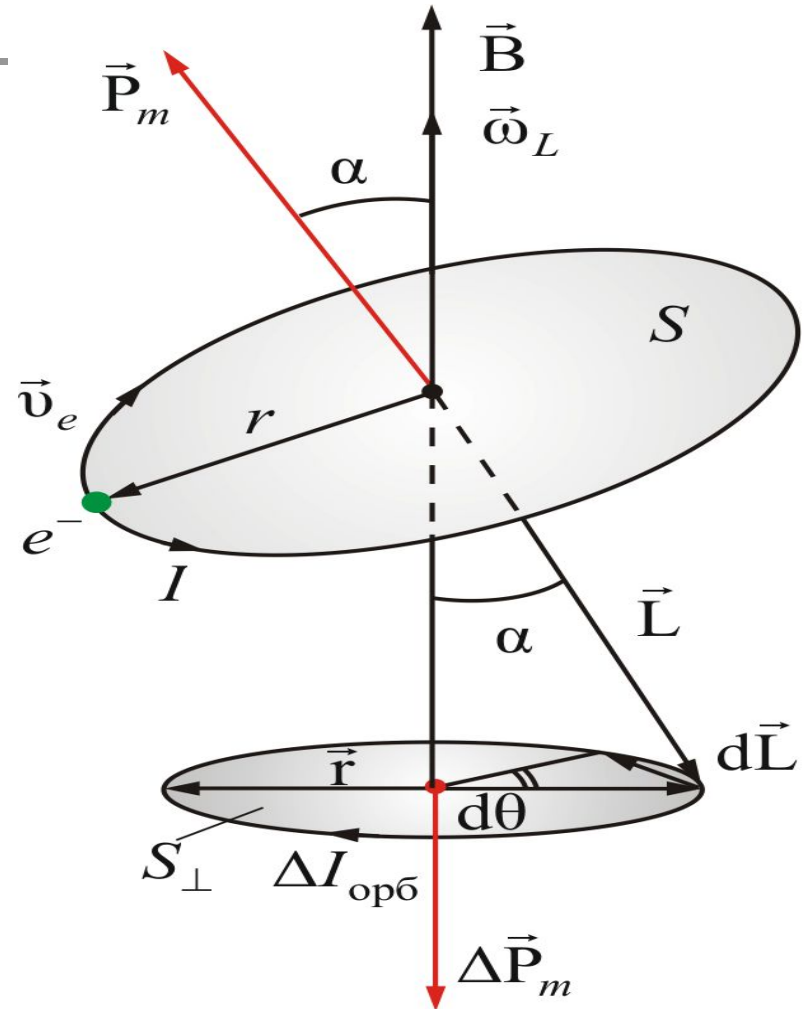
- 
- При внесении атома в магнитное поле с индукцией \vec{B} на электрон, движущийся по орбите эквивалентной замкнутому контуру M с током, действует момент сил

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

- И орбита электрона начинает совершать прецессионное движение

Атом в магнитном поле

- На рисунке показано прецессионное движение электрона и его орбитального магнитного момента, а также дополнительное (прецессионное) движение электрона.



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 \vec{B} , 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**, равная отношению магнитного момента малого объема вещества к величине этого объема:

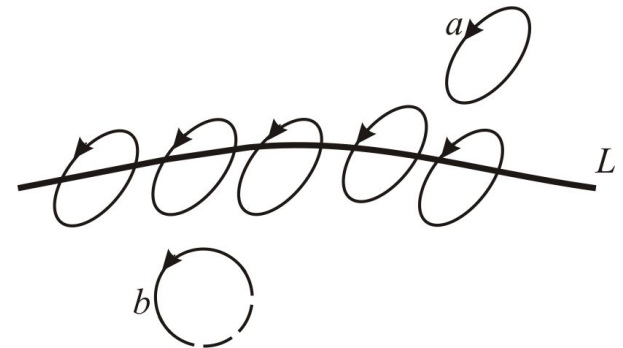
$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i=1}^n \vec{P}_{m i},$$

Магнитное поле в веществе

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

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

- 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

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

- 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:

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

- 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 :

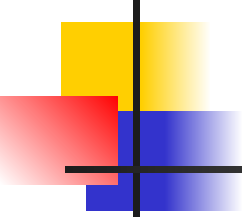
$$\mu = 1 + \chi$$

Три класса магнитных веществ

Существует три основных класса веществ с резко различающимися магнитными свойствами: ферромагнетики, парамагнетики и диамагнетики.



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.).

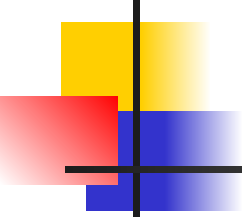
Диамagnetики и парамагнетики в магнитном поле

- При внесении диамagnetического вещества в магнитное поле его атомы приобретают наведенные магнитные моменты.
- В пределах малого объема ΔV изотропного диамagnetика наведенные магнитные моменты ΔP^m всех атомов одинаковы и направлены **ПРОТИВОПОЛОЖНО** вектору \underline{B} .

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

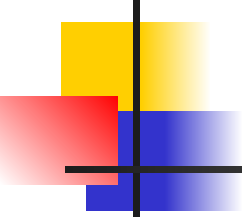
- В отсутствии внешнего магнитного поля намагниченность парамагнетика $J = 0$, так как векторы \vec{P}_{mi} разных атомов ориентированы беспорядочно.
- При внесении парамагнетика во внешнее магнитное поле, происходит преимущественная ориентация собственных магнитных моментов атомов \vec{P}_{mi} по направлению 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

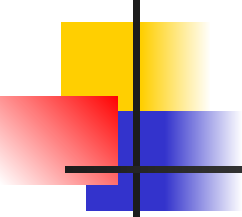
- К **ферромагнетикам** (*ferrum* – железо) относятся вещества, магнитная восприимчивость которых положительна и достигает значений $10^4 - 10^5$.
- Намагниченность $\vec{J} = \chi \vec{H}$ и магнитная индукция $\vec{B} = (\vec{H} + \vec{J})\mu_0$ ферромагнетиков растут с увеличением напряженности магнитного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

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

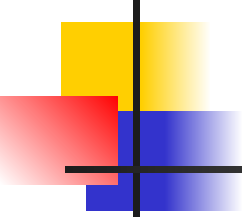
Ферромагнетики

- 
- 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, а также соединения ферромагнитных материалов с неферромагнитными.

Ферромагнетики

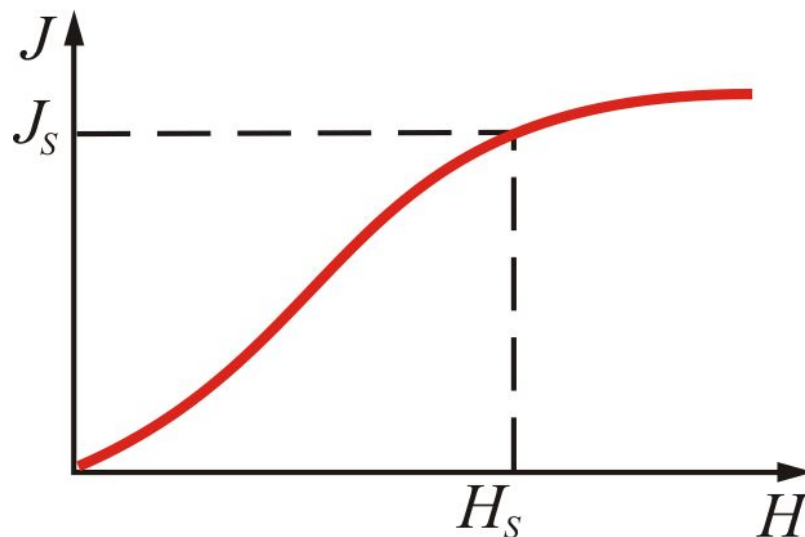
- 
- **Существенным отличием ферромагнетиков от диа- и парамагнетиков является наличие у ферромагнетиков самопроизвольной (спонтанной) намагниченности в отсутствие внешнего магнитного поля.**
 - **Наличие у ферромагнетиков самопроизвольного магнитного момента в отсутствие внешнего магнитного поля означает,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

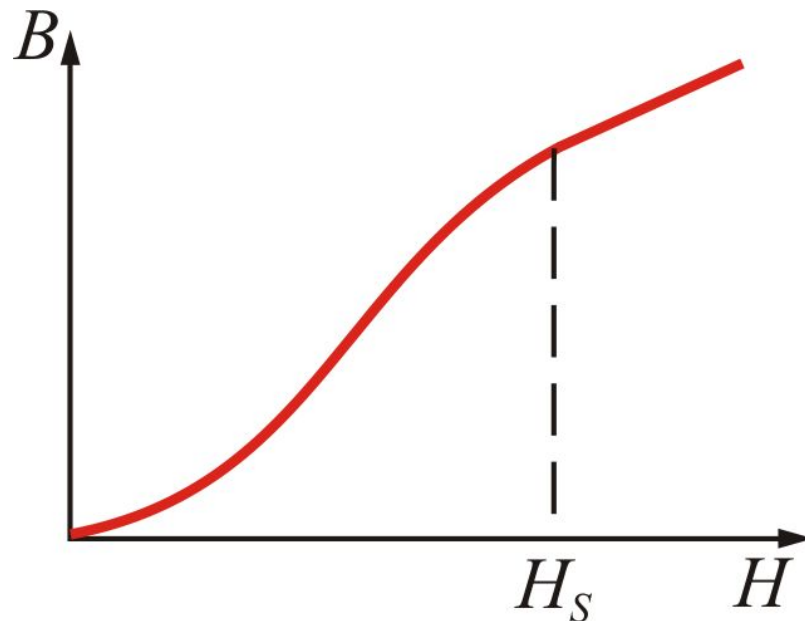
Ферромагнетики

- **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.**



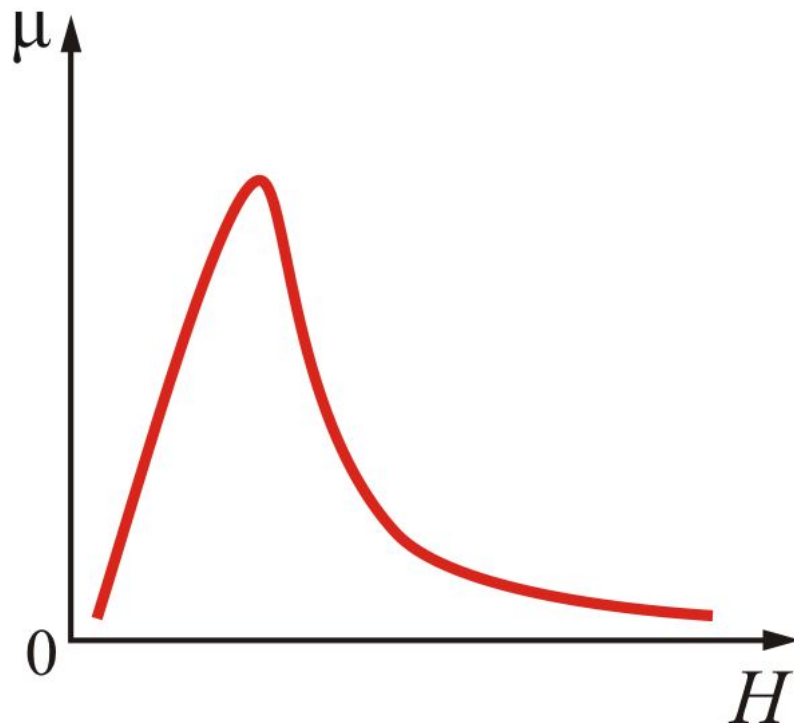
Ферромагнетики

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

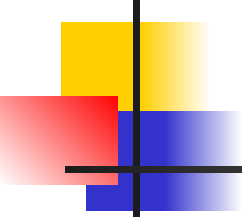


Ферромагнетики

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

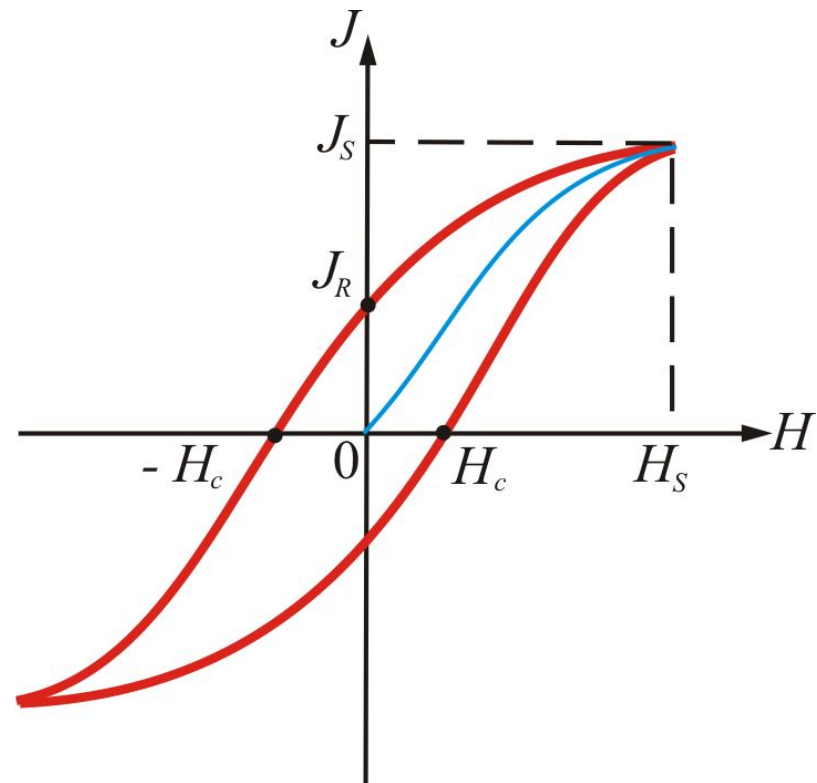


Ферромагнетики

- 
- 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

Магнитные металлы

Различают **магнитно-мягкие** и **магнитно-жёсткие** материалы.

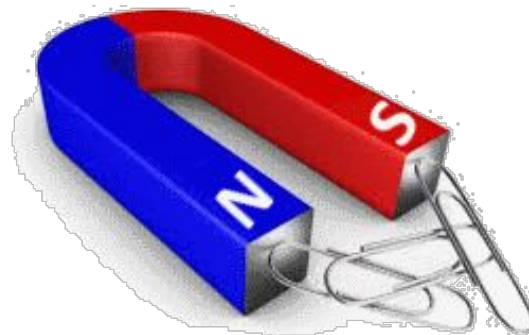
магнитно-мягкие:

- Малую коэрцитивную силу имеют **магнитомягкие материалы.**



магнитно-жёсткие

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



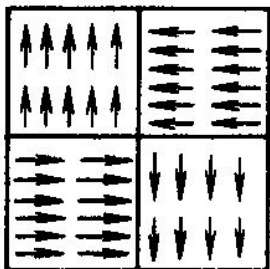
Ферромагнетики

- 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

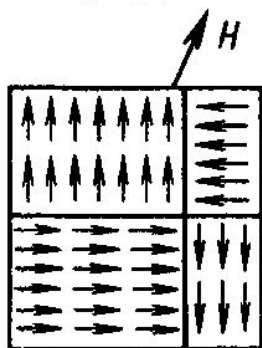
а) Поле отсутствует

Домены



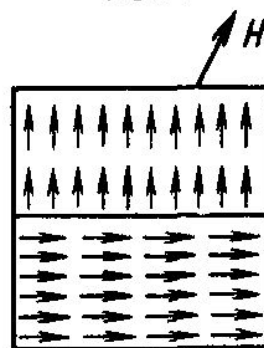
Магнитные поля атомов

б) Слабое поле

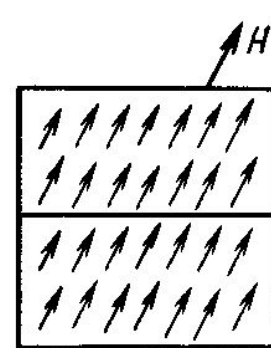


Направление внешнего поля

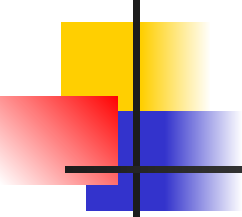
в) Более сильное поле



г) Насыщение



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

Применение

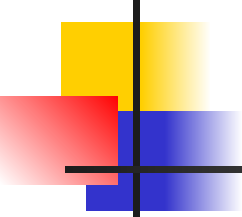
Изготовление постоянных магнитов, сердечников трансформаторов, находят применение в магнитных плёнках для записи разнообразной информации: голос, музыка, программы ЭВМ.



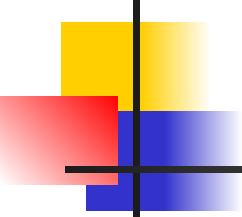
Ферромагнетики

- 
- **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 .**