

Диамagnetики.
Парамагнетики.
Ферромагнетики.

Парамагнетик (Ce^{3+} , Pr^{3+} , Ti^{3+} , V^{3+} , Fe^{2+} , Mg^{2+} , Li, Na)

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

Диамагнетик (Bi, Cu, Ag, Au и др.)

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

Ферромагнетиками (Fe, Co, Ni и пр.)

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

Диамagnetики. Парамагнетики.

Все известные вещества под действием магнитного поля способны приобретать магнитный момент (намагничиваться). По этой причине их называют **магнетиками**.

Когда **вещества помещают в магнитное поле**, то оказывается, что одни вещества **ослабляют** внешнее магнитное поле, а другие **усиливают** его.

Первые называются **диаманитными** (диаманетики), вторые **парамагнитными** (парамагнетики).

Среди **парамагнетиков** выделяется группа веществ, вызывающих **очень большое усиление внешнего** поля. Эти вещества называются **ферромагнитными** (ферромагнетики).

Диамагнетики.

В отсутствие внешнего магнитного поля *немагнитны*,
т.к. магнитные моменты электронов взаимно
компенсируются и

$$\vec{p}_{am} = 0 \quad \Rightarrow \quad \sum \vec{p}_{am} = 0$$

Диамагнитный эффект (ослабления внешнего
магнитного поля) объясняется действием внешнего
магнитного поля на электроны атомов вещества.

Парамагнетики.

В отсутствие внешнего магнитного поля у парамагнетиков магнитные моменты электронов взаимно не компенсируются, поэтому

$$\vec{p}_{\text{атома(молекулы)}} \neq 0, \quad \text{но} \quad \sum \vec{p}_{\text{ат}} = 0,$$

Во внешнем магнитном поле у парамагнетика магнитные моменты атомов ориентируются по полю, следовательно, парамагнетик *намагничивается*, т.е. создает свое дополнительное магнитное поле, которое по направлению совпадает с внешним магнитным полем и усиливает его – это *парамагнитный эффект*.

Магнитная восприимчивость диамагнетиков

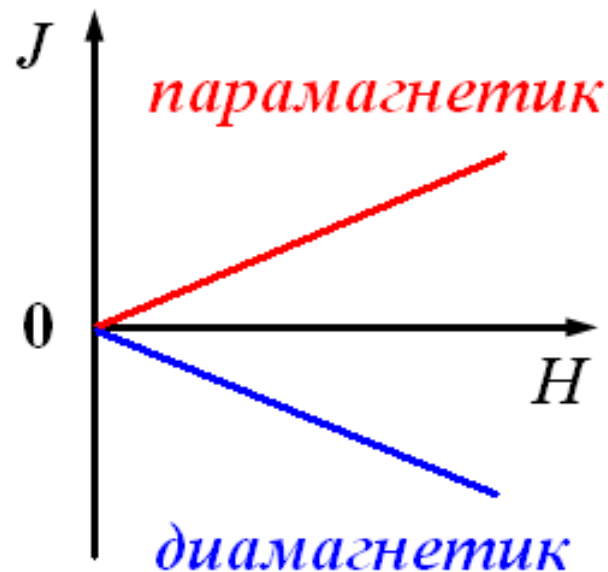
Вещество	$\chi_{\text{мол}} \cdot 10^{-6}$
He	−2,02
Cu	−5,41
Zn	−11,40
Ag	−21,50
Au	−29,59
Bi	−284,0
CO ₂	−21

Магнитная восприимчивость парамагнетиков в расчете на один моль (атом)

Вещество	$\chi_{\text{мол}} \cdot 10^{-6}$	Вещество	$\chi_{\text{мол}} \cdot 10^{-6}$
Mg	13,25	Sr	91,2
Na	15,1	Ti	161,0
Rb	18,2	U	414,0
Ba	20,4	Pu	627,0
K	21,25	FeS	1074,0
Li	24,6	EuCl ₃	2650,0
Ca	44,0	CoCl ₃	121660,0
W	55,0		

Диамagnetики. Парамагнетики.

- *Диамagnetики:* $\chi < 0$, по правилу Ленца поле микротоков противоположно внешнему полю B_0 .
- *Парамагнетики:* $\chi > 0$, поле микротоков совпадает с внешним полем B_0 .

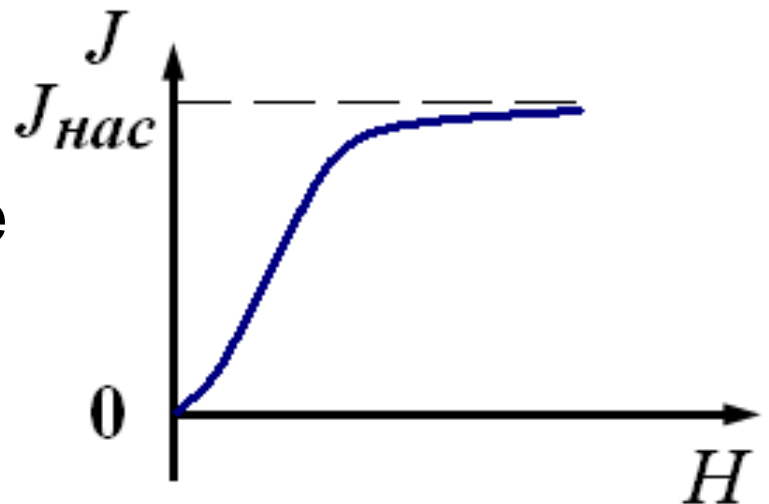


Ферромагнетики.

Сильномагнитные вещества, обладающие спонтанной намагниченностью, т.е. намагниченностью без внешнего магнитного поля (Fe, Co, Ni).

- Функциональная зависимость $J = f(H)$ - нелинейная с насыщением.

Насыщение возникает, когда все молекулярные магнитные моменты соригентируются по внешнему магнитному полю.



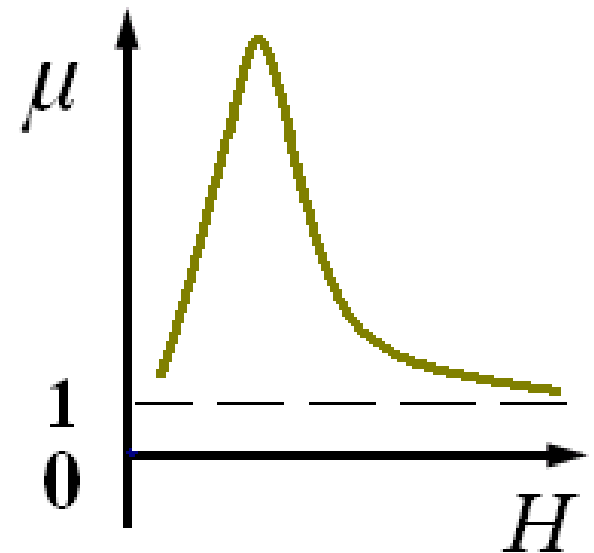
Ферромагнетики.

- У ферромагнетиков большое значение магнитной проницаемости $\mu \gg 1$.
- Нелинейная зависимость магнитной проницаемости μ от величины внешнего магнитного поля H :

$$\mu = f(H)$$

В слабых полях μ растет с ростом H , достигает максимума, затем начинает уменьшаться и в сильных полях стремится к 1.

$\mu = f(H)$ - *кривая Столетова*.



Ферромагнетики.

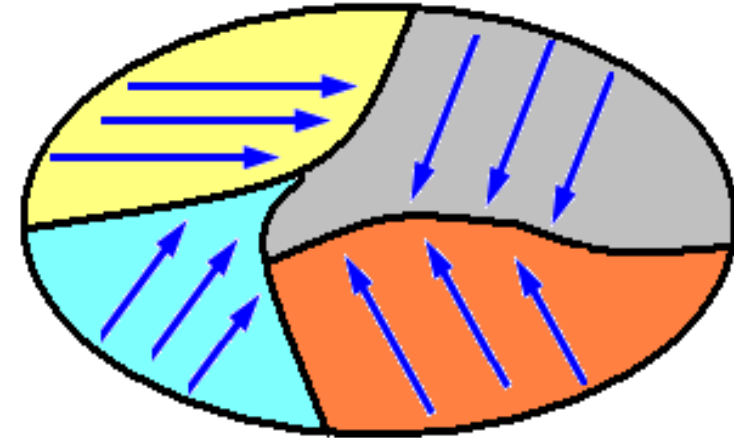
- Ферромагнетики обладают ***точкой Кюри*** – при определенной температуре теряют свои магнитные свойства.

Ферромагнетики.

Большая величина намагниченности J ферромагнетиков объясняется сильным взаимодействием **спиновых магнитных моментов электронов** (p_{ms}), в результате которого происходит *упорядочение* ориентации p_{ms} атомов в решетке.

Ферромагнетики.

Весь ферромагнетик разбивается на области самопроизвольной намагниченности до полного насыщения намагниченности J в них. Эти области называются **доменами**. Их линейные размеры порядка 10^{-2} см.



В отсутствие внешнего магнитного поля намагниченность доменов J направлена хаотично, поэтому

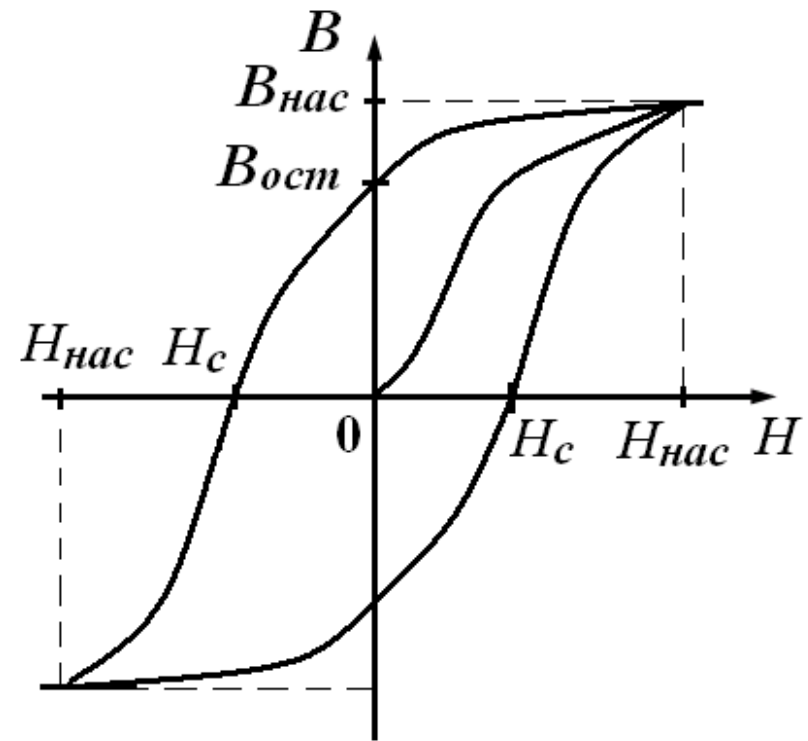
$$\vec{J}_{\text{ферромагнетика}} = \sum \vec{J}_{\text{доменов}} = 0.$$

При внесении ферромагнетика во внешнее магнитное поле

- 1) изменение направлений спонтанной намагниченности отдельных доменов и всего магнетика в целом в результате поворота векторов магнитного момента $\mathbf{p}_m$ внутри доменов по полю,
- 2) смещение границ доменов, что приводит к росту объема доменов, у которых намагниченность ориентирована наиболее близко к направлению внешнего магнитного поля, за счет соседних доменов.

Ферромагнетик во внешнем магнитном поле

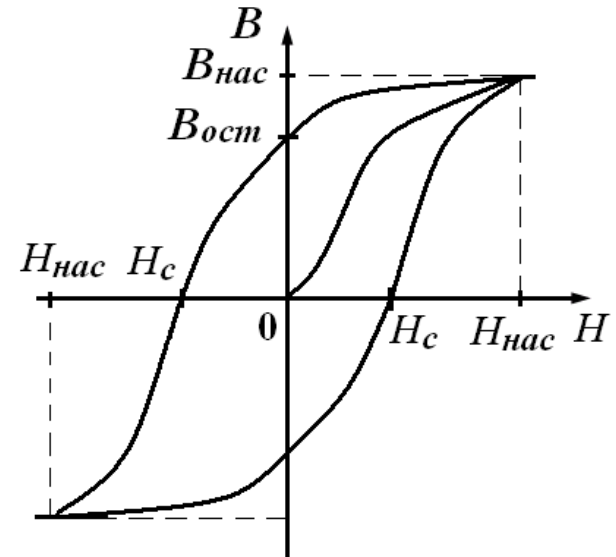
1. Намагниченность ферромагнетика растет от 0 до насыщения $B_{нас}$.
2. При уменьшении внешнего магнитного поля H до нуля ферромагнетик остается намагниченным – $B_{ост. намагниченность}$.



С наличием $B_{ост}$ связано существование *постоянных магнитов*.

Ферромагнетик во внешнем магнитном поле

3. Для того чтобы размагнитить ферромагнетик необходимо поместить его в поле противоположной полярности.



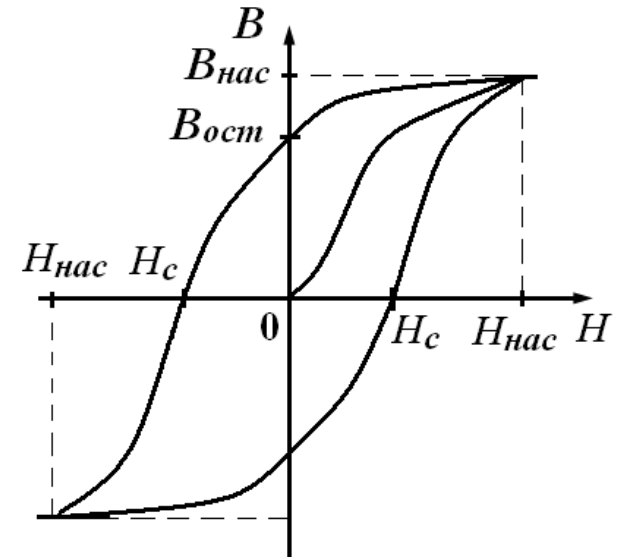
Намагниченность обращается в ноль под действием поля H_c – называемого **коэрцитивной силой**.

H_c – мала, магнетик *магнитомягкий*,

H_c – велика, магнетик *жесткий*.

Ферромагнетик во внешнем магнитном поле

4. При дальнейшем увеличении противоположного поля ферромагнетик перемагничивается и при $H_{нас}$ достигает насыщения.



Затем ферромагнетик можно опять размагнитить, т.о. при действии на ферромагнетик переменного магнитного поля его намагниченность J и индукция B изменяются в соответствии с замкнутой кривой – **петля гистерезиса**.

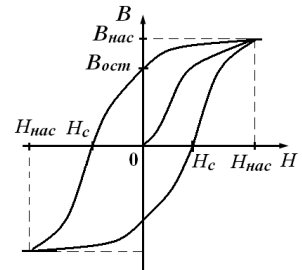
Ферромагнетик во внешнем магнитном поле

- Площадь петли пропорциональна работе, совершенной при перемагничивании.

- Эта работа определяет потери энергии на гистерезис.

$$\oint H dB$$

- Так как во внешнем магнитном поле внутри ферромагнетика происходит перестройка его структуры (смещение и поворот границ доменов), следовательно, это приводит к изменению его размеров.



Явление магнитострикции –

изменение формы и объёма
ферромагнетика при его
намагничивании.

- Обратный эффект – изменение намагниченности при деформации ферромагнетика.

Уравнения Максвелла

**Электромагнитная теория
Максвелла (60-е годы 19 века)**

Электромагнитная теория Максвелла

- Это последовательная теория единого электромагнитного поля, создаваемого произвольной системой зарядов и токов.
- В ней решается *основная задача электродинамики*: по заданному распределению зарядов и токов отыскиваются основные характеристики создаваемых ими электрических и магнитных полей.

Электромагнитная теория Максвелла

- *феноменологическая теория*, т.е. она не рассматривает механизмы явлений, происходящих в среде и вызывающих появление полей.
- Электрические и магнитные свойства среды характеризуются:
 - ε — диэлектрической проницаемостью
(**диэлектрическая проницаемость** среды — физическая величина, характеризующая свойства изолирующей (диэлектрической) среды и показывающая зависимость электрической индукции от напряженности электрического поля)

$$D = \varepsilon \varepsilon_0 E$$

Электромагнитная теория Максвелла

μ — магнитной проницаемостью

(**магнитная проницаемость** — физическая величина, коэффициент, зависящий от свойств среды и характеризующий связь между магнитной индукцией и напряженностью магнитного поля в веществе)

$$\vec{B} = \mu\mu_0\vec{H}$$

σ — удельной электрической проводимостью

(**электрическая проводимость** — способность тела проводить электрический ток)

$$\vec{j} = \sigma\vec{E}$$

Электромагнитная теория Максвелла

рассматривает *макроскопические поля*,

- (а) которые создаются макроскопическими зарядами и токами, сосредоточенными в объемах много больших, чем объем атомов и молекул,
- (б) расстояние от источников полей до рассматриваемой точки пространства много больше размеров атомов и молекул,
- (в) период изменения переменных электрических и магнитных полей много больше периода внутримолекулярных процессов.

Электромагнитная теория Максвелла

Теория Максвелла –

теория *близкодействия*, т.е.
электромагнитное взаимодействие
происходит с конечной скоростью,
равной скорости света c .

Основные положения теории Максвелла

1. Закон Фарадея

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = - \int_S \frac{\partial \vec{B}}{\partial t} d\vec{S},$$

$$\oint_L \vec{E} d\vec{l} = \mathcal{E}_i = - \frac{d\Phi_B}{dt}$$

Фарадей: переменное магнитное поле создает в проводящем замкнутом контуре **вихревое электрическое поле**.

Максвелл: *Циркуляция вектора напряженности электрического поля по произвольному замкнутому контуру L равна взятой с обратным знаком скорости изменения магнитного потока сквозь поверхность, натянутую на контур.*

Основные положения теории Максвелла

2. Закон полного тока

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

где $I_{\text{макро}}$ – результирующий макроток,

$I_{\text{микро}}$ – микроток сквозь поверхность,
натянутую на замкнутый контур L .

*Переменное электрическое поле порождает в
окружающем пространстве **магнитное поле.***