

Лекция 20

4. Магнетизм

4.3. Магнетики

Магнитное поле в веществе. Гипотеза Ампера.

Магнитные моменты атомов молекул. Вектор намагниченности. Намагничивание магнетиков.

Магнитная восприимчивость и проницаемость. Диамагнетизм, парамагнетизм, ферромагнетизм.

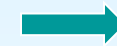
Ферриты. Зависимость намагниченности от напряженности поля. Магнитный гистерезис.

Остаточная намагниченность. Точка Кюри.

Магнитная проницаемость среды

Магнитная проницаемость среды – безразмерная величина, показывающая во сколько раз магнитное поле в веществе изменяется по сравнению с полем в вакууме.

Для вакуума $\mu = 1$



$$B = \mu B_0$$

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

Магнетики

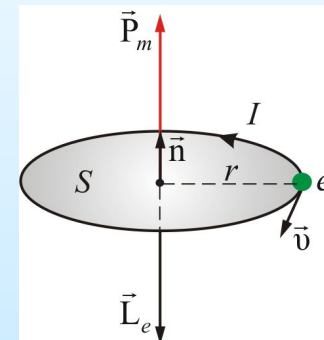
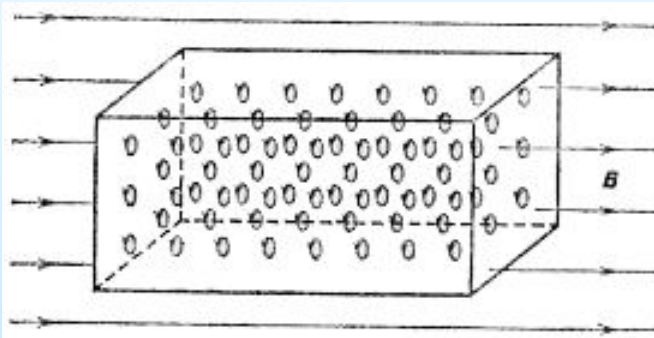
Все тела при внесении их во внешнее магнитное поле B_0 в той или иной степени намагничиваются, т.е. создают собственное магнитное поле B' , которое накладывается на внешнее.

Гипотеза Ампера

$$B = B_0 + B'$$

Ампер решительно отказался от идеи существования в природе особых магнитных зарядов. Вместо этого:

Элементарный магнит – это круговой ток, циркулирующий внутри небольшой частицы вещества, атома, молекулы или их группы.



Гипотеза Ампера

- 1) Каждый атом вещества можно рассматривать как круговой ток.
- 2) Каждый такой ток создает свой магнитный момент p_m .
- 3) Магнитное поле намагниченного тела складывается из магнитных моментов этих круговых (орбитальных) токов: $\sum p_m$
- 4) В ненамагниченном теле все эти магнитные моменты направлены хаотически, поэтому в целом поля нет. $\sum p_m = 0$
- 5) Процесс намагничивания заключается в том, что во внешнем поле все эти отдельные магнитные моменты в большей или меньшей степени выстраиваются вдоль направления внешнего поля, т.е. параллельно друг другу. $\sum p_m \neq 0$

Вектор намагничивания (намагниченность)

Намагниченностью называется векторная физическая величина, характеризующая степень намагничивания вещества, и численно равная магнитному моменту единицы его объема.

$$\vec{J} = \frac{1}{V} \sum \vec{p}_m = \left[\frac{\text{А} \cdot \text{м}^2}{\text{м}^3} \right] = \left[\frac{\text{А}}{\text{м}} \right]$$

Видео магнитные полюса

Напряженность магнитного поля

Напряженностью магнитного поля называется векторная физическая величина численно равная произведению магнитной постоянной и магнитной индукции поля.

$$B = \mu_0 H \quad H = \left[\frac{\text{А}}{\text{м}} \right]$$

Поле в веществе

$$B = B_0 + B' \quad \longrightarrow \quad B_0 = \mu_0 H \quad \longrightarrow \quad B = \mu_0 (H + J)$$

Магнитная восприимчивость

Опыт показывает, что в не очень сильных полях намагниченность пропорциональна напряженности внешнего поля:

Безразмерный коэффициент χ называется магнитной восприимчивостью вещества.

$$J = \chi H$$

$$B = \mu_0 (H + J) = \mu_0 (H + \chi H) = \mu_0 (1 + \chi) H = \mu_0 \mu H$$

Относительная магнитная проницаемость вещества

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

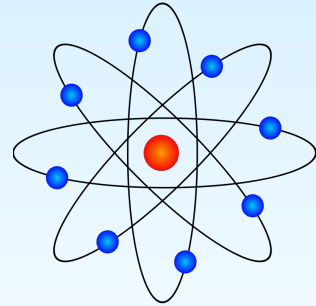
$$B = \mu_0 \mu H = \mu B_0$$

Относительная магнитная проницаемость вещества показывает, во сколько раз магнитное поле в веществе изменяется по сравнению с магнитным полем в вакууме.

Диа-, пара- и ферро- магнетики

В зависимости от величины и знака магнитной проницаемости χ все вещества делятся на 3 большие группы:

- 1) $\mu < 1$ диамагнетики;
- 2) $\mu > 1$ парамагнетики;
- 3) $\mu \gg 1$ ферромагнетики.

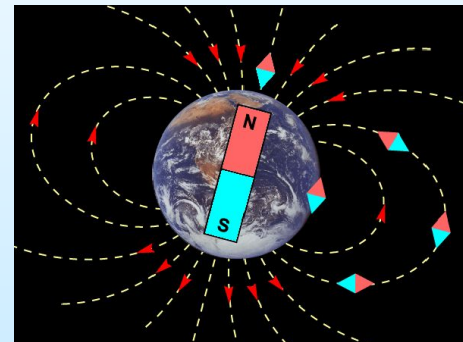
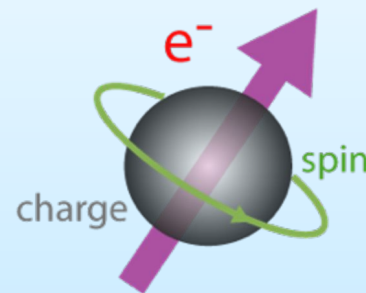


В атомах всех тел находится различное число движущихся электронов, каждый из которых создает свой орбитальный магнитный момент. Эти магнитные моменты складываются.

- 1) Магнитные моменты отдельных электронов могут случайно скомпенсировать друг друга, так, что суммарный магнитный момент атома в целом окажется равным нулю.
- 2) Магнитные моменты электронов не скомпенсированы, и суммарный магнитный момент атома не равен нулю.

Спин электрона

Спином электрона называется его собственный магнитный момент, обусловленный его вращением вокруг своей оси.



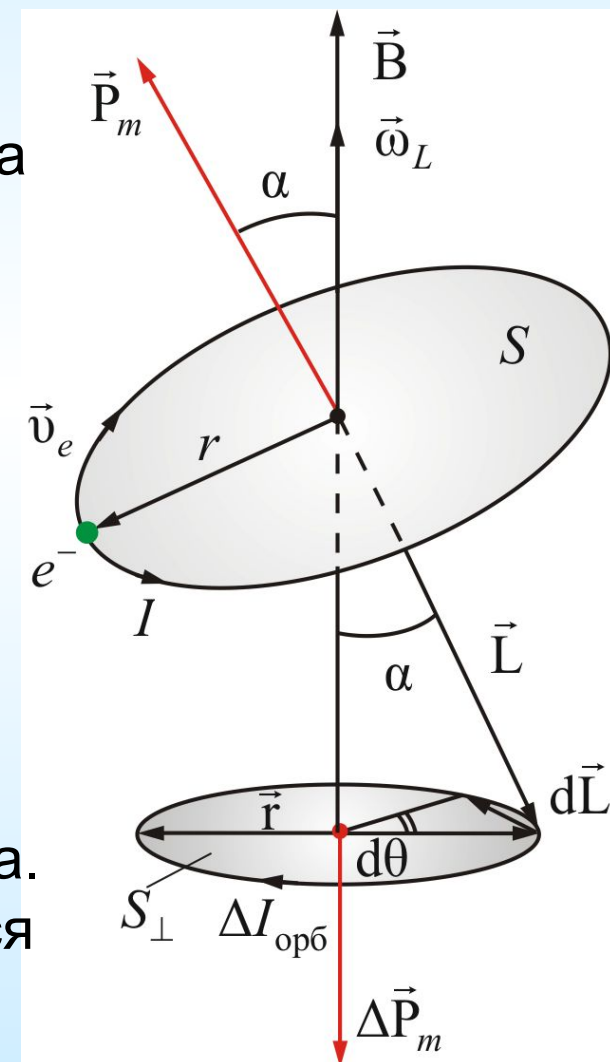
Диамагнетики

Диамагнитными являются вещества, общий магнитный момент каждой частицы которых (атома или молекулы) вне магнитного поля равен нулю (частица не обладает магнитными свойствами).

К диамагнетикам относятся вода, инертные газы, азот, водород, кремний, германий, фосфор, висмут, цинк, медь, золото, серебро, а также многие другие, как органические (глицерин, ацетон), так и неорганические (поваренная соль) соединения. Человек в магнитном поле ведет себя как диамагнетик.

Во внешнем магнитном поле диамагнетики приобретают собственный магнитный момент, противоположный этому полю (отталкиваются от магнита).

На электрон действует сила Лоренца. Значит, должна измениться центростремительная сила. Т.е. изменится скорость движения → изменится ток → возникнет магнитное поле, по правилу Ленца противодействующее внешнему.



Парамагнетики

Парамагнитными являются вещества, общий магнитный момент каждого атома (молекулы) которых вне магнитного поля не равен нулю (частица изначально обладает магнитными свойствами).

Парамагнетизм возникает в случаях, когда магнитные моменты при всем желании скомпенсировать невозможно, например:

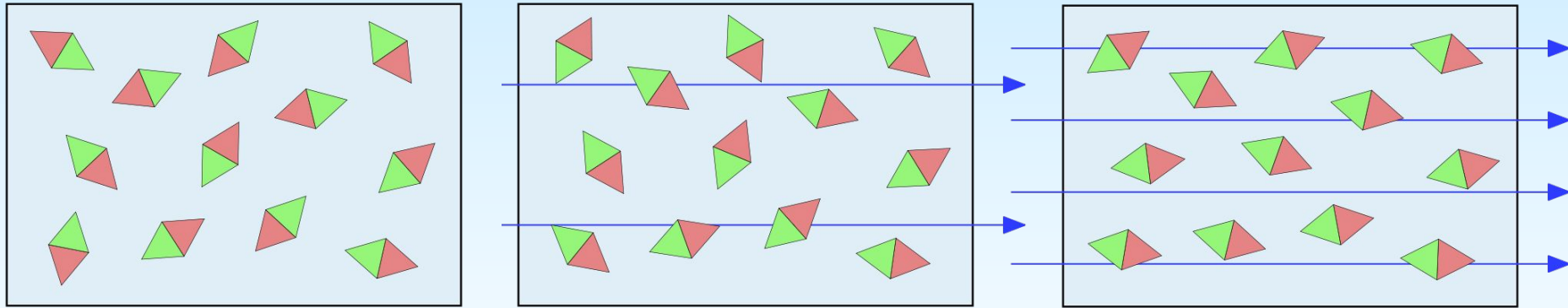
- 1) нечетное число электронов (как в щелочных металлах);
- 2) атомы с незаполненными внутри электронными оболочками;
- 3) когда имеются свободные электроны (при объединении атомов в молекулы, как в металлическом натрии).

К парамагнетикам относятся алюминий (Al), платина (Pt), многие другие металлы (щелочные и щелочно-земельные металлы, а также сплавы этих металлов), кислород (O_2), оксид азота (NO), оксид марганца (MnO), хлорное железо ($FeCl_2$) и др.

Парамагнетиками становятся ферромагнитные вещества при температурах, превышающих температуру Кюри (температуру фазового перехода в парамагнитное состояние).

Во внешнем магнитном поле парамагнетики приобретают собственный магнитный момент, направленный по этому полю (притягиваются к магниту).

Парамагнетики



Ферромагнетики

Во внешнем магнитном поле ферромагнетики также приобретают магнитный момент, направленный по полю (притягиваются к магниту).

- 1) Способны обладать намагничиванием даже в отсутствие внешнего поля;
- 2) Сильно магнитные вещества – их намагничивание до 10^{10} раз превосходит намагничивание диа- и пара- магнетиков;
- 3) Вектор намагничивания уже не пропорционален напряженности внешнего магнитного поля, а зависит от нее сложным образом;
- 4) При температурах превышающих определенное значение (температуру Кюри) ферромагнитные свойства резко пропадают.

Ферромагнетики

Среди химических элементов ферромагнитными свойствами обладают железо (Fe), кобальт (Co), никель (Ni), а также редкоземельные металлы (такие, как гадолиний (Gd) и пр.).

Ферромагнитны также многочисленные сплавы и соединения этих металлов между собой и с другими ферромагнитными элементами, сплавы и соединения хрома (Cr) и марганца (Mn) с ферромагнитными элементами.

Ферромагнитный порядок обнаружен также в аморфных (метастабильных) металлических сплавах и соединениях, аморфных полупроводниках, в обычных органических и неорганических стёклах, халькогенидах (соединениях элементов 6 группы таблицы Менделеева – сера, селен, теллур – с металлами).

Ферриты

Ферриты (оксиферы) — химические соединения оксида железа Fe_2O_3 с оксидами других металлов, обладающие уникальными магнитными свойствами, сочетающие высокую намагниченность и полупроводниковые или даже диэлектрические свойства.

Удельное сопротивление в миллионы раз больше чем у металлов.

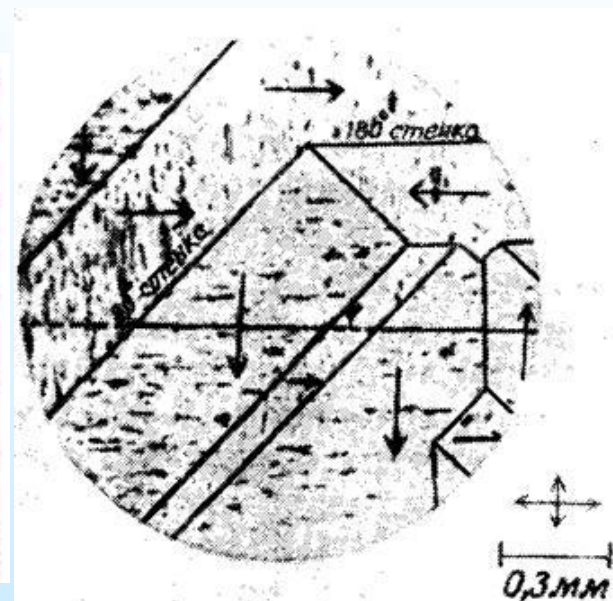
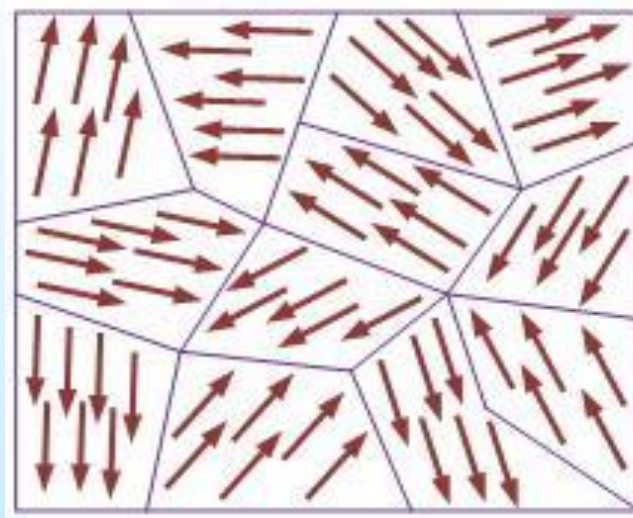
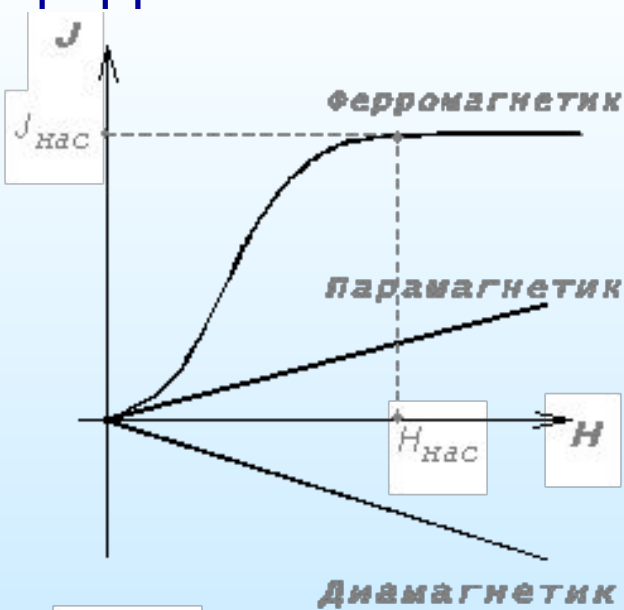
Ферромагнетизм

Объясняется не свойствами отдельных атомов или молекул вещества, а особенностями их кристаллической структуры.

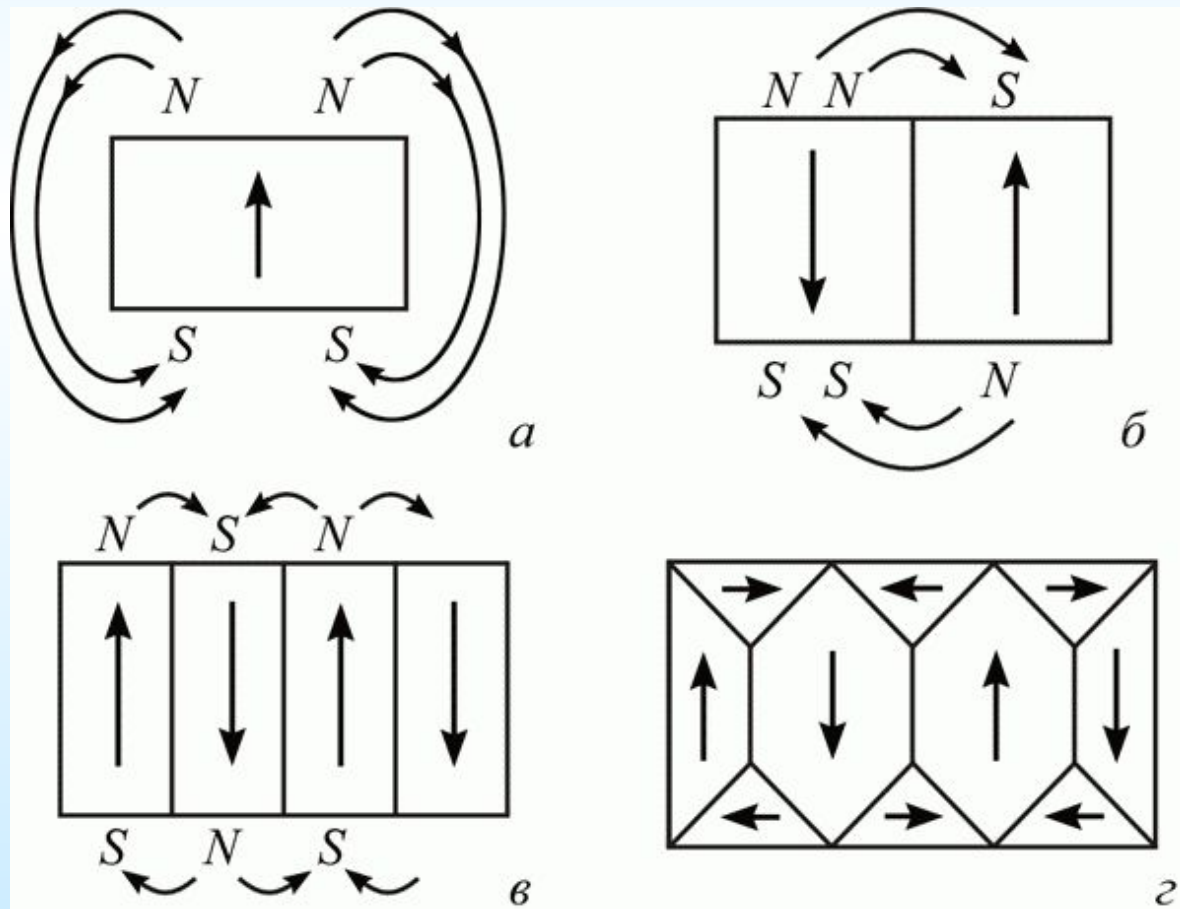
- 1) Сами атомы железа диамагнитны или слабо парамагнитны;
- 2) Зависит от обработки образца (закалка, отжиг) и его истории;
- 3) Сплавы диа- и пара- магнетиков ферромагнитны.

Магнитные домены

Макроскопические области спонтанного (самопроизвольного) намагничивания образца, в которых магнитные моменты атомов ориентированы одинаково. В пределах каждого домена ферромагнетик намагничен до насыщения. Размер: $10^{-3} - 10^{-4}$ см.



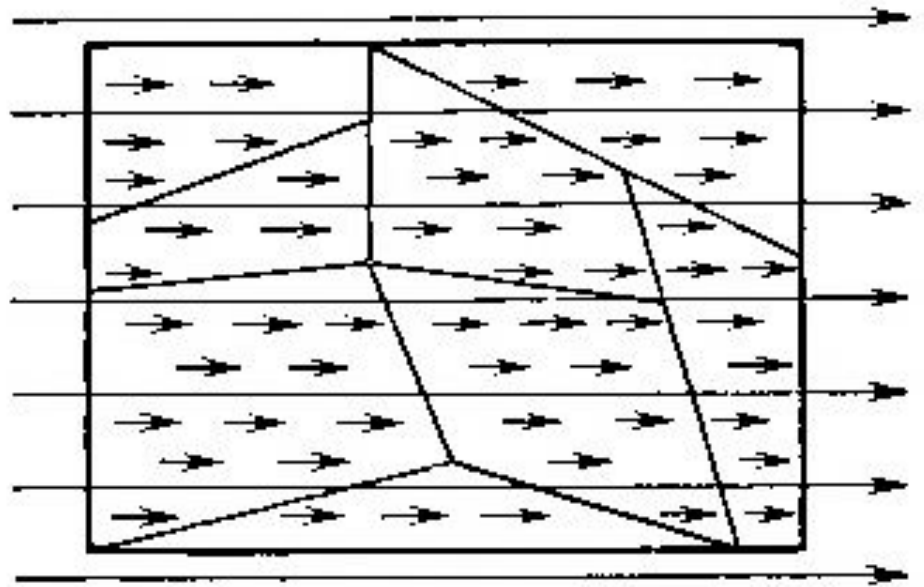
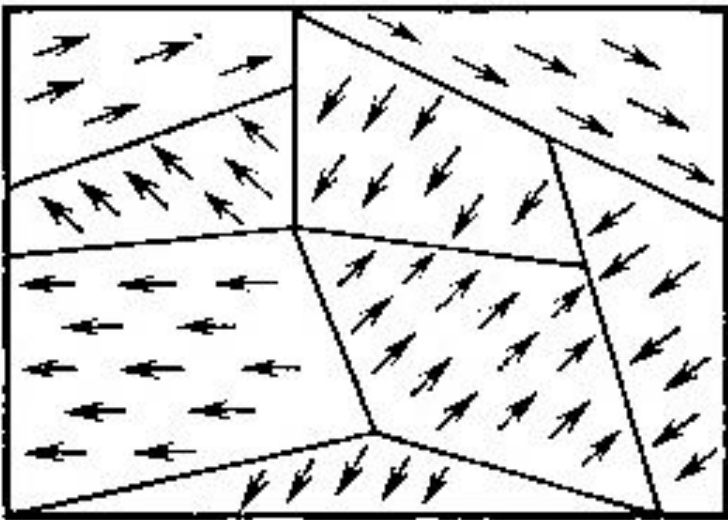
Если бы в отсутствие поля кристалл железа был бы единым доменом, то это привело бы к возникновению значительного внешнего магнитного поля, содержащего большую энергию. Разбиваясь на домены, ферромагнитный кристалл уменьшает энергию магнитного поля. При этом, разбиваясь на косоугольные области, можно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



Перемагничивание доменов

Объяснение – только из квантовой теории строения вещества. При определенных условиях спиновые магнитные моменты электронов могут в результате их магнитного взаимодействия спонтанно выстраиваться параллельно друг другу.

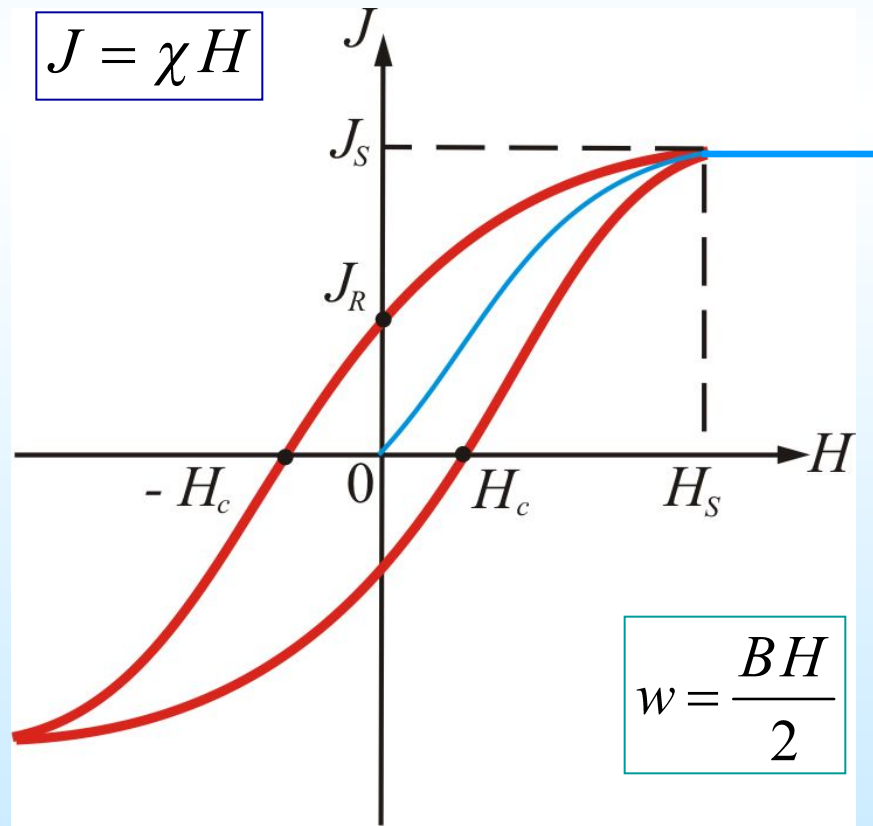
В слабом внешнем магнитном поле за счет перемагничивания пограничных областей начинают расти те домены, магнитные моменты которых составляют более острый угол с направлением магнитного поля (энергетически более выгодные). В дальнейшем в сильных полях возможен одновременный поворот всех магнитных моментов домена в направлении поля. Этот процесс необратим.



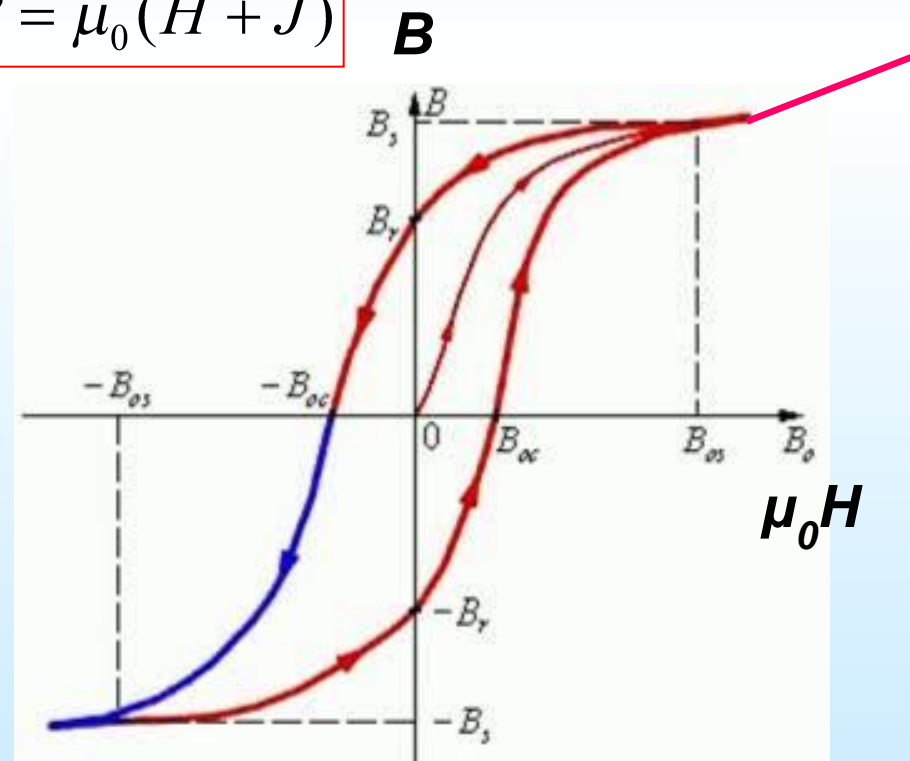
Магнитный гистерезис

Гистерезис магнитный (Hysteresis magnetic) – запаздывание намагничивания материала под воздействием любого циклического изменения прилагаемого магнитного поля.

Основная кривая намагничивания, насыщение (~ 100 А/м), остаточное намагничивание, остаточная индукция, коэрцитивная сила.



$$B = \mu_0(H + J)$$





Пьер Кюри
1859–1906
Ноб. лаур.
1903

Точка Кюри

Температура фазового перехода II рода (проходящего без поглощения или выделения теплоты), связанного со скачкообразным изменением симметрии вещества. При температуре ниже точки Кюри ферромагнетики обладают самопроизвольной намагниченностью и определённой магнитно-кристаллической симметрией. В точке Кюри интенсивность теплового движения атомов ферромагнетика оказывается достаточной для разрушения его "магнитного порядка", в результате ферромагнетик становится обычным парамагнетиком.

Температуры Кюри (°C)

$$T = Q$$

Кобальт	1130	
Железо	770	
Железо кремнистое (4,3% Si)		690
Магнетит Fe_3O_4	572	
Пермаллой (22% Fe, 78% Ni)		550
Никель	358	
Сплав Гейслера (61% Cu, 26% Mn, 13% Al)		330
Гадолиний	16	

Если подвесить образец никеля вблизи пламени горелки так, чтобы он находился в поле сильного постоянного магнита, то не нагретый образец может располагаться горизонтально, сильно притягиваясь к магниту. По мере нагрева образца и достижения температуры Кюри ($360\text{ }^{\circ}\text{C}$) ферромагнитные свойства у никеля исчезают и образец никеля падает. Остыв до температуры ниже точки Кюри, образец вновь притянется к магниту. Нагревшись, вновь падает и т.д. Эти периодические колебания будут продолжаться все время, пока горит свеча или горелка.

