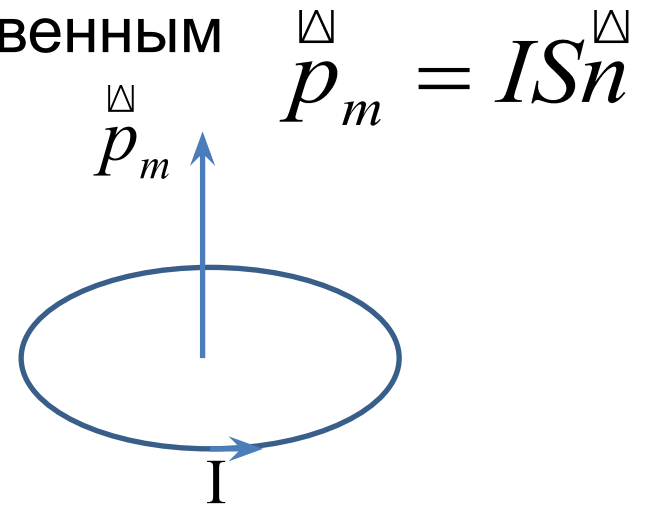


**Магнитное поле в  
веществе.  
Уравнения Максвелла**

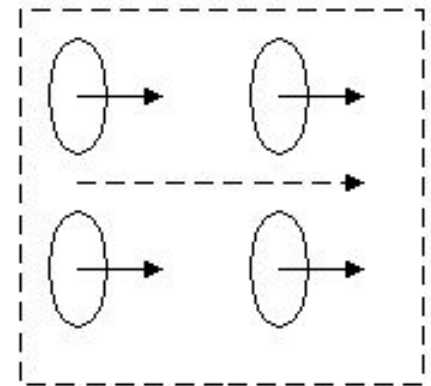
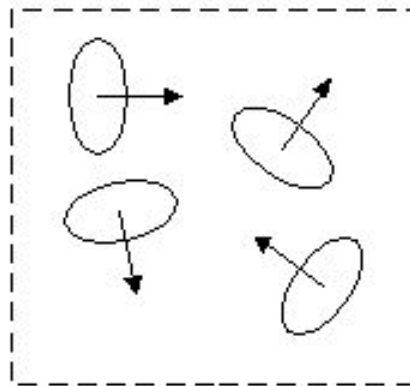
# Магнетики

- Если проводник с током помещен в некоторую среду, то создаваемое им магнитное поле изменяется.
- Все вещества в большей или меньшей степени обладают магнитными свойствами, т.е. являются **магнетиками**.
- Ампер предположил, что в молекулах циркулируют круговые токи, обладающие собственным **магнитным моментом**.
- Магнитные свойства веществ в основном определяются движением электронов, входящих в состав атомов.



# Магнетики

- В отсутствии магнитного поля молекулярные токи ориентированы хаотически.
- Под действием магнитного поля магнитные моменты молекул приобретают преимущественную ориентацию – **вещество намагничивается.**



# Намагниченность

- Магнитный момент единицы объема  $\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum_{i \in \Delta V} \vec{p}_{m_i}$  называется **намагниченностью**.
- **Намагниченность** связана с напряженностью магнитного поля  $\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J}$

$$\vec{J} = \chi \vec{H}, \quad \chi - \text{магнитная восприимчивость}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \chi \vec{H}; \quad (1 + \chi) \vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0}$$

$$\vec{H} = \frac{\vec{B}}{\mu_0(1 + \chi)} = \frac{\vec{B}}{\mu_0 \mu}$$

$$\mu = (1 + \chi) - \text{относительная магнитная проницаемость}$$

# Магнетики

- Магнитная проницаемость показывает во сколько раз индукция магнитного поля в однородной среде отличается по модулю от индукции магнитного поля в вакууме  $\mu = \frac{B}{B_0}$
- Напряженность магнитного поля внутри магнетика совпадает с напряженностью внешнего магнитного поля

$$\vec{H}_0 = \frac{\vec{B}_0}{\mu_0} = \frac{\vec{B} - \mu_0 \vec{J}}{\mu_0} = \frac{\vec{B}}{\mu_0} - \vec{J} = \vec{H}$$

- Различные вещества в той или иной степени способны к **намагничиванию**.
- Слабромагнитные вещества – **пара- и диамагнетики**, сильномагнитные – **ферромагнетики**.

# Магнетики

- У парамагнетиков  $\mu > 1$ , у диамагнетиков  $\mu < 1$ . Отличие  $\mu$  от единицы у пара- и диамагнетиков чрезвычайно мало. Например, у алюминия, который относится к парамагнетикам,  $\mu - 1 \approx 2,1 \cdot 10^{-5}$ , у хлористого железа ( $\text{FeCl}_3$ )  $\mu - 1 \approx 2,5 \cdot 10^{-3}$ .
- К **парамагнетикам** относятся также платина, воздух и многие другие вещества.
- К **диамагнетикам** относятся медь ( $\mu - 1 \approx -3 \cdot 10^{-6}$ ), вода ( $\mu - 1 \approx -9 \cdot 10^{-6}$ )

# Диамagnetизм и парамагнетизм

- Магнитный момент обусловлен движением электрона по орбите.
- Движущийся электрон обладает также моментом импульса.

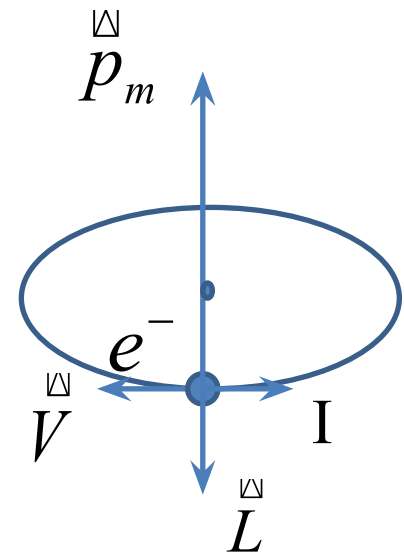
$I = ev$ ,  $\nu$  – частота вращения

$$p_m = IS = ev\pi r^2 = \frac{eVr}{2}$$

$$L = mVr$$

Магнитомеханическое соотношение

$$\frac{p_m}{L} = -\frac{e}{2m}$$



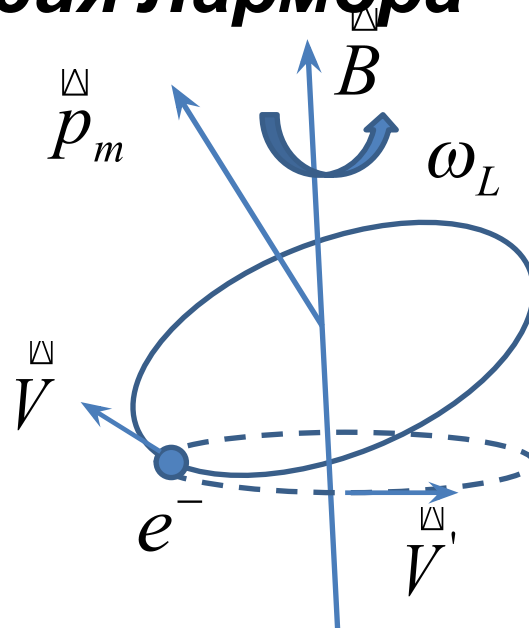
# Диамagnetизм и парамагнетизм

- Во внешнем поле на круговой ток действует вращательный момент, стремящийся установить магнитный момент по полю.
- Плоскость вращения электрона поворачивается – **прецессия Лармора**

$$\vec{M} = [\vec{p}_m \vec{B}]$$

$$\frac{d\vec{L}}{dt} = \vec{M};$$

$$\omega_L = \frac{p_m B}{L}$$





# Диамagnetизм и парамагнетизм

- Под действие внешнего магнитного поля происходит *прецессия* электронных орбит.
- Обусловленное прецессией дополнительное вращение приводит к возникновению *индуцированного магнитного момента, направленного против поля.*
- Если атом обладает собственным магнитным моментом (много больше, чем индуцированный) – *парамагнетик.*
- Если результирующий собственный магнитный момент атома равен нулю – *диамagnetик.*

# Слабромагнитные вещества

**Диамагнетики**

$$\chi < 0 \text{ и мала } (\chi = 10^{-5} - 10^{-6}) \quad \mu < 1 \quad \vec{B}' \uparrow \downarrow \vec{B}_0$$

органические соединения, инертные газы,  
Cu, Bi, Sb, Ag, Au, Pb, I, C, Si, Zn, S, H<sub>2</sub>O, CO<sub>2</sub>

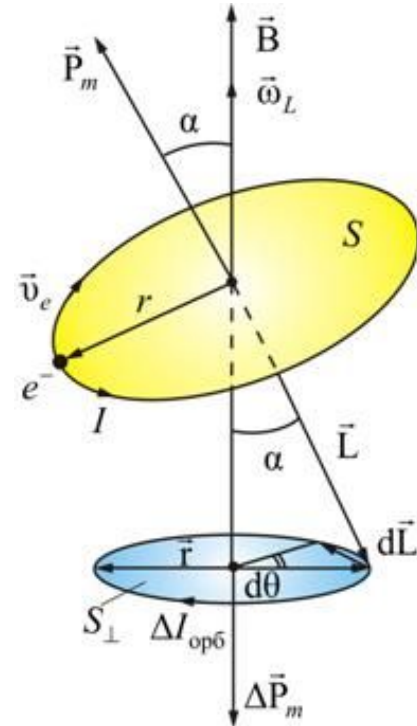
орбита e<sup>-</sup> ориентирована относительно вектора  $B$  произвольным образом, составляя с ним угол  $\alpha$ ,



орбита e<sup>-</sup> приходит в такое движение вокруг  $B$ , при котором  $p_m$ , сохраняя постоянным угол  $\alpha$ , вращается вокруг  $B$  с некоторой угловой скоростью



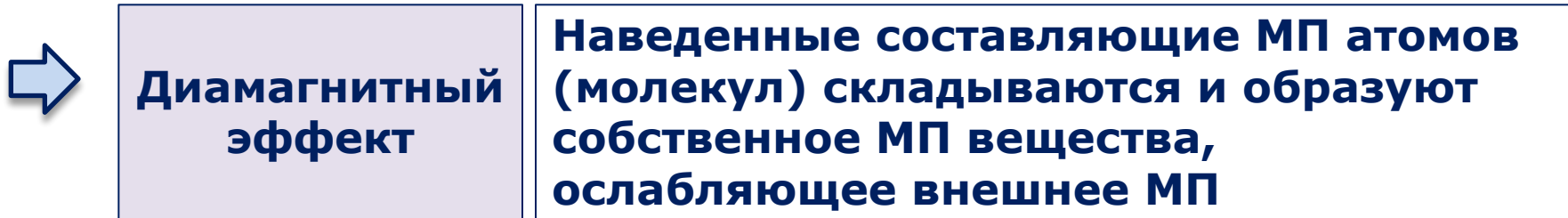
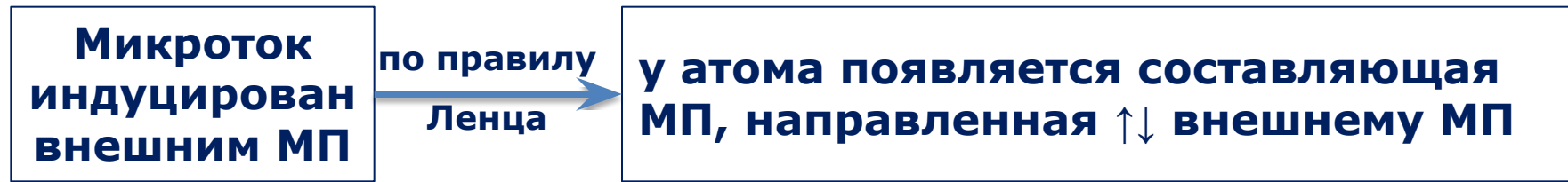
Электронные орбиты атома под действием внешнего МП совершают прецессионное движение, эквивалентное круговому току



прецессия  
электрона

Явление диамагнетизма  
открыто М. Фарадеем  
в 1845 г.

# Диамагнитный эффект

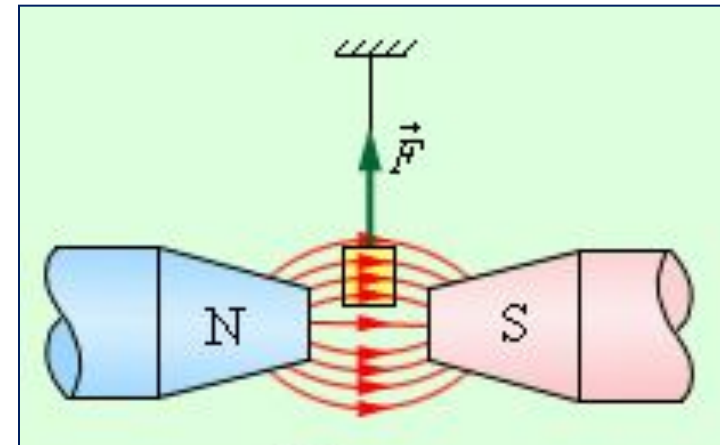


Диамагнитный эффект обусловлен действием внешнего МП на электроны атомов вещества

диамагнетизм свойствен ВСЕМ веществам

При  $B_0 = 0$   $\sum p_a = \sum p_m = 0$

магнитные свойства НЕ проявляются



В неоднородном МП образец выталкивается из области сильного МП

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42	43	44	45	46	47	48	49	50	51	52	53	54	55	56	57	58	59	60	61	62	63	64	65	66	67	68	69	70	71	72	73	74	75	76	77	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	97	98	99	100
---	---	---	---	---	---	---	---	---	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	----	-----

# Сильномагнитные вещества

**Парамагнетики**

**вещества, намагничивающиеся во внешнем МП по полю**

$$\vec{B}' \uparrow \uparrow \vec{B}_0$$

$\chi > 0$  и мала ( $\chi = 10^{-3} - 10^{-5}$ )       $\mu > 1$        $\chi = \frac{C}{T}$       **C – постоянная Кюри, зависит от вещества**

**редкоземельные элементы, щелочные металлы, воздух, O<sub>2</sub>, Cr, Mn, Sn, Pt и др.**

$$\vec{B} = \mu_0 (1 + \chi) \vec{H}$$

При  $B_0 = 0$        $\vec{p}_{mi} \neq 0$       но

**тепловое движение**

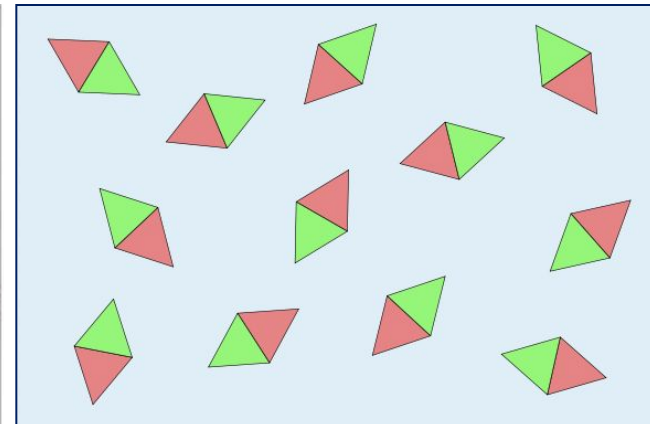
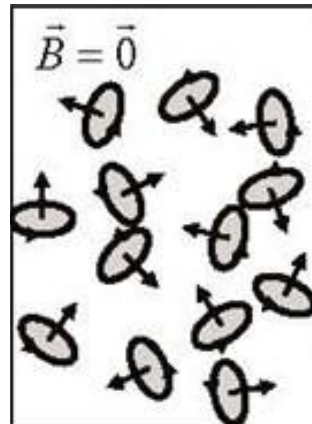


**магнитные моменты есть, НО ориентированы беспорядочно**

$$\vec{p}_a = \sum_{i=1}^n \vec{p}_{mi} = 0$$



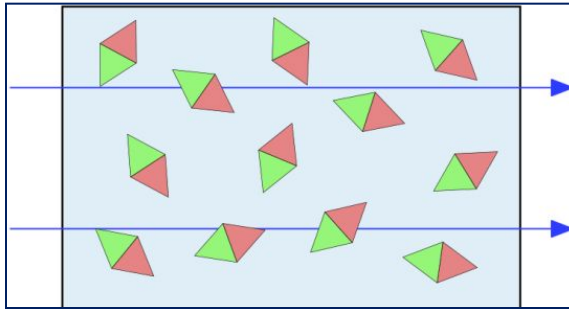
**парамагнетик НЕ намагничен**



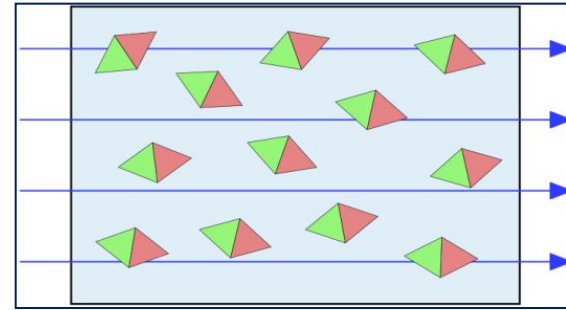
# Парамагнитный эффект

При  $B_0 \neq 0$

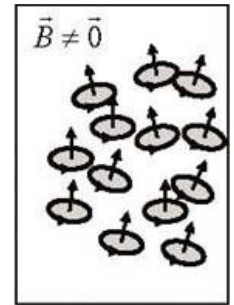
**Преимущественная ориентация  $p_m$  по полю**



$B_0 \neq 0$ , поле слабое

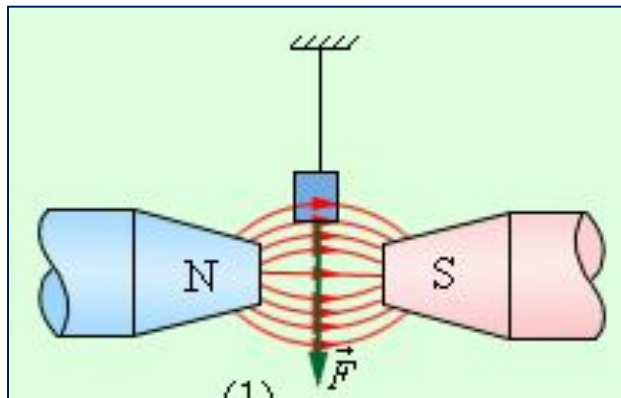


$B_0 \neq 0$ , поле сильное



**Парамагнитный эффект**

**парамагнетик намагничивается, создавая собственное МП, совпадающее по направлению с внешним полем и усиливающее его**



**В неоднородном МП образец втягивается в область сильного МП**

**Аналогично ориентационной (дипольной) поляризации диэлектриков с полярными молекулами**





# Сильномагнитные вещества

**Ферромагнетики**

$$\chi \gg 0 \quad \mu \gg 1$$

Fe, Ni, Co, Gd  
(гадолиний)  
и их сплавы

$\mu \sim 10^2 - 10^5$ :  
у стали  $\mu \approx 8\,000$ ,  
у сплава Fe с Ni  
 $\mu \approx 250\,000$

**сильномагнитные вещества**  
обладают спонтанной  
намагниченностью, т.е.  
при отсутствии внешнего МП

Намагниченность  
ферромагнетиков  $J$  –  
превосходит  $J$  диа- и  
парамагнетиков до  $10^{10}$  раз

$$\chi = \frac{C}{T - T_c}$$

$T_c$  –  
точка  
Кюри

Fe:  $T_c = 770^\circ\text{C}$   
Co:  $T_c = 1130^\circ\text{C}$   
Ni:  $T_c = 360^\circ\text{C}$

$$\overset{\nabla}{B'} \uparrow \uparrow \overset{\nabla}{B_0}$$

При  $T > T_c$

ферромагнетик



обычный  
парамагнетик

независимо от наличия внешнего МП !

При  $T < T_c$

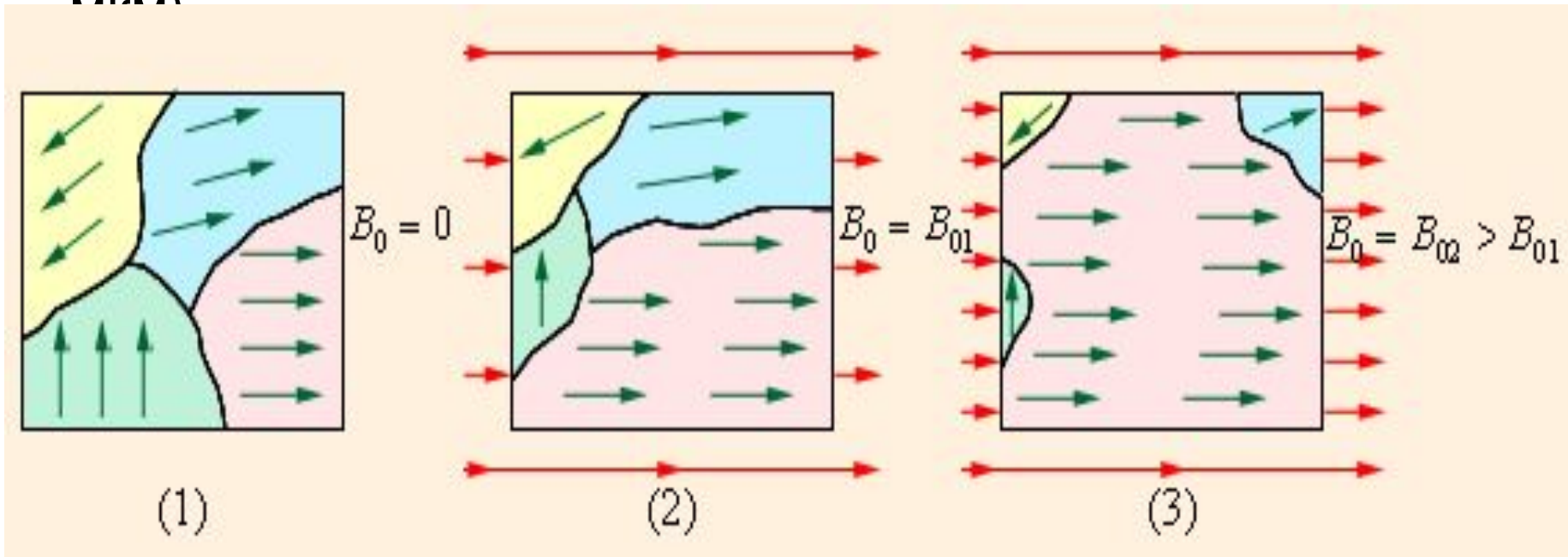
спонтанное  
намагничивание

фазовый переход II рода  
– НЕ сопровождается  
поглощением или  
выделением теплоты



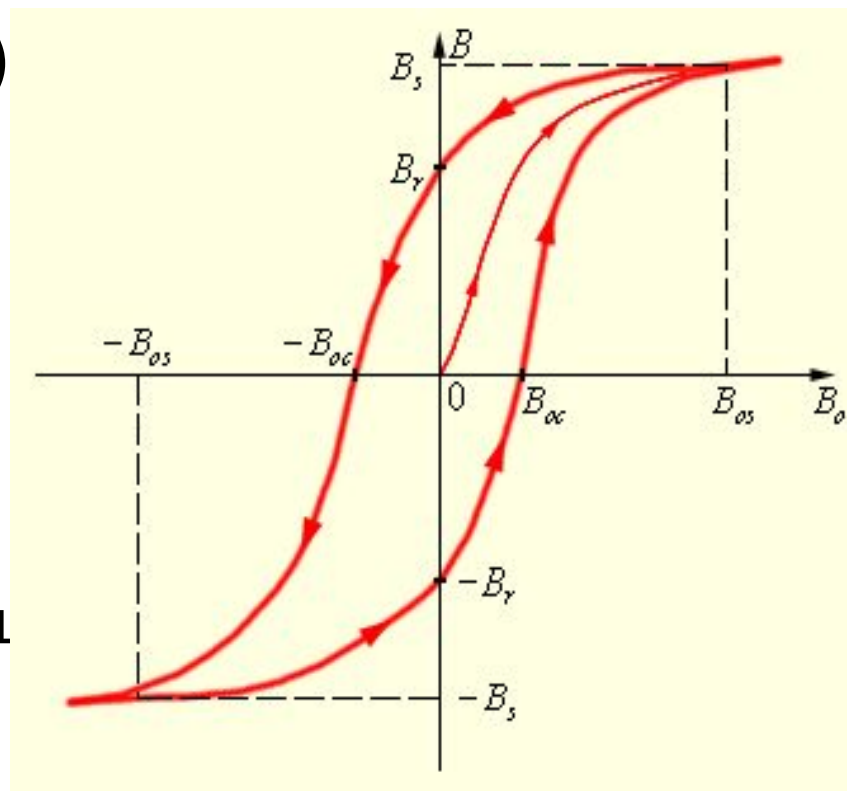
# Ферромагнетики

- **Ферромагнетики** – это вещества, обладающие самопроизвольной намагниченностью, которая сильно изменяется под влиянием внешних воздействий – магнитного поля, деформации, температуры.
- Области **спонтанного намагничивания** – домены (1-10 мкм)



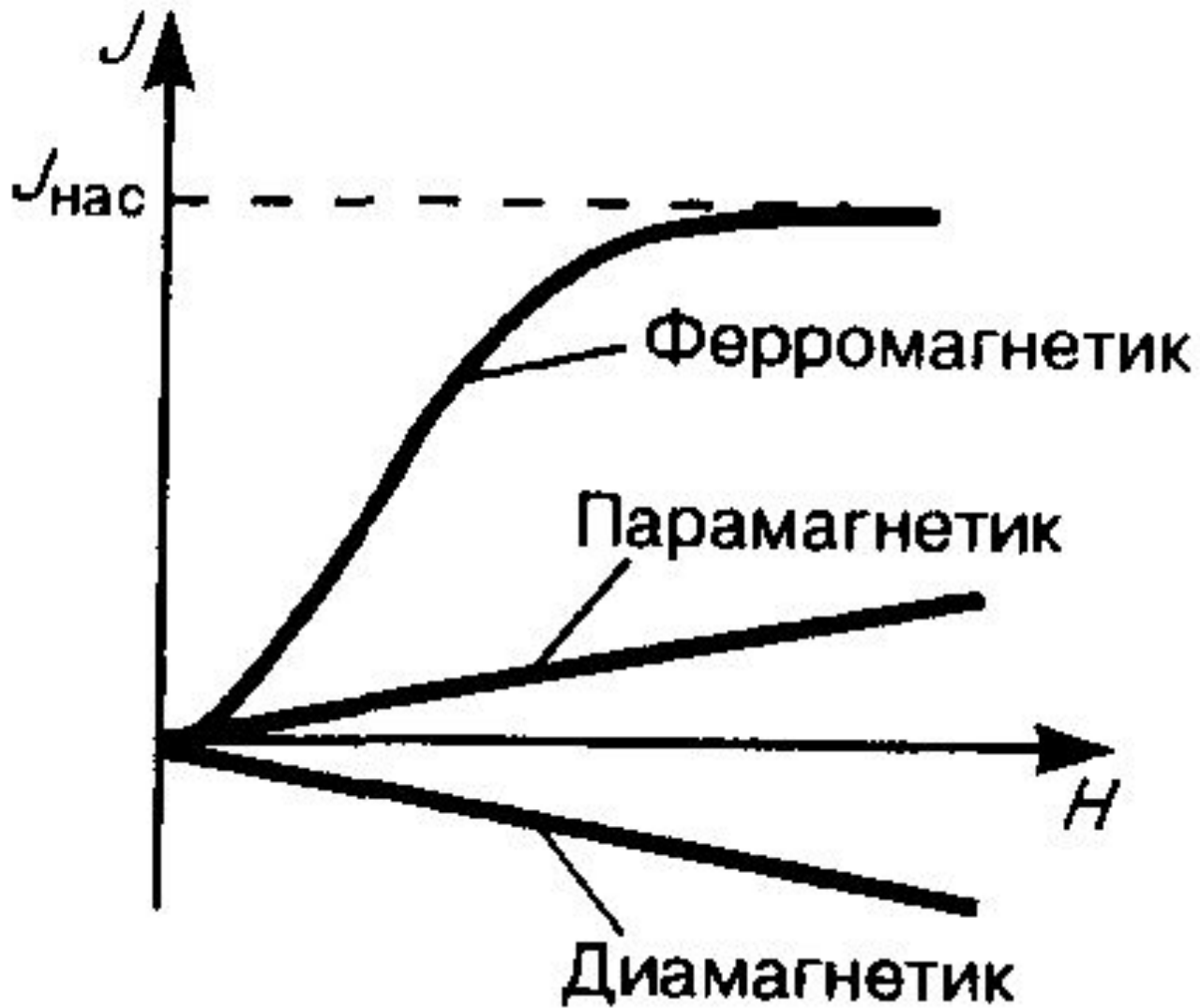
# Ферромагнетики

- Намагниченность зависит от внешнего магнитного поля сложным образом.
- Явление **гистерезиса**: при исчезновении внешнего магнитного поля сохраняется остаточная намагниченность ( $B_r$ )
- Индукция  $B$  обращается в нуль под действием внешнего поля, имеющего противоположное направление - **коэрцитивная сила**.
- Изготовление постоянных магнитов – тем лучше, чем больше коэрцитивная сила материала.





# Кривая намагничивания



# Уравнения Максвелла

## Электростатическое поле (потенциальное):

- Теорема Гаусса

$$\oint_S \vec{E} dS = \frac{Q}{\epsilon_0}$$

- Теорема о циркуляции  $\Gamma_E = \oint \vec{E} dl = 0$

## Вихревое электрическое поле

- Явление электромагнитной индукции

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \oint \vec{E}_{\text{вихр}} dl = -\frac{d\Phi}{dt} = -\frac{d}{dt} \int_S \vec{B} dS$$

$$\oint_L \vec{E}_{\text{вихр}} dl = -\int_S \frac{d\vec{B}}{dt} dS$$

# Токи смещения

- Изменение магнитного поля порождает вихревое электрическое поле.
- Что происходит, если электрическое поле изменяется во времени?
- **Токи смещения**

$$\oint \vec{j}_{\text{смещ}} dS = \frac{dq}{dt} = \frac{d}{dt} \epsilon_0 \oint_S \vec{E} dS = \oint_S \frac{d}{dt} (\epsilon_0 \vec{E}) dS$$

$$\vec{j}_{\text{смещ}} = \frac{d}{dt} (\epsilon_0 \vec{E})$$

# Уравнения Максвелла

Магнитное поле

- Теорема Гаусса  $\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$
- Теорема о циркуляции

$$\oint_L \vec{B} d\vec{l} = \mu_0 (I_{\text{провод}} + I_{\text{смест}}) =$$
$$= \mu_0 \int_S (\vec{j} + \epsilon_0 \frac{\partial \vec{E}}{\partial t}) d\vec{S}$$

# Уравнения Максвелла в среде

$$\vec{D} = \epsilon\epsilon_0 \vec{E}; \quad \vec{B} = \mu\mu_0 \vec{H}; \quad \vec{j} = \sigma \vec{E}$$

$$\oint_S \vec{D} d\vec{S} = Q$$

Теорема Гаусса

$$\oint_L \vec{H} d\vec{l} = \int_S \vec{j} d\vec{S} + \frac{\partial}{\partial t} \int_S \vec{D} d\vec{S}$$

Токи проводимости и токи смещения

$$\oint_S \vec{B} d\vec{S} = 0$$

Отсутствие магнитных зарядов

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

ЭДС электромагнитной индукции

# Электромагнитное поле

- Энергия электрического поля

$$W = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon V E^2; \quad w = \frac{W}{V} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon E^2$$

- Энергия магнитного поля (*размыкание цепи*)

$$dA = IUdt = -I \frac{d\Phi}{dt} dt = -Id(LI) = -LI dI$$

$$W = -\int_I^0 LI dI = \frac{LI^2}{2}$$

# Электромагнитное поле

- Энергия магнитного поля для бесконечно длинного соленоида с магнитным

сердечником

$$W = \frac{\mu\mu_0 n^2 V I^2}{2} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} V$$

$$w = \frac{W}{V} = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

- Плотность энергии электромагнитного поля

$$w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} + \frac{\mu\mu_0 H^2}{2}$$

# Сопоставление ЭП и МП

Объемная плотность энергии  
(энергия единицы объема)

$$w = \frac{W}{V}$$

Электрическое поле

$$w = \frac{\varepsilon\varepsilon_0 E^2}{2} = \frac{ED}{2}$$

$$D = \varepsilon\varepsilon_0 E$$

Магнитное поле

$$w = \frac{B^2}{2\mu\mu_0} = \frac{BH}{2}$$

$$B = \mu\mu_0 H$$

Справедливо для  
неоднородных МП !



# Электромагнитный колебательный контур

