

# Лекция 1 Основы магнетизма

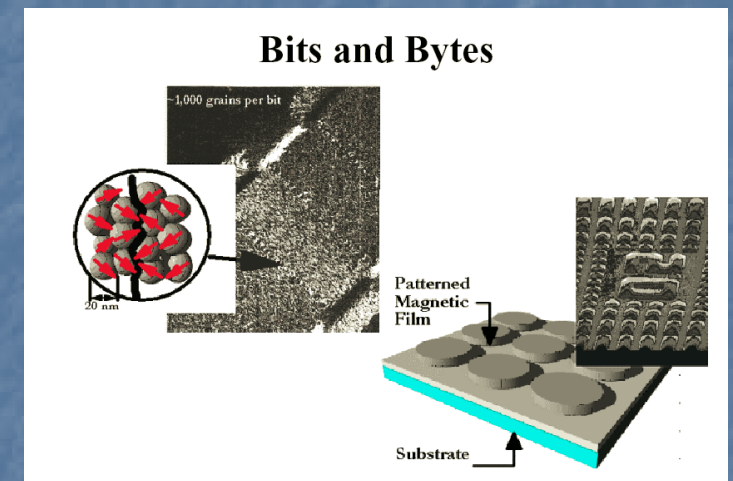
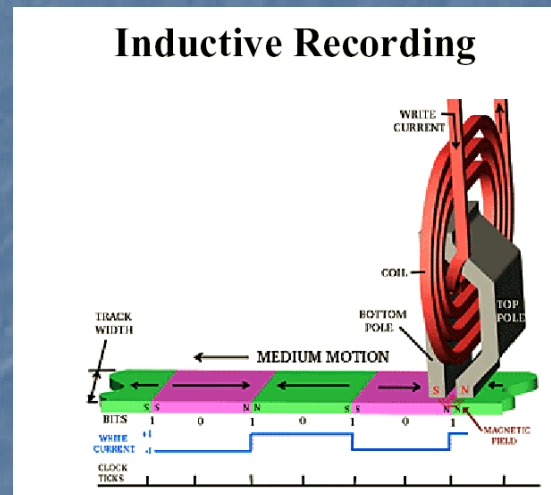
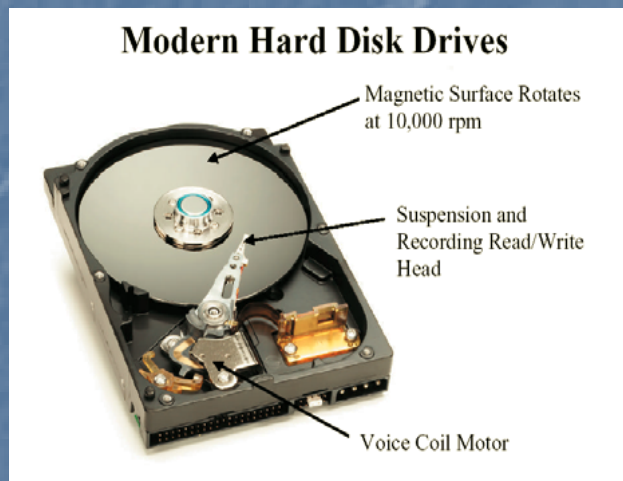
О.С. Трушин

доцент кафедры нанотехнологий в  
электронике,

к.ф.м.н., с.н.с ЯФ ФТИАН

# Введение в физику магнитных наноструктур

В данном курсе мы рассмотрим основные свойства **магнитных нанокристаллических систем** и их использование в настоящее время и в видимой перспективе. Приведем лишь одну иллюстрацию использования магнитных свойств – жесткий диск персонального компьютера, в основе работы которого лежит магнитная запись, хранение и считывание.



Центральный вопрос данного курса - проявления и использование магнитных свойств нанокристаллических систем и наноструктур, что является одной из основных тем современного магнетизма.

# Структура курса

- Лекция 1 Введение в физику магнитных явлений
- Лекция 2 Атомный магнетизм
- Лекция 3 Основы микромагнитной теории
- Лекция 4 Основы магнитооптики
- Лекция 5 Магнетосопротивление
- Лекция 6 Перспективные устройства спинтроники
- Лабораторная работа 1 Получение магнитных пленок
- Лабораторная работа 2 Измерение магнетосопротивления пленочных структур
- Лабораторная работа 3 Магнитооптика тонких пленок
- Лабораторная работа 4 Микромагнитное моделирование магнитных наноструктур
- Лабораторная работа 5 Микромагнитное моделирование движения доменной стенки
- Лабораторная работа 6 Микромагнитное моделирование спин-вентильной структуры

# Наше первое знакомство с магнитными явлениями



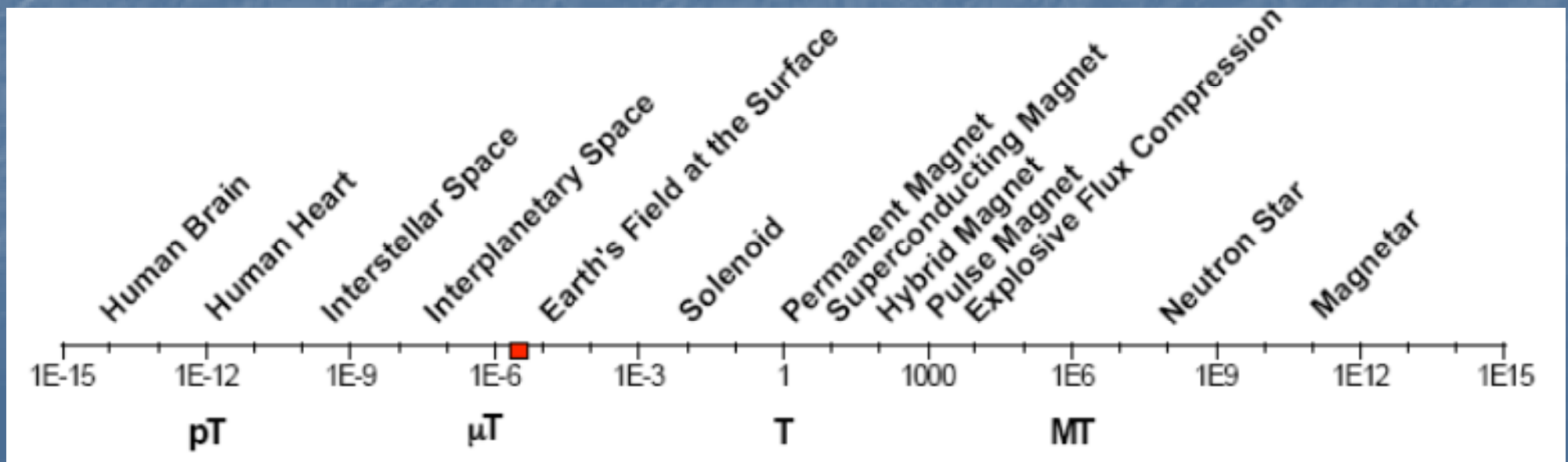
Явление магнетизма получило название от свойства кусков железной руды – магнетита ( $\text{Fe}_3+[\text{Fe}_2+\text{Fe}_3+]\text{O}_4$ ), которые были обнаружены вблизи древнего города Магнезия.



# Диапазон магнитных полей в природе

Источники полей:

- 1) Электрические токи
- 2) Постоянные магниты



# Примеры магнитных полей

Typical values of  $B$



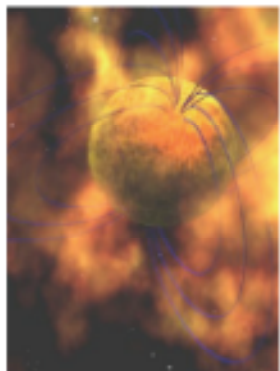
Earth  $50 \mu\text{T}$



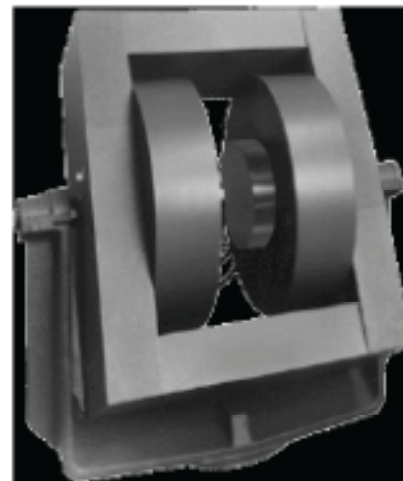
Helmholtz coils  $10 \text{ mT}$



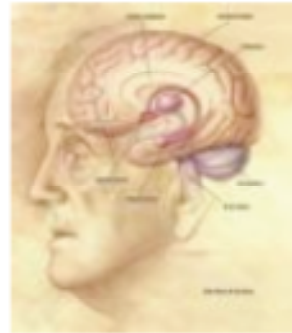
Permanent magnet  $1 \text{ T}$



Magnetar  $10^{12} \text{ T}$



Electromagnet  $1 \text{ T}$



Human brain  $1 \text{ fT}$



Superconducting magnet  $10 \text{ T}$

# История магнетизма I: Америка

## Olmecs and Sumerians



Sea turtle with a magnetic snout



Polished hematite bar



The Olmec heartland; 1400 - 400 BC



# История магнетизма II: Китай

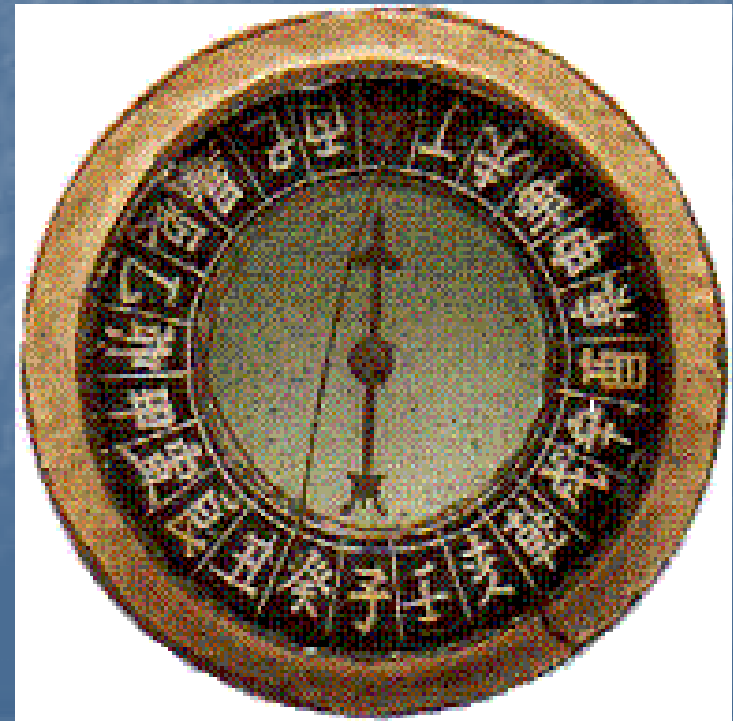


South-Pointer  
Compass



Начало нашей эры

-1000 to 1500

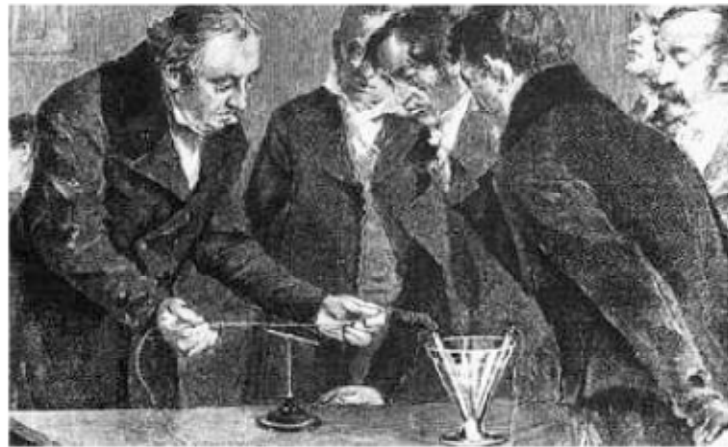


# История магнетизма: III

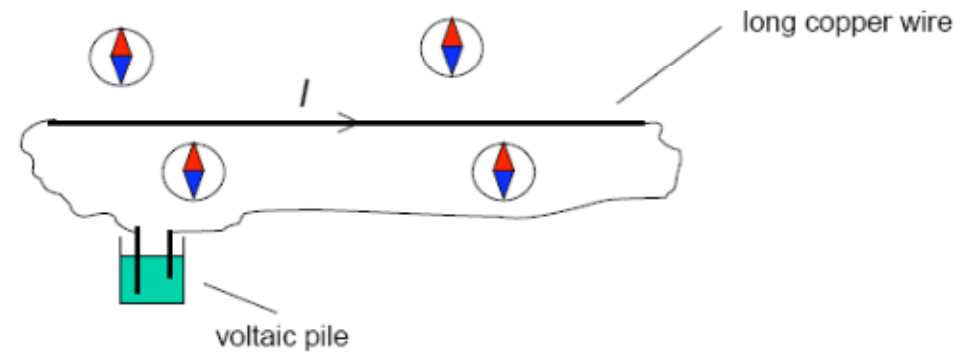
## Oersted's great discovery



Hans-Christian Oersted stumbles on the truth



1500 - 1820



# История магнетизма: IV

- 1820 Oersted discovers the magnetic effect of electric currents
- 1821 Ampere attributes the magnetism of matter to 'molecular' currents
- 1821 Faraday builds a primitive electric motor
- 1825 Sturgeon invents the first practical electromagnet
- 1831 Faraday discovers electromagnetic induction
- 1833 Gauss and Weber build a telegraph more than 1 km long, with a galvanometer as the receiver
- 1845 Faraday discovers paramagnetism and diamagnetism, also magneo-optic Faraday effect
- 1847 Helmholtz states the conservation of energy in a general form
- 1858 The first transatlantic telegraph cable
- 1864-73 Maxwell formulates the theory of electromagnetism**
- 1869 Gramme invents a practical dynamo
- 1879 Swan invents a practical incandescent bulb
- 1881 First public electric railway in Berlin
- 1882 First hydroelectric power station
- 1887 Hertz generates and detects radio waves
- 1887 Michelson and Morely *fail* to detect the motion of the aether
- 1888 Tesla invents a practical AC motor
- 1890 Ewing describes hysteresis
- 1895 Curie describes the temperature variation of paramagnetic susceptibility
- 1896 Marconi patents the radio; transmits radio signals across the Atlantic in 1901
- 1898 Valdemar Poulsen invents magnetic recording

# Классическая теория электро- магнетизма Максвелла

В дифференциальной форме

$$\operatorname{rot} \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t};$$

$$\operatorname{div} \vec{B} = 0;$$

$$\operatorname{rot} \vec{H} = \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right);$$

$$\operatorname{div} \vec{D} = \rho.$$

В интегральной форме

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

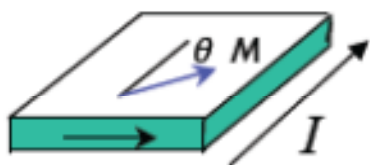
$$\oint_S (\vec{B}, d\vec{S}) = 0;$$

$$\oint_L (\vec{H}, d\vec{l}) = \int_S \left( \left( \vec{j} + \frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right), d\vec{S} \right)$$

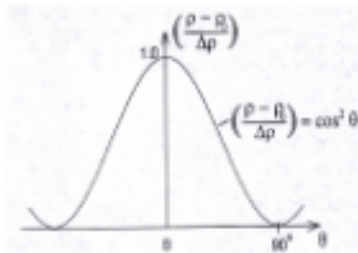
$$\oint_S (\vec{D}, d\vec{S}) = q.$$

# История магнетизма: V

## (Anisotropic) magnetoresistance 1857



thin film



Discovered by William Thompson

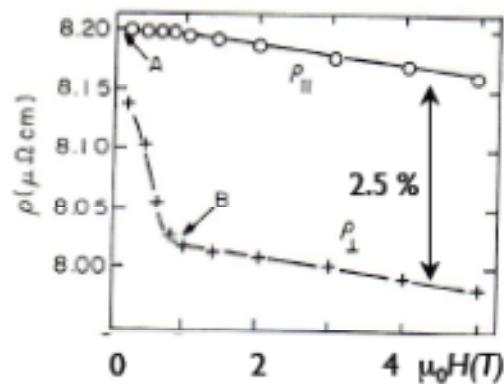
$$\rho = \rho_0 + \Delta\rho \cos^2 \theta$$

Magnitude of the effect  $\Delta\rho/\rho < 3\%$

The effect is usually positive;  $\rho_{\parallel} > \rho_{\perp}$

Maximum sensitivity  $d\rho/d\theta$  occurs when  $\theta = 45^\circ$ . Hence the 'barber-pole' configuration used for devices.

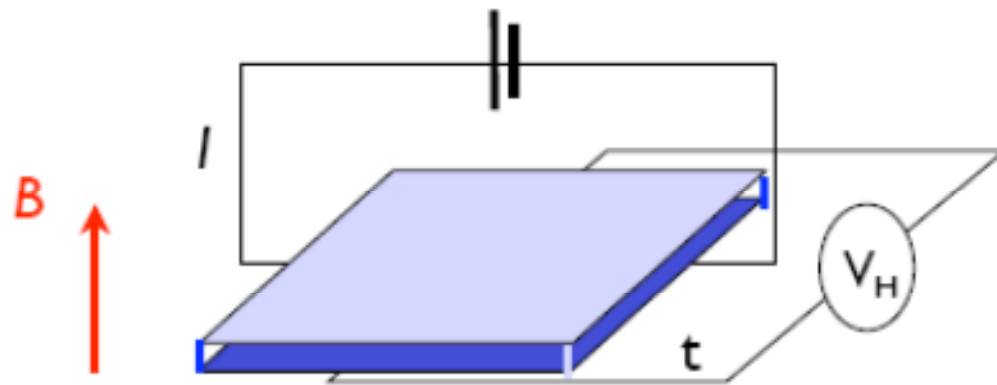
AMR is due to spin-orbit  $s$ - $d$  scattering



# История магнетизма: VI

Hall effect 1879

Effect discovered by Edwin Hall in 1879



$$V_H/t = R_0 j B \quad R_0 = (1/ne)$$

$$E/j = \rho_{xy} = R_0 B$$

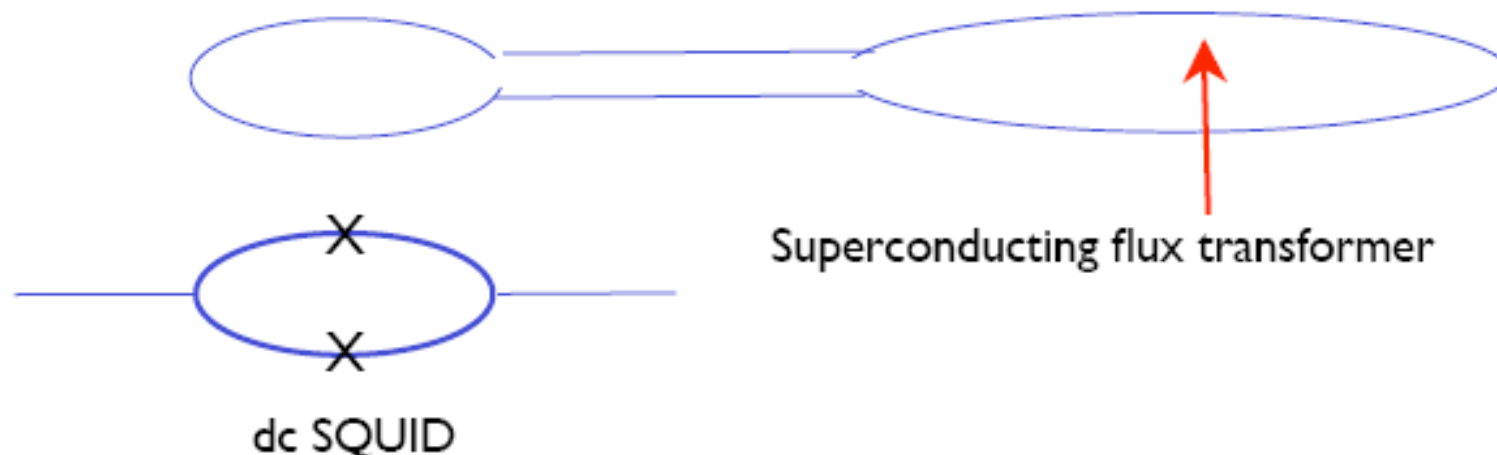
$$\mathbf{E} = -R_0(\mathbf{j} \times \mathbf{B})$$

# История магнетизма: VII

## Superconducting quantum interference devices (SQUIDs)

SQUIDs detect the change of flux threading a flux-locked loop. The flux is generally coupled to the SQUID via a superconducting flux transformer. The device is sensitive to a small fraction of a flux quantum. SQUIDS offer ultimate field sensitivity. They generally operate with a flux-locked loop.

$$\Phi_0 = 2 \cdot 10^{-15} \text{ T m}^2$$

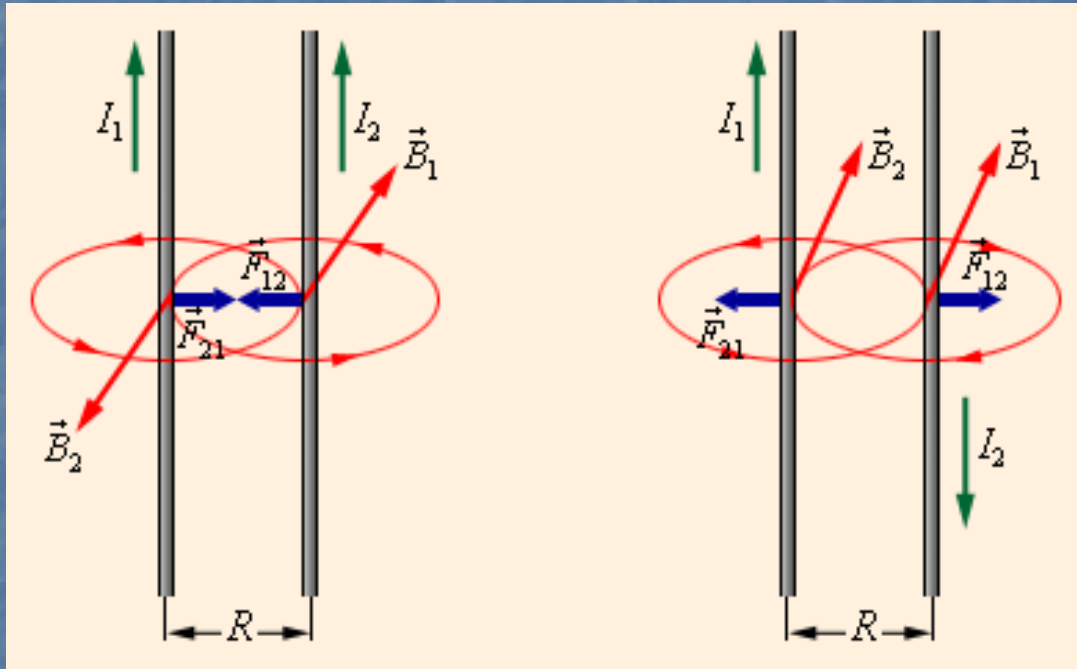


# История магнетизма: VIII

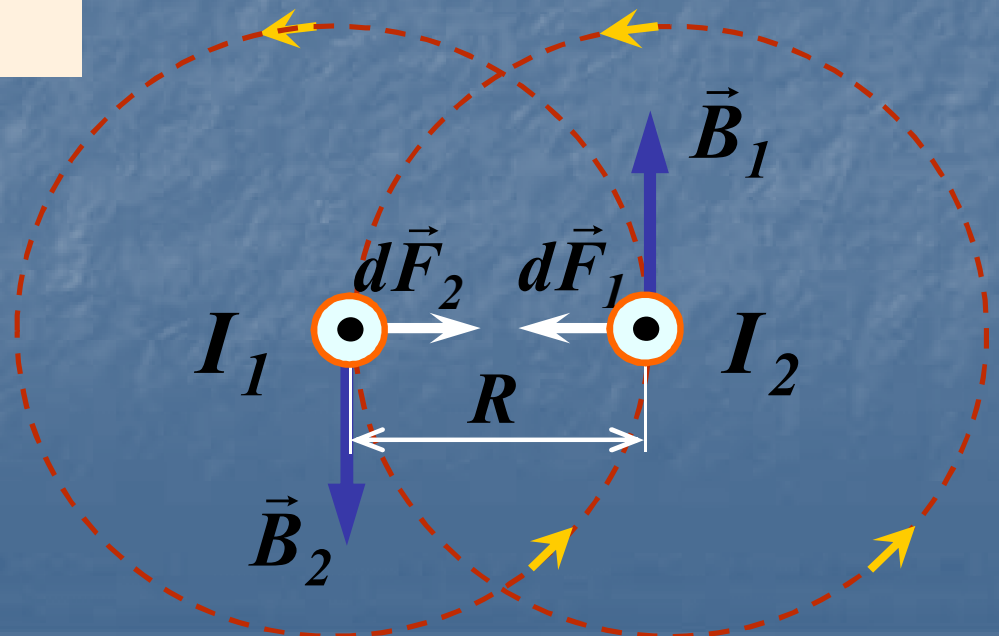
Age	Date	Names	Driver	Achievements	Materials	Applications
Ancient	-1000 to 1500	Shen Kua, Petrus Peregrinus	State	Force field, induced magnetism, TRM	Iron, lodestone	South pointer, Compass
Early scientific	1500 to 1820	Gilbert, Descartes, D.Bernouilli	Navy	Earth's field	Iron, lodestone	Dip circle, Horseshoe magnet
Electromagnetic	1820 to 1900	Oersted, Ampere, Faraday, Maxwell	Industry/infrastructure	E-M induction, Maxwells eqns	Electrical steel	Motors, generators, telegraph, wireless, magnetic recording
Understanding	1900 to 1935	Weiss, Bohr, Dirac, Heisenberg, Pauli, Landau	Academy	Spin, Exchange interactions	[Alnico]	
High-frequency	1935 to 1960	Bloch, Pound, Purcell	Military	Microwaves, epr, fmr, nmr	Ferrites	Radar, television
Applications	1960 to 1995	Gorter, Sagawa, Croat	Consumers	New materials, miniaturization	Sm-Co, Nd-Fe-B	Consumer electronics
Spin electronics	1995 to ??	Fert, Parkin ...	Consumers	Thin film devices	Multilayers	High-density recording, MRAM?



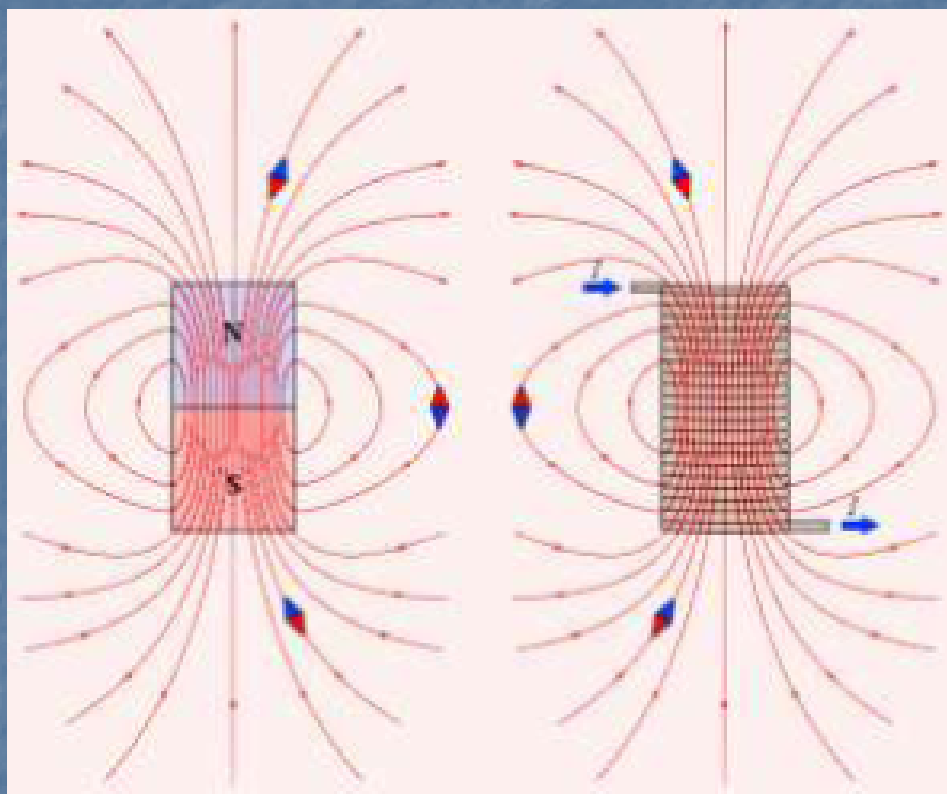
# Взаимодействие токов



$$dF_1 = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 I_2}{R} dl$$

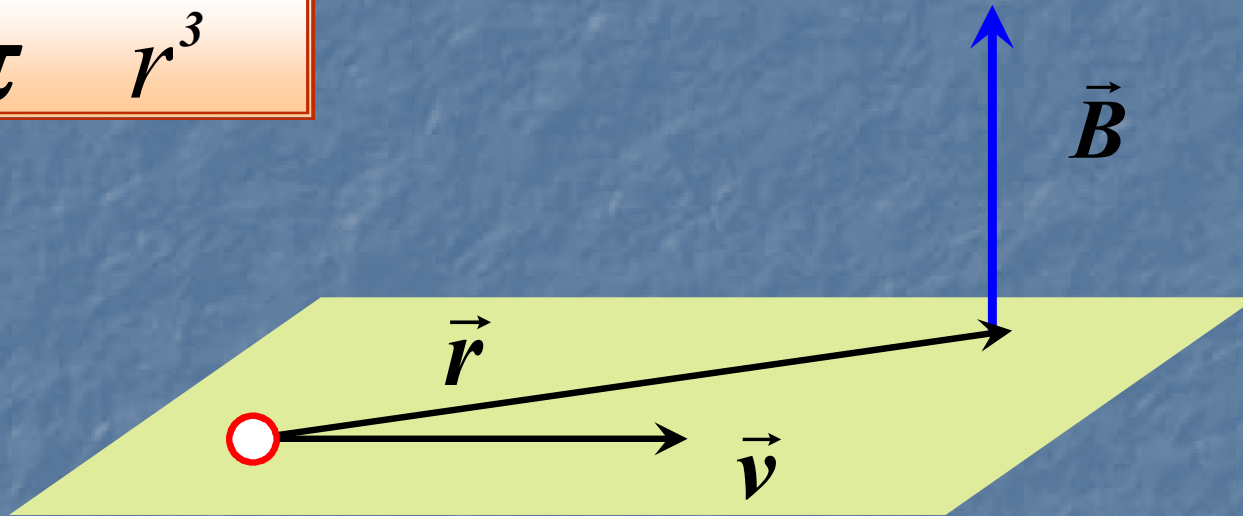


# Магнитное поле



# Магнитное поле равномерно движущегося заряда

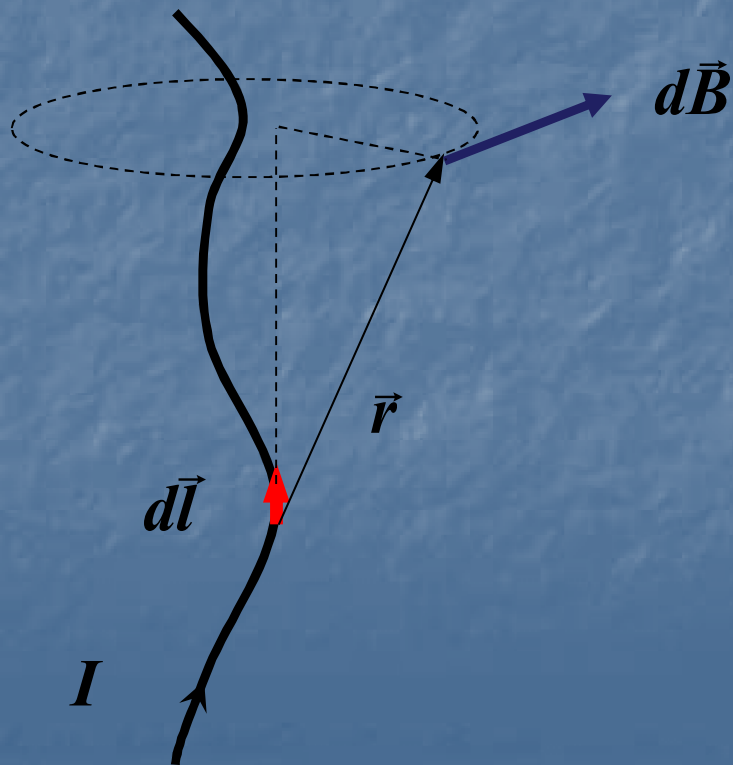
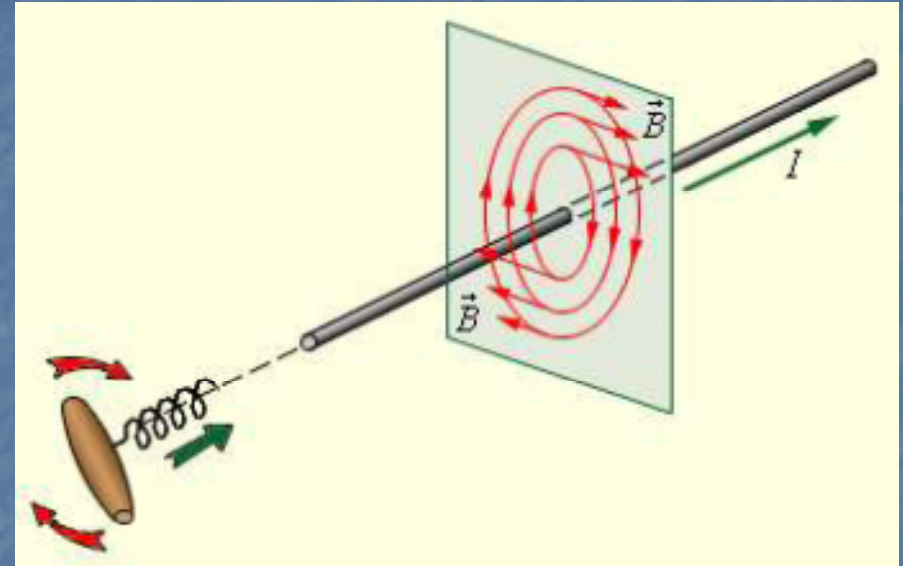
$$\vec{B} = \frac{\mu_0 q [\vec{v}, \vec{r}]}{4\pi r^3}$$



В соответствии с полученной формулой вектор  $\vec{B}$  располагается перпендикулярно плоскости, в которой лежат векторы  $\vec{v}$  и  $\vec{r}$

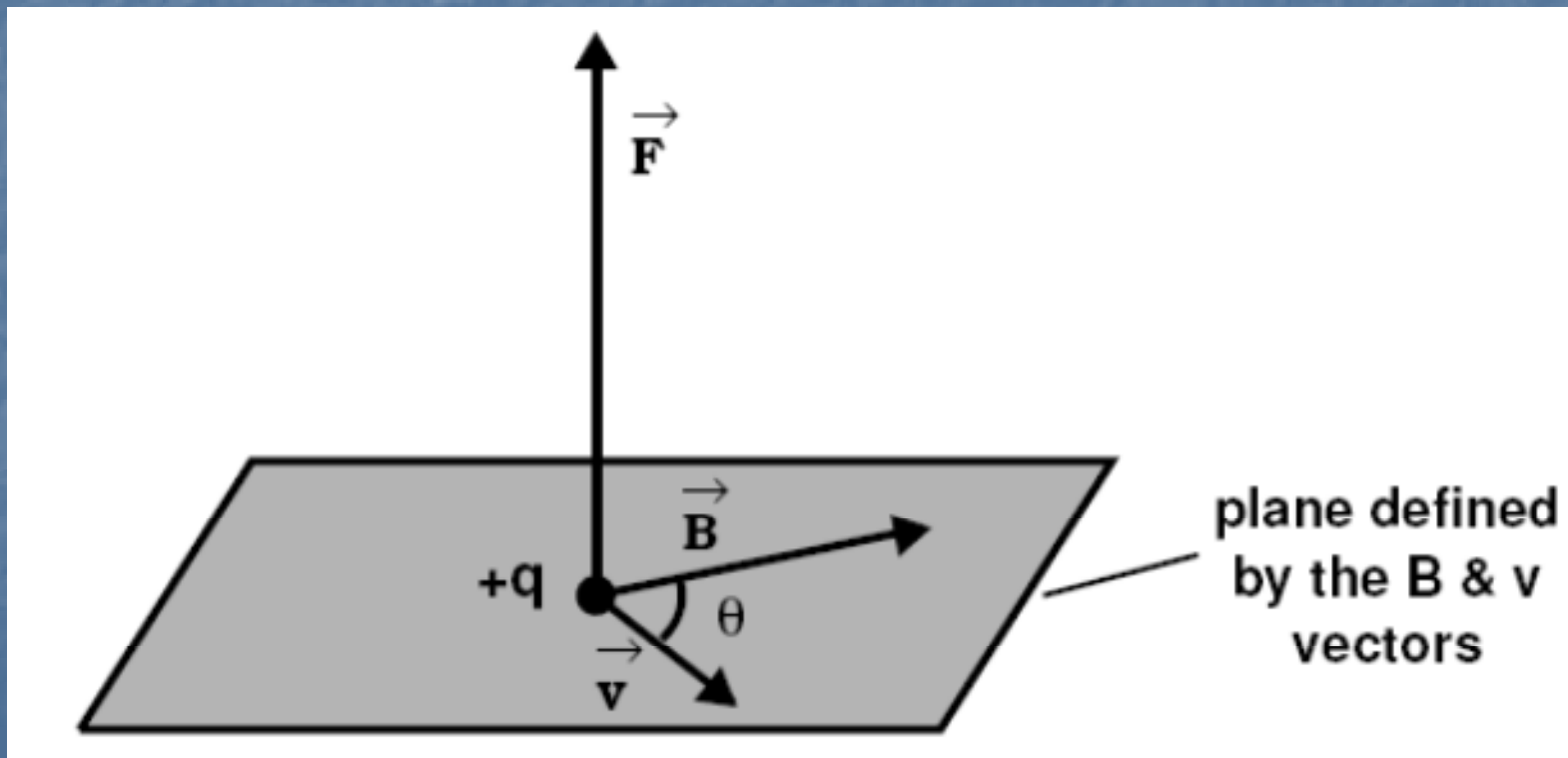
# Закон Био-Савара-Лапласа

$$d\vec{B} = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{I [d\vec{l}, \vec{r}]}{r^3}$$



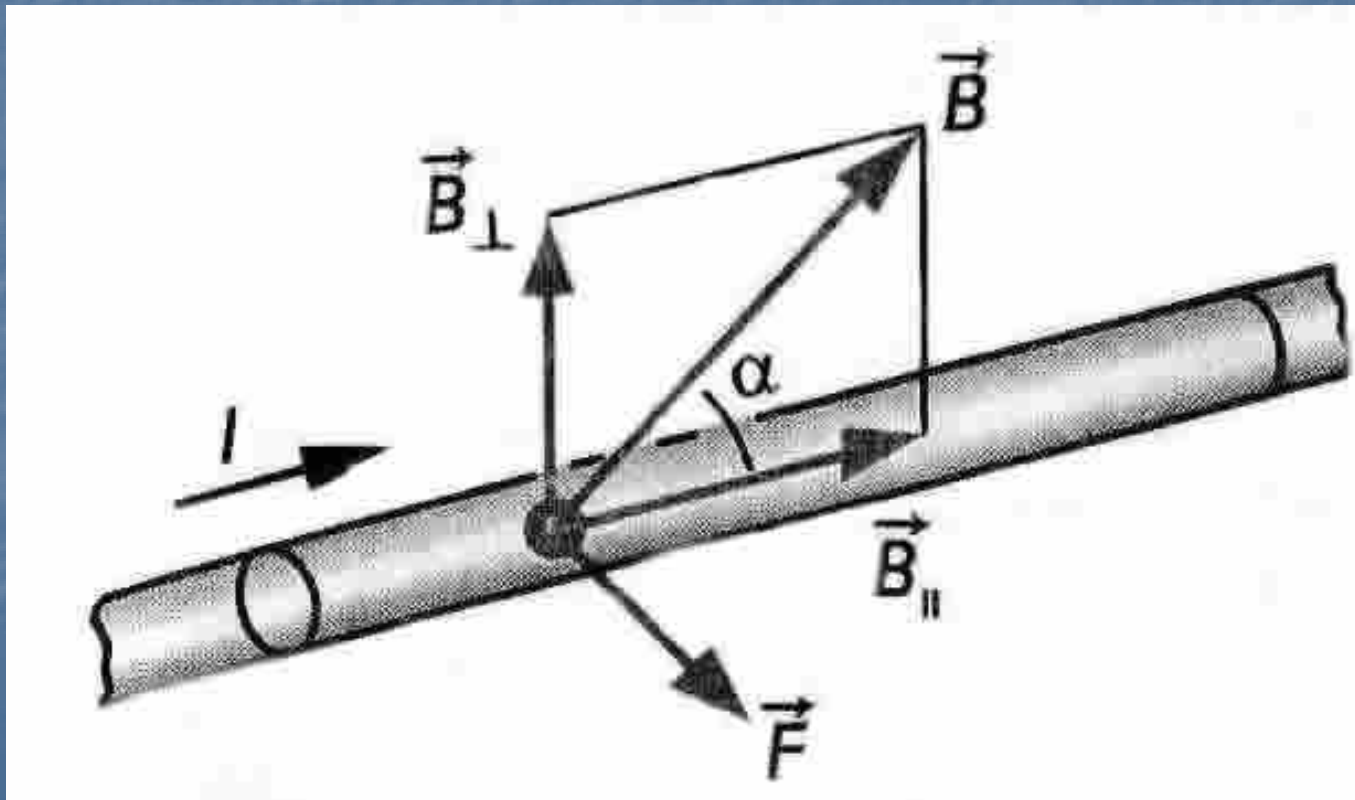
# Сила Лоренца

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{v}, \vec{B}]$$

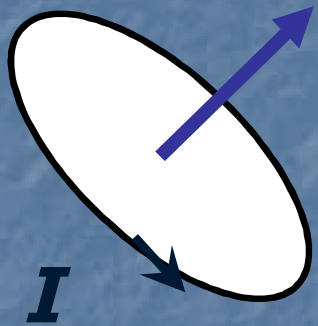


# Сила Ампера

$$d\vec{F} = I \left[ d\vec{l}, \vec{B} \right]$$



# Дипольный момент

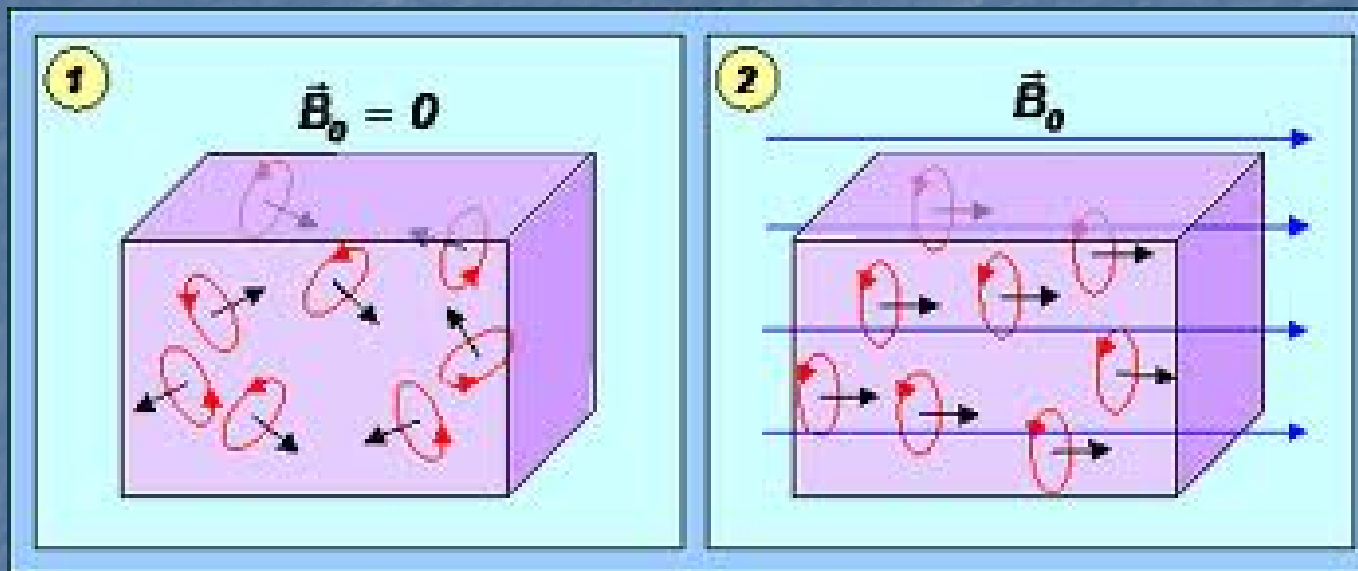


$$\vec{p}_m = IS\vec{n}$$

Ориентацию контура в пространстве характеризуют направлением нормали к контуру, которое связано с направлением тока в контуре правилом правого винта. Это *положительная* нормаль.

Магнитное поле устанавливает контур положительной нормалью по направлению поля.

# Магнитное поле в веществе



$$\vec{J} = \frac{1}{\Delta V} \sum \vec{p}_m$$



# Связь векторов индукции и напряженности

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

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

$$1 + \chi = \mu$$

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

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

# Виды магнетиков

- диамагнетики. У диамагнетиков  $\chi$  отрицательна и мала по абсолютной величине. Вектор  $\vec{J}$  диамагнетиков имеет направление, обратное направлению вектора  $\vec{H}$

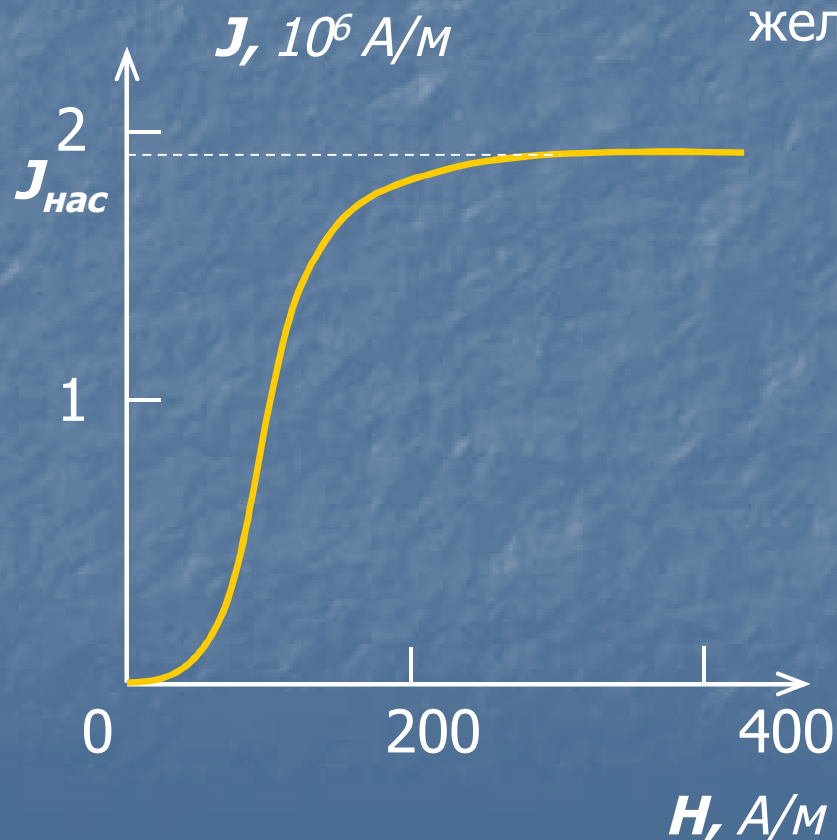
- парамагнетики.  $\chi$  парамагнетиков положительна и тоже мала по абсолютной величине. Вектор  $\vec{J}$  парамагнетиков имеет направление, совпадающее с направлением вектора  $\vec{H}$

- ферромагнетики.  $\chi$  положительна и по абсолютной величине достигает очень больших значений.

# Ферромагнетики

Ферромагнетиками называют твердые вещества, которые могут обладать *спонтанной намагниченностью*, т.е. они могут быть намагничены уже при отсутствии внешнего магнитного поля.

Типичные представители ферромагнетиков - железо, никель, кобальт, их сплавы.



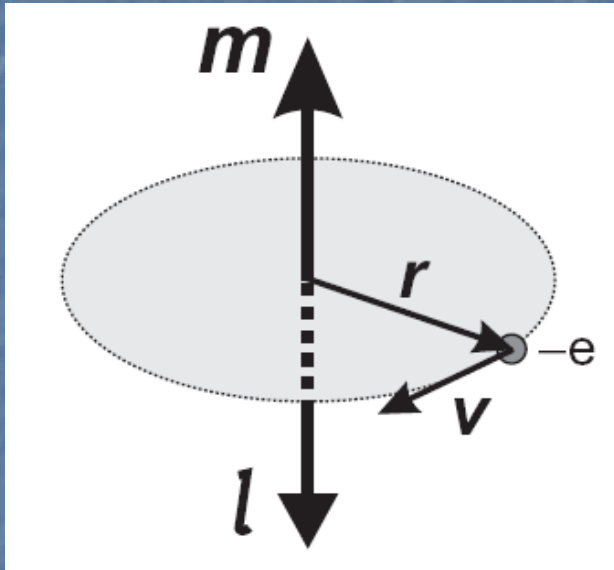
Намагниченность ферромагнетиков в огромное (до  $10^{10}$ ) число раз превосходит намагниченность диа- и парамагнетиков.

Кривая намагниченности ферромагнетиков — это зависимость

$$J(H)$$

основная или нулевая кривая, т.е. зависимость для ферромагнетика, магнитный момент которого первоначально был равен нулю

# Магнитомеханические явления

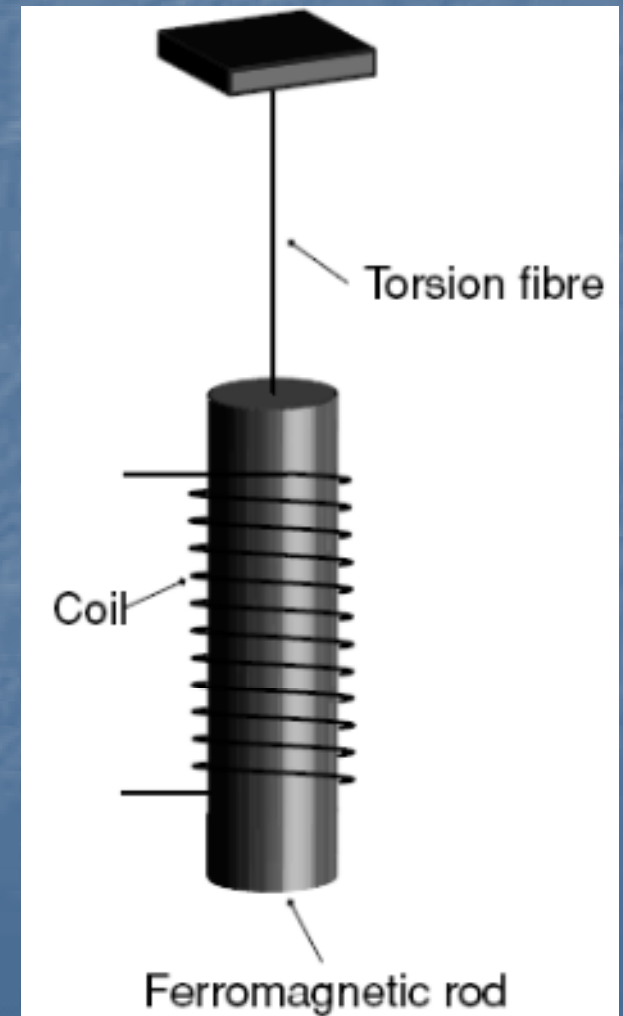


## Опыт Эйнштейна - де Хааса

$g = e/2m$  – классический результат

$g = e/m$  – эксперимент

## Опыт Барнета



# Вопросы к зачету

1. Введение в физику магнитных явлений. История развития магнетизма. Основные понятия и величины. Магнитная индукция и напряженность магнитного поля. Единицы измерения.
2. Уравнения Максвелла. Интегральная и дифференциальная форма.
3. Основы магнитостатики. Закон Био-Савара-Лапласа. Сила Лоренца. Сила Ампера.
4. Контур с током в магнитном поле. Магнитный момент.
5. Магнитные свойства вещества. Намагниченность магнетиков. Магнитная восприимчивость.
6. Виды магнетиков. Диамагнетизм. Парамагнетизм. Ферромагнетизм.
7. Магнито-механические явления. Магнитный момент орбитального движения электрона. Спин электрона. Гиромагнитное отношение.
8. Атомный магнетизм. Квантово-механическое описание магнитного момента атома. Правило Хунда. Магнитные атомы в периодической системе элементов.
9. Антиферромагнетизм. Ферромагнетизм.
10. Основы микромагнитной теории. Основные вклады в полную энергию магнитной системы. Уравнения Ландау-Лифшица-Гильберта.
11. Доменная структура ферромагнетика. Доменные стенки. Основные виды доменных стенок.
12. Основы магнито-оптики. Эффект Фарадея. Эффект Керра.
13. Магнетосопротивление. Эффект анизотропного магнетосопротивления (AMR). Эффект гигантского магнетосопротивления. Основные модели этих явлений.
14. Спиновый вентиль. Принцип работы и основные применения.
15. Спин-туннельная структура. Ячейка MRAM. Топология матрицы памяти.
16. Методы получения и исследования спин-вентильных и спин-туннельных структур.
17. Перспективные устройства спинтроники. Трековая память. Спин-вентильный транзистор.

# Литература

- И.В. Савельев «Курс общей физики» т.2
- Н.Г. Чеченин «Магнитные наноструктуры и их применение»
- С.С. Аплеснин «Основы спинтроники»
- В.А. Боков «Физика магнетиков»
- Е.С. Боровик «Лекции по магнетизму»
- С.В. Вонсовский «Магнетизм»
- Г.С. Кринчик «Физика магнитных явлений»
- Р. Суху «Магнитные тонкие пленки»
- М.М. Червинский и др. «Методы и средства измерений магнитных характеристик пленок»
- С.И. Касаткин и др. «Спинтронные магниторезистивные элементы и приборы на их основе»
- А.К. Звездин, В.А. Котов «Магнетооптика тонких пленок»