

Школа 22 июля 2024

ВВЕДЕНИЕ В СПИНТРОНИКУ

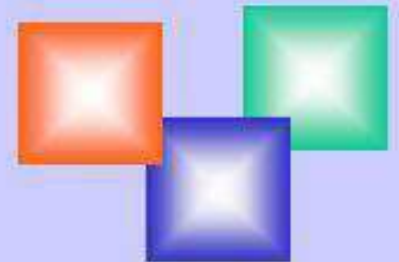
А.Б. Грановский

**кафедра магнетизма физического факультета
МГУ им. М.В. Ломоносова**

Лекция 1:

от Гильберта до Ферта-Грюнберга

“Few subjects in science are more difficult to understand than magnetism.” *Encyclopedia Britannica*, 15th Edition, 1989.



Electronics, Micro- and Nanoelectronics

Charge of Electron

SPINTRONICS = SPIN + TRANSPORT + ELECTRONICS (1996)

DARPA = Defense Advanced Research Projects Agency

Spintronics

Charge + Spin of Electron

Spin control and manipulation

Spin current without dissipation!!!!?

Спин-орбитроника

Спин-калориметрия = Термоспинтроника

Магноника

Антиферромагнитная спинтроника

Органическая спинтроника

Полупроводниковая спинтроника

Скирмионика, Хиральная спинтроника

Стрейтроника

Spin-photonics = Магнитофотоника



Multi-faceted world of spintronics

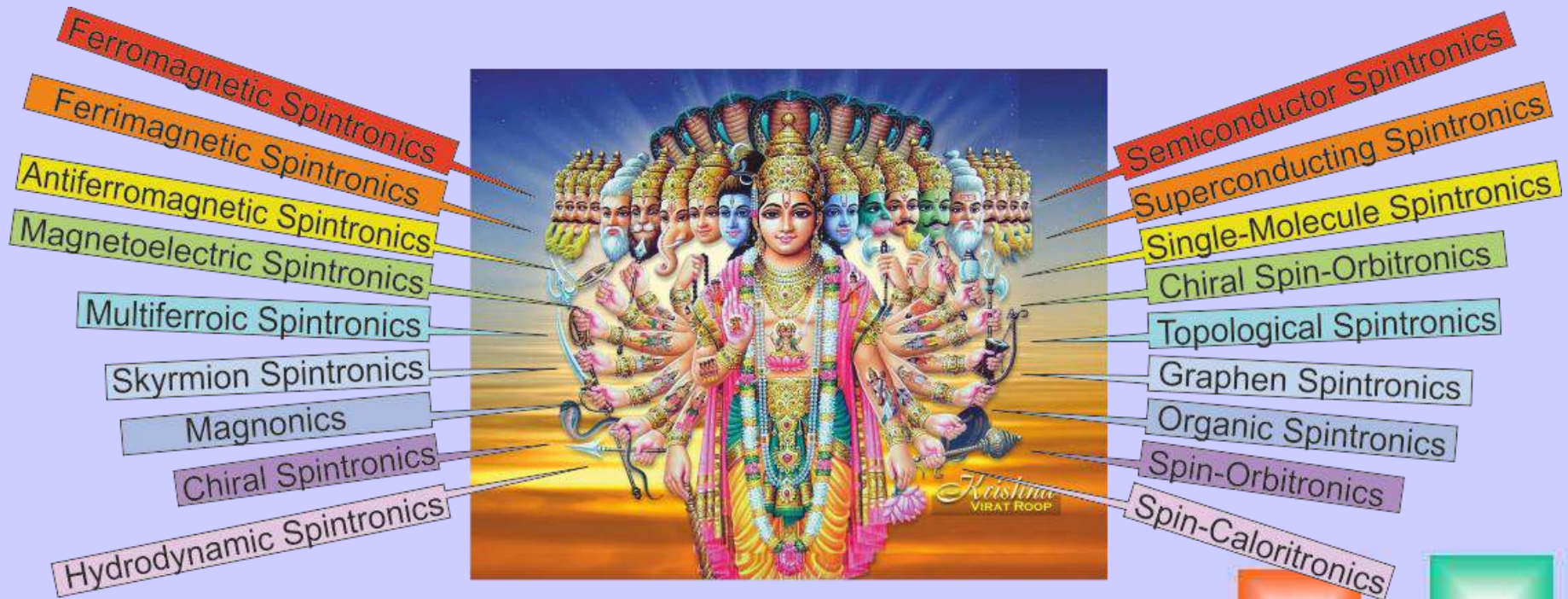


Рисунок В.В. Устинова

План

1. Введение.
2. Проблемы современной магнитной записи
3. Магнитосопротивление. ГМС и ТМС
4. Аномальный эффект Холла
5. Спиновый эффект Холла
6. Спиновый эффект Зеебека
7. Спин торк (спиновый перенос углового момента)

“I swear to tell the truth, all the truth and nothing but the truth”

Наука о магнетизме и магнитных материалах

- Самая древняя наука
- Все материалы магнитные
- Самый широкий диапазон полей, размеров, частот
- Квантовое явление при комнатной температуре
- Самая востребованная
- Много необъясненных явлений



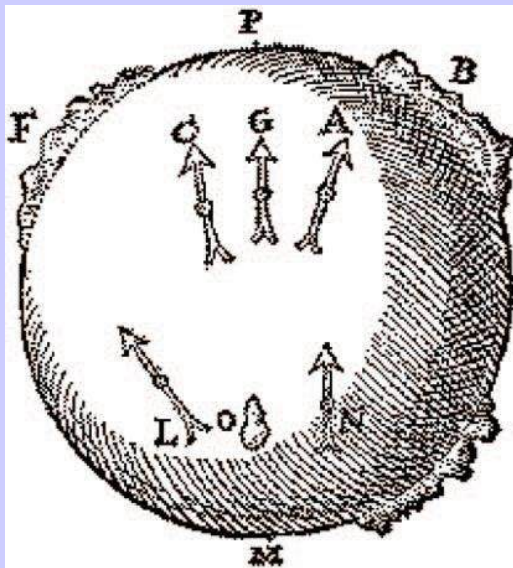
Магнетизм есть **универсальное свойство материи**, так как все вещества в природе состоят из электронов, протонов и нейтронов, которые обладают магнитным моментом. **Все вещества магнитные**

Глобальное проникновение физики магнетизма в науку и технику: генерация электроэнергии, радио и телефонная связь, магнитная память и вычислительная техника, магнитохимия, магнитобиология и биомагнетизм, геомагнетизм, магнетизм в космосе и т.д. **Надежды создания нейроморфных вычислений связываются с магнетизмом**

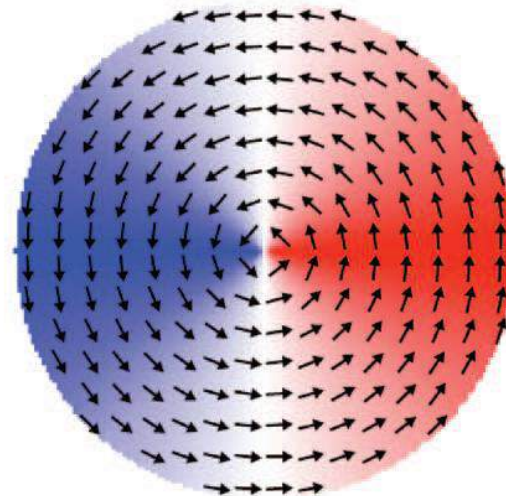


До Гильберта (до XVI века) единичные попытки экспериментального исследования. Перегрин 1269 г. полюса

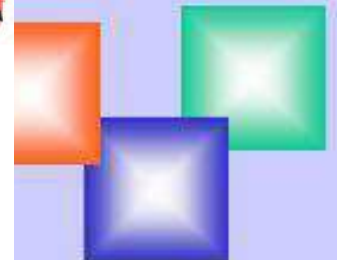
Уильям Гильберт родился в 1544 г (после Коперника и до Галилея), Умер от чумы в 1603 г. Был лейб-медиком королевы Елизаветы и президентом Королевского Медицинского Общества. Писал книгу De Magnete 17 лет, вышла в свет в 1600 г. Собрал все экспериментальные данные и первый установил, что Земля— магнит



(a)



(b)





М. Фарадей (1791-1867): диа- и парамагнетизм, магнитооптика, он ввел в декабре 1845 г термин “магнитное поле”

Дж. Максвелл (1831-1879) !! – волны, поля, источники.

Открытие электрона:

Дж. Стони предположил дискретность заряда в 1874 г и дал в 1891 г имя этой частице

Ж. Перен в 1895 г сказал, что в катодных лучах летят отрицательно заряженные частицы, Томсон определил e/m

В 1900 г на Международном физическом конгрессе в Париже было провозглашено существование электрона

1925 г. оказался годом рождения квантовой механики Гейзенберга и Дирака, годом рождения новой квантовой статистики

Бозе — Эйнштейна, годом рождения принципа Паули

и гипотезы **СПИНА**

Отречение от классической физики

Теорема Бора-Ван Левен: При любой конечной температуре и при любом конечном электрическом или магнитном поле истинная намагниченность системы электронов в тепловом равновесии равна **нулю**.

Бор – 1911, Ван Левен – 1919, Ван Флек – 1932 (поворотная вежа)

Магнетон Бора – 1911 (назван в 1920)

Спин электрона – 1925 (Гаудсмит и Уленбек)

Обменные силы – 1927 (Дирак, Френкель, Гейзенберг)

Шестой Сольвеевский конгресс в 1930 г был посвящен целиком магнетизму . (Им всем не было и 30 лет)

Нобелевские премии по магнетизму: Неель,
Ван Флек-Андресон-Мотт, Клингелер, Капица, Ландау,
Ферт-Грюнберг, Гинзбург, Абрикосов

Основные характеристики

	СИ	СГСМ(Гауссова)
\vec{B} - магнитная индукция,	Тесла (Тл),	Гаусс (Гс) 1 Тл=10 ⁴ Гс
\vec{H} - напряженность магнитного поля	А/м	Эрстед(Э) 1 Э=80А/м
$\vec{\Phi}$ - магнитный поток	Вб	Мкс
\vec{M} - намагниченность	Тл	Гс
μ - магнитная проницаемость	Гн/м	безразмерная

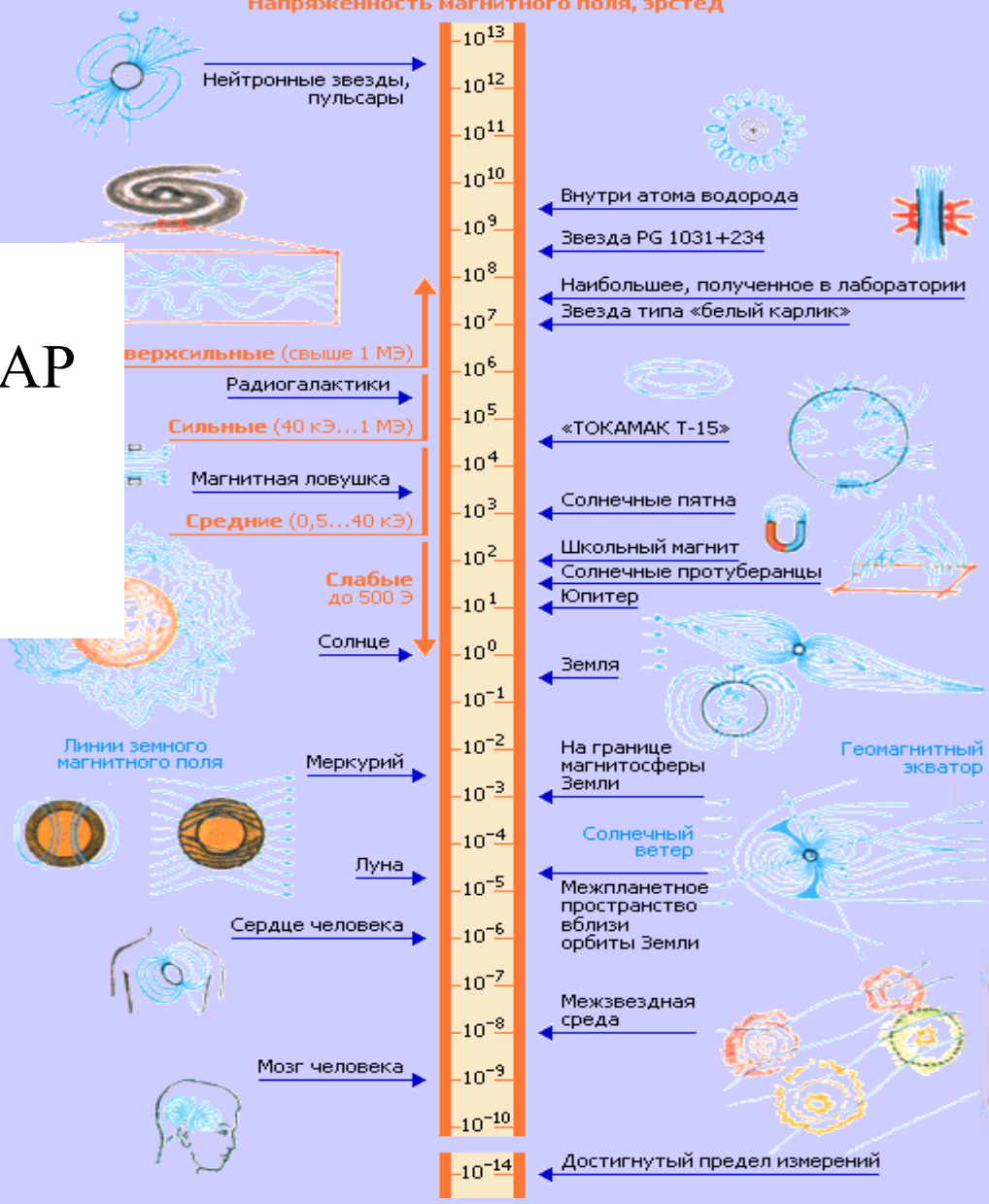
$\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м - магнитная проницаемость вакуума в СИ

$B = H + 4\pi M = \mu H; (СГСМ)$ $B = \mu_0(H + M)$

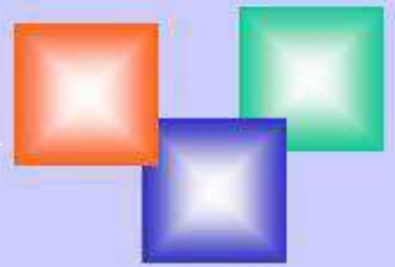


Напряженность магнитного поля, эрстед

10^{-14} –СКВИД
 10^{+14} –МАГНИТАР
 0.5 - Земля
 10^{-6} –Сердце
 10^{-9} - Мозг



ЭРСТЕД



- * Магнитное поле Земли значительно варьируется во времени и пространстве. На широте 50° магнитная индукция в среднем составляет 5×10^{-5} Тл, а на экваторе (широта 0°) — $3,1 \times 10^{-5}$ Тл.
- * В СКВИД или PRMS - 9-14 Тл. В солнечных пятнах -10 Тл.
- * Рекордное значение постоянного магнитного поля, достигнутое людьми — 36,2 Тл.

Рекордное значение импульсного магнитного поля, когда либо наблюдавшегося в лаборатории — $2,8 \times 10^3$ Тл.

- * Магнитные поля в атомах — 10^3 — 10^4 Тл .
- * На нейтронных звёздах — 10^6 — 10^8 Тл .
- * На магнитарах — 10^8 — 10^{11} Тл .

$\mu_B \hbar \approx 10^{-20}$ эрг/Э Н; 1 Дж = 10^7 Эрг; 1 эВ = $1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж;
 $k_B = 1.38 \cdot 10^{-16}$ Эрг/К $\mu_B \hbar = k_B T$ **10 кЭ → 1 К !!!!**

Про магнитары: С. Попов “Суперобъекты: звезды размером с город”, 2016 г.

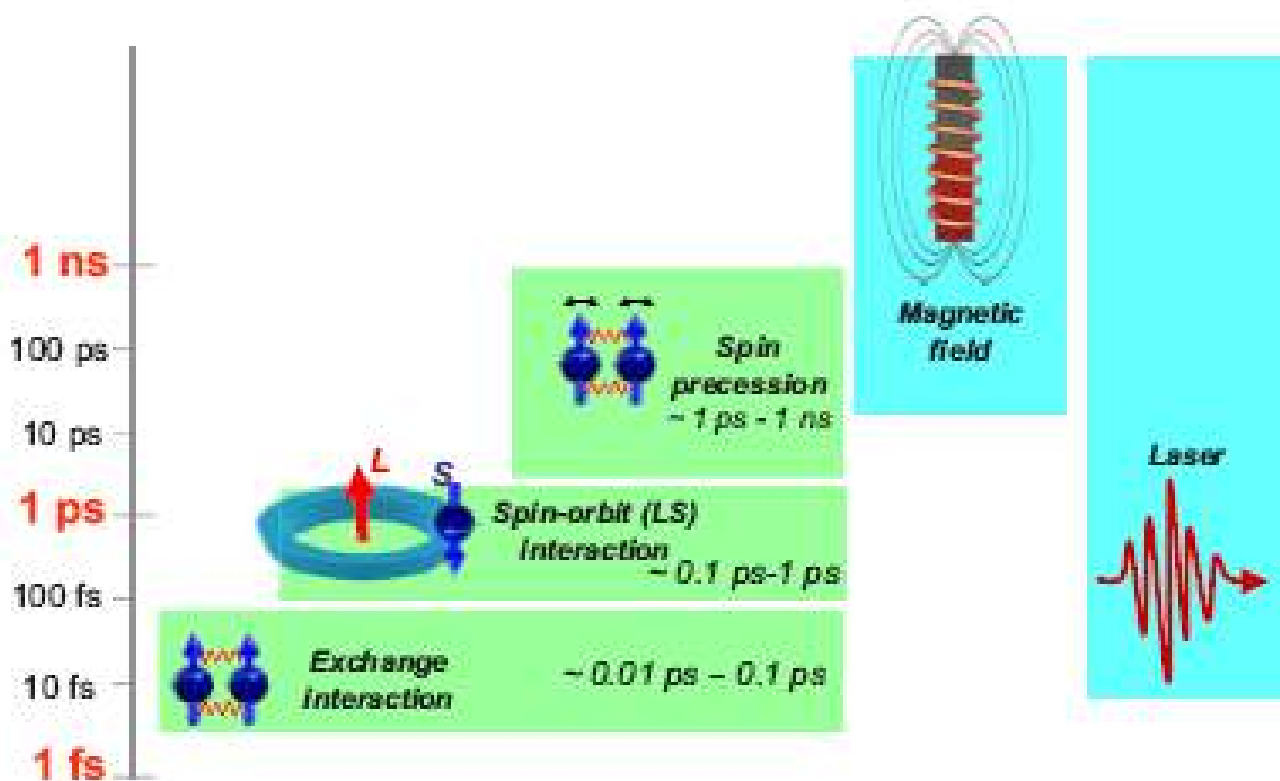
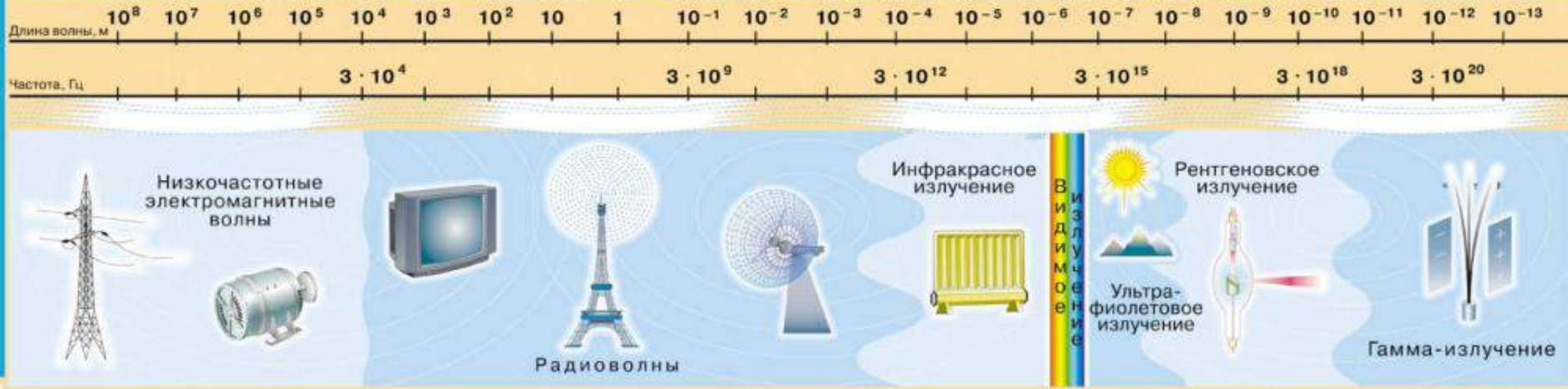


FIG. 1. (Color online) Time scales in magnetism as compared to magnetic field and laser pulses. The short duration of the laser pulses makes them an attractive alternative to manipulate the magnetization.

$$E = k_B T = \hbar / t$$

ШКАЛА ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ



ФМР , ЭПР, ЯМР, Резонанс ДГ, Релаксационные процессы, Магнитооптика, ХМСД

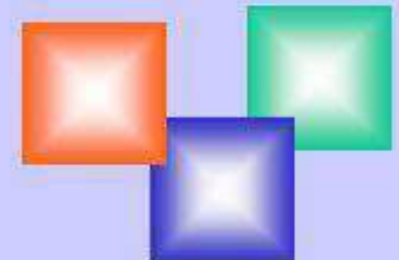
Видимый Диапазон -----0.5-----5 эВ

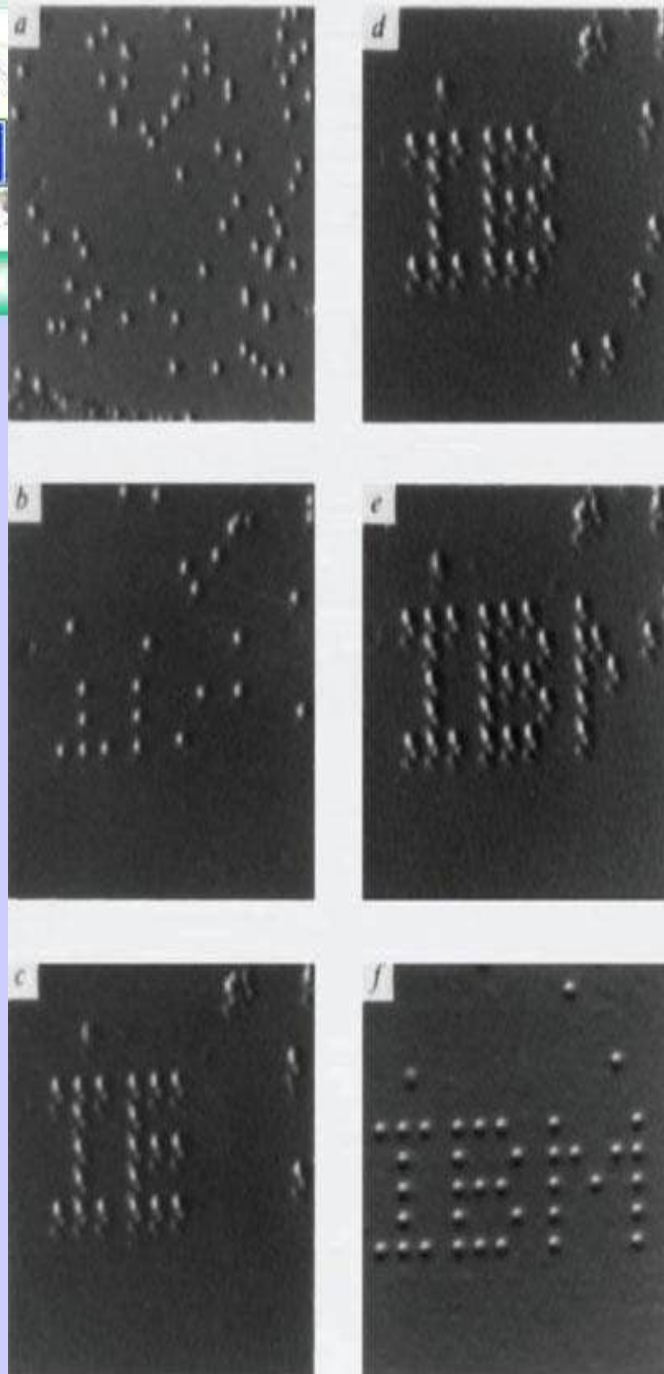
10 мкм –1000 К -- 0.1 эВ



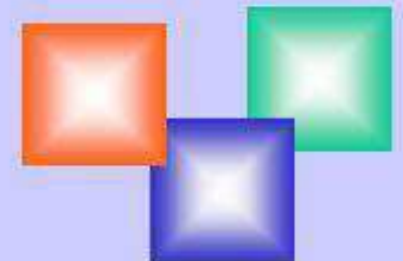


Атто - 10^{-18}



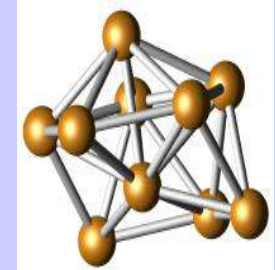
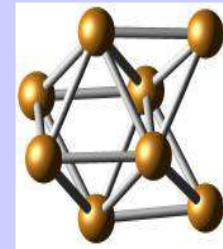
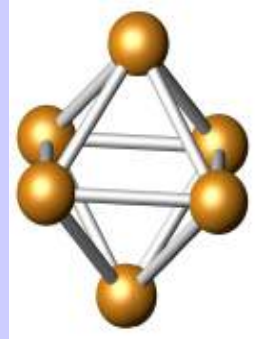
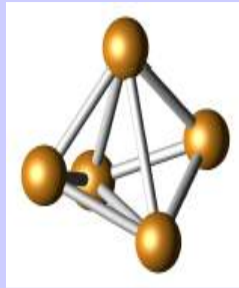
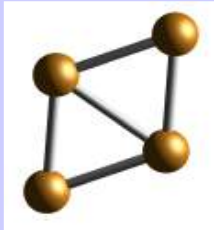


2010г 35 атомов ксенона ,
высота 5 нм
22 часа



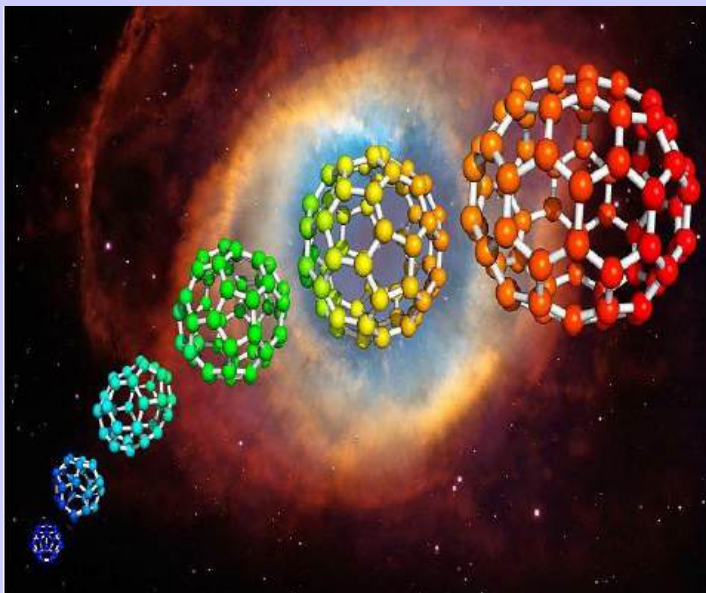


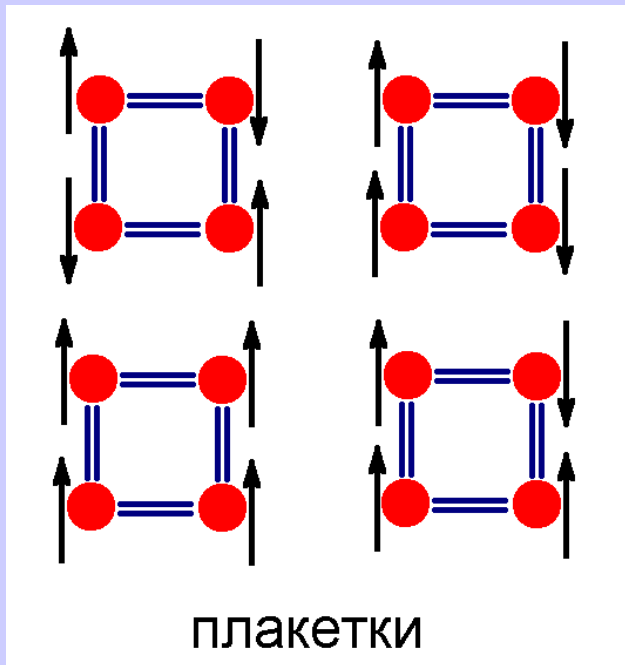
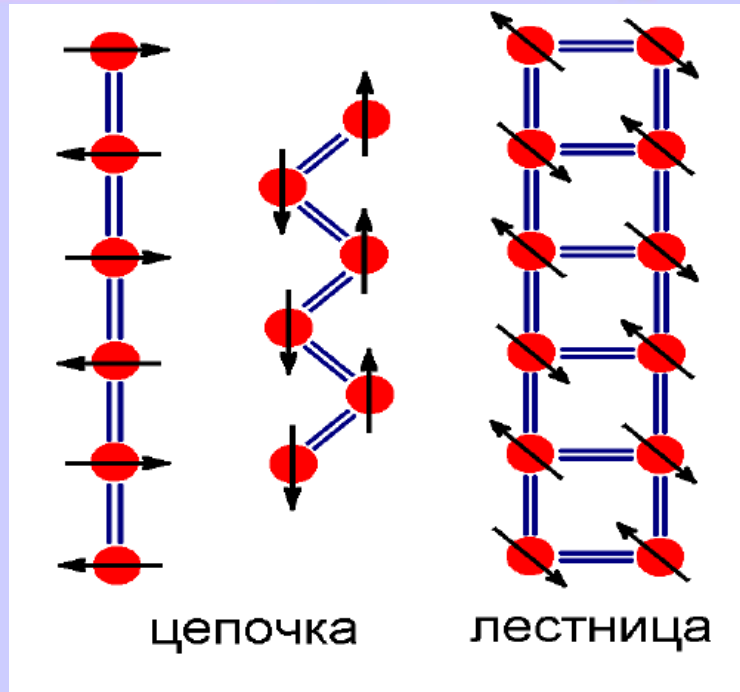
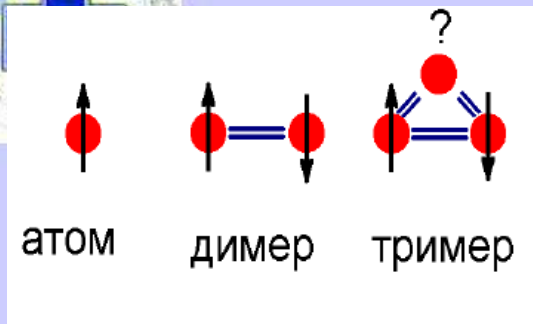
Пикомагнетизм



What such systems could be useful for??

- catalysis
- nanoelectronic (sub-nano...)
- novel 'bulk' materials from cluster assembly
- magnetic memory
- quantum computing





Магнетизм атомов порождается

1. Спиновым магнитным моментом электронов
2. Орбитальным движением = орбитальный магнитный момент
3. Магнитным моментом ядра, который создается спиновыми моментами протонов и нейтронов

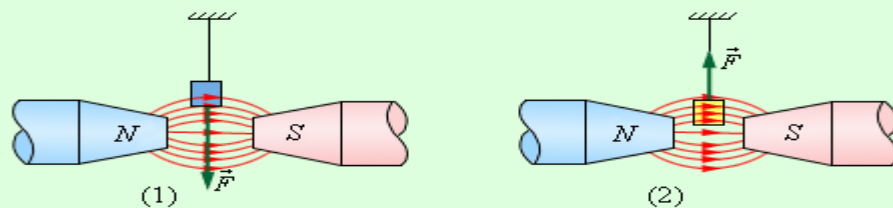
В зависимости как эти моменты взаимодействуют между собой и складываются или компенсируются в приложенном постоянном магнитном поле

$\mu \gg 1$ ферромагнетики и другие сильно магнитные вещества

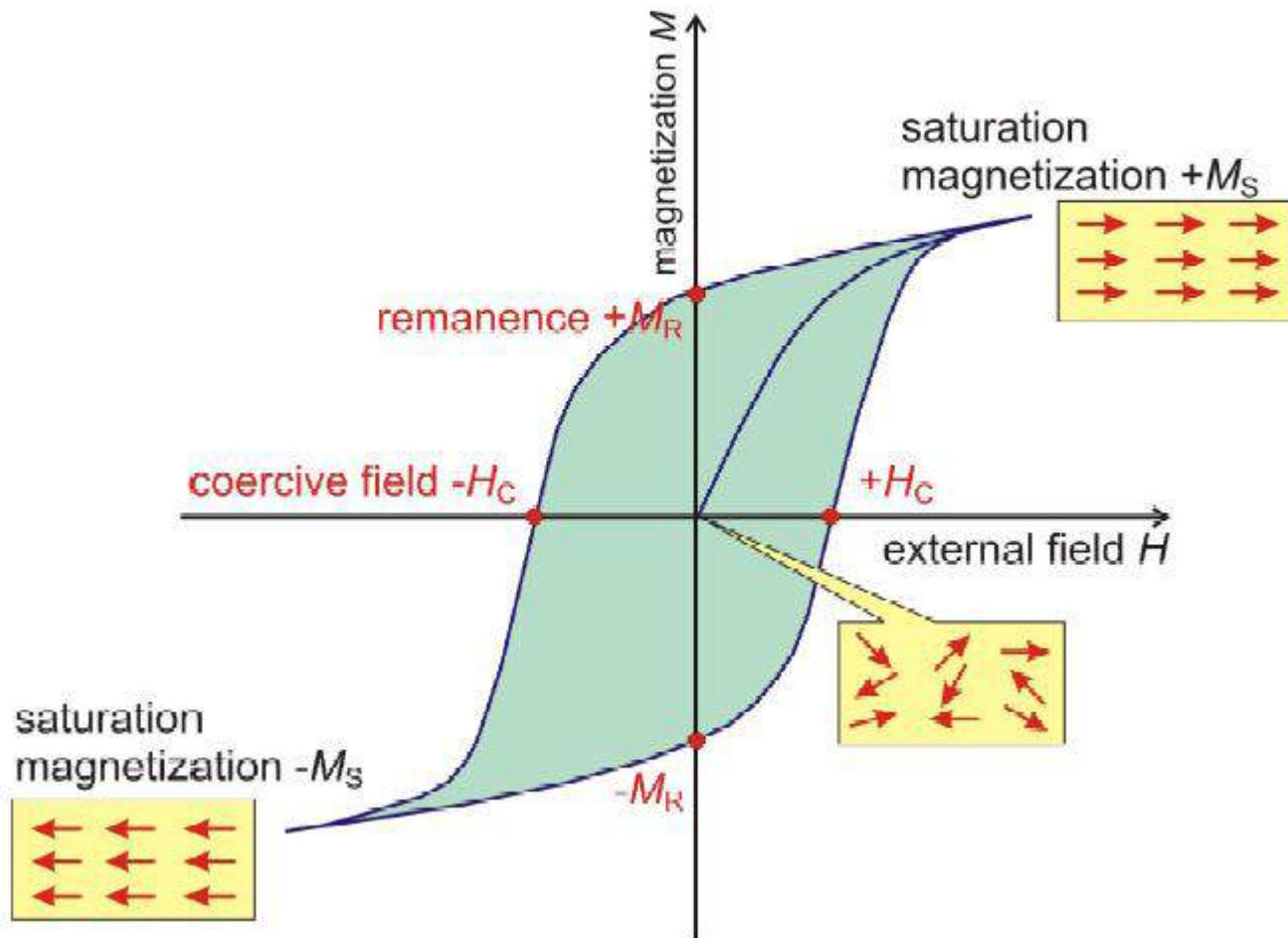
$\mu > 1$ парамагнетики

$\mu < 1$ диамагнетики

$\mu = 0$ идеальные диамагнетики = поле не проникает



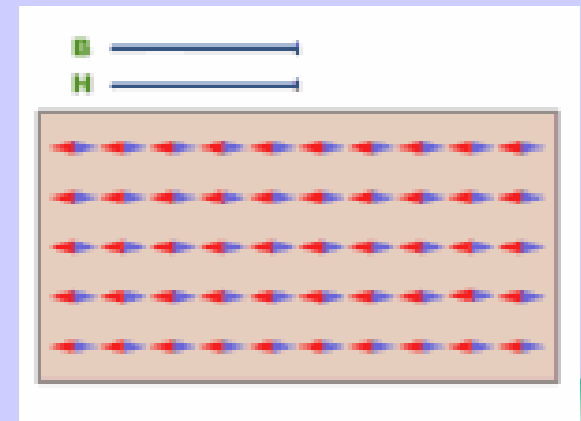
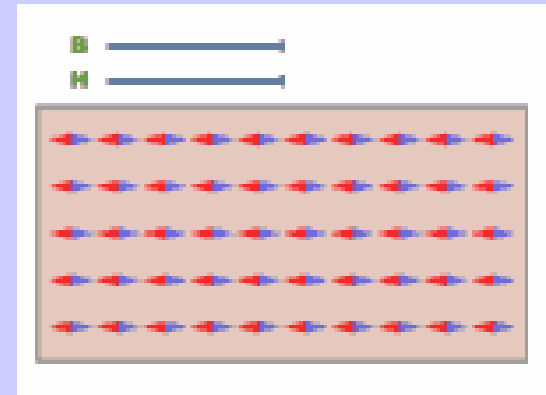
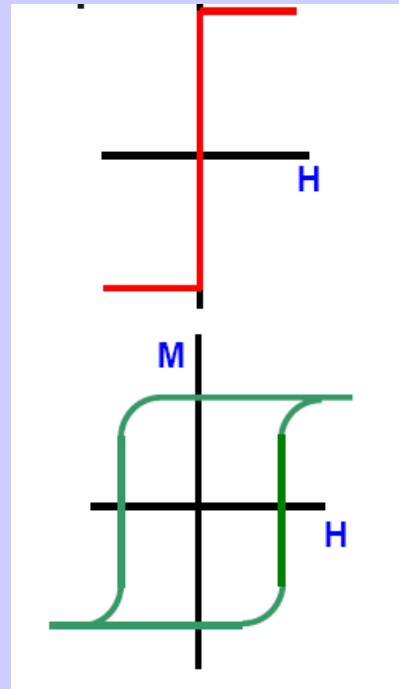
Hysteresis in Ferromagnets





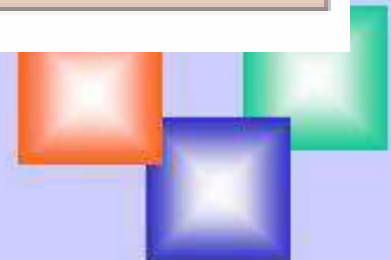
“SOFT” MAGNETS

Large domain wall width
Small single domain limit
Small anisotropy field



”HARD” MAGNETS

Small domain wall width
Large single domain limit
Large anisotropy field





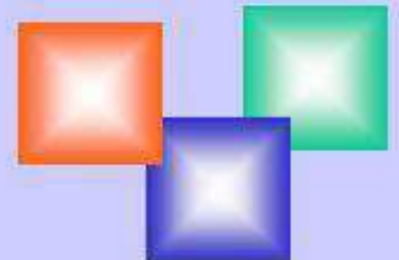
Motivation

- “The nation that controls magnetism will control the universe”
 - Dick Tracy - 1935

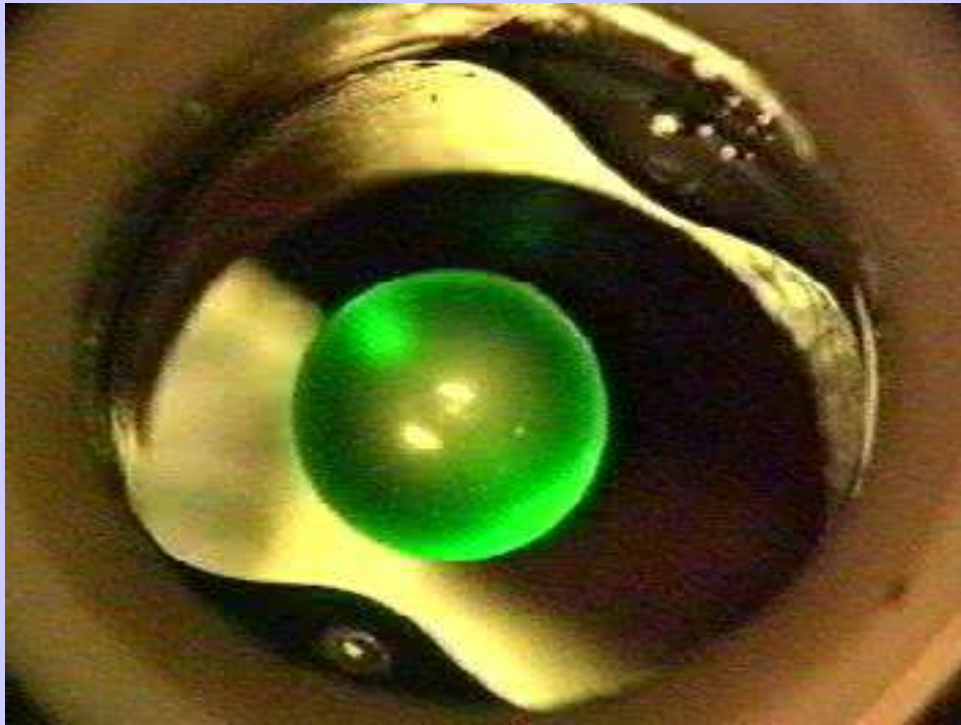


Dick Tracy by
Dick Locher and Michael Killian

All materials are magnetic!!!



All materials are magnetic !!!!



drop of water (coloured in green)

Nijmegen high magnetic field laboratory

Levitating strawberry



B



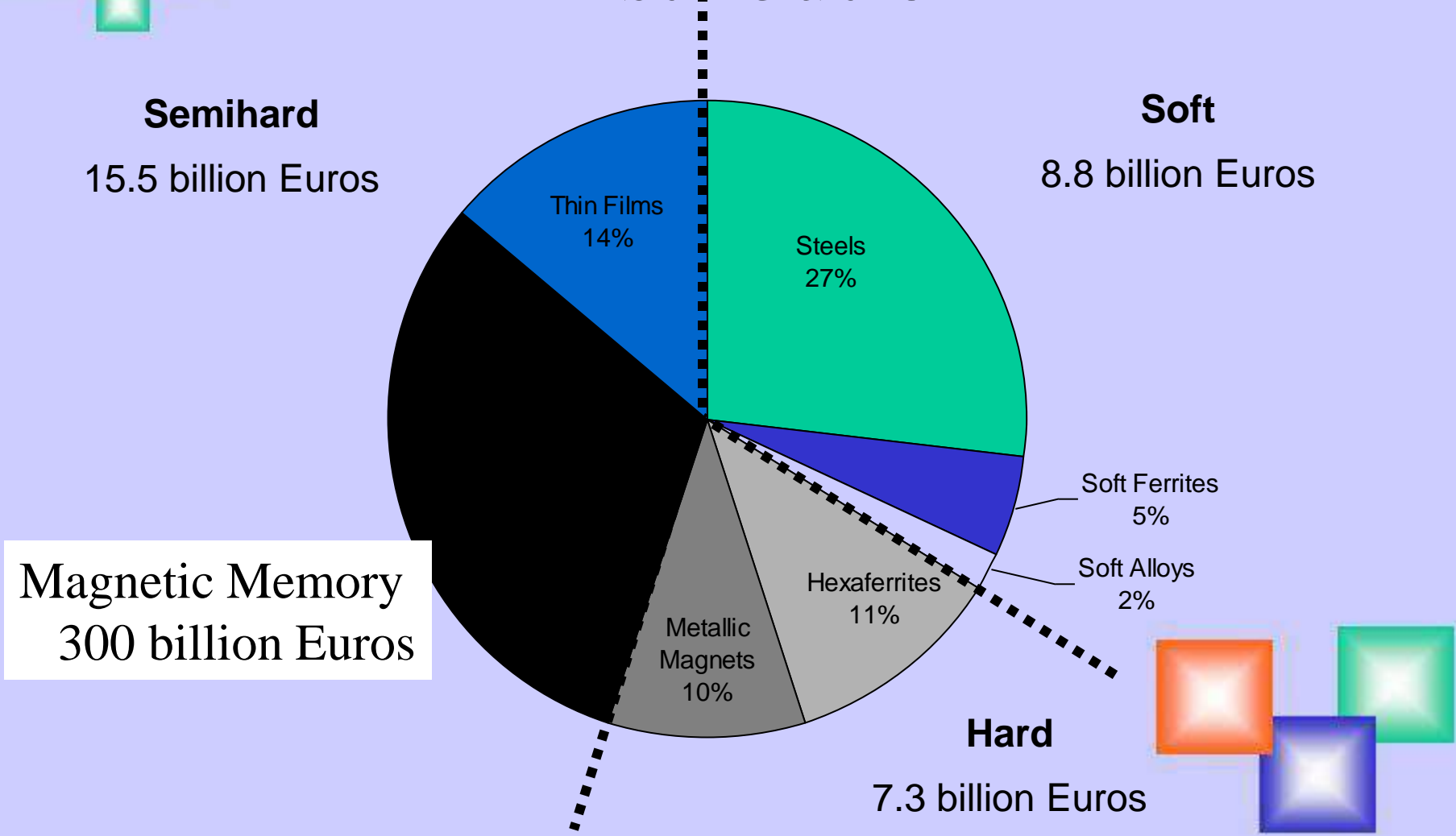


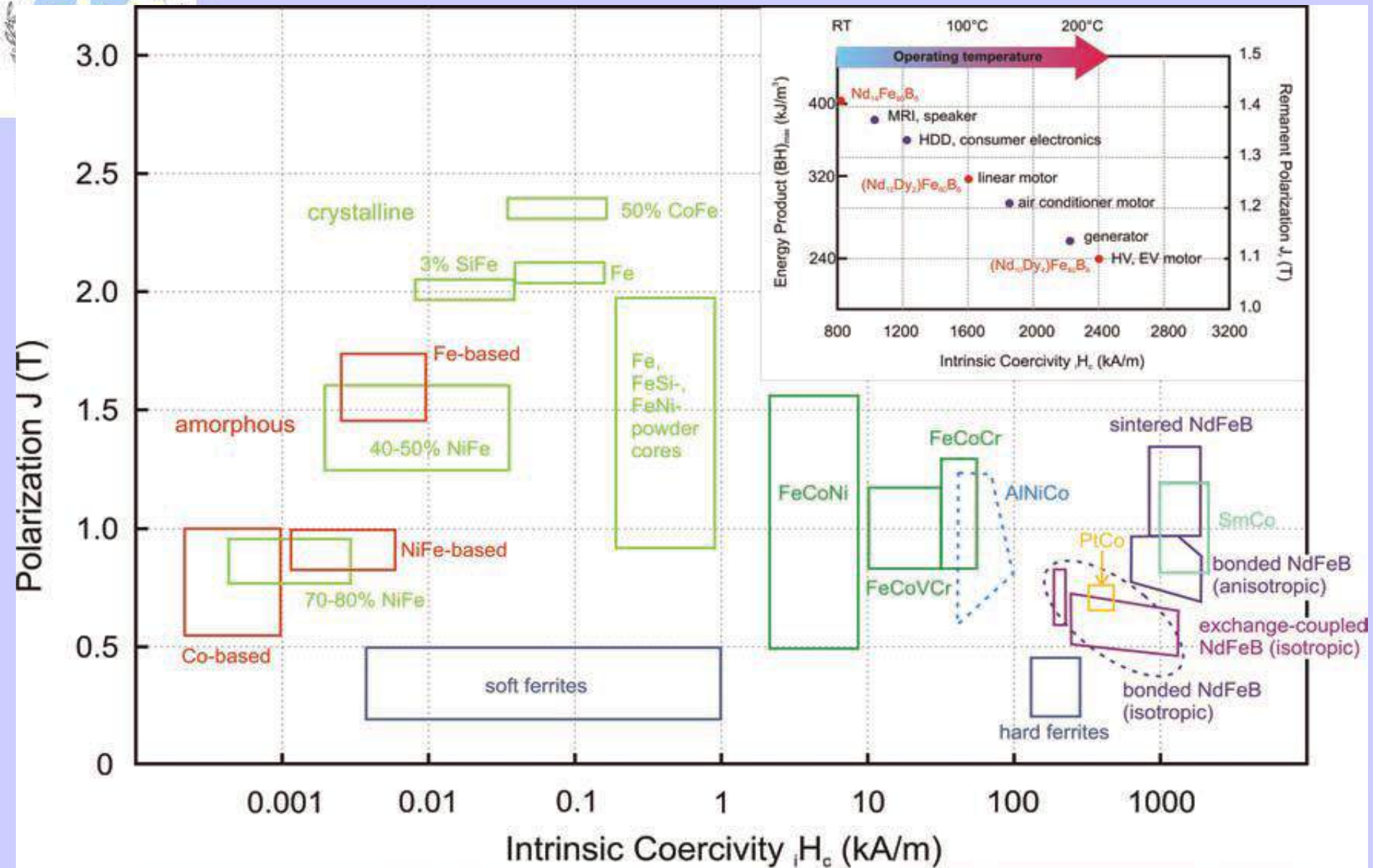
500 км/ч

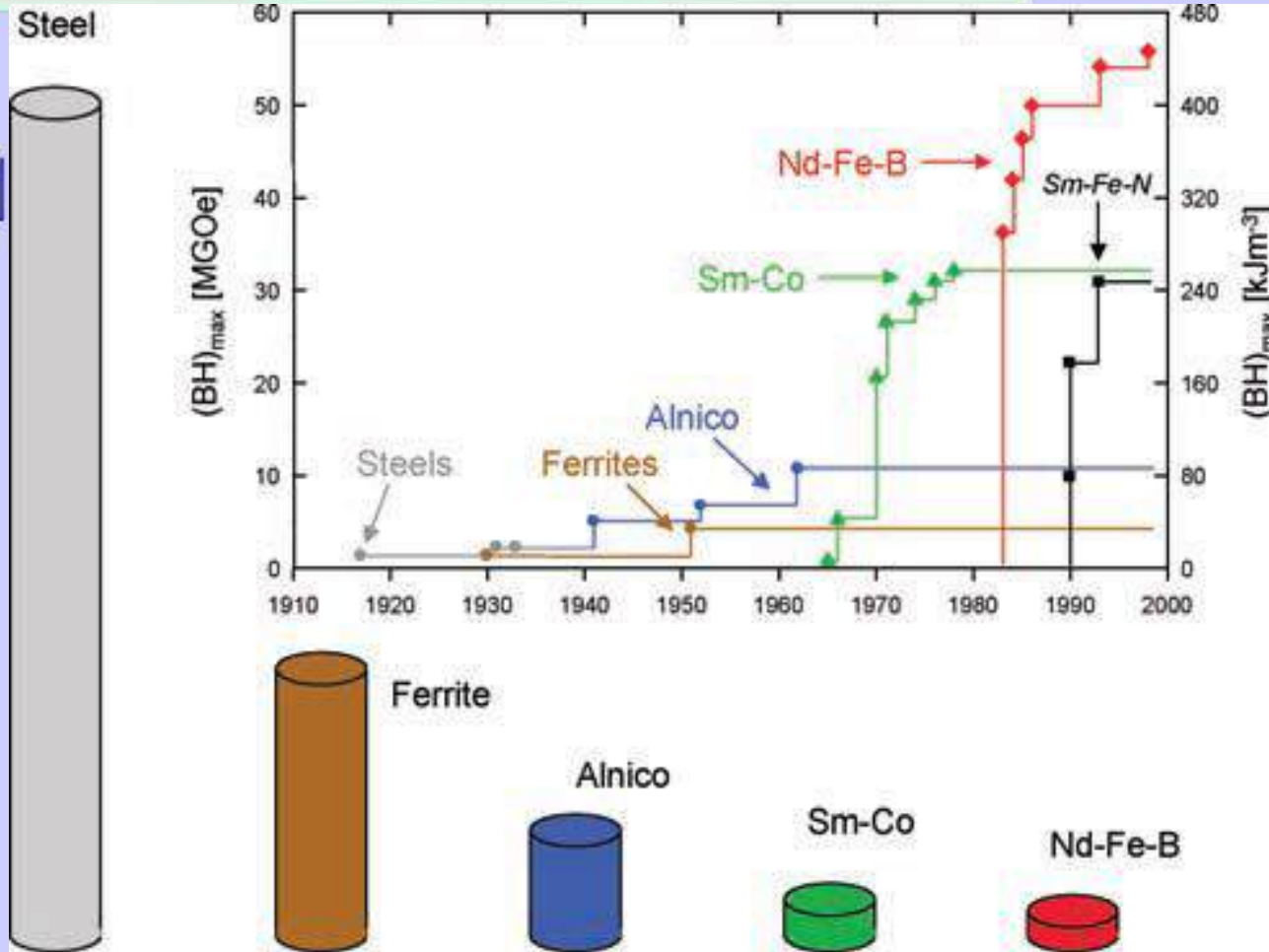
Поезда, использующие принцип магнитной левитации (**Maglev**) остаются наиболее перспективными из скоростных наземных видов транспорта, составляющих конкуренцию воздушному транспорту на средних расстояниях. В настоящее время рекордсменом является поезд, соединяющий Шанхай с его аэропортом: он может разогнаться до 430 км/ч (хотя в реальности эксплуатируется на скоростях **250** км/ч). Однако Япония, запустившая первые поезда на магнитной подушке еще в 1964 году, не собирается уступать своему соседу пальму первенства в этом виде транспорта и проводит первые испытания поезда, движущегося со скоростью 500 км/ч. Коммерческое использование поезда планируется в **2027** году, он свяжет Токио с Нагоей, уменьшив время в пути с полутора часов до 40 минут.



Magnetic Materials: World Market Distribution



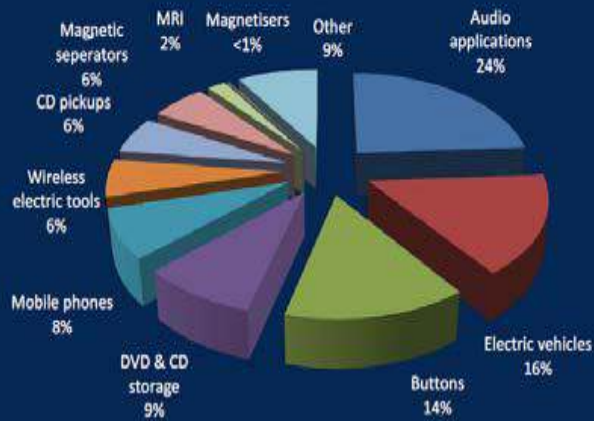




Development in the energy density (BH)_{max} at room temperature of hard magnetic materials in the 20th century and presentation of different types of materials with comparable energy density (each magnet is designed so that at a reference point 5 mm from the surface of the pole, a field of 100 mT is produced).



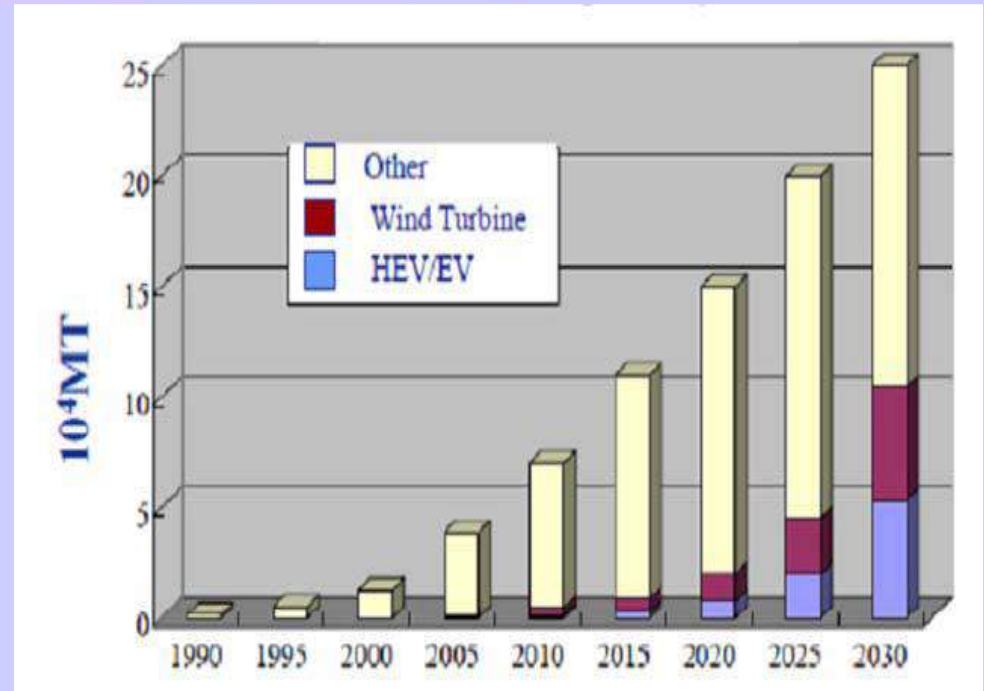
Application of NdFeB magnets in the Chinese domestic market 2008 (%)



Source: CREIC

Roskill

Approachable. Independent. Expert.



1 wind turbine- 250 kg NdFeB





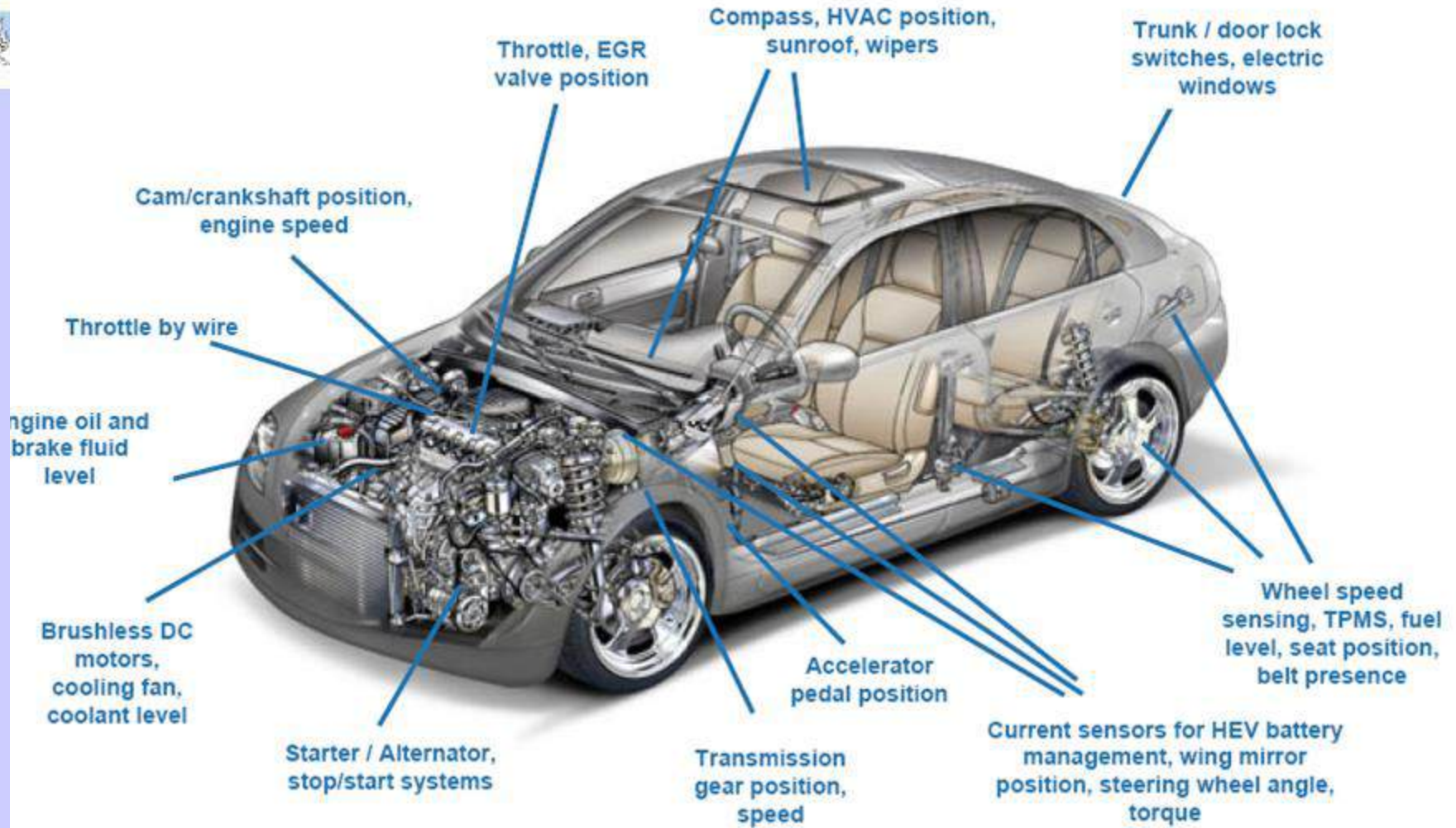
Magnetic sensors

1. Operating at room temperature
2. High sensitivity (10^{-8} Oe for medicine)
3. High spatial resolution (1-10 nm for magnetic heads)
4. Low dimensions
5. Low cost (\$ 0.3 for autocar industry)

Magnetic Sensors are used for speed, rotational speed, linear position, linear angle and position measurement in automotive, industrial and consumer applications.

Toyota uses 86 types of magnetic sensors

Flux-gate, Hall effect, magnetoresistance, GMI, NMR, magneto-optics, multiferroics etc





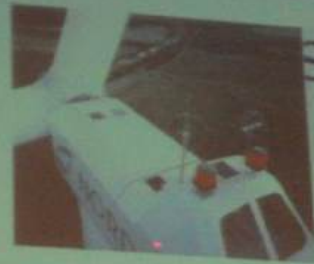
Some applications of MR



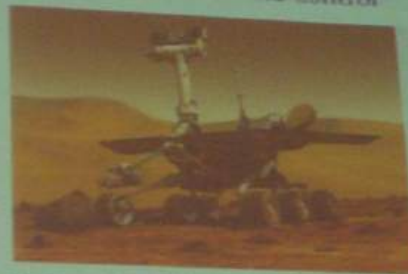
Wear monitoring for deep drilling



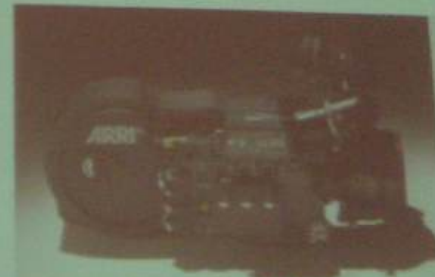
Active sensor for active steering



Current sensors for wind turbine control



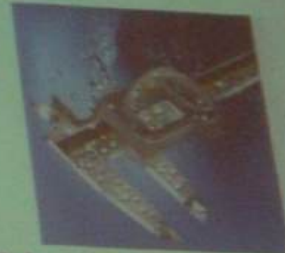
Motor encoders for Mars Rover



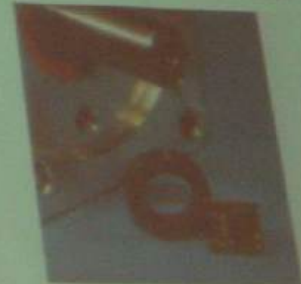
Iris and zoom control for film camera



Linear encoder for biometric testing



Digital scale for workshop calliper



Motor feedback system for BLDC motor



Novel, multifunctional and smart magnetic materials

Heusler alloys

Multiferroics

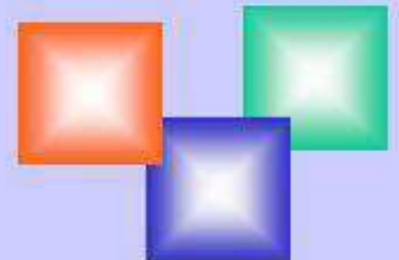
Magnetic fluids and composites

Magnetic polymers

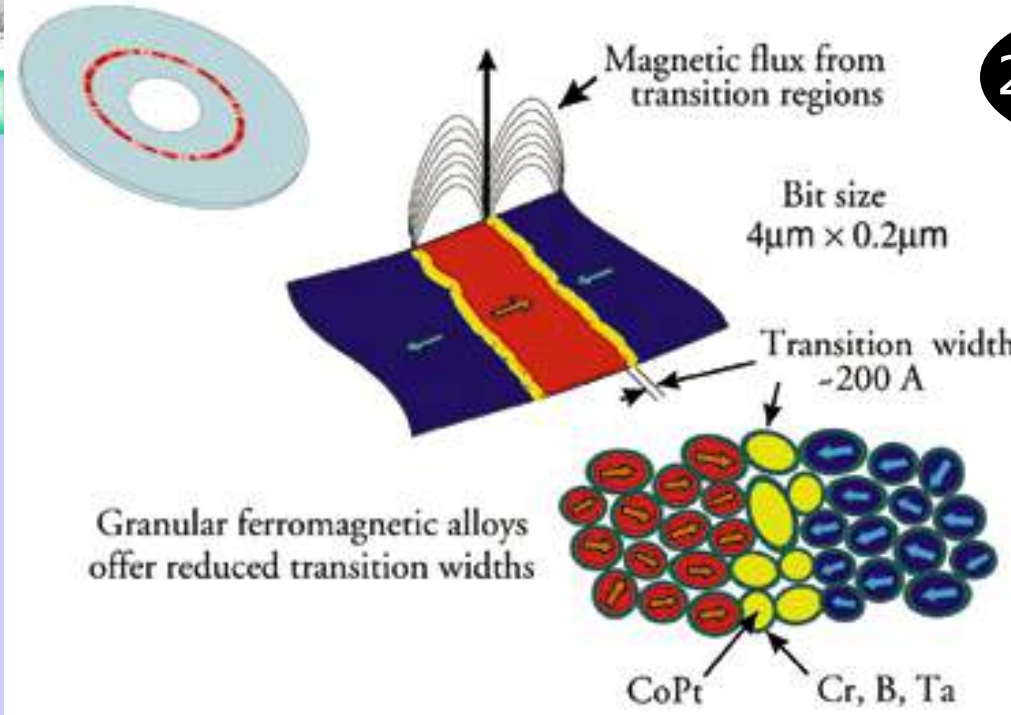
Metamaterials

Superconductive materials

Diluted magnetic semiconductors and oxides



Magnetic Recording



20 Gb/in²

Near the
Superparamagnetic
Limit !!

Computer disks consist of granular magnetic materials like CoPtCr with admixtures of boron or tantalum in order to minimize the transition width between the magnetic domains. In the disk material, the grains are believed to be coated by a non magnetic shell that reduces the magnetic coupling between the grains. A small transition width is required in order to achieve a high magnetic-flux density in the direction perpendicular to the disk surface, as shown. The flux from the spinning disk is sensed by the spin-valve magnetic read head. [Figure: J. Stöhr, IBM Research Center.]

Magnetic Information Storage

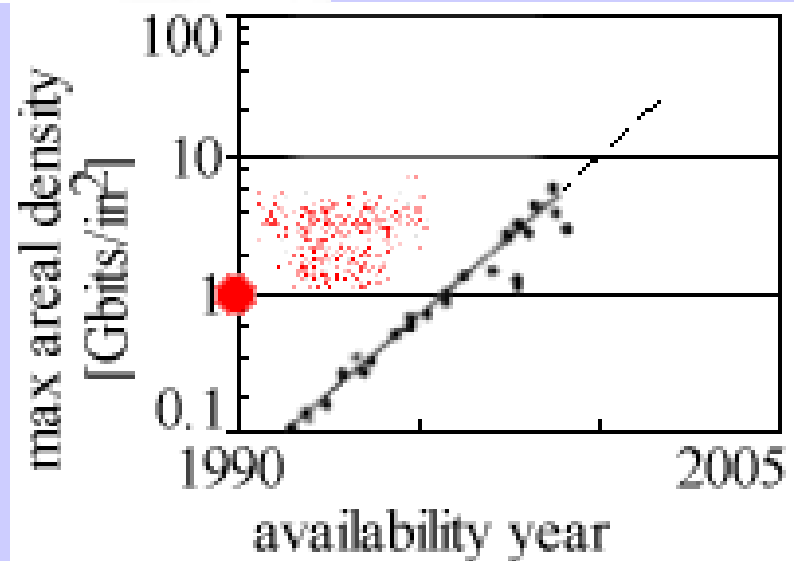


- ⊕ Density: 2 kb/in²
- ⊕ Speed: 70 kb/s
- ⊕ Size: f24" x 50
- ⊕ Capacity: 5 Mb

2010
100 Gb/in²



- ⊕ Density: 20 Gb/in²
- ⊕ Speed: 200 Mb/s
- ⊕ Size: f2.5" x 2
- ⊕ Capacity: 50 Gb





Первый компьютер с жестким диском IBM 1956 г.

Плотность 2000 bit/inch²

Скорость записи 70 kbit/sec

Стоимость 20\$ /MB

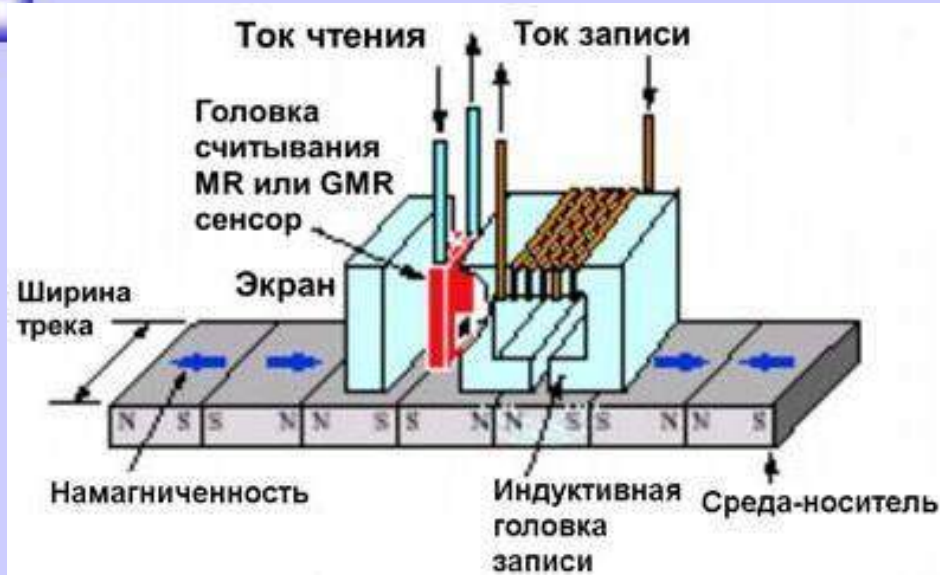
Размер - с холодильник

Нужно 24 диска чтобы записать 1 фотографию 5 MB

Что нужно:

1. Магнитный носитель- магнитожесткий материал
2. Головка записи- магнитомягкий с большой намагниченностью
3. Головка считывания -магнитомягкий

Продольная запись



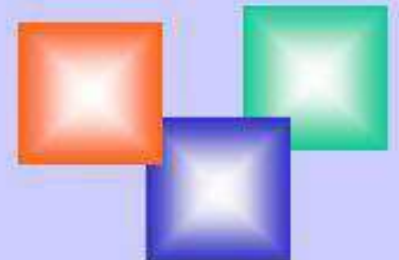
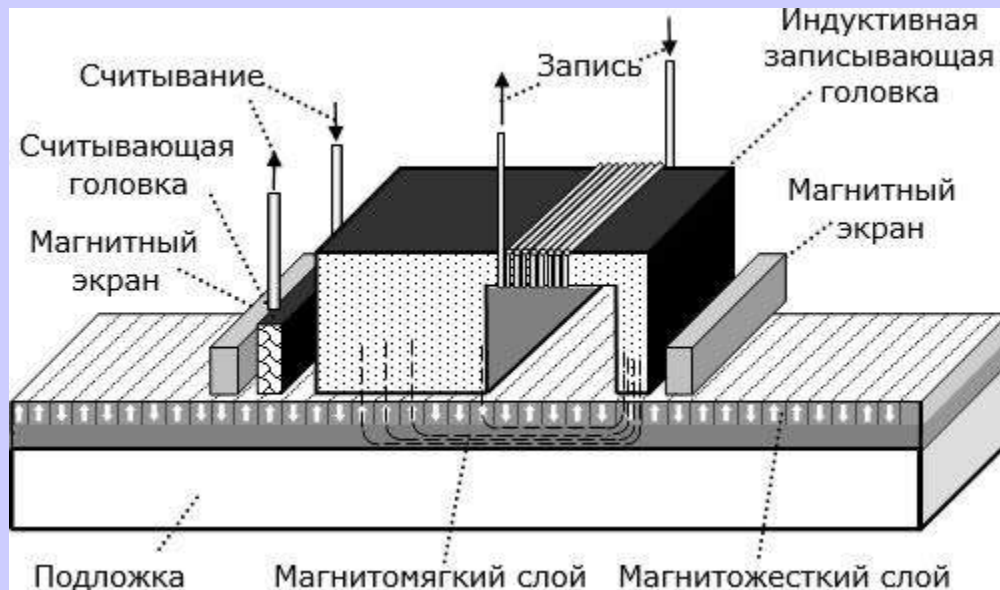
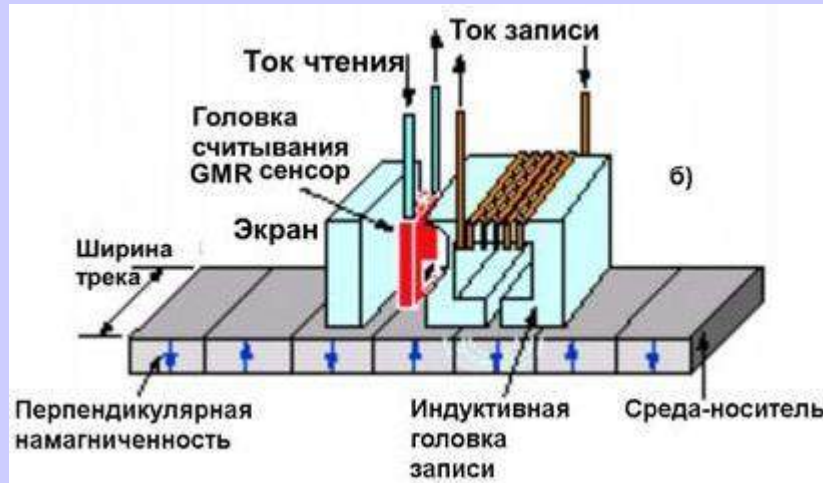
При длине бита
меньшей 30 нм
запись
нестабильна

Today's media: $H_0 \approx 10$ kOe, $M_s \approx 500$ emu/cc, size 8x8x16 nm

□ $K_u V / kT = 90$

- Little opportunity to increase H_0 (writability) or M_s (demag reduces stability)
- Small reductions in $K_u V$ possible, but energy-barrier already $< K_u V$ due to demag.
- Thicker media (smaller diameter grains) causes loss of vertical field strength

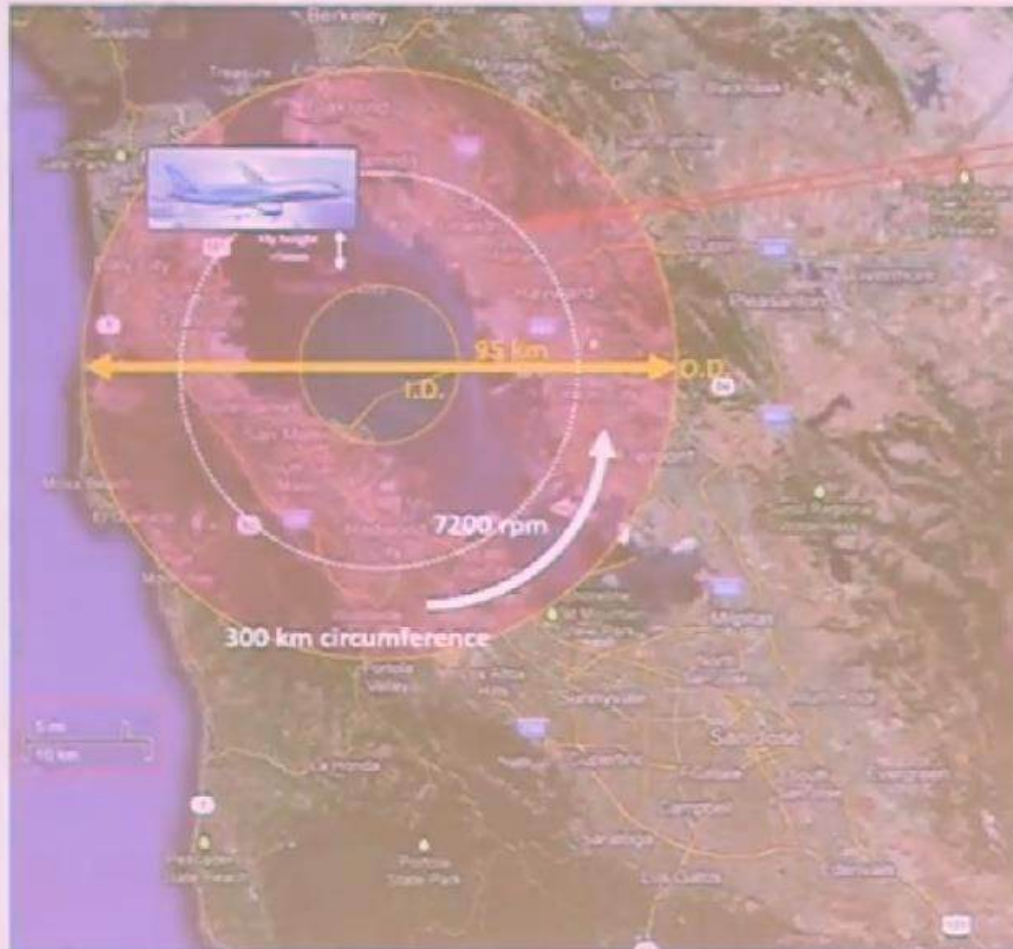
Перпендикулярная запись



Hard Disk Drives: an amazing technology !



Today's 700Gb/in² HDD technology ---- Scaled $\times 1$ million



• Media Disk = SF Bay Area (95 km dia)

• 1bit = 1 finger (1.5 \times 8cm)

• Read/Write Head = Passenger jet airplane

• Fly speed @ O.D.
 = 7200 rpm \times 300 km
 = 0.12 c (c = 3×10^8 m/s speed of light)

• Fly height = 5mm

HDD $\times 1$ million =

- A passenger jet airplane
- flying at 12% of the speed of light
- only 5mm above the ground
- around the SF Bay area
- all the while seeking, reading and writing bits of information the size of a finger



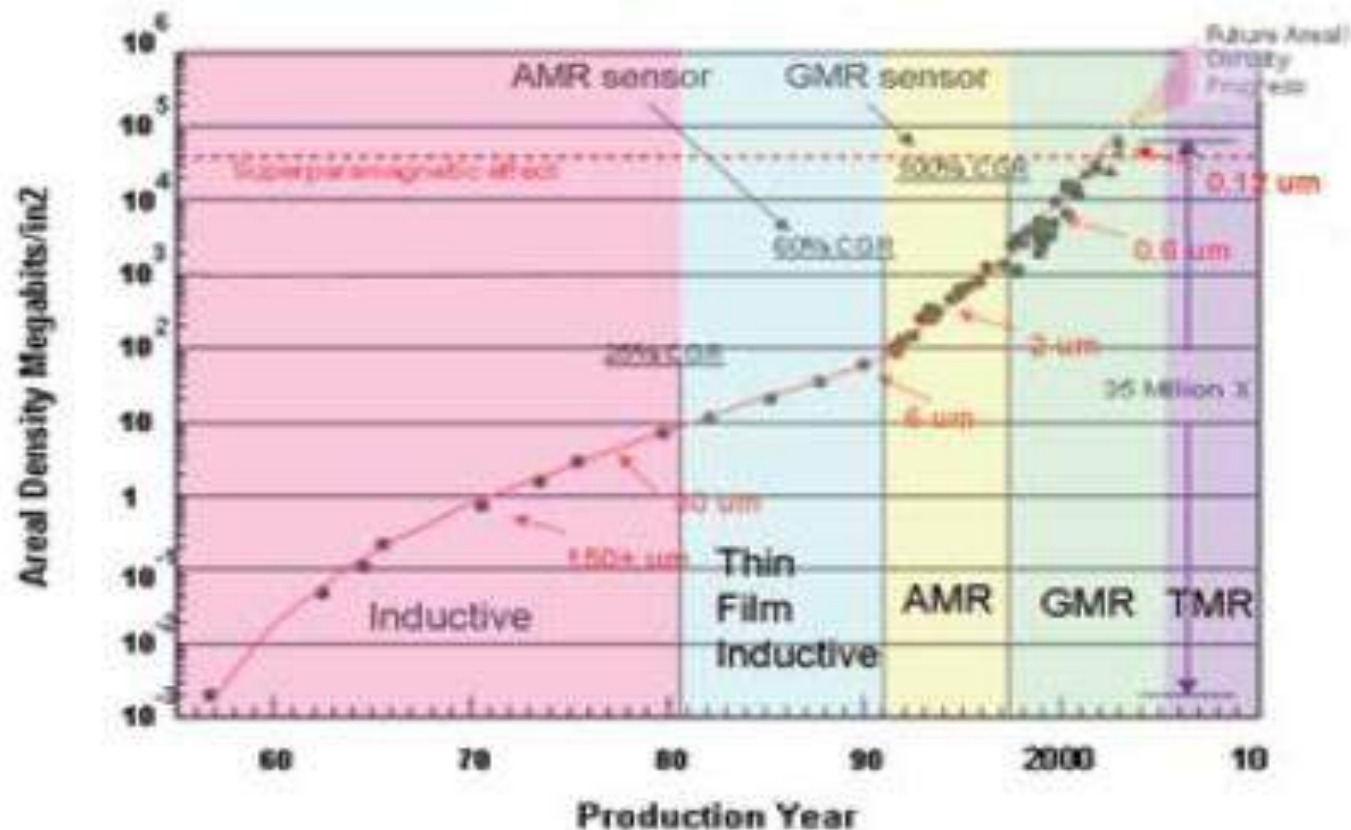
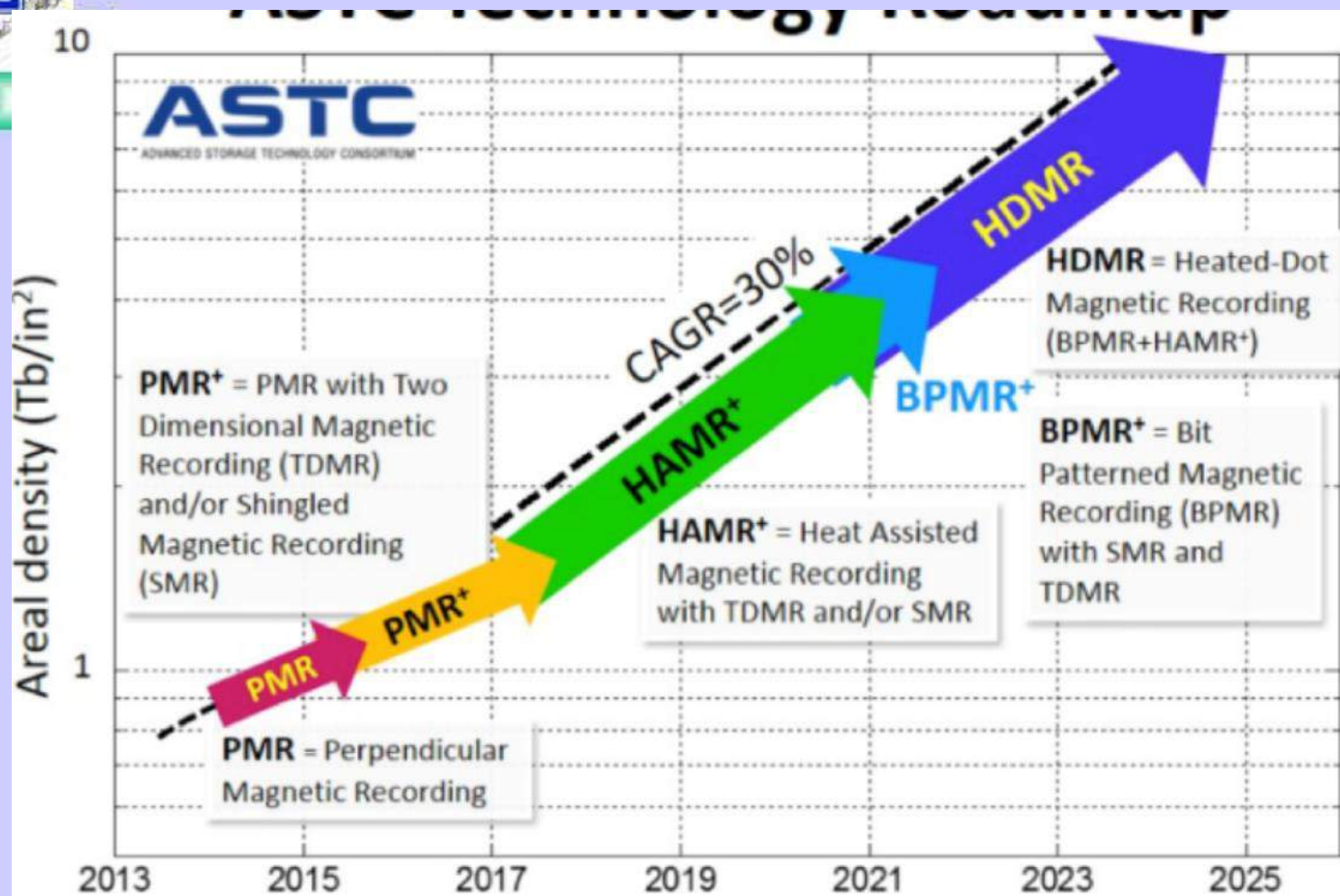
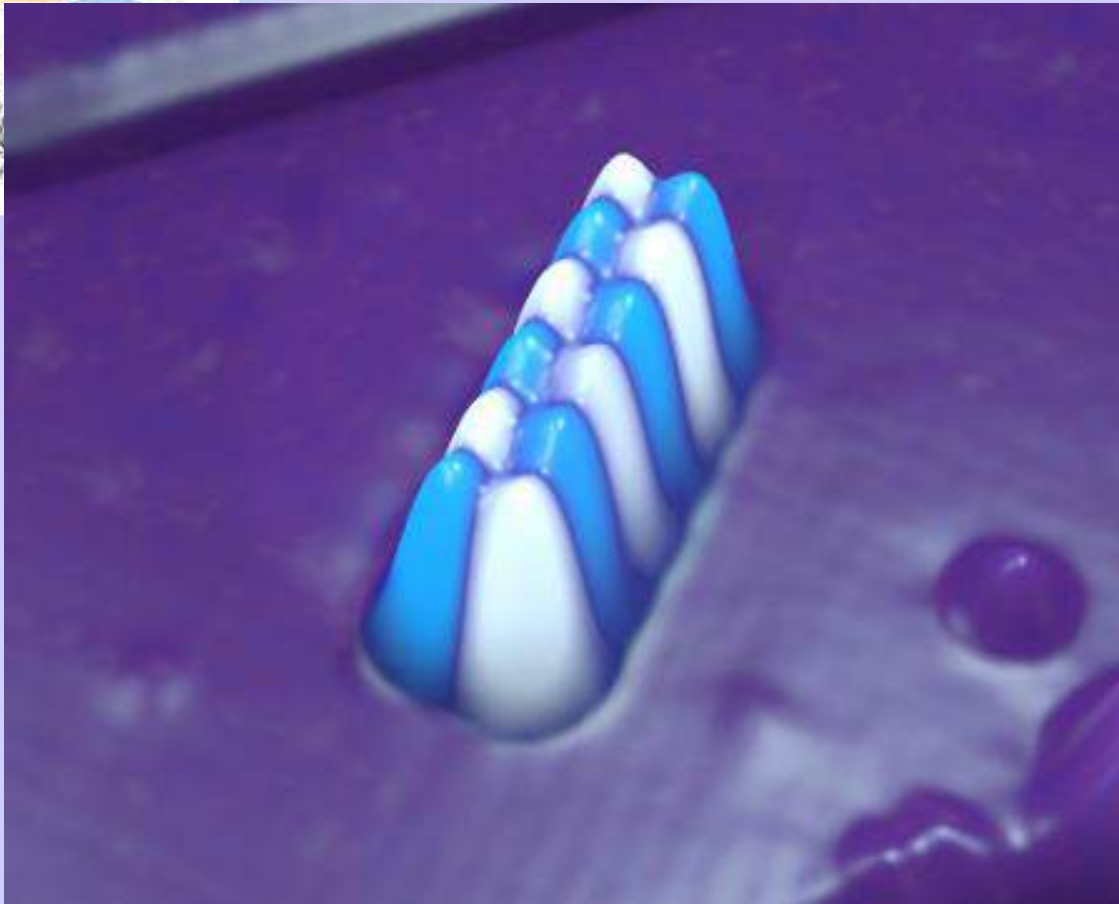


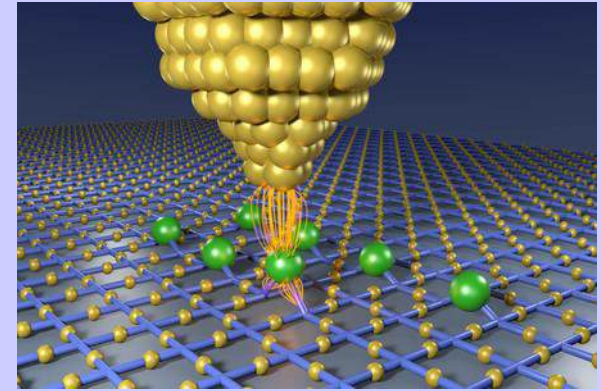
Fig. 7: Magnetic Recording Areal Density vs. year of product introduction, showing the evolution of sensor technologies. The introduction of the GMR spin valve in 1997 is the first commercially successful use of spintronics.





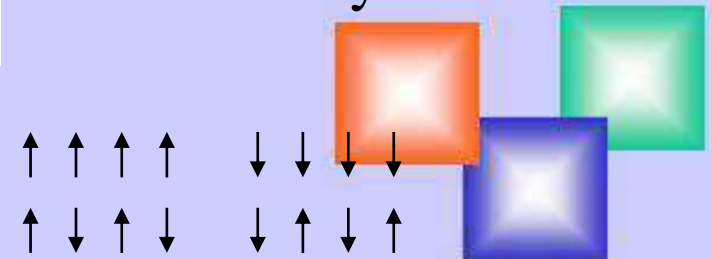
12 atoms of Fe – artificial antiferromagnet

The smallest magnetic memory cell



Tunnel microscope manipulation

1 byte = 8 bit = 96 atoms
Nowaday - 10^8 atoms



Суперпарамагнитный предел

Каждый бит содержит несколько магнитных гранул. Это для того чтобы повысить SNR. Чем выше плотность тем меньше размер бита и меньше размер гранулы. Каждая гранула имеет константу анизотропии K и объем V . Она становится суперпарамагнитной при $KV/k_B T < 25$. Но нужна стабильность, поэтому считается суперпарамагнитным пределом $KV/k_B T = 40$ (магическое число), а реально берут 60. Доказано, что при LMR если уменьшить с 60 до 25, то время релаксации уменьшится с $3.5 \cdot 10^6$ лет до 72 сек.

$$KV/k_B T > 40, \text{ значит } V > 40k_B T/K; \quad a > (40k_B T/K)^{1/3}$$

Магнитная головка генерирует магнитное поле записи $2\pi M$,
 Максимальная величина для материалов головок $4\pi M = 26 \text{ кГс}$
 Поэтому для LMR плотность ограничена 100 Gbit/inch^2

Пластины современных HDD с перпендикулярной записью изготавливаются из сплава кобальта, хрома и платины (CoCrPt), частицы которого имеют диаметр 8 нм и длину 16 нм. Для записи одного бита головке необходимо намагнитить около 20 таких частиц. При диаметре 6 нм и меньшем, частицы данного сплава не способны надежно сохранять свое магнитное состояние



$$\tau = \tau_0 \exp\left(E_B / k_B T\right)$$

$$T_B^0 = \frac{E_B}{25k_B}$$

Если уменьшить отношение $KV/k_B T_B$ от 60 до 25, то время стабильности уменьшится от 10^6 лет до 72 сек





Трилемма магнитной записи

$$H \sim K/M_s$$

Поле записи – малое
поле анизотропии

LMR – 100 Gb/in²

PMR – 1000 Gb/in²

Bit patterned recording

$$KV = 60k_B T$$

Устойчивость
Большие гранулы или
Сильная анизотропия

$$SNR = 10 \log N$$

N – число гранул в бите

Малые гранулы

Проблема №1

Традиционный принцип магнитной записи себя исчерпал, модификация с помощью HAMR, MAMR, BPR и техническими решениями уменьшения ширины дорожки позволят достичь плотности записи не более 2-4 ТБ/дюйм.

Проблема №2

Энергетическая эффективность как магнитной записи, так и микро и наноэлектроники.

5 поисков в ГУГЛ = вскипятить стакан воды. 6 миллиардов поисков в день. 15% всей энергии.

Закон Мура

Количество транзисторов, размещаемых на кристалле интегральной схемы, удваивается каждые 24 месяца.

FISHKI.NET

ЗАКОН МУРА В ДЕЙСТВИИ



1971

\$351

\$150

2 300

10 000 нм



2015

\$393

\$0,0003

1 300 000 000

14 нм

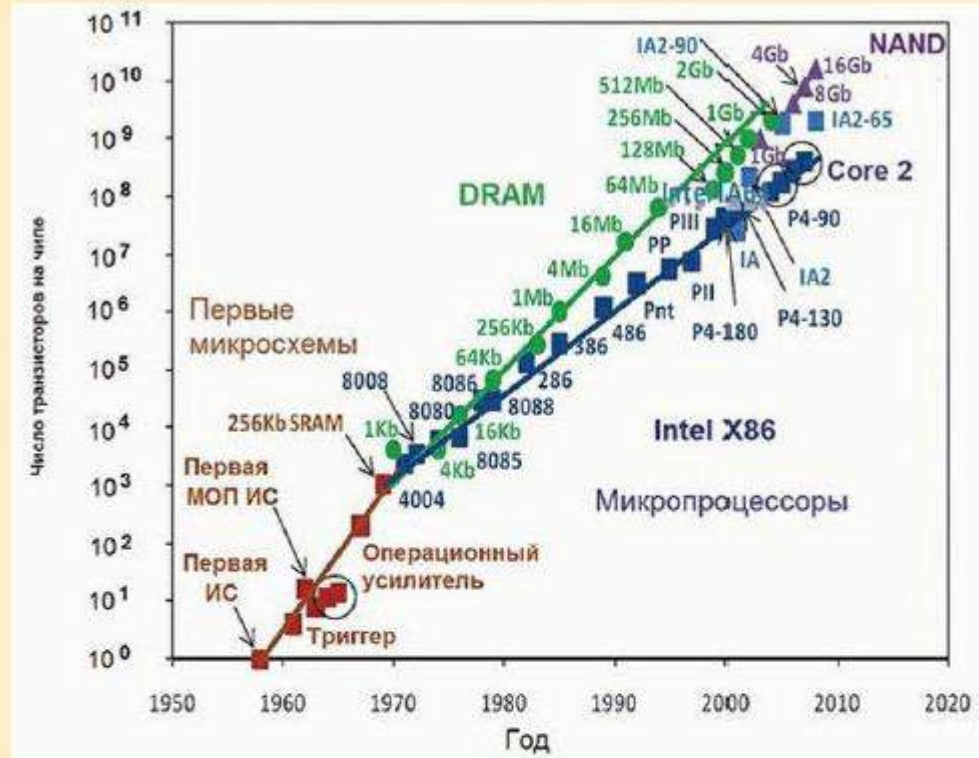
1,3 млрд

400 млн

Стоимость транзистора

Количество транзисторов

1965 1970 1975 1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015



- Уменьшение размера элементов 10 нм ↓
- Снижение времени переключения 0.1 нс ↓
- Снижение энергии переключения 1 нДж ↓
- Новые физические принципы !

ЭЛЕКТРОНИКА И СПИНТРОНИКА



Носитель информации электрон	Заряд электрона $q = 1.6 \cdot 10^{-19}$ Дж $m = 9.1 \cdot 10^{-31}$ кг	Спин и магнитный момент электрона $s = 1.054 \cdot 10^{-34}$ Дж·сек $\mu_B = 9.27 \cdot 10^{-24}$ Дж/Тл	Характеристики элемента памяти
Энергия электрона	$W_k \sim kT \sim 4 \cdot 10^{-21}$ Дж при $T = 300$ К	$W = -\mu_B B \sim 10^{-23}$ Дж при $B \sim 1$ Тл	Энергия записи на 1 бит
Область локализации	$L \sim 10 \dots 100$ нм	$L \sim 10 \dots 100$ нм	Размер элемента
Характерное время	$W_k = mV^2/2 \sim kT, \quad T \sim 300$ К $V \sim (2kT/m)^{1/2} \sim 10^5$ м/сек $\tau \sim L/V \sim 10^{-12}$ сек	Вращение момента $f = \gamma B, \quad \gamma = 3 \cdot 10^{10}$ Гц/Тл $\tau = 1/2f \sim 10^{-11}$ сек	Время переключения элемента
Характерная частота	$f \sim 1/\tau \sim 10^{12}$ Гц (достигнуто $\sim 10^{10}$ Гц)	$f \sim 10^{11}$ Гц (возможно $\sim 10^{12}$ Гц)	Рабочая частота
		Энергонезависимость Радиационная стойкость и т.д.	Преимущества

ADVANTAGES OF SPIN

- Information is stored into spin as one of two possible orientations
- Spin lifetime is relatively long, on the order of nanoseconds
- Spin currents can be manipulated
- Spin devices may combine logic and storage functionality eliminating the need for separate components
- Magnetic storage is nonvolatile (Charge state can be destroyed by interactions with impurities or other charges).
- Binary spin polarization offers the possibility of applications as qubits in quantum computers

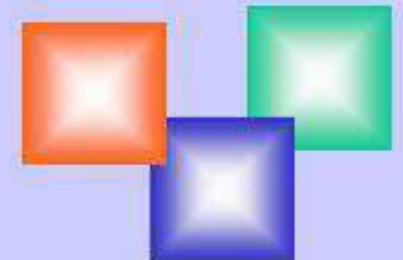
Electronics, Micro- and Nanoelectronics → Charge of Electron

SPINTRONICS = SPIN+TRANSPORT+ELECTRONICS
(1996) →
Spintronics Charge + Spin of Electron

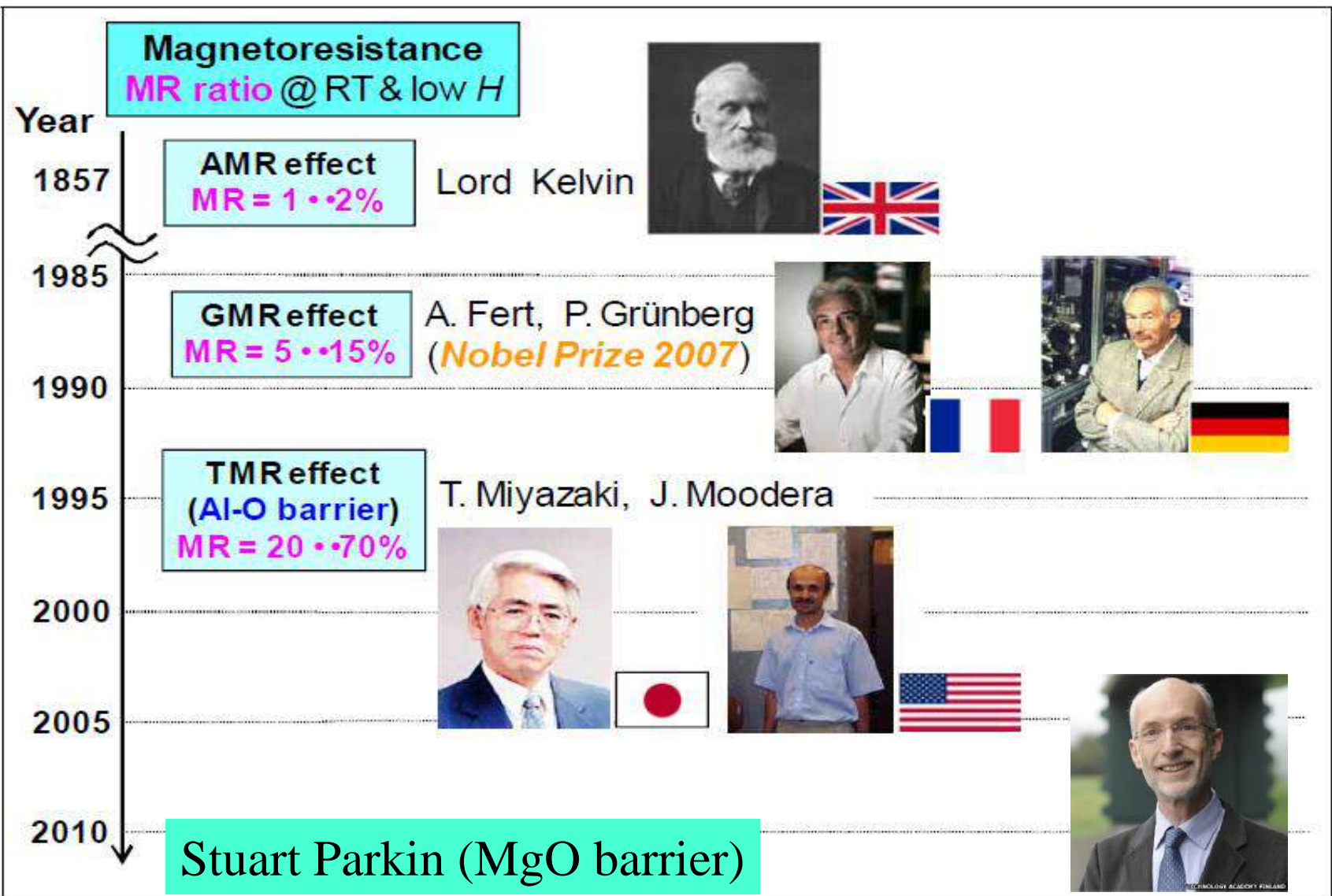
Spin control and manipulation

Spin current without dissipation!!!!?

Quantum Computers



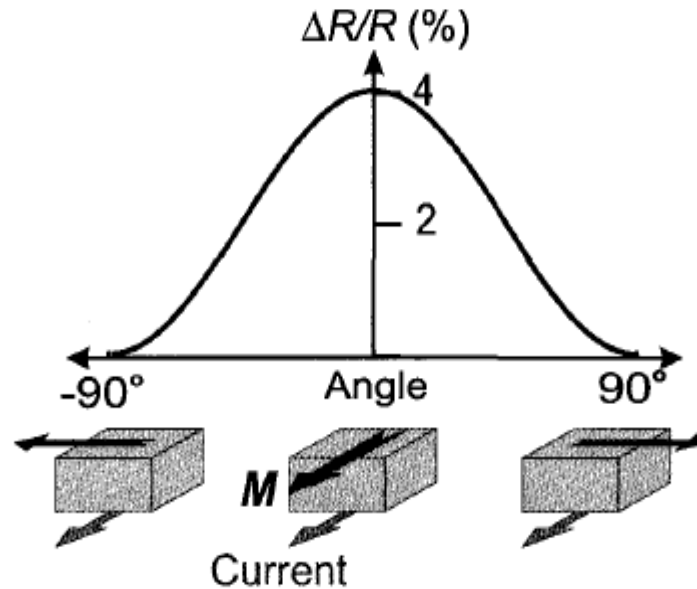
TMR



Courtesy S. Yuasa

1856
Thomson

Anisotropic magnetoresistance



4%, 300K
NiFe
H=5 Oe
S=1%/Oe

$$\rho_{ij} = \begin{vmatrix} \rho_{\perp}(B) & -\rho_H(B) & 0 \\ \rho_H(B) & \rho_{\perp}(B) & 0 \\ 0 & 0 & \rho_{\parallel}(B) \end{vmatrix}$$

$$\frac{\Delta \rho}{\rho} = \frac{\rho_{\parallel} - \rho_{\perp}}{\frac{1}{3}\rho_{\parallel} + \frac{2}{3}\rho_{\perp}}$$

$$\vec{E} = \rho_{\perp}(B)\vec{j} + [\rho_{\parallel}(B) - \rho_{\perp}(B)](\vec{\alpha} \cdot \vec{j}) \cdot \vec{\alpha} + \rho_H(B)[\vec{\alpha} \times \vec{j}],$$



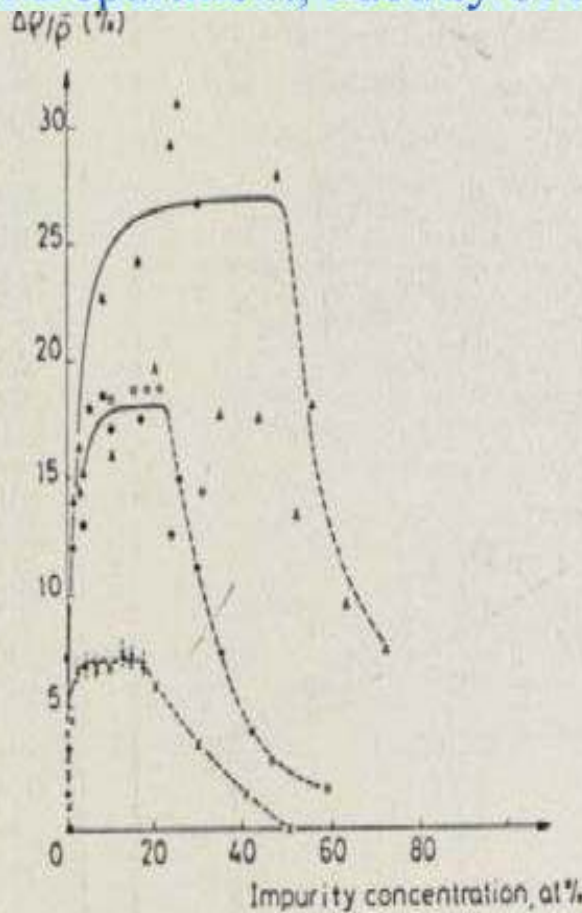


Fig. 13. Concentration dependence of the resistivity anisotropy at 4.2 K for several nickel based alloys.

\triangle : $\underline{\text{NiCo}}$, \bullet : $\underline{\text{NiFe}}$, \times : $\underline{\text{NiCu}}$ (after Jaoul et al. 1977).

$$\Delta\rho/\rho = 0.01(\alpha - 1)$$

$$\alpha = \rho_{\downarrow} / \rho_{\uparrow}$$

Нерешенные вопросы: 1. AMR исчезает при толщине пленки меньше 0.1 мкм; 2. Почему в некоторых сплавах большой при низких температурах

Spin-polarized current

Spin polarization

$$P = \frac{N_{\uparrow} - N_{\downarrow}}{N_{\uparrow} + N_{\downarrow}}$$

N_{\uparrow} Number of \uparrow (majority spin) electrons

N_{\downarrow} Number of \downarrow (minority spin) electrons

Fe, Co, Ni: $P \sim 40-50\%$

Half-metals (Cr_2O , $(\text{LaR})\text{MnO}_3$, etc): $P \sim 100\%$

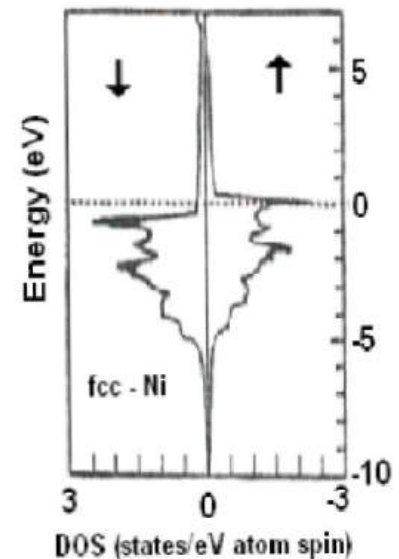
In metals like iron and cobalt, the majority spin and minority spin electron carry currents that can be different by more than a factor of ten.

Thus, in this metal the total current is strongly spin-polarized.

So, in ferromagnetic metals **electric current carriers not only charge but also spin, i.e. angular momentum.**

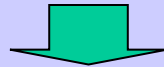


Sir
Nevill Francis
Mott

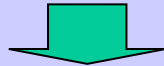


Ferromagnetic metals – natural source of spin polarized conduction electrons

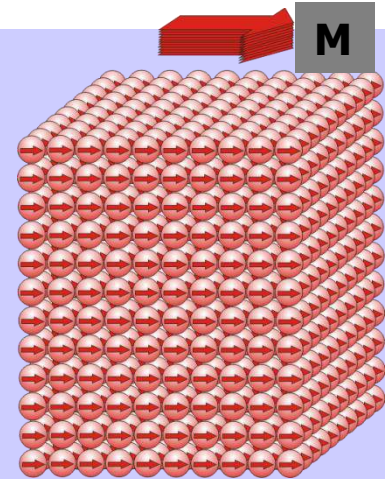
Spontaneous magnetization \mathbf{M}



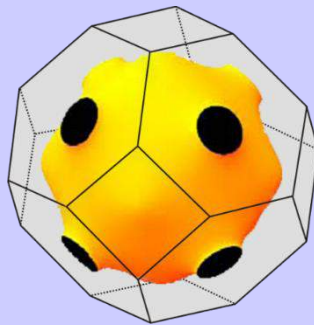
Internal exchange field $\mathbf{H}_{\text{ex}} = \lambda \mathbf{M}$,
 $\lambda \sim 1,000 \gg 1$



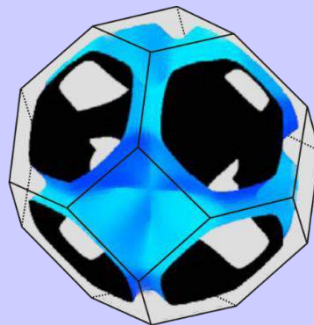
Spin asymmetry of electrons in metals:



Cobalt

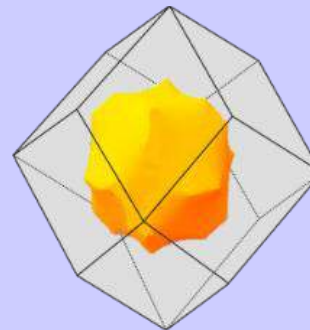


Co Spin Majority
Fermi Surface

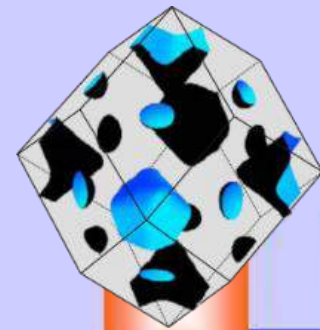


Co Spin Minority
Fermi Surface

Iron

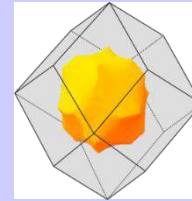
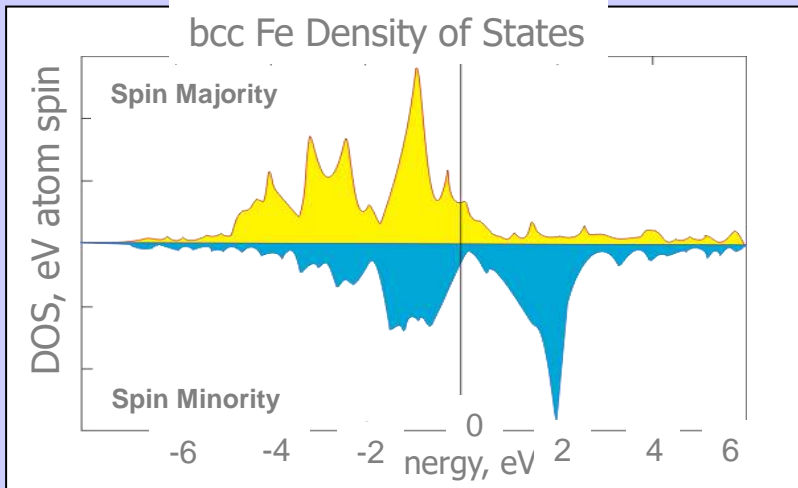


Fe Spin Majority
Fermi Surface

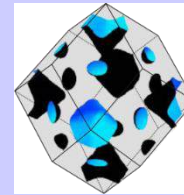


Fe Spin Minority
Fermi Surface

Spin asymmetry of electrons in metallic ferromagnets: the base for spin injection phenomena

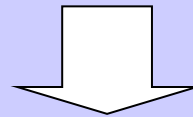


Fe Spin Majority
Fermi Surface

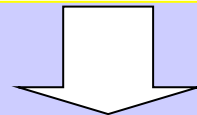


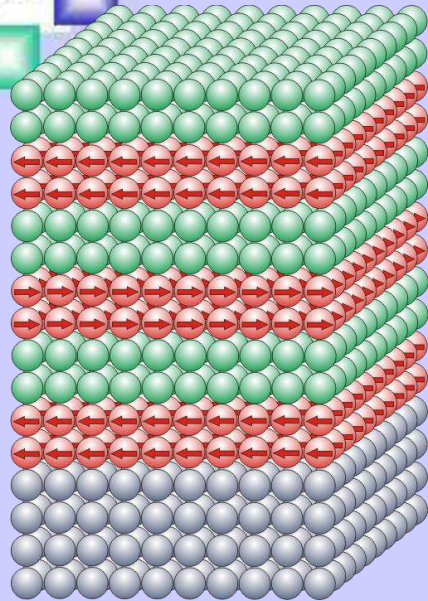
Fe Spin Minority
Fermi Surface

Result of spin asymmetry: Spin polarization of electrons in ferromagnets $P \neq 0$



Problem of the today: How to realize effective injection of spin polarization from ferromagnetic metal into semiconductor using electrical current?





Ferromagnetic metal (Fe)

Nonmagnetic metal (Cr)

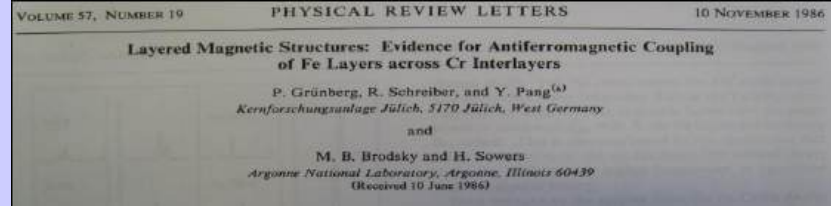
Ferromagnetic metal (Fe)

Nonmagnetic metal (Cr)

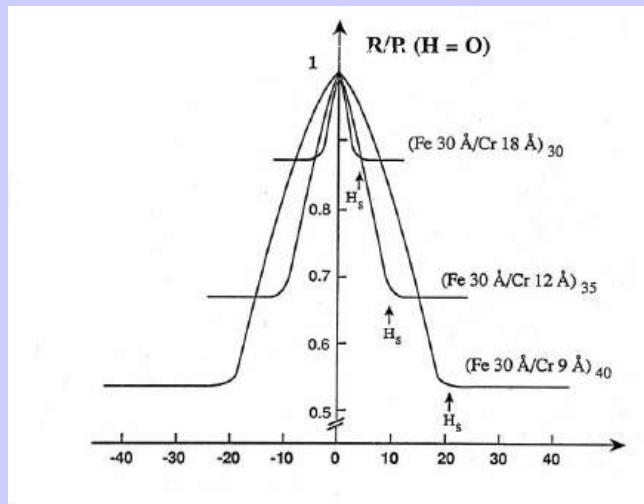
Ferromagnetic metal (Fe)



Layered Magnetic Structures:
Evidence for Antiferromagnetic Coupling
of Fe Layers across Cr Interlayers.
PRL, v.57, no.19, 1986



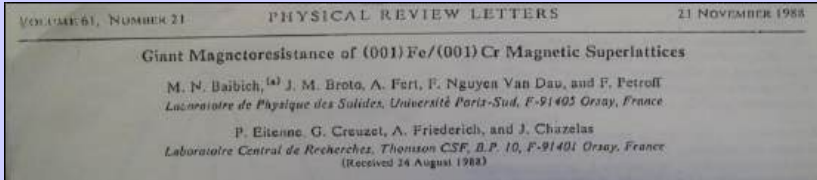
Patents of P. Grünberg «Magnetic fields sensor»
DE 38 20 475 C1, EP 03 468 17 B1, US 4,949,039.
JP 265 15 B2, AT 11 33 86 T
Application Date - 16 June 1988



H, kOe



Giant Magnetoresistance
of (001)Fe/(001)Cr Magnetic
Superlattices.
PRL, v.61, no.21, 1988



Received 24 August 1988

GMR – giant magnetoresistance
 A.Fert and P. Gruinberg (1988)

$$\frac{\Delta R}{R} = \frac{R_{AP} - R_P}{R_P}$$

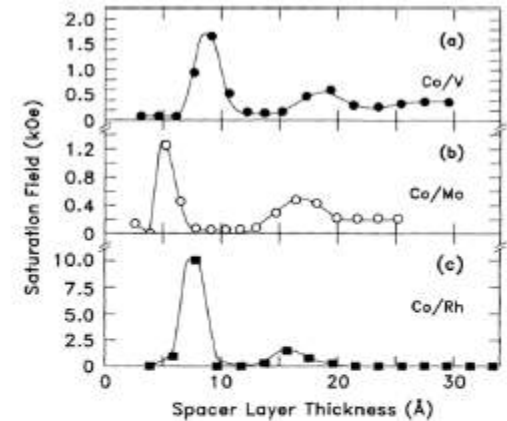
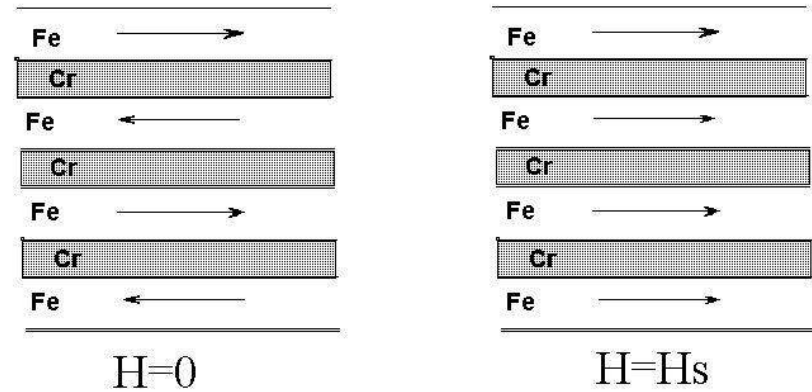
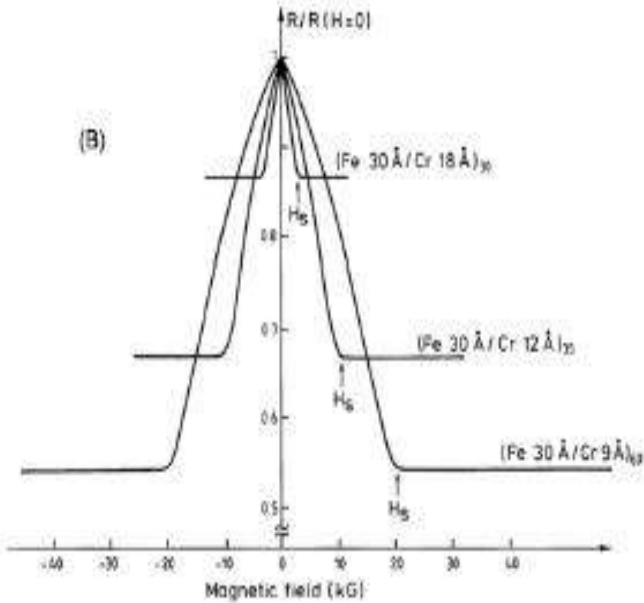
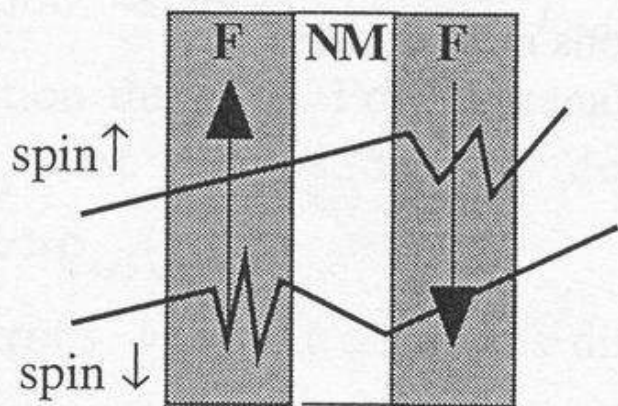
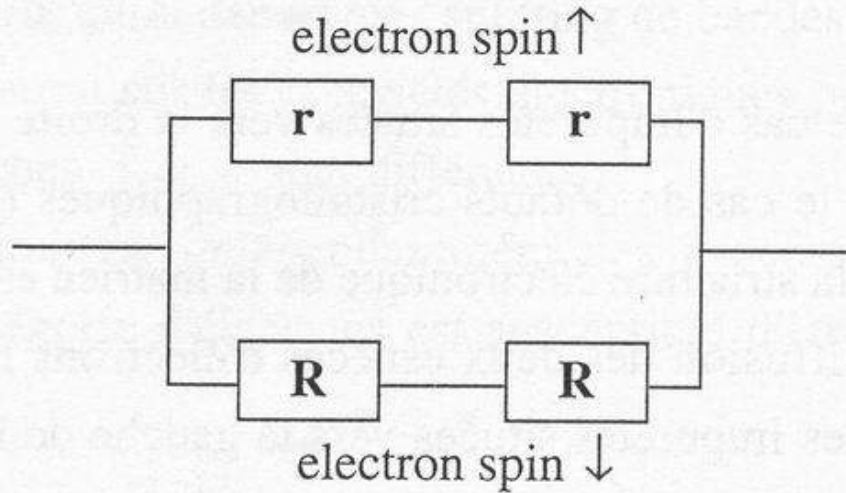
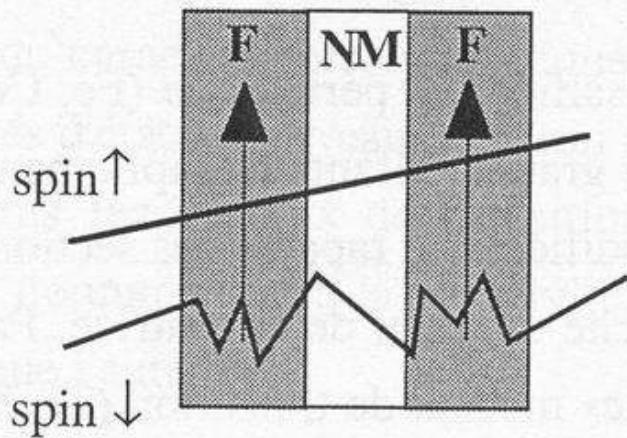


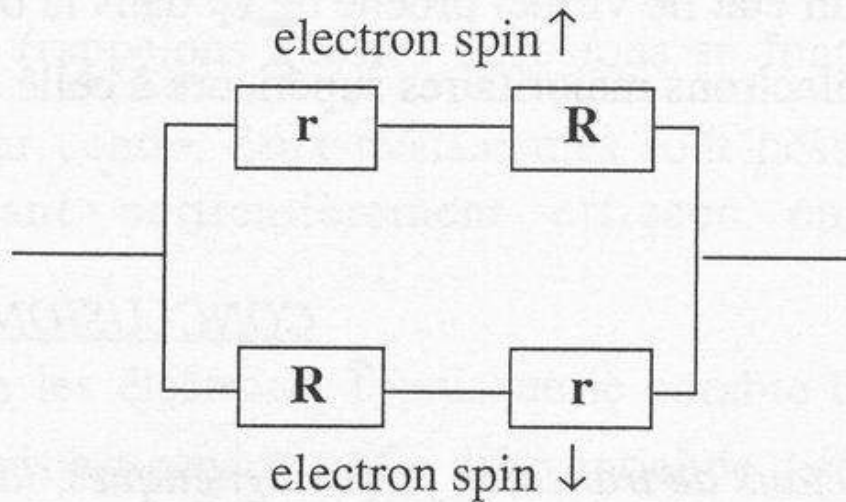
Figure 4. The oscillation of exchange coupling between Co layers across different spacer layers determined by the magnetic field required to reach 80% of the saturation magnetic moment. Note the period of oscillation of the coupling from ferromagnetic (low saturation field) to antiferromagnetic (high saturation field) is similar at about 1 nm for all the elements presented. This was part of an extensive study of many different ferromagnetic and spacer layers by Parkin [17]. (Reprinted with permission from figure 2 of [17]. Copyright 1991, American Physical Society.)



$H = H_{\text{sat}}$



$H = 0$



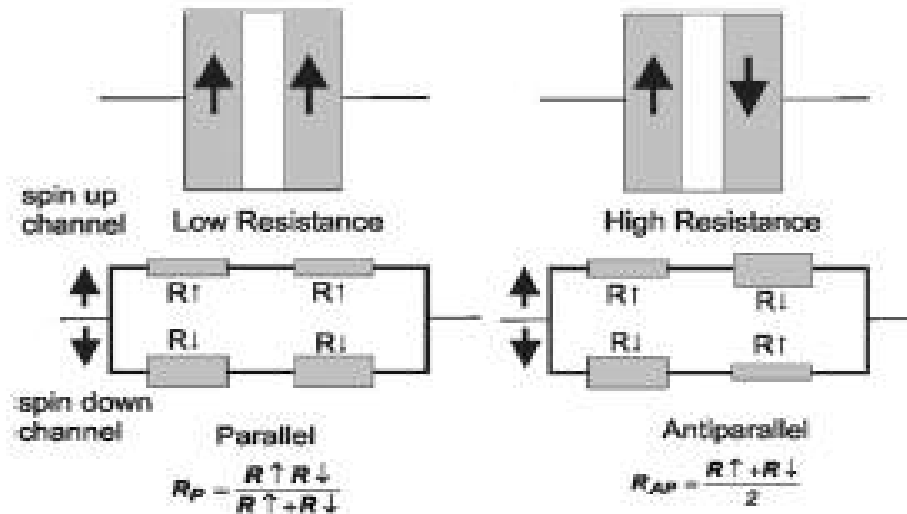
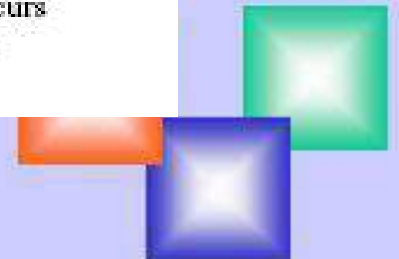
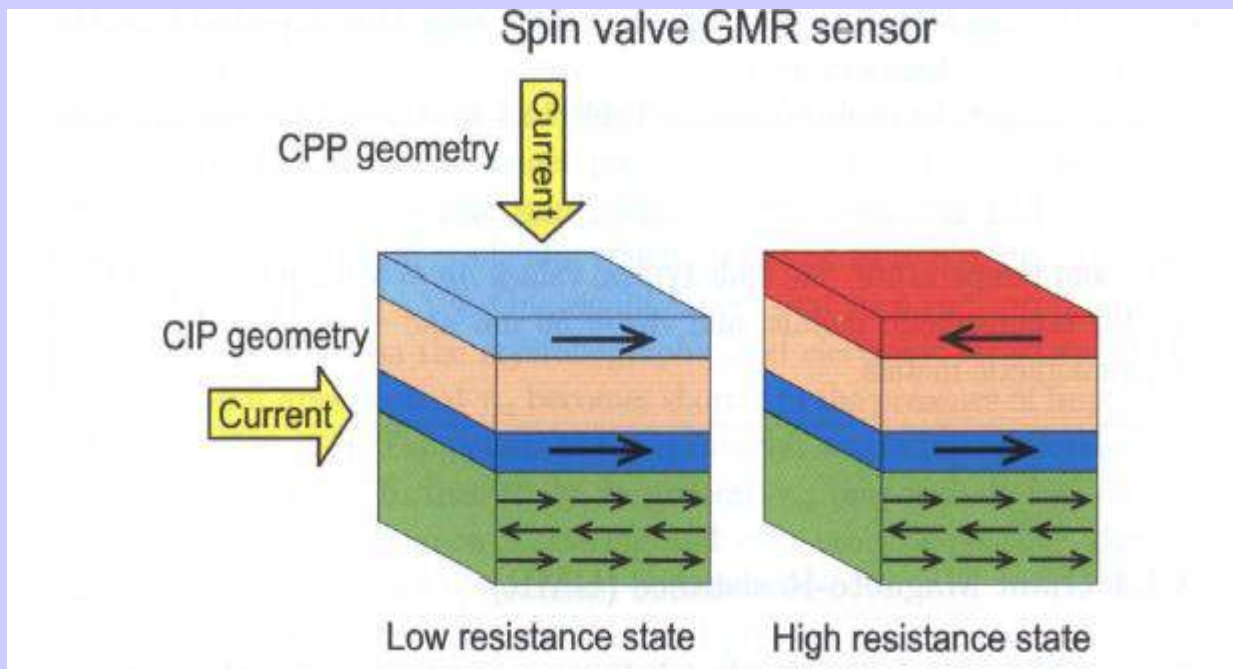


Figure 2. A schematic representation of GMR using a simple resistor network model. In the left picture, the spin-up channel is the majority spin channel in both the ferromagnetic layers, experiencing a low resistance (R_{\uparrow}) throughout the structure. In the right-hand picture the spin-up channel is the majority spin channel (R_{\uparrow}) in the first magnetic layer but the minority-spin channel (R_{\downarrow}) in the second magnetic layer and vice versa for the spin-down channel. Neither spin channel is of low resistance throughout the structure and the overall resistance state of the structure is high. GMR occurs when the relative orientation of the magnetic layers is switched, usually by the application of a magnetic field.

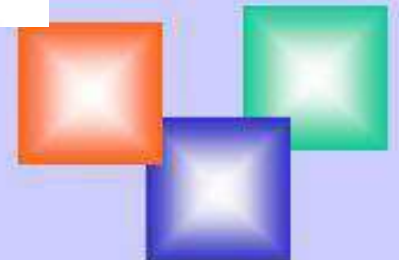




Спиновый клапан= Спиновый вентиль



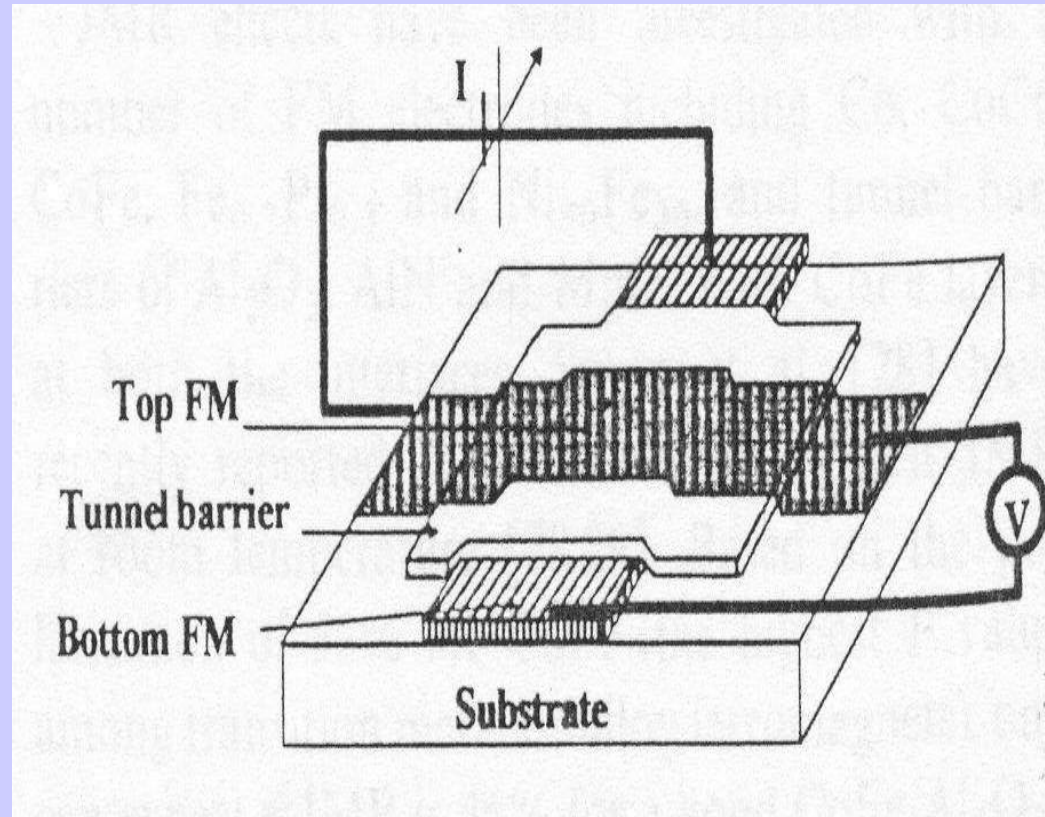
Паркин и Диени





TMR - Tunnel magnetoresistance

Jullier, Fe/GeO/Co 1975
Maekawa 1982, Parkin
1995 -2005



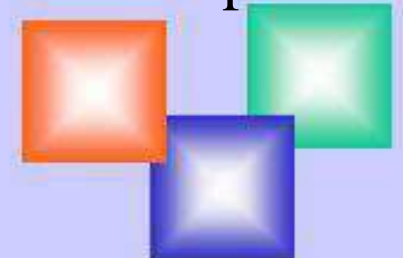
Al-O TMR up to 70%
(2004)

MgO TMR up to 600%
(2008)

Granular metal-insulator
alloys

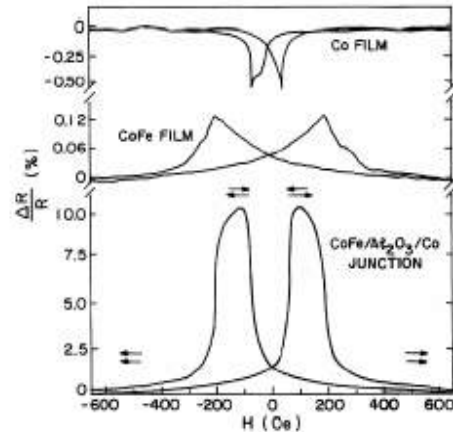
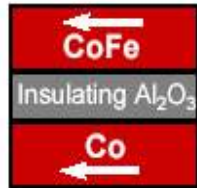
Co-Al-O TMR up to 20%

CoFeB/MgO/CoFeB

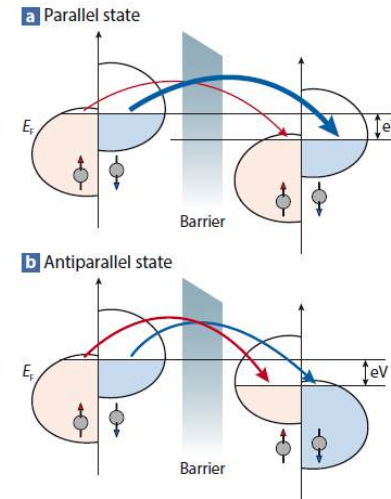


TMR in MTJ

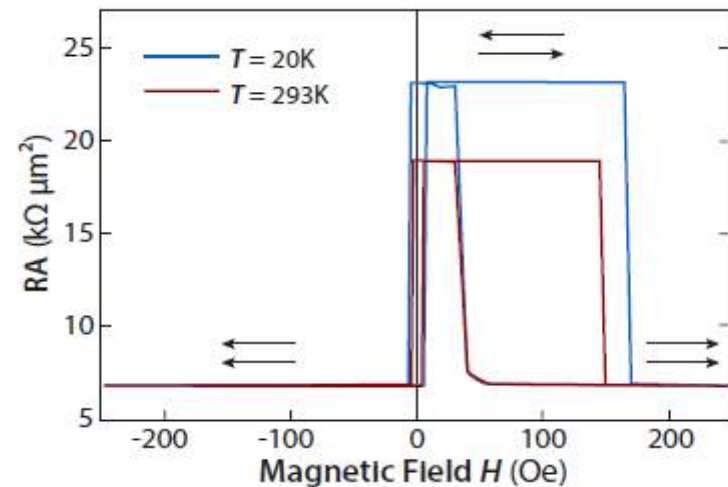
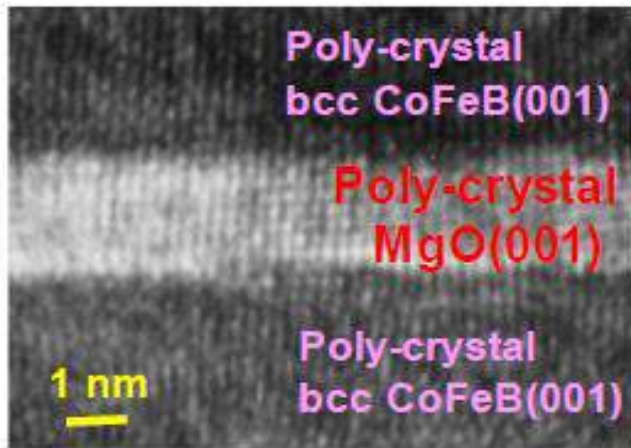
First observation of a TMR at RT



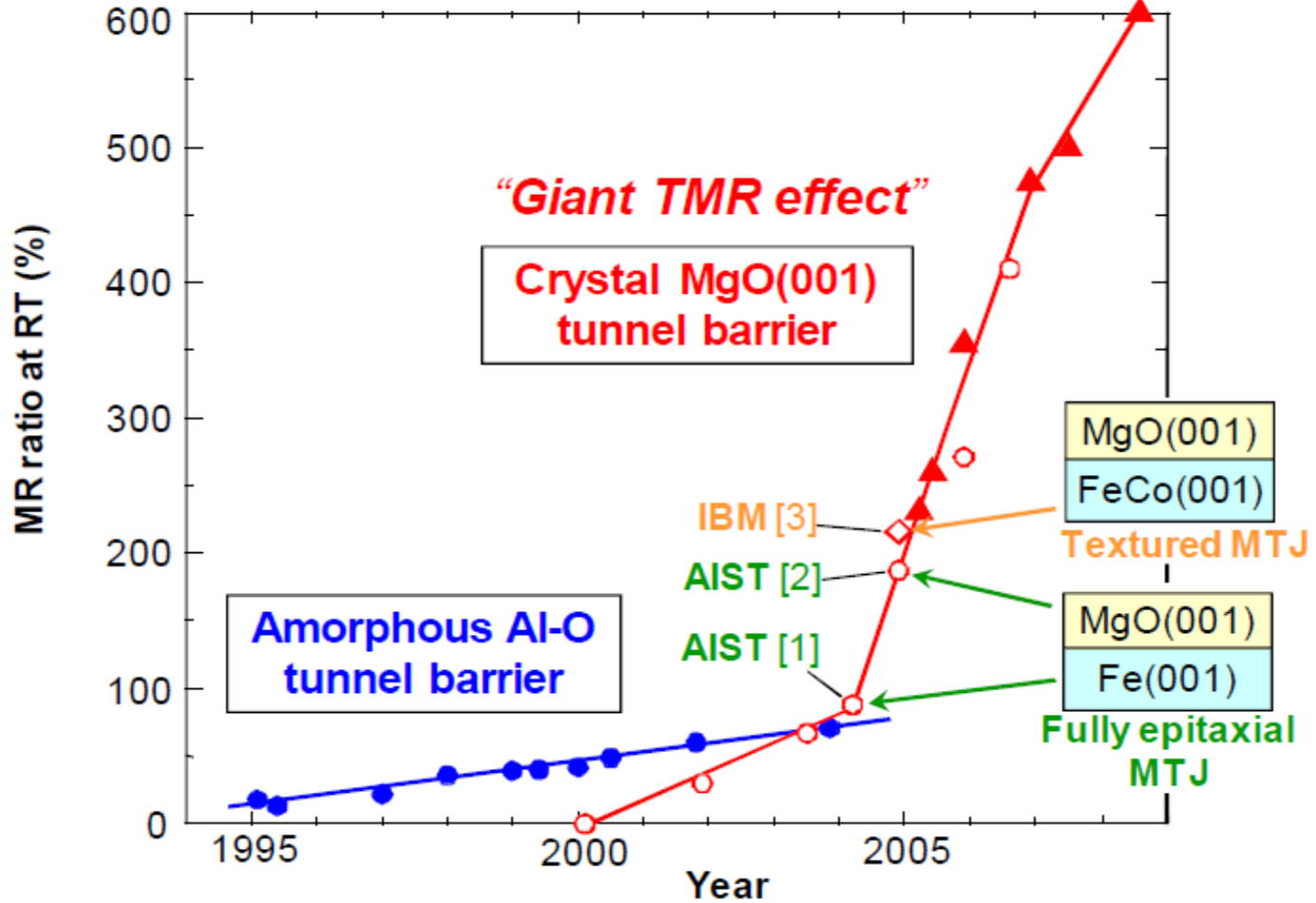
Moodera J S, Kinder L R, Wong T M and Meservey R *PRL* **74** 3273 (1995)



C. Chappert et al., *Nature Mat*, 2007



S. Yuasa et al., *Nature Mat*, 2004



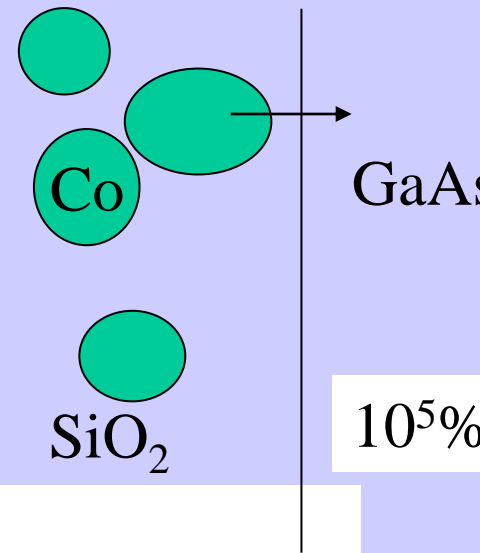
[1] Yuasa, *Jpn. J. Appl. Phys.* **43**, L558 (2004). [2] Yuasa, *Nature Mater.* **3**, 868 (2004).
 [3] Parkin, *Nature Mater.* **3**, 862 (2004).

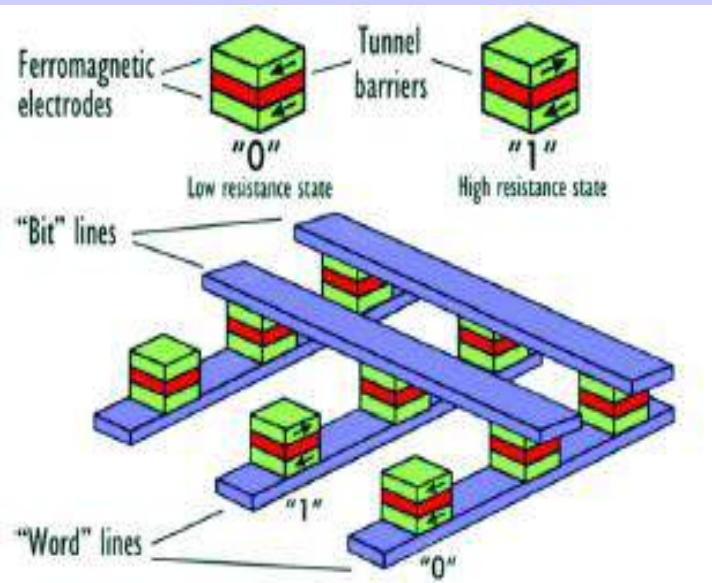
Другие типы MR: CMR in manganites and Heusler alloys, IMR, в полимерах- но чувствительность везде мала?

Нет объяснения ?

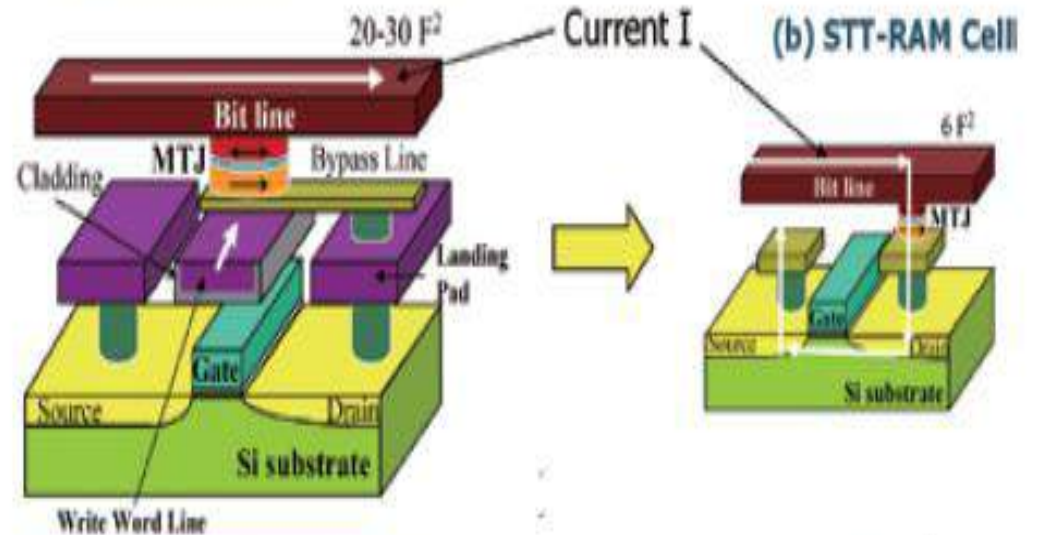
Large, non-saturating magnetoresistance in WTe_2
Mazhar N. Ali, Jun Xiong, Steven Flynn, et al
doi:10.1038/nature13763

We have discovered an extremely large positive magnetoresistance (XMR) in WTe_2 of up to **452,700%** at 4.5K in an applied field of 14.7 T when the current direction is along the tungsten chains (a axis) and the magnetic field is applied perpendicular to the dichalcogenide layers, along the c axis. The magnetoresistance is still increasing at 60 T, the highest field in our measurements, where it has a value of **13,000,000%**. There is no ind $10^8\%$ of resistivity saturation even at these high applied fields.





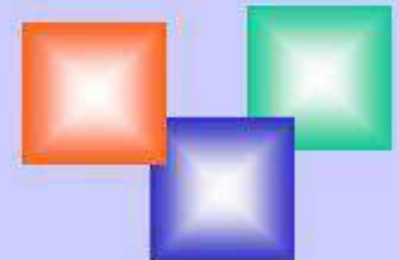
(a) Conventional MRAM Cell



Write Current: $I_{sw} \sim 1 / \text{Volume}$

$I_{sw} \sim \text{Volume}$

Fig. 1: Comparison of memory cell architecture between conventional field switching MRAM (a) and spin-transfer torque MRAM (STT-MRAM) (b).

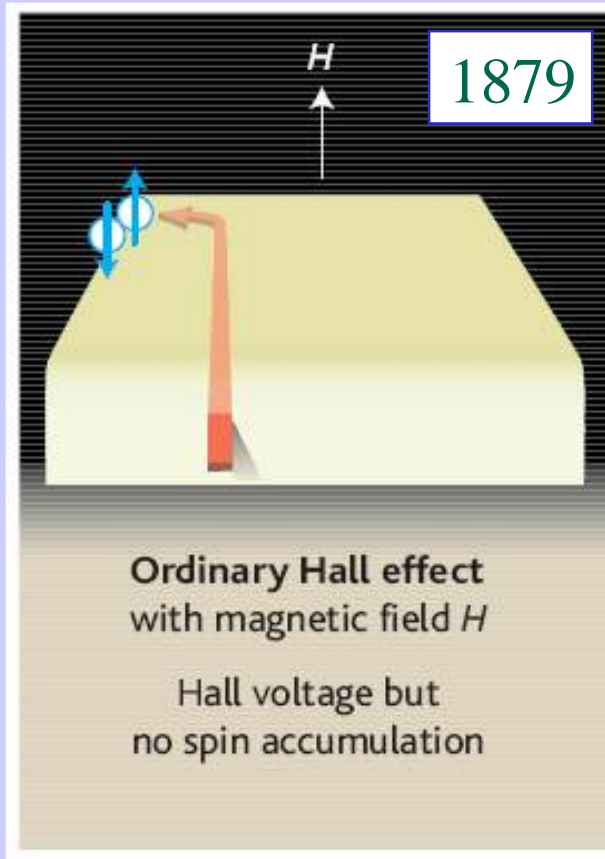


Ordinary Hall effect

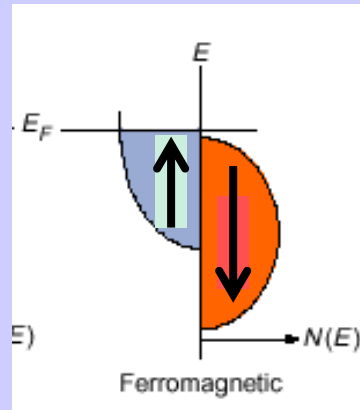
$$\rho_{xy} = R_0 B$$

$$\rho_{ah} = 4\pi M_z$$

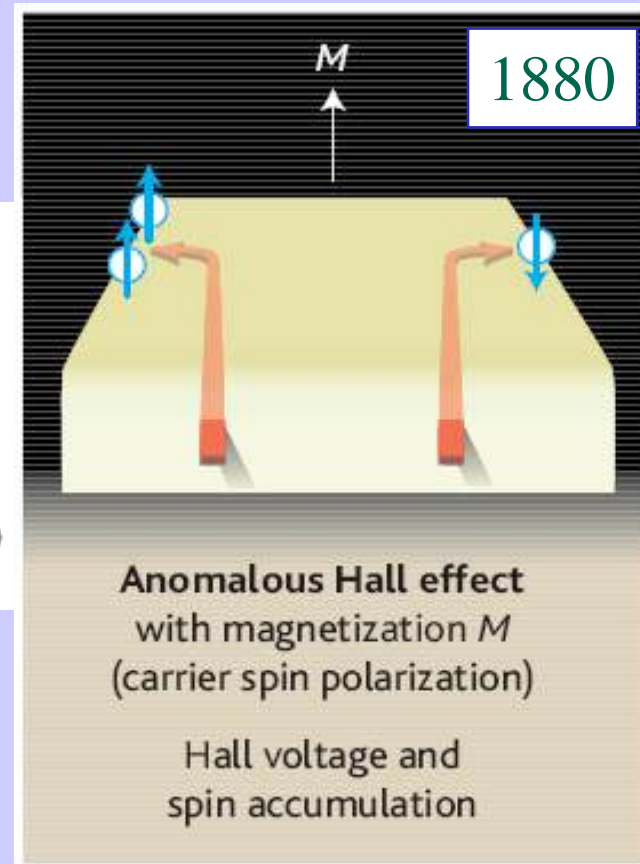
$$\rho_{xy} = R_0 B + \rho_{ah}$$



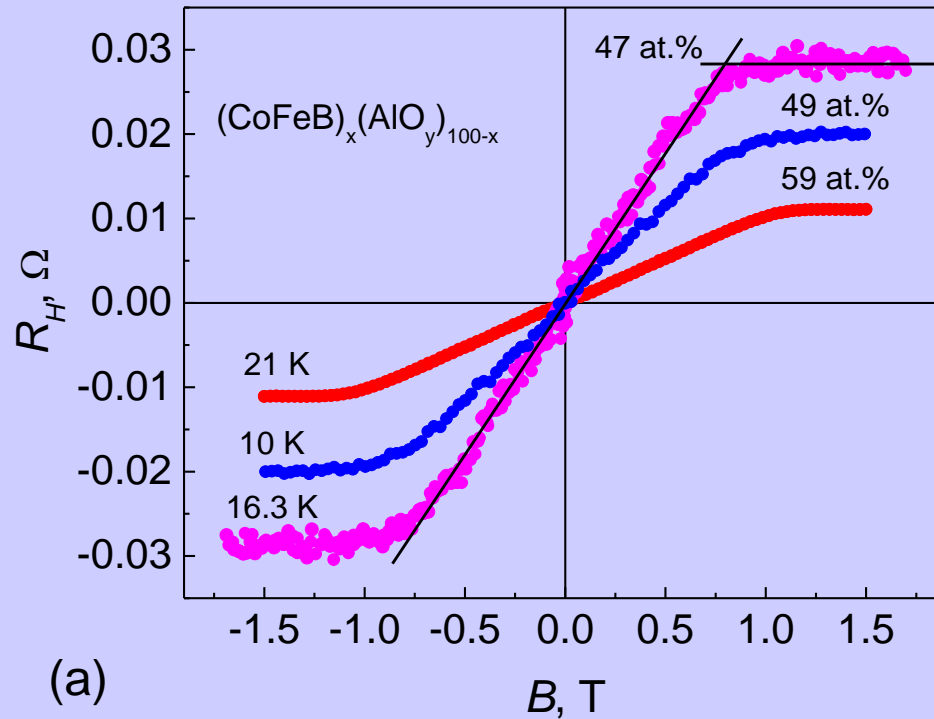
Lorentz Force



$$B = H + 4\pi M(1 - N)$$

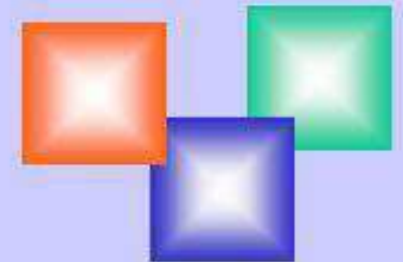


Spin-Orbit Coupling

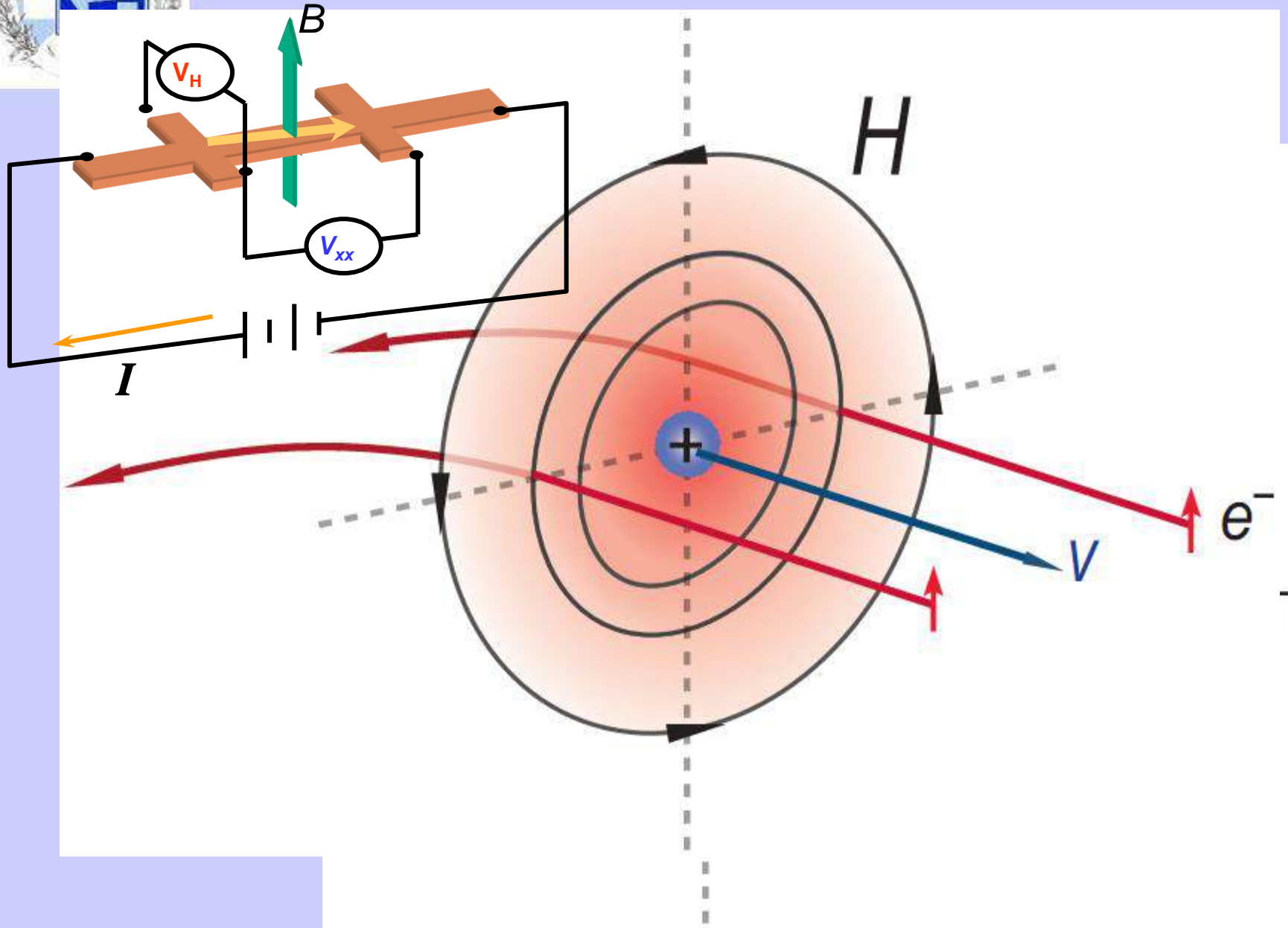


(a)

$$\rho_H = R_0 B + 4\pi R_s M$$



Spin-orbit coupling



1880 – Discovery of AHE – Hall

1940 – First idea about SOI – Rudnitskii

1954 – First theory – Karplus and Luttinger

1956-1970- Mechanisms of AHE – Luttinger, Smit, Berger

1971 – Prediction of Spin Hall effect- D'yakonov and Perel

1999 - Repeated prediction –Hirsch (resurgence)

2004 - First observation of Spin Hall effect - Awschalom

Even a couple of years ago spin Hall effects were considered mostly an academic curiosity. But more recently, the situation has changed with the experimental demonstration of spin Hall effects sufficiently large for being practically useful, i.e., for magnetization switching or exciting magnetization dynamics, and the realization that spin Hall effects can be used to manipulate magnetization in low conductivity or insulating materials, where electrical spin injection is impossible

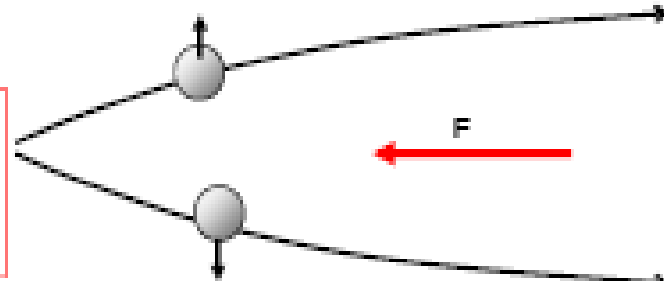
$$\rho_H = R_0 B_z + 4\pi R_s M_z$$

a) Intrinsic deflection

Interband coherence induced by an external electric field gives rise to a velocity contribution perpendicular to the field direction. These currents do not sum to zero in ferromagnets.

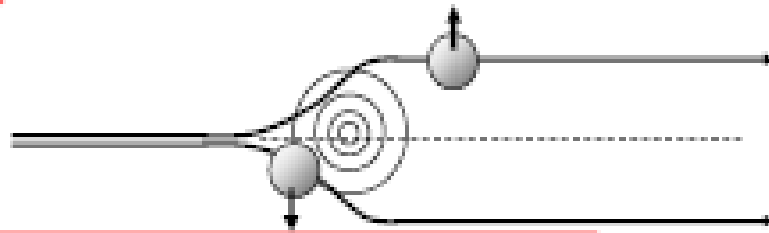
$$\frac{d\langle \hat{r} \rangle}{dt} = \frac{\partial E}{\hbar \partial k} + \frac{e}{\hbar} E \times b_n$$

Electrons have an anomalous velocity perpendicular to the electric field related to their Berry's phase curvature
AH



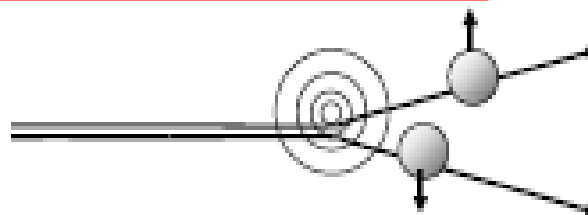
b) Side jump

The electron velocity is deflected in opposite directions by the opposite electric fields experienced upon approaching and leaving an impurity. The time-integrated velocity deflection is the side jump.



c) Skew scattering

Asymmetric scattering due to the effective spin-orbit coupling of the electron or the impurity.



$$(R_s)^{sc} = a\rho_0 + b\rho_0^2$$

$$(R_s)^{KL} = A\rho^2$$

$$(R_s)^{sj} = B\rho^2$$

$$(R_s) = D\rho^{0.4-0.2}$$

$$(\sigma_{xy}) \propto \sigma_{xx}^{1.6-1.8}$$

$$(\sigma_{xy}) \propto \sigma_{xx}^{1.5}$$

AEH in hopping

A.Vedyaev and A.Granovsky, Phys. Solid State **28**, 2310 (1986).

<1 $\mu\Omega\text{cm}$

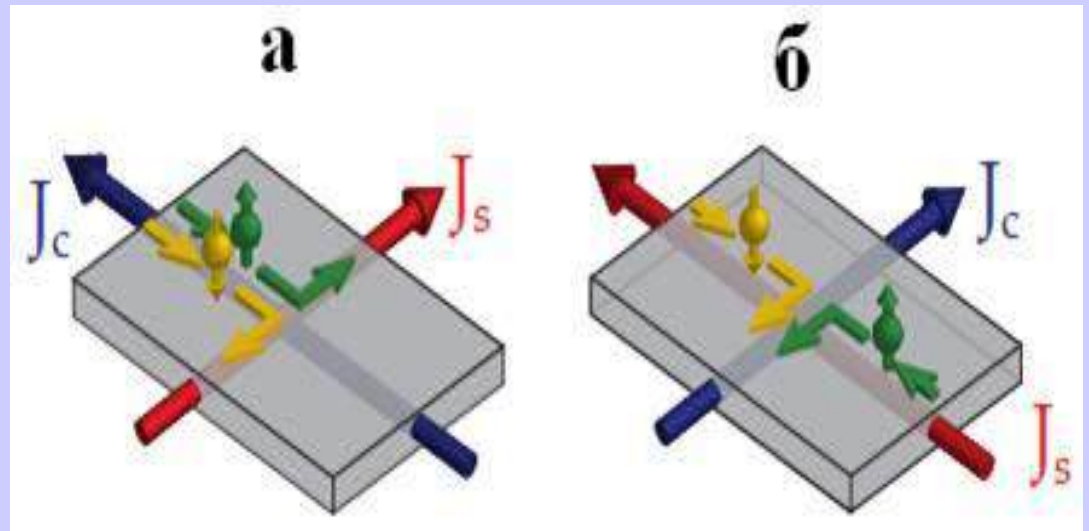
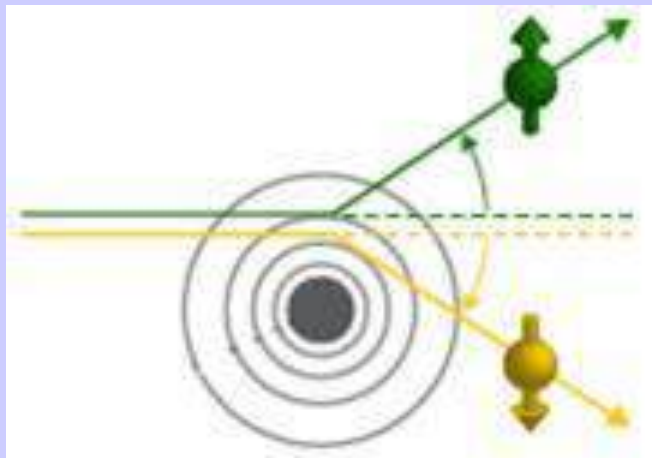
<100 $\mu\Omega\text{cm}$

>100 $\mu\Omega\text{cm}$

ρ

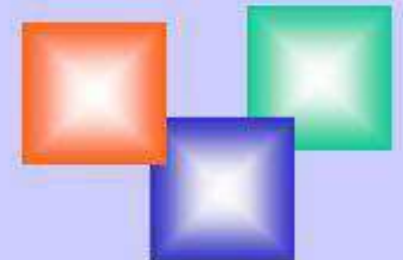


Direct and inverse Spin Hall effect



Нерешенный вопрос

Why it is so large?
Extrinsic or Intrinsic?
Rashba SOI?





Future: From charge current to pure spin current

$$J_e = J_{\uparrow} + J_{\downarrow} \quad (1)$$

$$J_s = J_{\uparrow} - J_{\downarrow} \quad (2)$$

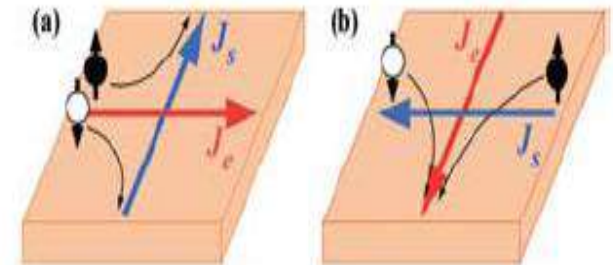
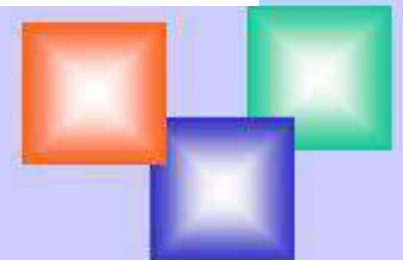
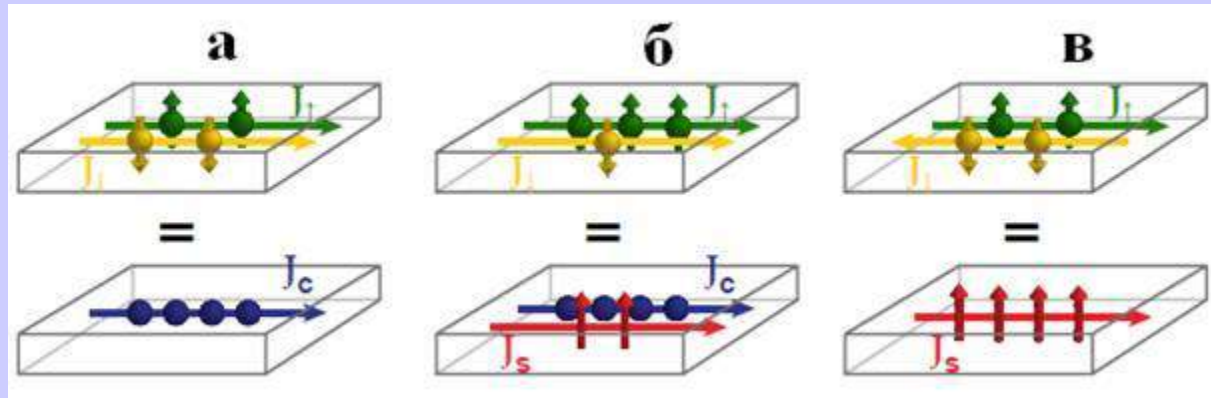


Fig. 6: Schematic illustration of (a) direct and (b) inverse spin-Hall effects in a nonmagnetic material. J_e and J_s are the charge and spin currents, respectively.

Spin Hall Effect





Виды токов: а) обычный электрический ток J_c (токи частиц со спинами вверх J_\uparrow и вниз J_\downarrow одинаковы по величине $J_\uparrow = J_\downarrow$ и направлены в одну сторону),
 б) спин-поляризованный ток (токи частиц со спинами вверх J_\uparrow и вниз J_\downarrow направлены в одну сторону, но неодинаковы по величине $J_\uparrow > J_\downarrow$),
 в) спиновый ток (токи частиц со спинами вверх J_\uparrow и вниз J_\downarrow направлены навстречу друг другу и одинаковы по величине $J_\uparrow = J_\downarrow$)



Термоспинтроника=spin caloritronics

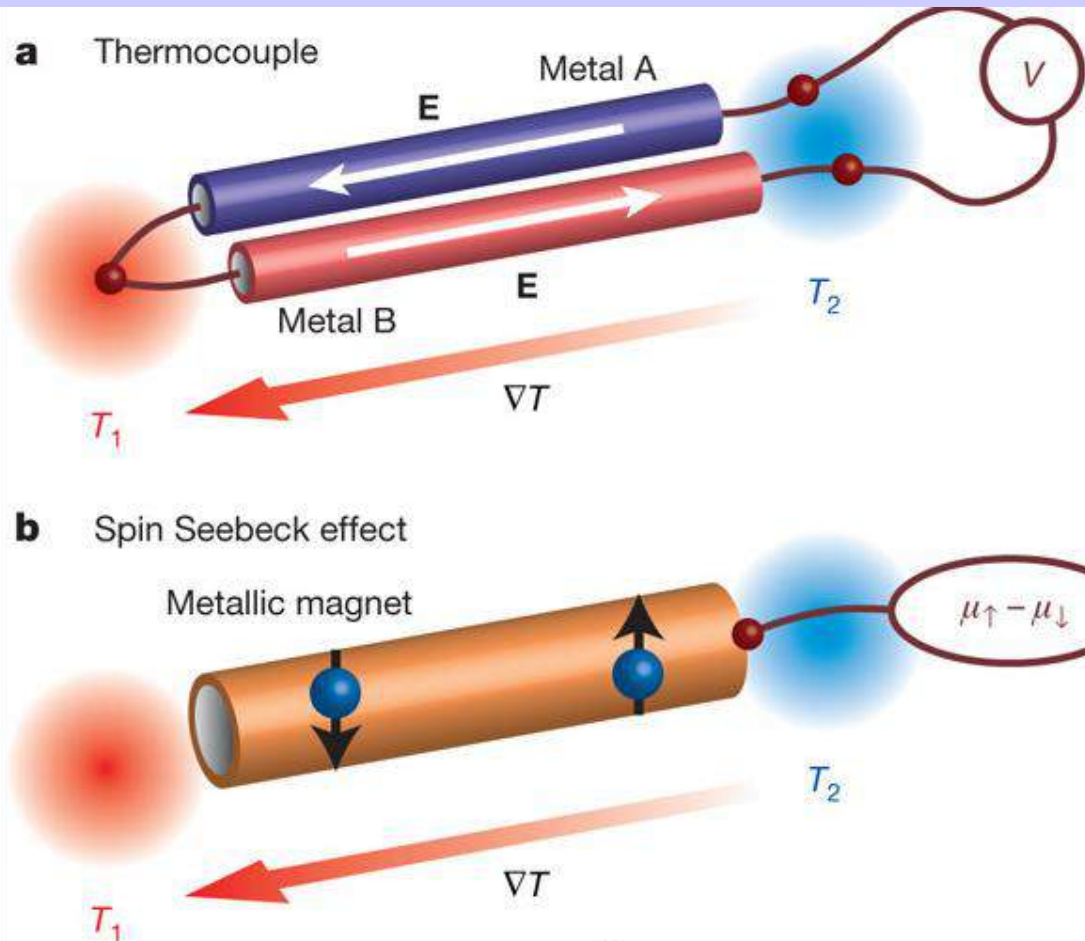


Рис. 1. а — изображение термопары, состоящей из двух разнородных металлов А и В, соединенных друг с другом. Металлы имеют разные коэффициенты Зеебека, поэтому напряжение, возникающее между «холодными» концами термопары, прямо пропорционально разности температур $T_1 - T_2$ между «горячим» и «холодным» концами.

б — объяснение спинового эффекта Зеебека. В металлическом магните электроны проводимости в состояниях «спин вверх» и «спин вниз» имеют разные коэффициенты Зеебека. Если к магниту приложить температурный градиент, то спиновый ток $\mu_{\uparrow} - \mu_{\downarrow}$ будет пропорционален разности температур на концах. Рис. из обсуждаемой статьи в *Nature*

СПИН ТОРК

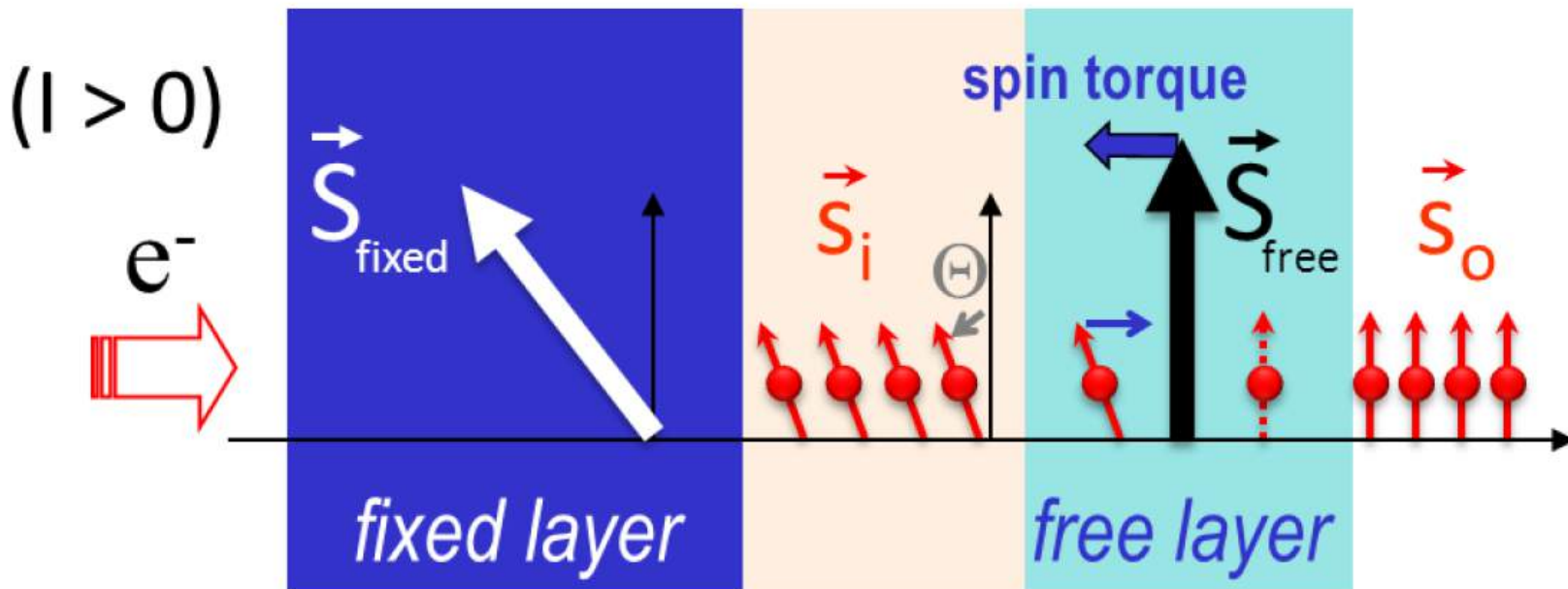
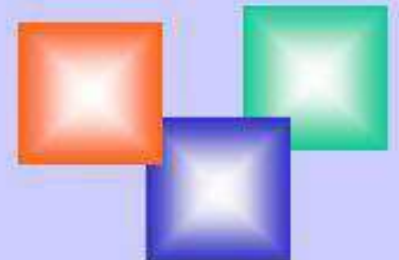


Figure 1: Spin torque principle: in a ferromagnet/non-magnetic/ferromagnet trilayer, the transverse spin component of the conduction electrons is absorbed as they pass through the free layer, generating a torque on the local magnetization: the spin-transfer torque.

За счет спин торка возникает возможность управлять намагниченностью не магнитным полем, а током





“IN THE THEORY THERE IS NO DIFFERENCE
BETWEEN PRACTICE AND THEORY.
BUT IN PRACTICE THERE IS.”

Conference on Symbolic Logic

THANK YOU!!!

