

Co to jest spin?



Pole elektryczne

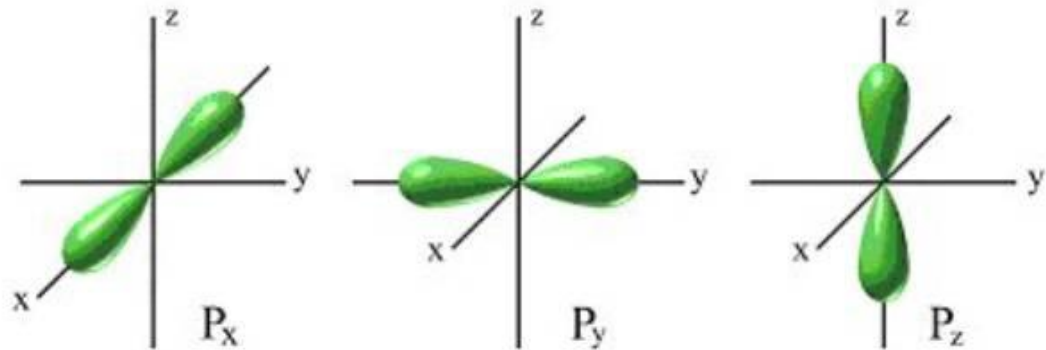
Efekt Starka dla atomu wodoru

Pole elektryczne E

$$H' = \vec{p}\vec{E} = ezE_z$$

Moment dipolowy p

Atom w polu ligandów:



http://pl.wikibooks.org/wiki/Mechanika_kwantowa/Rachunek_zaburzeń_dla_równania_Schrödingera_niezależnego_od_czasu

Pole elektryczne

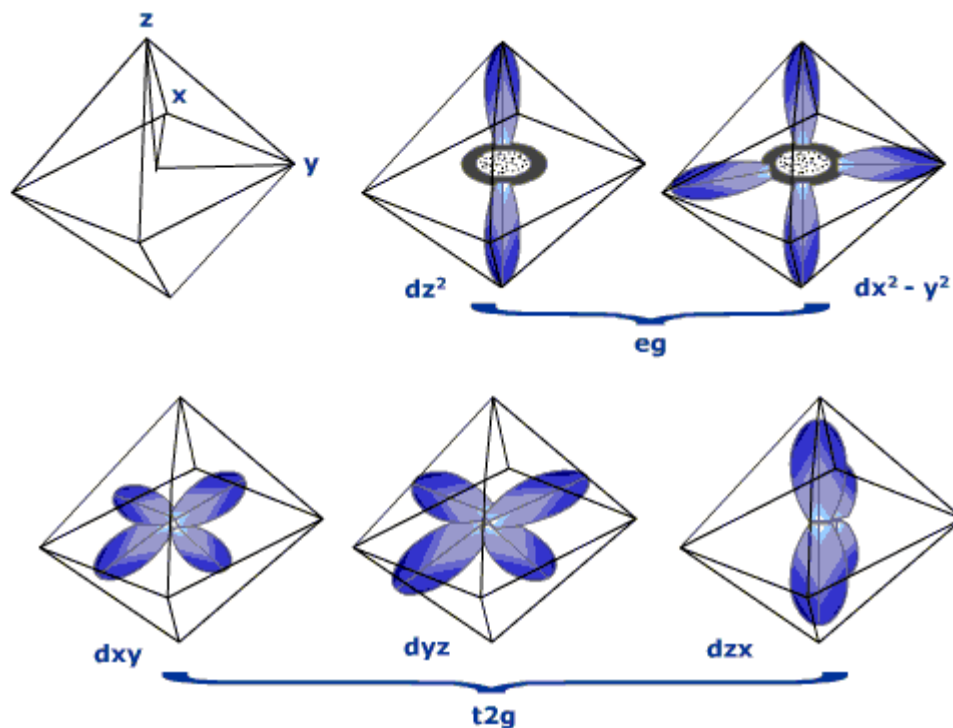
Efekt Starka dla atomu wodoru

Pole elektryczne E

$$H' = \vec{p}\vec{E} = ezE_z$$

Moment dipolowy p

Atom w polu ligandów:
(symetria oktaedryczna)



<http://www.tutorvista.com/content/chemistry/chemistry-iv/coordination-compounds/crystal-field-splitting.php>

Pole magnetyczne i spin

Pole magnetyczne:

$$H' = -\vec{m}\vec{B}$$

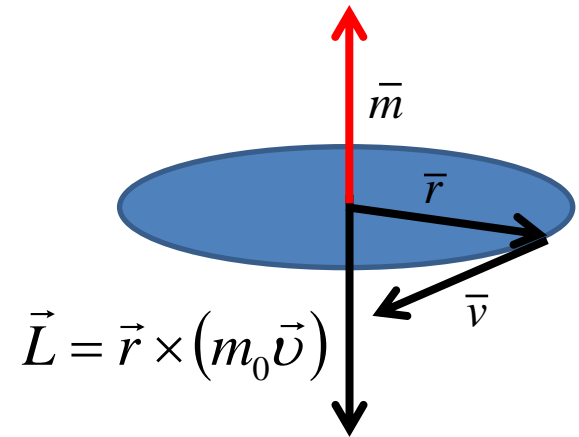
Klasycznie:

Moment magnetyczny

$$|\vec{m}| = |I\vec{S}| = \frac{e}{T} \pi r^2 = \frac{e}{2\pi r / v} \pi r^2 = \frac{1}{2} r v \quad [\text{Am}^2]$$

stąd:

$$\vec{m} = -\frac{e}{2m_0} \vec{L} = -\frac{\mu_B}{\hbar} \vec{L}$$



magneton Bohra $\mu_B = \frac{\hbar e}{2m_0}$

$$H' = -\vec{m}\vec{B} = \frac{\mu_B}{\hbar} \hat{L}\vec{B}$$

$$\hat{L} = (\hat{L}_x, \hat{L}_y, \hat{L}_z)$$

Pole magnetyczne i spin

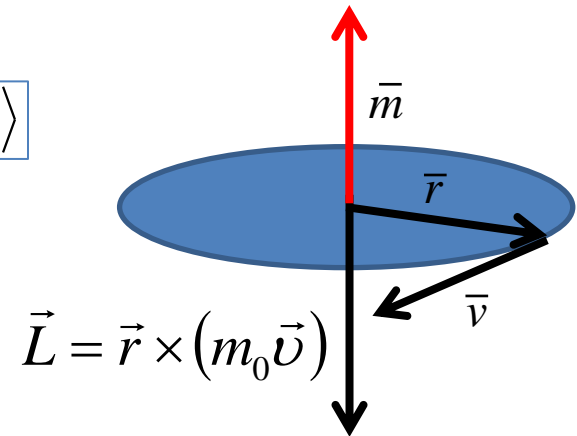
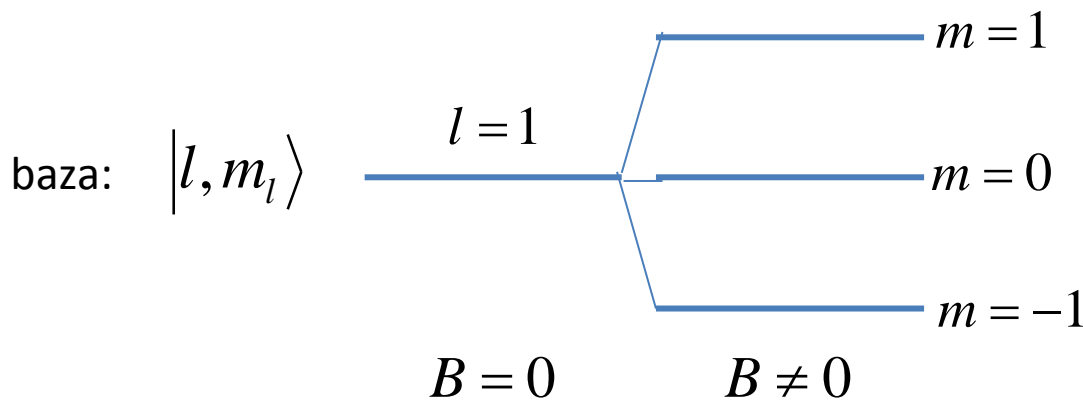
Pole magnetyczne:

$$H' = -\vec{m}\vec{B} = \frac{\mu_B}{\hbar} \hat{L}\vec{B}$$

dla $\vec{B} = (0, 0, B_z)$

mamy: $H' = \frac{\mu_B}{\hbar} B_z \hat{L}_z = \mu_B B_z m$ gdzie: $m = -l, -l+1, \dots, l$

Tym razem to liczba kwantowa $|n, l, m\rangle$



Pole magnetyczne i spin

Pole magnetyczne:

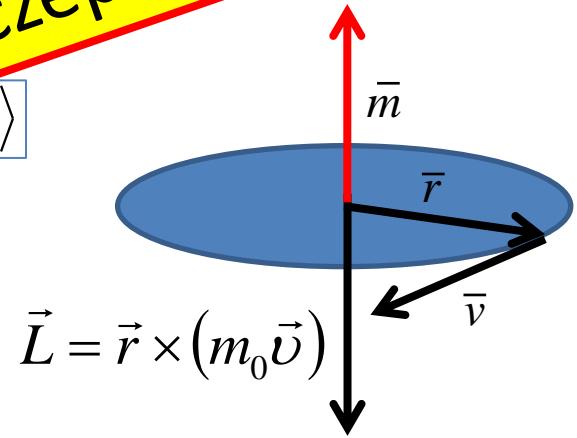
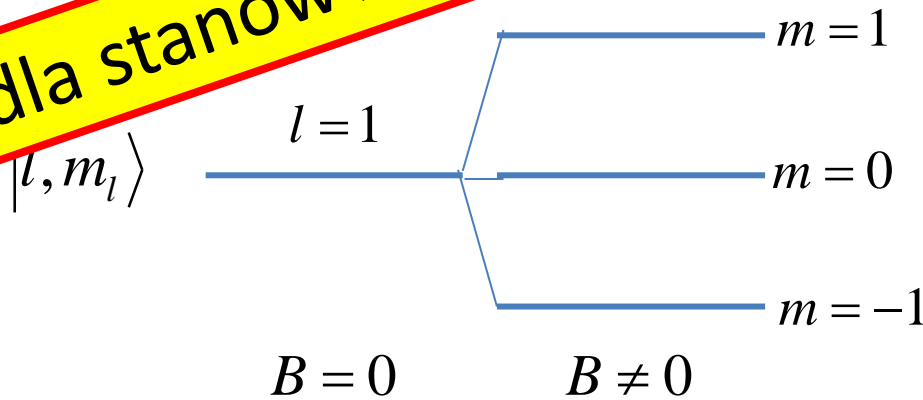
$$H' = -\vec{m}\vec{B} = \frac{\mu_B}{\hbar} \hat{L}\vec{B}$$

dla $\vec{B} = (0, 0, B_z)$

mamy: $H' = \frac{\mu_B}{\hbar} B_z \hat{L}_z = \mu_B B_z m$ gdzie: $m = -l, -l+1, \dots, l-1, l$

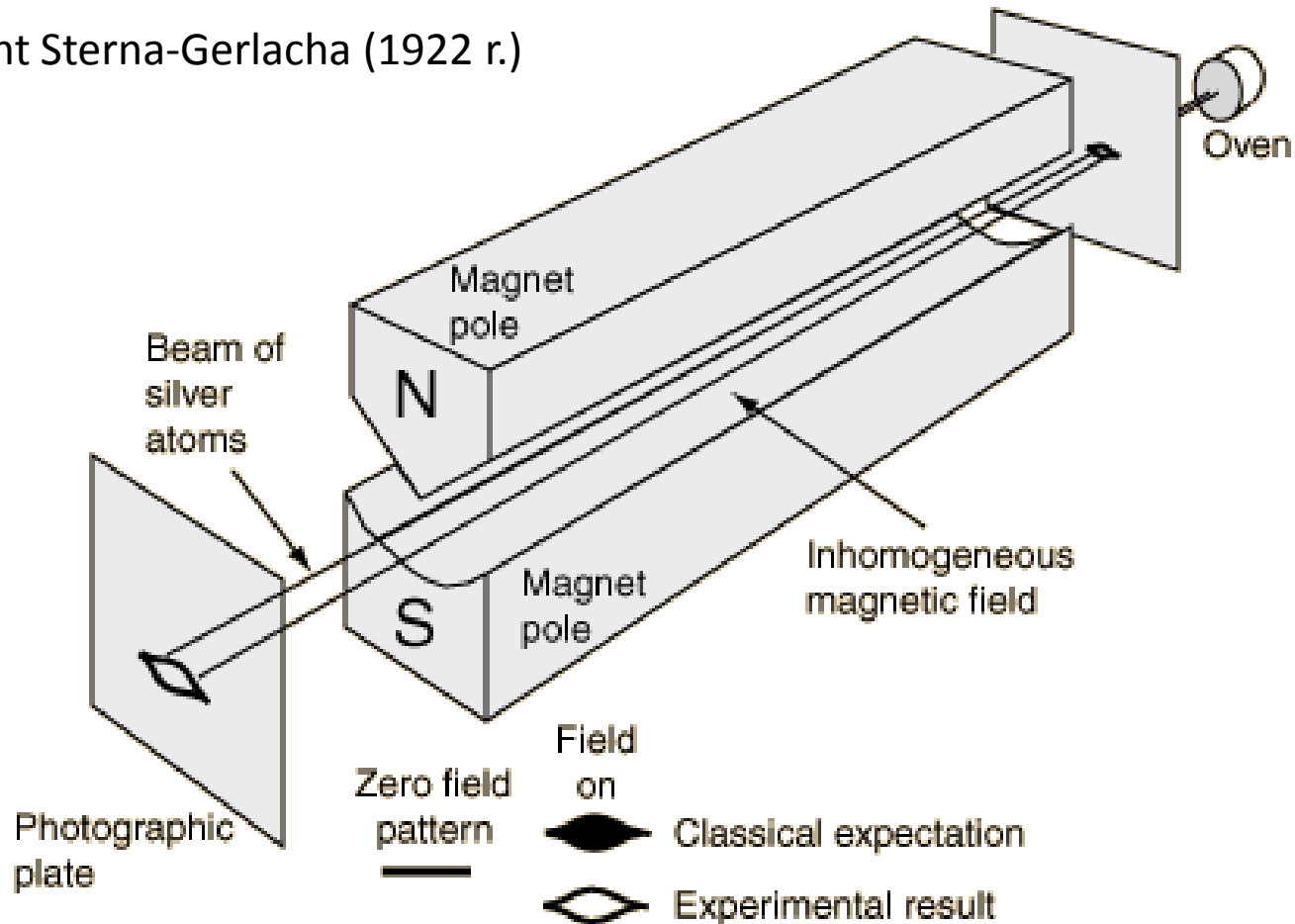
Tym razem to $|l, m\rangle$

Czy dla stanów s ($l=0$) nie ma rozszczepienia w polu B ?



Pole magnetyczne i spin

Eksperyment Sterna-Gerlacha (1922 r.)



Pole magnetyczne i spin

Spin, oddziaływanie spin-orbita

$$\psi(\vec{r}, S_z) = \psi(\vec{r})\chi(S_z)$$

Operator spinu $\hat{\vec{S}} = (\hat{S}_x, \hat{S}_y, \hat{S}_z)$

Spinor

$$[\hat{S}_x, \hat{S}_y] = i\hbar\hat{S}_z \text{ etc.}$$

macierze Pauliego: $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z$

$$\hat{S}_x = \frac{1}{2}\hbar\sigma_x = \frac{1}{2}\hbar\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{S}_y = \frac{1}{2}\hbar\begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{S}_z = \frac{1}{2}\hbar\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

rzuty spinu na oś z: $\chi_{\uparrow} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \chi_{\downarrow} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Pole magnetyczne i spin

Spin, oddziaływanie spin-orbita

Sprawdzić działanie operatorów $\hat{S}_z, \hat{S}_x, \hat{S}_y, \hat{S}^2$

$$H' = \frac{\mu_B}{\hbar} (\hat{L} + g\hat{S}) \vec{B}$$

g-czynnik, zapewnia zgodność z eksperymentem

macierze Pauliego:

$$\hat{S}_x = \frac{1}{2} \hbar \sigma_x = \frac{1}{2} \hbar \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{S}_y = \frac{1}{2} \hbar \begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix}$$

$$\hat{S}_z = \frac{1}{2} \hbar \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

rzuty spinu na oś z: $\chi_{\uparrow} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \chi_{\downarrow} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Pole magnetyczne i spin

Spin, oddziaływanie spin-orbita

Sprawdzić działanie operatorów $\hat{S}_z, \hat{S}_x, \hat{S}_y, \hat{S}^2$

Sprawdzić działanie operatorów $[\hat{S}_x, \hat{S}_y] = i\hbar\hat{S}_z$

Znaleźć stany własne $\hat{S}_z, \hat{S}_x, \hat{S}_y, \hat{S}^2$

Znaleźć rzut spinu na dowolną oś w przestrzeni zdefiniowaną kątami (θ, ϕ) . Założyć, że cząstka znajduje się w stanie o określonym rzucie $m_s = +\frac{1}{2}\hbar$ na oś z.

macierze Pauliego:

$$\hat{S}_x = \frac{1}{2}\hbar\sigma_x = \frac{1}{2}\hbar\begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix} \quad \hat{S}_y = \frac{1}{2}\hbar\begin{pmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{pmatrix} \quad \hat{S}_z = \frac{1}{2}\hbar\begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$$

rzuty spinu na oś z: $\chi_{\uparrow} = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad \chi_{\downarrow} = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$

Pole magnetyczne i spin

Spin, oddziaływanie spin-orbita

Sprawdzić działanie operatorów $\hat{S}_z, \hat{S}_x, \hat{S}_y, \hat{S}^2$

$$H' = \frac{\mu_B}{\hbar} (\hat{L} + g\hat{S}) \vec{B}$$

g-czynnik, zapewnia zgodność z eksperymentem

Całkowity moment pędu: $\hat{J} = \hat{L} + \hat{S}$

Całkowity moment magnetyczny: $\hat{M} = \hat{M}_L + \hat{M}_S = \underset{=1}{-g_L \frac{\mu_B}{\hbar} \hat{L}} - \underset{=2}{g_S \frac{\mu_B}{\hbar} \hat{S}}$

$$\hat{M} \nparallel \hat{J}$$

magnetyczna anomalia spinu

No dobra, ale...

- **Co to jest spin?**

Co to jest spin?

- Co to jest masa?

$$\vec{F} = m \vec{a}$$

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



Mariusz Pudzianowski <http://www.pudzian.pl/>

Co to jest spin?

- Co to jest ładunek?

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2}$$



Co to jest spin?

- Co to jest pęd?

$$\vec{p} = m \vec{v}$$



Marco Materazzi Zinedine Zidane

Co to jest spin?

- Co to jest moment pędu?

$$\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p}$$



Co to jest spin?

- Spin?



Sebastian Münster, *Cosmographia* in 1544



Disney

<http://www.floridahistory.com/us@1570.html>

Trochę historii

<1000 r. p.n.e. Mezopotamia: niektóre rudy żelaza to „żyjące kamienie”.

600 r. p.n.e. Tales z Miletu: „magnetyt ma duszę”, bo przyciąga żelazo.

98-55 r. p.n.e. Lukrecjusz (Titus Lucretius Carus) w poemacie *De Rerum Natura* użył słowa *magnes* jako nazwy dla kamienia pochodzącego z Magnezji na północy Grecji.

23-72 r. Plinusz Drugi (Gaius Plinius Secundus) napisał w *Historia Naturalis*, że według Nikadera (poety greckiego) nazwa *magnes* pochodzi od odkrywcy, niejakiego *Magnesa*, który wspinając się na górę Ida zauważył, że gwoździe jego sandałów przyczepiają się do skały.

...

ok. 1080 r. pierwszy opis magnezu w Chinach

1175 - 1183 r. pierwsze odniesienie do kompasu – Alexander Neckem, angielski mnich z St. Albans, opisuje działający kompas w dziele *De Nominibus Utensilium* (O nazwach rzeczy).

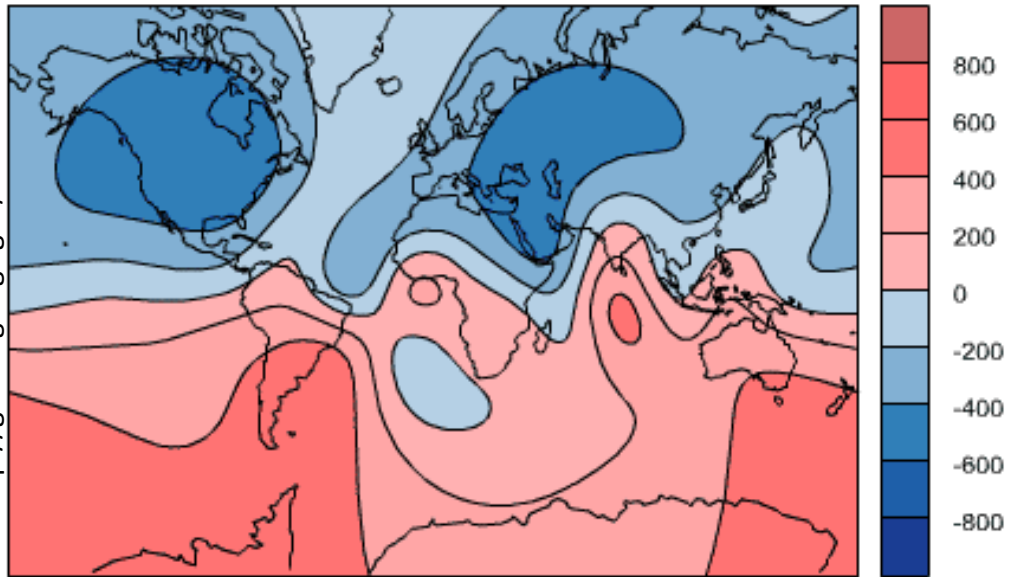
1269 – pierwszy szczegółowy opis do kompasu – Petrus Peregrinus de Marincourt, francuski krzyżowiec opisuje jak zbudowany jest kompas

Magnetyt - Fe_3O_4 , rdza – Fe_2O_3 ,

From Lodestone to Supermagnets. Alberto P. Guimarães

Trochę historii

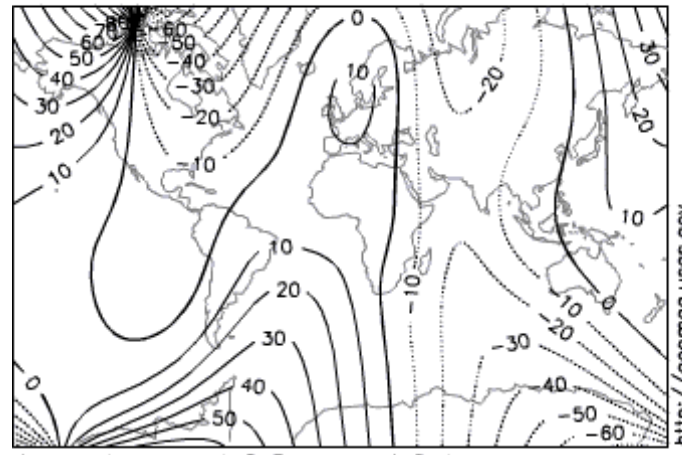
1590
Radial Core Field (relative values)



Model by A. Jackson, A. R. T. Jonkers, M. R. Walker,
Phil. Trans. R. Soc. London A (2000), 358, 957-990.

<http://geomag.usgs.gov>

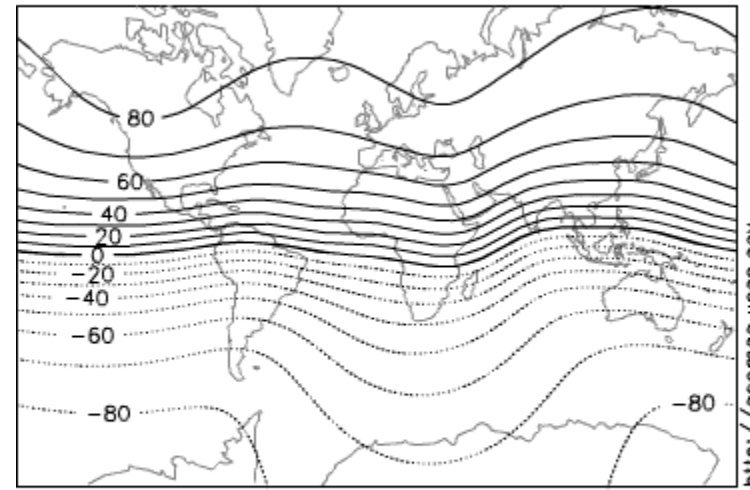
1590
Declination (degrees east)



Model by A. Jackson, A. R. T. Jonkers, M. R. Walker,
Phil. Trans. R. Soc. London A (2000), 358, 957-990.

<http://geomag.usgs.gov>

1590
Inclination (degrees down)



Model by A. Jackson, A. R. T. Jonkers, M. R. Walker,
Phil. Trans. R. Soc. London A (2000), 358, 957-990.

<http://geomag.usgs.gov>

Trochę historii

William Gilbert (1544-1603) w dziele "De magnete" zajął się magnetyzmem i m.in. napisał, że sama Ziemia jest magnesem.

1740 r. pierwszy komercyjny magnes - Gowen Knight oferuje naturalne magnesy naukowcom i navigatorom. Magnesowanie przez pocieranie.

1820 r. Hans Christian Oersted odkrył pole magnetyczne wokół przewodnika w którym płynie prąd.

1823 r. William Sturgeon zbudował pierwszy elektromagnes. Ok. 1825 solenoidy (cewki) budował także Andre Marie Ampere. M.in. odkrył, że poprzez namagnesowanie w cewce można uzyskać magnesy mocniejsze od naturalnych

1855 r. prawa indukcji Michaela Faradaya

1860 r. pierwszy silnik stałoprądowy Zenobe Theophile Gramme. Wcześniej prototypowe silniki budowali Oersted (1820), Faraday (1821), Jacobi (1834), Elias (1842), Froment (1844) oraz Pacinotti (1860)

1871 r. generator prądu stałego Z.T Gramme udoskonalony w 1872 r. przez Niemców Wernera von Siemens i Johanna Georga Halskego.

1873 - Maxwell publikuje *Treatise on Electricity and Magnetism*

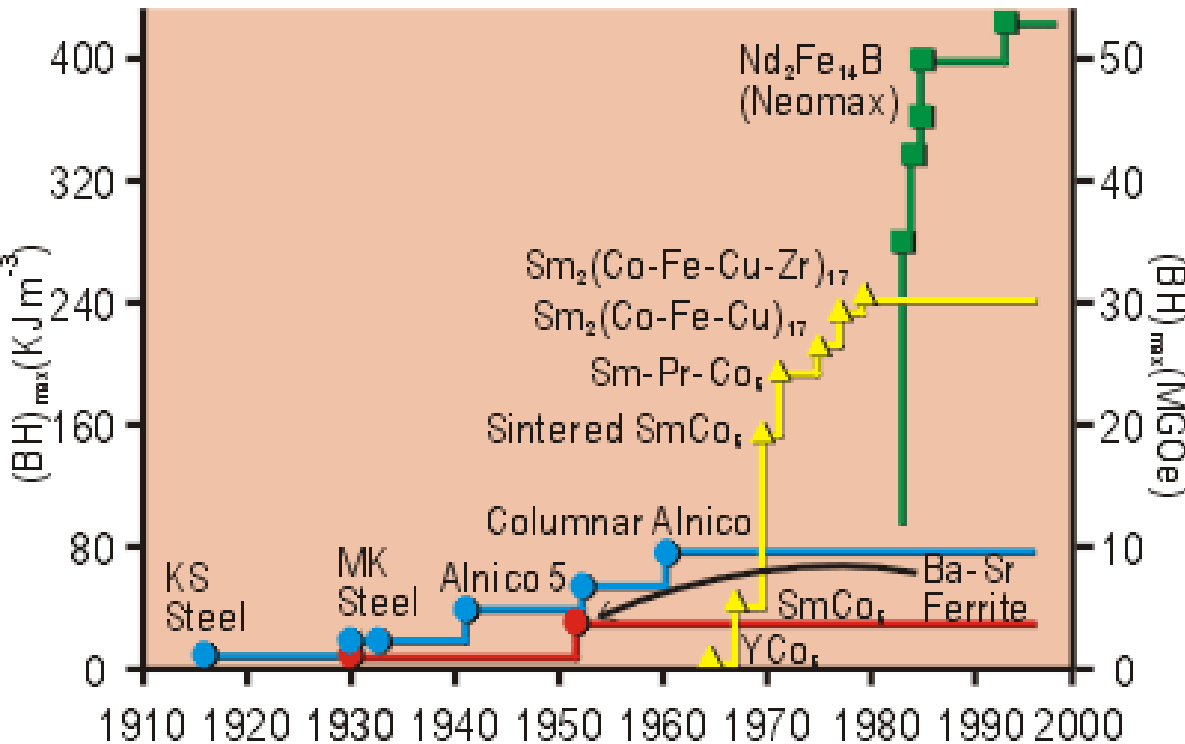
http://www.rare-earth-magnets.com/magnet_university/history_of_magnetism.htm

Trochę historii

- 1895 r. Pierre Curie odkrywa, że ferromagnetyki tracą swoje własności po przekroczeniu pewnej temperatury.
- 1917 r. magnesy kobaltowe: K. Honda and T. Takai
- 1919 r. komercyjne magnesy stalowe
- 1930 r. magnesy Alnico: I. Mishima tworzy stop Al, Ni, Fe
- 1952 r. magnesy ceramiczne Phillipsa (J.J. Went, G.W. Rathenau, E.W. Gorter, G.W. Van Oosterhout) Ba, Sr, Fe, Pb i O.
- 1966 r. magnesy z ziem rzadkich dr Karl J. Strnat z U.S. Air Force Materials Laboratory w bazie sił powietrznych Wright-Patterson odkrywa silny magnes 18 MGOe) Samar-Cobalt (SmCo_5)
- 1972 r. Zaawansowane magnesy ziem rzadkich Karl J. Strnat oraz Alden Ray (30 MGOe) Samar-Cobalt ($\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$).
- 1983 – magnesy żelazo-neodym-bor $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ Magnets General Motors, Sumitomo Special Metals oraz Chińska Akademia Nauk odkrywają rekordowy stop $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ (35 MGOe).
- rekord z 2002 r. naukowcy z Vacuumschmelze GmbH uzyskali w laboratorium 55.6 MGOe Nd-Fe-B (limit teoretyczny ok. 144 MGOe)

Źródło: różne

Trochę historii



<http://www.azom.com/details.asp?ArticleID=637>



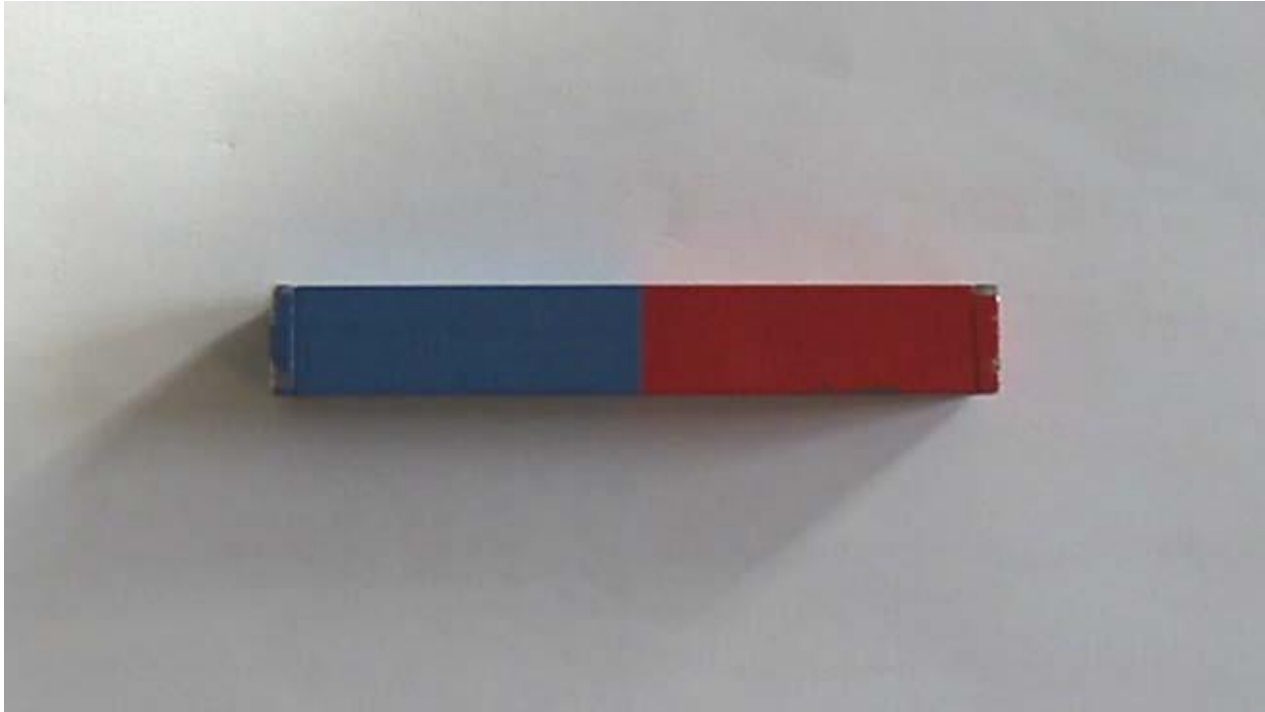
Magnetyt (z 1750 r.) typowy ferryt i magnes z ziem rzadkich. Każdy z nich o gęstości energii 1J.

<http://www.tcd.ie/Physics/Schools/what/materials/magnetism/seven.html>

A lodestone magnet from the 1750's and typical ferrite and rare earth used in modern appliances. Each of these produce about 1J of energy.

Co to jest spin?

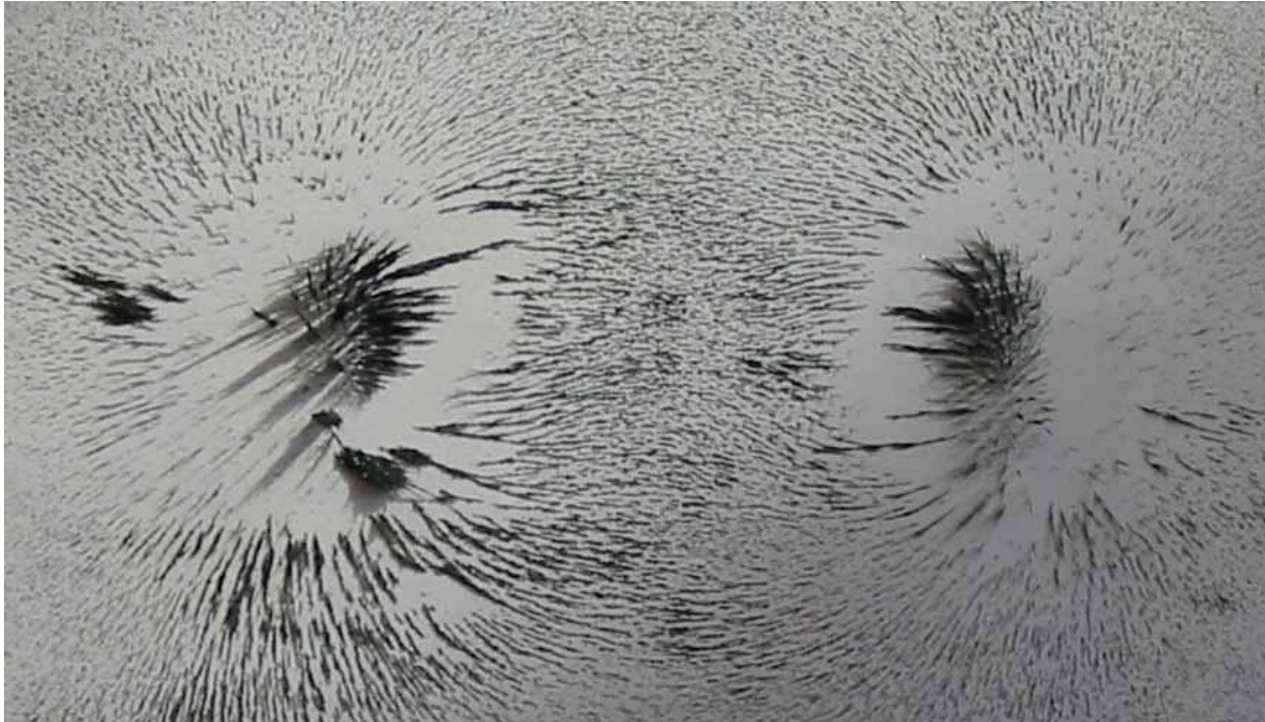
Skąd się biorą magnesy?



http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/magn_pole/stac_mp.html

Co to jest spin?

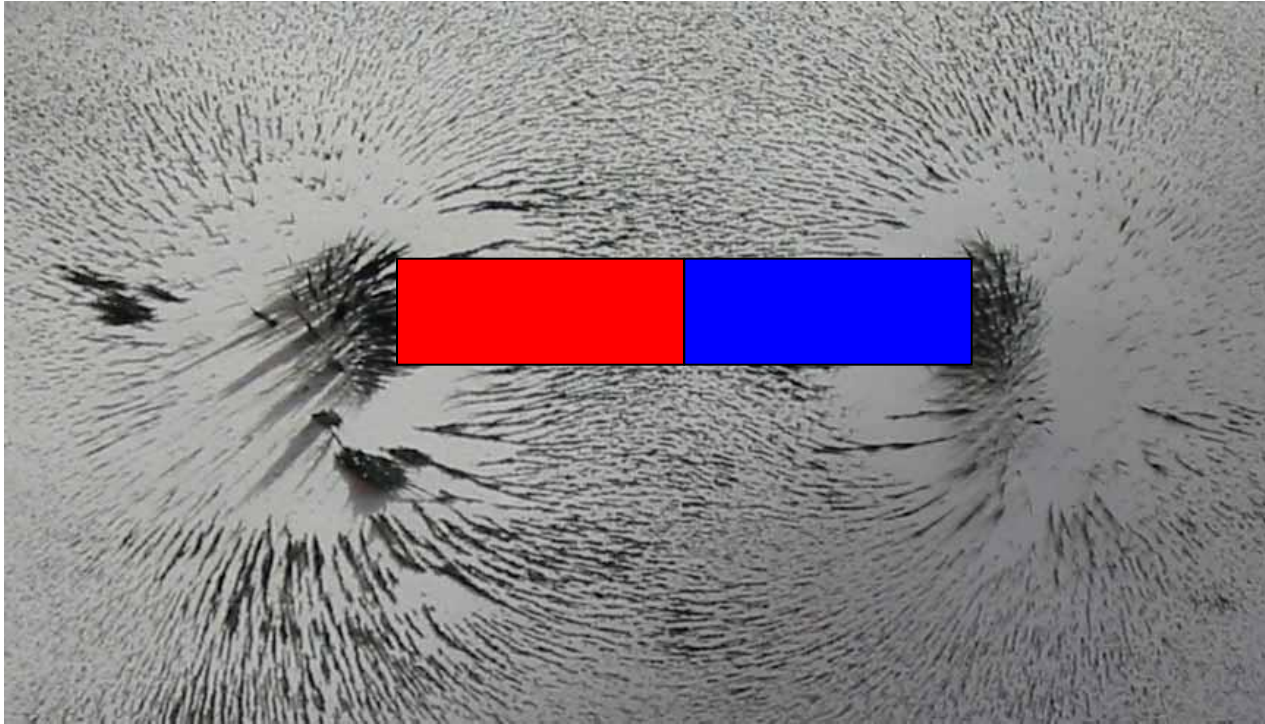
Skąd się biorą magnesy?



http://lucy.troja.mff.cuni.cz/~tichy/elektross/magn_pole/stac_mp.html

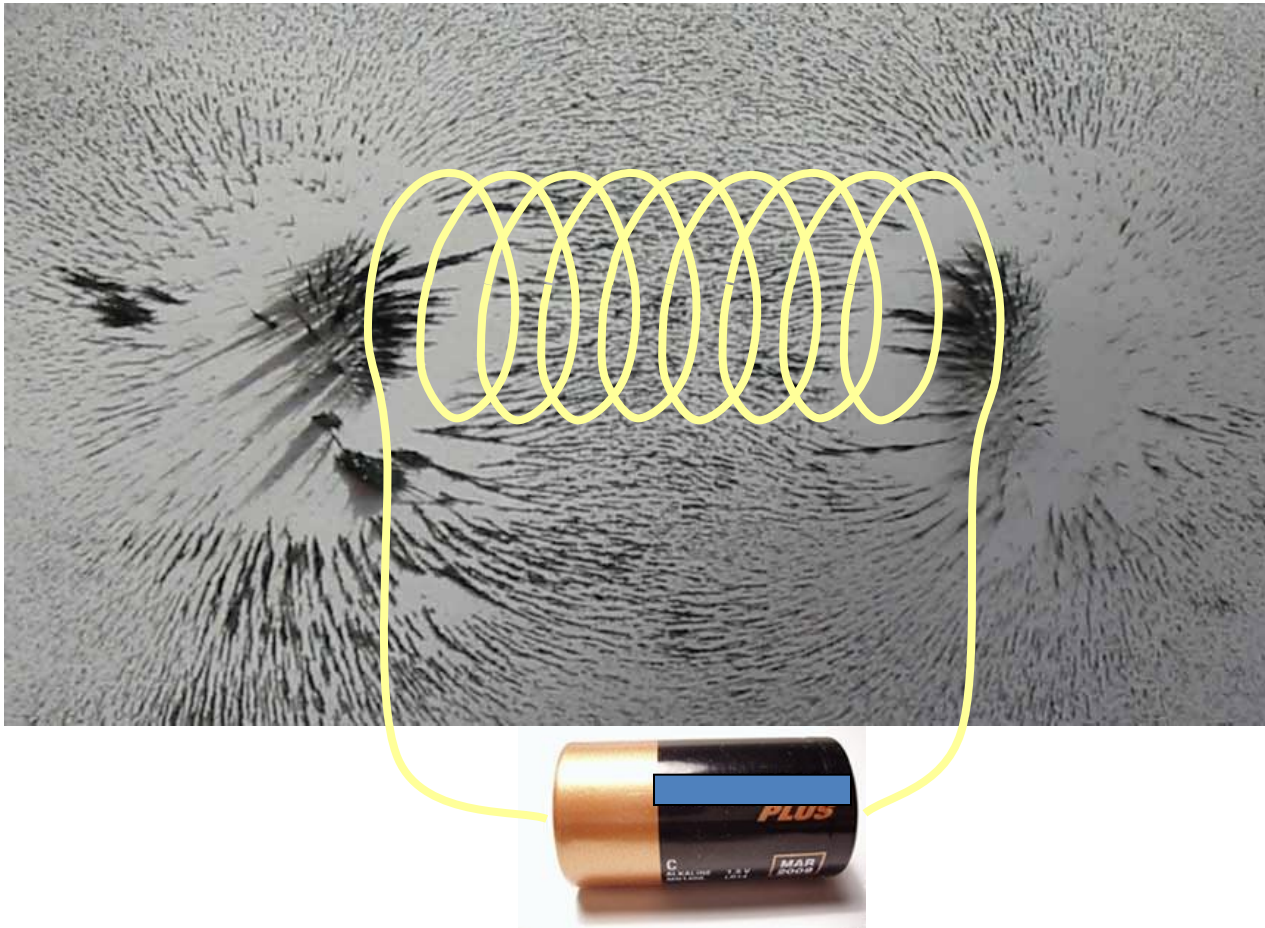
Co to jest spin?

Skąd się biorą magnesy?



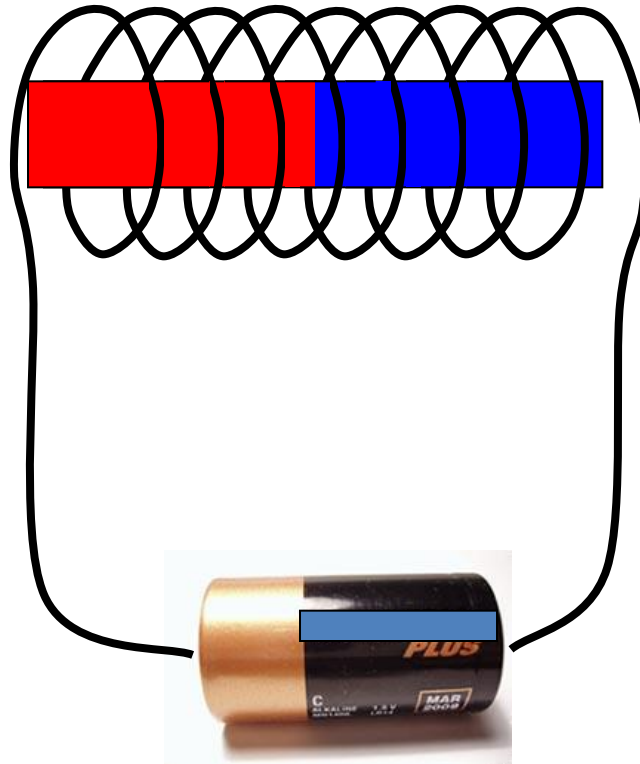
Co to jest spin?

Skąd się biorą magnesy?



Co to jest spin?

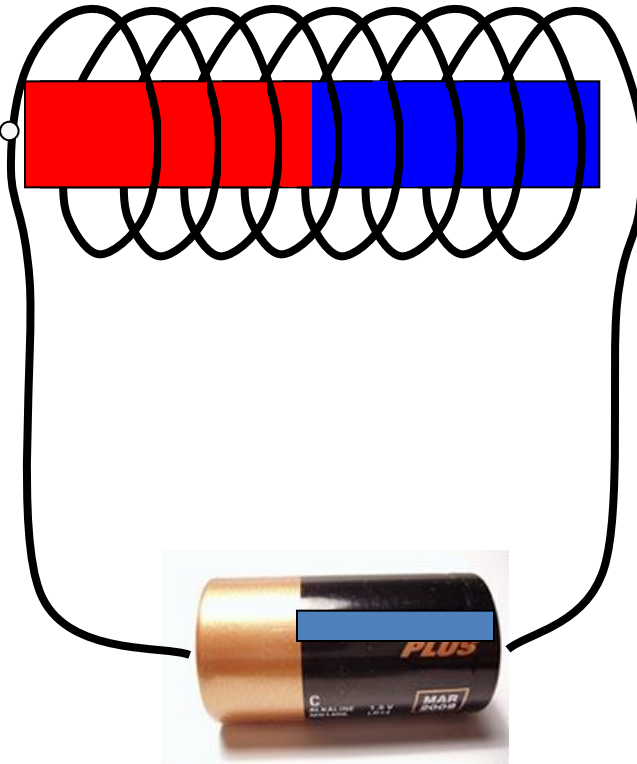
Skąd się biorą magnesy?



Co to jest spin?

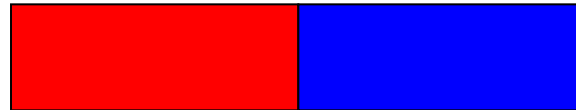
Skąd się biorą magnesy?

Poruszające się ładunki
wywołują pole
magnetyczne...



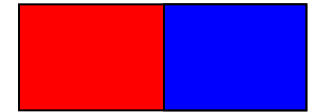
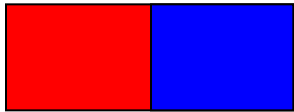
Co to jest spin?

Skąd się biorą magnesy?



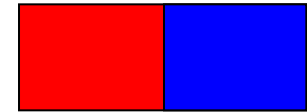
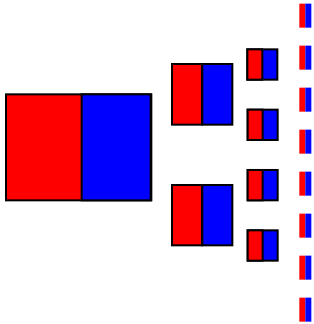
Co to jest spin?

Skąd się biorą magnesy?



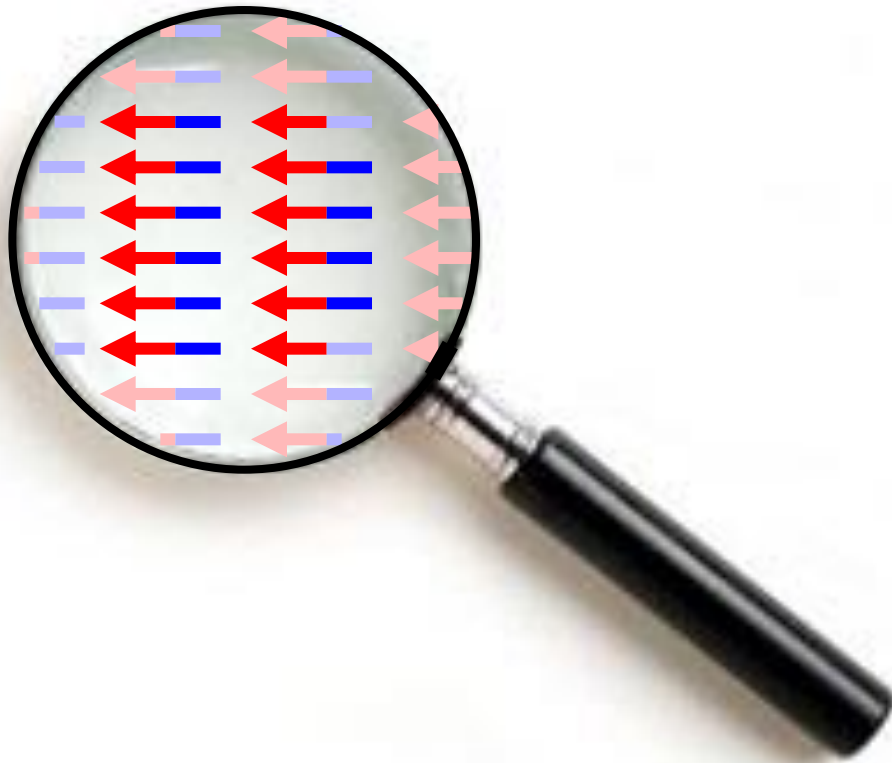
Co to jest spin?

Skąd się biorą magnesy?



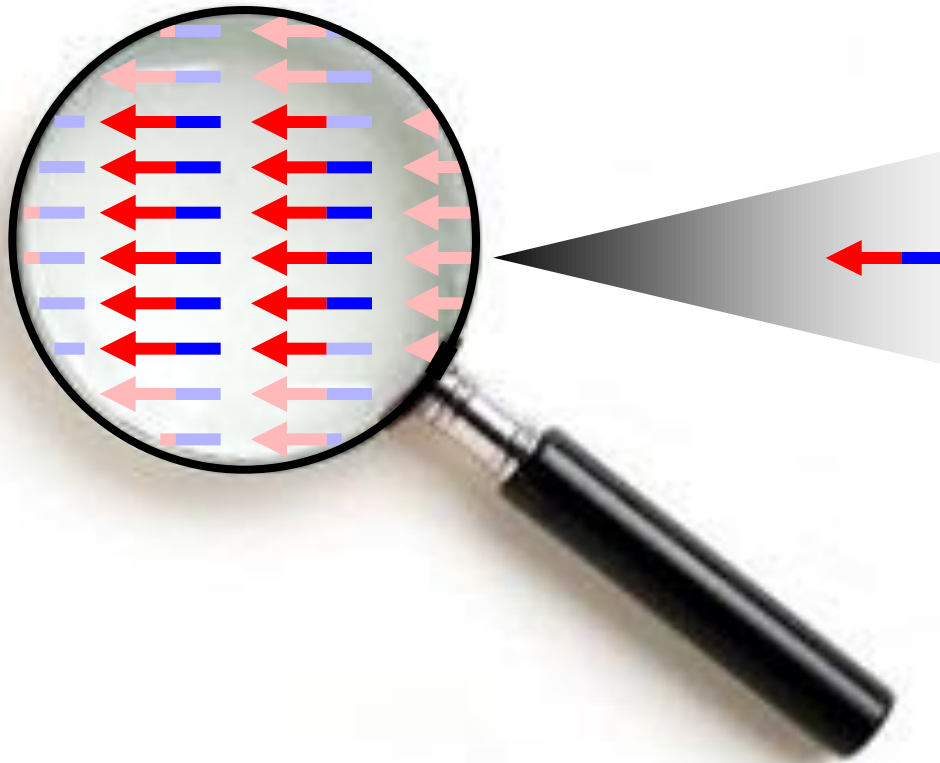
Co to jest spin?

Skąd się biorą magnesy?



Co to jest spin?

Skąd się biorą magnesy?



Te małe magnesiki to elektrony

Co to jest spin?

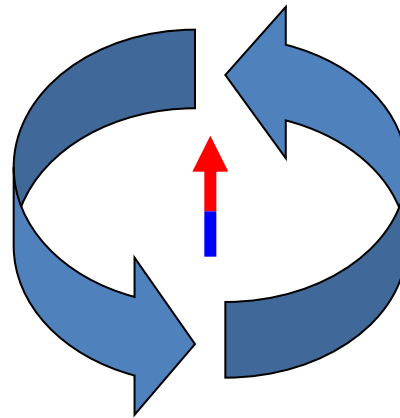
Skąd się biorą magnesy?



Te małe magnesiki to elektrony

Co to jest spin?

Skąd się biorą magnesy?



A więc płynie jakiś prąd?

Co to jest spin?

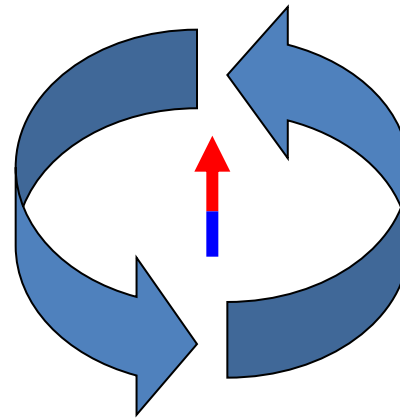
Skąd się biorą magnesy?

Ruch elektronów
wokół jąder
atomowych?

Ruch elektronów
wokół osi?

A więc płynie jakiś prąd?

Wewnętrzna własność
elektronów?

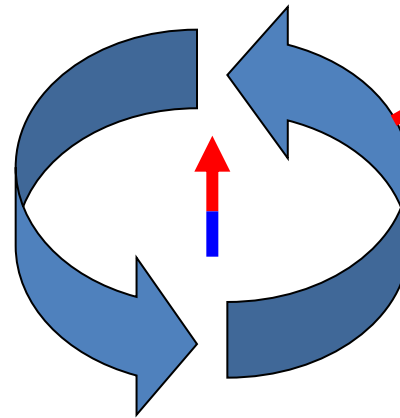


Co to jest spin?

Skąd się biorą magnesy?

~~Ruch elektronów
wokół jąder
atomowych?~~

~~Ruch elektronów
wokół osi?~~



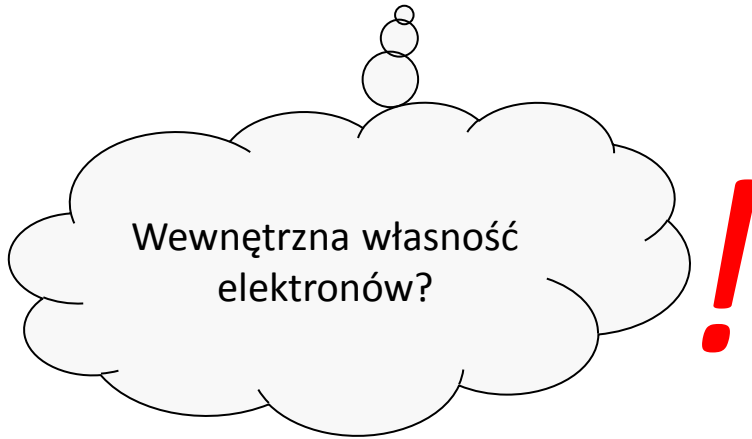
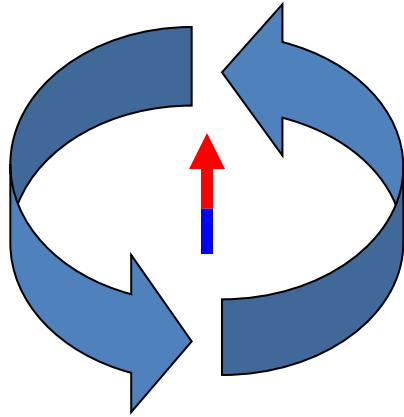
Wewnętrzna własność
elektronów?

tzw: **Wewnętrzny moment pędu**
czyli **SPIN**

tak samo jak **masa** albo **ładunek**

Co to jest spin?

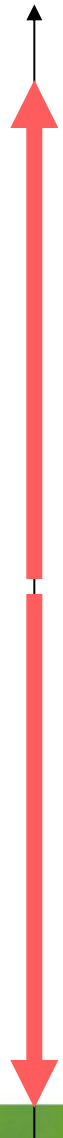
Kwantowy moment pędu



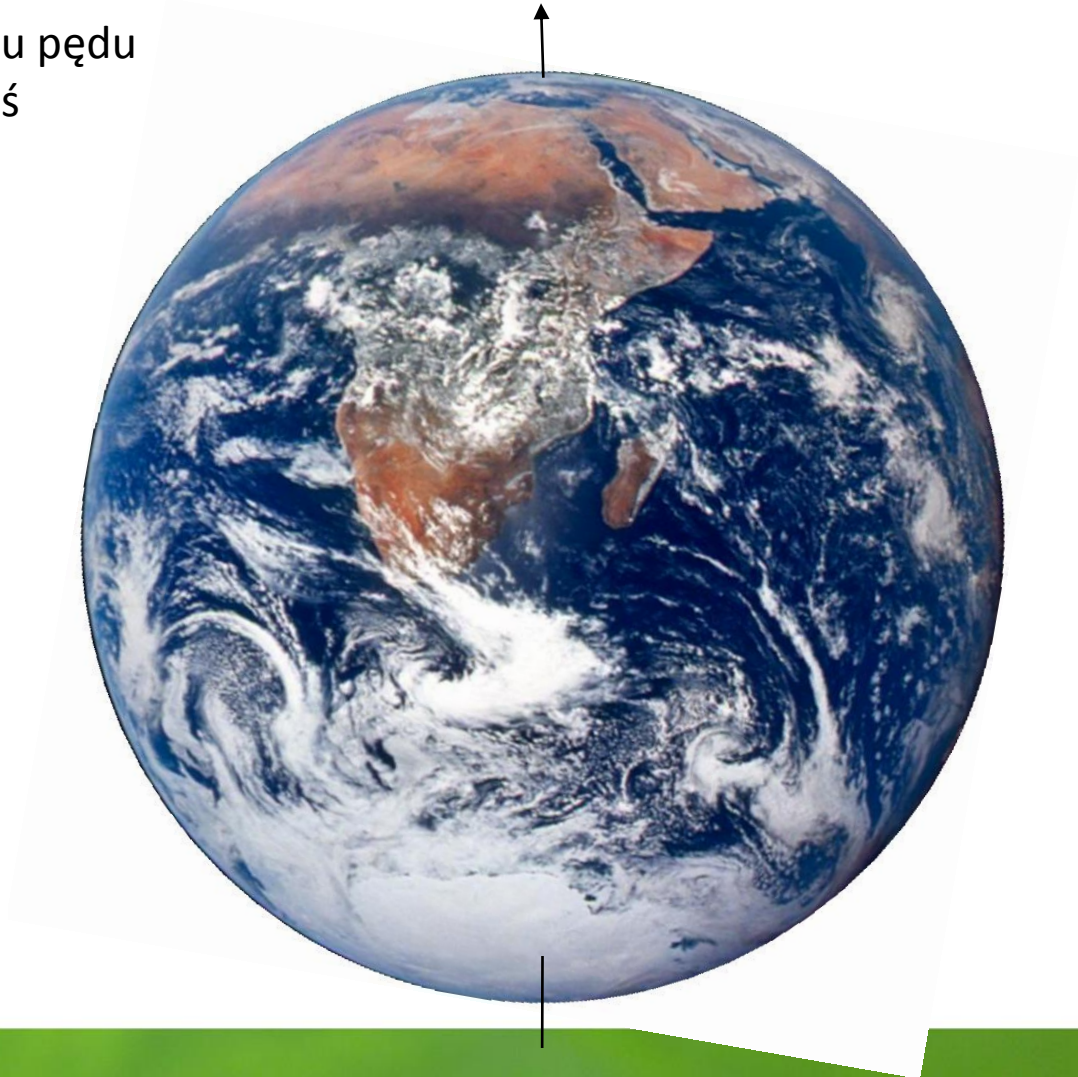
Albert **Einstein** - Johannes Wander **de Haas**,
Berlin 1914,



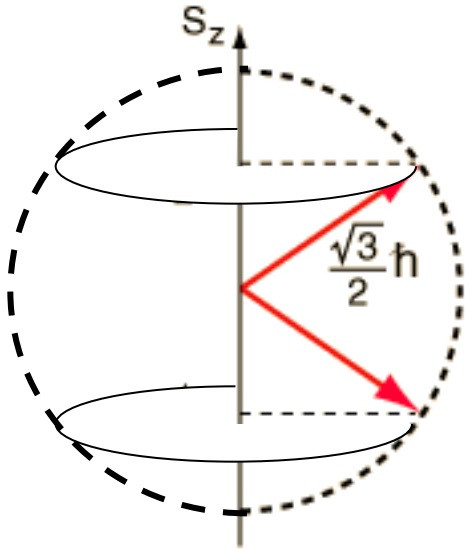
Co to jest spin?



Rzut momentu pędu
na wybraną oś



Co to jest spin?



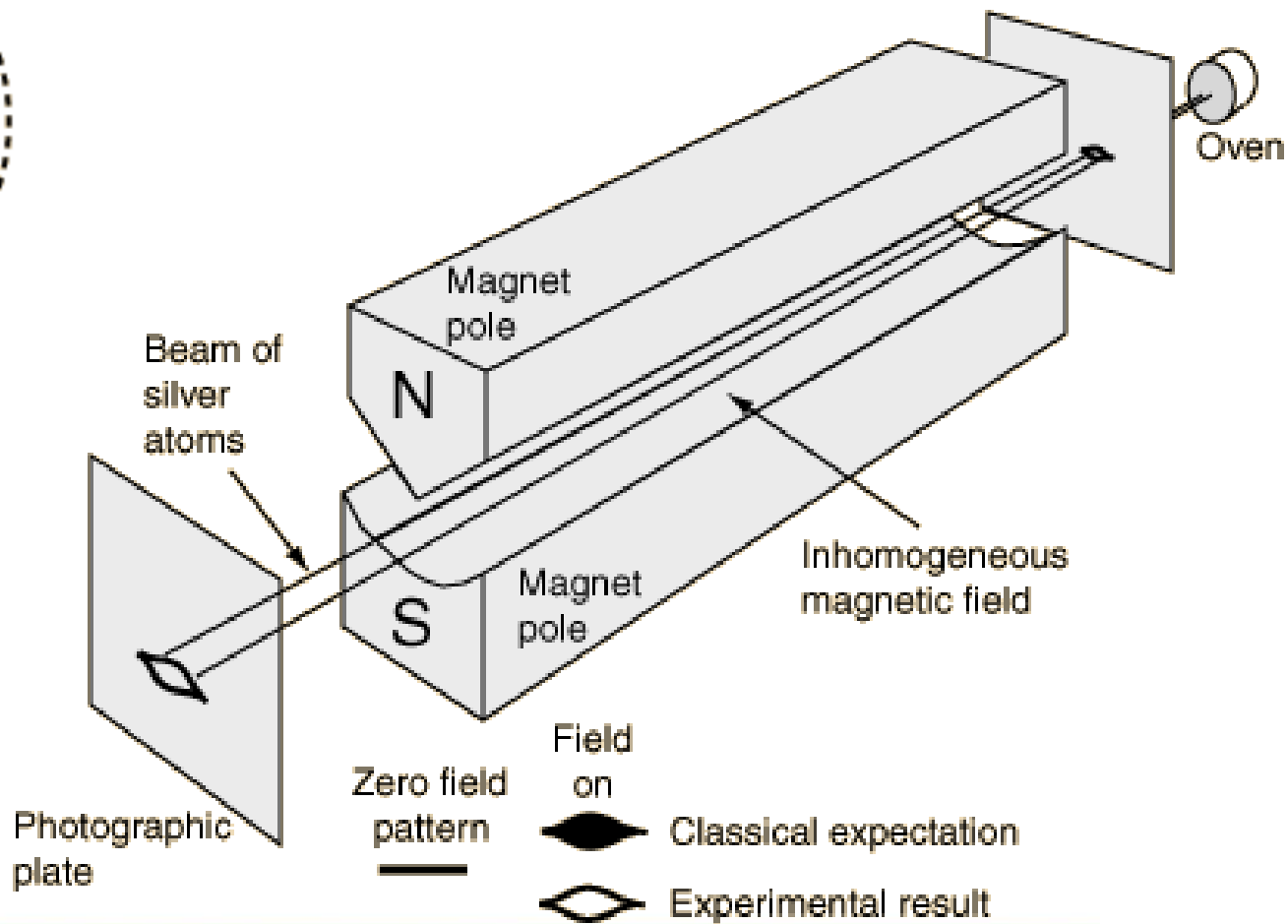
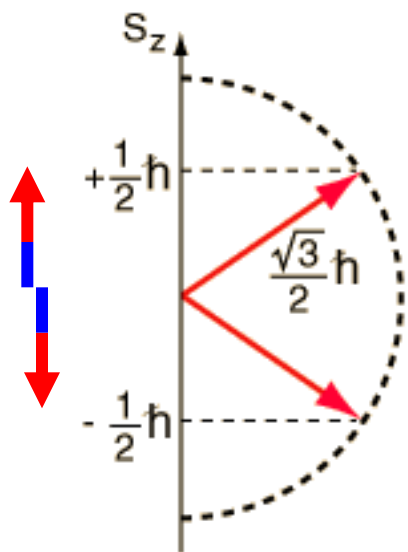
Rzut momentu pędu elektronu na **dowolną** oś ma tylko dwie możliwe wartości:

$$+\frac{1}{2}\hbar \uparrow \quad -\frac{1}{2}\hbar \downarrow$$

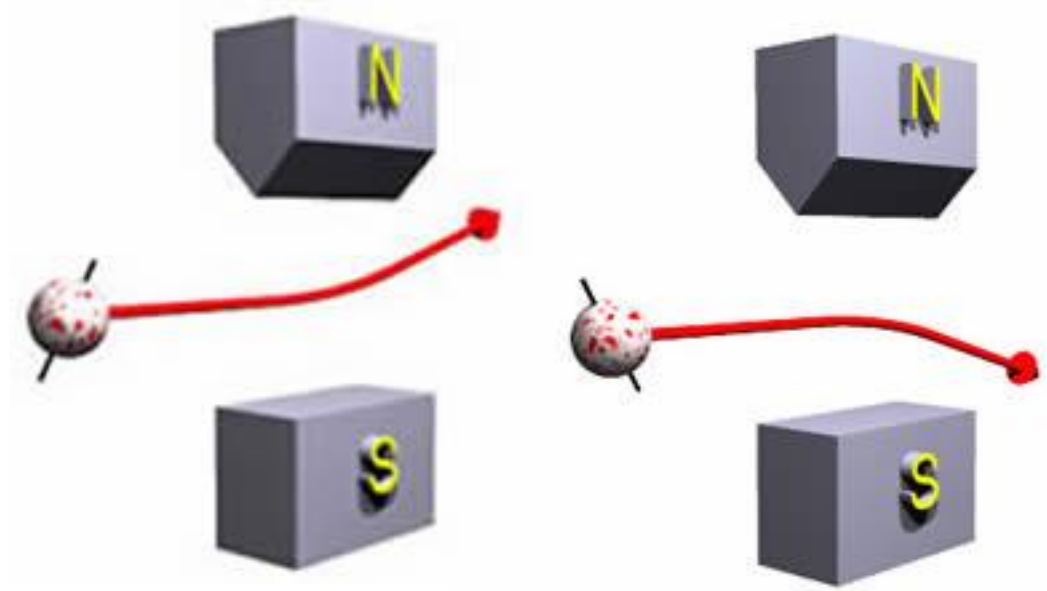
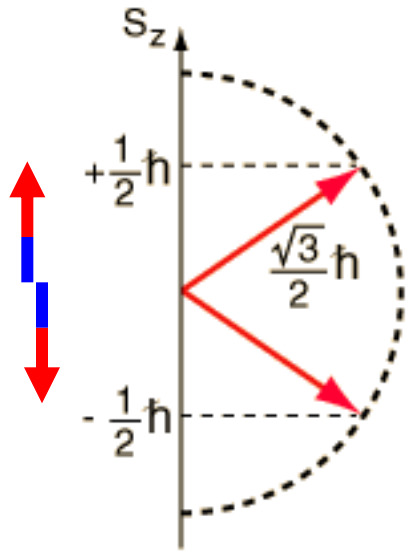


Co to jest spin?

Eksperyment Sterna-Gerlacha (1922 r.)

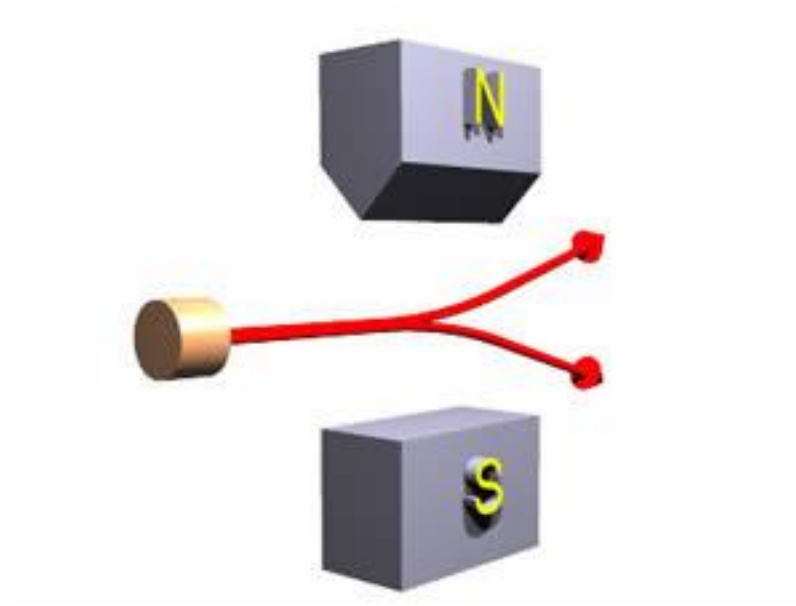
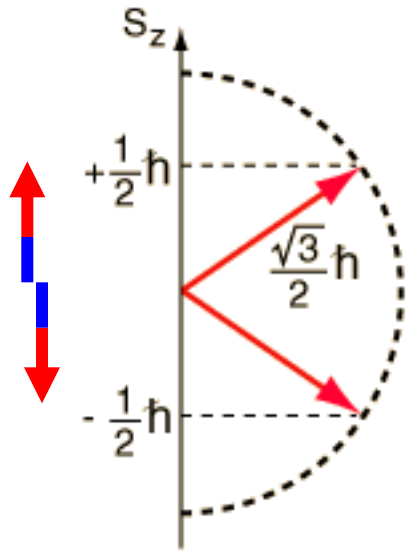


Co to jest spin?



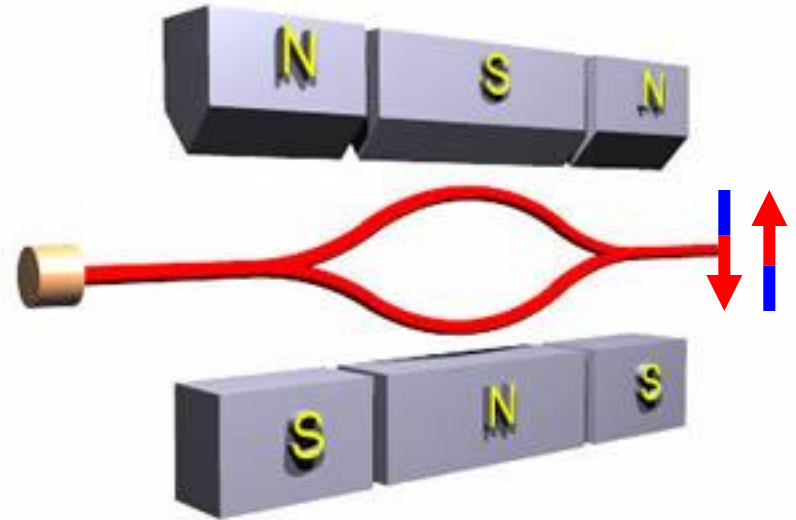
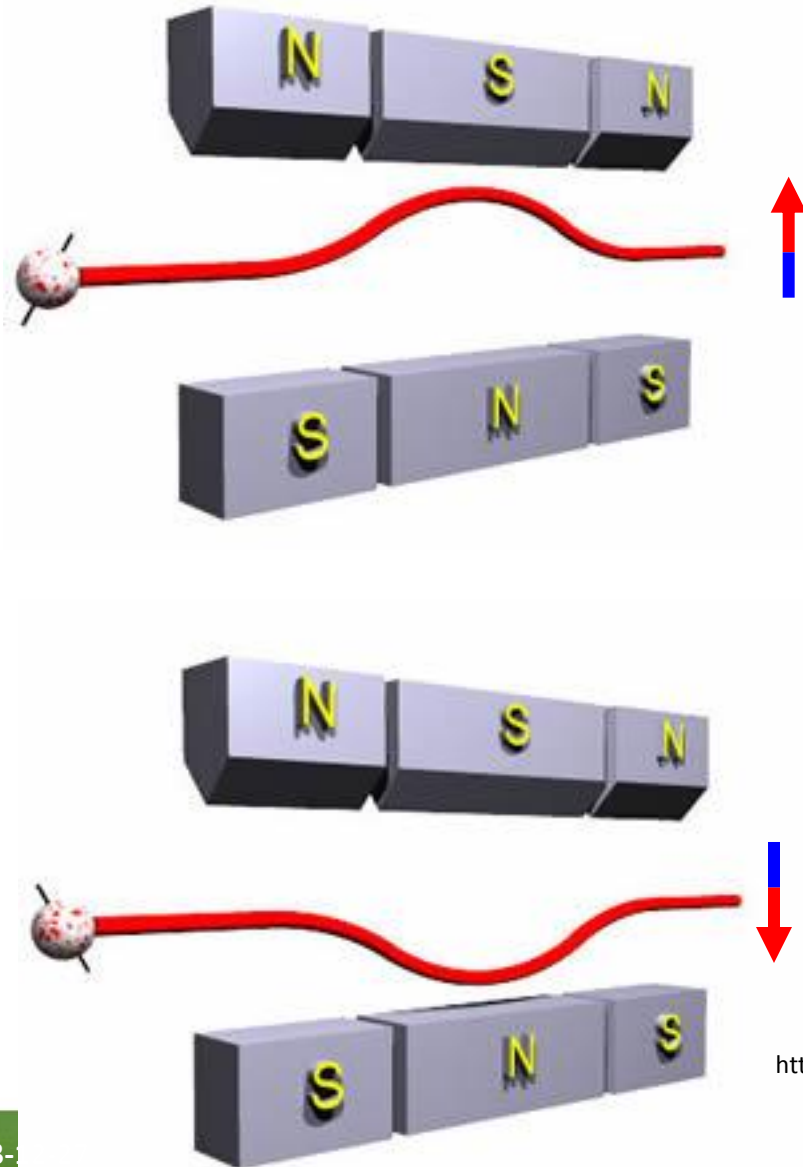
<http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/SternGerlach/SternGerlach.html>

Co to jest spin?



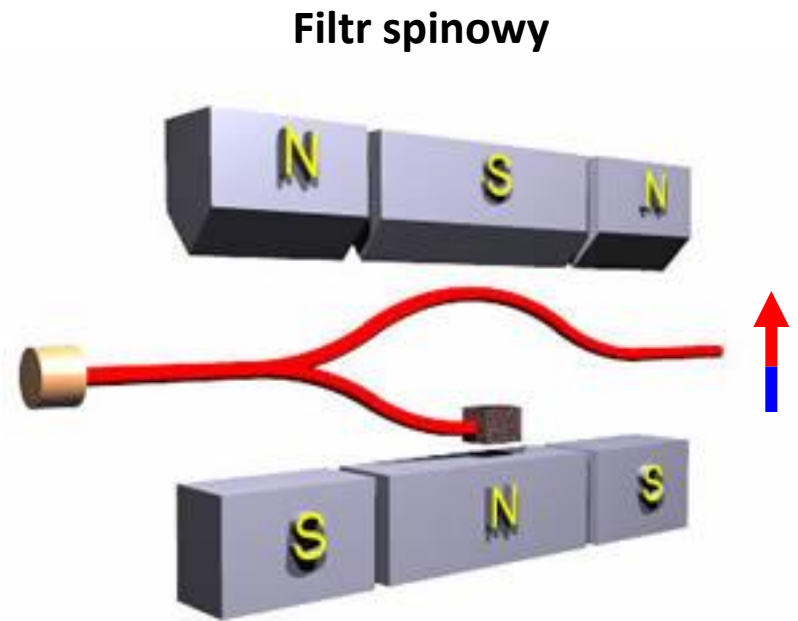
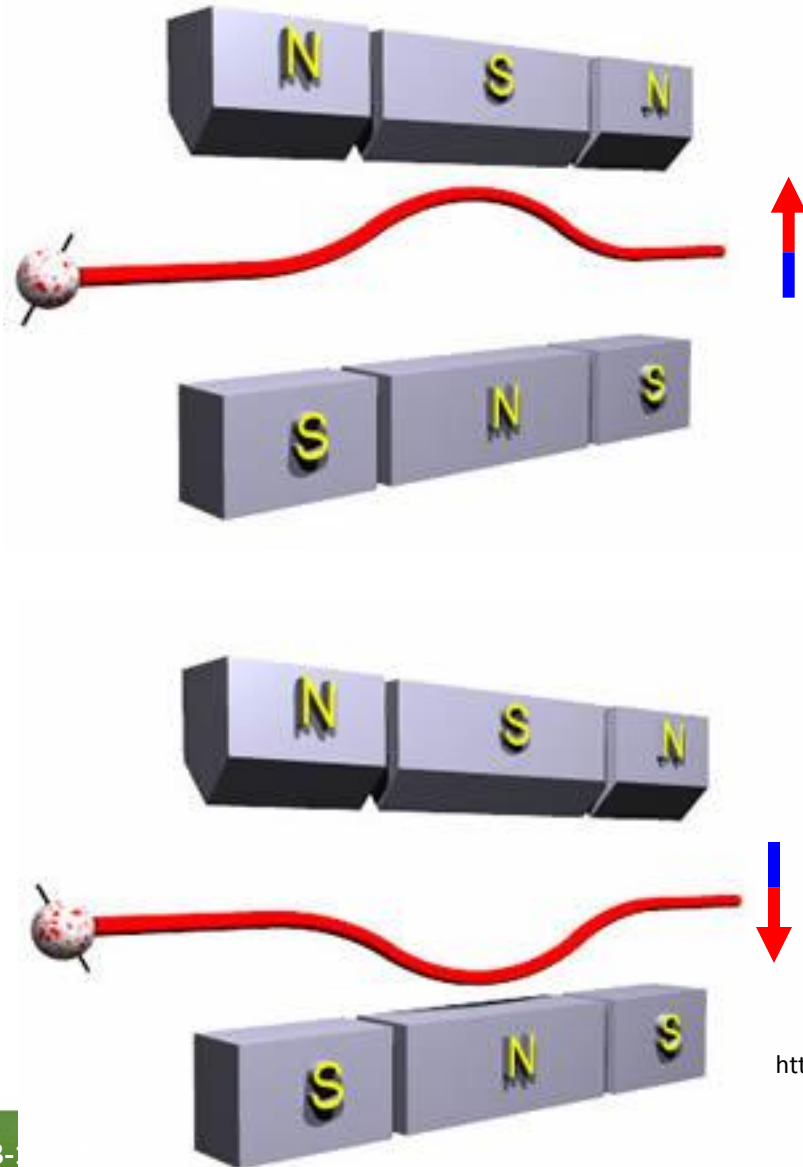
<http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/SternGerlach/SternGerlach.html>

Co to jest spin?



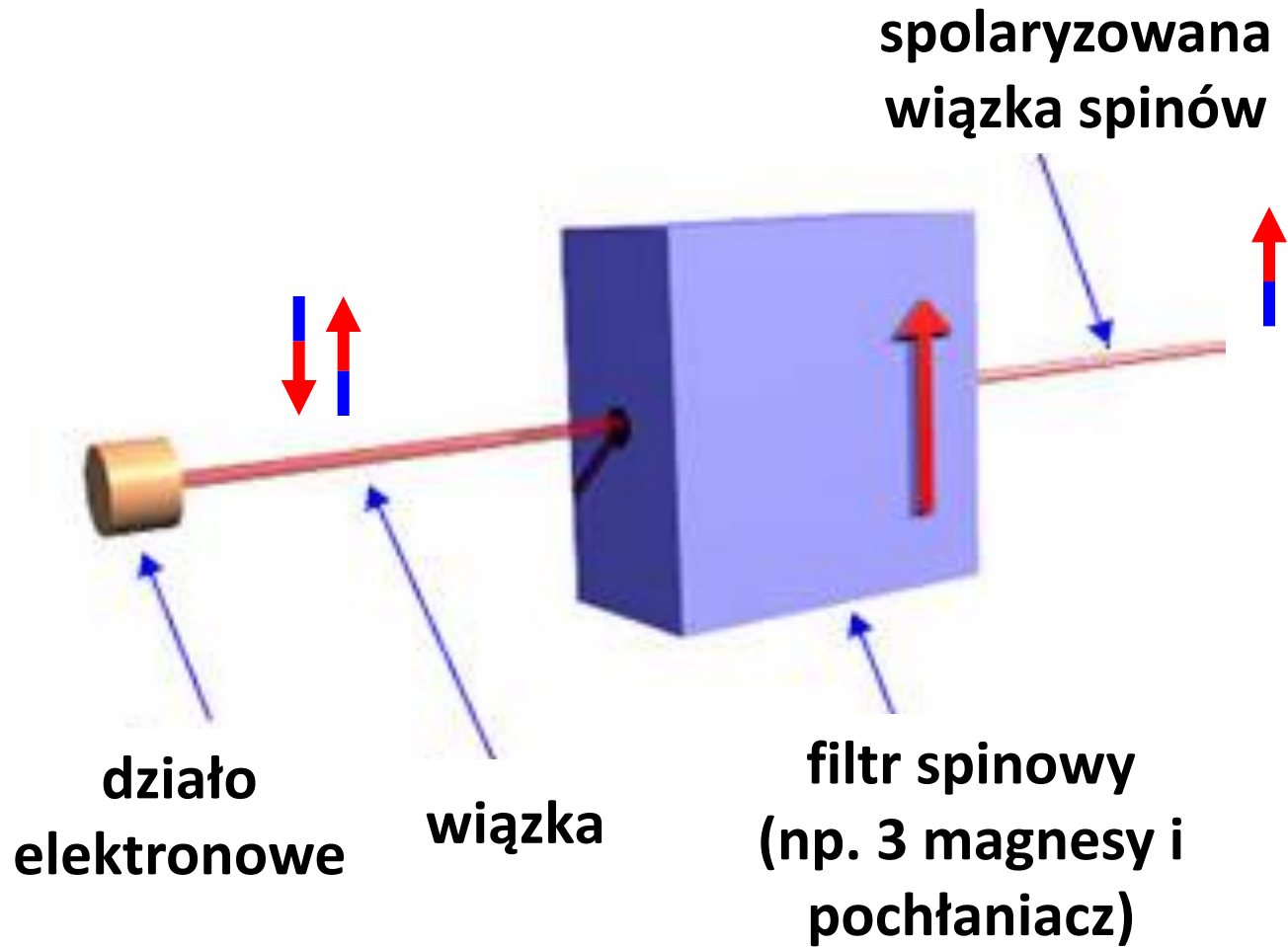
<http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/SternGerlach/SternGerlach.html>

Co to jest spin?



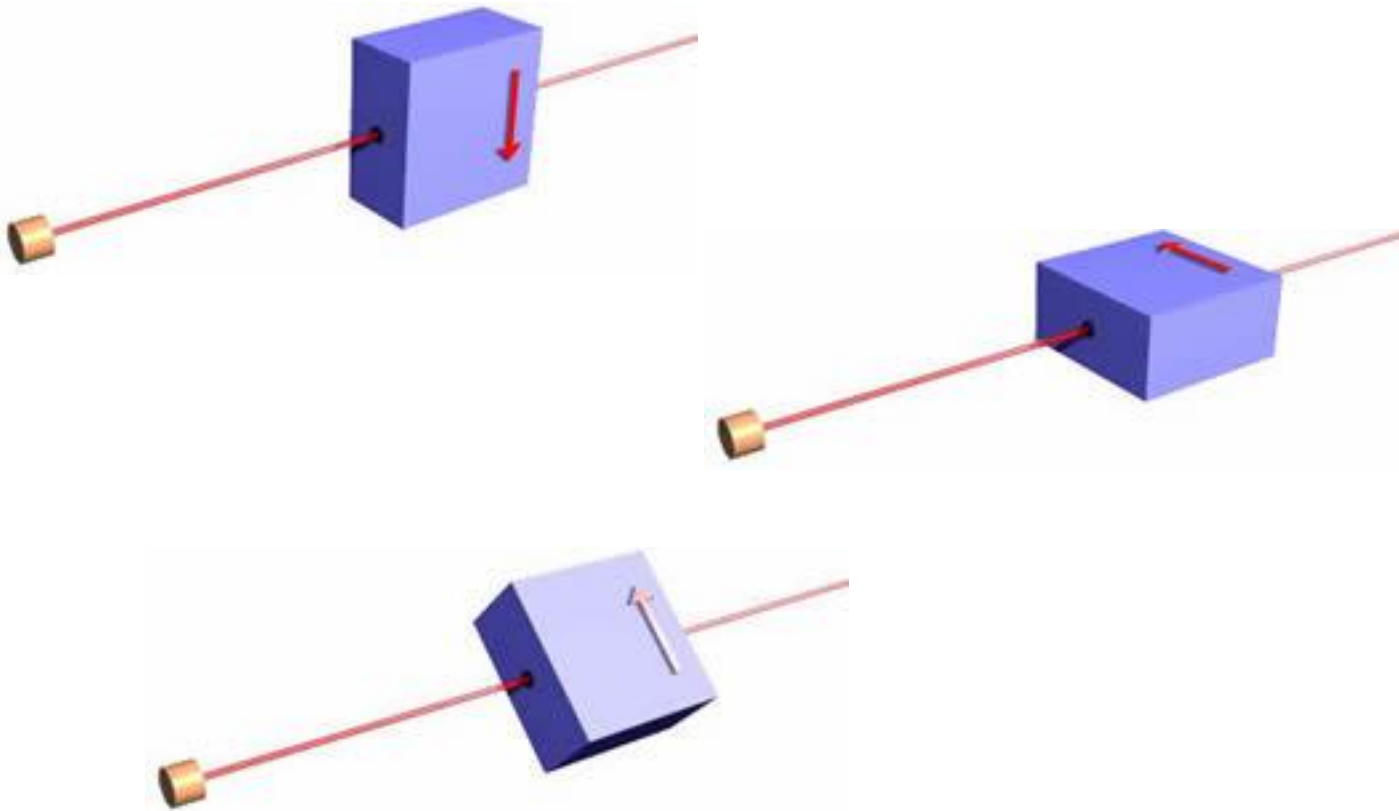
<http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/SternGerlach/SternGerlach.html>

Filtr spinowy



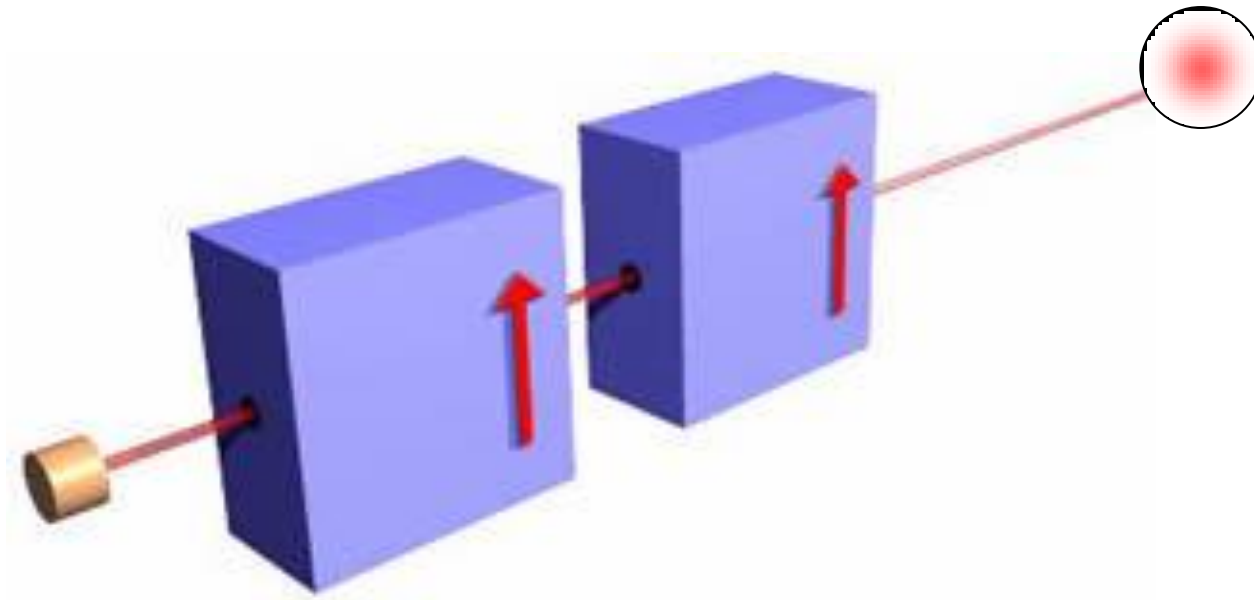
<http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/SternGerlach/SternGerlach.html>

Filtr spinowy



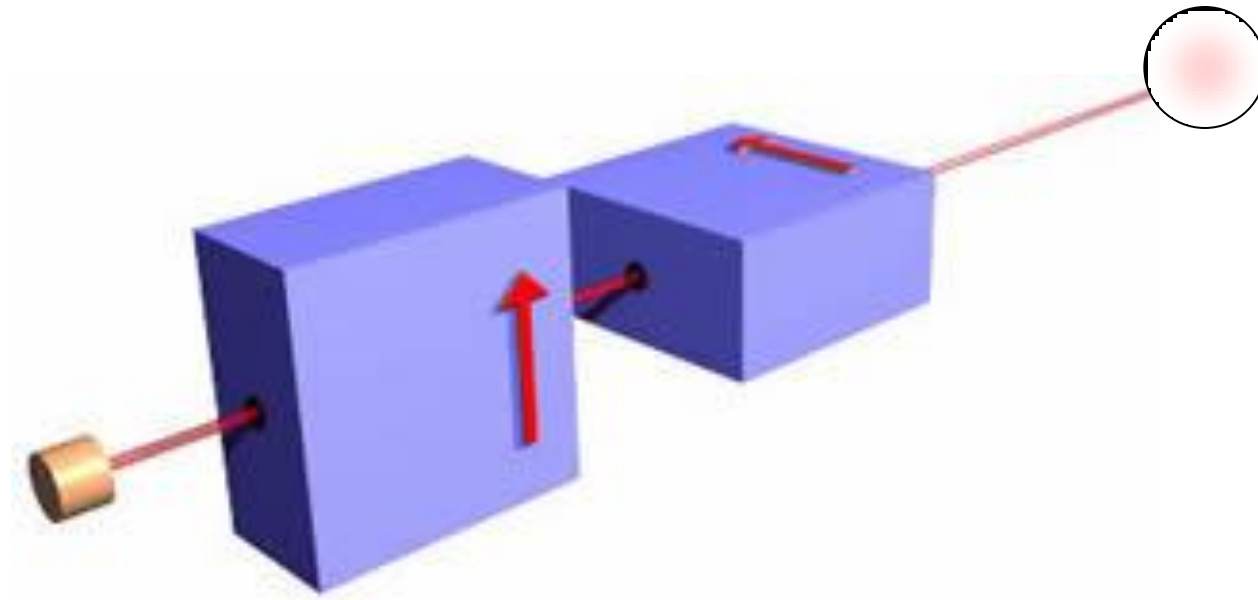
<http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/SternGerlach/SternGerlach.html>

Filtr spinowy



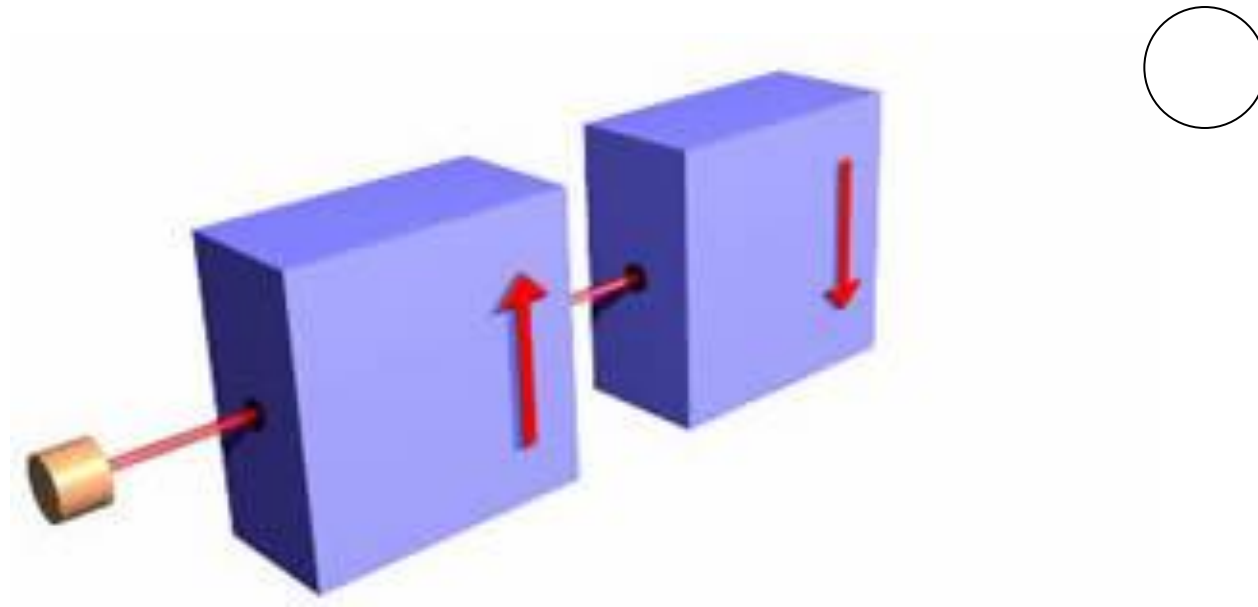
<http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/SternGerlach/SternGerlach.html>

Filtr spinowy



<http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/SternGerlach/SternGerlach.html>

Filtr spinowy



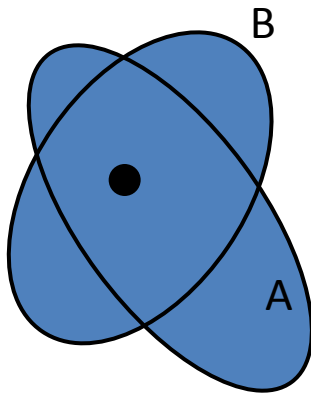
<http://www.upscale.utoronto.ca/GeneralInterest/Harrison/SternGerlach/SternGerlach.html>

Rodzaje oddziaływań wymiennych

Oddziaływanie wymienne = Oddziaływanie kulombowskie + Zasada Pauliego

$$\Psi = \Psi_{\text{orbitalna}} \times \Psi_{\text{spinowa}} \quad \underline{\text{Antysymetryczna!}}$$

Przykład:



Dwa elektrony zlokalizowane na jednym centrum

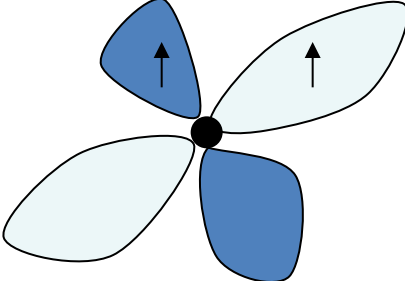
$$\mathcal{H}(1, 2) = H_0(1) + H_0(2) + \frac{e^2}{r_{12}}$$

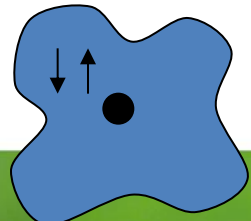
Rodzaje oddziaływań wymiennych

Oddziaływanie wymienne = Oddziaływanie kulombowskie + Zasada Pauliego

$$\Psi = \Psi_{\text{orbitalna}} \times \Psi_{\text{spinowa}} \quad \underline{\text{Antysymetryczna!}}$$

Reguły Hunda, $E_T < E_S$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [\varphi_A(1)\varphi_B(2) - \varphi_A(2)\varphi_B(1)] \times \left[\begin{array}{c} \chi_{\uparrow}(1)\chi_{\uparrow}(2) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} [\chi_{\uparrow}(1)\chi_{\downarrow}(2) + \chi_{\downarrow}(1)\chi_{\uparrow}(2)] \\ \chi_{\downarrow}(1)\chi_{\downarrow}(2) \end{array} \right]$$


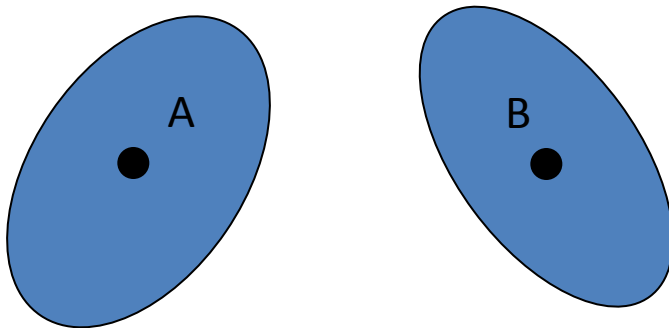
$$\frac{1}{\sqrt{2}} [\varphi_A(1)\varphi_B(2) + \varphi_A(2)\varphi_B(1)] \frac{1}{\sqrt{2}} [\chi_{\uparrow}(1)\chi_{\downarrow}(2) - \chi_{\downarrow}(1)\chi_{\uparrow}(2)]$$


Rodzaje oddziaływań wymiennych

Oddziaływanie wymienne = Oddziaływanie kulombowskie + Zasada Pauliego

$$\Psi = \Psi_{\text{orbitalna}} \times \Psi_{\text{spinowa}} \quad \underline{\text{Antysymetryczna!}}$$

Przykład:



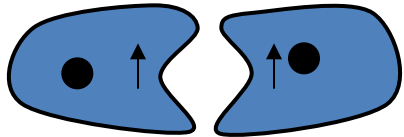
Dwa elektrony na dwóch różnych centrach

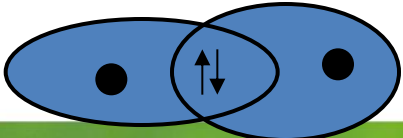
$$\mathcal{H}(1, 2) = H_0^A(1) + H_0^B(2) + \frac{e^2}{r_{12}}$$

Rodzaje oddziaływań wymiennych

Oddziaływanie wymienne = Oddziaływanie kulombowskie + Zasada Pauliego

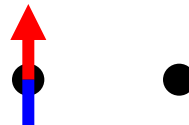
$$\Psi = \Psi_{\text{orbitalna}} \times \Psi_{\text{spinowa}} \quad \underline{\text{Antysymetryczna!}}$$

$$\frac{1}{\sqrt{2}} [\varphi_A(1)\varphi_B(2) - \varphi_A(2)\varphi_B(1)] \times \left[\begin{array}{c} \chi_{\uparrow}(1)\chi_{\uparrow}(2) \\ \frac{1}{\sqrt{2}} [\chi_{\uparrow}(1)\chi_{\downarrow}(2) + \chi_{\downarrow}(1)\chi_{\uparrow}(2)] \\ \chi_{\downarrow}(1)\chi_{\downarrow}(2) \end{array} \right]$$


$$\frac{1}{\sqrt{2}} [\varphi_A(1)\varphi_B(2) + \varphi_A(2)\varphi_B(1)] \frac{1}{\sqrt{2}} [\chi_{\uparrow}(1)\chi_{\downarrow}(2) - \chi_{\downarrow}(1)\chi_{\uparrow}(2)]$$


Wiązania chemiczne, $E_S < E_T$

Magnes

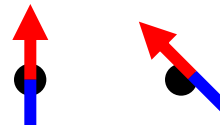


Oto kryształ:

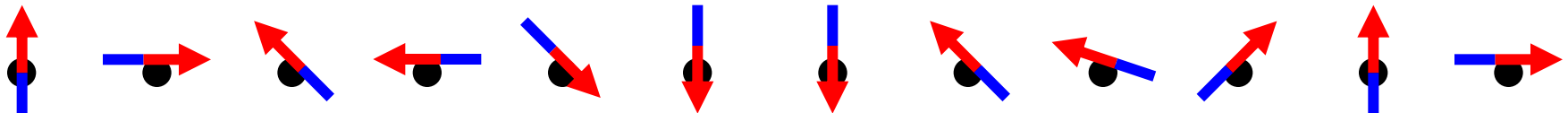


Magnes

PARA

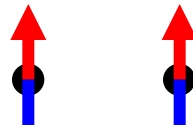


Namagnesowanie M przy braku pola $M = 0$



Magnes

FERRO

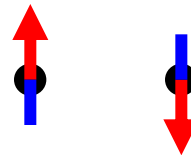


Namagnesowanie M przy braku pola $M > 0$

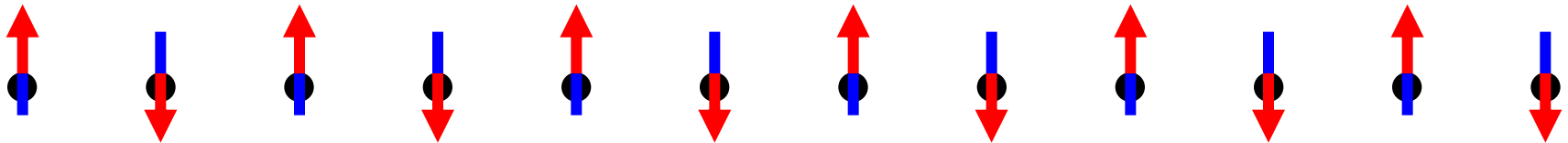


Magnes

ANTYFERRO

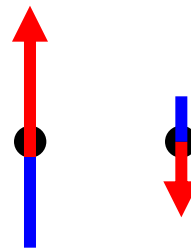


Namagnesowanie M przy braku pola $M = 0$

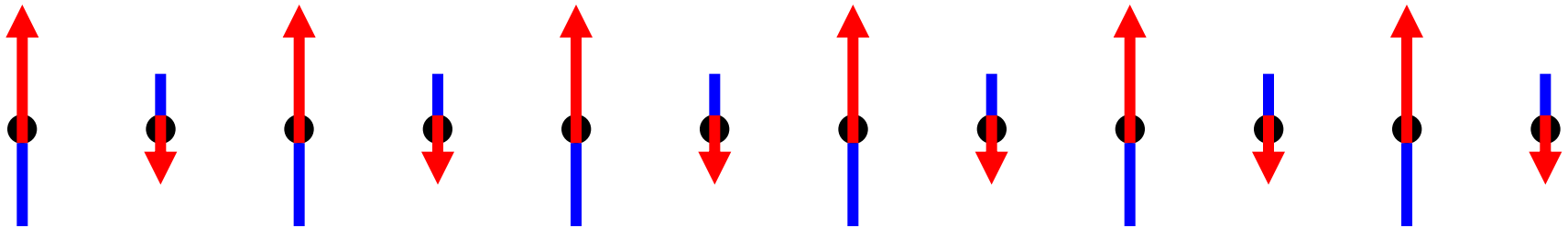


Magnes

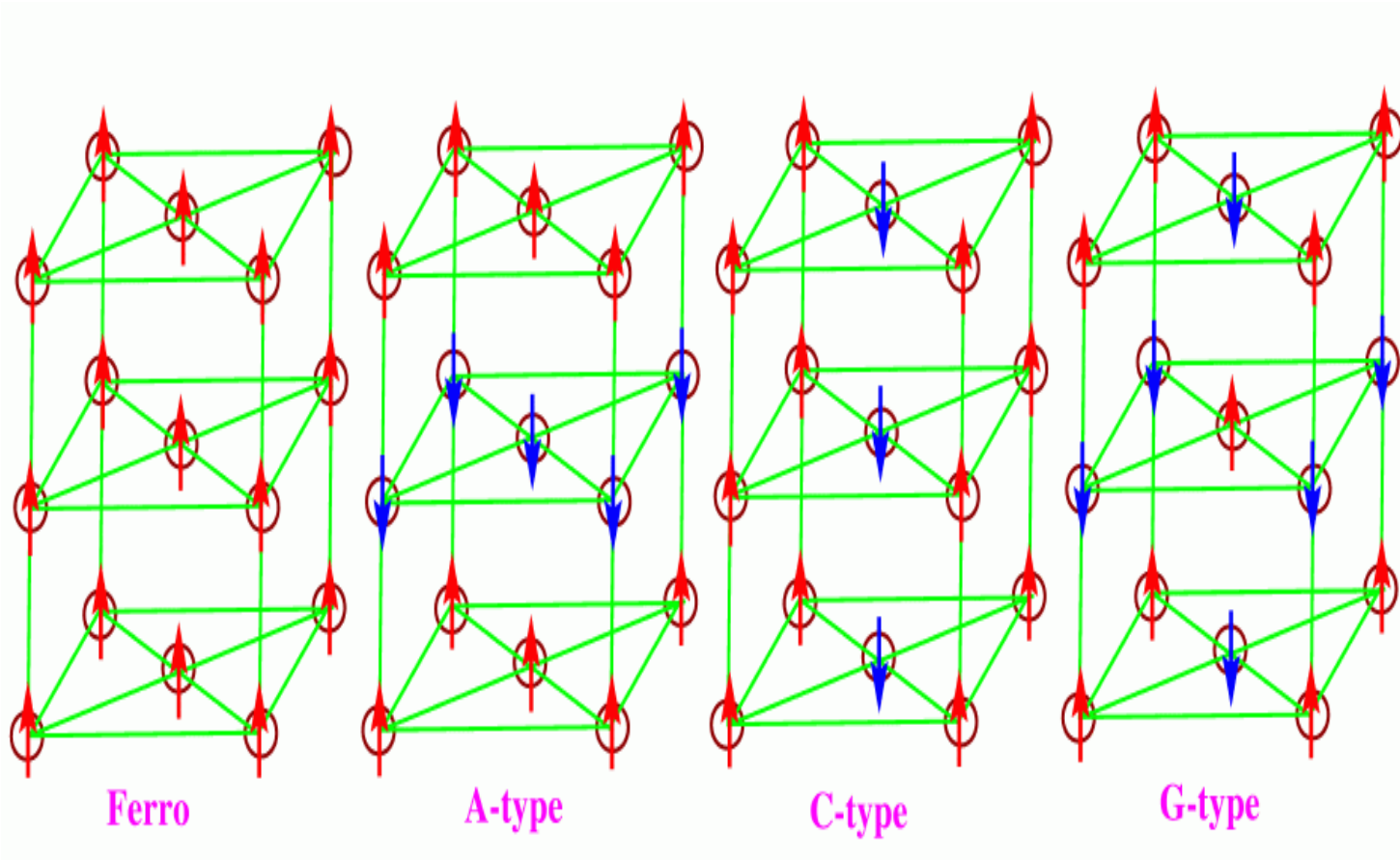
FERRI



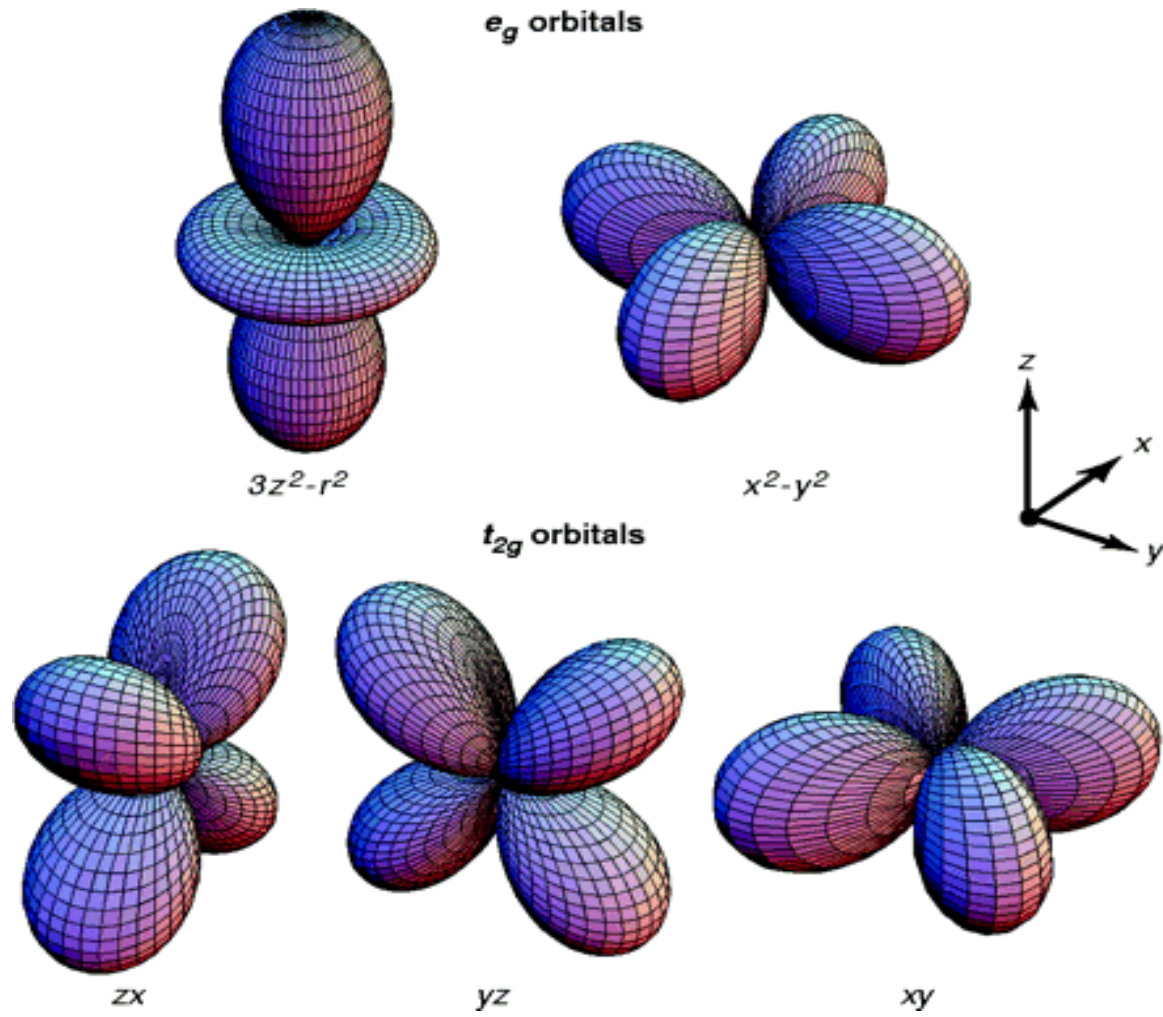
Namagnesowanie M przy braku pola $M > 0$



Magnes



Magnes

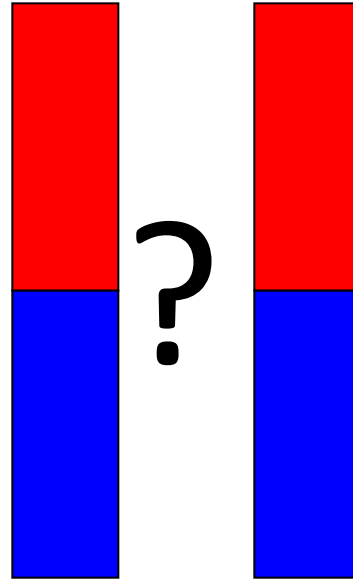


Magnes



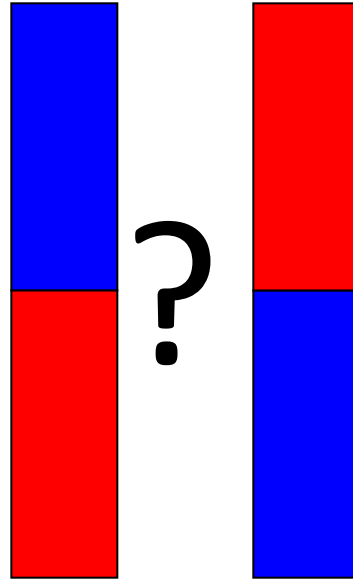
Magnes

FERRO?

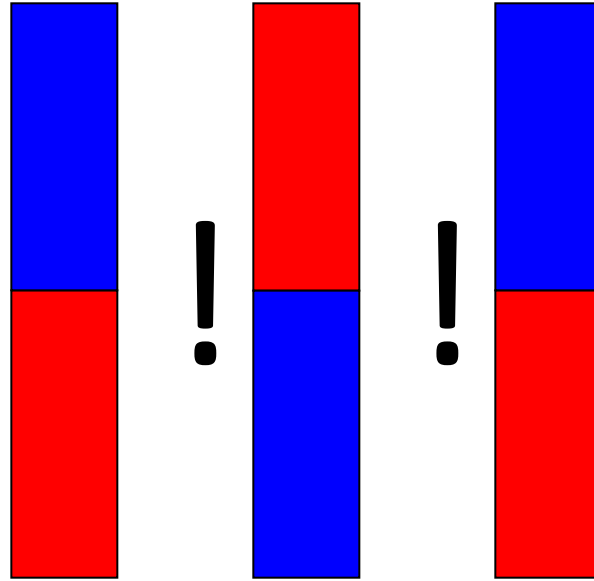


Magnes

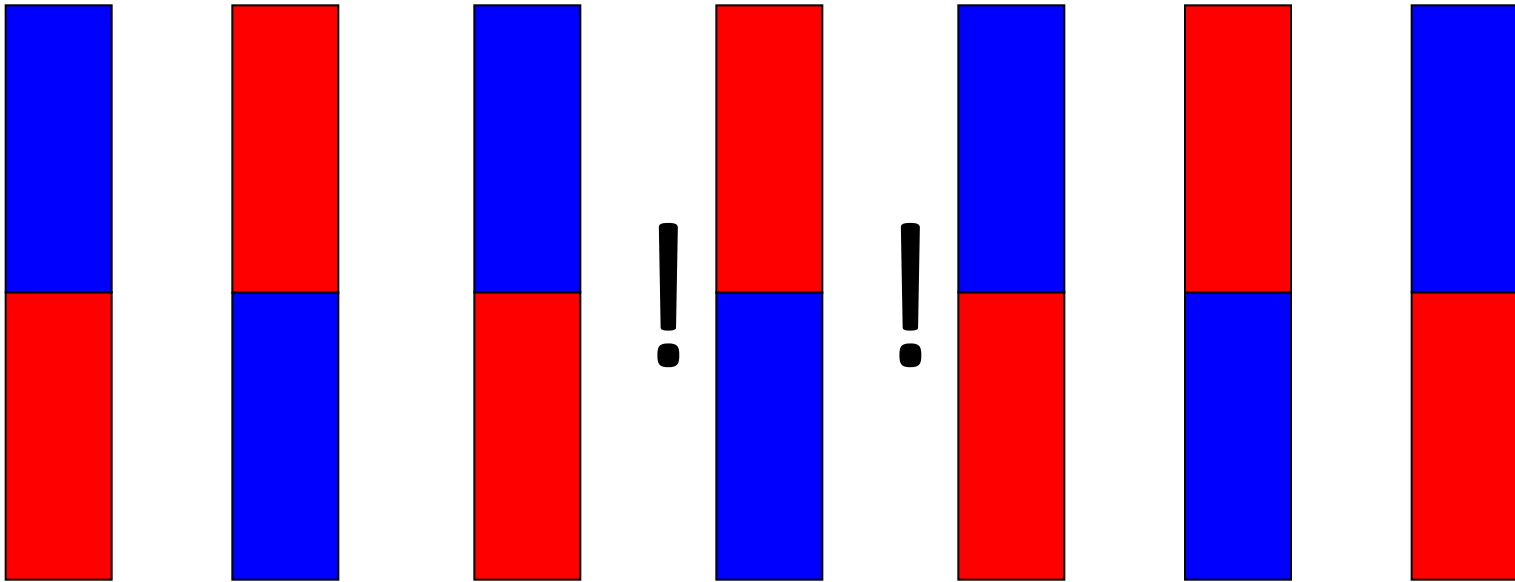
ANTY - FERRO?



Magnes

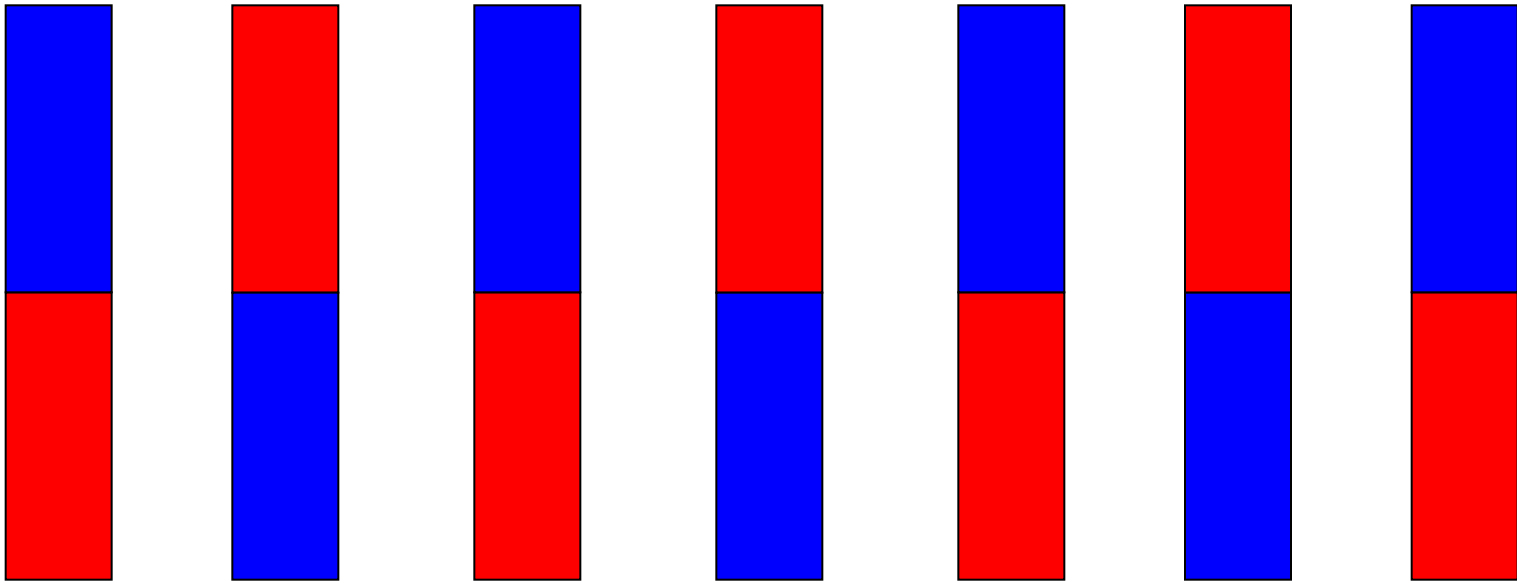


Magnes



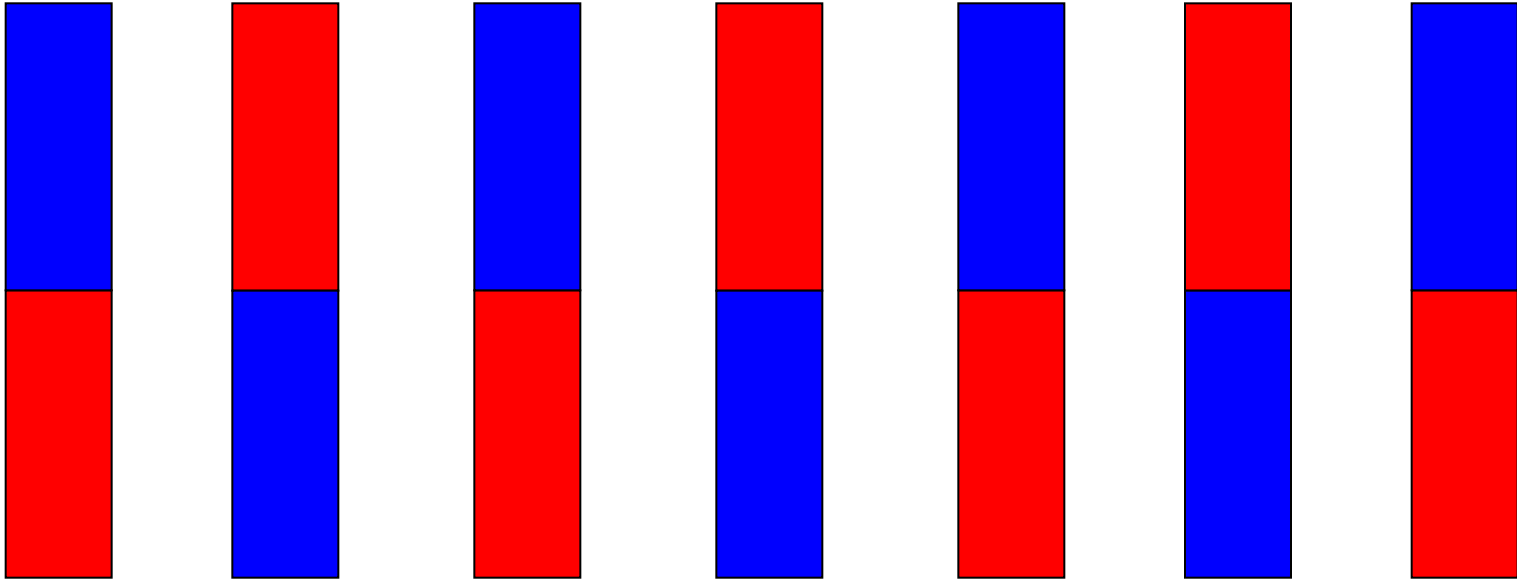
Korzystniejsze jest ustawienie antyferromagnetyczne

Magnes



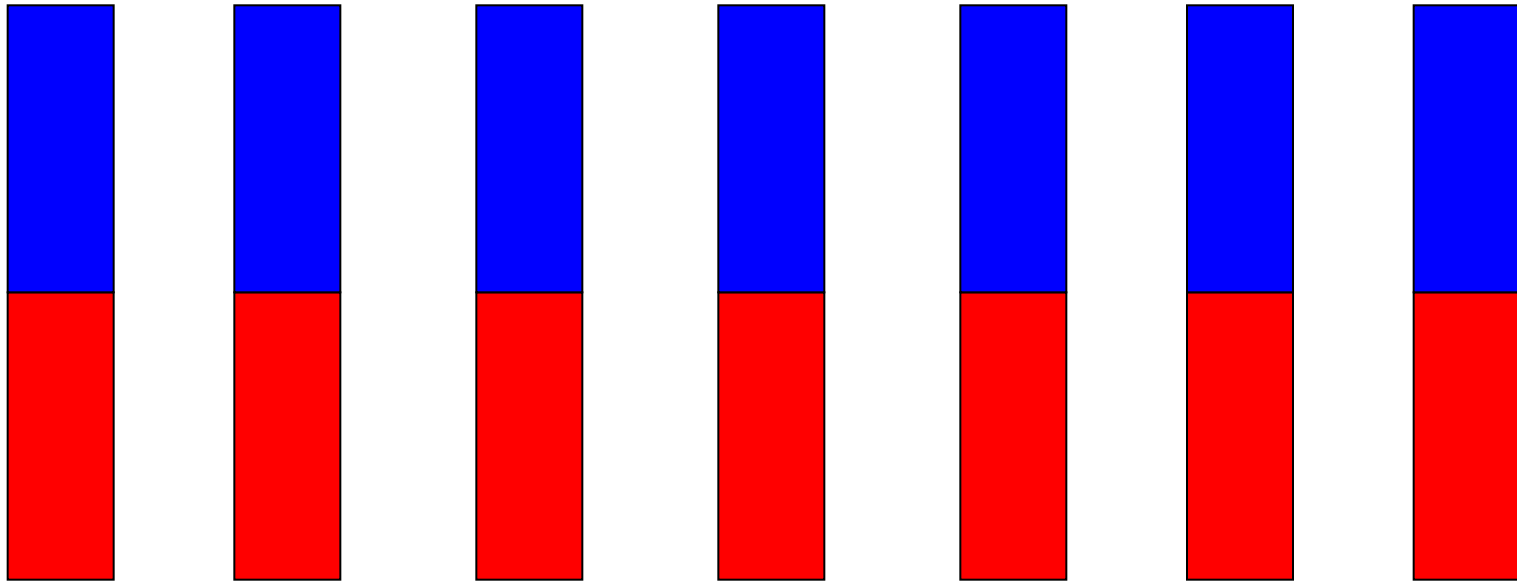
To skąd się biorą magnesy???

Magnes



To skąd się biorą magnesy???

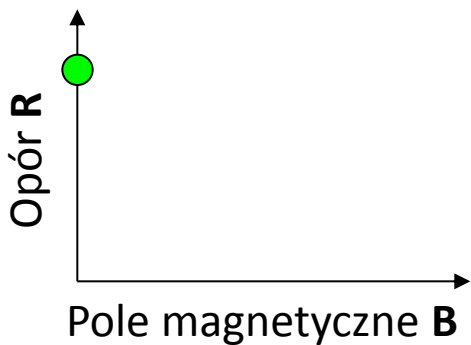
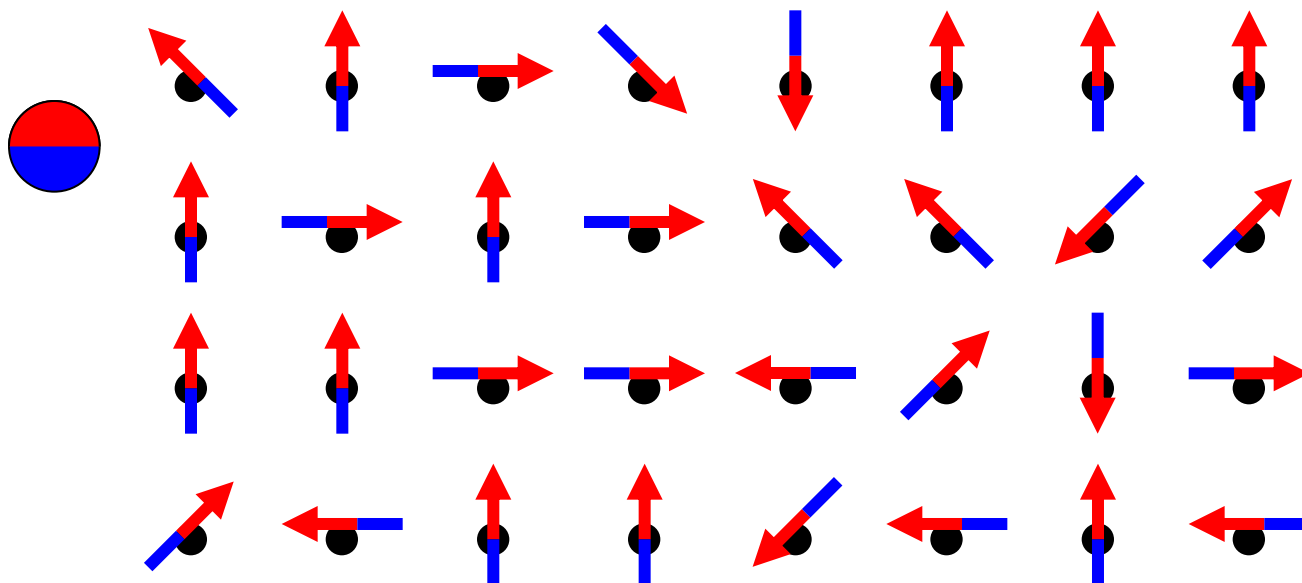
Magnes



To skąd się biorą magnesy???

Magnetoopór

Zewnętrzne pole magnetyczne $B = 0$ T



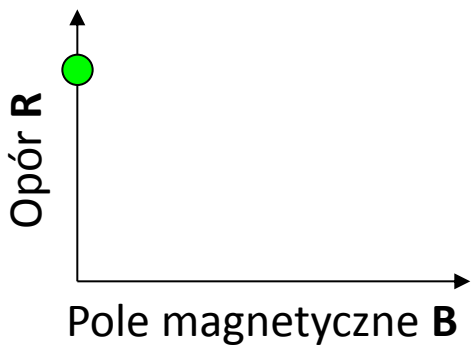
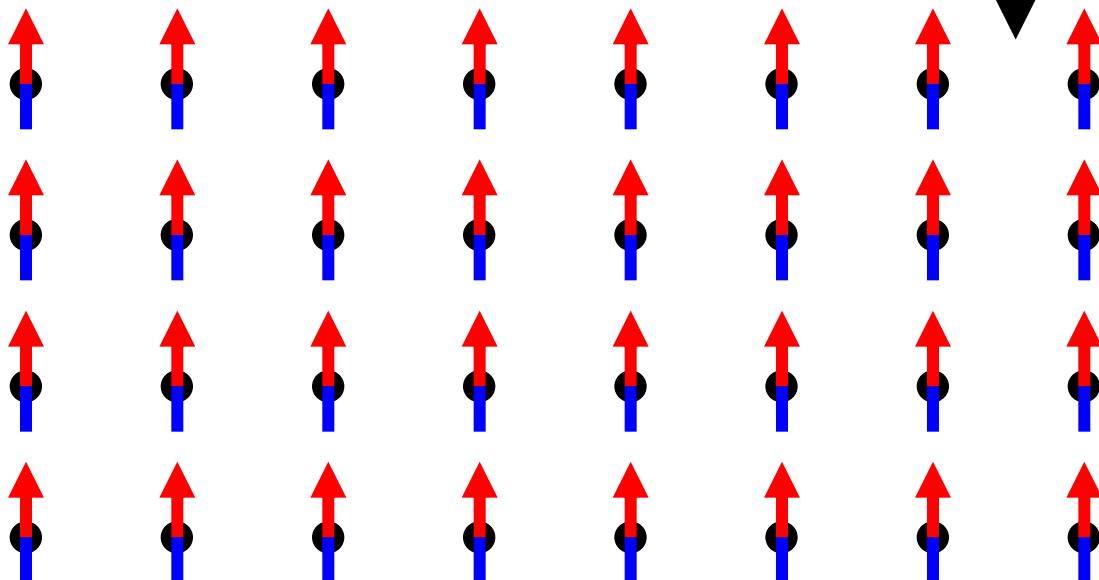
Energia sieci



Energia nośników

Magnetoopór

Zewnętrzne pole magnetyczne $B > 0$ T

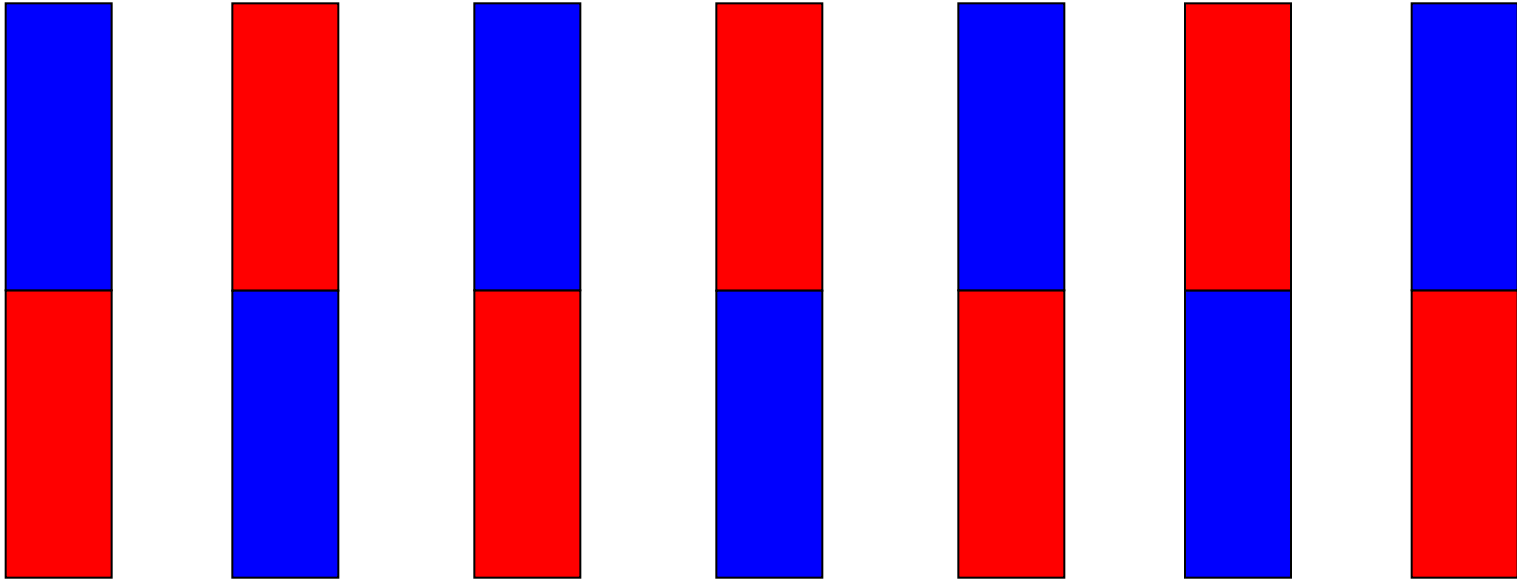


Energia sieci



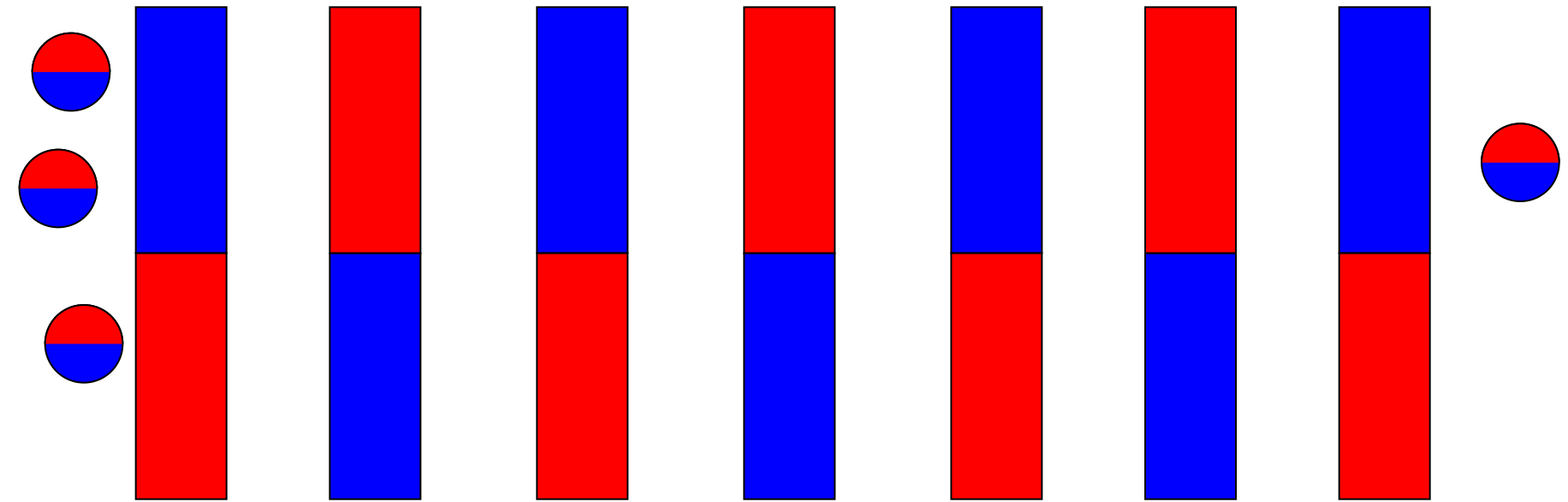
Energia nośników

Magnes



To skąd się biorą magnesy???

Magnes



Nośniki!!!



Nagroda FNP 2006 w obszarze nauk ścisłych:

prof. dr hab. Tomasz Dietl z Instytutu Fizyki PAN oraz Instytutu Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego za opracowanie potwierdzonej w ostatnich latach teorii rozcieńczonych półprzewodników ferromagnetycznych oraz zademonstrowanie nowych metod sterowania namagnesowaniem;

Alexander von Humboldt Research Award in Germany (2003),
Agilent Technologies Europhysics Prize (2005)

Spintronika

Magnetoopór $\Delta R/R \sim$ kilka %

Magnetoopór $\Delta R/R \sim$ kilka %

Gigantyczny magnetoopór
(Giant Magnetoresistance – GMR) 1988
 $\Delta R/R \sim 20 \%$

Spintronika

Magnetoopór $\Delta R/R \sim$ kilka %

Gigantyczny magnetoopór

(Giant Magnetoresistance – GMR) 1988

$\Delta R/R \sim 20$ %

Kolosalny magnetoopór

(Colossal Magnetoresistance – CMR)

1993 $\Delta R/R \sim$ kilka rzędów

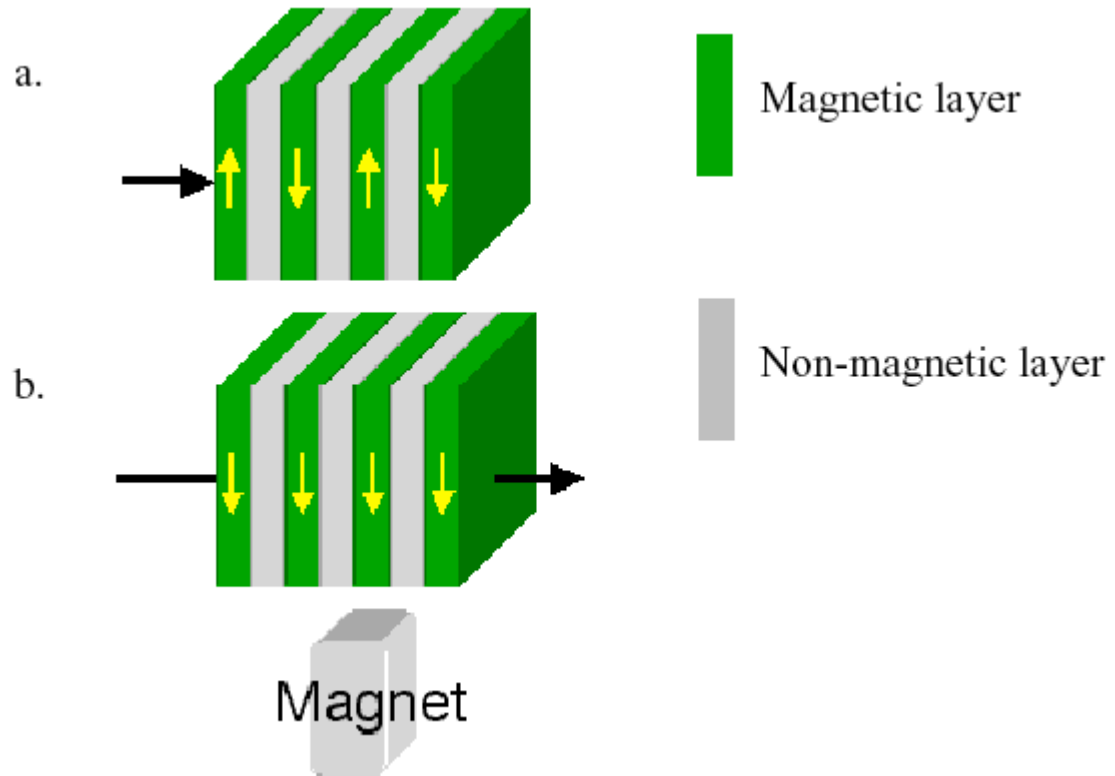
wielkości!

Spintronika

Magnetoopór $\Delta R/R \sim$ kilka %

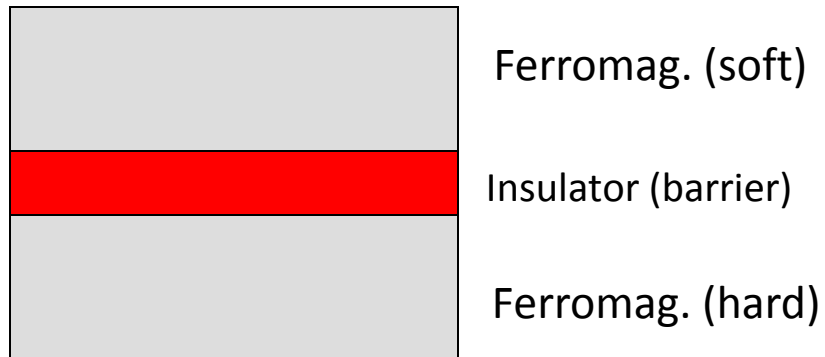
Gigantyczny magnetoopór (Giant Magnetoresistance – GMR) 1988

$\Delta R/R \sim 20 \%$



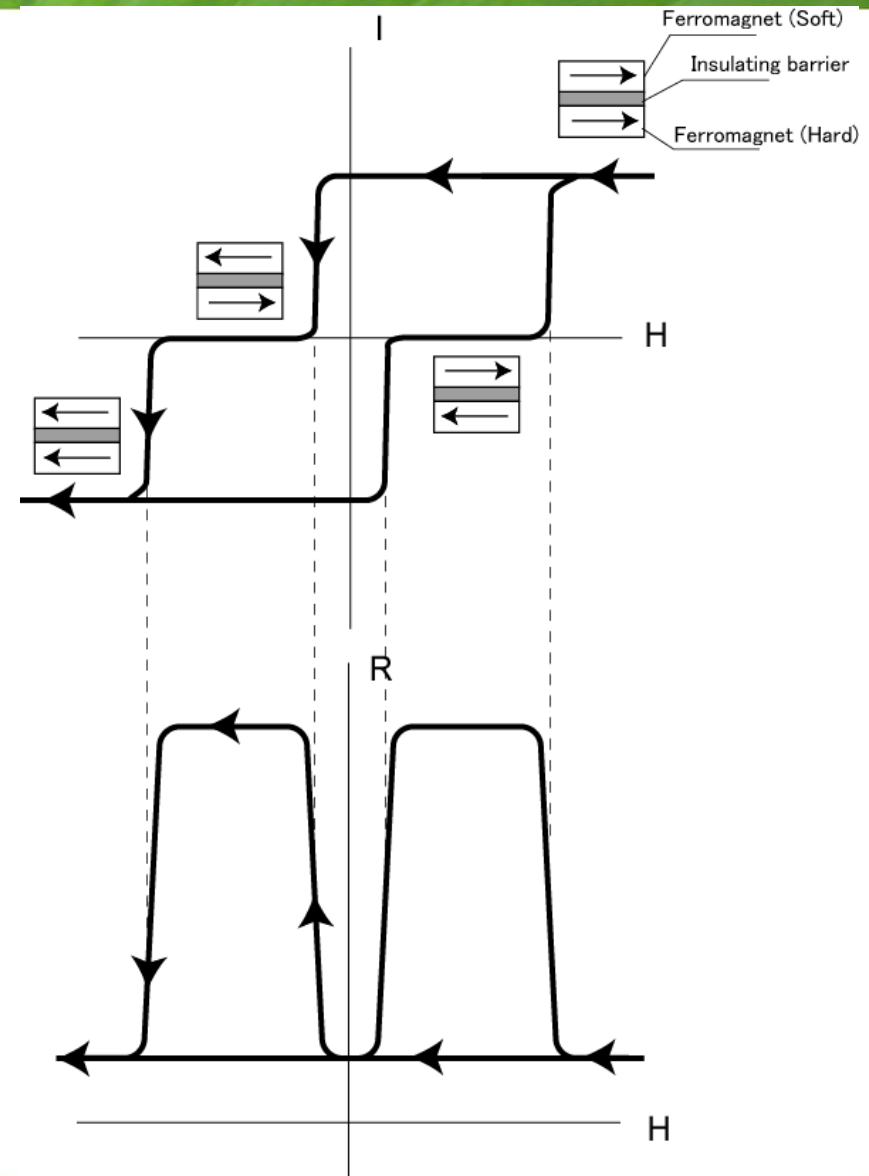
Spintronika

Magnetic tunnel junction (MTJ)



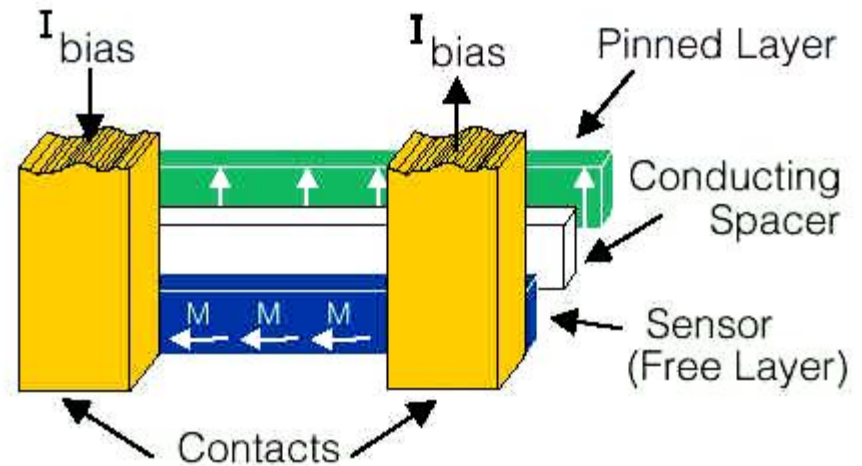
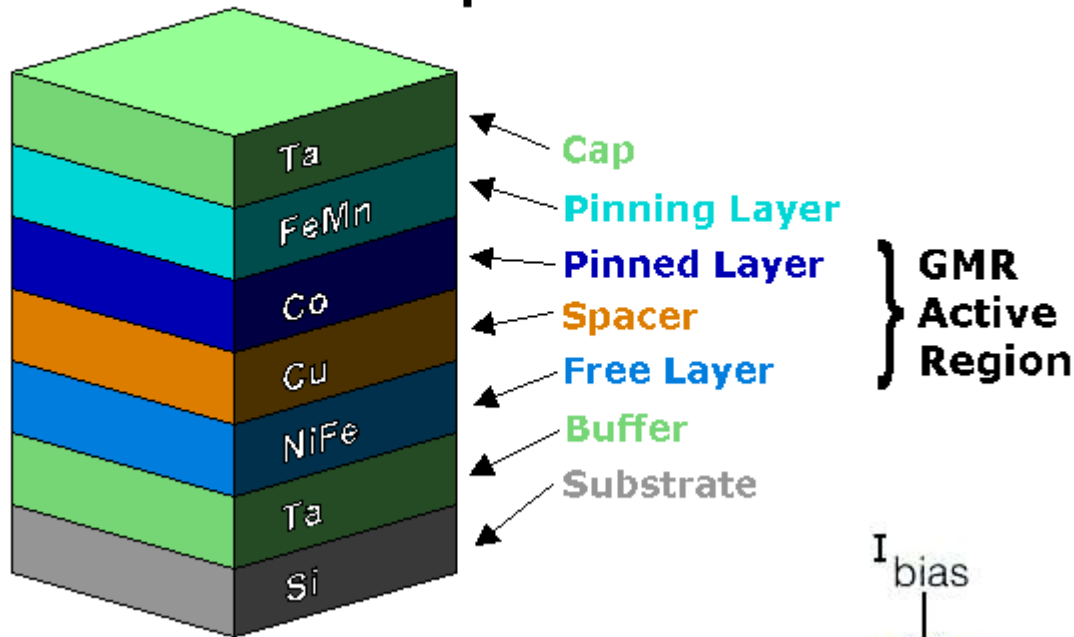
Ferromag.
Co, Py, FeCo, etc.
Barrier
Al₂O₃, MgO, etc.

$$\text{TMR}(\%) = (R_{AP} - R_P) / R_P * 100$$









Spintronika

Spin Valve Structure

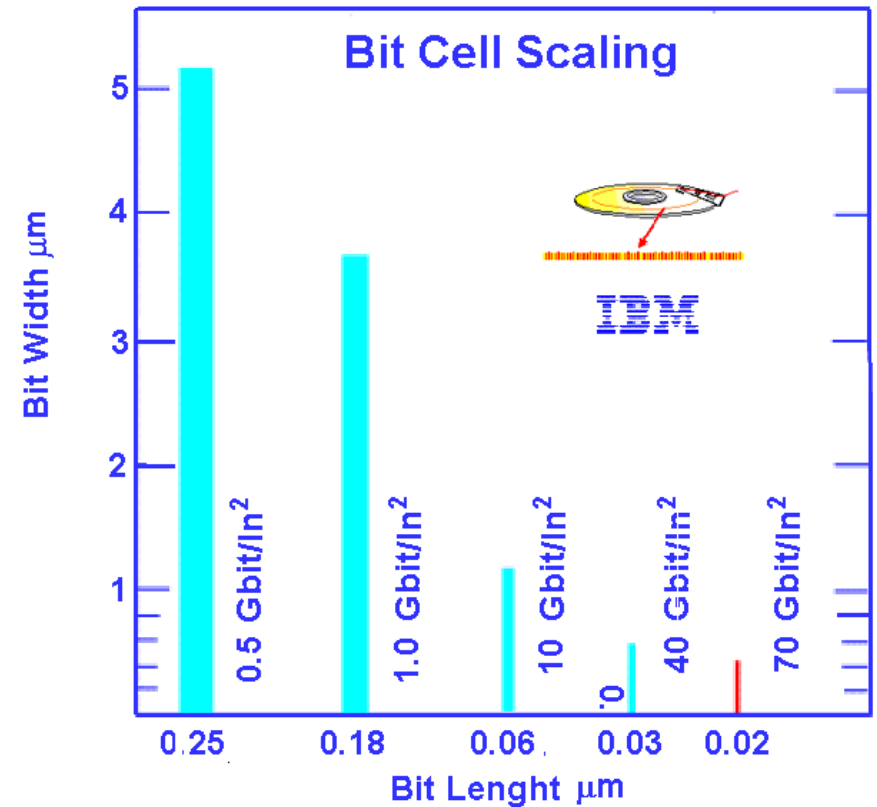


http://www.ing.unitn.it/~colombo/hard_disks/Magnetic_Heads_003.html

Spintronika

Year	Areal Density Gbits/in ²	MR Element
1991	0.132	
1992	0.260	
1993	0.354	
1994	0.578	
1995	0.829 0.923	
1996	1.32	
1997	1.45 2.64	
1998	3.0-5.0	 MR → GMR Transition 
2000	10.0	

- Leads
- Exchange
- Hard Bias
- Adv Bias
- NiFe
- Spacer
- Soft Film
- GMR
- Pinned Film



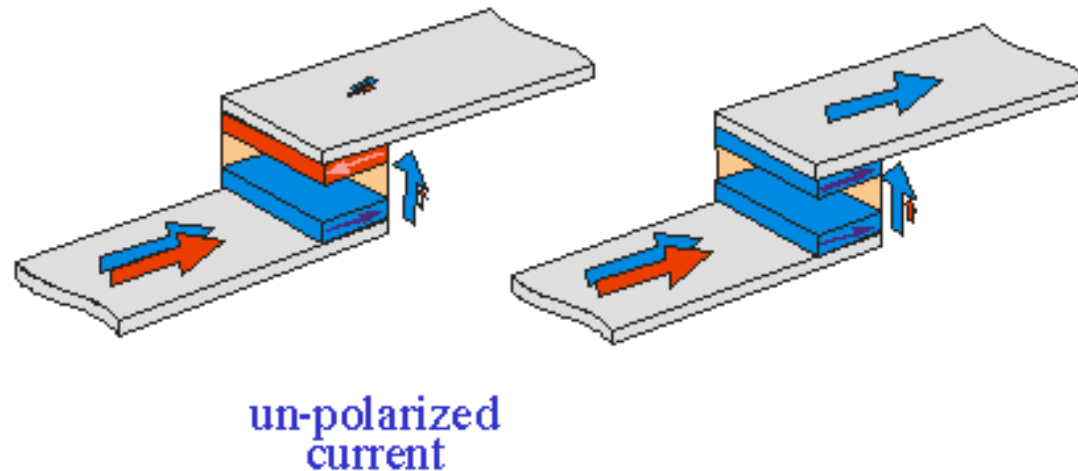
http://www.ing.unitn.it/~colombo/hard_disks/Magnetic_Heads_003.html

Spintronika

MTJ

*insulating space layer
current perpendicular to
plane*

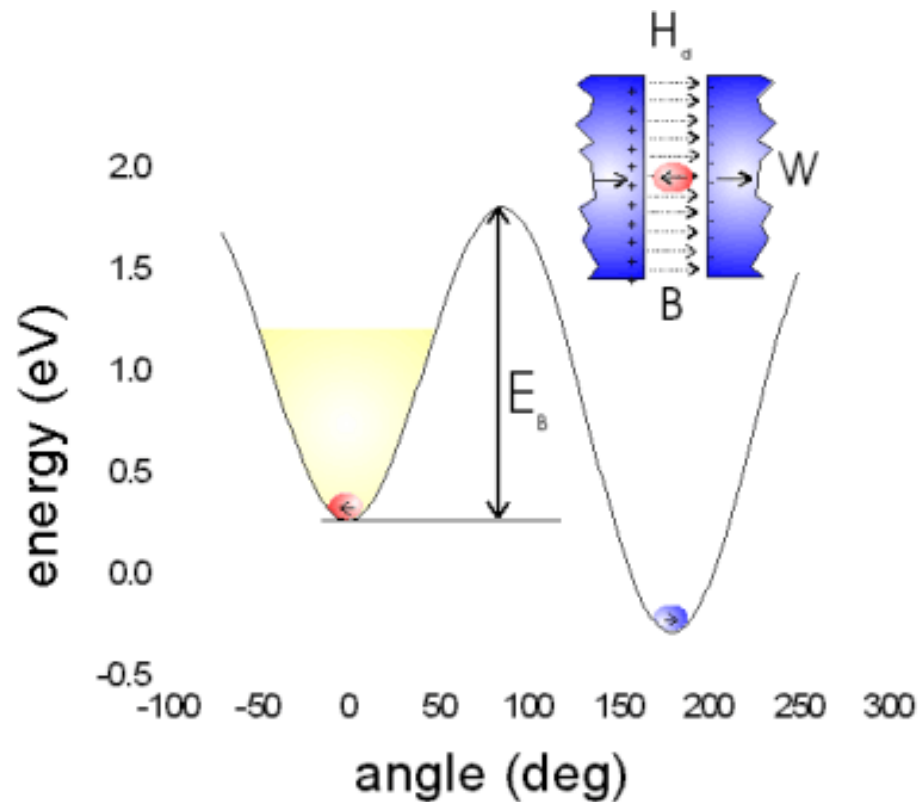
**Ferromagnetic
electrode 1**
**Tunneling
barrier**
**Ferromagnetic
electrode 2**



first ferromagnetic electrode acts as spin filter
second FM layer acts as spin detector

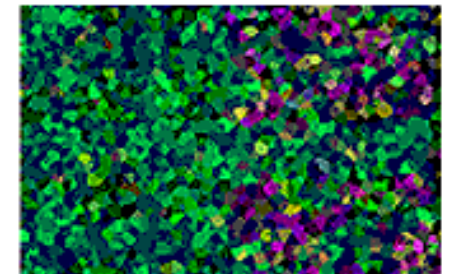
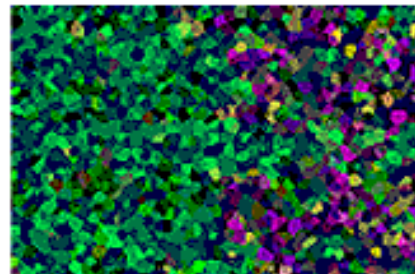
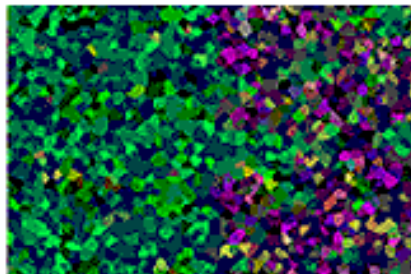
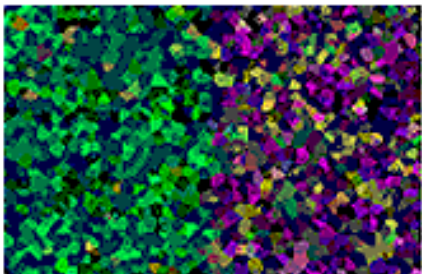
http://www.research.ibm.com/resources/news/20001207_mramimages.shtml

Spintronika



Limit Superparamagnetyczny

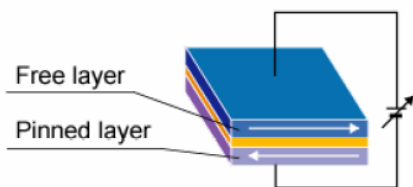
$$E_k = K_u V \sin^2(\vartheta)$$



http://www.ing.unitn.it/~colombo/hard_disks/Magnetic_Heads_003.html

Spintronika

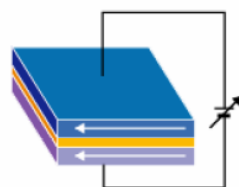
MRAM architecture



Resistance Large

Information "0"

Magnetization Configuration Anti -parallel



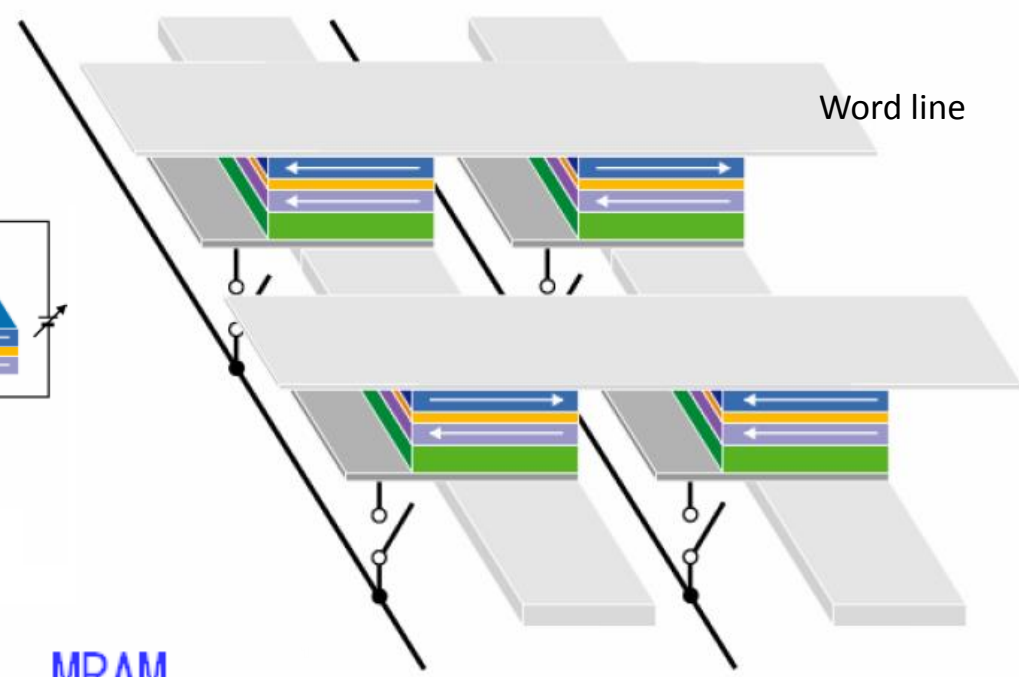
Resistance Small

Information "1"

Magnetization Configuration parallel

Bit line

Word line



ROM 

Non-volatile

DRAM 

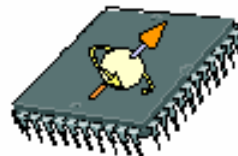
High Density

SRAM 

High Speed

Universal Memory

MRAM

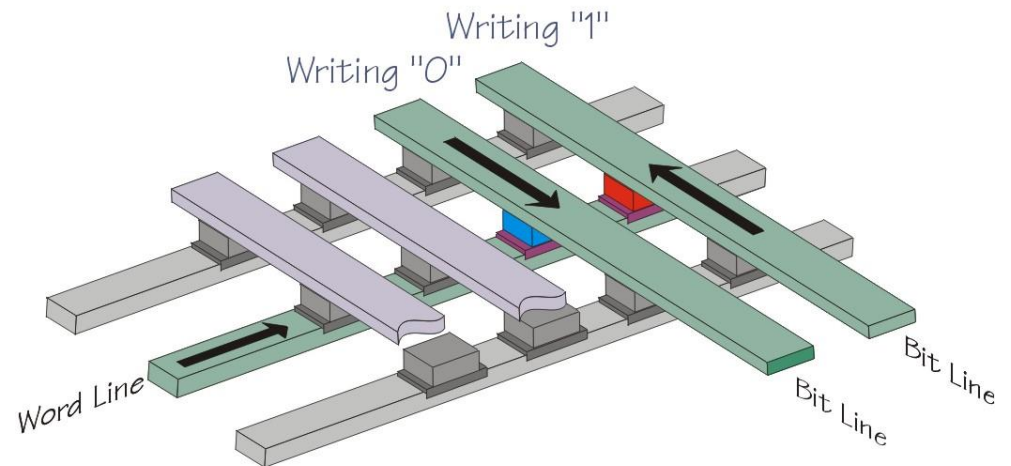
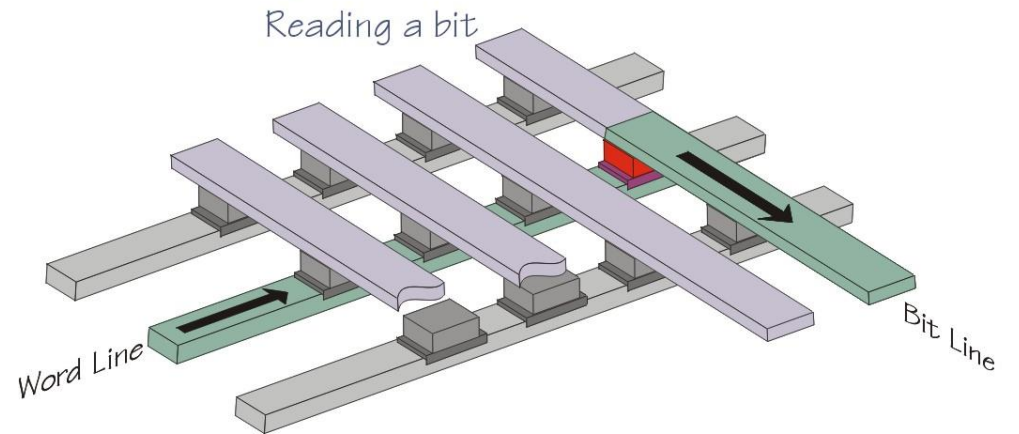


Non-volatile High Speed
High Density

Spintronika



MagRAM Architecture



MTJ MagRAM promises

- density of DRAM
- speed of SRAM
- non-volatility

http://www.research.ibm.com/resources/news/20001207_mramimages.shtml

Spintronika

Zalety MRAM

	DRAM	MRAM	Flash EEPROM	FeRAM
Trwałość zapisu	Nie	TAK	TAK	TAK
Czas zapisu	50ns	10 to 50ns	1us or longer	30 to 200ns
Czas odczytu	50ns	10ns to 1us	20 to 120ns	30 to 200ns
Metoda odczytu	Destructive	Non-Destructive	Destructive	Non-Destructive
Rewrite cycle	10^{15}	10^{15}	10^5	10^{12} to 10^{15}
Pobór prądu	100mA	10mA	10 to 100mA	10mA
Prąd uśpienia	100uA	1uA or lower	1uA or lower	1uA or lower

DRAM: Dynamic Random Access Memory

Flash EEPROM: Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory

FeRAM: Ferroelectric RAM

MRAM pokonuje DRAM !!

Takahiro Moriyama <http://www.ece.udel.edu/~appelbau/spintronics/>

Spintronika

Magnetoopór $\Delta R/R \sim$ kilka %

Gigantyczny magnetoopór

(Giant Magnetoresistance – GMR) 1988

$\Delta R/R \sim 20\%$

Kolosalny magnetoopór

(Colossal Magnetoresistance – CMR)

1993 $\Delta R/R \sim$ kilka rzędów

wielkości!

Kolosalny magnetoopór (CMR)

VOLUME 71, NUMBER 14

PHYSICAL REVIEW LETTERS

4 OCTOBER 1993

Giant Negative Magnetoresistance in Perovskitelike $\text{La}_{2/3}\text{Ba}_{1/3}\text{MnO}_x$ Ferromagnetic Films

R. von Helmolt,^{1,2} J. Wecker,¹ B. Holzapfel,¹ L. Schultz,¹ and K. Samwer²

¹*Siemens AG, Research Laboratories, D-8520 Erlangen, Germany*

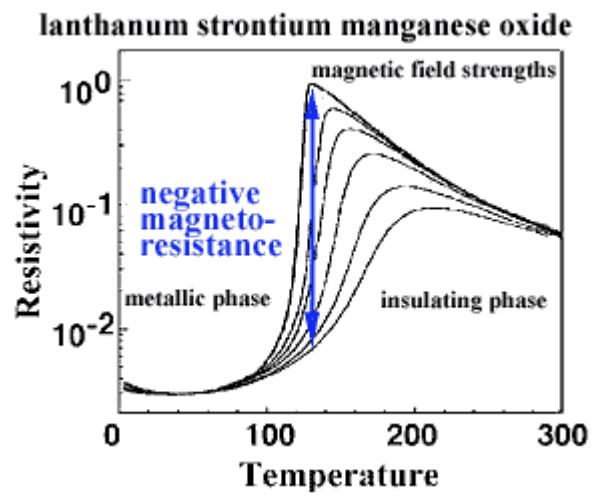
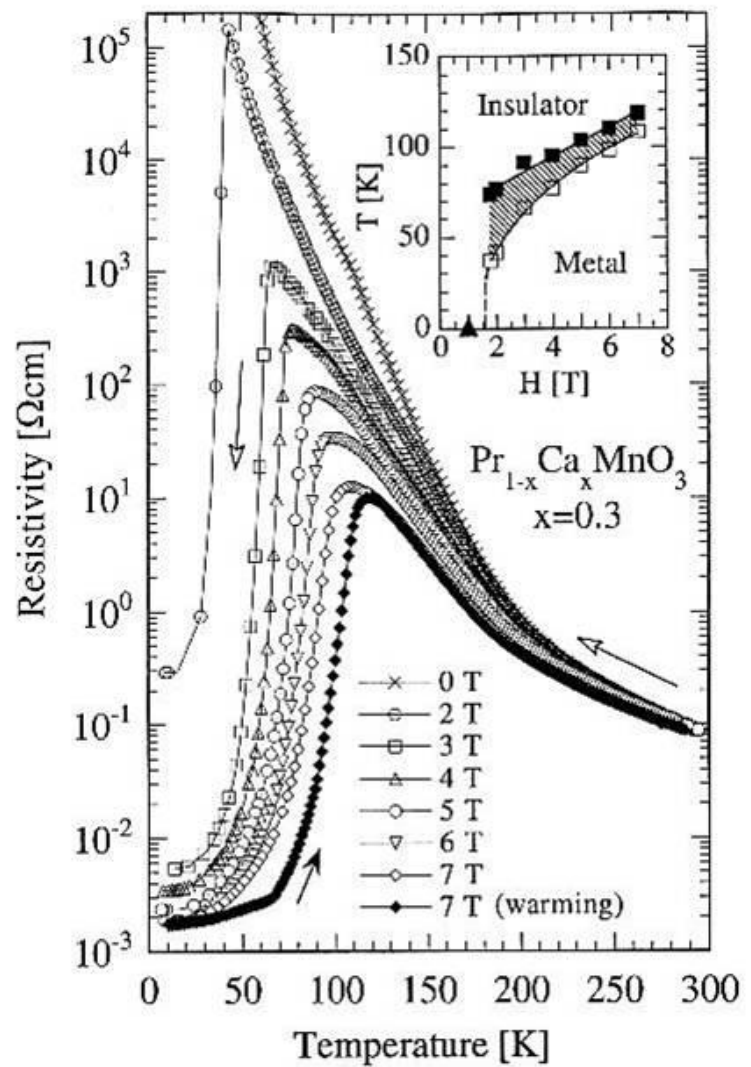
²*Institute of Physics, University of Augsburg, D-8900 Augsburg, Germany*

(Received 14 May 1993)

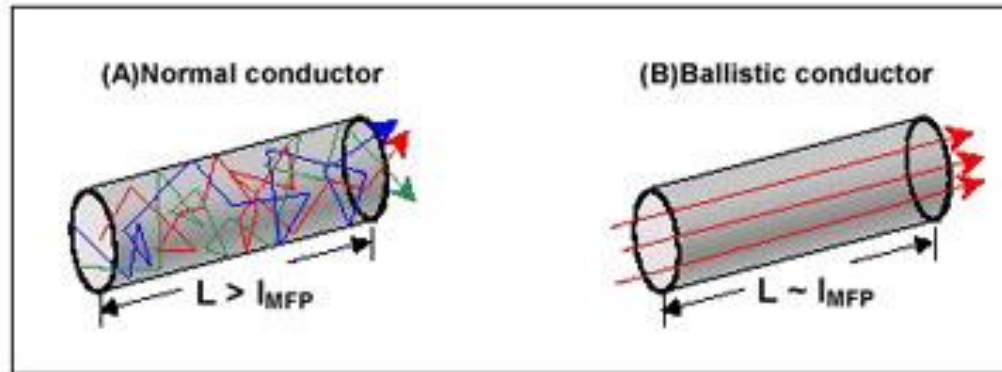
At room temperature a large magnetoresistance, $\Delta R/R(H=0)$, of 60% has been observed in thin magnetic films of perovskitelike La-Ba-Mn-O. The films were grown epitaxially on SrTiO_3 substrates by off-axis laser deposition. In the as-deposited state, the Curie temperature and the saturation magnetization were considerably lower compared to bulk samples, but were increased by a subsequent heat treatment. The samples show a drop in the resistivity at the magnetic transition, and the existence of magnetic polarons seems to dominate the electric transport in this region.

JIN S, TIEFEL TH, MCCORMACK M, FASTNACHT RA, RAMESH R, CHEN LH *et al.*
Thousandfold change in resistivity in magnetoresistive La-Ca-Mn-O films. *Science*
264, 413–415 (1994)

Kolosalny magnetoopór (CMR)



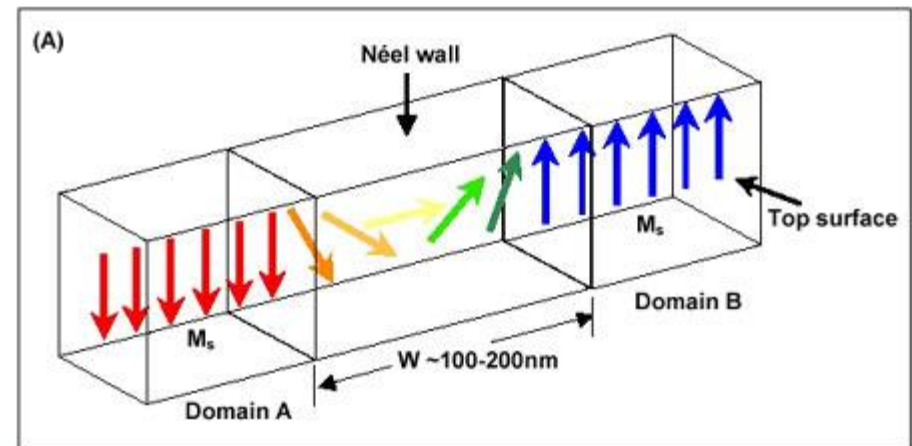
Nano-spintronika



In normal conductors, the conductor length is larger than the electron mean free path and motion is zigzag, figure (A) above.

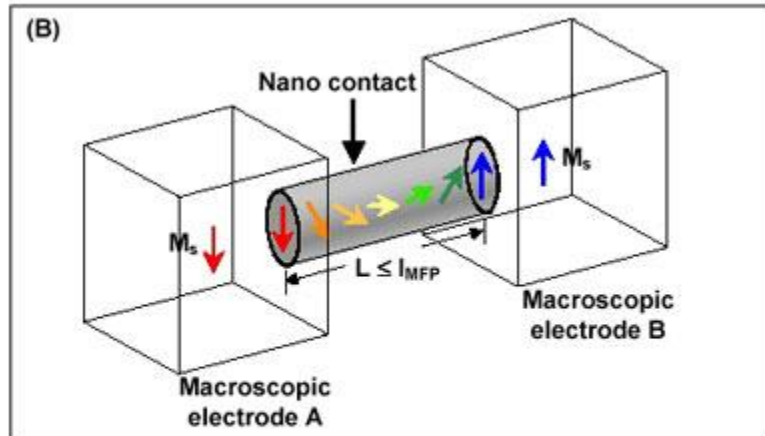
For electrons passing through a nanocontact, the nanocontact length is comparable to or less than electron mean free path and motion is ballistic, figure (B) above.

Ballistic Magnetoresistance



Néel wall in a thin film separates two domains of opposite magnetization. Wall width "W" is several hundred nanometers and BMR effect is negligible.

Nano-spintronika



Wall width within a nanocontact separating two macroscopic electrodes of opposite magnetization. Wall width is in the nanometer range and electrons passing through the nanocontact experiences a huge scattering moment.

(A) Magnetization across nanocontact opposite in direction, giving rise to high resistance state.
 (B) Magnetization across nanocontact parallel in direction, giving rise to low resistance state.
 Transition from state A to state B by applied magnetic field - BMR effect.

