

Magnetoresistência Gigante: Precursor da Spintrônica

R. B. Muniz
Universidade Federal Fluminense

Colaboradores:

D. M. Edwards
J. Mathon

Filipe S. M. Guimarães



Armazenagem de informação

- Uma parcela significativa de toda informação existente hoje (textos, imagens, sons e dados em geral) está armazenada em meios magnéticos.
- Isto se deve ao aumento incrível da capacidade de memória dos dispositivos de armazenagem de dados.

3 TB



Armazenagem de informação

- Em 1980 o computador central da Universidade de Londres tinha apenas 200Kb de memória.
- Um lançamento recente de pendrive:

- Hoje os te



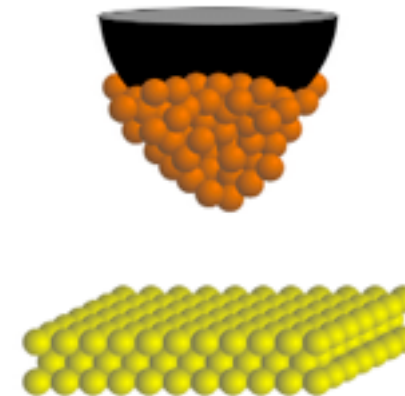
- Um cartão de memória de 64GB hoje custa R\$200

7,1×2,6×2,1cm



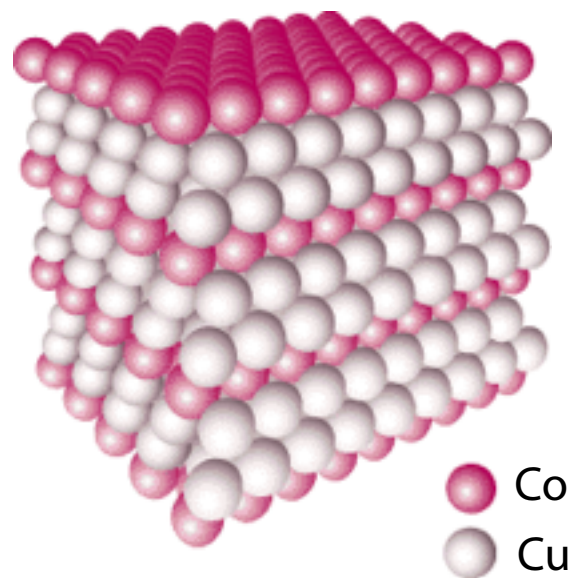
Nanociência e nanotecnologia

- Este progresso deve-se aos avanços na nanociência e nanotecnologia.
- Particularmente, ao controle na produção de novos materiais, tais como
 - Filmes ultrafinos
 - Multicamadas
 - Nanofios
 - Aglomerados

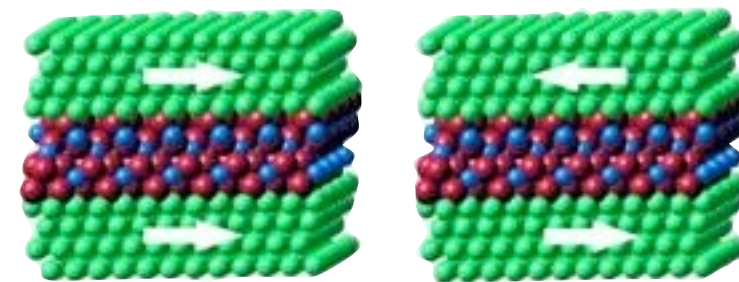


com dimensões nanoscópicas: $1\text{nm} = 10^{-9}\text{m}$

Nanoestruturas metálicas: alguns exemplos

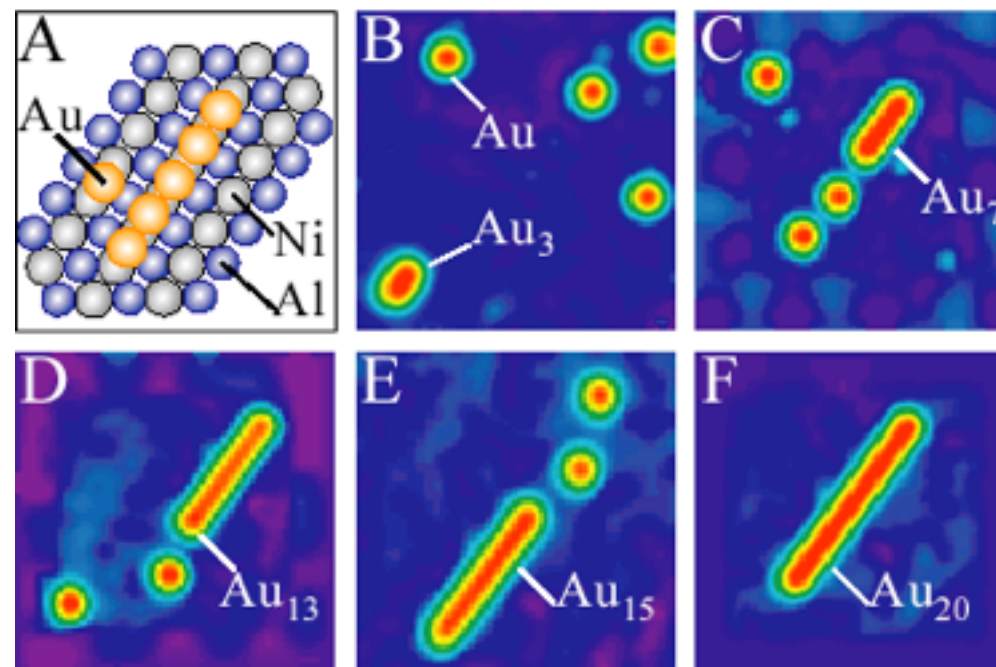


Multicamadas de Co/Cu(001)



Fe/MgO/Fe

Nanoestruturas metálicas: alguns exemplos

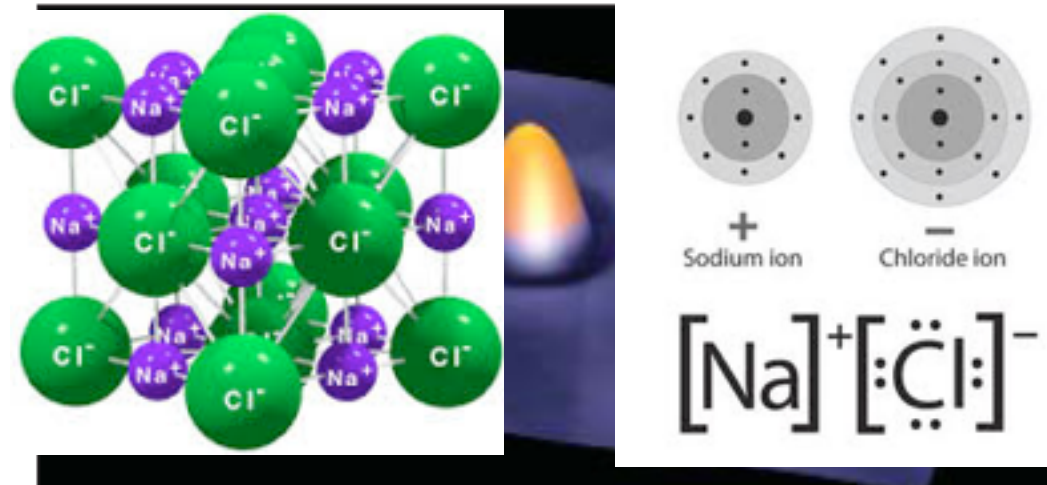
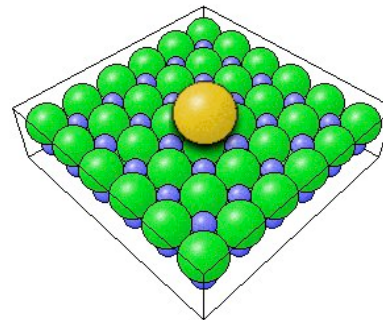


Nanofios de Au sobre NiAl

As propriedades físicas desses sistemas são muito diferentes das dos seus constituintes

Nanoestruturas metálicas: alguns exemplos

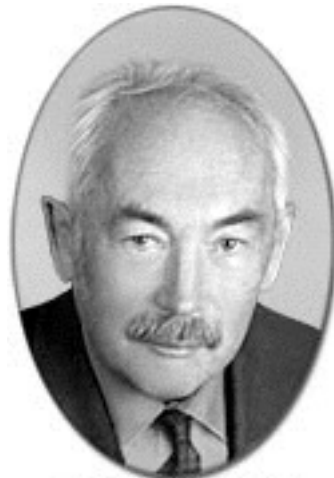
Au/NaCl



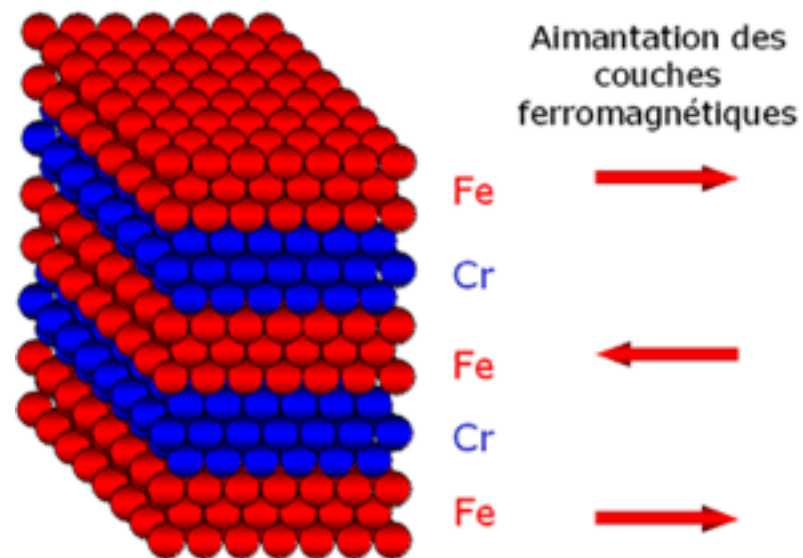
SCIENCE 305 23 JULY 2004

Nanoestruturas magnéticas são usadas em dispositivos de armazenagem e manipulação de informação.

Acoplamento magnético em multicamadas



Peter Grünberg
(1939-Present)



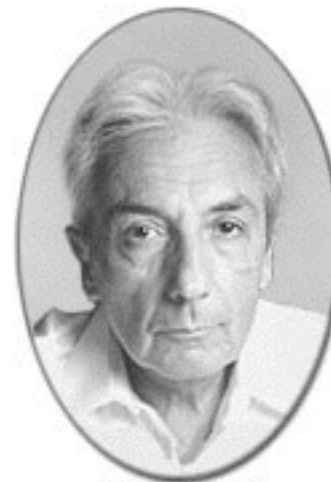
Enhanced magnetoresistance in layered magnetic structures
with antiferromagnetic interlayer exchange"

G. Binasch et al., Physical Review B, Vol. **39**, No. 7 (1989)

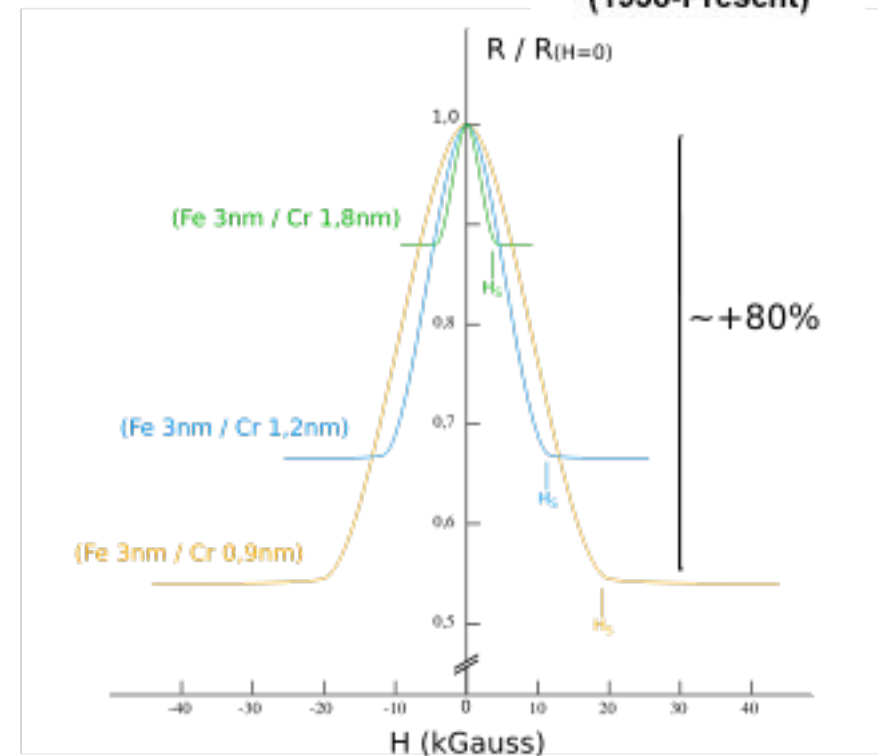
Magnetoresistência gigante



Mario Baibich



Albert Fert
(1938-Present)

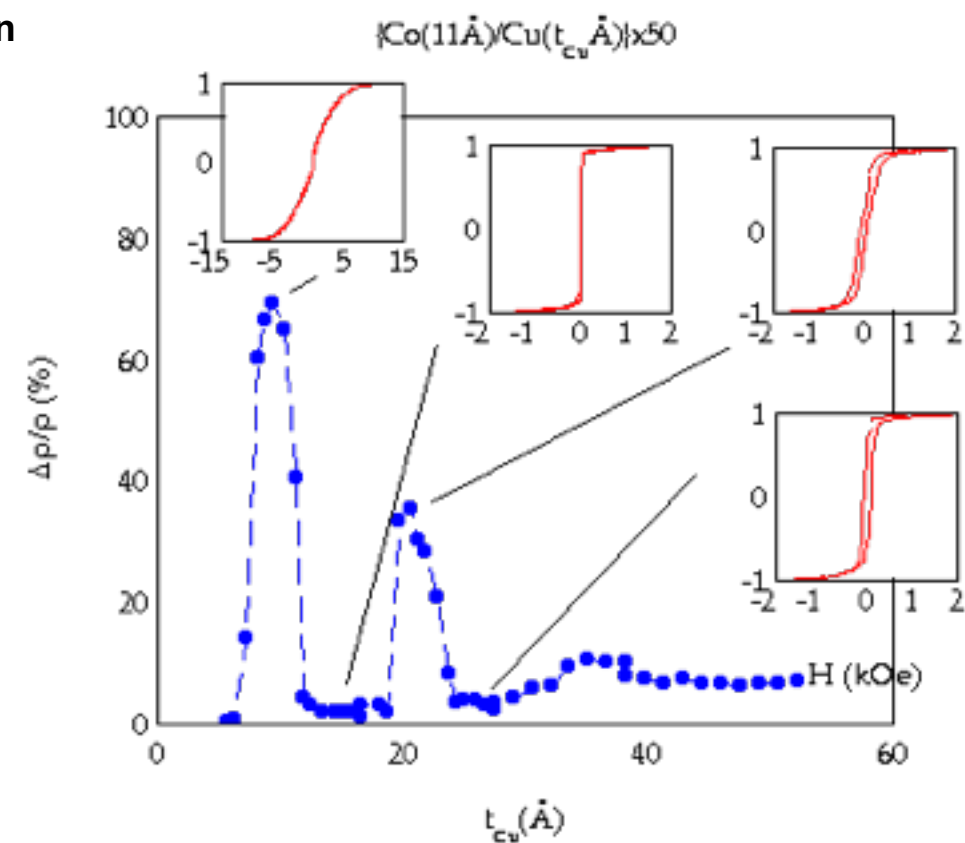
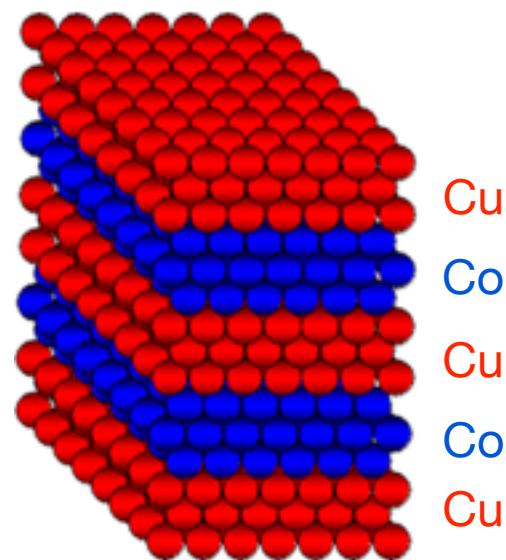


"Giant Magnetoresistance of (001)Fe/(001)Cr Magnetic Superlattices"
M.N. Baibich et al., Physical Review Letters Vol. 61, No. 21 (1988)

Magnetoresistência gigante: acoplamento magnético oscilatório em multicamadas



Stuart Parkin

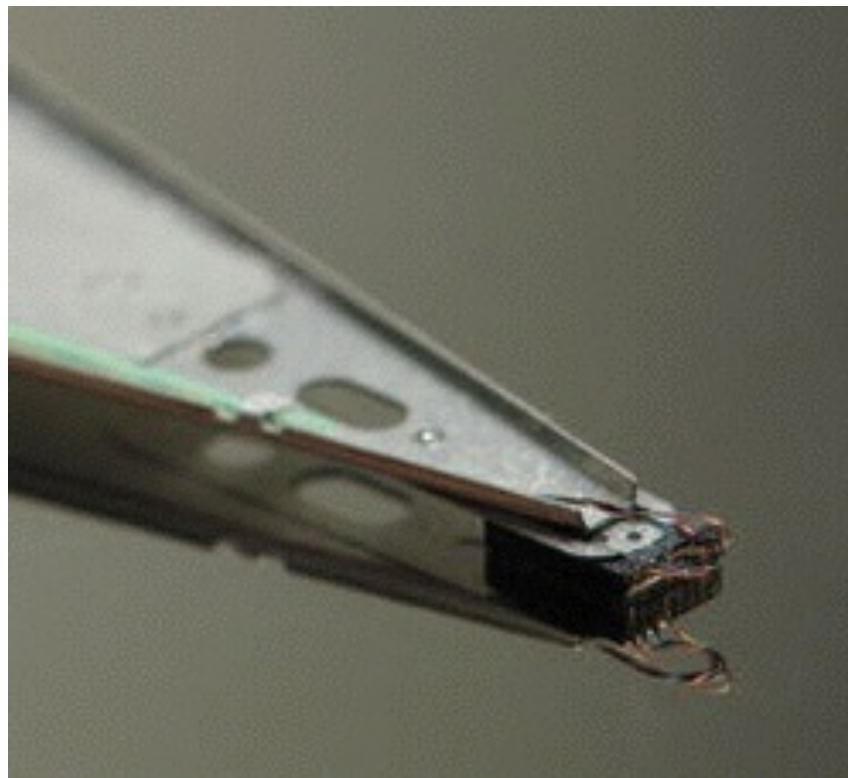


“Oscillatory magnetic exchange coupling through thin copper layers”

S. S. P. Parkin et al., Phys. Rev. Lett. **66**, 2152–2155 (1991)

Estas descobertas causaram um grande impacto
na indústria magnética

Sensores magnéticos de alta sensibilidade



Digitalização

- Informação é codificada em bits: contração inglesa de binary digits (0,1)

Um bit:

0
1

 2 possibilidades

Dois bits:

0	0
0	1
1	0
1	1

 4 possibilidades

- 1 Byte = 8 bits

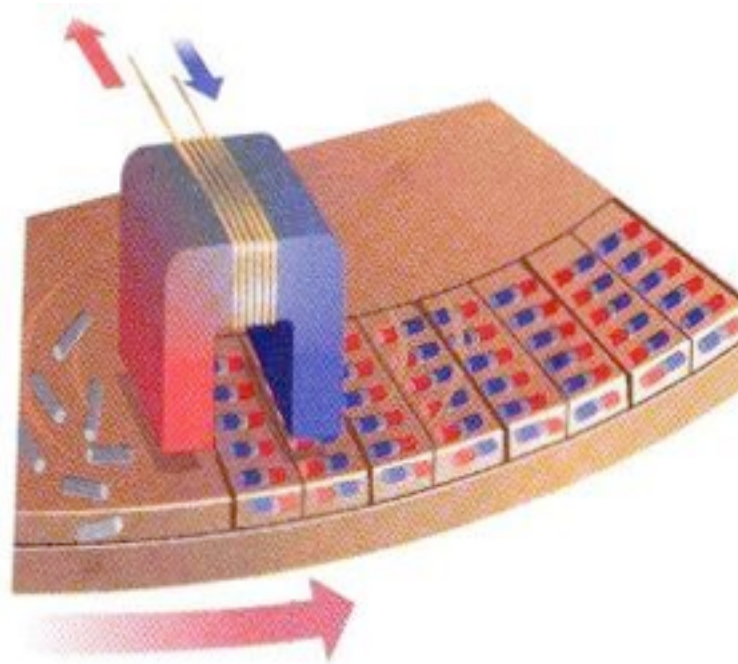
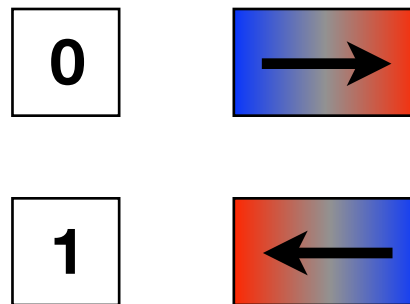
0	0	0	0	0	0	0	0
---	---	---	---	---	---	---	---

 $2^8 = 256$ possibilidades

- 1 palavra (word) = 4 Bytes = 32 bits = $2^{32} = 4.294.967.296$ possibilidades

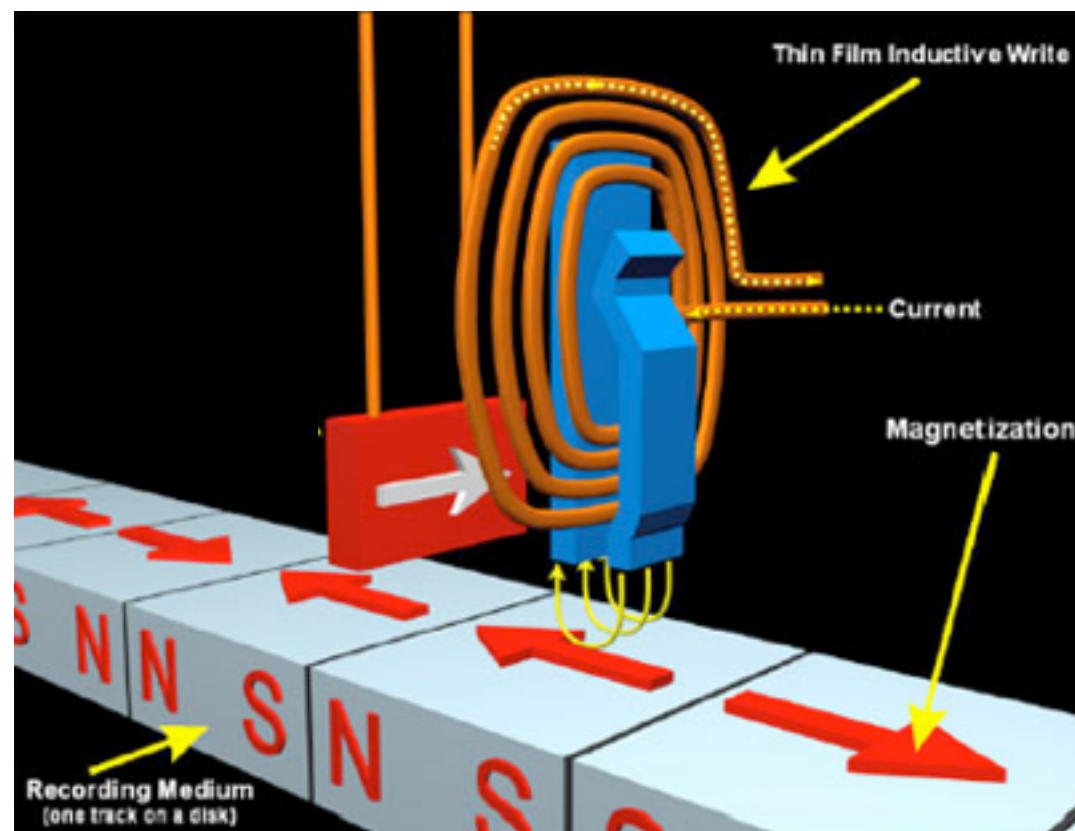
Armazenagem de informação

- Em meios magnéticos, os bits são unidades magnetizadas em uma direção ou outra

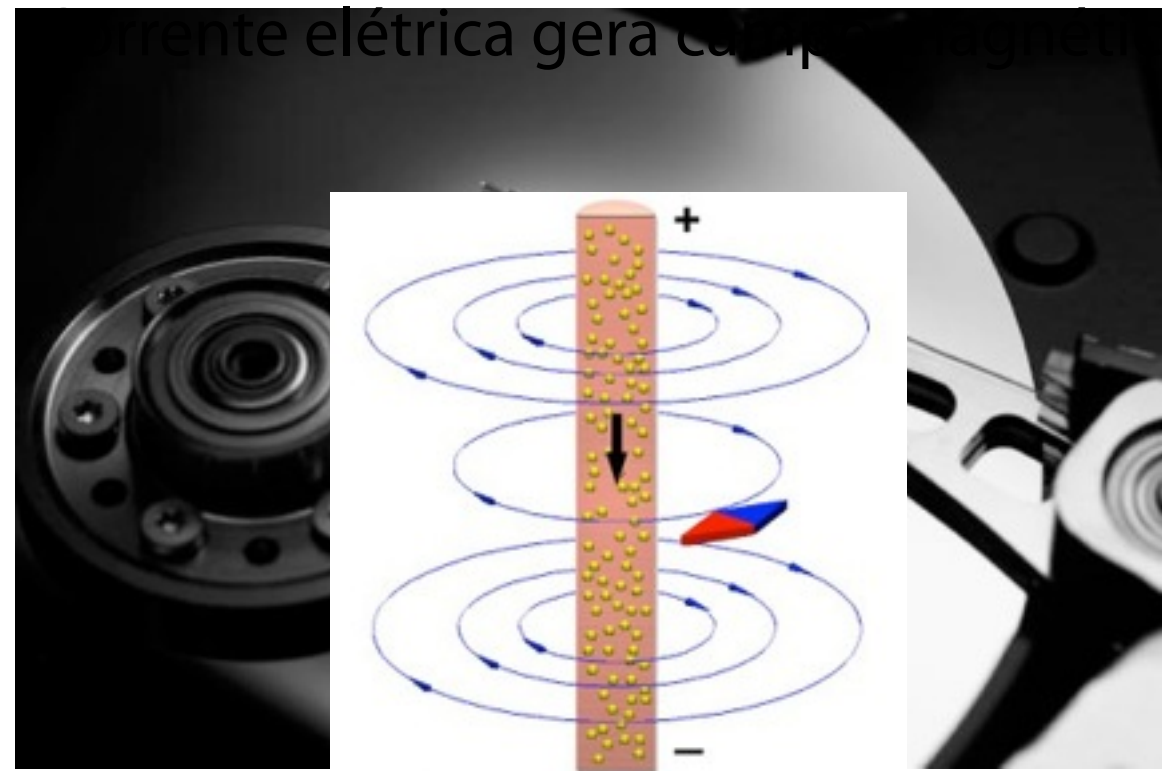


Armazenagem de informação

- Para aumentar a capacidade de armazenamento precisamos reduzir o tamanho da unidade magnética que armazena os bits



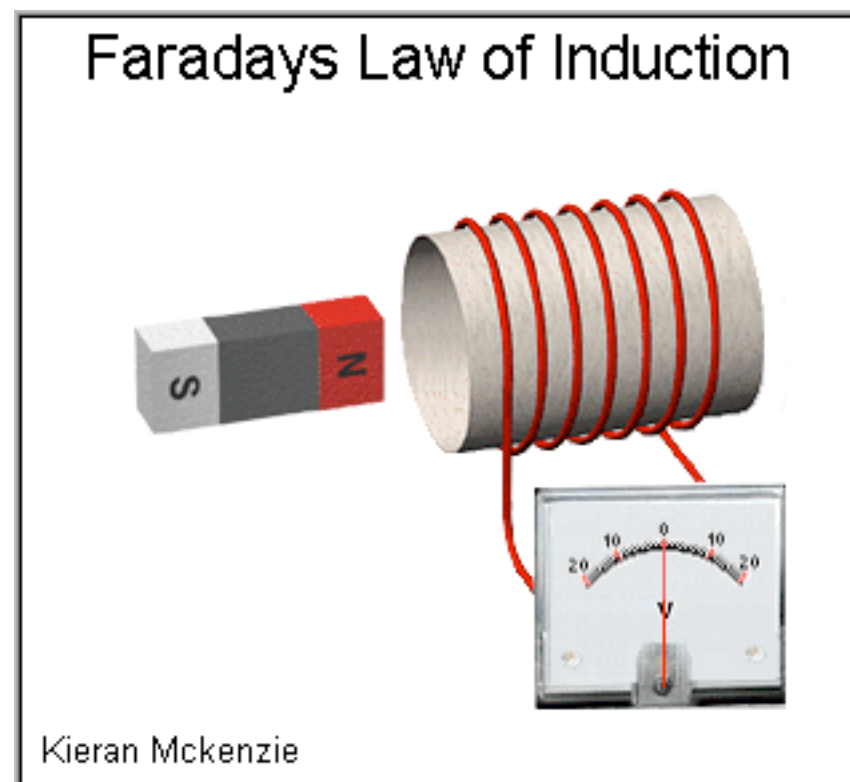
Importância tecnológica: sensores magnéticos de alta sensibilidade



Importância tecnológica: sensores magnéticos de alta sensibilidade

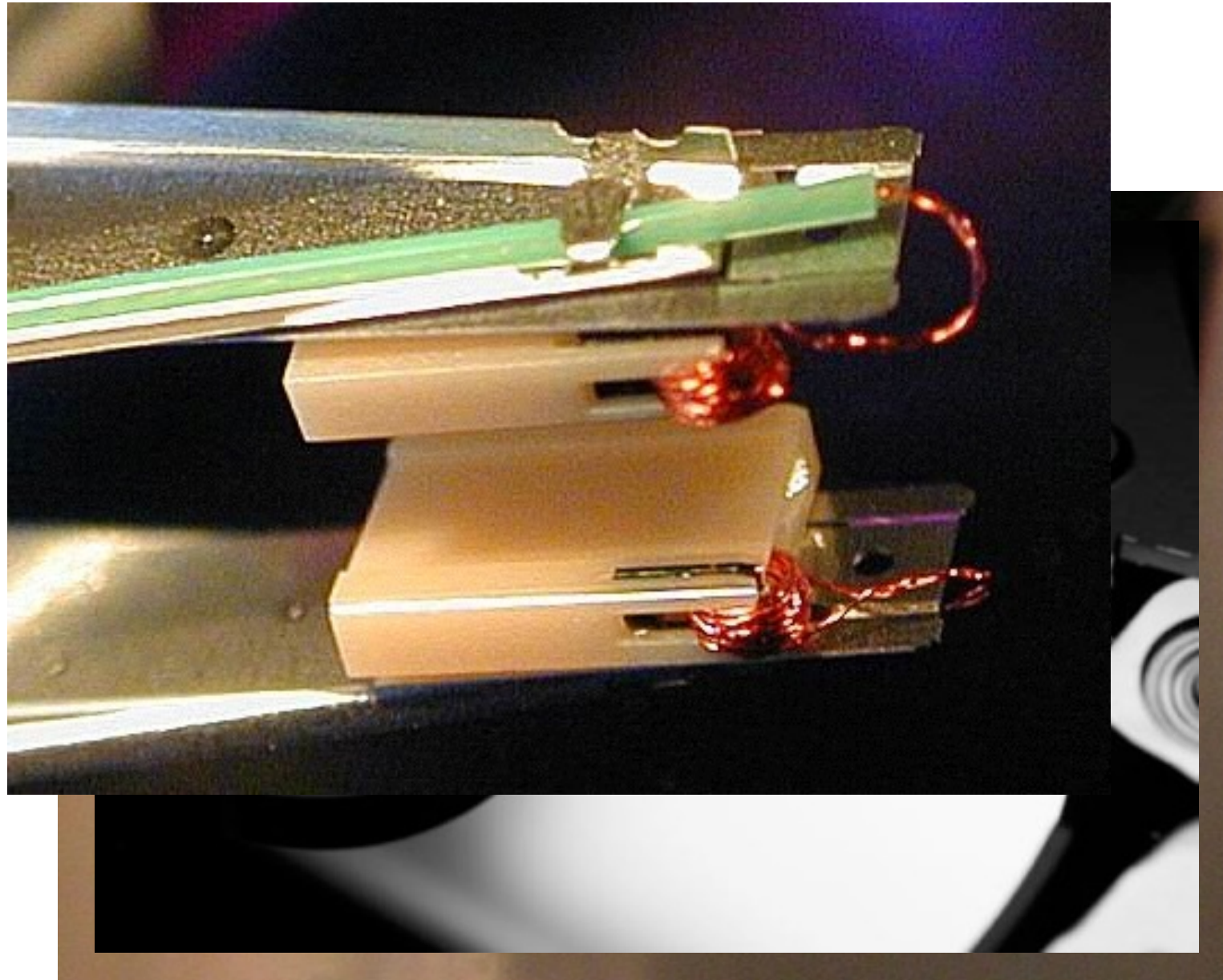
Sensores indutivos

Campo magnético pode gerar corrente elétrica

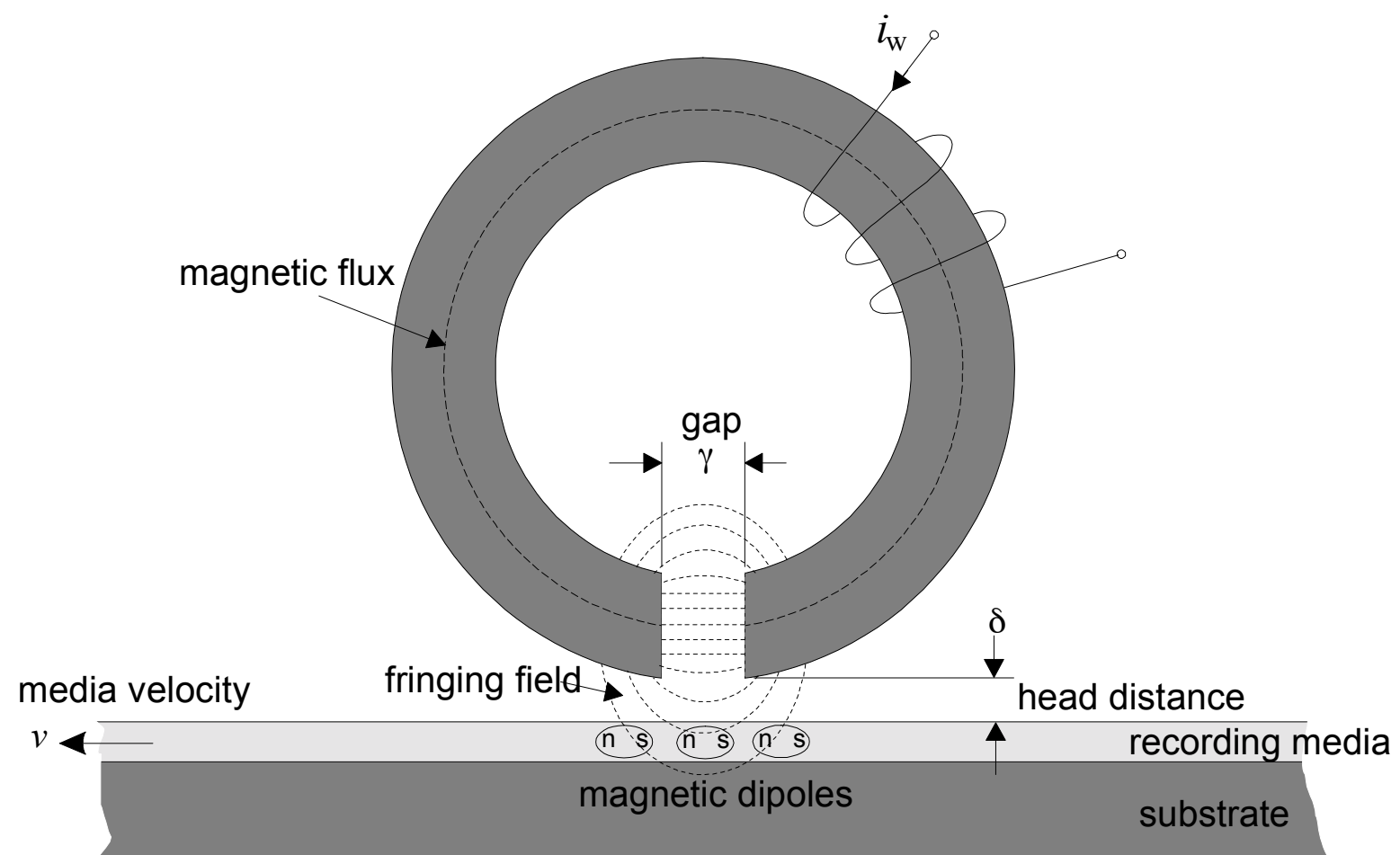


Lei de Faraday

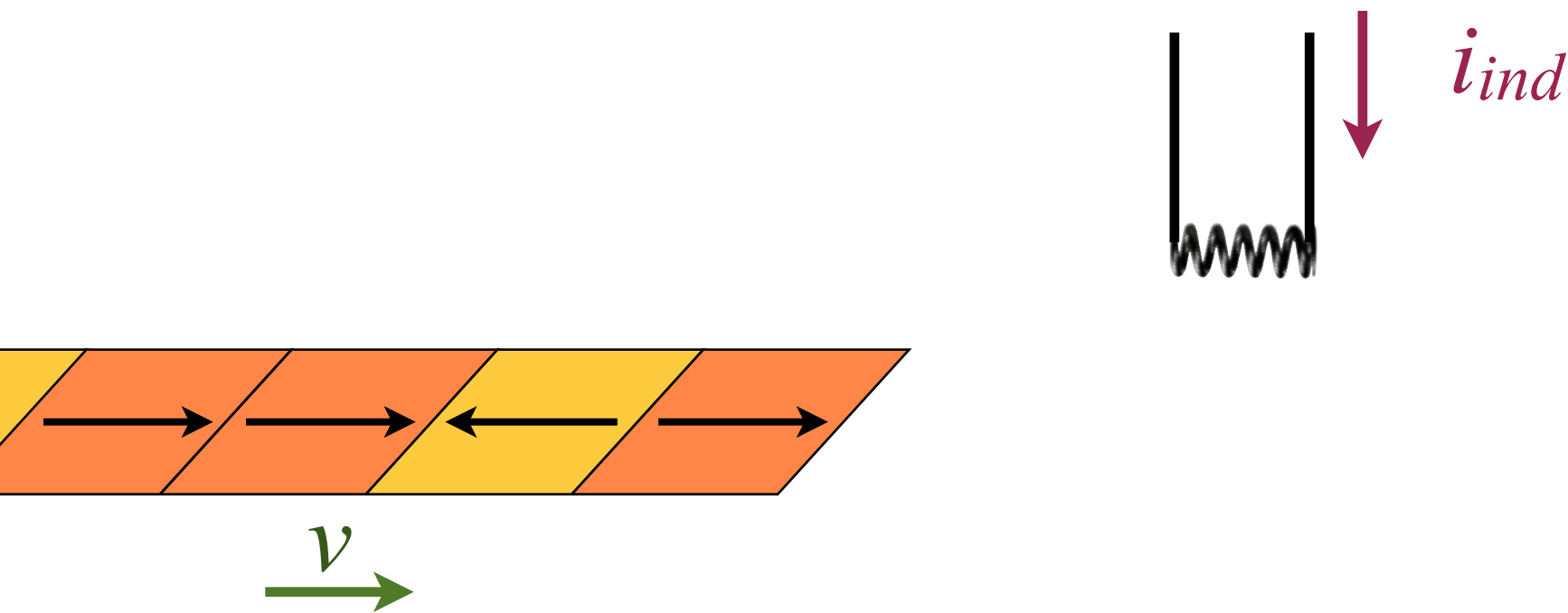
Os primeiros discos rígidos comerciais utilizavam sensores indutivos para escrita e leitura



Cabeçotes indutivos



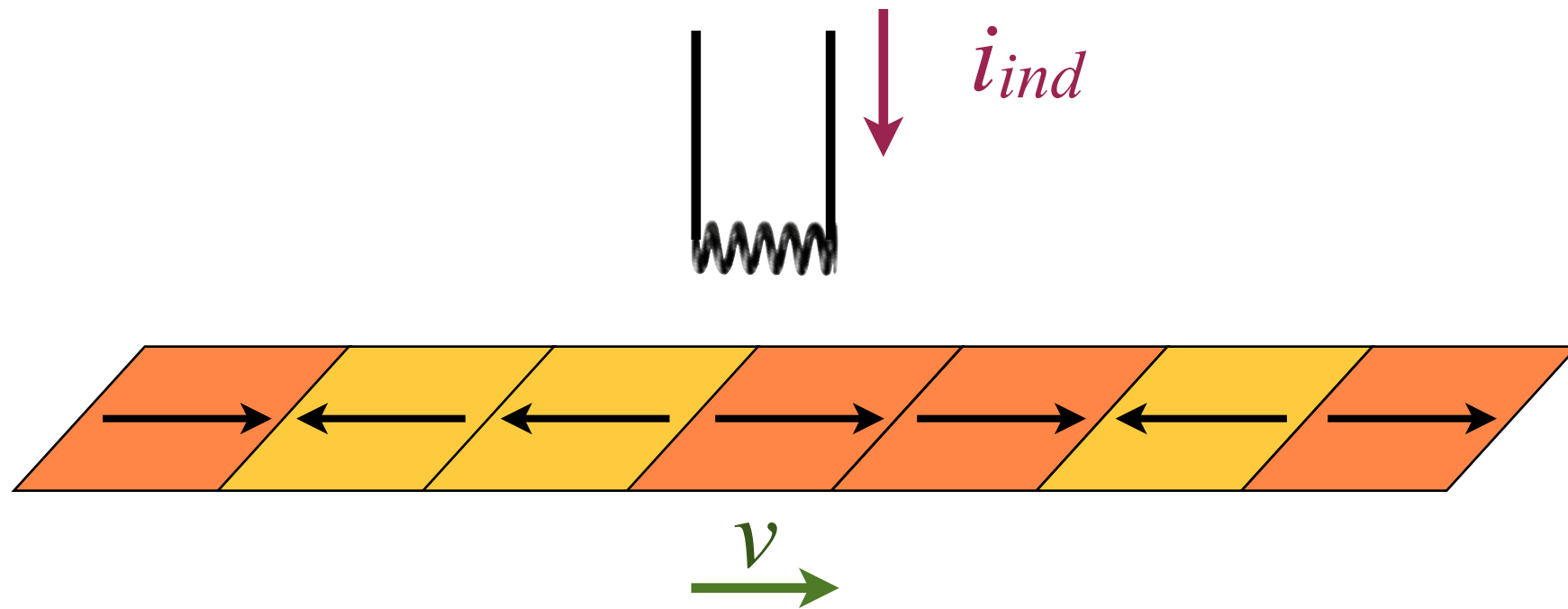
A corrente induzida depende da taxa de variação do fluxo do campo magnético através da espira



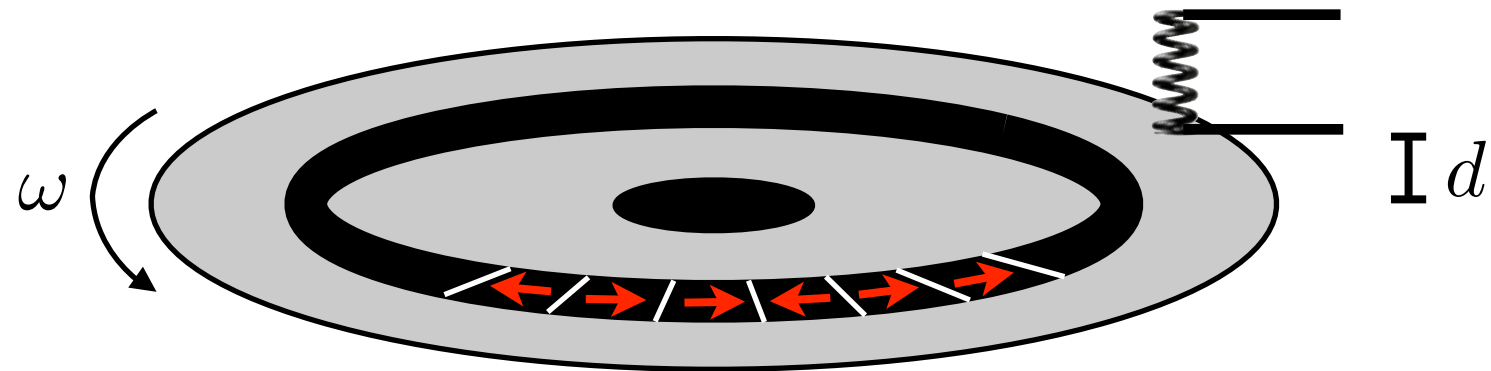
• A corrente induzida depende:

- ✓ tamanho da unidade magnética
- ✓ distância da espira à unidade magnética
- ✓ da velocidade com que a unidade magnética se move

A corrente induzida depende da taxa de variação do fluxo do campo magnético através da espira



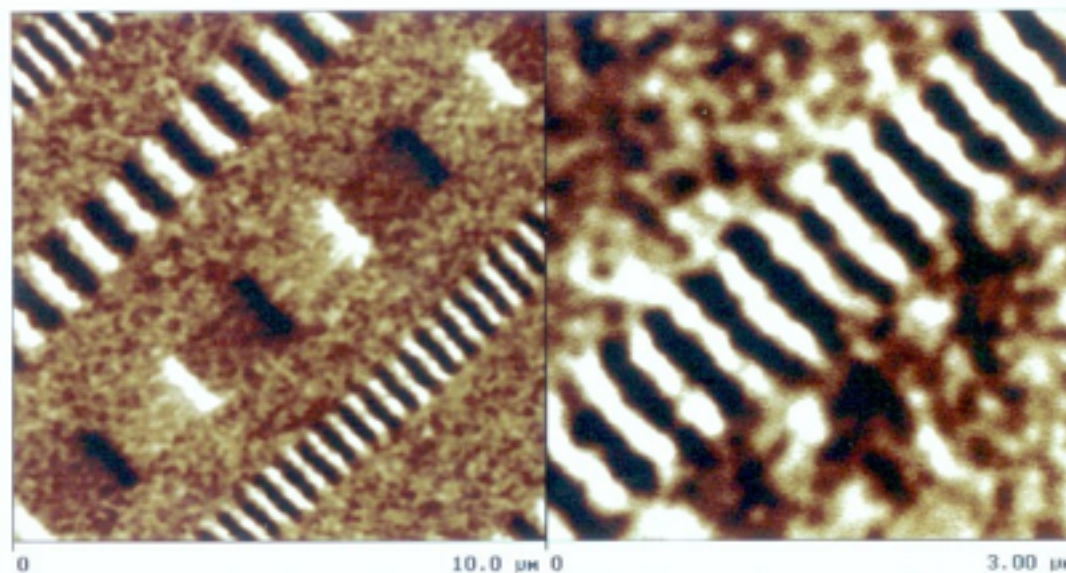
Esta tecnologia tem limitações



$$\omega \sim 7200 \text{ rpm}$$

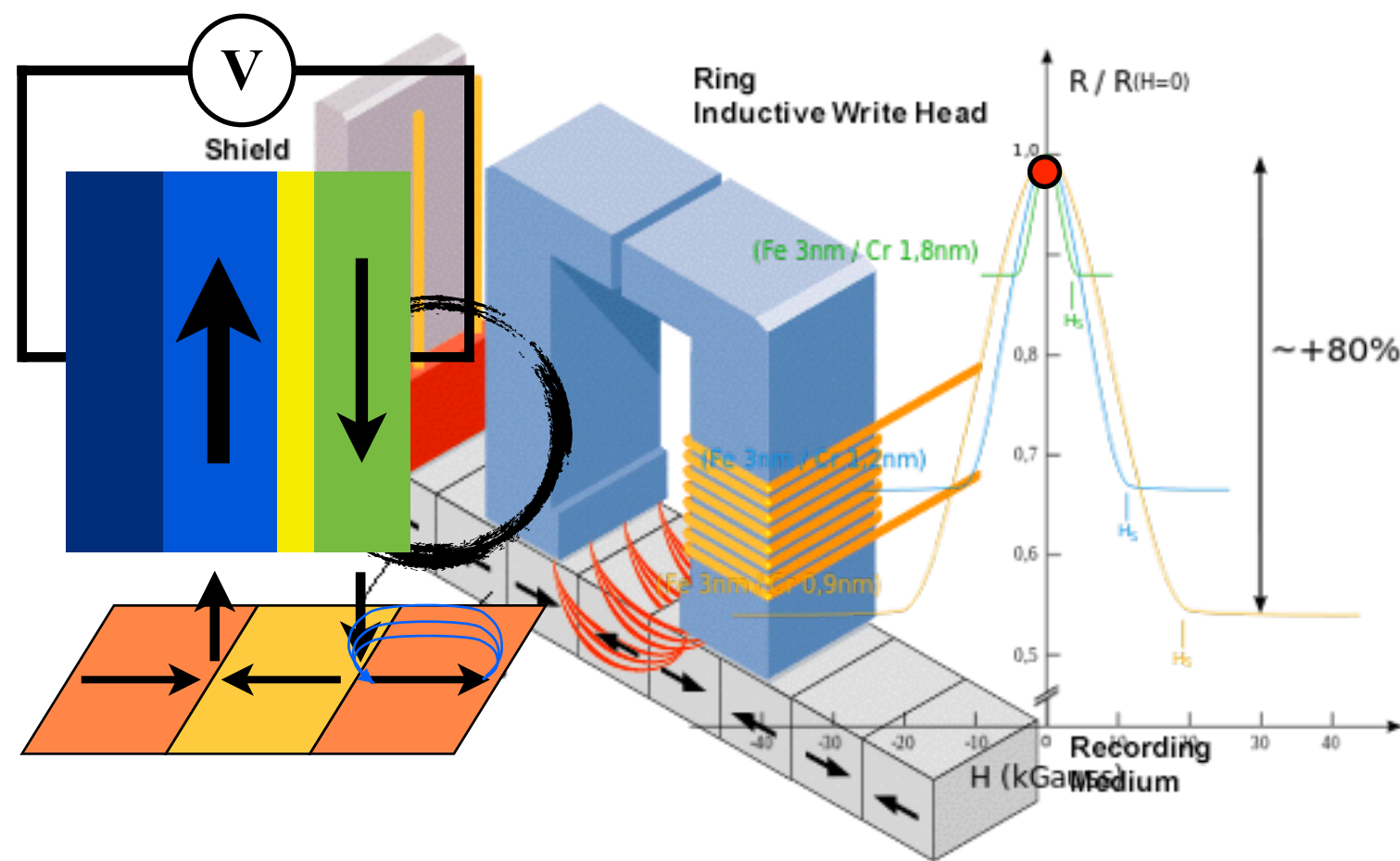
$$d \sim 3 \text{ nm}$$

- A densidade de gravação no disco não é uniforme
- A velocidade linear da periferia é maior do que no centro ($v = \omega r$)

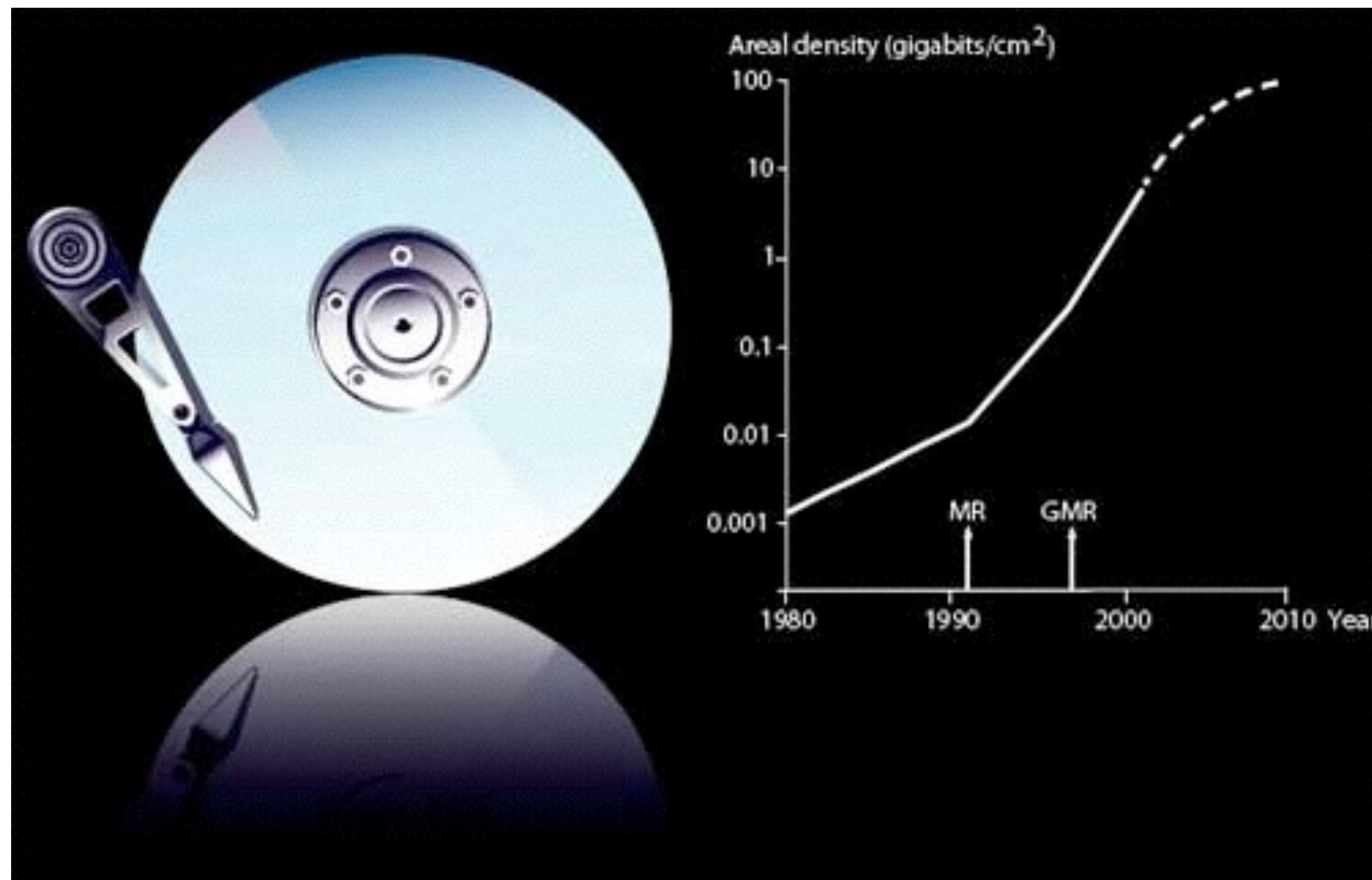


Sensor magnetoresistivo

Magnetoresistência gigante



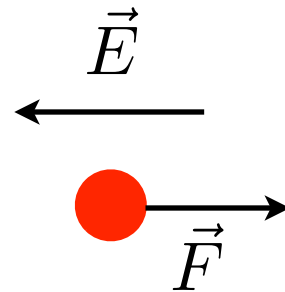
Impacto na Capacidade de Armazenamento



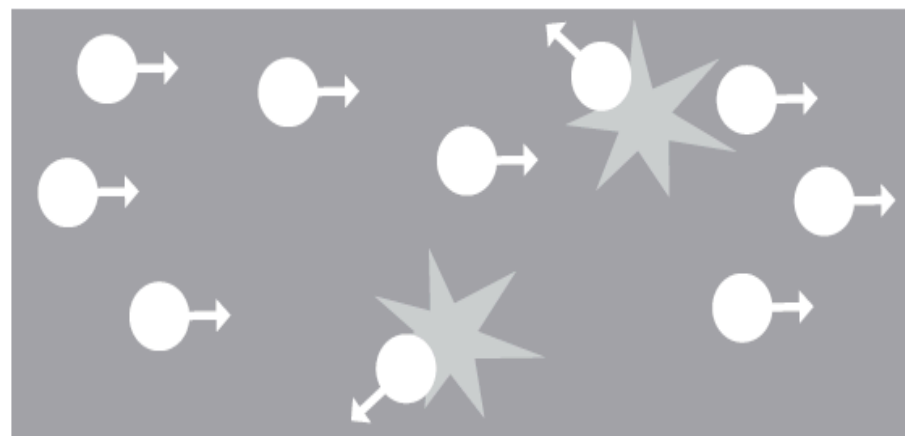
Explicação para o efeito GMR

Resistência elétrica

- Nos metais os portadores de corrente elétrica são os elétrons de condução.
- Os elétrons têm carga elétrica negativa ($-e$) e quando sujeitos a um campo elétrico \vec{E} sofrem uma força $\vec{F} = -e\vec{E}$



- Resistência elétrica ocorre devido a espalhamentos eletrônicos com impurezas e/ou heterogeneidades no material; quanto mais são espalhados maior a resistência

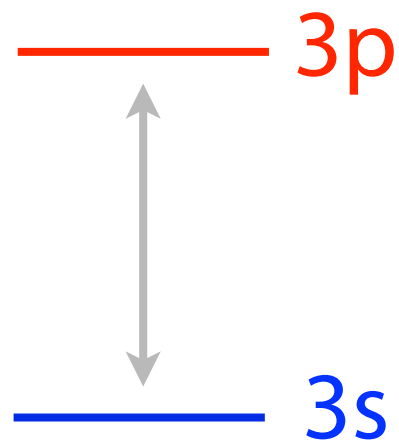


Resistência elétrica

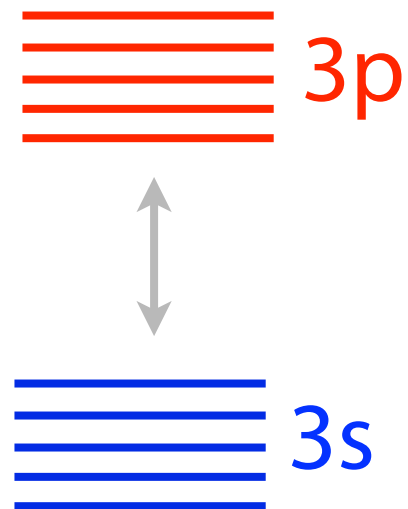
- Quanto maior for a densidade de centros espalhadores, maior será a resistência do material, pois a probabilidade de colisões aumenta.
- Entretanto, o espalhamento depende do número de estados disponíveis para os quais eles podem ser espalhados.
- Se não houver estados disponíveis, as colisões são ineficientes.

Estados eletrônicos

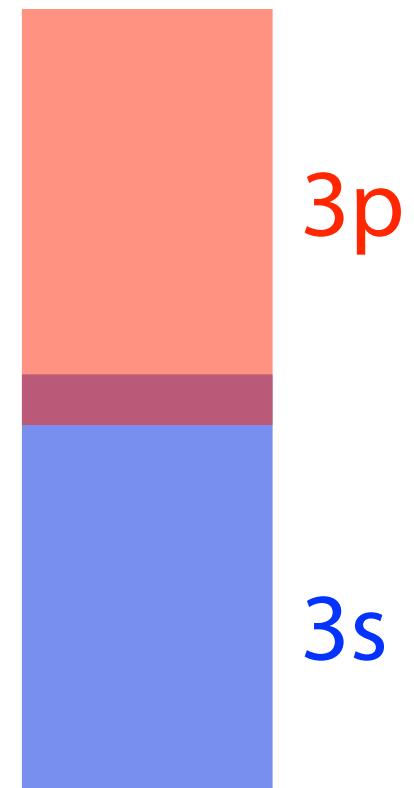
• Bandas de energia



Átomo
isolado



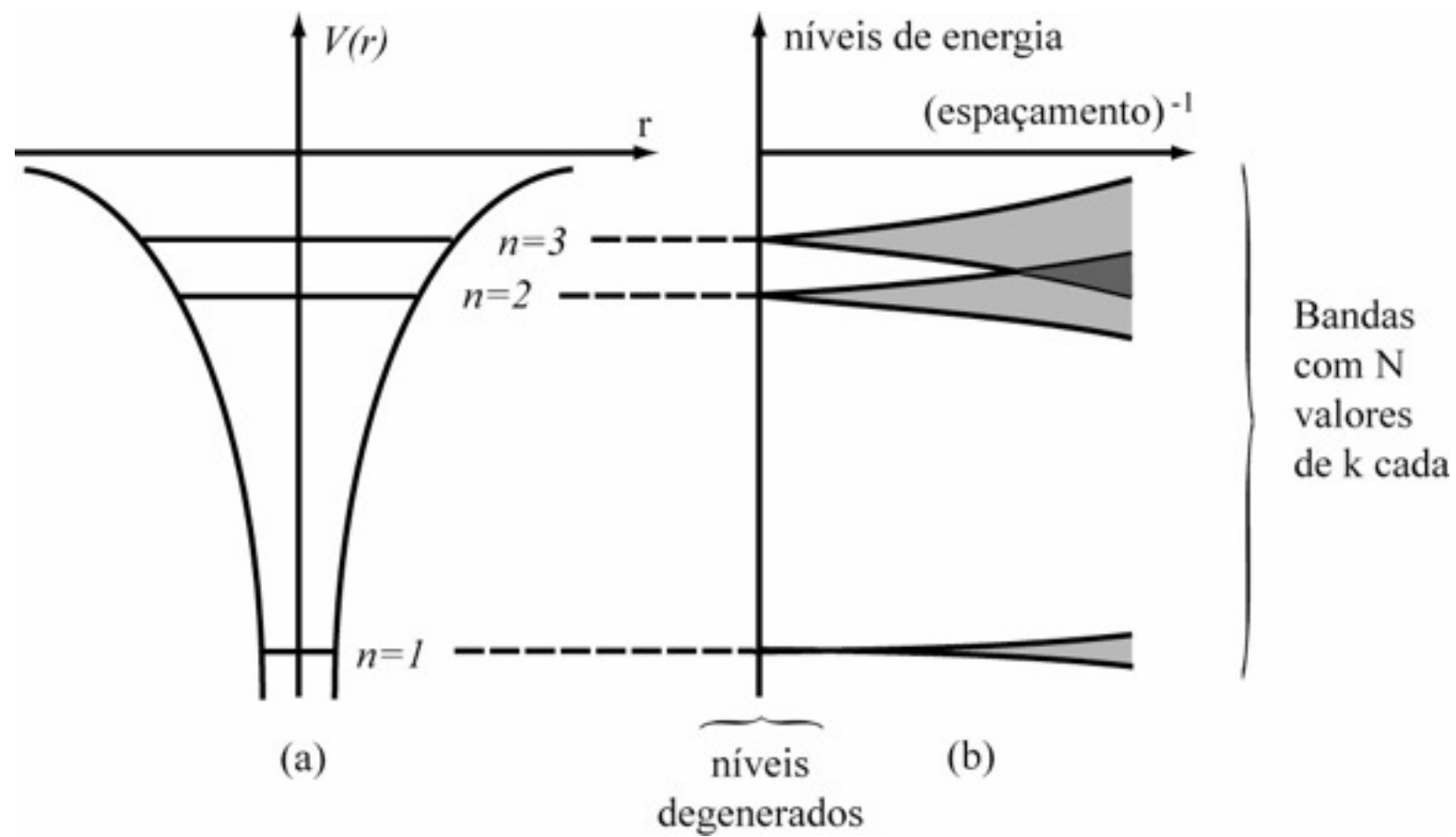
5 átomos
próximos



Muitos átomos
próximos

Estados eletrônicos

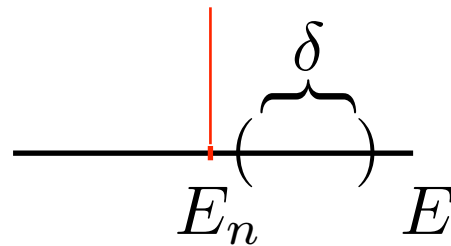
• Esquematicamente:



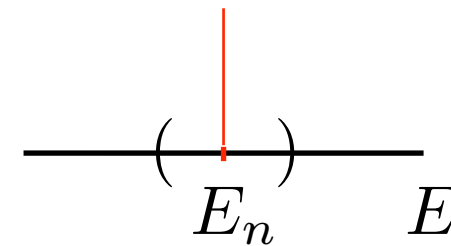
Densidade de estados eletrônicos

- Um conceito útil para analisar as propriedades eletrônicas em sólidos em geral é o da densidade de estados eletrônicos

$$\rho(E) = \sum_n \delta(E - E_n)$$



$$\int_{\delta} \rho(E) dE = 0$$

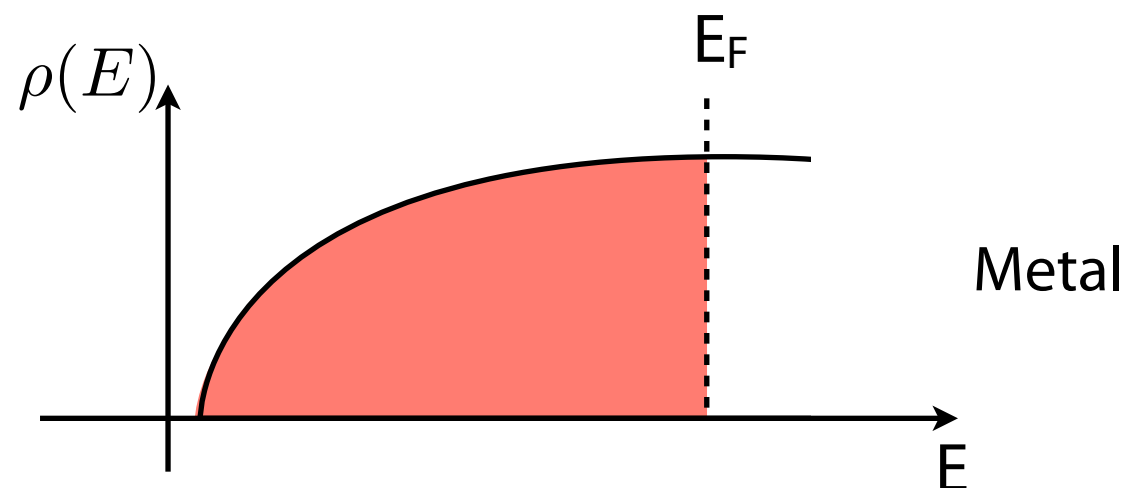


$$\int_{\delta} \rho(E) dE = 1$$

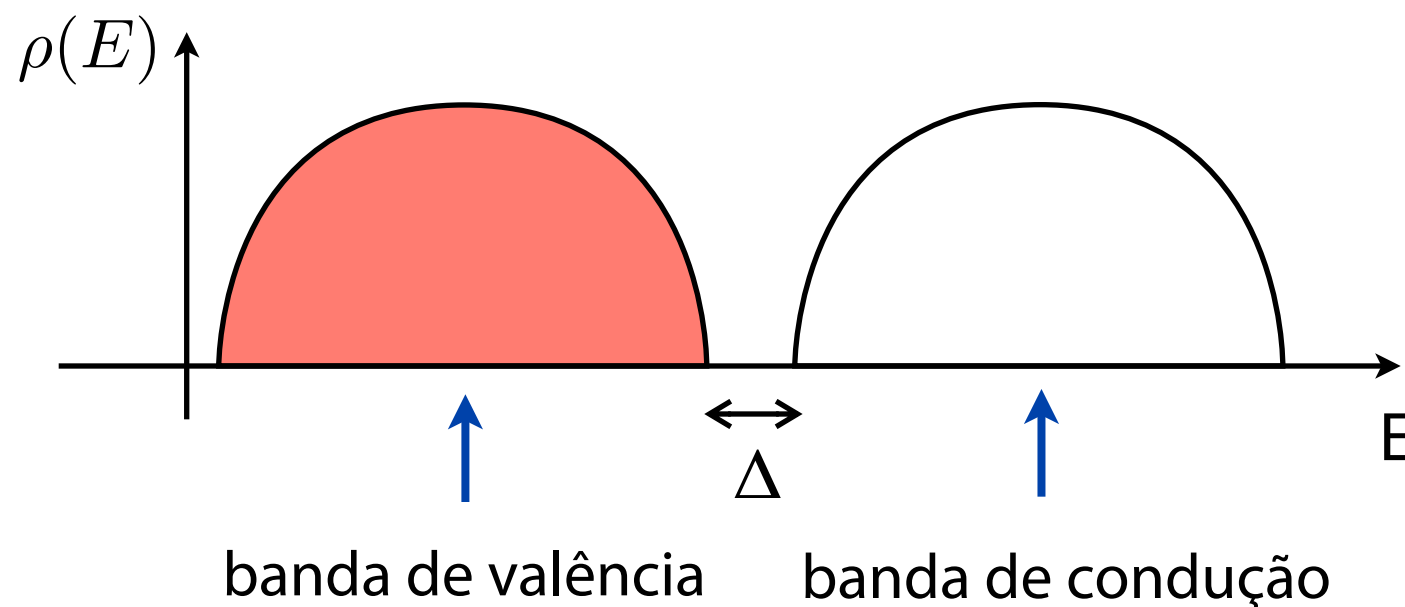
$$\int_{\delta} \boxed{\rho(E) \text{ funciona com um contador de estados}} \delta$$

Densidade de estados eletrônicos

- A densidade de estados $\rho(E)$ representa o número de estados eletrônicos por unidade de energia.



E_F representa o nível de Fermi (energia do último estado ocupado)

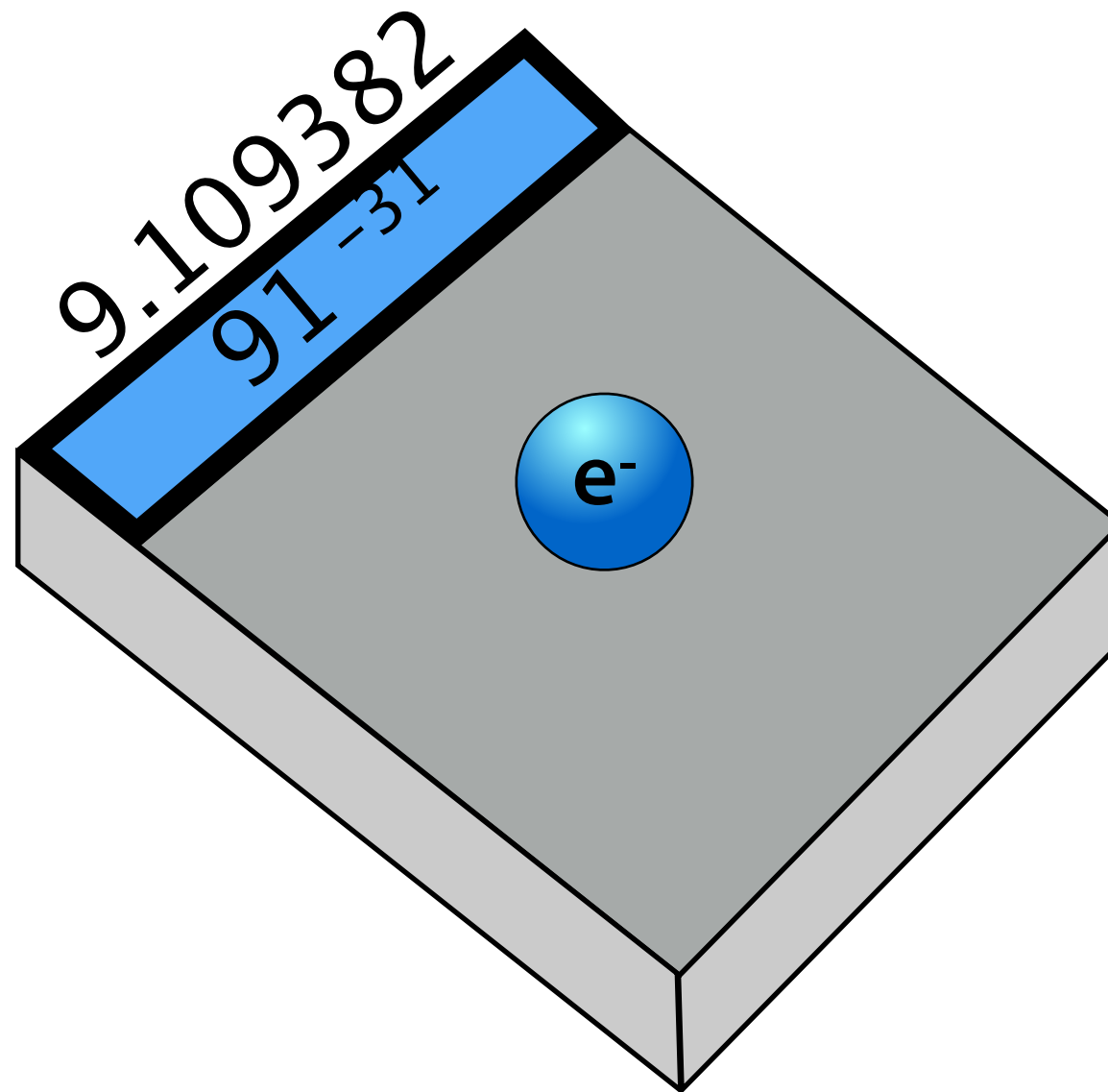


$\Delta \gg k_B T$ Isolante

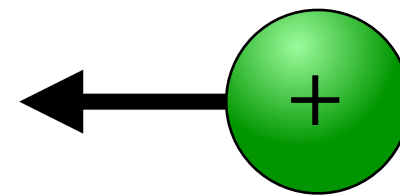
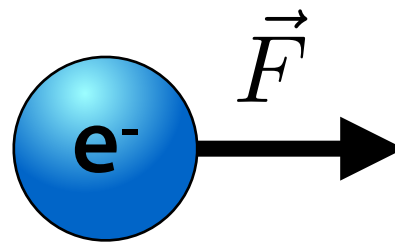
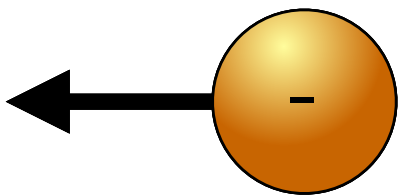
$\Delta \sim k_B T$ Semicondutor

Propriedades eletrônicas

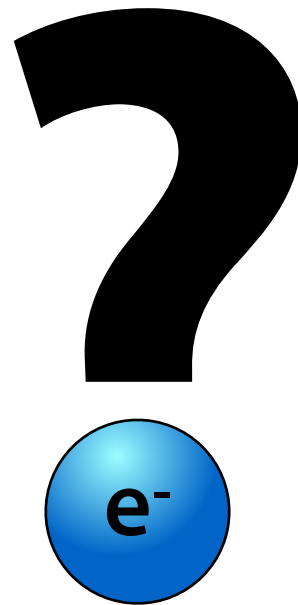
Elétrons possuem massa



Elétrons possuem carga



E o spin?

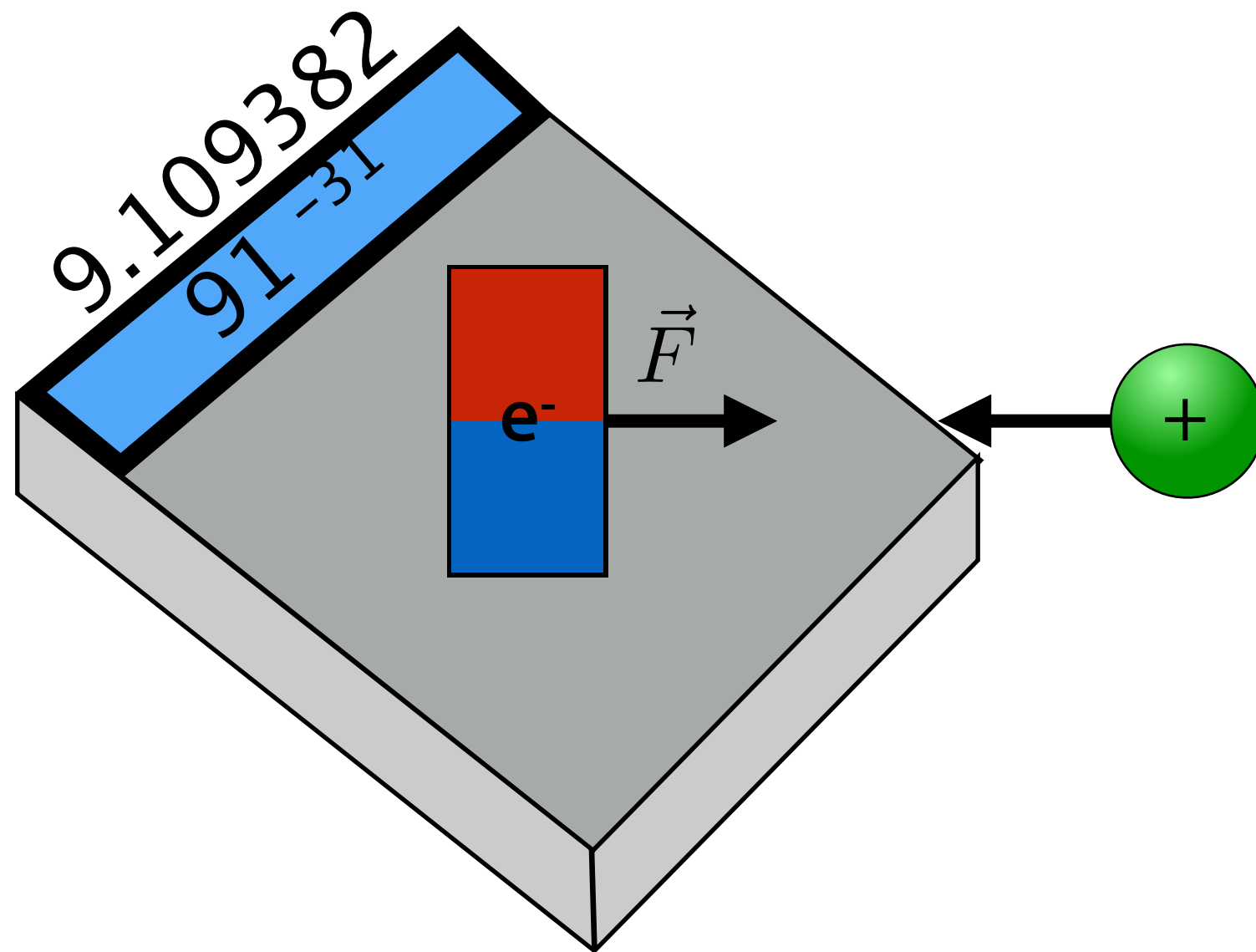


O experimento de Stern-Gerlach mostrou
que partículas possuem um momento angular intrínseco

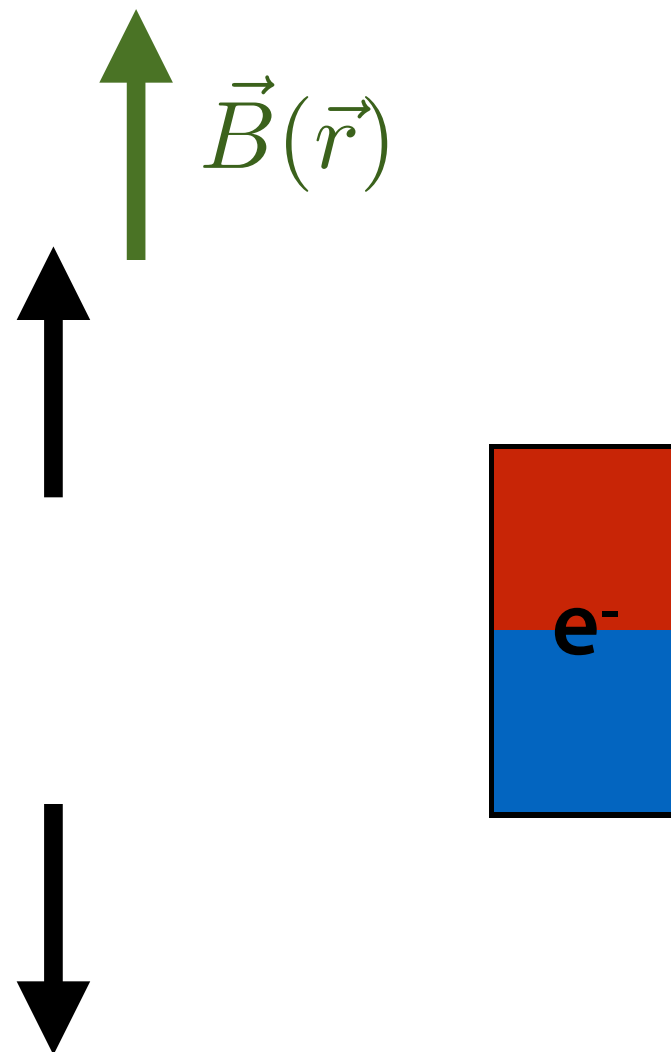
**THE SPIN,
A QUANTUM MAGNET**

All the animations and explanations on
www.toutestquantique.fr

Spin é uma propriedade intrínseca do elétron

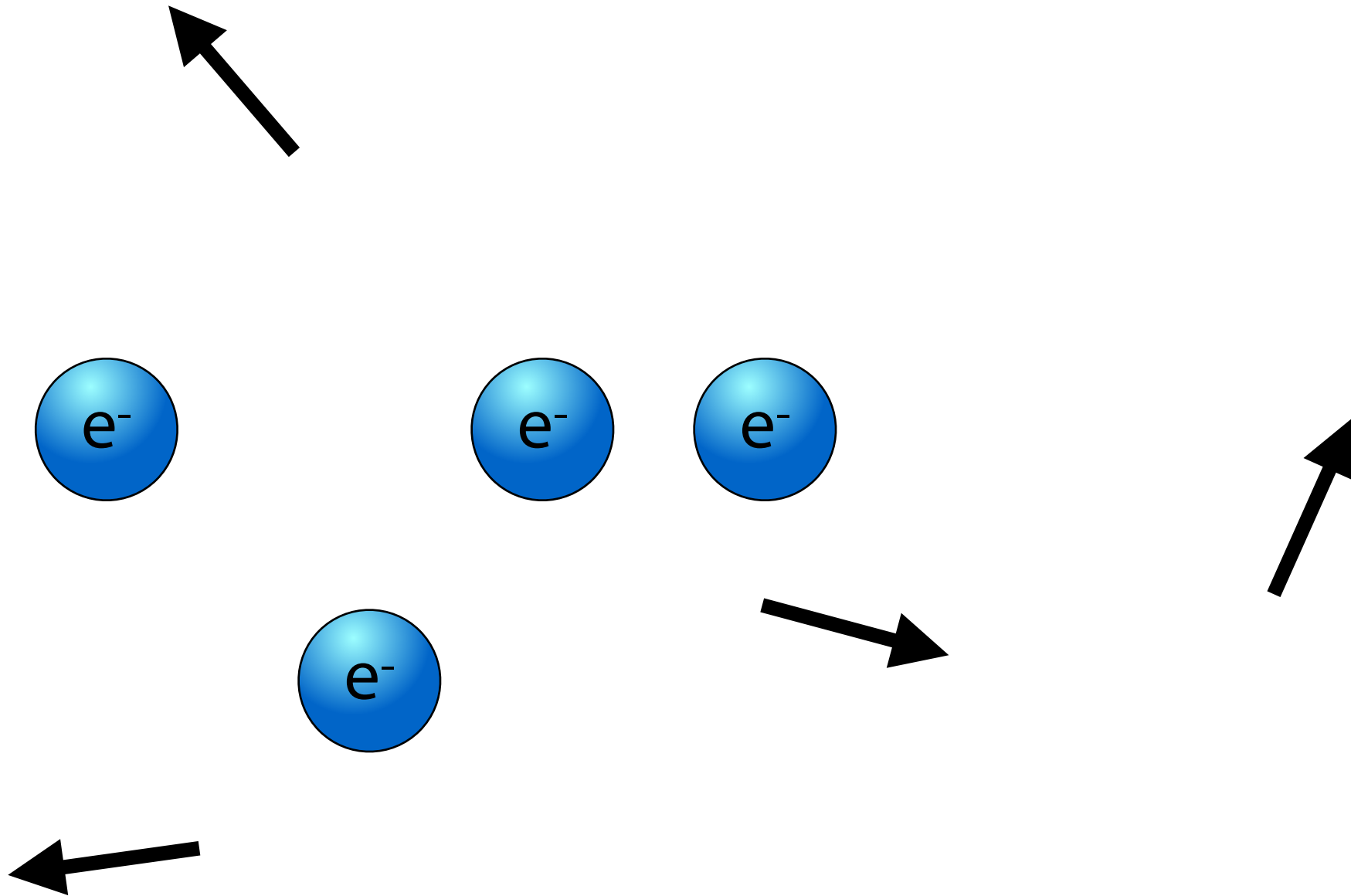


Ao medir os spins, obtemos valores discretos

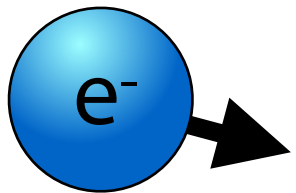


Eletrônica convencional

Em um metal, os elétrons de condução
são livres para se movimentar



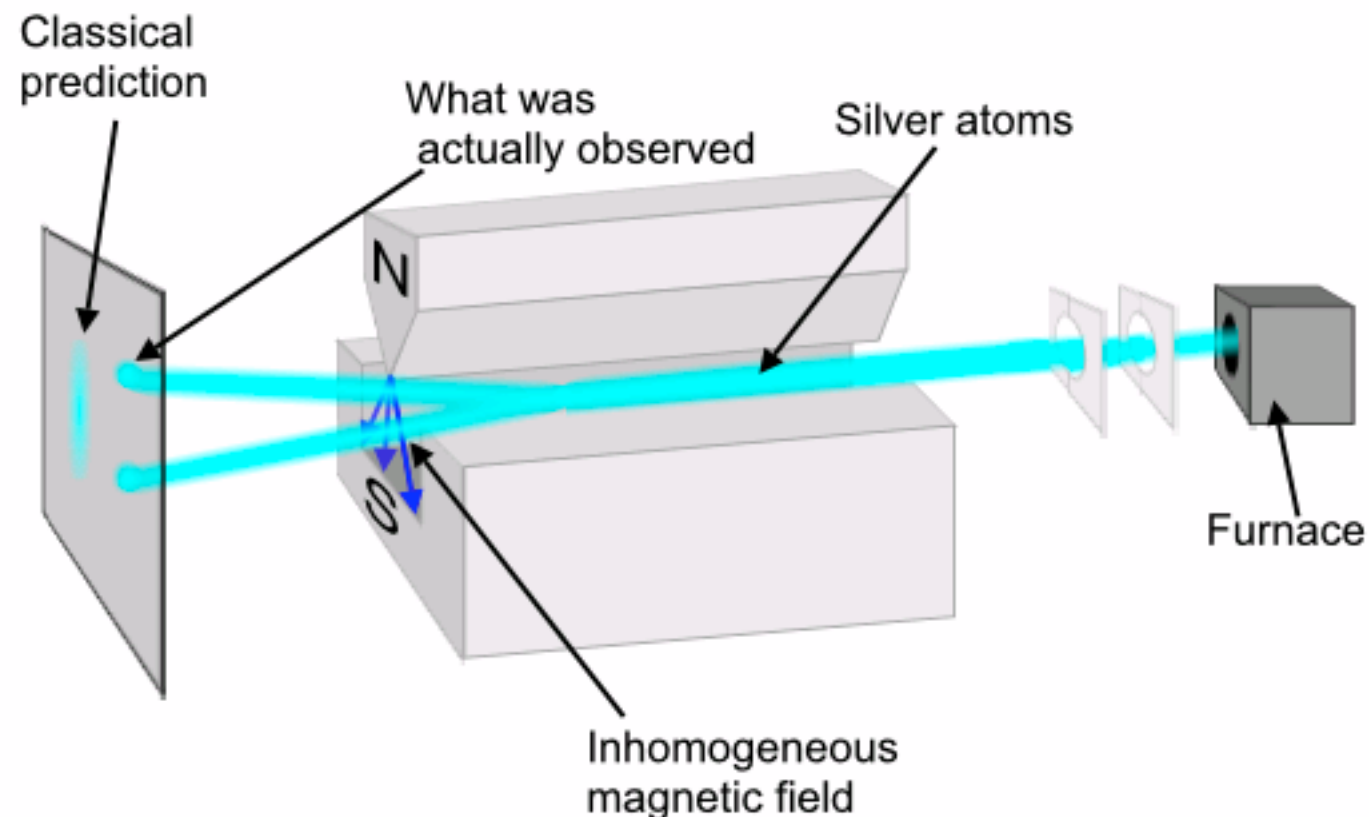
Dispositivos eletrônicos convencionais
não levam em conta o spin eletrônico



Sensores magnetoresistivos

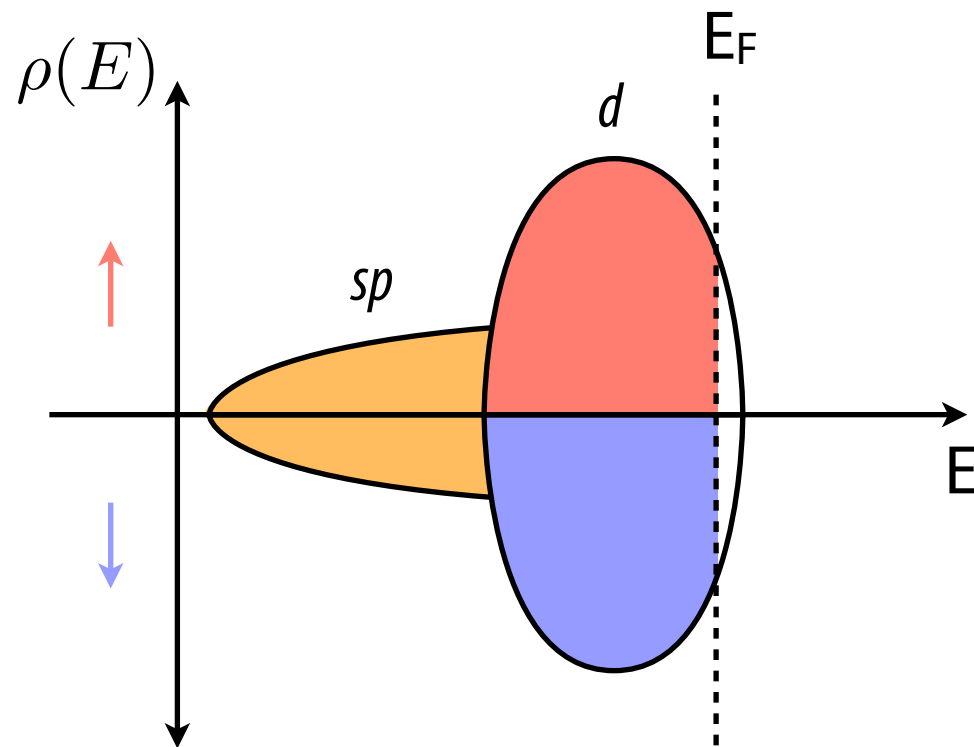
Spin eletrônico: Stern-Gerlach

- Além de possuírem massa e carga elétrica, os elétrons também possuem um momento angular intrínseco denominado spin.
- O spin eletrônico só pode ter 2 valores \uparrow ou \downarrow , dependendo da sua orientação em relação ao campo magnético externo.

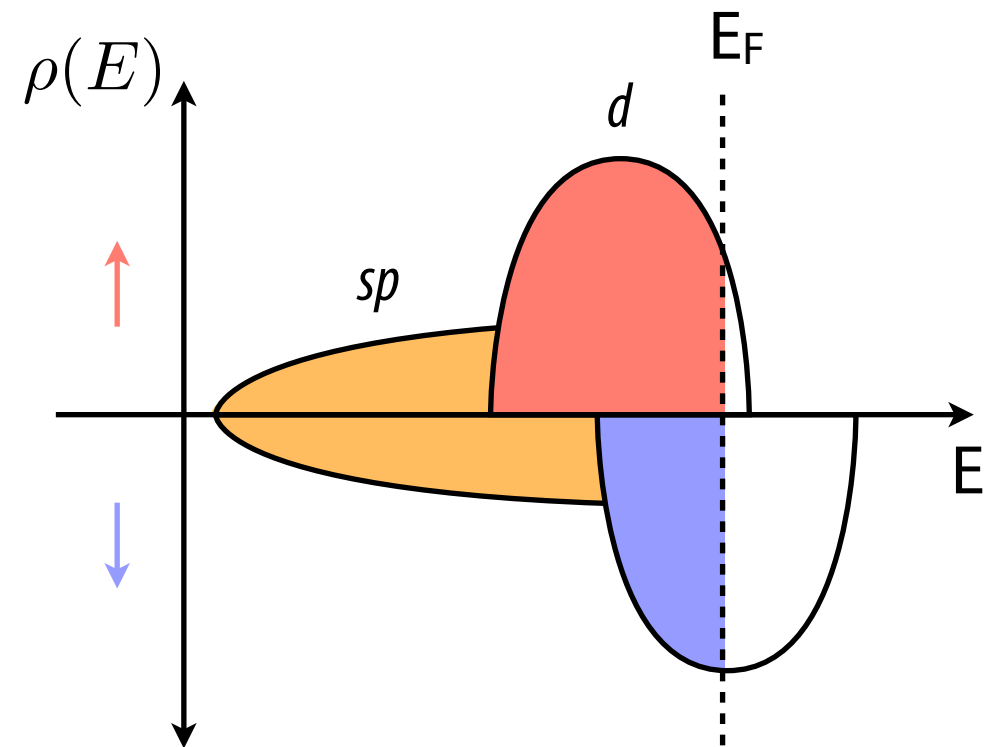


Metais magnéticos

- Nos materiais magnéticos, os estados eletrônicos para elétrons com spin \uparrow são deslocados em energia em relação aos dos elétrons com spin \downarrow



metal não-magnético



metal magnético

Modelo de duas correntes



Sir Nevil Mott

- A condução é feita pelos elétrons sp - os elétrons d também participam, porém, estão mais “presos” aos núcleos.
- A concentração de impurezas/irregularidades é a mesma para elétrons com spin ↑ e ↓
- Espalhamentos que provocam mudança no spin eletrônico são desprezíveis, elétrons com spin ↑ e ↓ trafegam em canais independentes; a resistência do sistema é dada por

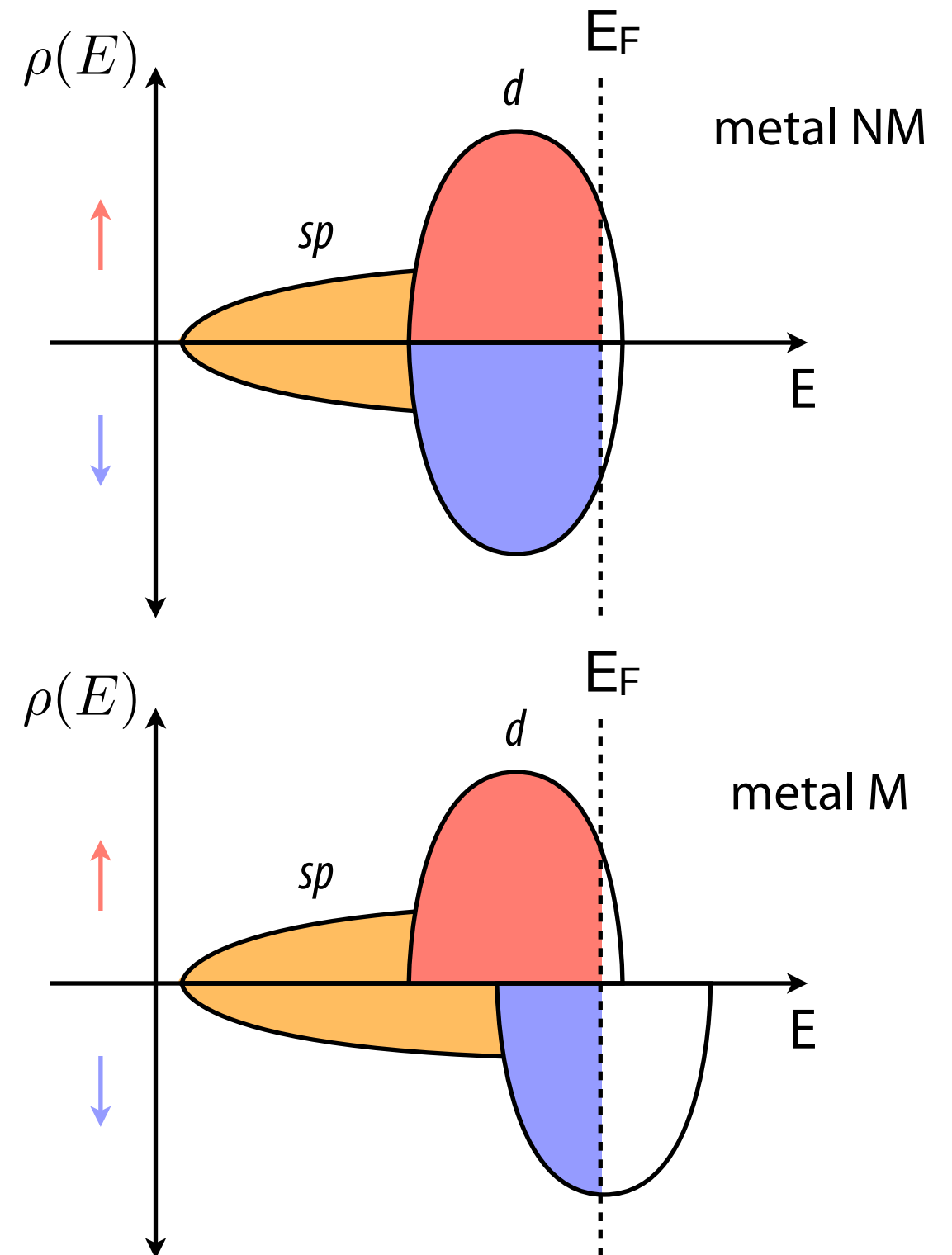
$$R = \frac{R_{\uparrow} R_{\downarrow}}{R_{\uparrow} + R_{\downarrow}}$$

Modelo

- No material não magnético $R_{\uparrow} = R_{\downarrow}$

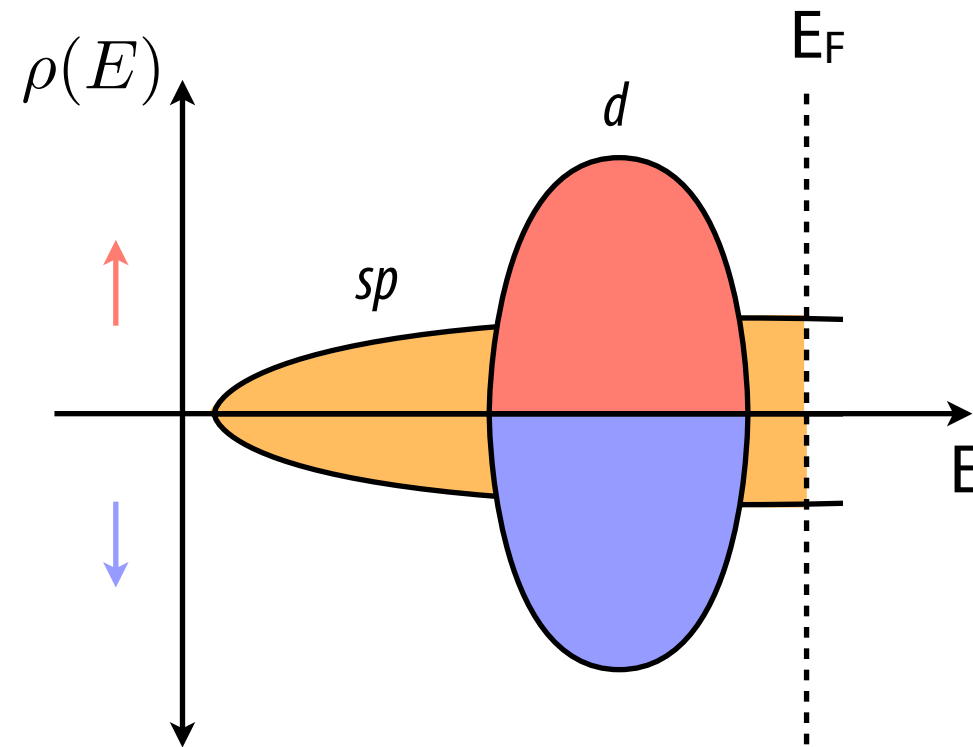
- No material magnético $R_{\uparrow}^M \neq R_{\downarrow}^M$

- Pelas Figs. $\begin{cases} R_{\uparrow}^M < R_{\downarrow}^M \\ R_{\uparrow} = R_{\downarrow} \approx R_{\uparrow}^M \end{cases}$



Modelo

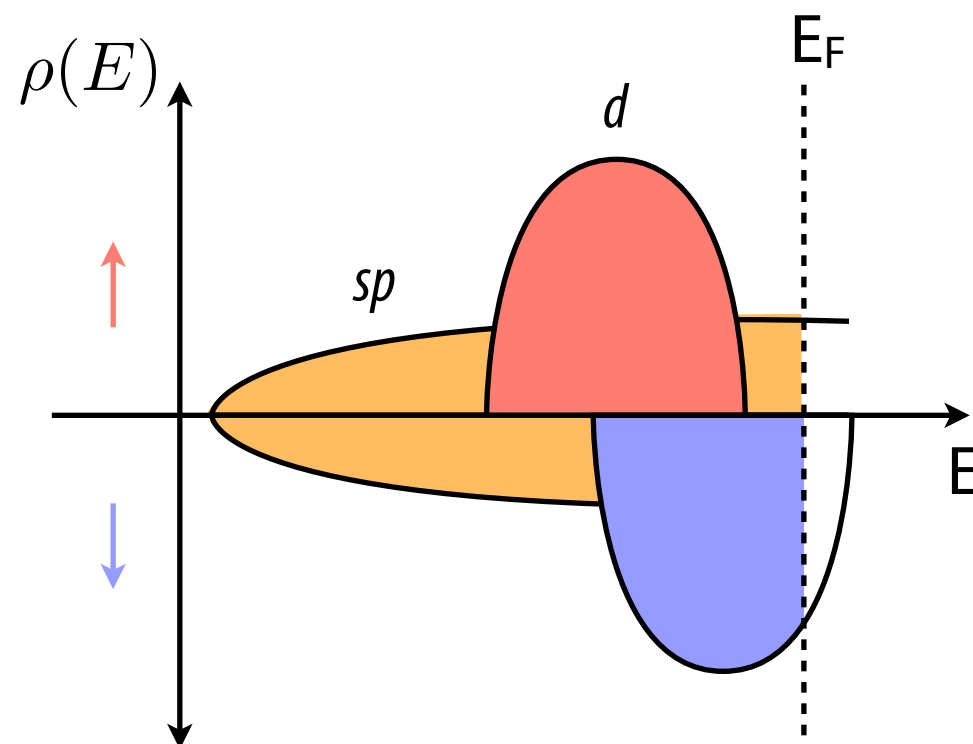
- Cu: $R_{\uparrow}^{Cu} = R_{\downarrow}^{Cu}$



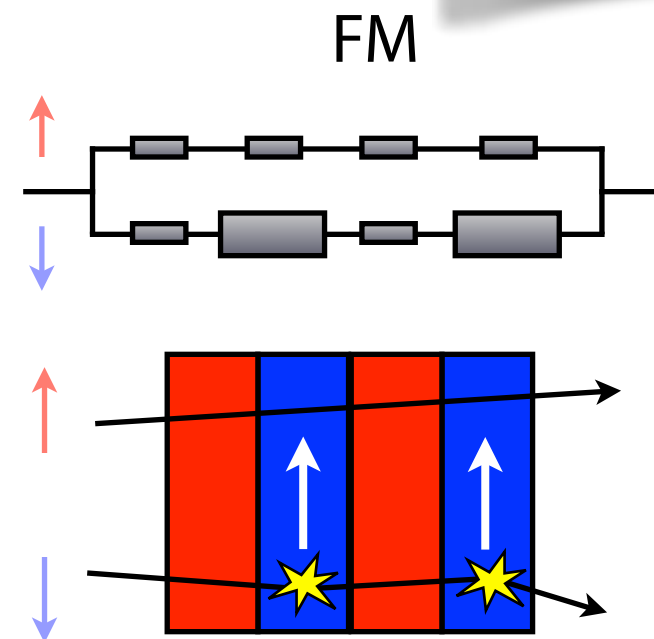
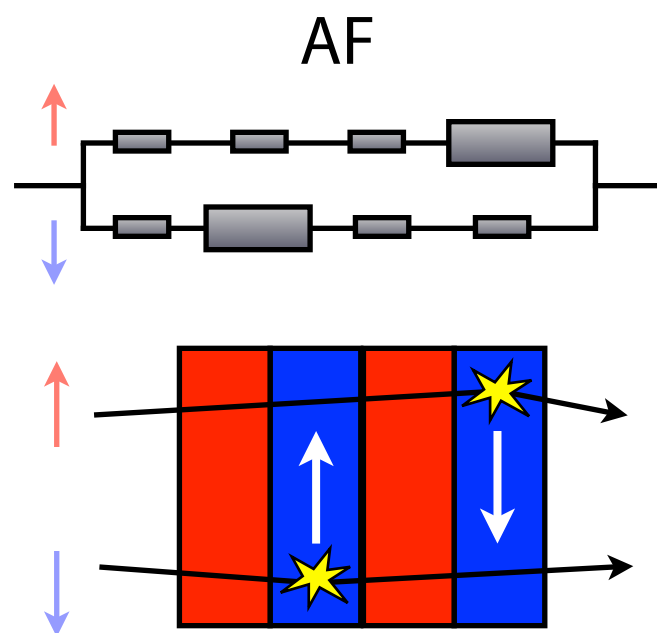
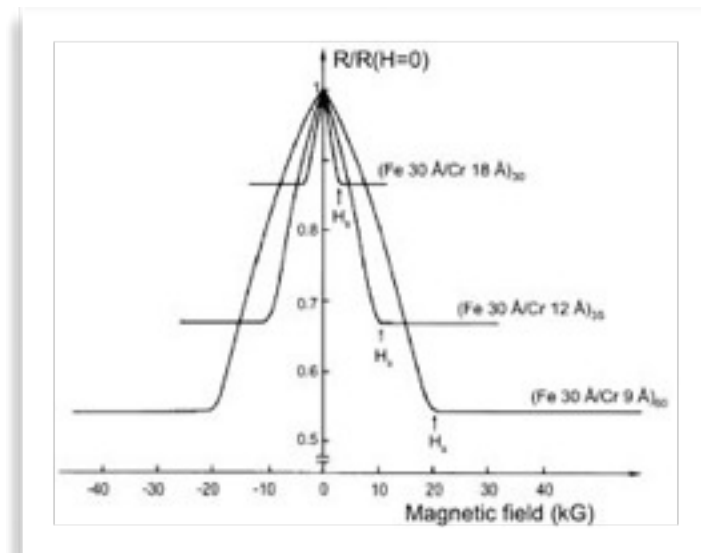
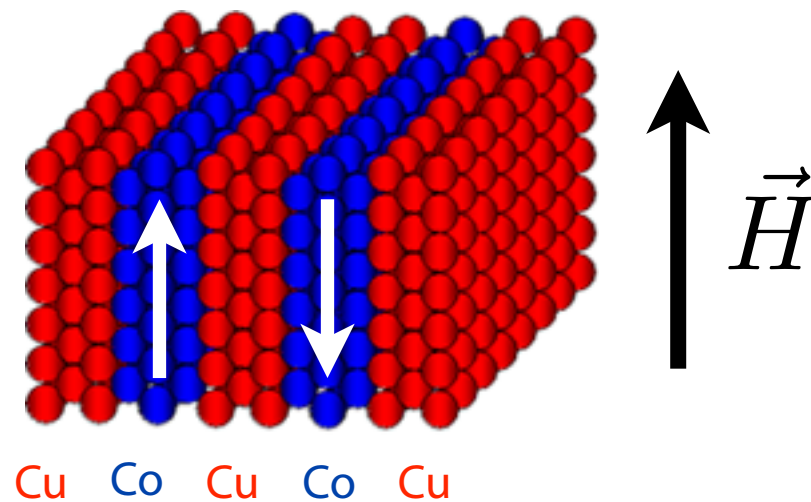
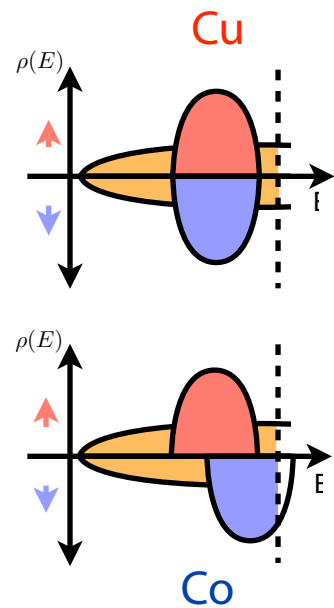
- Co: $R_{\uparrow}^{Co} \neq R_{\downarrow}^{Co}$

- Pelas Figs.

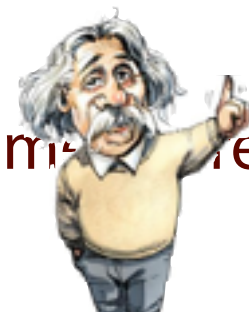
$$\begin{cases} R_{\uparrow}^{Co} < R_{\downarrow}^{Co} \\ R_{\downarrow}^{Co} \approx R_{\uparrow}^{Cu} = R_{\downarrow}^{Cu} \end{cases}$$



Resistores Co/Cu



Qual das duas configurações possui maior resistência?



ferromagnetischen
natürlich!

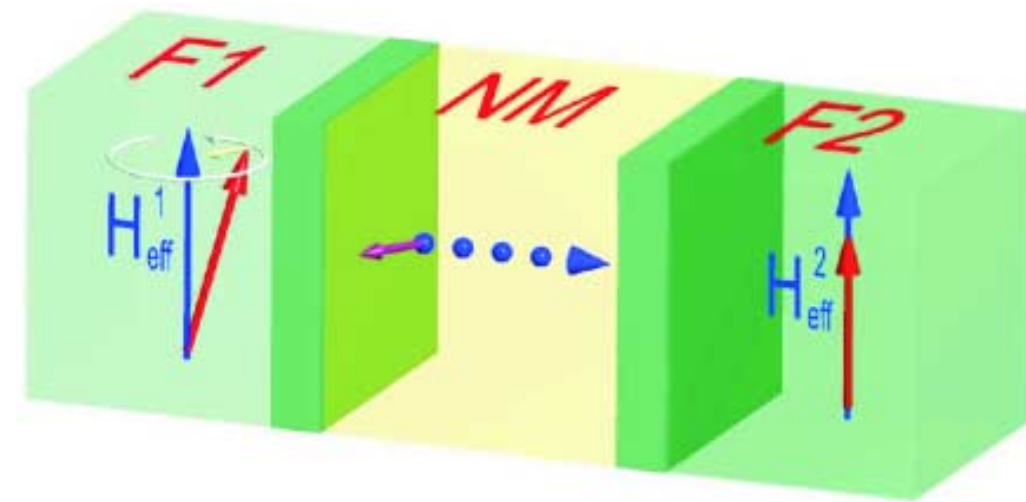
Controle da corrente

Manejo do fluxo de carga regulado pelo spin eletrônico



Spintrônica

Bombeamento de spins



B. Heinrich et al. PRL **90**, 187601 (2003)

Transporte de spins sem o transporte de cargas

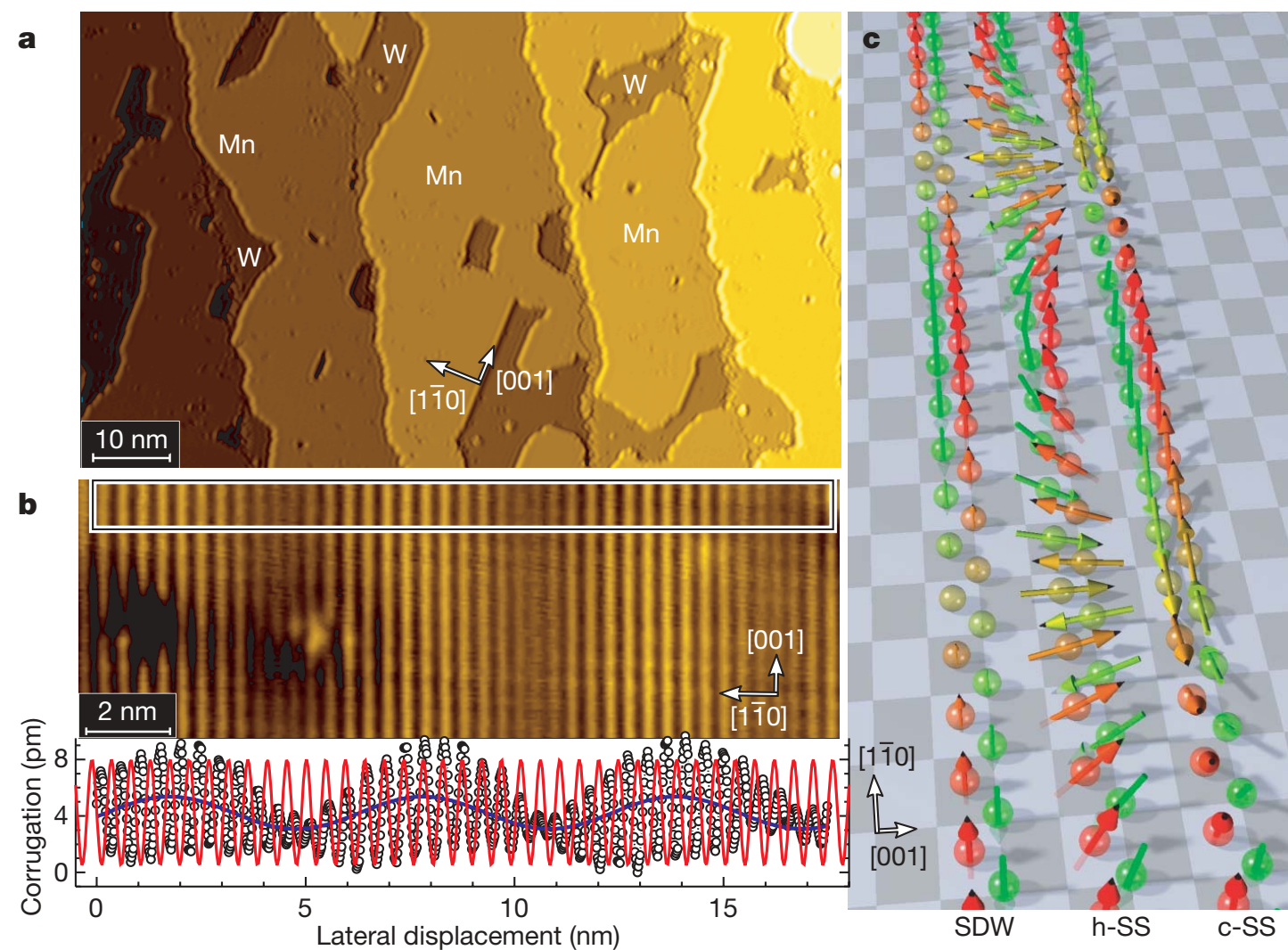
Transmissão de informação por correntes puras de spin

Essa corrente de spins pode ser usada para exercitar outras unidades magnéticas

A interação spin-órbita pode afetar substancialmente as propriedades magnéticas de nano-estruturas

O acoplamento spin-órbita pode favorecer a ocorrência de ordenamento magnético não colinear

Mn/W(110)

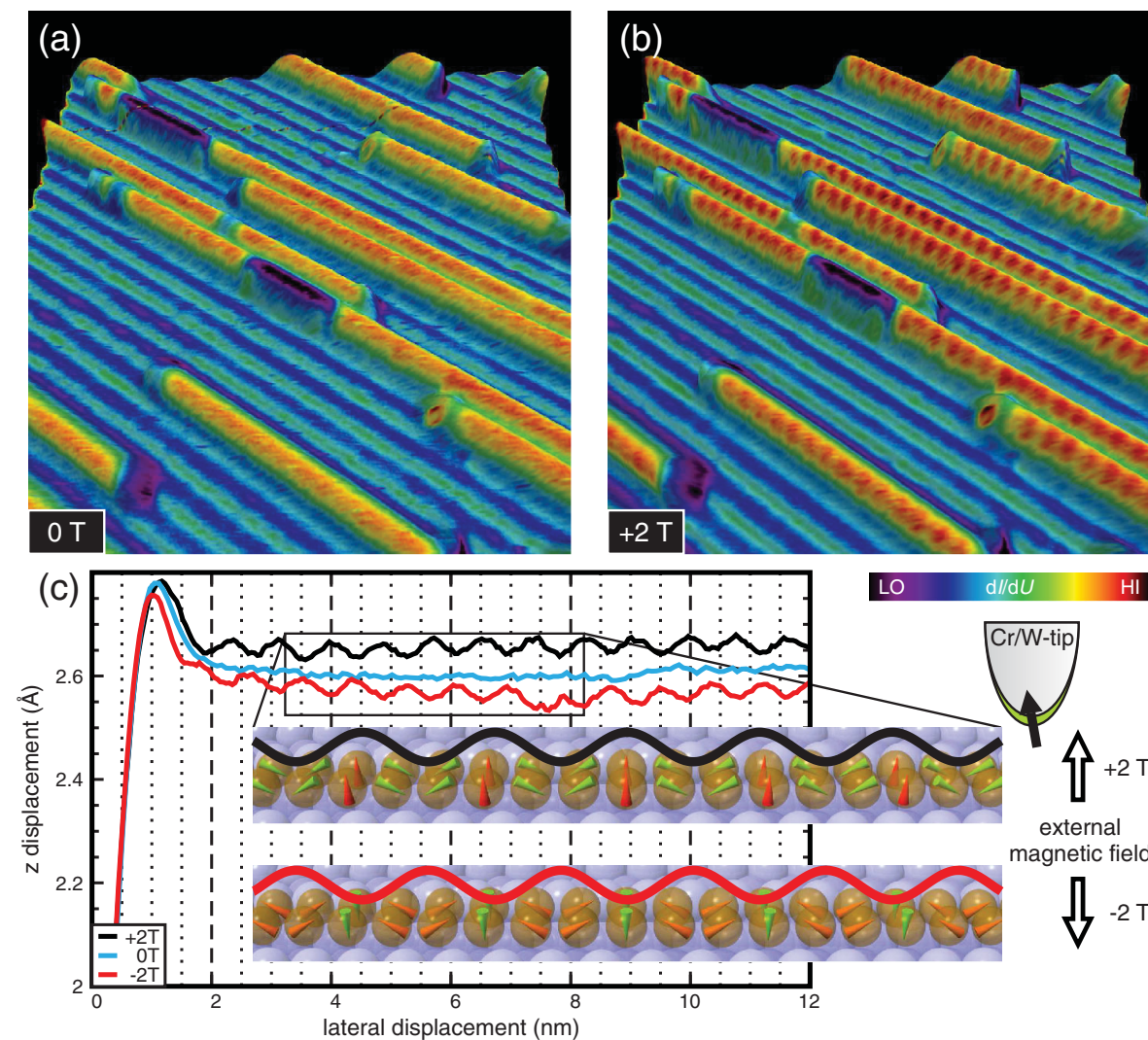


M. Bode et al Nature **447**, 05802 (2007); Ferriani et al PRL **101**, 027201 (2008)

Spin spiral propagating along $\langle 110 \rangle$ crystallographic direction

O acoplamento spin-órbita pode favorecer a ocorrência de ordenamento magnético não colinear

Fe/Ir(001)

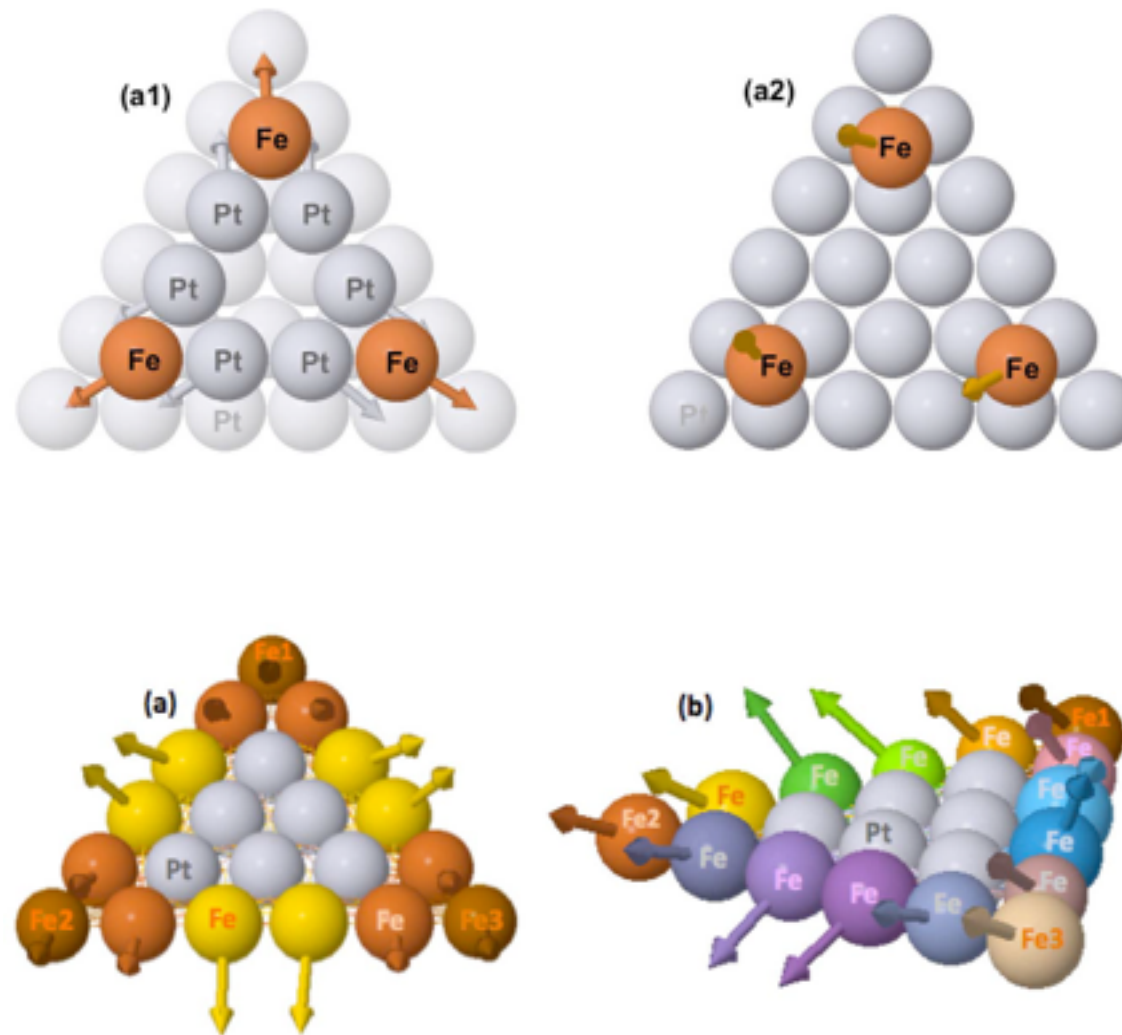


Matthias Menzel, et al PRL **108**, 197204 (2012)

Bi-atomic Fe chains on Ir (001) surface

O acoplamento spin-órbita pode favorecer a ocorrência de ordenamento magnético não colinear

Fe/Pt(111)

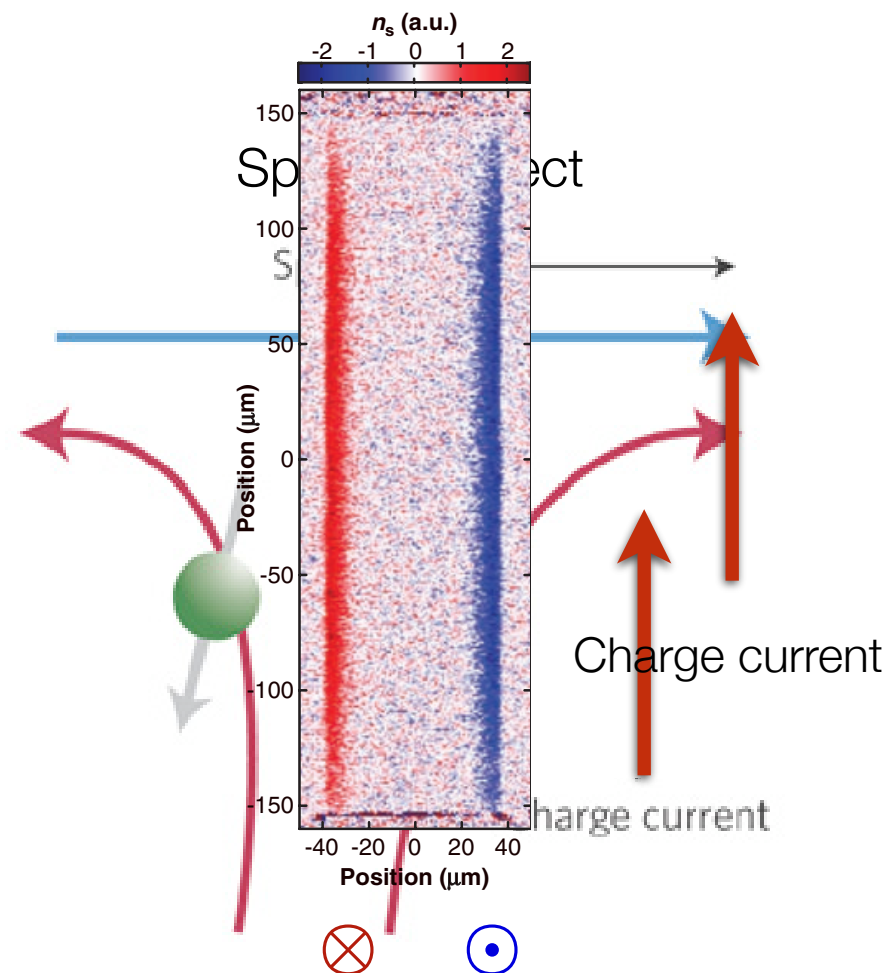


A interação spin-órbita promove a inter-relação entre carga, spin e momento angular orbital em sistemas nano-estruturados.

Isto amplia significativamente as perspectivas na área de spintrônica.

A interação spin-órbita causa o efeito Hall de spin (SHE)

Uma corrente elétrica fluindo em um material não magnético com SOC gera uma corrente transversa pura de spin

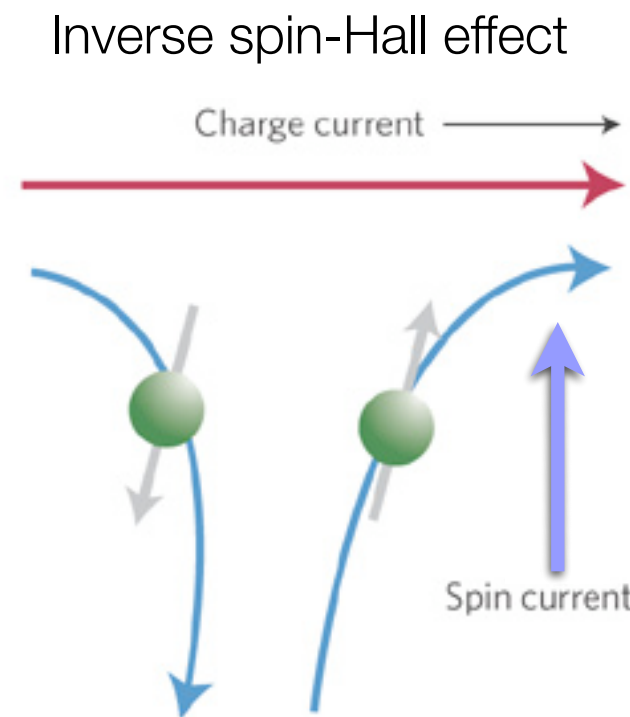


$$\vec{J}_s = \theta_H \hat{\sigma} \times \vec{J}_c$$

M. I. Dyakonov and V. I. Perel, JETP Lett. **13**, 467 (1971)
 Y. K. Kato et al., Science **306**, 1910 (2004)
 J. E. Hirsch, Phys. Rev. Lett. **83**, 1834 (1999)

A interação spin-órbita dá origem ao efeito Hall de spin
inverso (ISHE)

Uma corrente pura de spin fluindo em um material não magnético com SOC gera uma corrente elétrica transversa

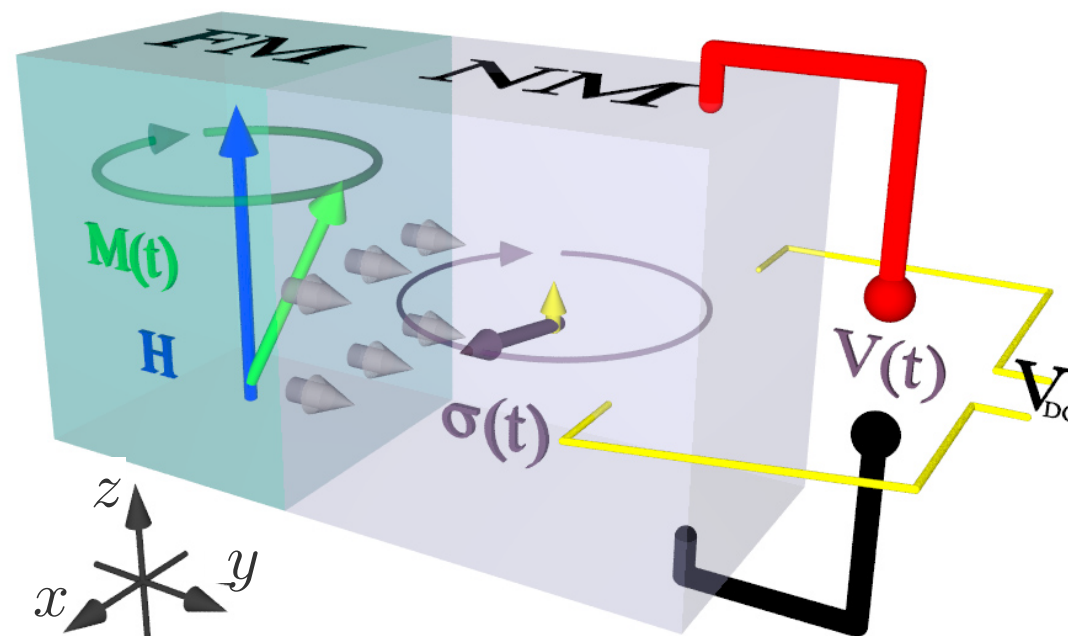


$$\vec{J}_c = D \vec{J}_s \times \hat{\sigma}$$

O ISHE é usado para detectar o bombeamento de spin

Y. Tserkovnyak et al, PRL **88**, 117601 (2002).

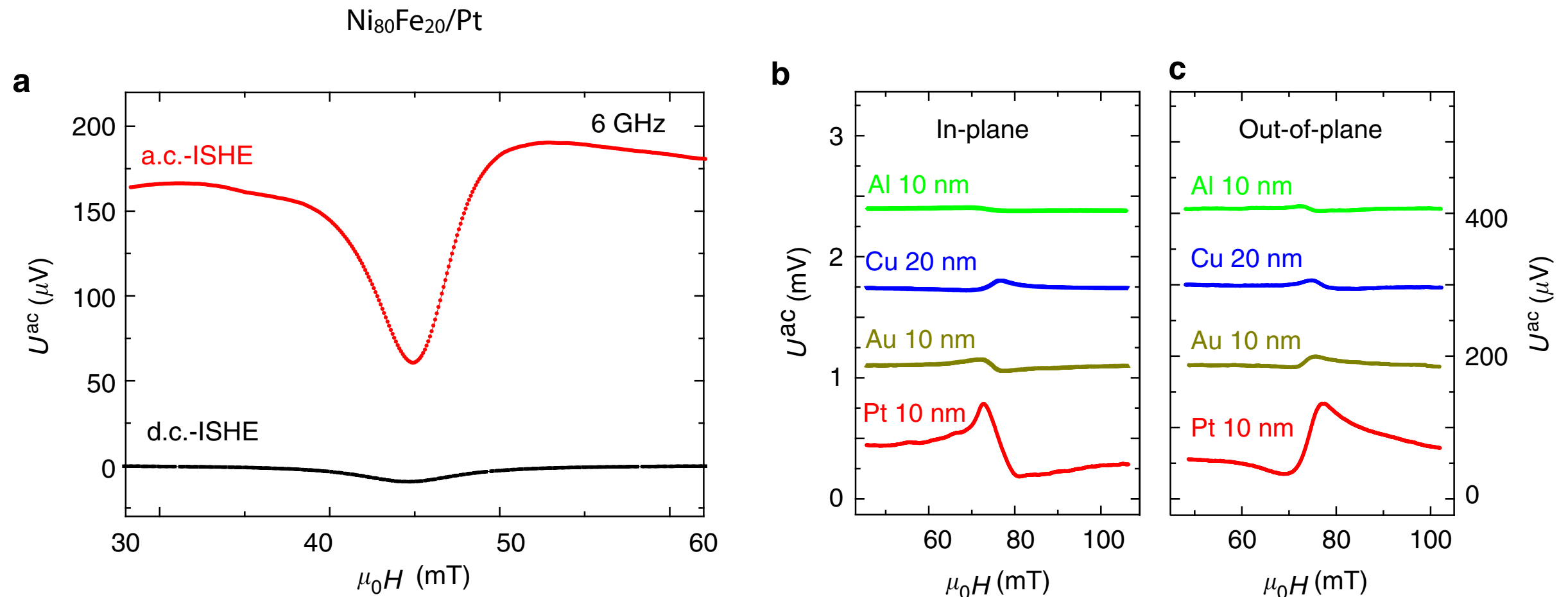
DC and AC-ISHE



One of the main experimental difficulties is to isolate it from the FMR signal which has the same frequency.

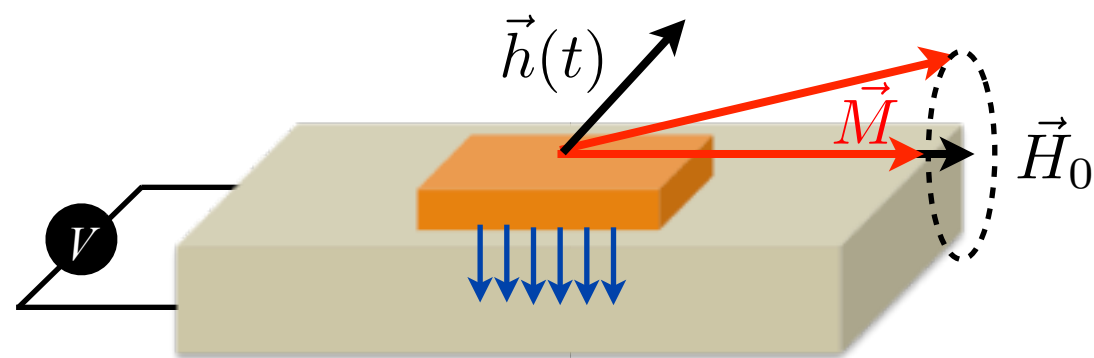
D. Wei et al, Nature Commu. | 5:3768 | DOI: 10.1038/ncomms4768

ac-ISHE foi observado recentemente



ac-ISHE is 12x larger than the dc-ISHE

Bombeamento de spins por FMR

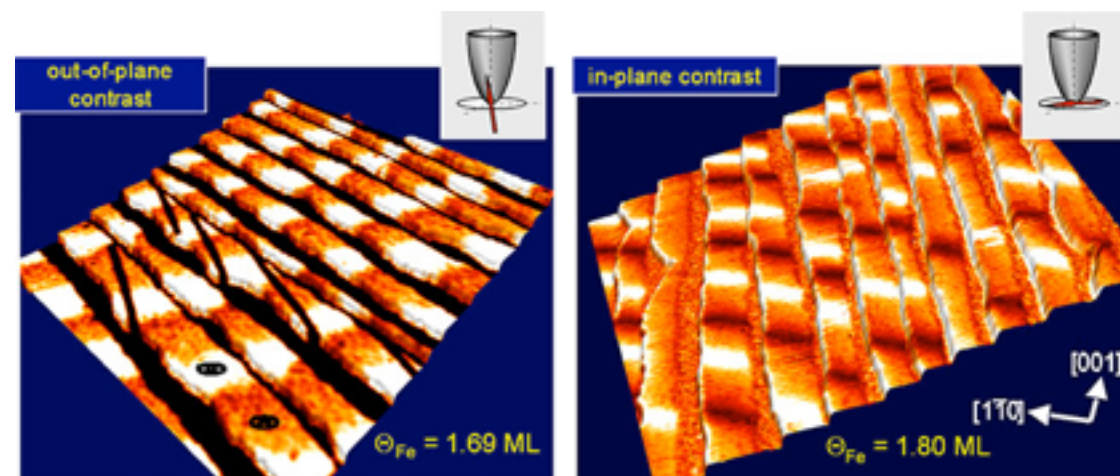


A. Azevedo e S. Rezende, UFPe

Anisotropia magnética perpendicular

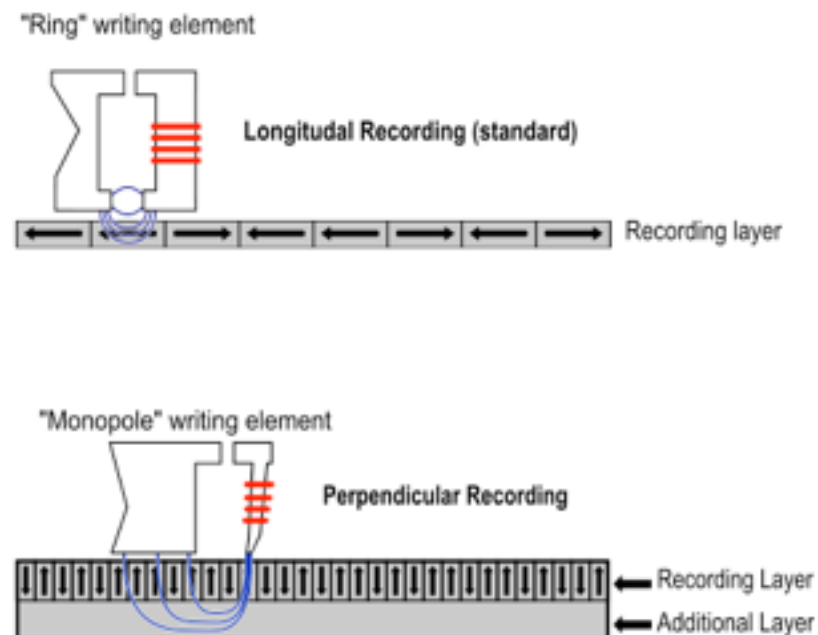
- Dependendo da combinação filme-substrato e da espessura do filme a direção de equilíbrio da magnetização pode ser \perp ou \parallel ao filme.

Fe/Au	$t < 2\text{ML}$
Co/Au	$t < 14\text{\AA}$
Co/Pt	$t < 4.5\text{\AA}$



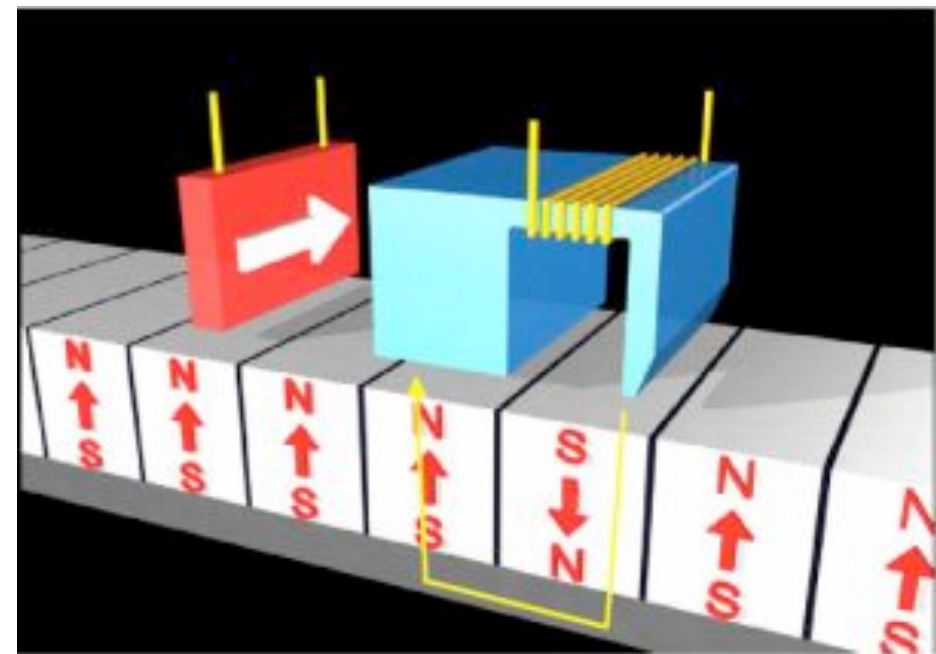
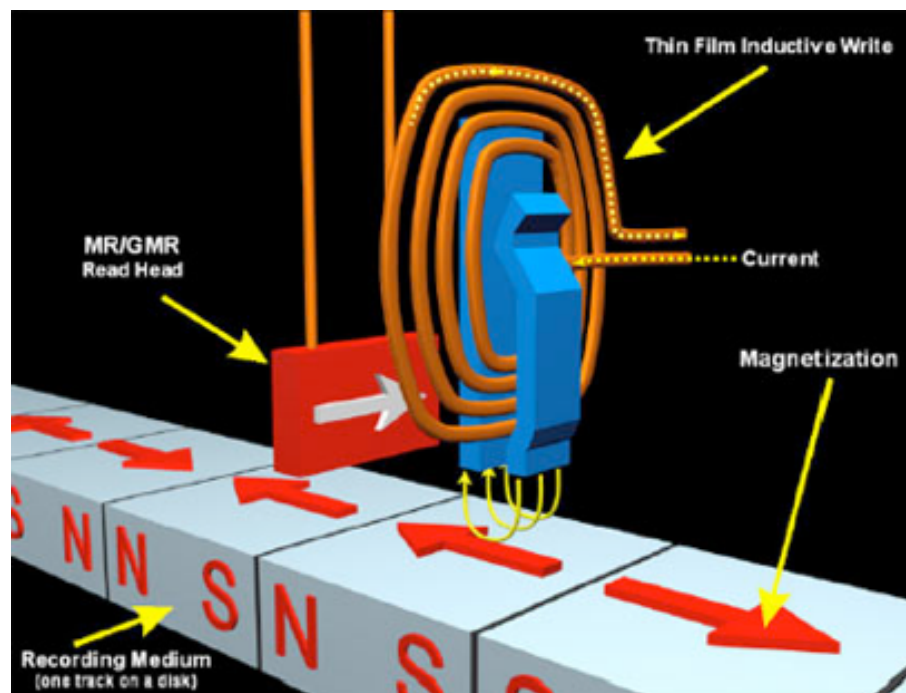
Gravação perpendicular

- Uma maneira de aumentar a densidade de gravação é através do armazenamento perpendicular



- É possível aumentar em até 10 vezes a densidade de gravação
- Atualmente várias empresas utilizam esta técnica na fabricação de HDs

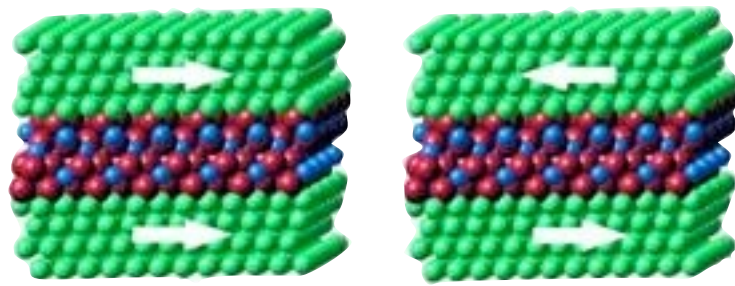
Gravação perpendicular



Gravação perpendicular



Magnetoresistência Túnel



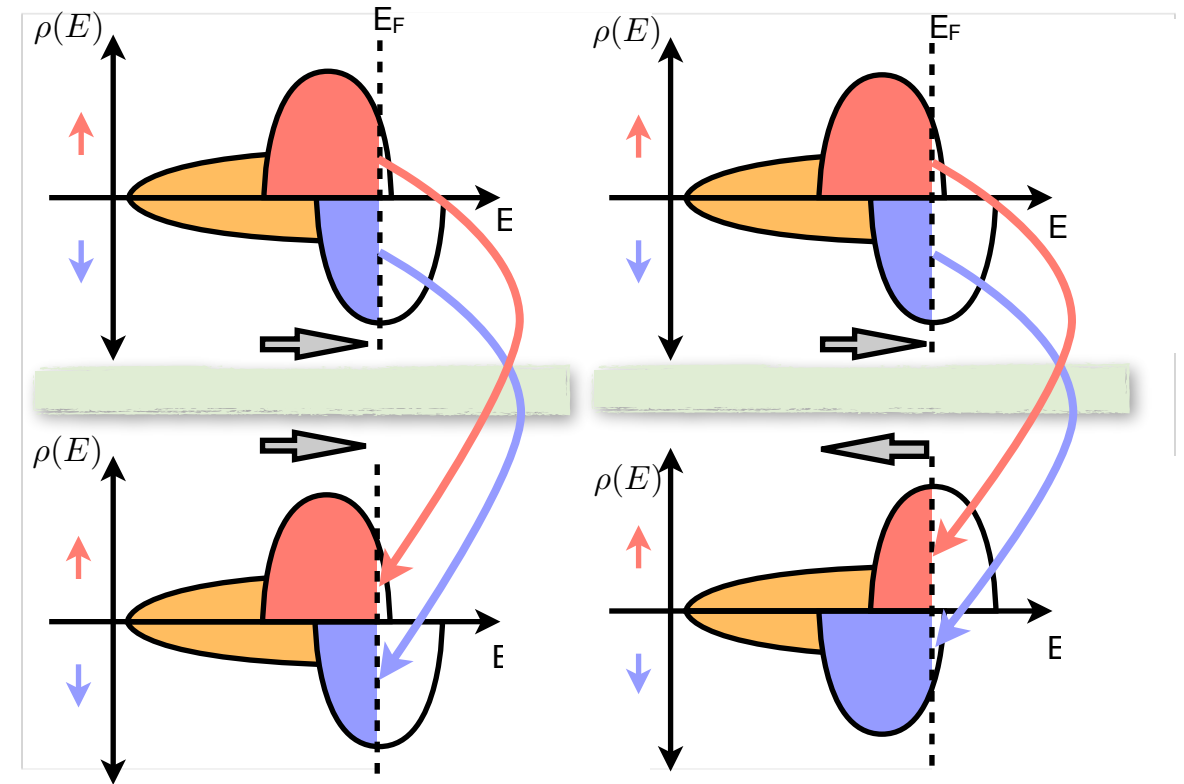
Fe/MgO/Fe

Modelo: $I_{\uparrow\uparrow} \propto \rho_{\uparrow}^L \rho_{\uparrow}^R + \rho_{\downarrow}^L \rho_{\downarrow}^R$

$I_{\uparrow\downarrow} \propto \rho_{\uparrow}^L \rho_{\downarrow}^R + \rho_{\downarrow}^L \rho_{\uparrow}^R$

$$TMR = \frac{I_{\uparrow\uparrow} - I_{\uparrow\downarrow}}{I_{\uparrow\downarrow}} = \frac{2P^L P^R}{1 - P^L P^R}$$

M. Julliere Phys. Lett. **54A**, 225 (1975)



$$P^L = \frac{\rho_{\uparrow}^L - \rho_{\downarrow}^L}{\rho_{\uparrow}^L + \rho_{\downarrow}^L}$$

$$P^R = \frac{\rho_{\uparrow}^R - \rho_{\downarrow}^R}{\rho_{\uparrow}^R + \rho_{\downarrow}^R}$$

TMR ~600% a T=300K, e >1100% a T=4.2 K

Appl. Phys. Lett. **93**: 082508 (2009).