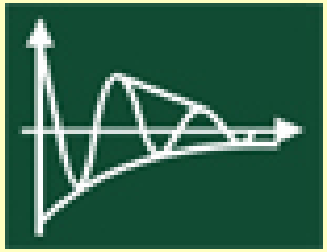
Nanomagnetismo

Parte 1

Escola do CBPF 2008



Nanomagnetismo

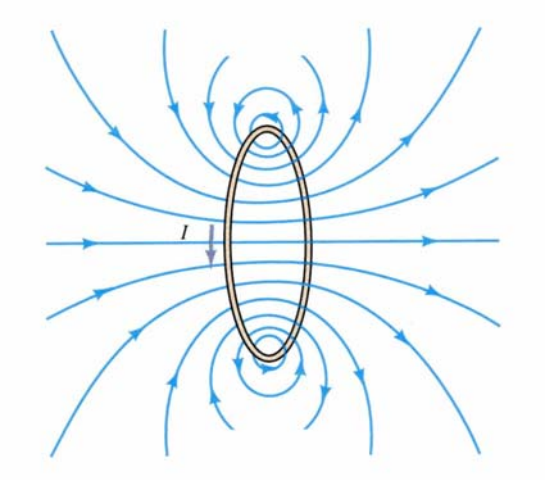
Escola do CBPF – 2008

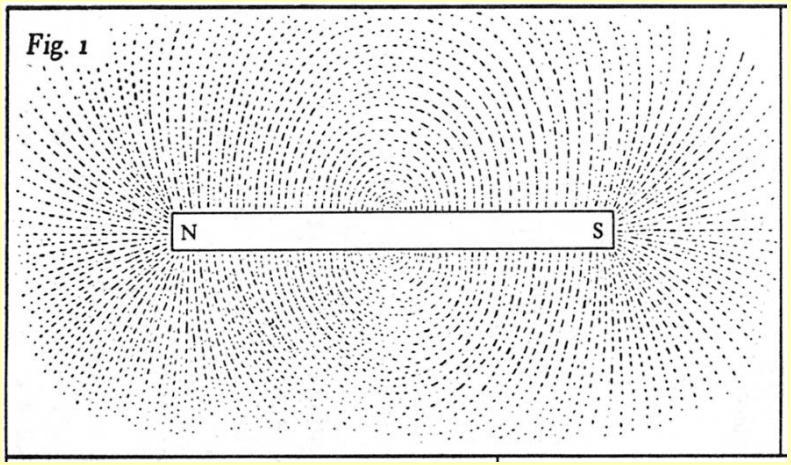
Alberto P. Guimarães
Renato A. Silva

1	• **Introdução**	14/07
2	• **Preparação e Caracterização; Magnetismo de Pequenas Partículas**	15/07
3	• **Filmes Finos e Multicamadas**	16/07
4	• **Outros Sistemas de Baixa Dimensionalidade**	17/07
5	• **Propriedades de Transporte**	18/07

Breve revisão de magnetismo

O Fenômeno do Magnetismo





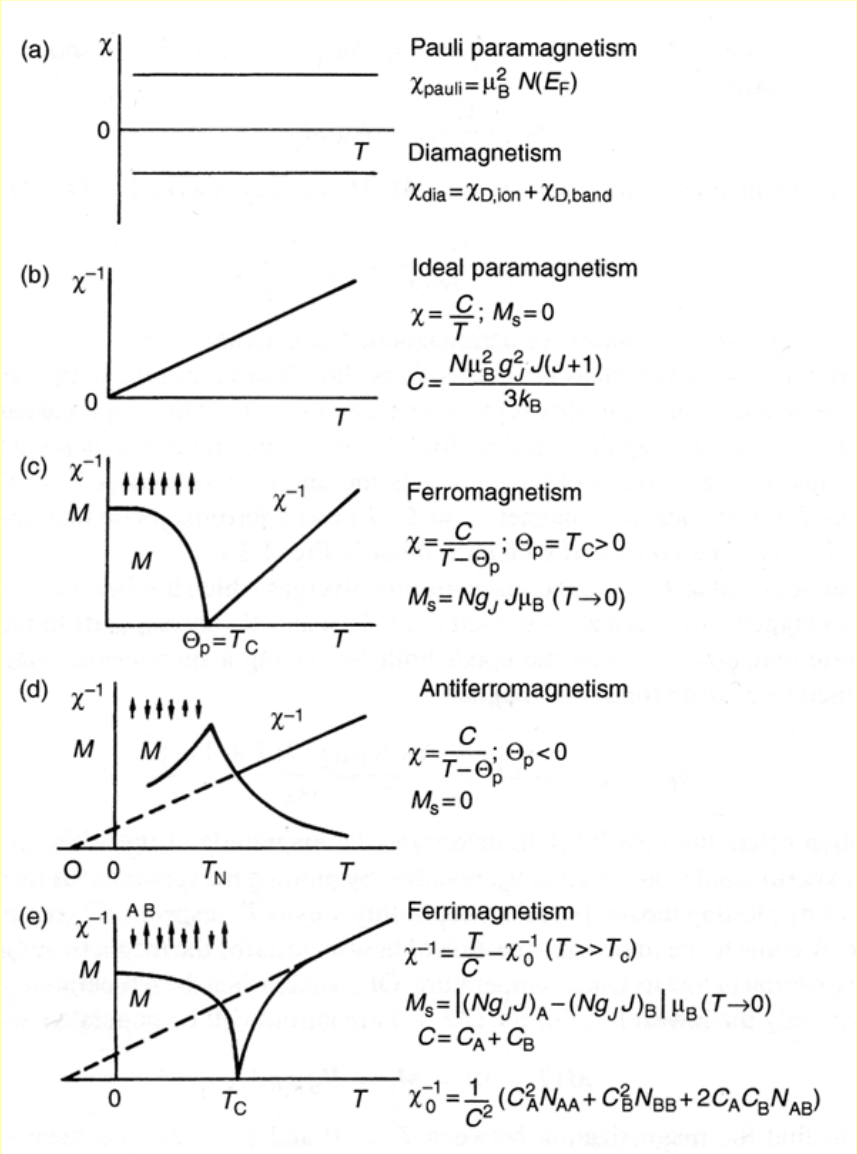
- O movimento de correntes elétricas gera campos magnéticos
- O spin do elétron também gera campos magnéticos
- O magnetismo da matéria resulta de correntes nos átomos (e do spin eletrônico)

Classificação geral dos materiais quanto ao magnetismo

- **Diamagnéticos**: repelidos por uma região de campo mais intenso
- **Paramagnéticos**: atraídos por uma região de campo mais intenso
- **Ferromagnéticos**: fortemente atraídos por uma região de campo mais intenso

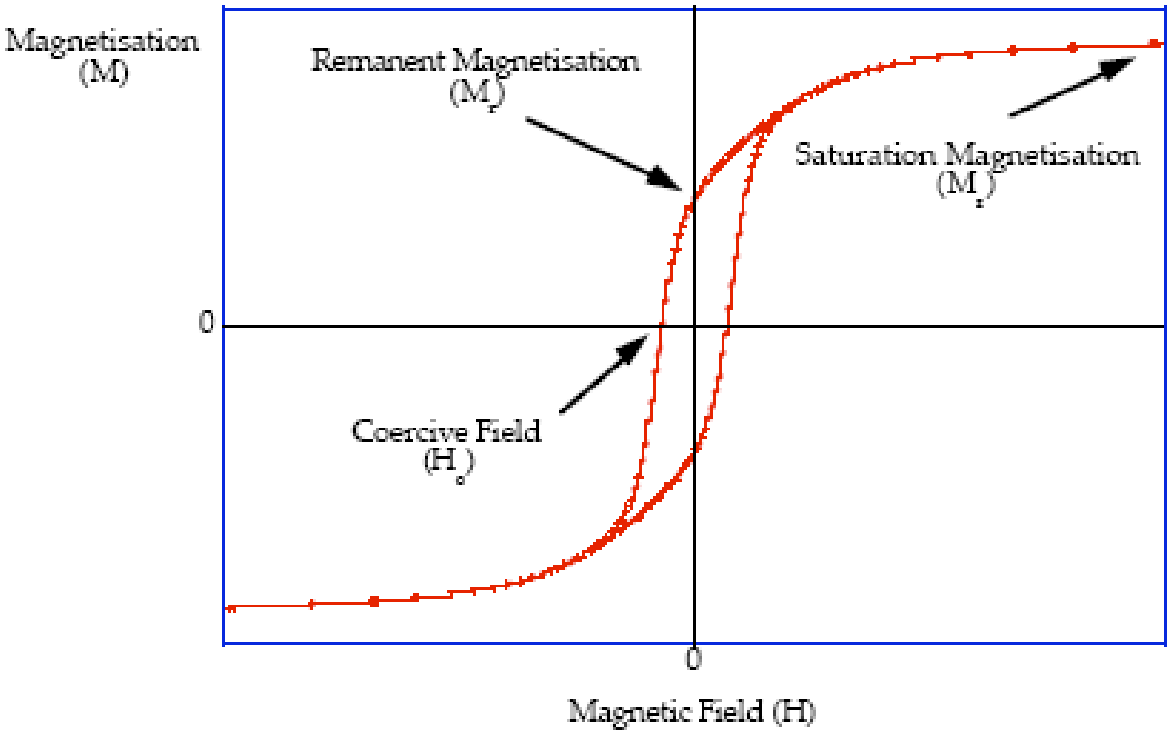
Diamagnéticos: $\chi < 0$: tipicamente $\chi \sim -10^{-6}$ $\mu_r < 1$
Paramagnéticos: $\chi > 0$: tipicamente $\chi \sim 10^{-5}$ $\mu_r > 1$
Ferromagnéticos: $\chi >> 0$: tipicamente $\chi \sim 10^{4}$ $\mu_r >> 1$

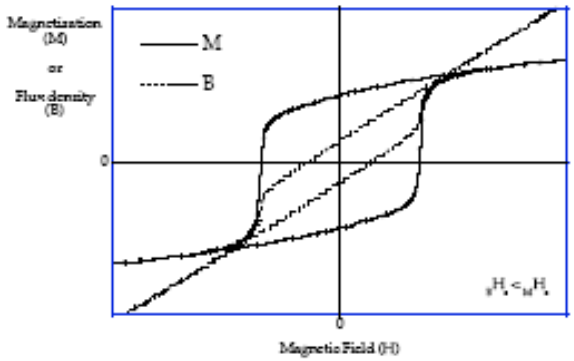
Tipos de materiais magnéticos



(Buschow e Boer 1998)

A curva de histerese



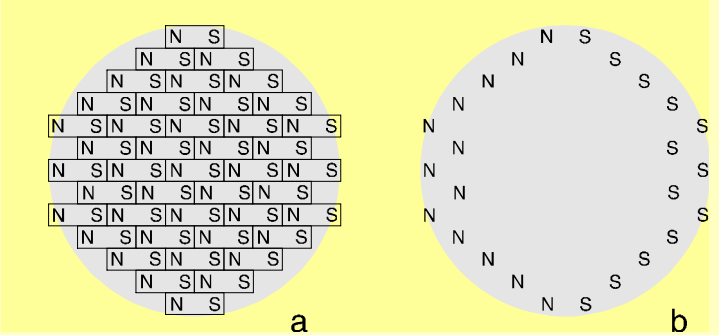


$$\mathbf{B} = \mu_0 \left(\mathbf{H} + \mathbf{M} \right)$$

Campo de desmagnetização

É o campo que surge da descontinuidade de M. O campo H total é

$$\boldsymbol{H} = \boldsymbol{H}_0 - \boldsymbol{H}_d = \boldsymbol{H}_0 - N_d \boldsymbol{M}$$



No caso geral, H_d varia de ponto a ponto e N_d é um tensor. No caso de amostra elipsoidal e isotrópica, N_d é o fator de desmagnetização

Forma	**Direção**	**N_d**
Plano	⊥	1
Plano	∥	0
Cilindro(l/d=1)	∥	0,27
Cilindro(l/d=5)	∥	0,04
Cilindro longo	∥	0
Esfera	-	1/3

Interações

(1) energia magnetostática, isto é. a energia magnética no campo de desmagnetização

(2) a anisotropia magnética

(3) a interação de troca, responsável pela ordem magnética

(4) a energia magnetoelástica, proporcional à deformação

Nanotecnologia

"Nanoscience and technology will change the nature of almost every human-made object in the 21st century"

--- M.C. Roco, R.S. Williams, P. Alivisatos, 1999

"Just wait—the 21st century is going to be incredible. We are about to be able to build things that work on the smallest possible length scales, atom by atom. These nanothings will revolutionize industries and our lives"

--- Richard Smalley, 1999



Importância do Nanomagnetismo

Dispositivos (memórias magnéticas, etc)

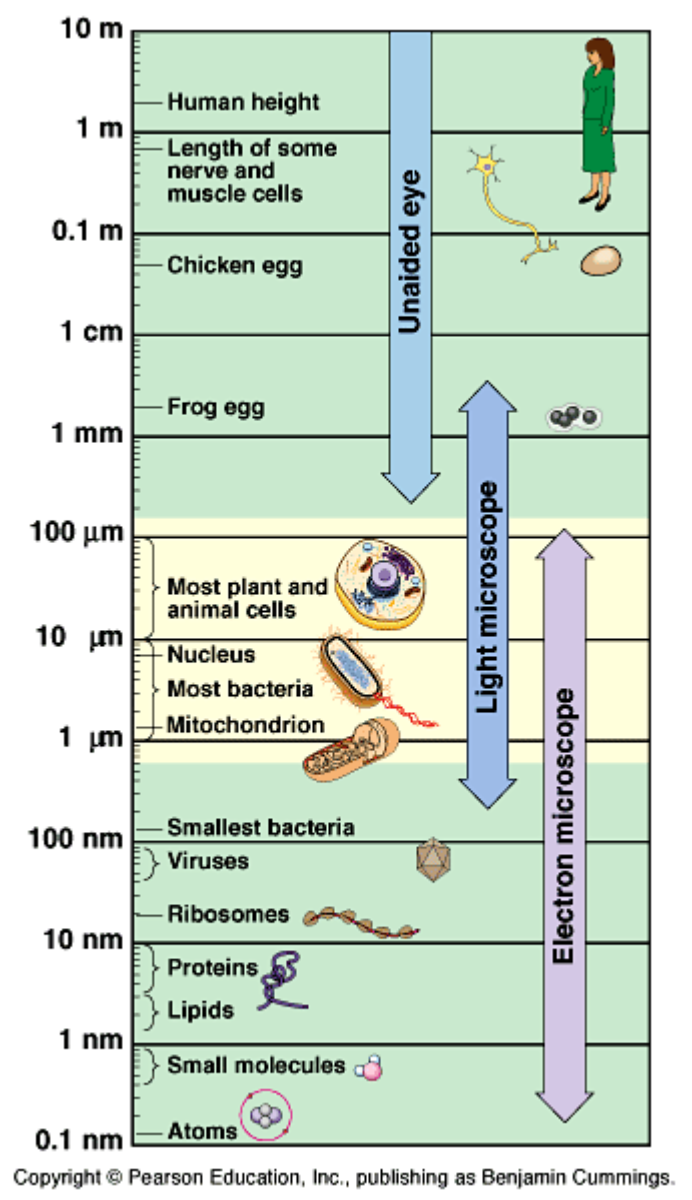
Ímãs com inclusões de nano-partículas

Relevância em geologia

Biomagnetismo

Aplicação mais importante: gravação magnética

A escala nano

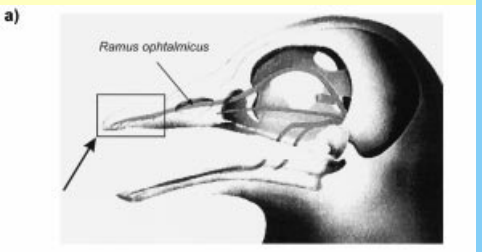


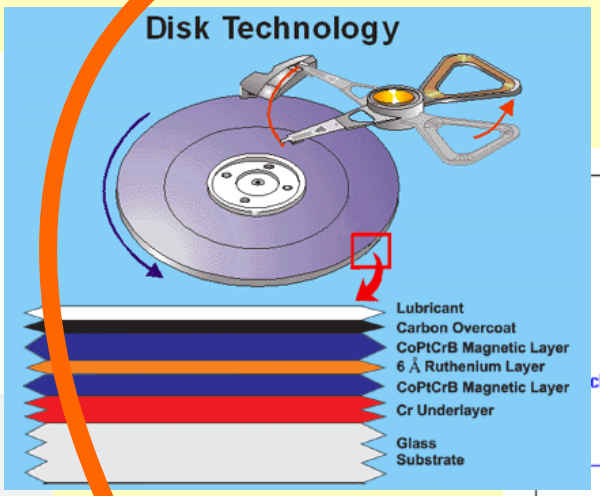
Copyright © Pearson Education, Inc., publishing as Benjamin Cummings.

$1\ nm = 10^{-9}\ m$

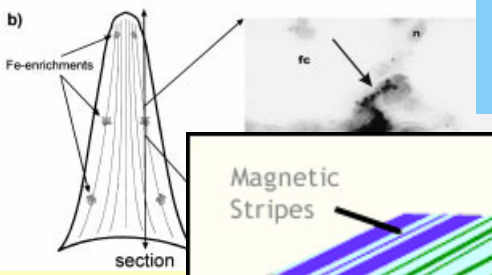
Fenômenos em objetos com 1-100 nanômetros

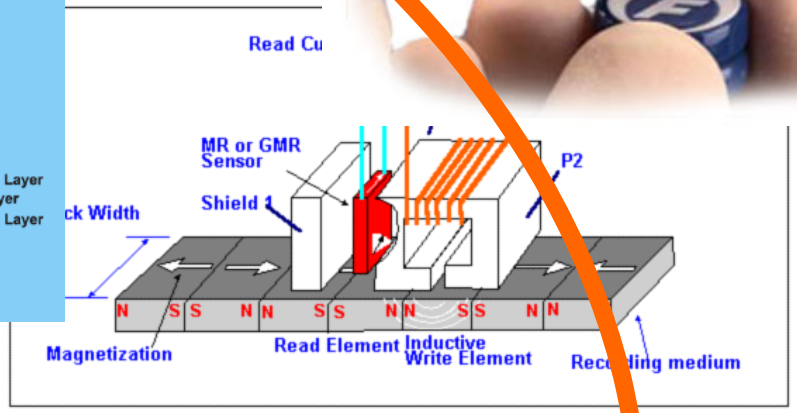
Relevância do nanomagnetismo

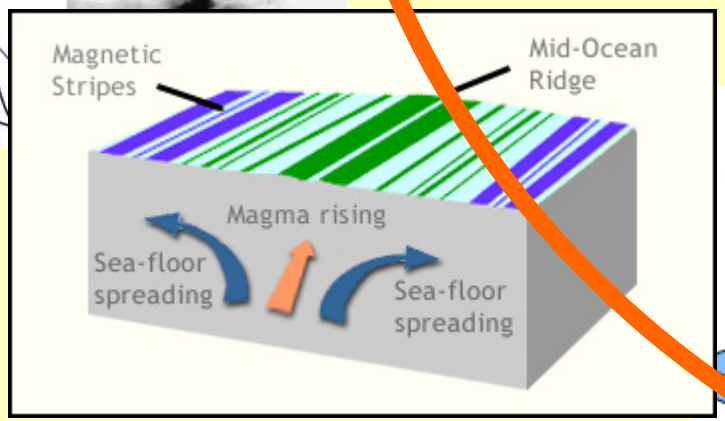


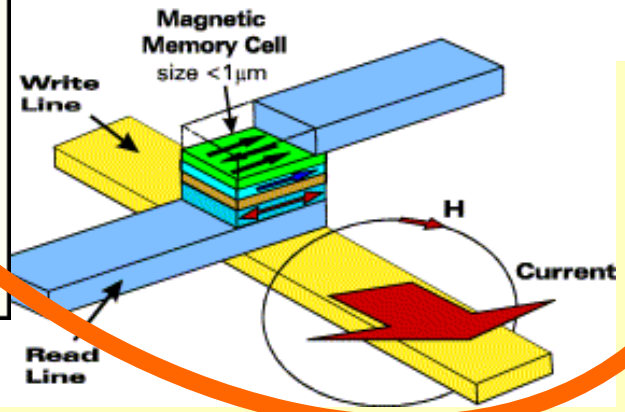


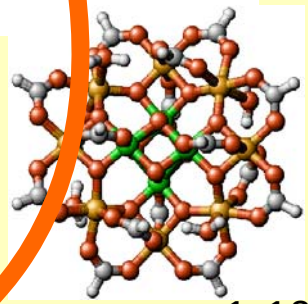




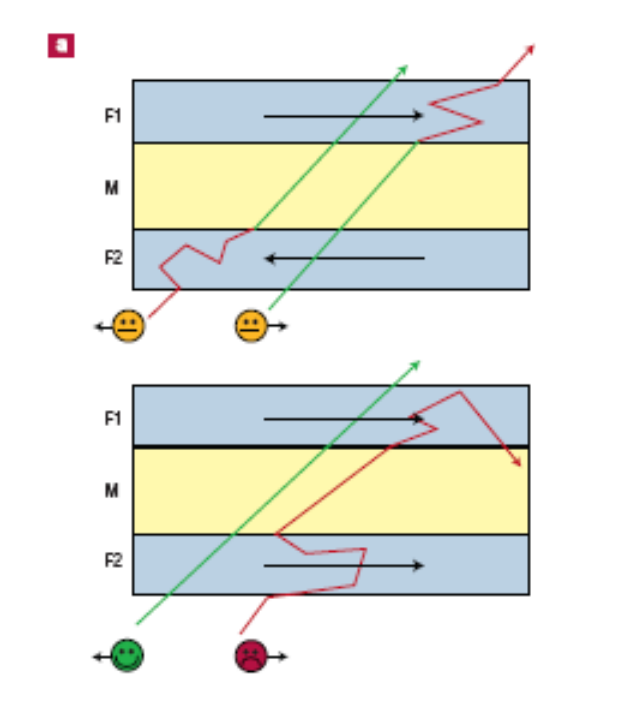








Magneto-resistência gigante (MRG)





Albert Fert e Peter Grünberg, Prêmio Nobel 2007, pelos estudos com a MRG

Magnetismo e Dimensionalidade

As propriedades magnéticas dependem da dimensionalidade: sólido de três dimensões; filme fino (bidimensional), fio, etc.
Nas amostras não volumosas, uma ou mais das suas dimensões podem ter grandeza mesoscópica ou nanoscópica.

Segundo a dimensionalidade, as amostras são

a) granulares (quase zero-dimensionais);
b) nanofios (unidimensionais);
c) filmes finos (bidimensionais);
d) volumosas ou massivas (tridimensionais).

Nanomagnetismo: novos fenômenos

- Magneto-resistência gigante
- Magneto-resistência túnel
- Injeção de spins
- Torque de spins
- Polarização de troca, Efeito Hall de spin, etc

Momentos magnéticos e dimensionalidade

Momentos magnéticos de Ni e Fe em μ_B:

D	Zero	Um	Dois	Três
Ni	2,0	1,1	0,68	0,56
Fe	4,0	3,3	2,96	2,27

Momentos magnéticos de Ni e Fe em μ_B para diferentes dimensões: zero (átomo livre), um (cadeia de átomos), dois (filme) e três (volume) (Song e Ketterson 1992).

A base do nanomagnetismo

Novas propriedades surgem de:

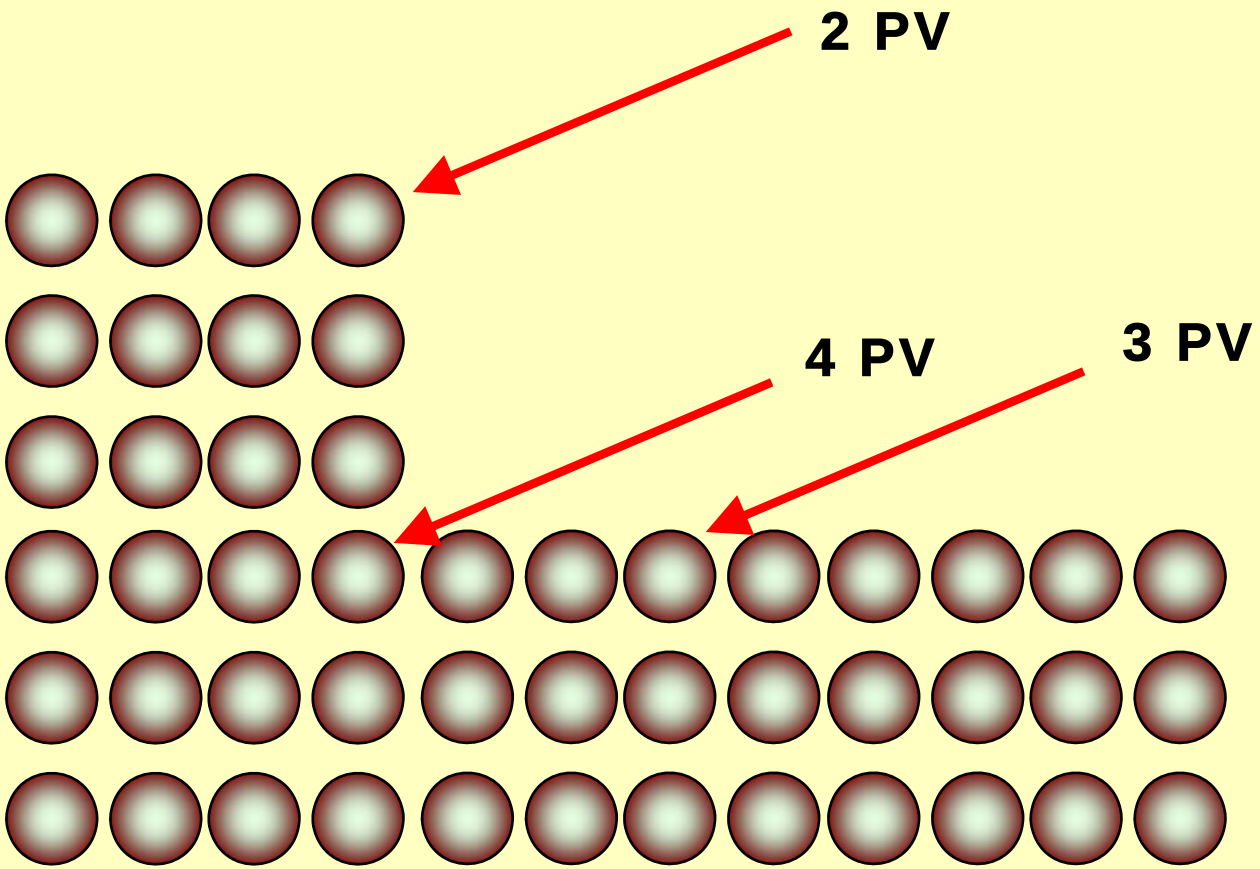
1. Dimensões comparáveis a comprimentos característicos
e.g., alcance da interação de troca, alcance da interação de RKKY, comprimento de difusão de spin

Symbol	Length	Typical magnitude (nm)
d_a	Interatomic distance (Fe)	2.5×10^{-1}
d_{ex}	Range of exchange interaction	$\sim 10^{-1} - \sim 1$
d_{RKKY}	Range of RKKY interaction	$\sim 10^{-1} - \sim 10$
d_c	Domain size	$10 - 10^4$
d_W	Domain wall width	$\sim 1 - \sim 10^2$
d_L	Exchange length	$\sim 1 - \sim 10^2$
d_{SD}	Spin diffusion length	$\sim 10 - 10^2$
l_{MFP}	Mean free path	$\sim 1 - 10^2$
ζ	Coherence length	$\sim 1 - 10^2$

(Baseado em Dennis 2002)

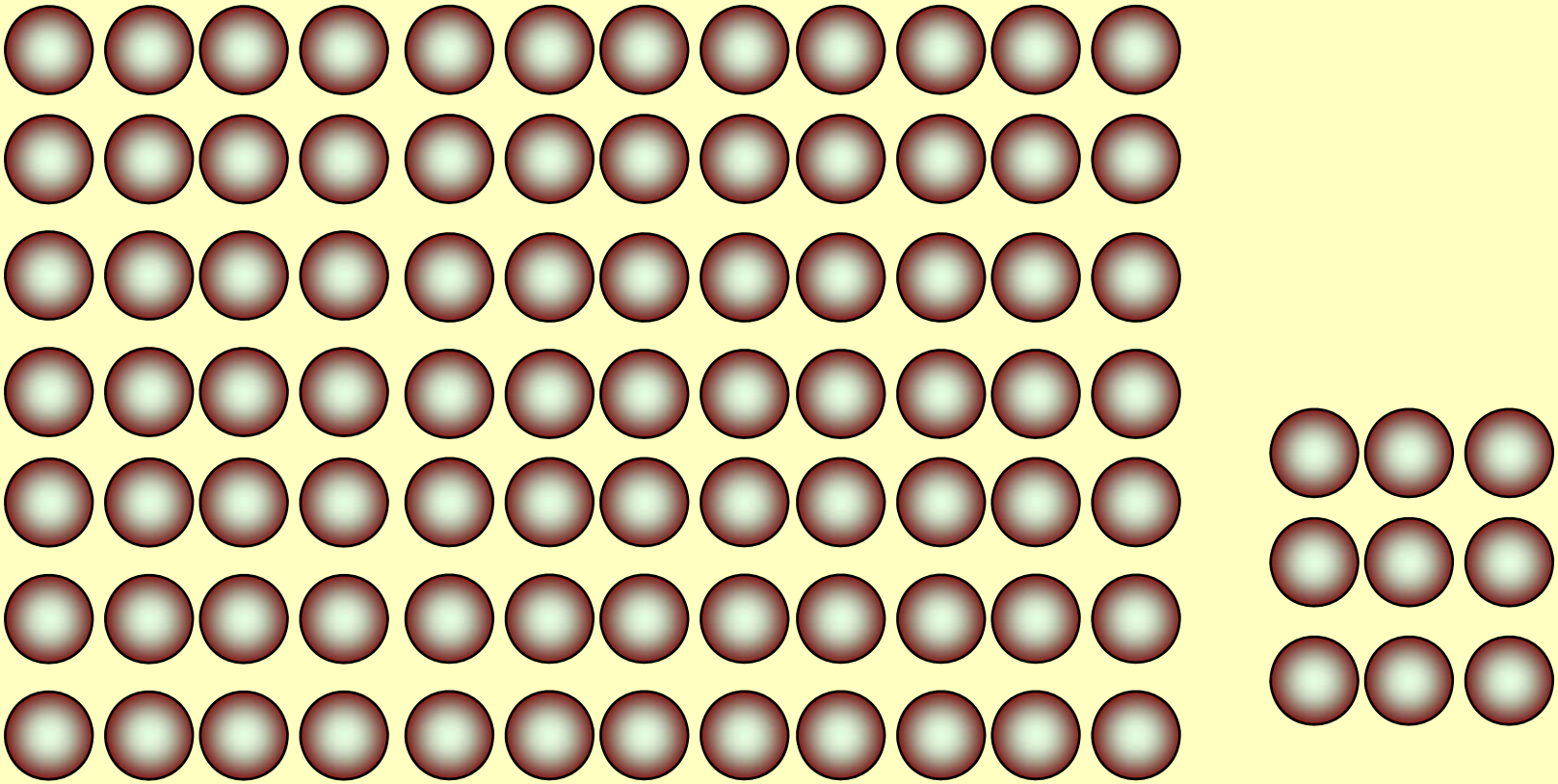
2. Quebra da simetria de translação, que resulta em

a) Número de coordenação reduzido e mudança na simetria

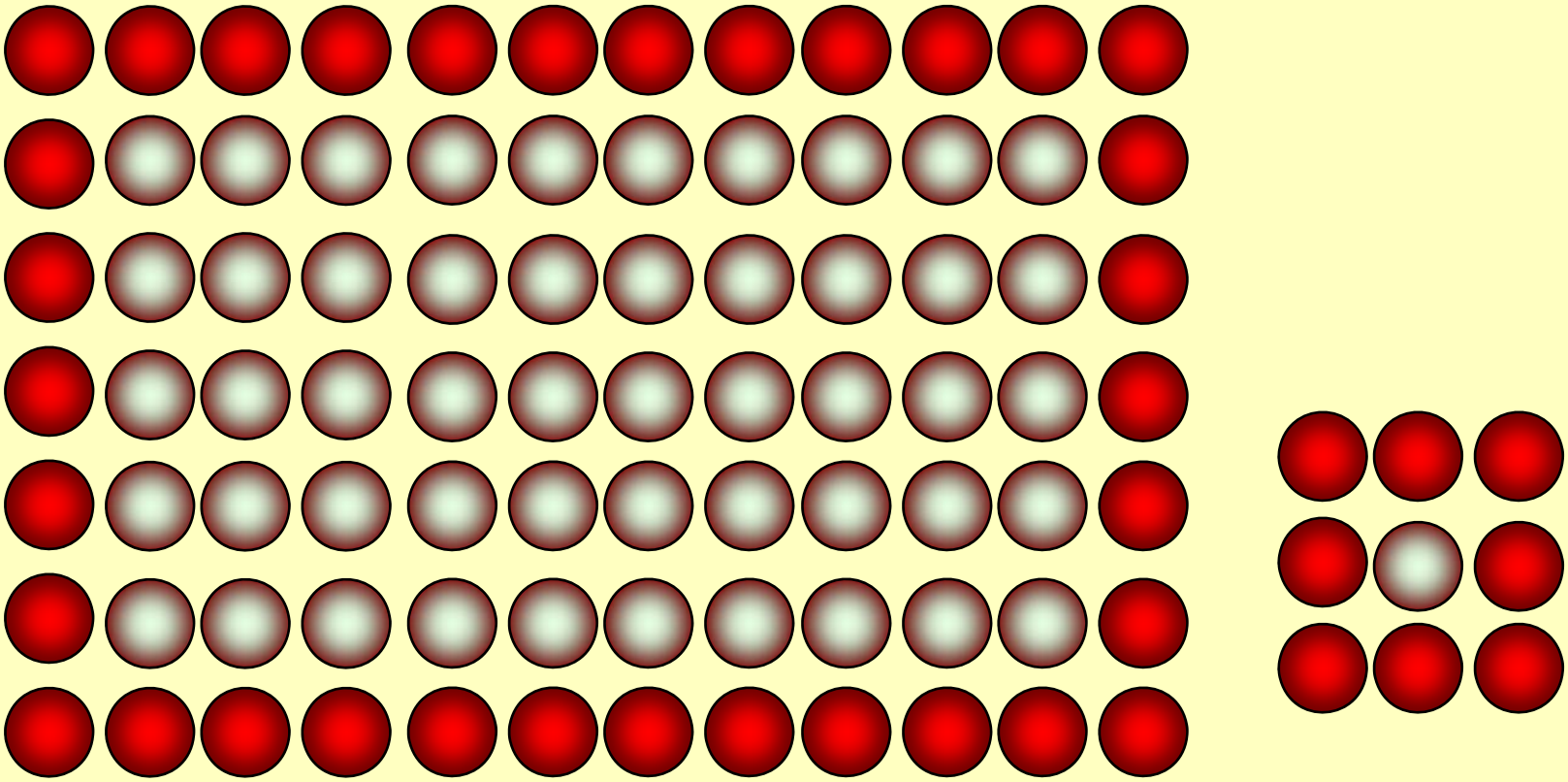


2. Quebra da simetria de translação, que resulta em

b) Maior proporção de átomos de superfície (ex., partícula de 1,6 nm de Co tem 60% dos átomos na superficie)



Proporção de átomos na superfície



Um grão de Co de 1.6 nm tem 60% dos átomos na superfície.

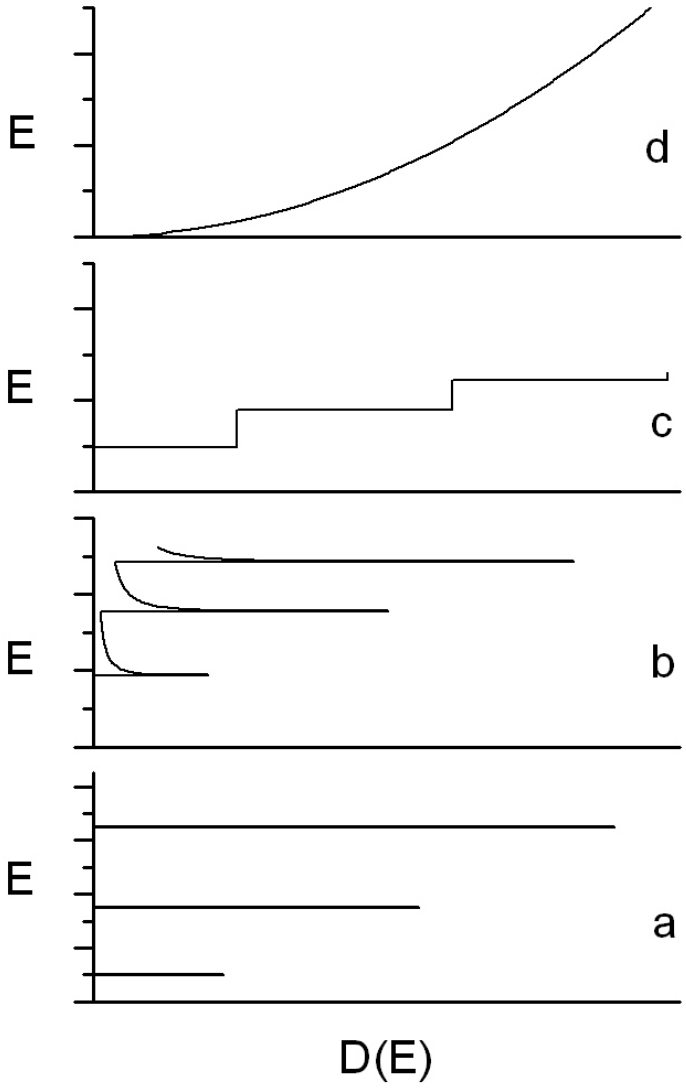
D

3

2

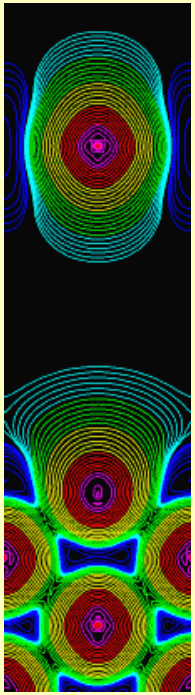
1

0

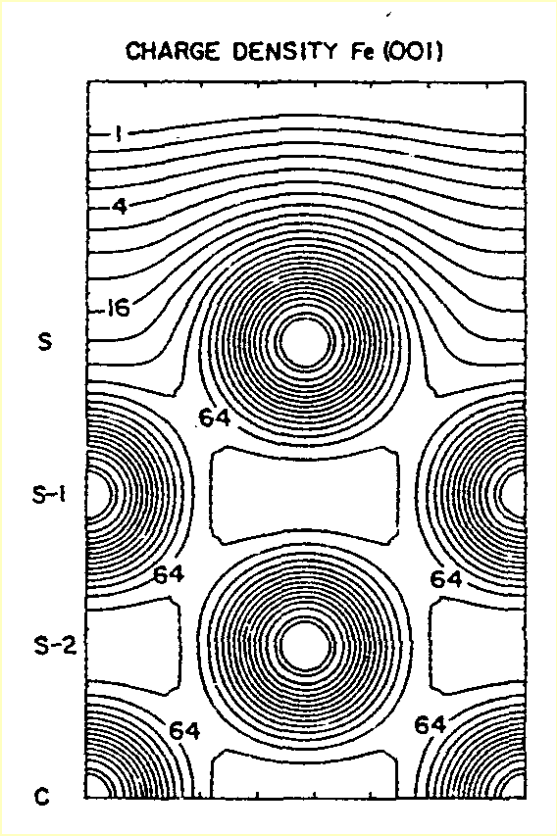


c) Mudança na densidade de estados eletrônicas (a dimensionalidade afeta a forma da curva de densidade de estados eletrônicos (D(E)), e consequentemente afeta importantes propriedades físicas

Densidade de carga e spin na superfície

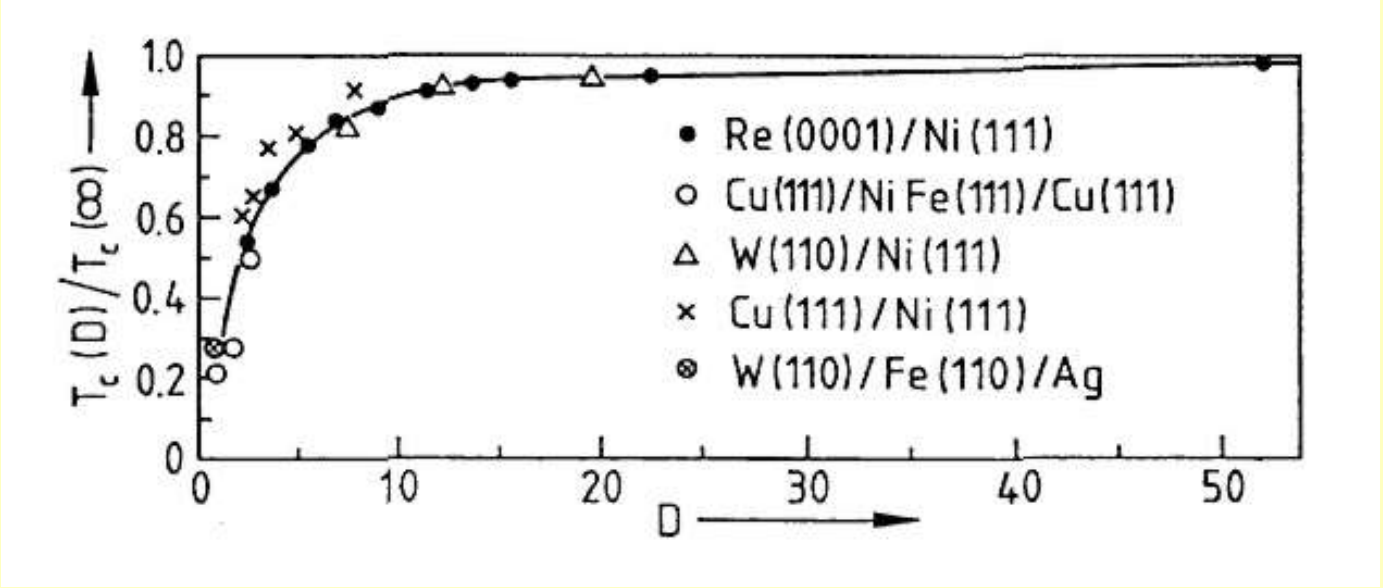


Densidade de spin da superfície do Fe e de uma monocamada de Fe (azul escuro indica spin negativo) (Freeman)



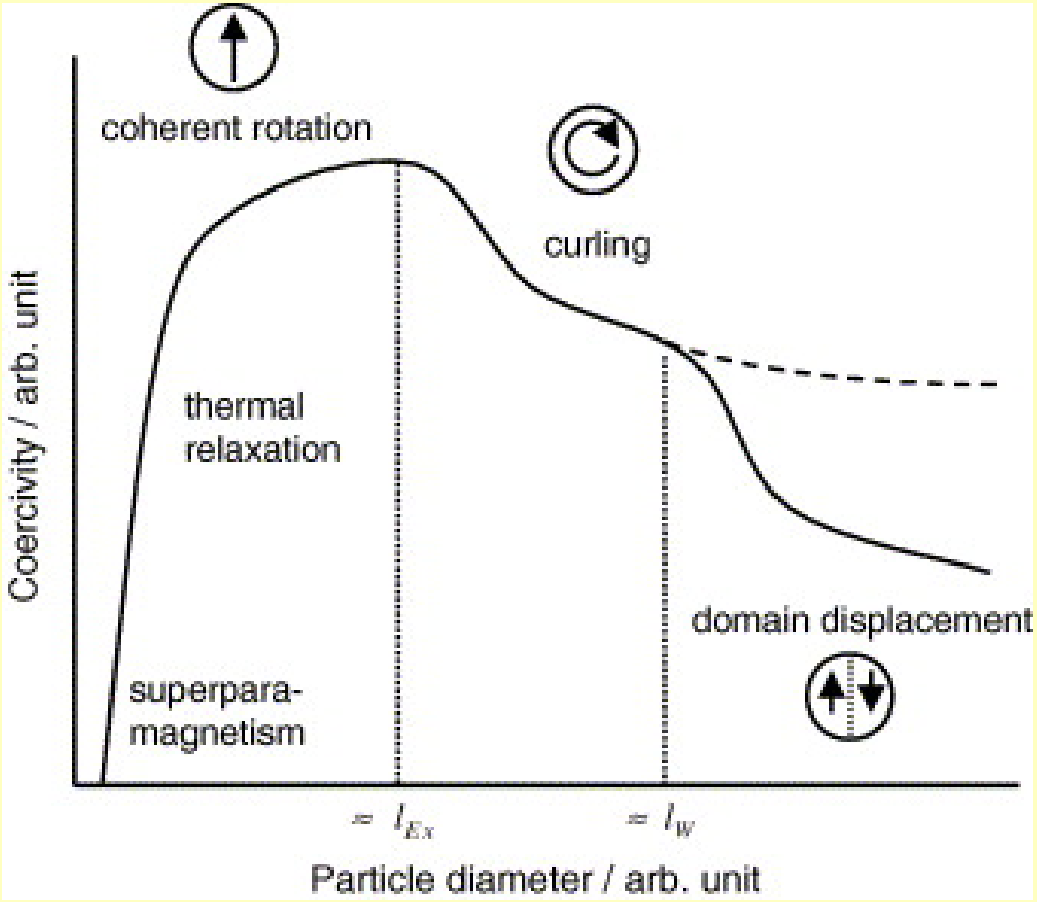
Densidade de carga calculada para a superfície do Fe(001) (Onishi et al. 1983)

T_C de filmes ultra-finos



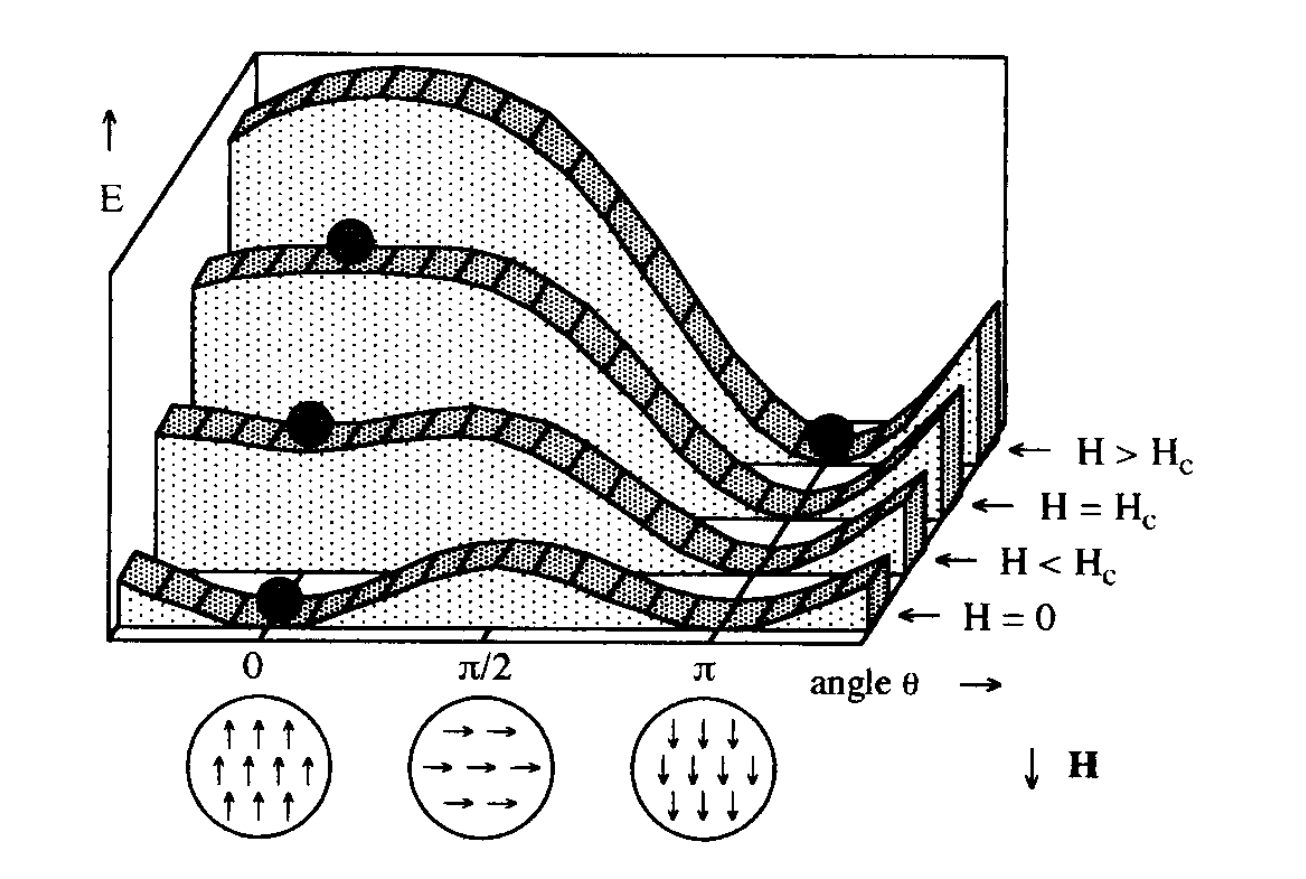
Razão entre as temperaturas de ordenamento magnético (T_C) de filmes ultra-finos e T_C de amostras macroscópicas, em função da espessura. (Gradmann 1993).

Diâmetro e comportamento magnético



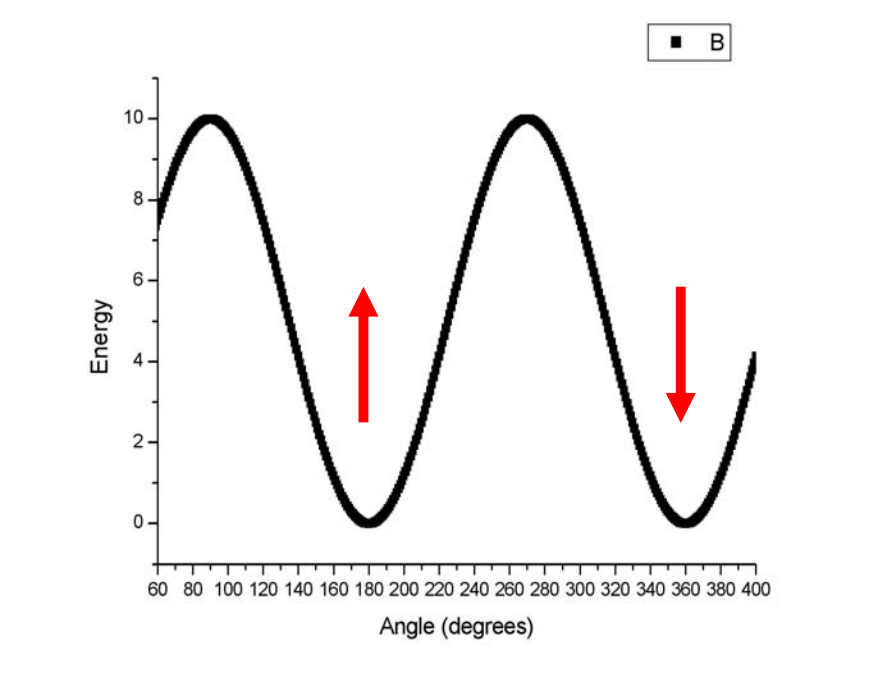
Curva esquemática de coercividade vs. diâmetro de partículas magnéticas.
Três regimes: SPM, monodomínio FM e multidomínio FM

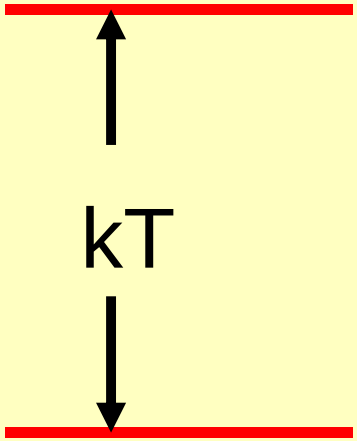
Energia de anisotropia de uma partícula monodomínio com campo aplicado



Energia de partícula monodomínio com anisotropia em campo magnético (Coey)

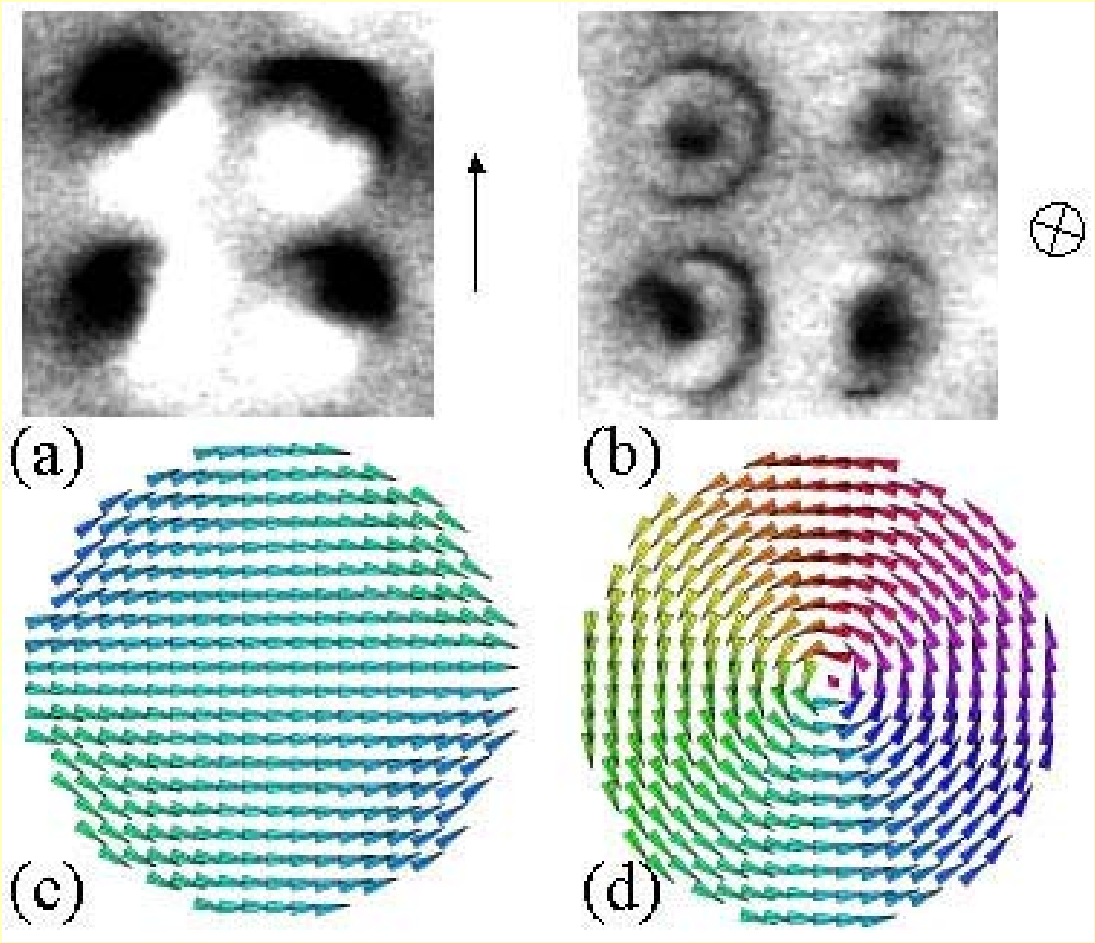
Superparamagnetismo





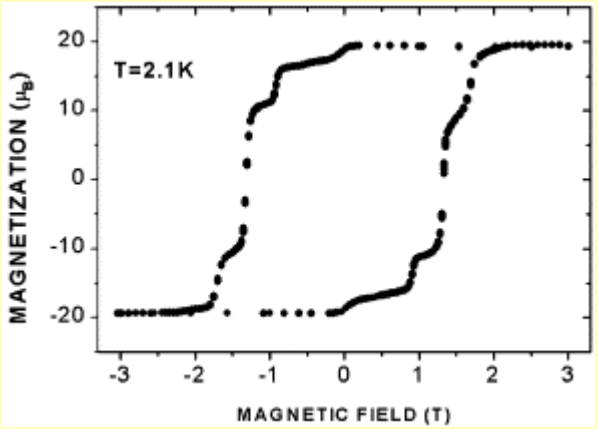
Finalmente, quando a energia de anisotropia da amostra é comparável a kT resulta em instabilidade da magnetização – o fenômeno do superparamagnetismo

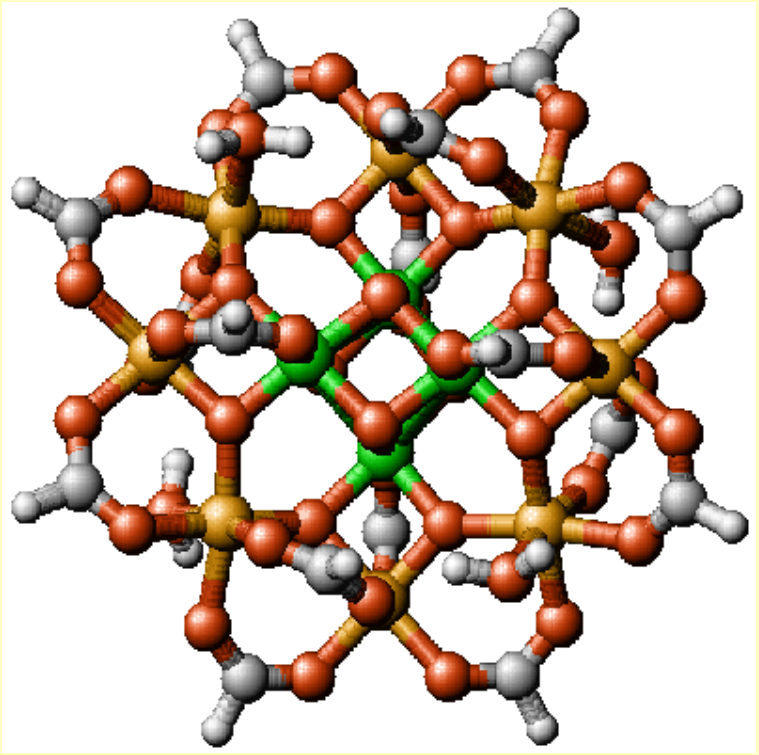
Magnetização de grãos magnéticos



a) e b) Imagens MFM de pontos de Co de 200 nm como monodomínios e vortexes; c) e d) respectivos modelos micromagnéticos (Dennis et al. 2004)

Magnetos moleculares





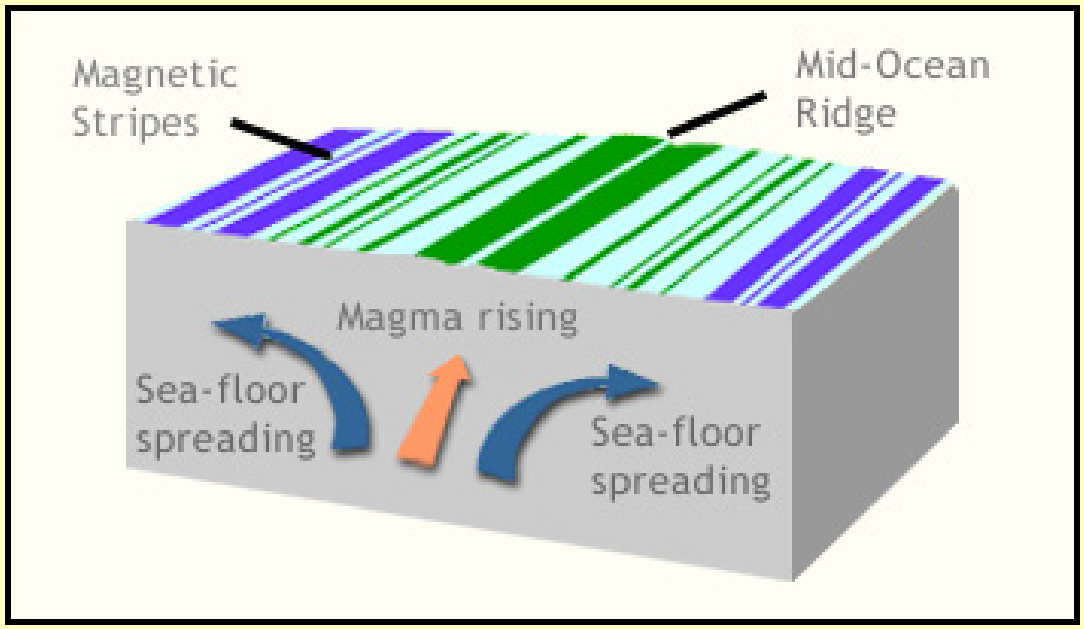
Histerese de monocristal de Mn12Ac a 2,1 K
(Gatteschi e Sessoli 2004)

Fluidos magnéticos



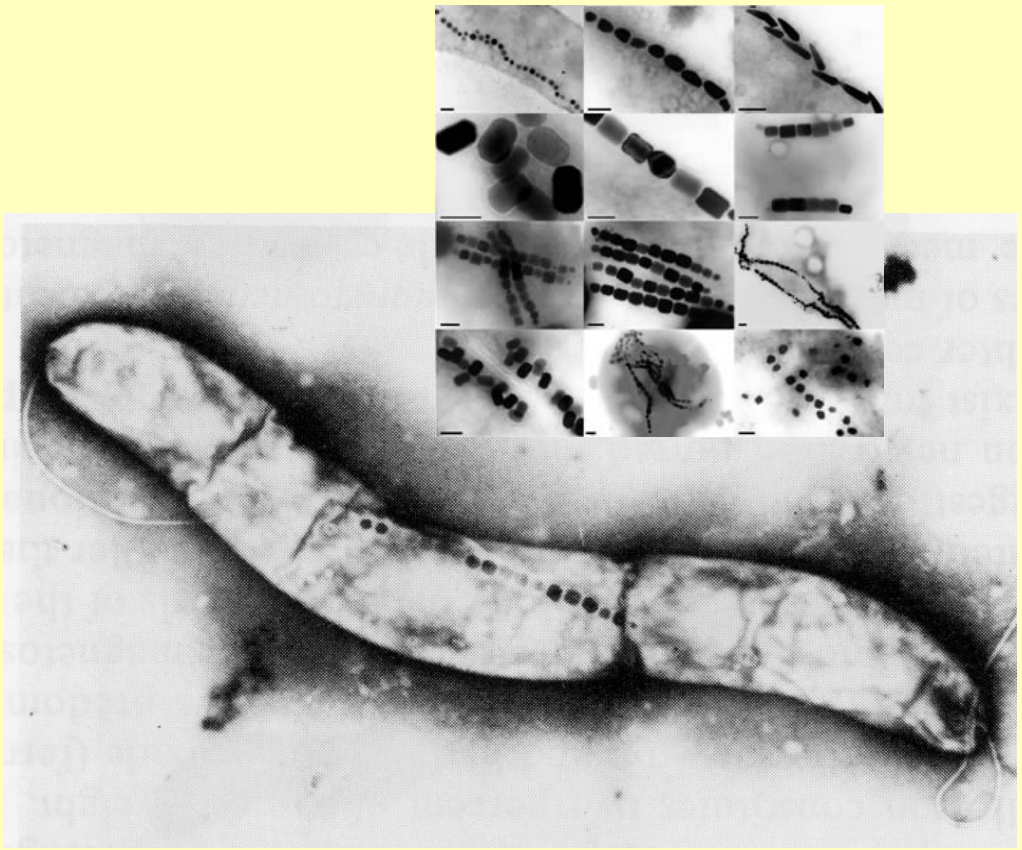
Ferrofluido entre os pólos de um ímã

Magnetismo e Geologia

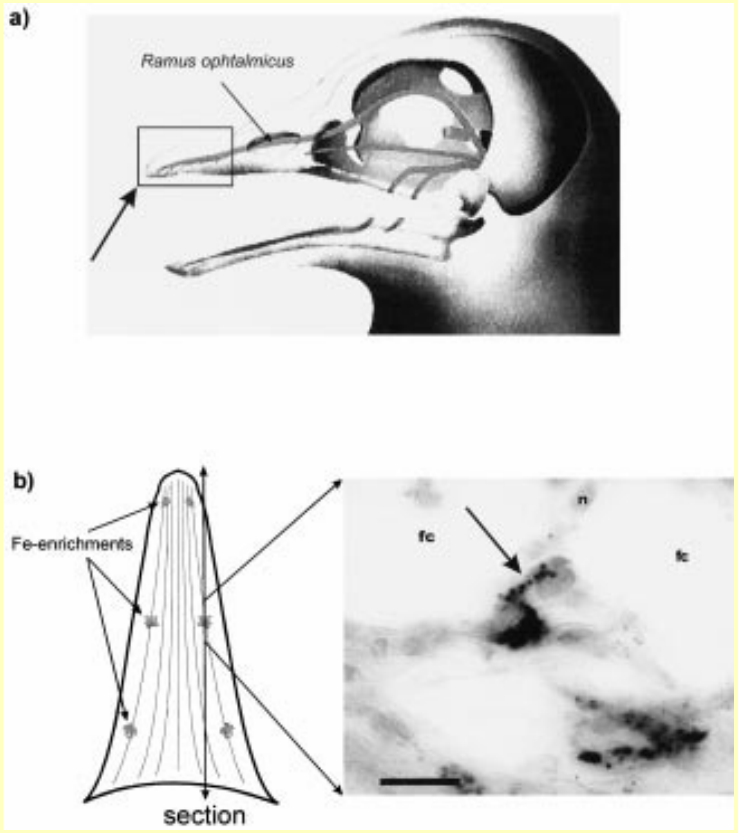


Padrões de magnetização das rochas no fundo do oceano mostrando a variação com o tempo do campo geomagnético

Magnetismo em seres vivos



Bactérias com cristais de material ferromagnético



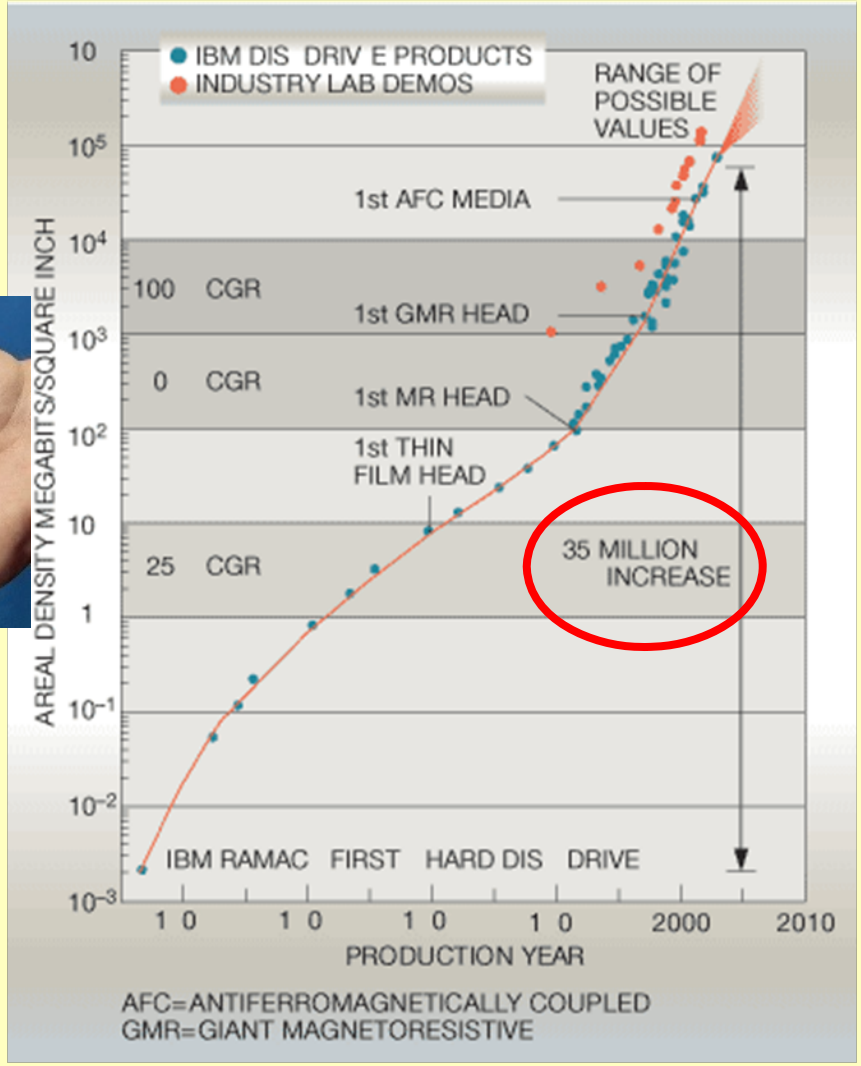
Bico de pombo mostrando pontos contendo regiões com Fe3+ (~μm) (Hanzlik et al., 2000)

A evolução da gravação magnética





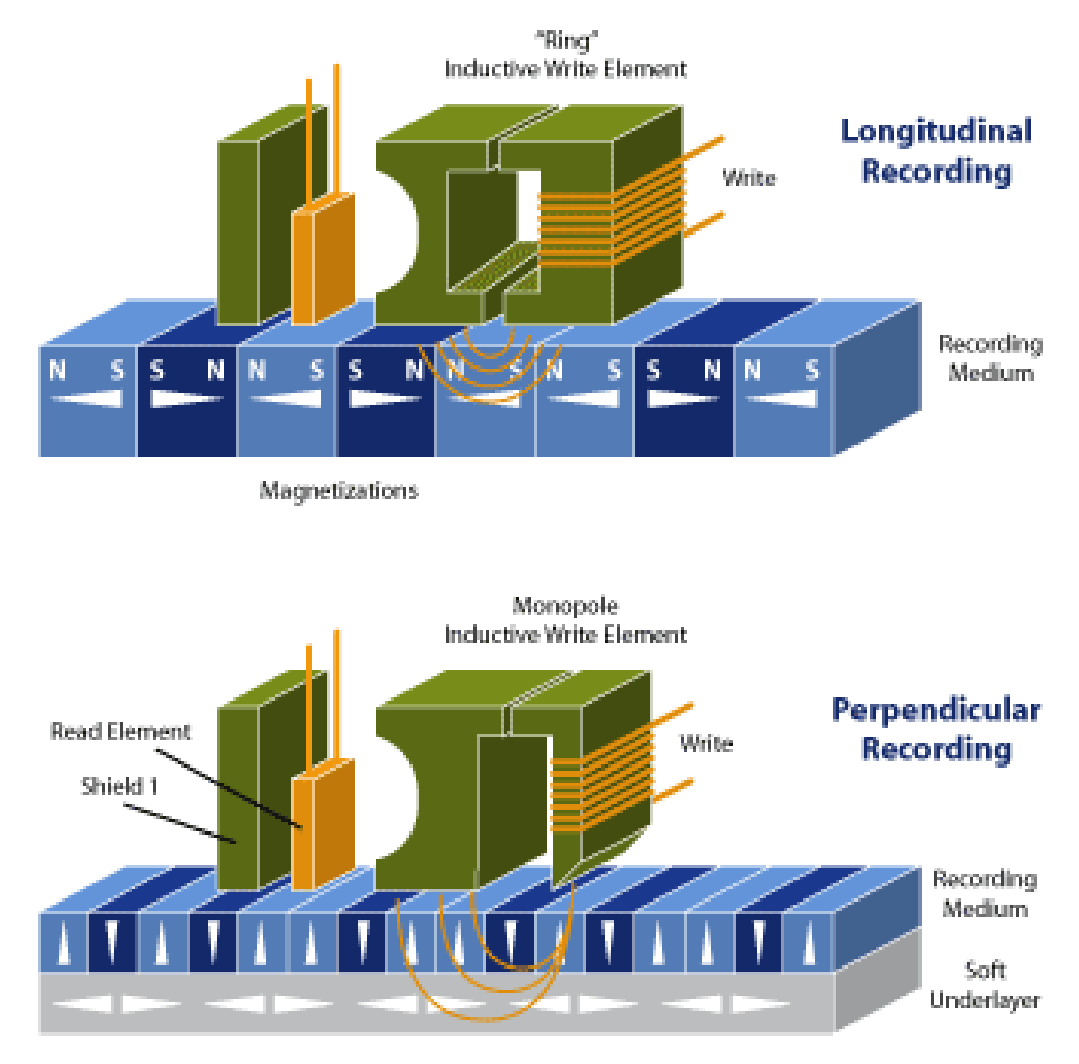
Três gerações de discos rígidos magnéticos



Evolução da densidade de área

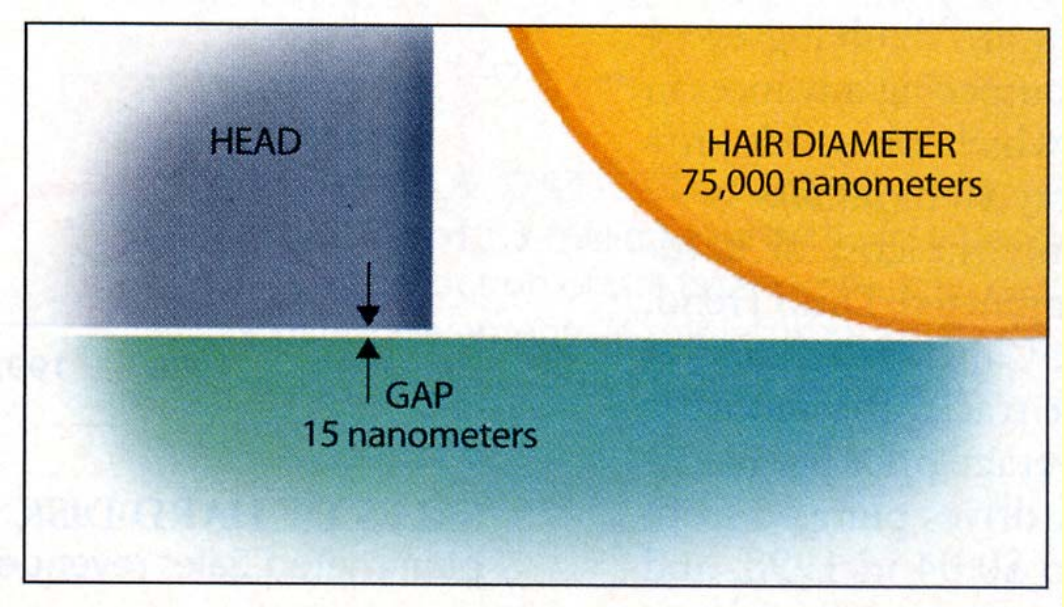
IBM

Gravação Magnética



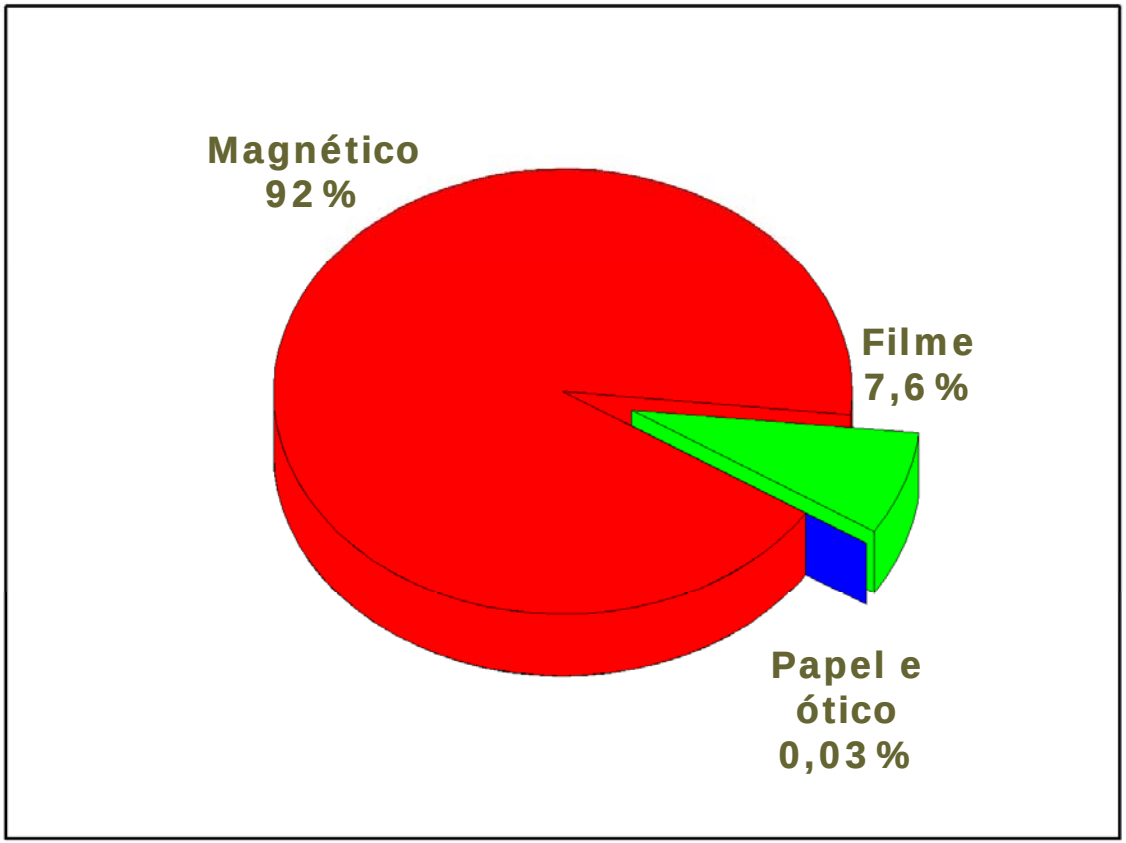
Cabeças de leitura e gravação magnética, longitudinal e perpendicular

Espaçamento Cabeça de Leitura-disco



Espaçamento 5.000 vezes menor que o diâmetro de um fio de cabelo!

Hoje a informação é armazenada principalmente sob forma magnética



Qual a quantidade de informação?

2 kB = $2x10^3$ bytes – uma página escrita

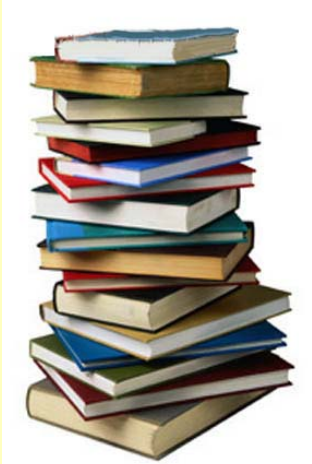
5 MB = $5X10^6$ bytes – toda a obra de Shakespeare

10 TB = $10X10^{12}$ bytes – Biblioteca do Congresso dos EUA (parte impressa)

A explosão de Informação

Em 2002 foram produzidos 5 Exabytes de informação nova

(1 Exabyte= 1.000.000.000.000.000.000 bytes ou 10^{18} bytes)





Equivalente ao conteúdo de informação de todas as palavras jamais pronunciadas pelos seres humanos !!!

Bibliografia

Revisão: Curso na página do CBPF (http://www.cbpf.br/~labmag/Nlabmag.htm)

Nanomagnetismo:

1. Ultrathin Magnetic Structures IV : Applications of Nanomagnetism, Bretislav Heinrich (Editor), J.A.C. Bland (Editor) Springer 2004.

2. J F Bobo, L. Gabillet e M. Bibes, "Recent advances in nanomagnetism and spin electronics", J. Phys.: Condens. Matter 16 (2004) S471-S496.

3. X. Batlle e A. Labarta, "Finite-size effects in fine particles: magnetic and transport properties", J. Phys. D: Appl. Phys. 35 (2002) R15-R42.

4. C.L. Dennis, R.P. Borges, L.D. Buda, U. Ebels, J.F. Gregg, M. Hehn, E. Jouguelet, K. Ounadjela, I. Petej, I.L. Prejbeanu e M.J. Thornton, "The defining length scales of mesomagnetism: a review", J. Phys.: Condens. Matter 14 (2002) R1175-R1262.

5. R. Skomski, "Nanomagnetism", J. Phys.: Condens. Matter 15 (2003) S841-R896.

6. I. Zutic, J. Fabian e S. Das Sarma, “Spintronics: fundamentals and applications", Rev. Mod. Phys. 76 (2004) 323-410.

7. S.D. Bader, 'Colloquium: opportunities in nanomagnetism', Rev. Mod. Phys. 78 (2006) 1-15.

8. S.N. Song and J. Ketterson, “Ultrathin Films and Superlattices”, in *Electronic and Magnetic Properties of Metals and Ceramics*, vol. 3A:Part I, eds. R. W. Cahn, P. Haasen, E. J. Kramer, John Wiley & Sons (1991).