



مبانی نانومغناطیس و روشهای مشخصه یابی در نانوساختارهای مغناطیسی

علی رستم نژادی

دانشگاه صنعتی مالک اشتر – مجتمع دانشگاهی علوم کاربردی
پژوهشکده الکتروسرام

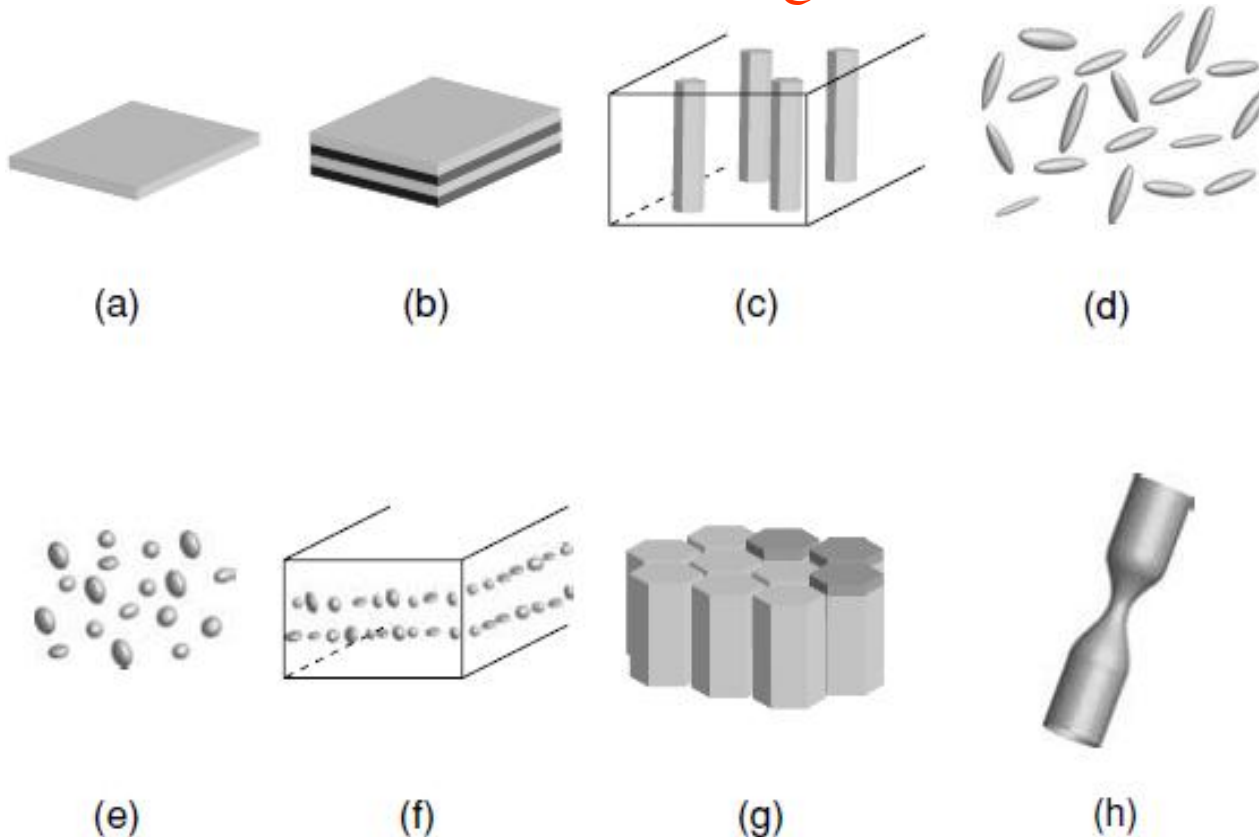
فهرست مطالب

- نانوساختارهای مغناطیس
- دلیل متفاوت بودن خواص مغناطیسی نانوساختارها با نمونه های ماکروسکوپی
- ناهمسانگردی و انرژیهای مغناطیسی
- نظریه میکرومغناطیس و طولهای مشخصه مغناطیسی
- نانوذرات تک حوزه مغناطیسی
- روشهای تجربی در مشخصه یابی خواص مغناطیسی نانوذرات
- ابر مغناطیس: ابرپارامغناطیس، ابر شیشه اسپینی و ابرفرومغناطیس
ابرپارامغناطیس و مشخصه های آن
- اثرات سطحی در نانوذرات مغناطیسی - نانوذرات هسته - پوسته
شیشه اسپینی، ابر شیشه اسپینی و ابرفرومغناطیس
- تمایز بین ابرپارامغناطیس و ابر شیشه اسپینی
- اثر بایاس تبادلی در نانوساختارهای مغناطیسی
- تغییر مرتبه گذار فاز مغناطیسی، اثر مگنتو کالریک

نانو مغناطیس

• نانومغناطیس به بخشی از علم فیزیک گفته می شود که در آن خواص مغناطیسی سیستم هایی بررسی می شود که حداقل یکی از ابعاد آنها در محدوده نانومتر، یعنی بین 1 تا 100 نانومتر، قرار بگیرد

انواع نانو ساختارهای مغناطیسی



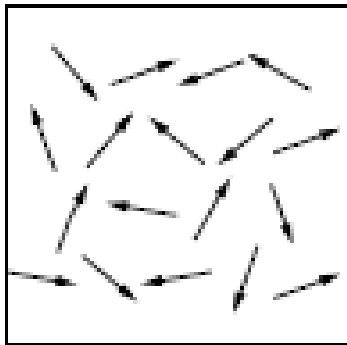
تعدادی از نانو ساختارهای مغناطیسی (a) لایه نازک (b) چند لایه ای (c) آرایه ای از نانوسیمها (d) نانوذرات غیر کروی (e) نانوذرات (f) (نانوکامپوزیت ها (g) محیط ضبط لایه نازکی و (h) نانو ساختار تنگ کشیده

منشا خواص مغناطیسی در مواد: دو قطبی مغناطیسی:

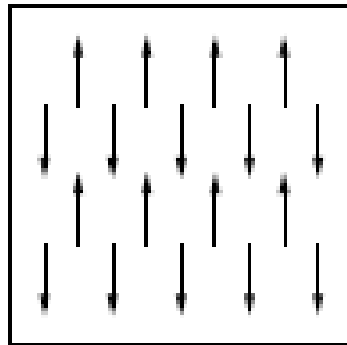
اندازه حرکت زاویه ای مداری الکترونها

اسپین الکترونها- مهم ترین سهم در تامین دو قطبی مغناطیسی در مواد

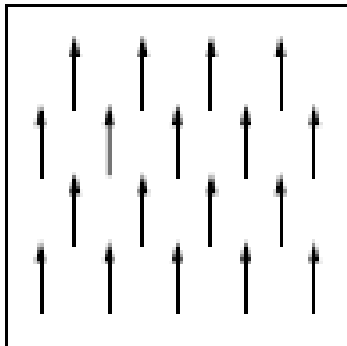
برهمکنش تبادلی: منشا نظم مغناطیسی در مواد



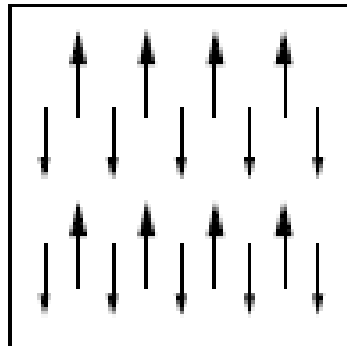
Paramagnetic



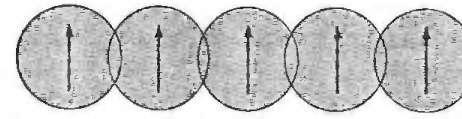
Antiferromagnetic



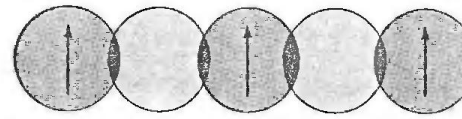
Ferromagnetic



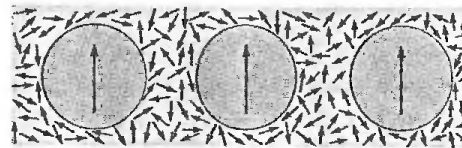
Ferrimagnetic



(a)



(b)



Oersted field

$$B = \frac{\mu_0 I}{2\pi r}$$

Magnetic dipole

$$B = \frac{\mu_0}{4\pi r^3} \times \left[\frac{3}{r^2} (\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{r} - \boldsymbol{\mu} \right]$$

Magnetic dipole: A.m²

Ashcroft, Mermin: Solid state physics, 1976

N. A. Spaldin, MAGNETIC MATERIALS, Fundamentals and Applications, 2011

دلیل متفاوت بودن خواص مغناطیسی نانو ساختارها با نمونه های ماکروسکوپی مواد

- ۱- شکست تقارن در نانو ساختارها به خاطر محدود شدن بعد فضایی
- ۲- قابل مقایسه بودن طولهای مشخصه مغناطیسی با ابعاد سیستم مغناطیسی
- ۳- آثار سطحی: ناشی از شکست پیوندها، تغییر نوع برهمکنشهای مغناطیسی ناکاملی بلوری در نزدیک سطح و...
- ۴- اهمیت برهمکنش دو قطبی-دوقطبی و برهمکنش تبادل بین نانو ساختارها
- ۵- مهم شدن اثر انرژی گرمایی بر خواص مغناطیسی
- ۶- تغییر نظم مغناطیسی با کاهش ابعاد، تغییر دمای نظم، **کاهش** یا **افزایش** مقدار مغناطش در نانو ساختارهای **فرومغناطیس** و **پادفرومغناطیس**
- ۷- تغییر مرتبه گذار فازهای مغناطیسی
- ۸- مهم تر شدن ناهمسانگردی شکل در ابعاد نانو

ناهمسانگردی مغناطیسی

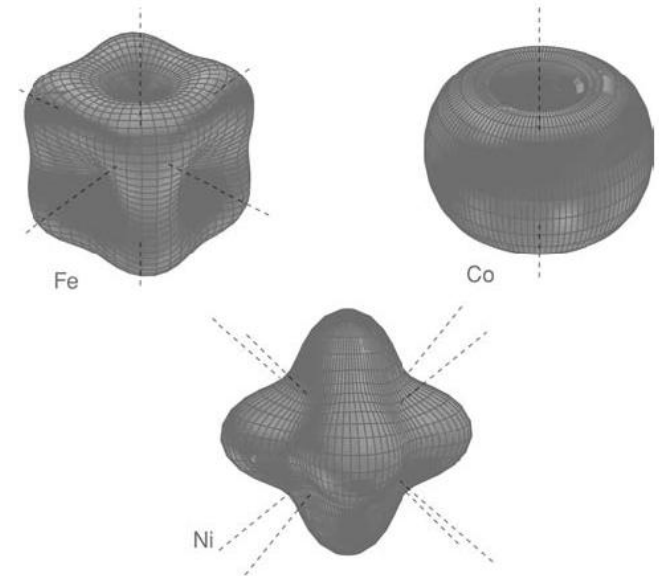
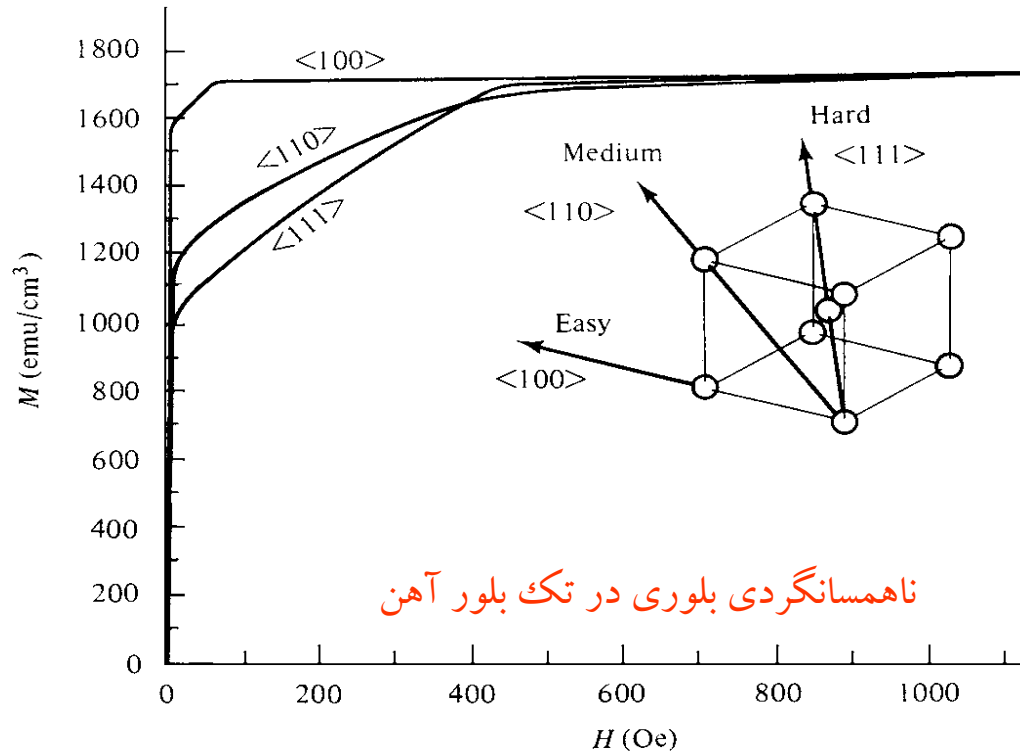
ناهمسانگردی مغناطیسی به مفهوم وابسته بودن خواص مغناطیسی سیستم به راستای اندازه گیری است. در مواد ناهمسانگرد مغناطیسی، بدون صرف انرژی نمی توان مغناطش را در هر راستایی قرار داد. راستای آسان (سخت) راستایی است که هنگامی که مغناطش سیستم در آن راستا قرار می گیرد، سیستم دارای کمترین (بیشترین) انرژی ناهمسانگردی است.

انواع ناهمسانگردی مغناطیسی

- ناهمسانگردی بلوری
- ناهمسانگردی شکل
- ناهمسانگردی تنشی
- ناهمسانگردی القایی
- ناهمسانگردی تبادل

ناهمسانگردی بلوری

به خاطر این ناهمسانگردی، مغناطش در راستاهای بلوری خاصی می تواند قرار گیرد. این ناهمسانگردی مهم ترین نوع ناهمسانگردی است که به علت برهمکنش اسپین-مدار الکترونها ایجاد می شود



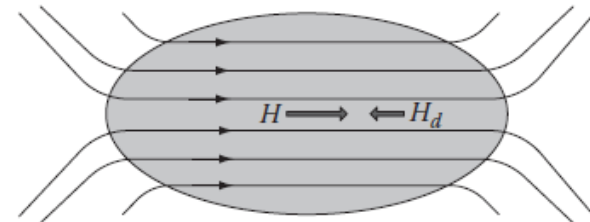
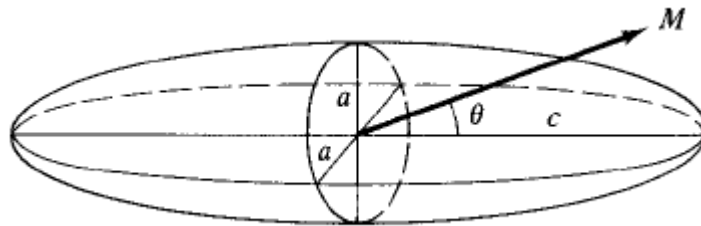
$$E = K_0 + K_1 \sin^2\theta + K_2 \sin^4\theta + \dots$$

انرژی ناهمسانگردی بلوری تک محوری

B . D. Cullity, Introduction to magnetic materials, 2011

ناهمسانگردی مغناطیسی شکل

در اجسام مغناطیسی با ابعاد محدود، شکل آنها تأثیر زیادی بر خواص مغناطیسی خواهد داشت. در این اجسام قطبهای مغناطیسی خنثی نشده در مرزهای آنها باعث ایجاد میدان مغناطیسی در داخل و خارج آنها می شود. به این میدان در داخل اجسام مغناطیسی میدان وامغناطش و در خارج از آنها میدان سرگردان گفته می شود. این میدان، که باعث کاهش میدان داخلی کل می شود، تابع شکل اجسام مغناطیسی است. این نوع ناهمسانگردی در نانوساختارهای مغناطیسی به دلیل افزایش میدان وامغناطش اهمیت بیشتری دارد.



$$E_{\text{ms}} = \frac{1}{2}M^2 N_c + \frac{1}{2}(N_a - N_c)M^2 \sin^2 \theta.$$

B. D. Cullity, Introduction to magnetic materials, 2011

S Tumanski, Handbook of Magnetic Measurements, 2011

نظریه میکرومغناطیس و طولهای مشخصه در نانومغناطیس

$$E_{tot} = E_{ex} + E_{an} + E_{ms} + E_z$$

$$E_z = -\mu_0 \vec{M} \cdot \vec{H}$$

$$E_{ex} = \int A(\nabla m)^2 dV$$

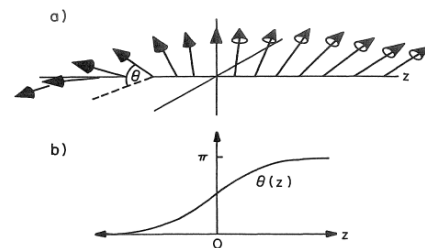
$$E_{ex} = \int A[(\nabla\theta)^2 + \sin^2(\theta)(\nabla\varphi)^2] dV$$

$$A \approx \frac{JS^2 Z_c}{a} \quad \text{سختی تبادل}$$

در این رهیافت اسپینهای اتمی نقش اصلی را بر عهده دارند. مغناطش تابع پیوسته ای در فضا است. مغناطش موضعی در هر نقطه از فضا، از کمینه کردن انرژی مغناطیسی کل به دست می آید. انرژی مغناطیسی کل شامل انرژی تبادل، انرژی زیمان، انرژیهای ناهمسانگردی، انرژی مگنتواستاتیک و... می باشد

$$E_{tot} = \int \left\{ A(\nabla m)^2 + k_1 e_{an}(\theta) - \frac{\mu_0}{2} \vec{M} \cdot \vec{H}_d - \mu_0 \vec{M} \cdot \vec{H} + \dots \right\} dV$$

$$E_{tot} = \frac{\mu_0 M_s^2}{2} \int \left\{ \frac{2A}{\mu_0 M_s^2} (\nabla m)^2 + \frac{2k_1}{\mu_0 M_s^2} e_{an}(\theta) - \frac{1}{M_s} \vec{m} \cdot \vec{H}_d - \frac{2}{M_s} \vec{m} \cdot \vec{H} + \dots \right\} dV$$



Kronmüller, H., in *General Micromagnetic Theory, Handbook of Magnetism and Advanced Magnetic Materials*

طول تبدالی

$$l_{ex} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}}$$

ضریب جمله اول برای تعریف طول تبدالی بکار برده می شود. این یک طول مشخصه در مواد مغناطیسی است و نشان دهنده معیاری است که در طول های کوچکتر از آن، انرژی تبدالی غالب تر از انرژی مگنتوستاتیک است. در بیشتر مواد فرومغناطیسی، طول تبدالی بین ۲ تا ۵ نانومتر است

$$\kappa = \sqrt{\frac{2k_1}{\mu_0 M_s^2}}$$

ضریب سختی و یا پارامتر کیفیت

اهمیت نسبی اثرات ناهمسانگردی بلوری به مگنتوستاتیک را نشان می دهد. این عبارت نسبت انرژی ناهمسانگردی به انرژی مگنتوستاتیک است

$$\Delta = \sqrt{\frac{A}{k_1}} = \frac{l_{ex}}{\kappa}$$

طول مشخصه تبدالی و پارامتر کیفیت از طریق پارامتر دیواره حوزه به هم مربوط می شوند.

$$\delta_0 = \pi \Delta = \pi \sqrt{\frac{A}{k_1}} = \pi \frac{l_{ex}}{\kappa}$$

پهنای دیواره حوزه مغناطیسی

طول بحرانی تک حوزه ای

$$D_{cr} = \frac{72\sqrt{Ak}}{\mu_0 M_s^2}$$

این طول مشخصه، قطری است که در بالاتر از آن به لحاظ انرژی، یک نمونه مغناطیسی در حالت چند حوزه ای و در پائین تر از آن در حالت تک حوزه مغناطیسی قرار می گیرد. برای مواد مغناطیسی سخت و نرم، از ۵ تا ۱۰۰۰ نانومتر تغییر می کند

مقادیر نسبی طولهای مشخصه بستگی به ضریب سختی دارند.

در مواد مغناطیسی نرم ترتیب آنها به این صورت است

$$D_{cr} \sim l_{ex} \ll \Delta$$

در مواد مغناطیسی سخت ترتیب آنها چنین است

$$D_{cr} \gg l_{ex} \geq \Delta$$

$$\gamma = 2\pi\sqrt{Ak_1}$$

چگالی انرژی دیواره بلاخ

Guimaraes, A.P., *Principles of Nanomagnetism*, 2009.

Coey, J.M.D., *Magnetism and Magnetic Materials*. 2010.,

Skomski, R. and J.M.D. Coey, *Permanent magnetism*, 1999.

Cullity, B.D., Graham, C.D., *Introduction to magnetic materials*, 2009.

طولهای مشخصه در نانو ساختارهای مغناطیسی

کمیت	$T_c(K)$	$k_1(kJm^{-3})$	κ	$l_{ex}(nm)$	$R_{coh}(nm)$	$\delta(nm)$	$\frac{D_{cr}}{2}(nm)$	$\gamma mJ/m^2$
عبارت			$\frac{2k_1}{\mu_0 M_s^2}$	$\sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_s^2}}$	$\sqrt{24}l_{ex}$	$\pi \sqrt{\frac{A}{k_1}}$	$\frac{36\sqrt{Ak_1}}{\mu_0 M_s^2}$	$2\pi\sqrt{Ak_1}$
Fe	1044	48	0/12	2/4	12	64	10	4/1
Co	1360	410	0/45	3/4	17	24	56	15
Ni	628	-5	0/13	5/1	25	125	24	0/7
CoPt	840	4900	2/47	3/5	17	4/5	310	28
Nd ₂ Fe ₁₄ B	588	4900	1/54	1/9	9/7	3/9	110	25
SmCo ₅	1020	17200	4/30	3/6	18	2/6	560	57
Sm ₂ Fe ₁₇ N ₃	749	8600	2/13	2/5	12	3/7	190	41
CrO ₂	396	25	0/36	4/4	21	44	48	1/3
Fe ₃ O ₄	860	-13	0/21	4/9	24	73	38	1/2
CoFe ₂ O ₄	560	-	0/84	5/2	26	20	160	1/8
BaFe ₁₂ O ₁₉	740	330	1/35	5/8	28	14	280	5/6
La _{0.7} Sr _{0.3} MnO ₃	370	1/8	0/01	8/7	42/6	296	20-40	0/17

نانوذرات تک حوزه مغناطیسی

نانوذرات مغناطیسی دارای سه بعد محدود در ابعاد نانومتر هستند. سیستمهای نانوذرات مغناطیسی می توانند به صورت نانوذرات آگلومره شده، نانوذرات توزیع شده در یک زمینه غیر مغناطیسی جامد و یا سیال (فروسیال) باشند.

خواص فیزیکی نانوذرات مغناطیسی را می توان به دلخواه بر حسب مورد علمی و یا کاربردی مورد نظر تغییر داد.

رقابت بین انرژیهای مخلف: تک حوزه ای شدن

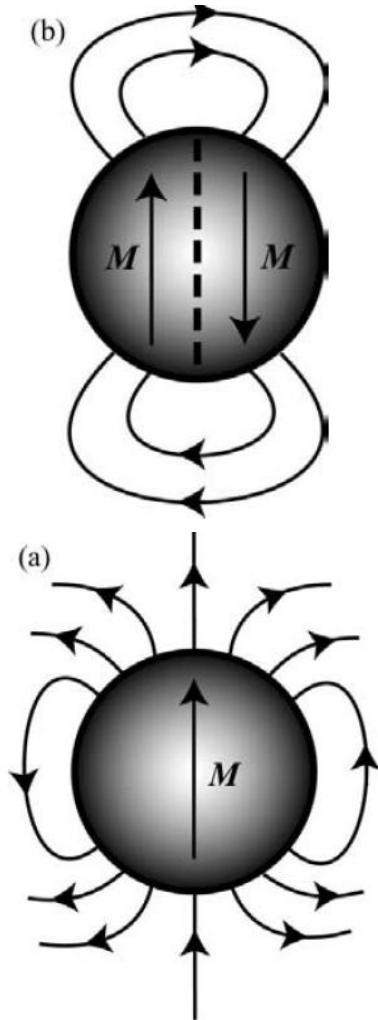
$$f_{ms} \approx -\mu_0 \vec{M} \cdot H_d \approx \mu_0 N_d M_s^2 \quad \text{انرژی مگنتواستاتیک}$$

$$\sigma_{dw} \approx 4\pi (Ak_u)^{1/2} \quad \text{چگالی انرژی دیواره مغناطیسی}$$

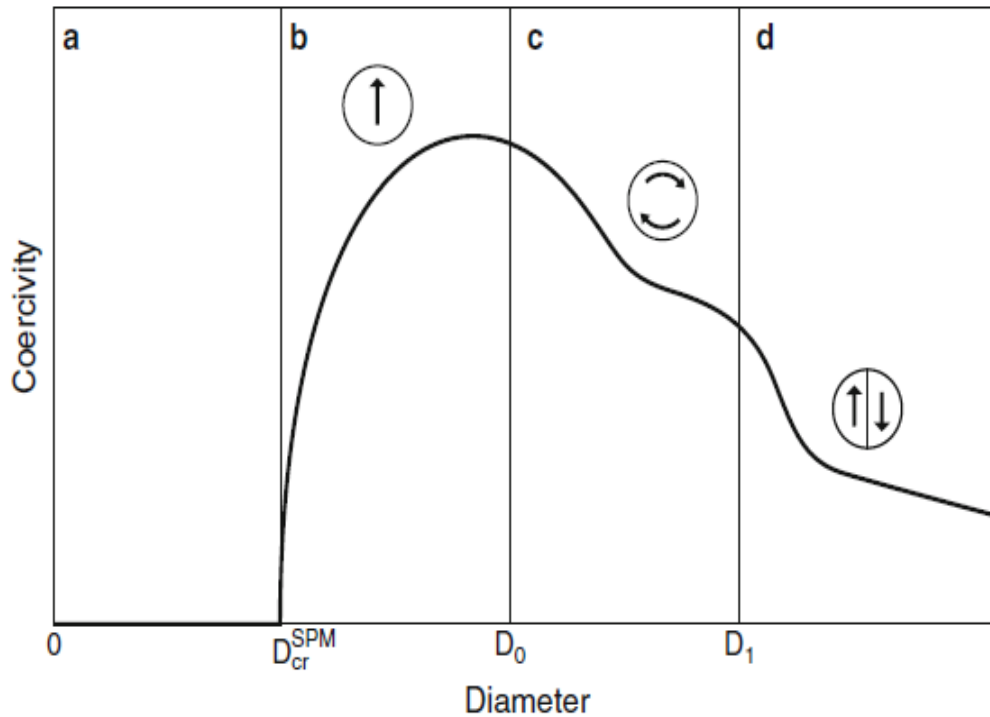
شعاع بحرانی تک حوزه ای شدن
ذرات کروی

$$r_c \approx 36 \frac{(Ak_u)^{1/2}}{\mu_0 M_s^2}$$

شعاع تک حوزه ای شدن با افزایش انرژی دیواره افزایش می یابد



حالت‌های مغناطیسی ممکن در نانوذرات تک حوزه
 نانوذرات مغناطیسی می‌توانند چند حالت مغناطیسی داشته باشند. در نانوذرات مواد نرم،
 با افزایش اندازه ذرات، در یک دمای ثابت، حالت‌های زیر رخ می‌دهد:



- ۱- حالت ابرپارامغناطیس (تک حوزه همدوس)
- ۲- حالت بلوکه شده ابرپارامغناطیس (تک حوزه همدوس)
- ۳- حالت گردشاره ای (buckling-curling)
- ۴- حالت چند حوزه ای

$$D_0 = 7.211 \sqrt{\frac{AK}{\mu_0 M_s^2}} = 7.211 l_{ex}$$

$$D_1 = \frac{9.0584 \sqrt{\frac{A}{\mu_0 M_s^2}}}{1 - 2.8075 \frac{K}{\mu_0 M_s^2}} = \frac{9.0584}{1 - 2.8075 \kappa} l_{ex}$$

در مواد مغناطیسی سخت، حالت گردشاره ای معمولاً وجود ندارد. اندازه بحرانی برای گذار از حالت تک حوزه ای به حالت چند حوزه ای

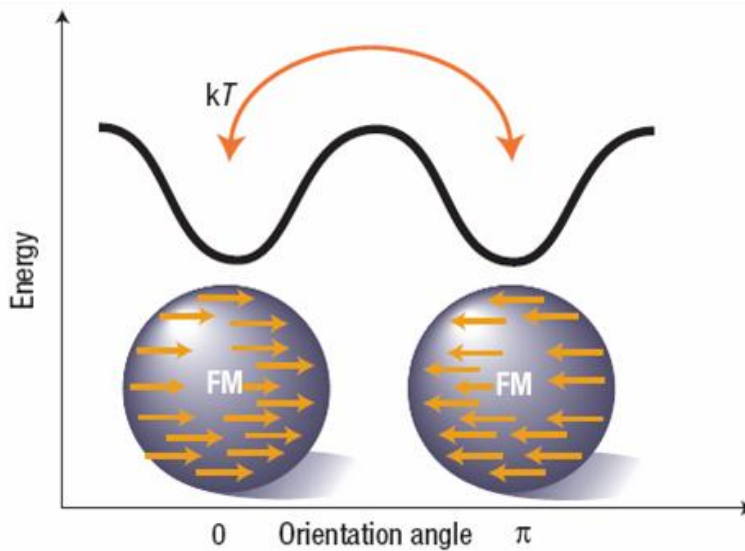
$$D_2 = \frac{9\pi \sqrt{2A(K + 2\sigma\mu_0 M_s^2)}}{\mu_0 M_s^2 (3\sigma - 2)} = \frac{9\pi \sqrt{\kappa + 4\sigma}}{\sqrt{2}(3\sigma - 2)} l_{ex}$$

$$\sigma = 0.785398$$

ابرپارامغناطیس (Superparamagnetism)

ذره مغناطیسی: اسپین کل ذره-ابر اسپین

در حالت ابرپارامغناطیس، انرژی گرمایی با انرژی ناهمسانگردی مغناطیسی مؤثر برابری می کند. مغناطش ذره در بین جهت‌های آسان مغناطیسی نوسان می کند.



$$E_a \approx k_B T \quad E_a = KV \sin^2(\theta) \quad \tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_B}{k_B T}\right) = \tau_0 \exp\left(\frac{KV}{k_B T}\right)$$

دمای بلو که شدن T_B : دمایی است که در آن انرژی گرمایی بر انرژی ناهمسانگردی غلبه می کند. در بالاتر از این دما، ذره در حالت ابرپارامغناطیس و در پائین تر از آن مغناطش ذره در حالت بلو که شده (یخ زده) قرار می گیرد.

T_B به عوامل ذاتی و خارجی مثل اندازه و شکل، انرژی ناهمسانگردی، زمان مشاهده یا اندازه گیری، دامنه میدان و فرکانس اعمالی، برهمکنش بین ذرات و... بستگی دارد رفتار مغناطیسی یک مجموعه از نانوذرات ابرپارامغناطیس مشابه با یک پارامغناطیس معمولی است، با این تفاوت که به جای اسپینهای اتمی، ابراسپین و درون ذره نظم مغناطیسی داریم.

برخی از روشهای مشخصه یابی نانوساختارهای مغناطیسی

- روشهای استتاتیک- اندازه گیری مغناطش و پذیرفتاری استتاتیک بر حسب دما، میدان: AGFM، VSM، SQUID
- روشهای دینامیکی- پذیرفتاری متناوب، واهلش مغناطش، تشدید مغناطیسی، طیف سنجی موسبائر
- روشهای تصویربرداری: میکروسکوپ نیروی لورنتزی، میکروسکوپ نیروی مغناطیسی
- روشهای اپتیکی: اثر فاراده و اثر کر
- core level spectroscopy، مانند EELS، XPS
- پراکندگی نوترون

سیستمهای ابرپارامغناطیسی: روشهای تجربی

$$M(T, H) = n\mu \left[\coth\left(\frac{\mu B}{k_B T}\right) - \frac{k_B T}{\mu B} \right] = M_s L\left(\frac{\mu B}{k_B T}\right)$$

مغناطش بر حسب میدان مغناطیسی - رابطه لانژوین

در حالت ابرپارامغناطیس میدان وادارندگی و

مغناطش بازمانده نداریم

۱- عدم پسماند مغناطیسی

۲- در دماهای بین دمای کوری تا دمای بلوکه

شدن، انطباق منحنیهای M/M_s بر حسب

B/T

خطی بودن در میدانهای کوچک و عدم اشباع

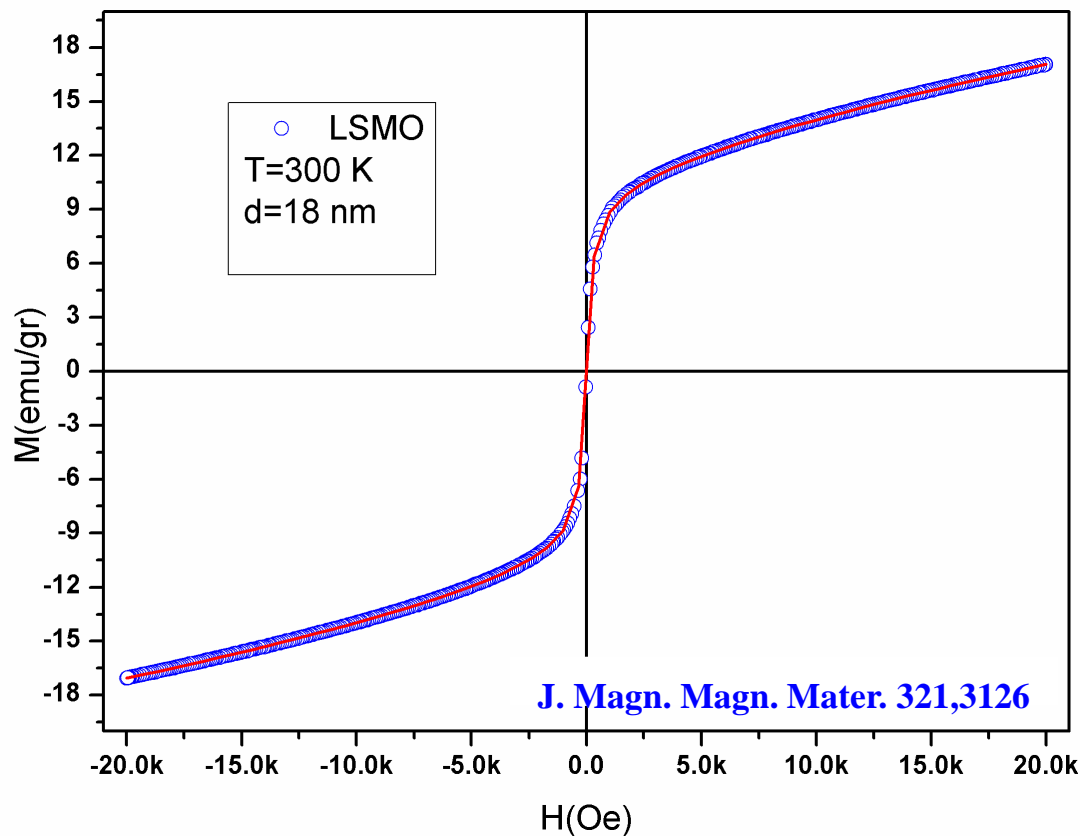
تا میدانهای خیلی بزرگ

دلایل انحراف از رابطه لانژوین

۱- توزیع در اندازه ذرات

۲- آثار مربوط به اسپینهای بی نظم سطحی

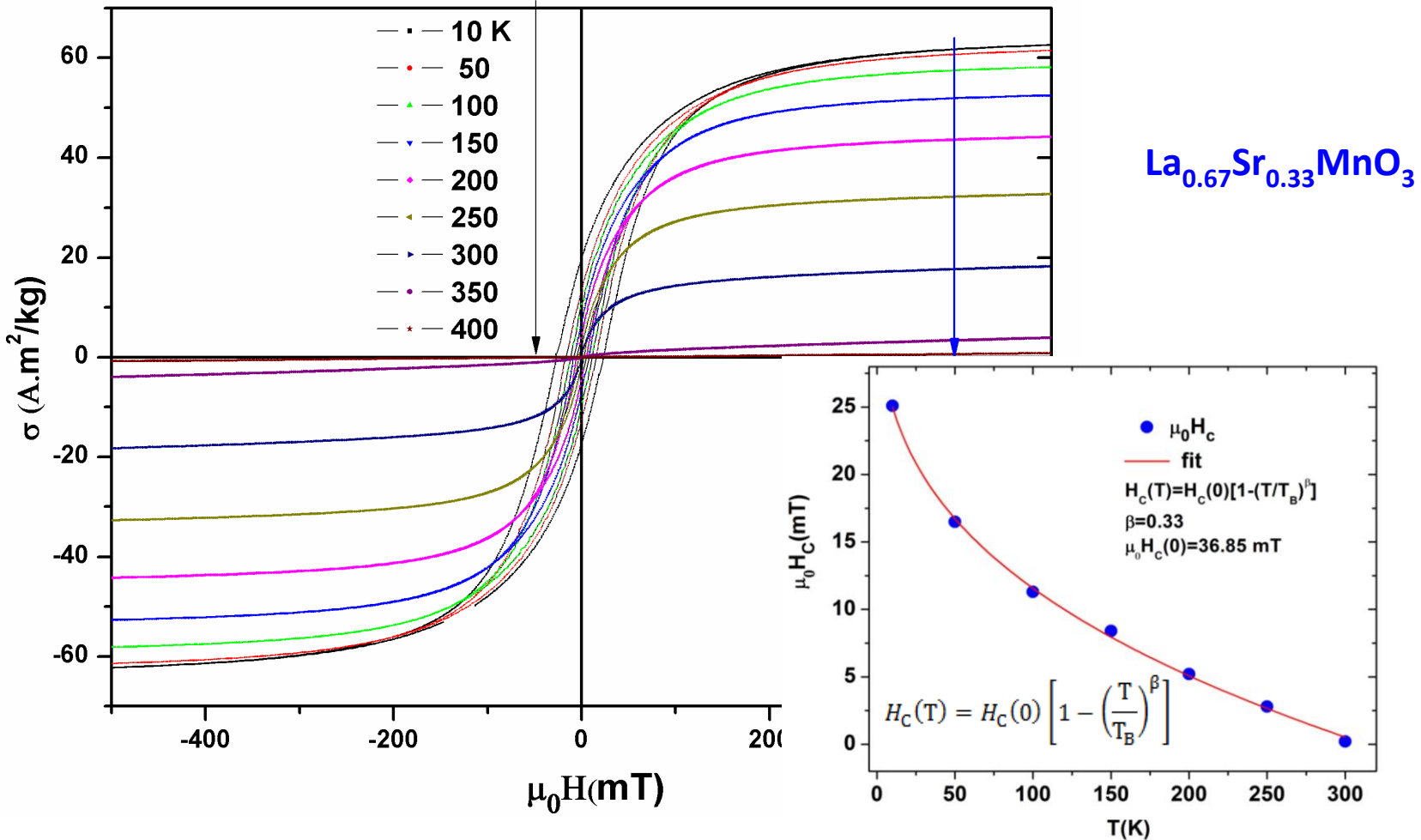
۳- برهمکنش بین ذرات



$$M(T, H) = \int_0^{\infty} \mu L\left(\frac{\mu B}{k_B T}\right) f(\mu) d\mu + \chi H \quad f(\mu) = \frac{N}{\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\ln^2(\mu/\mu_0) / 2\sigma^2\right]$$

روشهای تجربی برای بررسی خواص مغناطیسی سیستمهای ابرپارامغناطیسی

با کاهش دما، تا دماهای کمتر از دمای بلوکه شدن، پسماند مغناطیسی به وجود می آید.
با کاهش دما، میدان وادارندگی افزایش می یابد.



A. Rostamnejadi, et al. Magnetic and ferromagnetic resonance study of LSMO nanoparticles, unpublished.

ابر پارامغناطیس - روشهای تجربی - مغناطش بر حسب دما - در میدان استاتیکی
 مد ZFC و مد FC

انداز گیری مغناطش در میدانهای مغناطیسی کوچک

اثر اندازه ذرات بر دمای بلوکه شدن

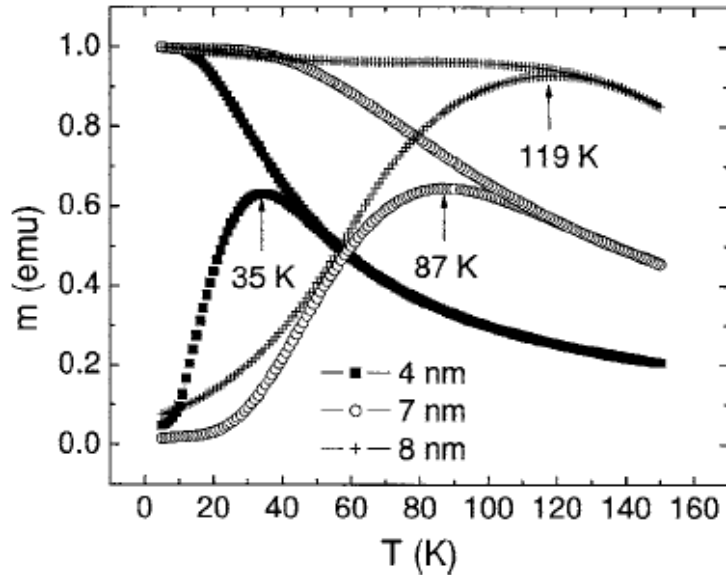


FIG. 3. ZFC-FC curves of Co particles of different sizes. The blocking temperature increases with increasing the particle size.

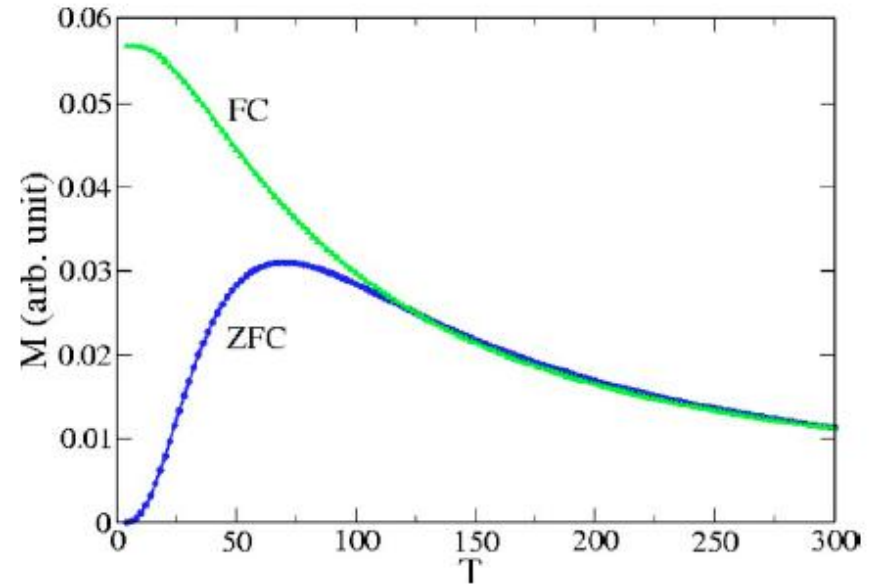


FIG. 1. (Color online) Numerically calculated dc magnetization the FC and ZFC processes.

$$E_a \approx k_B T \quad E_a = KV \sin^2(\theta)$$

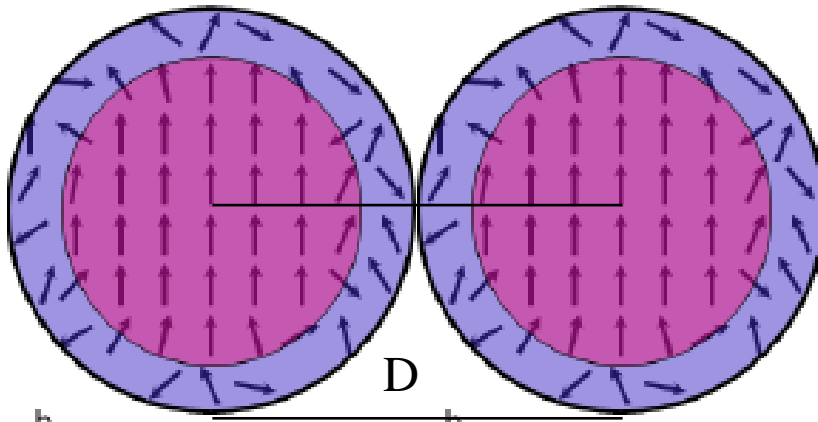
PHYSICAL REVIEW B 74, 214410 (2006)

PHYSICAL REVIEW B 72, 014416 (2005)

روشهای تجربی: مغناطش - استاتیک

انرژی برهمکنش دو قطبی دو قطبی

$$E = \mu_0/4\pi r^3 [\vec{m}_1 \cdot \vec{m}_2 - 3/r^2 (\vec{m}_1 \cdot \vec{r})(\vec{m}_2 \cdot \vec{r})]$$



$$d \sim 16 \text{ nm}$$

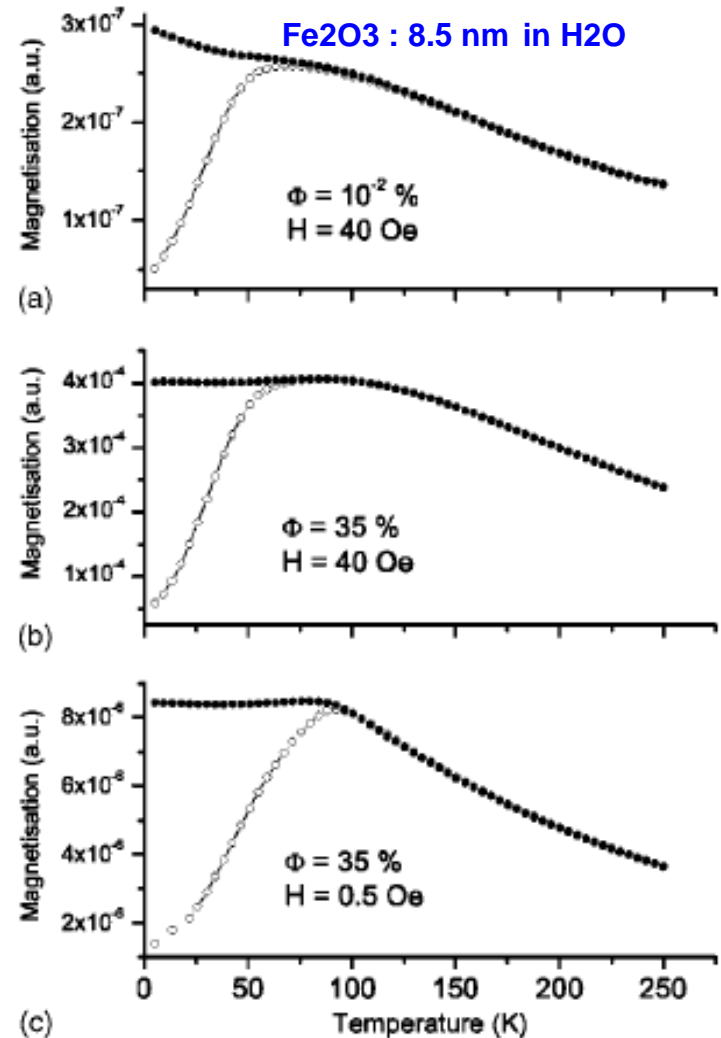
$$\mu \approx 9433 \mu_B$$

$$E_{d-d} \sim 19 \times 10^{-23} \text{ J}$$

$$\frac{E_{d-d}}{k_B} \approx 13.7 \text{ K}$$

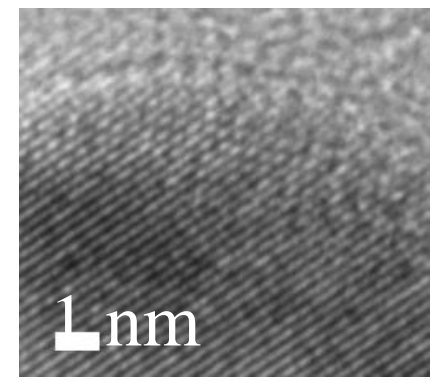
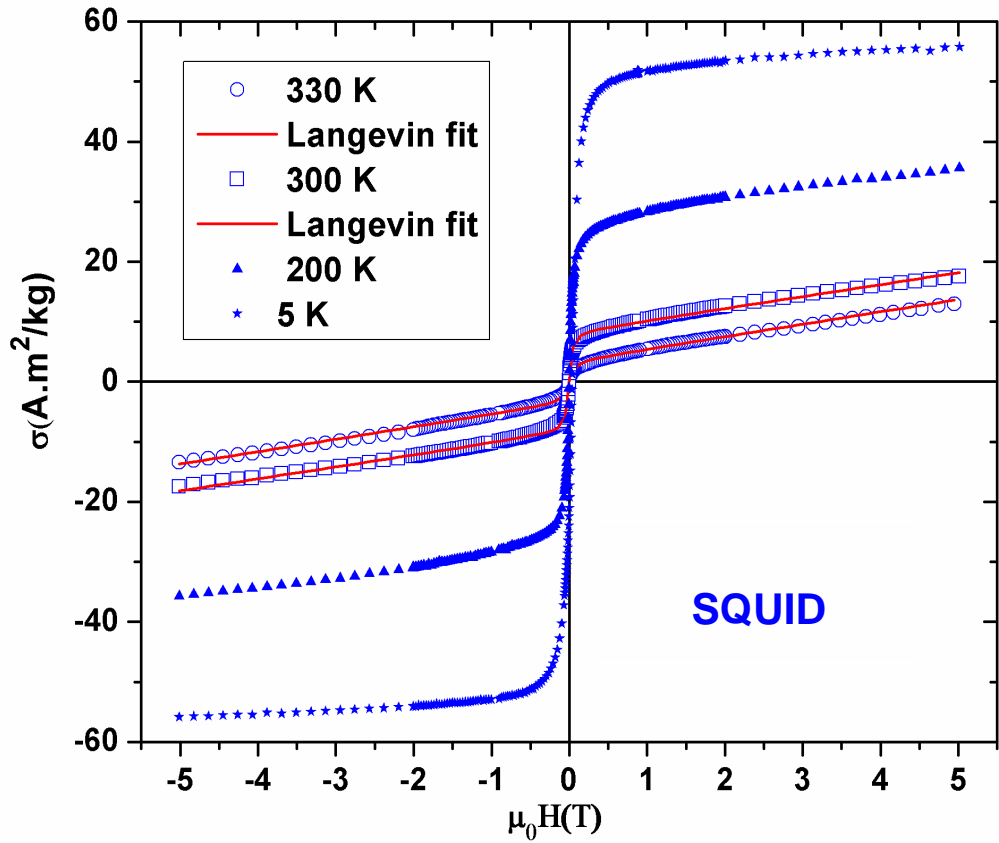
for 5 nearest neighbours: $\Delta T_B \sim 70 \text{ K}$

اثر برهمکنش بین ذرات بر دمای بلوکه شدن

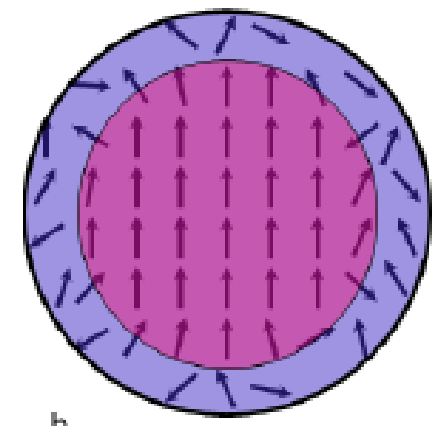


J. Appl. Phys. 97 (2005) 10A502.

روشهای تجربی: مغناطش - استاتیک
 Core-shell structure: FM fraction



HRTEM
 LSMO
 $\text{La}_{0.67}\text{Sr}_{0.33}\text{MnO}_3$



$d \sim 16 \text{ nm}$
 $t_{shell} \sim 1.4 \text{ nm}$
 $r_{FM} \sim 6.6 \text{ nm}$

$$\langle M \rangle_T = M_0(T) L\left(\frac{\mu B_{ext}}{k_B T}\right) + \mu_0^{-1} \chi_{AF} B_{ext}$$

$\mu \approx 9433 \mu_B$
 $m_s \approx 2.1 \mu_B / Mn$

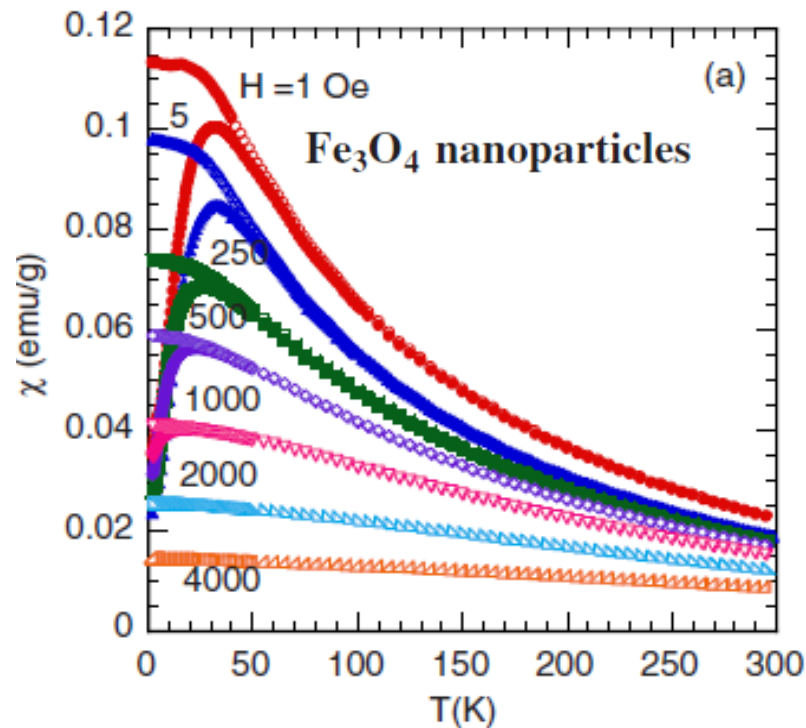
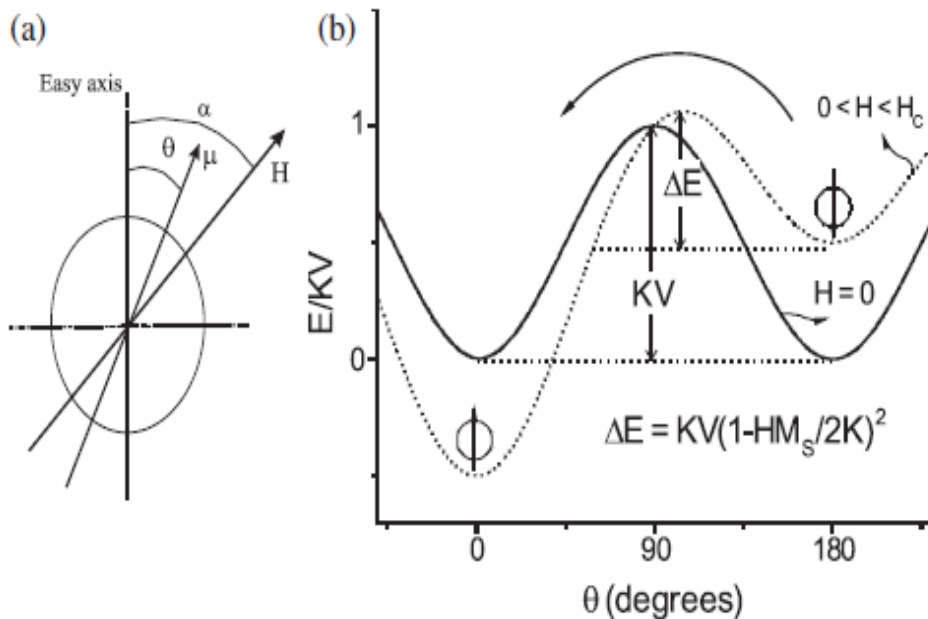
$$\frac{V_{FM}}{V_{particle}} = \frac{m_s}{3.67}$$

A. Rostamnejadi, et al. unpublished.

روشهای تجربی: مغناطش - استاتیک

اثر میدان مغناطیسی بر دمای بلوکه شدن (ZFC, FC mode)

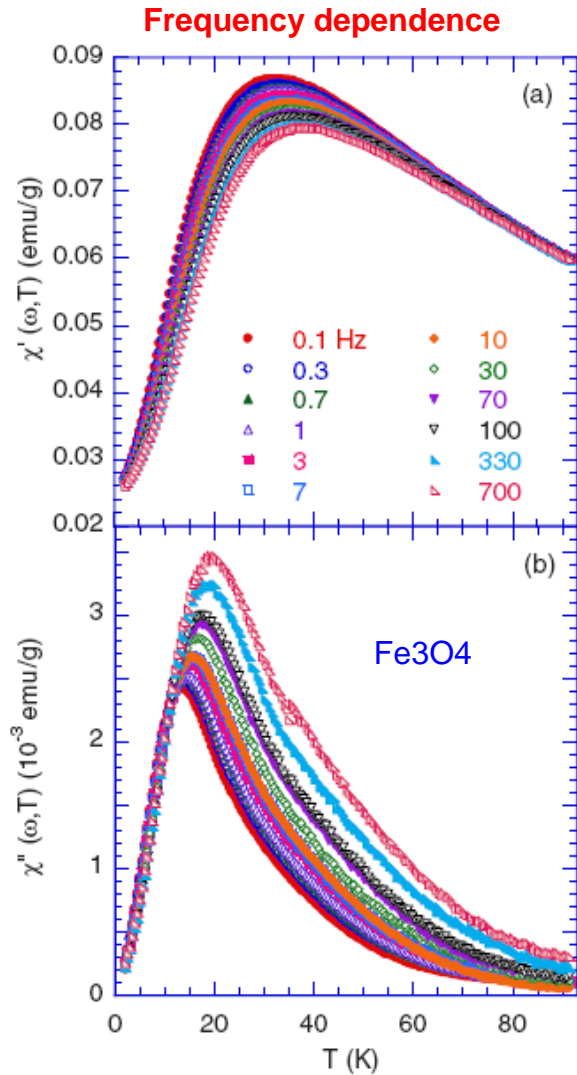
دمای بلوکه شدن با افزایش میدان کاهش می یابد. ارتفاع سد پتانسیل کاهش می یابد و انرژی گرمایی کمتری برای تحریک مغناطش بین راستهای آسان نیاز است



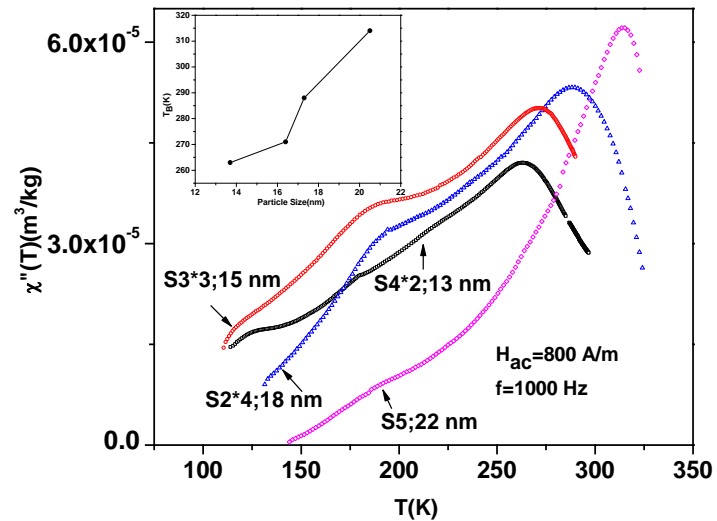
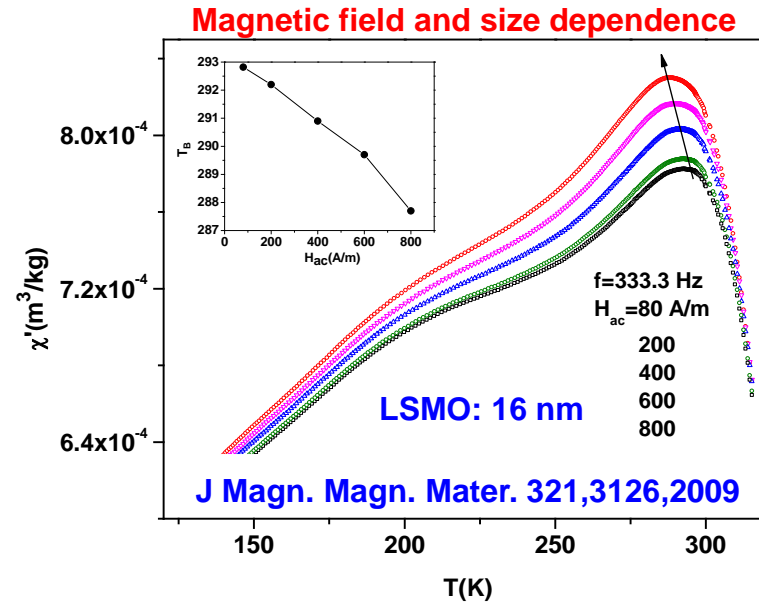
J. Nanosci. Nanotechnol. 8, 2836–2857, 2008

PHYSICAL REVIEW B 79, 024418 (2009)

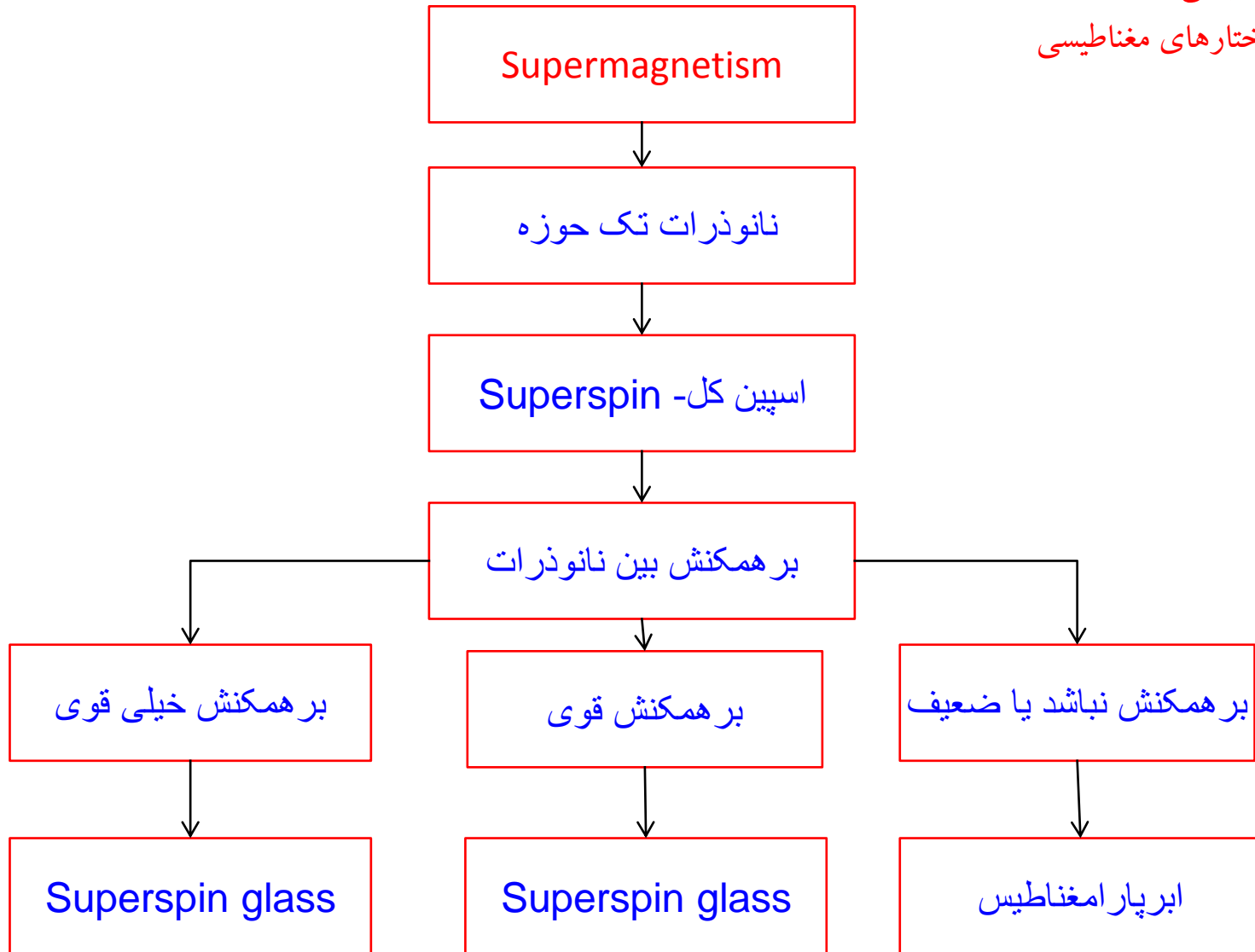
روشهای تجربی دینامیکی: پذیرفتاری مغناطیسی متناوب - استاتیک



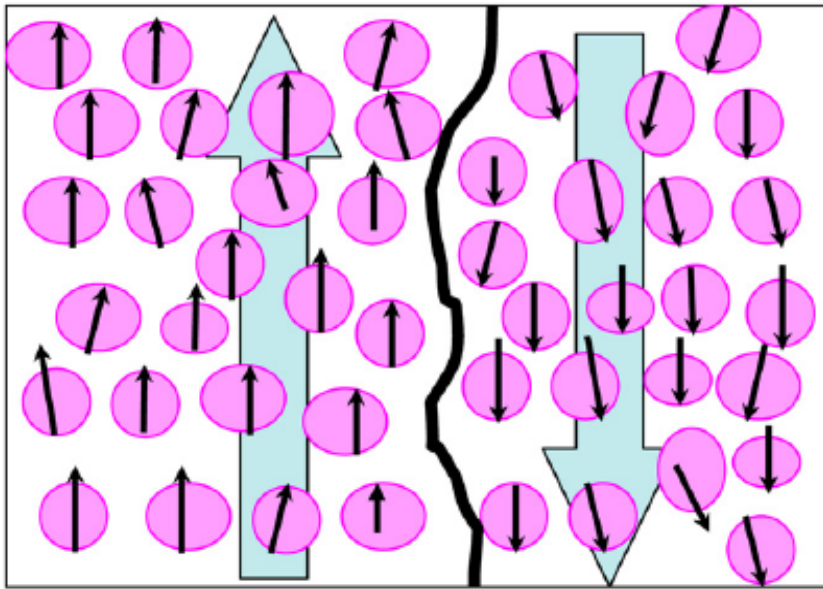
PRB 79, 024418, 2009



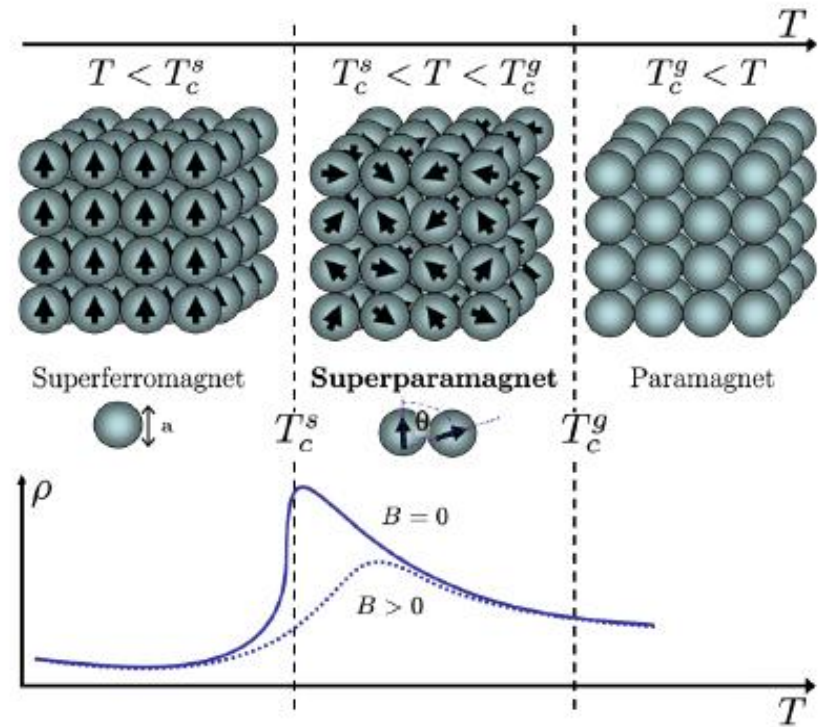
A. Rostamnejadi, et al., J Supercond Nov Magn (2012) 25:1123



superferromagnetism



J. Phys. D: Appl. Phys. 42 (2009) 013001.



PRL 99 (2007) 066602.

روشهای تجربی تمایز بین ابرپارامغناطیس و ابرشیشه اسپینی

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right)$$

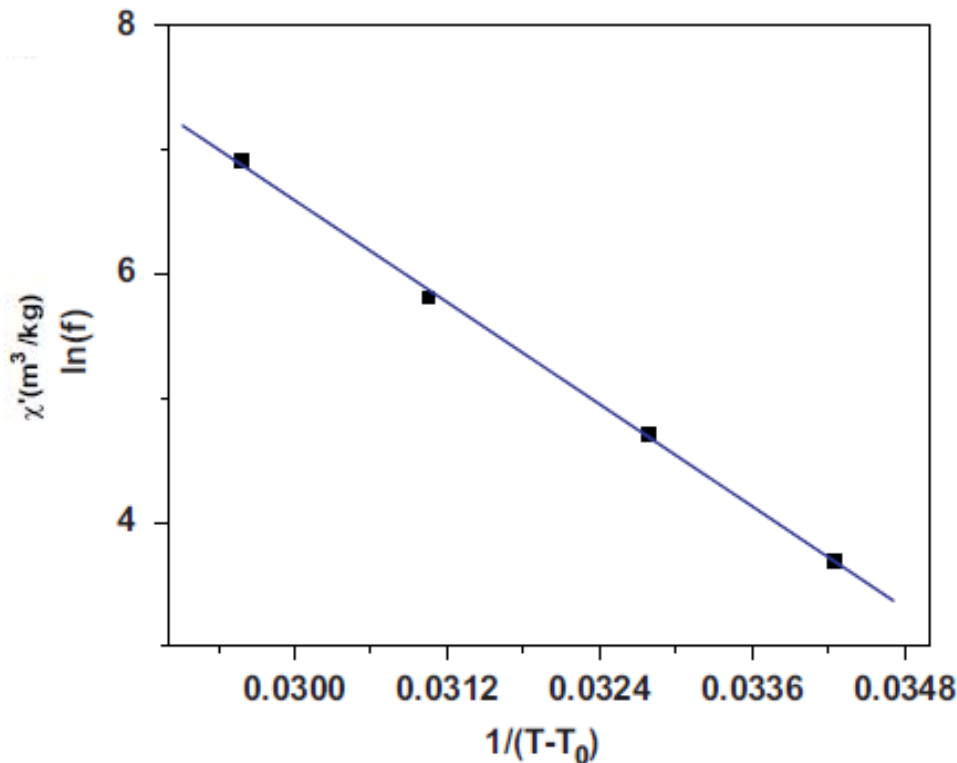
Neel-Brown model : Non-interacting nanoparticles

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{k_B (T - T_0)}\right)$$

Vogel- Fulcher model: Interacting nanoparticles

$$\tau_0 \approx 10^{-9} - 10^{-13} \text{ s}$$

Attempt frequency



Anisotropy energy $E_a \approx k_u V \approx k_B T$

Magnetic anisotropy constant

$$k_u = 2.25 \times 10^4 \text{ erg/cm}^3$$

$$= 2.25 \times 10^3 \text{ J/m}^3$$

for LSMO single crystal

$$1.8 \times 10^4 \text{ erg/cm}^3$$

Y. Suzuki, et al , J. Appl. Phys. 83 (1998) 7064

Critical slowing down model Interacting nanoparticles: superspin glass

$$\xi \propto \varepsilon^{-\nu}$$

Coherence length

$$\tau \propto \xi^z$$

$$\tau = \tau_0 [(T - T_g) / T_g]^{-z\nu}$$

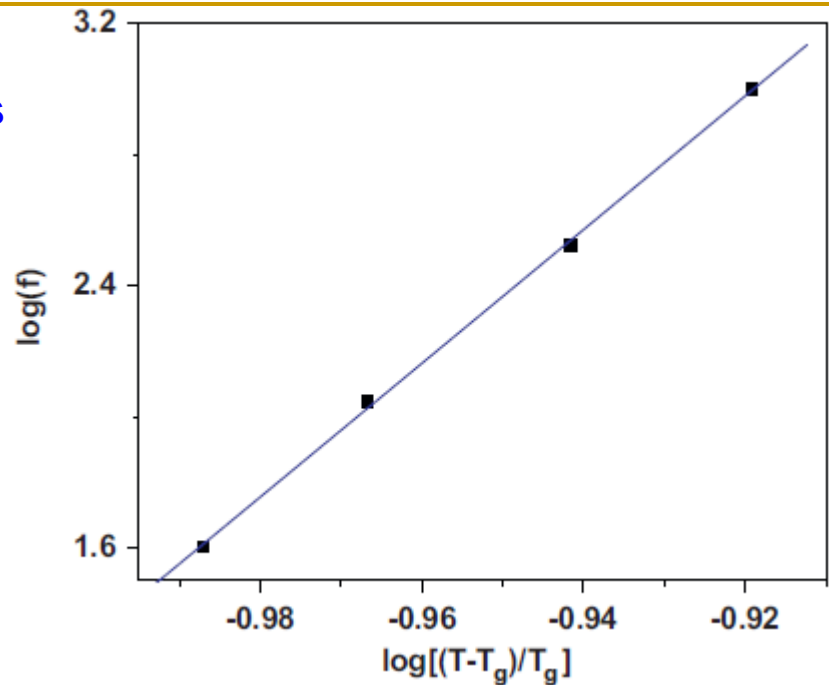
$$z\nu = 4 - 13$$

c1 and c2 parameters

$c_1 = \frac{\Delta T_f}{T_f \Delta(\log_{10} f)}$	$c_2 = \frac{T_f - T_0}{T_f}$
--	-------------------------------

ΔT_f is the difference between
 T_f measured at the $\Delta(\log_{10} f)$

$c_1 \sim 0.1$	$c_2 \sim 1$	non-interacting Superparamagnetic
$c_1 \sim 0.001$	$c_2 \sim 0.01$	strongly interacting superspin glass



$$\tau_0 = 1.78 \times 10^{-22} \text{ s and } z\nu = 20.4$$

In our case

$$c_1 = 0.0112$$

$$c_2 = 0.107$$

Interacting

superparamagneti

c behavior

Experimental techniques for study of magnetic nanoparticles: ac magnetic susceptibility
Phenomenological models¹

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{k_B T}\right)$$

Neel-Brown model : Non-interacting superparamagnetic nanoparticles

$$\tau = \tau_0 \exp\left(\frac{E_a}{k_B (T - T_0)}\right)$$

Vogel Fulcher: Interacting superparamagnetic nanoparticles

$$\tau_0 \approx 10^{-9} - 10^{-13} \text{ s}$$

Attempt frequency of relaxation of nanoparticles

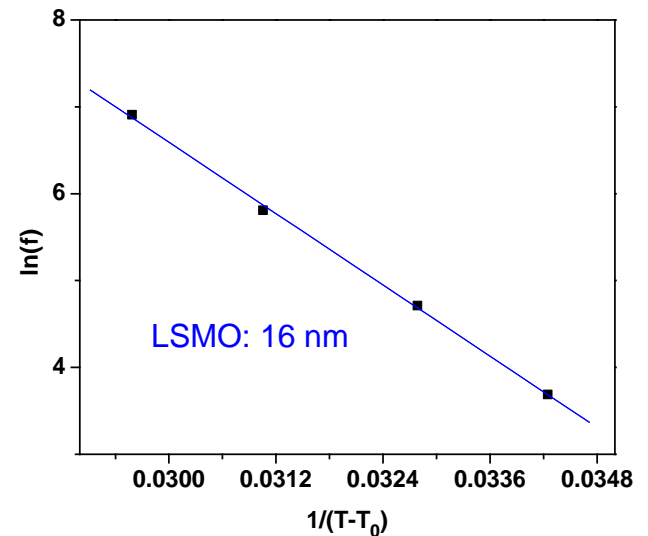
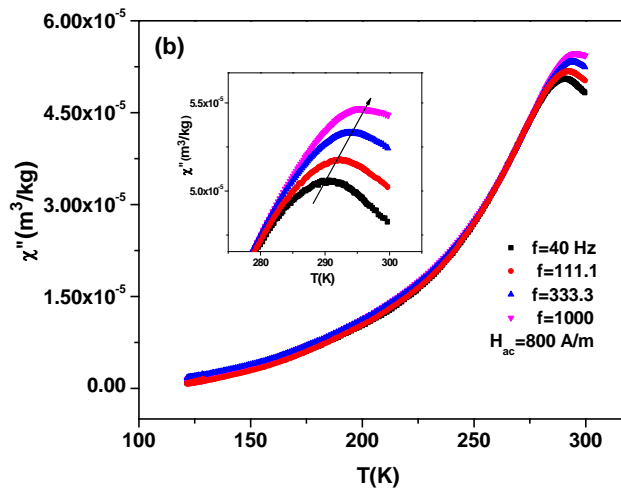
Anisotropy energy

$$E_a \approx k_u V \approx k_B T$$

$$k_u = 2.25 \times 10^4 \text{ erg/cm}^3$$

Magnetic anisotropy constant

for single crystal of LSMO²
is $1.8 \times 10^4 \text{ erg/cm}^3$



1_Adv. Chem. Phys. 98,(1997) 283.

2-J. Appl. Phys. 83 (1998) 7064

J Magn. Magn. Mater. 2009 (in press)

Critical slowing down model Interacting nanoparticles: super spin glass

$$\xi \propto \varepsilon^{-\nu}$$

Coherence length

$$\tau \propto \xi^z$$

$$\tau = \tau_0 \left[\frac{(T - T_g)}{T_g} \right]^{-z\nu}$$

$$z\nu = 4 - 13$$

parameters c1 and c2

$c_1 = \frac{\Delta T_f}{T_f \Delta(\log_{10} f)}$	$c_2 = \frac{T_f - T_0}{T_f}$
--	-------------------------------

ΔT_f is the difference between T_f measured at the $\Delta(\log_{10} f)$

$c_1 \sim 0.1$	$c_2 \sim 1$	non-interacting Superparamagnetic
$c_1 \sim 0.001$	$c_2 \sim 0.01$	strongly interacting superspin glass

J. Magn. Magn. Mater. 203 (1999) 23
PRB,74 (2006) 045330

Cole –Cole analysis for a monodisperse SPM ensemble in zero-field with a random distribution of anisotropy axis directions

$$\chi'(\omega) = \mu_0 \frac{M_s^2}{3K} \left[1 + \frac{KV}{k_B T} \frac{1}{1 + (\omega\tau)^2} \right], \quad (7)$$

$$\chi''(\omega) = \mu_0 \frac{M_s^2}{3} \frac{V}{k_B T} \frac{\omega\tau}{1 + (\omega\tau)^2}, \quad (8)$$

where M_s is the saturation value of the magnetization. Defining $\alpha \equiv \mu_0 M_s^2 / 3K$ and $\sigma \equiv KV / k_B T$ and eliminating ω , one gets

$$\chi'' = \sqrt{\left(\frac{\alpha\sigma}{2} \right)^2 - \left(\chi' - \frac{\alpha(2+\sigma)}{2} \right)^2}, \quad (9)$$

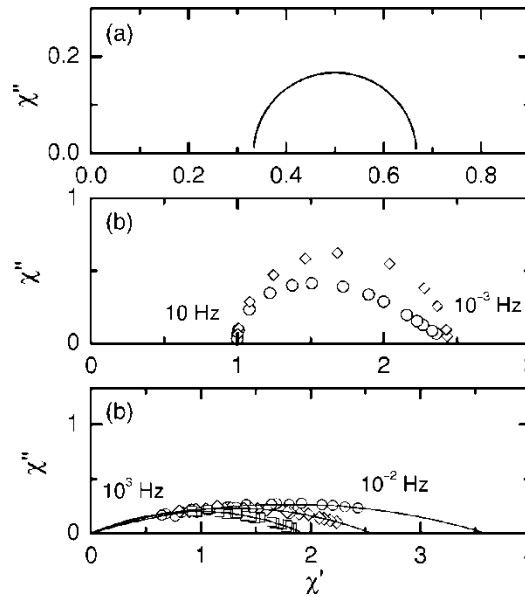
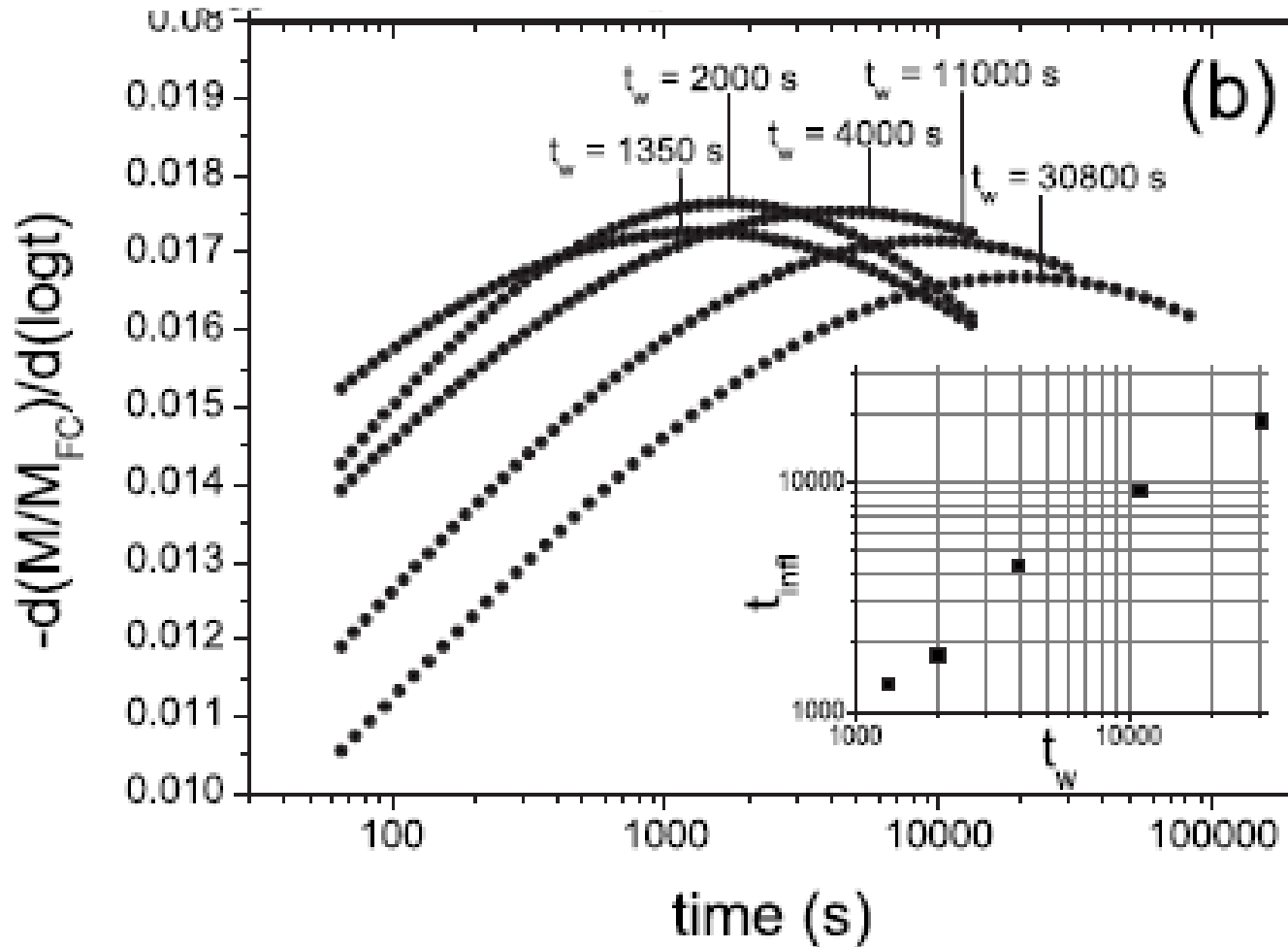


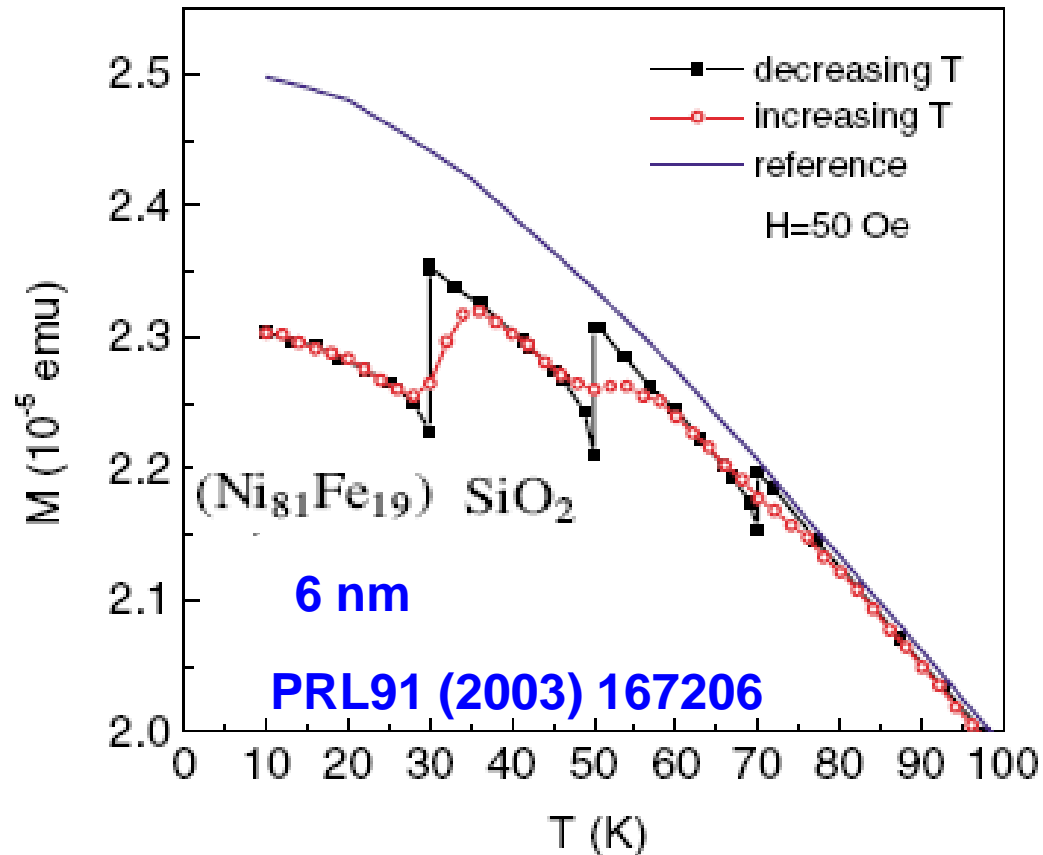
FIG. 1. Cole-Cole plots, χ'' vs χ' , (a) analytically obtained for a noninteracting monodisperse ensemble of SPM particles with $\mu_0 M_s^2 / 3K = 1$ and $KV / k_B T = 1$ (see text); (b) numerical result for a polydisperse ensemble with a log-normal distribution (circles) and a Maxwell distribution (diamonds) of particle volumes with $\mu_0 M_s^2 / 3K = 1$, $K / k_B T = 1$, $\tau_0 = 1$, $\Delta V = 0.9$, and $\langle V \rangle = 1$; and (c) shows experimentally obtained curves on the SSG system $[\text{CoFe}(0.9 \text{ nm})/\text{Al}_2\text{O}_3(3 \text{ nm})]_{10}$ at three different temperatures, $T = 50, 55$, and 60 K (Ref. 57). The particle sizes follow a Gaussian distribution with $\langle V \rangle = 11.5 \text{ nm}^3$ and $\Delta V = 0.95 \text{ nm}^3$. The frequency range is indicated in the figure.

PRB 70 (2004) 214432 & PRB, 56, (1997) 13984.

اثر صبر کردن Aging effect



Memory effect اثر حافظه ای



- دو منشا دینامیک آرام در نانوذرات ابرپارامغناطیس
- ۱- توزیع گسترده در زمان واهلش نانوذرات- ناشی از توزیع اندازه ذرات و یا انرژی ناهمسانگردی
 - ۲- برهمکنش قوی دوقطبی-دوقطبی در بین ذرات

نانوذرات پادفرومغناطیس
ایجاد فاز فرومغناطیسی در نانوذرات مواد پادفرومغناطیس

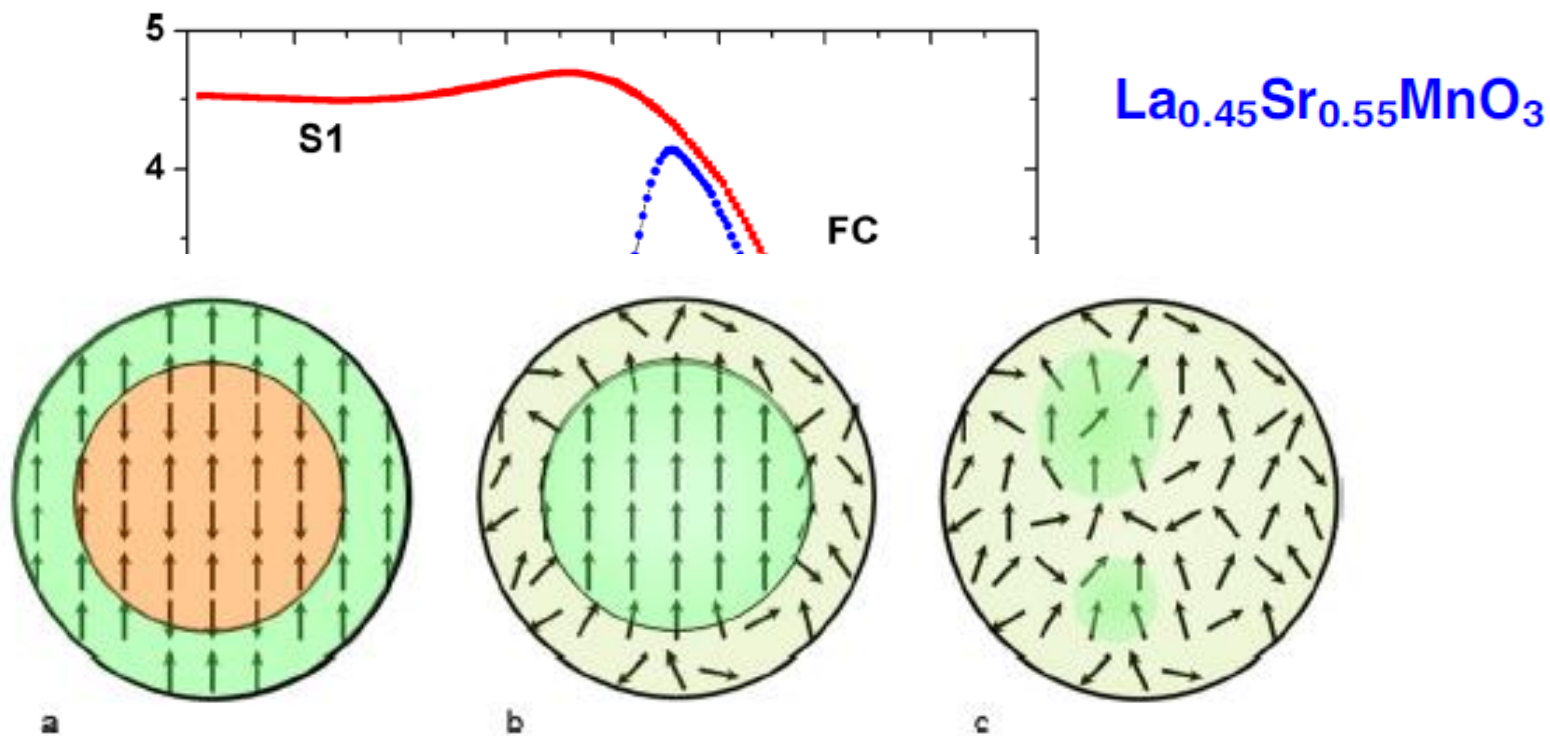


FIG. 7. (Color online) Model magnetic structures for AFM nanoparticles. a) AFM core, FM shell. b) FM core, canted shell. c) FM clusters embedded in a canted structure.

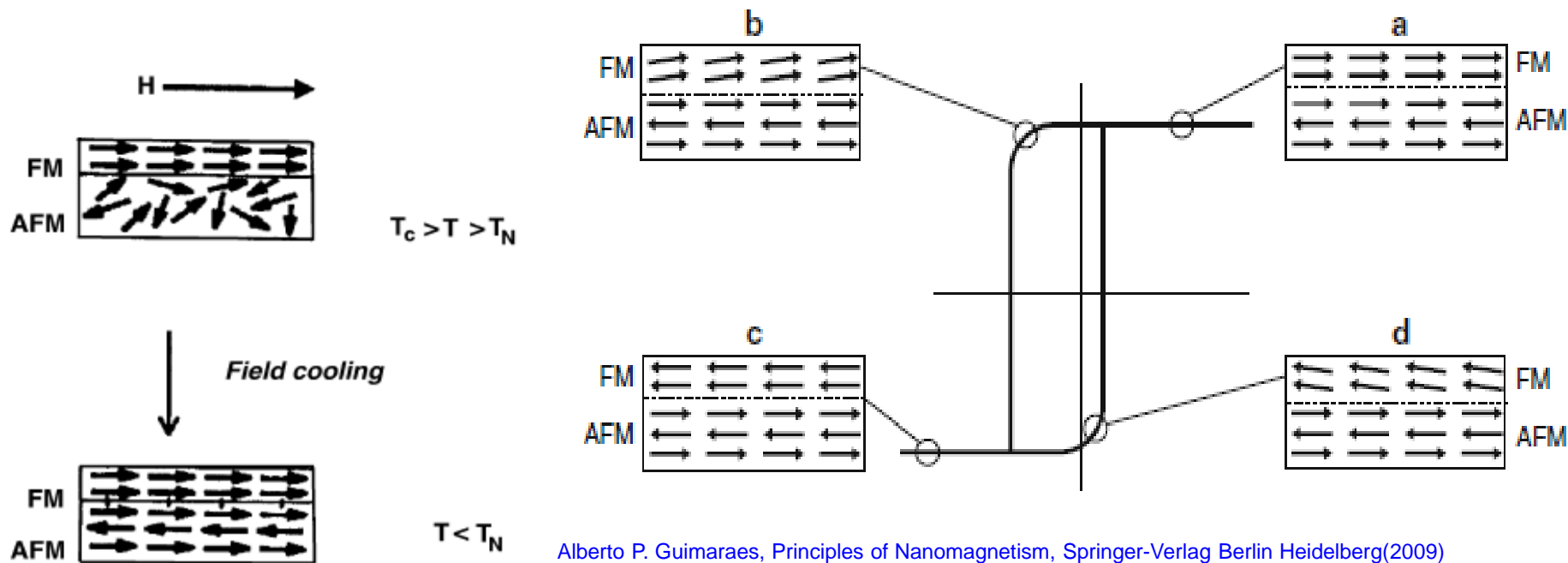
Exchange bias(EB) effect

EB is an interface effect in magnetic nanostructure.

FM/AFM, FM/SG, FI/AFM, AFM/SG, core-shell nanoparticles, phase separated manganites and ...

When a sample with a FM-AFM interface is cooled in a static magnetic field from above the ordering temperature of the AFM (T_N), the FM magnetization (M - H) loop shifts away from $H=0$. The magnitude of this shift is known as the exchange bias (HE).

An unidirectional anisotropy is caused by the magnetic interface interaction.



Thank you for your attention

