Estudo e Pesquisa em Física, Kansas State University, EUA

Atomic, molecular, optical physics (ion accelerators, attosecond lasers, high-harmonics, intense laser fields, Bose-Einstein condensation)

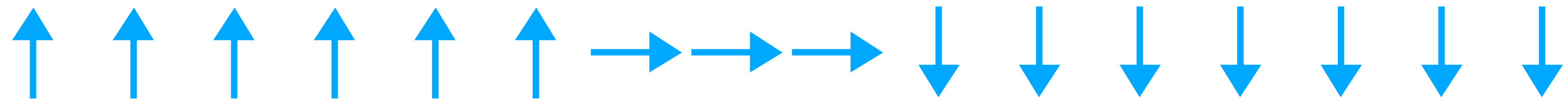
Condensed, soft and biological physics (magnetism, electromagnetics, polymers, colloids, proteins, nanoparticles, fractals, nanowires, self-organization, biophysics, cell physics)

Cosmology and particle physics (gravitation, dark matter, neutrinos, high energy accelerators, standard model)

Physics education research (teaching, problem solving, learning transfer)

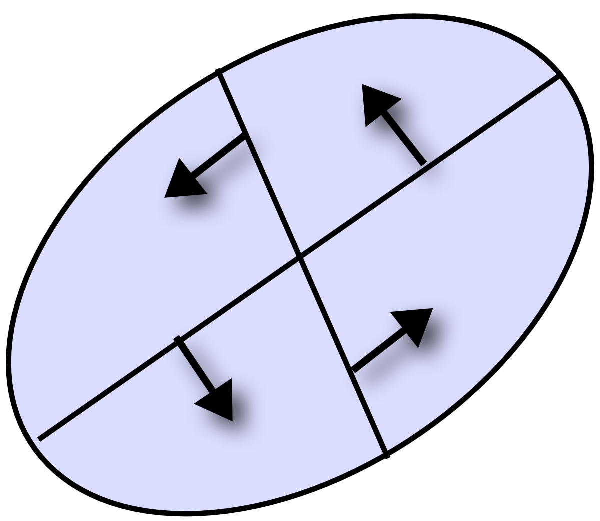
Estudo de graduação: www.phys.ksu.edu/undergraduate.html
Estudo de pós-graduação: www.phys.ksu.edu/graduate.html

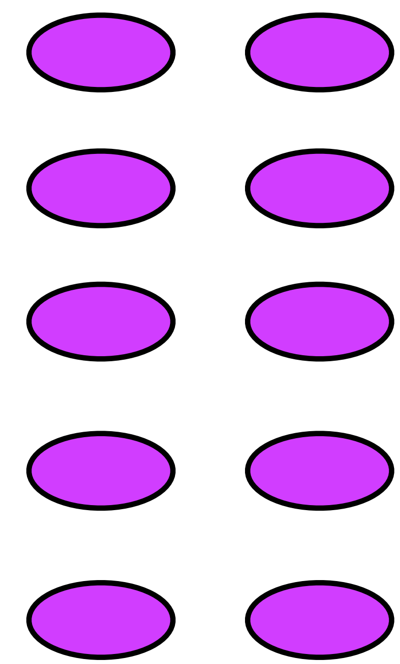
wysin@phys.ksu.edu www.phys.ksu.edu/personal/wysin



Energia e Dinâmica de Vórtices em Nanopontos Magnéticos

Universidade Federal de Santa Catarina
25 Maio, 2012





Gary Wysin
Kansas State University
Manhattan, Kansas, U.S.A.

wysin@phys.ksu.edu
www.phys.ksu.edu/personal/wysin

Agradecimentos:

UFSC - Física - Prof. Wagner Figueiredo

UFV - Física - Profs. Afrânio Pereira, Winder Moura-Melo

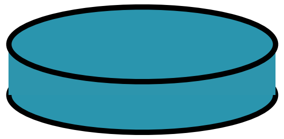
FAPEMIG - Bolsa de Pesquisador Visitante.

Kansas State University?

KSU


N
NEBRASKA
MISSOURI
CO.
OKLAHOMA
KANSAS
Norton
Phillipsburg
Belleville
Marysville
Atchison
Concordia
Leavenworth
Colby
Goodland
Manhattan
Topeka
Kansas City
Junction City
Olathe
WaKeeney
Abilene
Hays
Salina
Ottawa
Emporia
Scott City
McPherson
Great Bend
Garnett
Larned
Hutchinson
Newton
Garden City
Ft Scott
El Dorado
Chanute
Dodge City
Wichita
Pratt
Pittsburg
Neodesha
Sublette
Wellington
Winfield
Hugoton
Medicine Lodge
Coffeyville
Liberal
Arkansas City
©1997 MAGELLAN Geographix SM
(805) 685-3100 www.maps.com
0
40 mi

Nanopontos magnéticos



Aprox. 50 nm - 5 um, individuais & matrizes, feito de materiais magnéticos macios, crescidos com técnicas de epitaxia & litografia.

Podem ser ilhas em um substrato não-magnético. Formam matrizes de partículas que interagem.

Eles terão efeitos novos devido ao tamanho pequeno: (ondas de spin modificadas, efeitos de superfície, sensibilidade especial como detetores).

Dois estados principais:

(1) um domínio único; (2) um vórtice.

Nanopontos magnéticos: aplicações

☛ elementos de memoria, processamento de sinais

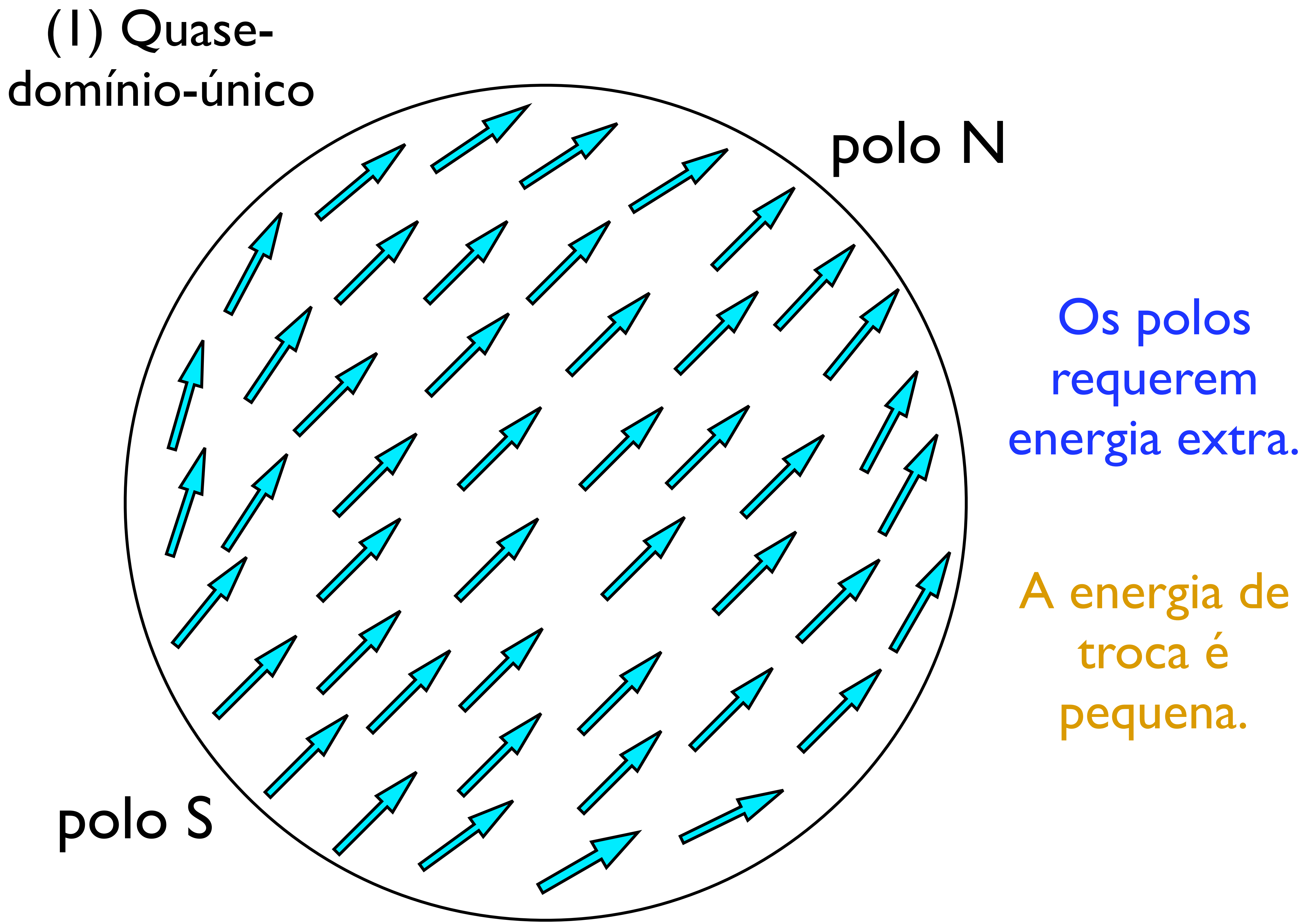
☛ armazenamento não volátil (magnetic ram)

☛ utilizar em sensores de magnetoresistência (GMR)

☛ integração dentro de spintronics (comutação entre estados via corrente de spin polarizada.)

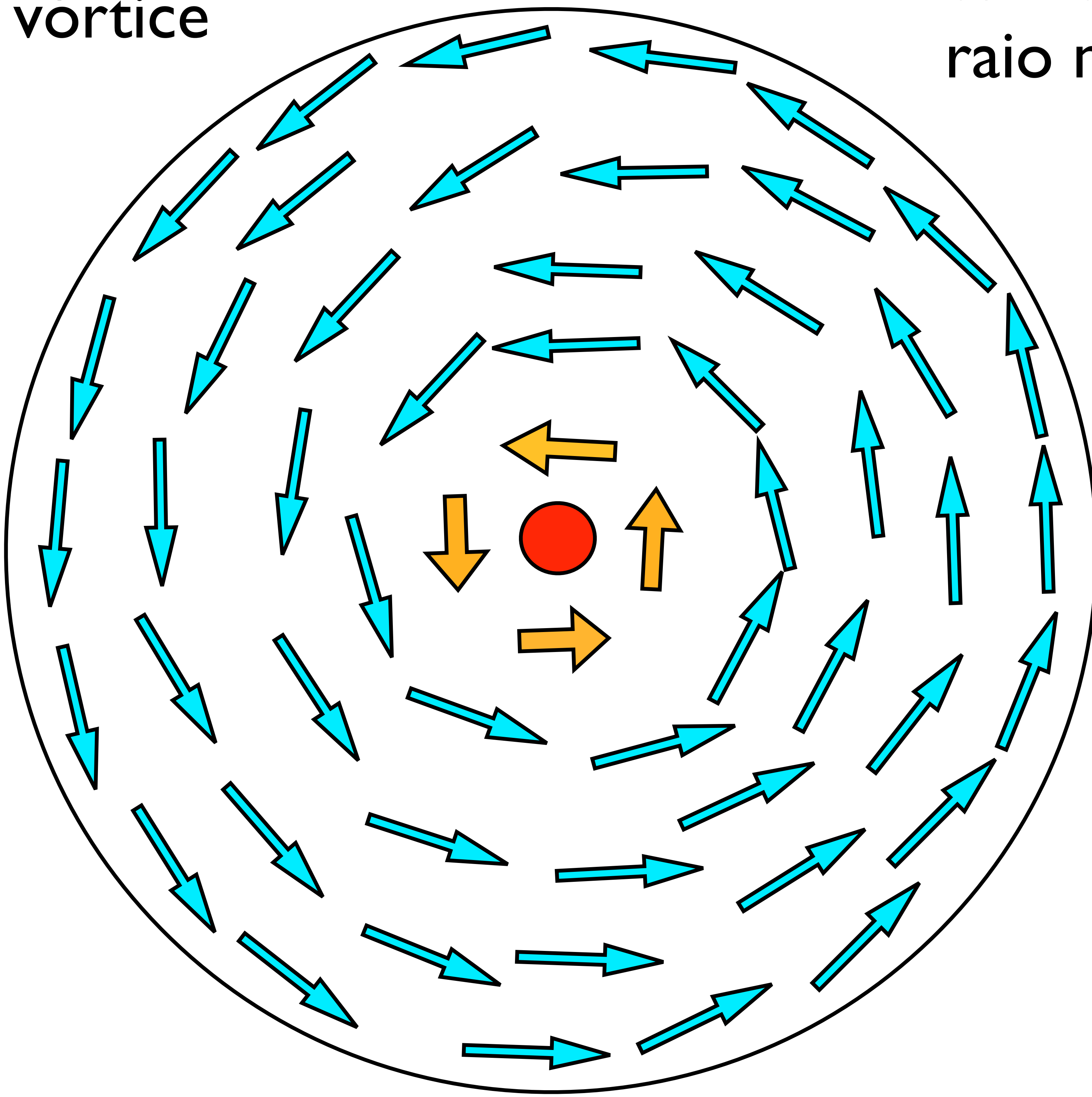
⊙ estado de um vórtice com pequeno campo externo.

Magnetização M num ponto circular



(2) Estado de um vórtice

Só estável acima de um raio mínimo



Só tem polos (±z) no núcleo.
A energia deles é pequena.

Agora a energia de troca aumentou.

Estados de um vórtice.

A. Energia & Potencial E(X)?

$X=(x_v,y_v)$=posição do centro do vórtice.

B. Dinâmica e frequencia ω_G do movimento girotrópico?

$V=(V_x,V_y)$=velocidade do centro do vórtice.

Como estudar as propriedades dos vórtices magnéticos dentro de um nanoponto cilíndrico?

Definir as energias magnéticas num disco de Permalloy, como funções da magnetização M.

Olhar vórtices como partículas com cargas, transições entre estados internos, objetos para guardar dados, e com dinâmica X(t) interessante.

Energia ⇒ potencial E(X), utilizando vínculos de Lagrange.

Energia ⇒ a dinâmica M(t), via uma equação de Langevin.

Resultados: Estabilidade, movimento girotrópico, a frequencia como função da geometria, etc.

Magnetic Vortex Core Observation in Circular Dots of Permalloy

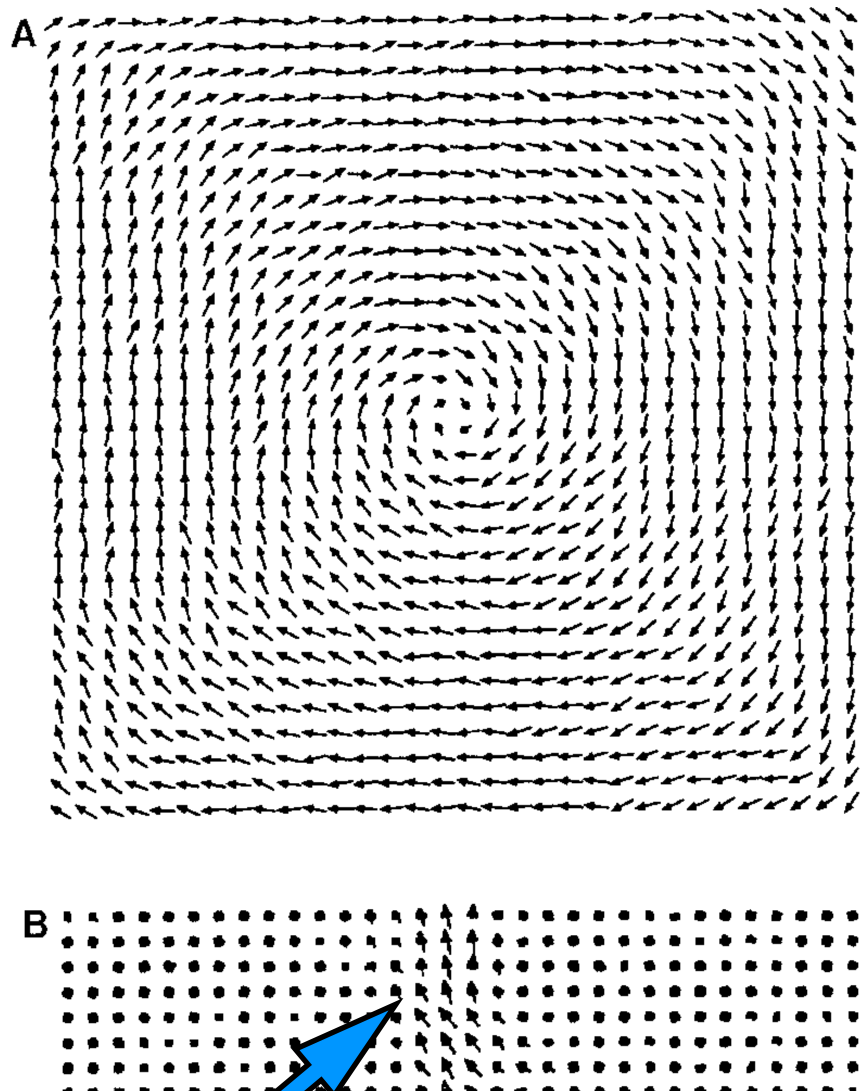
T. Shinjo,[1*] T. Okuno,[1] R. Hassdorf,[1†] K. Shigeto,[1] T. Ono[2]

930 11 AUGUST 2000 VOL 289 SCIENCE www.sciencemag.org

Os núcleos dos vórtices aparecem.

Fig. 1. Monte Carlo simulation for a ferromagnetic Heisenberg spin structure comprising 32 × 32 × 8 spins [courtesy of Ohshima *et al.* (*2*)]. (**A**) Top surface layer. (**B**) Cross-section view through the center. Beside the center, the spins are oriented almost perpendicular to the drawing plane, jutting out of the plane to the right and into the plane to the left, respectively. These figures represent snapshots of the fluctuating spin structure and are therefore not symmetric with respect to the center. The structure should become symmetric by time averaging.

M(r)



$M_z \approx \pm M_s$ no núcleo

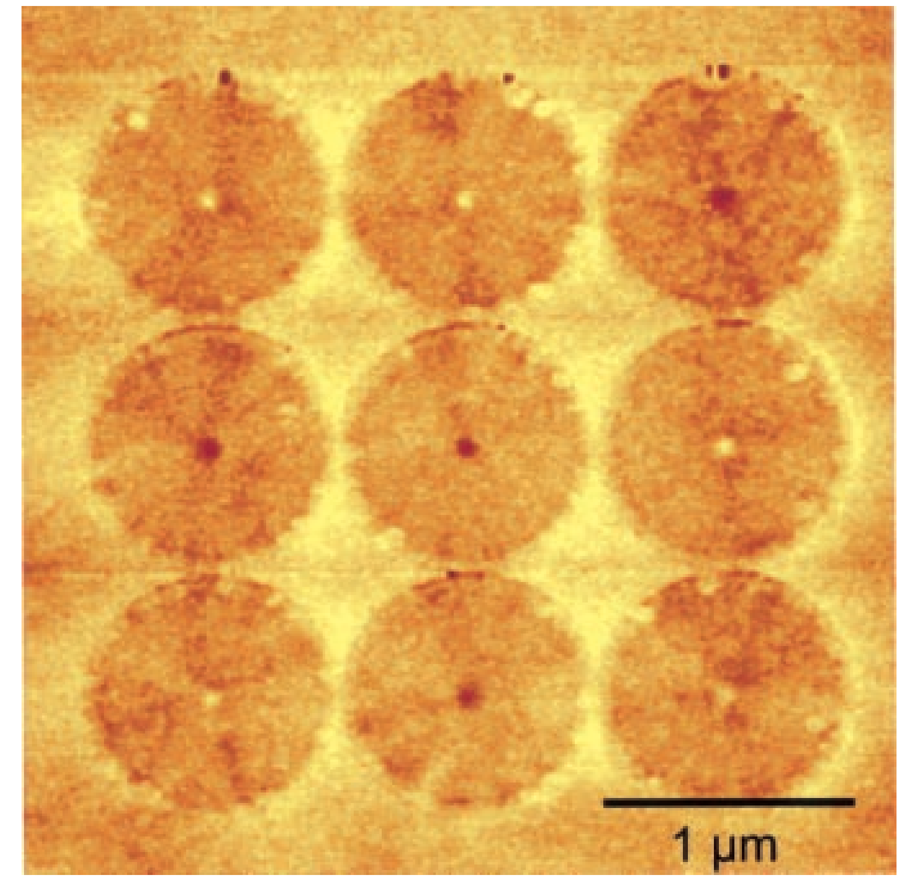


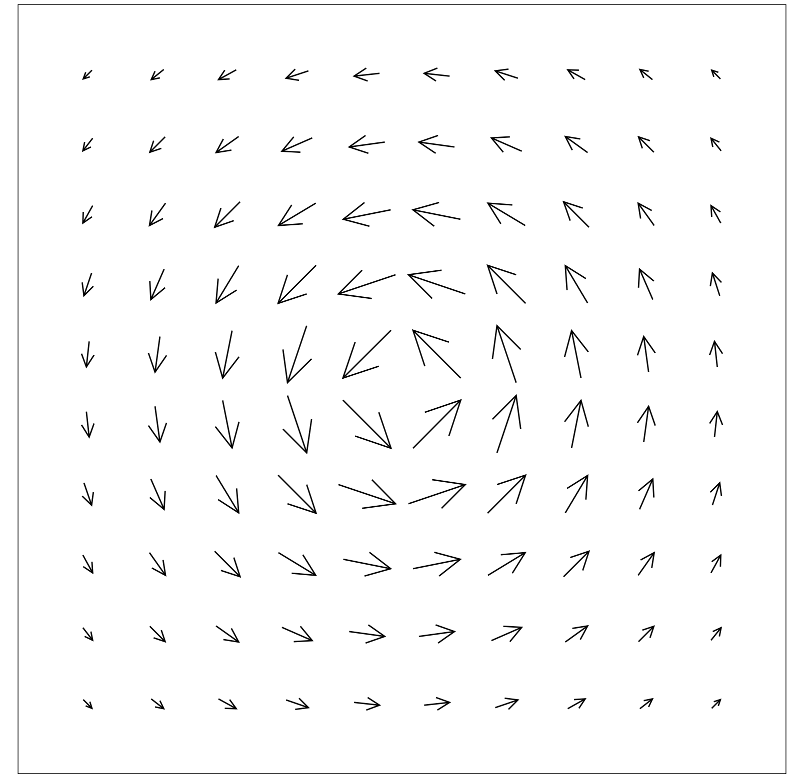
Fig. 2. MFM image of an array of permalloy dots 1 µm in diameter and 50 nm thick.

Podemos ver +/- Mz = polarização do núcleo!

Vórtices: Propriedades como partículas

"a carga de vorticidade"

$$q = \frac{1}{2\pi}\oint \vec{\nabla}\phi \cdot d\vec{r} = 0, \pm 1$$



M(r)

circulação ou *curling*

$-1 \leq C \leq +1$

$$C = \frac{1}{N}\sum_i \hat{\sigma}_i \cdot \hat{\phi}_i \qquad \hat{\sigma}_i = \vec{\mu}_i/\mu.$$

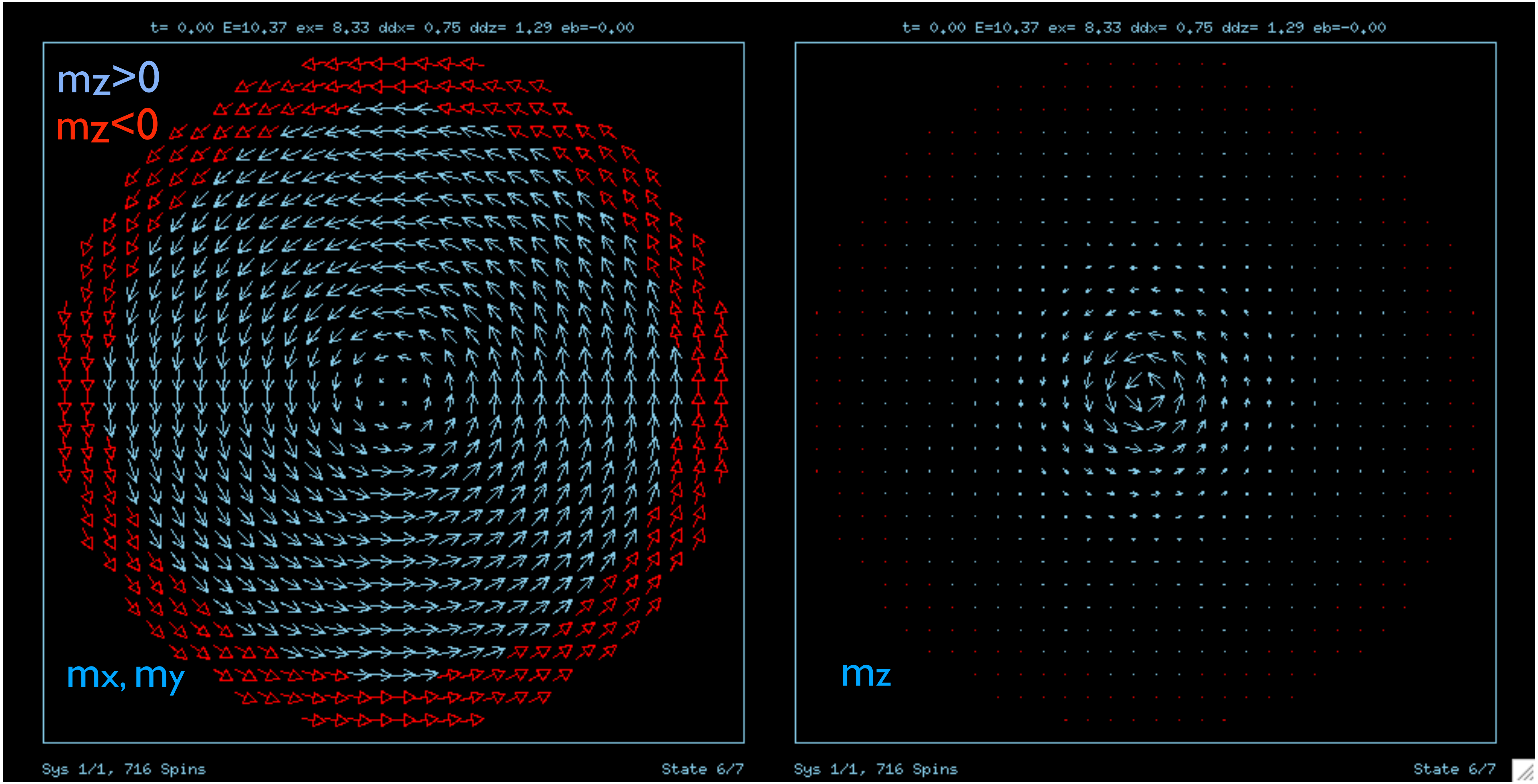
polarização

$p = m_z = \pm 1$ no núcleo

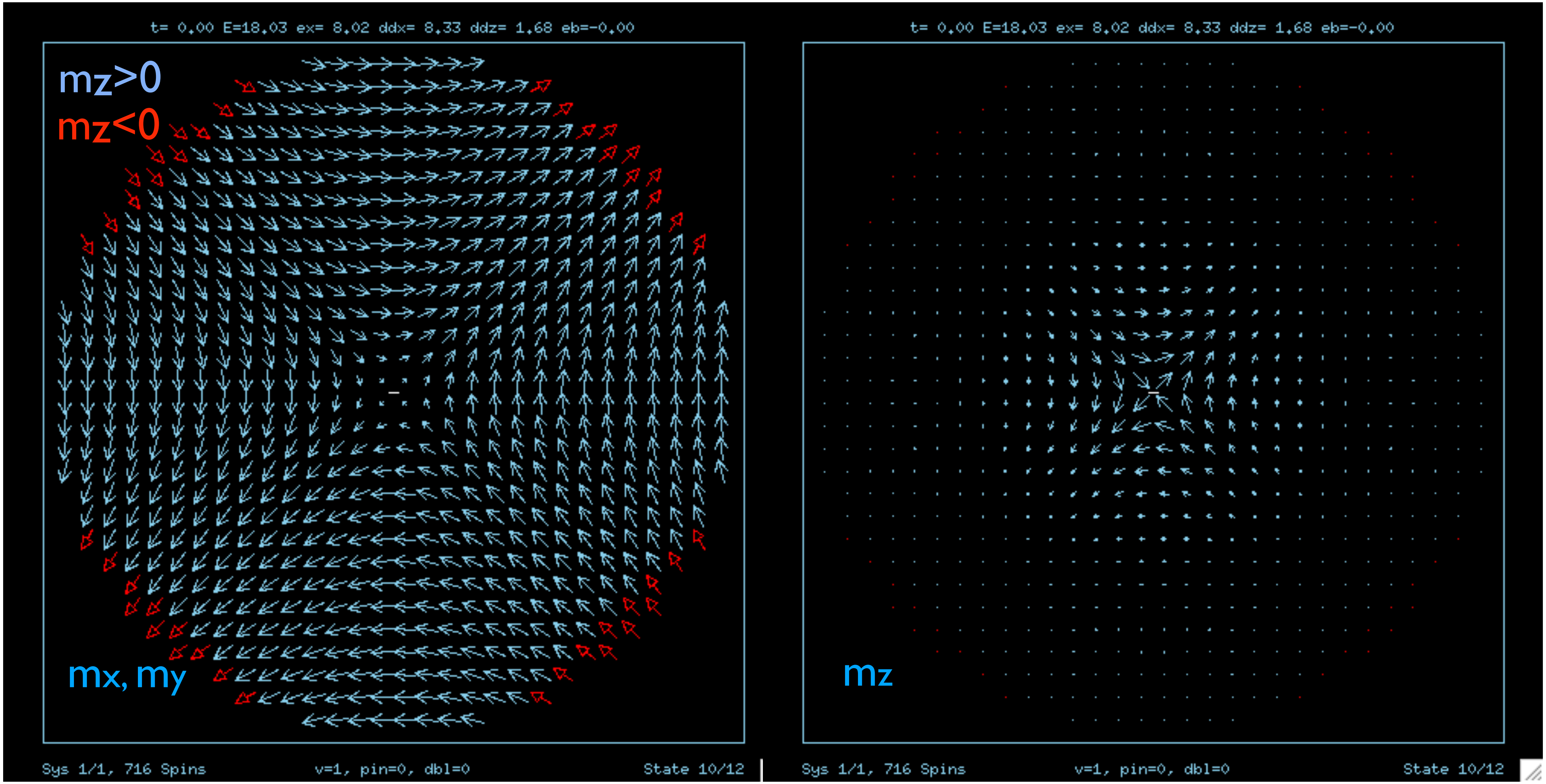
"carga topológica = girovetor"

$G = 2\pi pq =$ ângulo sólido mapeado por todos os spins

Vórtice, q=+1, p=+1
R=30nm, L=8nm



Anti-Vórtice, q=-1, p=+1
R=30nm, L=8nm



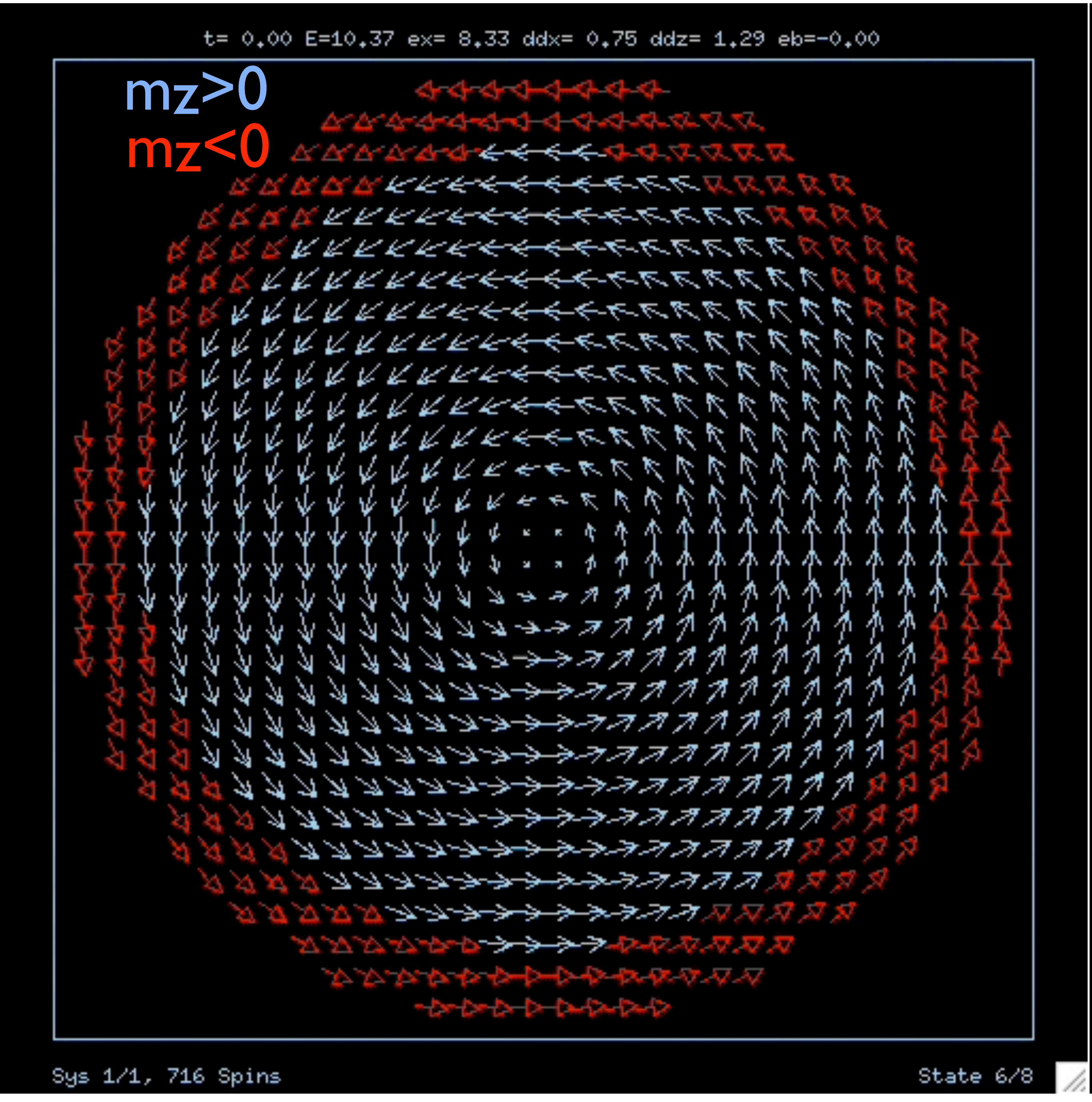
(Não estável)

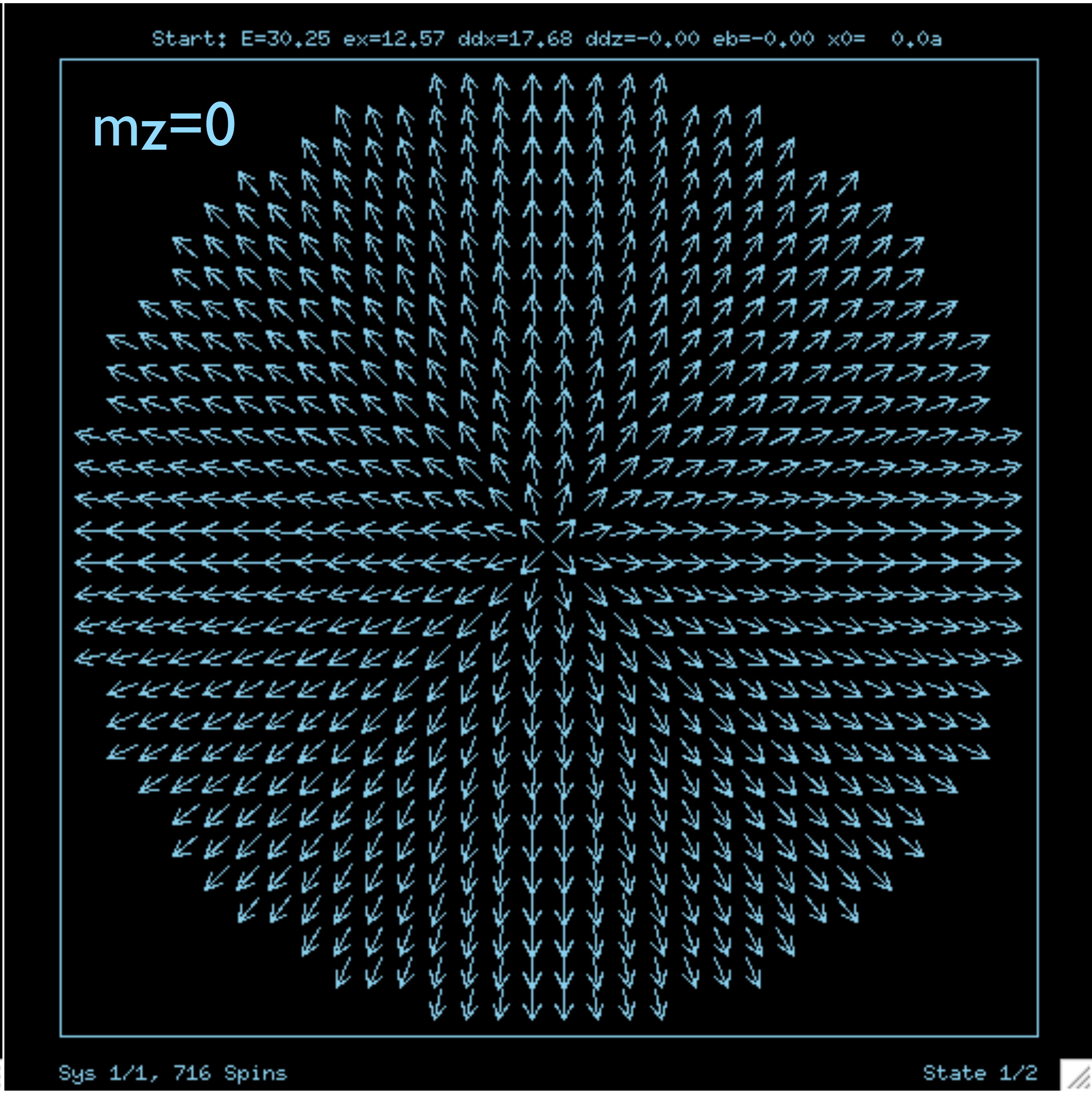
Bistabilidade usando as cargas?

mudança de C=+1/-1

a vorticidade q=+1 não muda.
a energia E=10.37 não muda.

estado (não-estavel) de
um vórtice planar: E=30.25

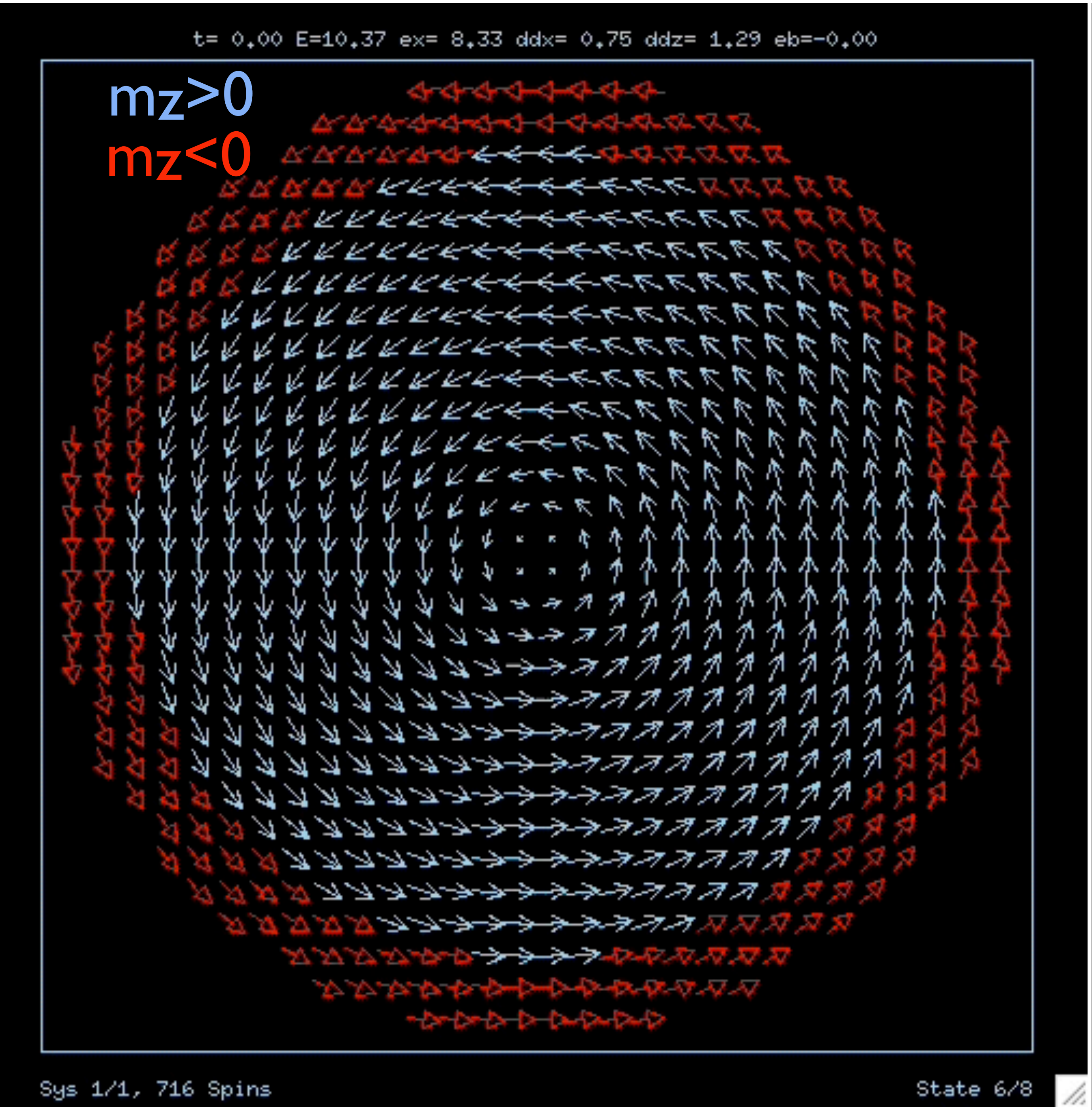




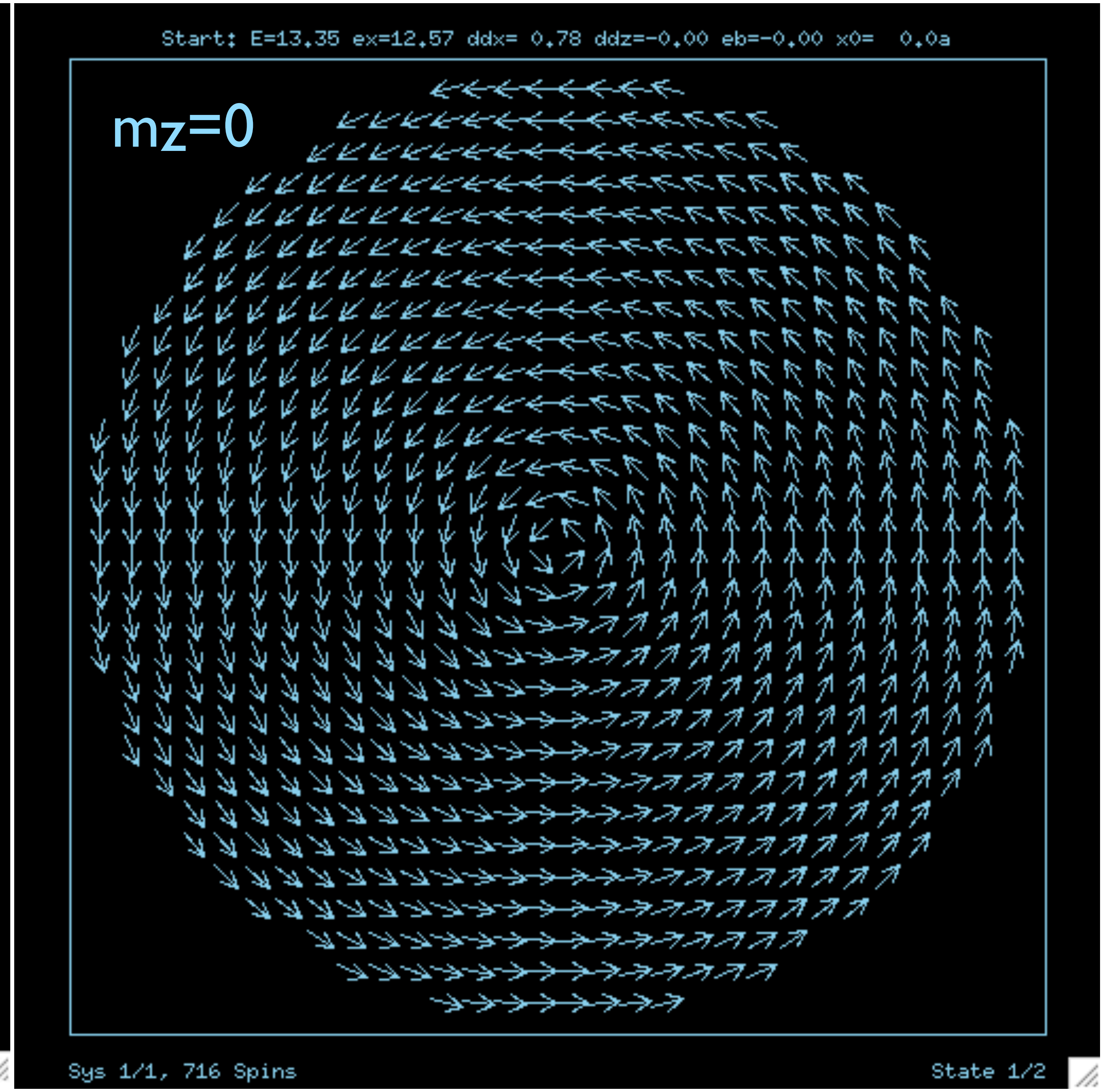
Bistabilidade usando as cargas?

mudança de p=+1/-1

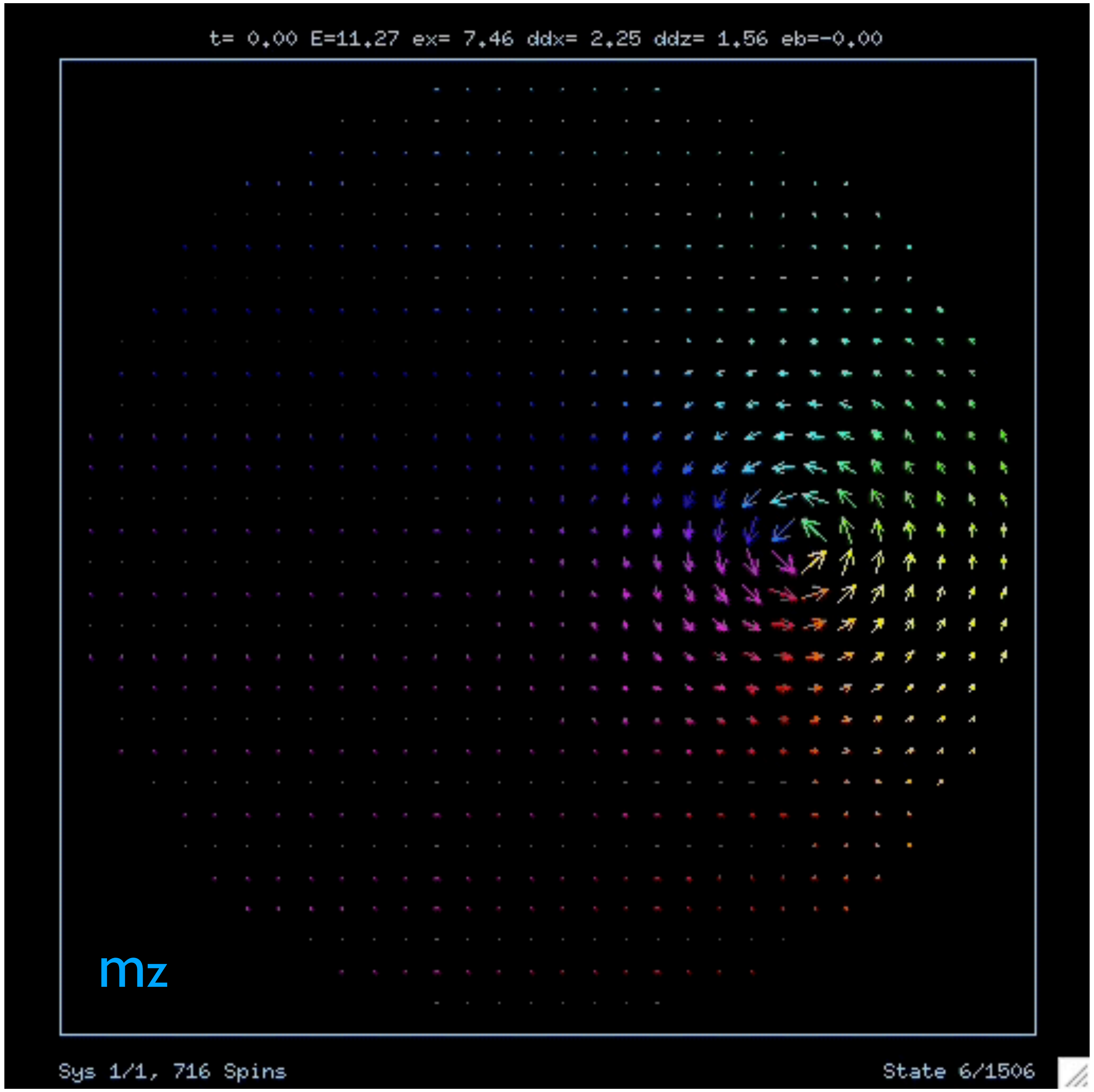
a vorticidade q=+1 não muda.
a energia E=10.37 não muda.



estado (não-estavel) de um vórtice planar: E=13.35



O movimento girotrópico



R=30 nm,
L=10 nm,
células a=2.0 nm

Vórtice,
q=+1, p=+1

As setas
têm tamanho
proporcional a Mz,
fora do plano.

Teoria microscópica. Modelo de dipolos atómicos.

Hamiltoniano: $\boxed{H = H_{ex} + H_{dd} + H_B}$

$$\boxed{\mu_{\text{atom}} = g\mu_B S_i}$$

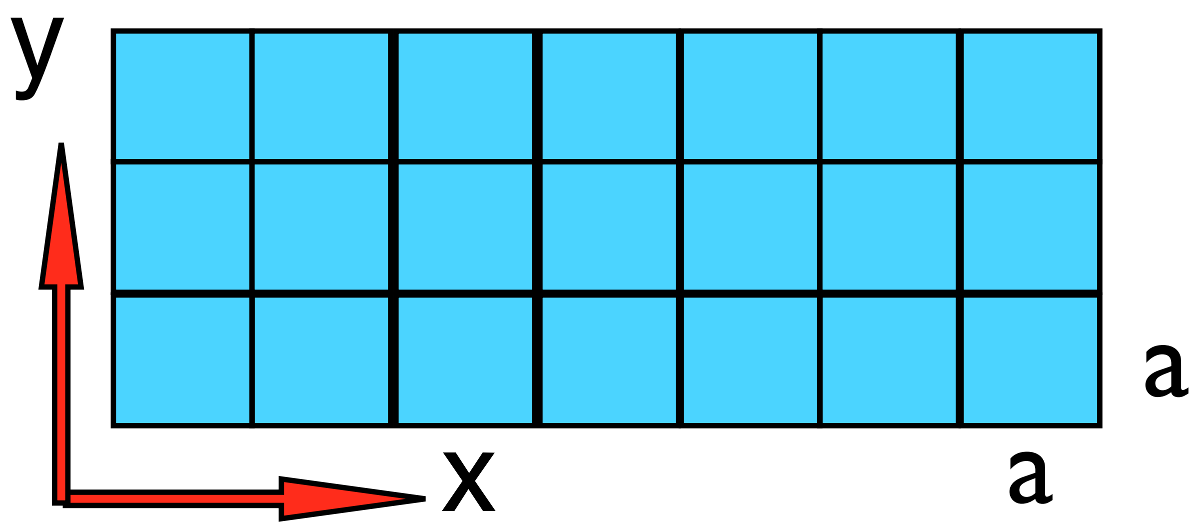
troca:
$$H_{\text{ex}} = -J \sum_{(i,j)} \vec{S}_i \cdot \vec{S}_j$$

dipolar:
$$H_{\text{dd}} = -\left(\frac{\mu_0}{4\pi}\right) \sum_{i>j} \frac{[3(\vec{\mu}_i \cdot \hat{r}_{ij})(\vec{\mu}_j \cdot \hat{r}_{ij}) - \vec{\mu}_i \cdot \vec{\mu}_j]}{r_{ij}^3},$$

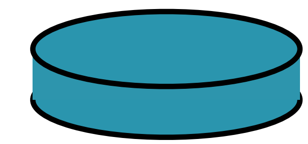
campo externo:
$$H_{\text{B}} = -\sum_i \vec{B} \cdot \vec{\mu}_i$$

Problema: Átomos demais para calcular um nanodisco típico.

Micromagnetismo. Uma técnica para estudar um sistema contínuo.



Cada célula tem um dipolo: $\hat{m} = \vec{M}/M_S$.



- Modelo para um nanoponto cilíndrico, raio R, altura L.

- Divide-se a amostra em células de tamanho a x a x L.

- Assume-se que a magnetização é saturada (M_S) dentro de cada célula: |m|=1. Só as direções variam entre células.

- As células interagem como dipolos, com energia de troca entre vizinhos & com o campo de desmagnetização.

Hamiltoniano: $\boxed{H = H_{ex} + H_{demag} + H_B}$

troca: $$\mathcal{H}_{\mathrm{ex}} = A \int dV \ \nabla \hat{m} \cdot \nabla \hat{m},$$

desmagnetização: $$\mathcal{H}_{\mathrm{dd}} = \mathcal{H}_{\mathrm{demag}} = -\frac{1}{2}\mu_0 \int \ dV \ \vec{H}_M \cdot \vec{M}$$

campo externo: $$\mathcal{H}_B = -\mu_0 \int \ dV \ \vec{H}_{\mathrm{ext}} \cdot \vec{M}$$

Estática: minimizamos a energia $\Rightarrow$ configurações estáveis.

Dinâmica: equação de movimento $\Rightarrow$ configs. periódicas.

Dificuldades: (i) Cálculo do campo de desmagnetização H_M

(ii) Exige uma posição determinada, X, do vórtice$\Rightarrow$E(X).

A escala de energia é baseada na energia de troca

$$J_{\text{cell}} = \frac{2Av_{\text{cell}}}{a^2} = 2AL.$$

"comprimento de troca"

$$\lambda_{\text{ex}} = \sqrt{\frac{2A}{\mu_0 M_S^2}}$$

campo desmag.:
$\vec{H}_M = M_S \tilde{H}_M$

Hamiltoniano micromagnético:

$$\mathcal{H}_{\text{mm}} = -J_{\text{cell}} \left\{ \sum_{(i,j)} \hat{m}_i \cdot \hat{m}_j + \left(\frac{a}{\lambda_{\text{ex}}}\right)^2 \sum_i \left(\tilde{H}_{\text{ext}} + \frac{1}{2}\tilde{H}_M \right) \cdot \hat{m}_i \right\}$$

$\left(\frac{a}{\lambda_{\text{ex}}}\right)^2$ deve ser menor que 1 para soluções confiáveis.

(células menores do que o comprimento da troca)

(i) Campo de desmagnetização $H_M \Leftarrow$ função de Green+FFT.

Magneto-estática sem correntes livres:

$$-\tilde{\nabla}^2\tilde{\Phi} = \tilde{\rho} \qquad \tilde{\rho} \equiv -\tilde{\nabla}\cdot\hat{m} \qquad \tilde{H}_M = -\tilde{\nabla}\tilde{\Phi}$$

Resolvemos utilizando a função de Green:

$$\tilde{\Phi}(\vec{r}) = \int d^3r' \; G(\vec{r},\vec{r}\,')\,\tilde{\rho}(\vec{r}\,') \qquad G(\vec{r},\vec{r}\,') = \frac{1}{4\pi|\vec{r}-\vec{r}\,'|}$$

caso de um cilíndro com L≪R -- geometria de 2D: $\tilde{r} \equiv (x,y)$

$$\tilde{H}_z(\tilde{r}) = \int d^2\tilde{r}\,' \; G_z(\tilde{r}-\tilde{r}\,')\; m_z(\tilde{r}\,')$$

$$\tilde{H}_{xy}(\tilde{r}) = \int d^2\tilde{r}\,' \; \vec{G}_{xy}(\tilde{r}-\tilde{r}\,')\; \tilde{\rho}(\tilde{r}\,')$$

$$G_z(\tilde{r}) = \frac{1}{2\pi L}\left[\frac{1}{\sqrt{\tilde{r}^2+L^2}} - \frac{1}{|\tilde{r}|}\right]$$

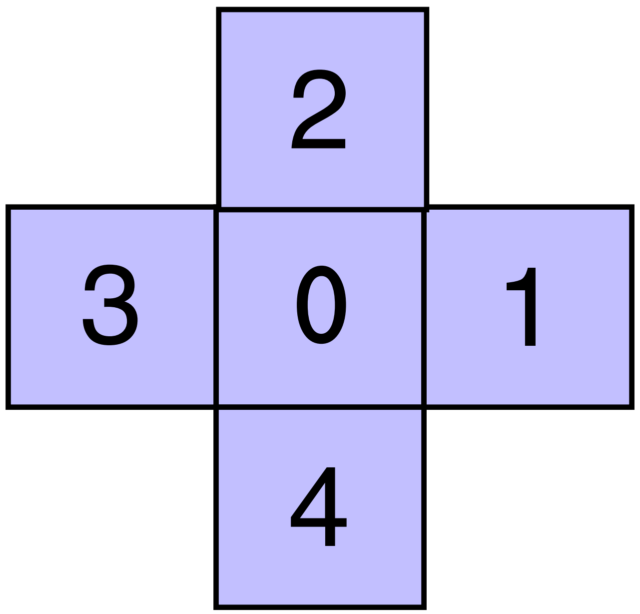
$$\vec{G}_{xy}(\tilde{r}) = \frac{1}{2\pi L}\left[\sqrt{1+\left(\frac{L}{\tilde{r}}\right)^2} - 1\right]\hat{e}_{\tilde{r}}$$

Alguns detalhes:

A densidade de cargas magnéticas depende da configuração atual, como:

$$\tilde{\rho}_0^{\mathrm{vol}} = \frac{q_M^{\mathrm{vol}}}{La^2} = -\frac{1}{2a}\left[m_1^x - m_3^x + m_2^y - m_4^y\right]$$

$$\tilde{\rho}_0^{\mathrm{sur}} = \frac{q_M^{\mathrm{sur}}}{La^2} = \sum_{\text{cell edges}} \frac{1}{2a}\hat{m}_0 \cdot \hat{n}_{\mathrm{edge}}$$



Integrais são avaliadas no espaço reciproco e utilizando a transformada rápida de Fourier (FFT) em 2D.

A rede para Green+FFT é 2X maior do que o sistema original, para evitar cópias periódicas.

Enfim, o campo de desmagnetização calculado será o campo de um único disco isolado.

(ii) Como minimizar a energia exigindo um local desejado para o vórtice? $\Rightarrow$ Técnica dos multiplicadores de Lagrange

Funcional da energia:

núcleo

$$\Lambda[\vec{m}_i] = E[\vec{m}_i] + \sum_i \alpha_i(\vec{m}_i^2 - m^2) - \vec{\lambda} \cdot \sum_n \vec{m}_n$$

hamiltoniano

comprimento desejado

local desejado

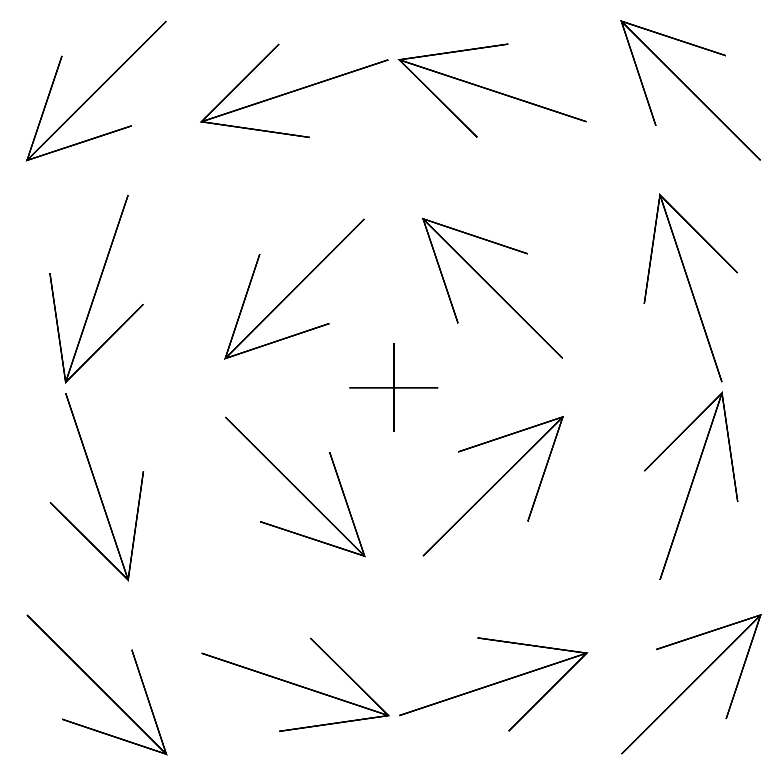
exige-se que esta soma seja igual a zero

$$\frac{\partial \Lambda}{\partial m_n^x} = \frac{\partial E}{\partial m_n^x} + 2\alpha_n m_n^x - \lambda_x = 0$$

$$-F_n^x + 2\alpha_n m_n^x - \lambda_x = 0$$

no núcleo:

$$m_n^x = \frac{1}{2\alpha_n}(F_n^x + \lambda_x)$$



o núcleo

Consegue-se os parametros indeterminados α eλ utilizando as restrições.

Iterações ...

$$\vec{m}_n^2 = \frac{1}{4\alpha_n^2}\left[(F_n^x+\lambda_x)^2+(F_n^y+\lambda_y)^2+(F_n^z)^2\right] = m^2$$

A. $$\boxed{\frac{1}{\alpha_n} = \frac{2m}{\sqrt{(F_n^x+\lambda_x)^2+(F_n^y+\lambda_y)^2+(F_n^z)^2}}}$$

(comprimentos desejados)

B. $$\sum_{\text{core}} m_n^x = \sum_{\text{core}} \frac{1}{2\alpha_n}(F_n^x+\lambda_x) = 0 \longrightarrow \boxed{\lambda_x = -\frac{\sum_{\text{core}} F_n^x/\alpha_n}{\sum_{\text{core}} 1/\alpha_n}}$$

(local do vórtice desejado)

Repete-se, apontando cada dipolo paralelo ao campo efetivo:

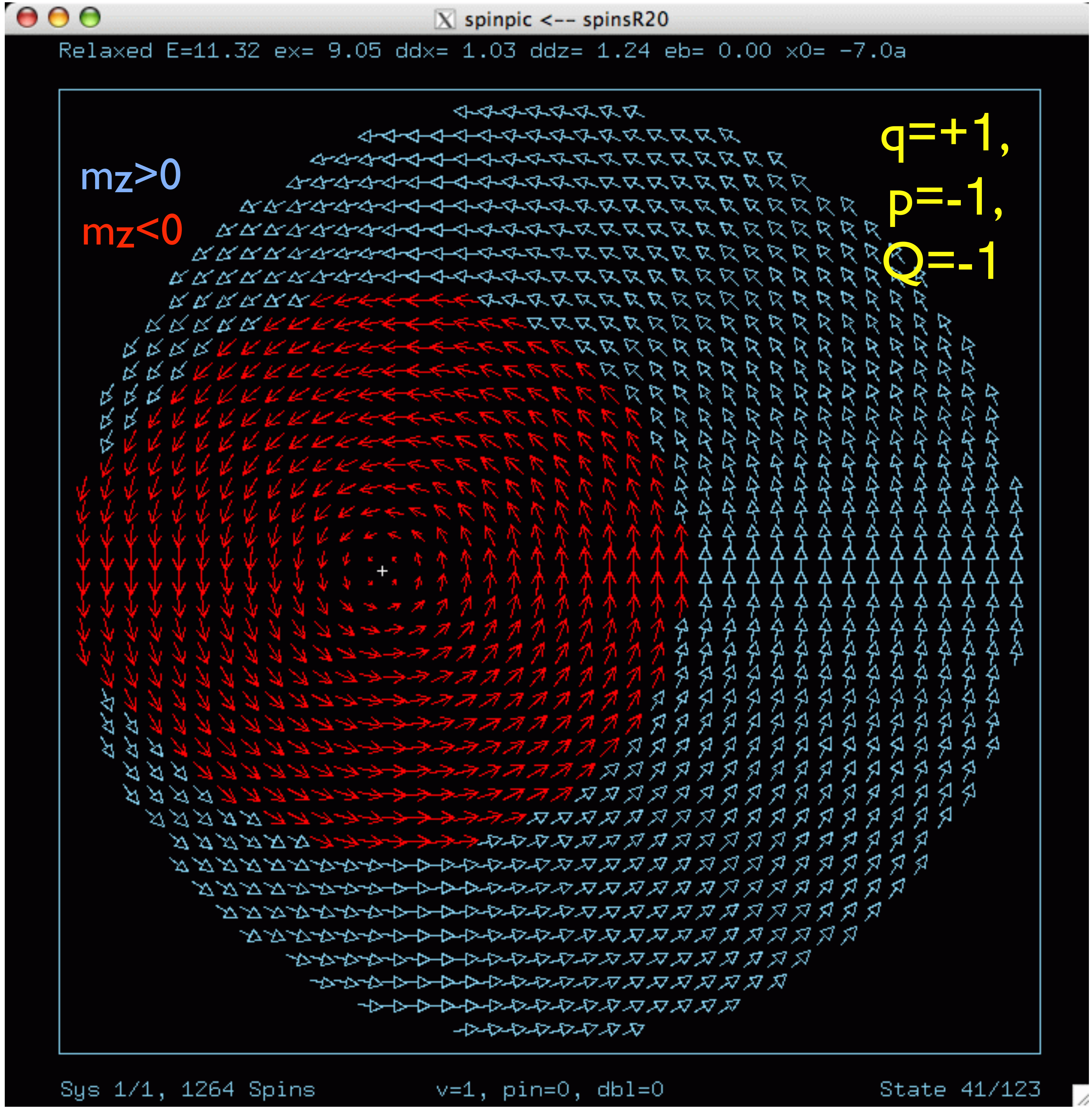
C. $$\boxed{\vec{m}_n = m\frac{(F_n^x+\lambda_x)\hat{x}+(F_n^y+\lambda_y)\hat{y}+F_n^z\hat{z}}{\sqrt{(F_n^x+\lambda_x)^2+(F_n^y+\lambda_y)^2+(F_n^z)^2}}}$$

(sem usar as equações da dinâmica de Landau-Lifshitz)

Exemplo. Configuração típica de um vórtice.

a=2.0 nm,
λ_{ex}=5.3 nm,
L=12 nm,
R=40 nm,

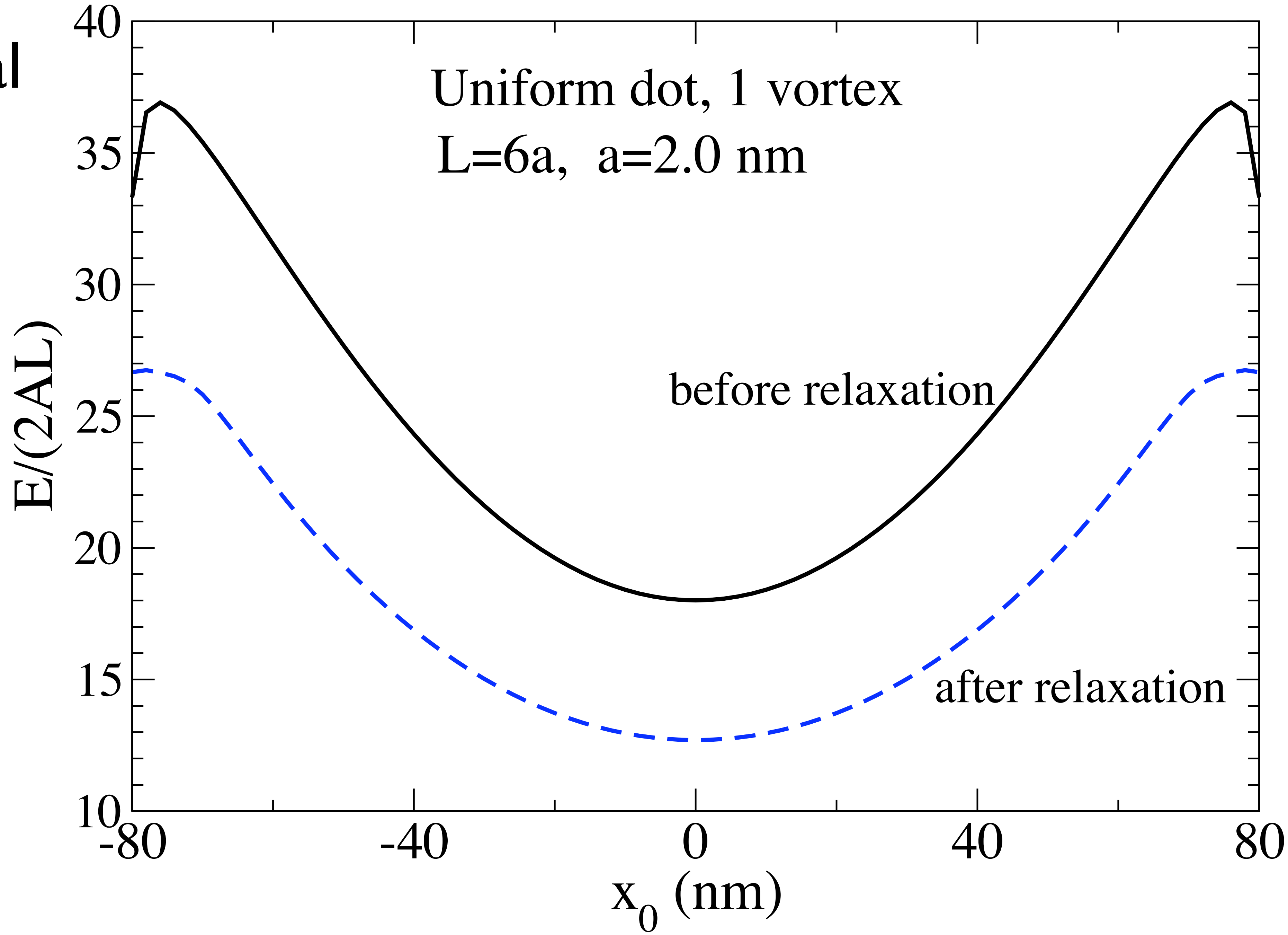
$\boxed{x_0=-7a}$



Exemplo. Energia total do vórtice, $E(x_0) \approx \frac{1}{2} k_F x_0^2$

$a = 2.0$ nm, $\lambda_{ex} = 5.3$ nm, $\boxed{L = 12 \text{ nm},}$ $R = 80$ nm

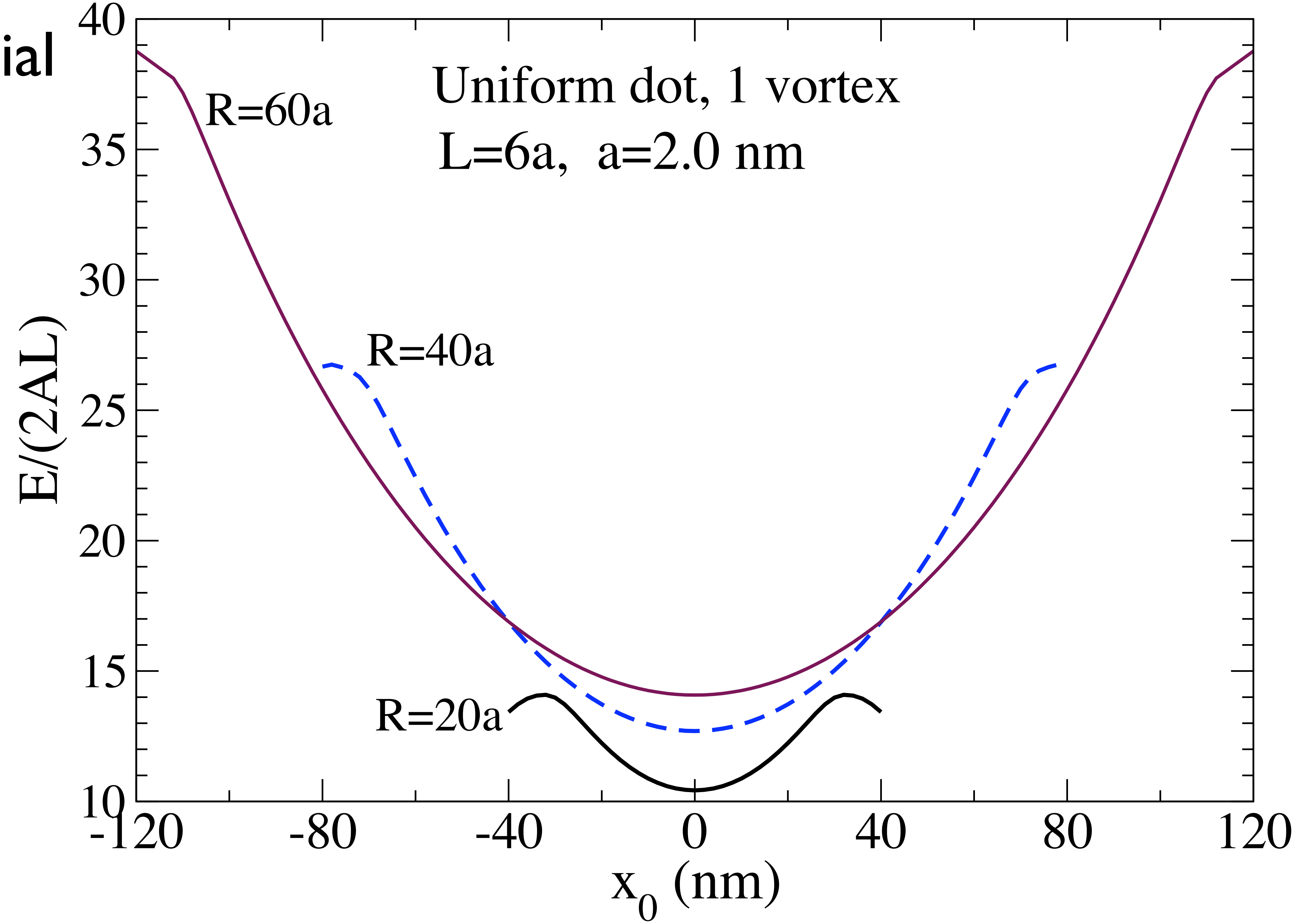
Potencial $E(x_0)$



Exemplo. Energia total do vórtice, $E(x_0) \approx \frac{1}{2} k_F x_0^2$

a=2.0 nm, λ_{ex}=5.3 nm, L=12 nm, R=40, 80, 120 nm

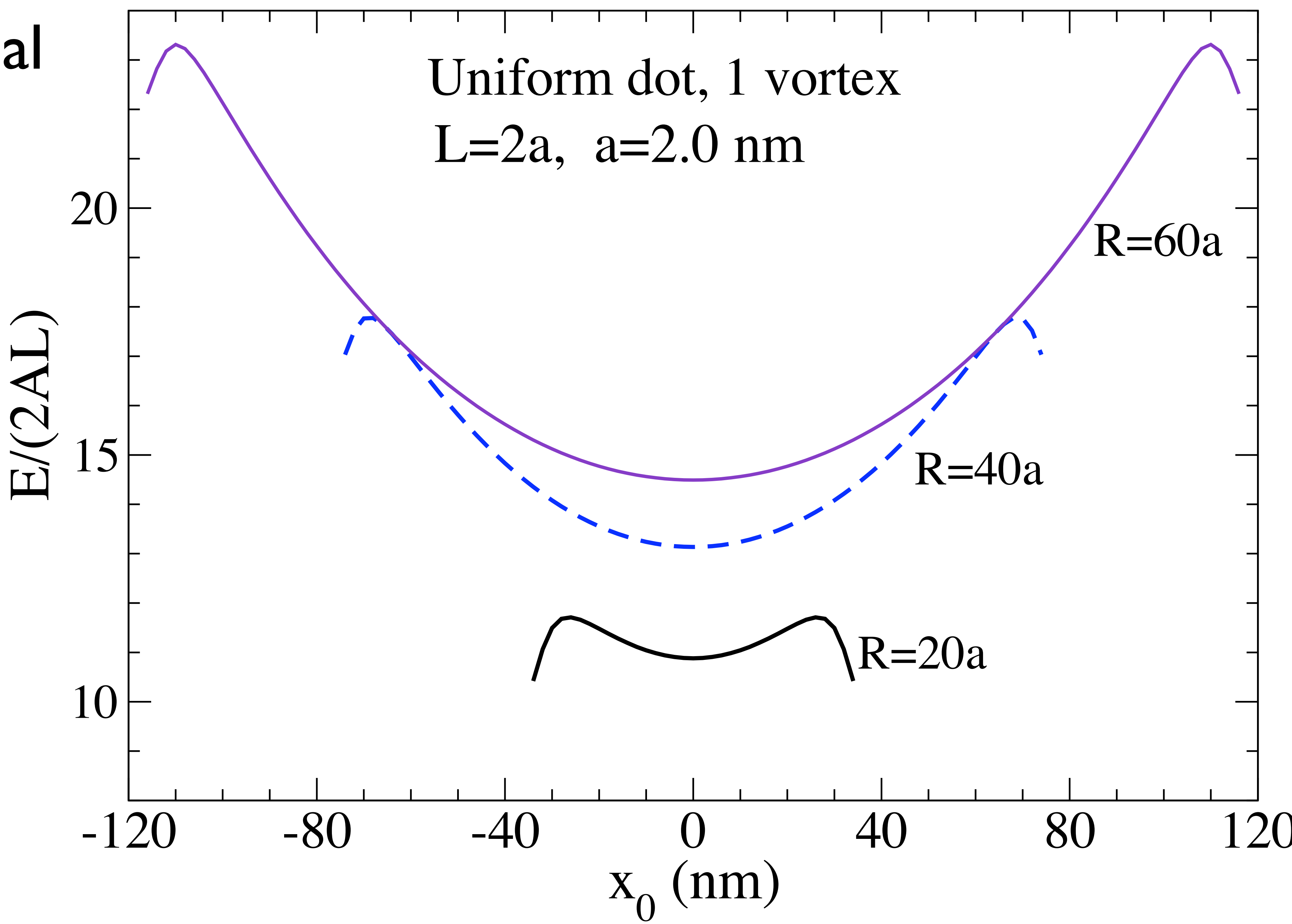
Potencial $E(x_0)$



Exemplo. Energia total do vórtice, $E(x_0) \approx \frac{1}{2} k_F x_0^2$

a=2.0 nm, λ_{ex}=5.3 nm, $\boxed{L\text{=4.0 nm,}}$ R=40, 80, 120 nm

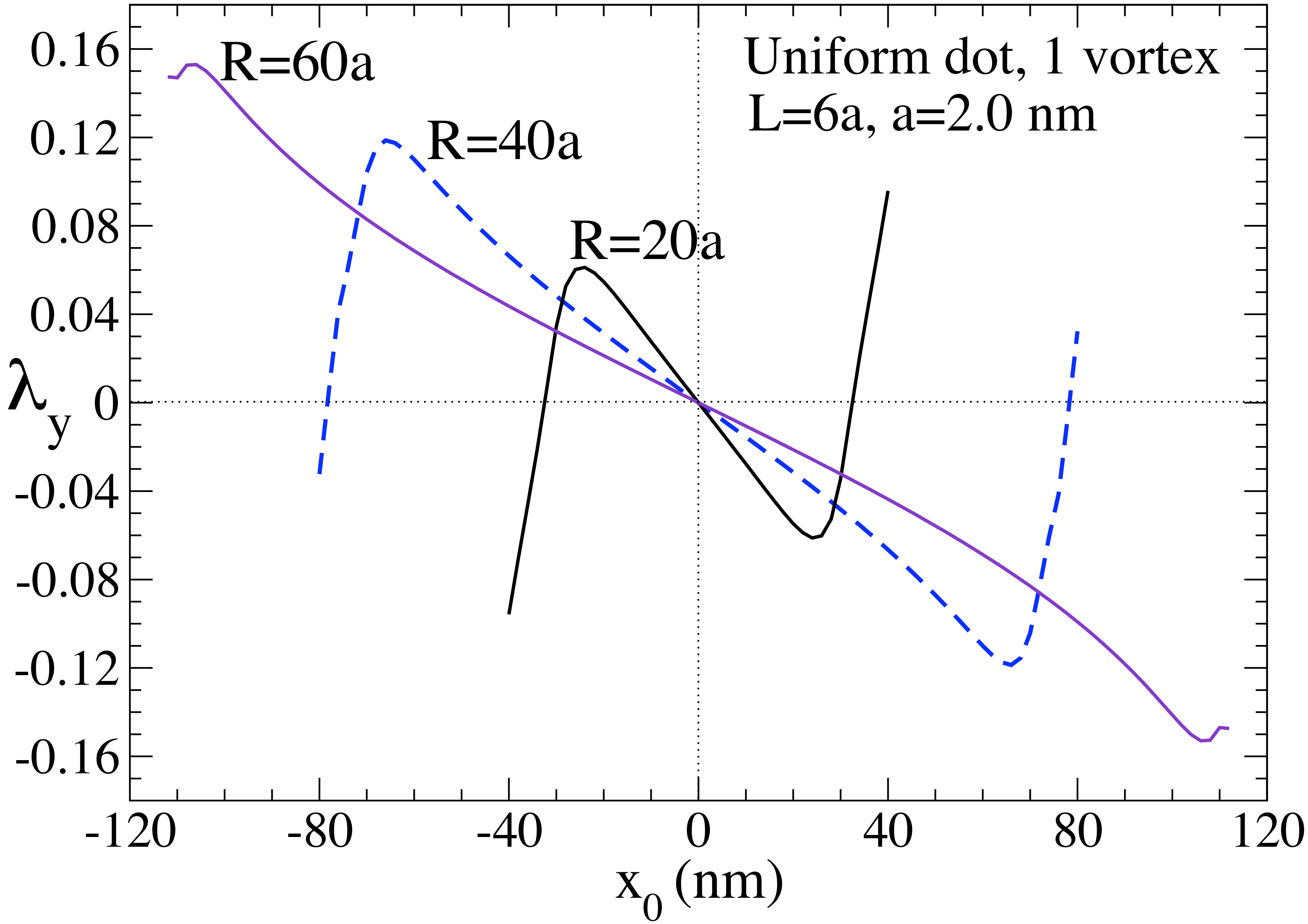
Potencial $E(x_0)$



potencias mais sauves

Exemplo. Vórtice, campo de restrição $\lambda=(0,\lambda_y)$

$a=2.0$ nm, $\lambda_{ex}=5.3$ nm, $\boxed{L=12 \text{ nm},}$ $R=40, 80, 120$ nm



Exemplo. Configuração típica de um vórtice.

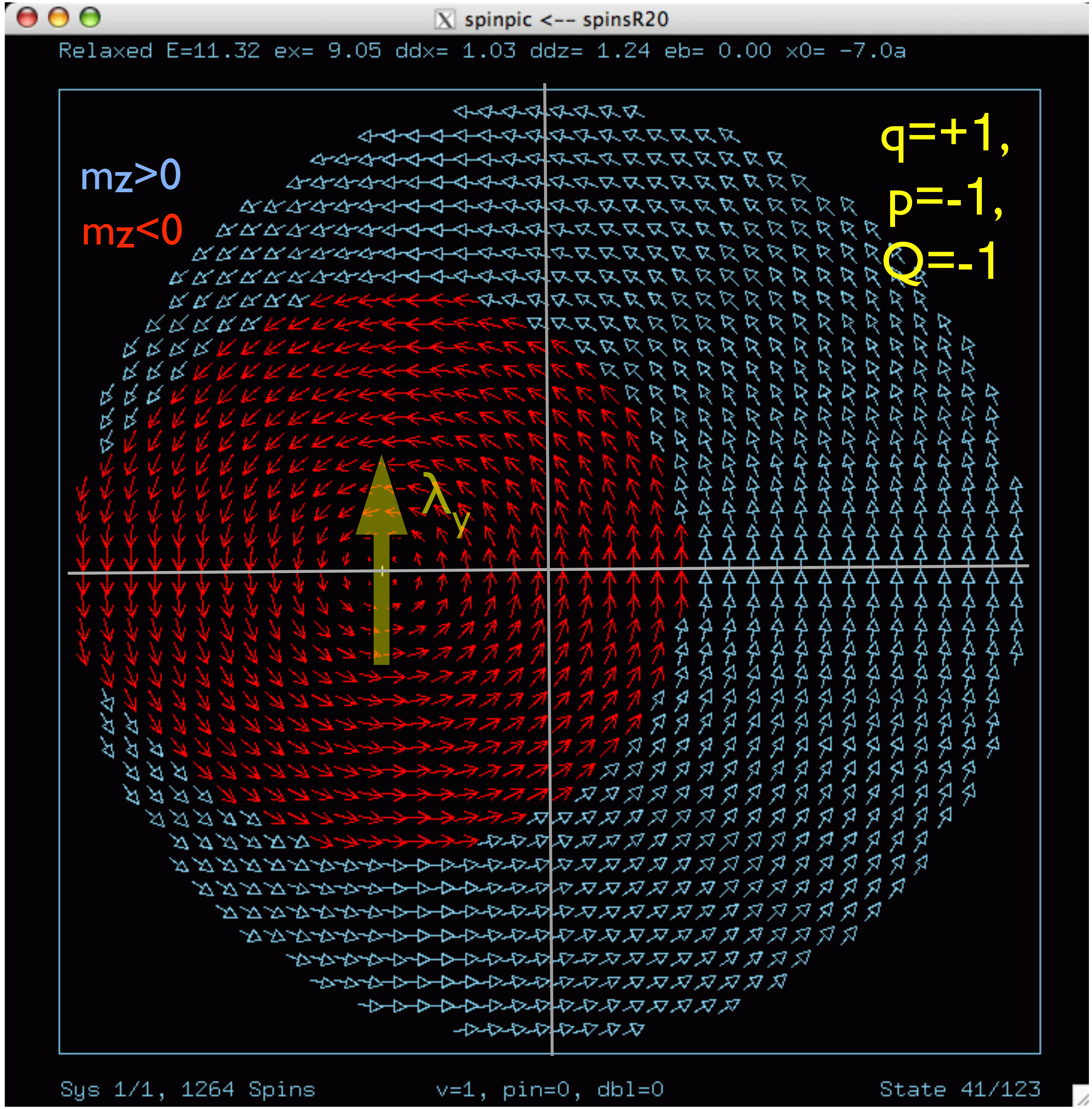
$a=2.0$ nm,

$\lambda_{ex}=5.3$ nm,

$L=12$ nm,

$R=40$ nm,

$x_0=-7a$



Potencial dos vórtices E(X)

Adaptando as equações do micromagnetismo (2D), o campo de desmagnetização é elaborado via FFT junto com uma função de Green para um disco quase-2D.

Um campo magnético de restrição (λ_x,λ_y) no núcleo do vórtice foi utilizado na técnica dos parâmetros indeterminados de Lagrange, para segurar o vórtice num lugar desejado.

É possivel achar o potencial efetivo E(X) do vórtice dentro do ponto, que pode ser útil no estudo da dinâmica dos vórtices.

A seguir, veremos o que isso tem a ver com a dinâmica ⇒⇒⇒

Sobre Dinâmica:

uma célula contém dipolo = $\vec{\mu}_i = La^2 M_s \hat{m}_i$

$$\frac{d\vec{\mu}_i}{dt} = \gamma \vec{\mu}_i \times \vec{B}_i.$$

$$\vec{B}_i = -\frac{\delta \mathcal{H}}{\delta \vec{\mu}_i} = \frac{J_{\text{cell}}}{La^2 M_s} \vec{b}_i$$

$$\boxed{\frac{d\hat{m}_i}{d\tau} = \hat{m}_i \times \vec{b}_i,} \quad \tau = \gamma B_0 t.$$

$$\boxed{\vec{b}_i \equiv \sum_{\text{nbrs}} \hat{m}_j + \frac{a^2}{\lambda_{\text{ex}}^2} \left(\tilde{H}^{\text{ext}} + \tilde{H}^M \right)}$$

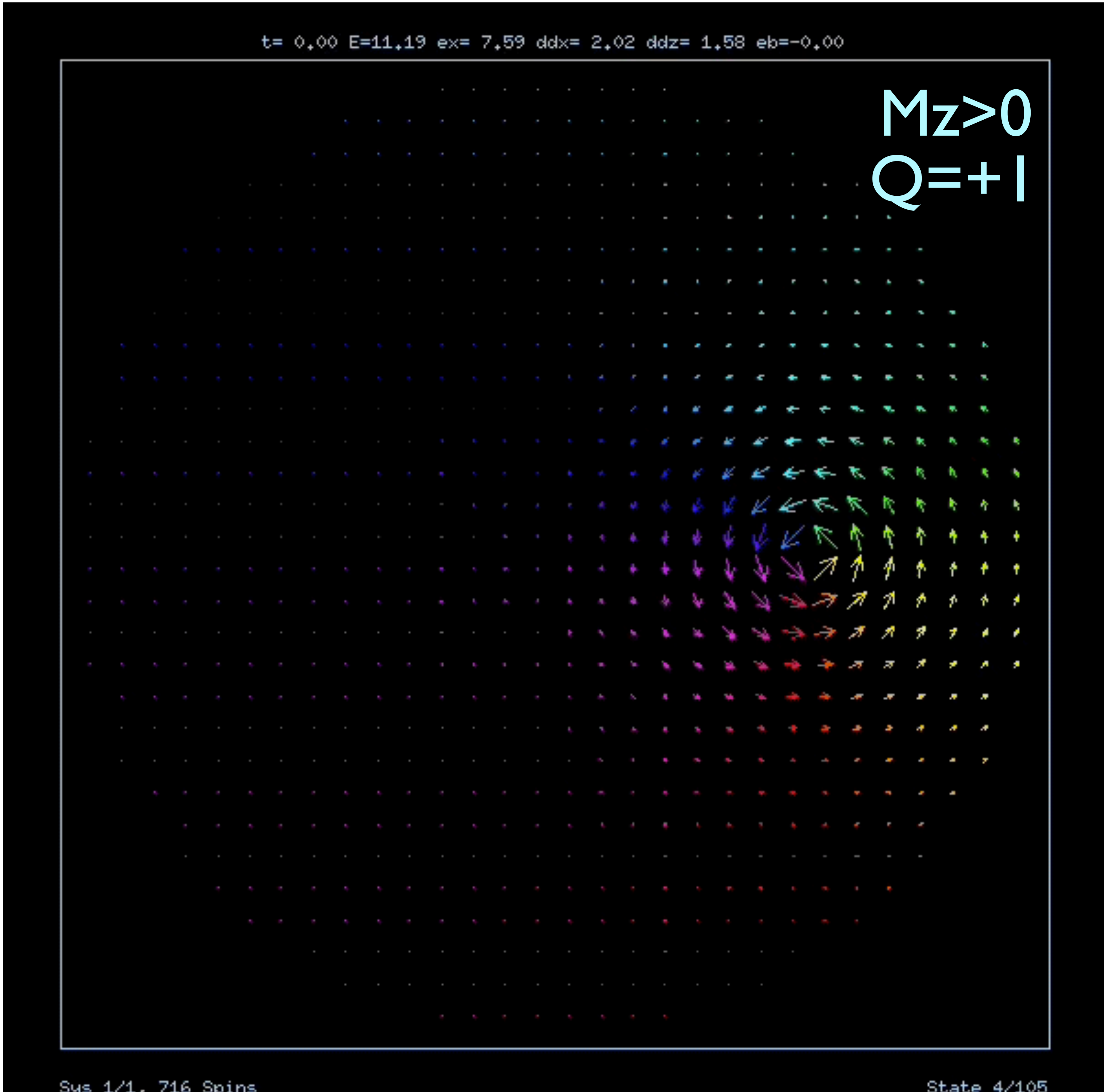
$$B_0 \equiv \frac{2A}{a^2 M_s} \qquad t_0 = (\gamma B_0)^{-1} \approx 1.5 \text{ ps para Permalloy}$$

Isso defina a dinâmica na temperatura T=0.

Podemos integrar com Runge-Kutta de quarta ordem.

$$\boxed{\frac{d\hat{m}_i}{d\tau} = \hat{m} \times \vec{b}_i - \alpha \hat{m} \times \left(\hat{m} \times \vec{b}_i \right)}$$ ← (Se tiver amortecimento)

Movimento girotrópico



R=30 nm,
L=5 nm,
células a=2.0 nm
α=0.02

girovetor:

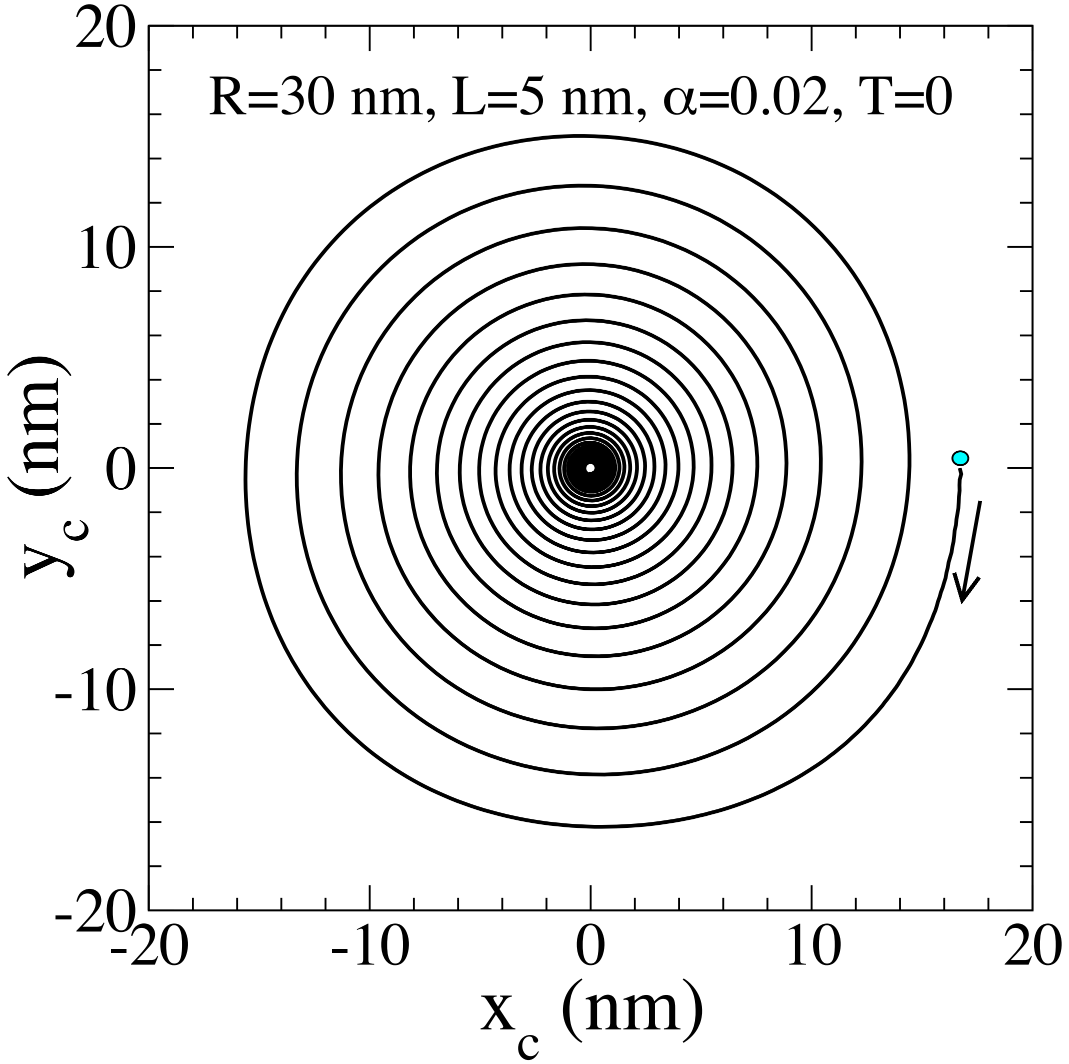
$$\mathbf{G} = 2\pi Q \hat{z}$$

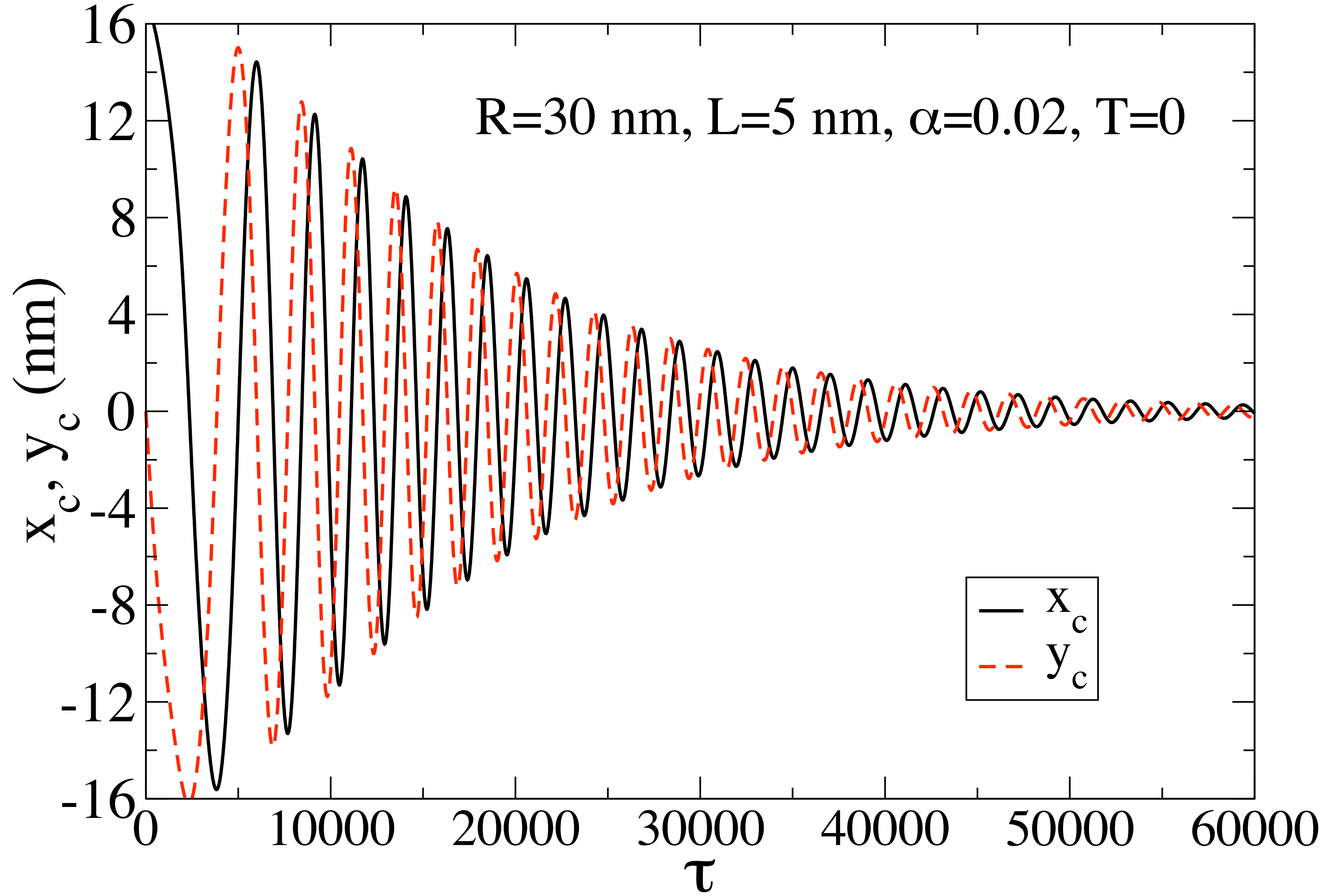
$$Q = \pm 1$$

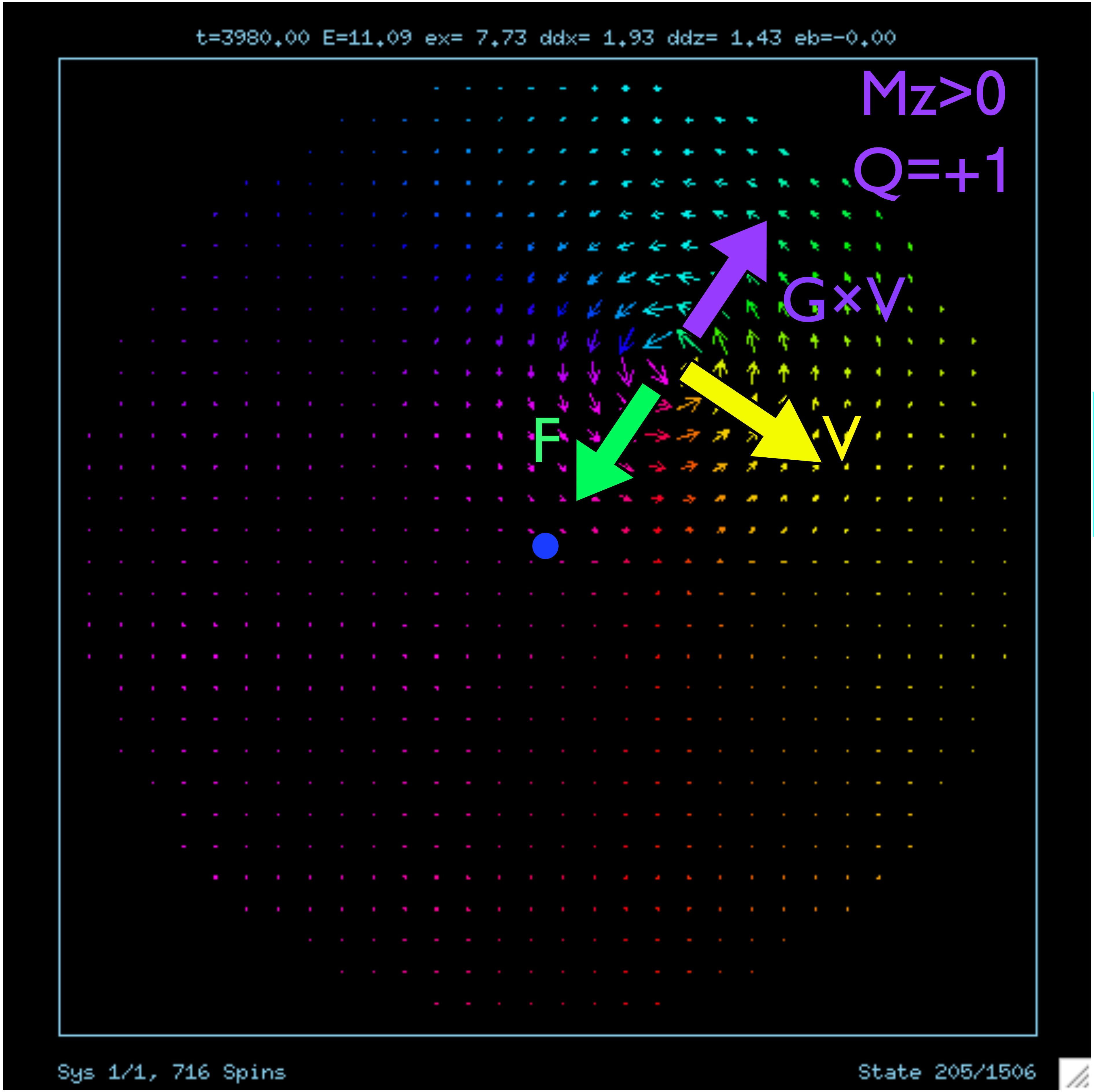
$$\boxed{\frac{\gamma}{m_0}\mathbf{F} + \mathbf{G} \times \mathbf{V} = 0.}$$

$$m_0 = \mu/a^2 = LM_s$$

A posição do núcleo:







girovetor:

$$\mathbf{G} = 2\pi Q \hat{z}$$

Q=qp=+1

$$\frac{\gamma}{m_0}\mathbf{F} + \mathbf{G} \times \mathbf{V} = 0.$$

$$m_0 = \mu/a^2 = LM_s$$

equação de Thiele:

$$\boxed{\frac{\gamma}{m_0}\mathbf{F} + \mathbf{G} \times \mathbf{V} = 0.}$$

força para o centro:

$$\mathbf{F} = -k_F r\,\hat{r} = -k_F X$$

solução (α=0): movimento circular do núcleo:

$$\mathbf{V} = \frac{\gamma}{GLM_s}\hat{z} \times \mathbf{F} = -\frac{\gamma k_F r}{2\pi QLM_s}\hat{\phi}$$

frequencia do movimento girotrópico:

$$\boxed{\omega_G = \frac{V}{r} = -\frac{\gamma k_F}{2\pi QLM_s}}$$

$$\boxed{f_G = \omega_G / 2\pi}$$

O importante é k_F/L.

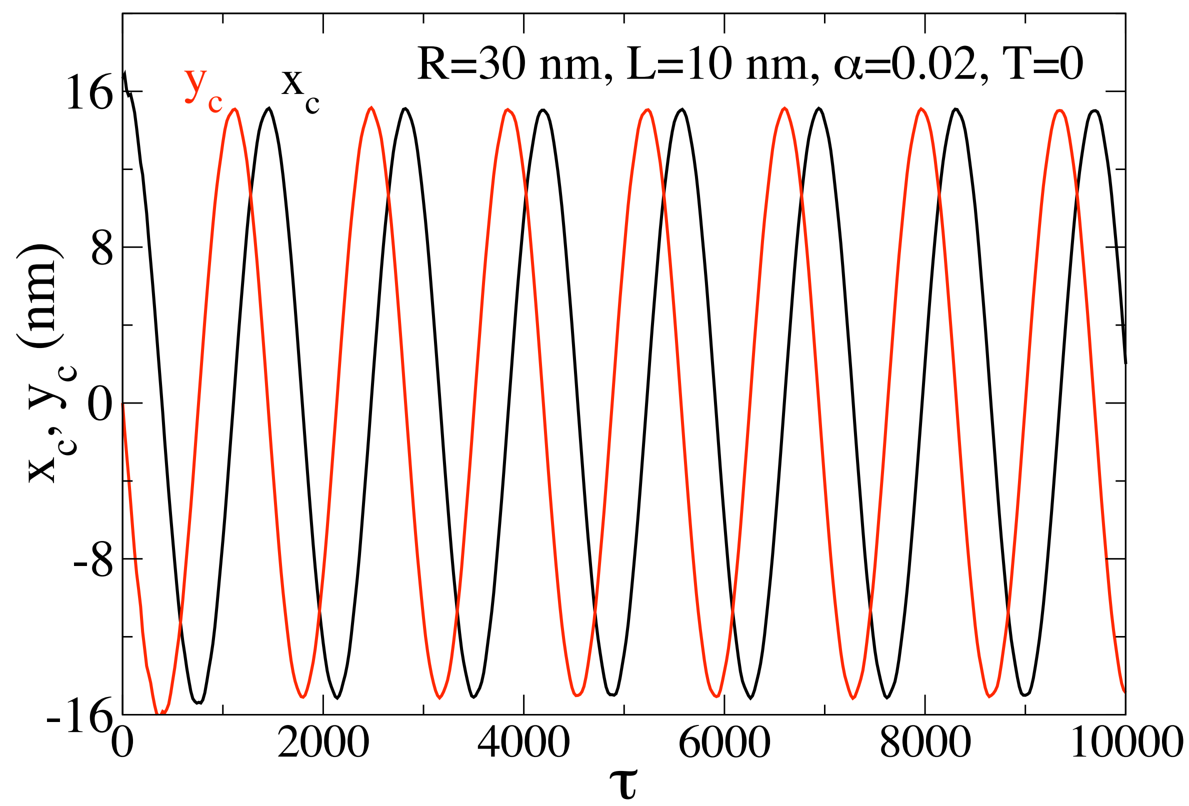
Simulações:

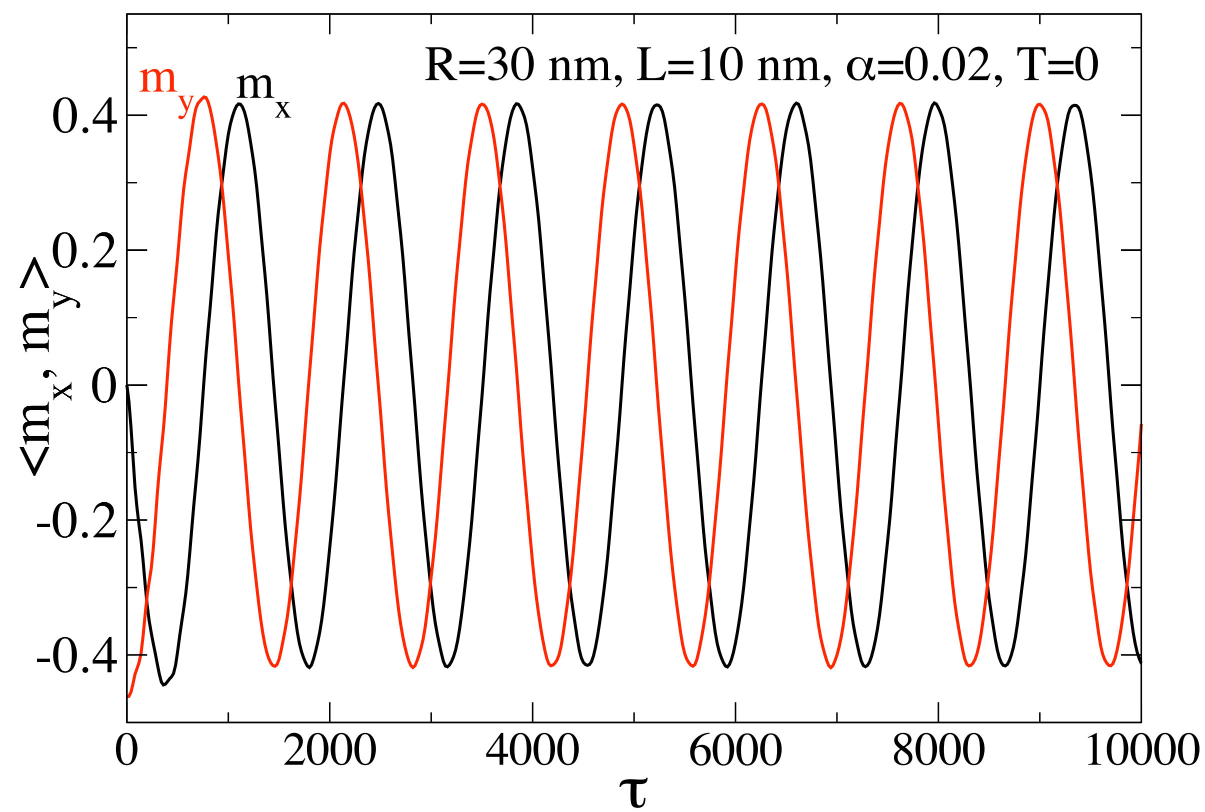
1. Relaxação com vínculo ⇒ posição inicial (x_0,y_0)

2. Evolução com Runge-Kutta-4 e com α=0.02 até τ=1000.

3. Evolução com Runge-Kutta-4 e com α=0.0 até alguns períodos

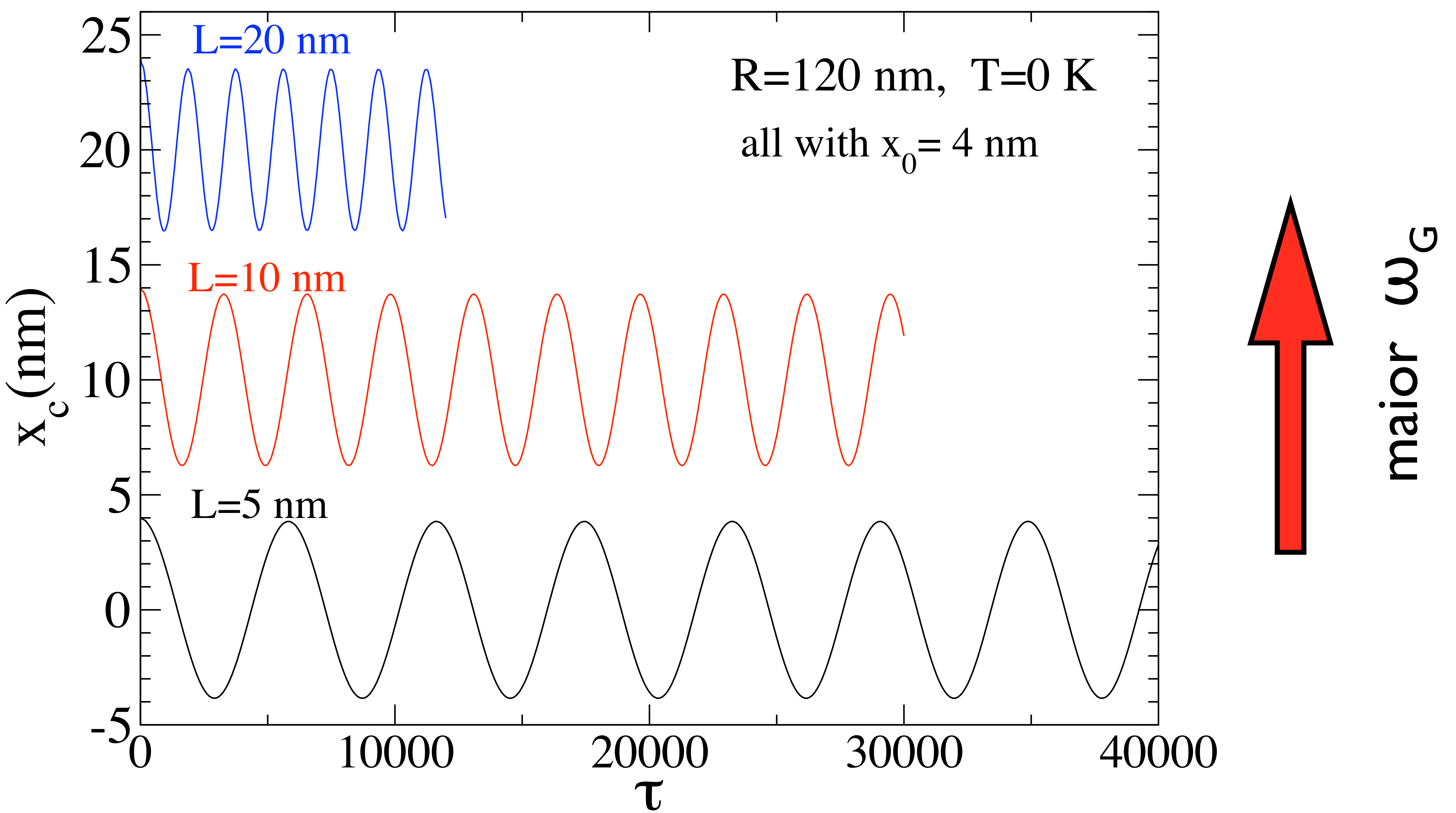
4. Medir a frequencia da rotação: $\nu_G = 1/\tau_G$.





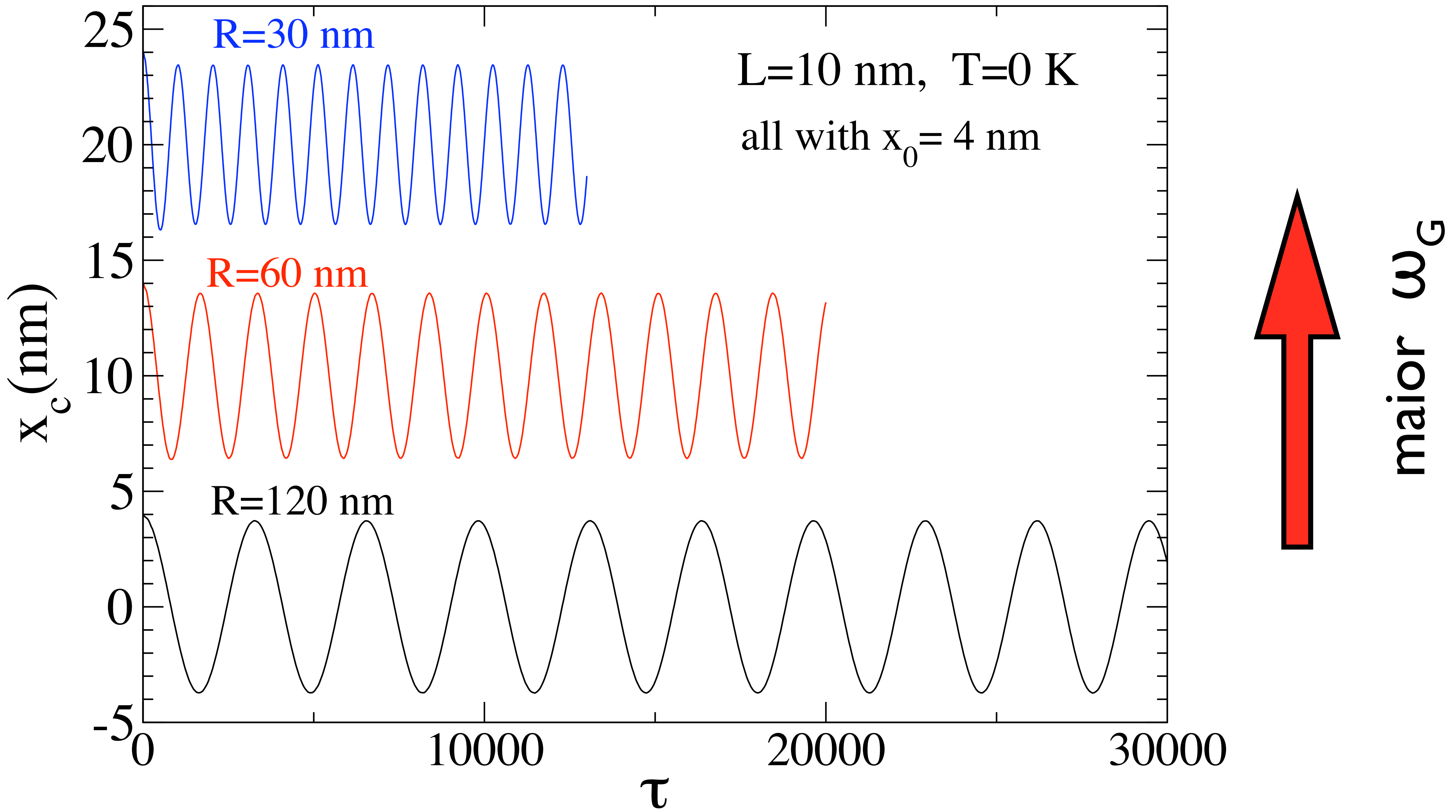
Diferenças com a espessura L do nanoponto.

x_c=coordenada do núcleo



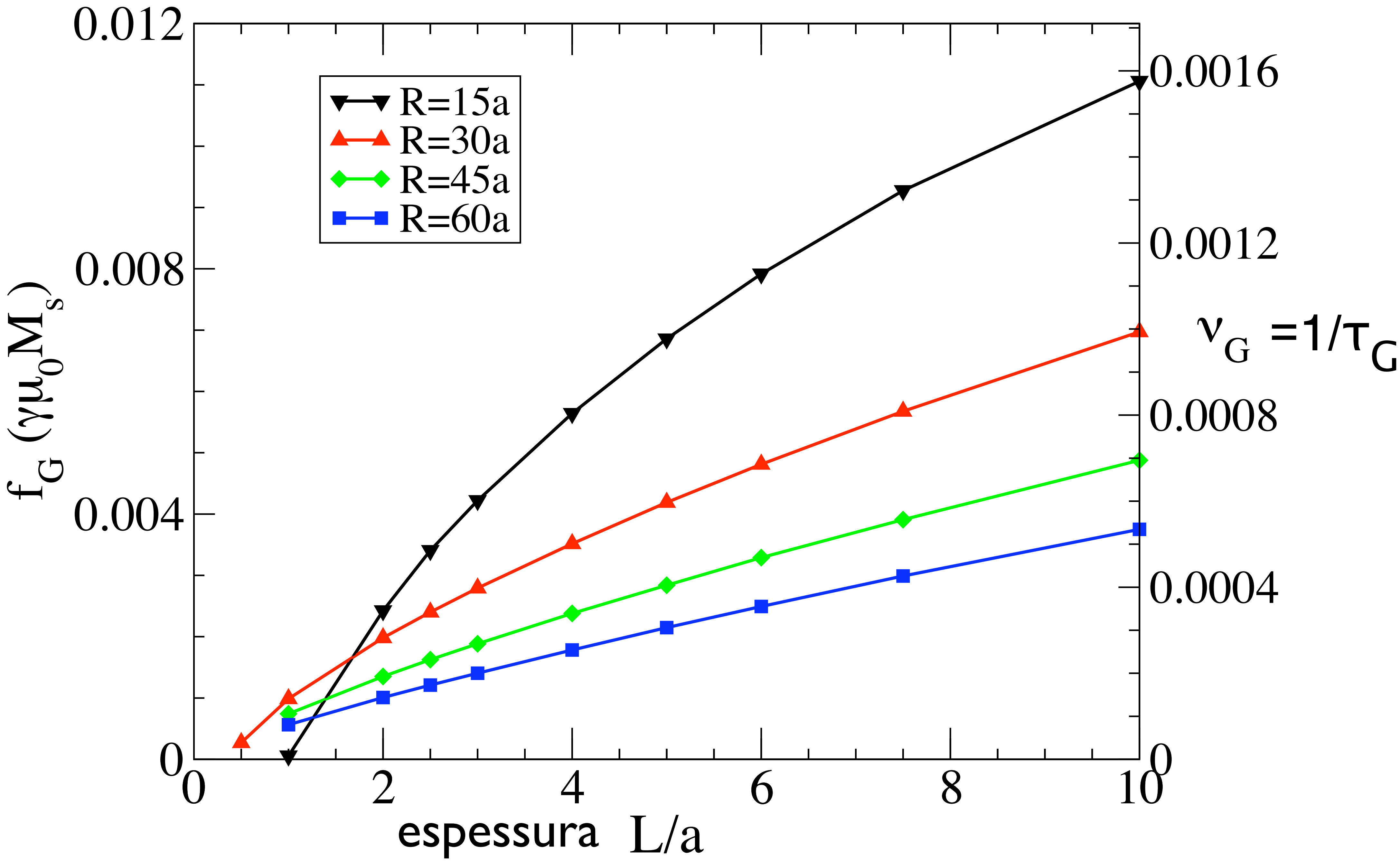
Diferenças com o raio R do nanoponto.

x_c=coordenada do núcleo



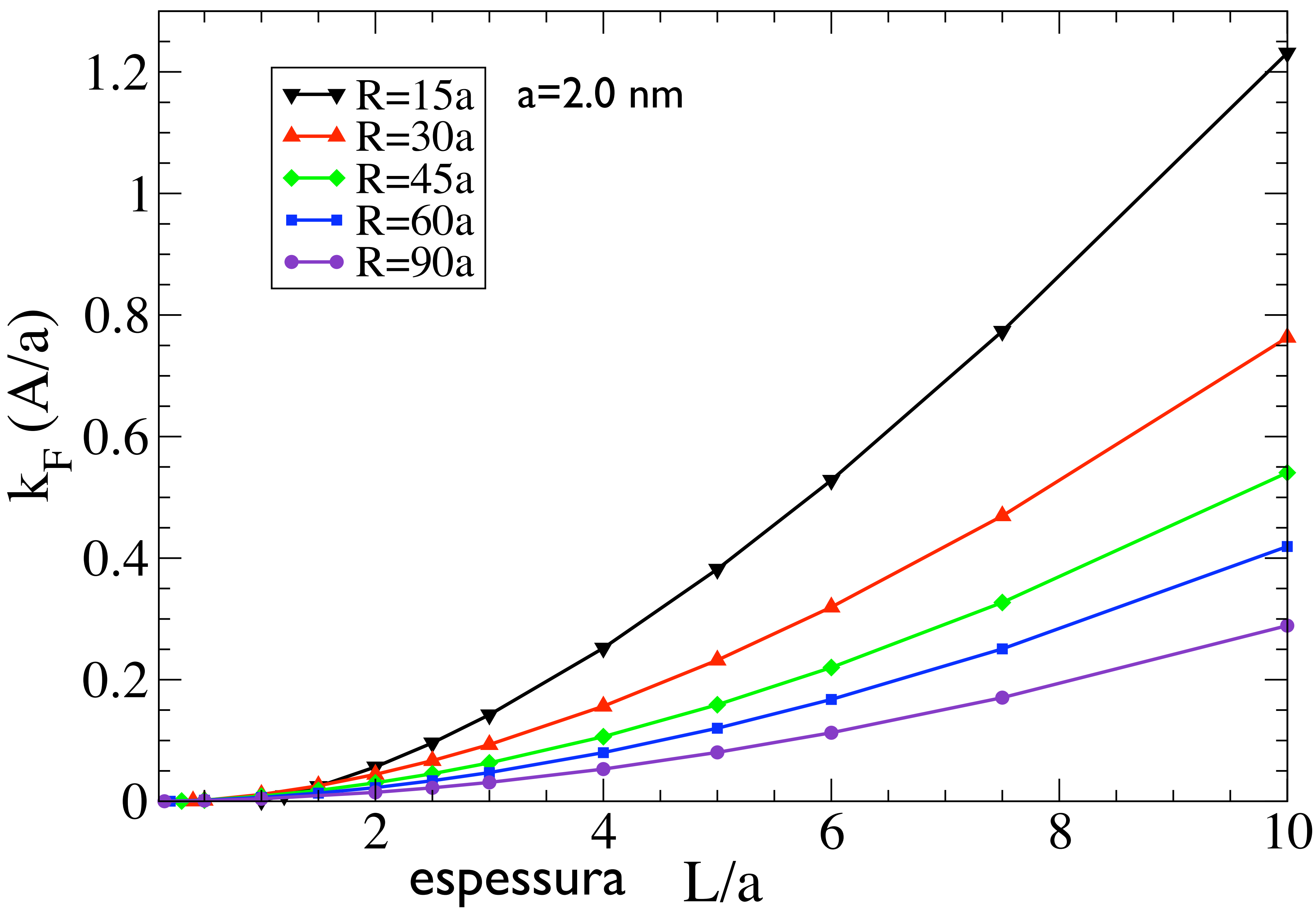
Frequencias:

(Calculadas utilizando a dinâmica)



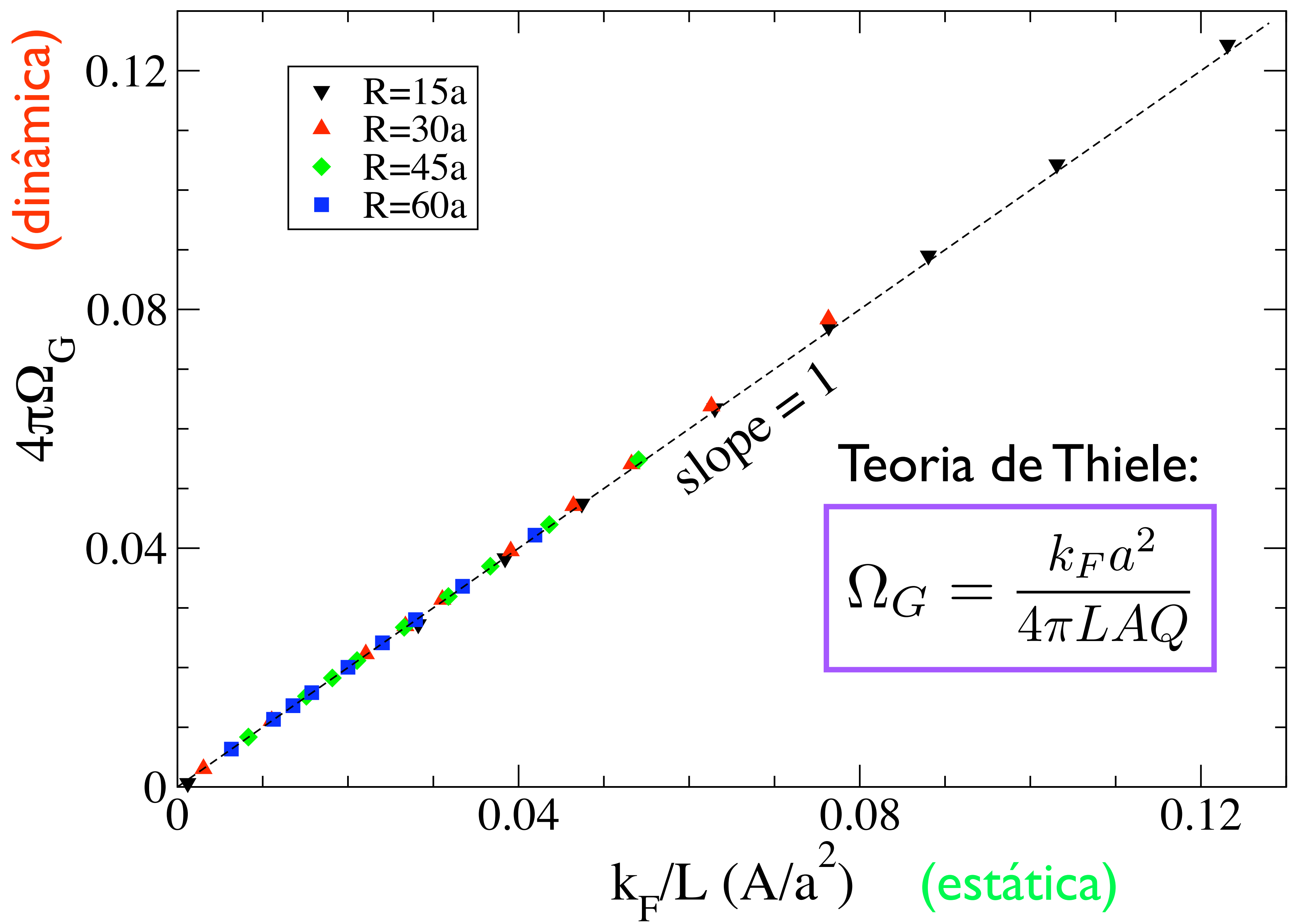
Constante de força: $E(x) \approx E(0) + \frac{1}{2} k_F x^2$

(Calculada utilizando só a energia, não a dinâmica)



A frequencia da dinâmica vs. constante de força:

$$\omega_G = \gamma B_0 \Omega_G \qquad \Omega_G = 2\pi\nu_G = 2\pi/\tau_G$$



Com temperatura T>0. Para o movimento em uma célula:

$$\boxed{\frac{d\hat{m}}{d\tau} = \hat{m} \times \left(\vec{b} + \vec{b}_s\right) - \alpha \hat{m} \times \left[\hat{m} \times \left(\vec{b} + \vec{b}_s\right)\right]}$$

campo estocástico

teorema da flutuação-dissipação:

$$\langle b_s^\alpha(\tau)\, b_s^\beta(\tau')\rangle = 2\alpha\, \mathcal{T}\, \delta_{\alpha\beta}\, \delta(\tau - \tau') \qquad \mathcal{T} \equiv \frac{kT}{J_{\text{cell}}} = \frac{kT}{2AL}$$

(o campo estocástico carrega energia térmica)

Podemos integrar com o algoritmo de Heun de 2ª ordem:

A. Passo de Euler (predição).

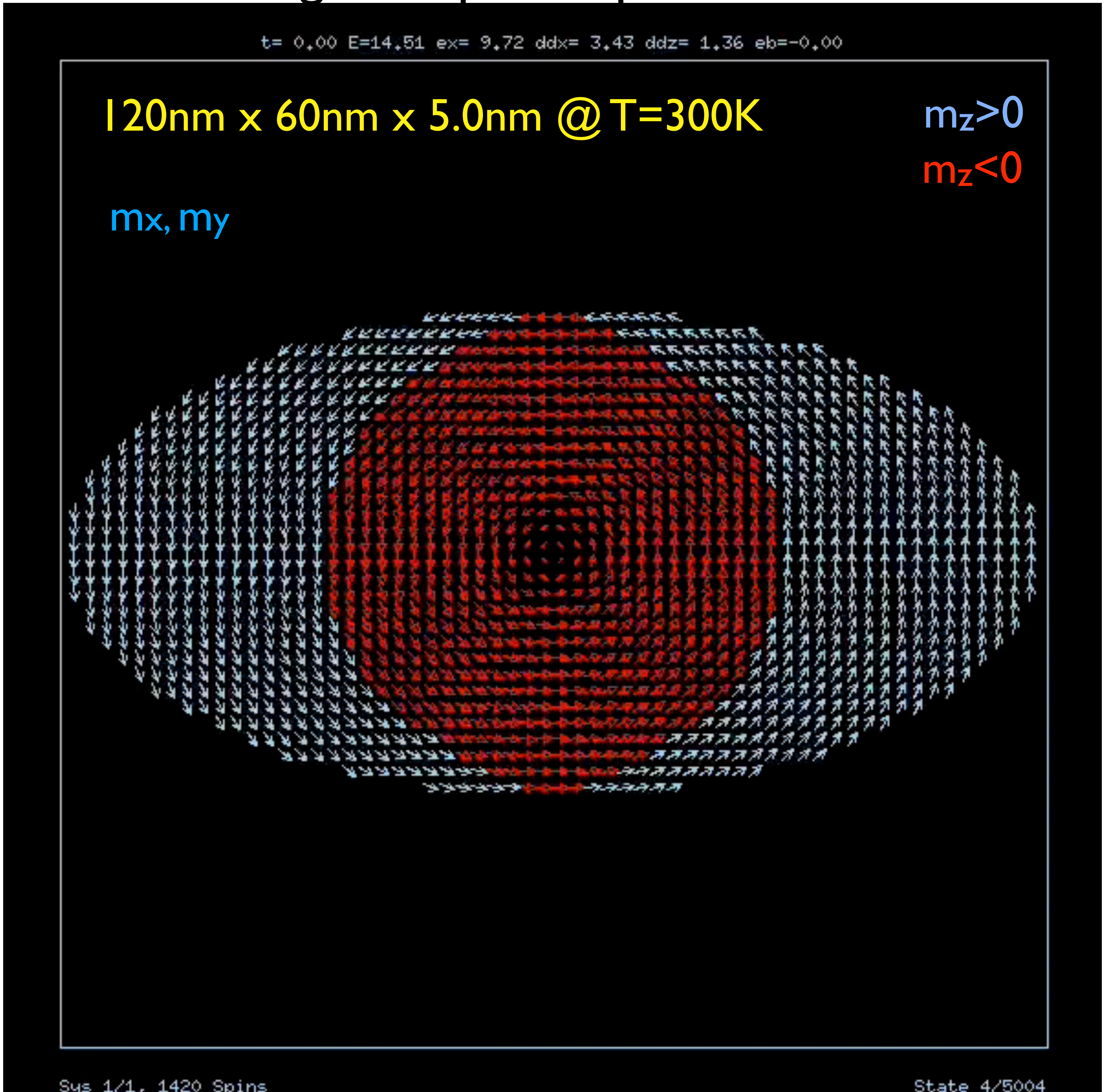
B. Passo do Trapezóide (correção).

$$\int_{\tau_n}^{\tau_n + \Delta\tau} d\tau\ b_s^x(\tau) \longrightarrow \sigma_s w_n^x$$

ran( )

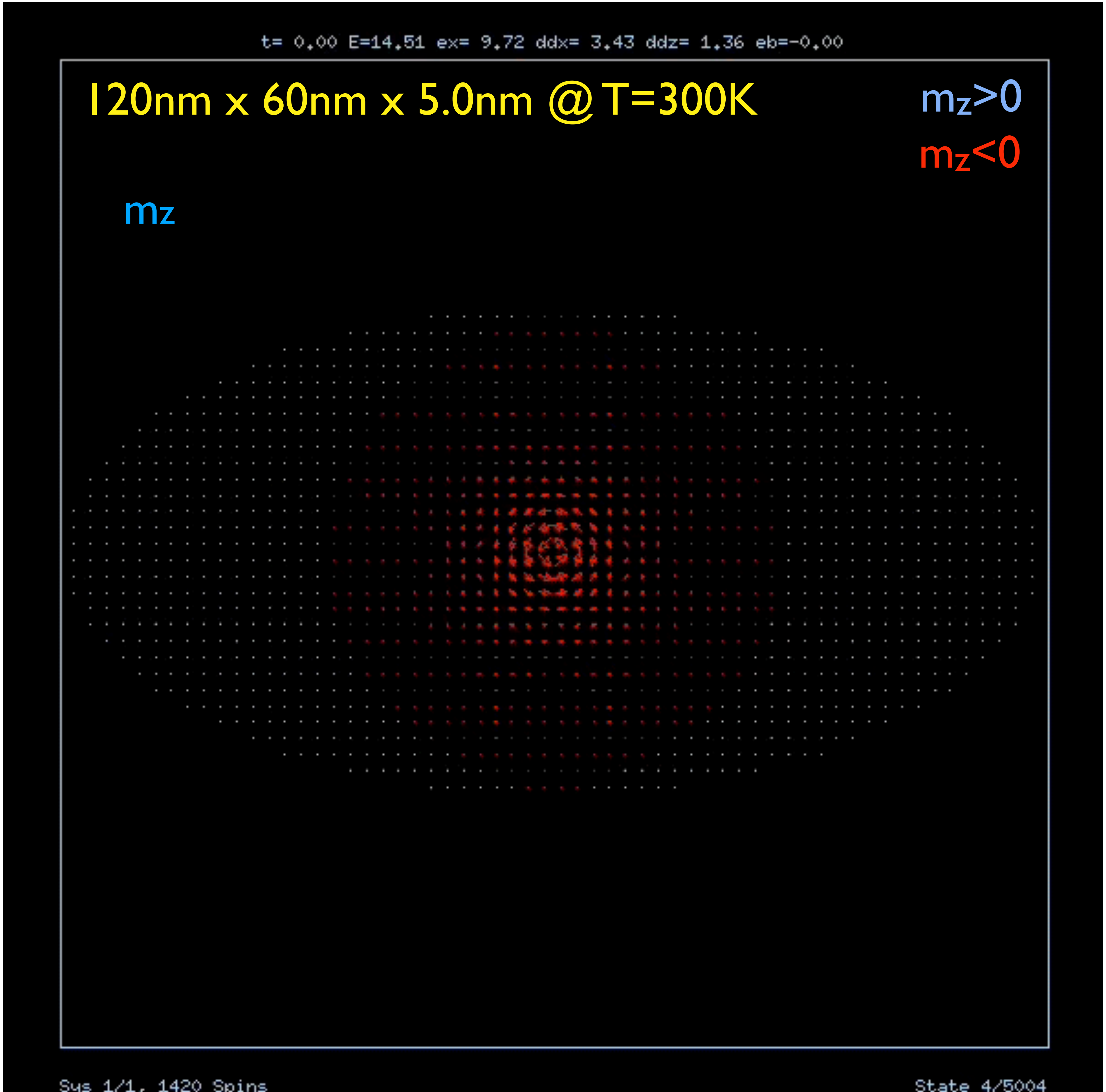
$$\sigma_s = \sqrt{2\alpha \mathcal{T}\, \Delta\tau}.$$

Movimento girotrópico espontâneo com T>0 (elipse)



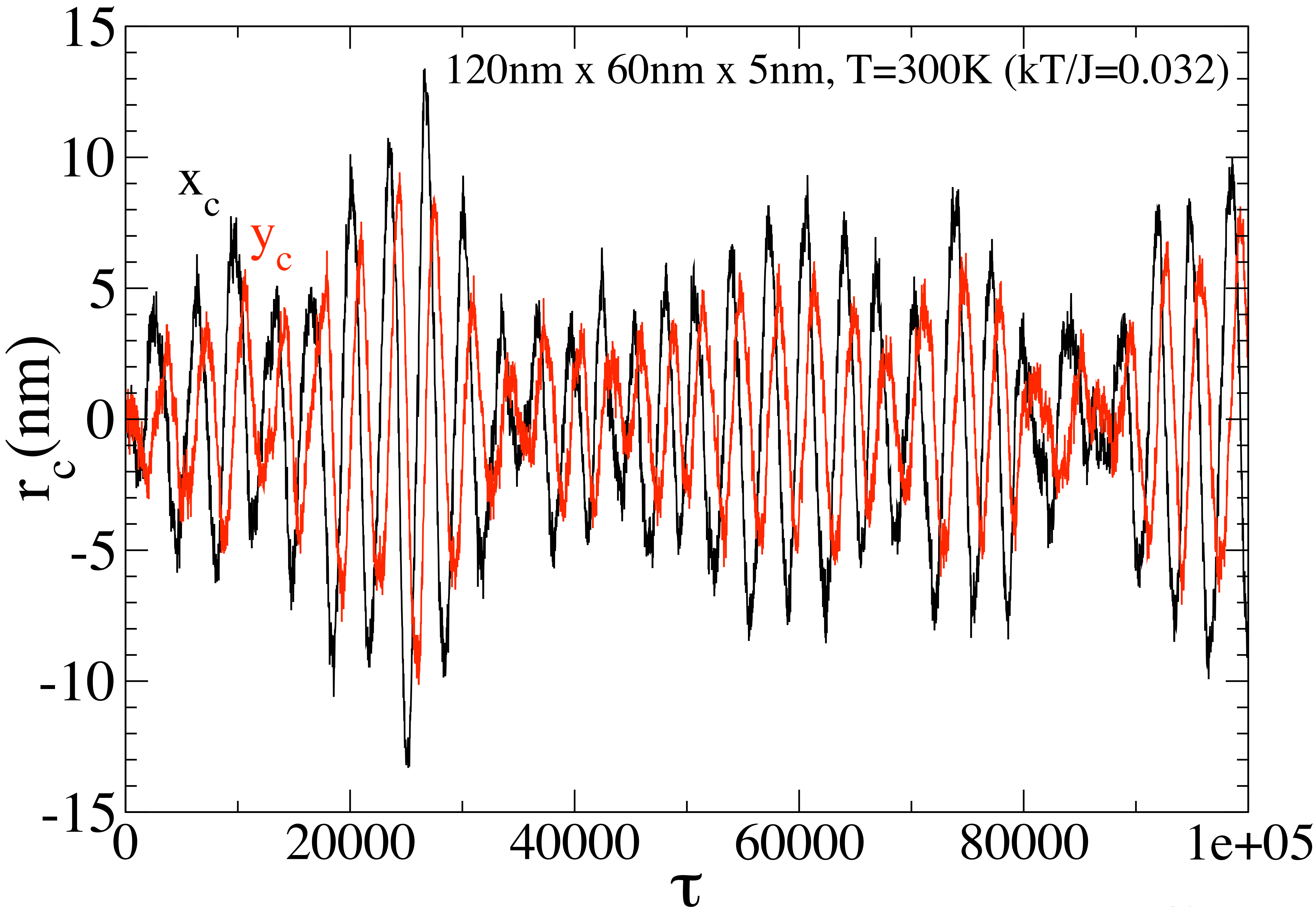
posição inicial
$x_0=y_0=0$

Movimento girotrópico espontâneo com T>0 (elipse)



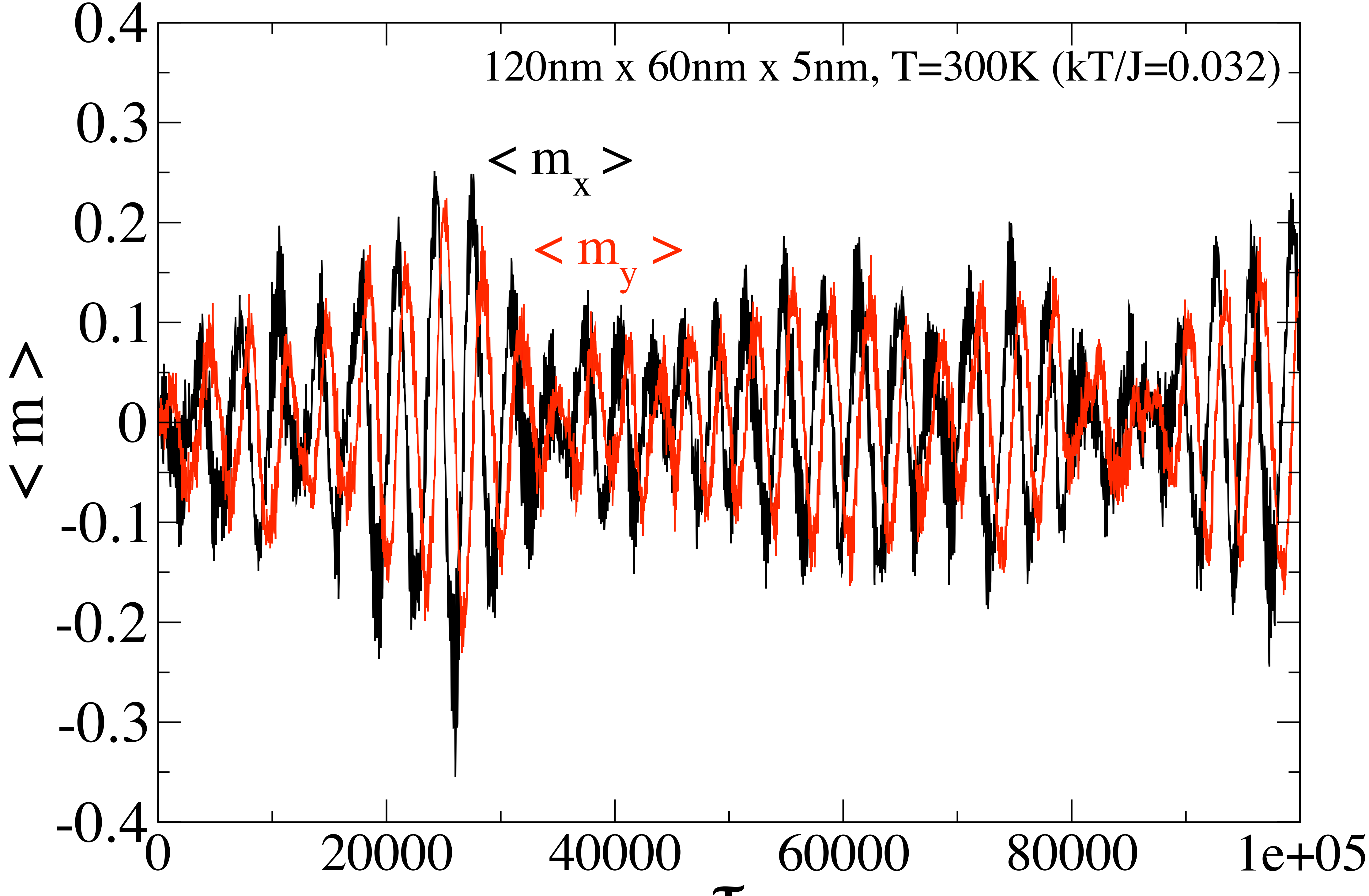
posição inicial
$x_0=y_0=0$

posição do núcleo: (elipse)



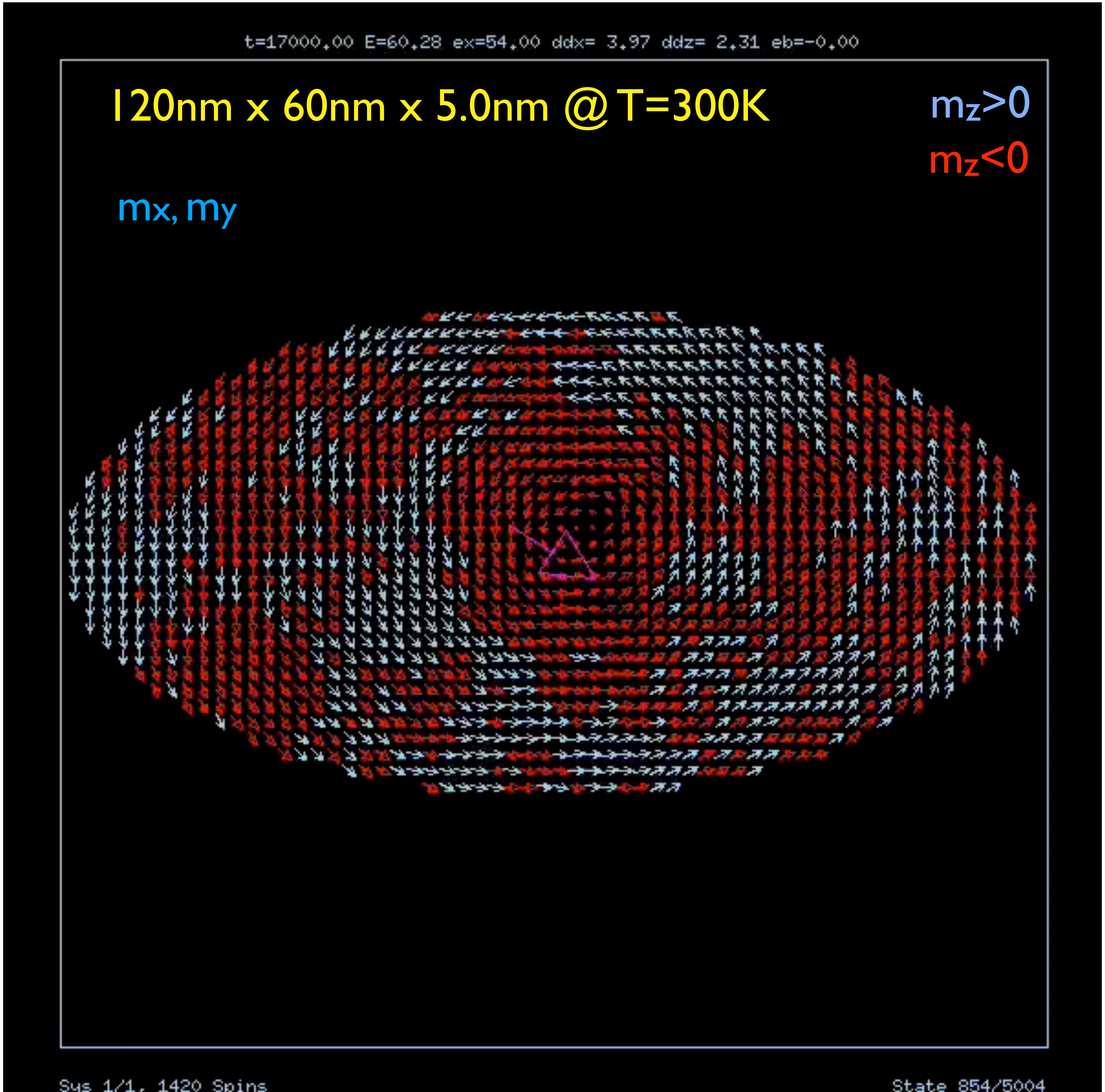
(0.15 μs)

magnetização total: (elipse)



(0.15 μs)

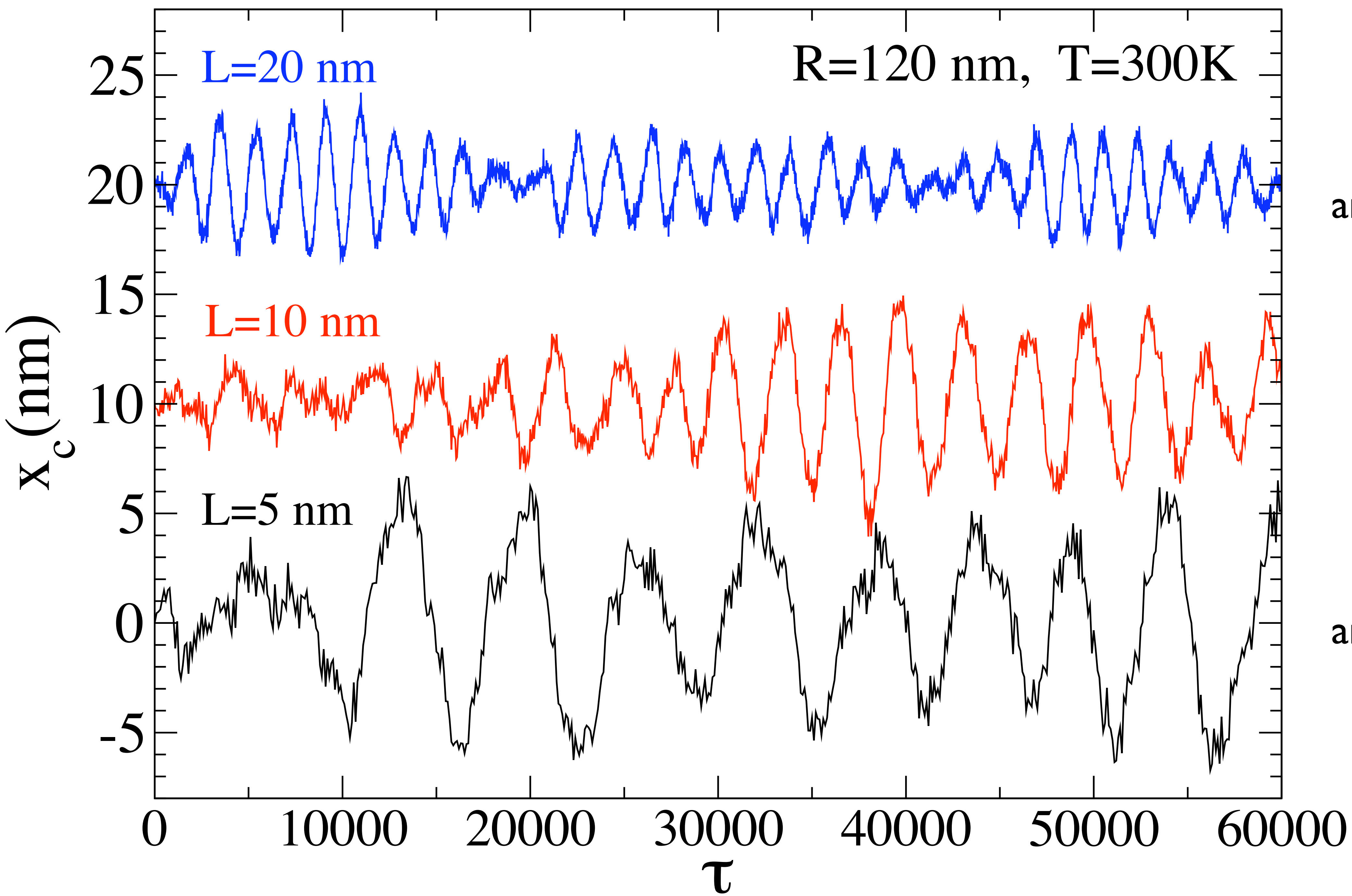
Movimento girotrópico espontâneo com T>0 (elipse)



posição inicial
$x_0=y_0=0$

A seta grande
= <M>

Movimento espontâneo (nanopontos circulares):



amplitude menor

amplitude maior

Sumário, dinâmica dos vórtices:

Sem campo magnético externo, um vórtice começa a mover-se naturalmente no movimento girotrópico, quando não está no centro do nanoponto.

A frequencia ω_G do movimento girotrópico é proporcional a k_F/L, para nanopontos circulares.

Flutuações de temperatura podem iniciar este movimento, que deve ter uma amplitude relacionada com as idéias de compartilhamento de energia igualmente entre todos os graus da liberdade.

A dinâmica nas elipses deve ser ainda mais interessante, por causa de se ter dois eixos diferentes.

wysin@phys.ksu.edu
www.phys.ksu.edu/personal/wysin