

# MODELIZACIÓN DE PROCESOS INDUCIDOS POR CORRIENTES DE ESPÍN POLARIZADAS EN NANOESTRUCTURAS MAGNÉTICAS

L. López Díaz, L. Torres, E. Jaromirska (Univ. Salamanca)  
O. Alejos (Univ. Valladolid), E. Martínez (Univ. Burgos),  
G. Consolo (Univ. Messina)

# Contenido

2

- Micromagnetismo
  - Introducción
  - Hipótesis y ecuaciones básicas
  - Activación térmica
  - Par de transferencia de espín (*spin-transfer torque*)
- Modelización de estructuras de tipo *point-contact*
  - Introducción
  - Aspectos computacionales
  - Modo de oscilación propagante lineal
  - Modo de oscilación evanescente no lineal
  - Modo de oscilación de un vórtice
- Conclusiones

3

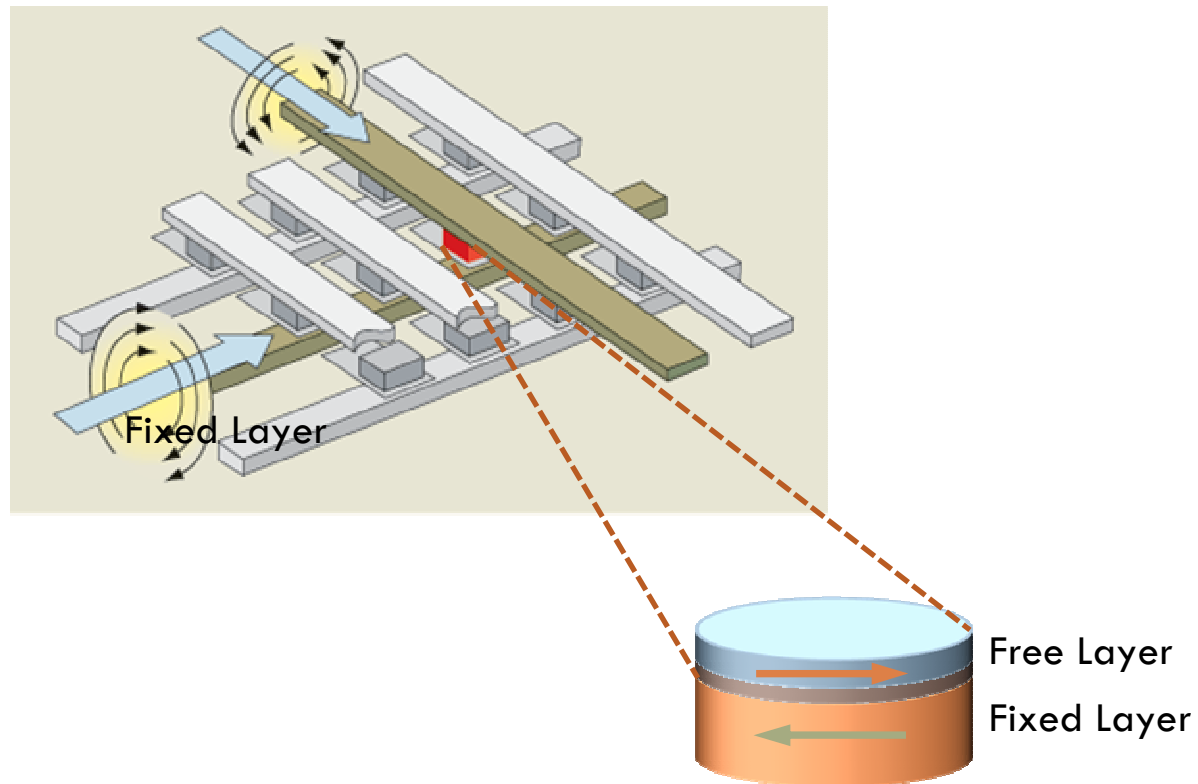
# Micromagnetismo

- Introducción
- Hipótesis y ecuaciones básicas
- Activación térmica
- Par de transferencia de espín

# Introducción

4

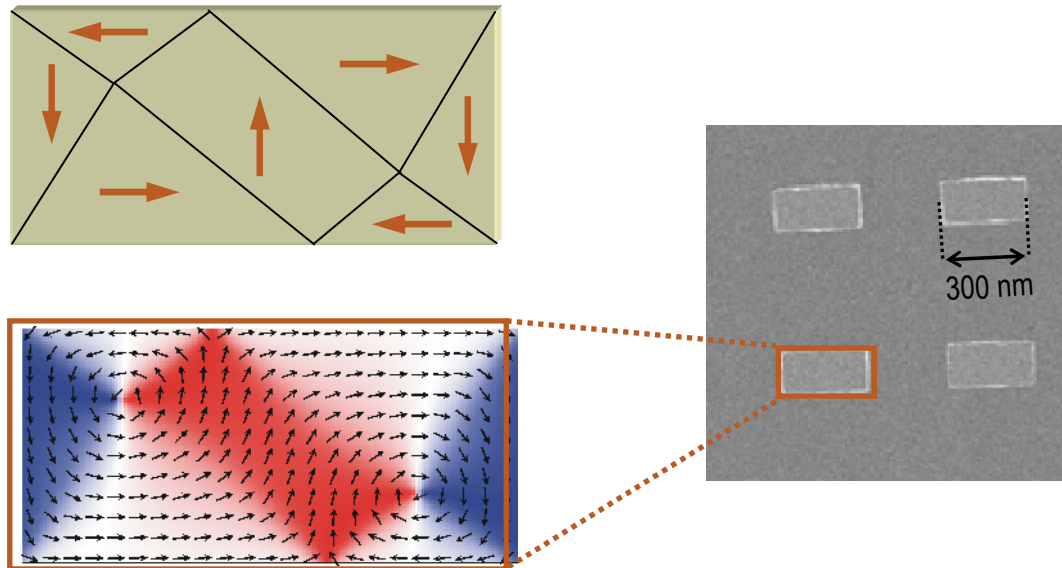
- Nanotecnología: requiere controlar el comportamiento de los materiales a escala nanométrica



# Introducción

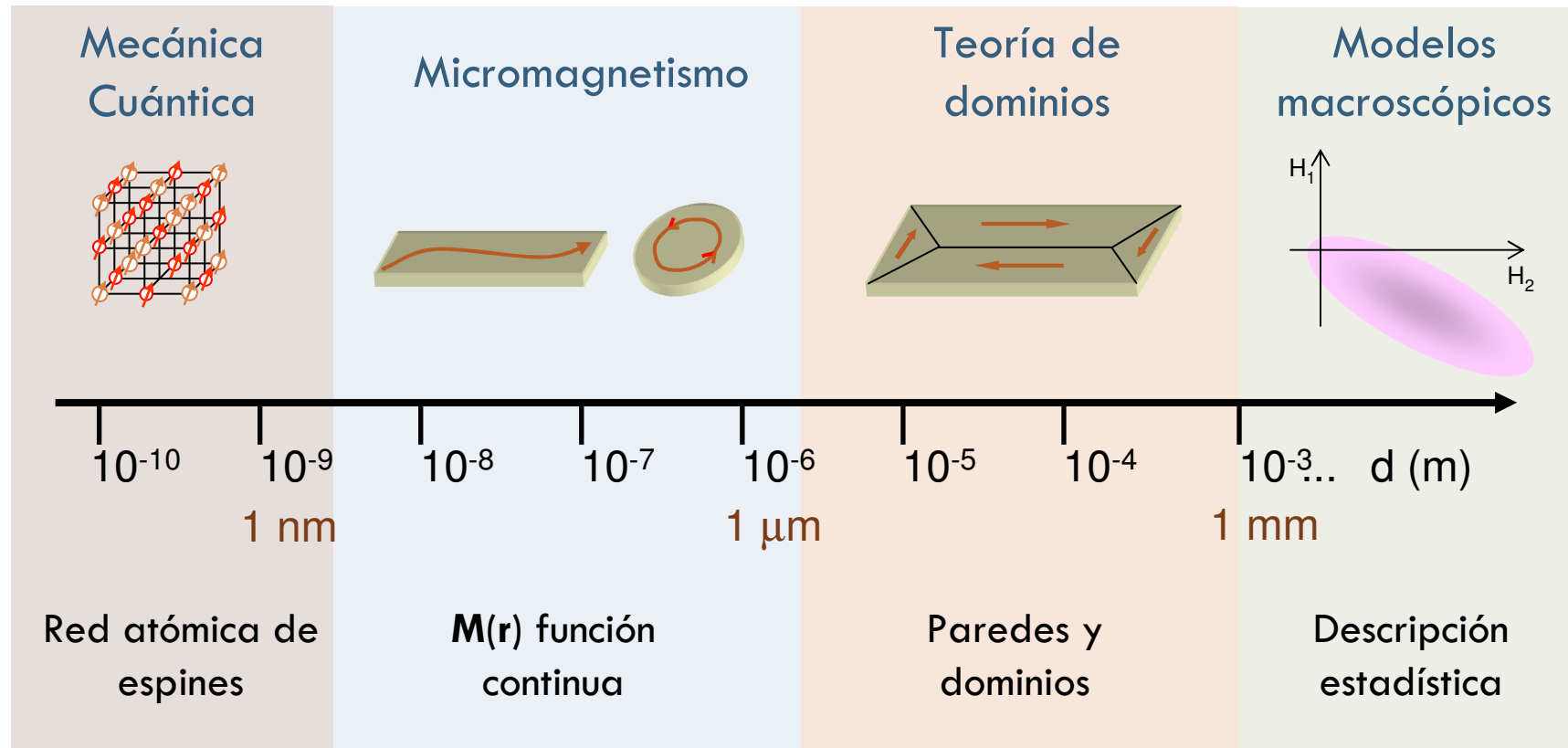
5

- A escala nanométrica, la magnetización varía de forma suave (interacción de intercambio domina a corto alcance)



# Escalas espaciales y modelos

6



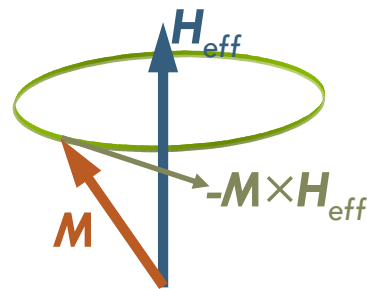
# Hipótesis básicas

7

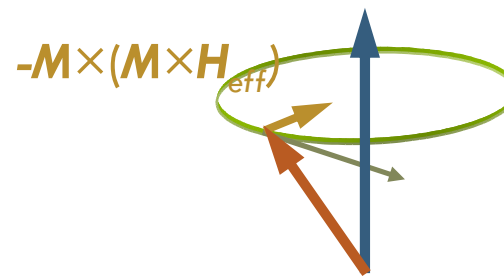
- Magnetización función continua de la posición
- Módulo constante
- Dinámica : 2ª ley de Newton
- Disipación lineal

Ecuación de  
Landau-Lifshitz

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) - \alpha \frac{\gamma}{M_s} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{H}_{eff})$$



Precesión

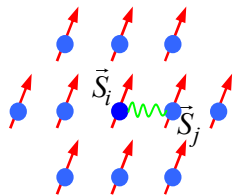


Disipación

# Términos de energía

8

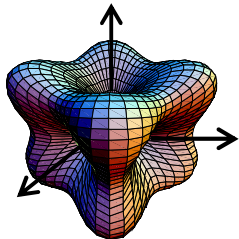
Energía total  $G = \int_V (\mathcal{E}_{exch} + \mathcal{E}_{anis} + \mathcal{E}_{zeeman} + \mathcal{E}_{demag}) dv$



Intercambio

$$\mathcal{E}_{exch} = A (\nabla \hat{m})^2$$

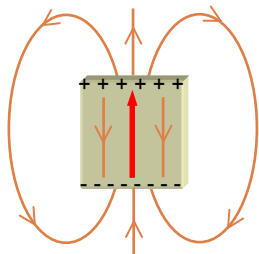
Tiende a alinear los espines vecinos.



Anisotropía

$$\mathcal{E}_{anis} = \mathcal{E}(\hat{m})$$

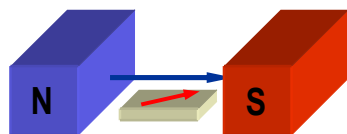
Tiende a orientar la magnetización a lo largo de direcciones fáciles.



Desmagnetizante

$$\mathcal{E}_{demag} = -\frac{\mu_0}{2} \vec{M} \cdot \vec{H}_d$$

Tiende a evitar la formación de polos magnéticos.



Campo externo

$$\mathcal{E}_{zeeman} = -\mu_0 \vec{M} \cdot \vec{H}_{ext}$$

Tiende a orientar la magnetización con el campo externo.

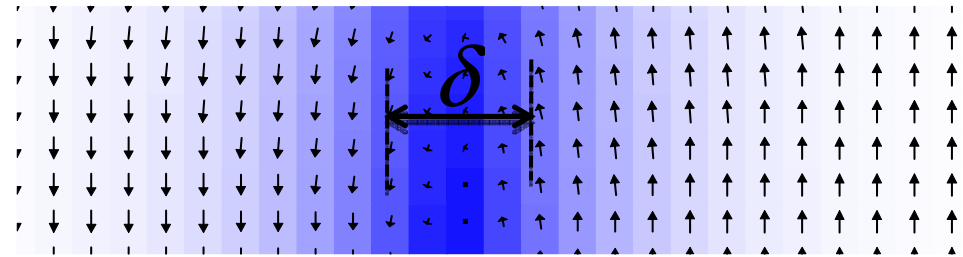


# Longitudes características

9

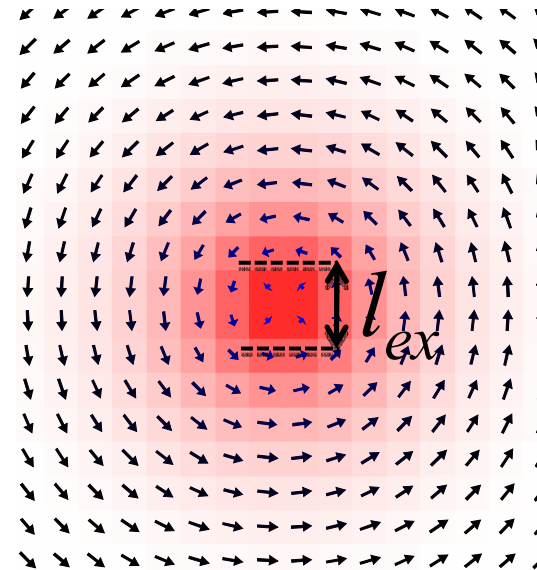
- Anchura de la pared de Bloch

$$\delta = \sqrt{A/K}$$



- Longitud de intercambio

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



# Ecuación dinámica

10

$$\frac{d\vec{M}(\vec{r}, t)}{dt} = -\gamma [\vec{M}(\vec{r}, t) \times \vec{H}_{eff}(\vec{r}, t)] - \alpha \frac{\gamma}{M_s} \vec{M}(\vec{r}, t) \times [\vec{M}(\vec{r}, t) \times \vec{H}_{eff}(\vec{r}, t)]$$

$$\vec{H}_{eff}(\vec{r}, t) = \frac{1}{\mu_0 V} \frac{\delta G(\vec{r}, t)}{\delta \vec{M}} = \frac{2A}{\mu_0} \nabla^2 \vec{M} - \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta \epsilon}{\delta \vec{M}} + \vec{H}_{ext} + \vec{H}_d$$

$$\vec{H}_d(\vec{r}, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{V'} \frac{\nabla \cdot \vec{M}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} (\vec{r} - \vec{r}') dv' + \frac{1}{4\pi} \int_{S'} \frac{\vec{M}(\vec{r}') \cdot \hat{n}(\vec{r}')}{|\vec{r} - \vec{r}'|^3} (\vec{r} - \vec{r}') ds'$$

□ Ecuación integro-diferencial no lineal

□ Resolución numérica

▣ Discretización:  $\vec{M}(\vec{r}, t) \rightarrow \vec{M}_i(t)$

▣ Integración numérica:  $\vec{M}_i(t + \Delta t) = f[\vec{M}_j(t), \vec{H}_{eff,j}(t)]$

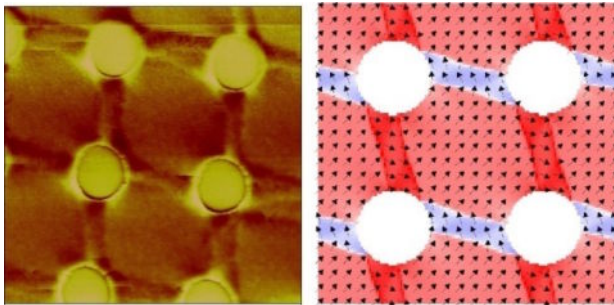
# Problemas estáticos

11

Ecuación de equilibrio

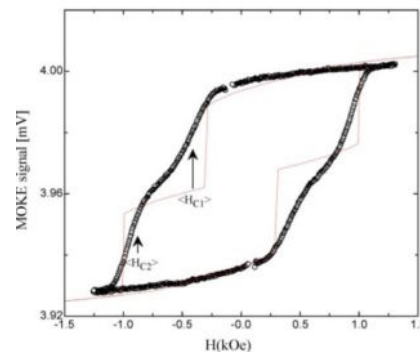
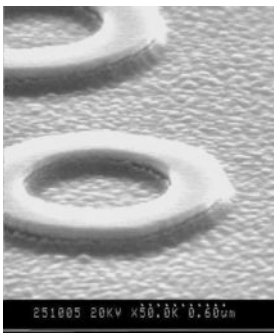
$$\vec{M} \times \vec{H}_{eff} = 0$$

- Configuraciones de mínima energía



□ I. Ruiz-Feal, L. Lopez-Diaz, A. Hirohata *et al.*  
*J. Magn. Magn. Mater.* 242, 597 (2002)

- Ciclos de histéresis (cuasiestáticos)

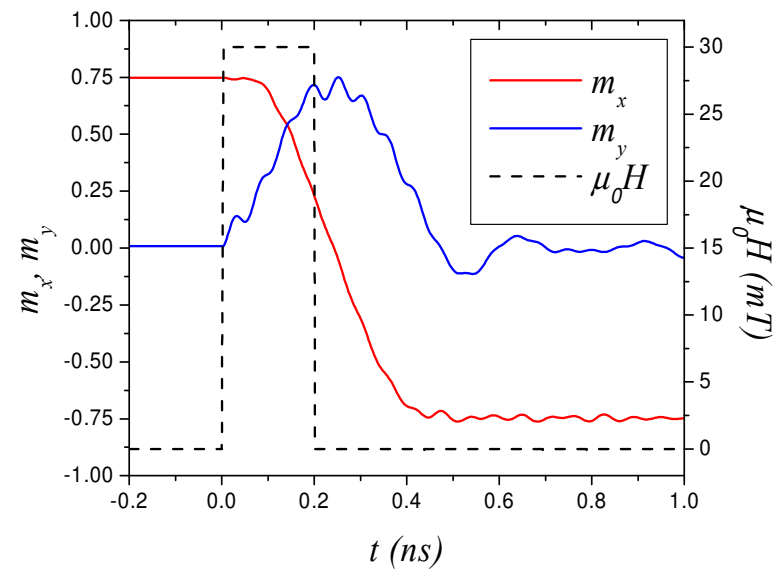
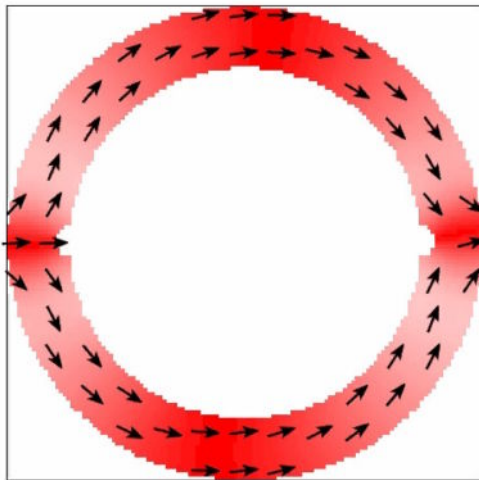


□ J. Rothman, M. Kläui, L. Lopez-Diaz *et al.*  
*Phys. Rev. Lett.* 86, 1098 (2001)

# Problemas dinámicos

12

- Mecanismo de *switching*
- Respuesta a un pulso de campo
- Respuesta a un campo AC



□ L. Lopez-Diaz, J. Rothman, M. Kläui *et al.* **J. Magn. Magn. Mater.** 242, 553 (2002)

# Problemas con fluctuaciones térmicas

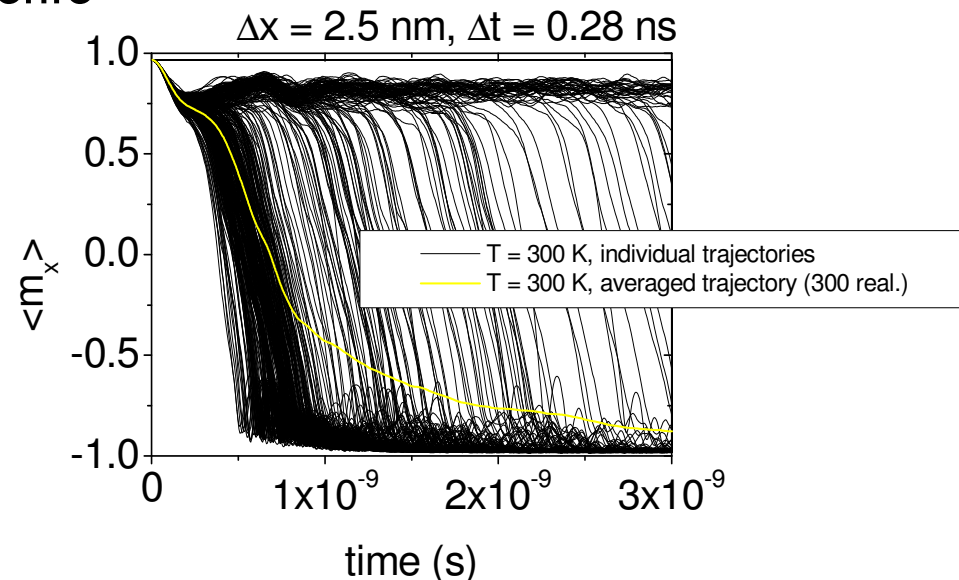
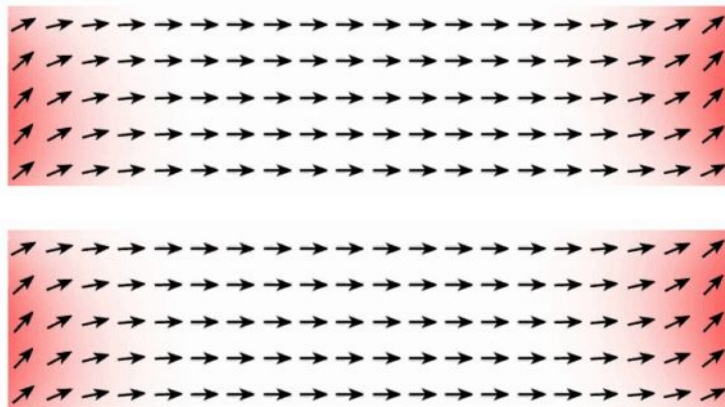
13

Ecuación de Langevin

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma [\vec{M} \times (\vec{H}_{eff} + \vec{H}_{th})] - \alpha \frac{\gamma}{M_s} \vec{M} \times [\vec{M} \times (\vec{H}_{eff} + \vec{H}_{th})]$$

$$\langle H_{th,\alpha}^i(\vec{r}, t) \cdot H_{th,\beta}^j(\vec{r}', t') \rangle = \frac{2 \alpha k_B T}{\gamma \mu_0 M_s V} \delta_{\alpha\beta} \delta_{ij} \delta(t-t')$$

- Switching asistido térmicamente
- Switching activado térmicamente

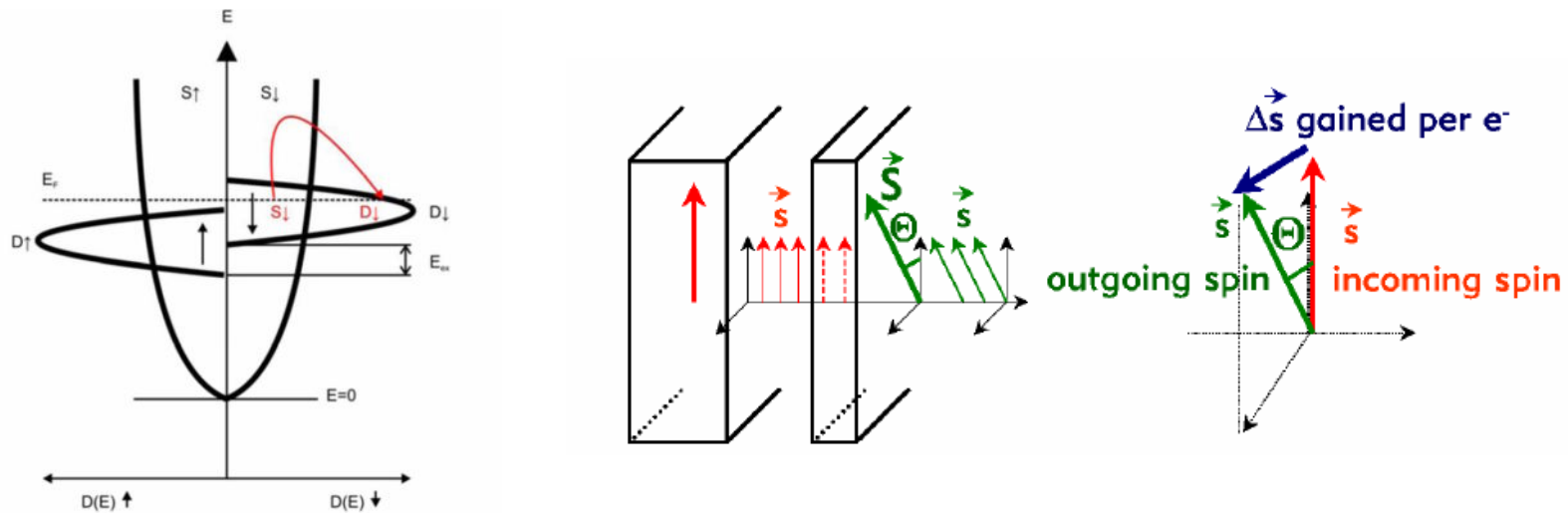


□ E. Martínez, L. Lopez-Diaz, L. Torres *et al.* **J. Phys. D** 40, 942 (2007)

# Par de transferencia de espín

14

- Cuando la corriente atraviesa un FM adquiere una polarización
- Transferencia de momento angular entre la corriente polarizada y la magnetización del segundo FM



📄 J.C. Slonczewski, **J. Magn. Magn. Mat.** 159, L1 (1996)

📄 L. Berger, **Phys. Rev. B** 54, 9353 (1996)

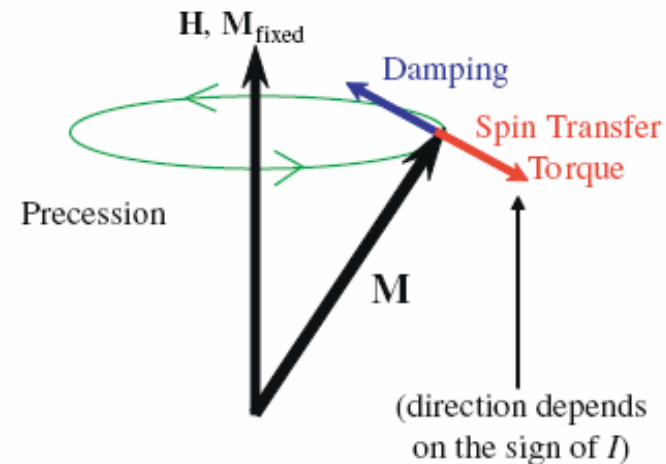
# Par de transferencia de espín

15

## Ecuación de Landau-Lifshitz-Slonzceswki

$$\frac{d\vec{M}}{dt} = -\gamma (\vec{M} \times \vec{H}_{eff}) + \frac{\alpha}{M_s} \vec{M} \times \frac{d\vec{M}}{dt} - \frac{g(\vec{m}, \vec{p}) \mu_B J P}{2 \gamma e d} \vec{M} \times (\vec{M} \times \vec{p})$$

- Switching inducido por corriente
- Auto-oscilaciones
- Hay que tener en cuenta campo de Oersted



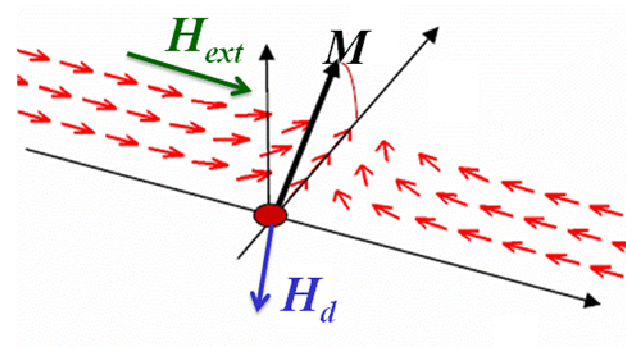
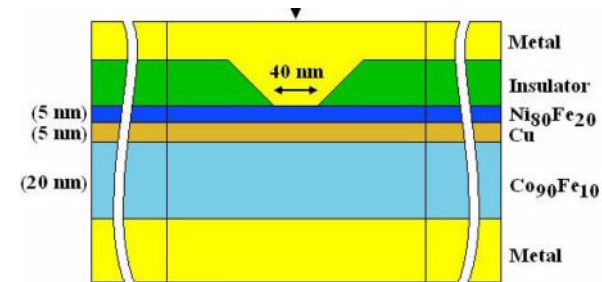
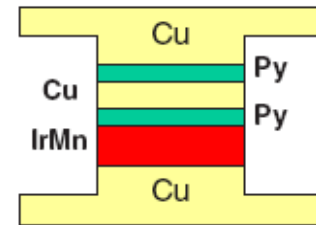
📄 J.C. Slonczewski, **J. Magn. Magn. Mat.** 159, L1 (1996)

📄 L. Berger, **Phys. Rev. B** 54, 9353 (1996)

# Nanoestructuras ferromagnéticas

16

- Columnas (*pillar devices*)
- Contacto puntual (*point-contact devices*)
- Paredes *head-to-head* en nanotiras





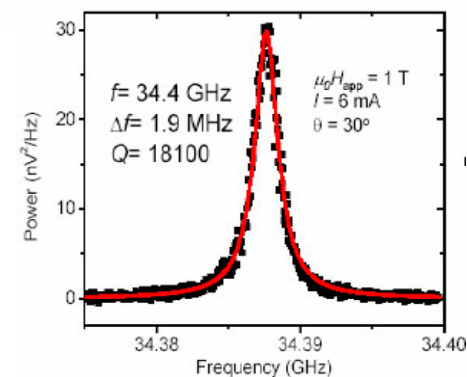
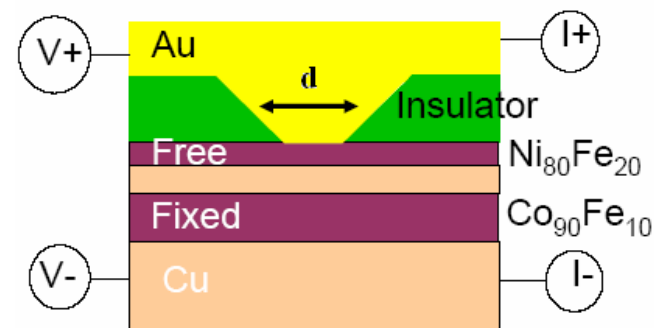
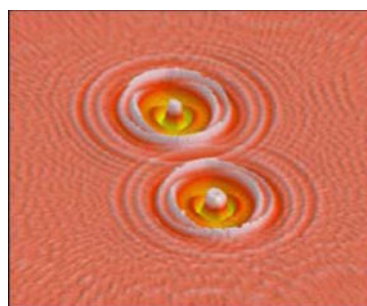
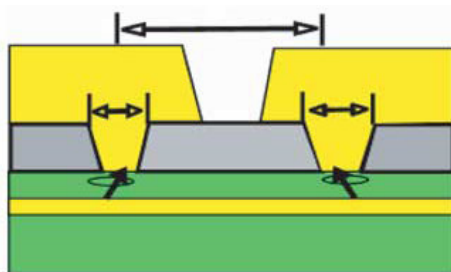
## Estructuras de *point-contact*

- Introducción
- Aspectos computacionales
- Modos de oscilación lineal y *bullet*
- Modos de oscilación de un vórtice
- Otros modos de oscilación

# Introducción

18

- Mayor factor de calidad
- No rugosidad superficial
- Acoplamiento entre varios osciladores a través de radiación de ondas de espín.



□ S. Kaka, M.R. Pufall, W.H. Rippard *et al.* **Nature.** 407, 389 (2005)

# Modo propagante lineal - teoría

19

## □ Hipótesis

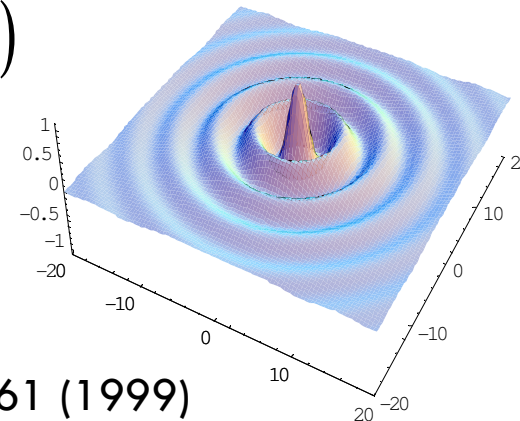
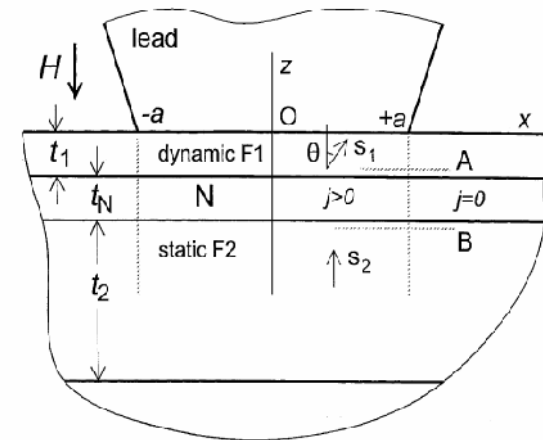
- Magnetización perpendicular al plano
- Linealización

## □ Solución: onda propagante

- Funciones de Hankell y Bessel
- Corriente crítica

$$I_{th} = \frac{e t_1}{\hbar \varepsilon} (23.4 A + 6.31 a^2 \alpha_G M_s H_{eff})$$

- Longitud de onda  $k_{th} = \frac{1.2}{a}$

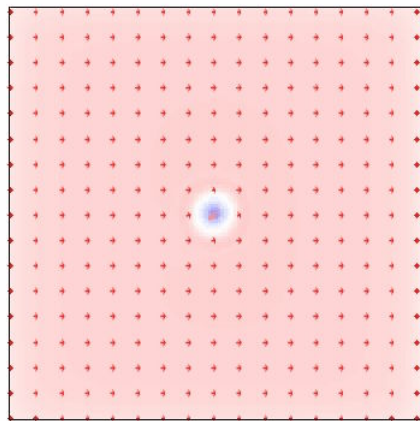


□ J.C. Slonczewski, **J. Magn. Magn. Mater.** 195, L261 (1999)

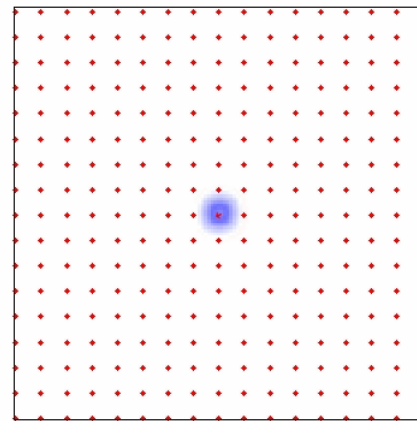
# Modo propagante lineal - simulaciones

20

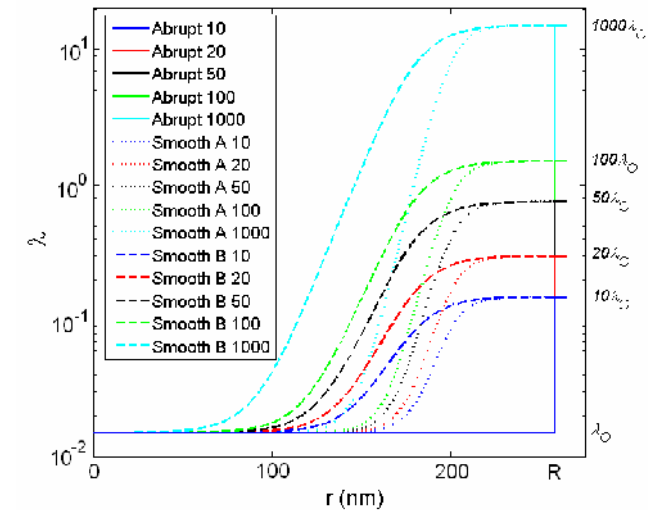
- Reflexiones en las fronteras de la región computacional
- Solución: aumentar la constante de disipación  $\alpha$  de forma gradual lejos del *point-contact* (condiciones de contorno absorbentes)



sin C.C. absorbentes

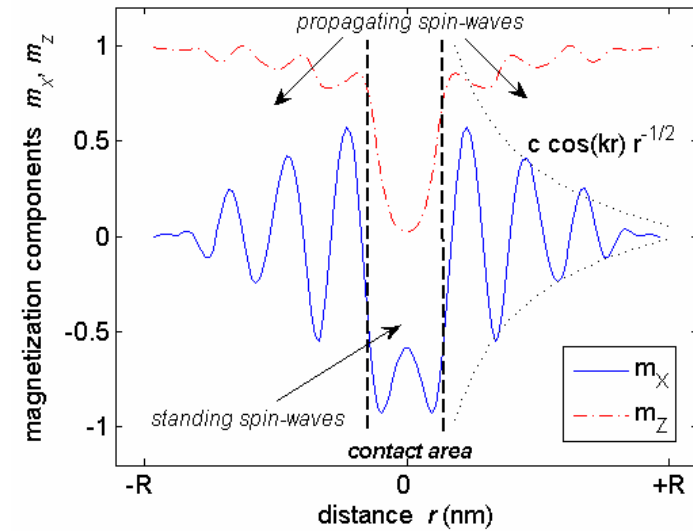
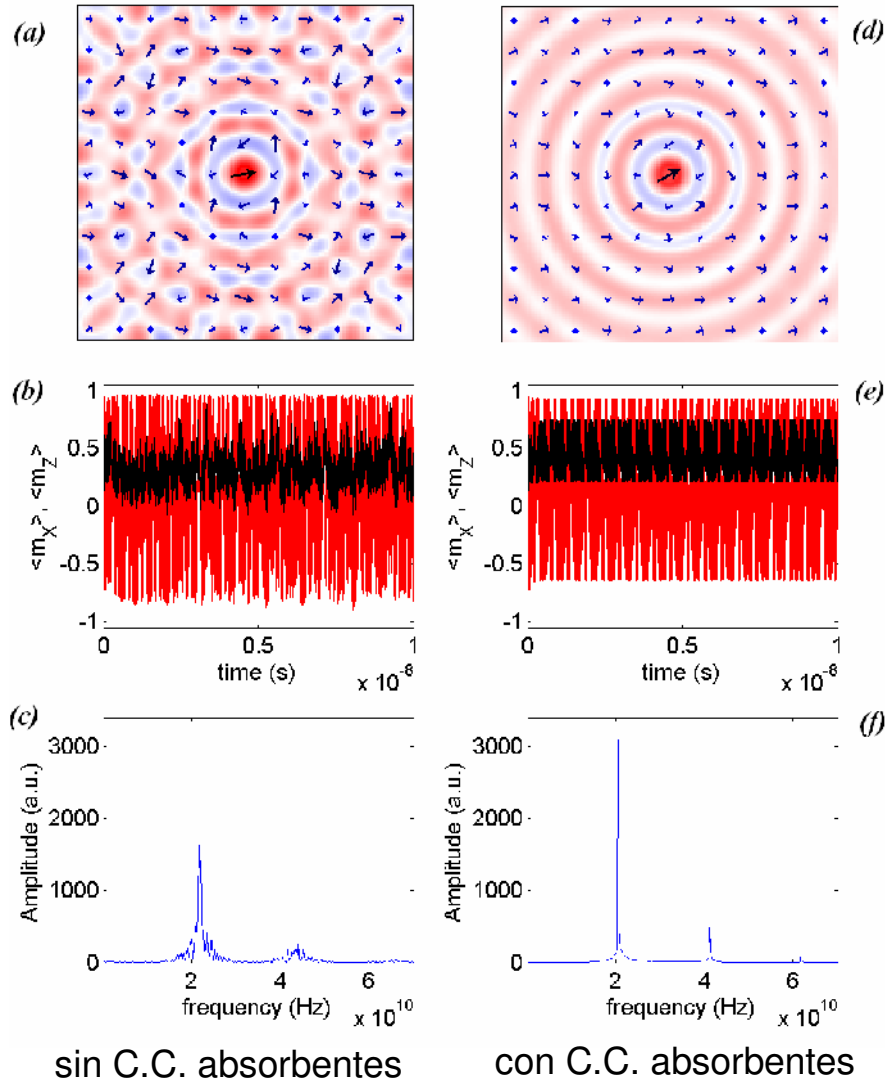


con C.C. absorbentes



# Condiciones de contorno absorbentes

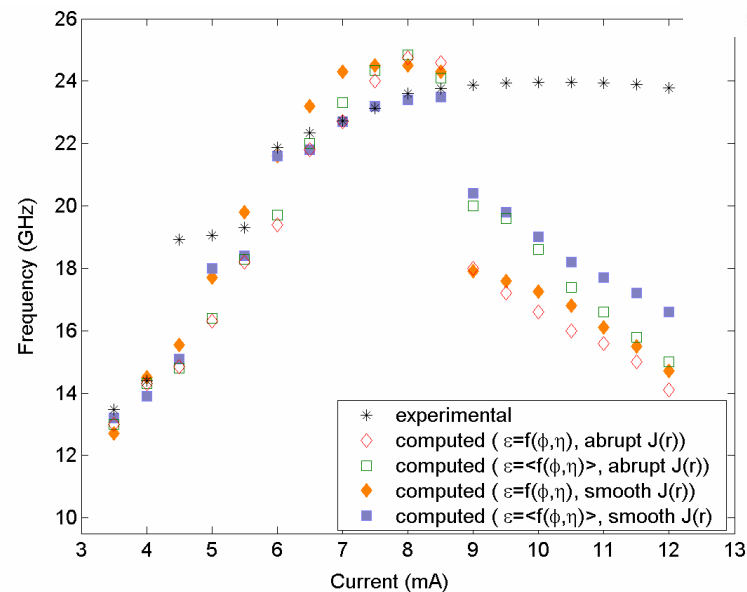
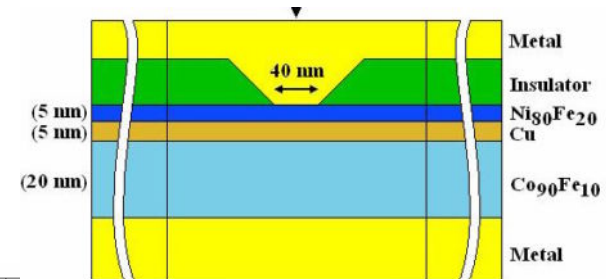
21



# Comparación con datos experimentales

22

- Buen acuerdo cuantitativo para  $I < 9$  mA
- Excitación del modo propagante lineal



📄 W.H. Rippard, M.R. Pufall, S. Kaka, *et al.* **Phys. Rev. Lett.** 92, 027201 (2004).

📄 G. Consolo, L. Lopez-Diaz, L. Torres *et al.* **Phys. Rev. B.** 75, 214428 (2007).

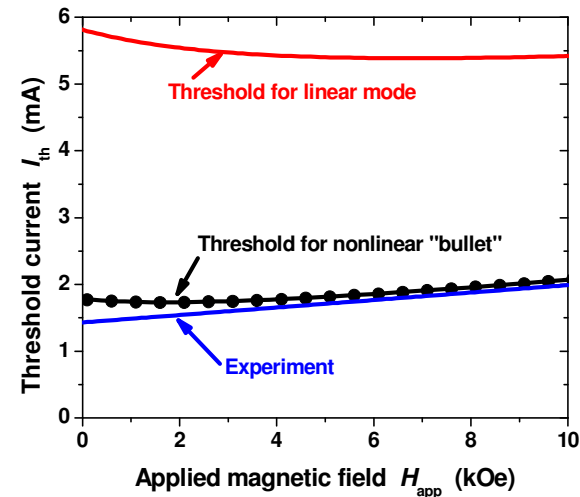
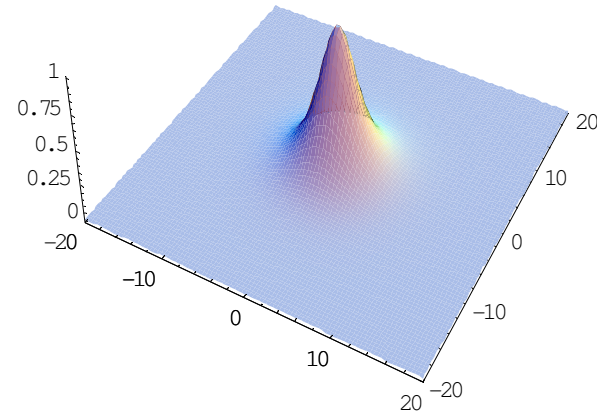
# Modo localizado no lineal - teoría

23

- Hipótesis:
  - Magnetización en el plano
- Solución: onda evanescente
  - Dependencia espacial

$$A_{bullet}(\vec{r}) \propto \frac{e^{-|k|r}}{r^{1/2}}$$

- Frecuencia
$$\omega_{bullet} = \omega_{FMR} + Dk^2 < \omega_{FMR}$$
- Corriente umbral menor que el modo propagante lineal

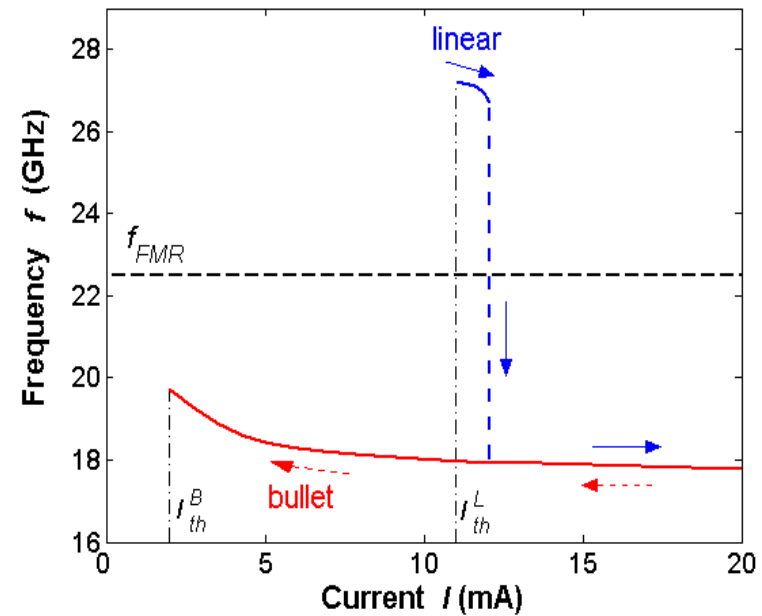
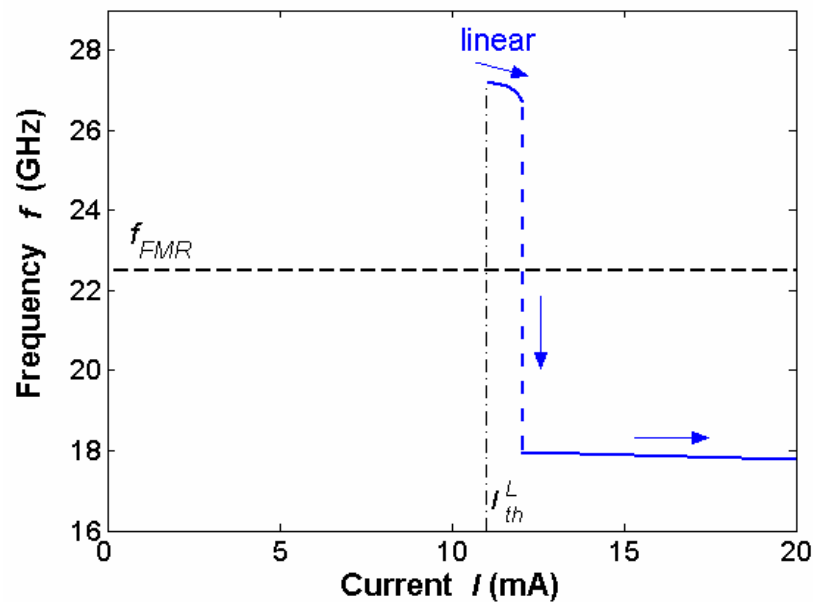


□ A. Slavin, V. Tiberkevich, **Phys. Rev. Lett.** 95, 237201 (2005)

# Modo localizado no lineal - simulación

24

- ¿Por qué no se obtiene este modo en las simulaciones?
- Excitación histerética del *bullet mode*
- Modo subcríticamente inestable

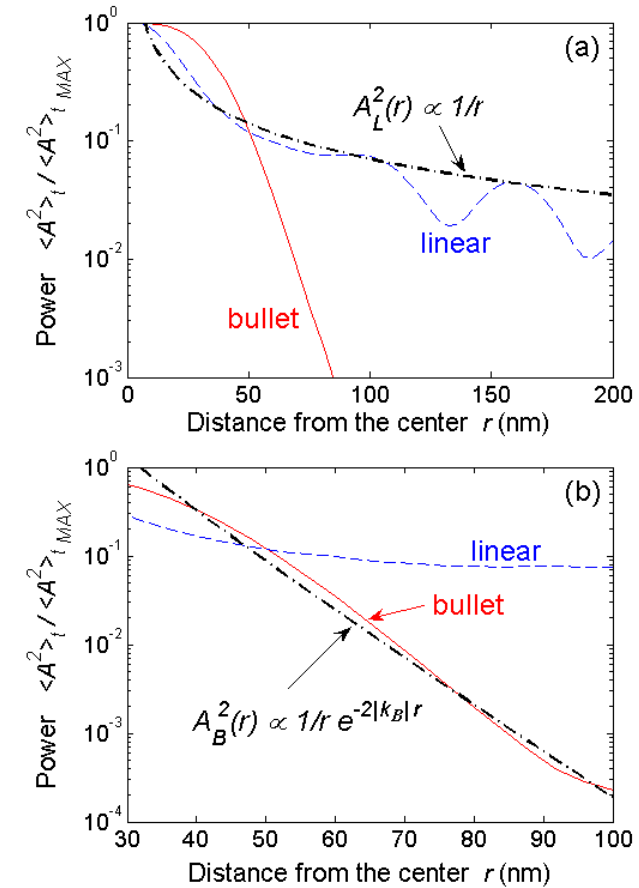
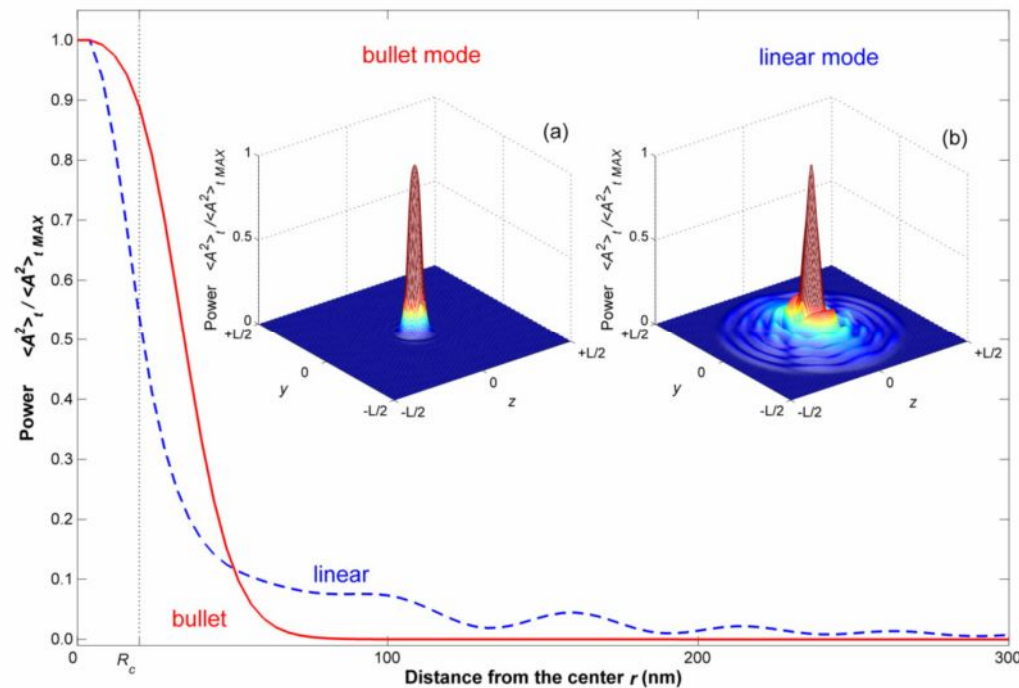


📄 G. Consolo, B. Azzerboni *et al.* **Phys. Rev. B** 75, 214428 (2007)



# Modos propagante y *bullet*

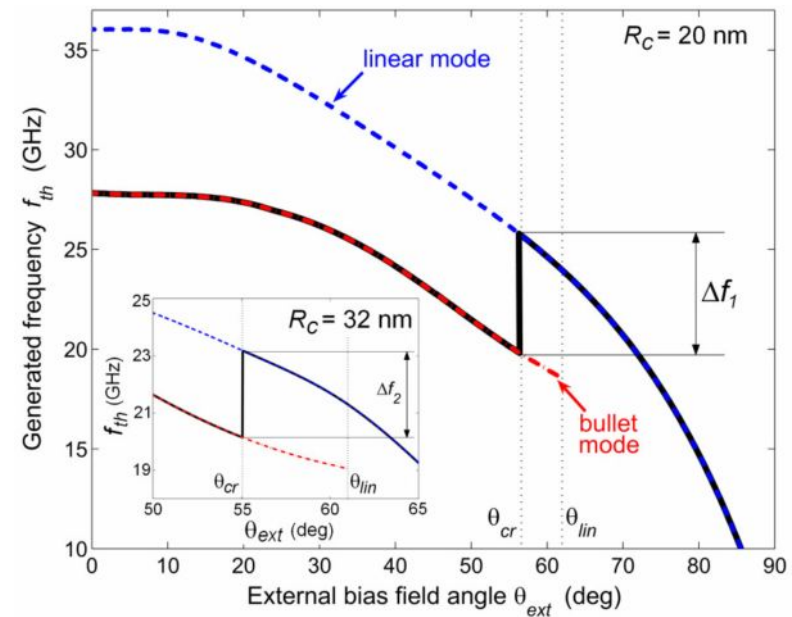
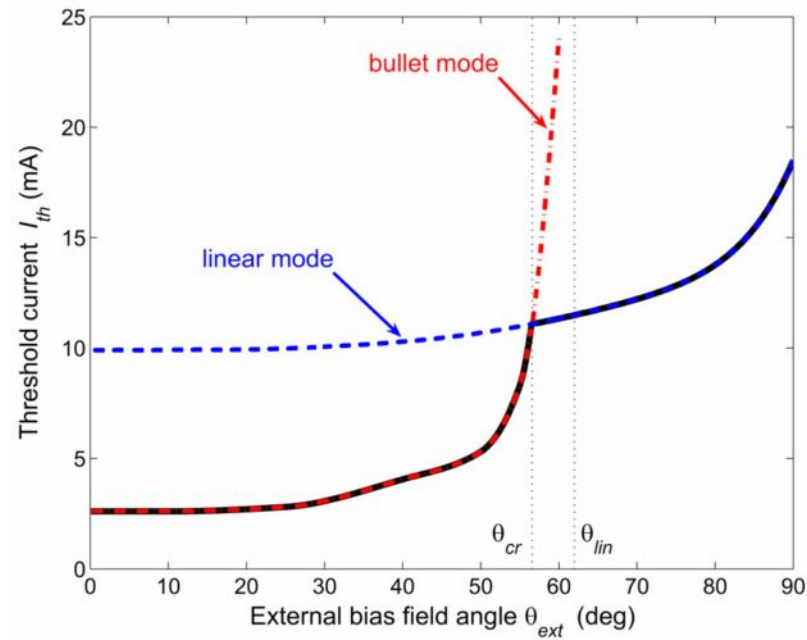
25



📄 G. Consolo, L. Lopez-Diaz *et al.* **Phys. Rev. B** 75, 214428 (2007)

# Dependencia angular del modo excitado

26

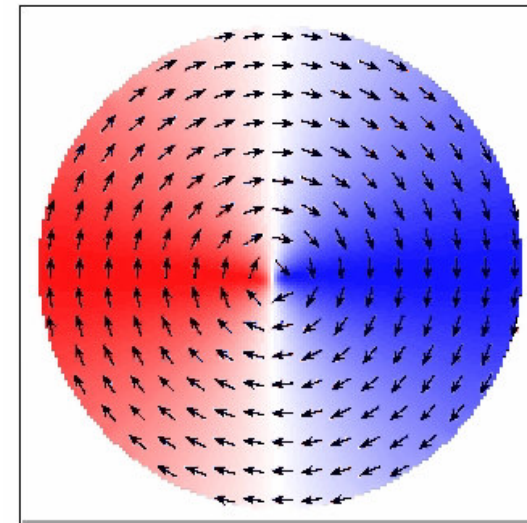
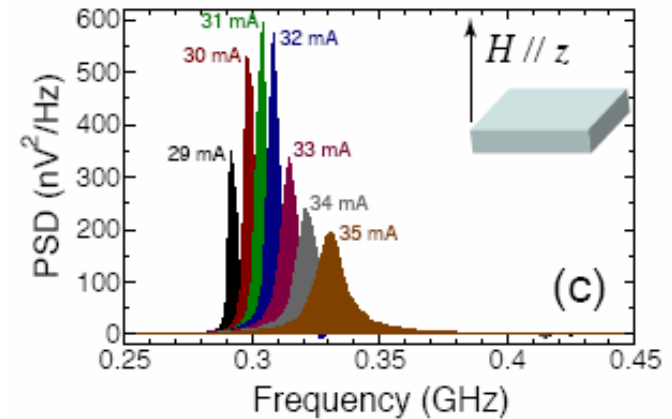
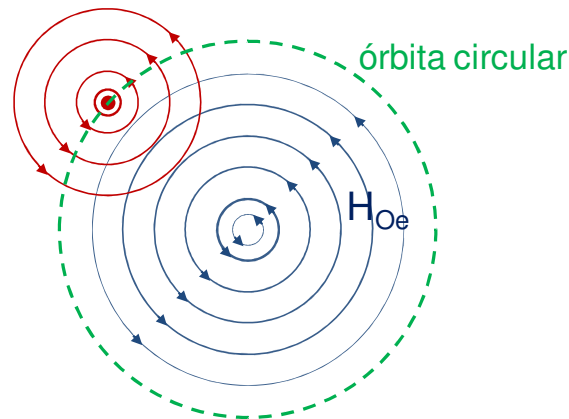


 G. Consolo, B. Azzaroni, L. Lopez-Diaz *et al.* **Phys. Rev. B** 78, 014420 (2008)

# Excitación de un vórtice

27

- Oscilaciones de muy baja frecuencia
- El campo de Oersted nuclea un vórtice
- El vórtice describe un movimiento circular fuera de la región del *point-contact*
- Equilibrio entre par de espín (repulsión) y el campo de Oersted (atracción)

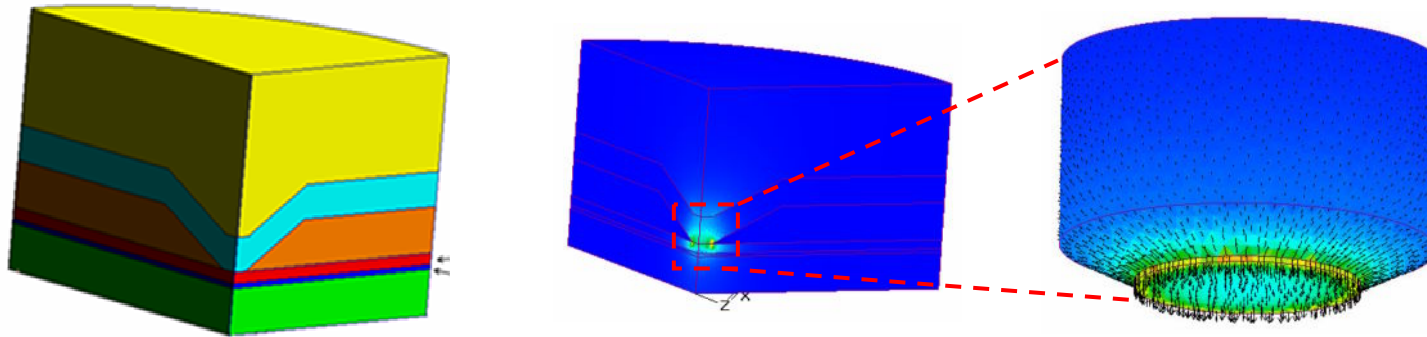


□ Q. Mistral, M. van Kampen, G. Hrkac *et al.* **Phys. Rev. Lett.** 100, 257201 (2008)

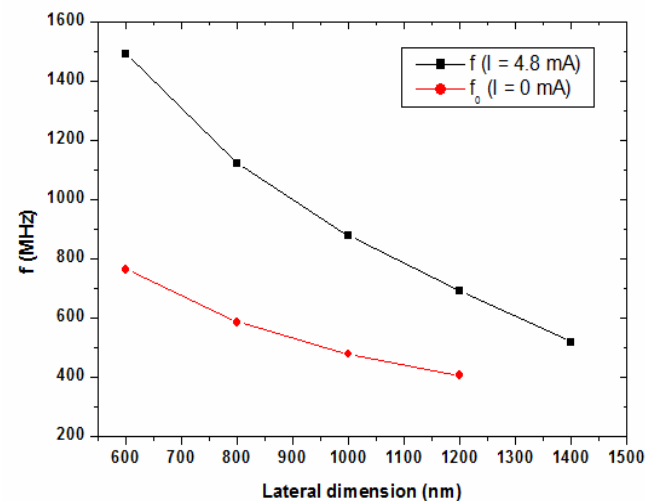
# Excitación de un vórtice - simulaciones

28

- Es importante calcular la distribución de corriente y el campo de Oersted asociado de forma rigurosa



- Problema: dependencia del resultado con el tamaño de la región computacional



# Conclusiones

- En los sistemas de tipo *point-contact* son interesantes para estudio de excitación y propagación de ondas de espín.
- En ellos son posibles varios modos de oscilación de muy diversas características
- Se han producido avances, pero todavía no se dispone de una visión global
- Hacen falta modelos cuantitativos que permitan predecir el comportamiento de estos dispositivos
- La modelización micromagnética resulta útil para una mejor comprensión de las oscilaciones y para conectar con los resultados experimentales.