



# Estudio de Resonancia Ferromagnética con Bombeo de Espín en el Aislante Topológico Bi<sub>2</sub>Se<sub>3</sub>



Alejandro Silvestre Novoa Gastaldi  
silvestre.novoa@ciencias.unam.mx

## Resumen

Se analizaron dispositivos bicapa de materiales magnéticos (FM) y no-magnéticos (NM):



CoFeB/Pt, CoFeB/Ir, y BiSe/Py.

El análisis fue por la técnica de resonancia ferromagnética con bombeo de espín (SP-FMR) para caracterizar el ángulo Hall de Espín de cada dispositivo.

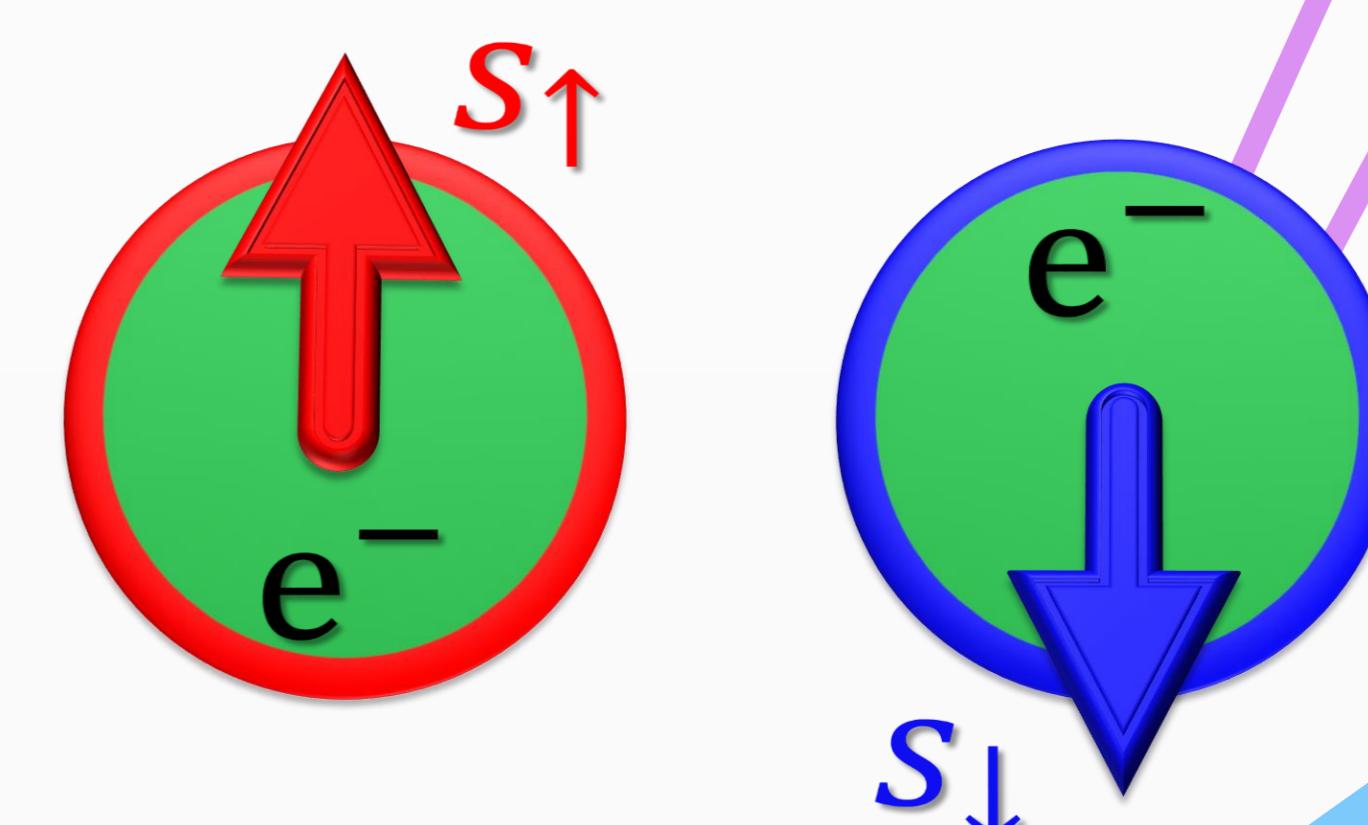
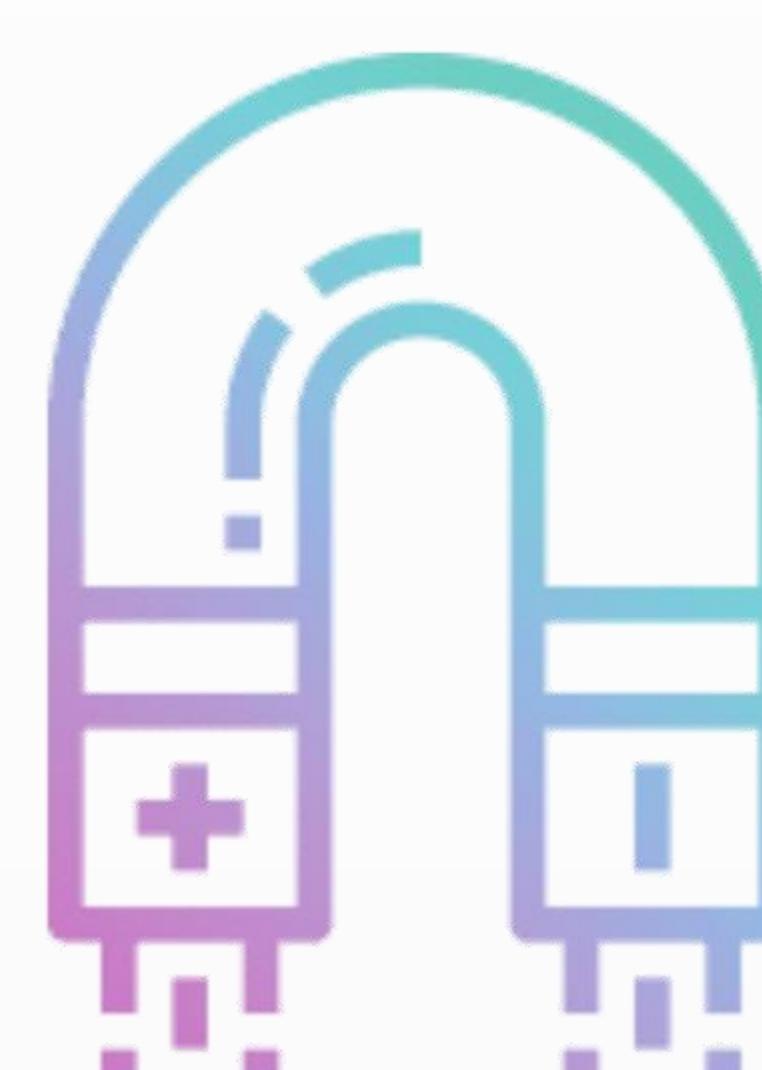
# TEORÍA

## ¿Qué es el Espín?

Es la “carga” magnética.

Un electrón tiene tanto carga eléctrica ( $e^-$ ) como magnética ( $s$ ).

La “carga” magnética tiene dirección.

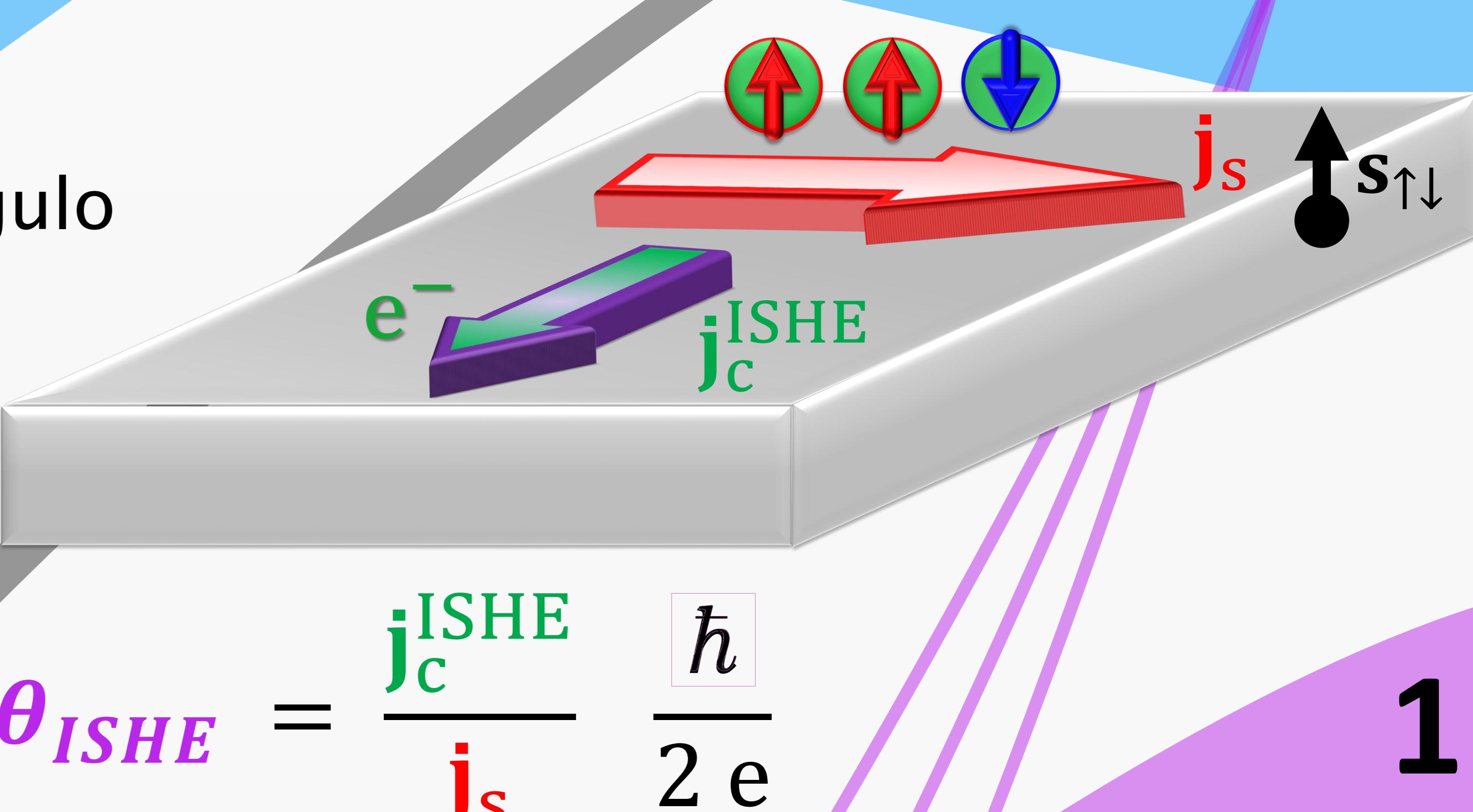


## ¿Qué es el ángulo Hall de Espín?

La corriente magnética  $j_s$  (de espín) puede generar una corriente eléctrica  $j_c^{ISHE}$  por dispersión.

El ángulo Hall de espín  $\theta_{ISHE}$  no es un ángulo geométrico, en realidad es una

Tasa de conversión de corriente de espín a corriente de carga



$$\theta_{ISHE} = \frac{j_c^{ISHE}}{j_s} \cdot \frac{\hbar}{2e}$$



# Estudio de Resonancia Ferromagnética con Bombeo de Espín en el Aislante Topológico $\text{Bi}_2\text{Se}_3$



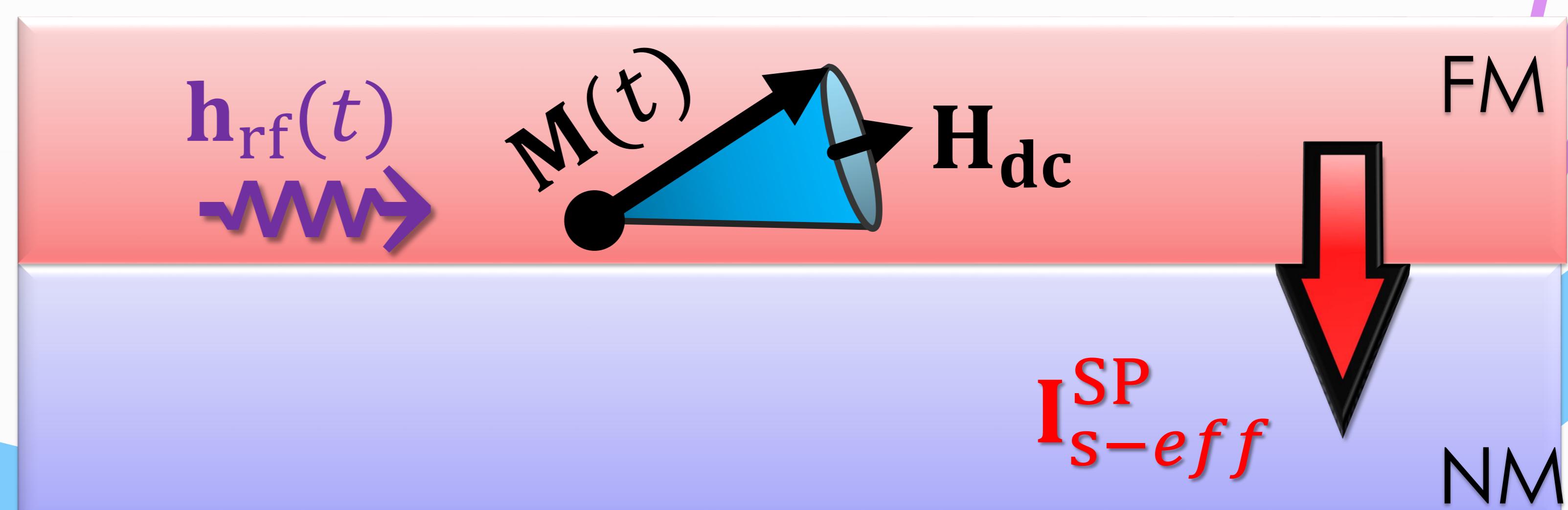
# TEORÍA

## ¿Qué es la SP-FMR?

Siglas de Resonancia Ferromagnética con Bombeo de Espín

Al sistema se aplica un campo magnético  $\mathbf{h}_{\text{rf}}(t)$  que varía en el tiempo, y un campo magnético  $\mathbf{H}_{\text{dc}}$  constante en el tiempo.

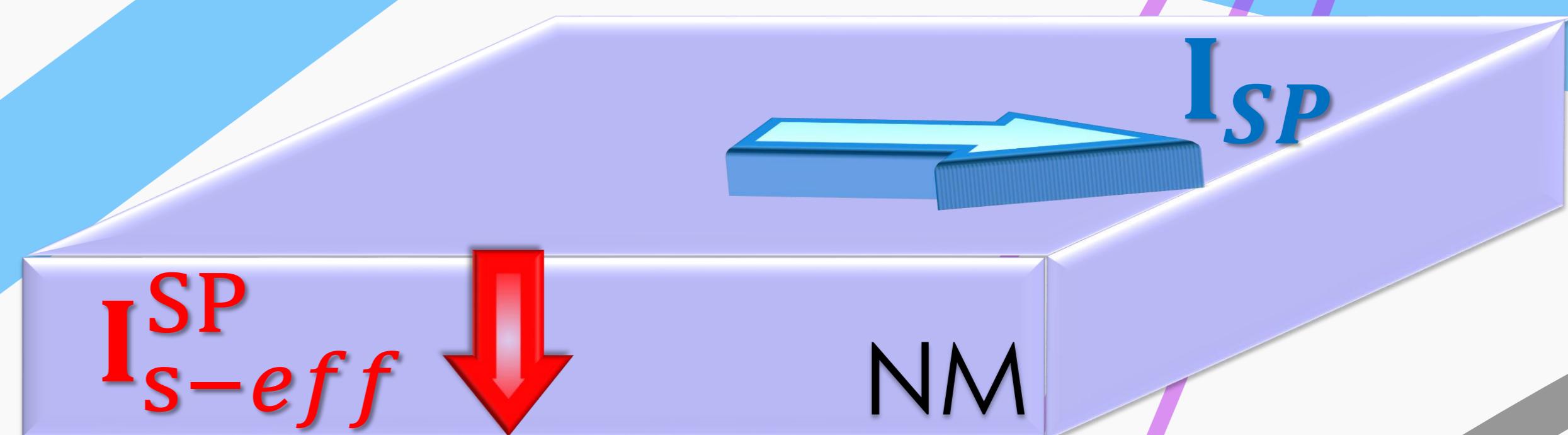
La combinación de los campos  $\mathbf{h}_{\text{rf}}(t)$  y  $\mathbf{H}_{\text{dc}}$  genera una magnetización  $\mathbf{M}(t)$  que varia en el tiempo, que se traduce en una corriente magnética (de espín):  $I_s(\mathbf{M})$



No toda la corriente de espín logra atravesar la interfaz entre los materiales,  $g_{\text{FM/NM}}$  caracteriza la cantidad de corriente que logra atravesar:  $I_{\text{s-eff}}^{\text{SP}}$

$$I_{\text{s-eff}}^{\text{SP}} = g_{\text{FM/NM}} I_s(\mathbf{M})$$

La corriente de espín  $I_{\text{s-eff}}^{\text{SP}}$  genera una corriente eléctrica  $I_{\text{SP}}$  por dispersión.



En un experimento ya se puede medir  $I_{\text{SP}}$ . Que depende de  $I_{\text{s-eff}}^{\text{SP}}$  por una función  $f(t_{\text{NM}})$  de como se difumina la corriente en el grosor  $t_{\text{NM}}$ .

$$I_{\text{SP}} = \theta_{\text{ISHE}} f(t_{\text{NM}}) I_{\text{s-eff}}^{\text{SP}}$$

Finalmente, se puede despejar  $\theta_{\text{ISHE}}$



# Estudio de Resonancia Ferromagnética con Bombeo de Espín en el Aislante Topológico $\text{Bi}_2\text{Se}_3$



# EXPERIMENTO

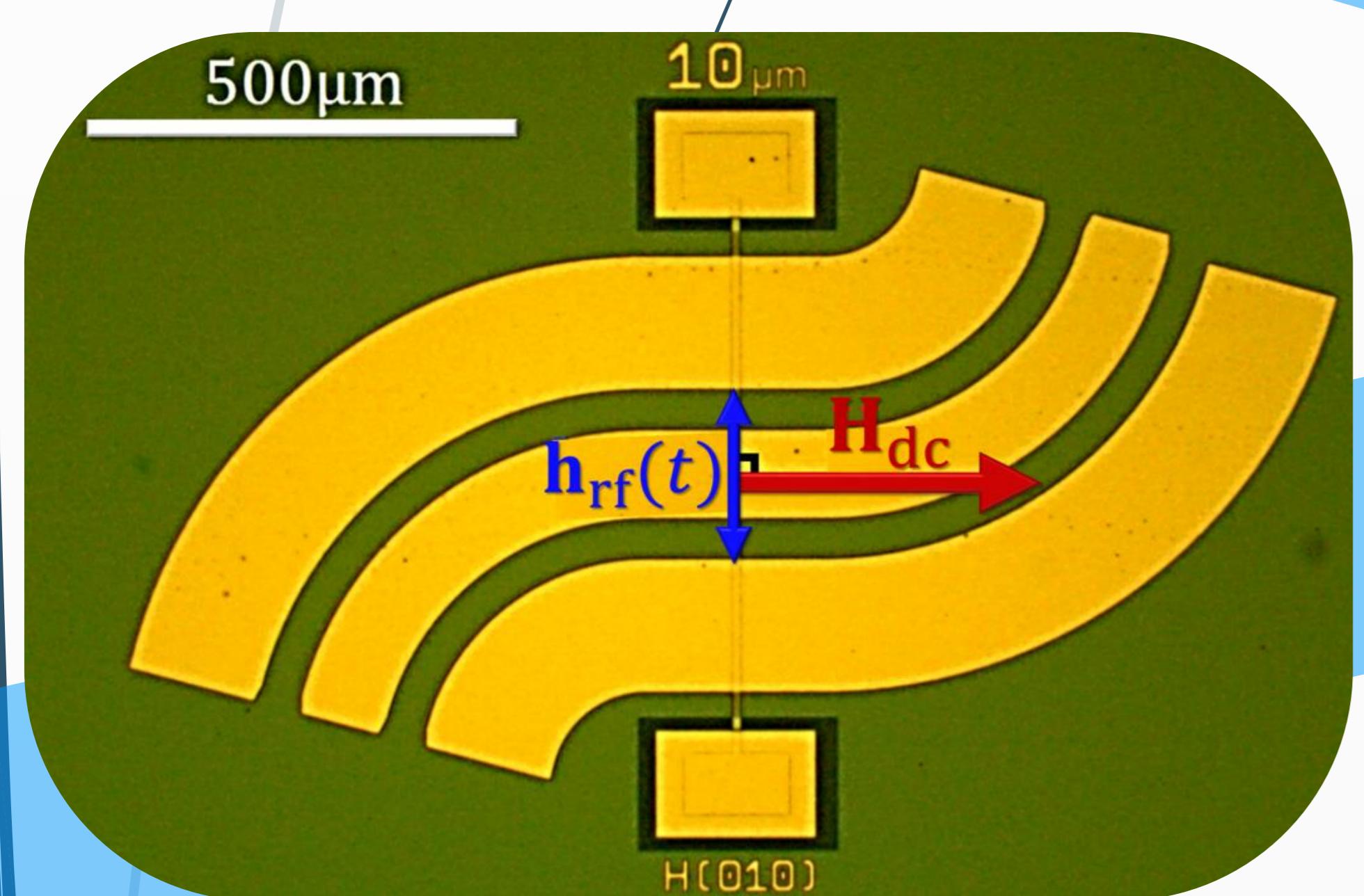
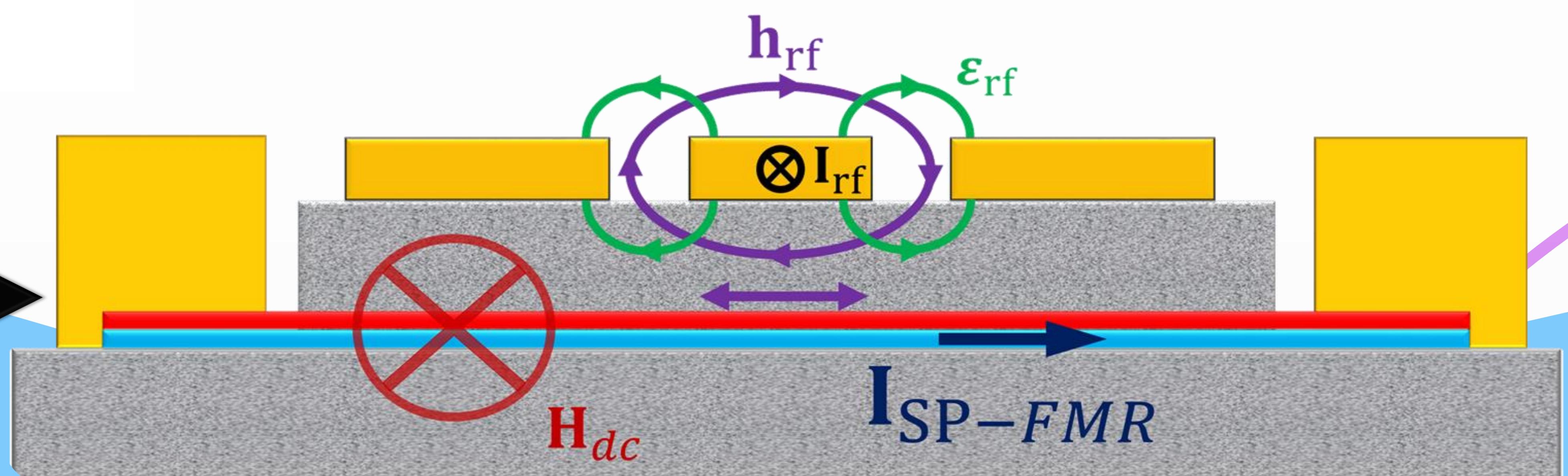
## Agradecimientos

Al programa L'Initiative Lorraine Université d'Excellence

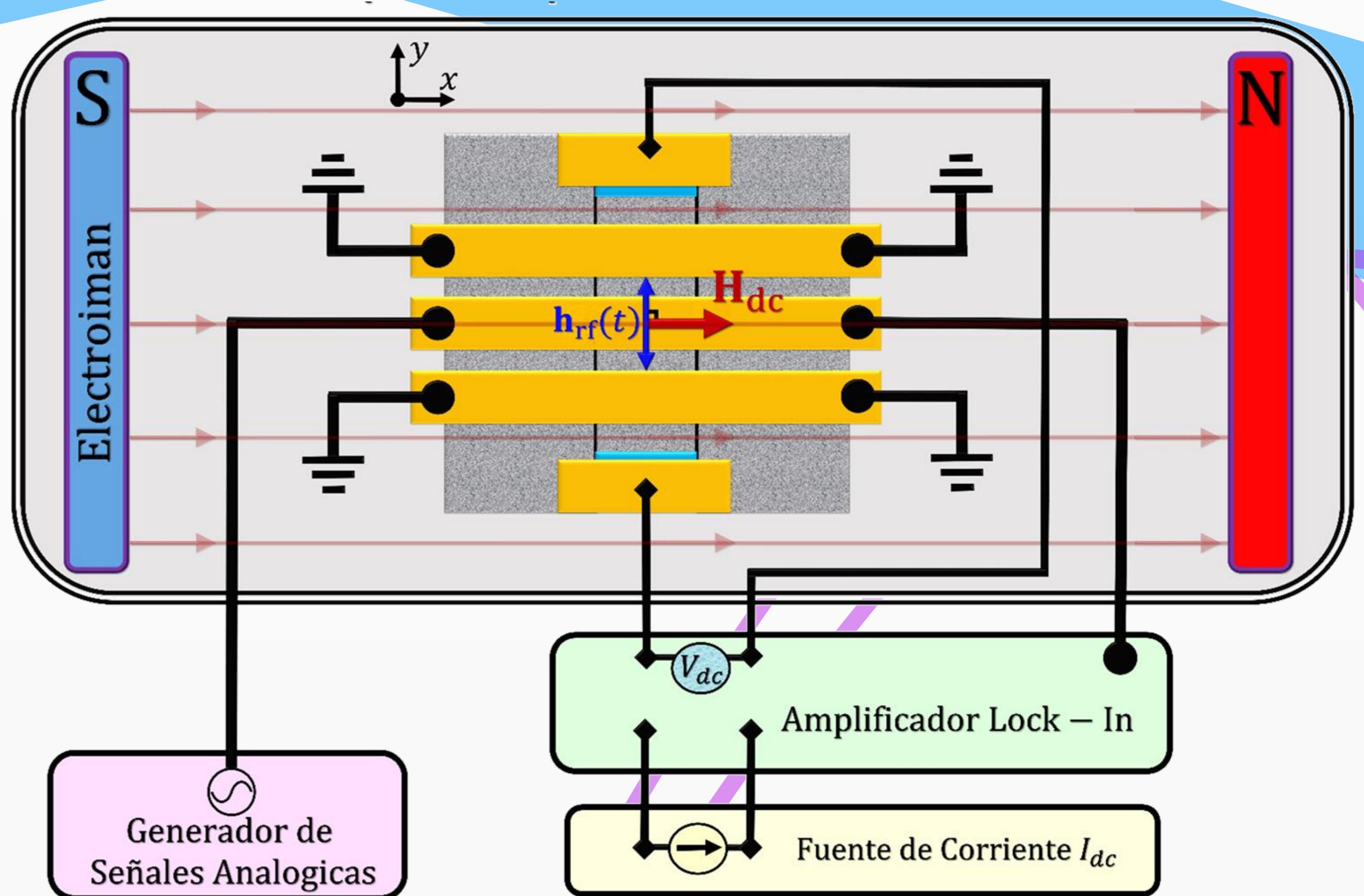
## ¿Cómo se mide?

El dispositivo se compone de la bicapa (  ) y 5 electrodos (  ).

La corriente se mide con los electrodos que tienen contacto con la bicapa (  )

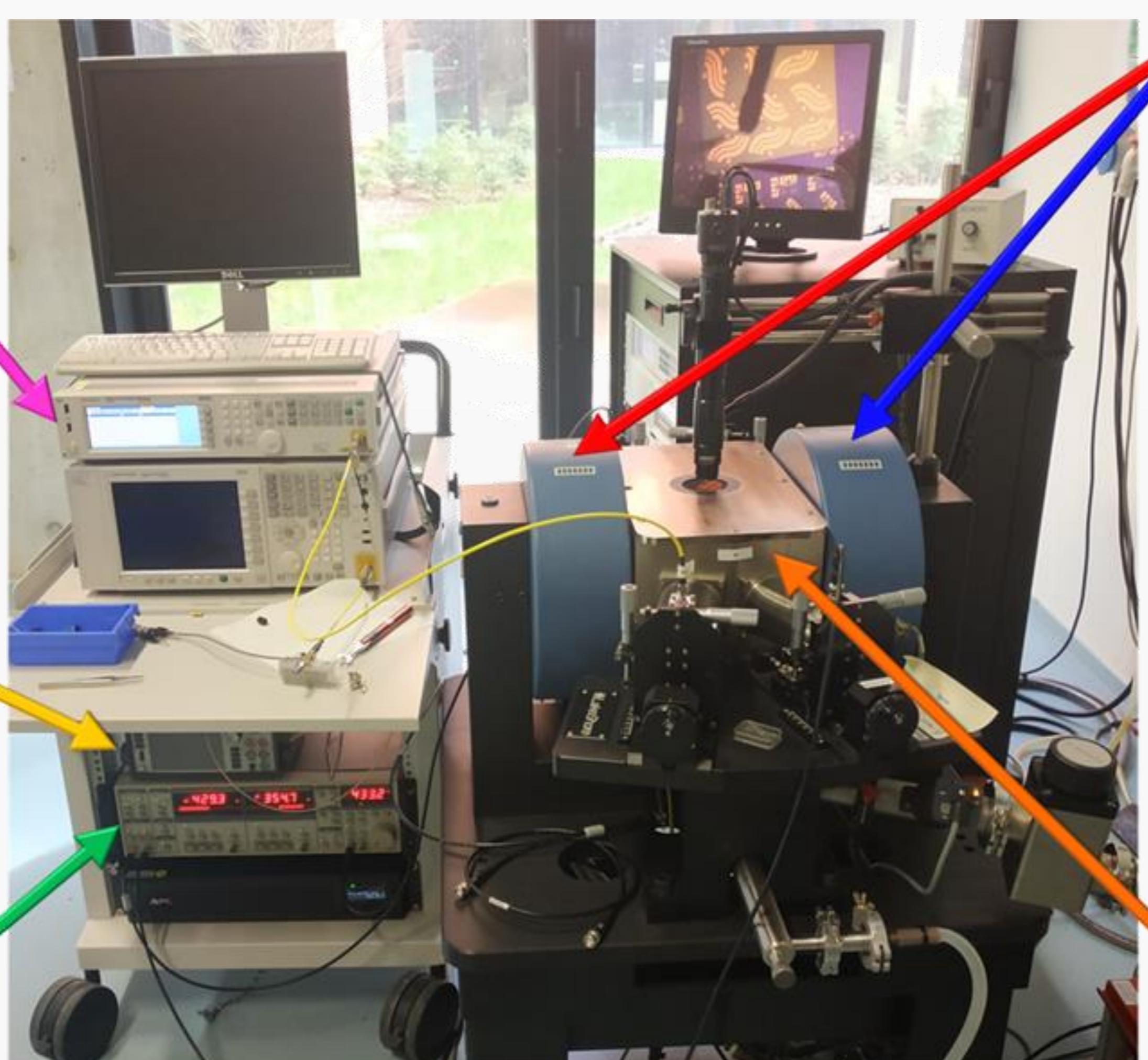


Los 3 electrodos de en medio sirven para inyectar una corriente AC que genera el campo magnético  $h_{rf}(t)$  que varía en el tiempo



El dispositivo se coloca en una cámara donde se generara un campo magnético constante, y se conectan sus electrodos para medir la corriente  $I_{SP}$

Generador de Señales Analógas



Fuente de Corriente

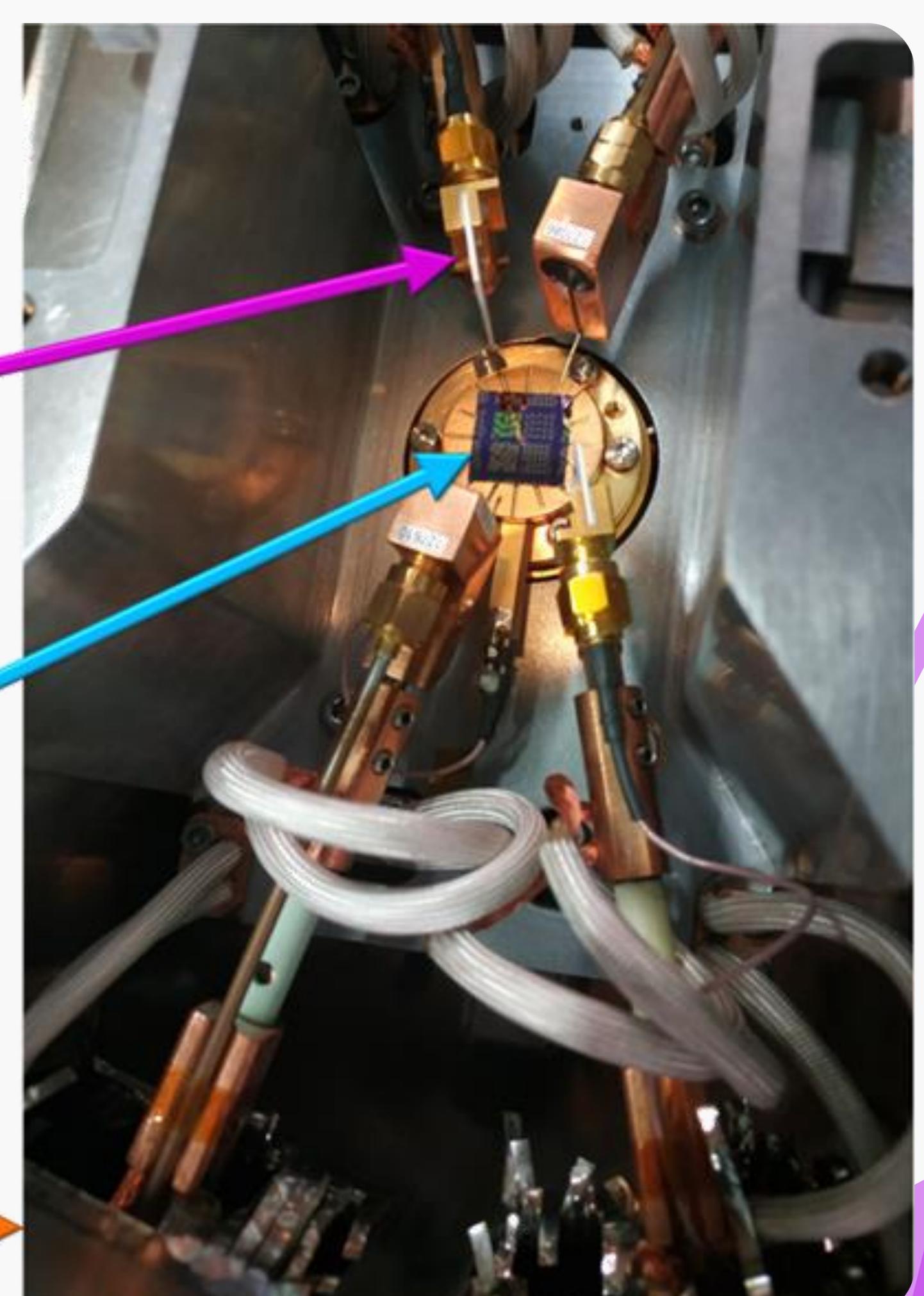
Amplificador Lock-In

Electroimanes

Contactos

Muestra

Cámara de Medición





# Estudio de Resonancia Ferromagnética con Bombeo de Espín en el Aislante Topológico $\text{Bi}_2\text{Se}_3$



Alejandro Silvestre Novoa Gastaldi  
silvestre.novoa@ciencias.unam.mx

# ANÁLISIS DE DATOS

Análisis realizado con **Excel, OriginLab y Python**

Reescribiendo las ecuaciones de TEORÍA a detalle

$$V_{SP} = \theta_{ISHE} W \lambda_{sf} \tanh\left(\frac{t_{NM}}{2\lambda_{sf}}\right) R j_{s-eff}^{SP}$$

donde la densidad de corriente es:

$$j_{s-eff}^{SP} = \frac{e}{\pi} \frac{4\pi M_s t_{FM}}{g \mu_B} (\alpha_{F/N} - \alpha_F) \frac{\gamma_0^2 h_{rf}^2}{\alpha_{F/N}^2} \frac{\gamma_0 M_s + \sqrt{\gamma_0^2 M_s^2 + 16\pi^2 f^2}}{\gamma_0^2 M_s^2 + 16\pi^2 f^2}$$

Objetivo: Determinar  $\theta_{ISHE}$

[3] DOI: 10.1016/j.physrep.2016.10.002  
[4] DOI: 10.1103/PhysRevB.102.064425

Parámetros Desconocidos: Magnetización  $M_s$  y amortiguamiento  $\alpha_{F/N}$

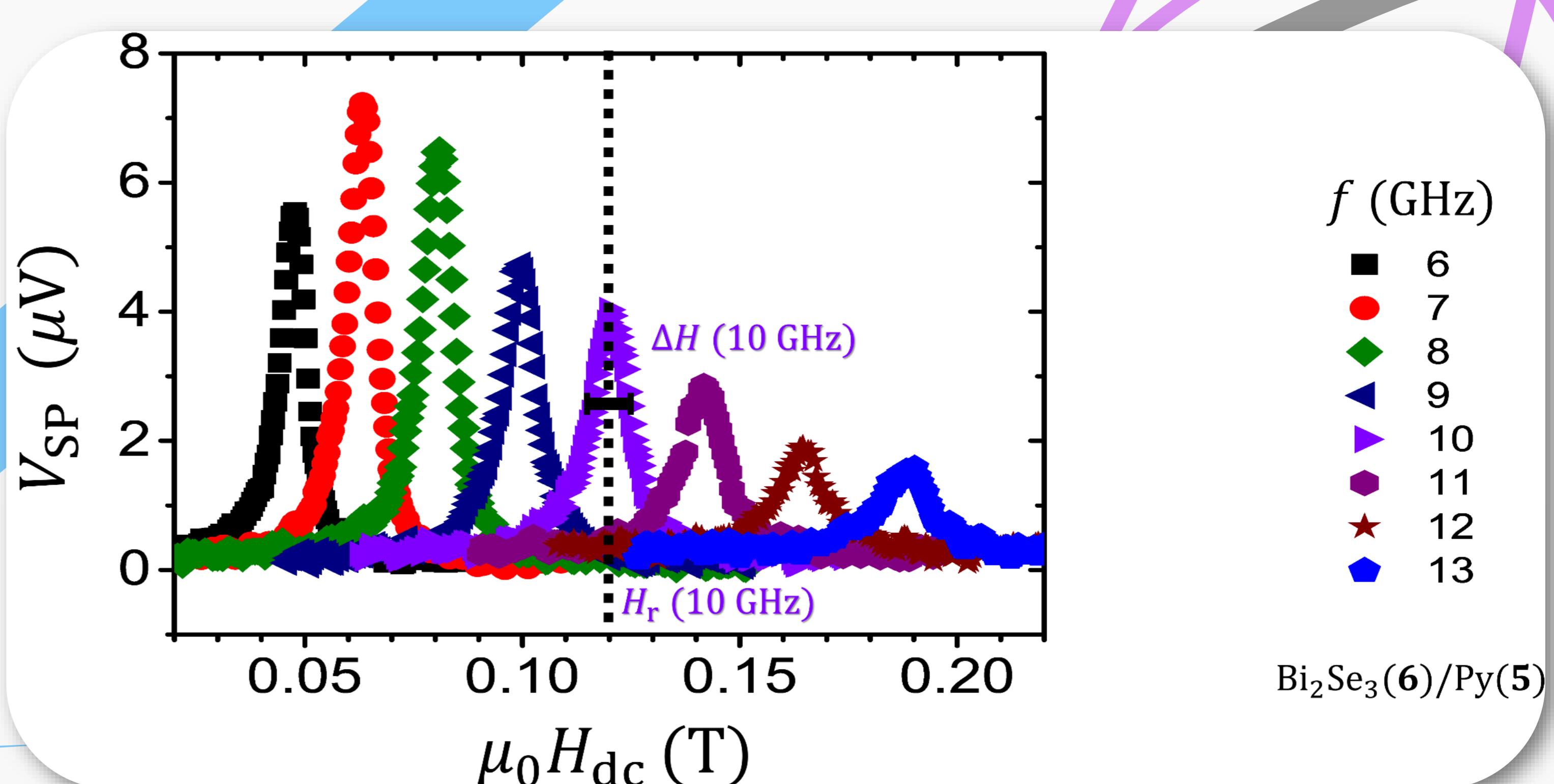
Data: Voltaje  $V_{SP}(H_{dc}, f)$  en función del campo magnético y frecuencia

Archivos por frecuencia

10 GHz	008_Rmw(H)_SPFMR_049_CoFeBSPt4_5183_ohm_10um H_010.in
Archivo	Edición
Formato	Ver Ayuda
2759.5600000000 0.0000036736	0.0000003236
2764.2900000000 0.0000036527	0.0000003139
2762.9500000000 0.0000036517	0.0000001183
2760.8900000000 0.0000035358	0.0000000419
2758.4900000000 0.0000034581	-0.000000433
2755.6500000000 0.0000034659	0.0000001225

11 GHz	004_Rmw(H)_SPFMR_049_CoFeBSPt4_5183_ohm_10um H_010.in
Archivo	Edición
Formato	Ver Ayuda
302.2190000000 -0.0000062549	0.0000006929
1442.4500000000 -0.0000099056	0.0000016280
1446.4200000000 -0.0000096337	0.0000018962
1444.5500000000 -0.0000093841	0.0000019372
1441.8300000000 -0.0000091047	0.0000016764
1438.6300000000 -0.0000087731	0.0000013970



De  $V_{SP}(H_{dc}, f)$  se extraen los parámetros:  $H_r(f)$  valor asociado al pico  
 $\Delta H(f)$  ancho del pico



# Estudio de Resonancia Ferromagnética con Bombeo de Espín en el Aislante Topológico $\text{Bi}_2\text{Se}_3$



¿Cómo determinamos los Parámetros Desconocidos?

Usando  $H_r(f)$  y  $\Delta H(f)$  en un 2º modelo.

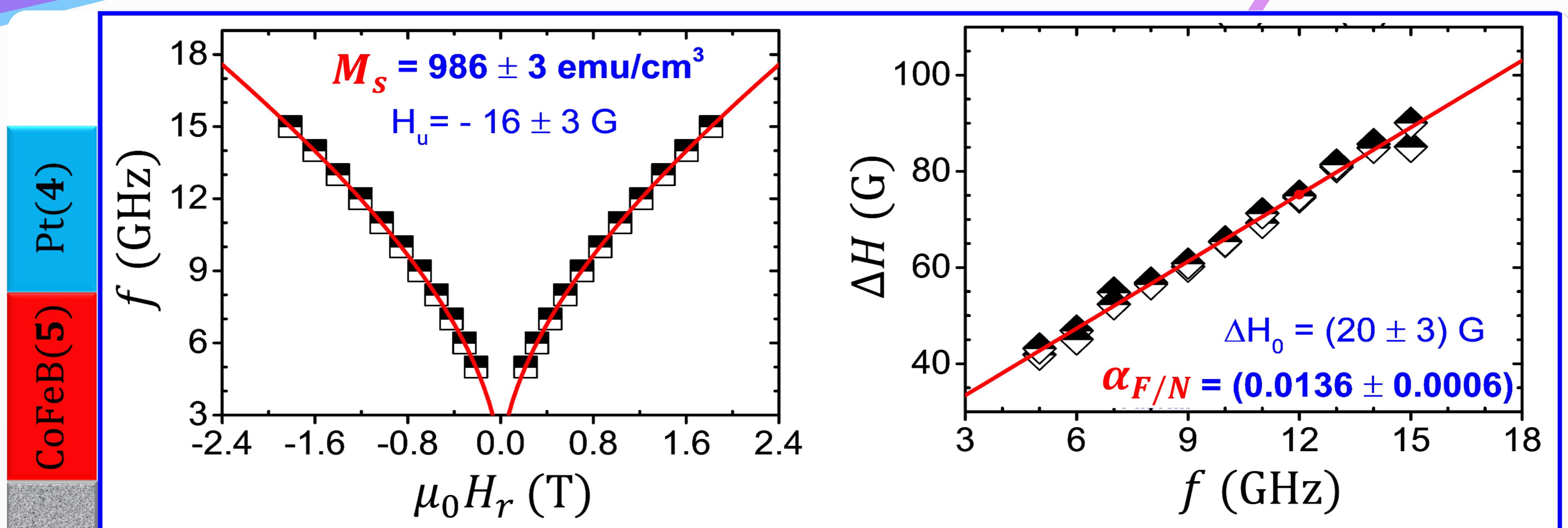
Realizando un ajuste de  $H_r(f)$  y  $\Delta H(f)$  respecto a la frecuencia, esas funciones dependen de la magnetización  $M_s$  y el amortiguamiento  $\alpha_{F/N}$

$$f = \frac{\gamma_0}{2\pi} \sqrt{(H_r + H_u)(4\pi M_s + H_r + H_u)}$$

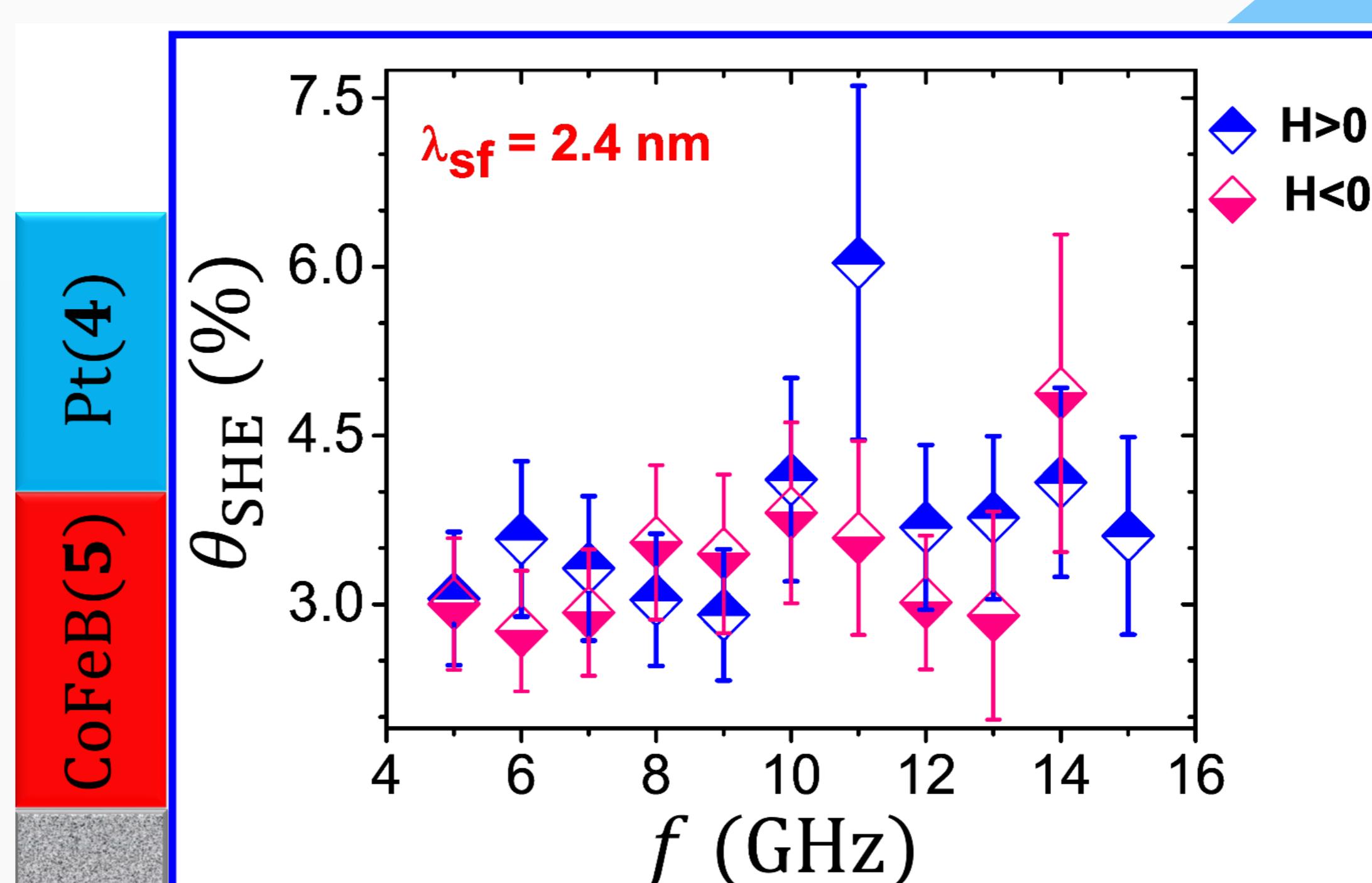
$$\Delta H = \Delta H_0 \frac{2\pi f \alpha_{F/N}}{\gamma_0}$$

Se realiza el ajuste:

Dispositivo con  
Capa Pt de 4nm.



Se determina  $\theta_{ISHE}$   
para múltiples  
frecuencias



Se promedian los resultados de diferentes frecuencias y grosores de las capas

## Resultados

Muestras		$M_{\text{eff}}$ (emu/cm <sup>3</sup> )	$\alpha_{F/N}$	$\theta_{\text{SHE}}^*$ (%)
CoFeB	Pt	$979 \pm 8$	$0.0136 \pm 0.0006$	$3.6 \pm 2.9$
CoFeB	Ir	$989 \pm 6$	$0.0149 \pm 0.0012$	$1.2 \pm 0.6$
$\text{Bi}_2\text{Se}_3$	CoFe	----	----	$0.19 \pm 0.22$
$\text{Bi}_2\text{Se}_3$	Py	----	----	$0.13 \pm 0.07$



# Estudio de Resonancia Ferromagnética con Bombeo de Espín en el Aislante Topológico $\text{Bi}_2\text{Se}_3$



Alejandro Silvestre Novoa Gastaldi  
silvestre.novoa@ciencias.unam.mx

## APORTES

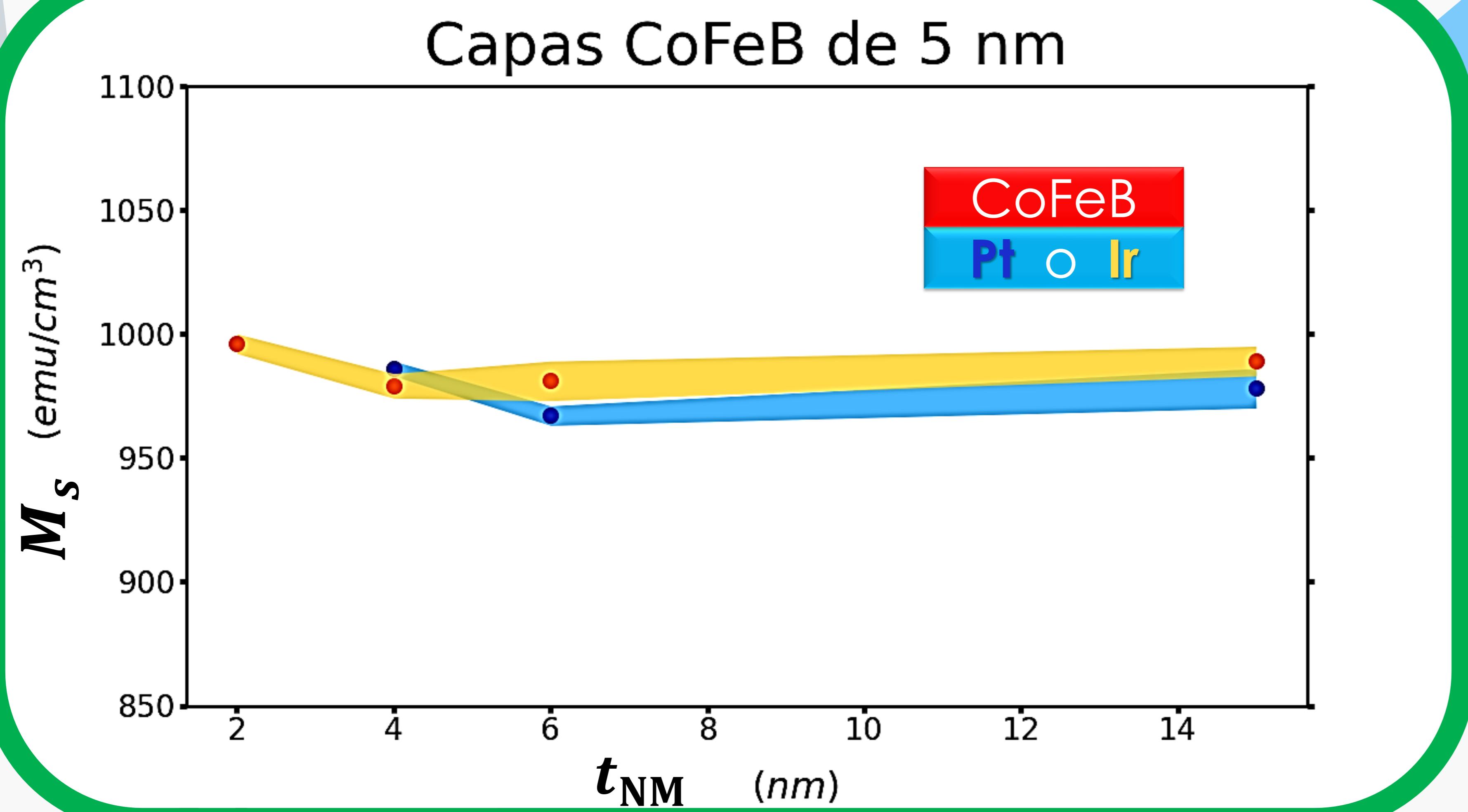
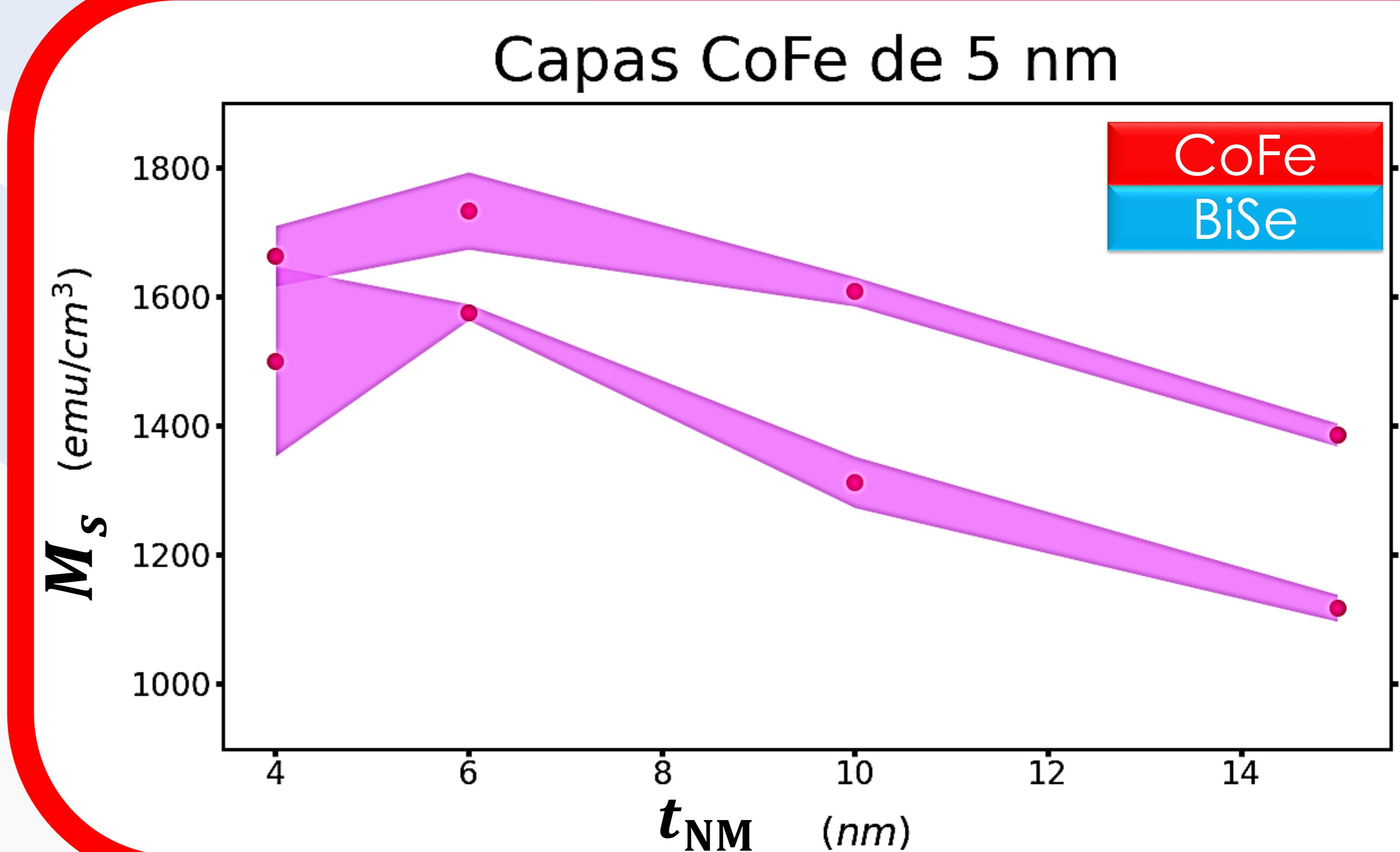
Se identificó un método para analizar la calidad de los datos

Reconocer que en los dispositivos, la capa **FM** del mismo espesor debe generar una Magnetización ( $M_s$ ) equivalente

Gráficas con banda de error en función del espesor de la capa **NM**  $\uparrow t_{\text{NM}}$

Los valores de  $M_s$  varían hasta un 50%

Se infiere que la Data de estos dispositivos **No es Confiable**



Los valores de  $M_s$  varían menos de un 5%

Data Confiable





# Estudio de Resonancia Ferromagnética con Bombeo de Espín en el Aislante Topológico $\text{Bi}_2\text{Se}_3$



Alejandro Silvestre Novoa Gastaldi  
silvestre.novoa@ciencias.unam.mx

## APORTES

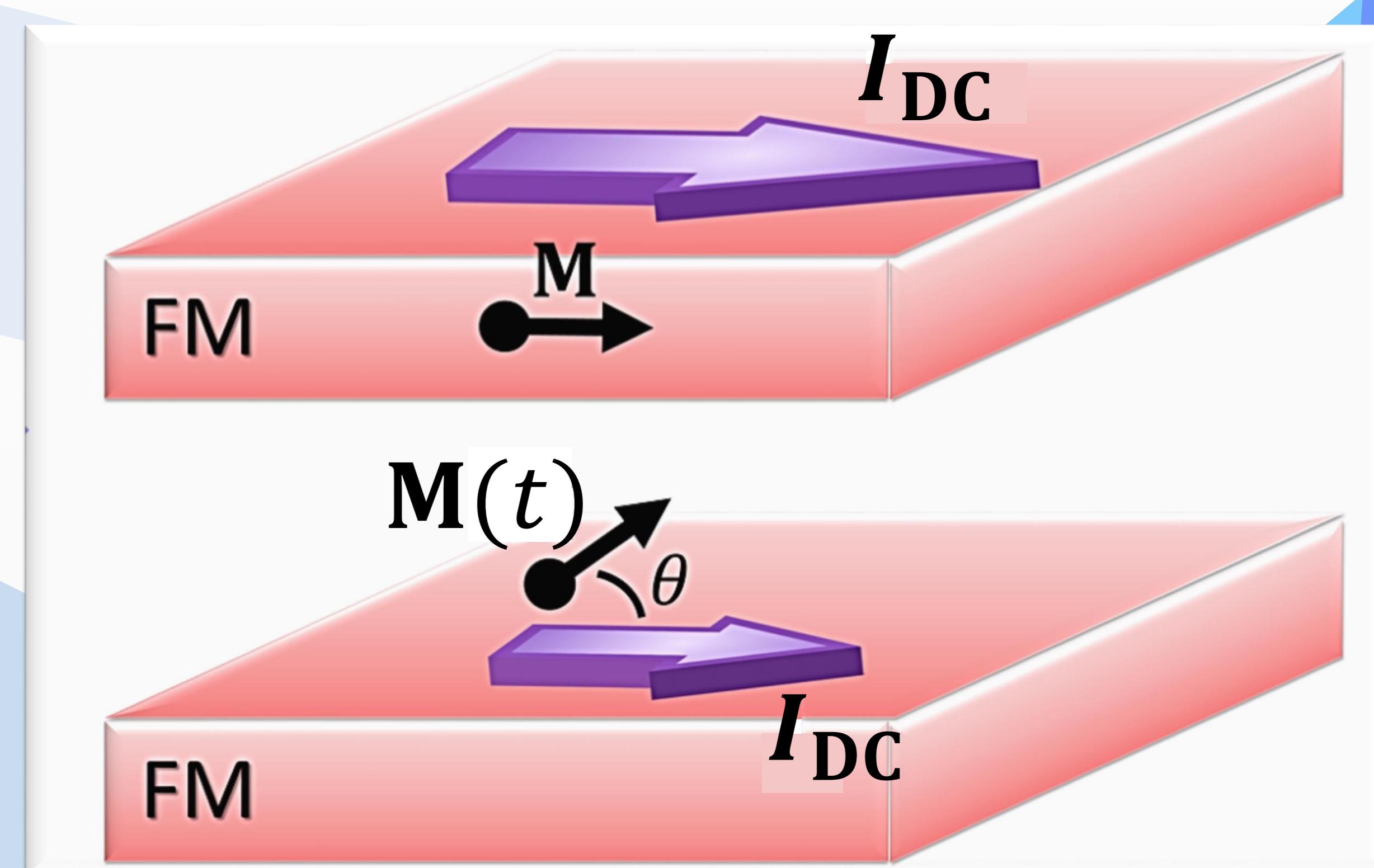
Se detalló el método de AMR-FMR

### ¿Qué es AMR-FMR?

Siglas de Magneto-Resistencia Anisotrópica por Resonancia Ferromagnética

Al sistema se aplica un campo magnético  $\mathbf{h}_{\text{rf}}(t)$  que varía en el tiempo, y un campo magnético  $\mathbf{H}_{\text{dc}}$  constante en el tiempo.

La combinación de los campos  $\mathbf{h}_{\text{rf}}(t)$  y  $\mathbf{H}_{\text{dc}}$  genera una magnetización  $\mathbf{M}(t)$  que varia en el tiempo. Si una corriente eléctrica  $I_{\text{DC}}$  atraviesa el material, su magnitud puede variar dependiendo de  $\mathbf{M}(t)$



Analizando el modelo, se puede determinar el ángulo con el que varía  $\mathbf{M}(t)$ , y con este, la magnitud del campo  $\mathbf{h}_{\text{rf}}$

$$h_{\text{rf}} \approx 2\Delta H \sin \theta_c$$

$$\theta_c = \arcsen \left( \sqrt{\frac{\Delta V_{\text{AMR-FMR}}}{\Delta I_{\text{dc}} \Delta R_{\text{AMR}}}} \right)$$

### ¿Por qué es importante?

La magnitud  $\mathbf{h}_{\text{rf}}$  es fundamental para completar el Análisis de Datos.

El no reportarla, dificulta el comparar resultados de distintas investigaciones.



# Estudio de Resonancia Ferromagnética con Bombeo de Espín en el Aislante Topológico $\text{Bi}_2\text{Se}_3$



Alejandro Silvestre Novoa Gastaldi  
silvestre.novoa@ciencias.unam.mx

## APORTES

Se brindó un protocolo optimizado de medición considerando el análisis de datos

### ¿Para qué un nuevo protocolo?

Para que la adquisición de datos (implica semanas de mediciones) se realicé en un orden que permita comprobar la calidad de los datos.

La idea es **optimizar el tiempo**, evitar tener que adquirir todos los datos para darse cuenta después que su calidad es mala.

## Protocolo

- 1. Medir  $R_{F/N}$  resistencia de bicapa.** Se analiza que  $R_{F/N}$  dependa inversamente del espesor.  
El no cumplirlo puede indicar mala calidad de datos por mala calidad de las capas.
- 2. Medir FMR.** Se analiza equivalencia de la magnetización  $M_s$  entre capas FM equivalentes.  
El no cumplirlo puede indicar mala calidad de datos por mala calidad de las capas.
- 3. Medir AMR-FMR.** Del análisis se determina  $h_{rf}$ .  
Parámetro fundamental para comparar resultados.
- 4. Medir  $R_{GSG}$  resistencia de la antena.** Para dispositivos equivalentes,  $R_{GSG}$  debe dar valores similares. Con  $R_{GSG}$  puede calcularse  $h_{rf}$  por otro método.  
Comparar valores de  $h_{rf}$  de distintos métodos comprueba la calidad del dispositivo y de los datos.
- 5. Analizar SP-FMR.** Con la calidad de datos comprobada, se completa el análisis y reportan resultados de  $\theta_{ISHE}$  y  $h_{rf}$ .