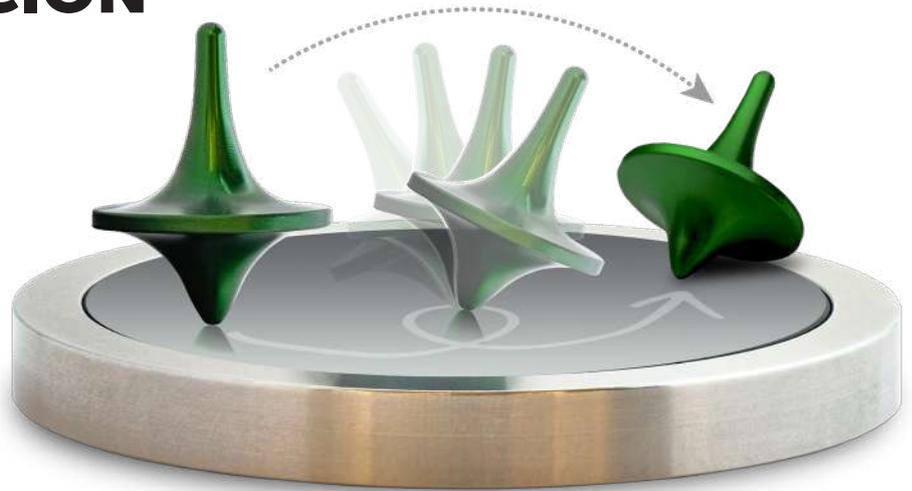


DINÁMICA DE LA MAGNETIZACIÓN

...en láminas delgadas con defectos controlados.

• **Juan Luis Palma**
 Doctor en Física / Académico Investigador Financ.



Este trabajo fue publicado en Scientific Reports de Nature Research [1], junto con mis colaboradores Eduardo Saavedra, Rosa Corona, Dora Altbir y Juan Escrig de la UdeSantiago, y junto con Nicolás Vidal de la Universidad de la Frontera, a quienes quiero comenzar agradeciendo por ser un excelente equipo de investigación.

Los sistemas magnéticos de baja dimensionalidad son un tema emergente en la física de la materia condensada. Estos sistemas nos ayudan a entender muchos fenómenos nuevos que nos permiten diseñar o mejorar potenciales aplicaciones en espintrónica, magnónica, electrónica o en dispositivos de microondas.

Todo esto, nos motivó a estudiar desde un punto de vista numérico, las propiedades magnéticas; tanto estáticas como dinámicas de películas metálicas muy delgadas, de diez nanómetros de espesor (recordemos que un nanómetro es la distancia que se obtiene al dividir un milímetro en un millón de partes). En particular, estas películas metálicas tienen agujeros ordenados que hemos introducido de forma artificial. En este estudio numérico, hemos diseñado en particular una lámina con agujeros circulares, y luego estos agujeros los vamos "alargando" de manera sistemática a lo largo de una dirección en particular. Esta forma en la que los "alargamos" se conoce como forma de "estadio", y es diferente de una elipse. La figura 1 muestra la forma que tienen este tipo de estructuras.

Estos sistemas de láminas con agujeros, que comúnmente se conocen como ANTIDOTS ya fueron descritos en el **volumen 5, año 2018, de la revista ingeniería al Día**, en el artículo:

DEFECTOS EN UN MATERIAL; ¿PORQUÉ SON IMPORTANTES PARA EL MAGNETISMO? Escrito por Juan Luis Palma

Los invito a leer este artículo [2], para obtener un mejor entendimiento de la geometría y entender de dónde viene el nombre "ANTIDOT".

El estudio que actualmente se presentará, es un análisis numérico, en el cual podríamos generar cualquier geometría que se nos ocurra, pero la verdad es que siempre debemos pensar en las capacidades experimentales, de crear cosas tangibles con las técnicas que hoy en día contamos en el mundo. En este contexto, hemos creado este tipo de geometría sabiendo cómo podemos sintetizar estas experimentalmente. La técnica que se utiliza es la de *ablación por un haz iónico enfocado* (Focused Ion Beam). Esta técnica se basa en disparar un haz de iones de Galio, que penetra en la muestra y la van destruyendo. "Es como dibujar con un cincel sobre una roca, claro que a escala nanométrica..."

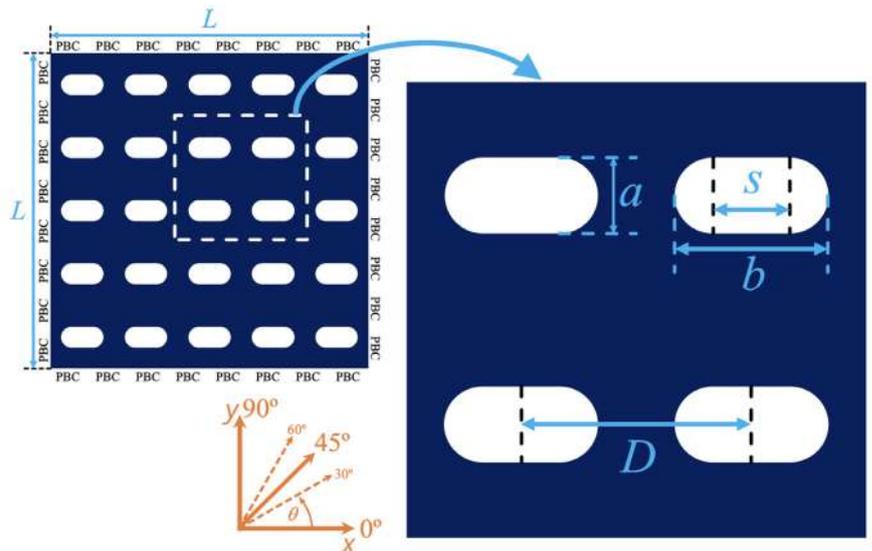


Figura 1

Representación esquemática del arreglo de ANTIDOTS con forma de estadio.

Una pregunta que se le podría ocurrir al lector es, ¿Por qué alargar los agujeros?, porque en realidad se me podría ocurrir cualquier forma de deformación de la geometría para obtener algún cambio y luego estudiar estas deformaciones en función de este cambio. Esta pregunta, la cual es muy válida, tiene una respuesta en la anisotropía. La anisotropía es una preferencia especial por una dirección que minimiza la energía de un sistema, y si alargamos los agujeros con forma de estadio en la dirección horizontal, entonces tendremos una alineación preferente de los momentos magnéticos de los átomos en

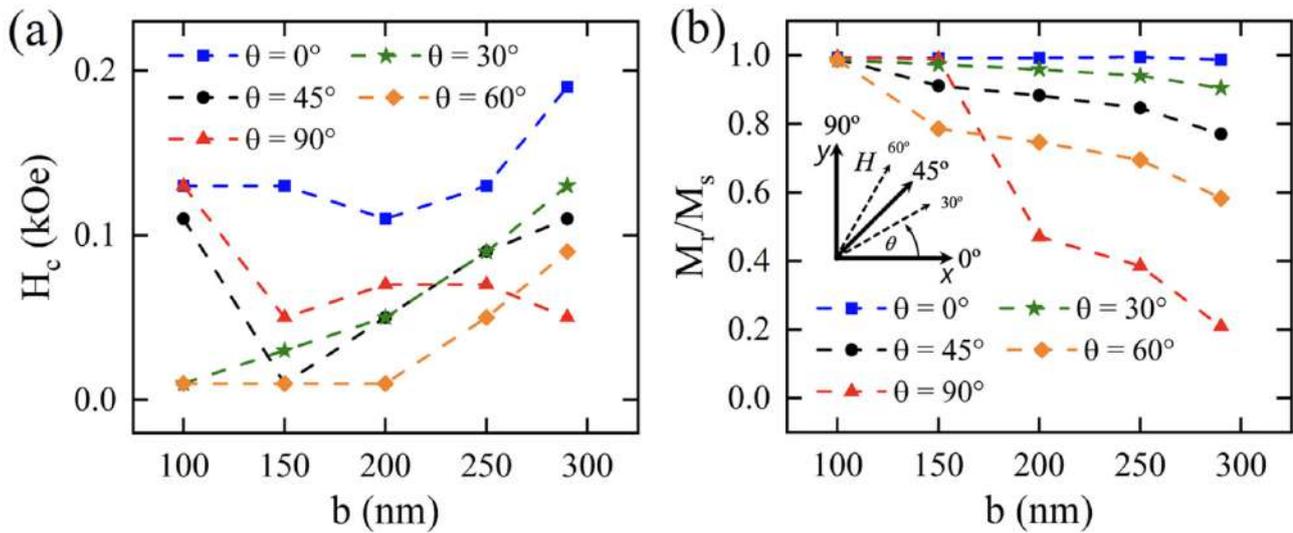


Figura 2

(a) Valores de campo coercitivo (H_c) en función de la geometría, desde agujeros circulares hasta agujeros muy alargados. (b) Valores de la magnetización remanente (M_r) en función de la geometría, desde agujeros circulares hasta agujeros muy alargados.

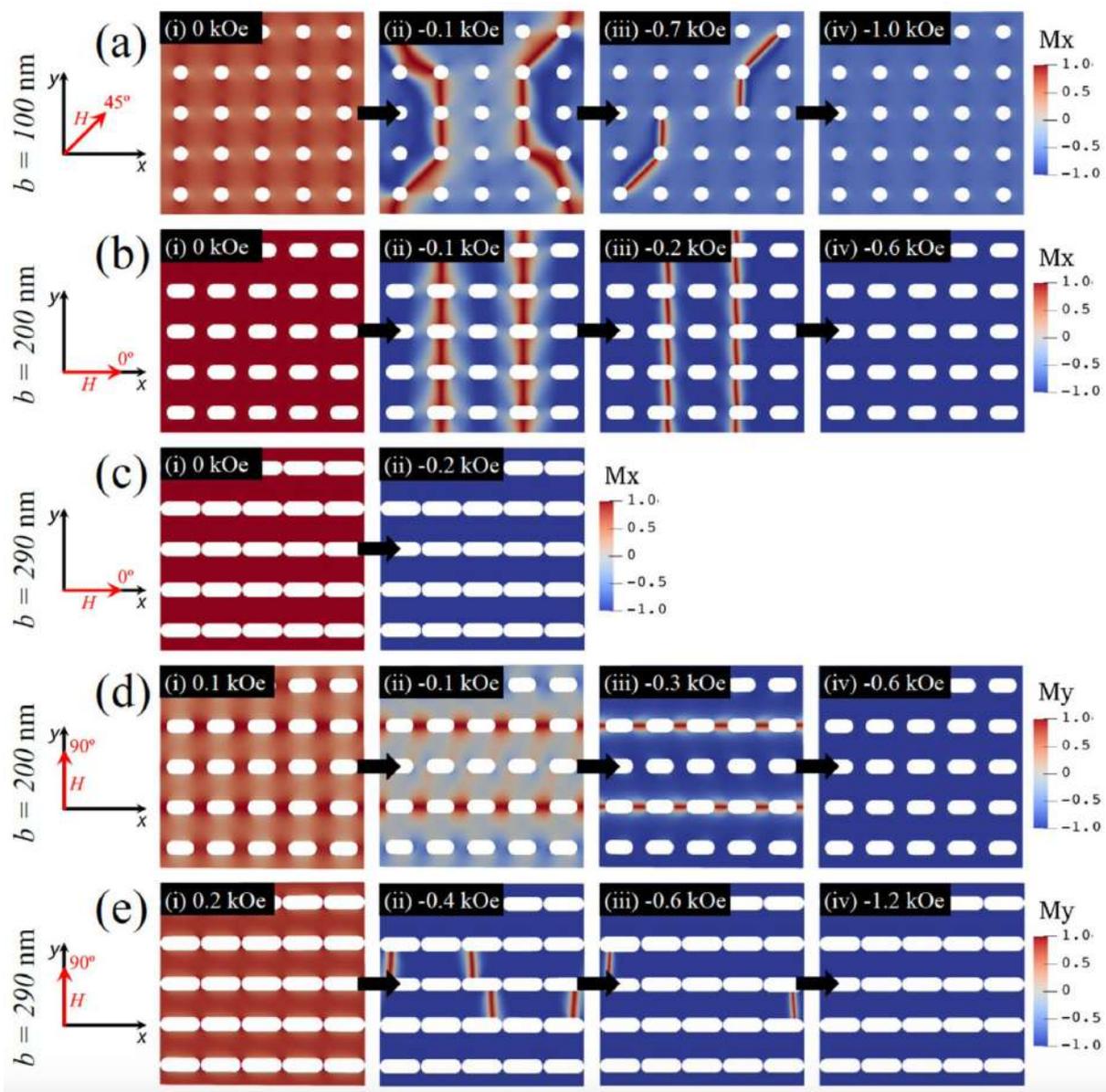


Figura 3

configuraciones de la magnetización a distintos campos aplicados, con distinta dirección de campo aplicado y con diferentes parámetros "b". En el caso de la magnetización en la dirección horizontal, dirección "x" (M_x), el color rojo indica a los espines que apuntan hacia la derecha, y el color azul a los espines que apuntan hacia la izquierda.

esta dirección. Si los momentos magnéticos prefieren estar en esta dirección, podremos estudiar cuales son las configuraciones de los momentos magnéticos que minimizan la energía de todo el sistema, y que nos permiten obtener configuraciones estables para la magnetización.

Obtener una configuración estable de la magnetización es muy importante desde el punto de vista de aplicaciones para el almacenamiento de la información. Para conocer las propiedades cuasi-estáticas de estos sistemas, hemos estudiado la reversión de la magnetización, mediante la aplicación de un campo magnético externo aplicado. Esto se hizo para diferentes valores del parámetro "b" mostrado en la figura 1. De las curvas de histéresis magnética, se pueden extraer dos informaciones relevantes (entre otras). La primera es: ¿Cuánto campo magnético externo se necesita para que la magnetización de la muestra sea cero?, el cual se conoce como campo coercitivo (H_c). La segunda es ¿Cuánta magnetización contiene la muestra cuando se disminuye el campo externo aplicado, desde la saturación hasta cero? Esto se conoce como magnetización remanente. Recordando que, la saturación de un material magnético es el estado donde todos los espines apuntan en la dirección del campo aplicado. La figura 2, muestra un resumen de estas dos cantidades en función de la dirección del campo magnético externo aplicado y del parámetro "b", que determina que tan alargado es el agujero de la muestra.

El pasar de un estado saturado a otro (digamos, un estado que apuntan todos sus espines a la derecha a un estado en dónde apuntan todos los espines a la izquierda) nos genera configuraciones intermedias en dónde se forman regiones bien definidas de espines, las que se conocen como dominios magnéticos. Estas son las que se necesitan controlar para generar dispositivos de grabación magnética. La figura 3, muestra un esquema de estas regiones en función del campo aplicado y del parámetro "b", que determina que tan alargado es el agujero de la muestra.

Estas propiedades cuasi-estáticas ya las habíamos analizado anteriormente. Ahora analizaremos cómo perturbar dinámicamente estos sistemas. Si aplicamos un campo magnético de tal manera de saturar todos los momentos magnéticos de la muestra en una dirección y luego repentinamente retiramos ese campo magnético, entonces los momentos magnéticos de este sistema, comenzaran a ordenarse de tal manera de minimizar la energía de toda la muestra. En la figura 4 se muestran los estados de mínima energía. El color rojo indica que los espines apuntan en dirección horizontal. Si un espín apunta en la dirección vertical, se volverá de color blanco. Por lo que mientras más intenso sea el color rojo, indica que los espines apuntan con una componente mayor en la dirección horizontal. Aquí podemos ver el rol que juega la geometría. Mientras más alargados sean los agujeros, existe una anisotropía en la dirección horizontal, impuesta por la geometría de la muestra. Esta diferencia es muy clara entre la muestra con agujeros circulares (Figura 4 (a)) y la muestra con los agujeros más alargados (Figura 4 (f)). Ya que en la primera se ve que en promedio los espines apuntan en 45° con respecto a la línea horizontal, mientras que en la última se ve que el promedio apunta en la dirección horizontal.

Un espín, lo podemos representar por una flecha que se encuentra apuntando en alguna dirección. Este espín está en equilibrio junto a todo el grupo de espines que se encuentran en la configuración de mínima energía. Si se aplica un campo magnético externo, el espín tratará de alinearse con este campo magnético. Para hacerlo comenzará a realizar un movimiento de precesión alrededor del campo aplicado, tal como el movimiento que hace una pirinola (o trompo) alrededor de un eje imaginario (esto se esquematiza en la figura 5). Si el campo es suficientemente intenso, el movimiento del espín terminará cuando se alinee con el campo magnético externo. De lo contrario, si el campo no es tan intenso, no logrará alinear al espín en su dirección o si la aplica-

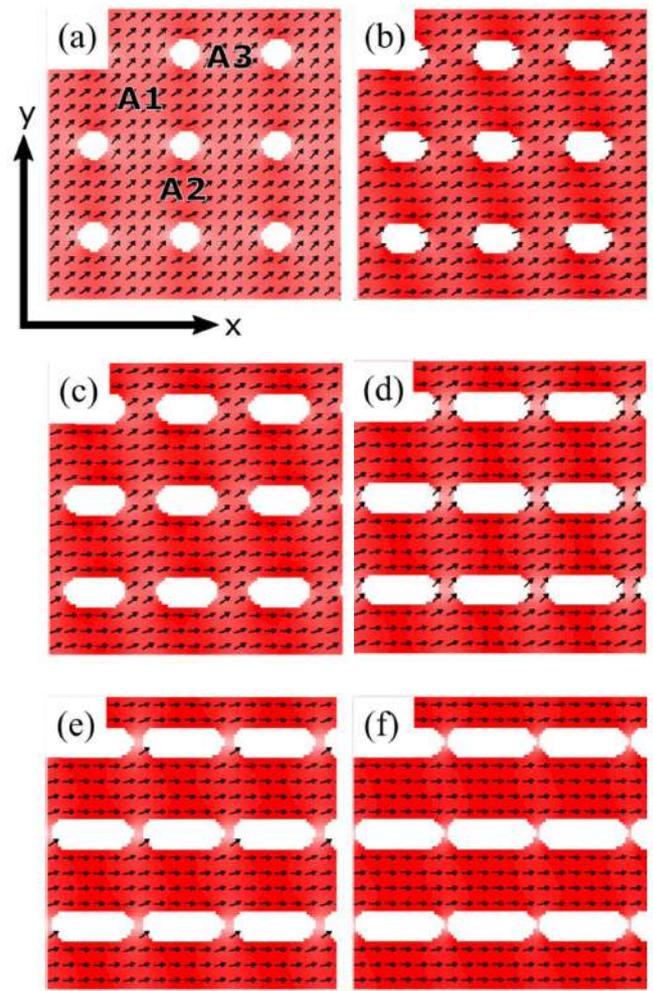


Figura 4

Estados de mínima energía.

ción de campo externo dura un corto tiempo, sólo generará un movimiento de precesión en el espín. Este movimiento del espín tiene una frecuencia y tiene una amplitud. Si esa frecuencia del espín se iguala a alguna frecuencia aplicada, tendremos una resonancia de una onda aplicada.

Estos ordenamientos de los espines, que conllevan a que la muestra tenga la mínima energía, se pueden perturbar con pequeños pulsos de campo magnético. Recordemos que los campos, ya sea eléctricos o magnéticos, son ondas que viajan en el espacio. Cuando hablamos del concepto de pulso, hablamos de una onda que dura un corto periodo de tiempo. En este caso en particular, el pulso que se le aplica a las configuraciones mostradas en la figura 4, es de la forma $h(t) = 1000 e^{-10^{19}t} [A/m]$. Este campo equivale a 10 millones de veces el campo de la tierra (para los más técnicos en el área, al hacer esta comparación se está considerando el factor $4\pi/\mu_0$). Esto nos permite ver la evolución temporal del sistema cuando se ha perturbado. La evolución temporal de la magnetización bajo la acción del campo de excitación se recoge durante 30 nanosegundos registrando la configuración de magnetización a intervalos de tiempo uniformes de 10 picosegundos, permitiendo una resolución espectral de 0,033 GHz. El espectro de resonancias de frecuencias para estos sistemas está en el orden de los Gigahertz, la conocida banda X se le designa a las frecuencias entre 8.0 y 12.0 Giga Hertz, designado por el Instituto de Ingenieros Eléctricos y Electrónicos a nivel mundial (IEEE Society). Para imaginar estos rangos de frecuencia, debemos saber que la red de nuestro hogar funciona con una corriente eléctrica sinusoidal, como una onda, a 50 Hertz. Esto quiere decir, que una ampolleta de filamento de Tungsteno se apaga 50 veces por cada segundo.

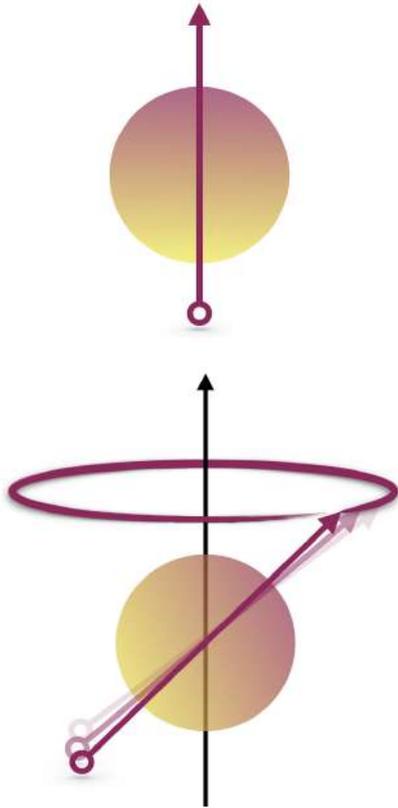


Figura 5

Movimiento de precesión de un momento magnético. Representación de espín de un átomo (arriba). Si se aplica un campo magnético, representado como una flecha negra, el espín intenta alinearse con el campo, pero no lo hace instantáneamente, sino que lo hace con un movimiento precesional (como si fuese una pirinola o un trompo).

Para imaginar una onda del orden de Giga Hertz, podríamos decir que una ampollita a esa frecuencia se apagaría mil millones de veces por cada segundo. Este tipo de frecuencias se utilizan en aplicaciones militares de radar, en la comunicación con satélites y en la comunicación con naves espaciales.

Para poder observar a qué frecuencias responde nuestro sistema, debemos obtener el espectro de resonancias y ver cómo responde la susceptibilidad dinámica a diferentes frecuencias. La susceptibilidad es una cantidad que mide el cambio en la magnetización de la muestra, cuando se cambia el campo aplicado a la muestra. El espectro que muestra la figura 6, muestra unos picos de resonancia a ciertas frecuencias. Estos picos de resonancia dependen fuertemente de la geometría impuesta por la geometría. Es decir, tenemos nuestra primera conclusión; podemos cambiar la frecuencia a la que las muestras resuenan, por el solo hecho de cambiar la geometría de la película delgada, en donde estamos incorporando una anisotropía en el eje horizontal. Si el pulso aplicado va en la dirección horizontal, observamos un espectro como en el de la figura 6 (izquierda), donde el pico de resonancia desaparece para la muestra con

agujeros más alargados que contienen una alta anisotropía horizontal. Por el contrario, si se aplica el pulso en la dirección vertical, el pico de resonancia no desaparece a medida que alargamos el agujero, e incluso, dependiendo del largo del agujero (es decir, dependiendo del parámetro b) podemos elegir la frecuencia a la cual nuestra muestra va a absorber en el espectro de los Gigahertz. Podemos decir que hemos creado un método que puede seleccionar qué frecuencias se van a absorber, o con las cuales nuestro dispositivo podría funcionar.

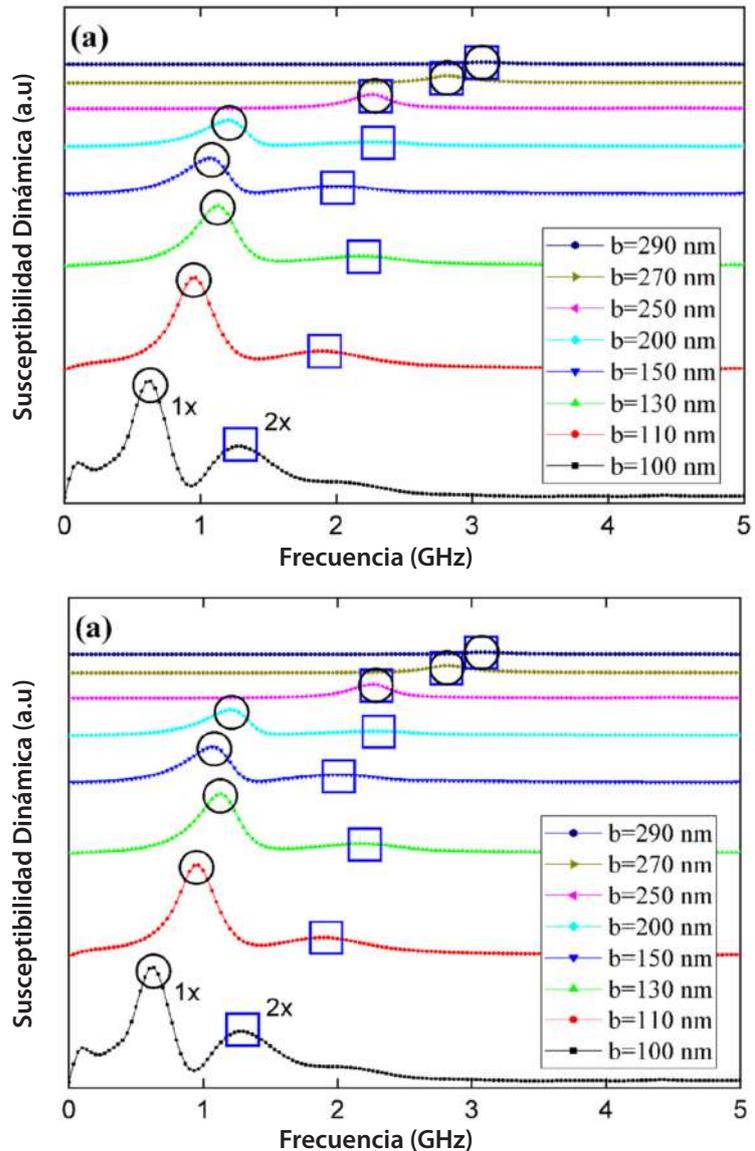


Figura 6

Espectro de la susceptibilidad dinámica que muestra la resonancia de frecuencias en función del alargamiento de los agujeros (parámetro "b" de la figura 1) para un pulso aplicado en el eje horizontal (arriba) y en el eje vertical (abajo).

Una vez que conocemos las frecuencias a las que nuestra muestra puede responder, necesitamos conocer el origen de los picos de resonancia. Para esto es necesario reconstruir los perfiles espaciales de los modos de resonancia calculando la transformada temporal de Fourier para cada sitio espacial, en cada imagen, a la que se le asocia una posición (o mejor dicho un código de color) para su frecuencia en el espectro de potencia. Esto lo veremos para un caso en particular, que se muestra en la figura 7. Cuando el pulso se aplica en el eje vertical, encontramos el resultado más interesante que nos permite elegir la frecuencia a la cual nuestro sistema produce picos de resonancia. De la figura 6 (abajo), se han clasificado los modos como 1y, 2y y 3y, los cuales solo podemos observar los peaks y la frecuencia a la que responden, pero no podemos saber en qué región de la muestra tenemos nuestros espines oscilando a esas frecuencias. En la figura 7 observamos las regiones en las cuales los espines se mueven con mayor frecuencia, o podríamos decir, observamos las regiones en donde se produce la resonancia. Las zonas rojas mostradas en la figura 7 representan las zonas en las cuales los espines tienen mayor amplitud de oscilación, y las zonas azules son las zonas en las que los espines no están oscilando, en donde los espines se quedaron quietos.

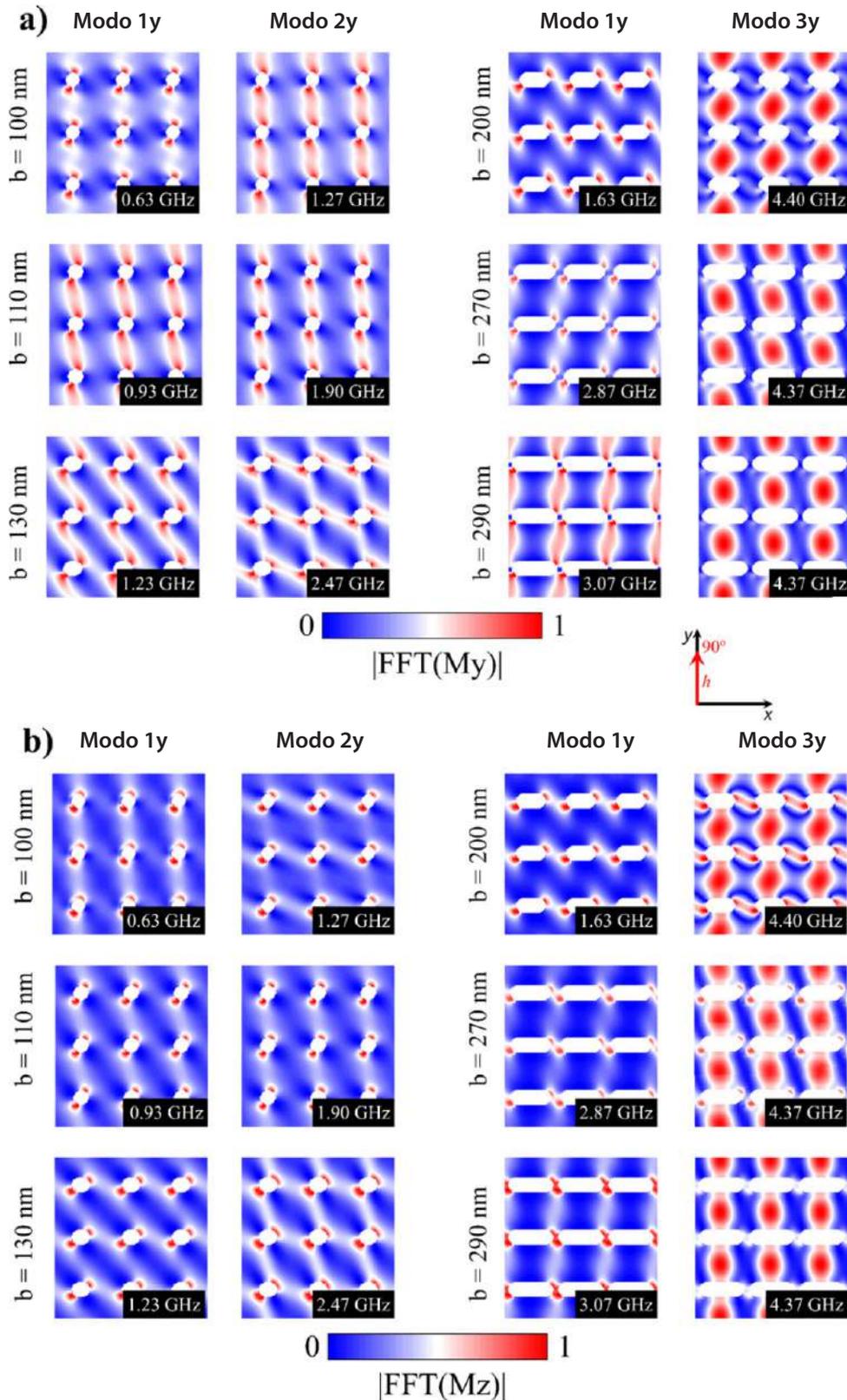


Figura 7

componente vertical (arriba) y componente fuera del plano (derecha) de la distribución espacial para cada pico de resonancia mostrado en la figura 6 (abajo), cuando el pulso de excitación se aplica en la dirección vertical. Las zonas rojas representan las zonas de mayor amplitud de precesión del espín.

Para finalizar, pero no a modo de una conclusión técnica ya que no viene al caso, podemos decir que las propiedades estáticas de estos sistemas son altamente sensibles a la geometría. Y que, además, este tipo de sistema nos permite diseñar las propiedades dinámicas. Así, tenemos un potencial para diseñar seleccionadores de frecuencias, para ser utilizados en ciertas aplicaciones, ya sea de uso militar o tecnología para misiones espaciales. Para conocer los detalles técnicos, para el lector más especializado, por favor leer la referencia del artículo [1].

Referencias

- [1] Saavedra, E. et.al., Scientific Reports, Vol. 10, 2024 (2020) p1-12.
- [2] Palma, J. L., http://revistaingenieriaaldia.ucecentral.cl/rev_5/art_5.pdf