"Ondas de spin tipo "dipole-exchange" en multi-capas ferromagnéticas"

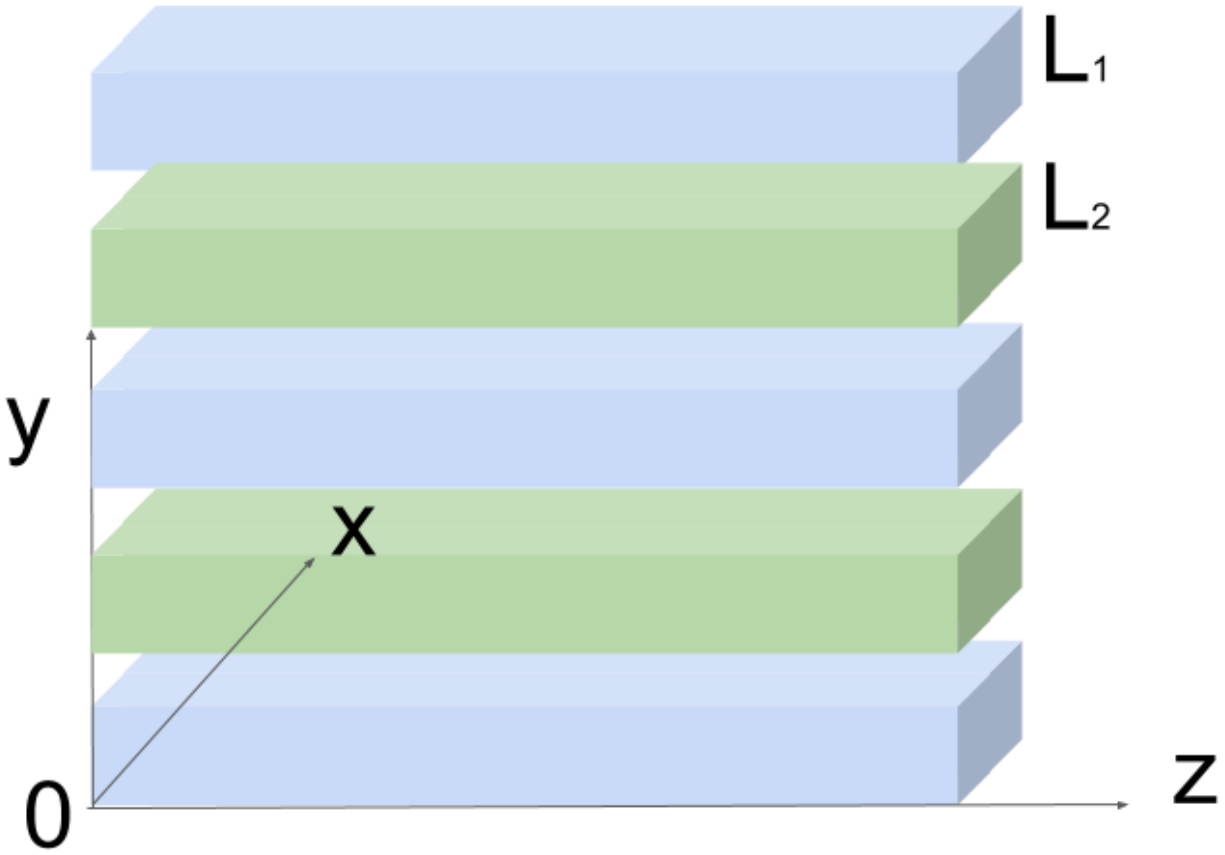
Rodrigo Arias, Ignacio Armijo
Universidad de Chile

Noviembre 2019

INTRODUCCCION:

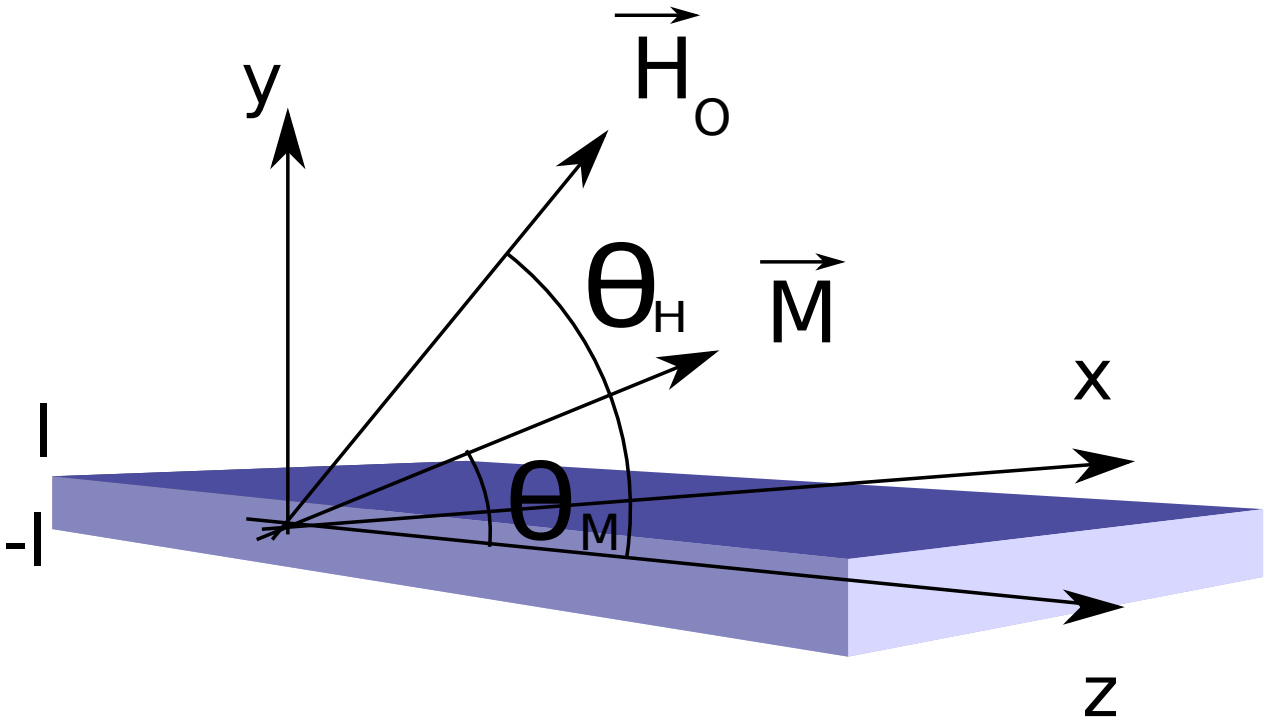
- **ALGUNOS TRABAJOS PREVIOS:**
  - **Configuraciones multi-capas: algunos films o arreglos periódicos**
  - **Films magnetizados en el plano o perpendicularmente a él**
  - **Diferentes tipos de condiciones de borde: libres, anisotropía superficial, acoplamiento de intercambio,...**
- **MOTIVACION:**
  - **Modos tipo "Dipole-Exchange" via un eficiente nuevo método, que incluye campos magnéticos aplicados oblicuamente**
  - **Relacionar propiedades en superficies de films o entre films con frecuencias**

Geometría, multi-capas de films feromagnéticos:



Magnetización de equilibrio en films ferromagnéticos:

$\vec{M}(\vec{x},t) \simeq M_s\hat{\tilde{z}} + m_x(\vec{x},t)\hat{x} + m_{\tilde{y}}(\vec{x},t)\hat{\tilde{y}}$



Dinámica de la magnetización, modos lineales:

- **Ecuaciones magnetostáticas de Maxwell , film (j):**

$$0 = \nabla \times \vec{h}_D^{\omega(j)} \rightarrow \vec{h}_D^{\omega(j)} = -\nabla \phi_\omega^{(j)}$$

$$0 = \nabla \cdot \vec{b}_\omega^{(j)} = -\nabla^2 \phi_\omega^{(j)} + 4\pi \nabla \cdot \vec{m}_\omega^{(j)}$$

- **Ecuaciones de Landau Lifshitz, film** (j)**:**

$$\frac{d\vec{M}^{(j)}}{dt} = -|\gamma|_j \vec{M}^{(j)} \times \vec{H}_{eff}^{(j)}(\vec{M})$$

$$i\omega \vec{m}_\omega^{(j)} = \hat{\vec{z}}^{(j)} \times |\gamma|_j \left(D_j \nabla^2 \vec{m}_\omega^{(j)} - M_s^j \nabla \phi_\omega^{(j)} - H_i^j \vec{m}_\omega^{(j)} \right)$$

- **Condiciones de borde dipolares, y de intercambio en interfaces**

Condiciones de borde de intercambio o "Exchange":

- **Torques efectivos de Rado-Weertman en las superficies de los films:**

$$0 = (2A/M_s^2) \int_S dS \vec{M} \times (\partial \vec{M}/\partial n) + \vec{T}_{sup}$$

- **Posibles fuentes de $\vec{T}_{sup}$:**
  - Anisotropía superficial
  - Interacción de intercambio entre capas
  - "Exchange bias"
  - Interacción de Dzyaloshinskii-Moriya

- **Ejemplo de condiciones de borde con pinning parcial:**

$$0 = \partial m_{\tilde{y}}/\partial n - \lambda \cos(2\theta_M) m_{\tilde{y}} \quad ; \quad 0 = \partial m_x/\partial n + \lambda \sin^2(\theta_M) m_x$$

Nuevo método de solución, ecuaciones de extinción:

Un único film: R.E. Arias, PRB 94, 134408 (2016)

- **Fuera del film:**

$$\int_{V_{out}} dV \left(\phi_0^{-\omega}(\vec{x}-\vec{x}')\nabla\cdot\vec{b}^{\omega}(\vec{x}) - \phi^{\omega}(\vec{x})\nabla\cdot\vec{b}_0^{-\omega}(\vec{x}-\vec{x}') \right) = 0$$

$$\int_S d\vec{S}\cdot\left(\phi_0^{-\omega}(\vec{x}-\vec{x}')\vec{b}^{\omega}(\vec{x}) - \phi^{\omega}(\vec{x})\vec{b}_0^{-\omega}(\vec{x}-\vec{x}') \right) = 0$$

- **Dentro del film:**

$$0 = \int_{V_{in}} dV \left(\phi^{\omega}(\vec{x})\nabla\cdot\vec{b}_I^{-\omega}(\vec{x}-\vec{x}') - \phi_I^{-\omega}(\vec{x}-\vec{x}')\nabla\cdot\vec{b}^{\omega}(\vec{x}) \right)$$

$$0 = \int_S d\vec{S}\cdot\Big(\phi^{\omega}(\vec{x})\vec{b}_I^{-\omega}(\vec{x}-\vec{x}') - \phi_I^{-\omega}(\vec{x}-\vec{x}')\vec{b}^{\omega}(\vec{x})$$
$$-4\pi(D_j/M_s^j)\sum_{\tilde{k}}[m_{I\tilde{k}}^{-\omega}(\vec{x}-\vec{x}')\nabla m_{\tilde{k}}^{\omega}(\vec{x}) - m_{\tilde{k}}^{\omega}(\vec{x})\nabla m_{I\tilde{k}}^{-\omega}(\vec{x}-\vec{x}')]\Big)$$

Funciones "Auxiliares":

Fuera del film: $\phi_0, \vec{b}_0$; Dentro del film: $\phi_I, \vec{b}_I, \vec{m}_I$

- **Funciones "Auxiliares":** Satisfacen las mismas ecuaciones que los modos
- **Fuera de los films:**

$$\partial^2 \phi_0^\omega / \partial y^2 - Q^2 \phi_0^\omega = 0 \ ,$$

$$\phi_0^{-(\vec{Q},\omega)}(y - y') = \exp(\pm Q(y - y'))$$

- **Dentro de los films:** **(**$M_\pm \equiv 4\pi(m_x \pm i m_{\tilde{y}})$**)**

$$\phi_I^{-(\vec{Q},\omega)} = A e^{-\alpha(y-y')} \quad ; \quad M_\pm^I = B_\pm e^{-\alpha(y-y')} \ ,$$

los α's son las raíces de polinomios de orden 6.

Modos "Dipole exchange" en las superficies de los films:
$V = l_u - l_d$

Ecuaciones de extinción:

Convoluciones en espacio real $\rightarrow$ Ecuaciones locales en espacio de Fourier

- **Ecuaciones de extinción en regiones no magnetizadas:**

$$
\begin{aligned}
0 &= e^{-QV}[b_y^{(\vec{Q},\omega)}(l_u) - Q\phi^{(\vec{Q},\omega)}(l_u)] - b_y^{(\vec{Q},\omega)}(l_d) + Q\phi^{(\vec{Q},\omega)}(l_d) \\
0 &= b_y^{(\vec{Q},\omega)}(l_u) + Q\phi^{(\vec{Q},\omega)}(l_u) - e^{-QV}[b_y^{(\vec{Q},\omega)}(l_d) + Q\phi^{(\vec{Q},\omega)}(l_d)] \ ,
\end{aligned}
$$

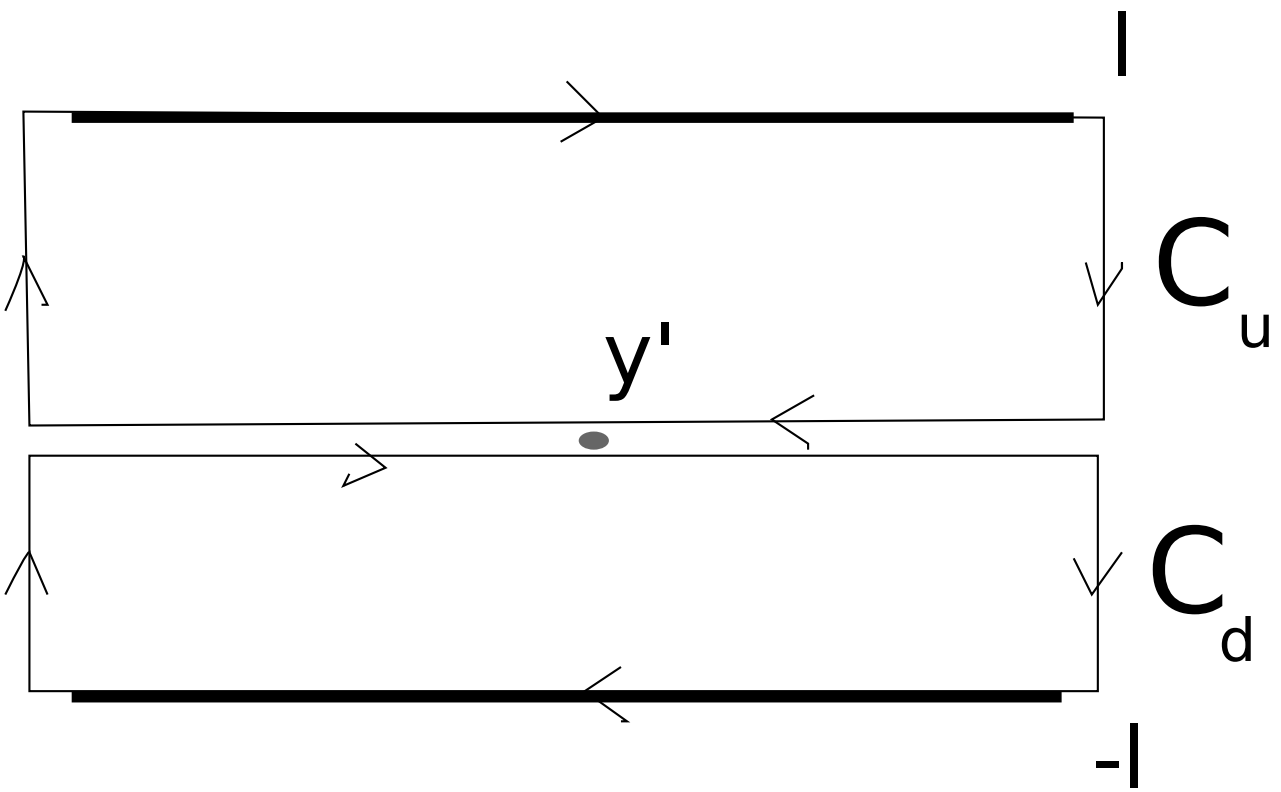
- **Ecuaciones de extinción en films, espacio de Fourier:**

  6 ecuaciones para cada film (6 α's)

- **Ecuaciones de extinción completas, escritas en las superficies:** Problema de valores propios homogéneo, 6Nx6N (N films, $DET = 0$) para las frecuencias y los modos evaluados en la superficie, en un valor dado de $\vec{Q}$.

Modos tipo "Dipole exchange":

- **Camino de integración de las ecuaciones de extinción:**



- **6 ecuaciones de extinción inhomogéneas, 6 incógnitas:**

$$\phi(y'), b_y(y'), M_\pm(y'), \partial M_\pm/\partial y(y')$$

Dispersión de modos magnetostáticos bi-capa:
Films separados por un 20 por ciento de su espesor L

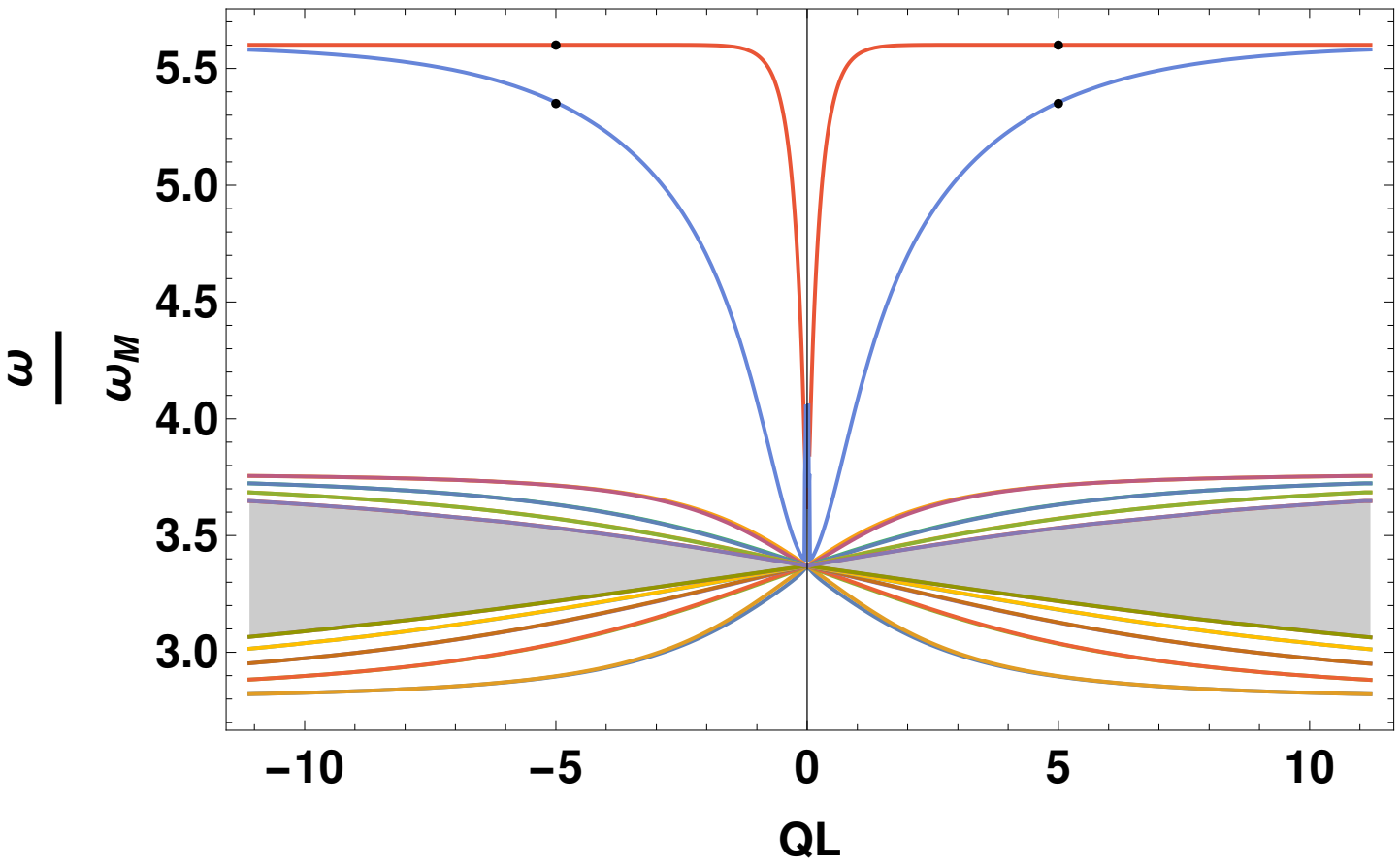


Figura: $H_0 = 6.4M_s$ en un ángulo oblicuo $\theta_H = 0.454\pi$, $\theta_M = 0.154\pi$, $\phi = 0.3\pi$. Campo interno $H_i = 1.04M_s$, $\omega_M \equiv |\gamma| M_s$, Q vector de ondas en la dirección ϕ

Potencial de modos magnetostáticos bi-capa:

Films separados por un 20 por ciento de su espesor L

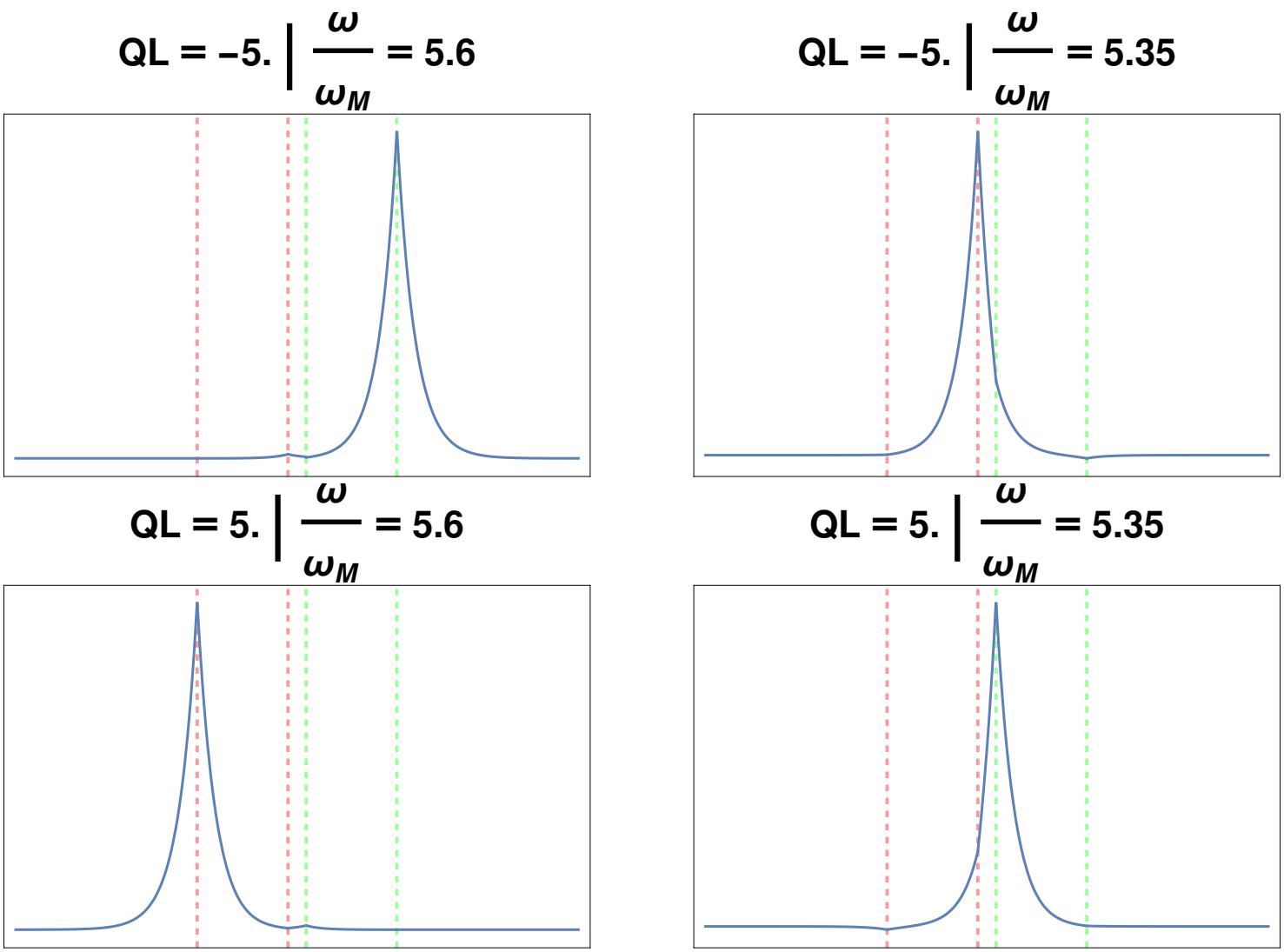


Figura: $H_0 = 6.4M_s$, $\theta_H = 0.45\pi$, $\theta_M = 0.15\pi$, $\phi = 0.3\pi$, $H_i = 1.04M_s$

Dispersión de modos magnetostáticos bi-capa Ni-Fe:

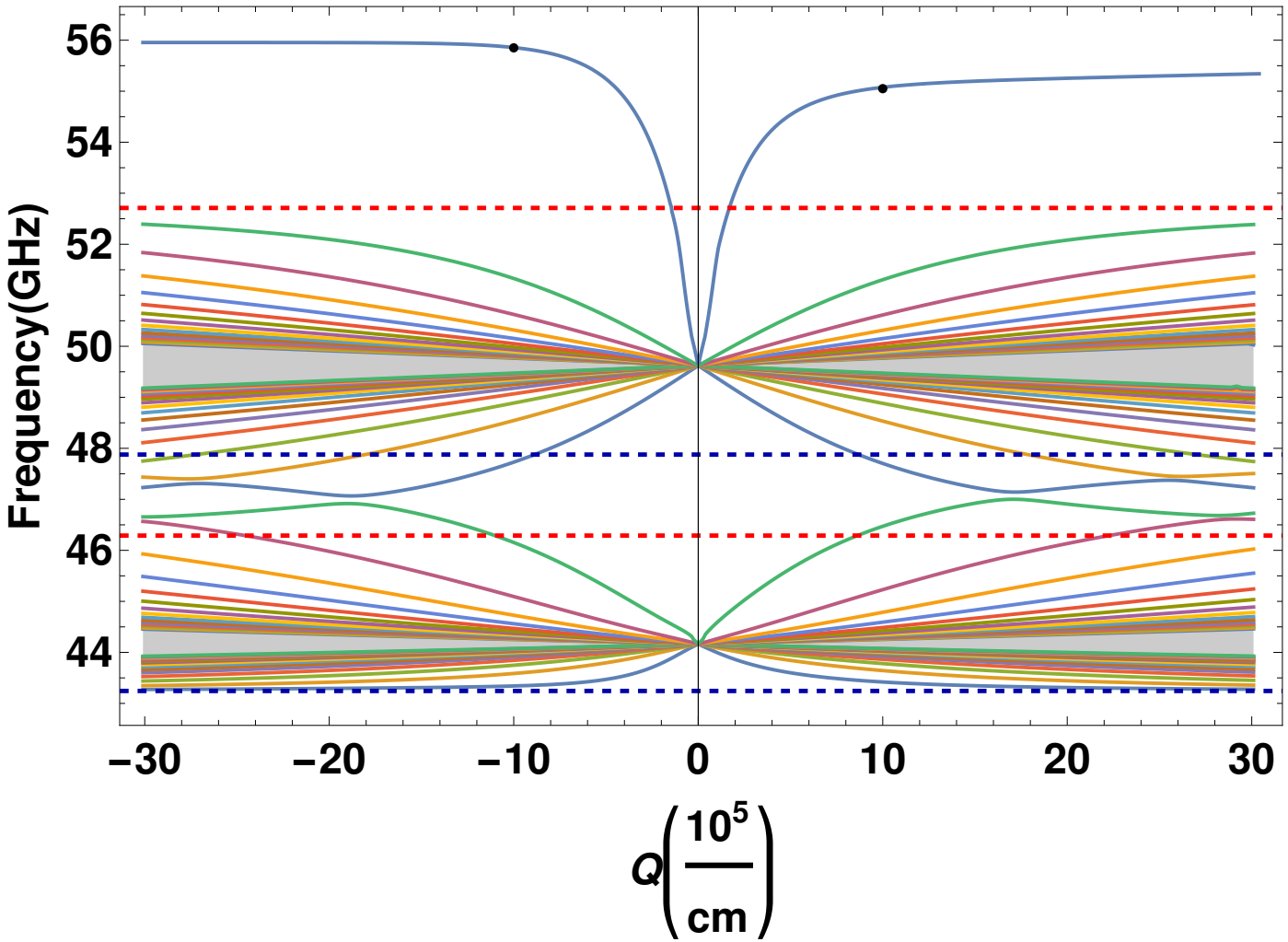


Figura: Separación de $6A^o$, $L_{Fe} = L_{Ni} = 200A^o$, $\theta_H = 0.3\pi$, $H_0 = 15.9kG$, $\theta_{Fe} = 0.135\pi$, $\theta_{Ni} = 0.24\pi$, $\phi = 0.35\pi$. $H^i_{Fe} = 10.26kG$, $H^i_{Ni} = 12.81kG$

Dos films equivalentes, modos "dipole-exchange", relaciones de dispersión:

Films separados por un 20 por ciento de su espesor L, $A/L^2 = 0.1, \omega_M = |\gamma| M_s$

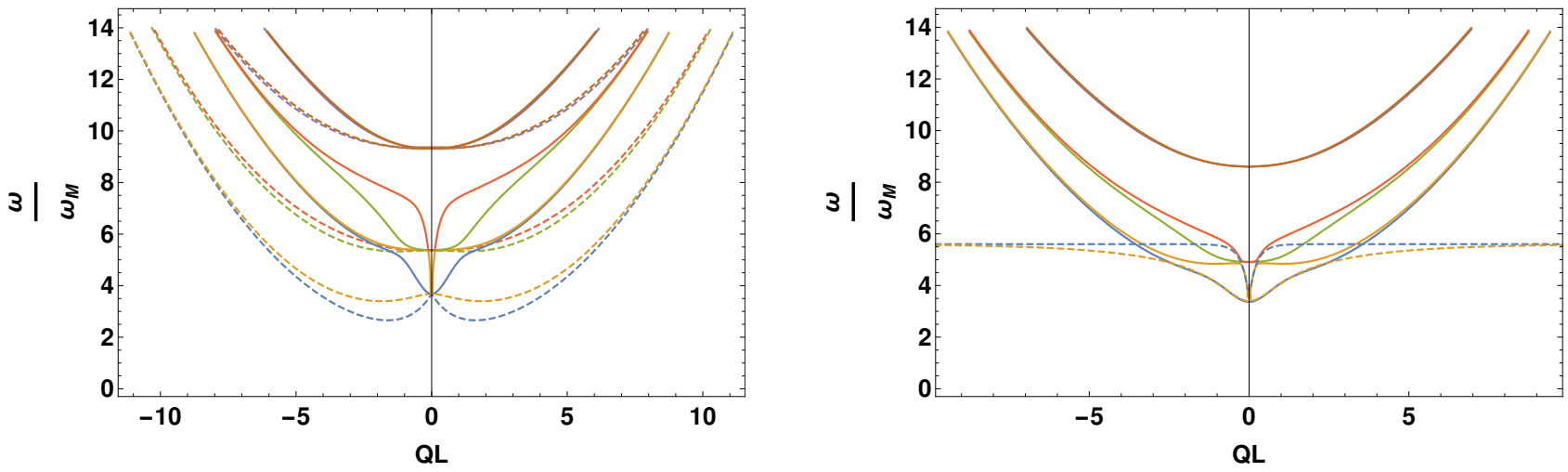
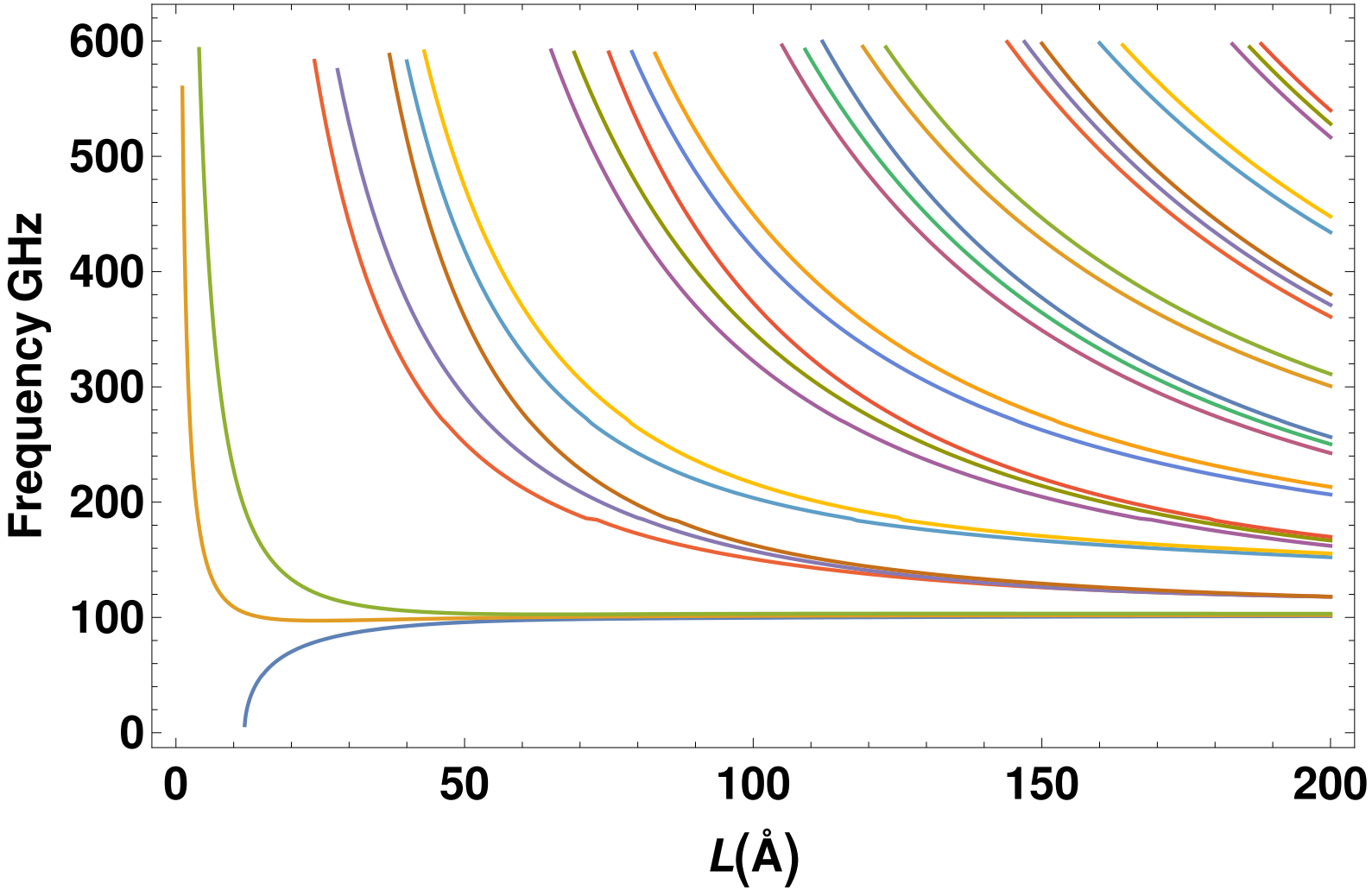


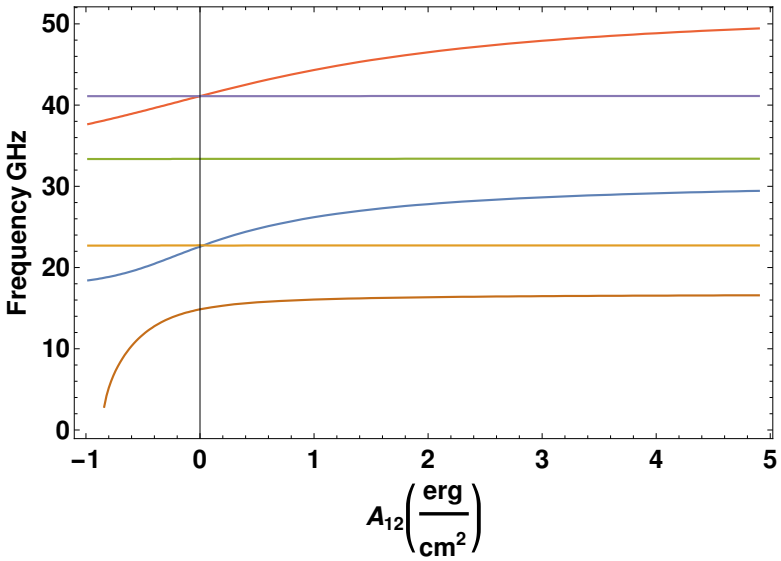
Figura: Izquierda, campo magnético en el plano, $H_0 = M_s$, $-- \rightarrow \phi = 0$, continuas $\phi = \pi/2$. Derecha, $\theta = 0.454\pi$, $H_0 = 6.4 M_s$, $\theta_M = 0.154\pi$, $\phi = 0.3\pi$, $H_i^{Fe} = 1.04 M_s$.

Cinco films ferromagnéticos, Fe-Ni-Fe-Ni-Fe, frequencias "dipole-exchange" vs. espesores:

$\theta_H = 0.49\pi$,$\theta_{Fe} = 0.28\pi$, $\theta_{Ni} = 0.48\pi$, $H_0 = 16.9kG$, $\varphi = 0.35\pi$, $A_{12} = 10erg/cm^2$



Dos films equivalentes de Fe, acoplamiento entre capas: $L = 400A^o$



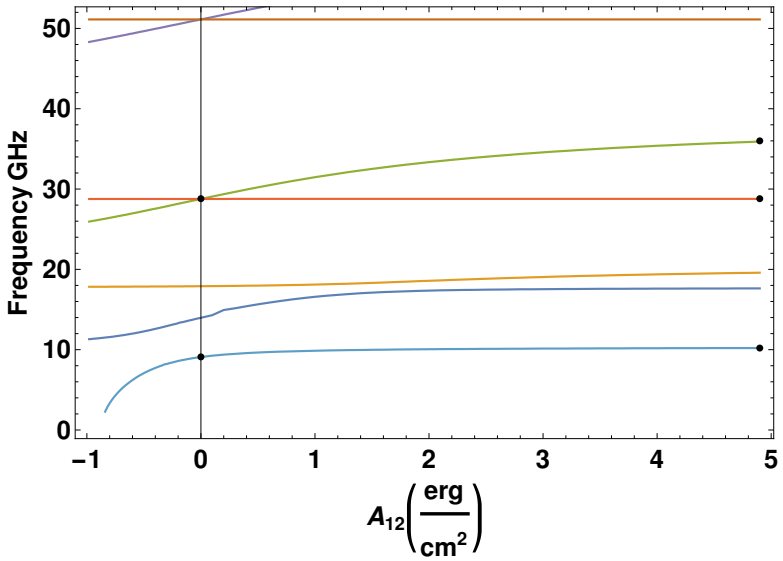


Figura: Izquierda, campo magnético en el plano $H_0 = 1kG$, $\phi = \pi/2$. Derecha, $H_0 = 18.2kG$, $\theta = 0.491\pi$, $\theta_{Fe} = 0.31\pi$, $\phi = 0.3\pi$, $H_i^{Fe} = 0.92kG$

Magnetizaciones, "dipole-exchange", bi-capa de Fe:

$H_0 = 18.2kG$, $\theta = 0.491\pi$, $\theta_{Fe} = 0.31\pi$, $\phi = 0.3\pi$, $H_i^{Fe} = 0.92kG$, $L = 400A^o$

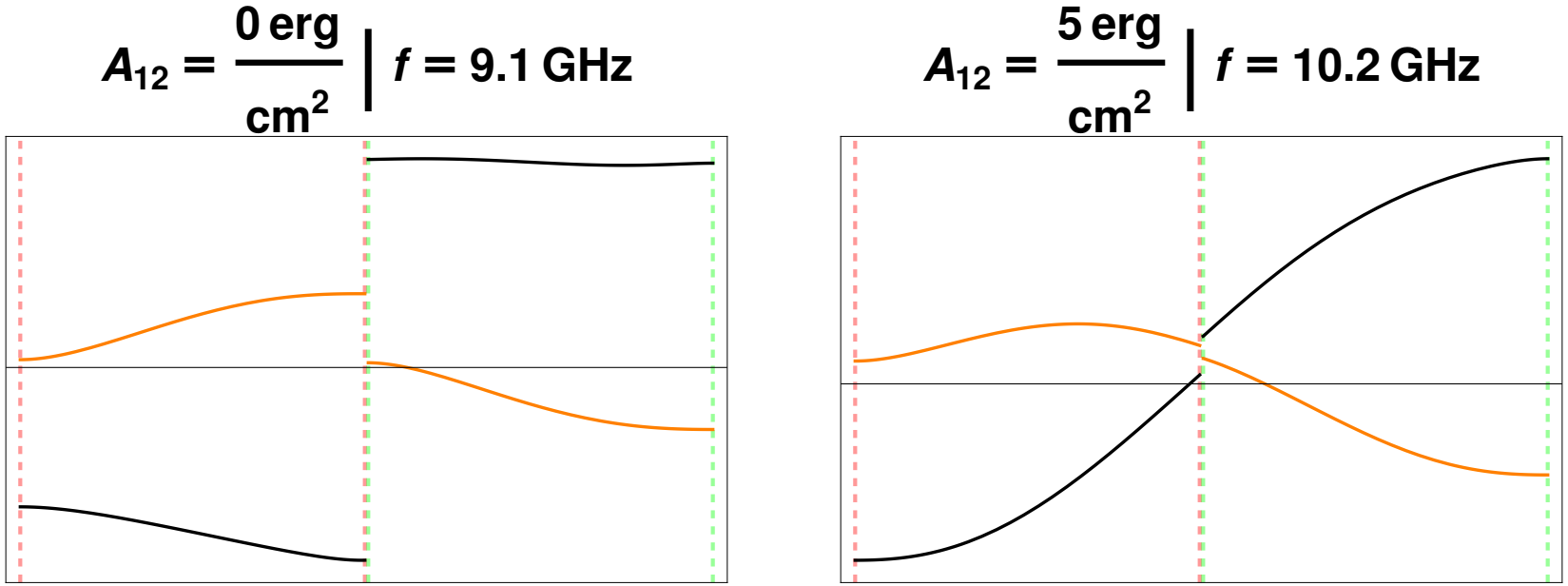


Figura: Magnetizaciones: negro m_x, naranjo $m_{\tilde{y}}$)

Consideraciones de simetría, propiedades de reciprocidad:

- **Antecedente:** Modos Damon-Eshbach, recíprocos en frecuencia, pero no en forma

- **Multicapas con un plano de simetría geométrico ($y = 0$), campo oblicuo:**
  Reciprocidad en frecuencia y no-reciprocidad en formas

$$\vec{Q} \to -\vec{Q} \quad : \quad \phi(y) \to \phi(-y), M_{\pm}(y) \to -M_{\pm}(-y)$$

- **Explicación:** Si un campo oblicuo se cambia de dirección en una multicapa simétrica existe una solución análoga que corresponde a un reflejada o anti-reflejada especularmente

CONCLUSIONES:

- **Nuevo método práctico de calcular ondas de spin en multi-capas ferromagnéticas: generalización de los teoremas de Green-Extinción**
- **N films: problema de valores propios, 6Nx6N, para frequencias y modos "dipole-exchange"en la superficie ($DET = 0$)**
- **Problema lineal inhomogéneo de 6x6 para los modos en un punto de interés**
- **Multicapas simétricas: modos recíprocos en frecuencia y no recíprocos en forma**