



# Respuesta electromagnética de partículas magnético/metálicas tipo core-shell.

Asesor: Alejandro Reyes-Coronado

Carlos Miguel García Rosas  
Facultad de Ciencias  
Universidad Nacional Autónoma de México

5 de abril de 2018

# Outline

## 1. Introducción

### 1.1 Motivación

### 1.2 “Teoría de Mie”

## 2. Expresiones del campo EM

### 2.1 Condiciones de frontera

### 2.2 Coeficientes de la expansión de los campos en la capa

### 2.3 Coeficientes para el campo esparcido fuera de la nanopartícula.

### 2.4 Secciones Transversales

## 3. Función dieléctrica de los metales Au & Ag

### 3.1 Función dieléctrica del Au

### 3.2 Función dieléctrica del Ag

## 4. Función dieléctrica de los materiales Ni & $Fe_3O_4$

### 4.1 Función dieléctrica del Ni

### 4.2 Función dieléctrica del $Fe_3O_4$

## 5. Resultados para sistemas metal/metal.



- 5.1 Nanopartícula Au/Au
- 5.2 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Au/Ag
- 5.3 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Agua/Au vs. Au
- 5.4 Nanopartícula Au/Ag
- 5.5 "Skin depth" de una nanopartícula Au
- 5.6 Nanopartícula Au/Ni
- 5.7 Nanopartícula Au/Ni
- 5.8 Nanopartícula Ni/Au
- 5.9 Nanopartícula Ni/Au
- 5.10 Nanopartícula Au/Ni vs Ni/Au
- 5.11 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$
- 5.12 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$
- 5.13 Nanopartícula  $Fe_3O_4$ /Au
- 5.14 Nanopartícula  $Fe_3O_4$ /Au
- 5.15 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$  vs Ni/ $Fe_3O_4$

## 6. Futuro trabajo

## 1. Introducción

### 1.1 Motivación

### 1.2 “Teoría de Mie”

## 2. Expresiones del campo EM

### 2.1 Condiciones de frontera

### 2.2 Coeficientes de la expansión de los campos en la capa

### 2.3 Coeficientes para el campo esparcido fuera de la nanopartícula.

### 2.4 Secciones Transversales

## 3. Función dieléctrica de los metales Au & Ag

### 3.1 Función dieléctrica del Au

### 3.2 Función dieléctrica del Ag

## 4. Función dieléctrica de los materiales Ni & $Fe_3O_4$

### 4.1 Función dieléctrica del Ni

### 4.2 Función dieléctrica del $Fe_3O_4$

## 5. Resultados para sistemas metal/metal.

5.1 Nanopartícula Au/Au

5.2 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Au/Ag

5.3 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Agua/Au vs. Au

5.4 Nanopartícula Au/Ag

5.5 "Skin depth" de una nanopartícula Au

5.6 Nanopartícula Au/Ni

5.7 Nanopartícula Au/Ni

5.8 Nanopartícula Ni/Au

5.9 Nanopartícula Ni/Au

5.10 Nanopartícula Au/Ni vs Ni/Au

5.11 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$

5.12 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$

5.13 Nanopartícula  $Fe_3O_4/Au$

5.14 Nanopartícula  $Fe_3O_4/Au$

5.15 Nanopartícula  $Au/Fe_3O_4$  vs  $Ni/Fe_3O_4$

## 6. Futuro trabajo

# 1. Introducción

- Estudiar la respuesta electromagnética de nanopartícula (NP) tipo *core/shell*.

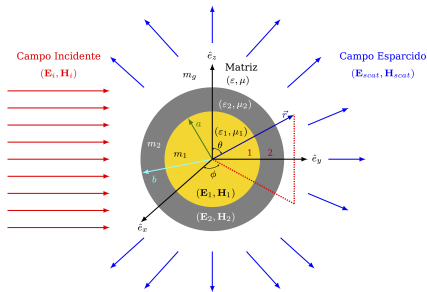


Figura 1: El campo EM incidente  $(\mathbf{E}_i, \mathbf{H}_i)$  en la región  $a \leq r \leq b$  de la nanopartícula, da origen a los campos eléctrico y magnético  $(\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2)$  y un campo esparcido fuera de ella  $(\mathbf{E}_{scat}, \mathbf{H}_{scat})$ .  $(\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1)$  representan el campo EM dentro de la partícula, es decir,  $0 \leq r \leq a$ .

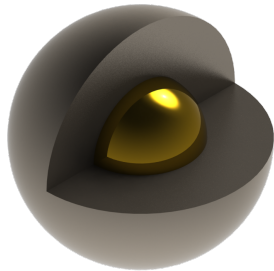
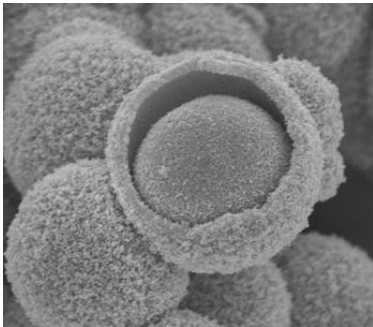


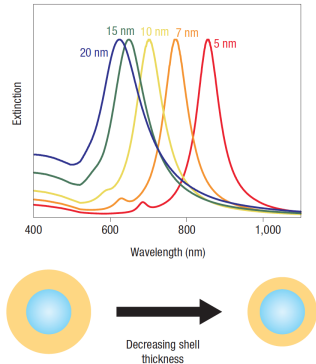
Figura 2: Esquema de una nanopartícula tipo core/shell, con núcleo metálico y capa magnética.

# 1.1 Motivación

- Resonancia Magnética Nuclear (NMR): imagen + tratamiento directo.



**Figura 3:** Nanopartícula de con un núcleo de aluminio y capa de óxido de silicio ( $Al/SiO_2$ ) vista desde SEM/TEM. <https://www.nanoshel.com/product/aluminium-silicon-oxide-core-shell/>



**Figura 4:** Resonancias del plasmón de una nanopartícula con núcleo de silicio con diámetro de 120 nm, variando el grosor de capa de oro. Lal, S., Link, S. & Halas, N. J. *Nanooptics from sensing to waveguiding*. *Nature Photon.* 1, (2007), 641-648.

## 1.2 “Teoría de Mie”

- Describió la respuesta electromagnética de una nanopartícula esférica, homogénea e isotrópica de radio  $a$ , por una onda electromagnética (EM) monocromática plana.

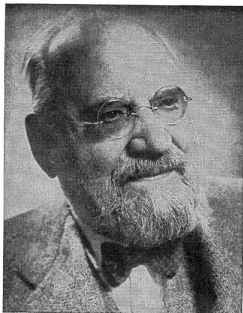


Figura 5: Gustav Adolf Feodor Wilhelm Ludwig Mie (cortesía de H. Spehl, Albert-Ludwigs-Universität).

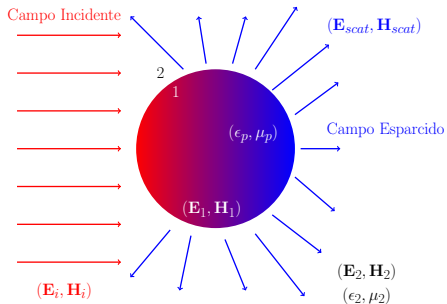


Figura 6: El campo EM incidente  $(\mathbf{E}_i, \mathbf{H}_i)$  da origen a un campo en el interior de la partícula  $(\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1)$  y a un campo esparcido fuera de ella  $(\mathbf{E}_{scat}, \mathbf{H}_{scat})$ .  $(\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2)$  representa el campo total en el medio que rodea a la partícula.

## 1. Introducción

### 1.1 Motivación

### 1.2 “Teoría de Mie”

## 2. Expresiones del campo EM

### 2.1 Condiciones de frontera

### 2.2 Coeficientes de la expansión de los campos en la capa

### 2.3 Coeficientes para el campo esparcido fuera de la nanopartícula.

### 2.4 Secciones Transversales

## 3. Función dieléctrica de los metales Au & Ag

### 3.1 Función dieléctrica del Au

### 3.2 Función dieléctrica del Ag

## 4. Función dieléctrica de los materiales Ni & $Fe_3O_4$

### 4.1 Función dieléctrica del Ni

### 4.2 Función dieléctrica del $Fe_3O_4$



## 5. Resultados para sistemas metal/metal.

5.1 Nanopartícula Au/Au

5.2 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Au/Ag

5.3 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Agua/Au vs. Au

5.4 Nanopartícula Au/Ag

5.5 "Skin depth" de una nanopartícula Au

5.6 Nanopartícula Au/Ni

5.7 Nanopartícula Au/Ni

5.8 Nanopartícula Ni/Au

5.9 Nanopartícula Ni/Au

5.10 Nanopartícula Au/Ni vs Ni/Au

5.11 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$

5.12 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$

5.13 Nanopartícula  $Fe_3O_4/Au$

5.14 Nanopartícula  $Fe_3O_4/Au$

5.15 Nanopartícula  $Au/Fe_3O_4$  vs  $Ni/Fe_3O_4$

## 6. Futuro trabajo

## 2. Expresiones del campo EM

- En la región  $a \leq r \leq b$ , las funciones esféricas de Bessel  $j_n$  y  $y_n$  son finitas; como consecuencia, la expansión de los campos eléctrico y magnético ( $\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2$ ) en esta región es

$$\mathbf{E}_2 = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left[ f_n \mathbf{M}_{o1n}^{(1)} - i g_n \mathbf{N}_{e1n}^{(1)} + i w_n \mathbf{N}_{e1n}^{(2)} - v_n \mathbf{M}_{o1n}^{(2)} \right], \quad (1)$$

$$\mathbf{H}_2 = -\frac{k_2}{\omega \mu_2} \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left[ g_n \mathbf{M}_{e1n}^{(1)} + i f_n \mathbf{N}_{o1n}^{(1)} - w_n \mathbf{M}_{e1n}^{(2)} - i v_n \mathbf{N}_{o1n}^{(2)} \right], \quad (2)$$

donde  $\omega$  es la frecuencia angular,  $k_2 = 2\pi m_2/\lambda$ ,  $\mu_2$  es la permeabilidad magnética en la segunda región.

## 2. Expresiones del campo EM

- Para calcular el campo EM dentro de la partícula ( $\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1$ ) en la región  $0 \leq r \leq r_1$  (núcleo), en donde las funciones esféricas de Bessel  $j_n$  son finitas, es decir [1,2]

$$\mathbf{E}_1 = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left[ c_n^{(1)} \mathbf{M}_{o1n}^{(1)} - i d_n^{(1)} \mathbf{N}_{e1n}^{(1)} \right], \quad (3)$$

$$\mathbf{H}_1 = -\frac{k_1}{\omega \mu_1} \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left[ d_n^{(1)} \mathbf{M}_{e1n}^{(1)} + i c_n^{(1)} \mathbf{N}_{o1n}^{(1)} \right]. \quad (4)$$

[1] C. F. Bohren, D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley, New York, EEUU (1983).

[2] Z. S. Wu, Y. P. Wang, *Electromagnetic scattering for multilayered sphere: recursive algorithms*, *Radio Sci.* (1991), 26, 1393–1401. DOI: 10.1029/91RS01192.

## 2. Expresiones del campo EM

- En la región fuera (capa-matriz) de la esfera  $\mathbf{E} = \mathbf{E}_i + \mathbf{E}_s$  y además los campos incidentes y esparcidos se denotan como [1]

$$\mathbf{E}_i = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left[ \mathbf{M}_{o1n}^{(1)} - i\mathbf{N}_{e1n}^{(1)} \right], \quad (5)$$

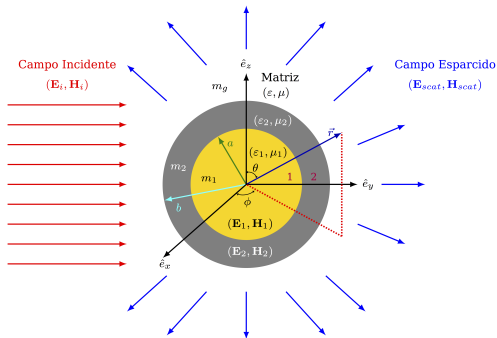
$$\mathbf{H}_i = -\frac{k}{\omega\mu} \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left[ \mathbf{M}_{e1n}^{(1)} + i\mathbf{N}_{o1n}^{(1)} \right], \quad (6)$$

$$\mathbf{E}_s = \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left[ ia_n \mathbf{N}_{e1n}^{(3)} - b_n \mathbf{M}_{o1n}^{(3)} \right], \quad (7)$$

$$\mathbf{H}_s = -\frac{k}{\omega\mu} \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left[ ib_n \mathbf{N}_{o1n}^{(3)} + a_n \mathbf{M}_{e1n}^{(3)} \right]. \quad (8)$$

[1] C. F. Bohren, D. R. Huffman, *Absorption and Scattering of Light by Small Particles*, Wiley, New York, EEUU (1983).

## 2.1 Condiciones de frontera



- Las condiciones de frontera para la interfaz núcleo–capa ( $r_1 = a$ ) están dadas por

$$(\mathbf{E}_2 - \mathbf{E}_1) \times \hat{\mathbf{e}}_r = 0, \quad (9a)$$

$$(\mathbf{H}_2 - \mathbf{H}_1) \times \hat{\mathbf{e}}_r = 0. \quad (9b)$$

Mientras que para el caso del sistema *core/shell*, en la interfaz capa–matriz ( $r_2 = b$ ), las condiciones de frontera están dadas por

$$(\mathbf{E}_s + \mathbf{E}_i - \mathbf{E}_2) \times \hat{\mathbf{e}}_r = 0, \quad (10a)$$

$$(\mathbf{H}_s + \mathbf{H}_i - \mathbf{H}_2) \times \hat{\mathbf{e}}_r = 0. \quad (10b)$$

## 2.1 Condiciones de frontera

- Las componentes tangenciales de los campos eléctricos y magnéticos deben ser continuas, lo que da como resultado el siguiente sistema de ecuaciones:

$$\begin{aligned} E_{s\theta} + E_{i\theta} &= E_{2\theta}, & E_{s\phi} + E_{i\phi} &= E_{2\phi}, \\ H_{s\theta} + H_{i\theta} &= H_{2\theta}, & H_{s\phi} + H_{i\phi} &= H_{2\phi}, \\ E_{2\theta} &= E_{1\theta}, & E_{2\phi} &= E_{1\phi}, \\ H_{2\theta} &= H_{1\theta}, & H_{2\phi} &= H_{1\phi}. \end{aligned} \tag{11}$$

## 2.2 Coeficientes de la expansión de los campos en la capa

- Debido a las condiciones de contorno [ec. (11)] se cumple que  $E_{2\theta} = E_{1\theta}$  y  $H_{2\theta} = H_{1\theta}$ , y además  $m_\ell = k_\ell/k$ , con  $\ell = 1, 2$ ; entonces para el caso de una partícula tipo *core/shell*, en la región  $a \leq r \leq b$  (la capa), se obtienen las siguientes expresiones:

$$A_n^{(2)} = \frac{m_2 \mu_1 \psi_n(m_2 x_1) \psi_n'(m_1 x_1) - m_1 \mu_2 \psi_n(m_1 x_1) \psi_n'(m_2 x_1)}{m_2 \mu_1 \chi_n(m_2 x_1) \psi_n'(m_1 x_1) - m_1 \mu_2 \chi_n'(m_2 x_1) \psi_n(m_1 x_1)}, \quad (12)$$

$$B_n^{(2)} = \frac{m_2 \mu_1 \psi_n(m_1 x_1) \psi_n'(m_2 x_1) - m_1 \mu_2 \psi_n(m_2 x_1) \psi_n'(m_1 x_1)}{m_2 \mu_1 \chi_n'(m_2 x_1) \psi_n(m_1 x_1) - m_1 \mu_2 \chi_n(m_2 x_1) \psi_n'(m_1 x_1)}, \quad (13)$$



## 2.3 Coeficientes para el campo esparcido fuera de la nanopartícula (en la matriz)

- Para el caso de la última capa,  $E_{s\theta} + E_{i\theta} = E_{2\theta}$  y  $H_{s\theta} + H_{i\theta} = H_{2\theta}$ , se obtienen las siguientes expresiones:

$$a_n = \frac{\mu_2 \psi_n(x_2) \left[ \psi'_n(m_2 x_2) - A_n^{(2)} \chi'_n(m_2 x_2) \right] - m_2 \mu \psi'_n(x_2) \left[ \psi_n(m_2 x_2) - A_n^{(2)} \chi_n(m_2 x_2) \right]}{\mu_2 \zeta_n(x_2) \left[ \psi'_n(m_2 x_2) - A_n^{(2)} \chi'_n(m_2 x_2) \right] - m_2 \mu \zeta'_n(x_2) \left[ \psi_n(m_2 x_2) - A_n^{(2)} \chi_n(m_2 x_2) \right]}, \quad (14)$$

$$b_n = \frac{m_2 \mu \psi_n(x_2) \left[ \psi'_n(m_2 x_2) - B_n^{(2)} \chi'_n(m_2 x_2) \right] - \mu_2 \psi'_n(x_2) \left[ \psi_n(m_2 x_2) - B_n^{(2)} \chi_n(m_2 x_2) \right]}{m_2 \mu \zeta_n(x_2) \left[ \psi'_n(m_2 x_2) - B_n^{(2)} \chi'_n(m_2 x_2) \right] - \mu_2 \zeta'_n(x_2) \left[ \psi_n(m_2 x_2) - B_n^{(2)} \chi_n(m_2 x_2) \right]}. \quad (15)$$

## 2.4 Secciones Transversales

- Las secciones de esparcimiento, absorción y extinción están dadas por las siguiente ecuaciones

$$C_{\text{scat}} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) (|a_n|^2 + |b_n|^2), \quad (16)$$

$$C_{\text{ext}} = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}\{a_n + b_n\}, \quad (17)$$

$$C_{\text{abs}} = C_{\text{ext}} - C_{\text{scat}}. \quad (18)$$

## 1. Introducción

### 1.1 Motivación

### 1.2 “Teoría de Mie”

## 2. Expresiones del campo EM

### 2.1 Condiciones de frontera

### 2.2 Coeficientes de la expansión de los campos en la capa

### 2.3 Coeficientes para el campo esparcido fuera de la nanopartícula.

### 2.4 Secciones Transversales

## 3. Función dieléctrica de los metales Au & Ag

### 3.1 Función dieléctrica del Au

### 3.2 Función dieléctrica del Ag

## 4. Función dieléctrica de los materiales Ni & $Fe_3O_4$

### 4.1 Función dieléctrica del Ni

### 4.2 Función dieléctrica del $Fe_3O_4$

## 5. Resultados para sistemas metal/metal.

5.1 Nanopartícula Au/Au

5.2 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Au/Ag

5.3 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Agua/Au vs. Au

5.4 Nanopartícula Au/Ag

5.5 "Skin depth" de una nanopartícula Au

5.6 Nanopartícula Au/Ni

5.7 Nanopartícula Au/Ni

5.8 Nanopartícula Ni/Au

5.9 Nanopartícula Ni/Au

5.10 Nanopartícula Au/Ni vs Ni/Au

5.11 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$

5.12 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$

5.13 Nanopartícula  $Fe_3O_4/Au$

5.14 Nanopartícula  $Fe_3O_4/Au$

5.15 Nanopartícula  $Au/Fe_3O_4$  vs  $Ni/Fe_3O_4$

## 6. Futuro trabajo

# 3.1 Función dieléctrica del Au

- La función dieléctrica está definida como

$$\epsilon = \epsilon_1(\omega) + i\epsilon_2(\omega) \quad (19)$$

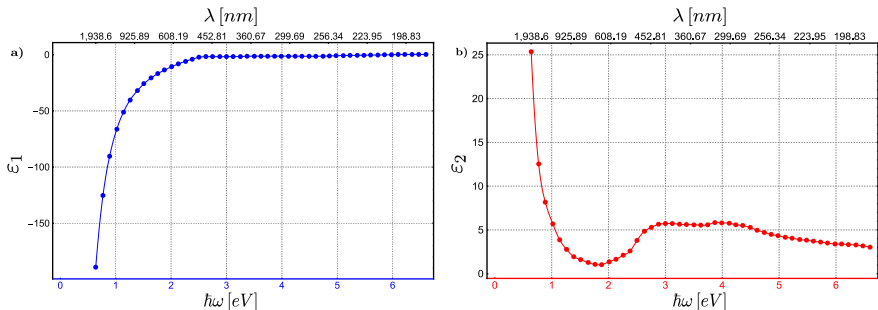
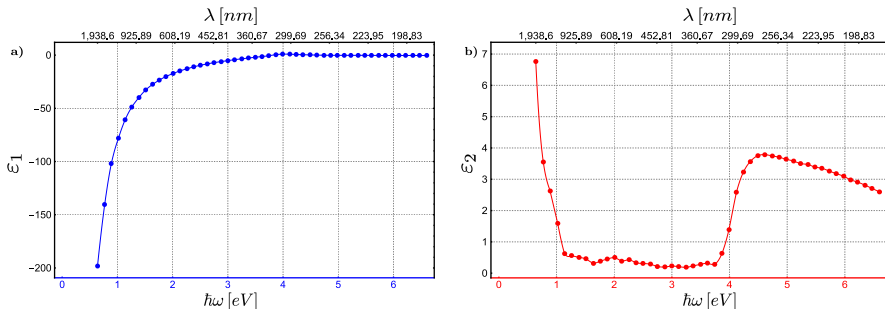


Figura 7: a) Gráfica de la parte real de la función dieléctrica del Au en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala de arriba). b) Gráfica de la parte imaginaria de la función dieléctrica del Au en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala de arriba). Los puntos representan datos experimentales de Johnson y Christy [3], la línea que representa una interpolación generada a partir de los datos.

[3] P. B., Johnson and R. W. Christy, *Optical Constants of the Noble Metals*, *Phys. Rev. B* (1972), 12, 4370–4379.

DOI: 10.1103/PhysRevB.6.4370.

## 3.2 Función dieléctrica del Ag



**Figura 8:** a) Gráfica de la parte real de la función dieléctrica del Ag en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala de arriba). b) Gráfica de la parte imaginaria de la función dieléctrica del Ag en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala de arriba). Los puntos representan datos experimentales de Johnson y Christy [3], la línea que representa una interpolación generada a partir de los datos.

[3] P. B., Johnson and R. W. Christy, *Optical Constants of the Noble Metals*, *Phys. Rev. B* (1972), 12, 4370–4379.  
DOI: 10.1103/PhysRevB.6.4370.

## 1. Introducción

### 1.1 Motivación

### 1.2 “Teoría de Mie”

## 2. Expresiones del campo EM

### 2.1 Condiciones de frontera

### 2.2 Coeficientes de la expansión de los campos en la capa

### 2.3 Coeficientes para el campo esparcido fuera de la nanopartícula.

### 2.4 Secciones Transversales

## 3. Función dieléctrica de los metales Au & Ag

### 3.1 Función dieléctrica del Au

### 3.2 Función dieléctrica del Ag

## 4. Función dieléctrica de los materiales Ni & $Fe_3O_4$

### 4.1 Función dieléctrica del Ni

### 4.2 Función dieléctrica del $Fe_3O_4$



## 5. Resultados para sistemas metal/metal.

5.1 Nanopartícula Au/Au

5.2 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Au/Ag

5.3 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Agua/Au vs. Au

5.4 Nanopartícula Au/Ag

5.5 "Skin depth" de una nanopartícula Au

5.6 Nanopartícula Au/Ni

5.7 Nanopartícula Au/Ni

5.8 Nanopartícula Ni/Au

5.9 Nanopartícula Ni/Au

5.10 Nanopartícula Au/Ni vs Ni/Au

5.11 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$

5.12 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$

5.13 Nanopartícula  $Fe_3O_4/Au$

5.14 Nanopartícula  $Fe_3O_4/Au$

5.15 Nanopartícula  $Au/Fe_3O_4$  vs  $Ni/Fe_3O_4$

## 6. Futuro trabajo

## 4.1 Función dieléctrica del Ni

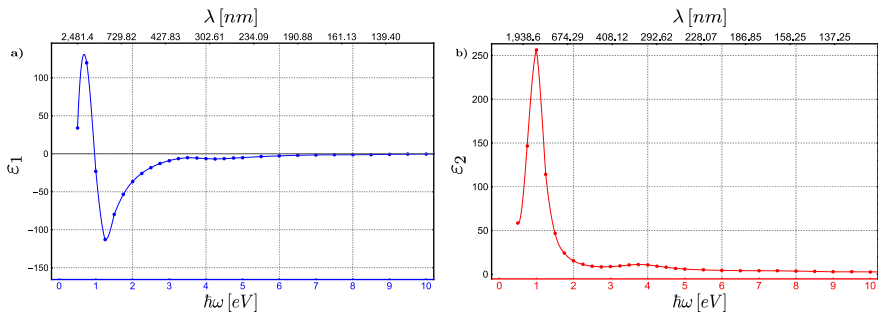


Figura 9: a) Gráfica de la parte real de la función dieléctrica del Ni en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala de arriba). b) Gráfica de la parte imaginaria de la función dieléctrica del Ni en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala de arriba). Los puntos representan datos experimentales de Werner et. al. [4], la línea que representa una interpolación generada a partir de los datos.

[4] W.S.M. Werner, K. Glantschnig, and C. Ambrosch-Draxl, *J. Phys. Chem. Ref. Data* **38**, 1013 (2009).

DOI: 10.1063/1.3243762.

## 4.2 Función dieléctrica del $Fe_3O_4$

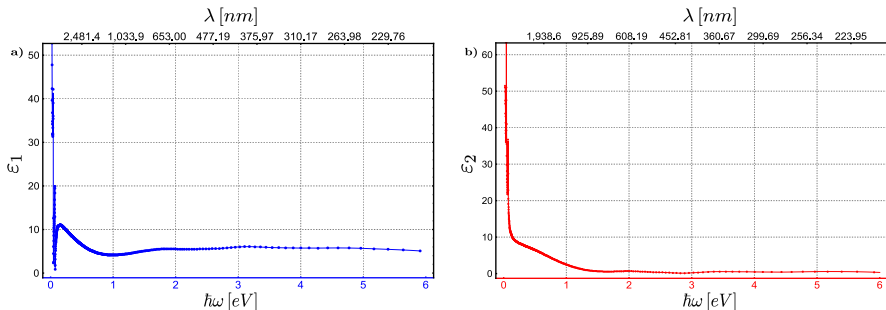


Figura 10: a) Gráfica de la parte real de la función dieléctrica del  $Fe_3O_4$  en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala de arriba). b) Gráfica de la parte imaginaria de la función dieléctrica del  $Fe_3O_4$  en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala de arriba). Los puntos representan datos experimentales de Query [5], la línea que representa una interpolación generada a partir de los datos.

[5] M. R. Query, *Optical Constants*, Report No. AD-A158-623, University of Missouri (1985).

## 1. Introducción

### 1.1 Motivación

### 1.2 “Teoría de Mie”

## 2. Expresiones del campo EM

### 2.1 Condiciones de frontera

### 2.2 Coeficientes de la expansión de los campos en la capa

### 2.3 Coeficientes para el campo esparcido fuera de la nanopartícula.

### 2.4 Secciones Transversales

## 3. Función dieléctrica de los metales Au & Ag

### 3.1 Función dieléctrica del Au

### 3.2 Función dieléctrica del Ag

## 4. Función dieléctrica de los materiales Ni & $Fe_3O_4$

### 4.1 Función dieléctrica del Ni

### 4.2 Función dieléctrica del $Fe_3O_4$

## 5. Resultados para sistemas metal/metal.

5.1 Nanopartícula Au/Au

5.2 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Au/Ag

5.3 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Agua/Au vs. Au

5.4 Nanopartícula Au/Ag

5.5 "Skin depth" de una nanopartícula Au

5.6 Nanopartícula Au/Ni

5.7 Nanopartícula Au/Ni

5.8 Nanopartícula Ni/Au

5.9 Nanopartícula Ni/Au

5.10 Nanopartícula Au/Ni vs Ni/Au

5.11 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$

5.12 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$

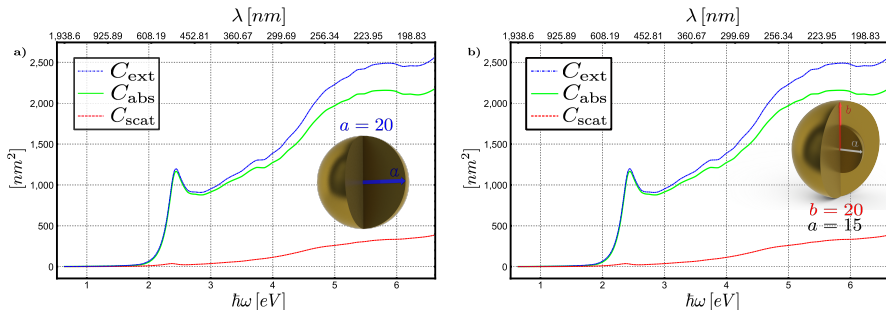
5.13 Nanopartícula  $Fe_3O_4/Au$

5.14 Nanopartícula  $Fe_3O_4/Au$

5.15 Nanopartícula  $Au/Fe_3O_4$  vs  $Ni/Fe_3O_4$

## 6. Futuro trabajo

## 5.1 Test I: nanopartícula Au/Au



**Figura 11:** a) Esta gráfica presenta los resultados obtenidos al calcular los coeficientes de extinción ( $C_{\text{ext}}$ ), absorción ( $C_{\text{abs}}$ ) y esparcimiento ( $C_{\text{scat}}$ ), para una nanopartícula de Au con radio  $a = 20$ . b) Esta gráfica presenta los resultados obtenidos al calcular los coeficientes  $C_{\text{ext}}$ ,  $C_{\text{abs}}$  y  $C_{\text{scat}}$ , para una nanopartícula de tipo Au/Au, donde el radio del núcleo es igual a  $a = 15$  y el radio de la capa es igual a  $b = 20$ .



## 5.2 Test II: comparación de resultados Au/Ag

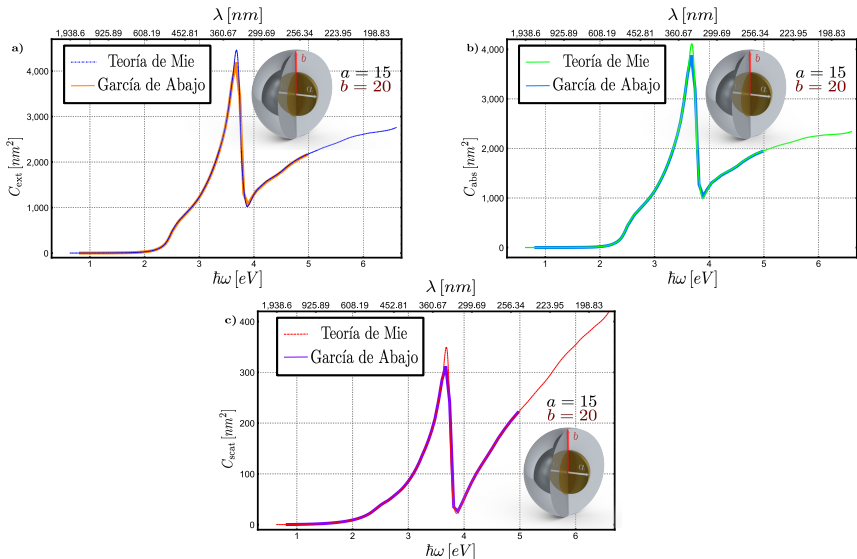


Figura 12: a) Coeficiente de extinción. b) Coeficiente de absorción. c) Coeficiente de esparsimiento. NP de Au/Ag de radio interior  $a = 15$  nm y radio exterior  $b = 20$  nm. [6]

[6] <http://garciaabajos-group.icfo.es>

# 5.3 Test III: Nanopartícula con sistema Agua/Au vs. Au

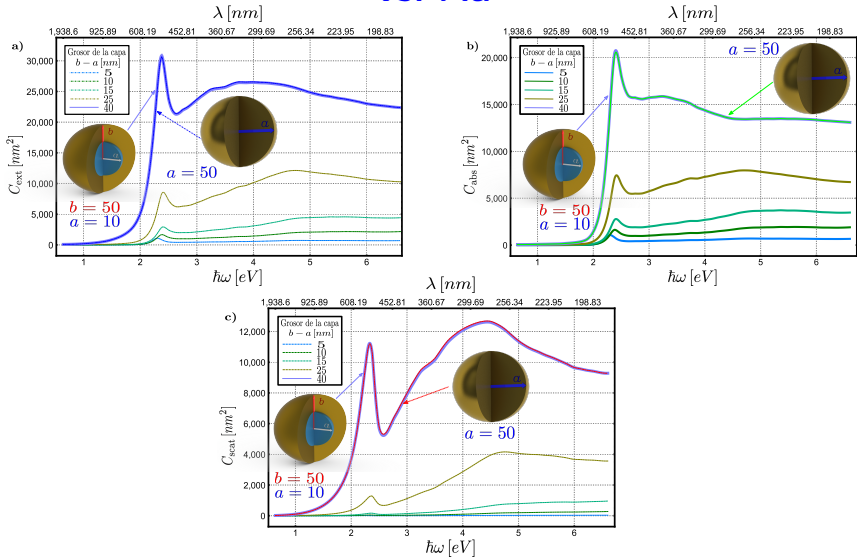


Figura 13: a) Coeficiente de extinción. b) Coeficiente de absorción. c) Coeficiente de esparramiento.

## 5.4 Nanopartícula con sistema Au/Ag

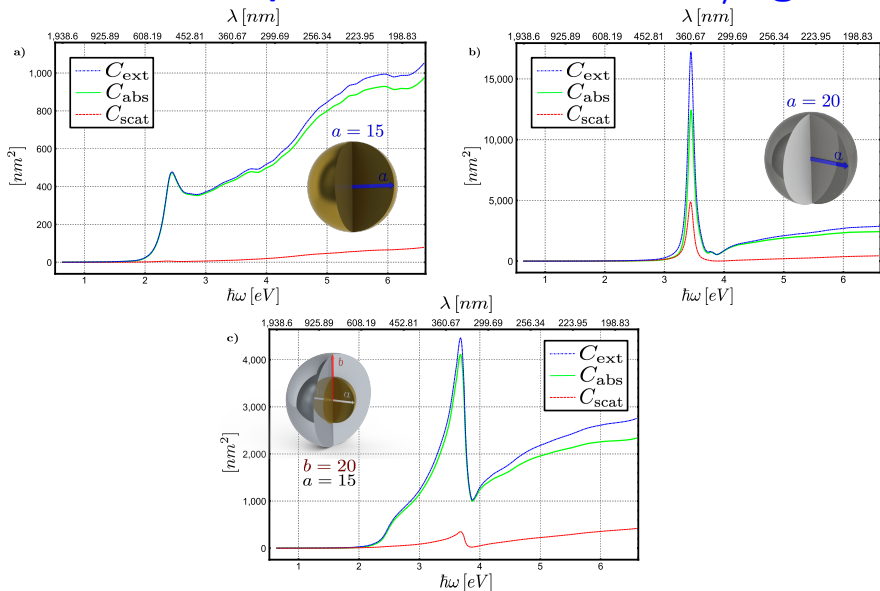


Figura 14: a) Nanopartícula de Au. b) Nanopartícula de Ag. c) Nanopartícula tipo Au/Ag de radio interior  $a_{Au} = 15$  nm y radio exterior  $b_{Ag} = 20$  nm.

## 5.5 "Skin depth" de una nanopartícula Au

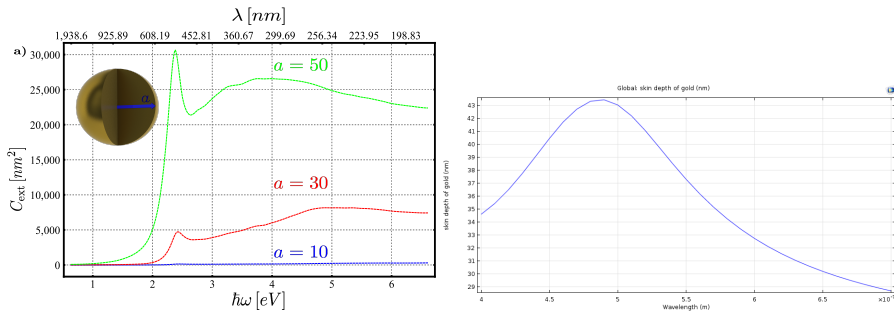
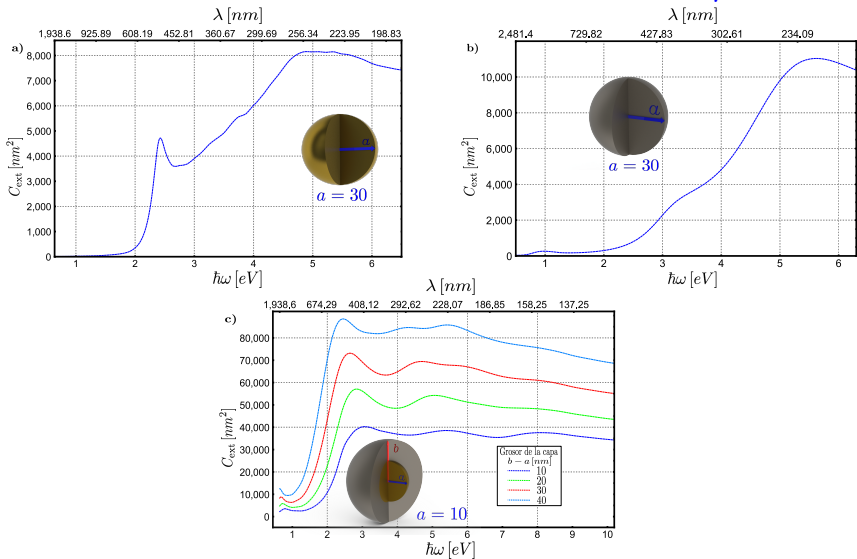


Figura 15: a) Coeficientes de extinción de una NP de Au. b) Skin depth de una nanopartícula de Au..

# 5.6 Nanopartícula con sistema Au/Ni



**Figura 16:** a) Coeficiente de extinción de una NP de Au. b) Coeficiente de extinción de una NP de Ni. c) Nanopartícula tipo Au/Ni de radio interior  $a_{Au} = 10$  nm y grosor de la capa igual a  $\Delta r = 10, 20, 30, 40$  nm.

## 5.6 Nanopartícula con sistema Au/Ni

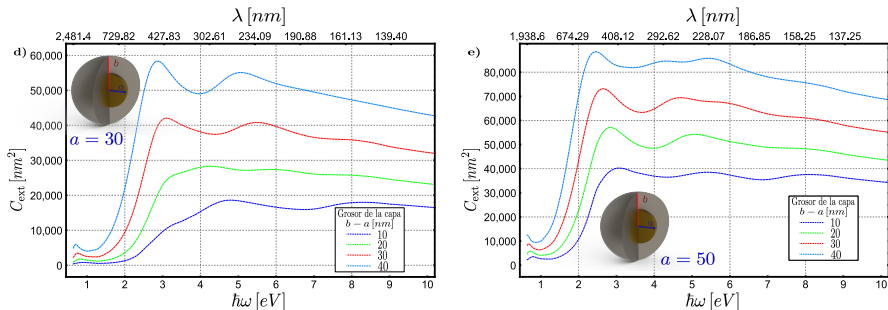
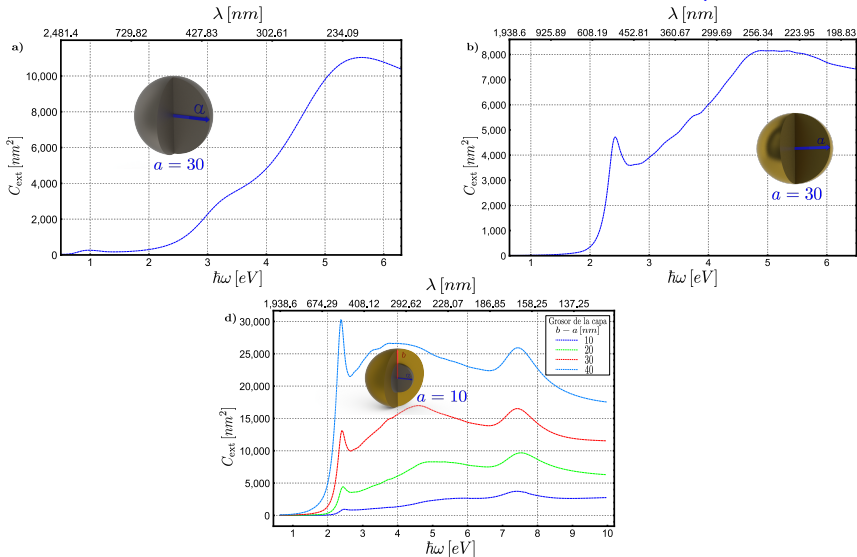


Figura 17: a), b) Nanopartícula tipo Au/Ni de radio interior  $a_{Au} = 30$  y  $50$  nm, respectivamente, con grosor de capa igual a  $\Delta r = 10, 20, 30, 40$  nm.

# 5.7 Nanopartícula con sistema Ni/Au



**Figura 18:** a) Coeficiente de extinción de una NP de Ni. b) Coeficiente de extinción de una NP de Au. c) Nanopartícula tipo Ni/Au de radio interior  $a_{Ni} = 10$  nm y grosor de la capa igual a  $\Delta r = 10, 20, 30, 40$  nm.

## 5.7 Nanopartícula con sistema Ni/Au

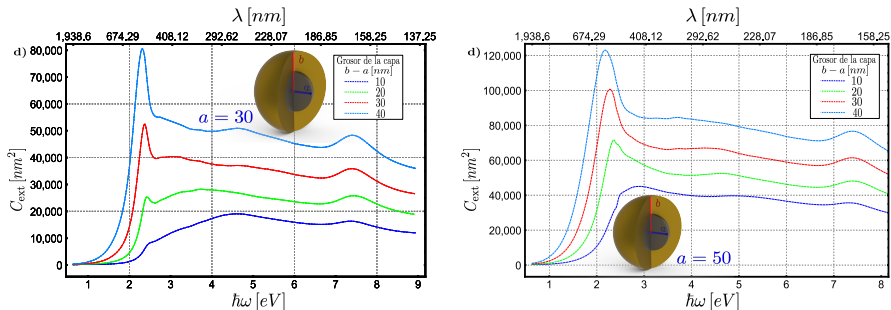


Figura 19: a), b) Nanopartícula tipo Ni/Au de radio interior  $a_{\text{Ni}} = 30$  y  $50$  nm, respectivamente, con grosor de capa igual a  $\Delta r = 10, 20, 30, 40$  nm.



## 5.8 Nanopartícula con sistema Au/Ni vs Ni/Au

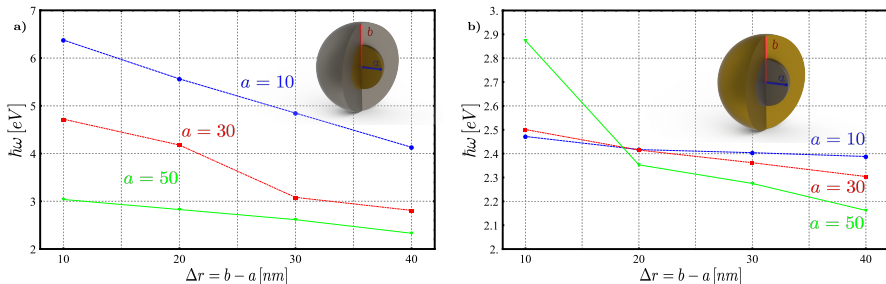
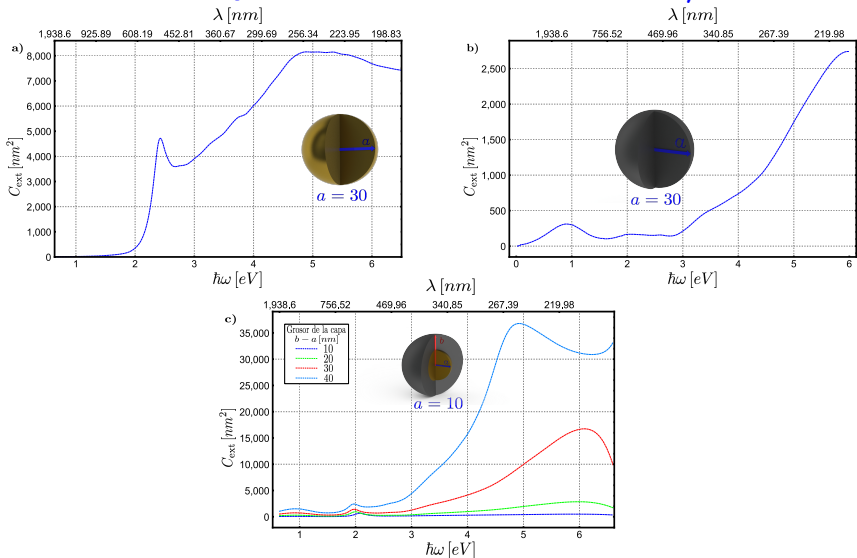


Figura 20: a) Coeficientes de extinción para  $\ell = 1$  (dipolar) de una NP tipo Au/Ni. b) Coeficientes de extinción para  $\ell = 1$  (dipolar) de una NP tipo Ni/Au.

## 5.9 Nanopartícula con sistema Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>



**Figura 21:** a) Coeficiente de extinción de una NP de Au. b) Coeficiente de extinción de una NP de Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (magnetita). c) Nanopartícula tipo Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> de radio interior  $a_{Au} = 10$  nm y grosor de la capa igual a  $\Delta r = 10, 20, 30, 40$  nm.

## 5.9 Nanopartícula con sistema Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>

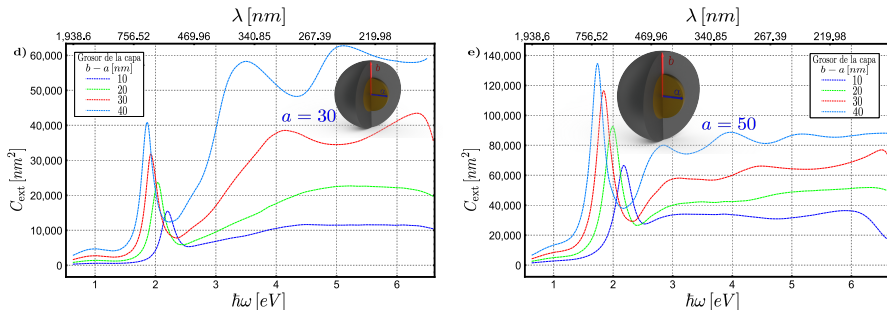
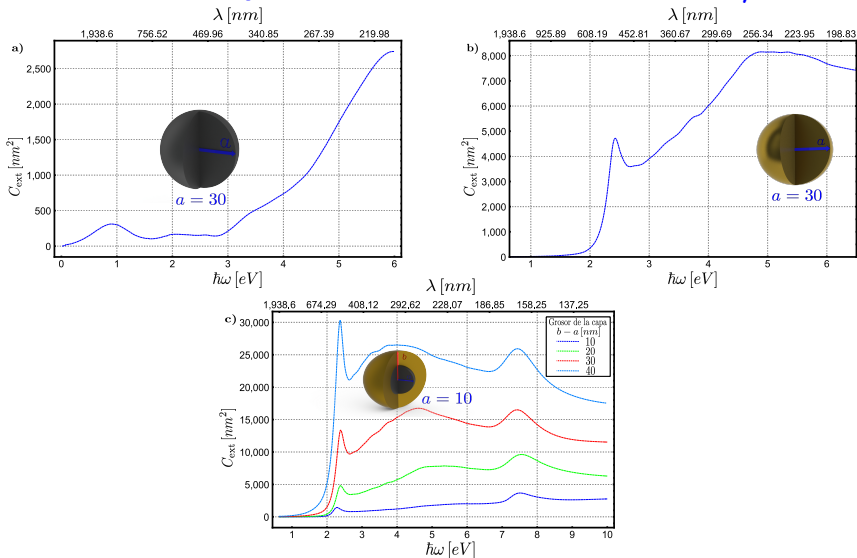


Figura 22: a), b) Nanopartícula tipo Au/Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> de radio interior  $a_{\text{Au}} = 30$  y  $50$  nm, respectivamente, con grosor de capa igual a  $\Delta r = 10, 20, 30, 40$  nm.

# 5.10 Nanopartícula con sistema $Fe_3O_4/Au$



**Figura 23:** a) Coeficiente de extinción de una NP de  $Fe_3O_4$ . b) Coeficiente de extinción de una NP de Au. c) Nanopartícula tipo Ni/Au de radio interior  $a_{Fe_3O_4} = 10$  nm y grosor de la capa igual a  $\Delta r = 10, 20, 30, 40$  nm.

## 5.10 Nanopartícula con sistema $Fe_3O_4/Au$

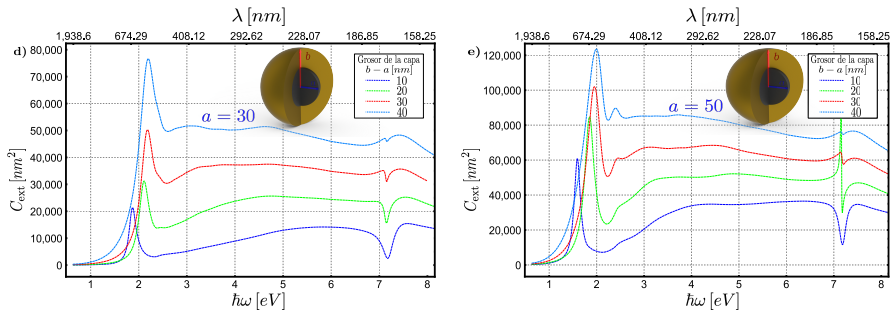


Figura 24: a), b) Nanopartícula tipo  $Fe_3O_4/Au$  de radio interior  $a_{Fe_3O_4} = 30$  y  $50$  nm, respectivamente, con grosor de capa igual a  $\Delta r = 10, 20, 30, 40$  nm.

## 5.11 Nanopartícula con sistema Au/ $Fe_3O_4$ vs $Fe_3O_4$ /Au

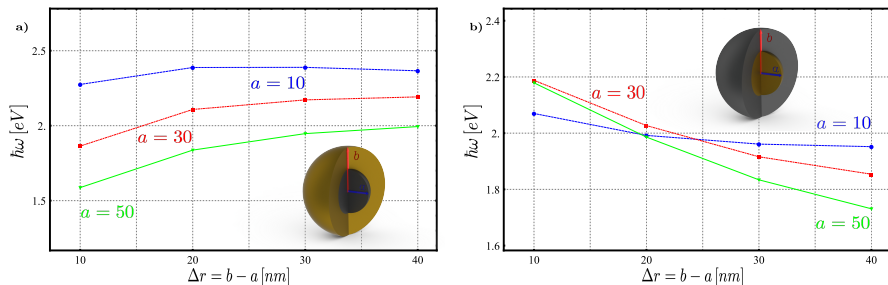


Figura 25: a) Coeficientes de extinción para  $\ell = 1$  (dipolar) de una NP tipo  $Fe_3O_4$ /Au. b) Coeficientes de extinción para  $\ell = 1$  (dipolar) de una NP tipo Au/ $Fe_3O_4$ .

## 1. Introducción

### 1.1 Motivación

### 1.2 “Teoría de Mie”

## 2. Expresiones del campo EM

### 2.1 Condiciones de frontera

### 2.2 Coeficientes de la expansión de los campos en la capa

### 2.3 Coeficientes para el campo esparcido fuera de la nanopartícula.

### 2.4 Secciones Transversales

## 3. Función dieléctrica de los metales Au & Ag

### 3.1 Función dieléctrica del Au

### 3.2 Función dieléctrica del Ag

## 4. Función dieléctrica de los materiales Ni & $Fe_3O_4$

### 4.1 Función dieléctrica del Ni

### 4.2 Función dieléctrica del $Fe_3O_4$

## 5. Resultados para sistemas metal/metal.

5.1 Nanopartícula Au/Au

5.2 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Au/Ag

5.3 Comparación de resultados para una nanopartícula tipo Agua/Au vs. Au

5.4 Nanopartícula Au/Ag

5.5 "Skin depth" de una nanopartícula Au

5.6 Nanopartícula Au/Ni

5.7 Nanopartícula Au/Ni

5.8 Nanopartícula Ni/Au

5.9 Nanopartícula Ni/Au

5.10 Nanopartícula Au/Ni vs Ni/Au

5.11 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$

5.12 Nanopartícula Au/ $Fe_3O_4$



5.13 Nanopartícula  $Fe_3O_4/Au$

5.14 Nanopartícula  $Fe_3O_4/Au$

5.15 Nanopartícula  $Au/Fe_3O_4$  vs  $Ni/Fe_3O_4$

## 6. Futuro trabajo

## 6. Nanoelipsoides tipo core/shell

- Deformar el sistema anterior, obteniendo un nuevo sistema de nanoelipsoides, tipo core/shell, para así ganar sensibilidad dependiendo de la dirección de la partícula.

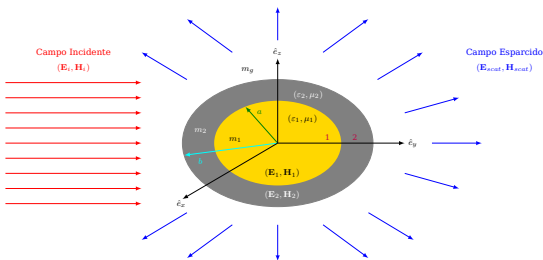


Figura 26: Elipsoide oblatado.

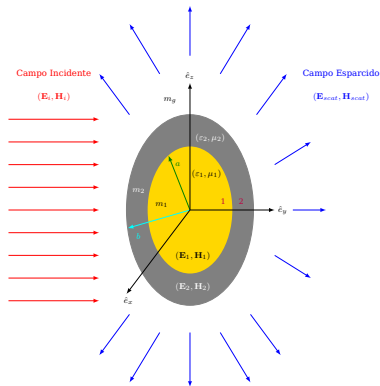


Figura 27: Elipsoide prolato.