



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*.

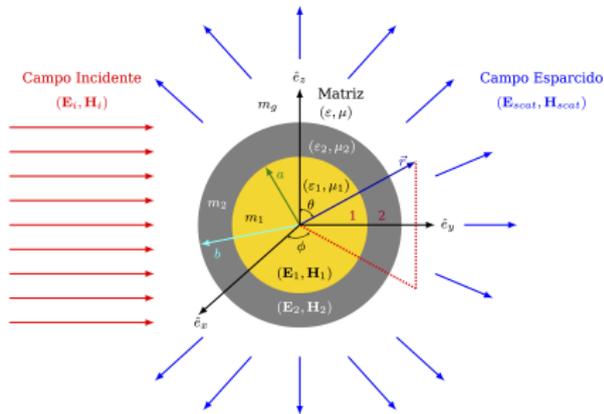


Figura 1: El campo EM incidente $(\mathbf{E}_i, \mathbf{H}_i)$ en la región $a \leq r \leq b$ de la nanopartícula, da origen a los campos eléctrico y magnético $(\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2)$ y un campo esparcido fuera de ella $(\mathbf{E}_{scat}, \mathbf{H}_{scat})$. $(\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1)$ representan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

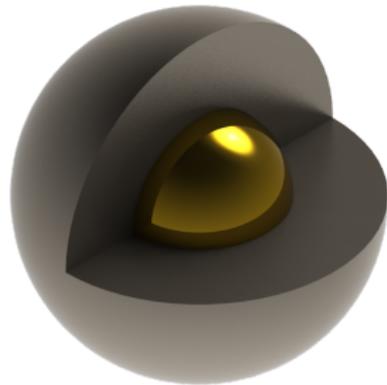


Figura 2: Esquema de una nanopartícula tipo core/shell, con núcleo metálico y capa magnética.

1.1 Motivación

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

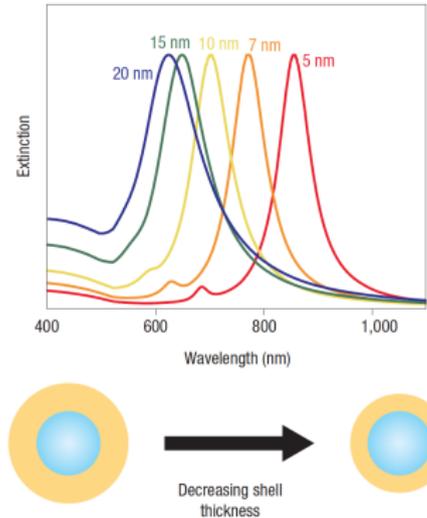
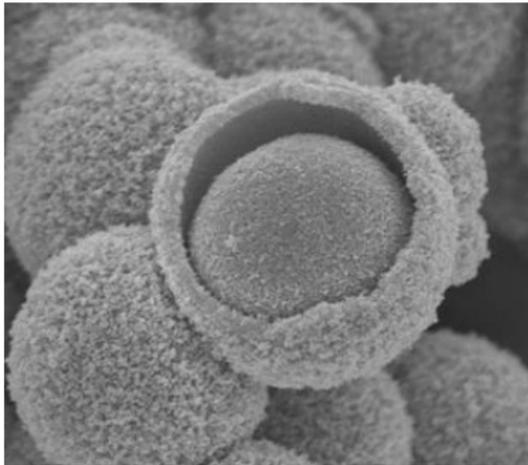


Figura 3: Nanopartícula de con un núcleo de aluminio y capa de óxido de silicio (Al/SiO_2) vista desde SEM/TEM. <https://www.nanoshel.com/product/aluminium-silicon-oxide-core-shell/>

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.

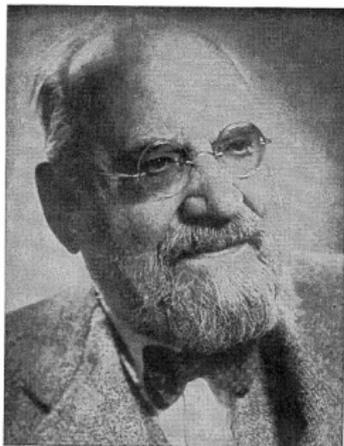


Figura 5: Gustav Adolf Feodor Wilhelm Ludwig Mie (cortesía de H. Spehl, Albert-Ludwigs-Universität).

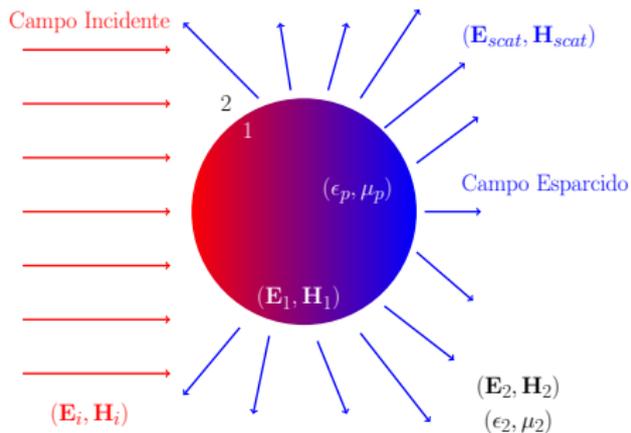


Figura 6: El campo EM incidente $(\mathbf{E}_i, \mathbf{H}_i)$ da origen a un campo en el interior de la partícula $(\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1)$ y a un campo esparcido fuera de ella $(\mathbf{E}_{scat}, \mathbf{H}_{scat})$. $(\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2)$ representa el campo total en el medio que rodea 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 ω es la frecuencia angular, $k_2 = 2\pi m_2 / \lambda$, μ_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]

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

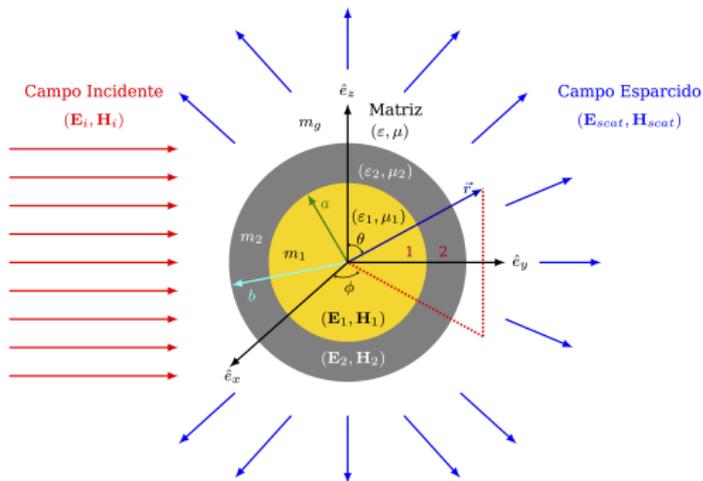
$$\mathbf{H}_i = -\frac{k}{\omega\mu} \sum_{n=1}^{\infty} E_n \left[\mathbf{M}_{e1n}^{(1)} + i\mathbf{N}_{o1n}^{(1)} \right], \quad (6)$$

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

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

[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

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

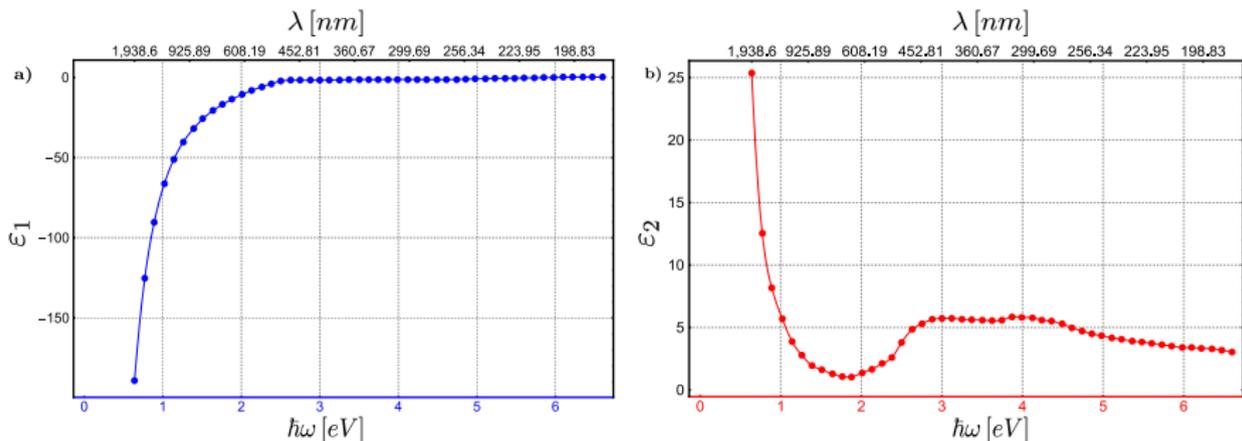


Figura 7: a) Gráfica de la parte real de la función dieléctrica del Au en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala de arriba). b) Gráfica de la parte imaginaria de la función dieléctrica del Au en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala 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

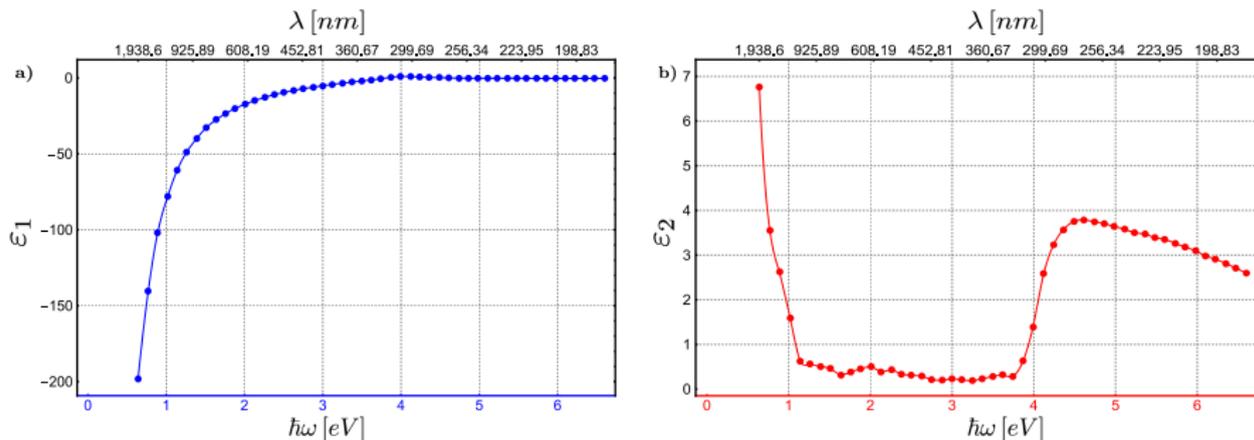


Figura 8: a) Gráfica de la parte real de la función dieléctrica del Ag en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala de arriba). b) Gráfica de la parte imaginaria de la función dieléctrica del Ag en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala 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

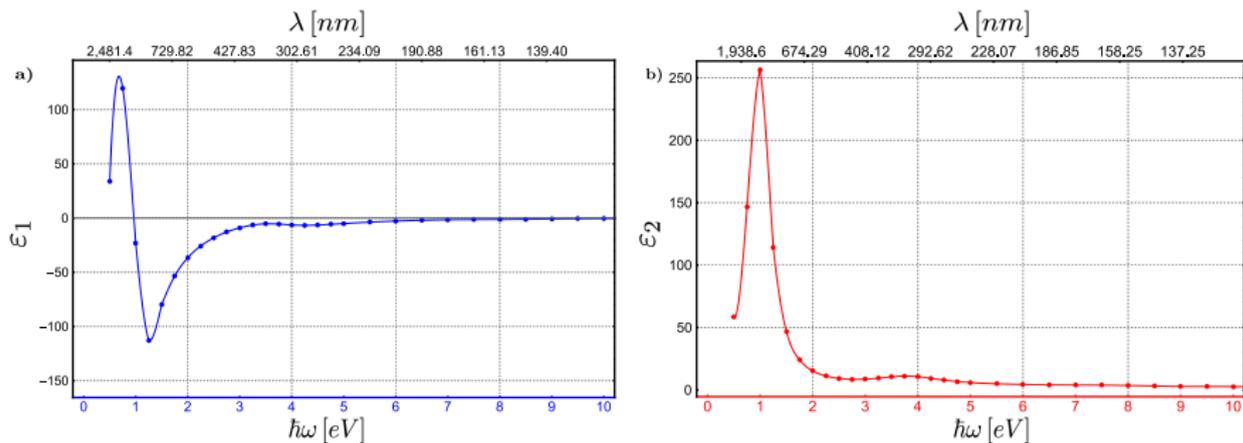


Figura 9: a) Gráfica de la parte real de la función dieléctrica del Ni en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala de arriba). b) Gráfica de la parte imaginaria de la función dieléctrica del Ni en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala 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

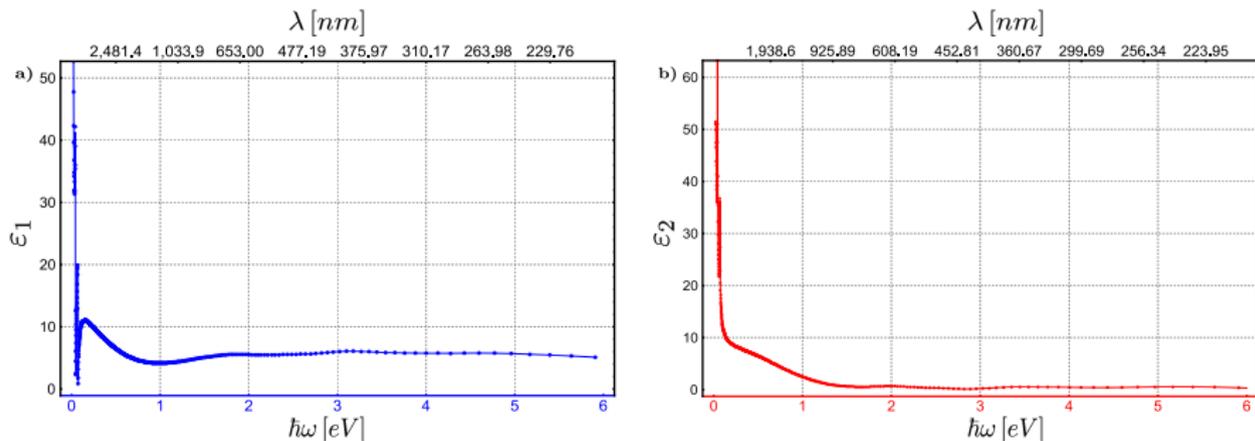


Figura 10: a) Gráfica de la parte real de la función dieléctrica del Fe_3O_4 en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud de onda (escala de arriba). b) Gráfica de la parte imaginaria de la función dieléctrica del Fe_3O_4 en función de la frecuencia (escala de abajo) y de la longitud 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

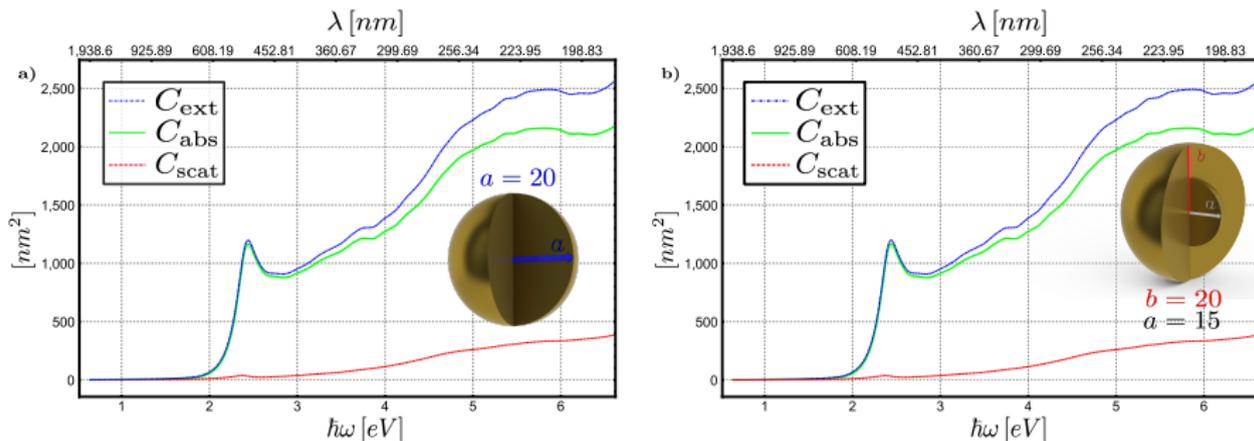


Figura 11: a) Esta gráfica presenta los resultados obtenidos al calcular los coeficientes de extinción (C_{ext}), absorción (C_{abs}) y esparcimiento (C_{scat}), para una nanopartícula de Au con radio $a = 20$. b) Esta gráfica presenta los resultados obtenidos al calcular los coeficientes C_{ext} , C_{abs} y C_{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

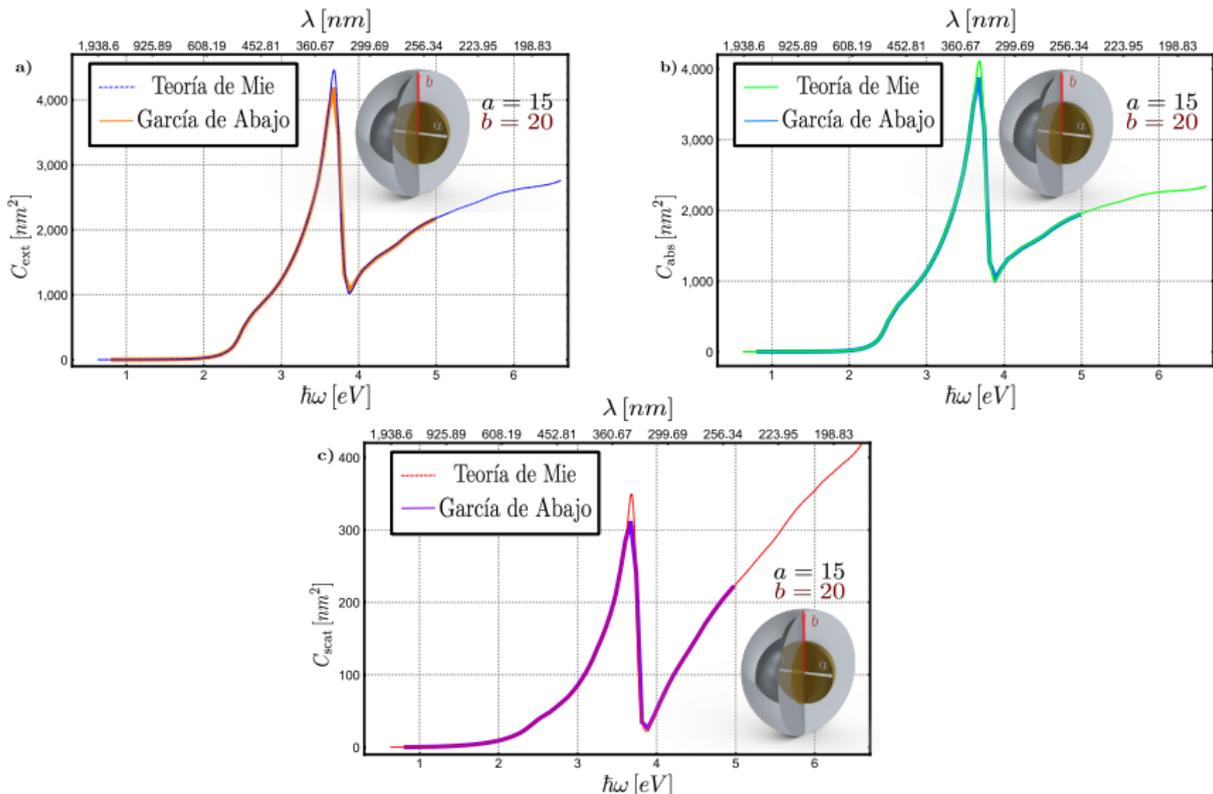


Figura 12: a) Coeficiente de extinción. b) Coeficiente de absorción. c) Coeficiente de esparsimiento. NP de Au/Ag de radio interior $a = 15$ nm y radio exterior $b = 20$ nm. [6]

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

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

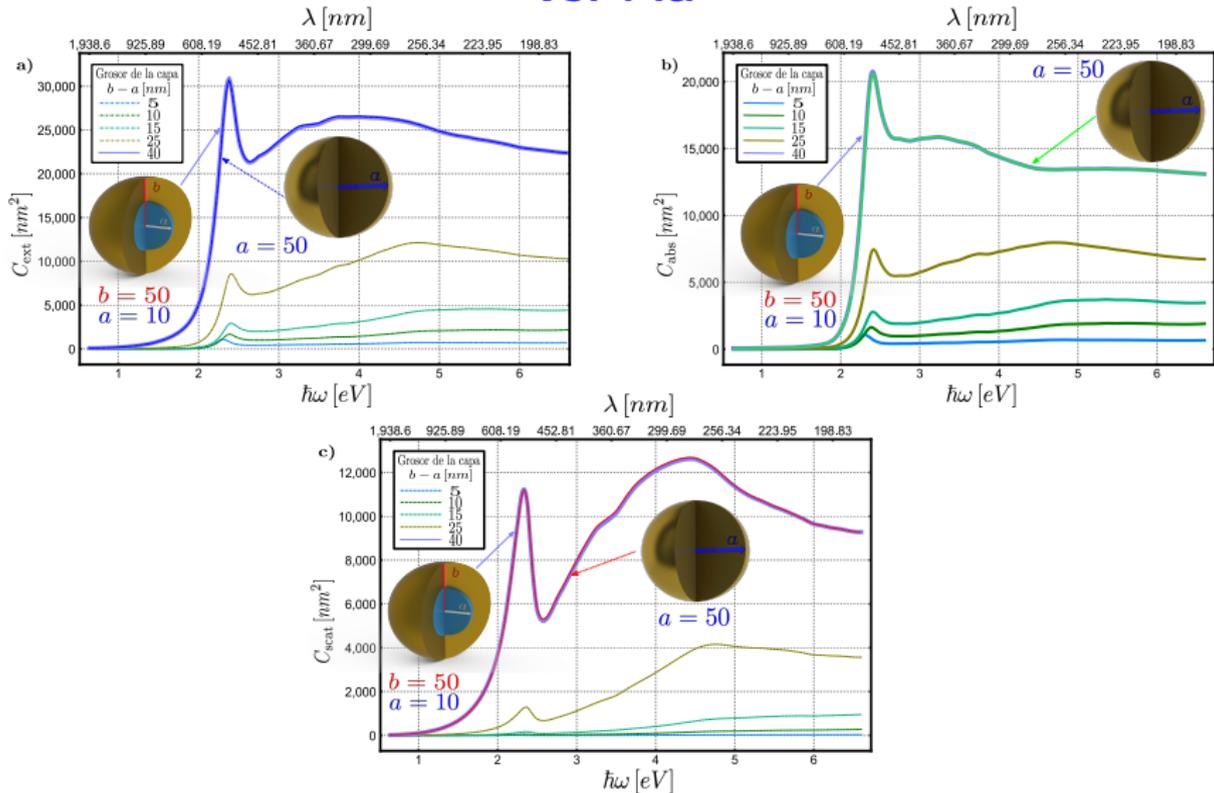


Figura 13: a) Coeficiente de extinción. b) Coeficiente de absorción. c) Coeficiente de esparramiento.

5.4 Nanopartícula con sistema Au/Ag

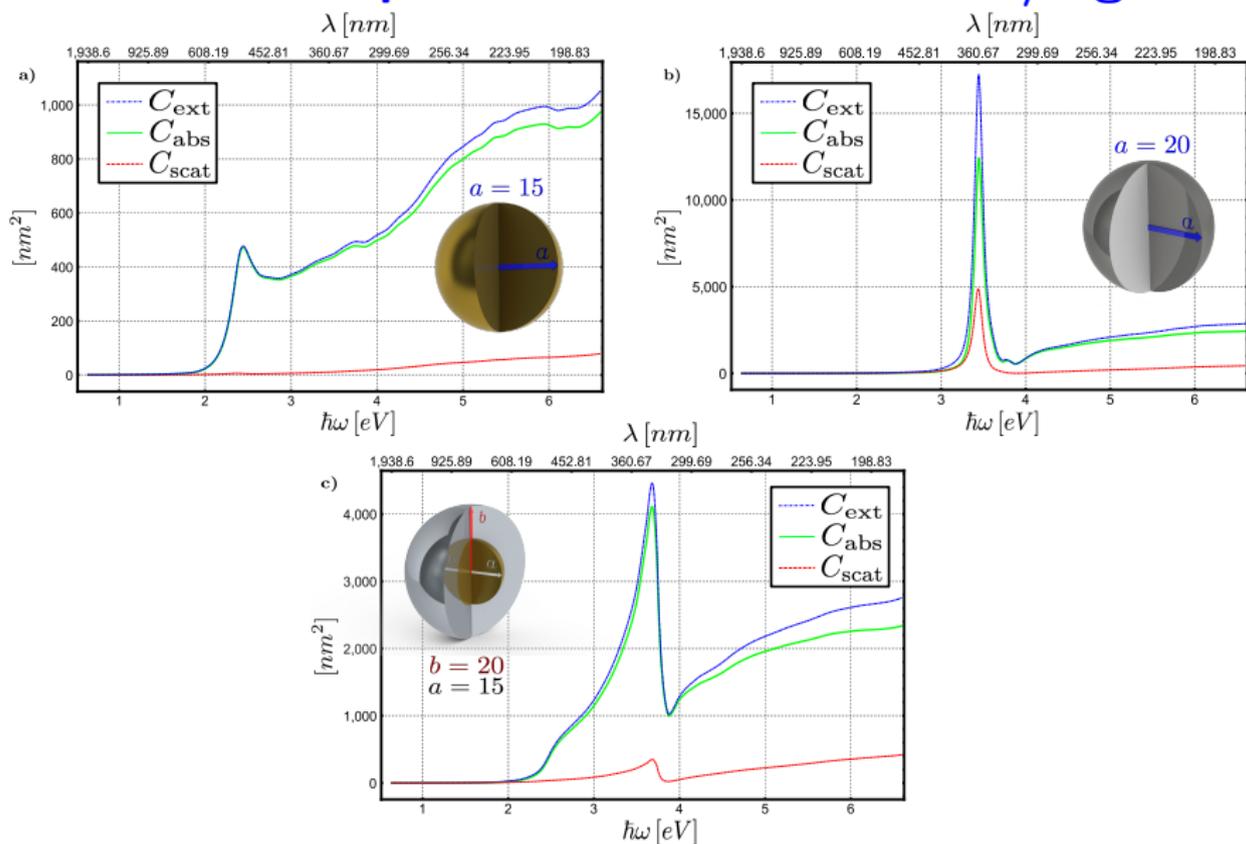


Figura 14: a) Nanopartícula de Au. b) Nanopartícula de Ag. c) Nanopartícula tipo Au/Ag de radio interior $a_{Au} = 15$ nm y radio exterior $b_{Ag} = 20$ nm.

5.5 "Skin depth" de una nanopartícula Au

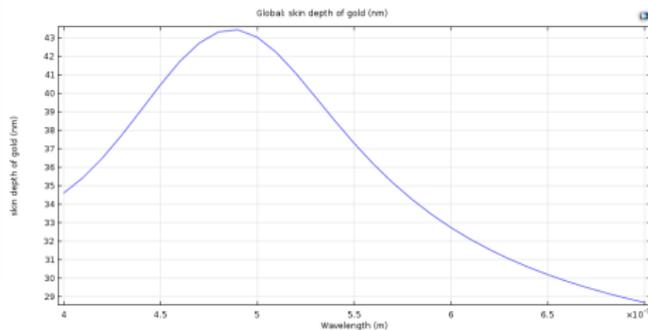
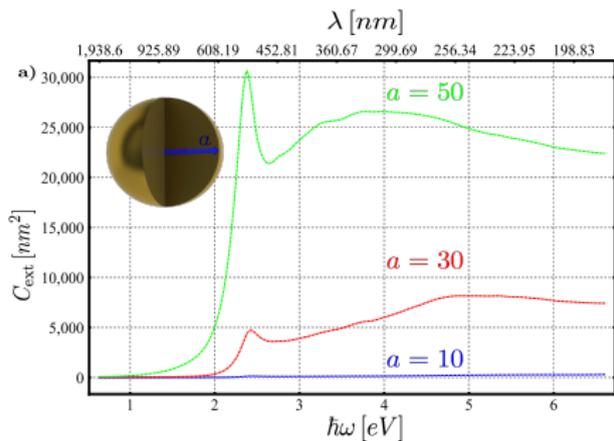


Figura 15: a) Coeficientes de extinción de una NP de Au. b) Skin depth de una nanopartícula de Au..

5.6 Nanopartícula con sistema Au/Ni

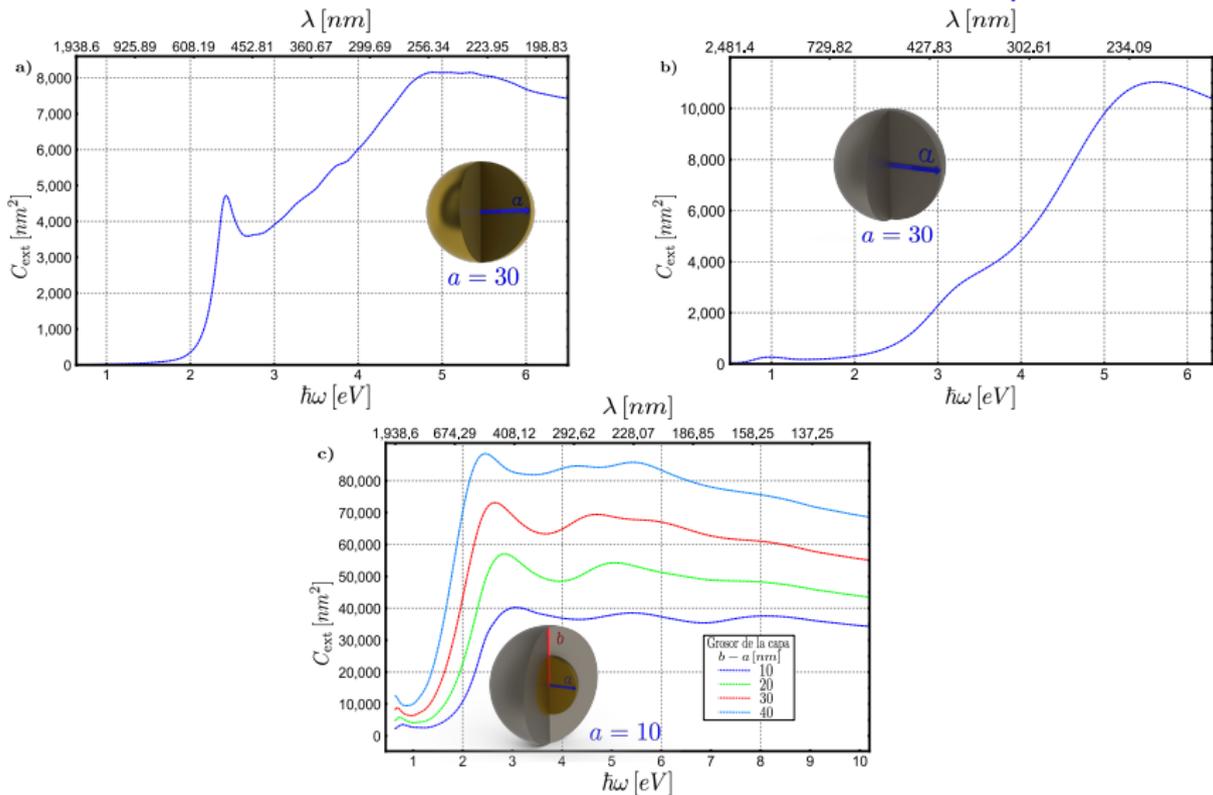


Figura 16: a) Coeficiente de extinción de una NP de Au. b) Coeficiente de extinción de una NP de Ni. c) Nanopartícula tipo Au/Ni de radio interior $a_{Au} = 10$ nm y grosor de la capa igual a $\Delta r = 10, 20, 30, 40$ nm.

5.6 Nanopartícula con sistema Au/Ni

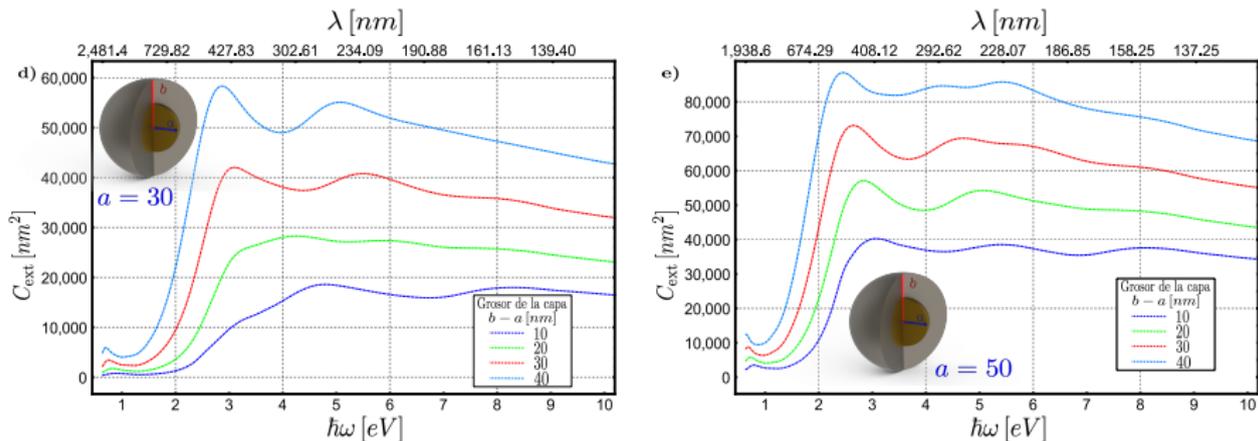


Figura 17: a), b) Nanopartícula tipo Au/Ni de radio interior $a_{Au} = 30$ y 50 nm, respectivamente, con grosor de capa igual a $\Delta r = 10, 20, 30, 40$ nm.

5.7 Nanopartícula con sistema Ni/Au

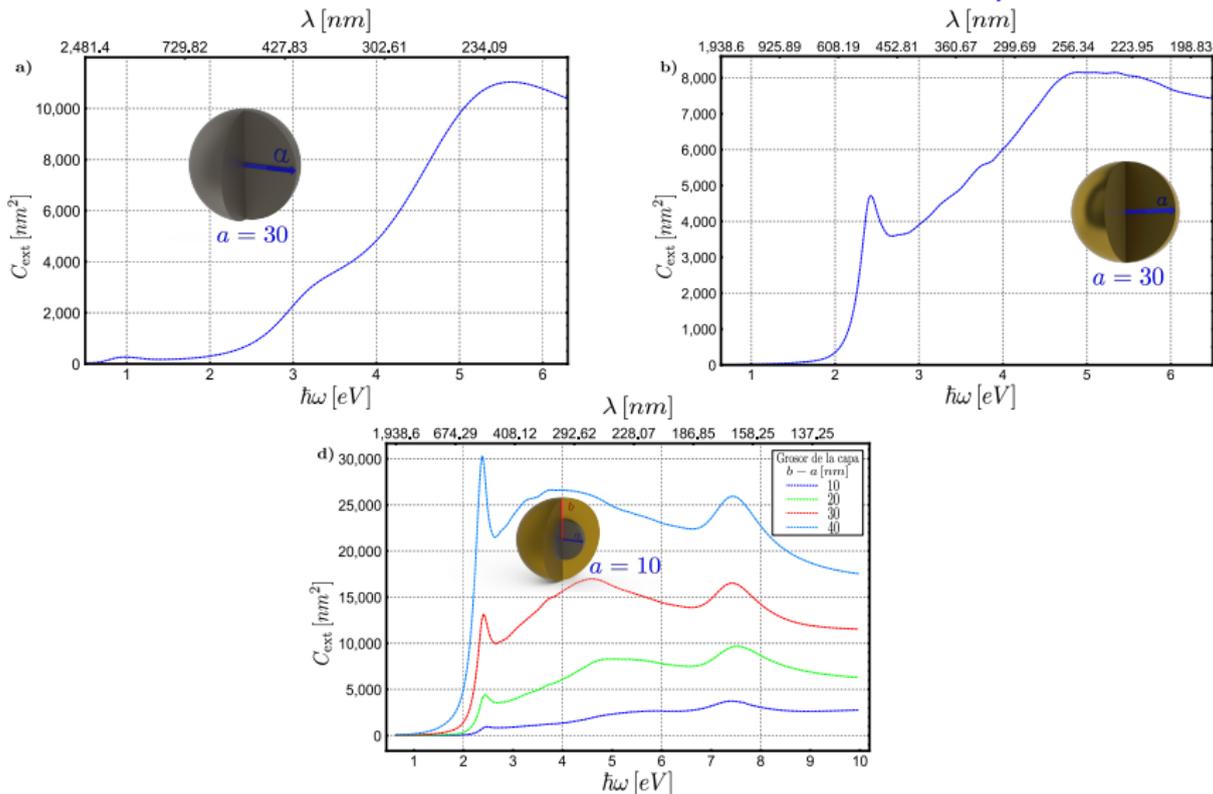


Figura 18: a) Coeficiente de extinción de una NP de Ni. b) Coeficiente de extinción de una NP de Au. c) Nanopartícula tipo Ni/Au de radio interior $a_{Ni} = 10$ nm y grosor de la capa igual a $\Delta r = 10, 20, 30, 40$ nm.

5.7 Nanopartícula con sistema Ni/Au

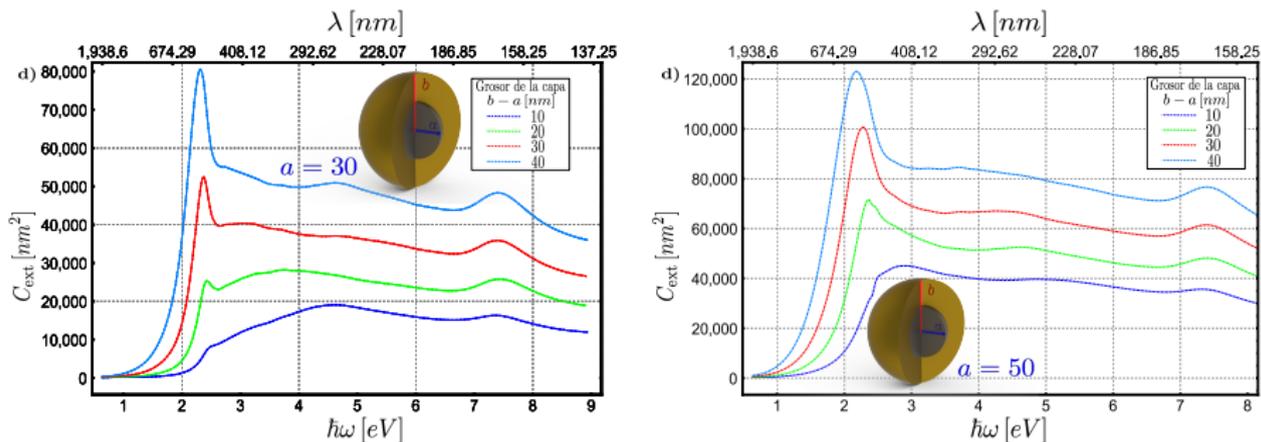


Figura 19: a), b) Nanopartícula tipo Ni/Au de radio interior $a_{Ni} = 30$ y 50 nm, respectivamente, con grosor de capa igual a $\Delta r = 10, 20, 30, 40$ nm.

5.8 Nanopartícula con sistema Au/Ni vs Ni/Au

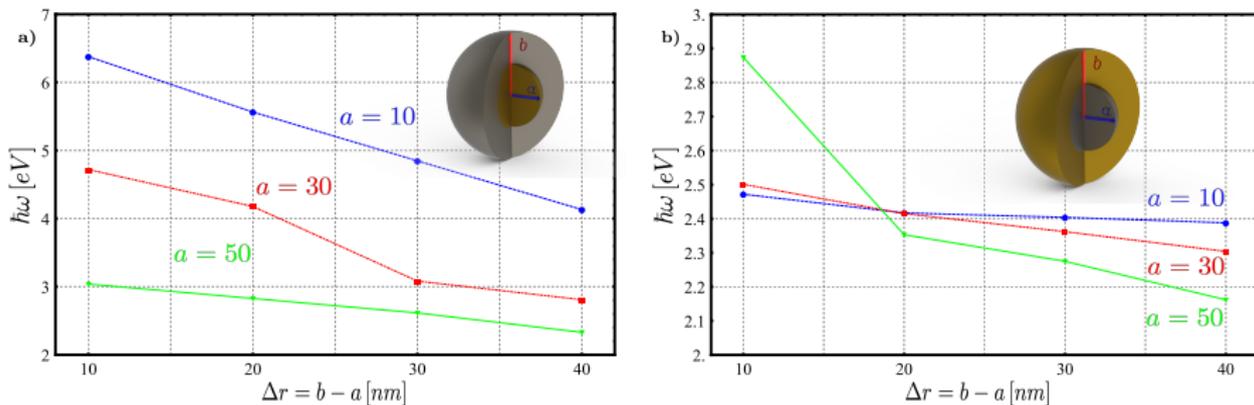


Figura 20: a) Coeficientes de extinción para $\ell = 1$ (dipolar) de una NP tipo Au/Ni. b) Coeficientes de extinción para $\ell = 1$ (dipolar) de una NP tipo Ni/Au.

5.9 Nanopartícula con sistema Au/Fe₃O₄

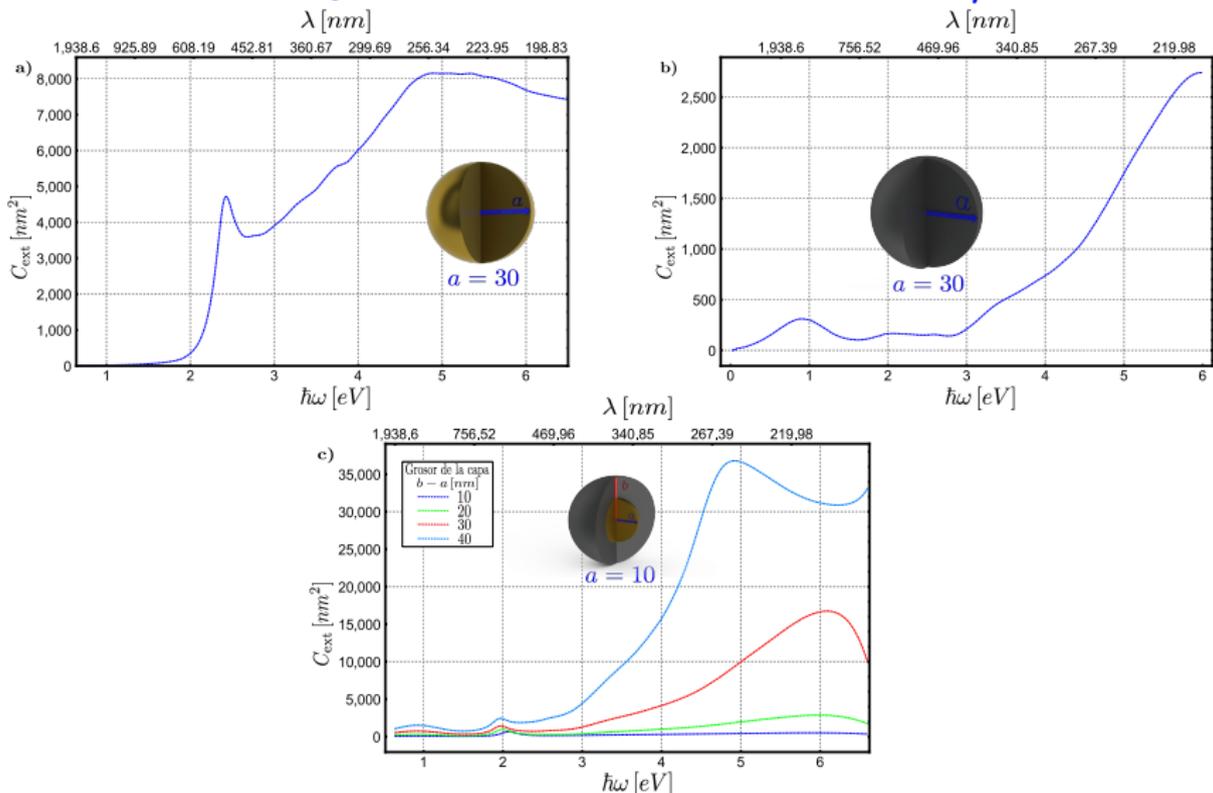


Figura 21: a) Coeficiente de extinción de una NP de Au. b) Coeficiente de extinción de una NP de Fe₃O₄ (magnetita). c) Nanopartícula tipo Au/Fe₃O₄ de radio interior $a_{Au} = 10$ nm y grosor de la capa igual a $\Delta r = 10, 20, 30, 40$ nm.

5.9 Nanopartícula con sistema Au/Fe₃O₄

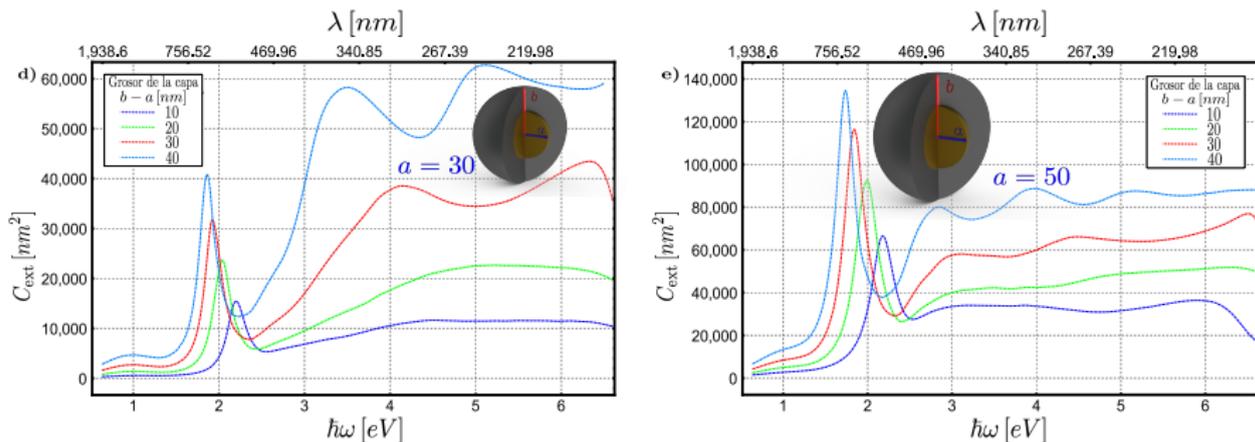


Figura 22: a), b) Nanopartícula tipo Au/Fe₃O₄ de radio interior $a_{\text{Au}} = 30$ y 50 nm, respectivamente, con grosor de capa igual a $\Delta r = 10, 20, 30, 40$ nm.

5.10 Nanopartícula con sistema Fe_3O_4/Au

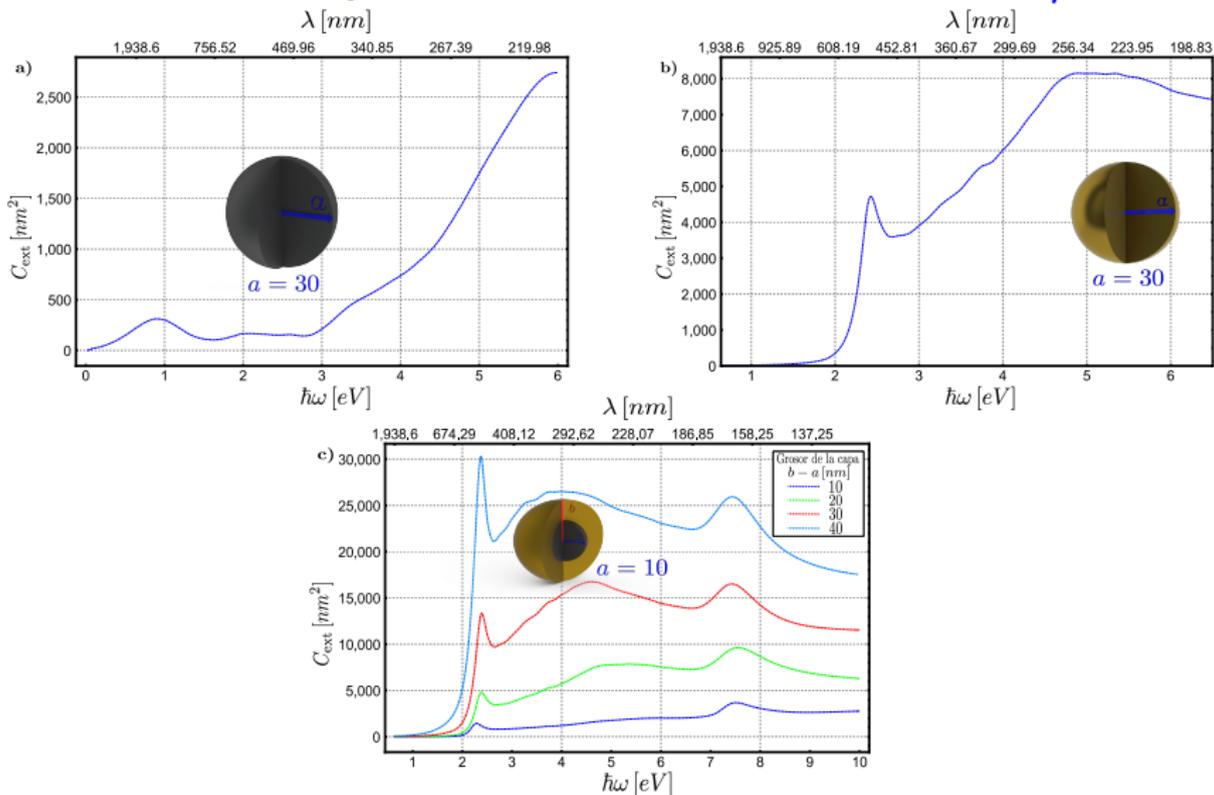


Figura 23: a) Coeficiente de extinción de una NP de Fe_3O_4 . b) Coeficiente de extinción de una NP de Au. c) Nanopartícula tipo Ni/Au de radio interior $a_{Fe_3O_4} = 10$ nm y grosor de la capa igual a $\Delta r = 10, 20, 30, 40$ nm.

5.10 Nanopartícula con sistema Fe_3O_4/Au

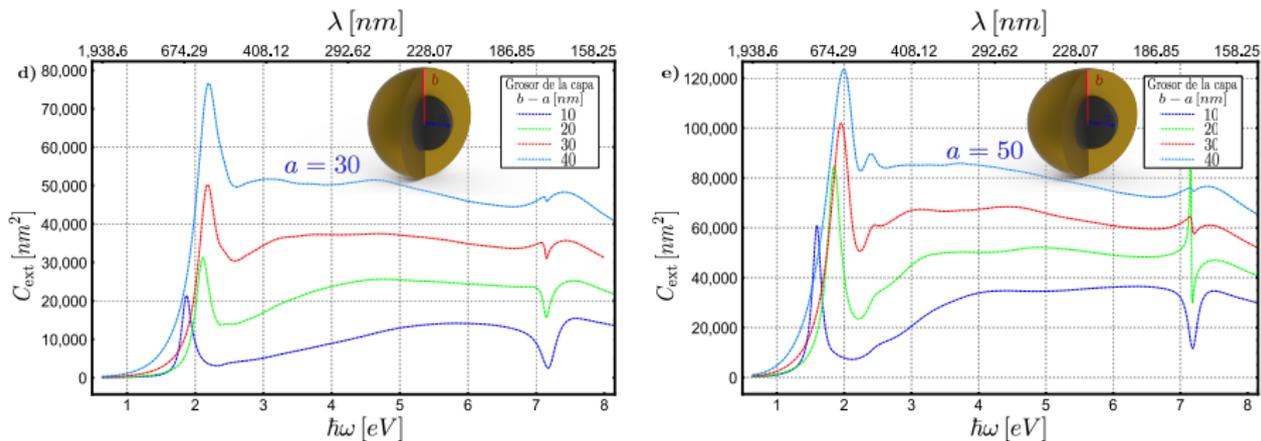


Figura 24: a), b) Nanopartícula tipo Fe_3O_4/Au de radio interior $a_{Fe_3O_4} = 30$ y 50 nm, respectivamente, con grosor de capa igual a $\Delta r = 10, 20, 30, 40$ nm.

5.11 Nanopartícula con sistema Au/ Fe_3O_4 vs Fe_3O_4 /Au

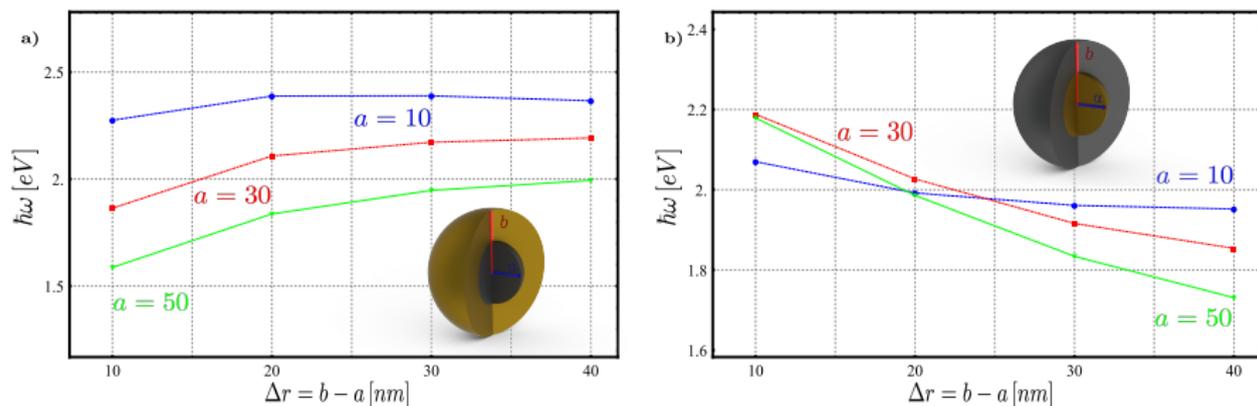


Figura 25: a) Coeficientes de extinción para $\ell = 1$ (dipolar) de una NP tipo Fe_3O_4 /Au. b) Coeficientes de extinción para $\ell = 1$ (dipolar) de una NP tipo Au/ Fe_3O_4 .

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.

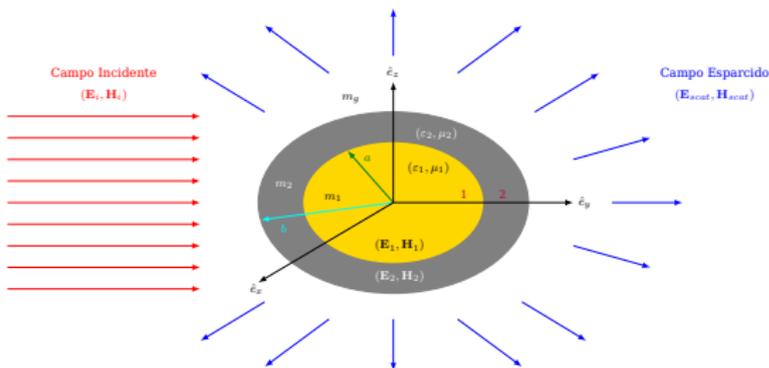


Figura 26: Elipsoide oblatado.

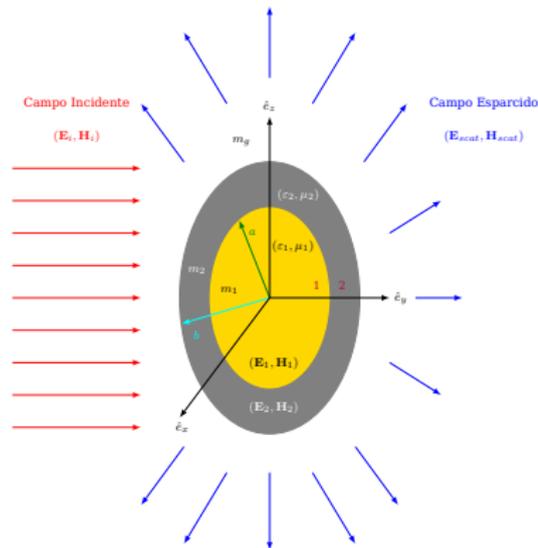


Figura 27: Elipsoide prolato.