Localización espectral de resonancias plasmónicas en nanoesferas tipo Drude de tamaño arbitrario

Luna González, Dana L.[1], Urrutia Anguiano, Jonathan A.[2] y Reyes Coronado, Alejandro[3]

Departamento de Física, Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México

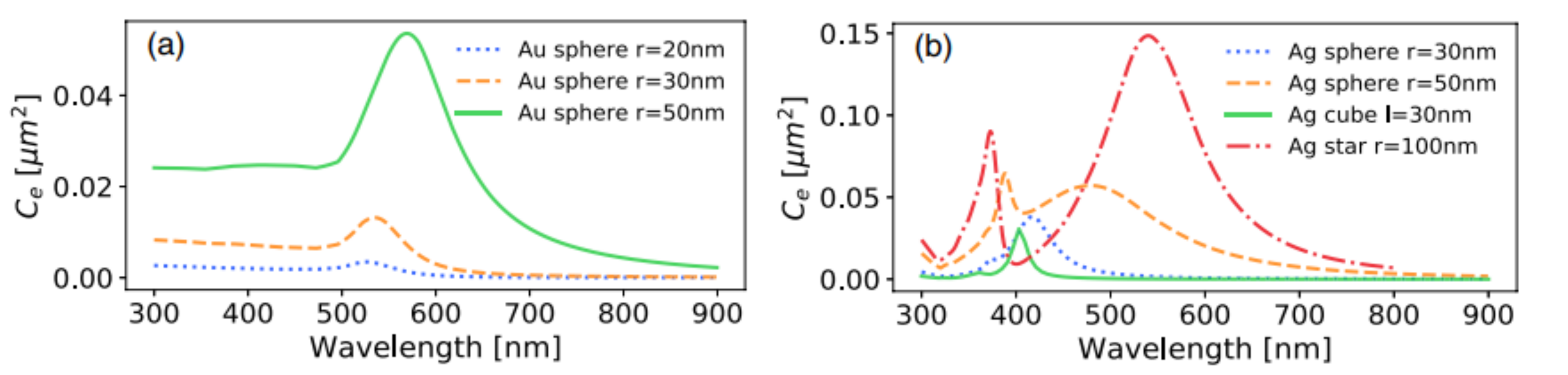
[1]dana.larissalg@ciencias.unam.mx, [2]jaurrutia.95@ciencias.unam.mx, [3]coronado@ciencias.unam.mx

Resumen

La **nanoplasmónica** es el estudio de la respuesta electromagnética en sistemas con respuesta metálica a la nanoescala, es decir, con dimensiones menores a 100 nm. En sistemas espacialmente confinados a esta escala, se presenta el fenómeno de **resonancia de plasmón de superficie localizado**, resultado del acoplamiento entre los electrones libres de un metal con el campo electromagnético incidente que ilumina al sistema. Este fenómeno se puede emplear en aplicaciones como la espectroscopía y la medicina, debido a la sintonización de dichas resonancias a una frecuencia específica según las propiedades morfológicas del sistema. En este trabajo, se estudia teórica y numéricamente la localización espectral de las resonancias plasmónicas excitadas en **partículas esféricas** caracterizadas por una función dieléctrica descrita por el **modelo de Drude** en función de su radio.

1) Introducción

La interacción luz-materia puede estudiarse clásicamente mediante la **absorción** de parte de la luz incidente en la materia y el **esparcimiento** de luz por la materia en todas las direcciones, cuyo efecto combinado resulta en la **extinción** del rayo incidente [1]. En los últimos años, en muchos campos de la ciencia aplicada y la tecnología, se han estudiado las propiedades ópticas de partículas de diferentes formas y tamaños , en particular se ha estudiado la dependencia de la sección transversal de extinción del tamaño de las partículas esféricas para describir muestras coloidales.



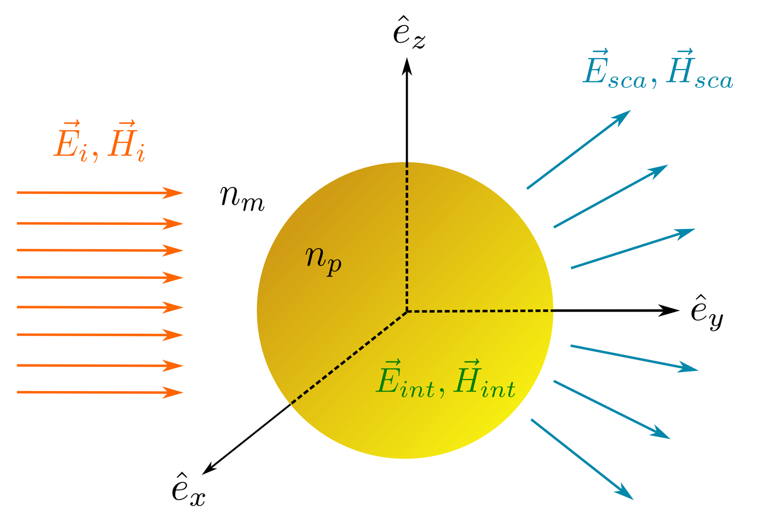
El problema de esparcimiento de luz dada una partícula de forma, tamaño y propiedades ópticas específicas iluminada por una onda plana monocromática consiste en conocer los campos electromagnéticos en todos los puntos de la partícula y en todos los puntos del medio homogéneo en el que está embebida [1].

Teoría de Mie

Al caso particular de esparcimiento por una partícula esférica, la solución a este problema se le conoce como **teoría de Mie**. Esta es una solución analítica a las ecuaciones de Maxwell que describe la excitación de la **resonancia plasmónica de superficie** para partículas metálicas esféricas iluminadas por una onda electromagnética (EM) plana. Los campos EMs dentro de la partícula y los esparcidos por esta son descritos mediante coeficientes que corresponden a contribuciones multipolares de **modos eléctricos** y **magnéticos** mejor conocidos como **coeficientes de Mie**. En particular, los coeficientes correspondientes al campo esparcido están dados por [1]:

$$a_n = \frac{m\psi_n(mx)\psi_n'(x) - \psi_n(x)\psi_n'(mx)}{m\psi_n(mx)\xi_n'(x) - \xi_n(x)\psi_n'(mx)},$$

$$b_n = \frac{\psi_n(mx)\psi_n'(x) - m\psi_n(x)\psi_n'(mx)}{\psi_n(mx)\xi_n'(x) - m\xi_n(x)\psi_n'(mx)},$$



con $\psi_n(\rho) = \rho j_n(\rho)$ y $\xi_n(\rho) = \rho h_n^{(1)}(\rho)$ las funciones de Ricatti Bessel, $m = n_p/n_m$ y $x = 2\pi n_m/a$ el parámetro de tamaño.

La **sección transversal de extinción** se escribe en términos de los coeficientes de Mie como [1]:

$$C_{ext} = \frac{2\pi}{k^2}\sum_{n=1}^{\infty}(2n+1)\mathrm{Re}\{a_n + b_n\}$$

cuyo máximo corresponde a la excitación del plasmón de superficie localizado obtenido cuando el denominador de los coeficientes de Mie es mínimo [2].

2) Materiales plasmónicos cuando $x \ll 1$

Cuando un material se encuentra en presencia de un campo magnético oscilante, al resolver la ecuación de movimiento que obedecen los electrones libres en el material, se obtiene la **función dieléctrica tipo Drude** [2, 3]

$$\frac{\epsilon_D(\omega)}{\epsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega + i\gamma)}, \tag{1}$$

donde γ es la constante fenomenológica de amortiguamiento y ω_p la frecuencia de plasma.

Al considerar el **límite de partícula pequeña** ($x = k_m a \ll 1$) para esferas inmersas en vacío ($n_m = 1$), se obtiene que los **modos normales** cumplen las relaciones

Eléctricos

$$\epsilon_p(\omega_l) = -\frac{l+1}{l},$$

Magnéticos

$$l \stackrel{!}{=} -(l+1),$$

Al emplear la Ec.1 y considerar el límite $\gamma \to 0$, al despejar ω se obtiene

$$\frac{\omega_l}{\omega_p} = \sqrt{\frac{l}{2l+1}}.$$

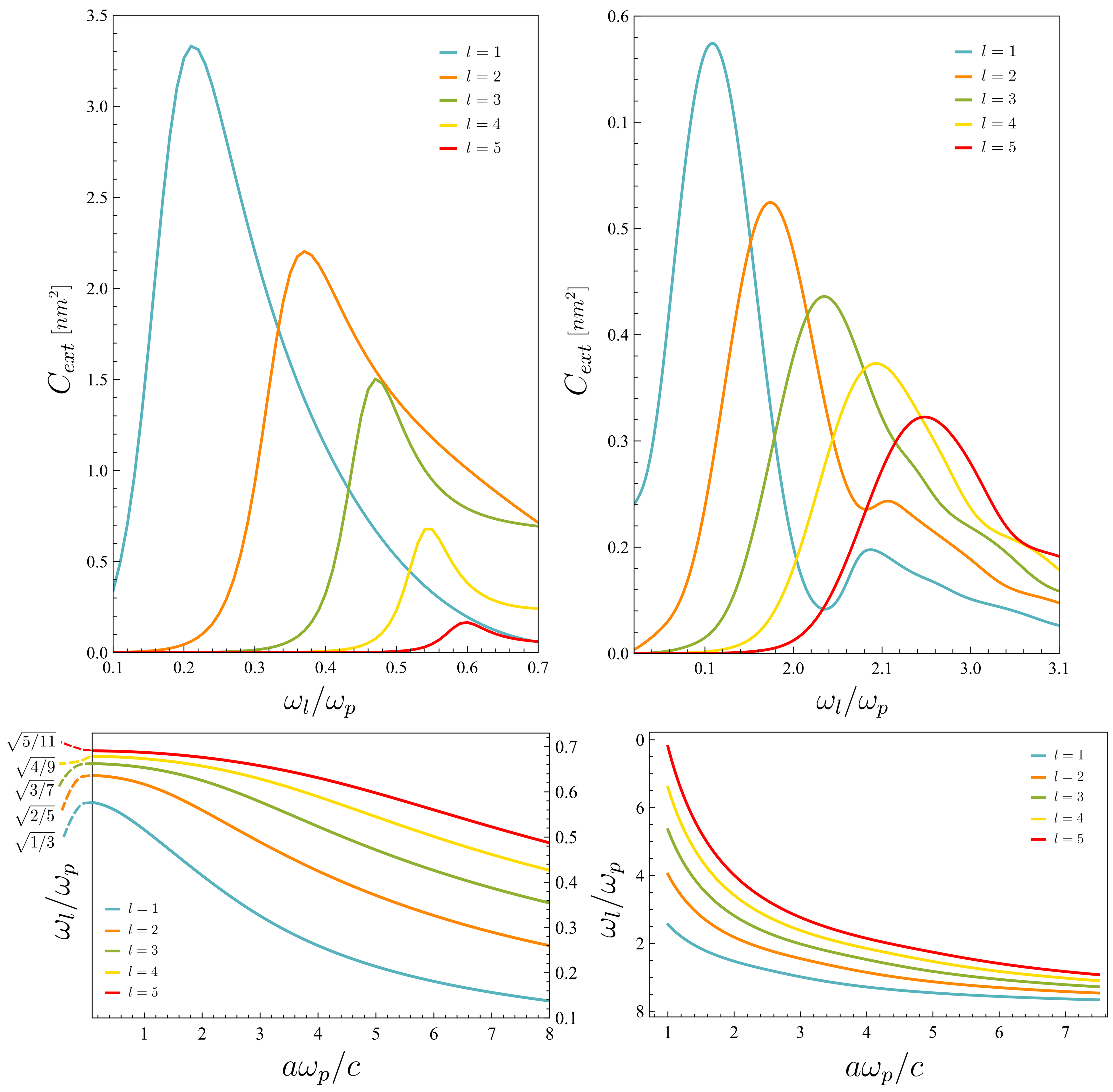
4) Resultados numéricos

Dado que para partículas de mayor radio, las resonancias deben de calcularse de forma numérica, se empleó el método de la sección dorada [pones referencia]. Se reescribieron n_p y x en términos de variables adimensionales

$$n_p = \sqrt{1 - \frac{1}{\tilde{\omega}(\tilde{\omega} + i\tilde{\gamma})}}, \qquad x = \tilde{\omega}\tilde{a}n_m.$$

donde $\omega_p a/c$ compara la frecuencia de excitación ω con el tiempo de acoplamiento ac^{-1} entre la interacción EM de la esfera y la densidad de carga inducida que corresponde al plasmón de superficie [4].

Eléctricos **Magnéticos**



5) Conclusiones

- La banda de frecuencias en la que las frecuencias de resonancia de los modos eléctricos se espera que se encuentren es $[\omega_p/\sqrt{3}, \omega_p/\sqrt{2}]$, cuyos límites corresponden al modo plasmónico dipolar eléctrico y a la resonancia plasmónica de superficie de una esfera de radio infinito, es decir, a un plano infinito.
- Conforme el límite de partícula pequeña deja de ser válido se presenta un corrimiento al rojo de las resonancias plasmónicas de superficie localizadas de los modos eléctricos y magnéticos para partículas esféricas.
- No es posible calcular una aproximación de las frecuencias de resonancia de los modos normales magnéticos en el límite de partícula pequeña.

6) Referencias

[1] C.F. Bohren y D.R. Huffman , *Absorption and scattering of light by small particles* (John Wiley & Sons, 1980).

[2] L. Novotny, *Principles of Nano-Optics* (Cambridge University Press, New York, 2006).

[3] N.W. Ashcroft y N.D. Mermin, *Solid State Physics, Principles of Nano-Optics* (Saunders College, 1976).

[4] J. Aizpurua, *Coupling of electrons and electromagnetic surface modes in scanning transmission electron microscopy* (Tesis doctoral, Universidad de País Vasco, País Vasco, España, 1998).

Agradecimientos al proyecto PAPIIT-UNAM IN107122 y a la Facultad de Ciencias de la UNAM