

Entangled Two Photon Absorption en átomos de Cesio mediante teoría de perturbaciones en diferentes aproximaciones

Antonio Vargas Quiñónez, Christian Rodríguez Camargo y
Mayerlin Nuñez Portela

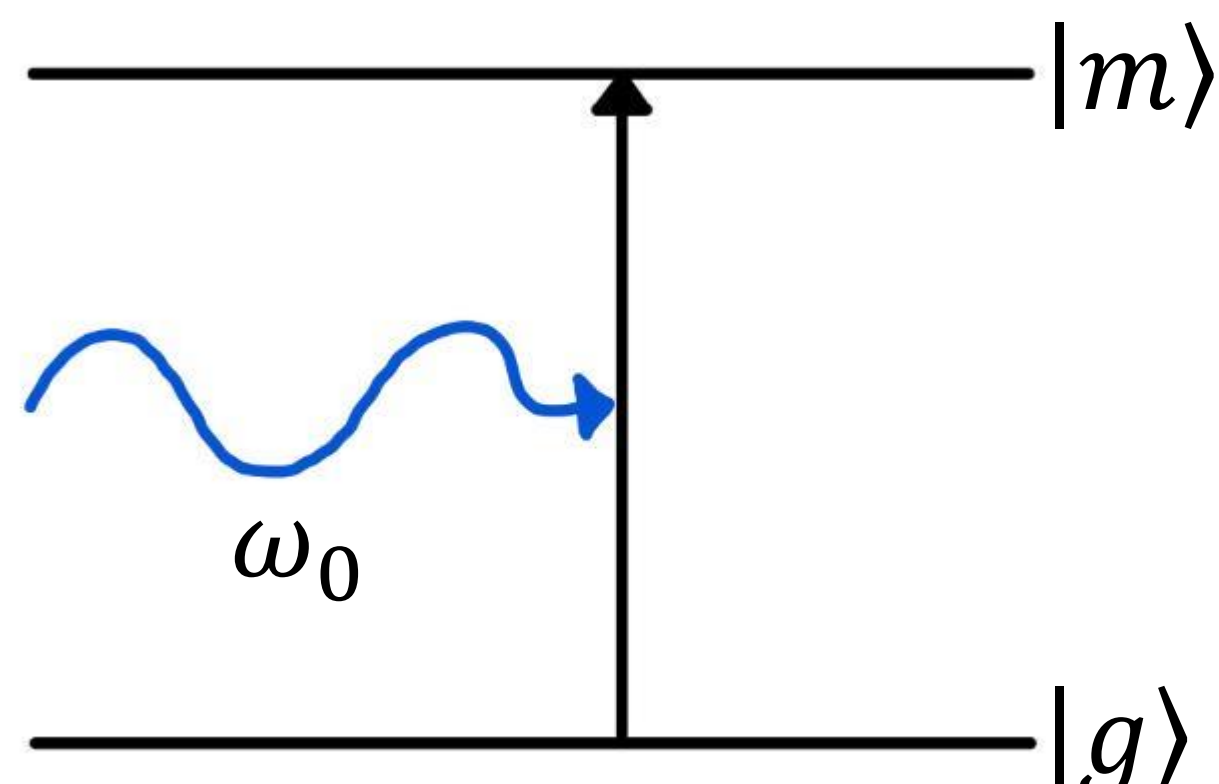
Laboratorio de Óptica Cuántica, Universidad de los Andes, A.A. 4976, Bogota, D.C., Colombia

E-mail: a.vargasq@uniandes.edu.co

Resumen

La absorción de pares fotones entrelazados (ETPA) es un proceso óptico no lineal, a través del cual un par de fotones, previamente producidos por un cristal no lineal (SPDC), en resonancia con un átomo o una molécula, en este caso con el átomo de Cesio, son absorbidos por este, provocando una transición del estado base a un estado excitado. Por lo que, el objetivo principal de este proyecto fue entender este proceso desde sus bases, las cuales son: absorción de un fotón (OPA) y absorción de dos fotones (TPA), y derivar las expresiones de sus secciones eficaces y calcular dicho valor para el átomo de Cesio. Esto se realizó mediante teoría de perturbaciones dependiente del tiempo, específicamente a tiempo finito.

One Photon Absorption (OPA)



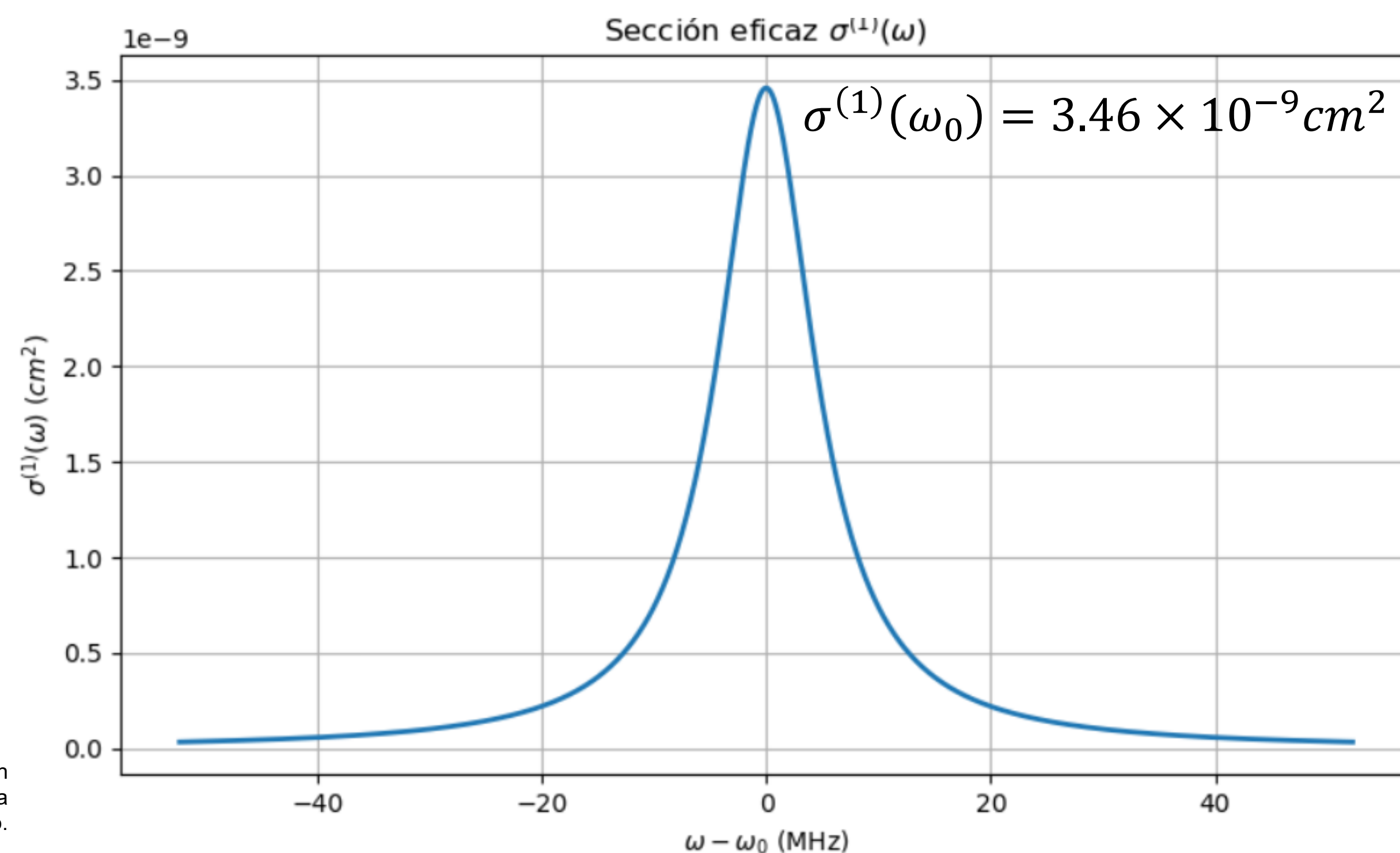
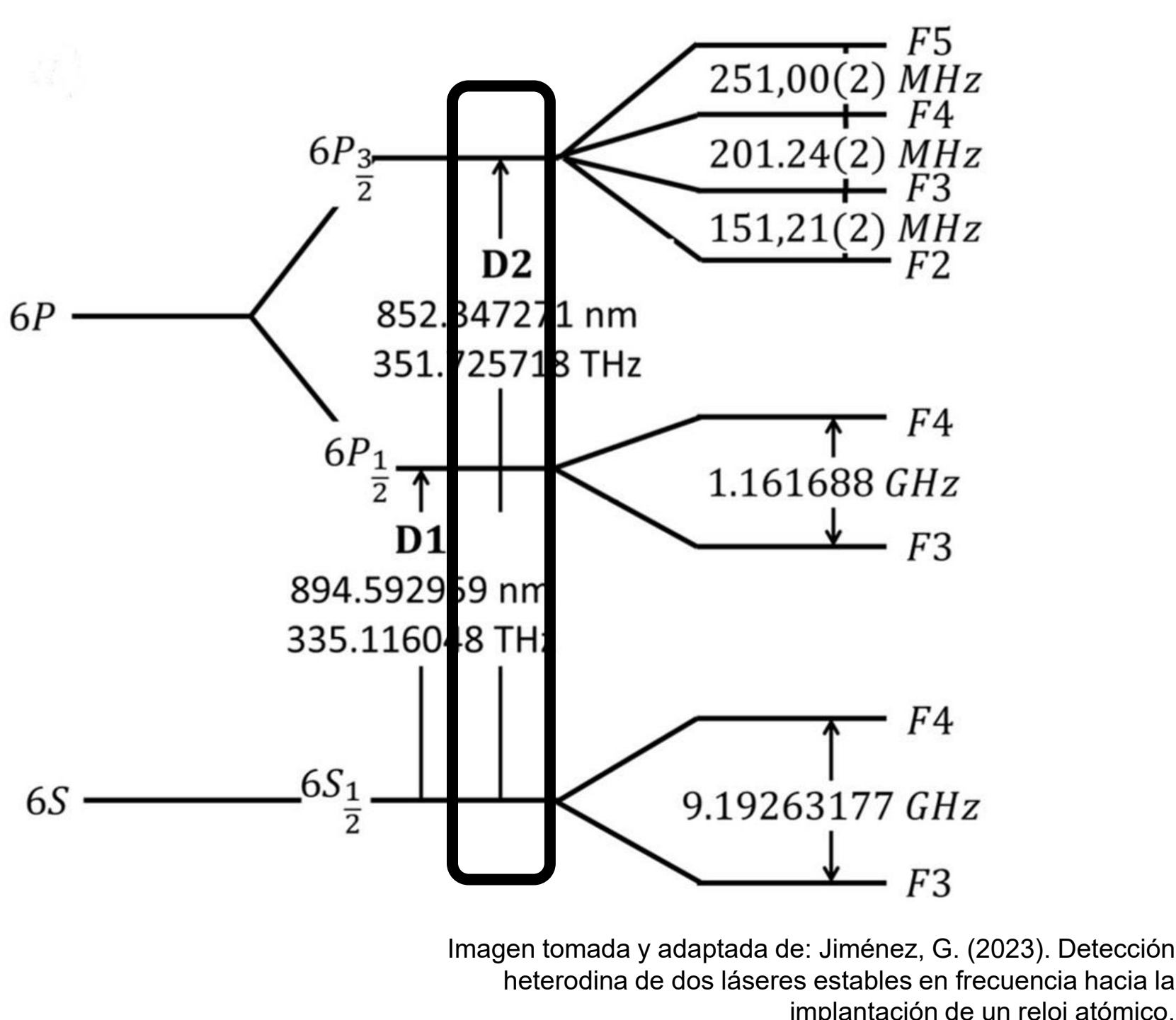
Hamiltoniano de interacción:

$$\hat{V} = -\vec{\mu} \cdot \vec{E}(t) \approx -\mu E_0 e^{-i\omega_0 t}$$

→ Rotating Wave Approximation

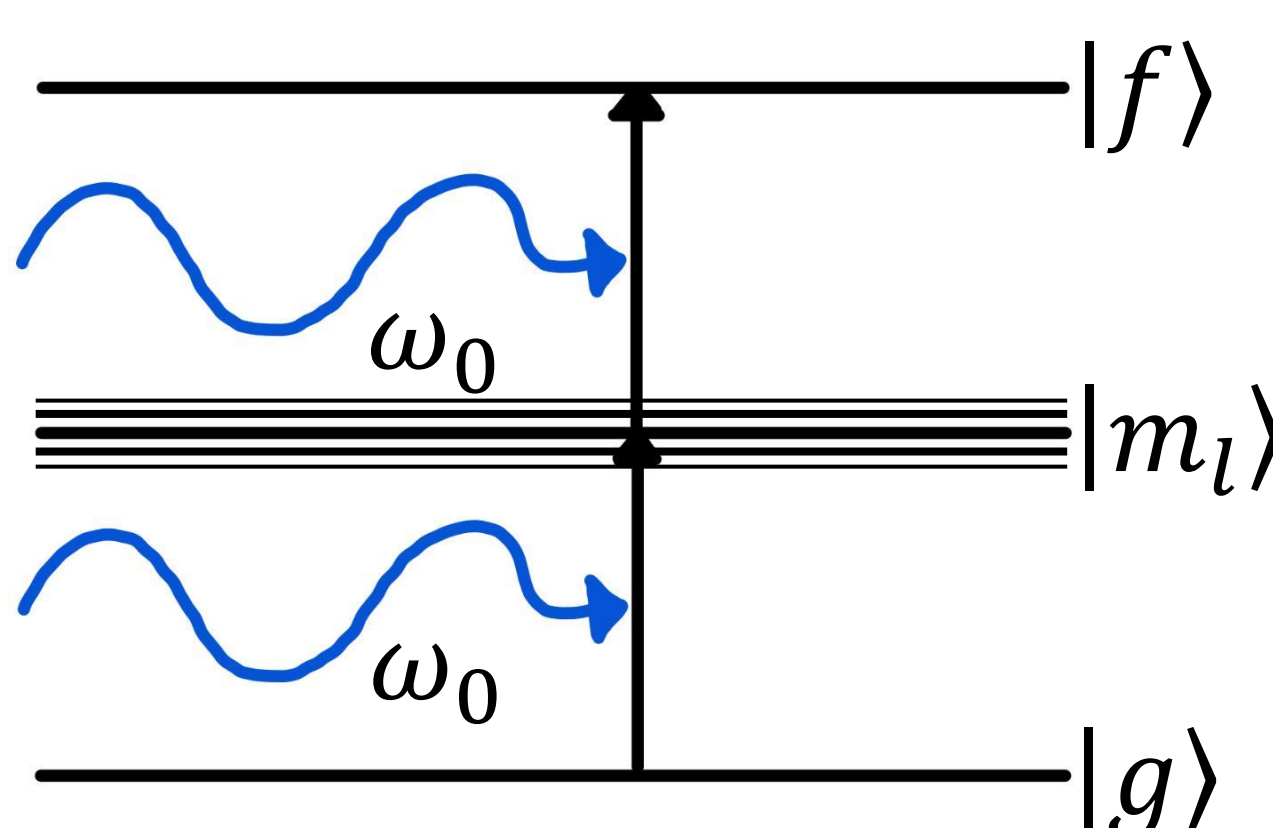
$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \lambda \hat{V}$$

Teoría de perturbaciones dep. del tiempo



$$\sigma^{(n)} = \frac{R^{(n)}}{\Phi^n} = \frac{(\hbar\omega)^n R^{(n)}}{I^n} \longrightarrow \sigma^{(1)}(\omega) = \frac{\omega \mu_{mg}^2}{2n\epsilon_0 c \hbar} \frac{\Gamma/2}{(\omega - \omega_0)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

Two Photon Absorption (TPA)

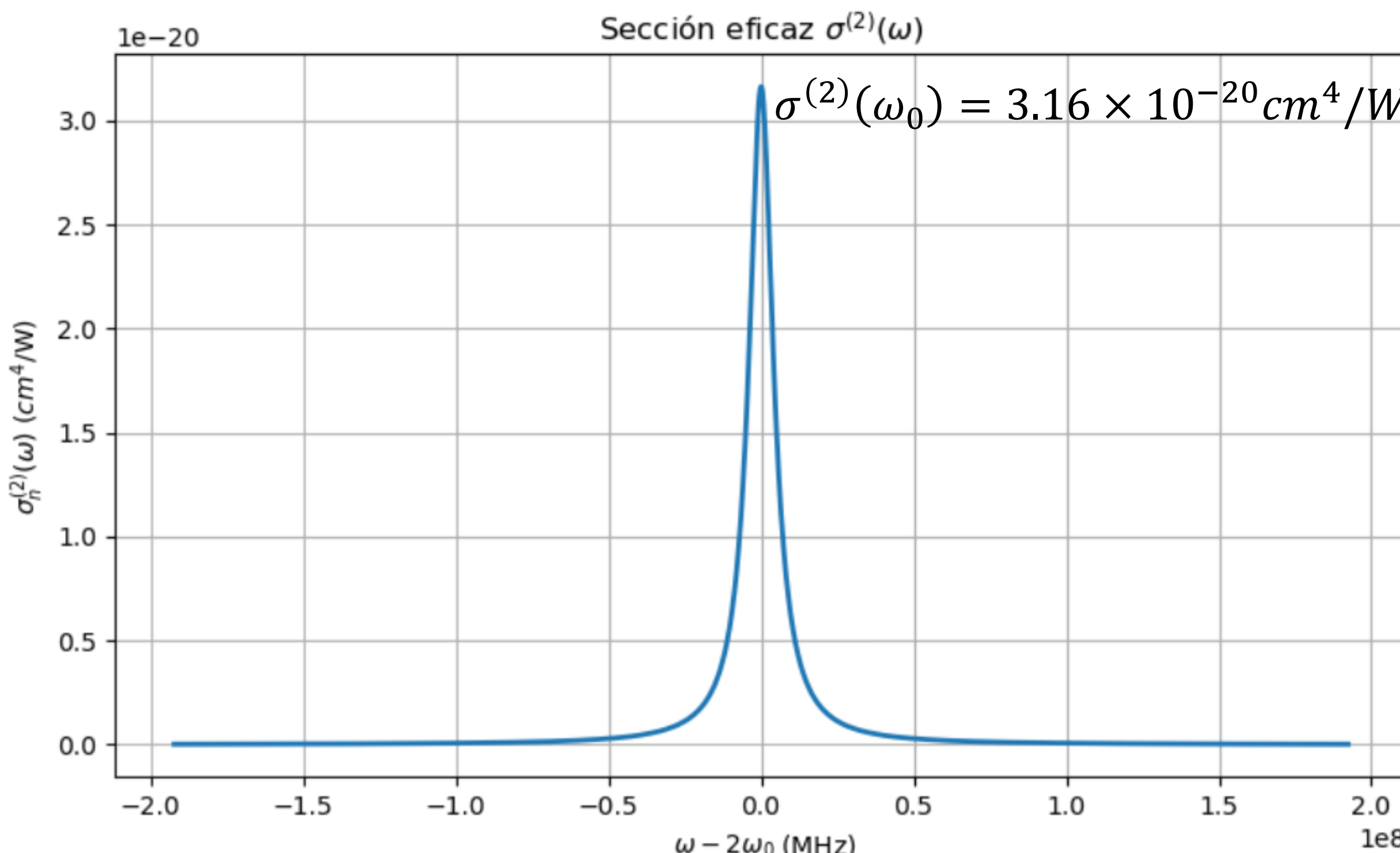
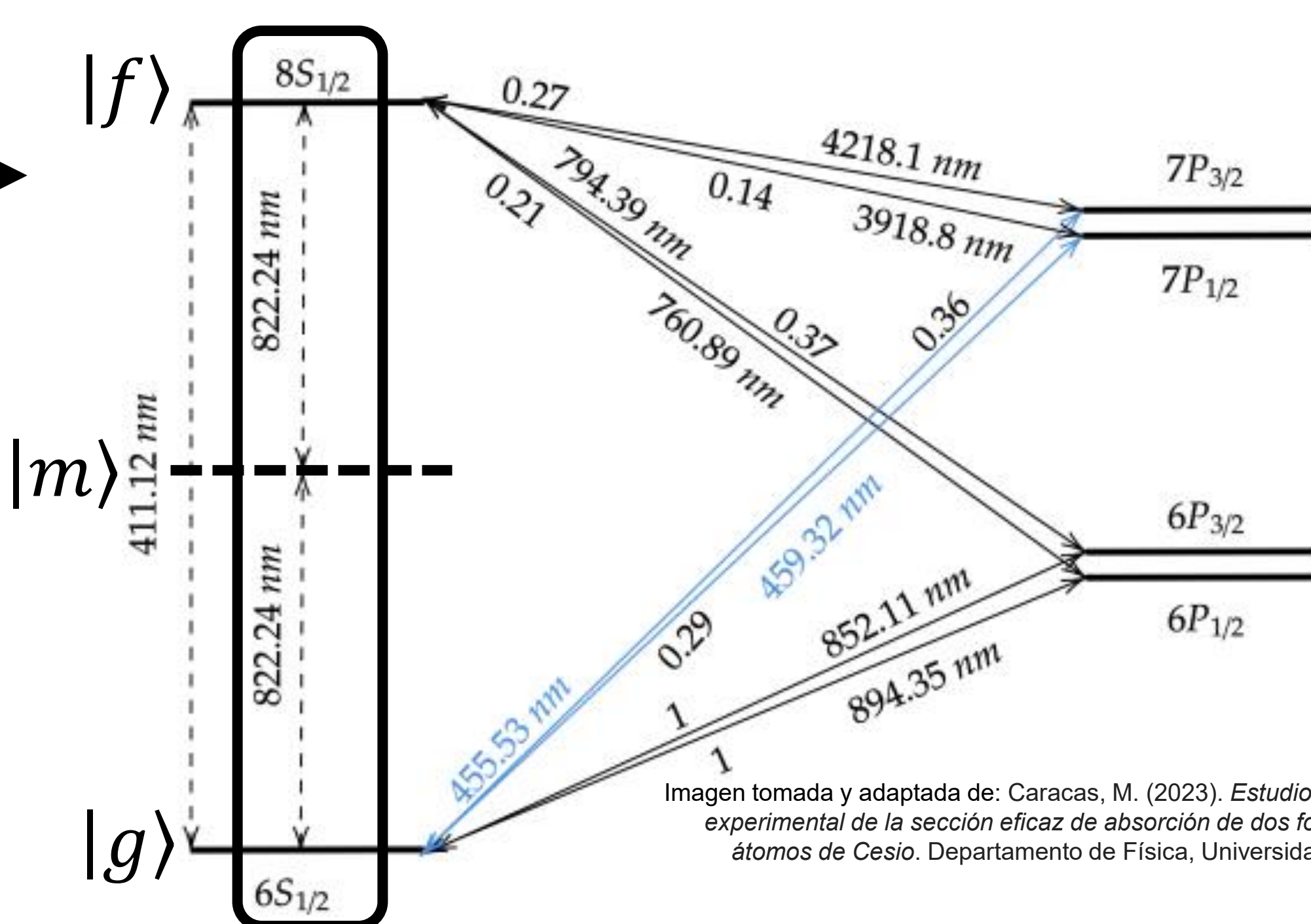


Hamiltoniano de interacción:

$$\hat{V} \approx -\mu E_0 e^{-i\omega_0 t}$$

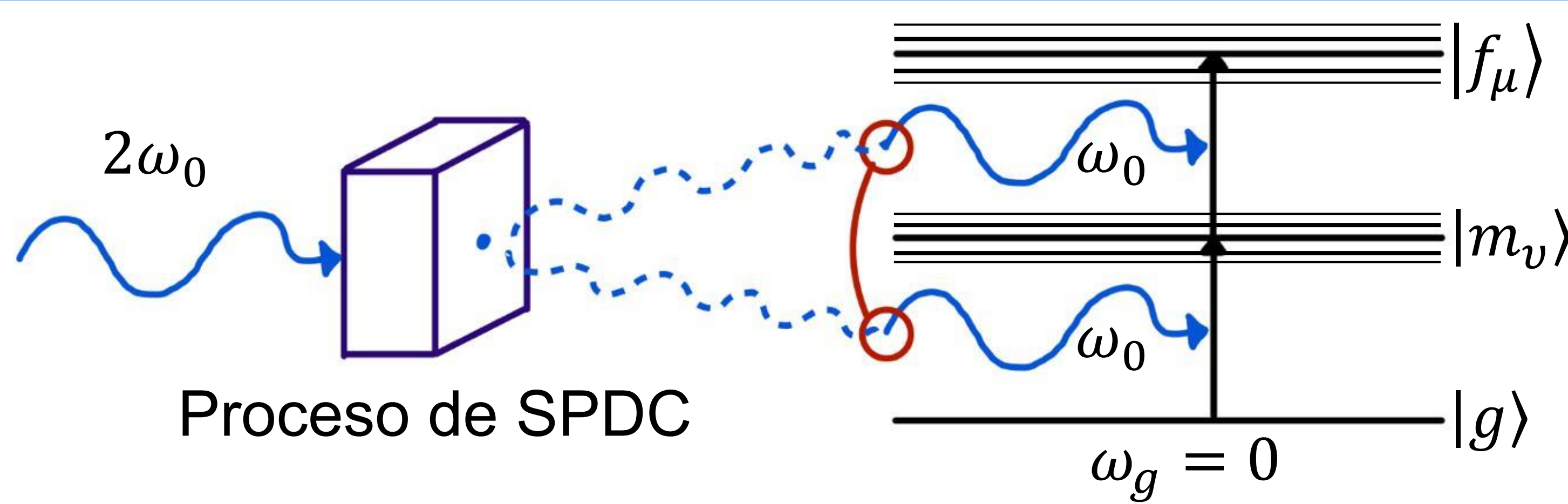
Teoría de perturbaciones dep. del tiempo

$$\hat{H} = \hat{H}_0 + \lambda^2 \hat{V}$$



$$\sigma^{(2)}(\omega) = \frac{\omega^2}{8n^2\epsilon_0^2 c^2 \hbar^2} \left| \sum_l \frac{\mu_{lg}\mu_{fl}}{(\omega_{lg} - \omega_0)} \right|^2 \frac{\Gamma/2}{(\omega - 2\omega_0)^2 + (\Gamma/2)^2}$$

Entangled Two Photon Absorption (ETPA)



Cuantización del campo eléctrico:

$$\hat{E}(t) = \hat{E}^+(t) + \hat{E}^-(t) = i \sqrt{\frac{\hbar\omega_0}{2\epsilon_0 c A_q}} \left[\underset{\text{Absorción}}{\hat{a}(t)} + \underset{\text{Emisión}}{\hat{a}^\dagger(t)} \right]$$

Hamiltoniano de interacción:

$$\hat{H}_I(t) = -\hat{V}(t)\hat{E}^-(t) - \hat{V}^\dagger(t)\hat{E}^+(t)$$

$$\hat{V}(t) = \mu_{gm} e^{-i\omega_m(t-t_0)} |g\rangle\langle m| + \mu_{mf} e^{-i\omega_{fm}(t-t_0)} |m\rangle\langle f|$$

$$\hat{V}^\dagger(t) = \mu_{gm} e^{i\omega_m(t-t_0)} |m\rangle\langle g| + \mu_{mf} e^{i\omega_{fm}(t-t_0)} |f\rangle\langle m|$$

$$\text{Amplitud de transición temporal: } \langle f_\alpha e^{i\omega_{f\alpha}(t-t_0)}, 0 | \hat{U}_I(t, t_0) | g, \psi^{(2p)} \rangle \rightarrow |\psi^{(2p)}\rangle = \int \int d\omega_1 d\omega_2 \psi^{(2p)} \hat{a}_i^\dagger(\omega_1) \hat{a}_s^\dagger(\omega_2) |0\rangle$$

$$\hat{U}_I(t, t_0) \rightarrow \text{Operador de evolución temporal} \quad \text{y} \quad \psi^{(2p)} \rightarrow \text{Joint Spectral Amplitude}$$

Teoría de perturbaciones dep. del tiempo (aproximación a tiempo finito):

$$A_\alpha(t, t_0) = \frac{\omega_0 e^{i(\omega_{f\alpha} - \frac{i}{2}\gamma_{f\alpha})t}}{2\pi\hbar\epsilon_0 n c A_q} \sum_v \mu_{v\alpha} \mu_{v\alpha} \int_{-t_0}^t dt_1 \int_{-t_0}^{t_1} dt_2 \int_{-\infty}^{\infty} d\omega_1 \int_{-\infty}^{\infty} d\omega_2 e^{i(\omega_{f\alpha} - \frac{i}{2}\gamma_{f\alpha})t_1} e^{-i(\omega_{mv} - \frac{i}{2}\gamma_{mv})(t_1 - t_2)} e^{-i\omega_1 t_1} e^{-i\omega_2 t_2} \psi^{(2p)}(\omega_1, \omega_2)$$

Conclusiones

- La absorción de fotones (OPA, TPA e ETPA) es un fenómeno probabilístico, el cual tiende más a ocurrir mientras más cerca se encuentre el haz de luz de la frecuencia de resonancia.
- Se entendió teóricamente el comportamiento de OPA, TPA y ETPA para el átomo de Cesio.
- Mediante teoría de perturbaciones dependiente del tiempo, a tiempo finito, se lograron derivar las secciones eficaces para absorción de un fotón y de pares de fotones, y se dejó expresada una expresión generalizada para ETPA.
- El ETPA permite mejorar la tasa de absorción usando menor intensidad, mejorando significativamente frente al TPA.

Referencias

- [1] Caracas, M. (2023). *Estudio teórico y experimental de la sección eficaz de absorción de dos fotones en átomos de Cesio*. Departamento de Física, Universidad de Los Andes.
- [2] Caracas, M and Nuñez, M. (2026). *Entangled two-photon absorption in cesium atoms and the limitations of the far-off-resonance approximation*.
- [3] Fei, H. (1997). *Entanglement-induced two-photon transparency*. PNAS.
- [4] Rodríguez, C. (2026) *Theory of two photon absorption processes*.
- [5] Rumi, M and Perry, J. (2010). *Two-photon absorption: an overview of measurements and principles*.
- [6] Varnavski, O. (2023). *Colors of entangled two-photon absorption*. PNAS.
- [7] Jiménez, G. (2023). Detección heterodina de dos láseres estables en frecuencia hacia la implantación de un reloj atómico.