



# Láseres Pulso Ultracorto Attosegundos

José Angel Arias Cruz

Julián Ramírez Ramírez

Elizabeth Pérez Corona

Antonio de Jesús Olivares Robles

# Pulso Ultracorto

A diferencia de lo que ocurre en el funcionamiento usual de un láser, donde se tiene una onda continua de luz casi monocromática, los láseres de pulsos ultracortos generan una secuencia de pulsos con un ancho de banda asociado de algunos nanómetros. Esto significa un ancho de banda enorme

El campo eléctrico asociado a un pulso ultracorto se puede expresar matemáticamente como

$$E(t) = E_0(t) e^{j\phi(t)} e^{j\omega_0 t}$$

# Pulsos con Chirp

Un pulso con chirp se define como aquel pulso cuya frecuencia instantánea cambia a lo largo del tiempo.

En un pulso sin chirp la frecuencia instantánea es una constante a lo largo del tiempo

$$\omega_i(t) \equiv \frac{d\phi_{tot}(t)}{dt}$$

$$\omega_i(t) \equiv \frac{d}{dt}(\omega_0 t) = \omega_0$$

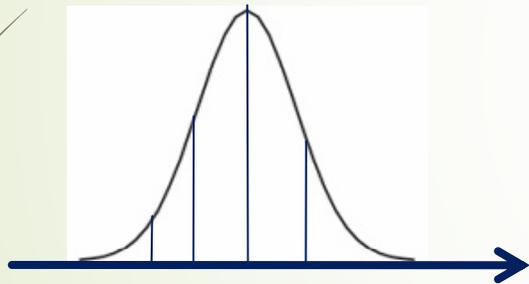
# Pulsos Limitados por Transformada de Fourier

Un pulso Limitado por Transformada de Fourier (LTF) es aquel cuyo producto duración por ancho de banda es mínimo. En otras palabras, un pulso LTF será aquel que, con un ancho de banda y un perfil de intensidad determinados tenga la menor duración posible

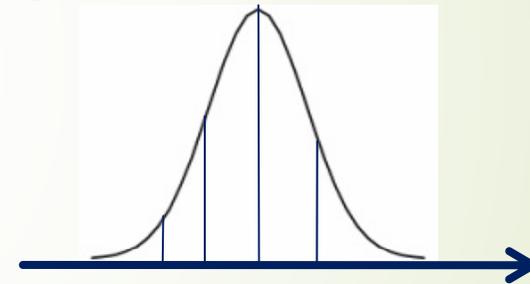
$$\Delta f_p \tau_p$$

$$\nabla^2 \tilde{E}(r, \omega) + \frac{\omega^2}{c^2} n(\omega)^2 \tilde{E}(r, \omega) = 0$$

$$\tilde{E}(0, \omega_1) \longrightarrow \tilde{E}(0, \omega_1) e^{i\beta(\omega_1)z}$$



$$\begin{array}{ccc} \omega_1 & \omega_2 & \omega_3 \\ \tilde{B}_1 & \tilde{B}_2 & \tilde{B}_3 \end{array}$$



$$\begin{array}{c} \omega_1 \\ \tilde{B}_1 e^{i\beta(\omega_1)z} \end{array}$$

$$E_{out}(t) = F^{-1}(E_{out}(\omega))$$

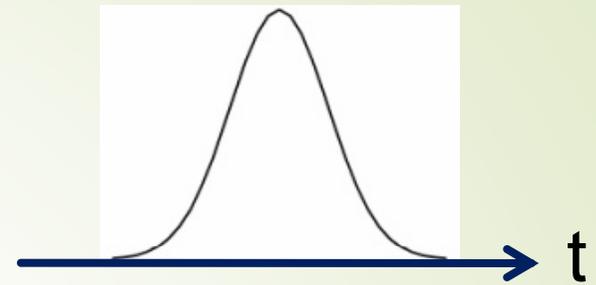
$$E(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{E}(0, \omega) e^{i\beta z} e^{-i\omega t} d\omega$$

$$E(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{B}(0, \omega - \omega_0) e^{i\beta z} e^{-i\omega t} d\omega$$

$$\beta = \beta_0 + \frac{d\beta}{d\omega} (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \frac{d^2\beta}{d\omega^2} (\omega - \omega_0)^2 +$$

$$E(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{B}(0, \omega - \omega_0) e^{i\left(\beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2\right)z} e^{-i\omega t} d\omega$$

$$E(z, t) = e^{-i\omega_0 t} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{B}(0, \omega - \omega_0) e^{i\left(\beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2\right)z} e^{-i(\omega - \omega_0)t} d\omega$$



$$E(0, t) = B(0, t) e^{-i\omega_0 t}$$

$$\tilde{E}(z, \omega) = \tilde{B}(z, \omega - \omega_0)$$

Pulse filled by frequency  $\omega$


$$E(z, t) = e^{-i\omega_0 t} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{B}(0, \omega - \omega_0) e^{i\left(\beta_0 + \beta_1(\omega - \omega_0) + \frac{1}{2}\beta_2(\omega - \omega_0)^2\right)z} e^{-i(\omega - \omega_0)t} d(\omega - \omega_0)$$

$$E(0, t) = e^{-i\omega_0 t} B(0, t)$$

$$E(z, t) = e^{-i\omega_0 t} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{B}(0, \Omega) e^{i\left(\beta_0 + \beta_1\Omega + \frac{1}{2}\beta_2\Omega^2\right)z} e^{-i\Omega t} d\Omega$$

$$B(z, t) = e^{i\beta_0 z} \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{B}(0, \Omega) e^{i\left(\beta_1\Omega + \frac{1}{2}\beta_2\Omega^2\right)z} e^{-i\Omega t} d\Omega$$

$$A(z, t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \tilde{B}(0, \Omega) e^{i\left(\beta_1 \Omega + \frac{1}{2} \beta_2 \Omega^2\right)z} e^{-i\Omega t} d\Omega$$



$$E(z, t) = A(z, t) e^{-i(\omega_0 t - \beta_0 z)}$$

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} = -\beta_1 \frac{\partial A(z, t)}{\partial t} - \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2}$$

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A(z, t)}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2} = 0$$

$$\frac{\partial A(z, t)}{\partial z} + \beta_1 \frac{\partial A(z, t)}{\partial t} + \frac{i}{2} \beta_2 \frac{\partial^2 A(z, t)}{\partial t^2} = (\text{no-linear})$$

# Dispersión del Material

En un medio dispersivo la constante de propagación  $\beta(\omega)$  se puede desarrollar en serie de potencias como

$$\beta(\omega) = \beta(\omega_0) + \beta' \times (\omega - \omega_0) + \frac{1}{2} \beta'' \times (\omega - \omega_0)^2 + \dots$$

$$\beta \equiv \beta(\omega) \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{\omega_0}{v_\phi(\omega_0)} \equiv \frac{\omega_0}{\text{velocidad de fase}}$$

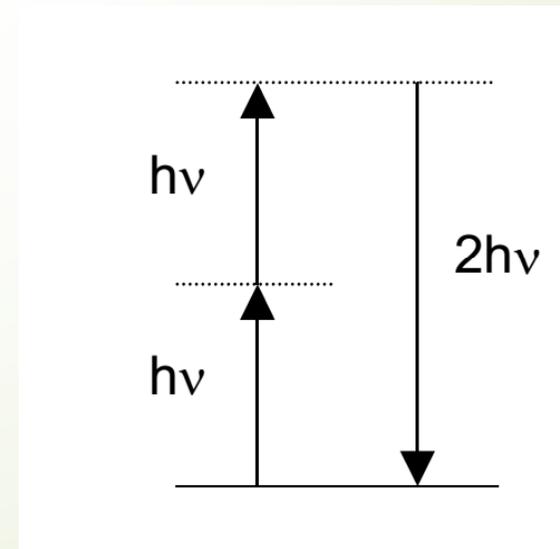
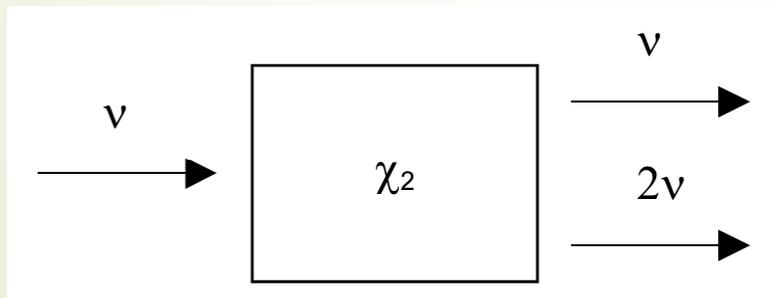
$$\beta' \equiv \frac{d\beta}{d\omega} \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{1}{v_g(\omega_0)} \equiv \frac{1}{\text{velocidad de grupo}}$$

$$\beta'' \equiv \frac{d^2\beta}{d\omega^2} \Big|_{\omega=\omega_0} = \frac{d}{d\omega} \left( \frac{1}{v_g(\omega)} \right) \equiv \text{dispersión de la velocidad de grupo}$$

# Generación de Segundo Armónico

Cuando la luz que incide en un material es suficientemente intensa se comienzan a manifestar una serie de fenómenos no lineales, en el sentido de que la respuesta óptica del material deja de depender linealmente con el campo eléctrico aplicado. En tal caso la Polarización Eléctrica que se induce en el material es

$$P(t) = \chi_1 E(t) + \chi_2 E^2(t) + \chi_3 E^3(t) + \dots$$



# El Láser de Pulsos Ultracortos

efectos no lineales importantes para la generación de pulsos ultracortos, ambos derivados del efecto Kerr óptico

$$n(t) = n_0 + n_{2I} \cdot I(t)$$

$$\Delta\phi(t) = \frac{2\pi L n_{2I} I(t)}{\lambda}$$

$$\Delta\omega(t) = -\frac{2\pi L n_{2I}}{\lambda} \left[ \frac{dI(t)}{dt} \right]$$



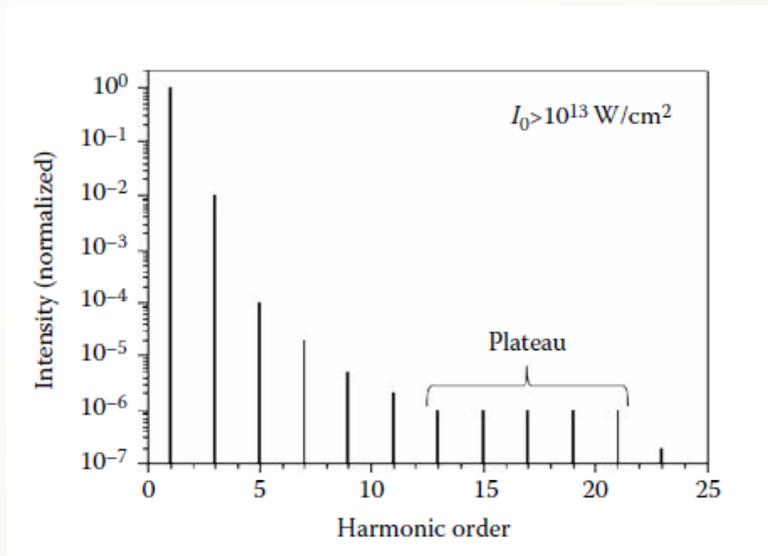
# Descripción general de la generación de pulsos de attosegundos

No se ha encontrado ningún medio laser que soporte el ancho de banda que es en FWHM de 1 a 100 as de duración se encuentra en el rango de 18eV a 1.8keV.

Ti: zafiro, con su longitud de onda central a 790 nm. El FWHM de la curva de sección transversal de ganancia es de 120 nm, que corresponde a 2 fs.

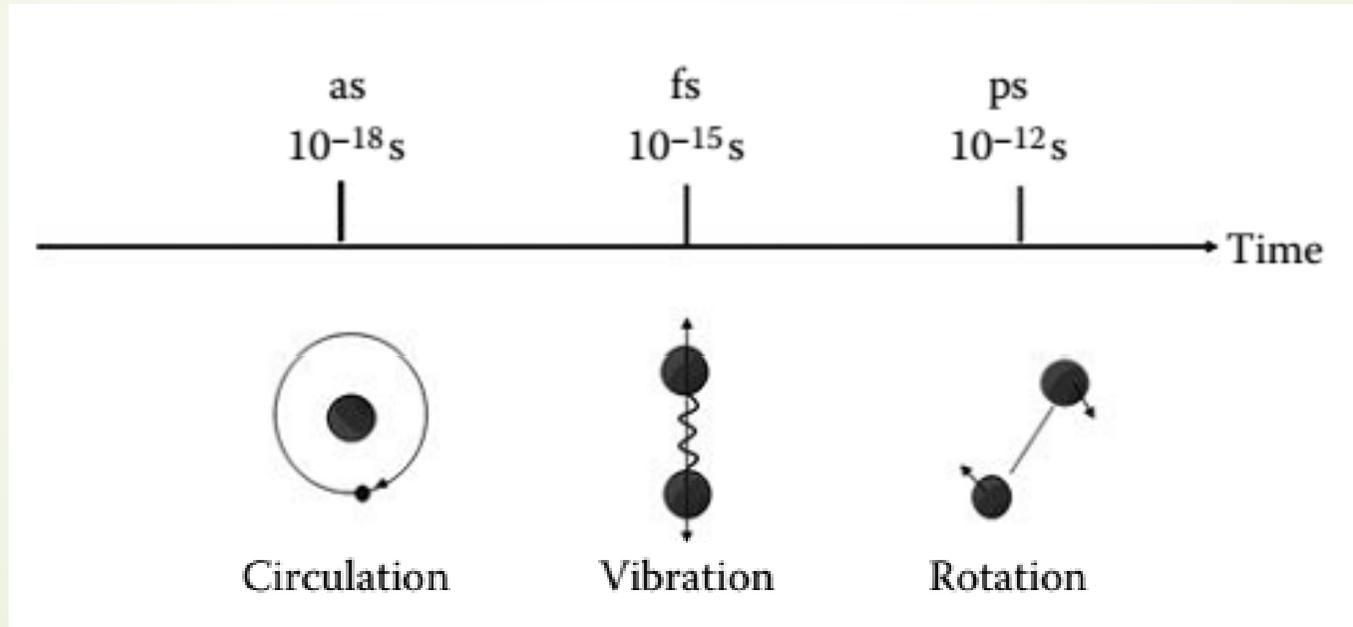
# Generación de armónicos de alto orden

un haz de láser de pulso corto linealmente polarizada con una intensidad del orden de  $10^{14} \text{ W/cm}^2$  interactúa con gases nobles.

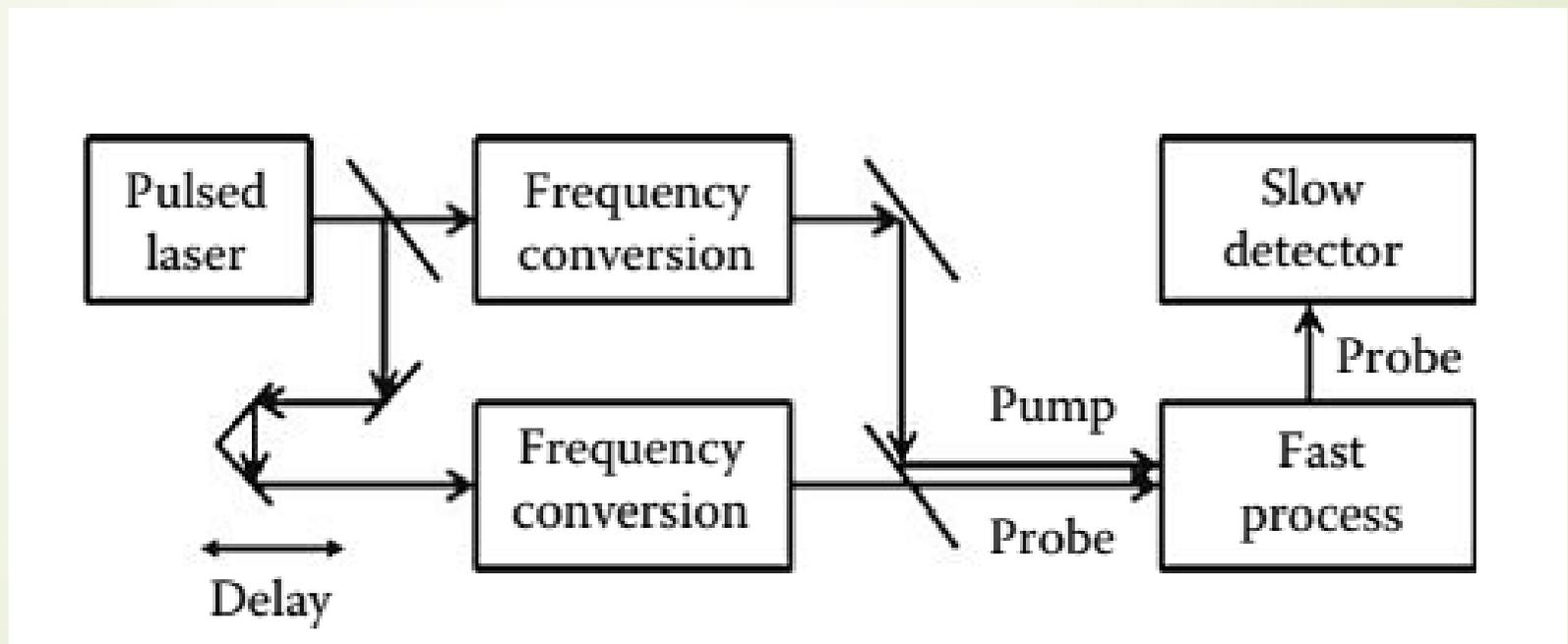


los cinco armónicos meseta abarcan 6 eV, que es lo suficientemente amplio como para soportar pulsos de attosegundos.

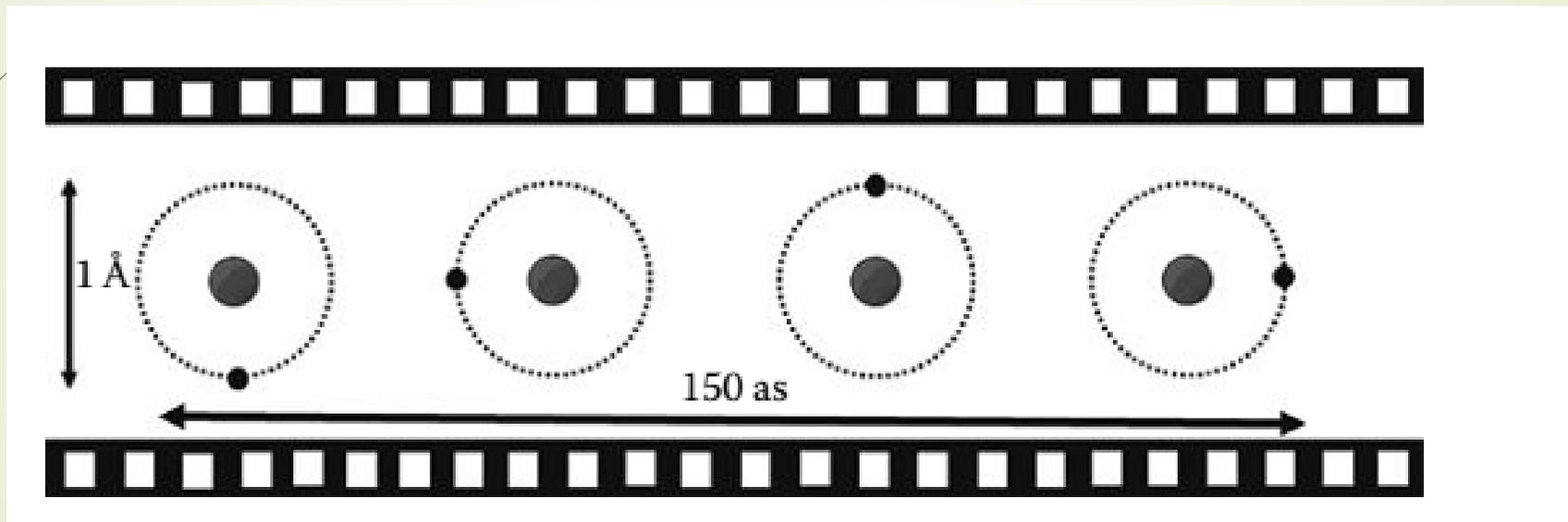
# Imagen de alta velocidad



# Técnica prueba de bombeo



# Película del movimiento del electrón en el átomo de Hidrogeno



# ¿Como generar pulsos de attosegundos?

× Técnicas de *Q-switching* y *Mode-locking*

-----> Régimen de los femtosegundos

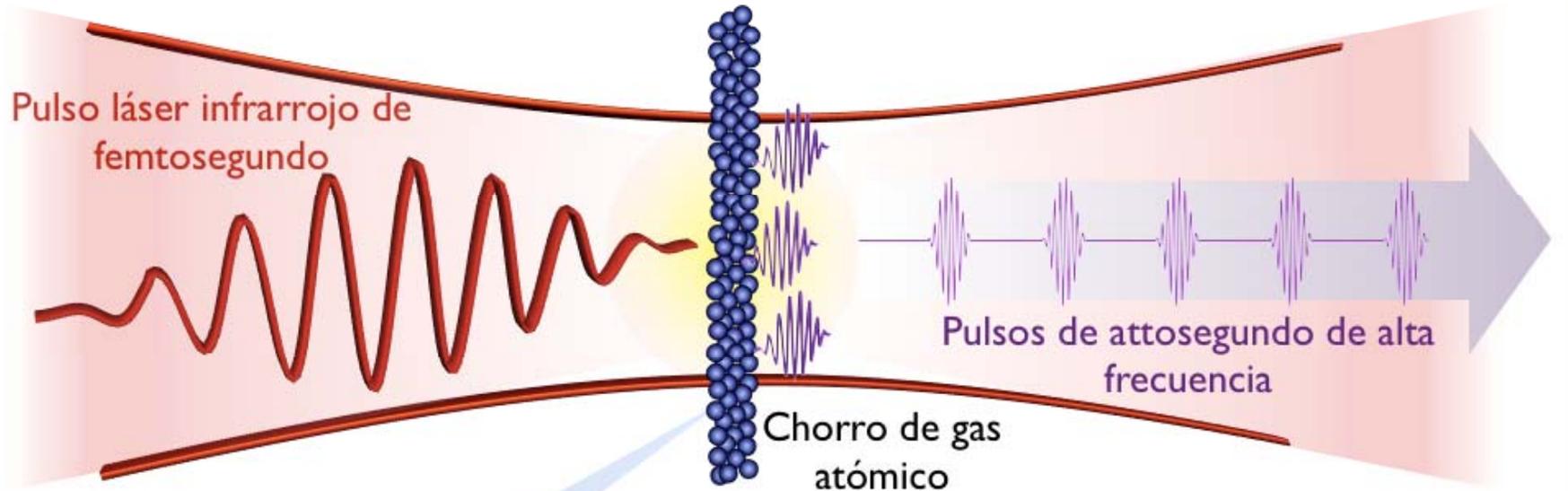
La generación de pulsos de luz en el régimen de **attosegundo** NO es una extensión del proceso de *Mode-locking* necesario para generar pulsos de femtosegundo

✓ Basado en la generación de armónicos de alto orden (*High order Harmonic Generation, HHG*)

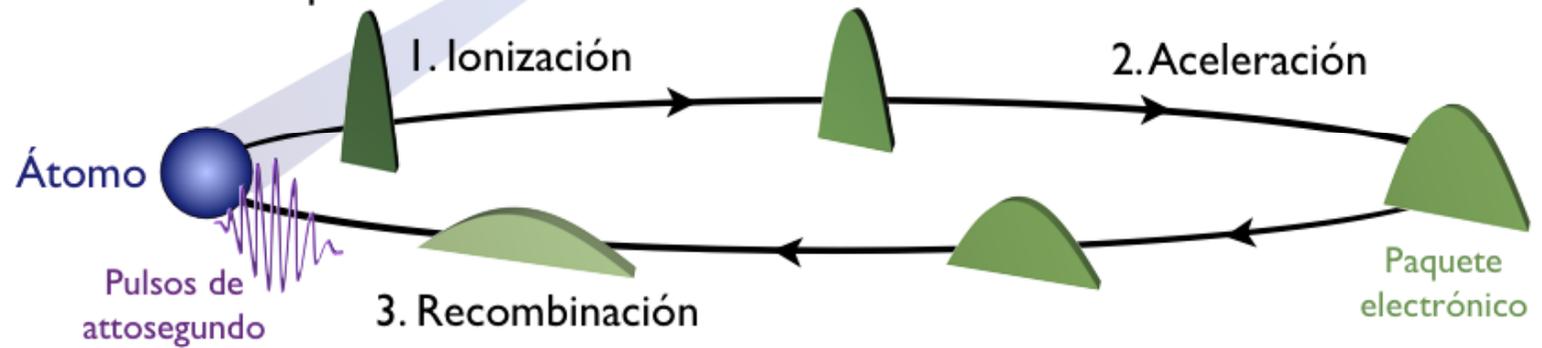
# Modelo de tres pasos:

- ***Ionización:*** El láser intenso de femtosegundo ioniza (extrae) un electrón del átomo.
- ***Aceleración:*** El electrón liberado es acelerado por el mismo láser.
- ***Recombinación:*** Debido al carácter oscilante del campo láser, el electrón es reenviado contra el átomo del que fue extraído. Al colisionar con el átomo se recombina, y toda la energía que adquirió del láser cuando era libre es liberada en forma de radiación de mayor frecuencia, (en concreto, en forma de armónicos de orden elevado).

## Generación de harmónicos de orden elevado (HHG)



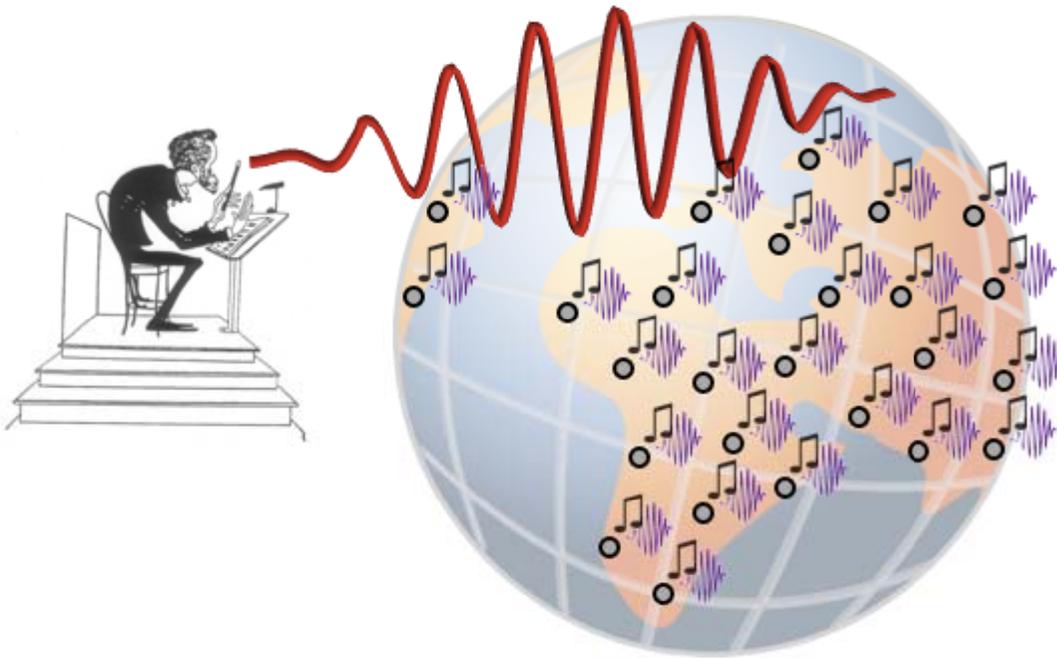
Modelo de los 3 pasos:



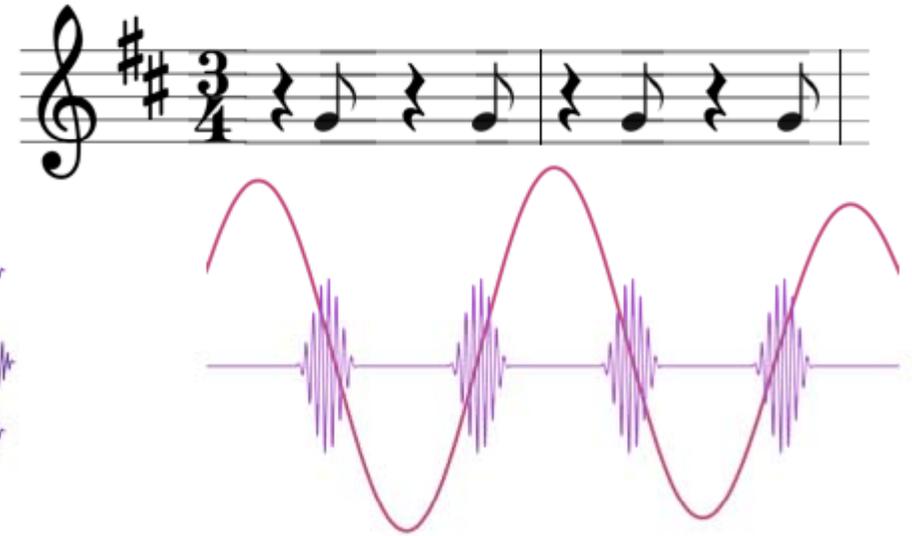
- 
- ▶ Armónicos en el proceso de HHG ---> Forma de pulsos de attosegundo.
  - ▶ En un gas atómico tendremos en torno a un billón de átomos ( $10^{12}$  átomos), por tanto si cada uno de los átomos emite pulsos de attosegundo, ¡todos ellos han de hacerlo de manera coordinada para obtener una señal eficiente!, ¿parece difícil verdad?

# Proceso macroscópico de HHG

El **láser** como director de orquesta ...



... y cada átomo de un gas como músico, emitiendo **pulsos de attosegundo** al ritmo que dicta el láser.



Como resultado, una *melodía* de **pulsos de attosegundo** emitidos coherentemente.

Sin embargo, esto ocurre en circunstancias controladas en un laboratorio, por lo que, a pesar de lo complicado que parece, **mediante este proceso se consiguen melodías perfectamente acompañadas de pulsos de attosegundo.**

- 
- Variando diversos parámetros del proceso de HHG (longitud de onda del láser, focalización, gas, geometría del gas, etc...) se pueden controlar las condiciones bajo las cuales los átomos emiten las melodías de pulsos de attosegundo.



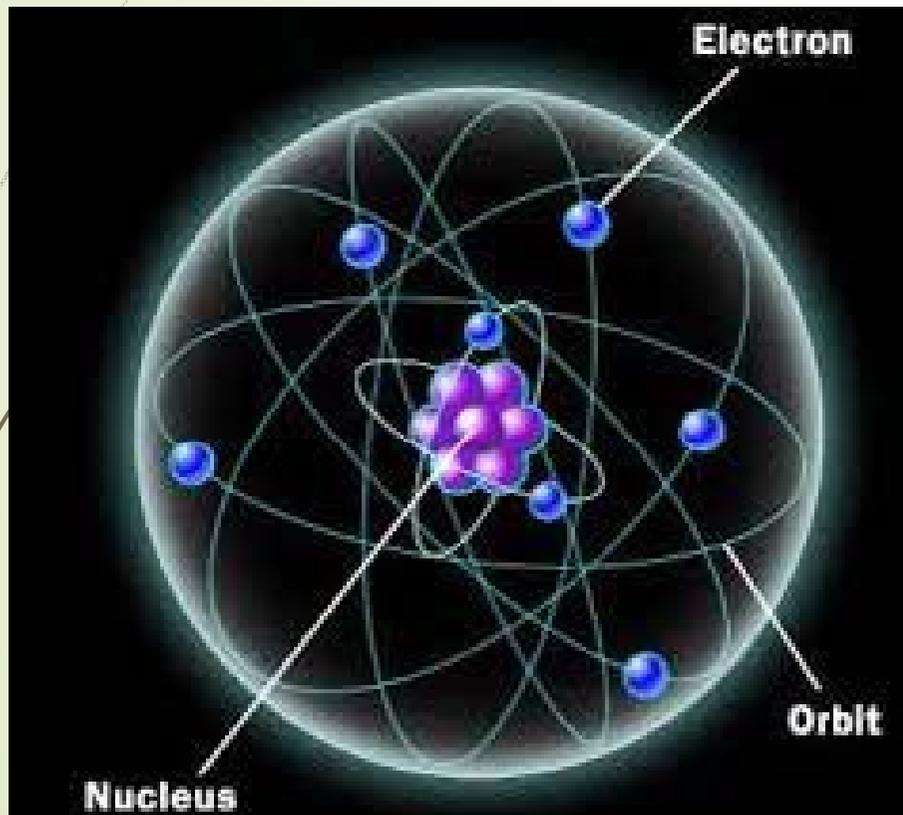
# APLICACIONES

# BOMBEO ATOSEGUNDOS PROBAR EXPERIMENTOS



Estudio de dos electrones  
dinámicos en Helio.

# CONTROLAR DOS ELECTRONES DINAMICO EN ATOMOS DE HELIO



Átomos y moléculas que  
tiene muchos electrones  
se le construyen bloques  
de materia alrededor.



# MEDICION DIRECTA DE LA OSCILACION TEMPORAL DE LA LUZ

MEDICION DIRECTA DE VARIACION ESPACIAL  
DEL CAMPO EN HACES BESSEL