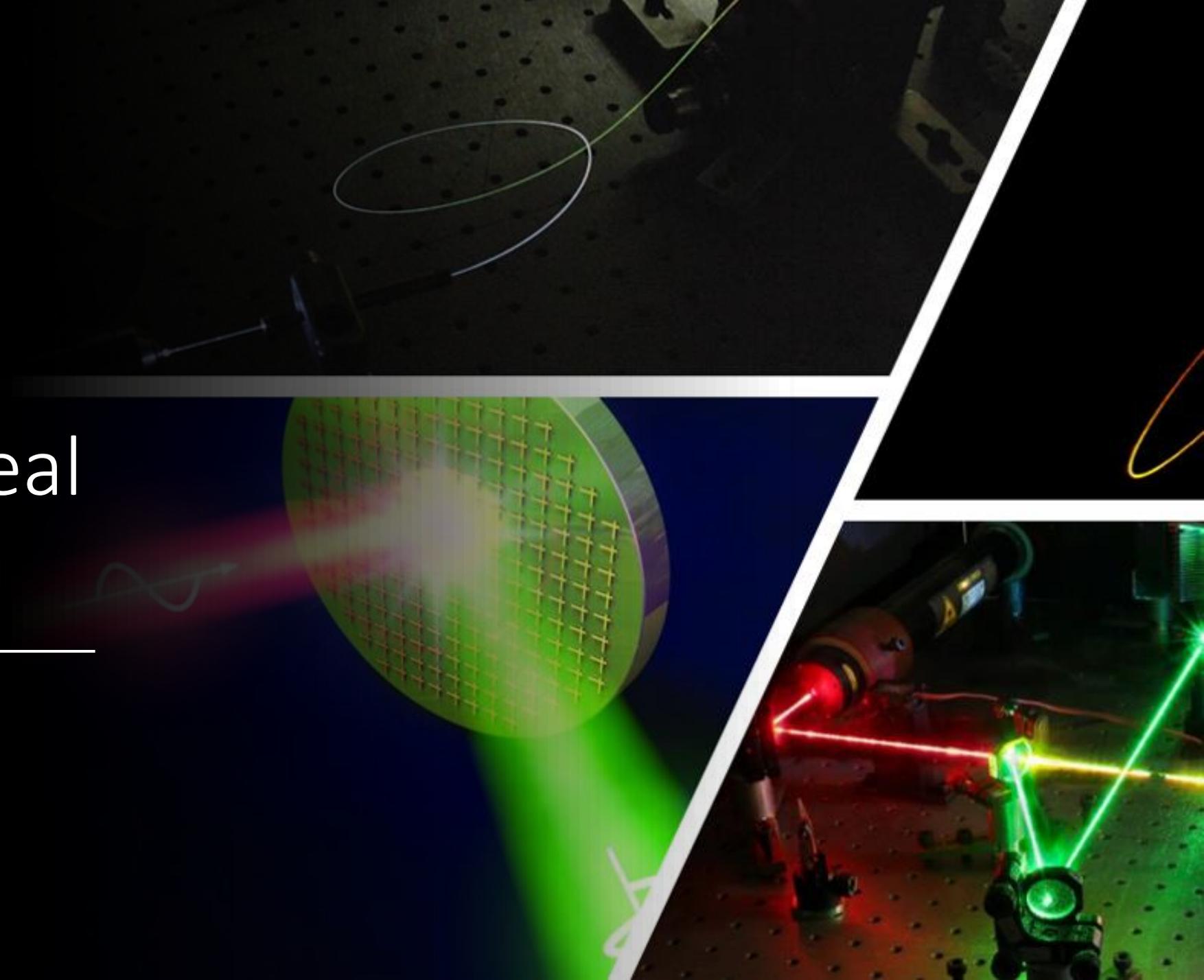


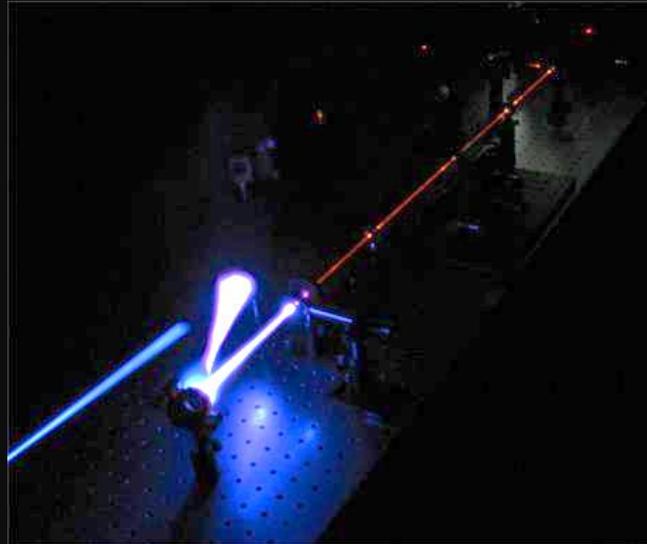


# Optica no lineal y ultra-rápida

---



“no lineal”





TOP 10: Animales autóctonos de Argentina  
buenosairesconnect.com



Estos son los animales de Argentina en peligro de ...  
matadornetwork.com



Animales autóctonos de Argentina - La nueva famili...  
youtube.com



Fauna de Argentina - E...  
buenosairesconnect.com



TOP 10: Animales autóctonos de Argentina  
buenosairesconnect.com



Animales autóctonos de Argentina  
es.slideshare.net



24 animales autóctonos de Argentina en peligro de...  
animador.com



TOP 10: Animales autóctonos de Argentina  
buenosairesconnect.com



TOP 10: Animales autóctonos de Argenti...  
buenosairesconnect.com



Animales-autoctonos | Córdoba, Animales, ...  
ar.pinterest.com



Animales en peligro de extinción en Argentina - M...



Mapa de los Dinosaurios



Yaguareté | Nueva familia de felinos. Animales autóct...

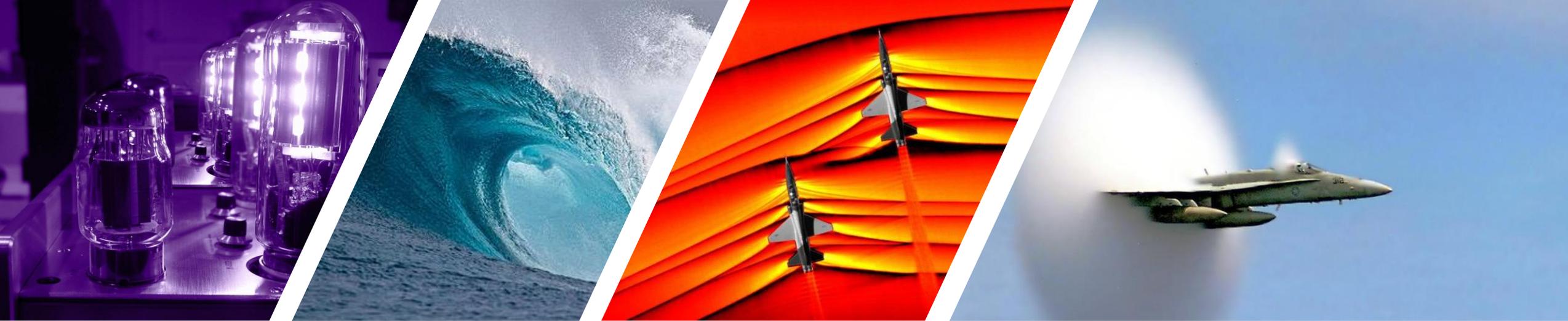


20 animales autóctonos de Argentina - Lifeder

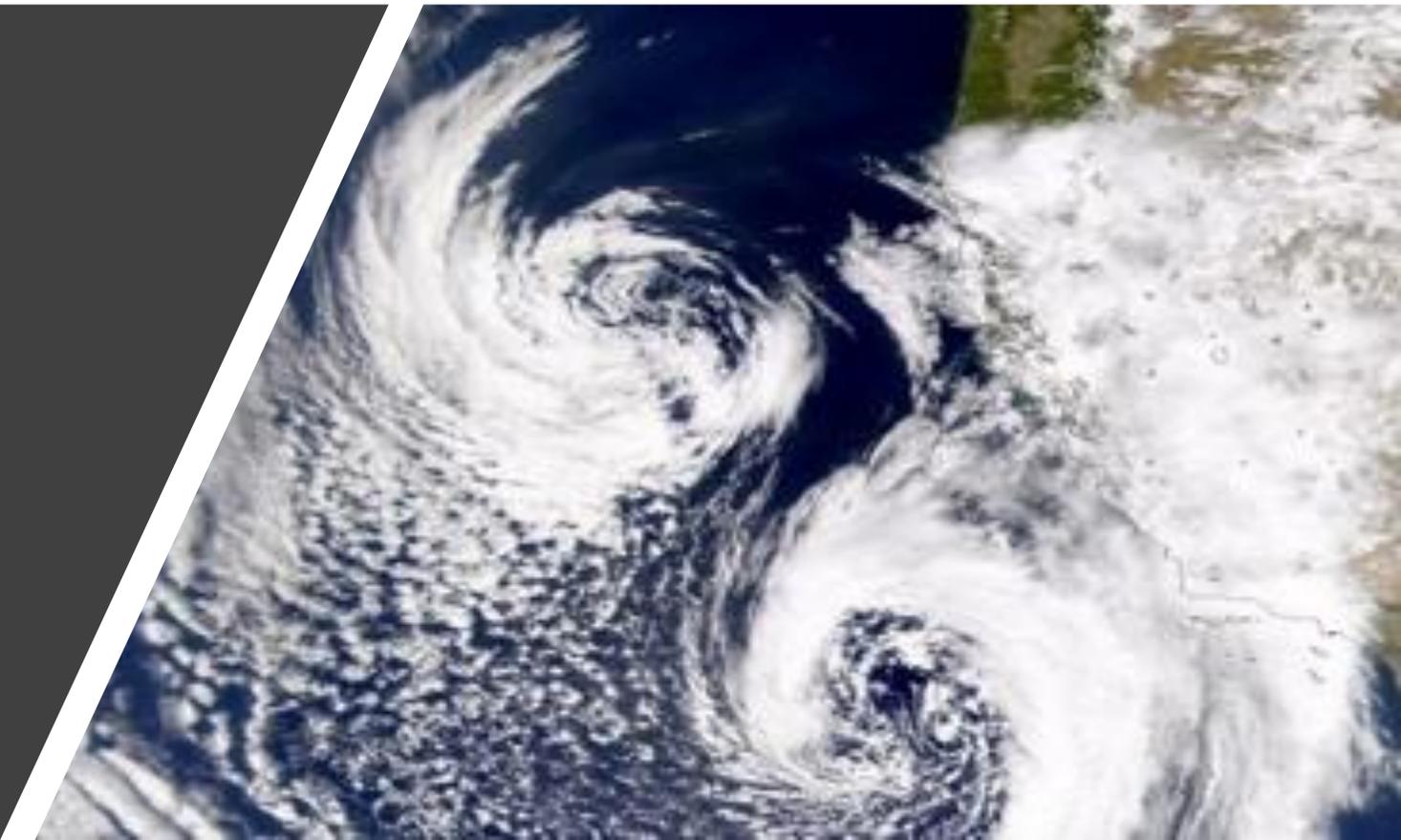


Animales autóctonos de Argentina

# animales no canguros



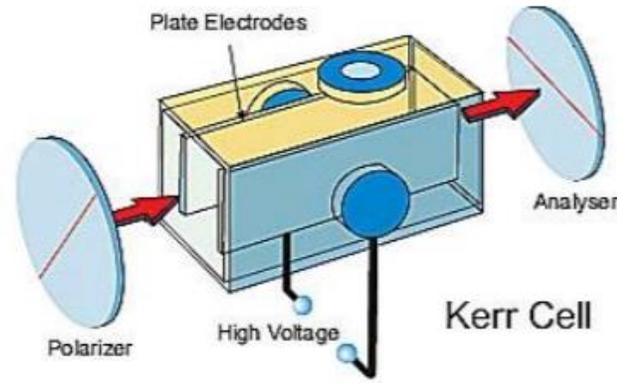
Efectos no lineales en la física



# En óptica?

❖ Kerr Effect- 1875:

$$\Delta n = \lambda K E^2,$$

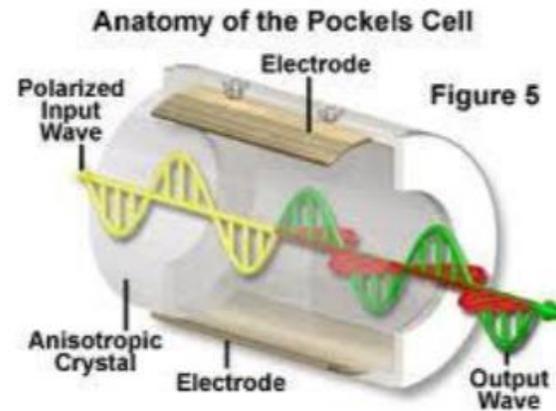


John Kerr



❖ Pockels Effect- 1893:

$$\Delta n = r \cdot n^3 E$$



Friedrich Pockels

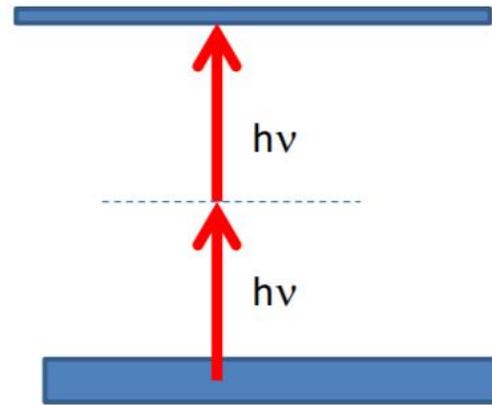


# En óptica?



**Maria Goeppert-Mayer** (June 28, 1906 – February 20, 1972)

Two-photon absorption theory (1931, doctoral dissertation)



$$\alpha = \alpha_0 + \beta I$$

En óptica?

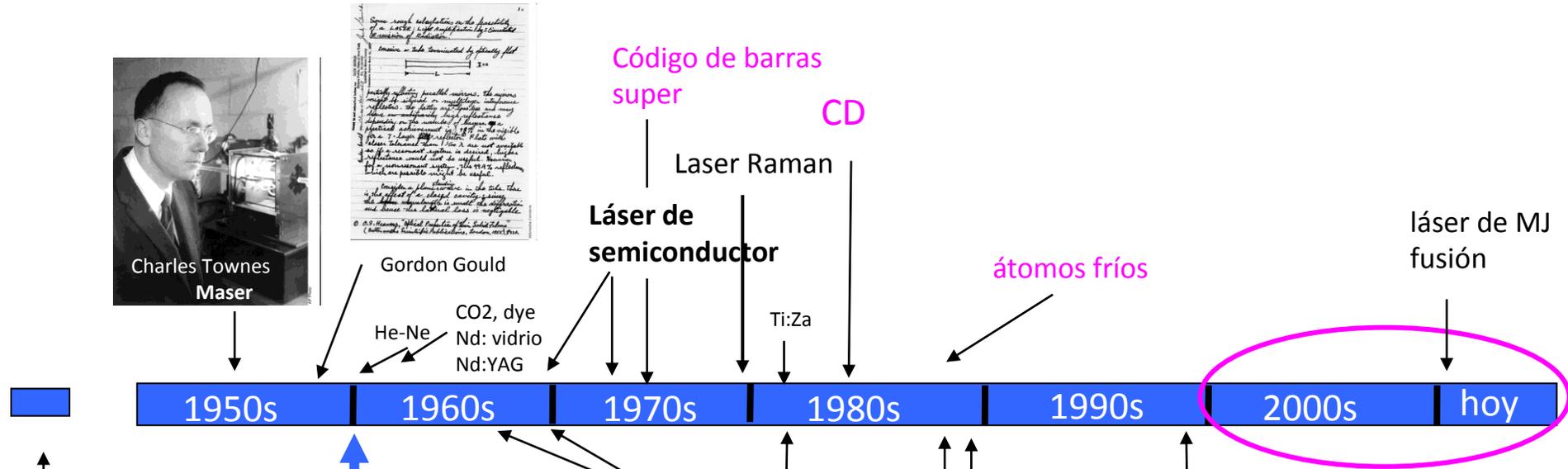
Light **A**mplification by **S**timulated **E**mission of **R**adiation



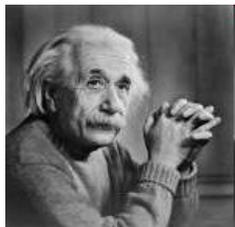
una solución esperando un problema.....

**The Birth of the Laser** - Physics Today **41**, 10, 26 (1988); <https://doi.org/10.1063/1.881155>

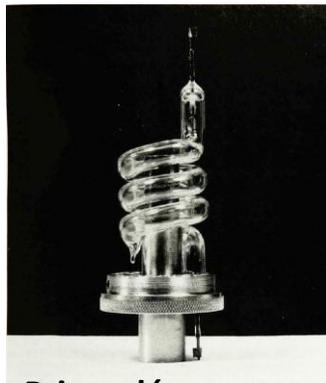
# El láser en el tiempo



1917



Emisión estimulada



Primer láser  
Theodore Maiman  
1960



Fibra óptica

litografía  
láser

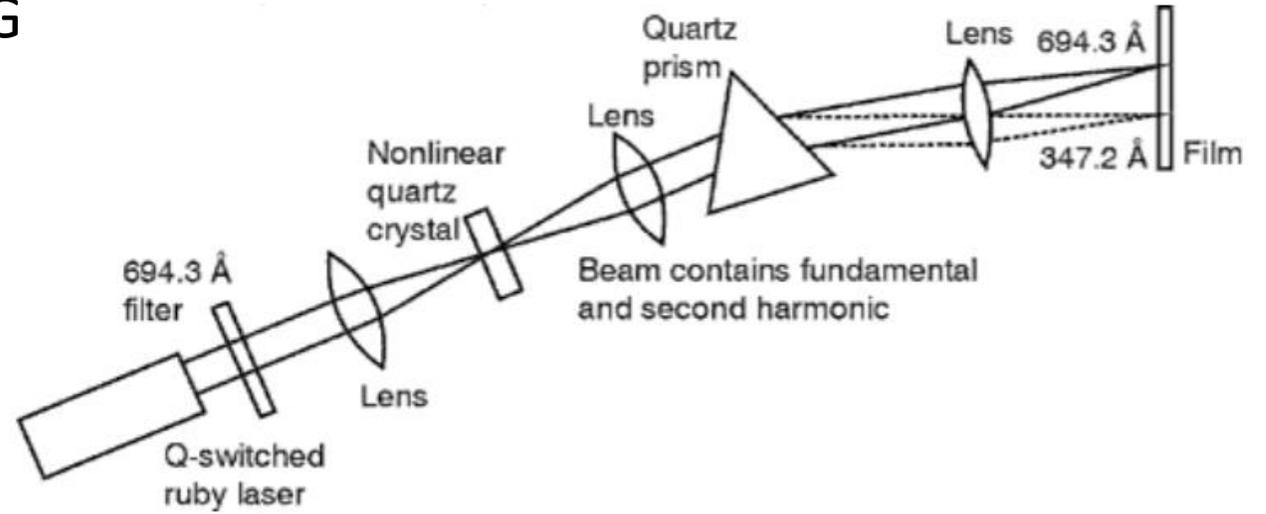
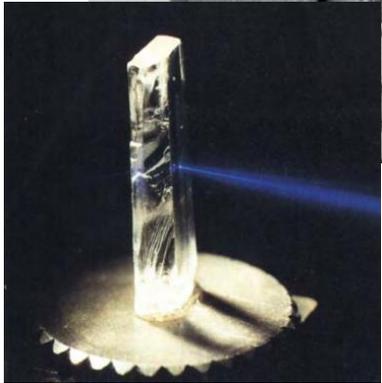
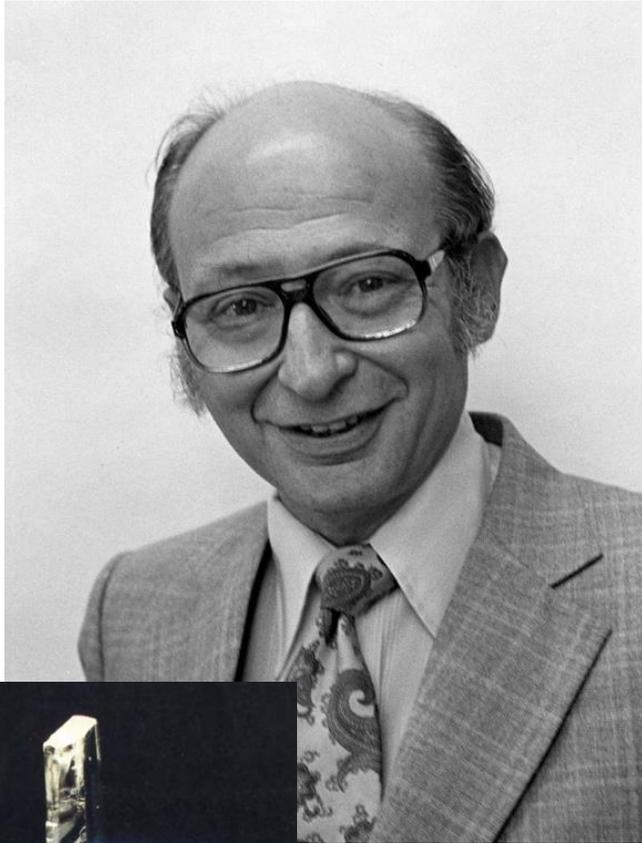
Amplificador  
de fibra

Cirugía de ojos

Láser  
semiconductor  
azul

- Fuentes intensas de luz
- Pulsos ultracortos
- Nanofotónica no lineal
- Comunicaciones – solitones transmitidos a través de fibras
- Información cuántica
- Óptica no lineal extrema
- Peine de frecuencias – metrología de precisión

# Generacion de segunda armónica- SHG



VOLUME 7, NUMBER 4

PHYSICAL REVIEW LETTERS

AUGUST 15, 1961

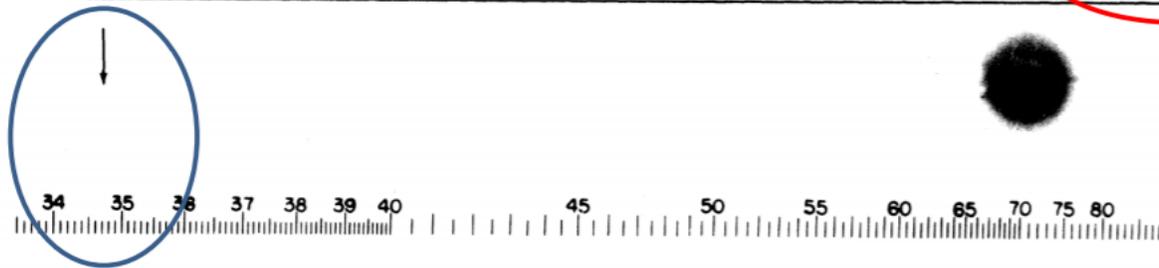
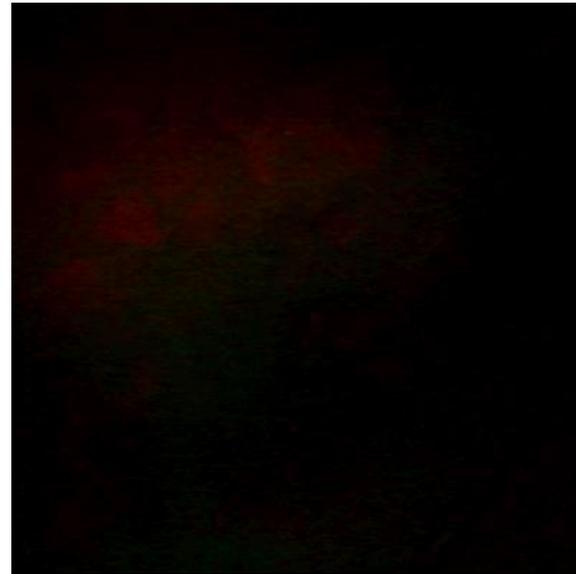
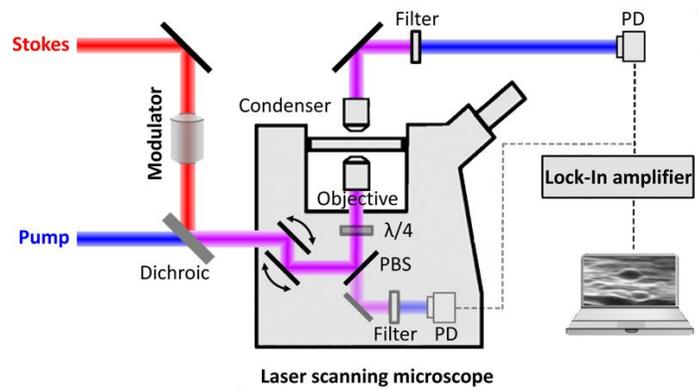
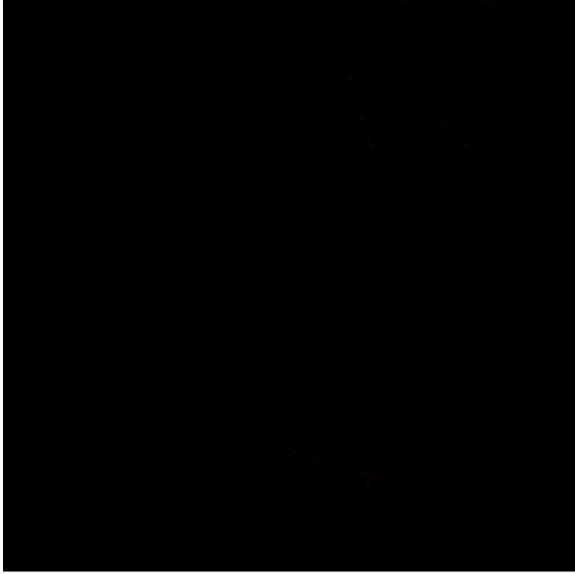
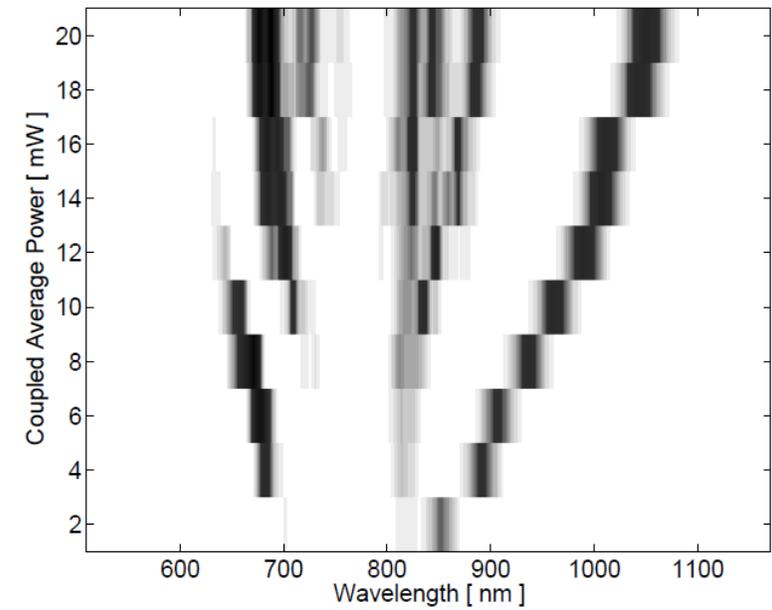
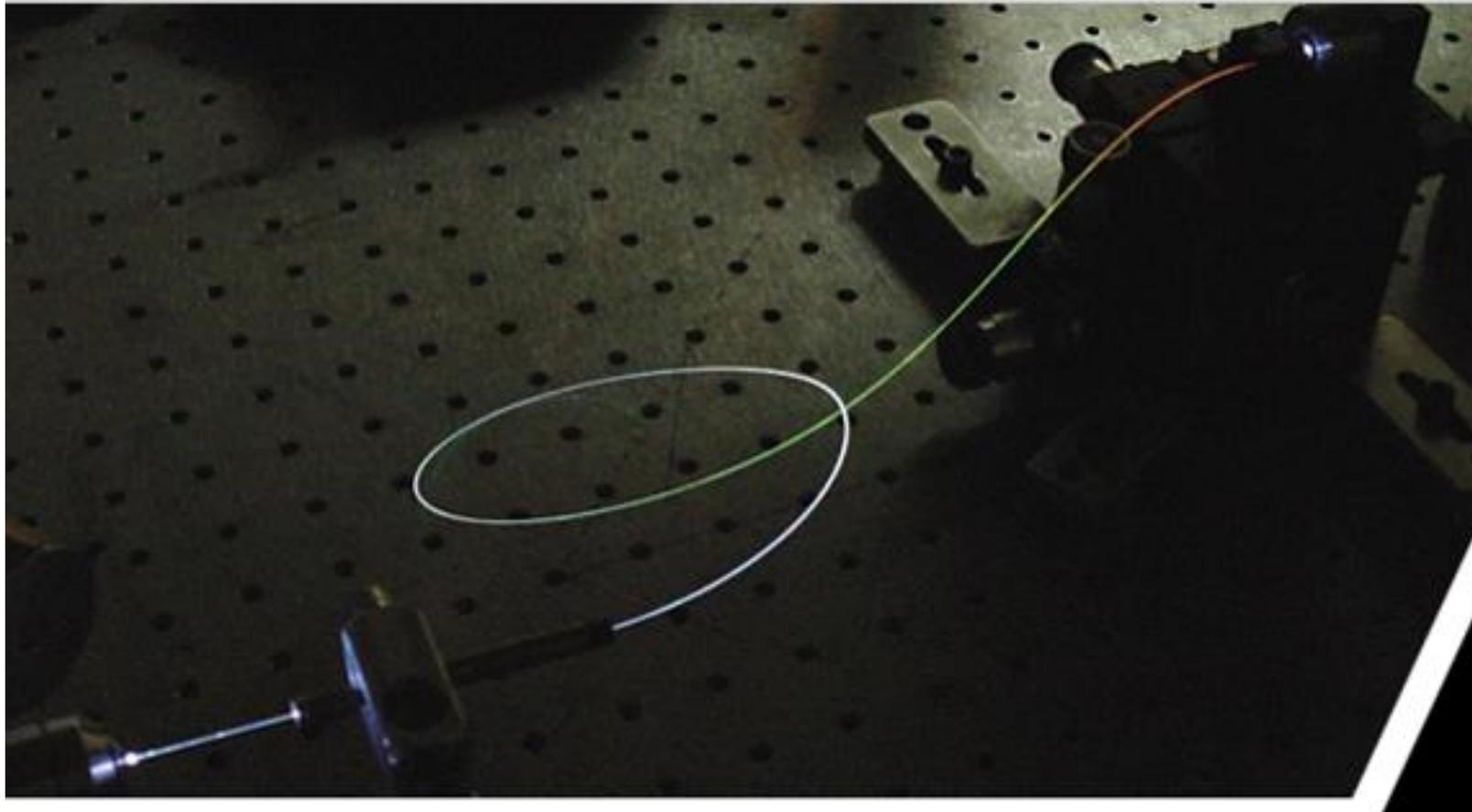


FIG. 1. A direct reproduction of the first plate in which there was an indication of second harmonic. The wavelength scale is in units of 100 Å. The arrow at 3472 Å indicates the small but dense image produced by the second harmonic. The image of the primary beam at 6943 Å is very large due to halation.

P. A. Franken, A. E. Hill, C. W. Peters, and G. Weinreich, "Generation of Optical Harmonics," Phys. Rev. Lett. **7**, 118–119 (1961).

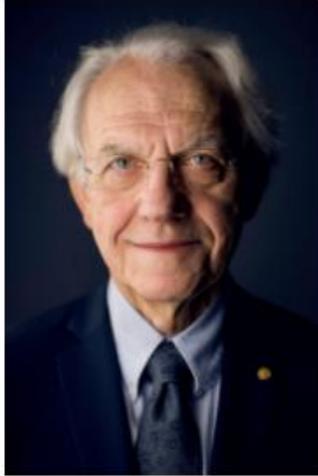
# Microscopias y espectroscopías no lineales





M. Masip, A. Rieznik, P. König, D. Grosz, A. V. Bragas and O. E. Martínez, "Femtosecond soliton source with fast and broad spectral tunability", *Optics Letters*, Vol. 34 Issue 6, 842-844, 2009

# The Nobel Prize in Physics 2018

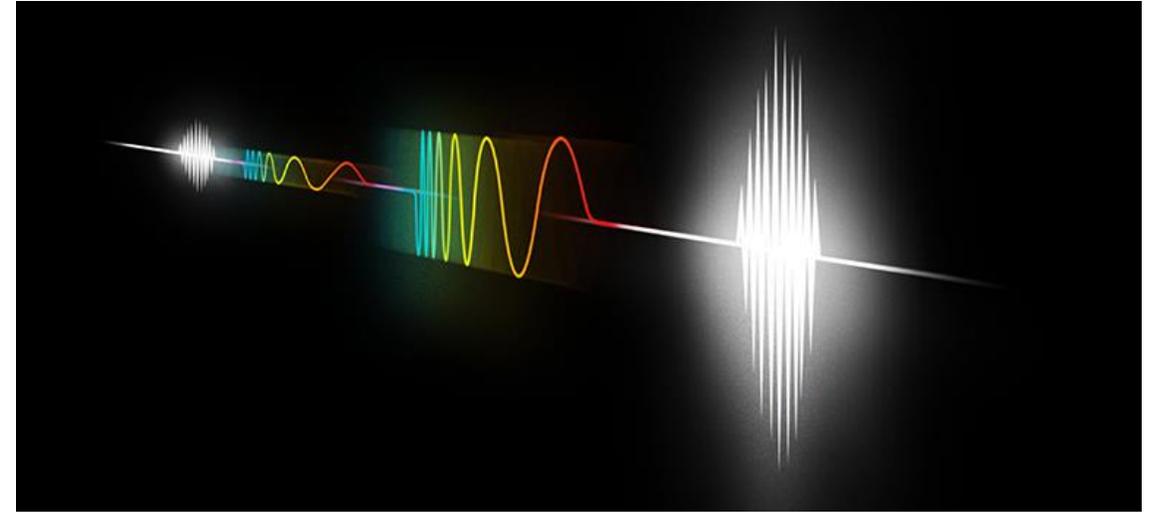


© Arthur Ashkin  
Arthur Ashkin  
Prize share: 1/2

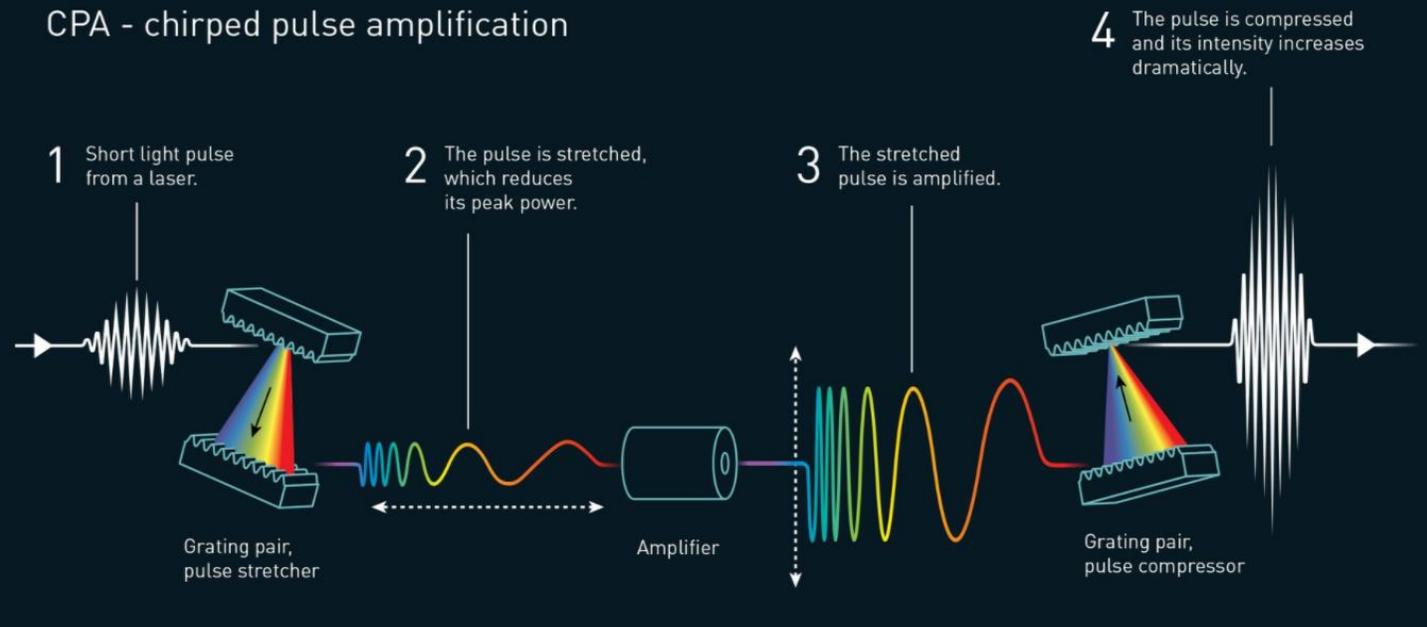
© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud  
Gérard Mourou  
Prize share: 1/4

© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud  
Donna Strickland  
Prize share: 1/4

The Nobel Prize in Physics 2018 was awarded "for groundbreaking inventions in the field of laser physics" with one half to Arthur Ashkin "for the optical tweezers and their application to biological systems", the other half jointly to Gérard Mourou and Donna Strickland "for their method of generating high-intensity, ultra-short optical pulses."



## CPA - chirped pulse amplification



06-nov	Prof invitada: Gabriela Capeluto. Experimentos con lasers ultraintensos (título a confirmar)
10-nov	Prof invitado: Alex Fainstein. Optomecánica y Raman estimulado (título a confirmar)
13-nov	Prof invitado: Diego Grosz. Nolinealidades en fibras ópticas (título a confirmar)
17-nov	Prof invitada: Karina Bastida. Aplicaciones a la metrología (título a confirmar)
20-nov	Prof invitado: Miguel Larrotonda. Aplicaciones a la información cuántica (título a confirmar)
24-nov	Prof invitado: Gustavo Grinblat. Nanofotónica no lineal (título a confirmar)

Hoy vamos a hacer un pasaje rápido por una variedad de efectos no lineales y después a lo largo de la materia vamos a estudiar detalladamente algunos de ellos.

Básicamente lo que vamos a hacer para cada caso es derivar la polarización no lineal y luego insertarla en la ecuación de onda. De manera que tenemos que escribir  $P$

Podemos pensar en una expansión de Taylor en potencias del campo incidente  $E$ , si pensamos por ejemplo que los campos ópticos son  $\ll$  que los campos que mantienen unidos los  $e^-$  y los protones  $\sim 10^{11}$  V/m (problema Guía 1).

Supongamos para empezar un material sin pérdidas, de respuesta instantánea (sin dispersión) y además que los campos son escalares

Momento dipolar  
por unidad de  
volumen  
Polarización  $P$

$$P = \chi^{(1)} E + \chi^{(2)} E^2 + \chi^{(3)} E^3 + \dots$$

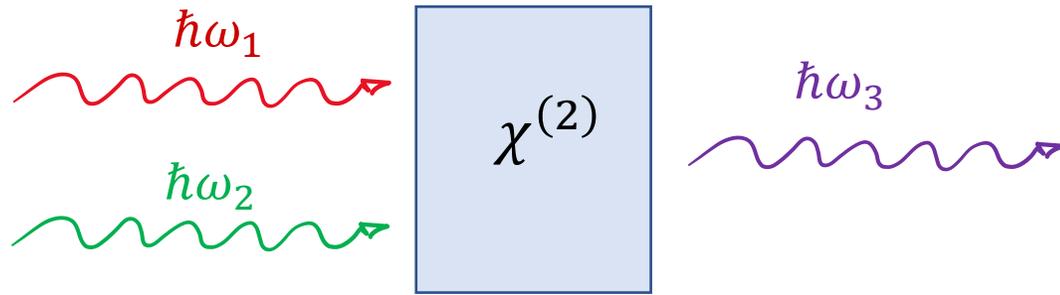
gaussiano

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)} E + \epsilon_0 \chi^{(2)} E^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)} E^3 + \dots$$

MKS

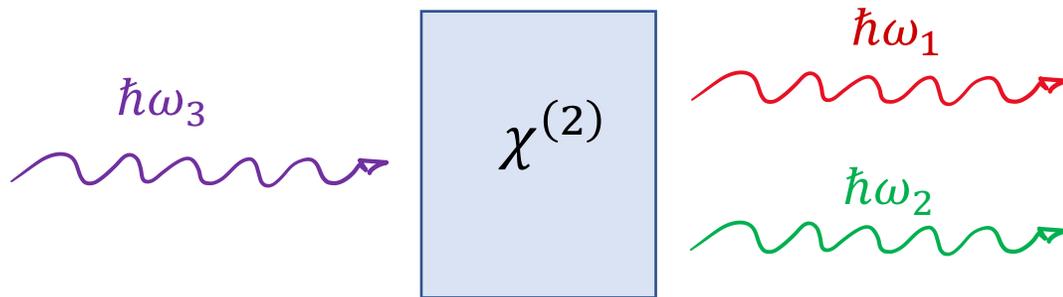
# Procesos de $\chi^{(2)}$ mezcla de 3 ondas

a) "fusion"



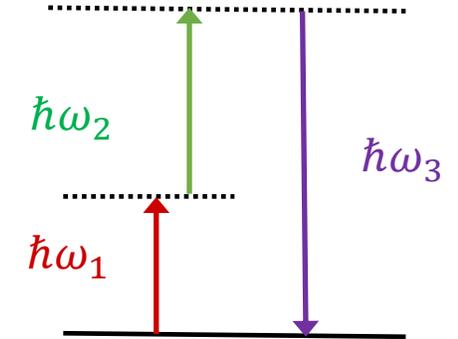
Se cumple la conservación de la energía  $\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 = \hbar\omega_3$   
Conservación del momento para optimización

b) "separación"  
splitting



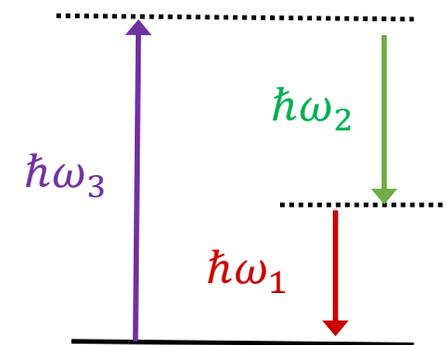
Se usa para formar pares correlacionados en óptica cuántica

Suma de frecuencias - up conversion



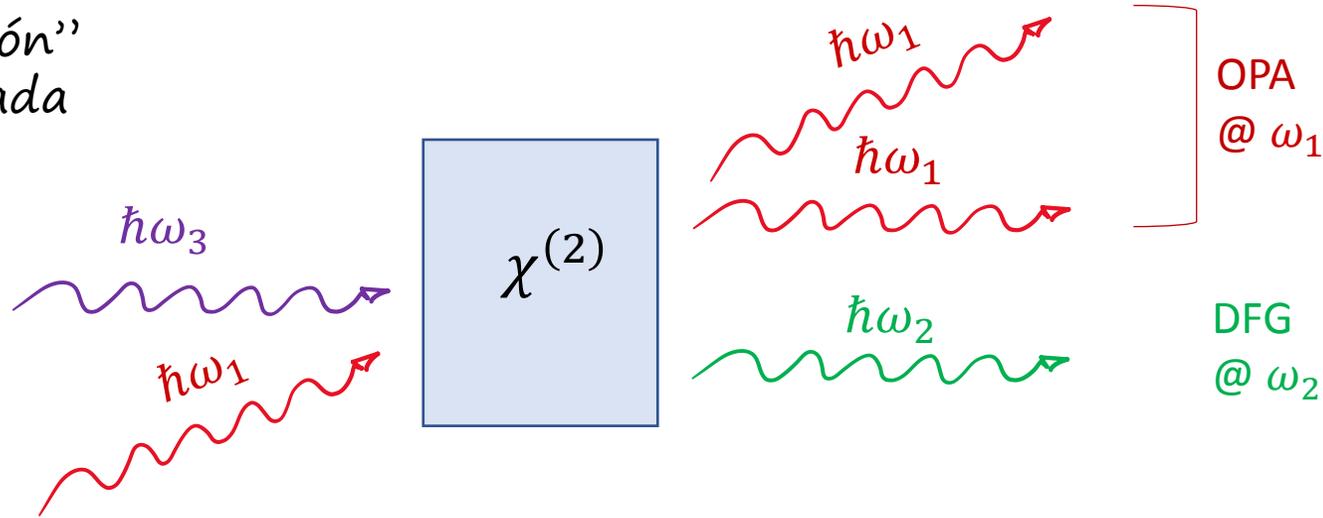
Si  $\omega_1 = \omega_2$  SHG

Fluorescencia paramétrica - DFG -  
down conversion



# Procesos de $\chi^{(2)}$ mezcla de 3 ondas

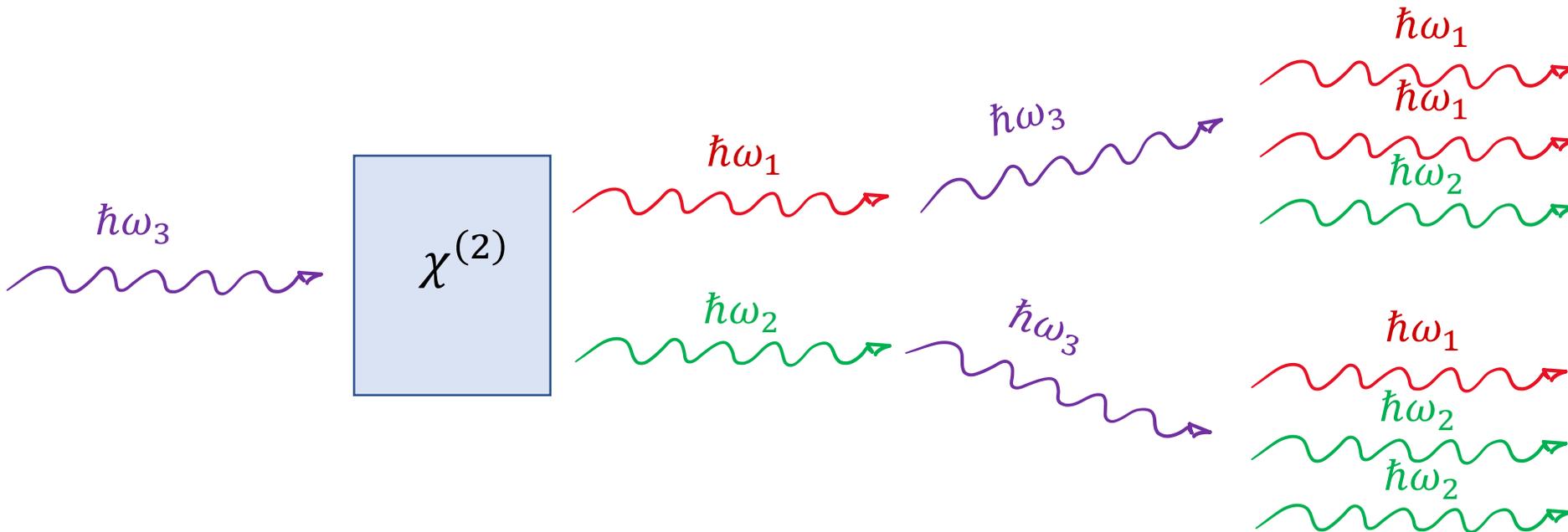
c) "separación" estimulada



diferencia de frecuencias (DFG)

Amplificación óptica paramétrica (OPA)

d) Cascada de separación espontánea y estimulada

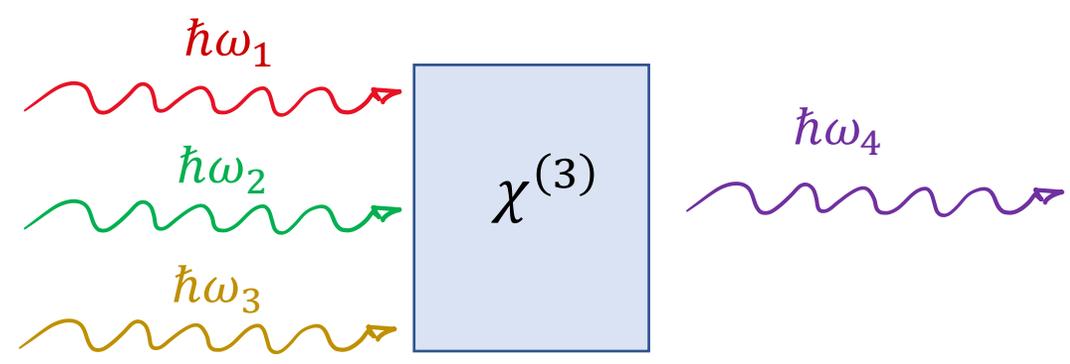


Generación óptica paramétrica (OPG)

y cuando el proceso es resonante en  $\omega_1$  u  $\omega_2$   
Oscilación óptica paramétrica (OPO)

# Procesos de $\chi^{(3)}$ mezcla de 4 ondas

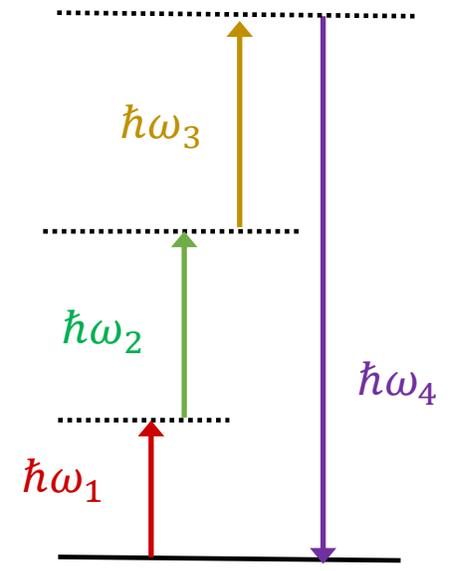
a) "fusion"



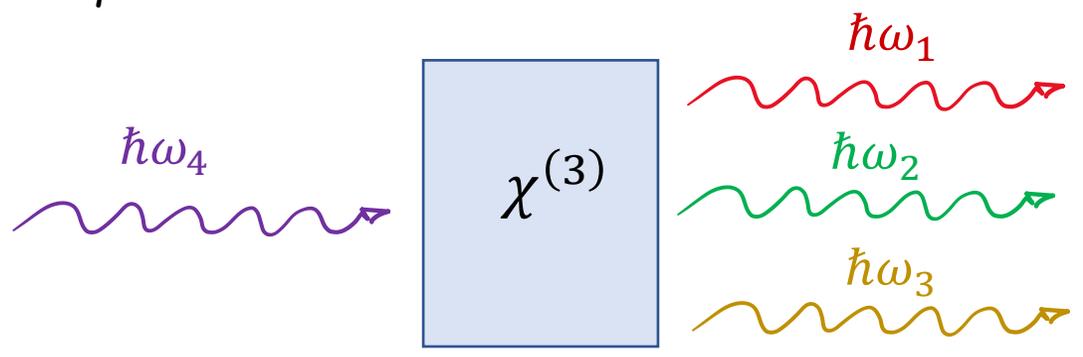
$$\hbar\omega_1 + \hbar\omega_2 + \hbar\omega_3 = \hbar\omega_4$$

Si  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3$  THG

Suma de frecuencias – up conversion

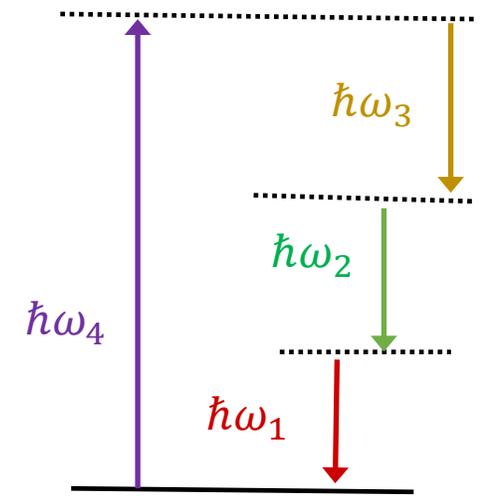


b) "separación" espontánea  
splitting



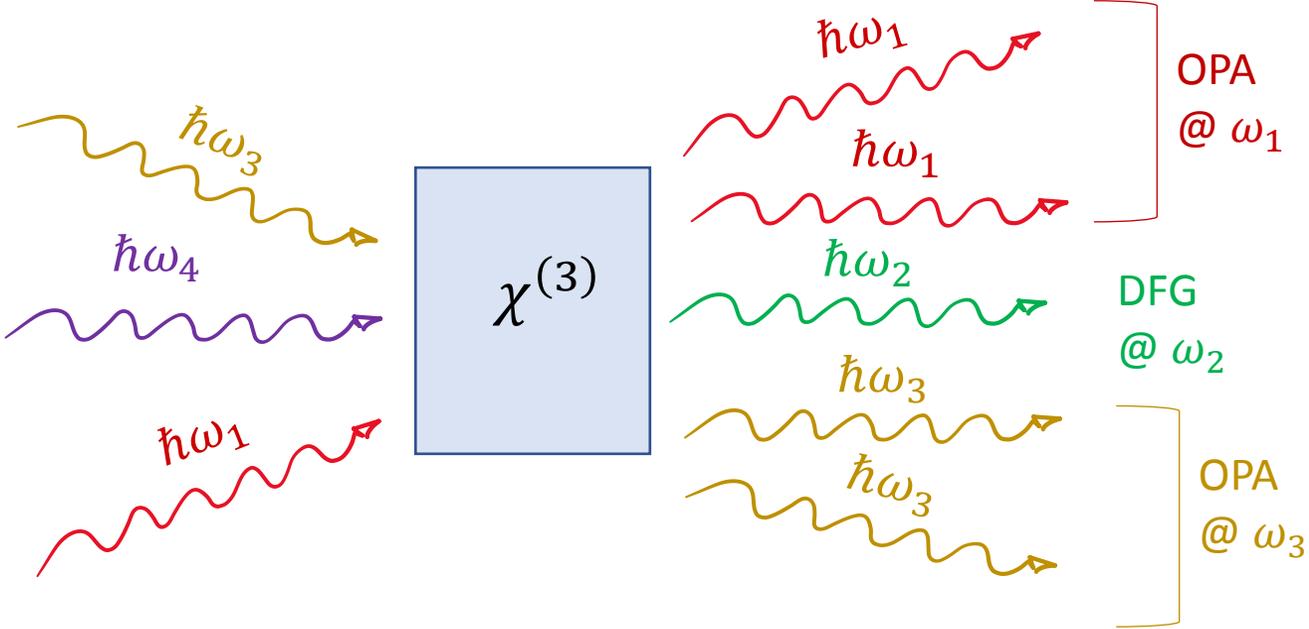
Estados entrelazados de 3 fotones, con características muy distintas a los estados de 2 fotones (Rajas et al, PRL 120, 043601, 2018)

DFG – down conversion



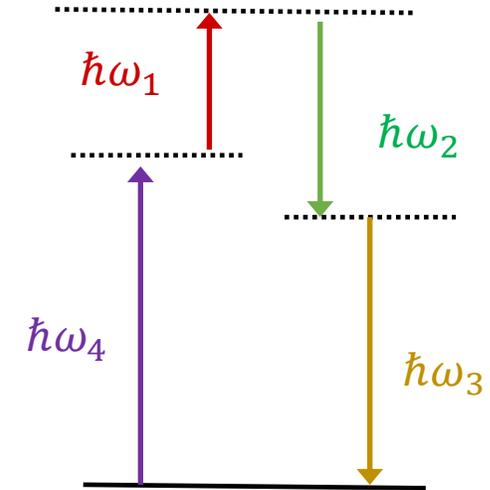
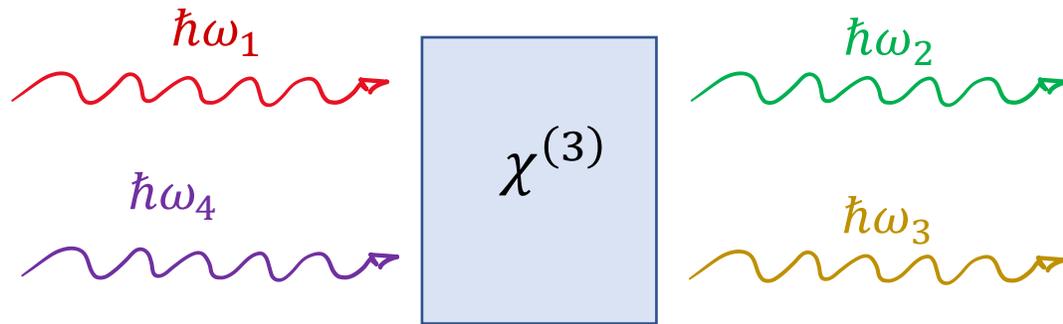
# Procesos de $\chi^{(3)}$ mezcla de 4 ondas

c) "separación" estimulada



# Procesos de $\chi^{(3)}$ mezcla de 4 ondas

d) fusión/separación. Mezclado de 4 ondas



Ahora la conservación de la energía es

$$\hbar\omega_1 + \hbar\omega_4 = \hbar\omega_2 + \hbar\omega_3$$

Y la conservación del momento

$$\hbar k_1 + \hbar k_4 = \hbar k_2 + \hbar k_3$$

si  $\omega_1 = \omega_2 = \omega_3 = \omega_4$

Si domina  $\text{Re } \chi^{(3)} \Rightarrow$  efecto Kerr

Si domina  $\text{Im } \chi^{(3)} \Rightarrow$  absorción de 2 fotones

## Unidades /notación

Momento dipolar  
por unidad de  
volumen  
Polarización  $P$

$$P = \chi^{(1)}E + \chi^{(2)}E^2 + \chi^{(3)}E^3 + \dots$$

gaussiano

$$P = \epsilon_0 \chi^{(1)}E + \epsilon_0 \chi^{(2)}E^2 + \epsilon_0 \chi^{(3)}E^3 + \dots$$

MKS

A lo largo del curso vamos a usar MKS, pero hay que estar atentos porque los distintos libros usan uno u otro. Conviene encontrar las equivalencias.

Las ecuaciones de arriba las puedo escribir así:

$$P(t) = \chi^{(1)}E(t) \cdot \left[ 1 + \frac{\chi^{(2)}}{\chi^{(1)}}E(t) + \frac{\chi^{(3)}}{\chi^{(1)}}E^2(t) + \dots \right]$$

En gaussiano todos los campos tienen la misma unidad, statVolt/cm.  $E, D, B, H, M, P$ . Entonces  $\chi^{(1)}$  es adimensional

$$P(t) = \epsilon_0 \chi^{(1)}E(t) \cdot \left[ 1 + \frac{\chi^{(2)}}{\chi^{(1)}}E(t) + \frac{\chi^{(3)}}{\chi^{(1)}}E^2(t) + \dots \right]$$

Las cantidades entre corchetes son adimensionales y deben valer lo mismo en ambos sistemas de unidades

1 statvolt = 300V entonces

$E(\text{MKS}) = 3 \cdot 10^4 E(\text{gauss})$

En gaussiano

$$[E]=[P]= \text{statvolt/cm}$$

$$[\chi^{(1)}] \text{ adimensional}$$

$$[\chi^{(2)}] = [1/E] = \text{cm/statvolt}$$

$$[\chi^{(3)}] = [1/E^2] = \text{cm}^2/\text{statvolt}^2$$

En MKS

$$\epsilon_0 = 8.85 \cdot 10^{-12} \text{ F/m}$$

$$[E]=\text{V/m y como } F=C/V \text{ entonces } [P]=C/m^2$$

$$[\chi^{(1)}] \text{ adimensional}$$

$$[\chi^{(2)}] = [1/E] = \text{m/V}$$

$$[\chi^{(3)}] = [1/E^2] = \text{m}^2/\text{V}^2$$

$$\bar{D} = \bar{E} + 4\pi\bar{P} = \bar{E}(1 + 4\pi\chi^{(1)}) \text{ gaussiano; } \bar{D} = \epsilon_0 E + \bar{P} = \epsilon_0 \bar{E}(1 + \chi^{(1)}) \text{ en MKS} \Rightarrow 4\pi\chi_g^{(1)} = \chi_{MKS}^{(1)}$$

Asumiendo que los corchetes en la diapo anterior son iguales

$$\frac{\chi_g^{(2)}}{\chi_g^{(1)}} E_g = \frac{\chi_{MKS}^{(2)}}{\chi_{MKS}^{(1)}} E_{MKS} \Rightarrow \frac{\chi_g^{(2)}}{\chi_{MKS}^{(2)}} = \frac{4\pi}{3 \cdot 10^4}$$

análogamente

$$\frac{\chi_g^{(3)}}{\chi_{MKS}^{(3)}} = \frac{4\pi}{(3 \cdot 10^4)^2}$$

Conclusion, ojo con las unidades que nos podemos equivocar por órdenes de magnitud

## Notación

Las notaciones en los diferentes libros son variadas

Acá vamos a usar  $\bar{E}, \bar{P}$  para los vectores (algunos usan negritas)

No tenemos notación diferenciada entre reales e imaginarios (Powers)

No tenemos notación diferenciada entre cantidades lenta y rápidamente variables (Boyd)

Cuando sea necesario vamos a eliminar dependencias explícitas