

Aplicaciones extremas de óptica no lineal

del conteo de fotones a los TeraWatt sobre la mesa

Miguel Larotonda – DEILAP (CITEDEF-CONICET)

Aplicaciones extremas de óptica no lineal

Ecuación de onda para el campo eléctrico.....

$$\nabla^2 \mathbf{E} - \frac{1}{c_0} \frac{\partial^2 \mathbf{E}}{\partial t^2} = \mu_0 \frac{\partial^2 \mathbf{P}}{\partial t^2}$$



Polarización del medio: término de fuente

... lineal

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E}$$

Óptica lineal

... no lineal

$$\mathbf{P} = \varepsilon_0 \chi \mathbf{E} + 2d \mathbf{E}^2 + 4\chi^{(3)} \mathbf{E}^3 + \dots$$

Óptica no lineal
(es sólo una expansión, simplifica las cuentas,
no significa que el sistema sea simple!)

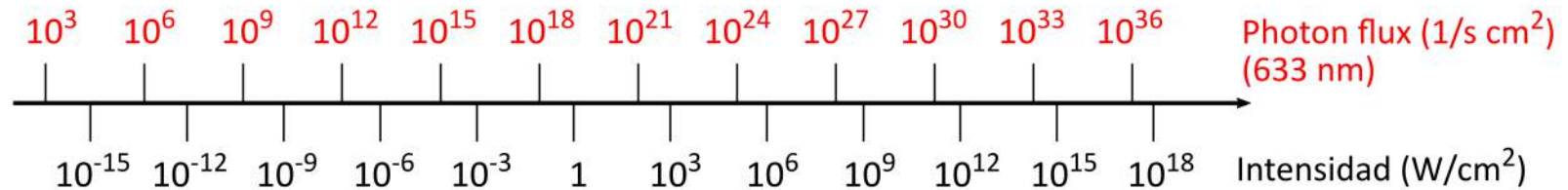
Intensidad: $I \propto |\mathbf{E}|^2$

$$[\mathbf{E}] = [V/m]$$

$$[I] = [W/cm^2]$$

Aplicaciones extremas de óptica no lineal

Algunos números de intensidad...

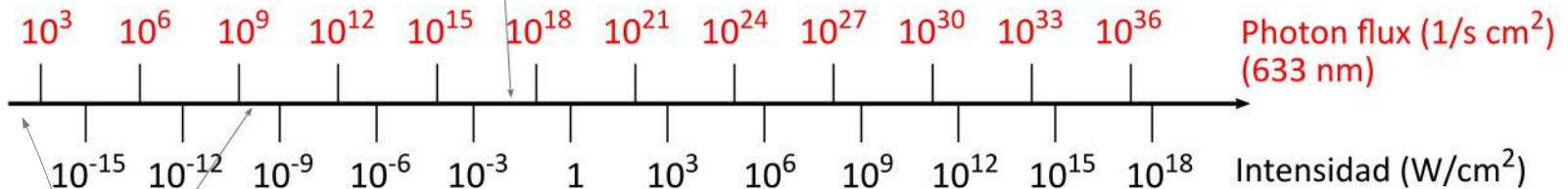


Aplicaciones extremas de óptica no lineal

Algunos números de intensidad...



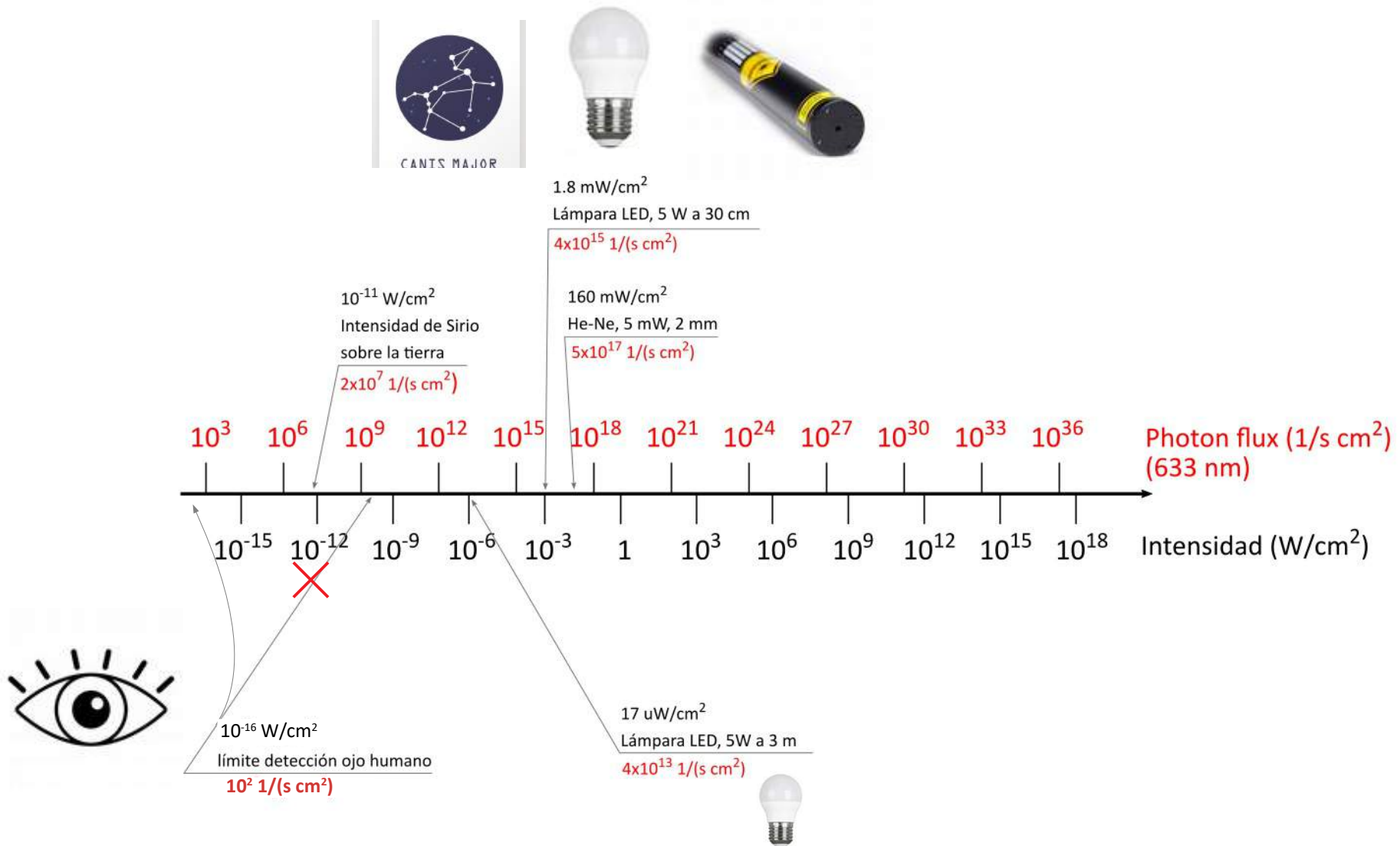
160 mW/cm²
He-Ne, 5 mW, 2 mm
 5×10^{17} 1/(s cm²)



10⁻¹⁶ W/cm²
límite detección ojo humano
 10^2 1/(s cm²)

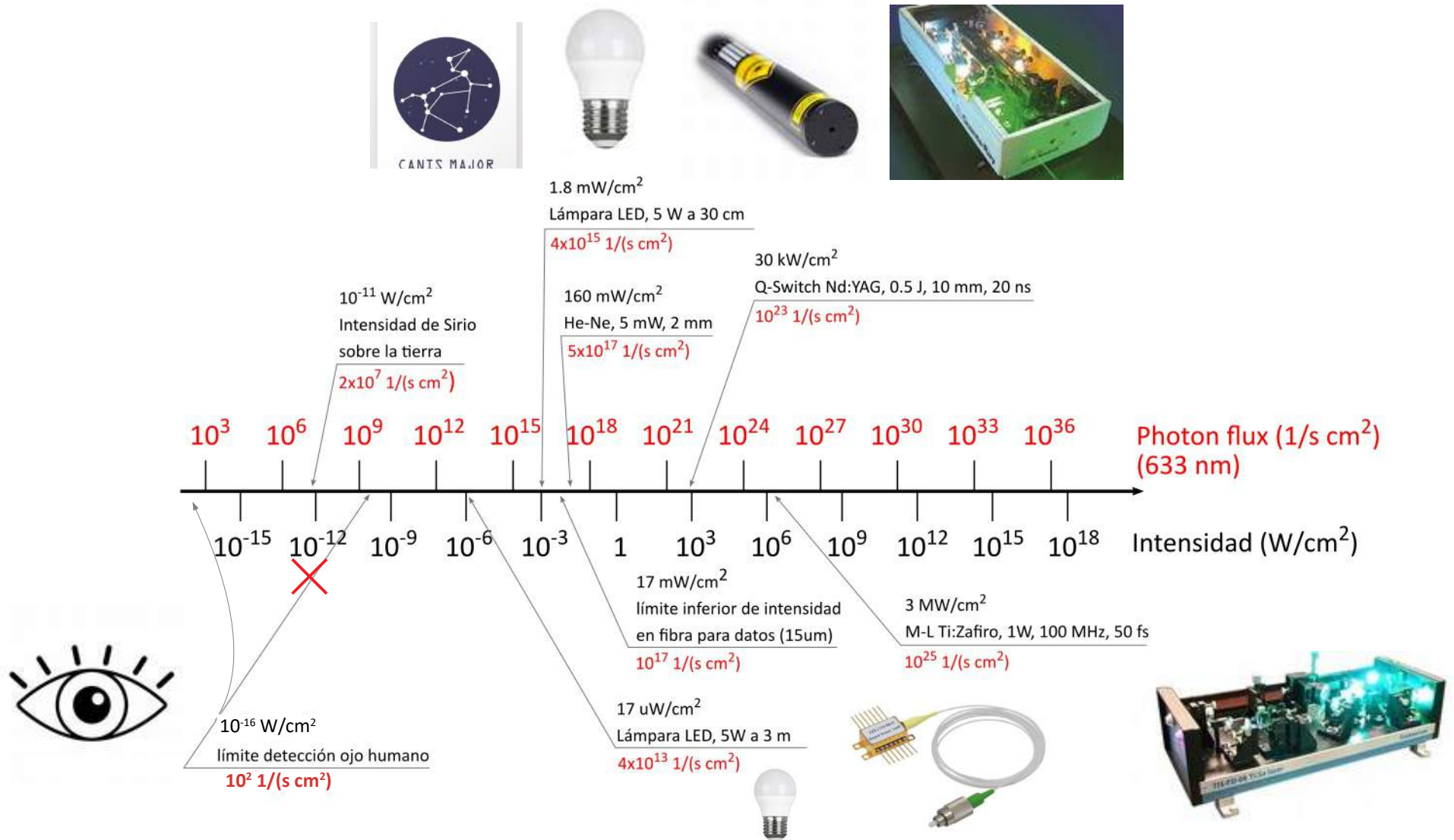
Aplicaciones extremas de óptica no lineal

Algunos números de intensidad...



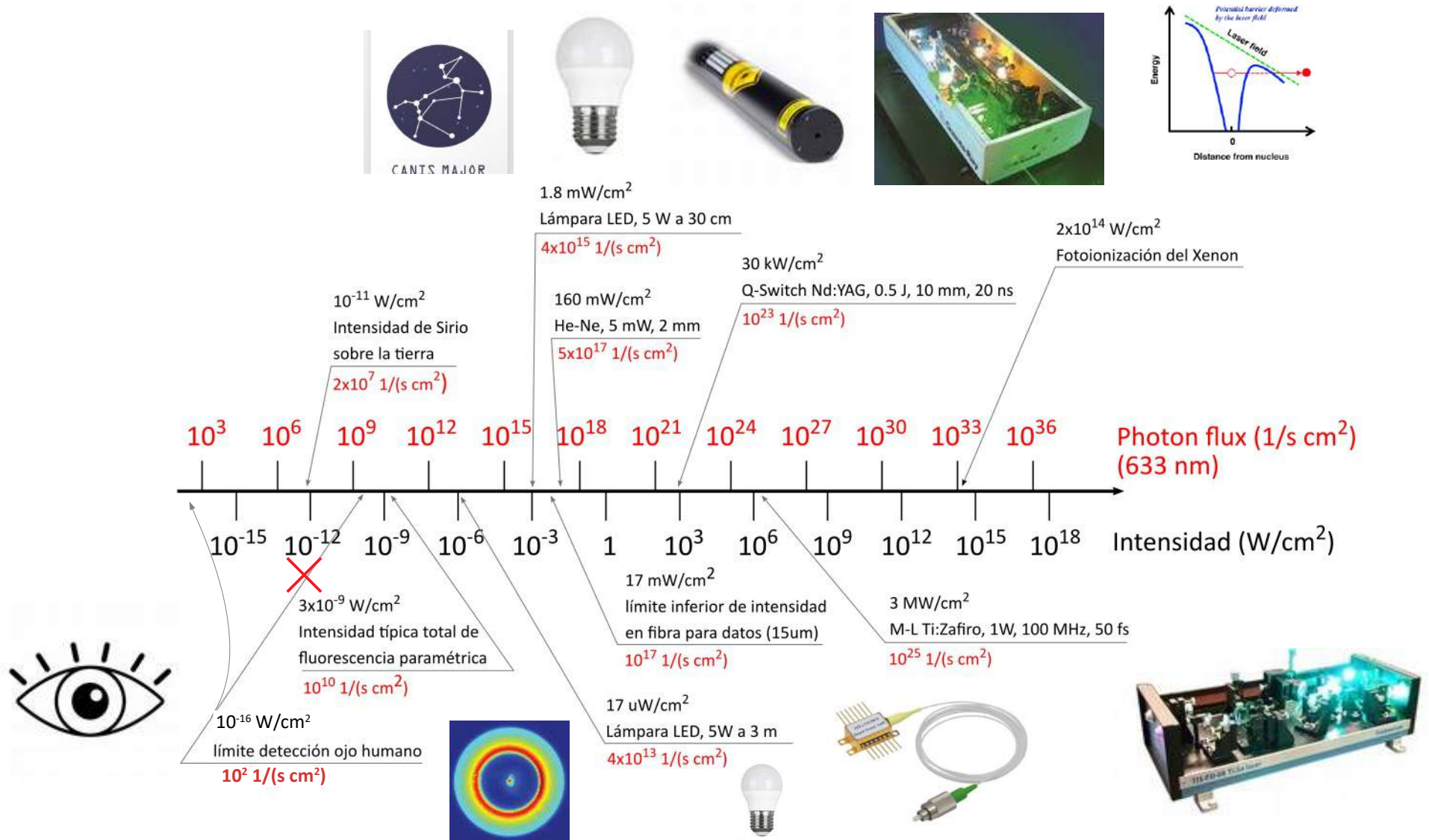
Aplicaciones extremas de óptica no lineal

Algunos números de intensidad...



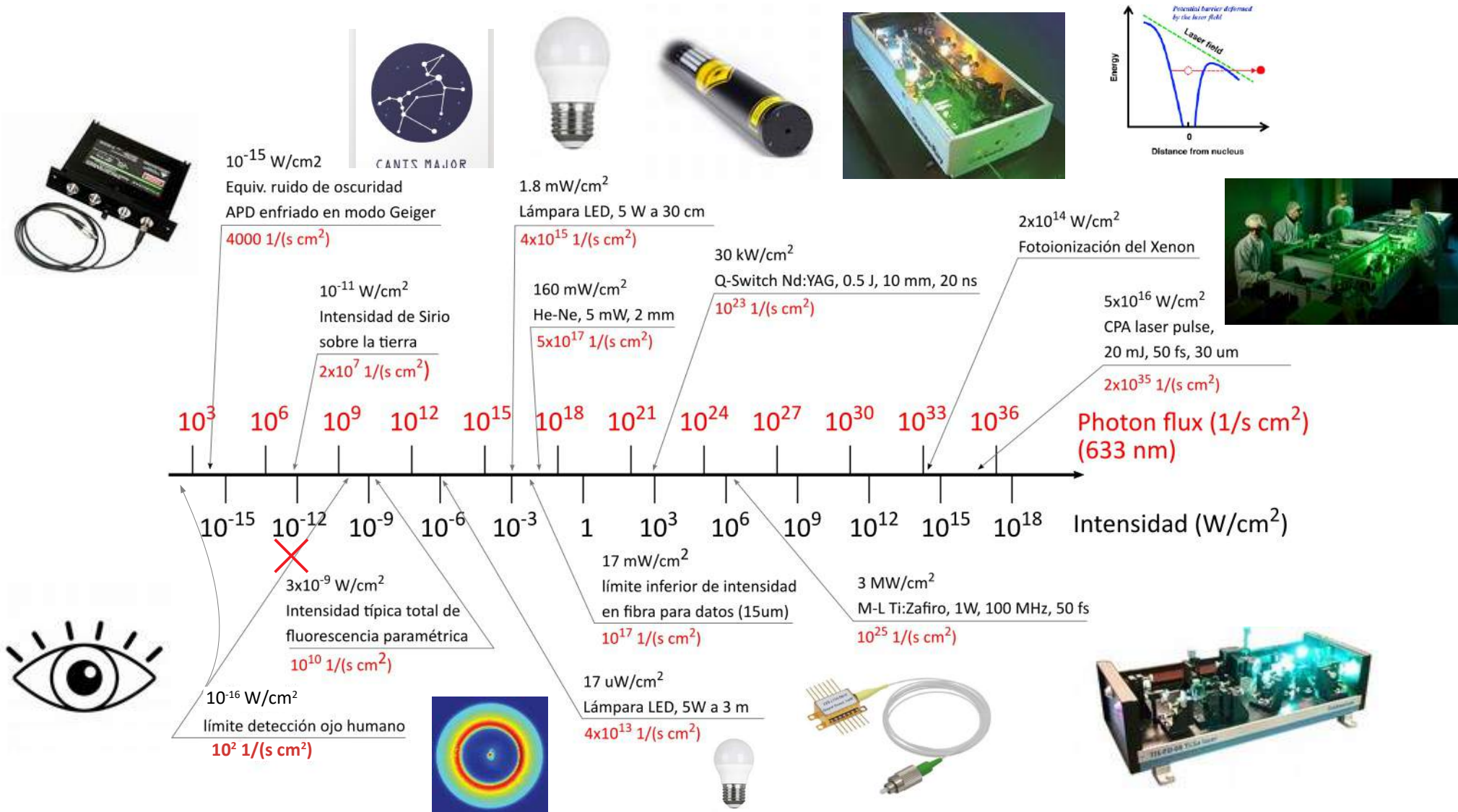
Aplicaciones extremas de óptica no lineal

Algunos números de intensidad...



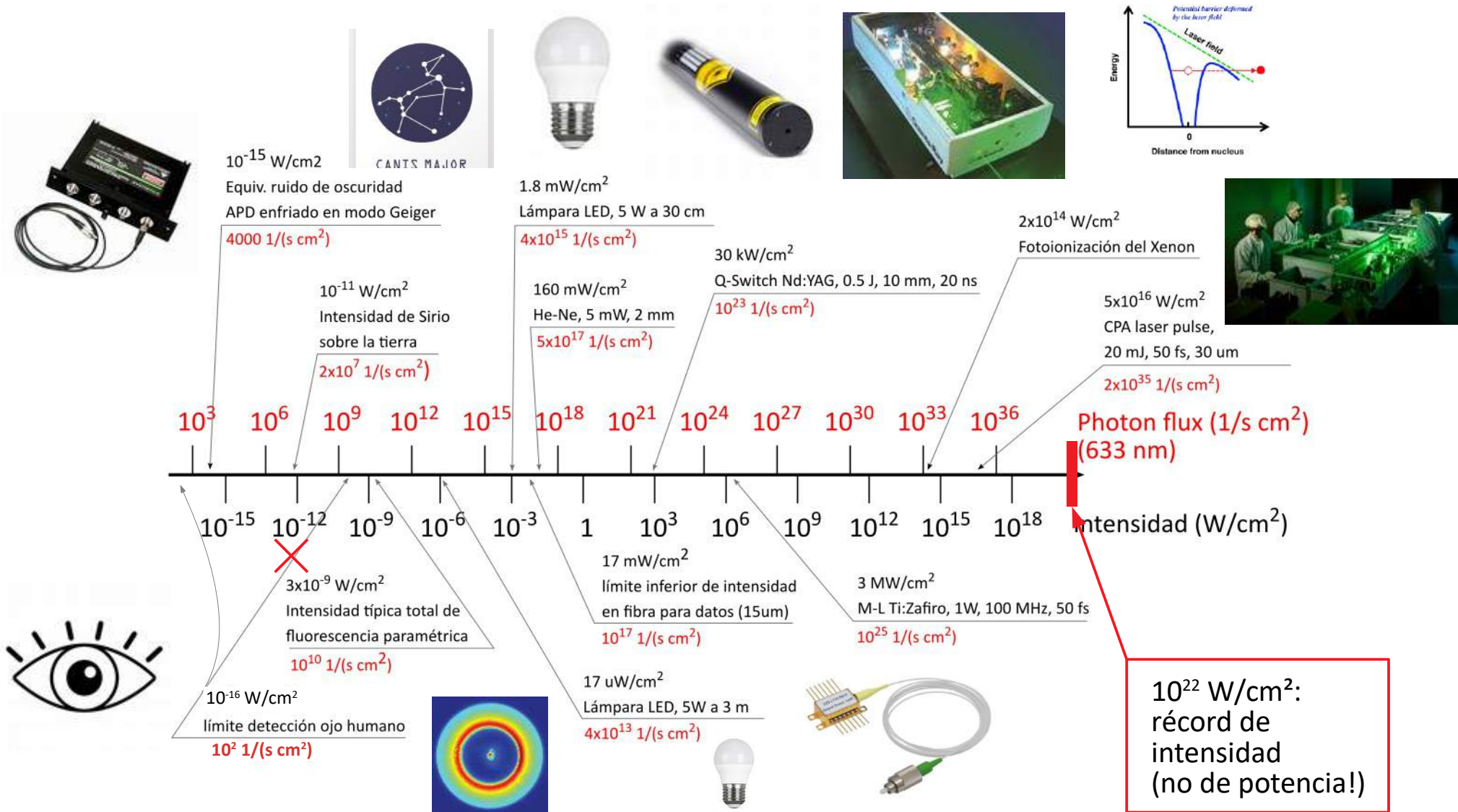
Aplicaciones extremas de óptica no lineal

Algunos números de intensidad...



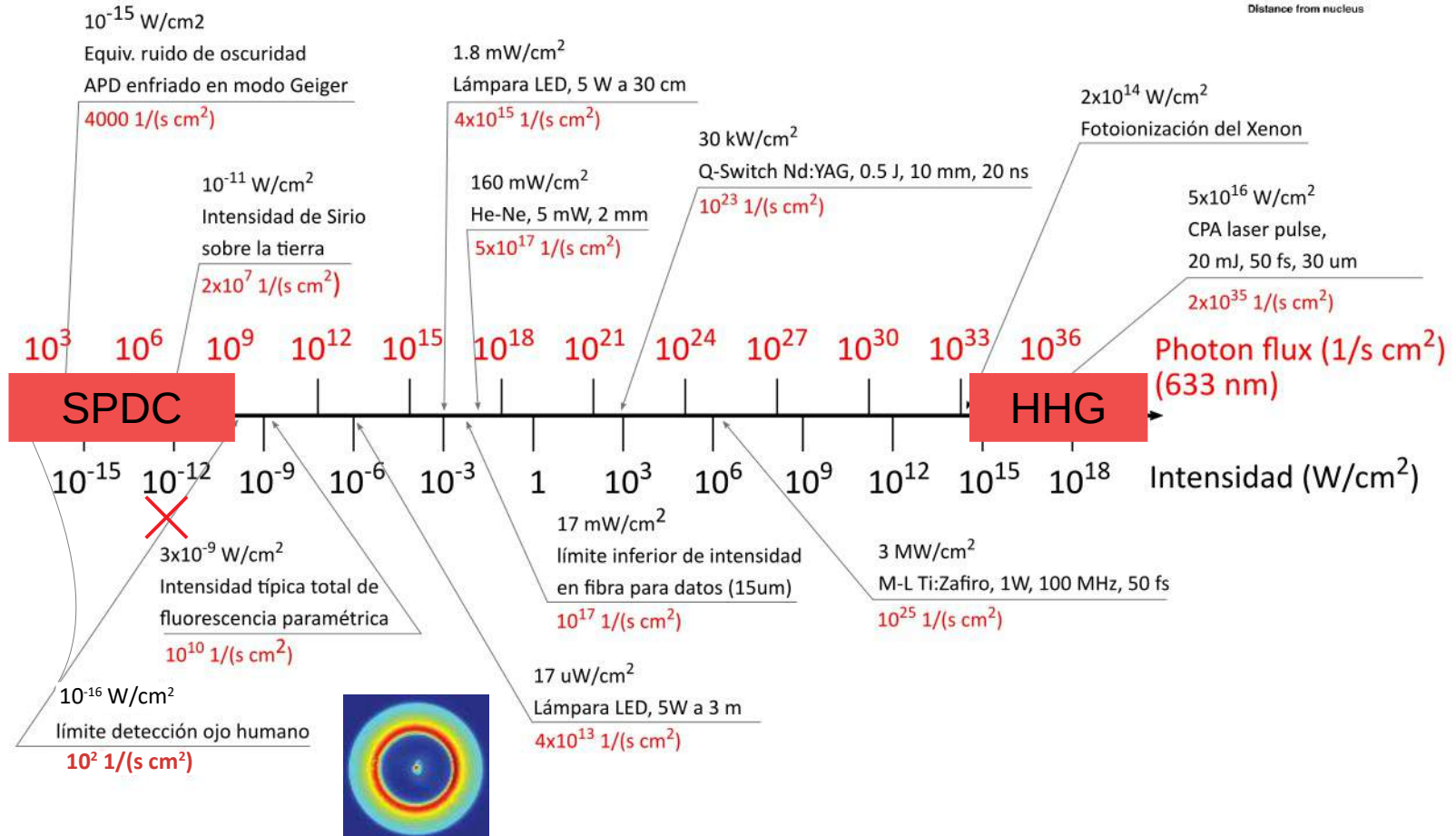
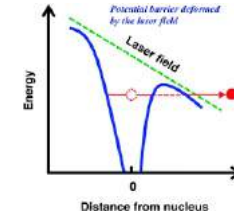
Aplicaciones extremas de óptica no lineal

Algunos números de intensidad...



Aplicaciones extremas de óptica no lineal

Algunos números de intensidad...

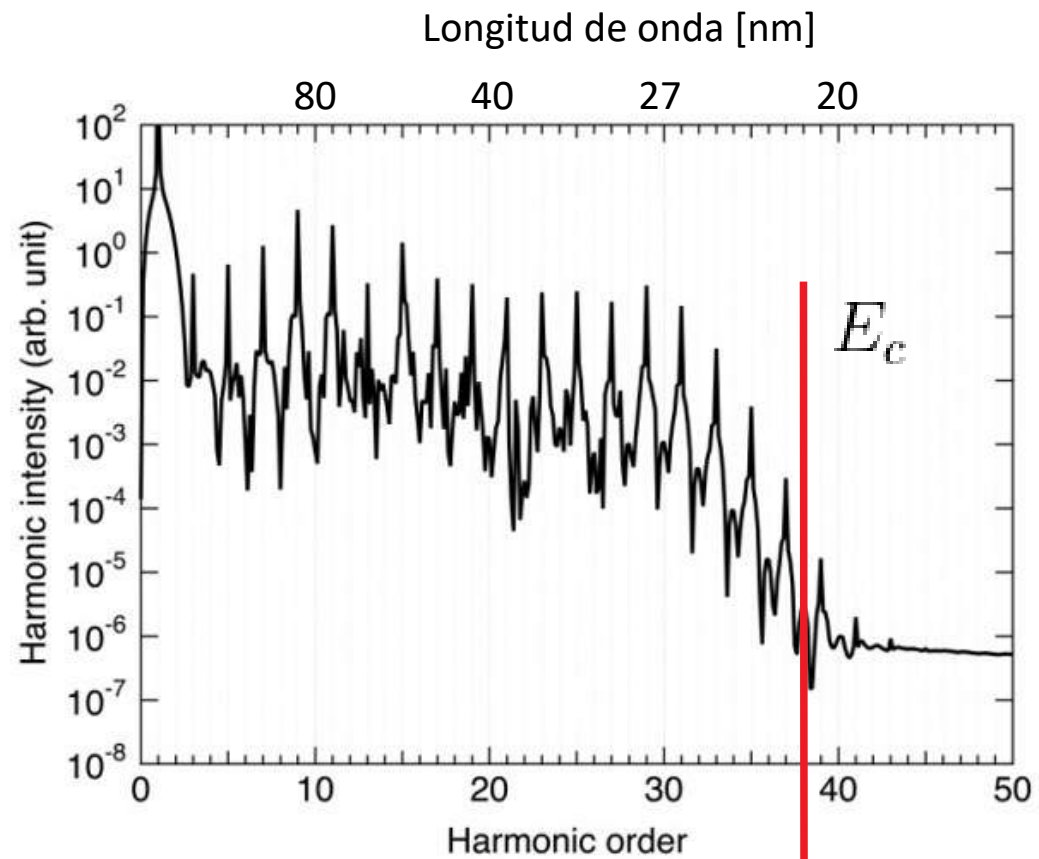
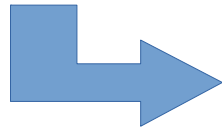


High Harmonic Generation

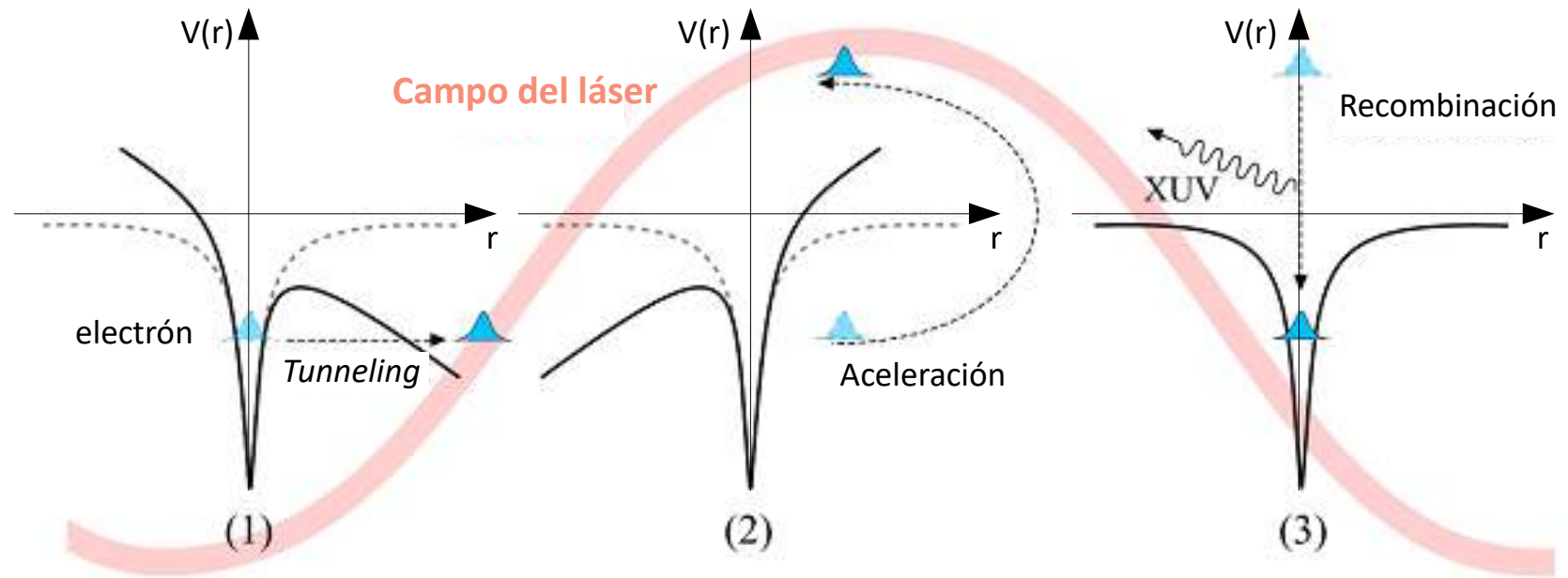
Emisión de armónicos de orden 20 o más, a partir de la interacción de un pulso intenso de luz sobre un blanco (gas, sólido, plasma)

Harmonic generation in CO₂ laser target interaction. Applied Physics Letters, **31**(3), 172-174 (1977).
(observaron hasta el armónico 11 (0.95 μ m))

HHG con pulsos de ultracortos de Titanio:Zafiro (800nm)

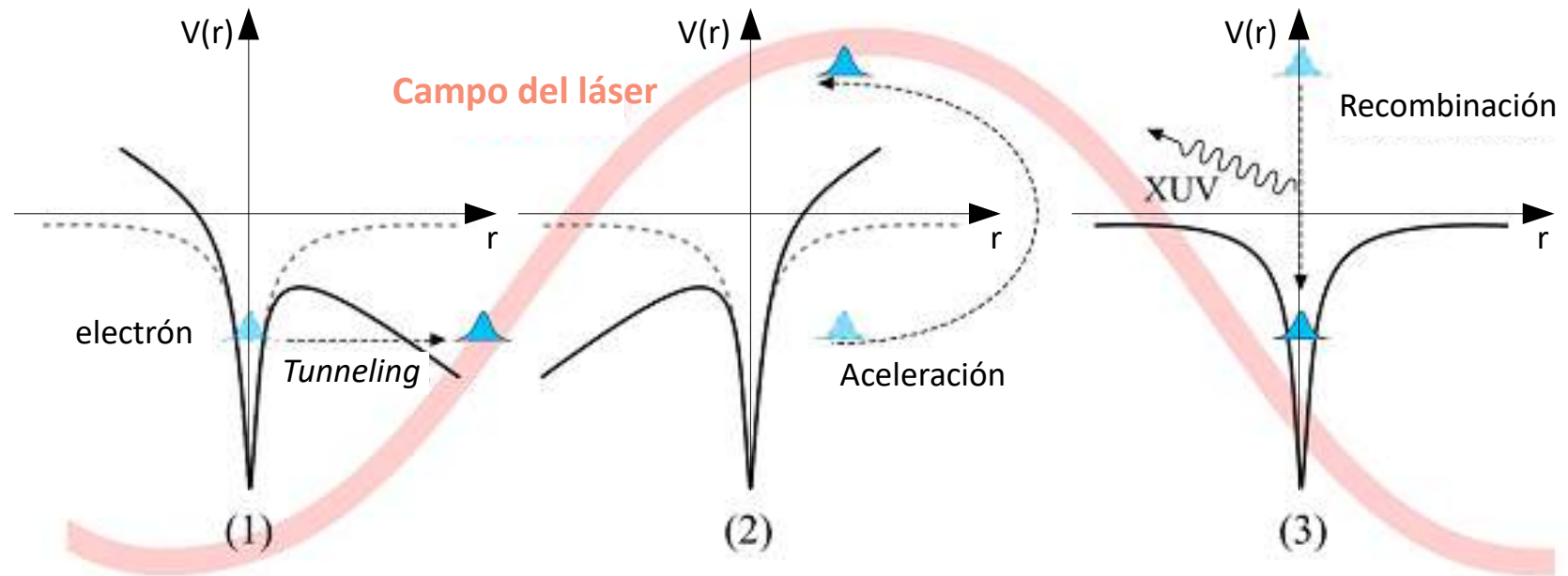


High Harmonic Generation



(1) El potencial de Coulomb de un gas atómico se deforma debido al campo del láser. Un electrón puede tunelear al estado "libre"

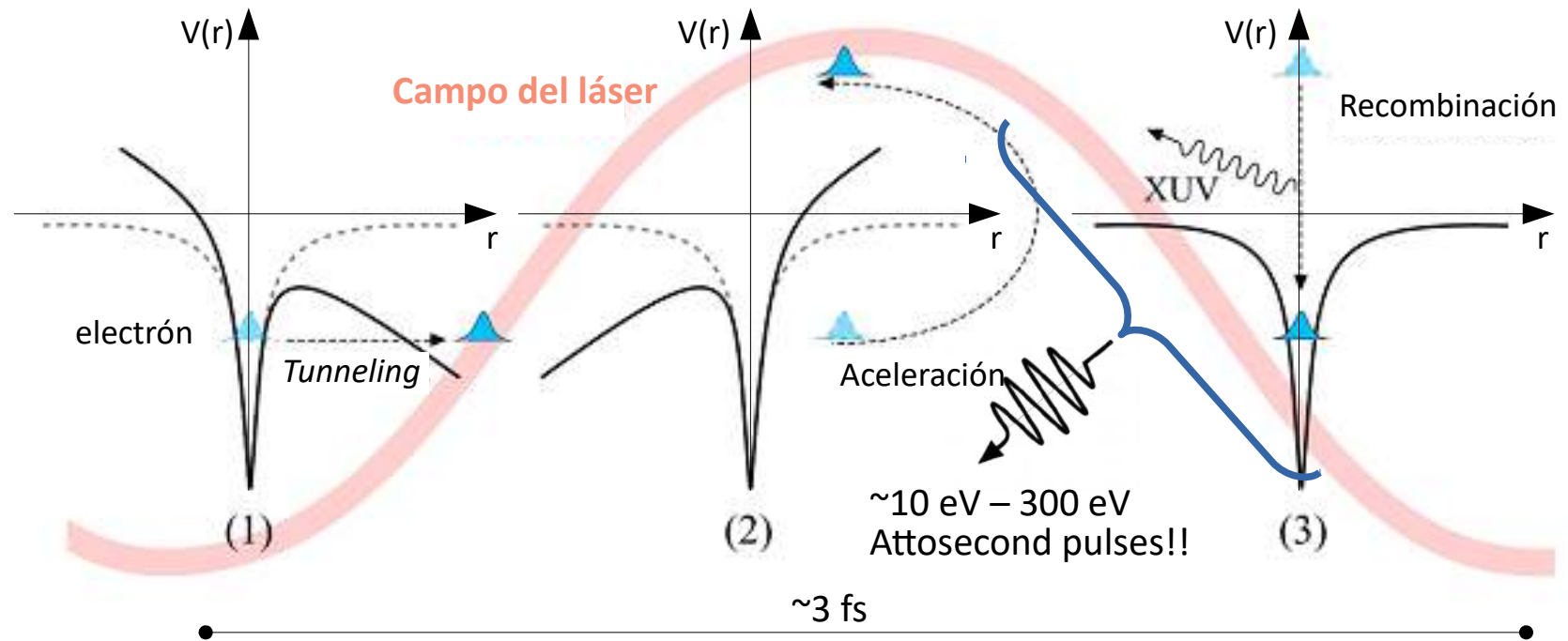
High Harmonic Generation



“siente” un campo eléctrico de entre 1 y 10 eV/Å

- (1) El potencial de Coulomb de un gas atómico se deforma debido al campo del láser. Un electrón puede tunelear al estado “libre”
- (2) El electrón se acelera, siendo repelido y atraído nuevamente por el campo eléctrico. Gana energía potencial acelerado por el campo

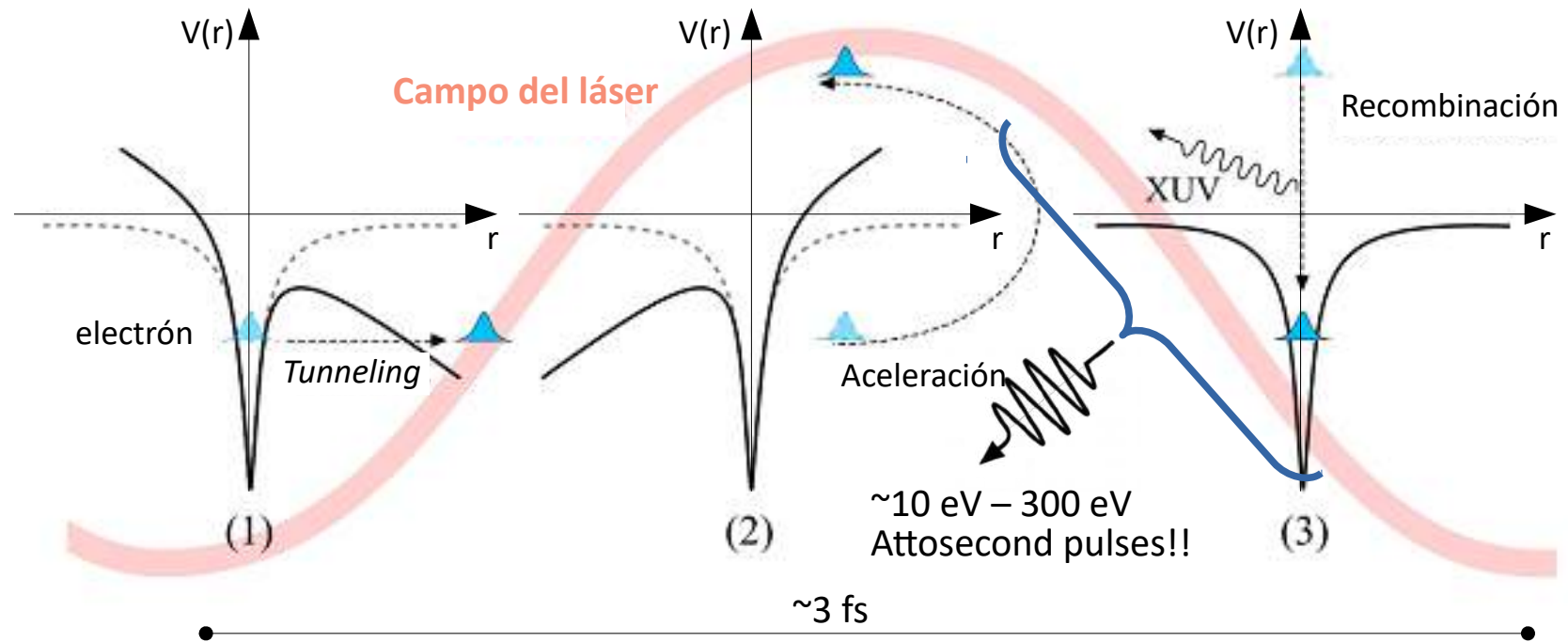
High Harmonic Generation



“siente” un campo eléctrico
de entre 1 y $10 \text{ eV/\text{Å}}$

- (1) El potencial de Coulomb de un gas atómico se deforma debido al campo del láser. Un electrón puede tunelear al estado “libre”
- (2) El electrón se acelera, siendo repelido y atraído nuevamente por el campo eléctrico. Gana energía potencial acelerado por el campo
- (3) se recombina con el átomo ionizado emitiendo radiación de muy alta energía (XUV)

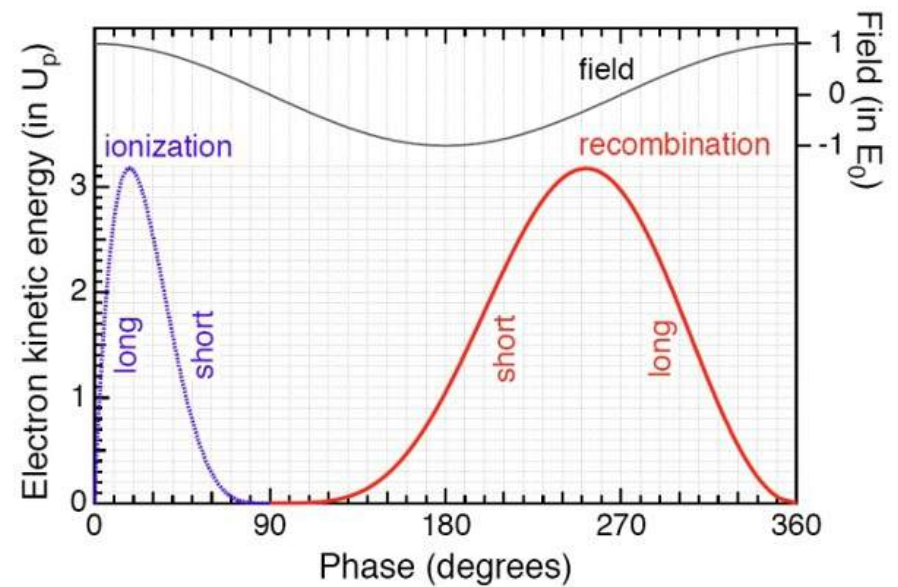
High Harmonic Generation



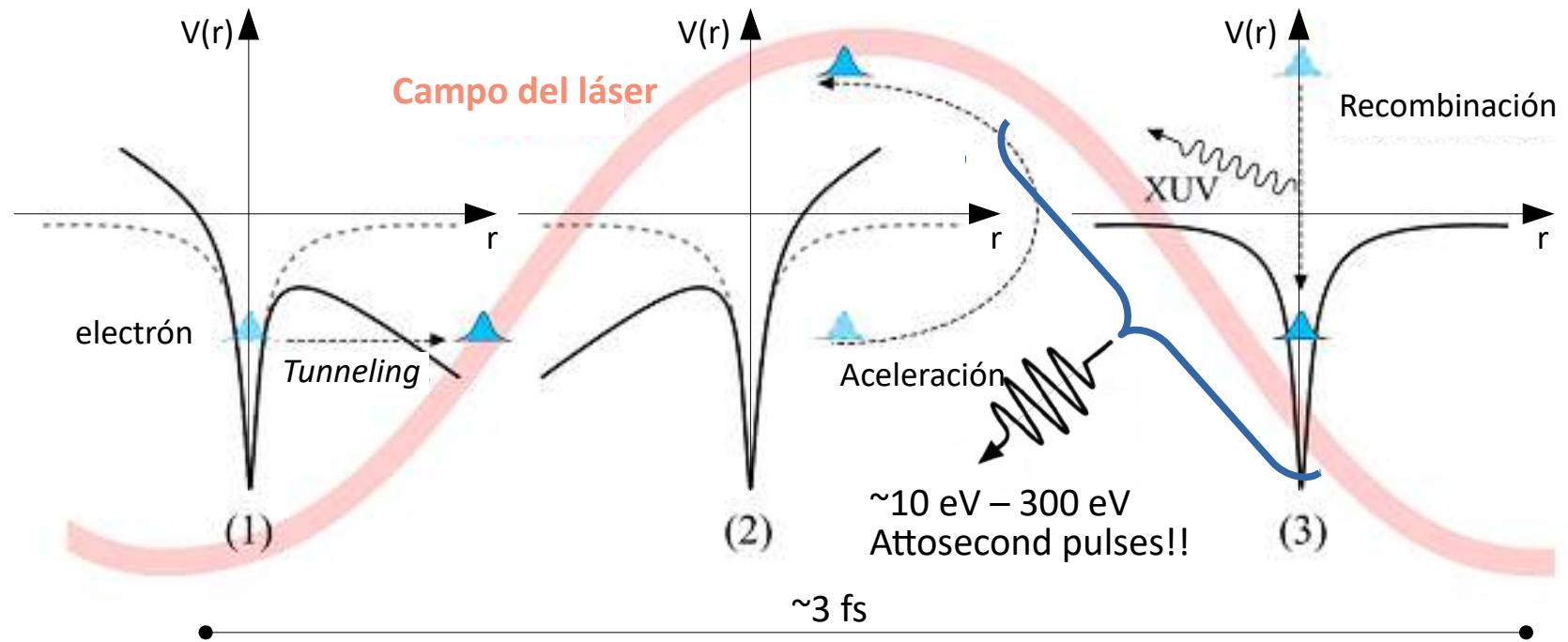
$$E_c = I_{ph} + 3.17U_p = I_{ph} + 3.17 (9.337 \times 10^{-14} \cdot I \cdot \lambda^2)$$

$$[I] = [W/cm^2]$$

$$[\lambda] = [\mu m]$$

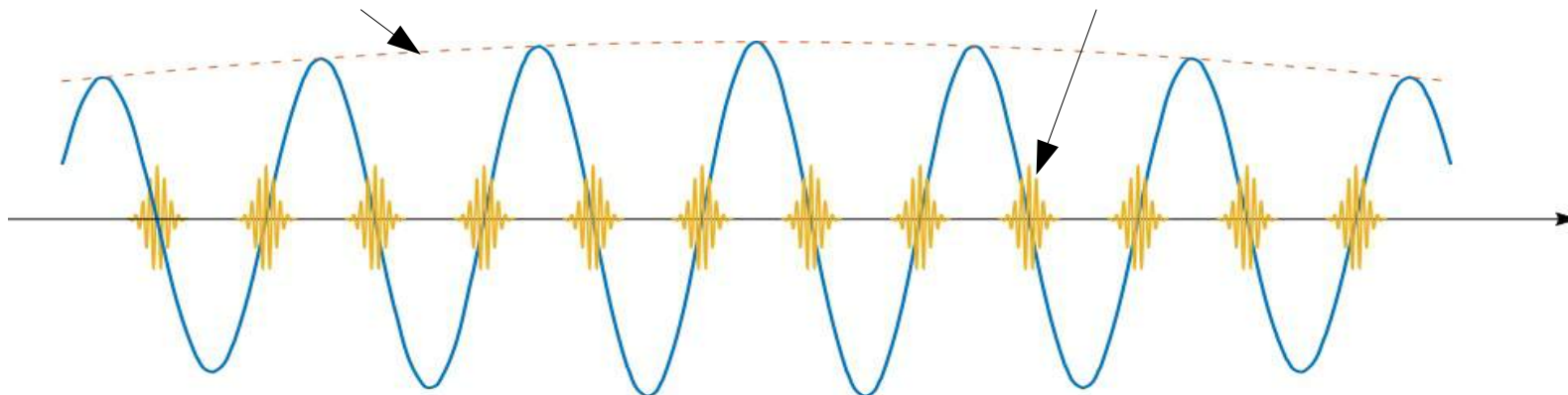


High Harmonic Generation

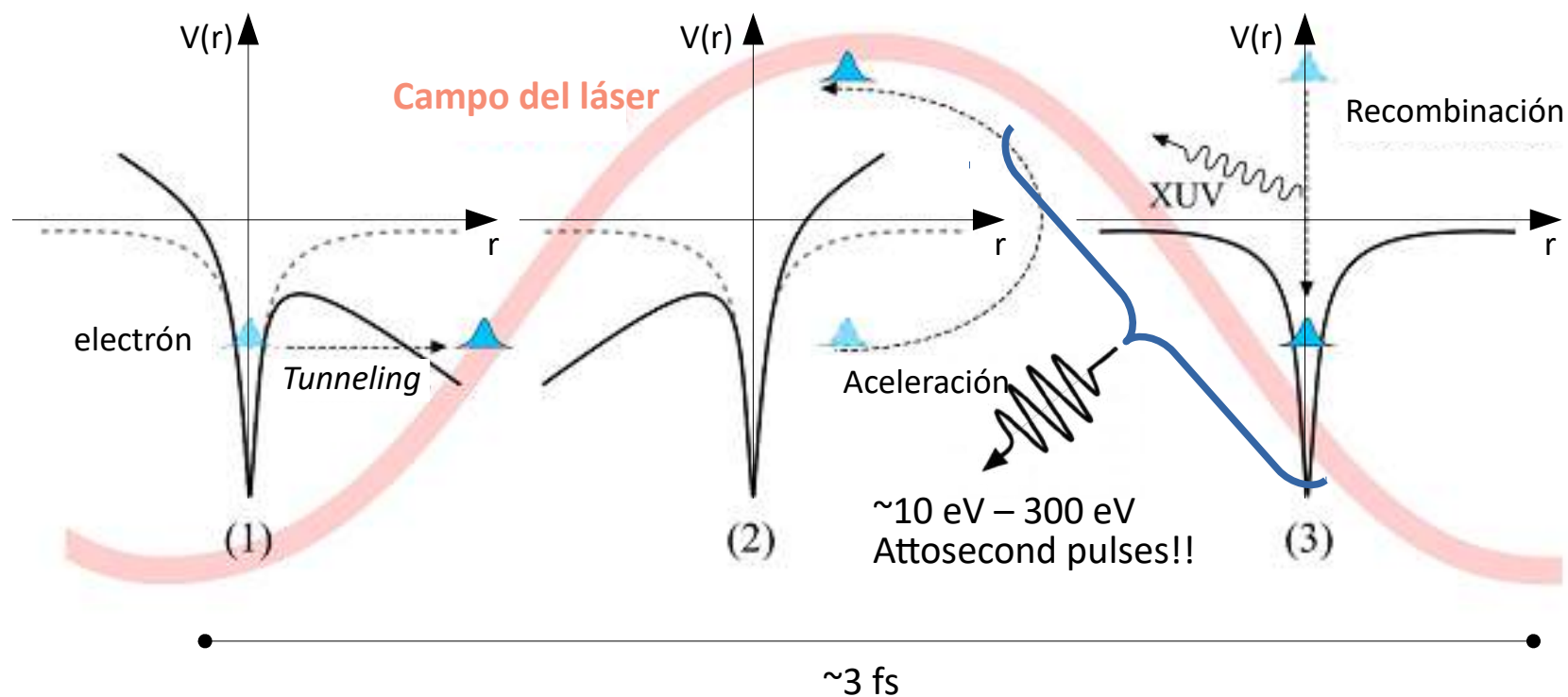


Envolvente del pulso láser

Pulsos de attosegundos

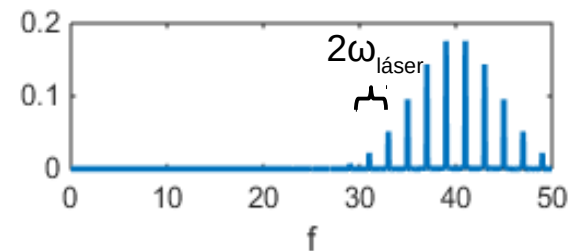
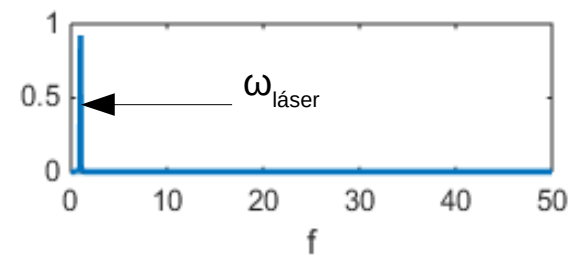
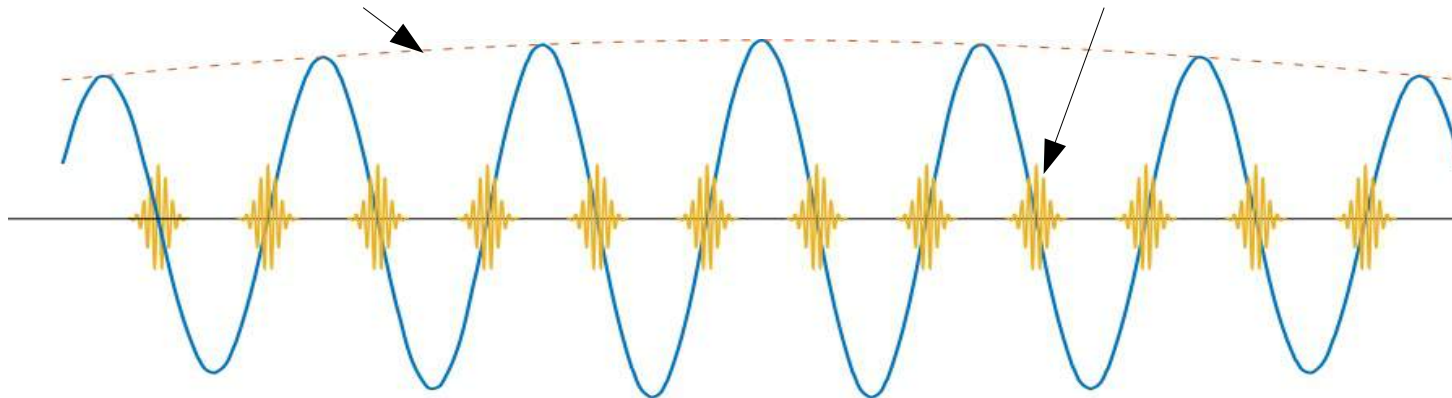


High Harmonic Generation

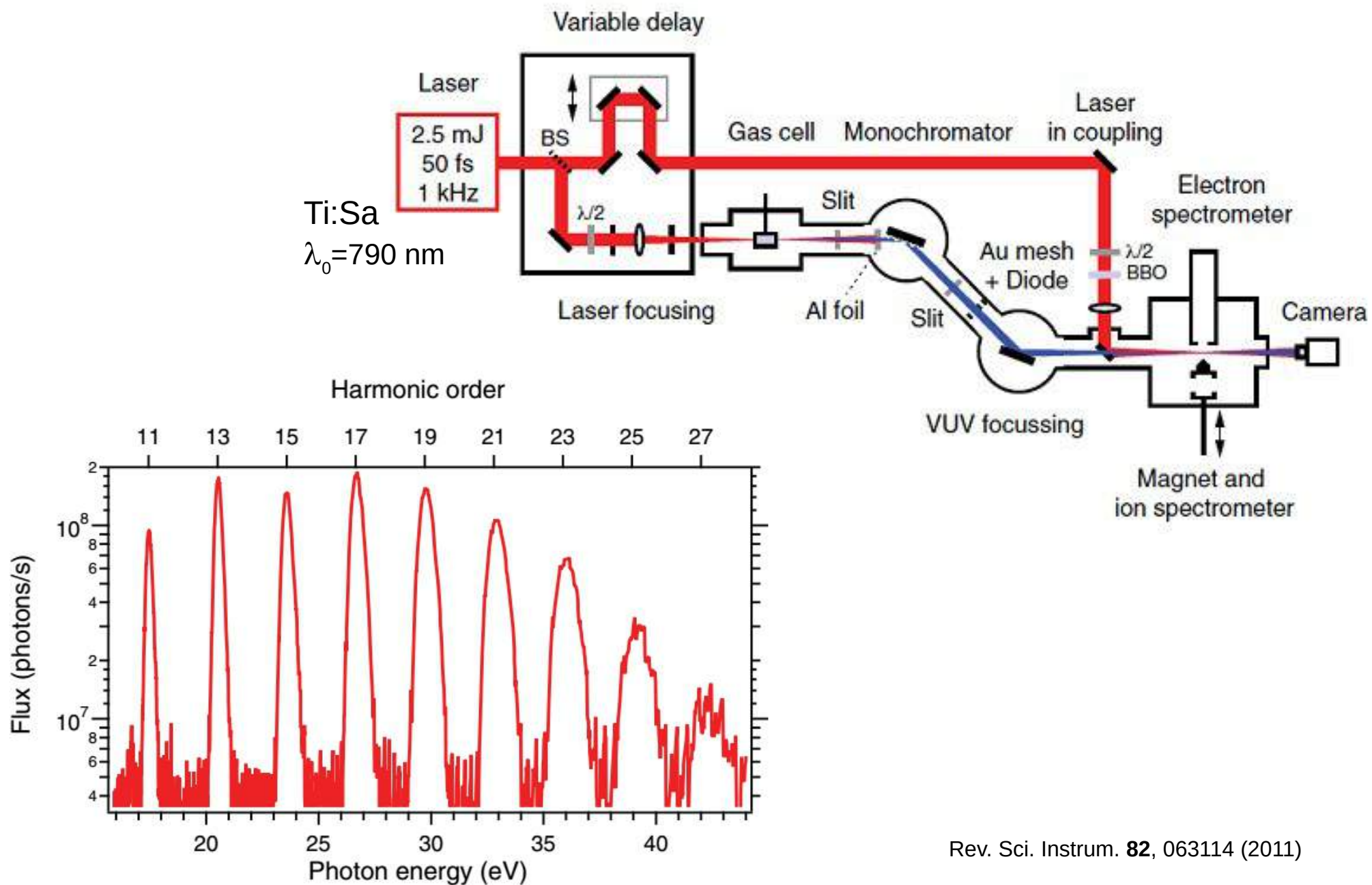


Envolvente del pulso láser

Pulsos de attosegundos



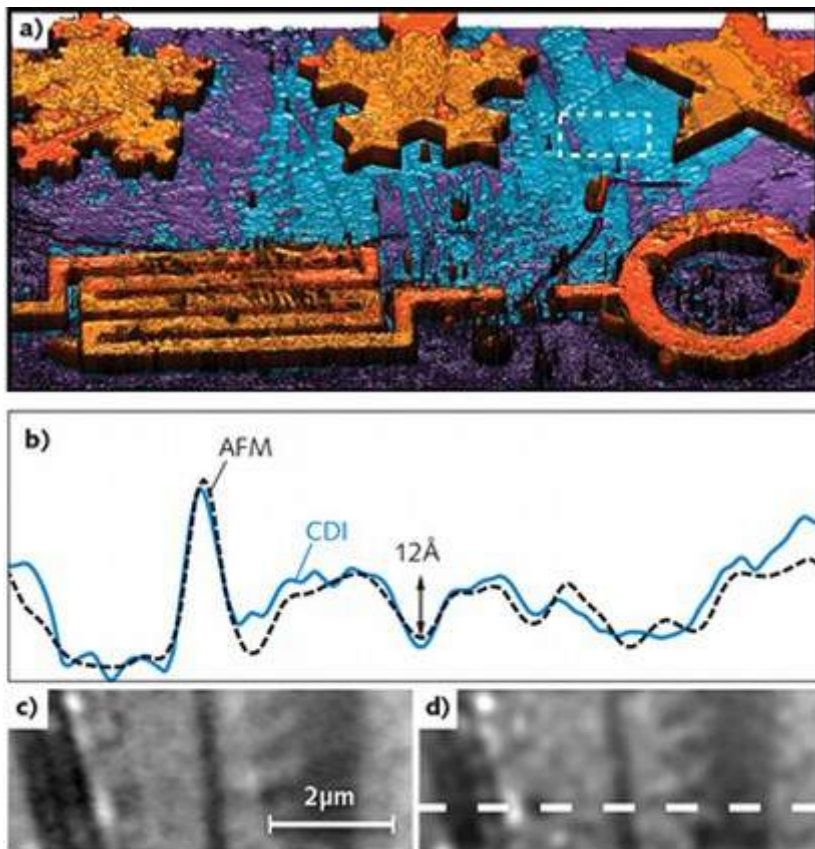
High Harmonic Generation



High Harmonic Generation

HHG + Coherent Diffraction Imaging (CDI):

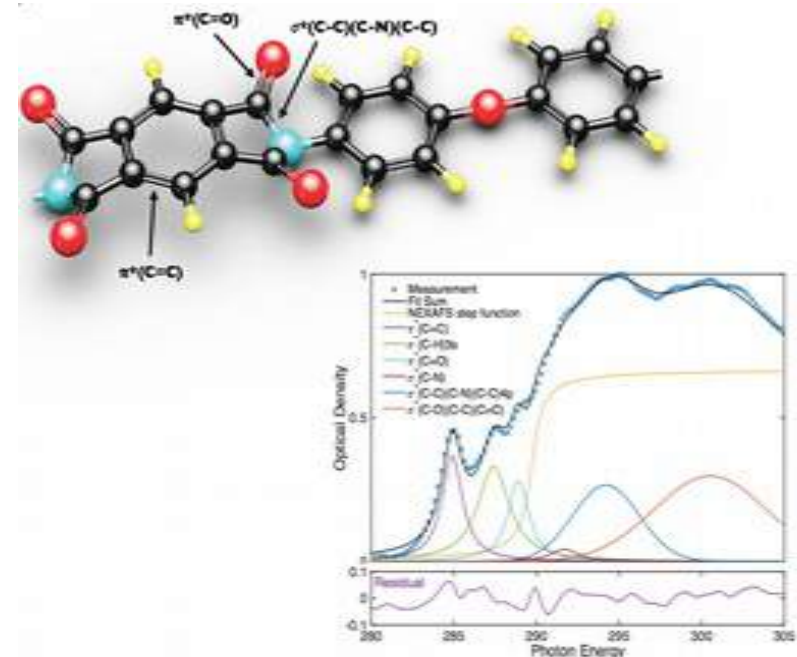
Combina formación de imágenes sin lente, resolución temporal de fs, resolución espacial 20nm. Capacidad de inspeccionar objetos opacos (energía del fotón $\sim 1.5\text{kEv}$)



T. Popmintchev et al., Science, **336**, 1287–1291 (Jun. 8, 2012)

Near-edge X-ray absorption fine structure spectroscopy (NEXAFS):

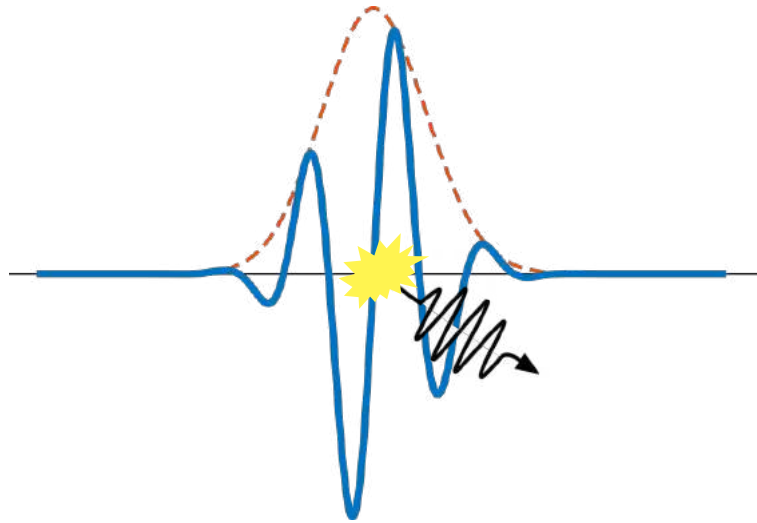
Espectroscopía de absorción. Mide la emisión de un fotoelectrón luego de que un fotón de rayos X es absorbido por uno de los niveles internos de un átomo en un sólido. Hasta ahora sólo posible en (algunos) sincrotrones y free electron lasers



K-edge del carbono en poliamida,
S. Cousin, Optics letters **39** (18), 5383-5386 (2014)

Pulsos de attosegundos

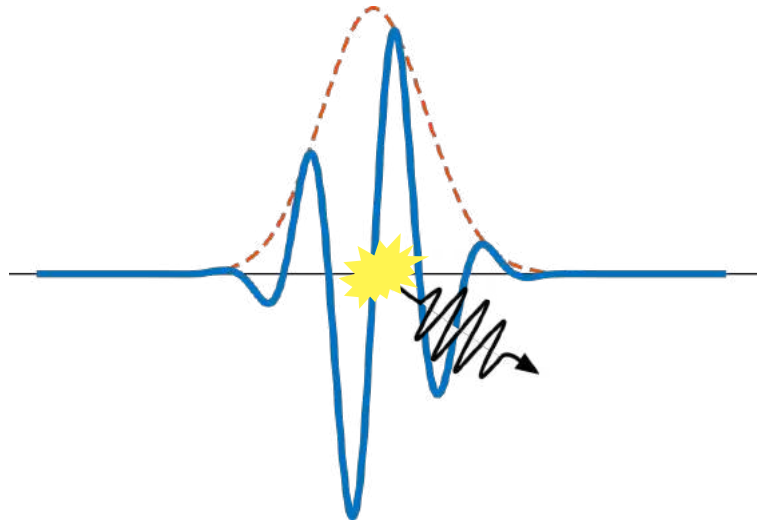
Si los pulsos del láser de bombeo (visible o infrarrojo) son MUY cortos ($<5\text{fs}$):



“SINGLE ATTOSECOND PULSE” (400 as – 80 as)

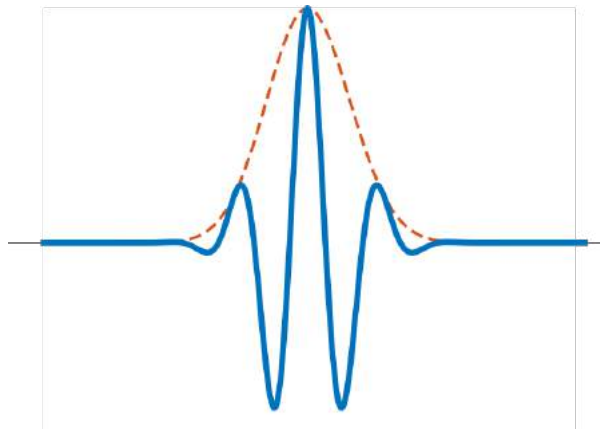
Pulsos de attosegundos

Si los pulsos del láser de bombeo (visible o infrarrojo) son MUY cortos ($<5\text{fs}$):

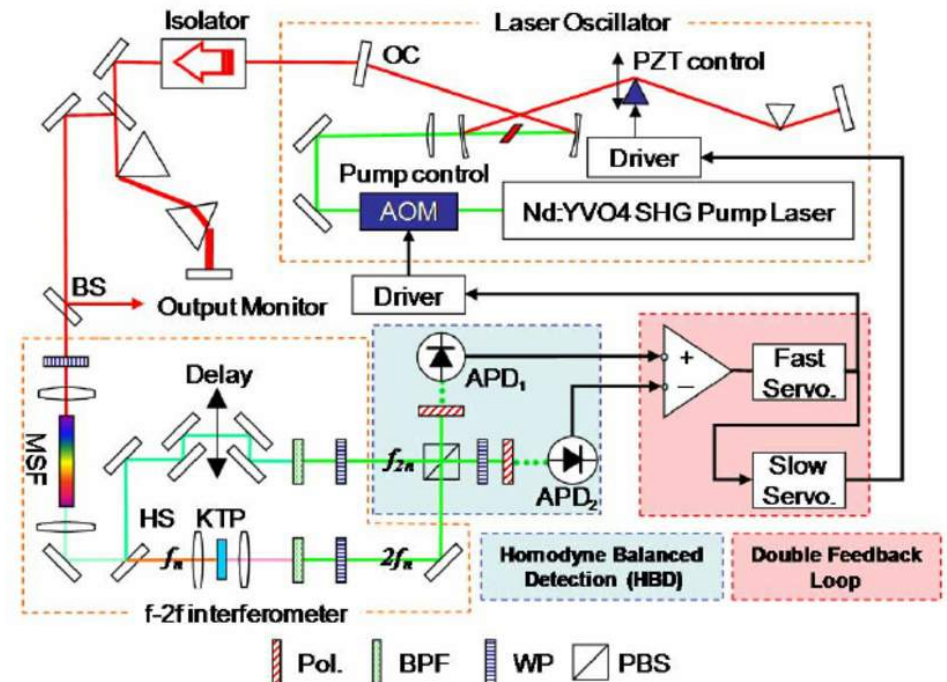


“SINGLE ATTOSECOND PULSE” (400 as – 80 as)

Pero...al desfasarse la envolvente de la portadora (v_ϕ vs v_g) pueden pasar estas cosas:

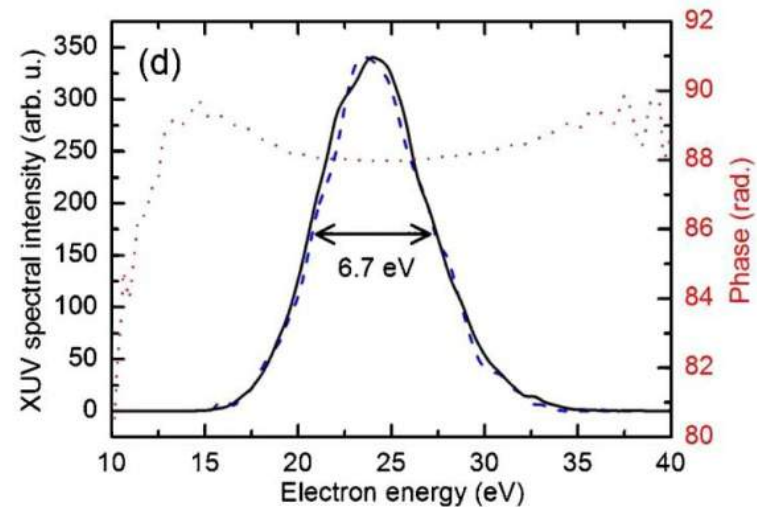
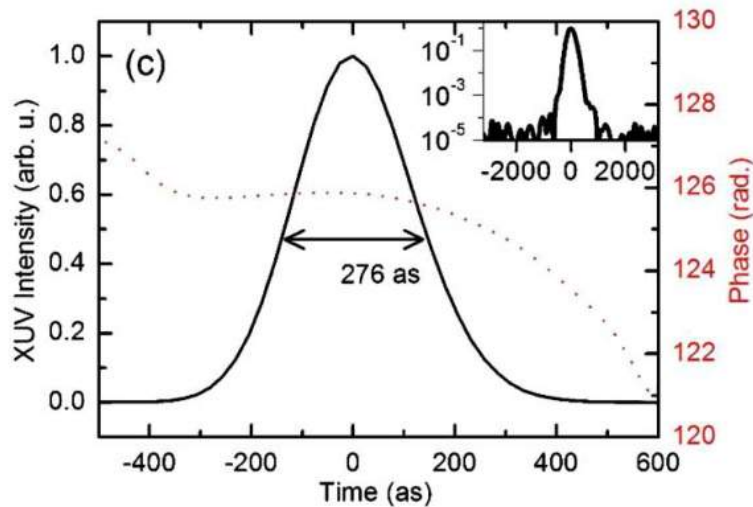
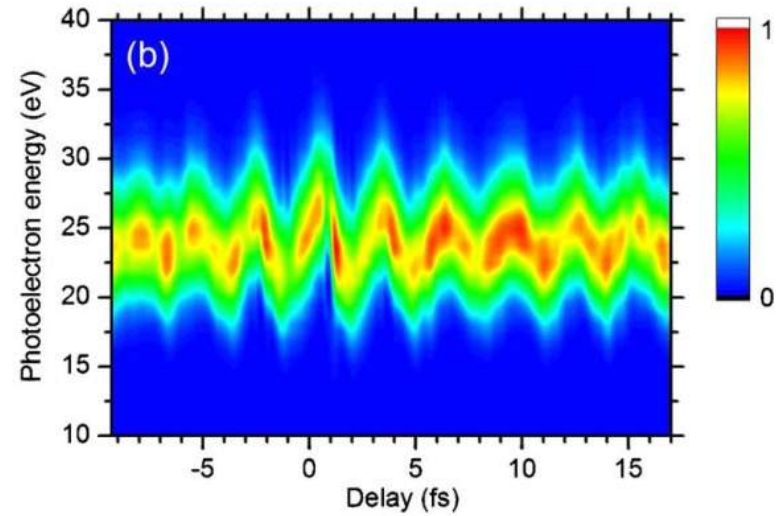
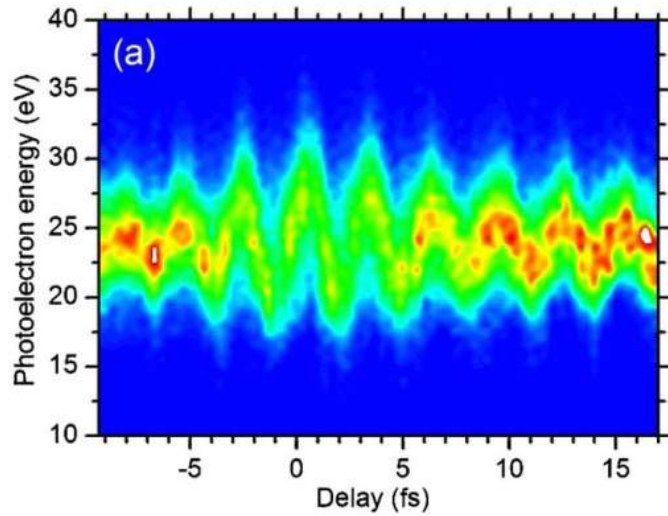


Entonces hace falta por ejemplo un método de estabilización activa de la cavidad que permita fijar la fase entre la portadora y la envolvente (CEP, Carrier-Envelope Phase)



Pulsos de attosegundos

Cómo se mide? ...complicado



Pulsos de attosegundos

CHEMICAL PHYSICS

Attosecond spectroscopy of liquid water

Inga Jordan, Martin Huppert*, Dominik Rattenbacher†, Michael Peper, Denis Jelovina, Conaill Perry, Aaron von Conta, Axel Schild, Hans Jakob Wörner‡

Jordan *et al.*, *Science* **369**, 974–979 (2020) 21 August 2020

Research Article

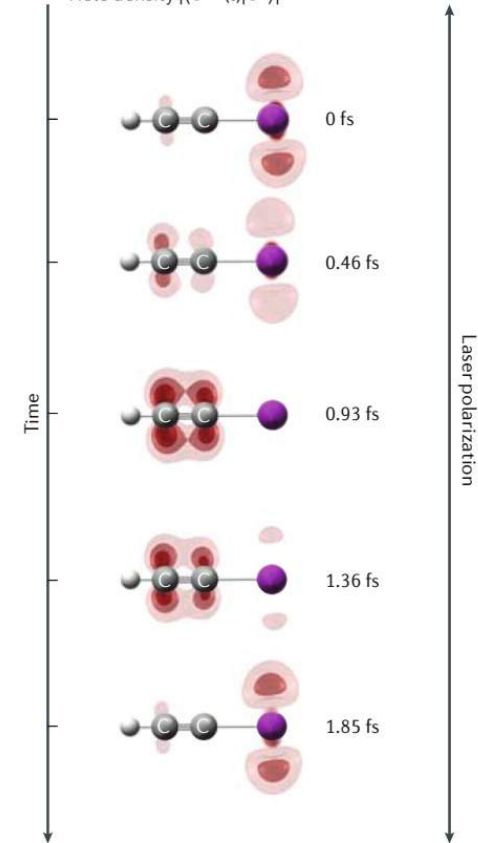
Vol. 5, No. 5 / May 2018 / Optica 502

optica

Dispersive soft x-ray absorption fine-structure spectroscopy in graphite with an attosecond pulse

BÁRBARA BUADES,¹ DOOSHAYE MOONSHIRAM,² THEMISTOKLIS P. H. SIDIROPOULOS,¹ IKER LEÓN,¹ PETER SCHMIDT,¹ IRINA PI,¹ NICOLA DI PALO,¹ SETH L. COUSIN,¹ ANTONIO PICÓN,^{1,3} FRANK KOPPENS,^{1,4} AND JENS BIEGERT^{1,4,*}

Hole density $\langle |\Phi^{N-1}(t)|\Phi^N \rangle^2$



Measurement and laser control of attosecond charge migration in ionized iodoacetylene

P. M. Kraus,¹ B. Mignolet,^{2,3} D. Baykusheva,¹ A. Rupenyan,¹ L. Horný,¹ E. F. Penka,⁴ G. Grassi,¹ O. I. Tolstikhin,⁵ J. Schneider,¹ F. Jensen,⁶ L. B. Madsen,⁷ A. D. Bandrauk,⁴ F. Remacle,² H. J. Wörner^{1*}

Science 13 Nov 2015: Vol. 350, Issue 6262, pp. 790-795

Cómo es el láser de excitación?



Procesos no lineales para óptica cuántica

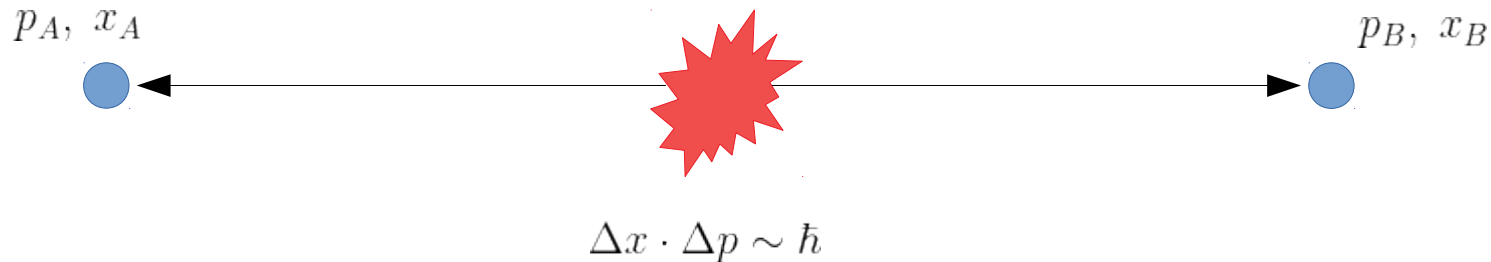
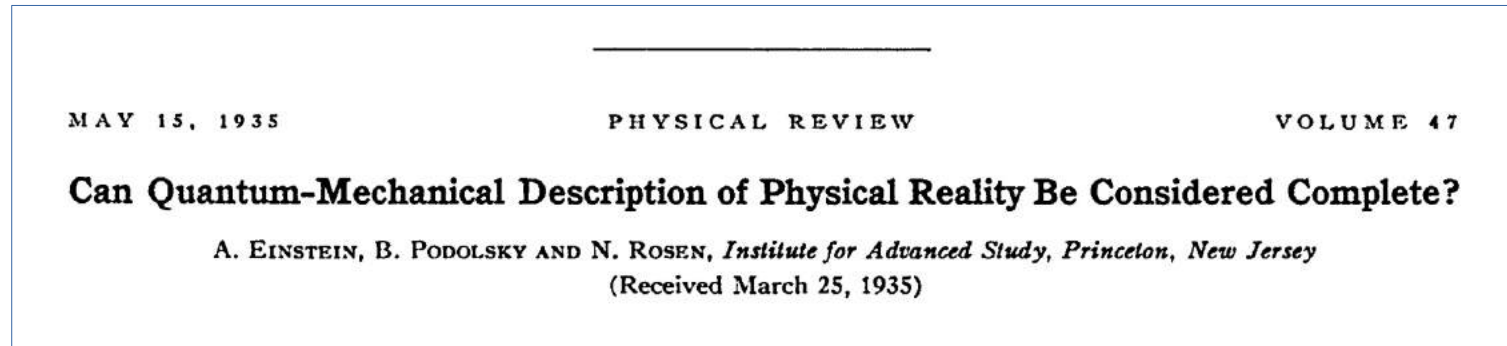
Linear Optical Quantum Computing:

- .Los fotones únicos son los portadores de la información
- .Usa óptica lineal (separadores de haz, placas de fase, láminas retardadoras, polarizadores, espejos, etc) para procesar la información
- .El registro se realiza con detectores de fotones (Single photon counting device)

Cómo obtengo “fotones únicos”?

Primero una introducción breve a la información cuántica

Procesos no lineales para óptica cuántica



Mido x (en A), conozco x_A (y x_B)
Mido p (en B), conozco p_B (y p_A !!!)

Cómo es esto?

.Los estados de las partículas no están definidos hasta que los mido
.Existe una correlación a distancia que puede ser mayor a la del cono de luz ($D=c.t$)



~~Realismo~~
~~Localidad~~

Paradoja de EPR. “*gedankenexperiment*” motivo de discusión y debate casi filosófico, hasta que en 1964...

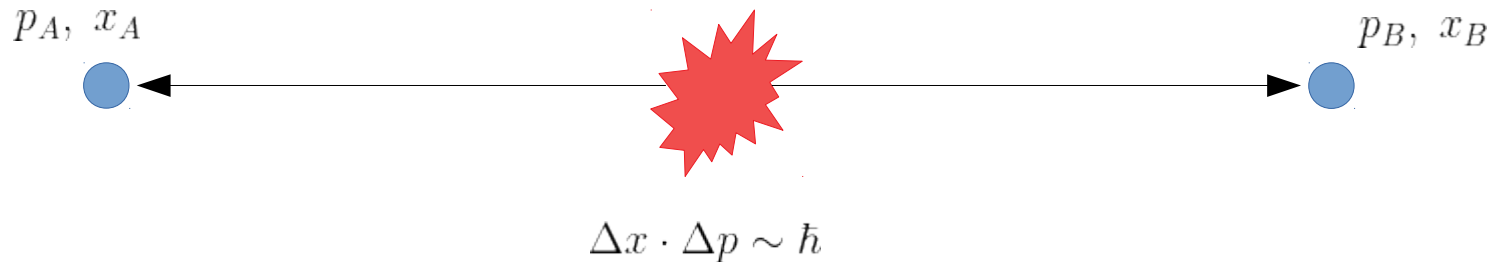
Procesos no lineales para óptica cuántica

Physics Vol. 1, No. 3, pp. 195–200, 1964 Physics Publishing Co. Printed in the United States

ON THE EINSTEIN PODOLSKY ROSEN PARADOX*

J. S. BELL[†]

Department of Physics, University of Wisconsin, Madison, Wisconsin



John S. Bell mostró que estas correlaciones no podían ser explicadas por ninguna teoría que postulara el realismo local: Un sistema que obedece a las leyes de la mecánica cuántica debe tener MAS correlaciones que uno que se rige por teorías de realismo local (clásicas).

Y que esta diferencia en correlaciones se podía testear experimentalmente!!

Experimentos de Bell

Todos al laboratorio?

No tan rápido, es 1964!!!, no hubo tecnología disponible hasta 1972

Procesos no lineales para óptica cuántica

Información Cuántica

Notación: estados cuánticos

$$|\psi\rangle = \begin{pmatrix} c_1 \\ c_2 \\ c_3 \\ \vdots \end{pmatrix} \quad c_i \in \mathbb{C}$$

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= c_1 |k_1\rangle + c_2 |k_2\rangle + c_3 |k_3\rangle + \dots \\ &= \sum_i c_i |k_i\rangle \quad \text{“Ket”} \end{aligned}$$

$$\langle\psi| = (|\psi\rangle)^T \quad \text{“Bra”}$$

$$\langle\psi| = (c_1^* \quad c_2^* \quad c_3^* \quad \dots)$$

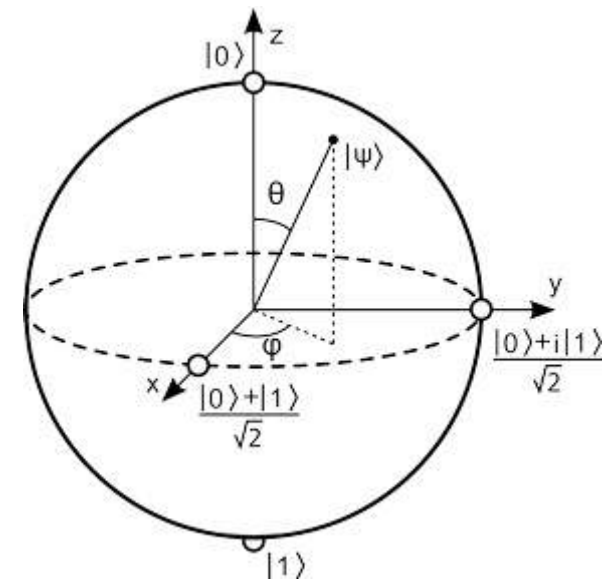
Normalización:

$$\sum_i |c_i|^2 = 1 \implies \langle\psi|\psi\rangle = 1$$

Sistemas de dos niveles (qubits)

$$|\psi\rangle = \alpha |0\rangle + \beta |1\rangle$$

Representación gráfica: esfera de Bloch



$$|\psi\rangle = \cos \frac{\theta}{2} |0\rangle + e^{i\varphi} \sin \frac{\theta}{2} |1\rangle$$

Procesos no lineales para óptica cuántica

Información Cuántica

Sistemas compuestos

Sistema cuántico compuesto por dos o más sistemas físicos.

El espacio de estados es el producto tensorial de los espacios de cada uno de los subsistemas:

$$|\psi\rangle = |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle \otimes \cdots \otimes |\psi_n\rangle$$

Para un sistema bipartito:

$$|\psi\rangle = |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$$

Para un par de qubits (estados de dos niveles):

$$\begin{aligned} |\psi\rangle &= (\alpha |0\rangle_1 + \beta |1\rangle_1) \otimes (\gamma |0\rangle_2 + \delta |1\rangle_2) \\ &= \alpha\gamma |0\rangle_1 \otimes |0\rangle_2 + \alpha\delta |0\rangle_1 \otimes |1\rangle_2 + \beta\gamma |1\rangle_1 \otimes |0\rangle_2 + \beta\delta |1\rangle_1 \otimes |1\rangle_2 \\ &= \alpha\gamma |00\rangle + \alpha\delta |01\rangle + \beta\gamma |10\rangle + \beta\delta |11\rangle \end{aligned}$$

Superposición de todos los posibles estados del sistema

Procesos no lineales para óptica cuántica

Información Cuántica

Entrelazamiento:

El siguiente estado BIPARTITO:

$$|\psi\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}}$$

NO se puede escribir de la forma:

$$|\psi\rangle = \frac{|00\rangle + |11\rangle}{\sqrt{2}} \neq |\psi_1\rangle \otimes |\psi_2\rangle$$

No es **separable**. A los estados de un sistema compuesto, con esta propiedad, se los denomina estados **entrelazados**.

$$\frac{|01\rangle + |00\rangle}{\sqrt{2}} = |0\rangle \otimes \frac{|1\rangle + |0\rangle}{\sqrt{2}} \quad \longrightarrow \quad \text{Separable}$$

$$\frac{|01\rangle + |10\rangle}{\sqrt{2}} \neq |a_1\rangle \otimes |b_2\rangle \quad \longrightarrow \quad \text{Entrelazado}$$

Procesos no lineales para óptica cuántica

Información Cuántica

Entrelazamiento:

El siguiente estado BIPARTITO:

$$|\psi\rangle = \frac{|0_A 0_B\rangle + |1_A 1_B\rangle}{\sqrt{2}}$$

Con estos estados entrelazados, que presentan la máxima correlación entre los subsistemas A y B, se puede hacer un experimento de Bell y testear la mecánica cuántica contra modelos de realismo local

Cómo se pueden generar estos estados?

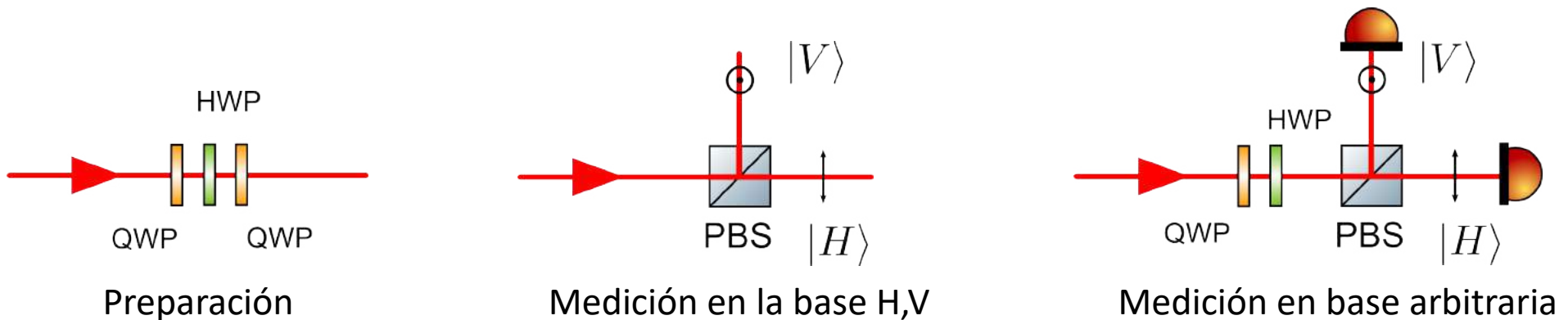
Procesos no lineales para óptica cuántica

Información Cuántica

Qubits codificados en la Polarización de un fotón:

$$\left. \begin{array}{l} |0\rangle \rightarrow |H\rangle \\ |1\rangle \rightarrow |V\rangle \end{array} \right\} |\psi\rangle = \alpha|H\rangle + \beta|V\rangle$$

Qubit	Estado de Polarización	Nombre
$ 0\rangle$	$ H\rangle$	Horizontal
$ 1\rangle$	$ V\rangle$	Vertical
$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + 1\rangle)$	$ D\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(H\rangle + V\rangle)$	Diagonal
$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle - 1\rangle)$	$ A\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(H\rangle - V\rangle)$	Antidiagonal
$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle + i 1\rangle)$	$ L\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(H\rangle + i V\rangle)$	Circular Izquierda
$\frac{1}{\sqrt{2}}(0\rangle - i 1\rangle)$	$ R\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(H\rangle - i V\rangle)$	Circular Derecha

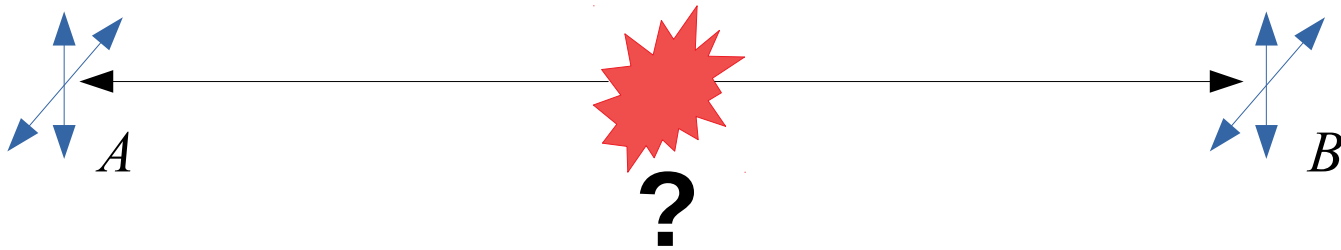


Procesos no lineales para óptica cuántica

Información Cuántica

Qubits codificados en la Polarización de un fotón:

$$|\psi\rangle = \frac{|H_A H_B\rangle + |V_A V_B\rangle}{\sqrt{2}}$$



Cómo consigo dos fotones (y no más) correlacionados en polarización?

Procesos no lineales para óptica cuántica

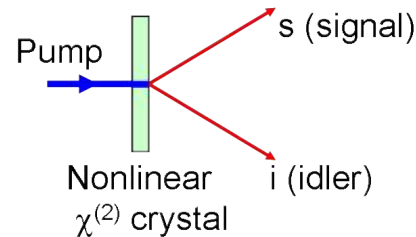
Spontaneous Parametric Down-Conversion (SPDC)

$$\omega_{pump} = \omega_s + \omega_i$$

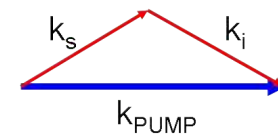
$$\mathbf{k}_{pump} = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i$$

Condición de phase matching (el material debe ser no lineal Y birrefringente)

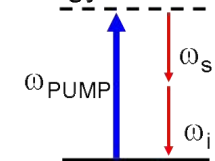
Spontaneous
Parametric
Downconversion



Momentum Conservation

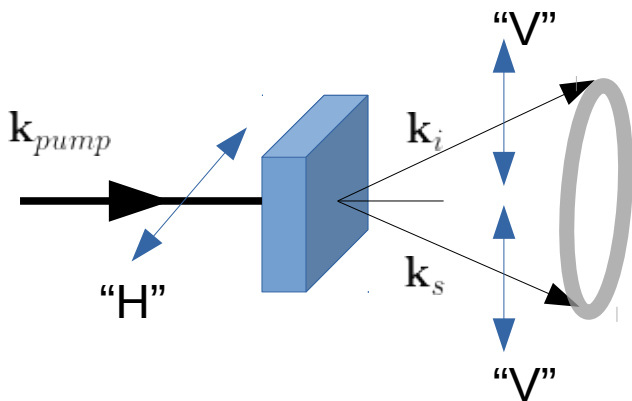


Energy conservation



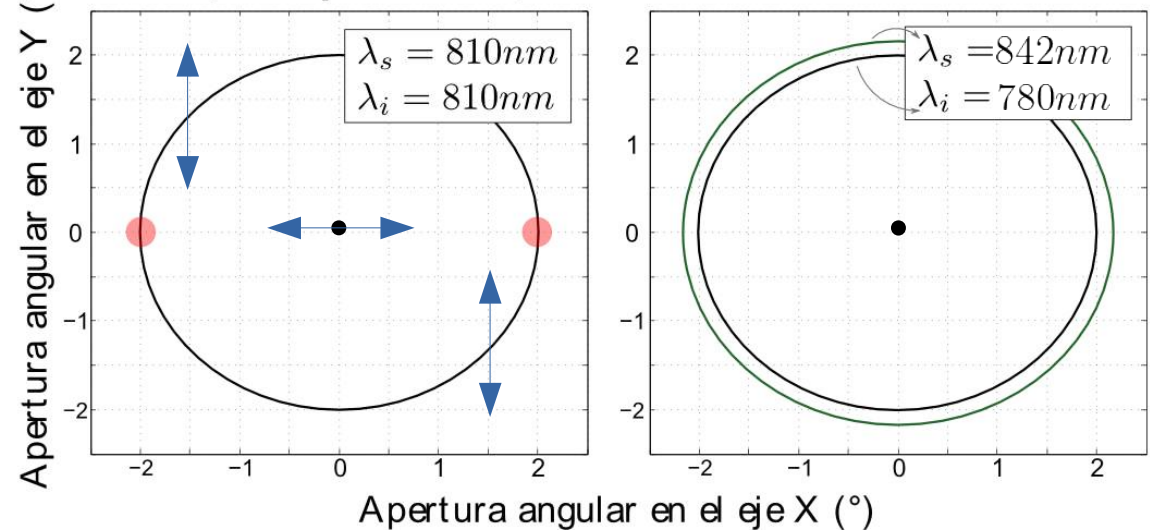
$$\Phi_{PUMP} = \Phi_s + \Phi_i$$

Phase Matching Tipo I



$$|\varphi\rangle = |V_A, V_B\rangle$$

Tipo I: $\lambda_p = 405nm, \theta_c = 29^\circ$



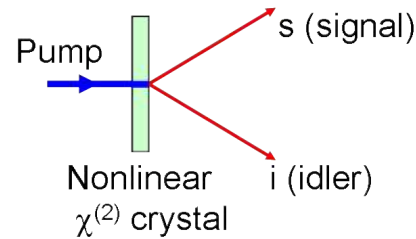
Procesos no lineales para óptica cuántica

Spontaneous Parametric Down-Conversion (SPDC)

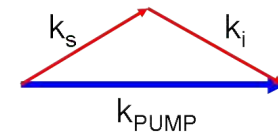
$$\omega_{pump} = \omega_s + \omega_i$$

$$\mathbf{k}_{pump} = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i$$

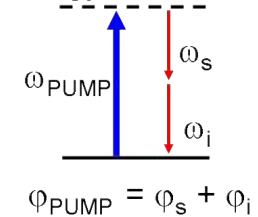
Spontaneous
Parametric
Downconversion



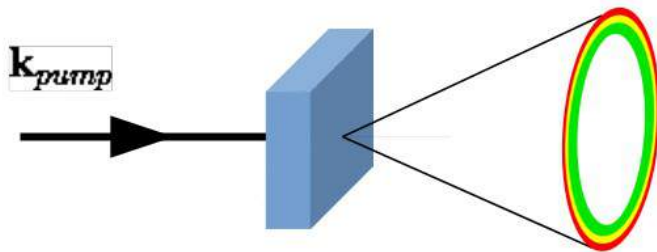
Momentum Conservation



Energy conservation

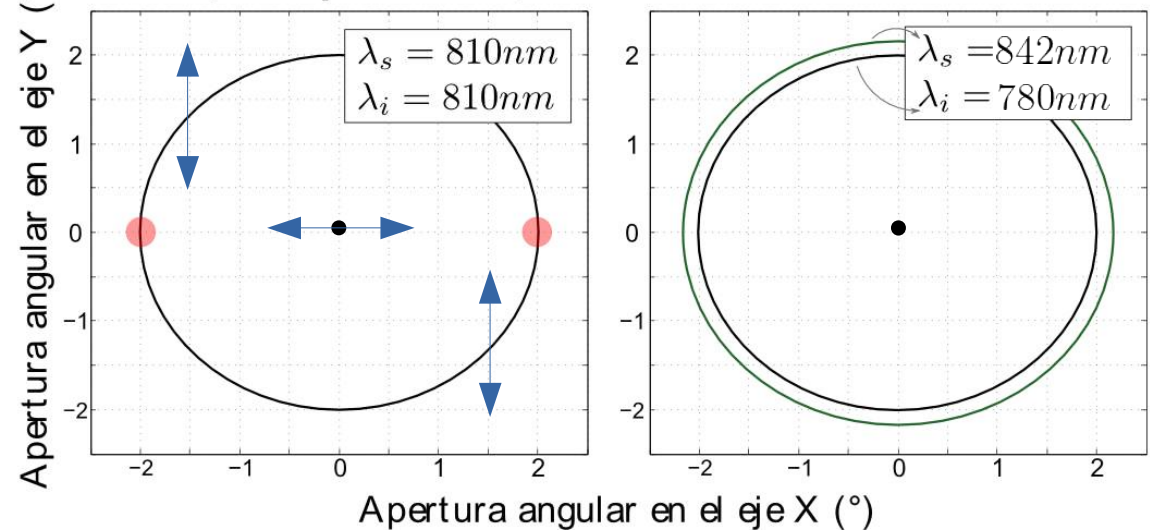


Phase Matching Tipo I



$$|\varphi\rangle = |V_A, V_B\rangle$$

Tipo I: $\lambda_p = 405nm, \theta_c = 29^\circ$



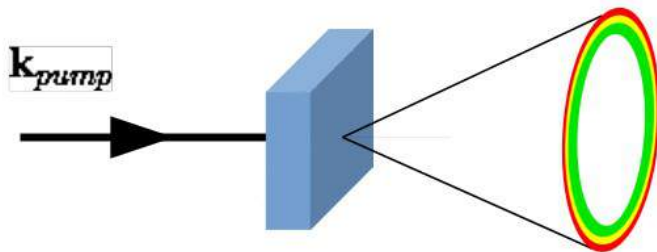
Procesos no lineales para óptica cuántica

Spontaneous Parametric Down-Conversion (SPDC)

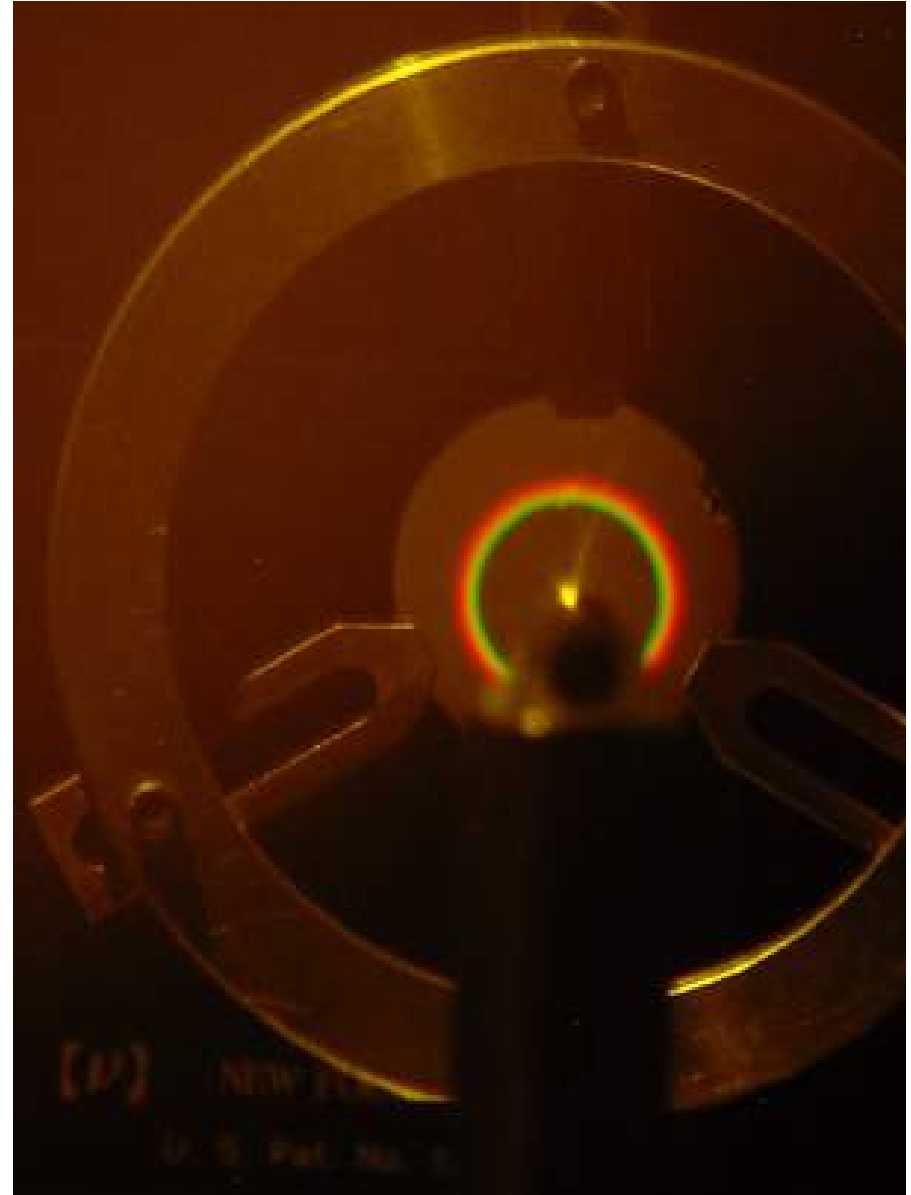
$$\omega_{pump} = \omega_s + \omega_i$$

$$\mathbf{k}_{pump} = \mathbf{k}_s + \mathbf{k}_i$$

Phase Matching Tipo I

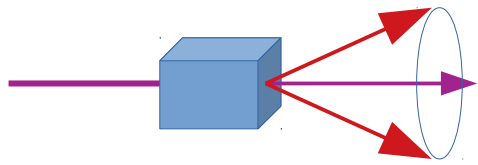


$$|\varphi\rangle = |V_A, V_B\rangle$$

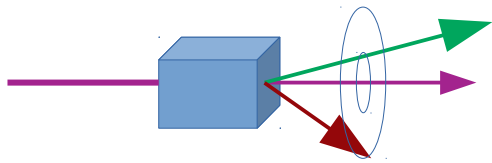


Procesos no lineales para óptica cuántica

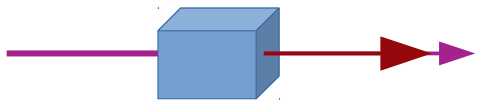
Spontaneous Parametric Down-Conversion (SPDC): similitudes entre procesos



degenerada,
no colineal



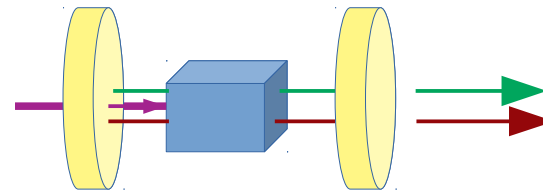
no degenerada,
no colineal



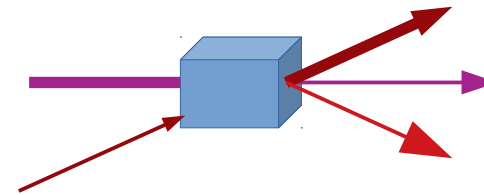
colineal

$$\omega_1 = \omega_2 + \omega_3$$

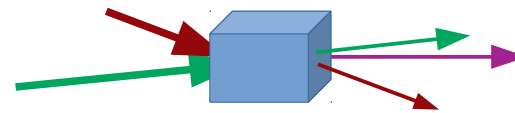
$$k_1 \approx k_2 + k_3$$



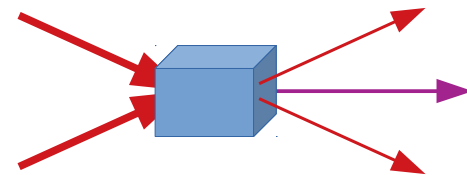
OPO (oscilador
paramétrico)



OPA
(amplificador
paramétrico)

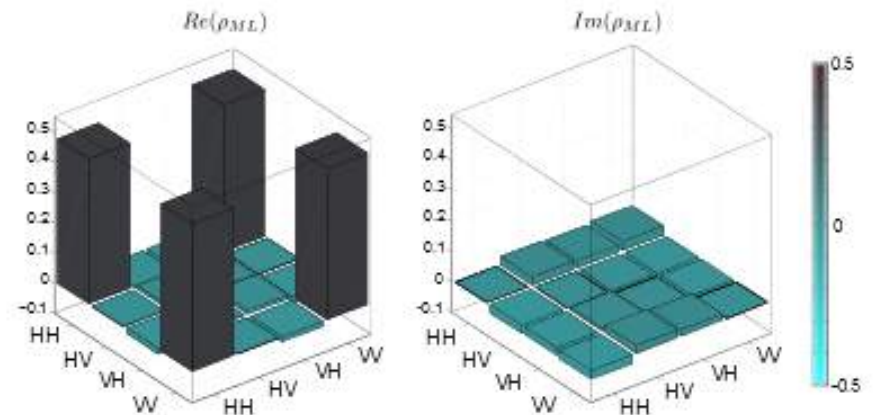
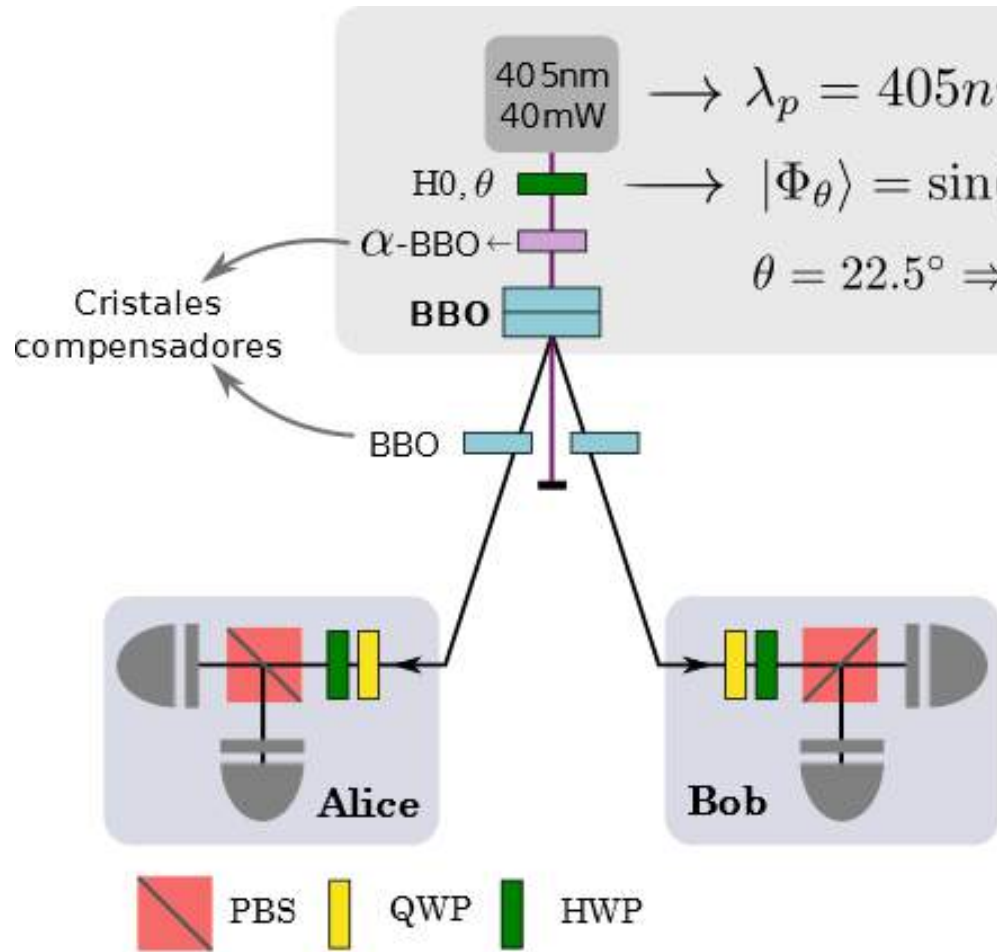


SFG (suma de
frecuencias)



SHG (generación de
segunda armónica)

Procesos no lineales para óptica cuántica



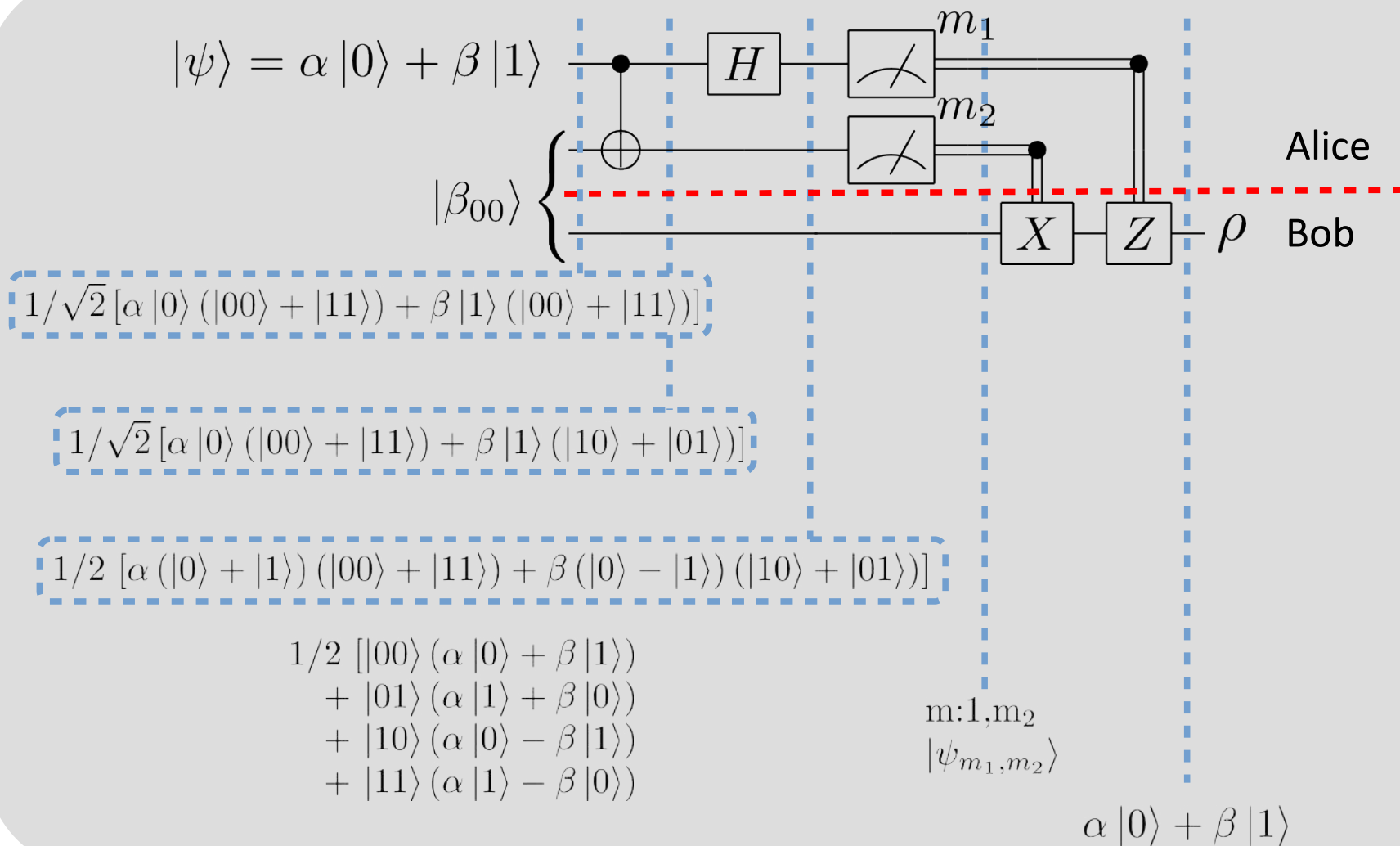
Fidelidad $F = 0.95 \pm 0.01$

Valor de S (CHSH) $S = 2.703 \pm 0.067$

$$\rho = \frac{1}{2} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

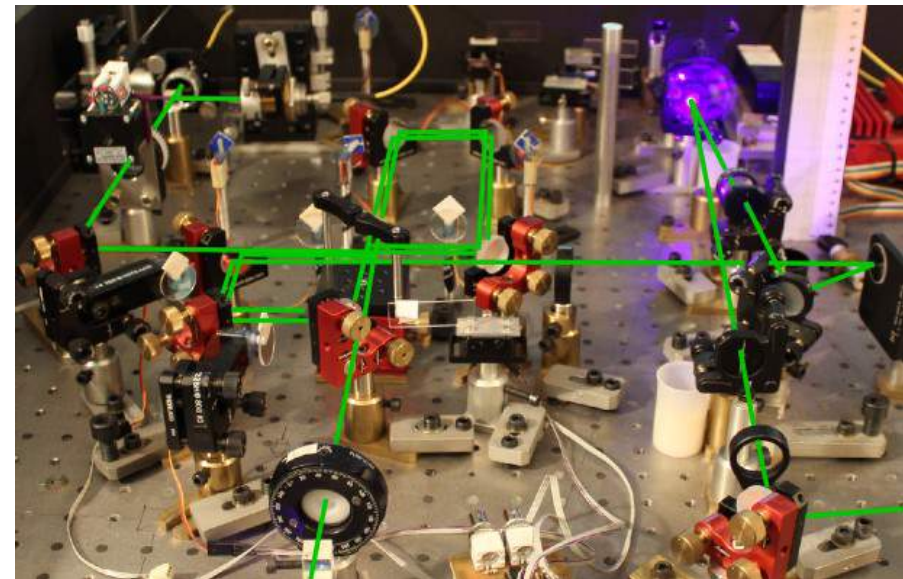
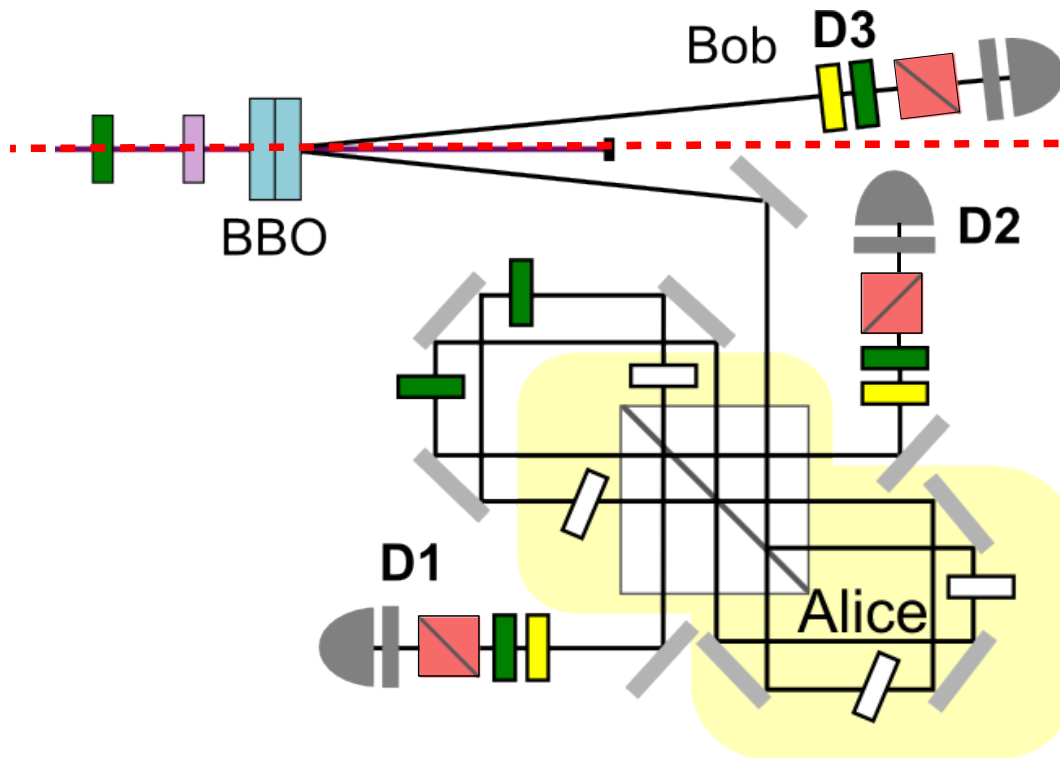
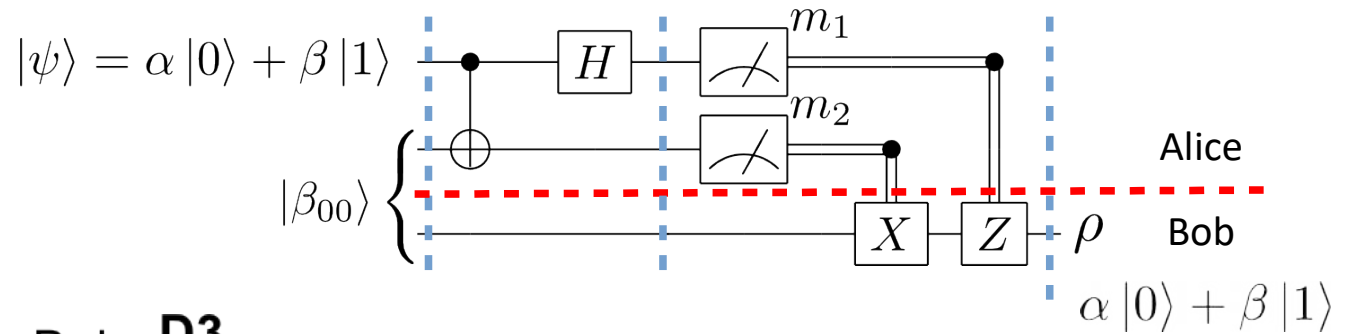
Procesos no lineales para óptica cuántica

Una aplicación: Teleportación cuántica



Procesos no lineales para óptica cuántica

Una aplicación: Teleportación cuántica



Procesos no lineales para óptica cuántica

Distribución Cuántica de Claves – Quantum Key Distribution (QKD)

Transmisión de un mensaje encriptado

ALICE

010101010
101010101
010101010
101010101



Mensaje **M**

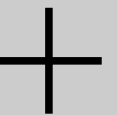
Clave **K**

Canal Público (inseguro)



Criptograma **C**

BOB



C

K

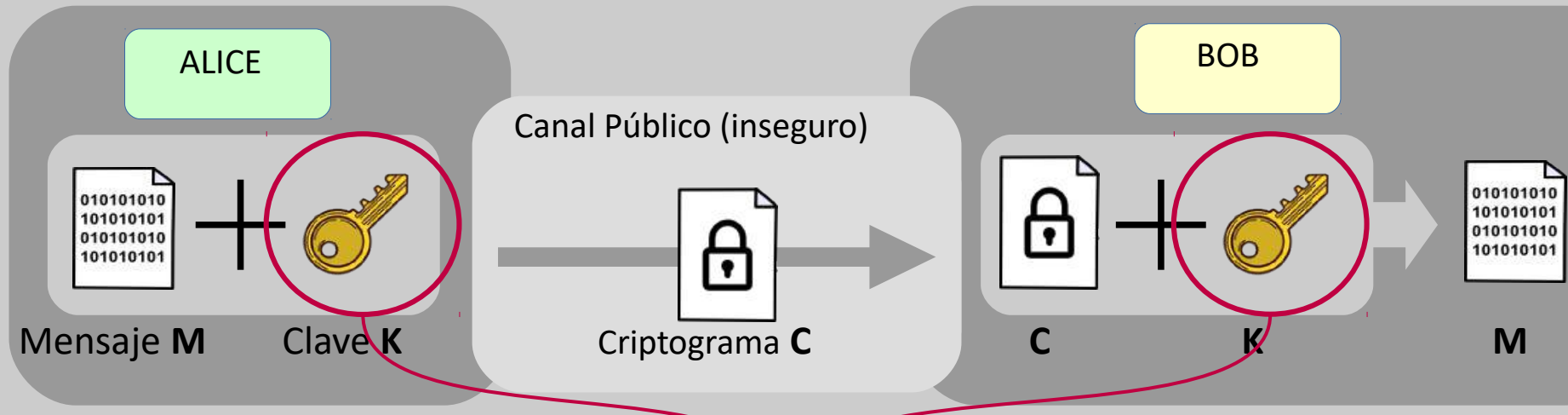
010101010
101010101
010101010
101010101

M

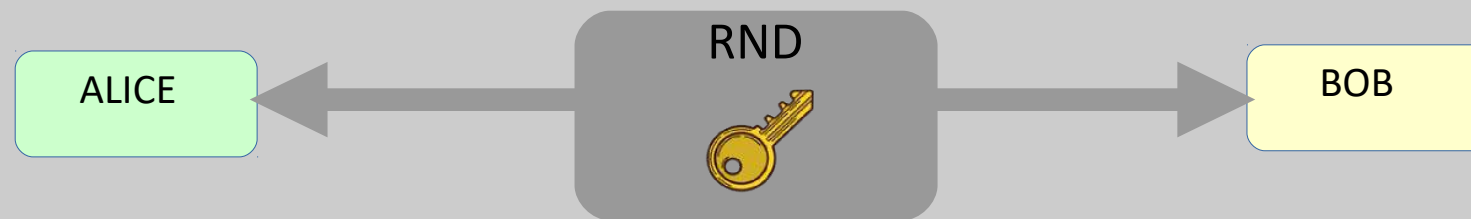
Procesos no lineales para óptica cuántica

Distribución Cuántica de Claves – Quantum Key Distribution (QKD)

Transmisión de un mensaje encriptado



Generación y Distribución de una clave criptográfica

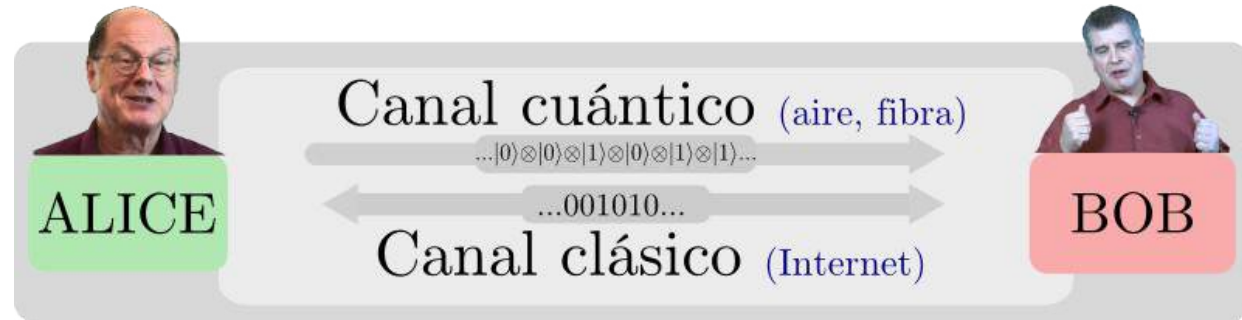


Procesos no lineales para óptica cuántica

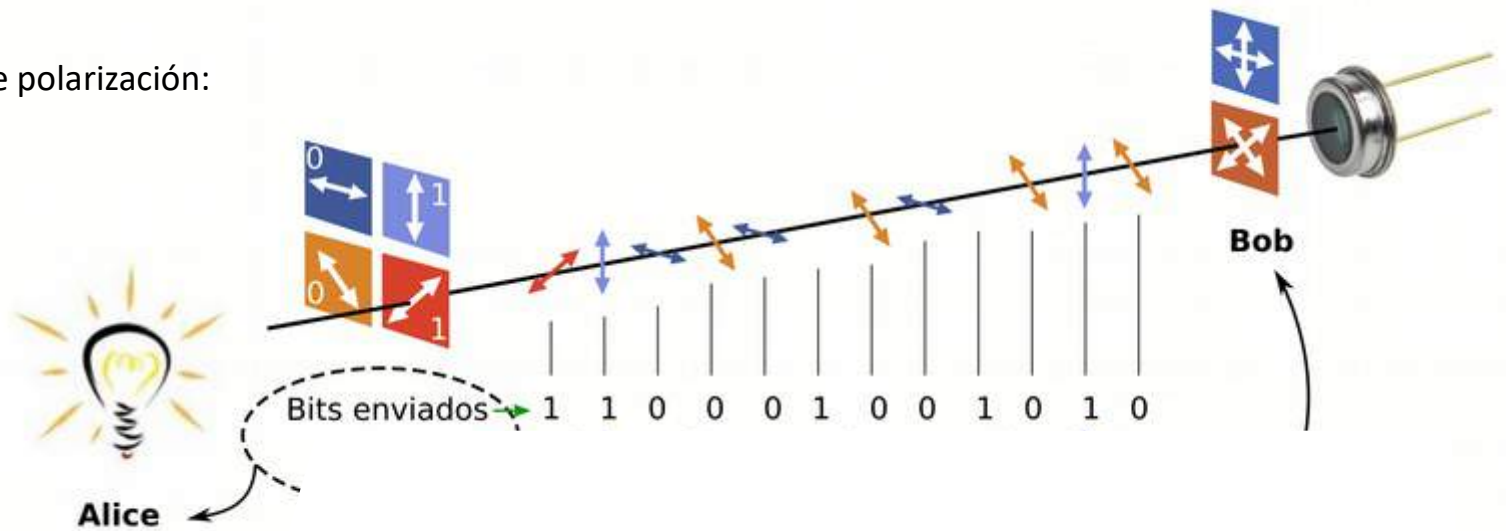
Distribución Cuántica de Claves – Quantum Key Distribution (QKD)

Protocolo BB84

- Propuesto en 1984 por Bennett y Brassard
- Utiliza los cuatro estados de dos bases conjugadas



Implementación con estados de polarización:



$$+ \begin{cases} 0 \rightarrow |H\rangle \\ 1 \rightarrow |V\rangle \end{cases}$$

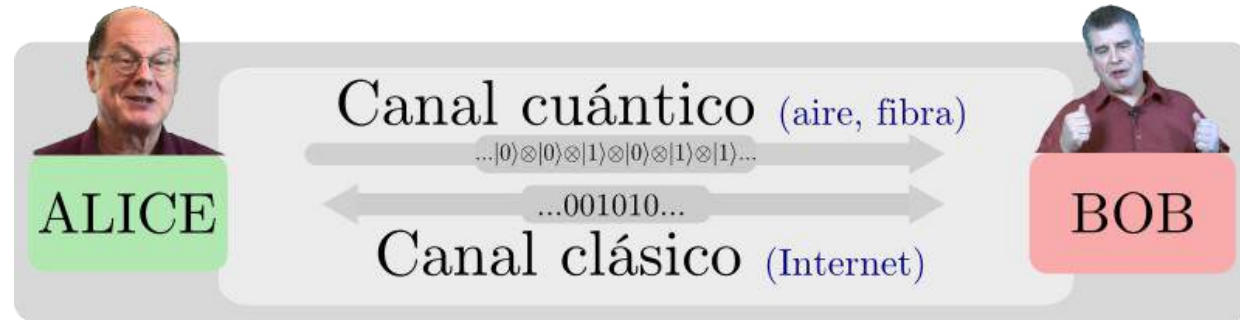
$$\times \begin{cases} 0 \rightarrow 1/\sqrt{2} (|H\rangle + |V\rangle) \\ 1 \rightarrow 1/\sqrt{2} (|H\rangle - |V\rangle) \end{cases}$$

Procesos no lineales para óptica cuántica

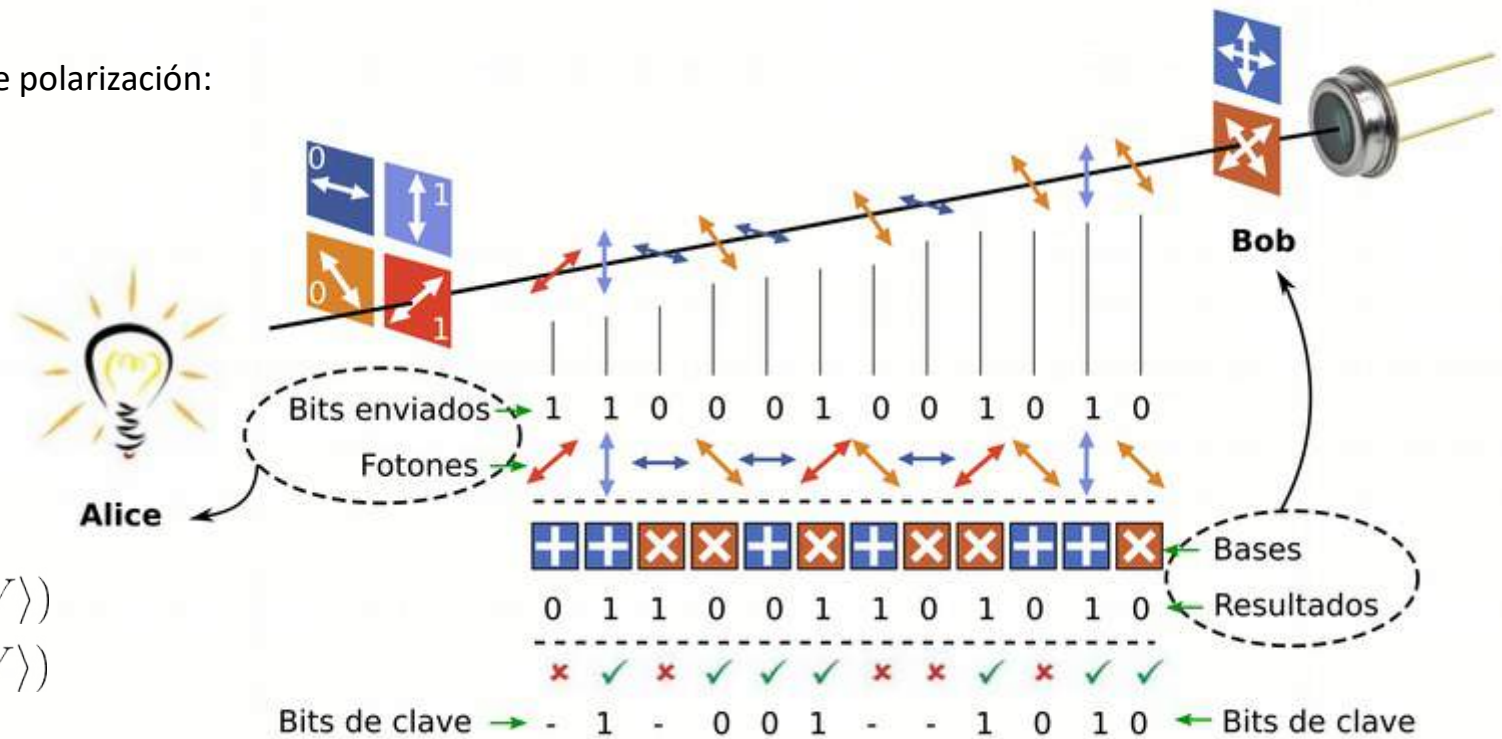
Distribución Cuántica de Claves – Quantum Key Distribution (QKD)

Protocolo BB84

- Propuesto en 1984 por Bennett y Brassard
- Utiliza los cuatro estados de dos bases conjugadas



Implementación con estados de polarización:



$$+ \begin{cases} 0 \rightarrow |H\rangle \\ 1 \rightarrow |V\rangle \end{cases}$$

$$\times \begin{cases} 0 \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle + |V\rangle) \\ 1 \rightarrow \frac{1}{\sqrt{2}} (|H\rangle - |V\rangle) \end{cases}$$

Procesos no lineales para óptica cuántica

Fuentes de luz para comunicaciones cuánticas

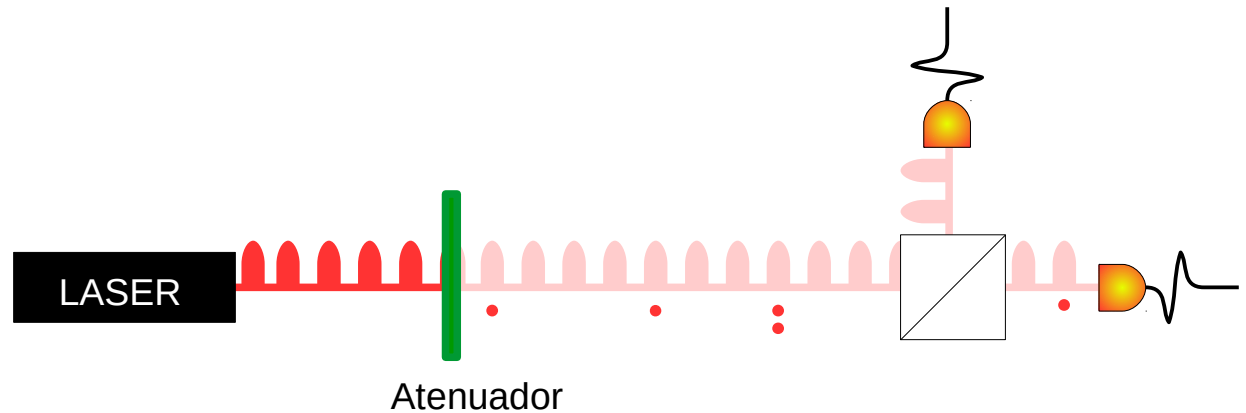
Pulsos de luz atenuados

Pros:

- Simple
- Sincronizado con reloj externo

Cons:

- Generación no-determinística (Poisson)
- Multi-photon probability $\neq 0$
- $g^{(2)}(0)=1$



Procesos no lineales para óptica cuántica

Fuentes de luz para comunicaciones cuánticas

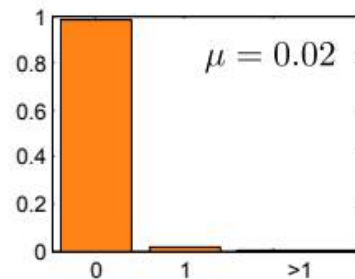
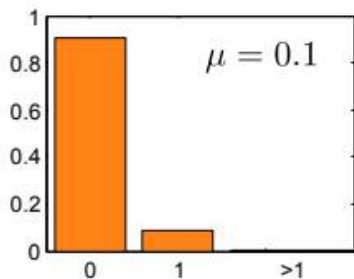
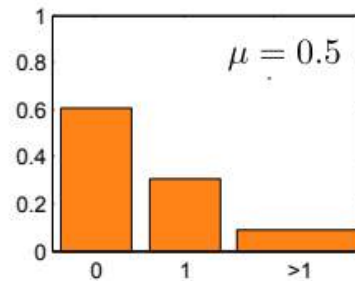
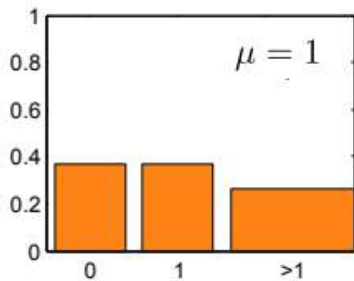
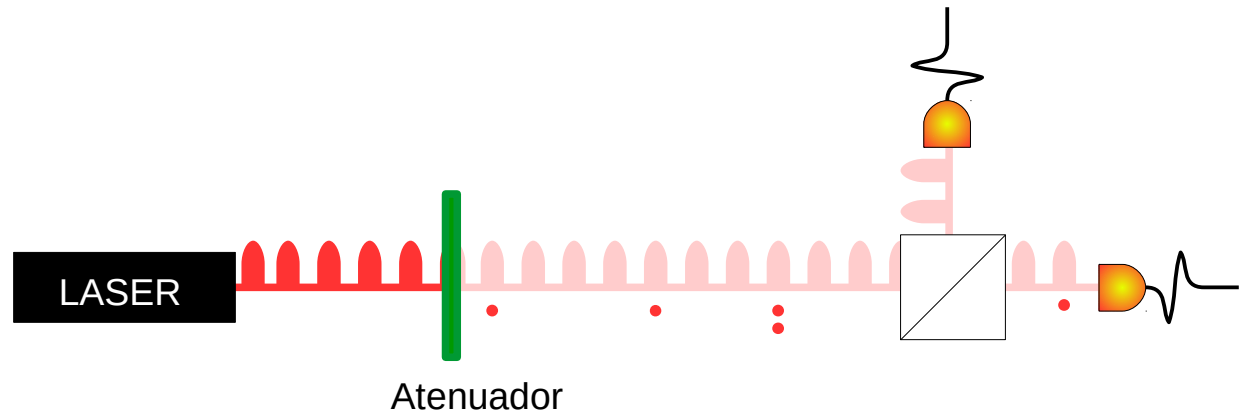
Pulsos de luz atenuados

Pros:

- Simple
- Sincronizado con reloj externo

Cons:

- Generación no-determinística (Poisson)
- Multi-photon probability $\neq 0$
- $g^{(2)}(0)=1$



$$P(n) = \frac{\mu^n}{n!} e^{-\mu}$$

	P(0)	P(1)	P(>1)
$\mu=1$	0.37	0.37	0.26
$\mu=0.5$	0.61	0.30	0.09
$\mu=0.1$	0.90	0.09	0.01
$\mu=0.02$	0.98	≈ 0.02	$\approx 2E-4$

Procesos no lineales para óptica cuántica

Fuentes de luz para comunicaciones cuánticas

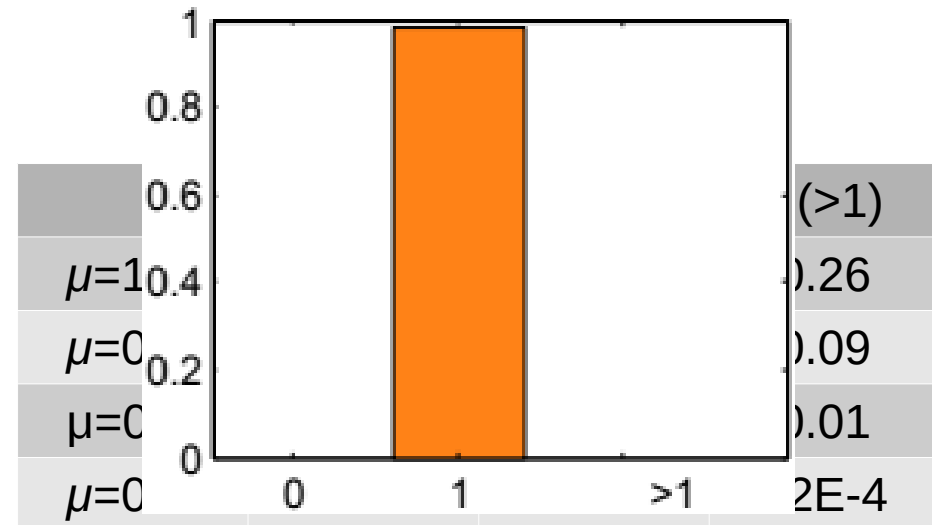
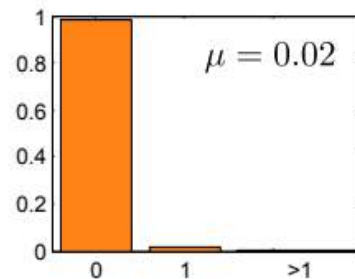
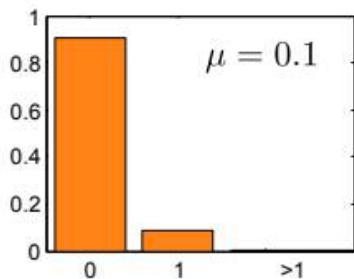
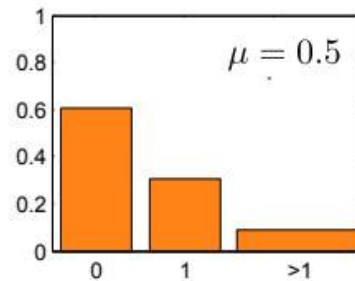
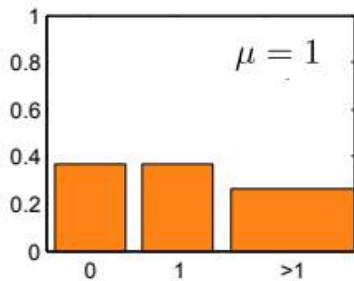
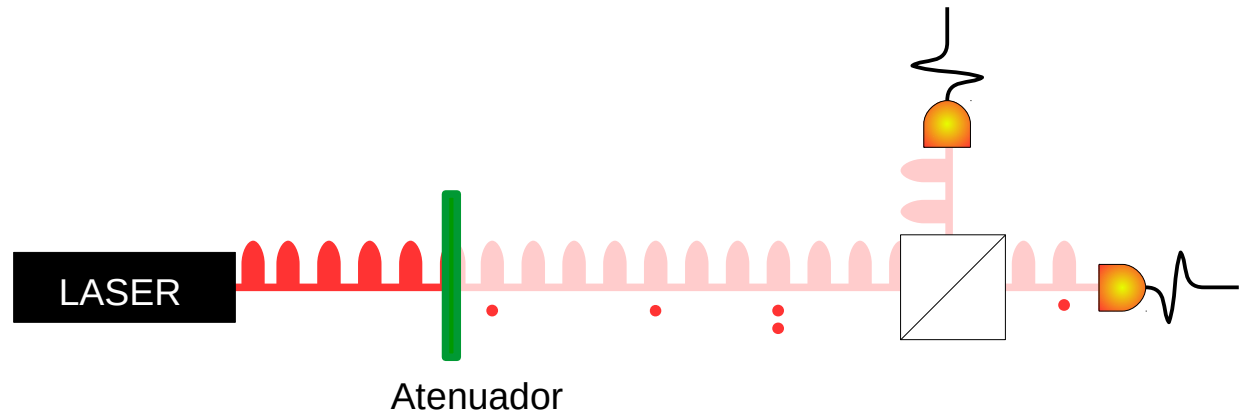
Pulsos de luz atenuados

Pros:

- Simple
- Sincronizado con reloj externo

Cons:

- Generación no-determinística (Poisson)
- Multi-photon probability $\neq 0$
- $g^{(2)}(0)=1$



Procesos no lineales para óptica cuántica

Fuentes de luz para comunicaciones cuánticas

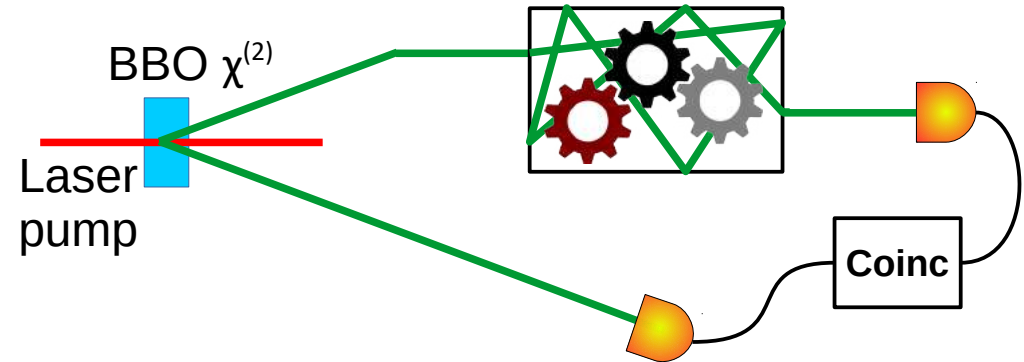
Fotones anunciados (SPDC)

Pros:

- $G^{(2)}(0)=0$
- Se pueden post-seleccionar fotones únicos

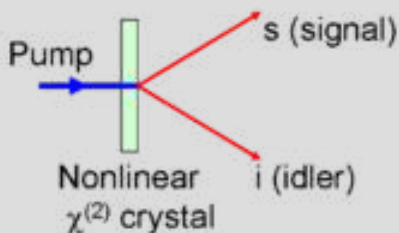
Cons:

- No sincrónicas, no determinísticas
- Ingeniería más compleja
- Anchos de banda grandes (baja coherencia):
1-10nm (SPDC); 10-100 GHz (SF-WM)

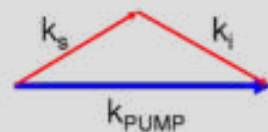


$\chi^{(2)}$ en cristales no-centrosimétricos, birrefringentes

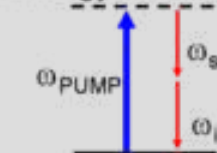
Spontaneous Parametric Downconversion



Momentum Conservation

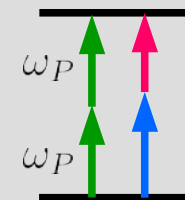
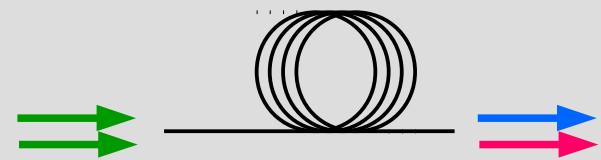


Energy conservation



$$\omega_P = \omega_s + \omega_i$$

$\chi^{(3)}$ en Dispersion-Shifted Fiber



$$2\omega_P = \omega_s + \omega_i$$

$$2k_P = k_s + k_i$$

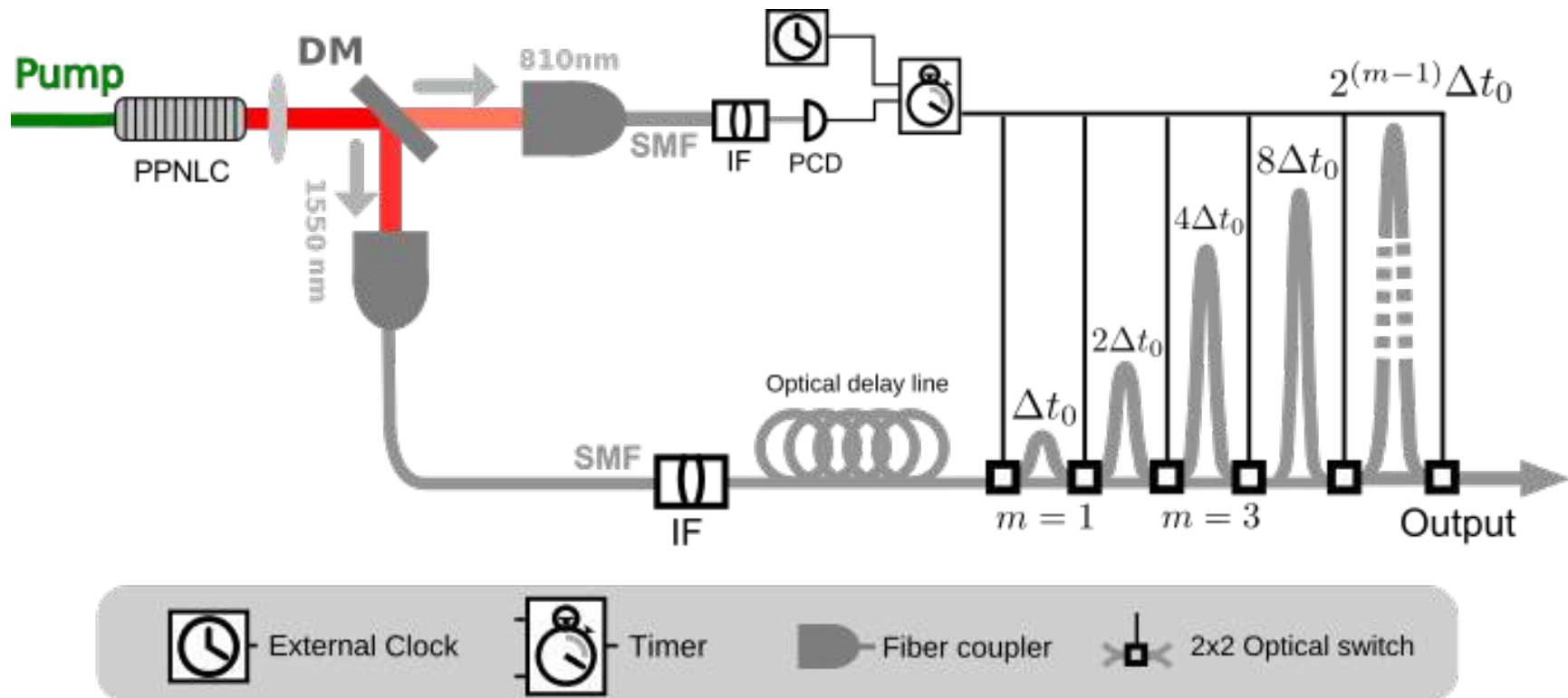
DSF!!!

Procesos no lineales para óptica cuántica

Fuentes de luz para comunicaciones cuánticas

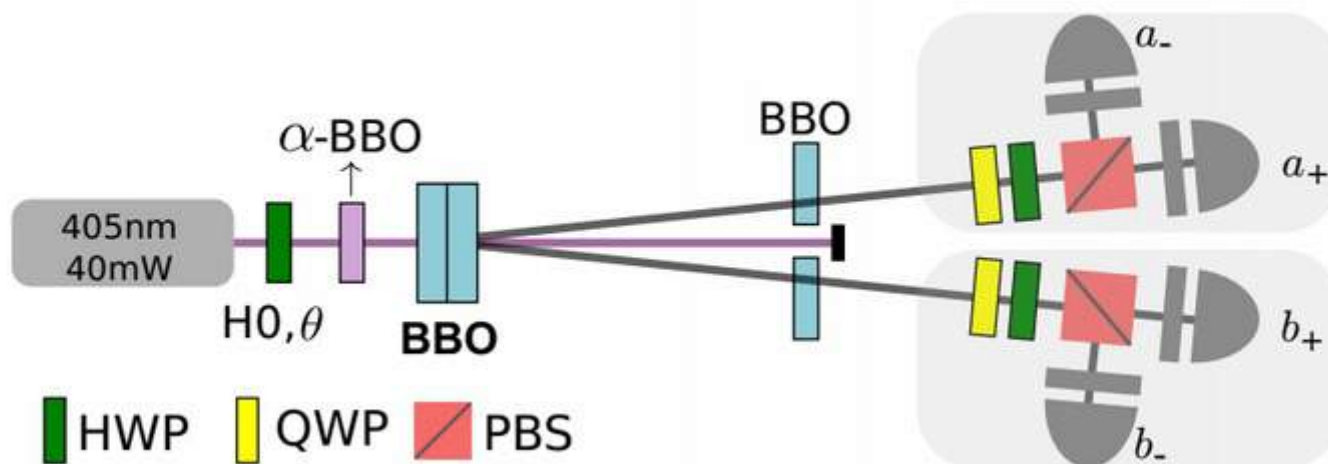
Pares anunciados multiplexados (SPDC)

Una aproximación a estados de fotones únicos



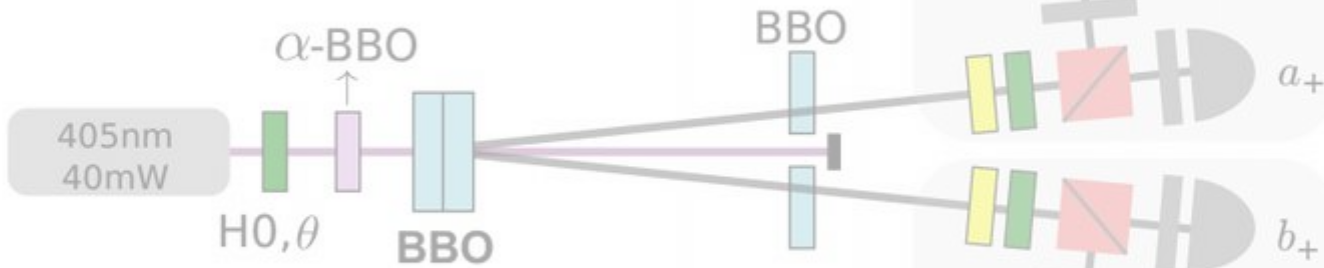
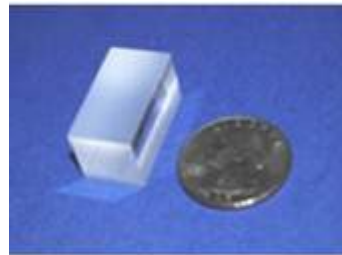
Procesos no lineales para óptica cuántica

Qué se usa? Cuáles son los fierros?



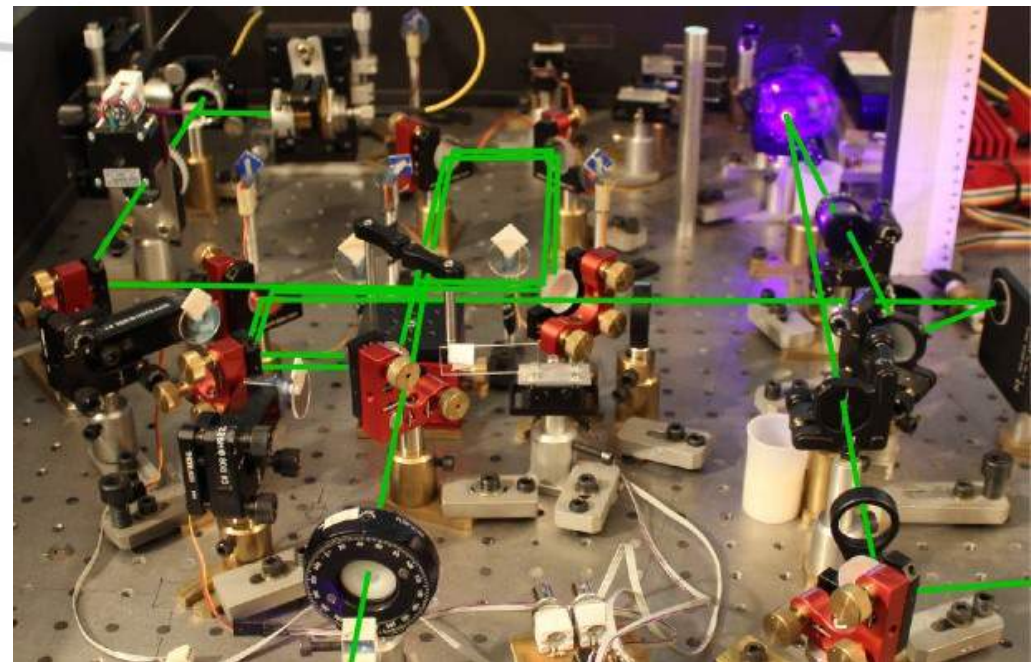
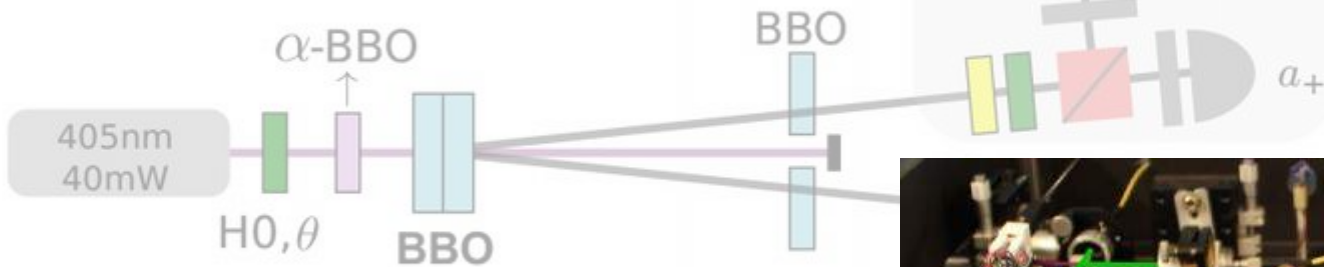
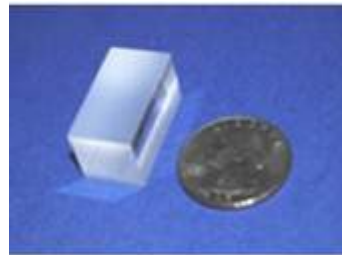
Procesos no lineales para óptica cuántica

Qué se usa? Cuáles son los fierros?



Procesos no lineales para óptica cuántica

Qué se usa? Cuáles son los fierros?



Procesos no lineales para óptica cuántica

Dos ejemplos, en los extremos del rango de intensidades

...y en los extremos del presupuesto