

Control del haz láser



A. Guzmán

angela.guzman@creol.ucf.edu



CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA



Control del haz láser

- Láseres multimodales
- Láseres monomodales
- Q-switching
- Mode locking
- Chirped pulse amplification



Láseres monomodales y multimodales

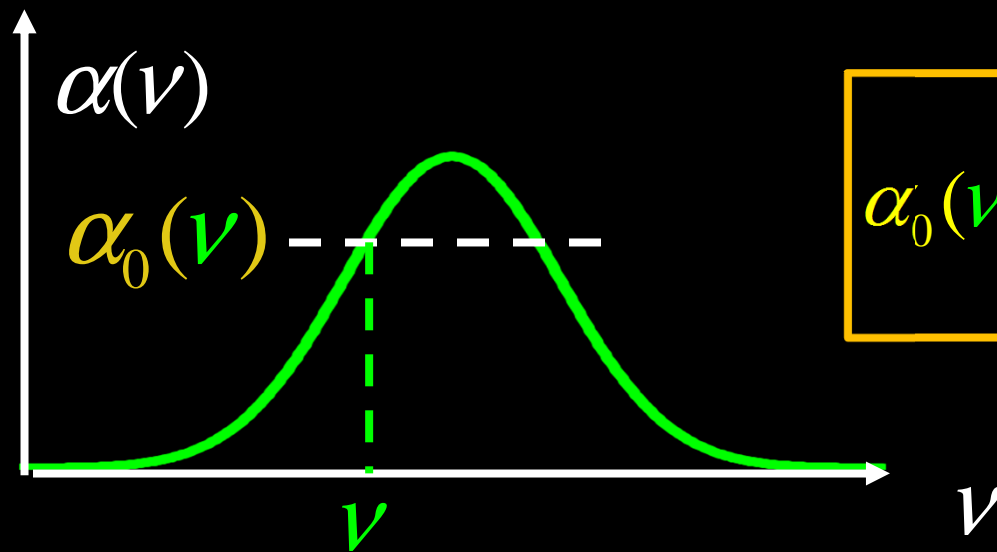


CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA

CREOL@25
Celebrating 25 Years of Excellence in Optics and Photonics

Saturación de la ganancia

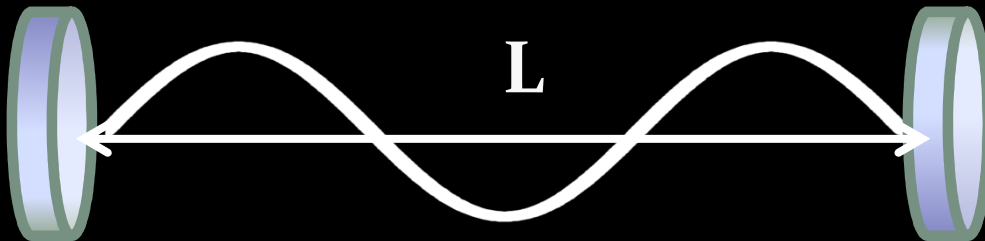
En el estado estacionario la ganancia debe equilibrar las pérdidas, incluyendo las de emisión láser y es igual a la ganancia umbral.



$$\alpha_0(\nu) = \beta + \frac{1}{2L} \ln \left(\frac{1}{R_1 R_2} \right)$$



Modos axiales del láser



$$L = \frac{n\lambda}{2}, \quad n \gg 1$$

$$\nu_n = \frac{nc}{2L}$$

Condición de resonancia

$$\Delta\nu = \frac{c}{2L}$$



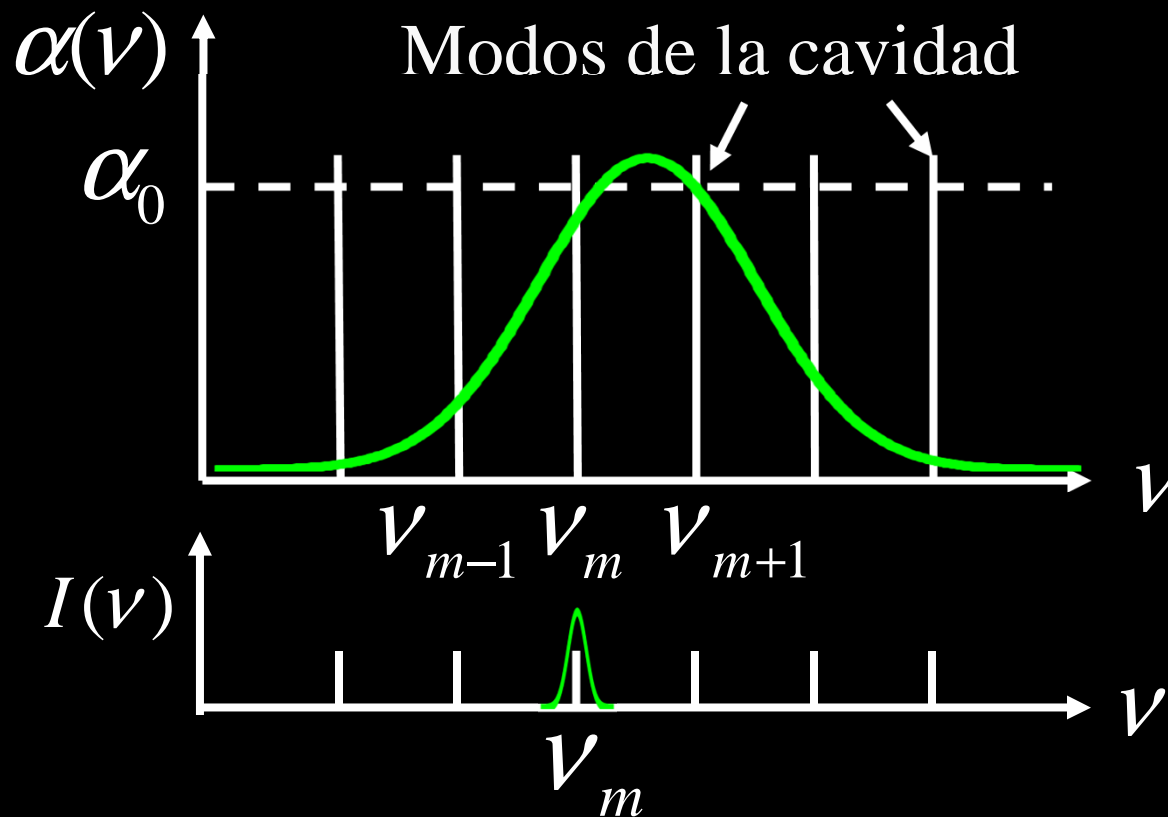
Para un láser de 25cm de longitud, la separación en frecuencia entre estos modos axiales es aprox. de 600MHz



Saturación de la ganancia y modos láser

- En el estado estacionario la ganancia es igual a α_0 .
- Si el ensanchamiento de línea del medio activo es homogéneo la saturación de ganancia resulta en emisión láser en un solo modo axial, es decir, en una sola frecuencia.
- Si el ensanchamiento es homogéneo y los modos axiales son cercanos en frecuencia, la saturación de ganancia conduce a la emisión láser en varios modos axiales del resonador.

Láser monomodal: Ancho homogéneo

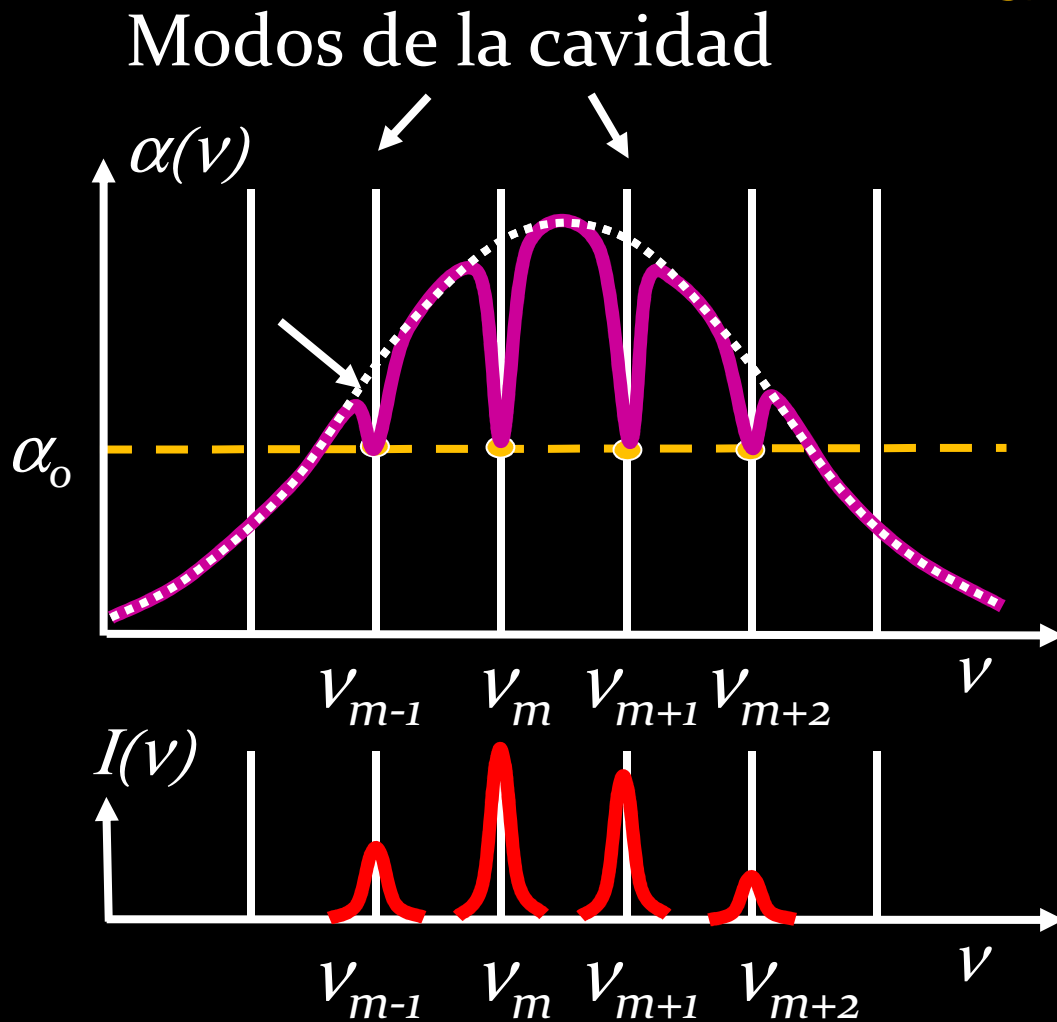


Solo para
el modo m
 $\alpha(\nu) > \alpha_0$

Ej: Nd;YAG y
TiS en modo
continuo

Laser multimodal

Ancho inhomogéneo

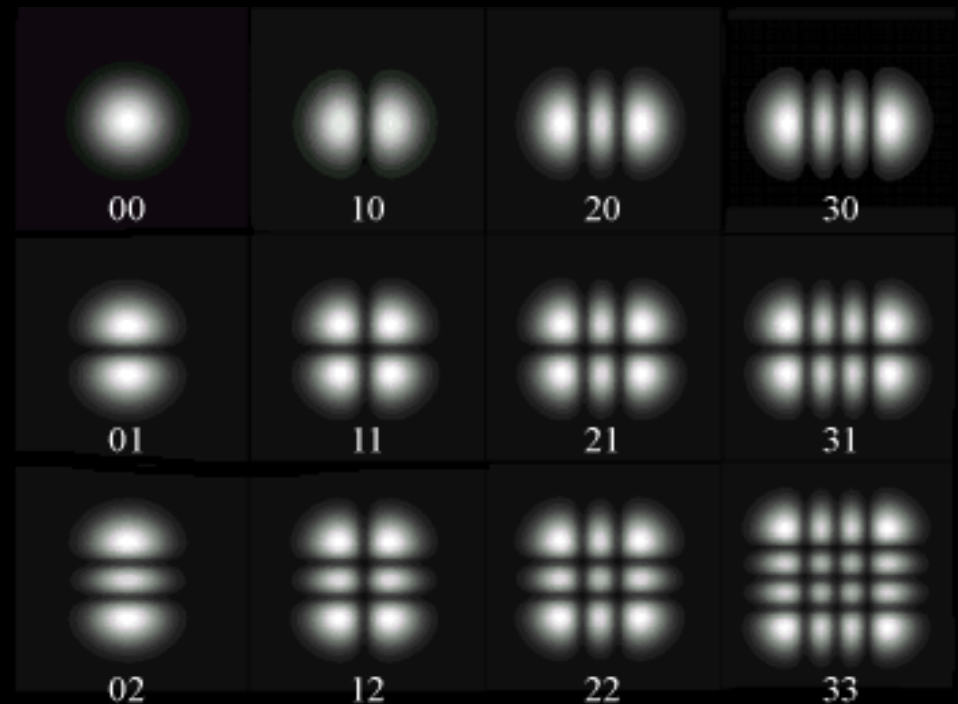


Hay emisión láser en cada modo de la cavidad a cuya frecuencia la ganancia alcanza su valor umbral

Ej: HeNe y CO₂

Modos espaciales transversales

Aunque muchos láseres producen haces de perfil Gaussiano, es posible obtener haces con perfiles espaciales más complicados, asociados con diferentes *modos transversales* del resonador.



Supresión de Modos espaciales transversales

Mediante la introducción de un *diafragma modal* se pueden eliminar los *modos transversales*. El campo de los modos transversales sufre difracción fuerte y no alcanza la condición umbral.

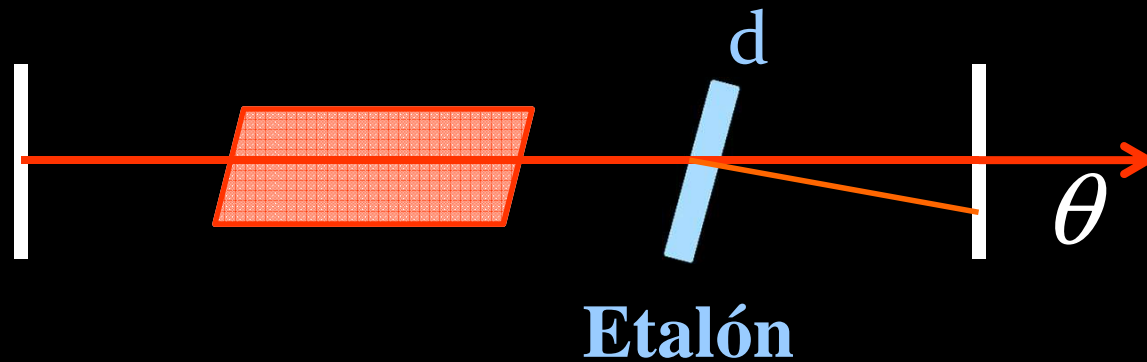


Control de la operación de un láser en modos longitudinales

- Láser de una sola línea (opera en pocos modos longitudinales vecinos). Espectro angosto.
- Láser monomodal: opera en un solo modo longitudinal
- Mode –locked laser: opera en un gran número de modos longitudinales. Las fases de los campos en diferentes modos están acopladas.



Láser monomodal



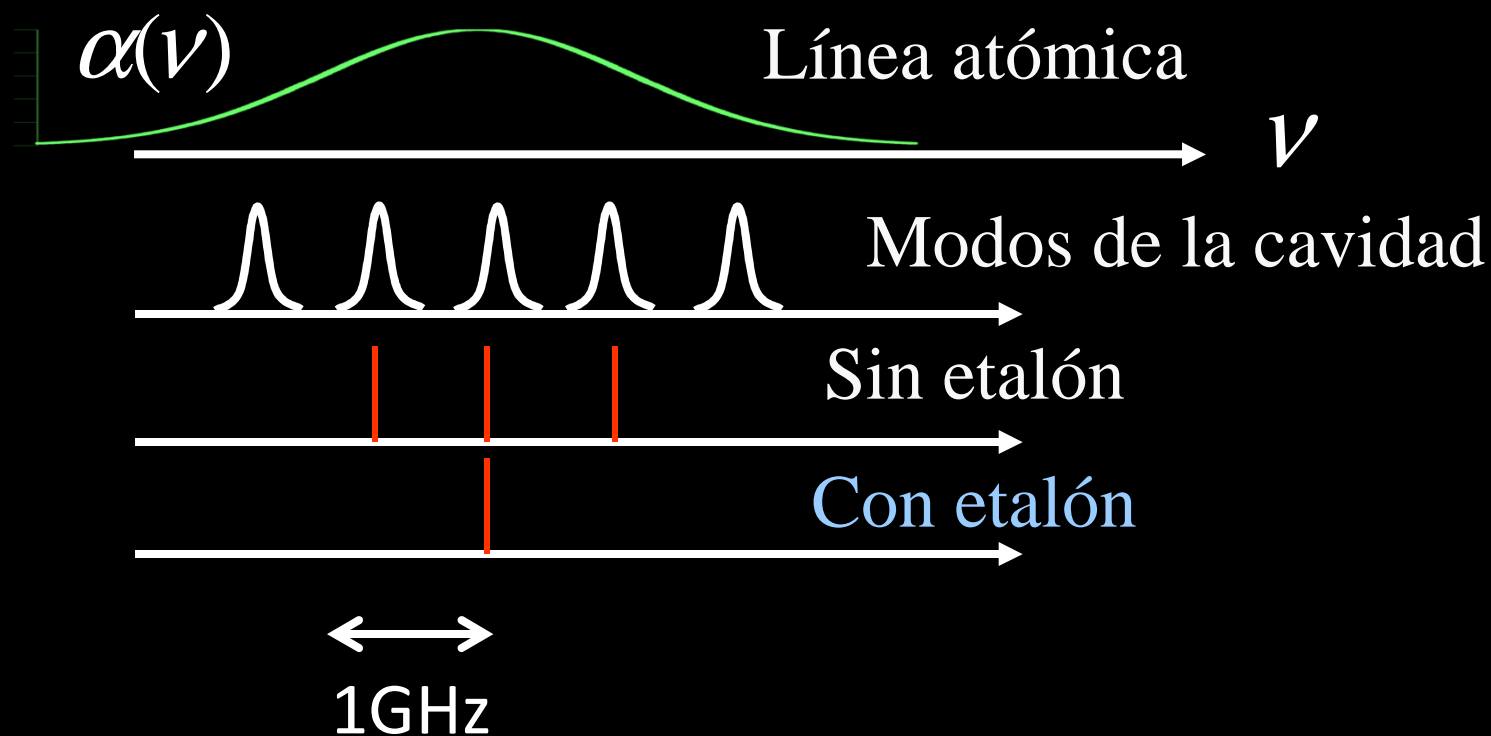
Selección de modos en un láser de HeNe ($\lambda=633\text{nm}$, $\nu=474\text{ THz}$) con un etalón.

El etalón disminuye el factor de calidad de la cavidad para las longitudes de onda:

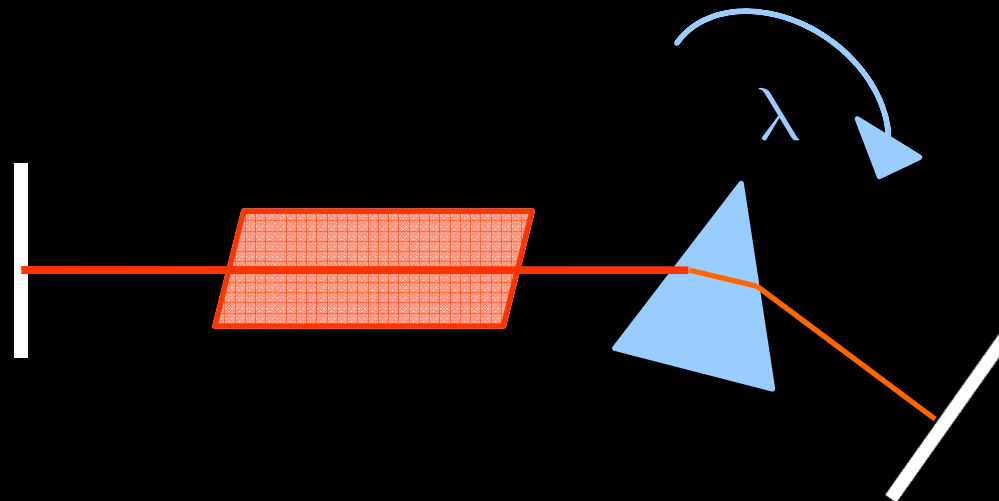
$$\lambda_s = \frac{2nd}{s} \cos \theta$$



Selección de modos: láser de HeNe



Láser sintonizable



Prisma

Rejilla de difracción

Filtro birrefringente



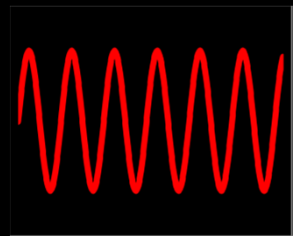
Generación de pulsos



CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA

CREOL@25
Celebrating 25 Years of Excellence in Optics and Photonics

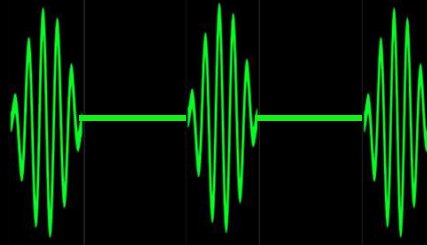
Comportamiento temporal



CW
onda
continua

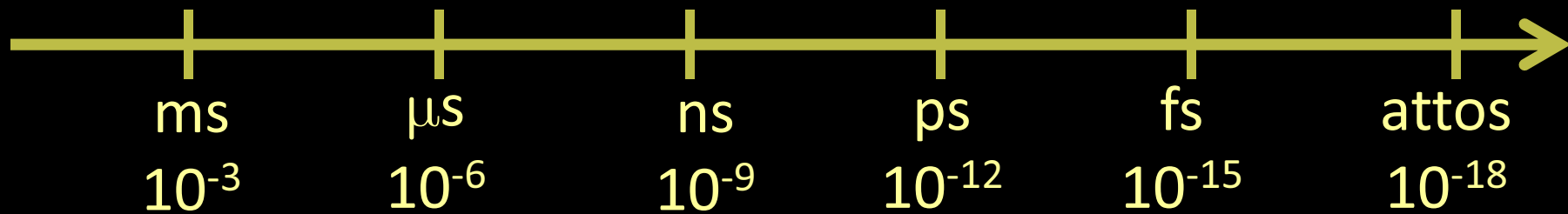
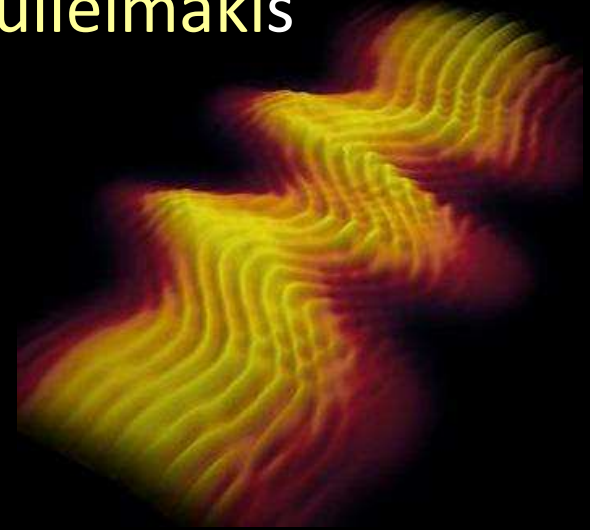


Tasa de
repetición



Duración del pulso

80 attosegundos, 2008
E. Goulielmakis



Pulsos gigantes:

Control del factor de calidad Q del resonador
Q-switching



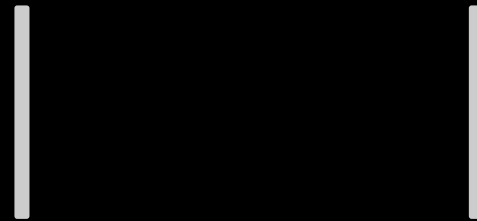
Q-Switching

- En un láser con Q-switch, el factor de calidad Q del resonador láser cambia con el tiempo. El factor de calidad es pequeño la mayor parte del tiempo y grande durante un tiempo corto.
- Durante el tiempo de bajo Q se colecta población en el nivel superior del láser.
- Durante el tiempo de alto Q la inversión de población disminuye fuertemente y se libera rápidamente su energía en un pulso láser.



Métodos de Q-Switching

Q-switch mecánico:



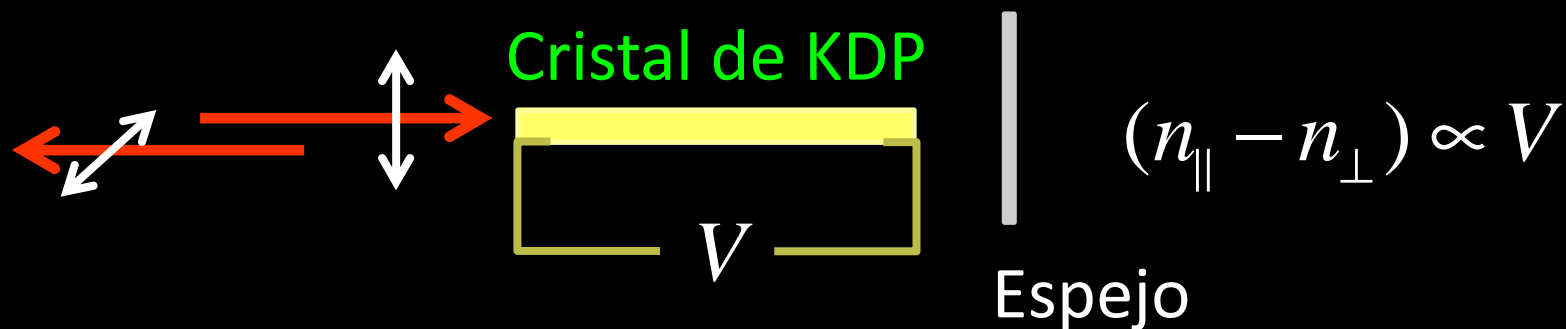
El reflector del láser rota , por ejemplo a 100 ciclos/s. El resonador tiene un alto factor de calidad cuando el espejo rotante este paralelo al espejo de salida.

Ejemplo: Pulsos de CO₂ de 100ns .



Métodos de Q-Switching

Q-switch electro-óptico por efecto Pockels:



Celda Pockels: Cristal isotrópico que se vuelve birrefringente cuando se le aplica un voltaje estático. Rotación de la polarización de la luz en $\pi/2$ cuando el haz atraviesa la celda dos veces (ida y vuelta).

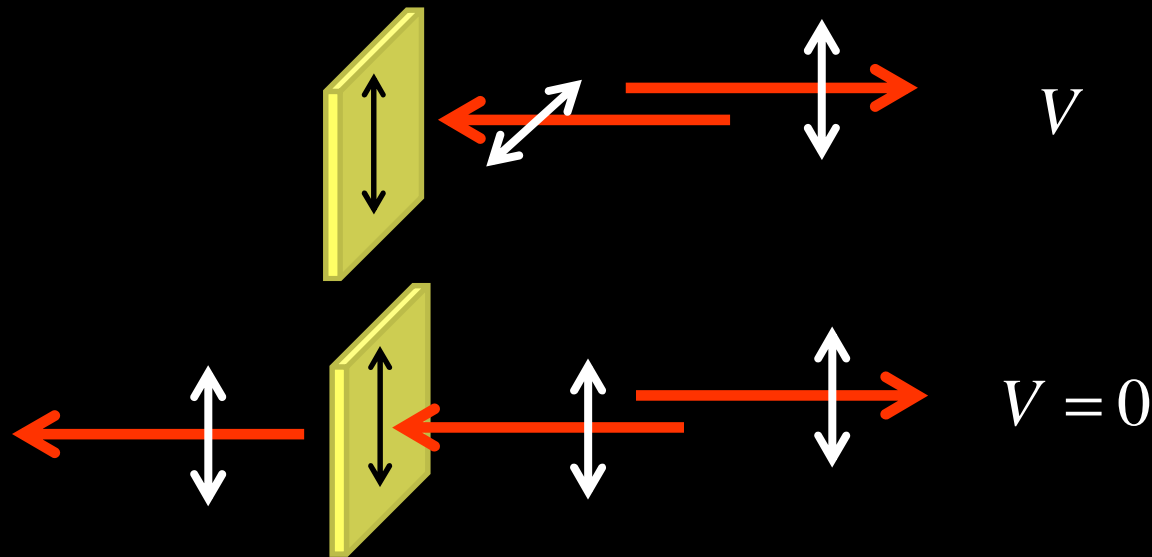
Cristal de KDP de 5mm x 5cm a 25kV.



Métodos de Q-Switching

Q-switch electro-óptico por efecto Pockels:

Un polarizador bloquea el haz al retorno. Cuando se apaga el voltaje se empieza a construir el pulso láser.



Métodos de Q-Switching

Q-switch electro-óptico por efecto Kerr:

Celda Kerr: un medio isotrópico se vuelve birrefringente cuando se aplica un campo eléctrico estático. La diferencia de índices de refracción para los rayos ordinario y extraordinario varía con el cuadrado del voltaje.

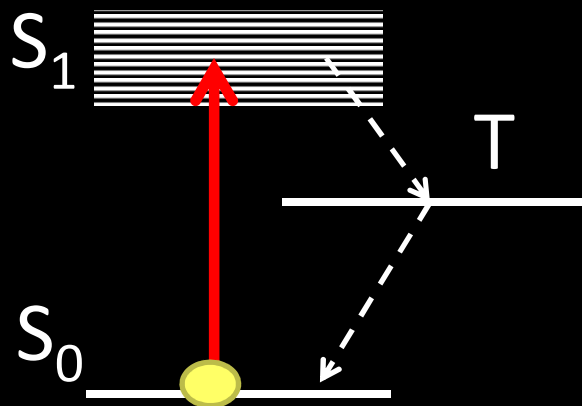
$$(n_{\parallel} - n_{\perp}) \propto V^2$$

Nitrobenceno líquido ($C_6H_5NO_2$) en celda de 1cm x 1cm a 10kV.

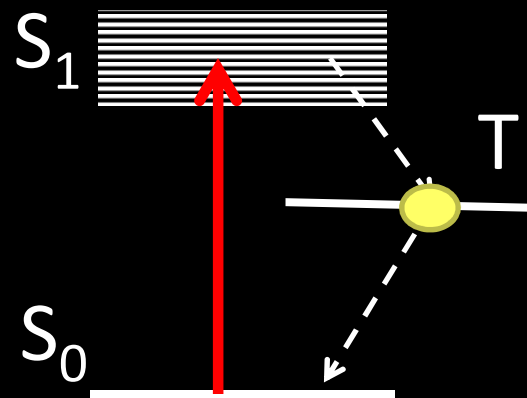
Métodos de Q-Switching

Q-switch : absorbedor saturable

Colorante en un solvente



Absorbedor



Transparente

Pulso láser



Trenes de Pulsos:

Sincronización de fase de los modos de un láser multimodal

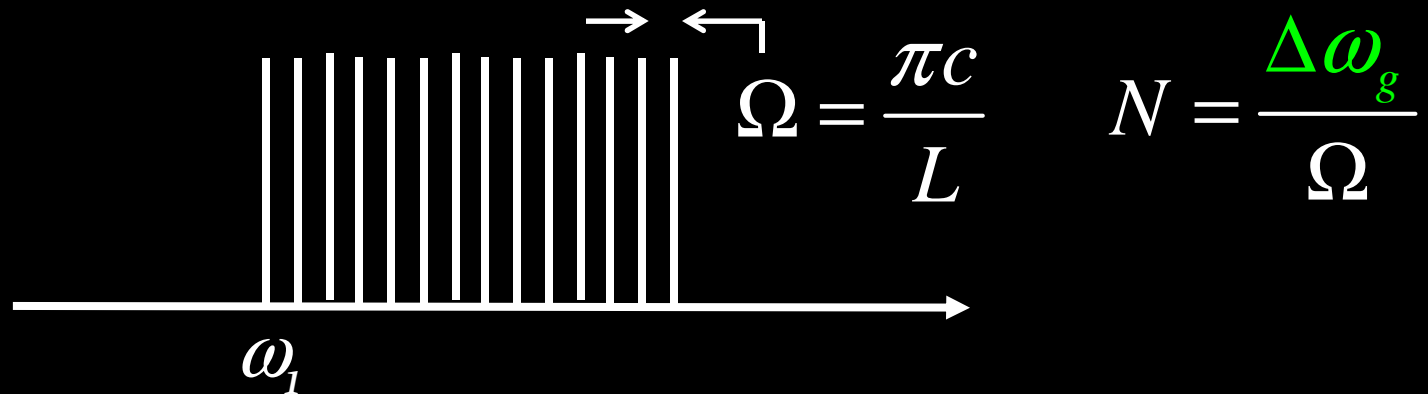
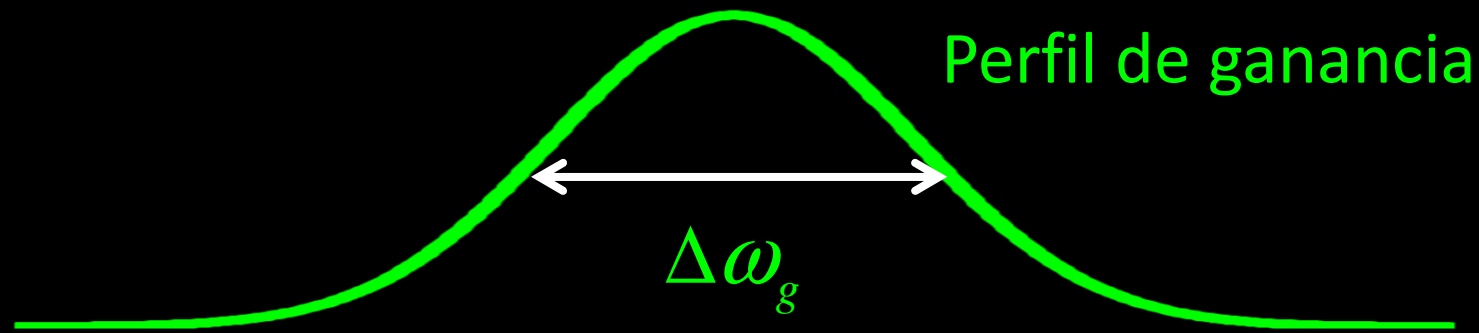
Mode-locking



Láser de fs



Mode locking



Peinilla de frecuencias ópticas



Mode locking

Campo instantáneo

$$E(t) = A \sum_{s=0}^{N-1} e^{i(\omega_1 + s\Omega)t + \varphi_s}$$

Sin acoplamiento entre los modos, los campos de los diferentes modos tienen diferentes fases (fluctuantes en el tiempo):

- El campo fluctúa fuertemente
- El láser emite radiación de ancho de banda $\Delta\omega_g$
- La intensidad promedio de la radiación es $I_{inc} = \frac{c\epsilon_0 NA^2}{2}$



Mode locking

Mediante mode locking los modos se sincronizan y

oscilan con la misma fase $\varphi_s(t) = \varphi_s = \varphi$

Fijando la escala de tiempo podemos hacer $\varphi_s(0) = \varphi_s = 0$

$$E(t) = A \sum_{s=0}^{N-1} e^{i\omega_1 t} e^{is\Omega t} = A e^{i\omega_1 t} \sum_{s=0}^{N-1} e^{is\Omega t} = A e^{i\omega_1 t} \frac{1 - e^{iN\Omega t}}{1 - e^{i\Omega t}}$$

Definimos la frecuencia portadora

$$\omega_c = \omega_1 + \frac{N-1}{2} \Omega$$



Mode locking

$$E(t) = Ae^{i\omega_c t} \frac{\text{sen}(N\Omega t / 2)}{\text{sen}(\Omega t / 2)}$$

$$\text{Re}[E(t)] = A(t) \cos \omega_c t$$

$$A(t) = A \frac{\text{sen}(N\Omega t / 2)}{\text{sen}(\Omega t / 2)}$$

Máximos cuando $\frac{\Omega t}{2} = n\pi$

$$T_n = \frac{2n\pi}{\Omega} = \frac{2L}{c} n, \quad n = 0, 1, 2, \dots$$

La distancia temporal T entre pulsos consecutivos es igual al tiempo de ida y vuelta de la radiación en el resonador

Mode locking

Campo eléctrico (amplitud)

Intensidad

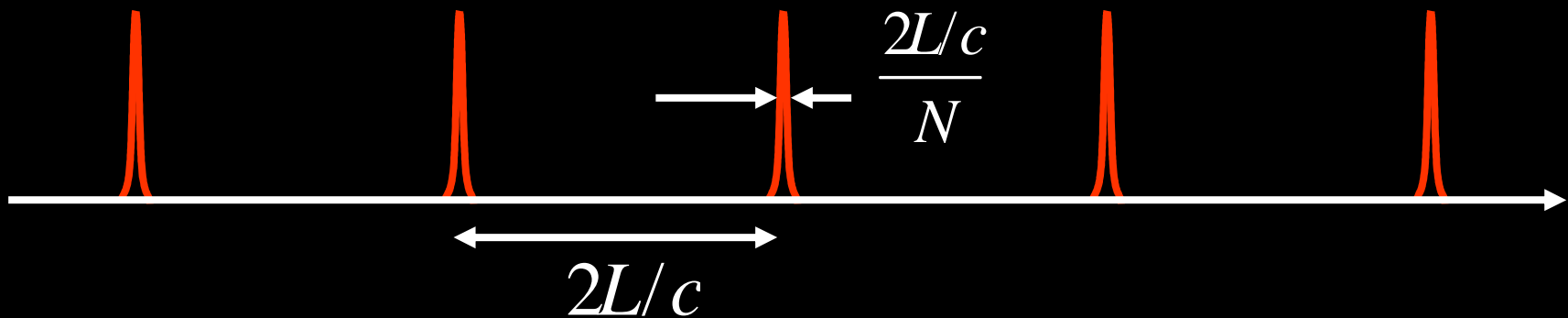


Mode Locking: pulsos de picosegundos

- Técnica empleada para convertir la potencia fluctuante de salida de un láser en un tren de pulsos cortos y regularmente espaciados
- El intervalo entre los pulsos es igual al tiempo de tránsito de ida y vuelta de la luz en la cavidad láser, $2L/c$.
- La duración de los pulsos individuales decrece con el número de modos de diferente frecuencia que contribuyen a formar el tren de pulsos.



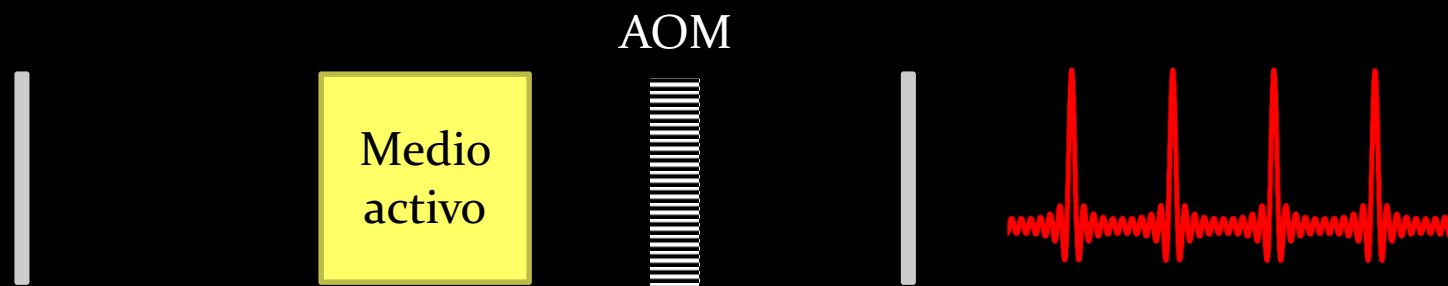
Salida de un láser Mode-Locked



N: número de modos individuales que contribuyen a la formación del tren de pulsos

Sincronización activa de modos

Modulador acusto-óptico (AOM)



Una onda ultrasónica (f_s) modula el índice de refracción del cristal. Cada medio periodo del campo ultrasónico la modulación desaparece por un instante. En ese instante la luz pasa por el modulador sin pérdidas por difracción. Requiere: $2f_s=1/T$. Para $L=1.5\text{m}$, $1/T=100\text{MHz}$, $f_s=50\text{MHz}$.

Sincronización pasiva de modos

Absorbedor saturable

Sincronización fundamental en vez de armónica

Saturación
del
absorbedor



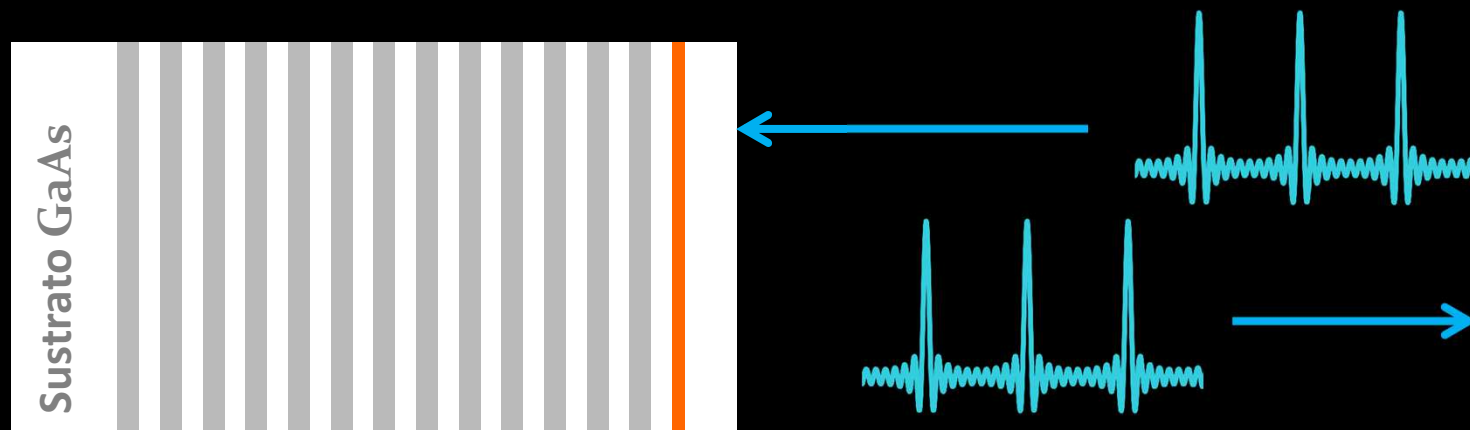
Tiempo

<http://www.rp-photonics.com/>



Sincronización pasiva de modos

SESAM (Semiconductor Saturable Absorber Mirror)



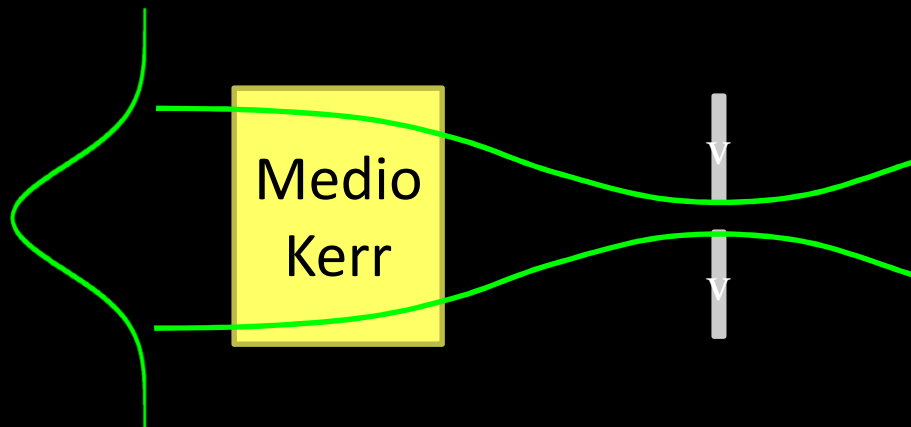
Reflector de Bragg
GaAs/AlAs

Absorbedor QW de InGaAs
Transición interbanda
saturable (0.1 ps)
Pulsos de 30ps a 30fs



Control de la dispersión

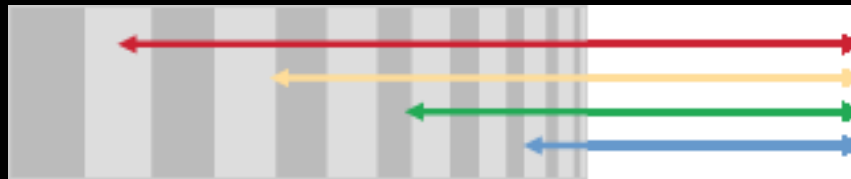
Lente Kerr $n(x, y, t) = n_0 + n_2 I(x, y, t)$



Un láser intenso produce autoenfoco de la radiación por efecto Kerr. Solo existe cuando pasa el pulso. La dispersión temporal del pulso en un viaje de ida y vuelta es compensada por la lente Kerr.

Generación de pulsos de fs

Láser mode-locked de TiS con espejo dieléctrico **chirped** para compensar la dispersión cromática introducida por el medio activo.



Luz con longitud de onda mas larga penetra una mayor longitud dentro del espejo: **dispersión anómala**.

Pulsos de 5-10fs. Tasa de repetición 50-500MHz

Mode-Locking:

- La duración de un pulso individual mode-locked puede ser muy pequeña (hasta 0.1 ps)
- Procesamiento posterior (compresión) de los pulsos mode-locked puede acortar la duración de los mismos a pocos femtosegundos (10^{-15} s).
- Tales pulsos pueden irradiar pequeños blancos con potencias muy elevadas por muy cortos intervalos de tiempo.



Pulsos ultracortos de luz láser

80 attosegundos 2008

Grupo de Ferenc Krausz, Max Planck Institute for
Quantum Optics

E. Goulielmakis (Premio IUPAP 2010)

R. Kienberger (Premio ICO 2010)

[Attosecond laser - the world's fastest laser](#)

“Ver” el movimiento de átomos y sus electrones
durante reacciones químicas.

<http://www.youtube.com/watch?v=wOBijH5CjY4>

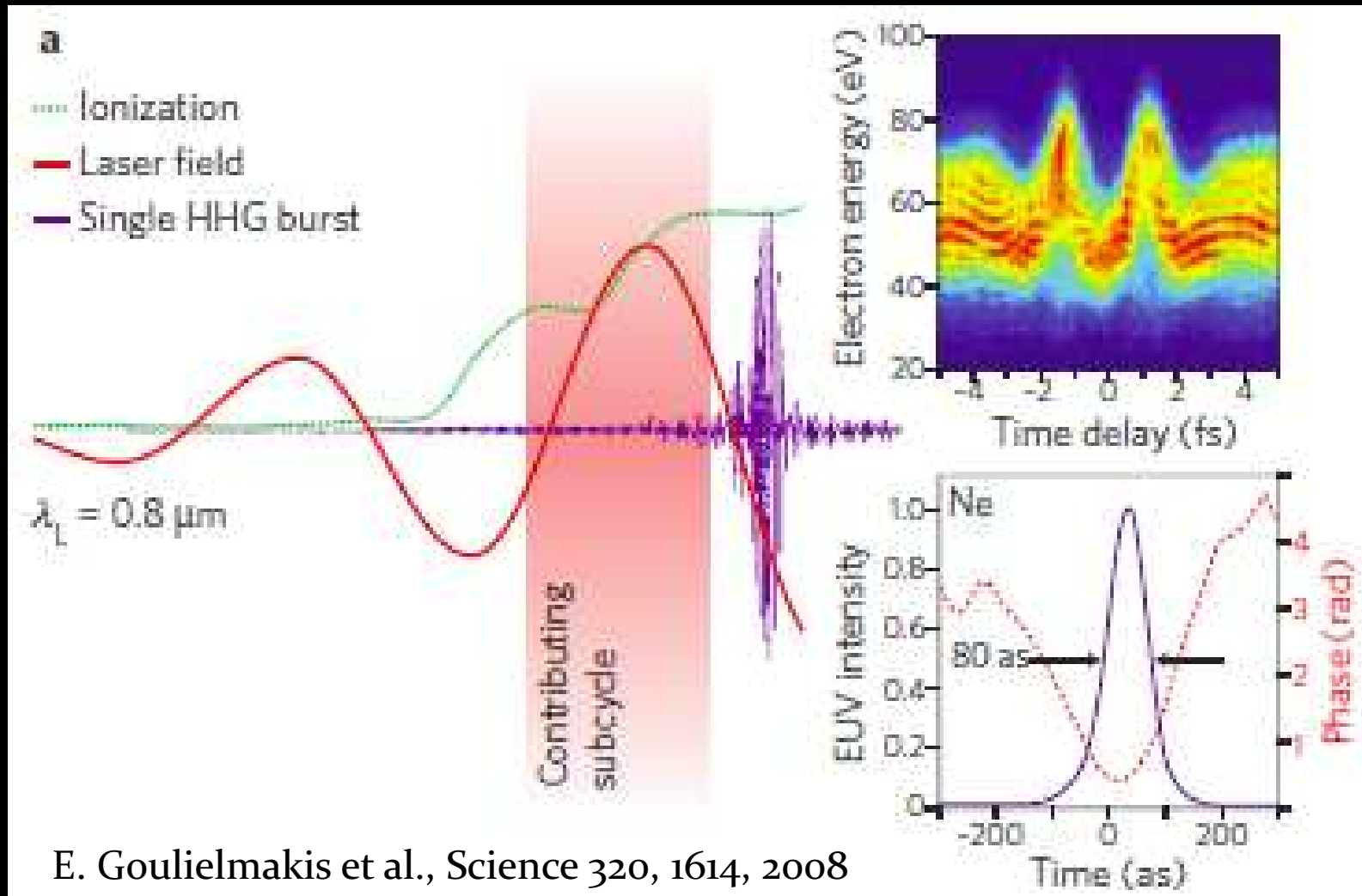




Generación de pulsos de as

Un pulso intenso de 2.5 fs es enfocado en una cámara de gas noble. El campo fuerte ioniza los electrones, los acelera y frena durante fs.





E. Goulielmakis et al., Science 320, 1614, 2008

Generando alta potencia

CPA: Chirped pulse amplification
Amplificación de pulsos *chirped*

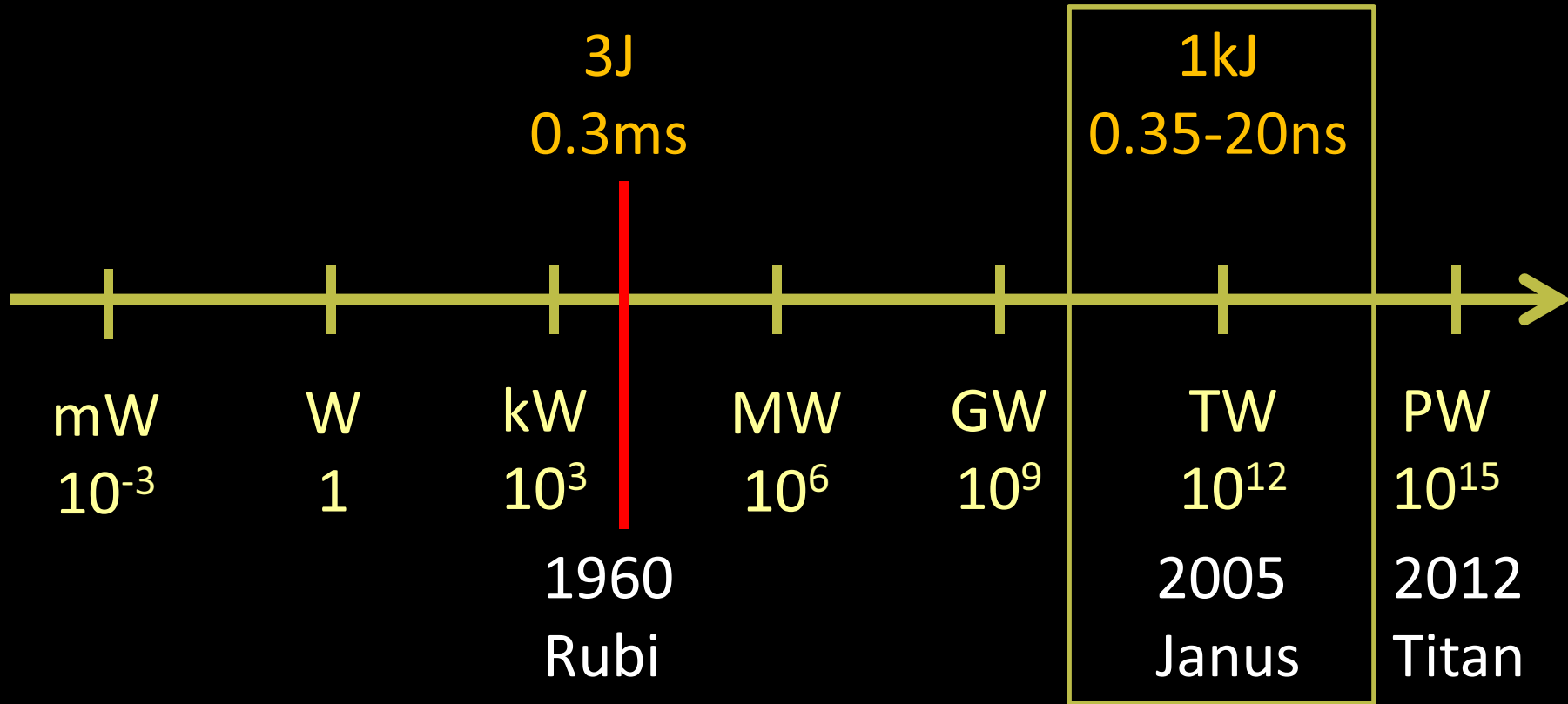


Alta frecuencia

Baja frecuencia



Energía, potencia pico



Potencia total
generada en USA



1963 C. G. B. Garrett, Bell Labs

1:31-2:22

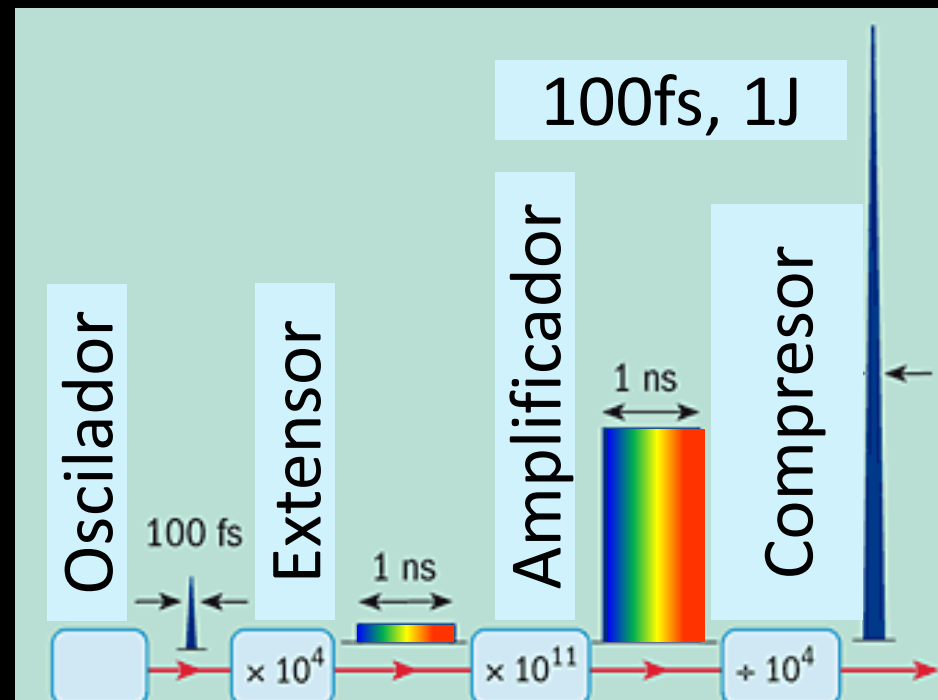
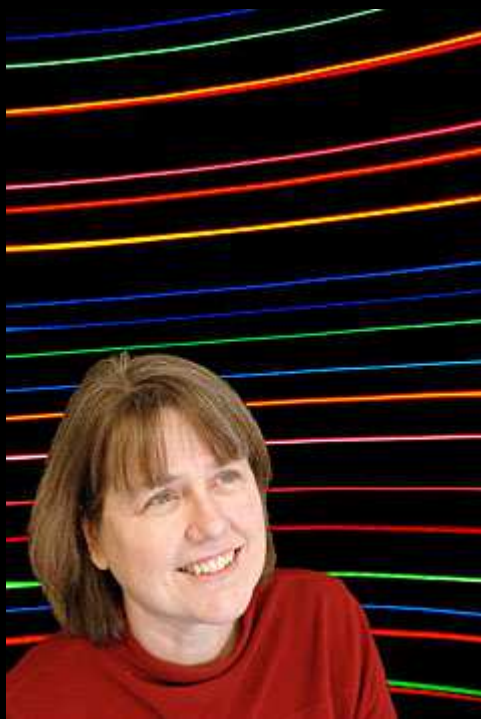


CREOL | The College of Optics & Photonics
UNIVERSITY OF CENTRAL FLORIDA

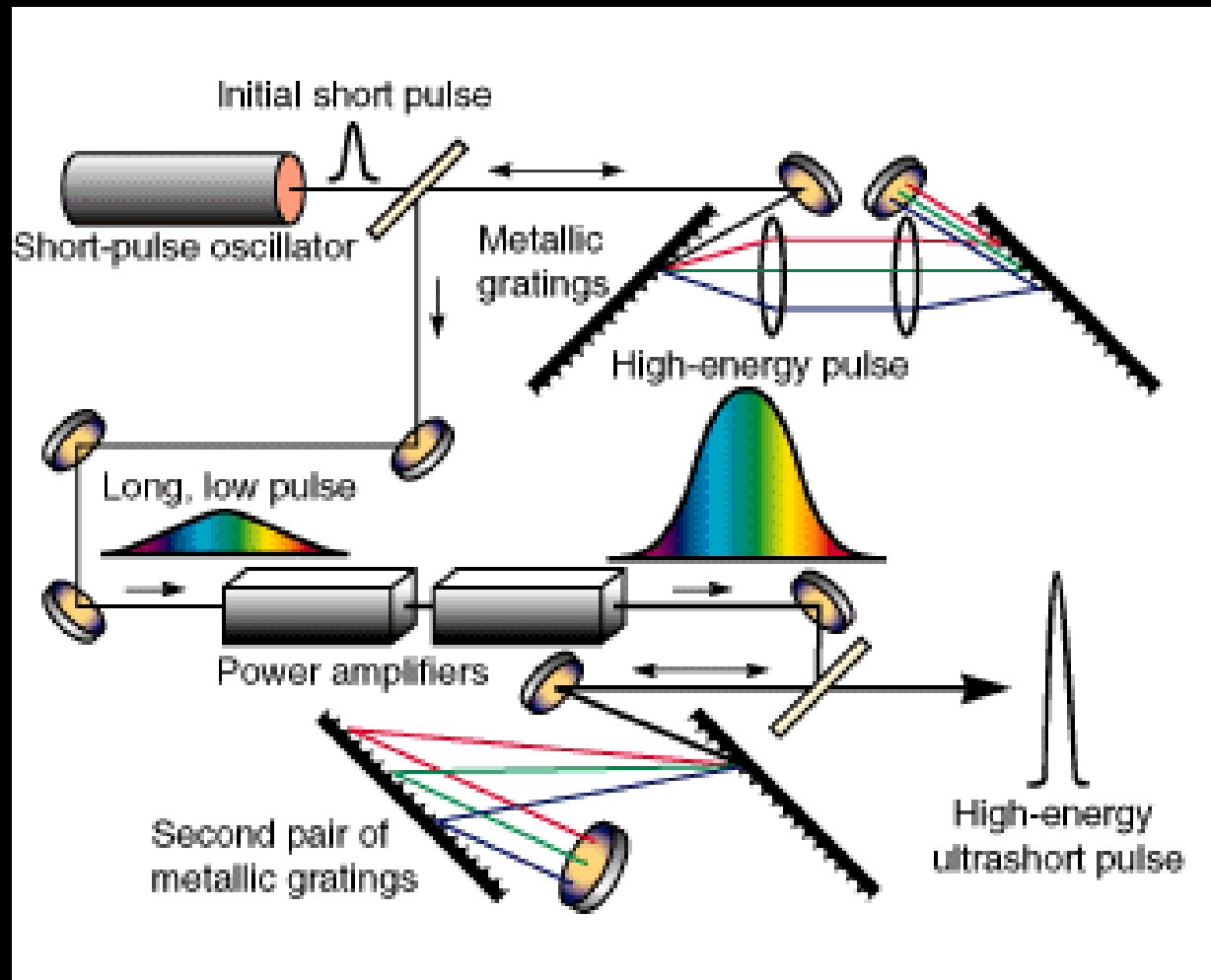


Amplificación de pulsos *chirped*

Donna Strickland, G. Mourou. *ICO Newsletter 85, Oct. 2010*



Pulsos de Petawatt (0.5ps) para Fusión nuclear



<https://www.llnl.gov/str/Petawatt.html>

Janus :

2 láseres Nd:YAG
independientes.

$\lambda=1.053 \mu\text{m}$ (1kJ)

Segundo armónico:
 $\lambda/2=527 \text{ nm}$ (0.5kJ)



<https://jlf.llnl.gov/html/facilities/titan/titan.html#>

Tasa de repetición: 2/hora

Vulcan (UK)

Cadena de
amplificadores de
Nd:glass
8 rayos, 3 blancos
Intensidad (ultra-
focalizado):
 10^{21} Watt/cm²
 $\lambda=1.054 \mu\text{m}$



<http://www.clf.rl.ac.uk/Facilities/Vulcan/Vulcan+laser/12250.aspx>

2.6kJ en pulsos largos (ns)

PW potencia pico en pulsos cortos (500fs) using CPA

Titan : PetaWatt 10^{15} Watt



2 láseres Nd:YAG

<https://jlf.llnl.gov/html/facilities/titan/titan.html#>

Independientes, uno del láser Janus (pulso largo) y uno de pulso corto (1-10ps) y energía hasta de 250 J, dependiendo de la duración del pulso.

Intensidad focalizado a $1\mu\text{m}$: hasta 10^{21} W/cm²

Callisto:

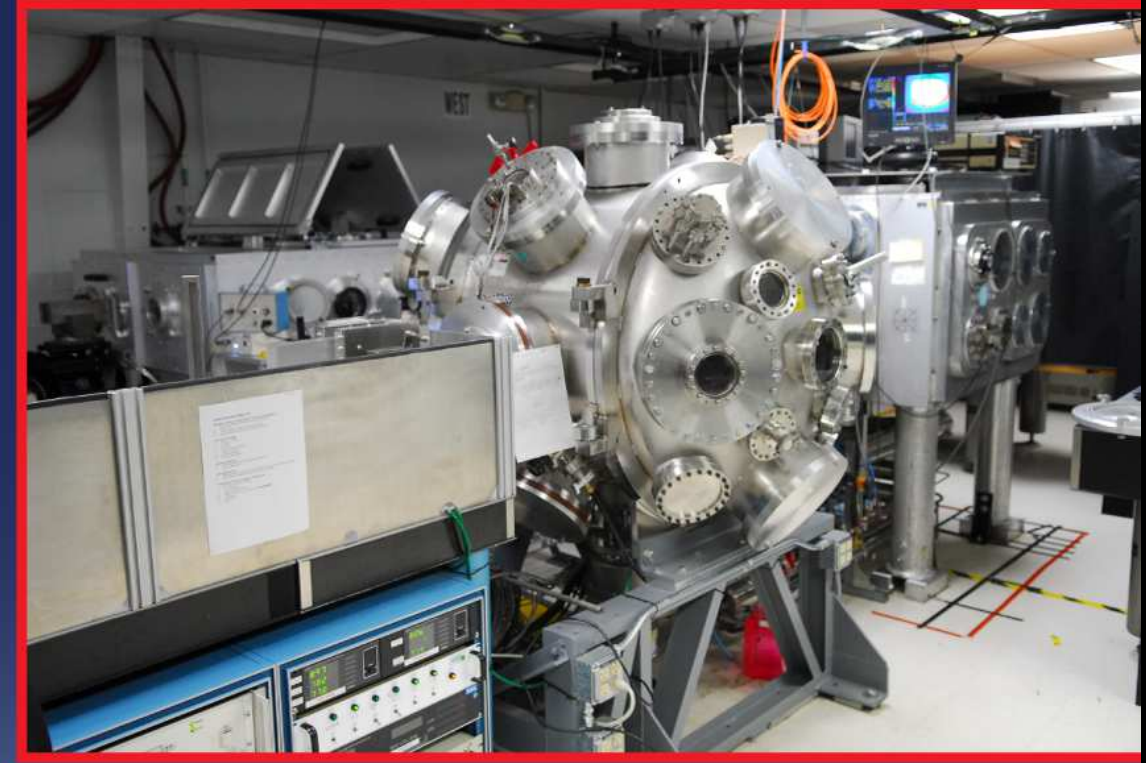
Láser de TiS

$\lambda=800\text{nm}$

180 mJ

Tasa de repetición:

10Hz



+ un láser Janus:

<https://jlf.llnl.gov/html/facilities/titan/titan.html#>

Pulsos individuales de 12J. Pulsos > 60 fs, 200 TW.

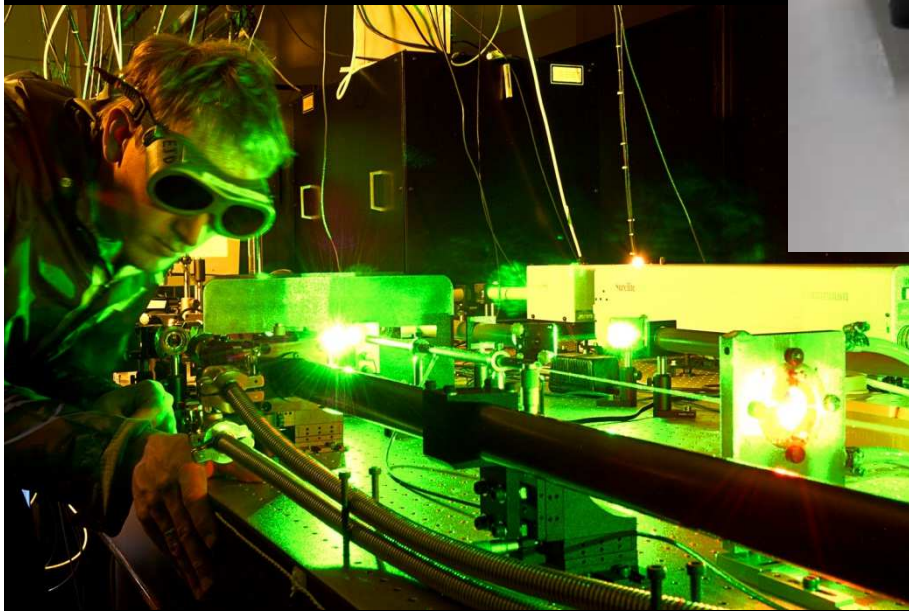
Intensidad focalizado en el blanco: 10^{21} W/cm².



Astra (UK):

Cadena de Ti:S

Bombeo: láser verde



Astra Gemini:

2 rayos c/u 15J, 30fs,
p.p. 0.5 PW, Intensidad
focalizado: 10^{22}W/cm^2

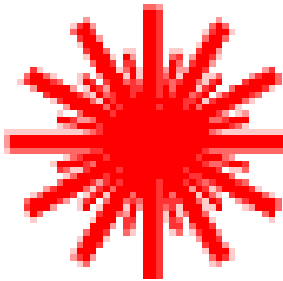
<http://www.clf.rl.ac.uk/Facilities/Astra/Astra+Laser/12256.aspx>

Comentario sobre seguridad láser

- No apunte hacia personas con el láser
- Este siempre consciente de la trayectoria del haz y sus reflexiones en relación con Ud. y otros.
- No opere el láser sin blindaje eléctrico apropiado: los voltajes de operación de algunos láseres pueden ser letales.



DANGER

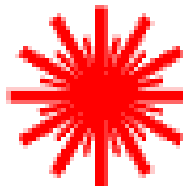


RADIACION LASER VISIBLE y/o INVISIBLE.

**Evite exponer los ojos o la piel a radiacion
directa o reflejada**



DANGER



No mire el rayo laser con
el ojo que le queda!

