



Ayuntamiento
de **Ávila**
Del Rey - De los Leales - De los Caballeros



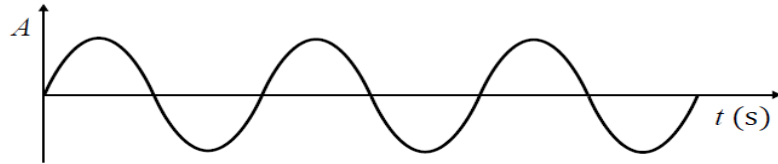
Proyecto para la **C**onstrucción e Implementación de un **R**eloj de red **Ó**ptica de **E**stroncio – Cadena de frecuencias ópticas –

Héctor Álvarez Martínez, Carmen Vélez López, Juan M. González Sánchez y
Héctor Esteban Pinillos

Real Instituto y Observatorio de la Armada

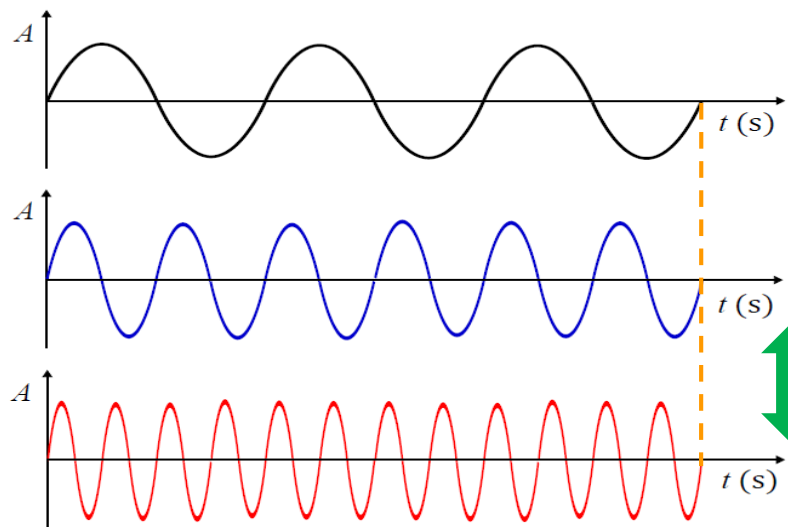
Ávila, 27 de septiembre de 2022

Motivación

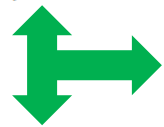


?

Motivación

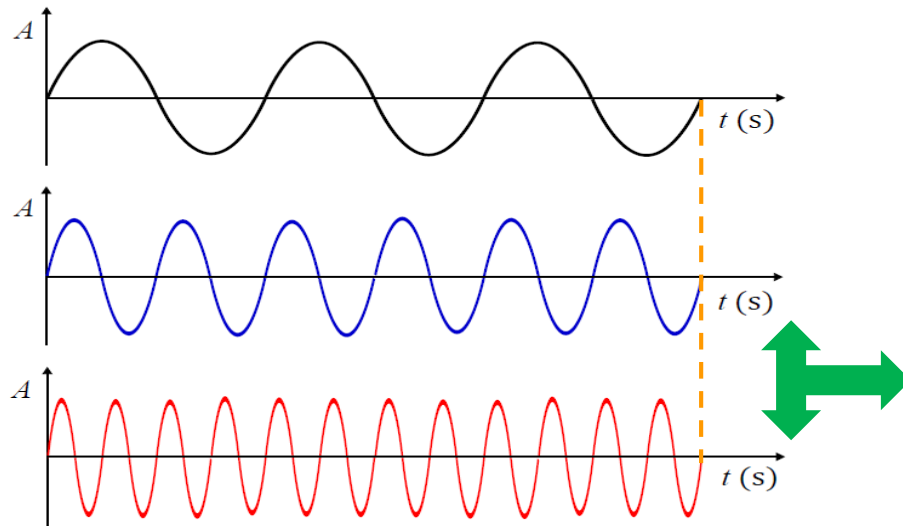


?



Frecuencia de referencia

Motivación

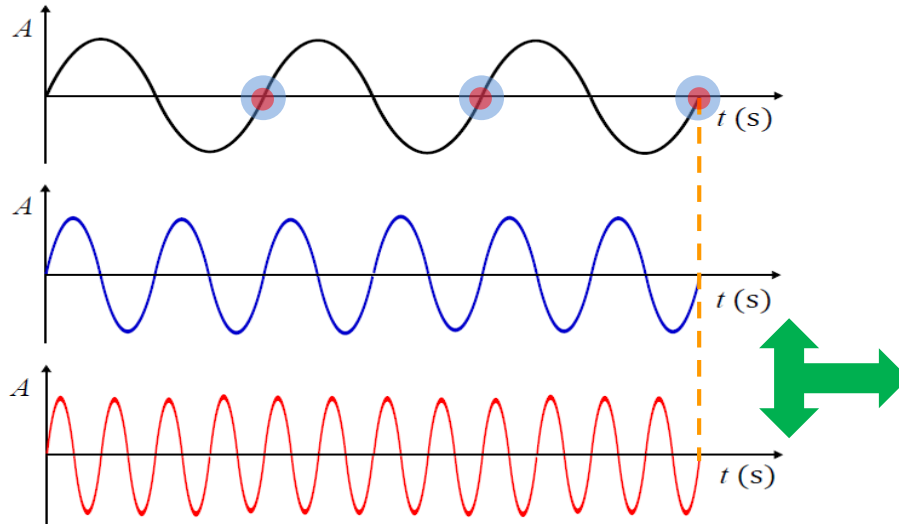


3 oscilaciones en 1 segundo:

frecuencia = 3 Hz

Frecuencia de referencia

Motivación → Hacia frecuencias más altas



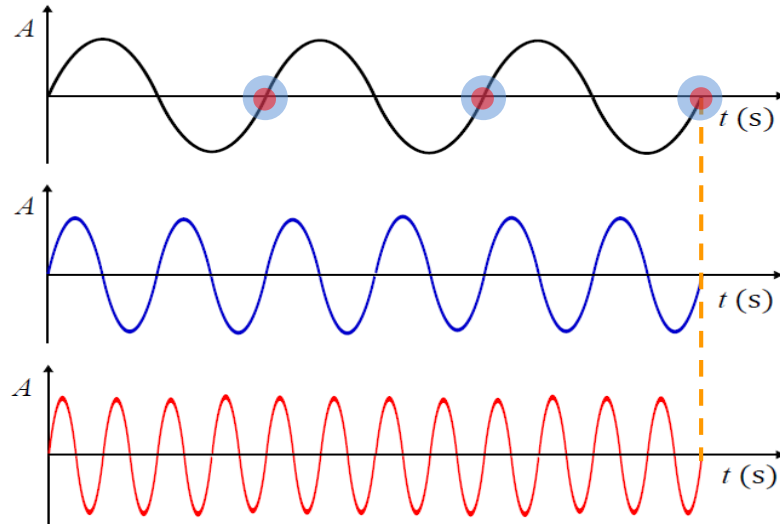
3 oscilaciones en 1 segundo:

$$\text{frecuencia} = 3 \text{ Hz} \pm u_B$$

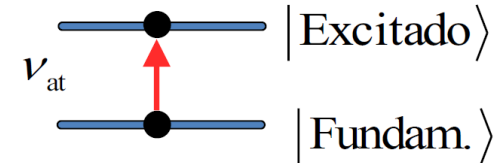
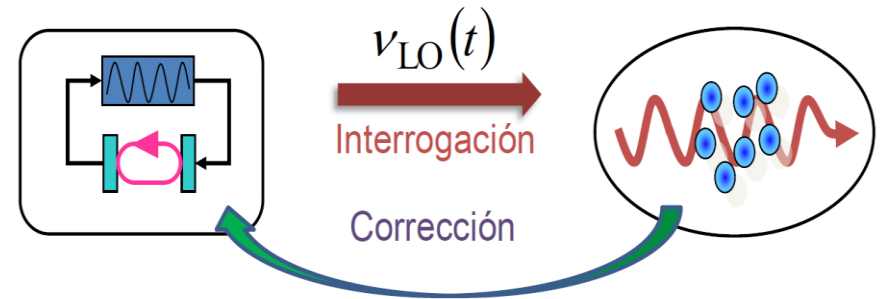
Frecuencia de referencia

Exactitud de la medida

Motivación → Relojes atómicos ópticos

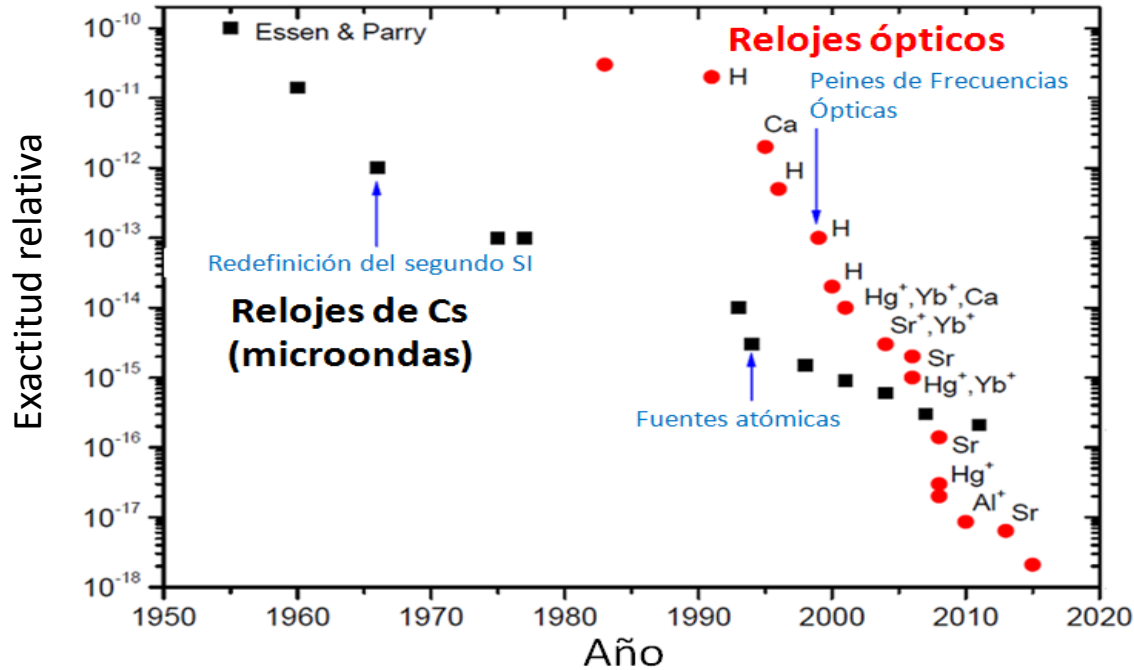


Reloj atómico:



Motivación → Evolución patrones de frecuencia

Evolución patrones de frecuencia

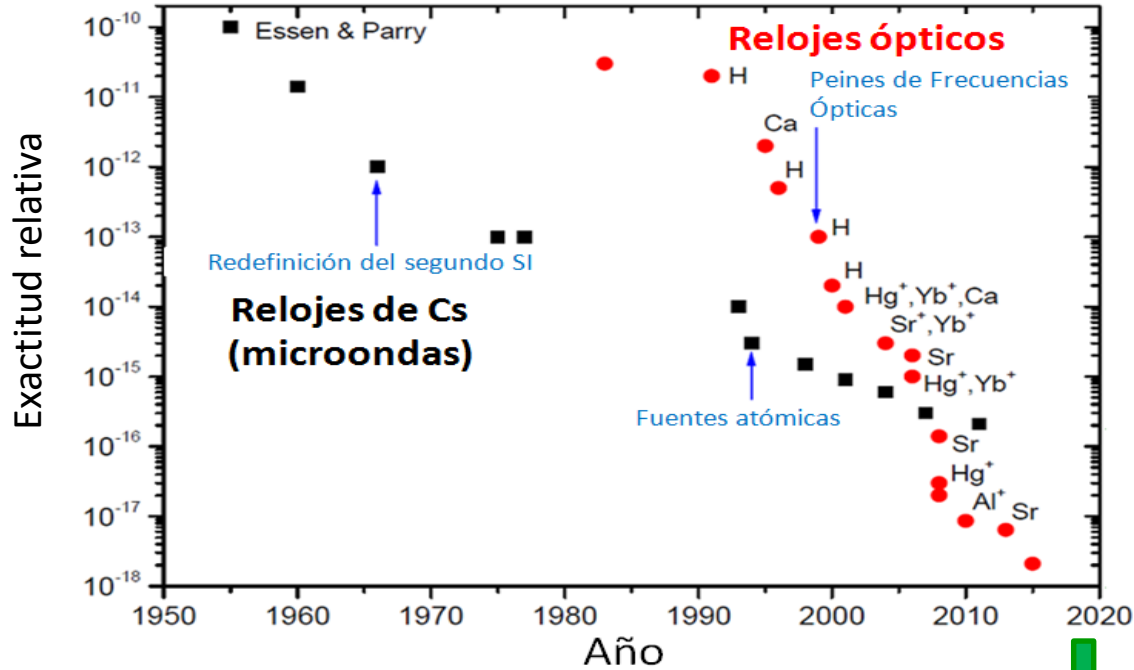


Cada 10 años:

- Microondas: **Un orden**
- Ópticos: **Dos órdenes**

Motivación → El proyecto CIROEs

Evolución patrones de frecuencia



Cada 10 años:

- Microondas: **Un orden**
- Ópticos: **Dos órdenes**

→ **CIROEs**



- ✓ El proyecto CIROEs
 - ✓ Justificación
 - ✓ Presentación del proyecto

- ✓ Cadena de frecuencias ópticas
 - ✓ Peine de frecuencias
 - ✓ Cavidades ópticas
 - ✓ Comparación directa con el máser de H
 - ✓ Eliminación deriva frecuencia referencia



- ✓ **El proyecto CIROEs**
 - ✓ **Justificación**
 - ✓ Presentación del proyecto

- ✓ **Cadena de frecuencias ópticas**
 - ✓ Peine de frecuencias
 - ✓ Cavidades ópticas
 - ✓ Comparación directa con el máser de H
 - ✓ Eliminación deriva frecuencia referencia

CIROEs → Justificación



CIROEs: **C**onstrucción e **I**mplementación de un **R**eloj de red **Ó**ptica de **E**stroncio

CIROEs → Justificación (rango óptico)



CIROEs: **C**onstrucción e **I**mplementación de un **R**eloj de red **Ó**ptica de **E**stroncio

CIROEs → Justificación (tecnología)



CIROEs: **C**onstrucción e **I**mplementación de un **R**eloj de red **Ó**ptica de **E**stroncio



Átomos neutros

Iones

Captura:

Red óptica (trampa dipolar)

Trampas tipo Paul o Penning

Densidad (N):

10^4 ●

1 - 10

Factor de calidad (Q):

10^{14} ●

10^{14}

Tiempo de interrogación:

Limitado ●

Muy alto

Estabilidad:

$\sigma_y(\tau) = 10^{-17} / \sqrt{\tau}$ ●

$\sigma_y(\tau) = 10^{-15} / \sqrt{\tau}$

Incertidumbre:

10^{-18} ●

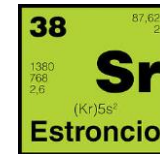
10^{-18}

CIROEs → Justificación (especie química)



CIROEs: **C**onstrucción e **I**mplementación de un **R**eloj de red **Ó**ptica de **E**stroncio

- ¿Abundancia en la naturaleza? ¿su presión de vapor es razonable?
- ¿Se puede enfriar mediante láser con una longitud de onda accesible?
- ¿Tiene una transición reloj permitida (<1 Hz) con una longitud de onda accesible?
- ¿Es poco sensible a la Radiación de Cuerpo Negro?
- ¿Tiene una longitud de onda mágica (red óptica)?





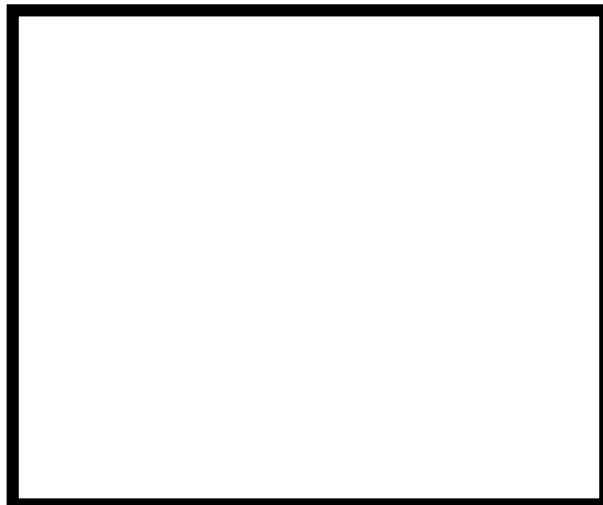
- ✓ **El proyecto CIROEs**
 - ✓ Justificación
 - ✓ **Presentación del proyecto**

- ✓ **Cadena de frecuencias ópticas**
 - ✓ Peine de frecuencias
 - ✓ Cavidades ópticas
 - ✓ Comparación directa con el máser de H
 - ✓ Eliminación deriva frecuencia referencia

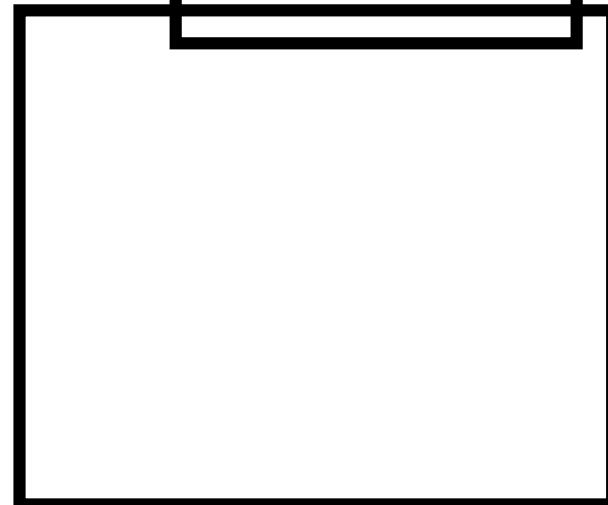
Sección de Hora → Laboratorio de óptica



- 1.5 años



-1 año



Hoy

CIROEs → Laboratorio de óptica



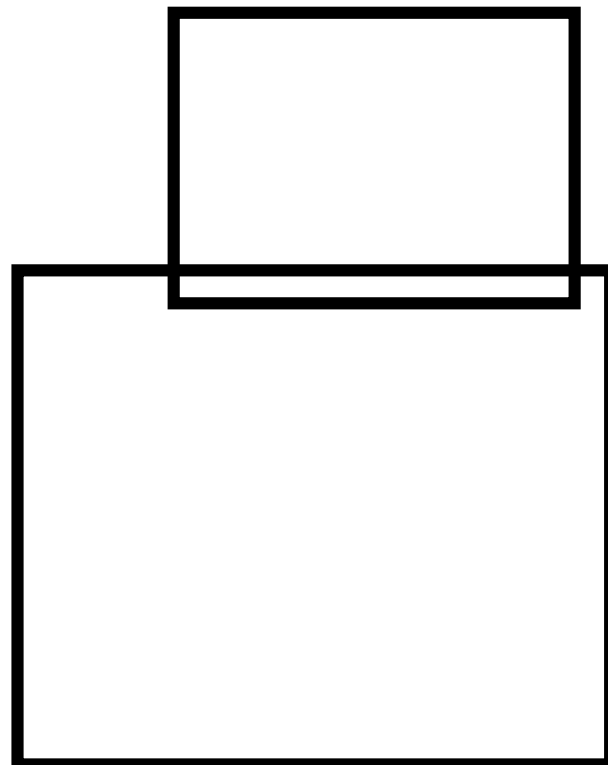
Sección de Hora → Laboratorio de óptica



- 1.5 años



-1 año



Hoy

Sección de Hora → Laboratorio de óptica



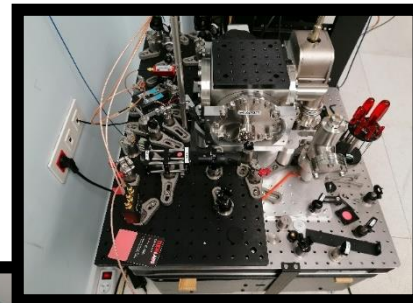
- 1.5 años



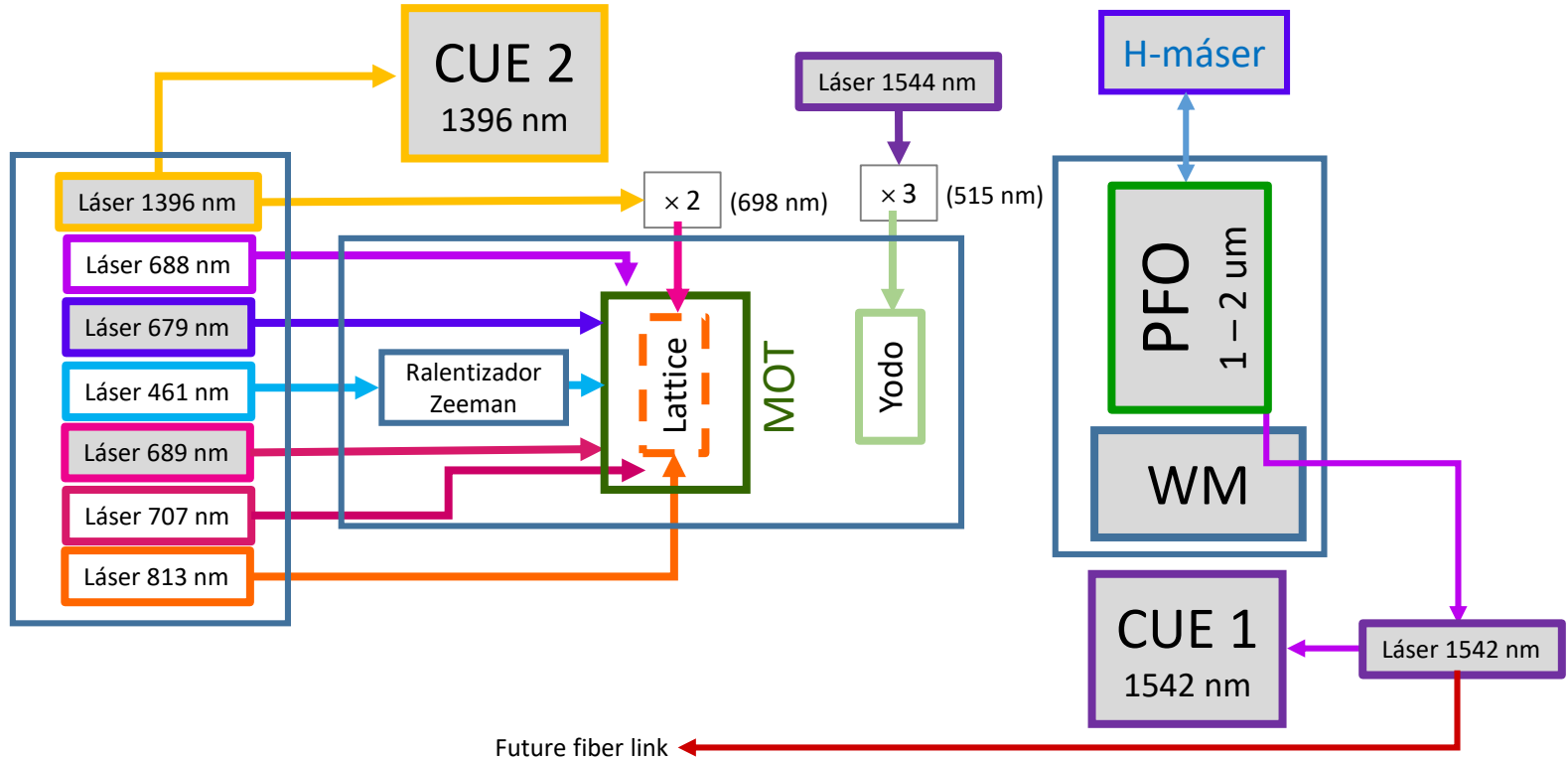
-1 año



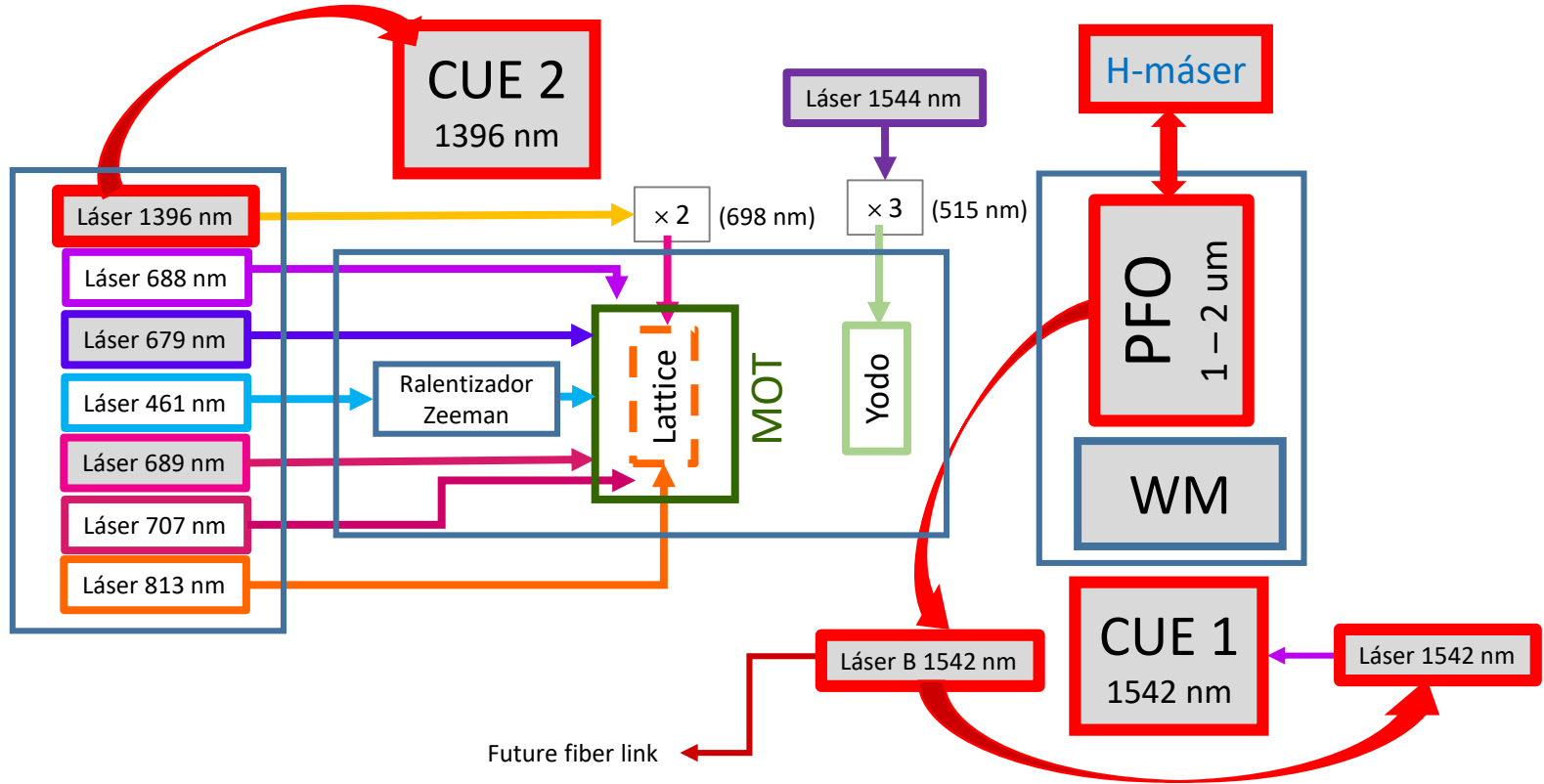
Hoy



CIROEs → Esquema



CIROEs → Esquema → Cadena de frecuencias

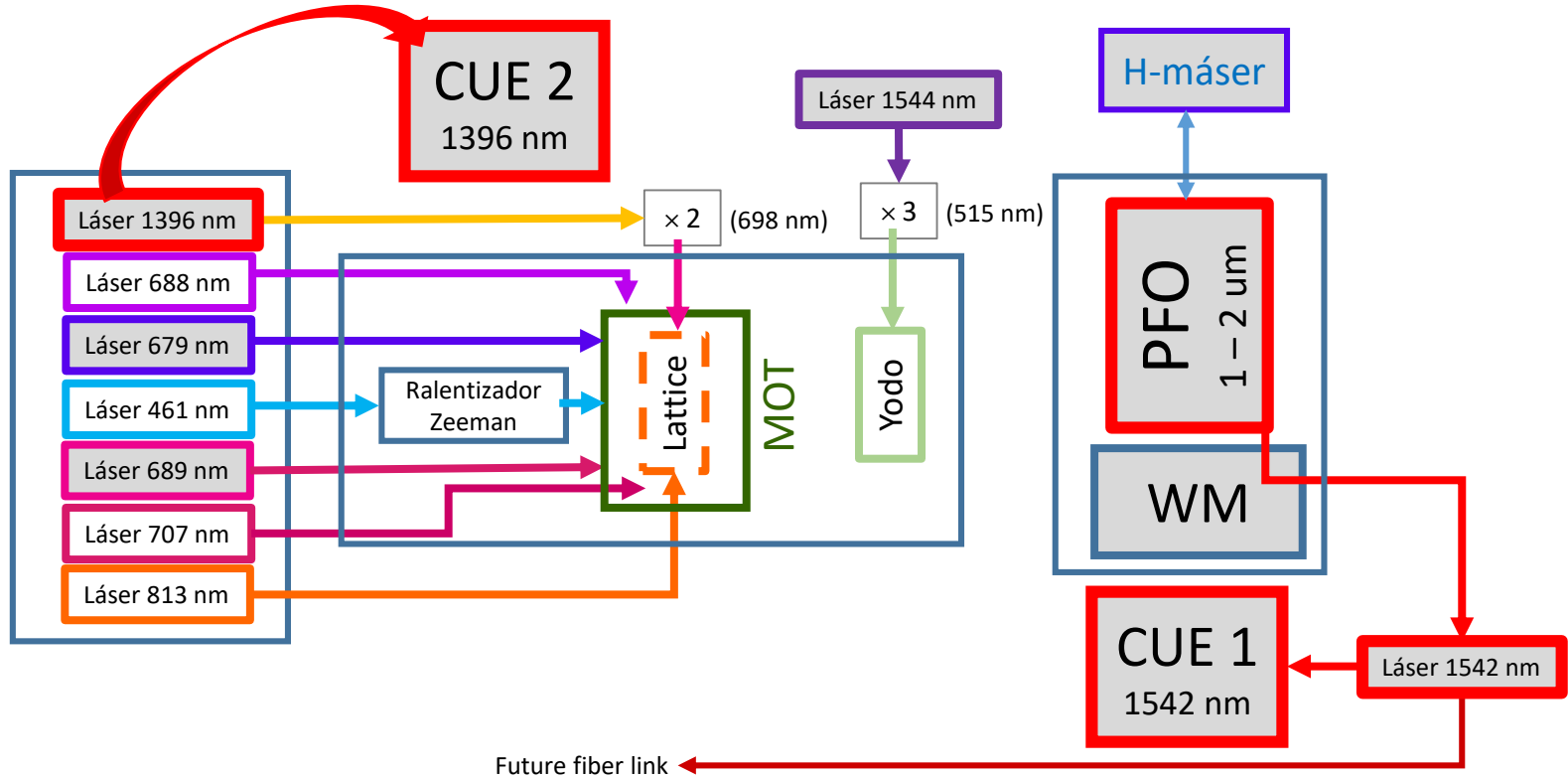




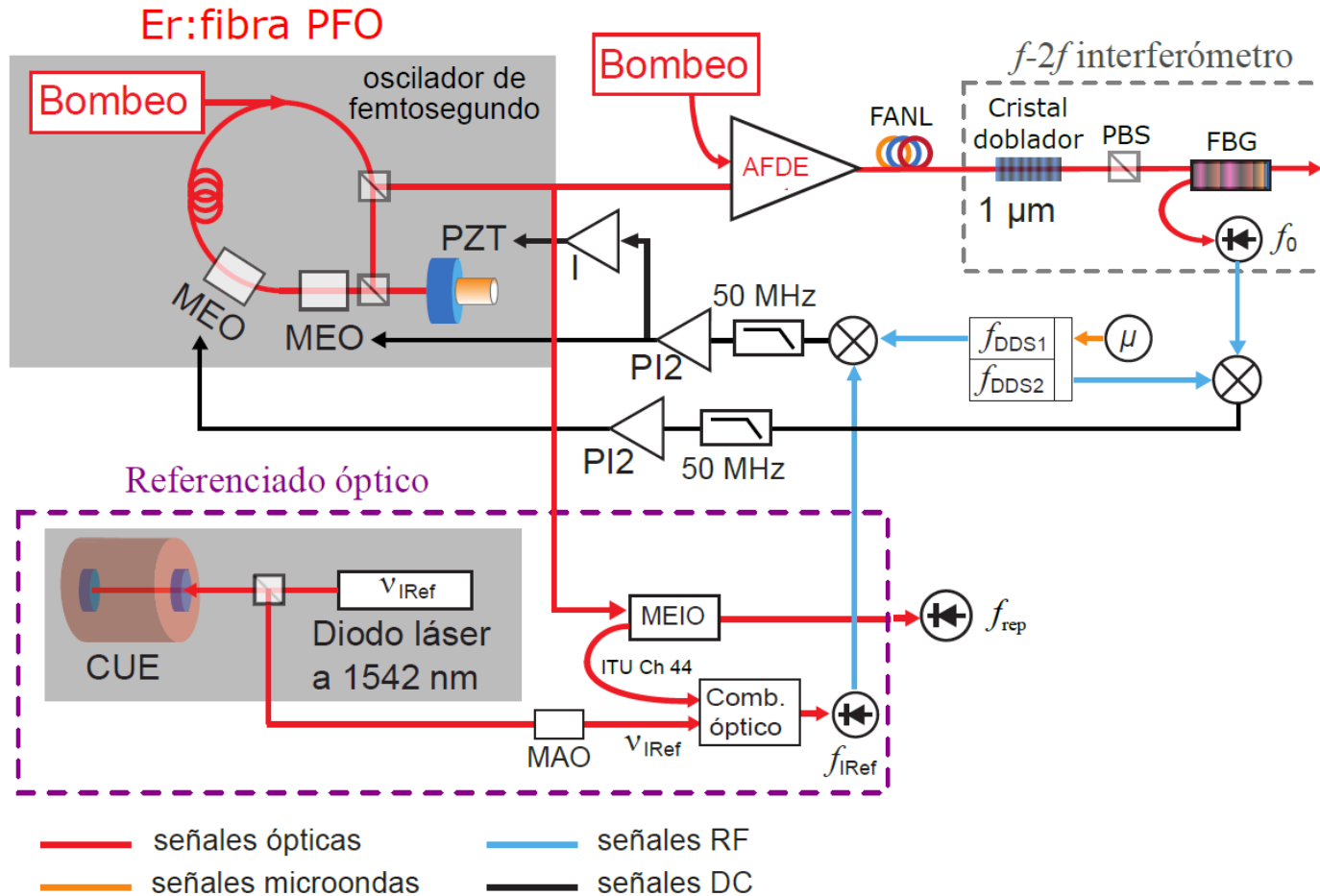
- ✓ El proyecto CIROEs
 - ✓ Justificación
 - ✓ Presentación del proyecto

- ✓ **Cadena de frecuencias ópticas**
 - ✓ **Peine de frecuencias**
 - ✓ **Cavidades ópticas** } Estabilidad
 - ✓ Comparación directa con el máser de H
 - ✓ Eliminación deriva frecuencia referencia

Cadena de frecuencias: estabilidad



Cadena de frecuencias → Montaje

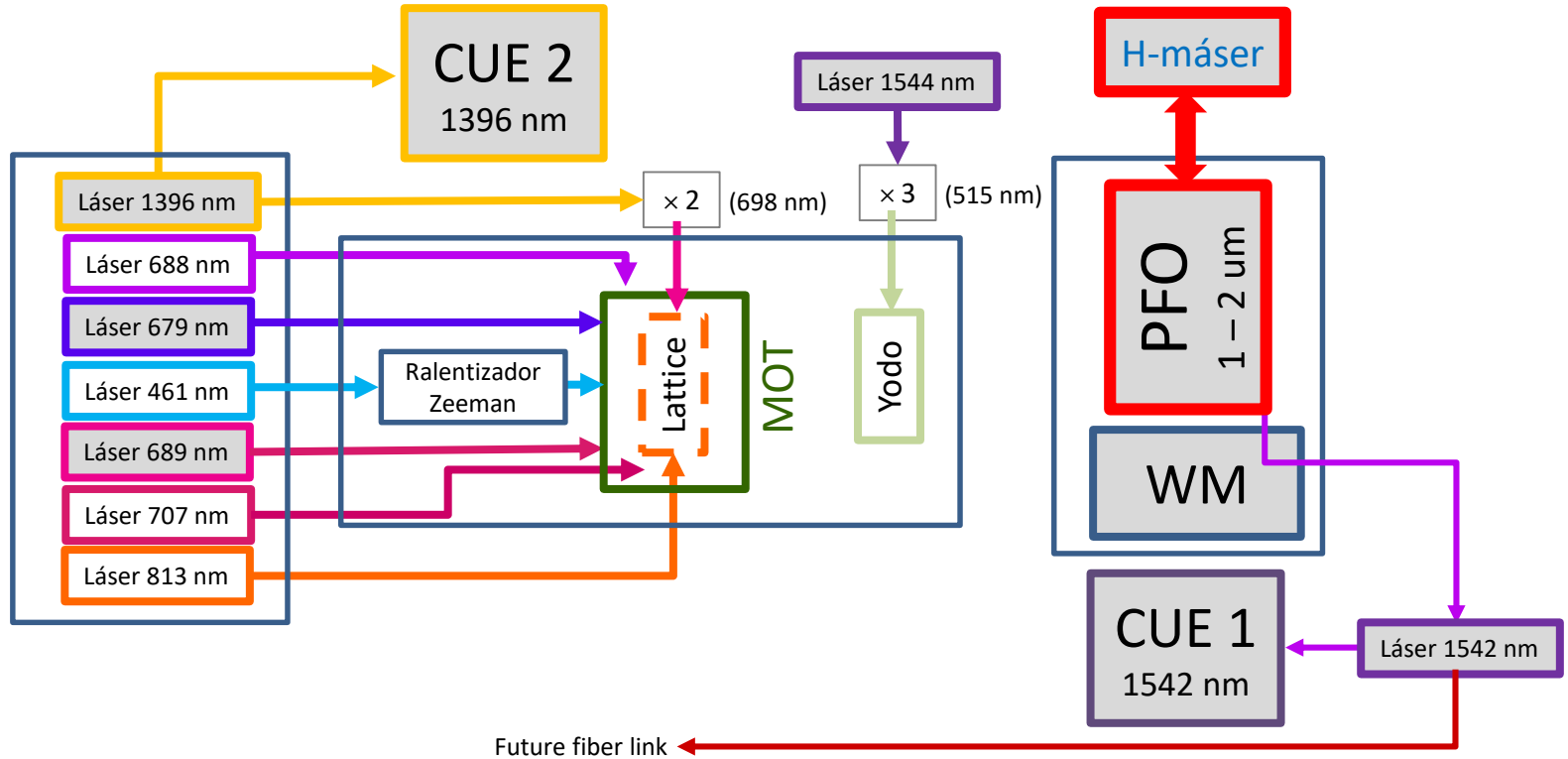




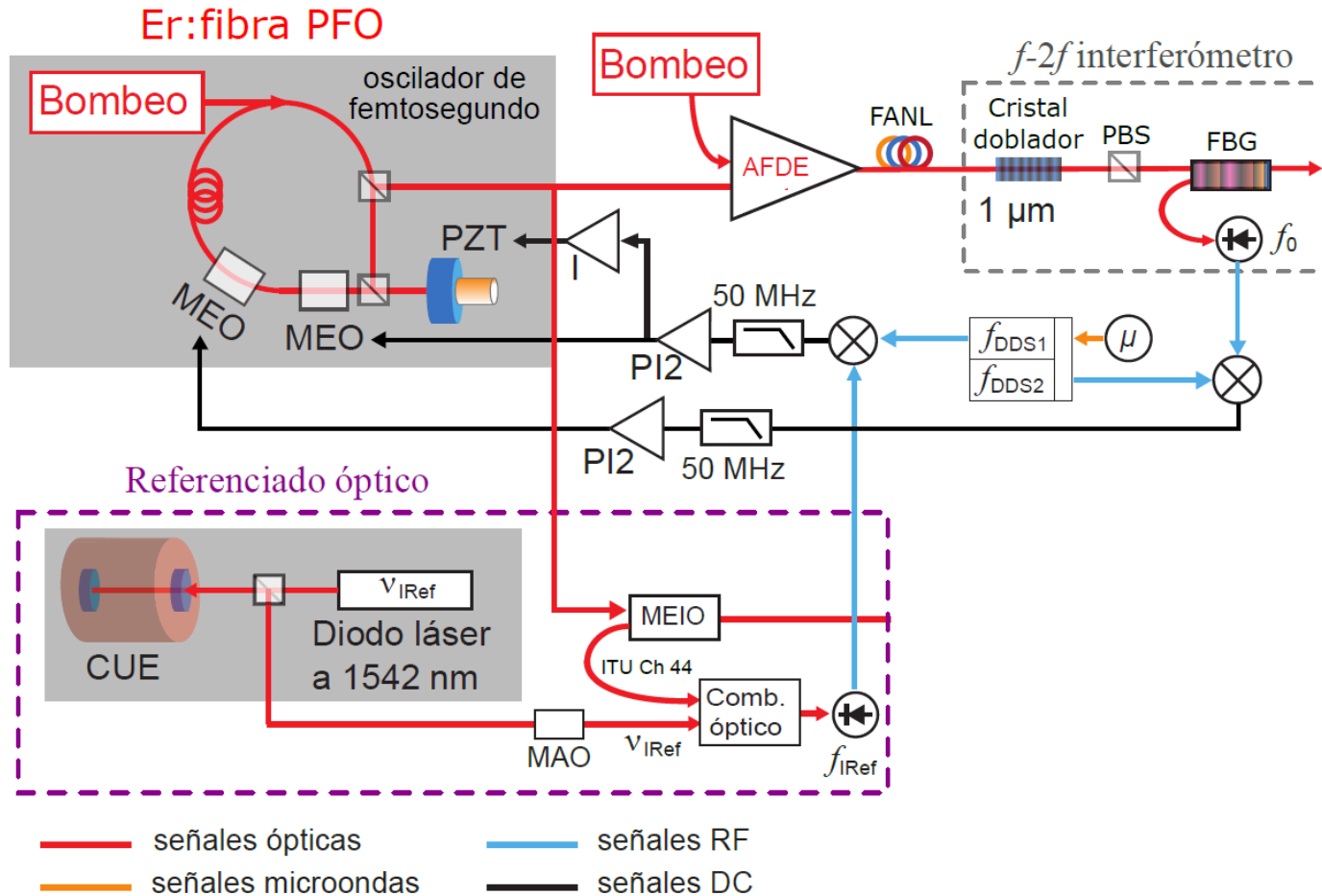
- ✓ El proyecto CIROEs
 - ✓ Justificación
 - ✓ Presentación del proyecto

 - ✓ **Cadena de frecuencias ópticas**
 - ✓ Peine de frecuencias
 - ✓ Cavidades ópticas
 - ✓ **Comparación directa con el máser de H**
 - ✓ **Eliminación deriva frecuencia referencia**
- } Exactitud

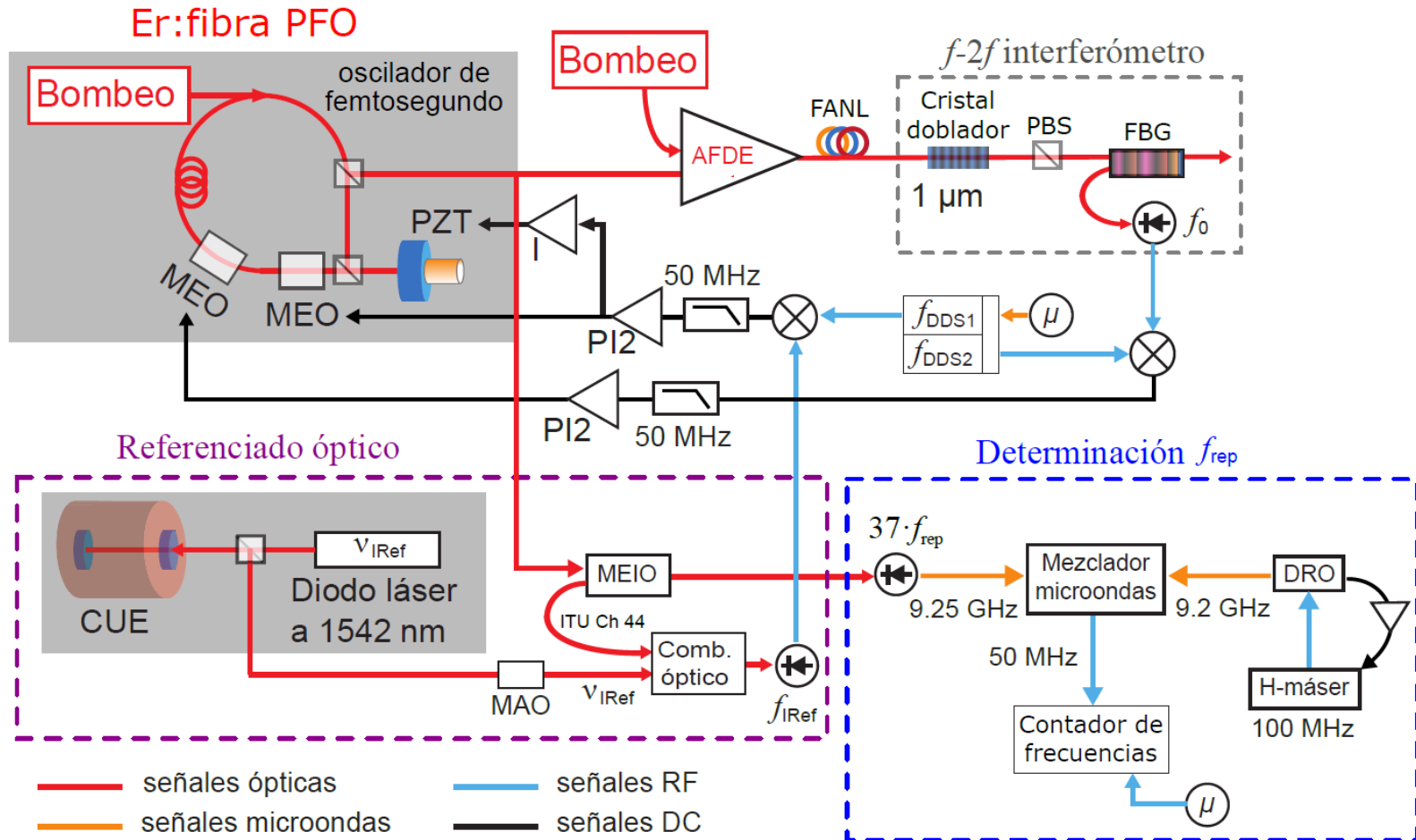
Cadena de frecuencias: exactitud



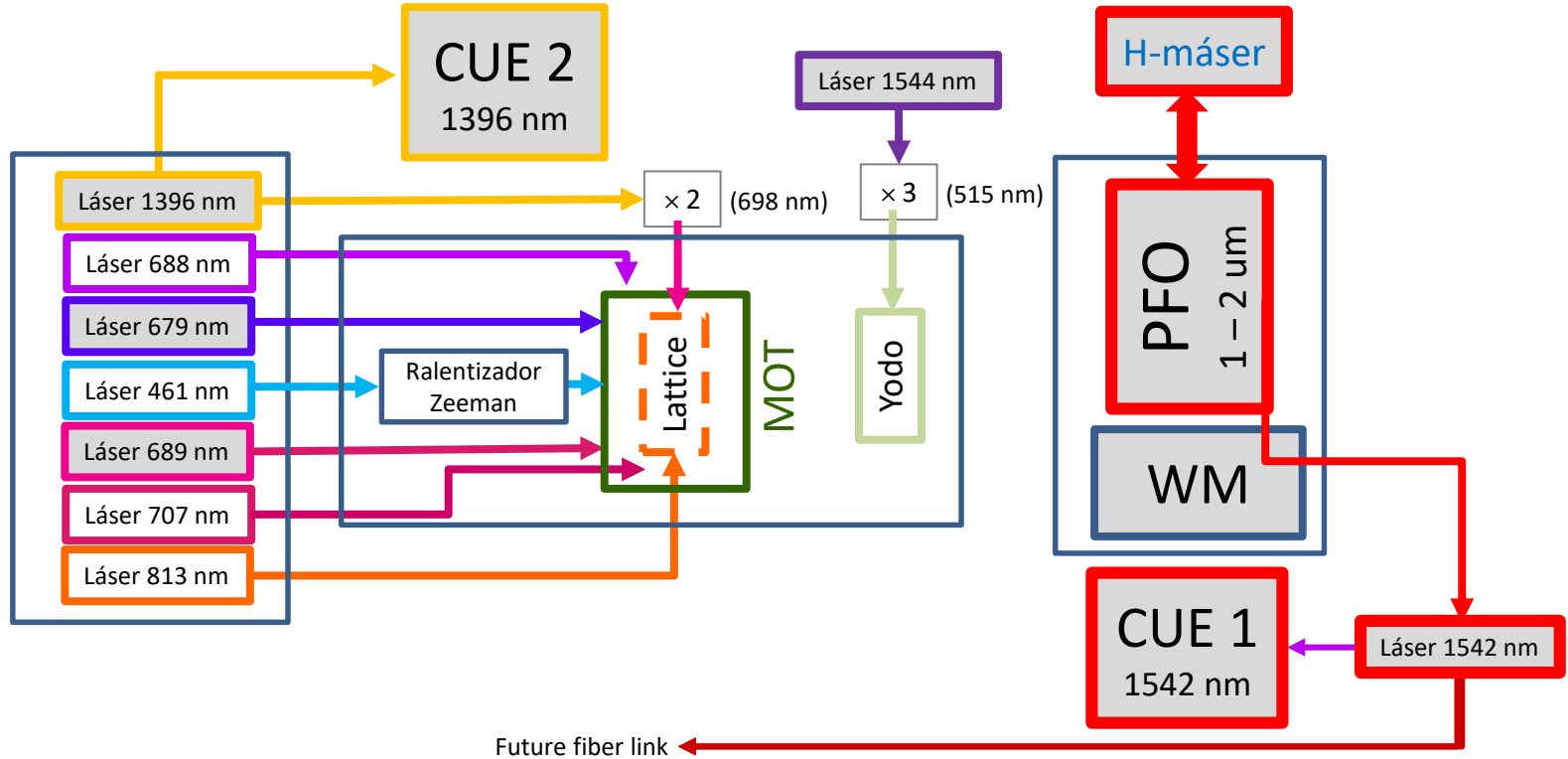
Cadena de frecuencias → Montaje



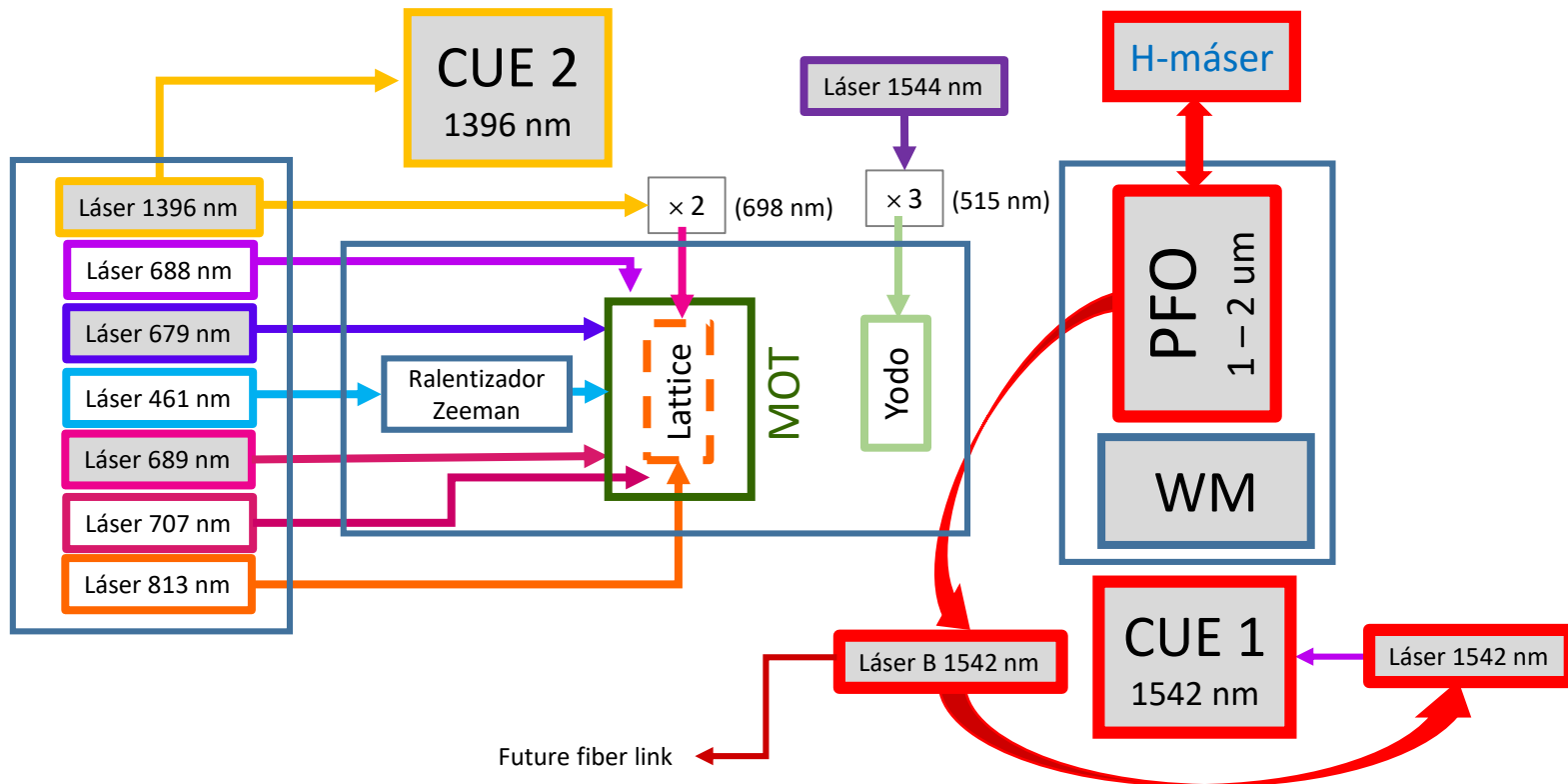
Cadena de frecuencias → Montaje

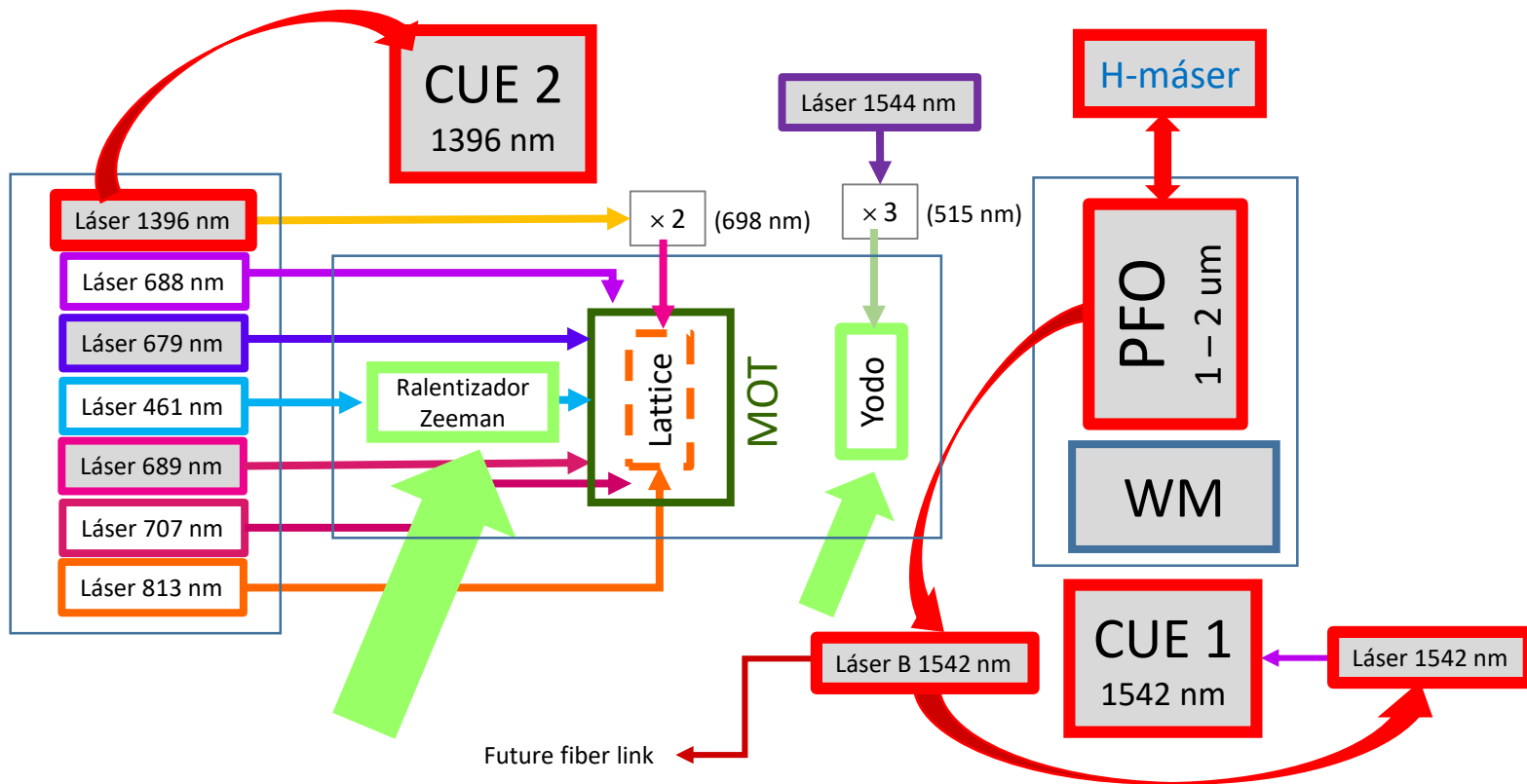


Cadena de frecuencias → Deriva



Cadena de frecuencias → Deriva





¡Gracias por su atención!

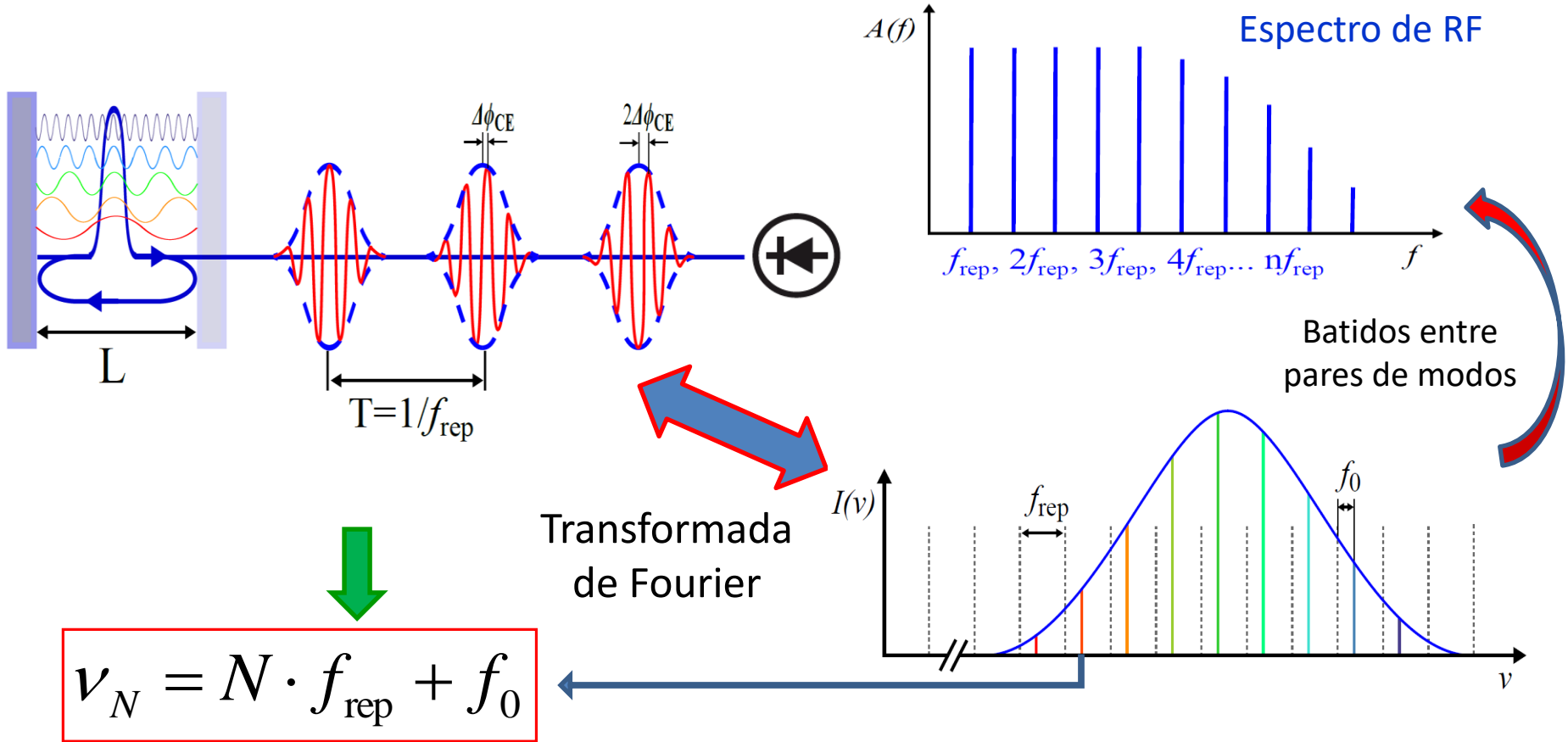
Real Instituto y Observatorio de la Armada (ROA)

Plaza de las Tres Marinas s/n
11100 San Fernando (Cádiz), SPAIN

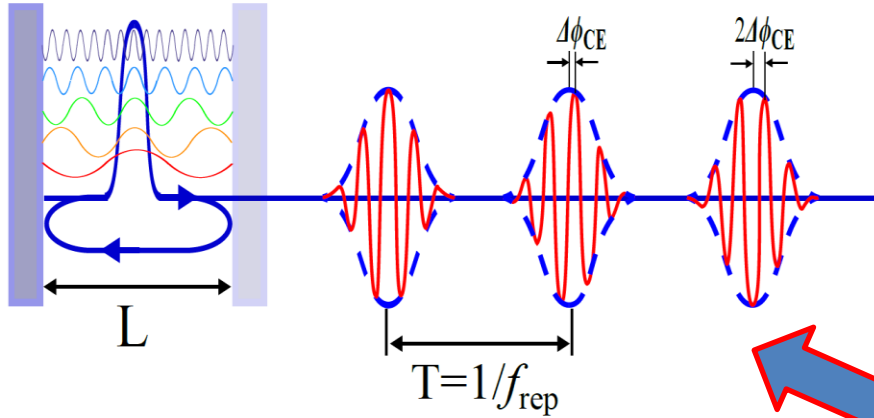
Phone: (+34) 956 545 615

halvarez@roa.es

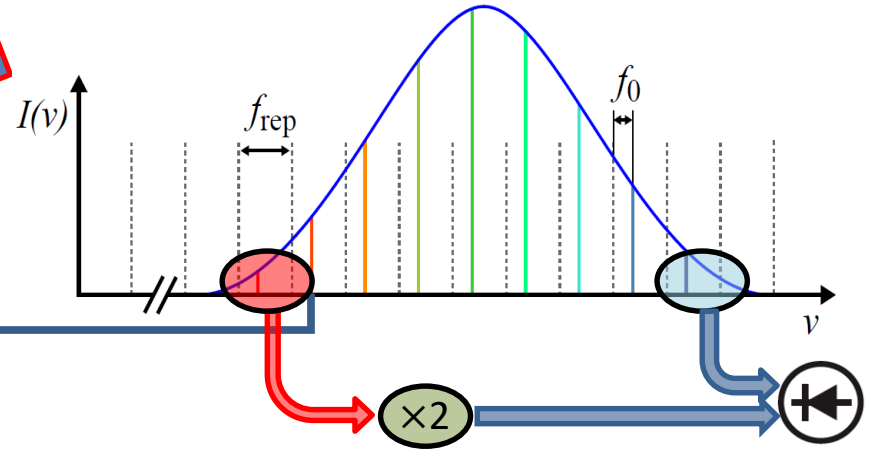
Cadena de frecuencias → Peine de frecuencias



Cadena de frecuencias → Peine de frecuencias

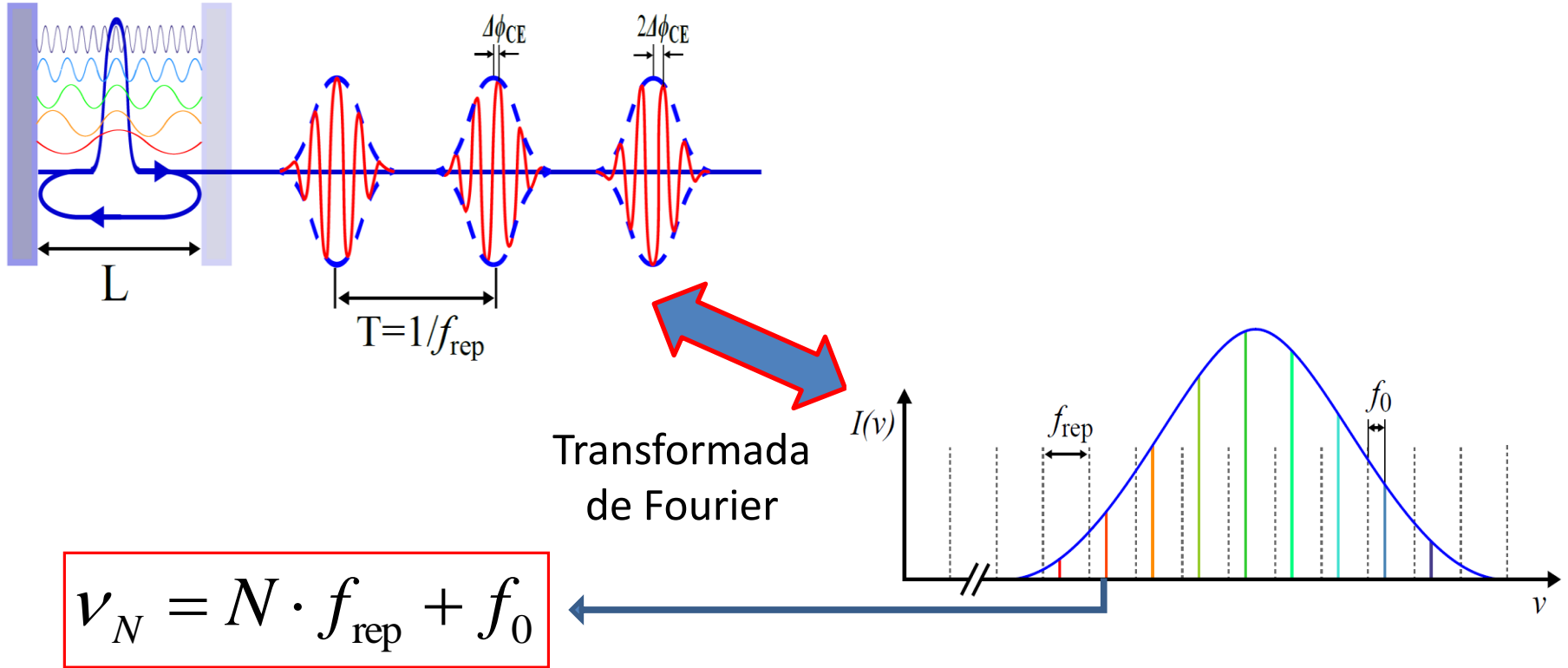


Transformada de Fourier

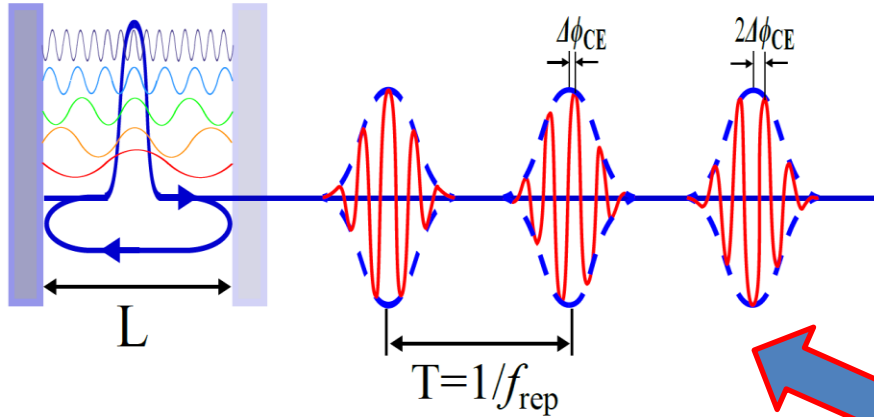


$$\nu_N = N \cdot f_{rep} + f_0$$

Cadena de frecuencias → Peine de frecuencias

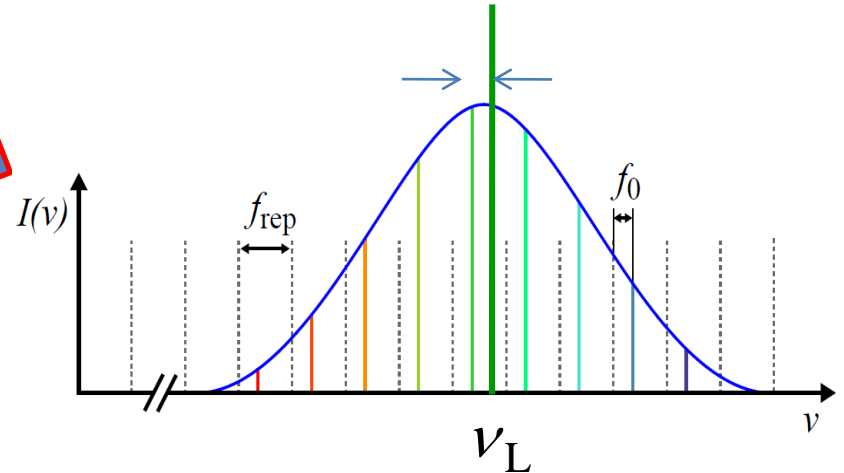


Cadena de frecuencias → Peine de frecuencias



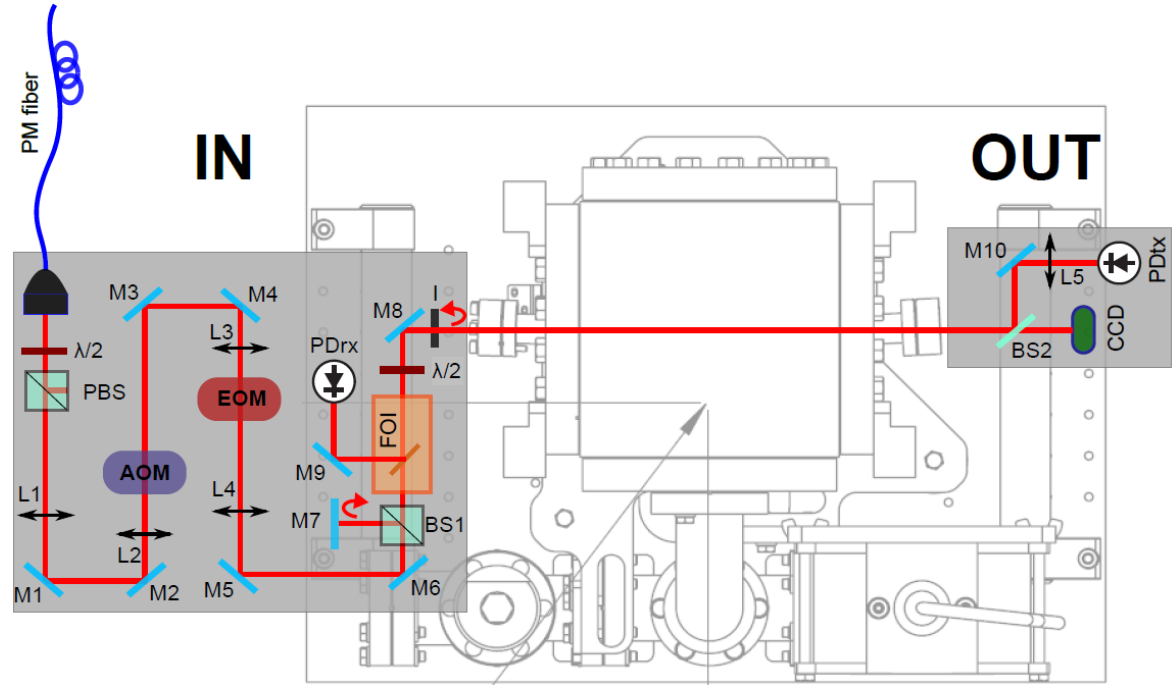
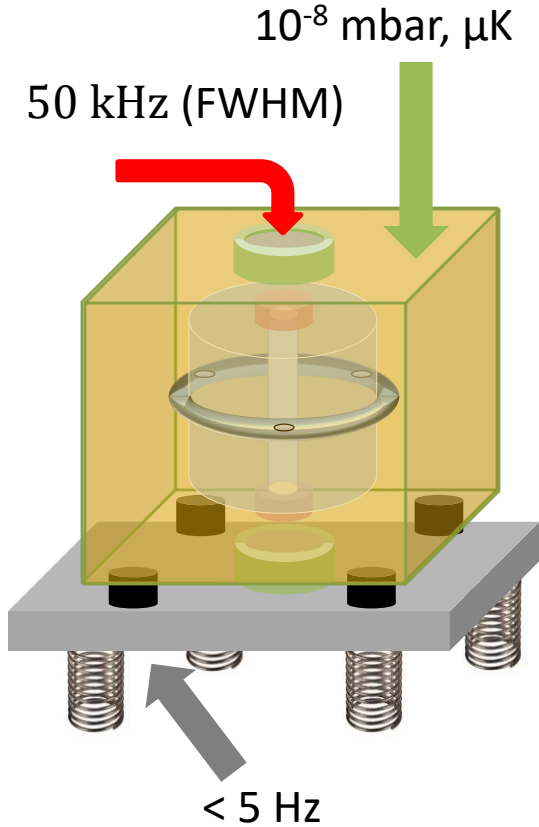
$$f_{\text{batido}} = \nu_L - \nu_N$$

Transformada de Fourier

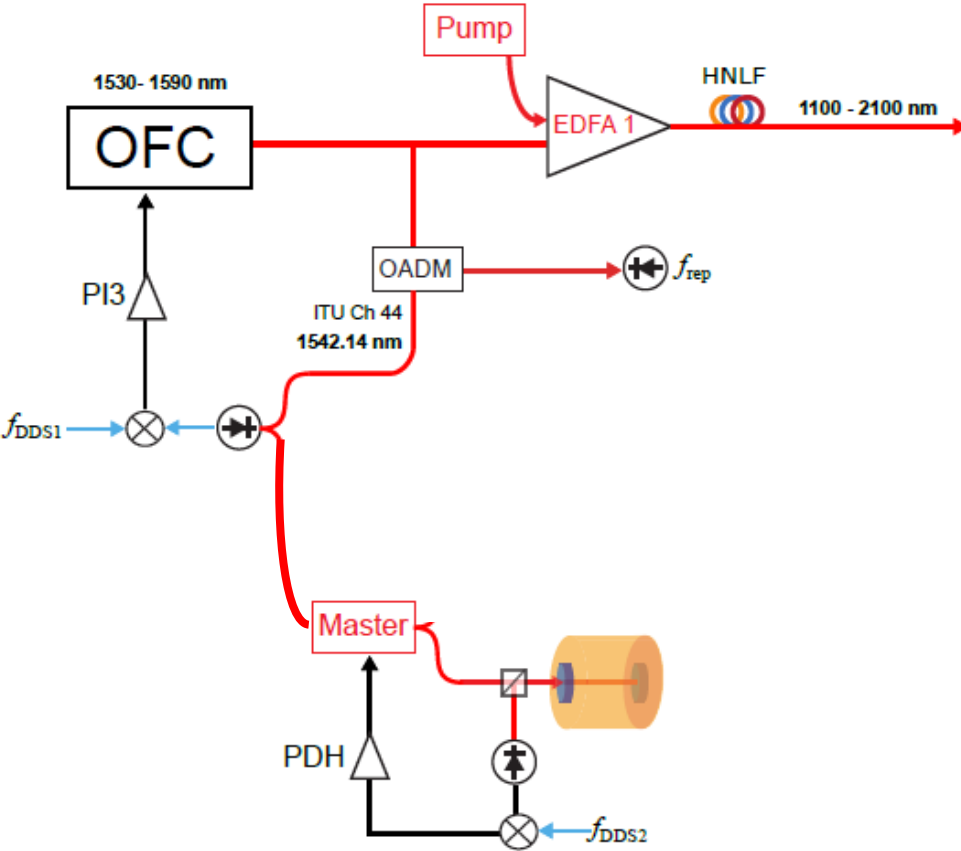


$$\nu_N = N \cdot f_{\text{rep}} + f_0$$

Cadena de frecuencias → Cavidades ópticas



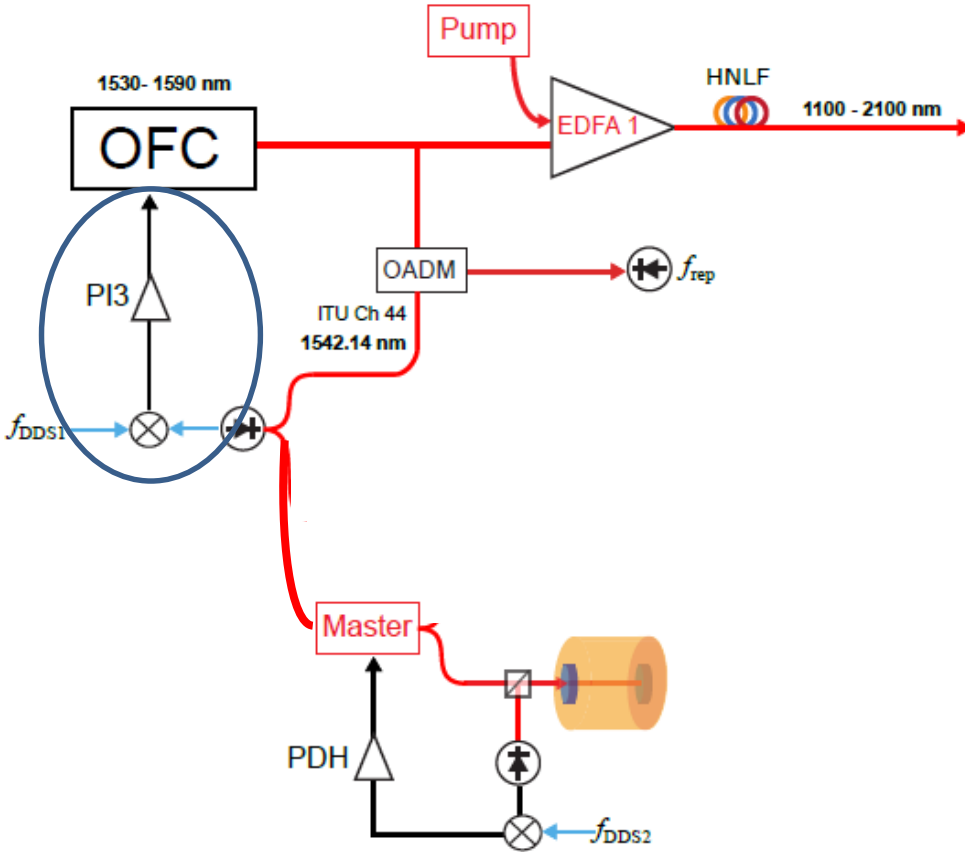
Cadena de frecuencias → Deriva



$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1)$$

$$N \cdot f_{\text{rep}} + \cancel{f_0} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (2)$$

Cadena de frecuencias → Deriva

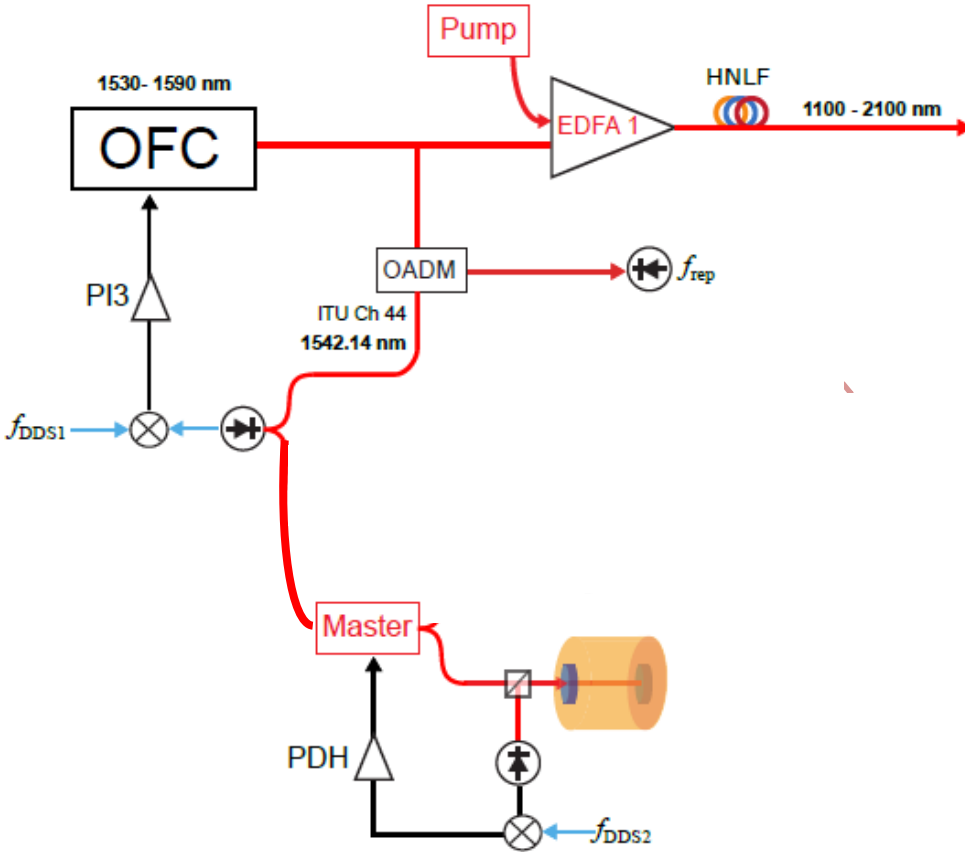


$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1)$$

$$N \cdot f_{\text{rep}} + \cancel{f_0} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (2)$$

$$N \cdot \sigma(f_{\text{rep}}) \sim \sigma(\nu_{\text{M}}) \quad (3)$$

Cadena de frecuencias → Deriva



$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1)$$

$$N \cdot f_{\text{rep}} + \cancel{f_0} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (2)$$

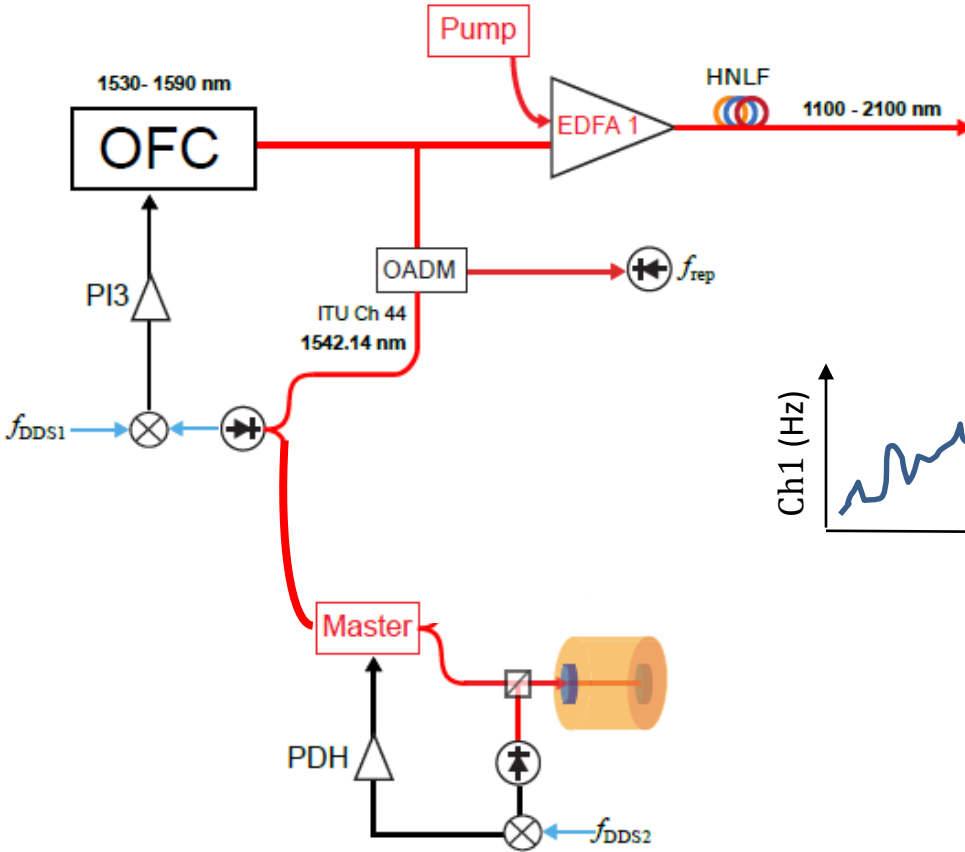
$$N \cdot \sigma(f_{\text{rep}}) \sim \sigma(\nu_{\text{M}}) \quad (3)$$

$$i f_{\text{rep}} \rightarrow \otimes \leftarrow j f_{\text{maser}}$$

$$\downarrow$$

$$\text{Ch1} = i \cdot f_{\text{rep}} - j \cdot f_{\text{maser}} \quad (4)$$

Cadena de frecuencias → Deriva

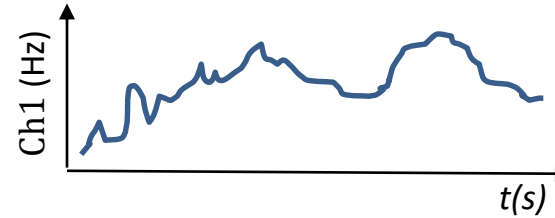


$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1)$$

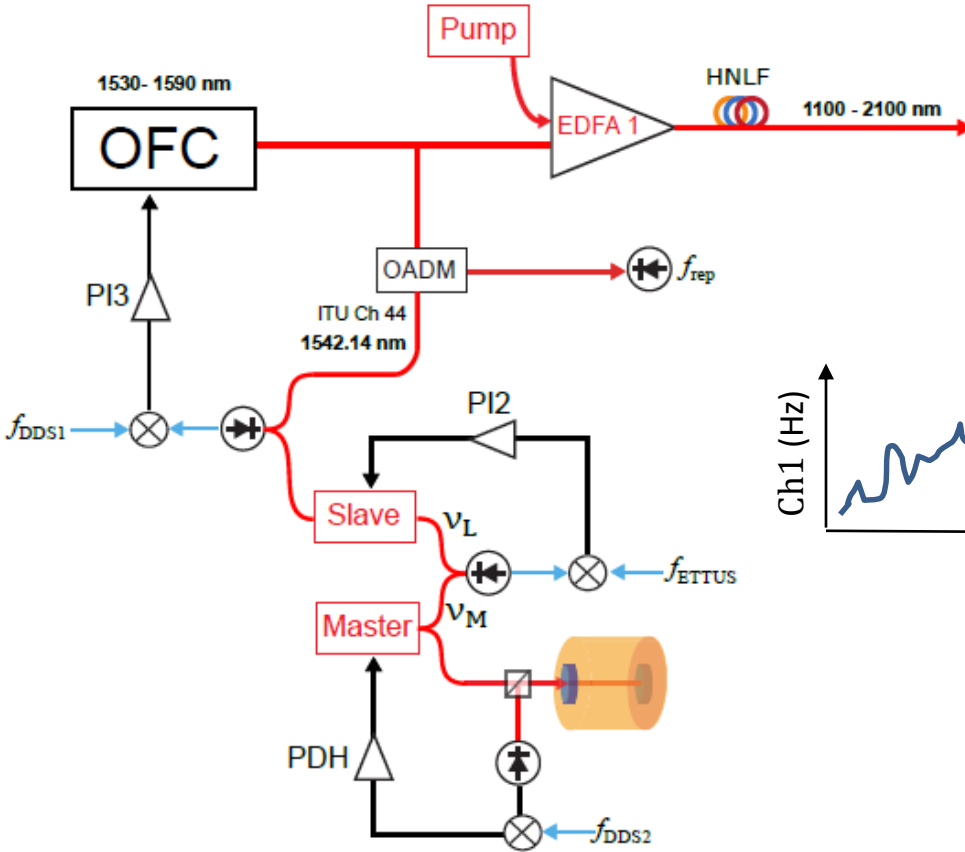
$$N \cdot f_{\text{rep}} + \cancel{f_0} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (2)$$

$$N \cdot \sigma(f_{\text{rep}}) \sim \sigma(\nu_{\text{M}}) \quad (3)$$

$$i f_{\text{rep}} \rightarrow \otimes \leftarrow j f_{\text{maser}} \rightarrow \text{Ch1} = i \cdot f_{\text{rep}} - j \cdot f_{\text{maser}} \quad (4)$$



Cadena de frecuencias → Deriva



$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1)$$

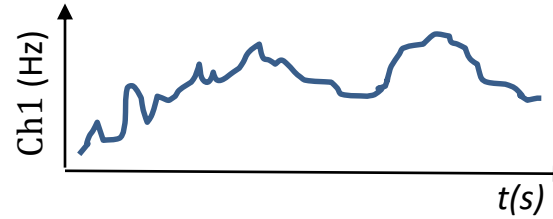
$$N \cdot f_{\text{rep}} + \cancel{f_0} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (2)$$

$$N \cdot \sigma(f_{\text{rep}}) \sim \sigma(\nu_{\text{M}}) \quad (3)$$

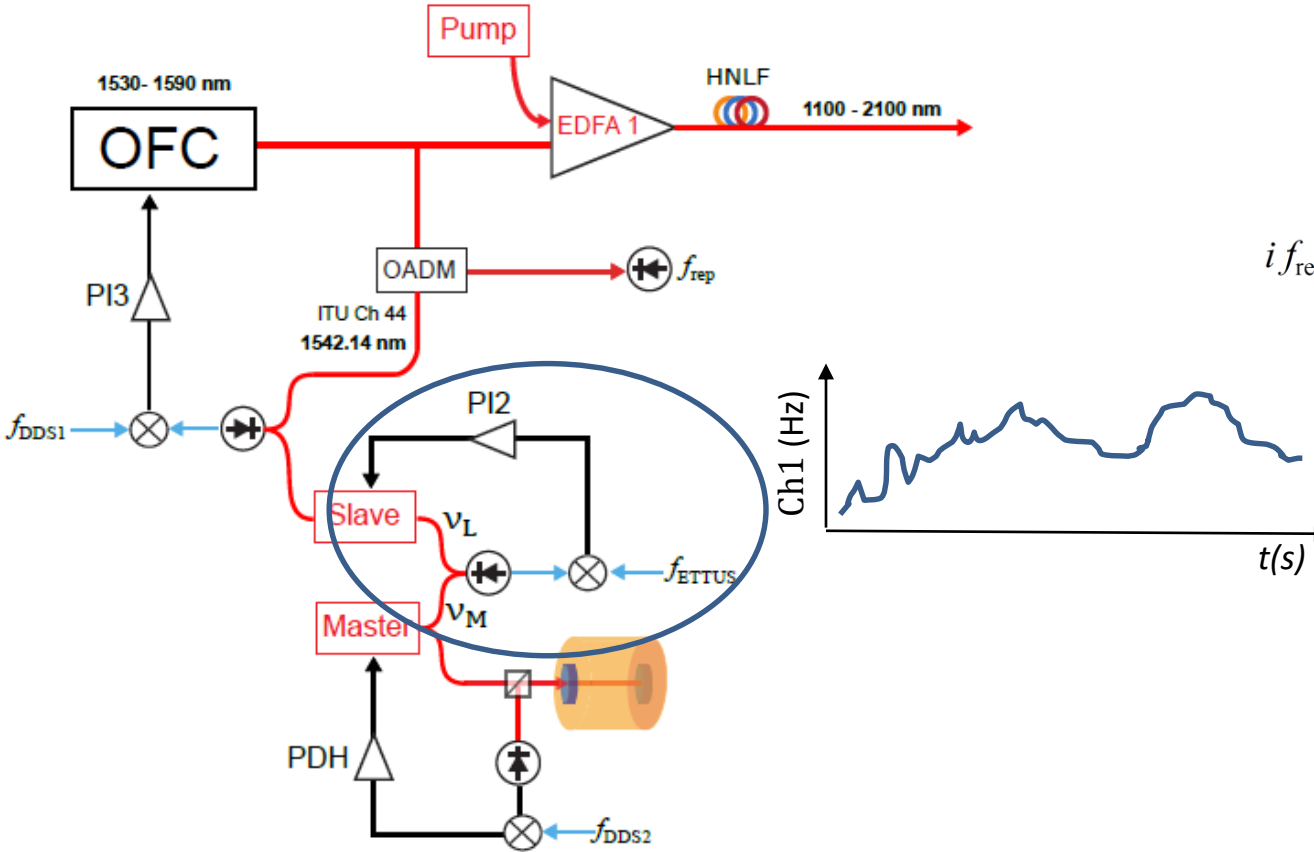
$$i f_{\text{rep}} \rightarrow \otimes \leftarrow j f_{\text{maser}}$$

$$\downarrow$$

$$\text{Ch1} = i \cdot f_{\text{rep}} - j \cdot f_{\text{maser}} \quad (4)$$



Cadena de frecuencias → Deriva



$$\nu_{OFC} - \nu_M = f_{DDS1} \quad (1)$$

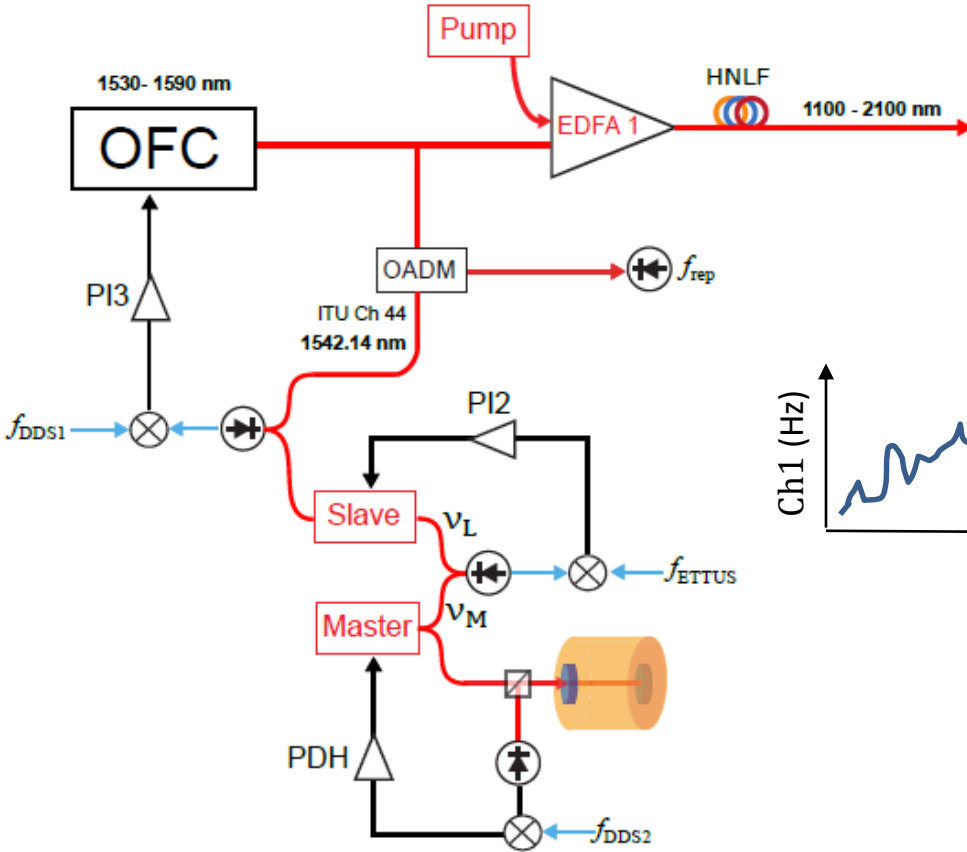
$$N \cdot f_{rep} + \cancel{f_0} - \nu_M = f_{DDS1} \quad (2)$$

$$N \cdot \sigma(f_{rep}) \sim \sigma(\nu_M) \quad (3)$$

$$i f_{rep} \otimes j f_{maser} \rightarrow \text{Ch1} = i \cdot f_{rep} - j \cdot f_{maser} \quad (4)$$

$$\nu_M - \nu_S = f_{ETTUS} \quad (5)$$

Cadena de frecuencias → Deriva



$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1)$$

$$N \cdot f_{\text{rep}} + \cancel{f_0} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (2)$$

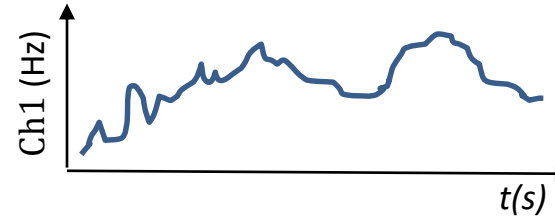
$$N \cdot \sigma(f_{\text{rep}}) \sim \sigma(\nu_{\text{M}}) \quad (3)$$

$$i f_{\text{rep}} \quad \text{---} \otimes \quad \text{---} j f_{\text{maser}}$$

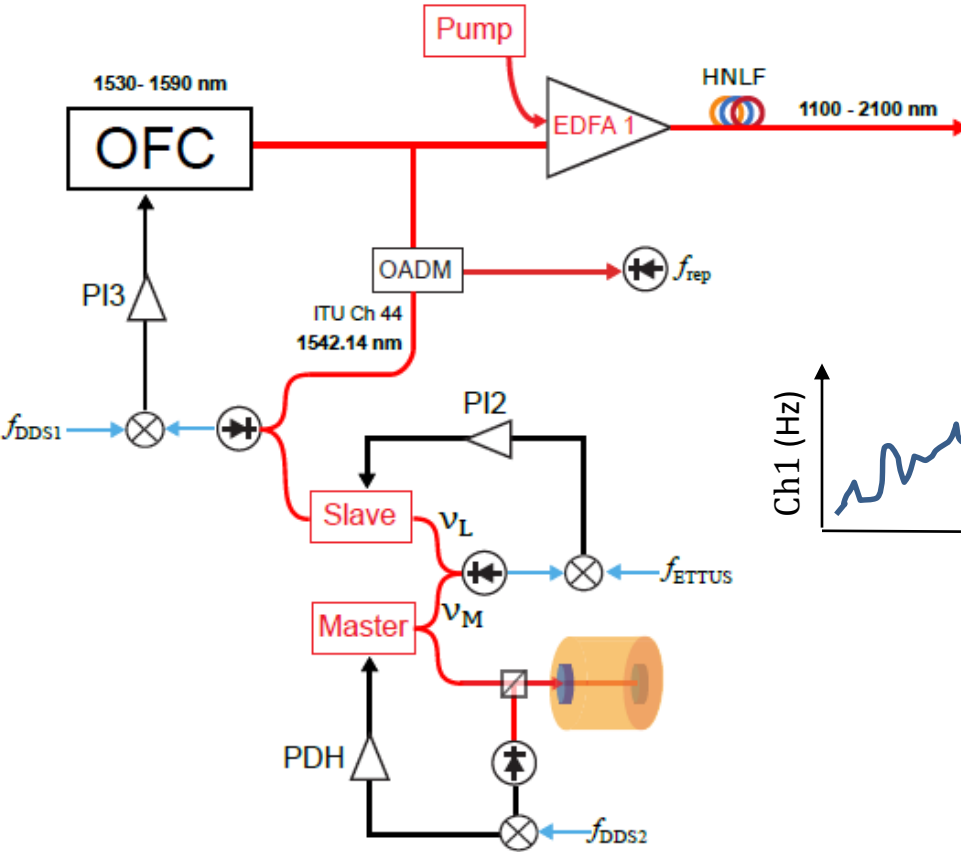
$$\text{Ch1} = i \cdot f_{\text{rep}} - j \cdot f_{\text{maser}} \quad (4)$$

$$\nu_{\text{M}} - \nu_{\text{S}} = f_{\text{ETTUS}} \quad (5)$$

$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{S}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1')$$



Cadena de frecuencias → Deriva



$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1)$$

$$N \cdot f_{\text{rep}} + \cancel{f_0} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (2)$$

$$N \cdot \sigma(f_{\text{rep}}) \sim \sigma(\nu_{\text{M}}) \quad (3)$$

$$i f_{\text{rep}} \rightarrow \otimes \leftarrow j f_{\text{maser}}$$

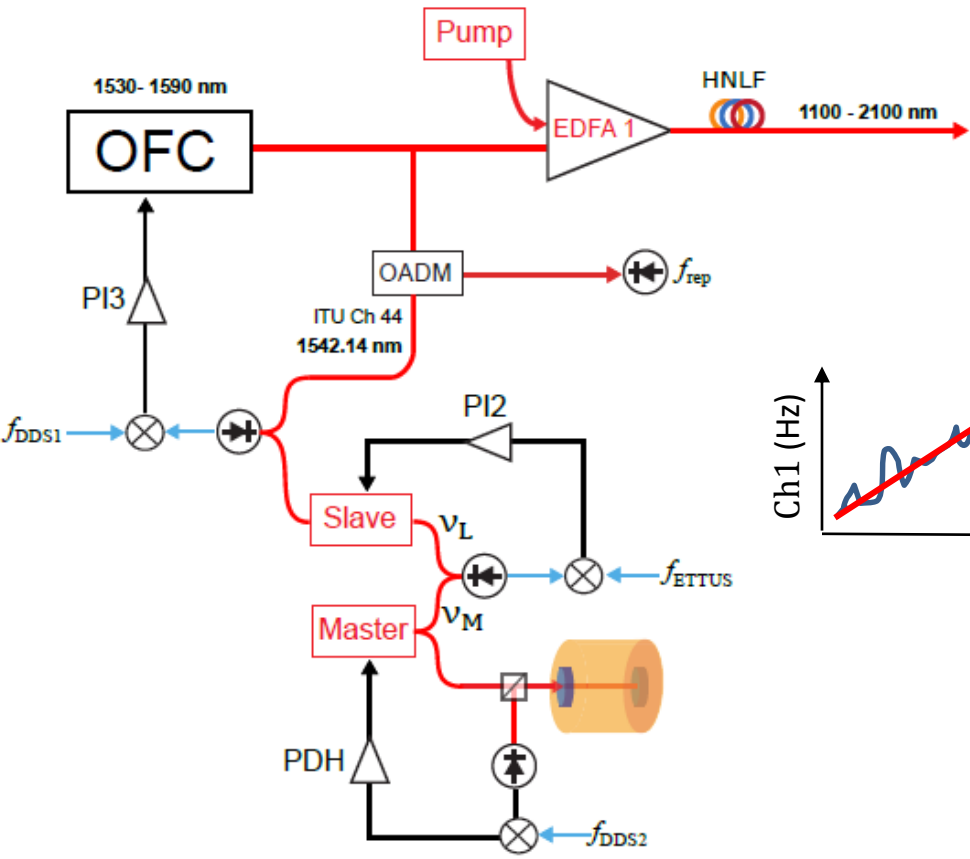
$$\text{Ch1} = i \cdot f_{\text{rep}} - j \cdot f_{\text{maser}} \quad (4)$$

$$\nu_{\text{M}} - \nu_{\text{S}} = f_{\text{ETTUS}} \quad (5)$$

$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{S}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1')$$

$$(1') \vee (5) \quad N \cdot f_{\text{rep}} - \nu_{\text{M}} - f_{\text{ETTUS}} = f_{\text{DDS1}} \quad (6)$$

Cadena de frecuencias → Deriva



$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1)$$

$$N \cdot f_{\text{rep}} + \cancel{f_0} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (2)$$

$$N \cdot \sigma(f_{\text{rep}}) \sim \sigma(\nu_{\text{M}}) \quad (3)$$

$$i f_{\text{rep}} \otimes j f_{\text{maser}} \rightarrow \text{Ch1} = i \cdot f_{\text{rep}} - j \cdot f_{\text{maser}} \quad (4)$$

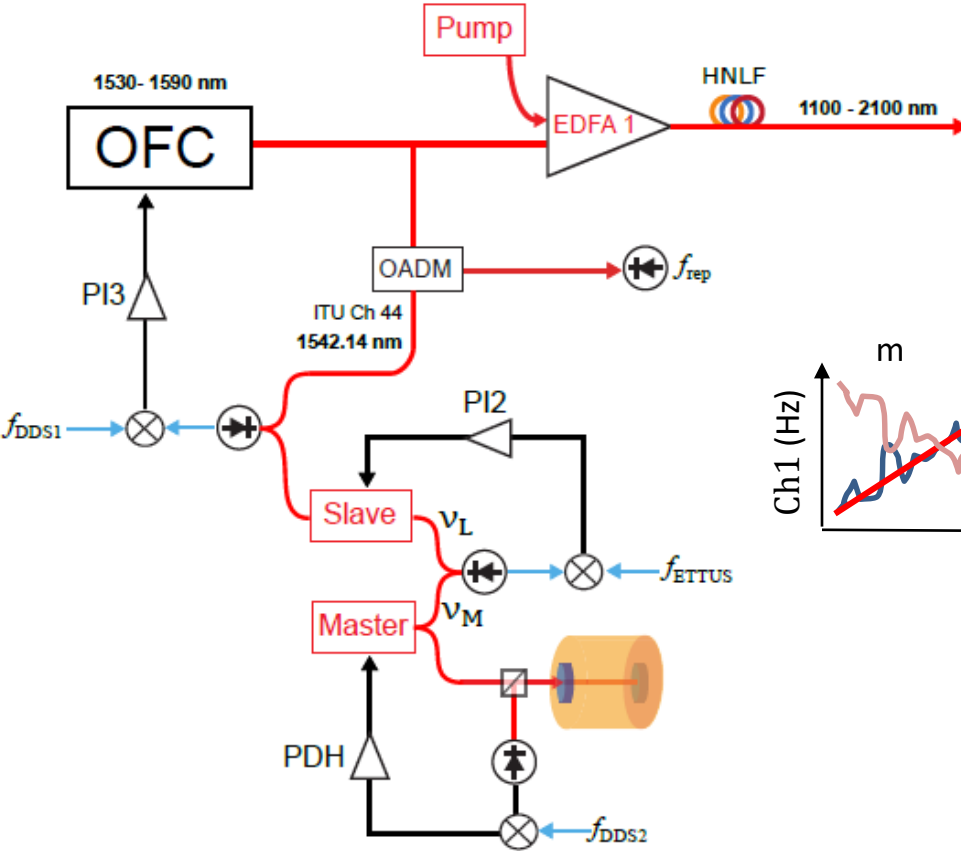
$$\nu_{\text{M}} - \nu_{\text{S}} = f_{\text{ETTUS}} \quad (5)$$

$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{S}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1')$$

$$(1') \vee (5) \quad N \cdot f_{\text{rep}} - \nu_{\text{M}} - f_{\text{ETTUS}} = f_{\text{DDS1}} \quad (6)$$

$$\frac{d\nu_{\text{M}}}{dt} = N \frac{df_{\text{rep}}}{dt} \quad (7)$$

Cadena de frecuencias → Deriva



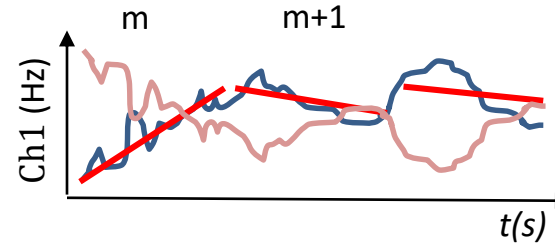
$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1)$$

$$N \cdot f_{\text{rep}} + \cancel{f_0} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (2)$$

$$N \cdot \sigma(f_{\text{rep}}) \sim \sigma(\nu_{\text{M}}) \quad (3)$$

$$i f_{\text{rep}} \quad \otimes \quad j f_{\text{maser}} \quad \downarrow$$

$$\text{Ch1} = i \cdot f_{\text{rep}} - j \cdot f_{\text{maser}} \quad (4)$$



$$\nu_{\text{M}} - \nu_{\text{S}} = f_{\text{ETTUS}} \quad (5)$$

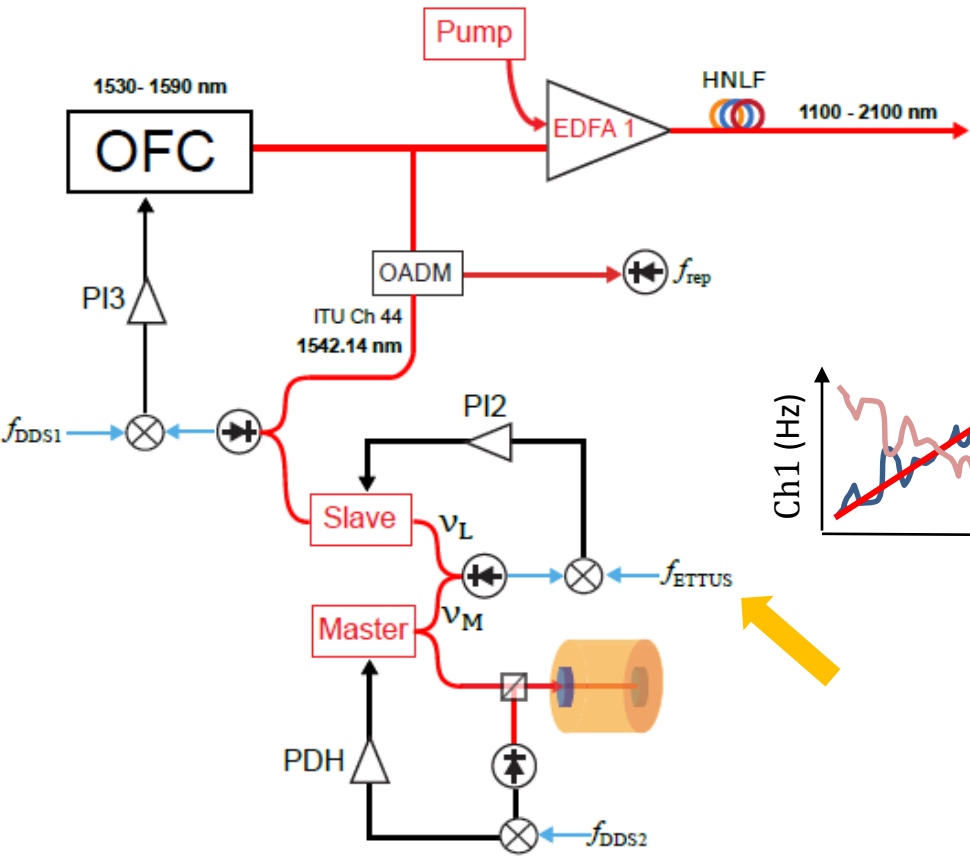
$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{S}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1')$$

$$(1') \text{ y } (5) \quad N \cdot f_{\text{rep}} - \nu_{\text{M}} - f_{\text{ETTUS}} = f_{\text{DDS1}} \quad (6)$$

$$\frac{d\nu_{\text{M}}}{dt} = N \frac{df_{\text{rep}}}{dt} \quad \alpha \quad (7)$$

$$\left(\frac{df_{\text{rep}}}{dt}\right)_{m+1} = \left(\frac{df_{\text{ETTUS}}}{dt}\right)_m - \alpha_m \quad (8)$$

Cadena de frecuencias → Deriva



$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1)$$

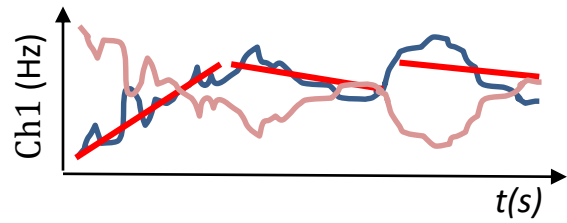
$$N \cdot f_{\text{rep}} + \cancel{f_0} - \nu_{\text{M}} = f_{\text{DDS1}} \quad (2)$$

$$N \cdot \sigma(f_{\text{rep}}) \sim \sigma(\nu_{\text{M}}) \quad (3)$$

$$i f_{\text{rep}} \otimes j f_{\text{maser}} \rightarrow \text{Ch1} = i \cdot f_{\text{rep}} - j \cdot f_{\text{maser}} \quad (4)$$

$$\nu_{\text{M}} - \nu_{\text{S}} = f_{\text{ETTUS}} \quad (5)$$

$$\nu_{\text{OFC}} - \nu_{\text{S}} = f_{\text{DDS1}} \quad (1')$$

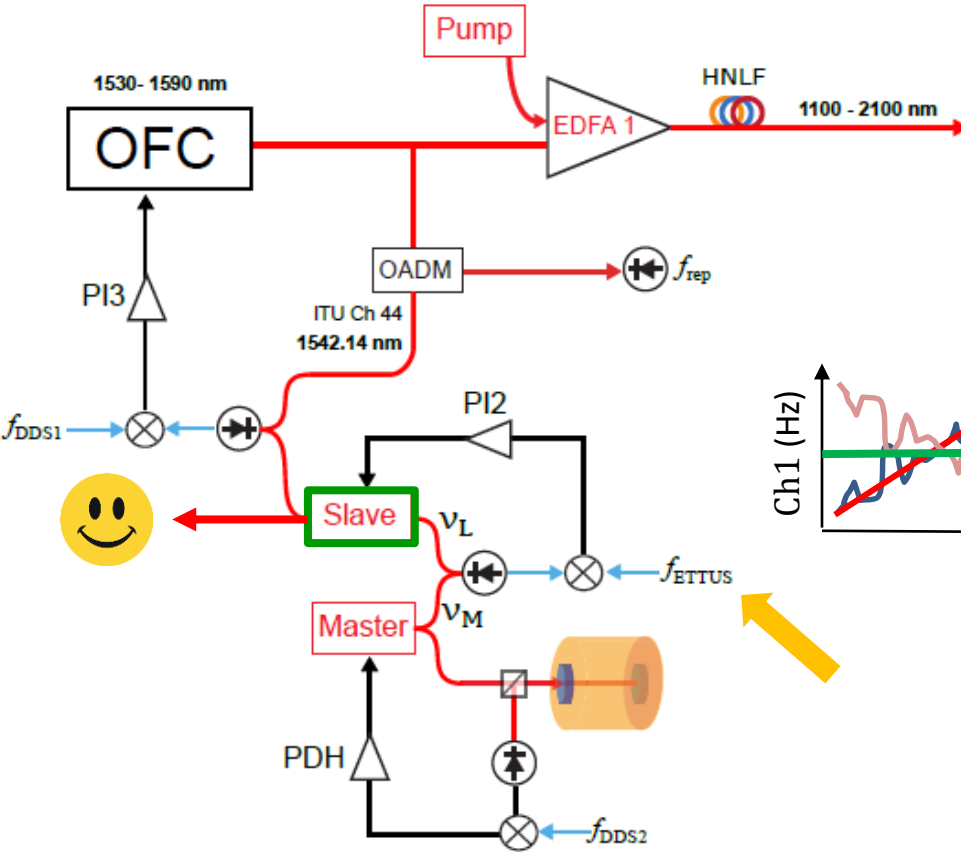


$$(1') \text{ y } (5) \quad N \cdot f_{\text{rep}} - \nu_{\text{M}} - f_{\text{ETTUS}} = f_{\text{DDS1}} \quad (6)$$

$$\frac{d\nu_{\text{M}}}{dt} = N \frac{df_{\text{rep}}}{dt} \alpha \quad (7)$$

$$\left(\frac{df_{\text{rep}}}{dt}\right)_{m+1} = \left(\frac{df_{\text{ETTUS}}}{dt}\right)_m - \alpha_m \quad (8)$$

Cadena de frecuencias → Deriva



$$\nu_{OFC} - \nu_M = f_{DDS1} \quad (1)$$

$$N \cdot f_{rep} + \cancel{f_0} - \nu_M = f_{DDS1} \quad (2)$$

$$N \cdot \sigma(f_{rep}) \sim \sigma(\nu_M) \quad (3)$$

$$i f_{rep} \otimes j f_{maser} \rightarrow \text{Ch1} = i \cdot f_{rep} - j \cdot f_{maser} \quad (4)$$

$$\nu_M - \nu_S = f_{ETTUS} \quad (5)$$

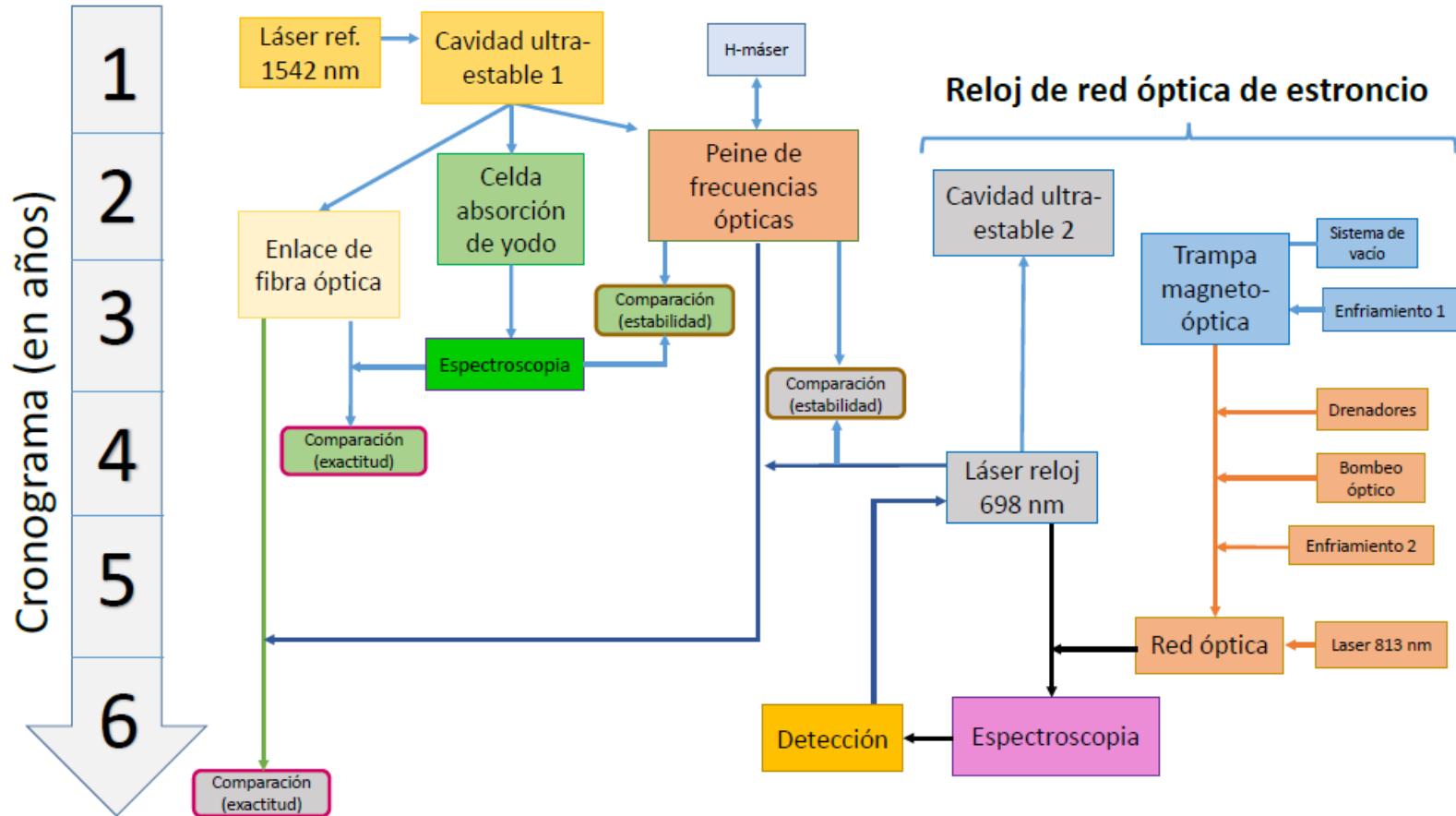
$$\nu_{OFC} - \nu_S = f_{DDS1} \quad (1')$$

$$(1') \text{ y } (5) \quad N \cdot f_{rep} - \nu_M - f_{ETTUS} = f_{DDS1} \quad (6)$$

$$\frac{d\nu_M}{dt} = N \frac{df_{rep}}{dt} \alpha \quad (7)$$

$$\left(\frac{df_{rep}}{dt}\right)_{m+1} = \left(\frac{df_{ETTUS}}{dt}\right)_m - \alpha_m \quad (8)$$

CIROES: fases





CIROEs: **C**onstrucción e **I**mplementación de un **R**eloj de red **Ó**ptica de **E**stroncio

1.45 M€

https://contrataciondelestado.es/wps/portal/!ut/p/b0/04_Sj9CPykssy0xPLMnMz0vMAfijU1JTC3Iy87KtUIJLEnNyUuNzMpMzSxKTgQr0w_Wj9KMyU1zLcvQj80sL88KcVU2yUnxL00wSnfy1ywJzAm1t9Qtycx0Be8XlgA!!/

- * 1 peine de frecuencias ópticas
- * 1 medidor de longitud de onda
- * 1 analizador de espectros ópticos
- * 2 cavidades ultra-estables
- * 5 láseres a 1542, 1544, 1396, 679, 688 y 461
- * 4 contadores de frecuencia
- * 1 turbo bomba y 3 bombas iónicas
- * 1 ralentizador Zeeman
- + PIDs, electrónica control, óptica...

A bordo

- 1 horno de Sr
- 3 láseres a 813, 707 y 688
- 1 cámara de ciencia
- + componentes de vacío, mecánicos, ópticos, electrónicos...

En camino