

# Realización y diseminación de frecuencias ópticas

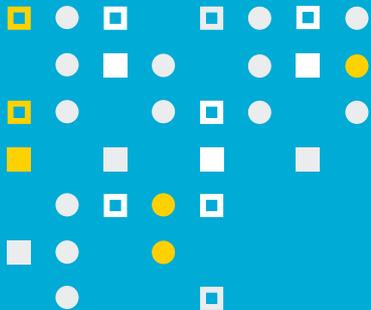
Departamento de Óptica y Dimensional.

FCE&N | 11 | 2020





# INDICE

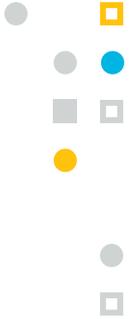
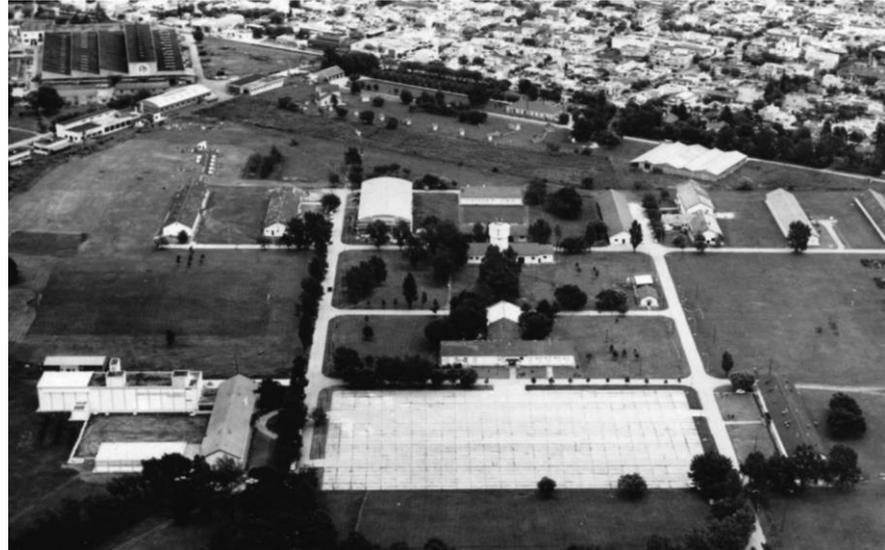


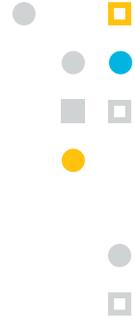
1. Una introducción al trabajo que realizamos en INTI
2. Contarles en que consiste la estructura en metrología
3. Peine de frecuencias
4. La diseminación en frecuencia
5. Proyectos futuros



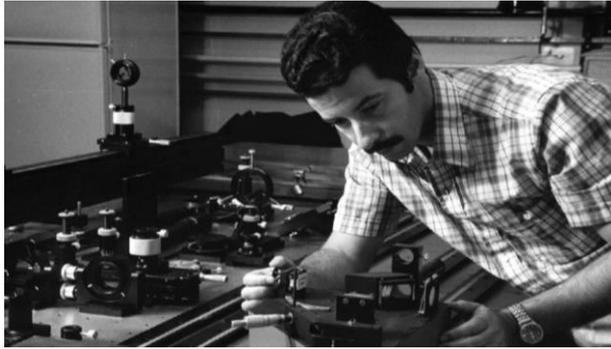
El Instituto Nacional de Tecnología Industrial es un organismo descentralizado del Ministerio de Desarrollo Productivo cuya misión principal consiste en realizar y promover investigaciones aplicadas a la industria, a través de una red de centros de investigación y desarrollo distribuidos en todo el país.

El INTI surge con los objetivos de :





- ❑ mejorar las técnicas de elaboración y proceso de las materias
- ❑ “estimular a los sectores industriales del país a emprender estudios susceptibles de mejorar su producción
- ❑ “mantener estrecha vinculación con la industria y los centros de estudio (universidades, organismos de investigación oficiales y privados)”.



## Desarrollo de laboratorios de referencia:

Laboratorio de Física, orientado a problemas fundamentales de la Metrología; Laboratorio de Química Analítica, con orientación a la Química Instrumental; y un Laboratorio de Ensayo de Materiales (1961)



*El profesor Rafael Steinberg es considerado el padre de la Metrología nacional y regional. Ingresó al INTI en el año de su creación (1957) y durante tres décadas fue director del Centro de Física y Metrología.*



1965, **planta piloto** creada para el sector agroindustrial en Mendoza.

Centro creado con el fin de prestar colaboración con la industria conservera



“La pequeña empresa es hoy un medio eficaz para desarrollar nuevas ideas y transformarse en el mecanismo inventado por el hombre para trasladar el conocimiento científico a la producción, y mejorar los bienes y servicios que la sociedad necesita”.

---

Ingeniero Salvador María del Carril, primer presidente del INTI, uno de los tres tecnólogos eméritos del Instituto.

*Fuente: columna de opinión de La Prensa, 1970.*



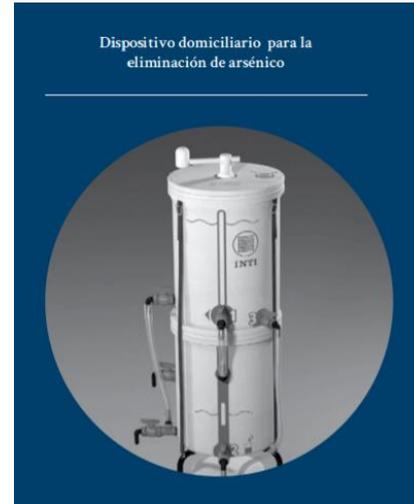
**El apoyo a las pymes fue una prioridad desde los inicios del INTI.**



# OBJETIVOS ESTRATÉGICOS

Fortalecimiento de las pymes a través de:

- ❑ Desarrollo de soluciones innovadoras para la industria (Calidad de las mediciones).
- ❑ Desarrollo de proveedores en forma integral, desde el diseño y la calidad hasta la mejora de procesos y productos.
- ❑ Oferta de servicios para el incremento de la productividad, la calidad y la capacidad de mejora continua.



Dispositivo domiciliario para la eliminación de arsénico

Eliminación de arsénico



Generación de energía a partir de desechos de caña de azúcar



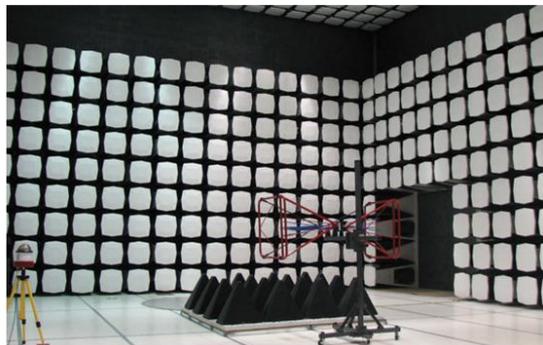
Laboratorio de referencia en leche



Nanopoc

## OFERTA TECNOLÓGICA

- Investigación y desarrollo.
- Certificación de procesos y productos.
- Análisis y ensayos.
- Calibraciones.
- Auditorías tecnológicas.
- Innovación de productos y mejora de procesos.
- Formación de personal técnico especializado.



Cámara semi anecoica



Sala limpia, microelectrónica



Alimentos Diferenciados



Embalaje de sustancias peligrosas



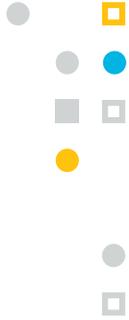
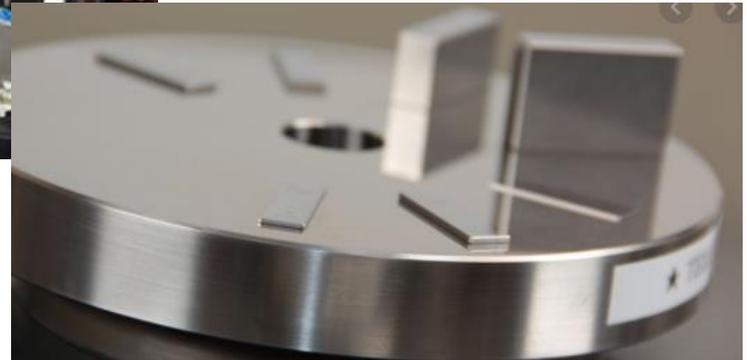
Incendios y explosiones

**Referencia metrológica** para asistir a la productividad, la calidad y competitividad de la industria nacional. La equidad en el comercio. Proveer a la sociedad con mediciones de calidad para la salud, la seguridad y la preservación del medio ambiente.

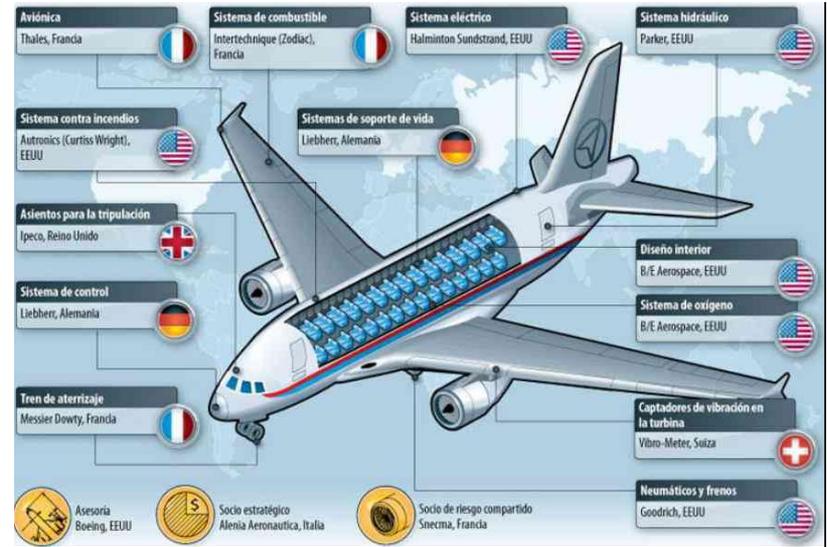
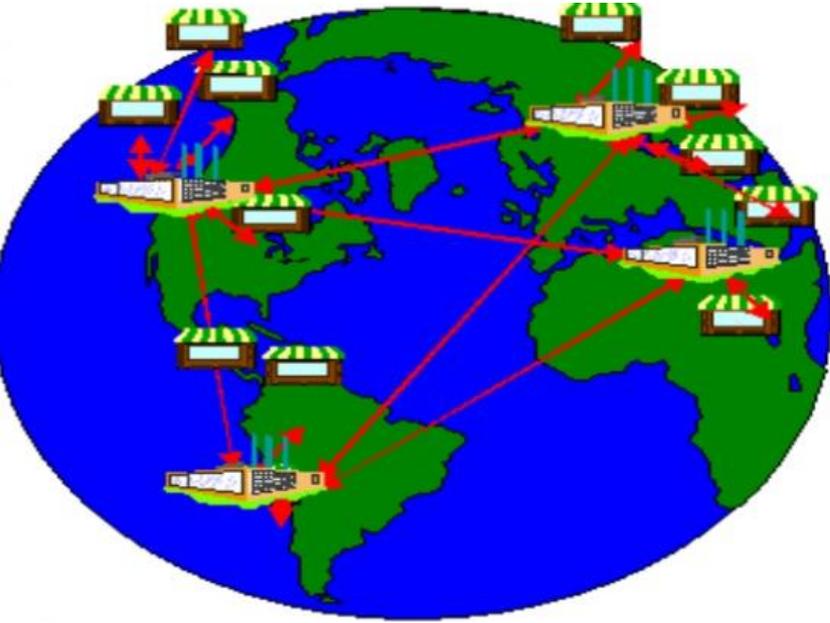
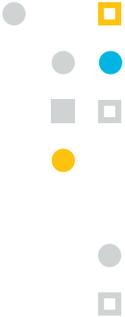


El Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI) es el Instituto Nacional de Metrología (INM) en la Argentina, al cual según el decreto reglamentario 788/03 de la Ley 19511 (Ley de Metrología) le han sido asignadas, entre otras funciones, las de **realizar, producir y mantener los patrones nacionales de medida y difundir su exactitud**

¿Cómo asegurar la  
equivalencia ente mediciones?  
¿por qué?



# ¿Cómo asegurar la equivalencia ente mediciones? ¿por qué?

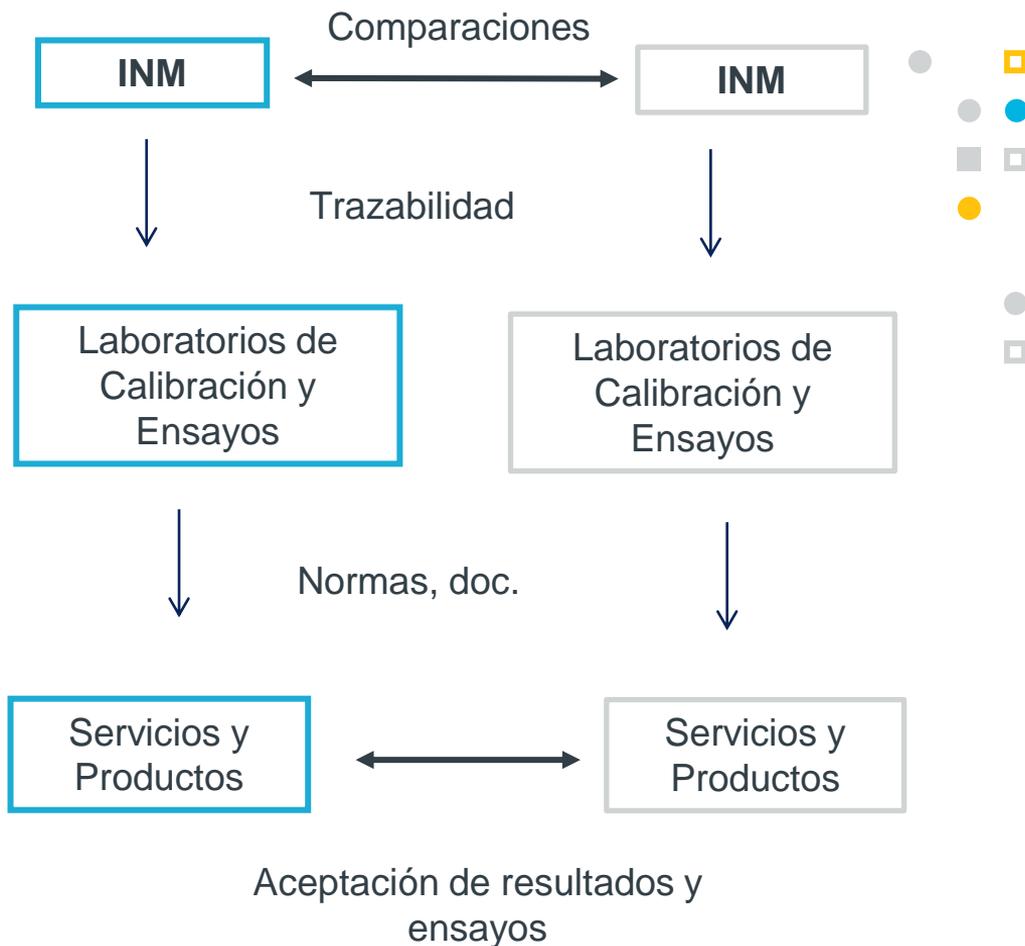


Para asegurar la equivalencia entre mediciones requiere una base **técnica** como la que se muestra en la fig..

En el INM se realiza, mantiene y **disemina la unidad de medida**, y su **equivalencia y exactitud** se sustenta a través de comparaciones entre distintos NMI.

Y se transfiere garantizando la **trazabilidad** de las mediciones, por ende la equivalencia de las mismas a distintos laboratorios de calibración, ensayos.

Resultados **que sustentan la evaluación de la** confiabilidad en el producto final,



Estructura de la base metrológica

Trazabilidad



Si

Instituto  
Nacionales de  
Metrología  
(INTI)

Laboratorios  
secundarios.  
Laboratorios acreditados

Usuarios

The BIPM is an intergovernmental organization established by the Metre Convention, through which Member States act together on matters related to measurement science and measurement standards.



# Entregable

← to BIPM.org

CIPM MRA PARTICIPANTS Login

KCDB

All data listed in the KCDB have been reviewed and approved within the CIPM Mutual Recognition Arrangement

CMCS COMPARISONS NEWS STATISTICS

Calibration and Measurement Capabilities - CMCS

SEARCH

Key and supplementary comparisons

Type a keyword or identifier SEARCH

## Argentina, INTI (Instituto Nacional de Tecnología Industrial)

Angle , Angle by circle dividers : **15 ° to 120 °**

Index table: index angle

Absolute expanded uncertainty : **0.2 "**

Index table and autocollimator, full closure

Measured angle:  $360/n$  °, number of divisions n : 3, 4, 5, 6, 8, 9, 10, 12, 15, 16, 18, 20 and 24

Approved on 27 November 2012

Institute service identifier : INTI/15.04.01.05.00.044

Radiations of the mise en pratique , Laser radiations : **633 nm**

Frequency stabilized laser: vacuum wavelength

Relative expanded uncertainty : **2.0E-9**

Optical beat frequency

Approved on 30 August 2015

Institute service identifier : INTI/102.05.02.05.00.004

Calibración

Incertidumbre

Comparaciones

ISO 17025

evaluaciones de patris

→ VIM

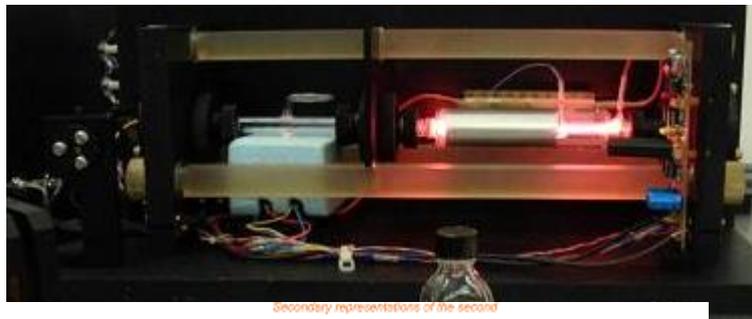
→ GUM

→ CCL

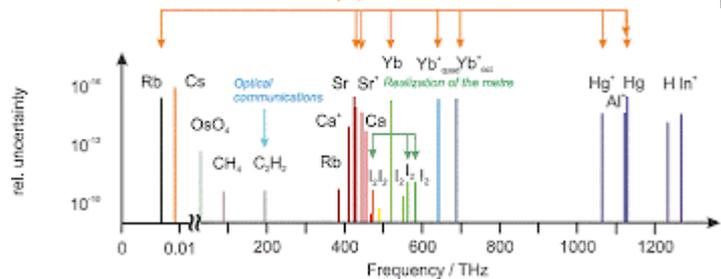
→ evaluaciones de patris



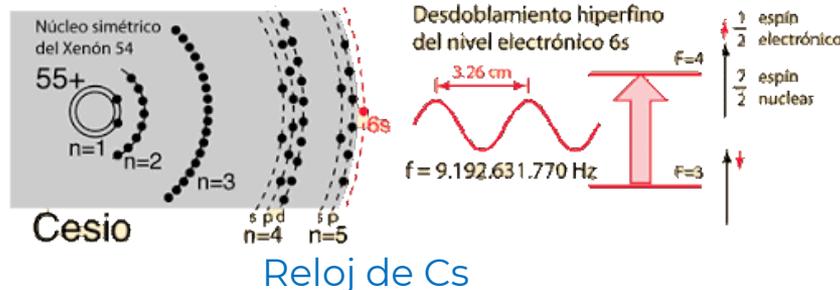
Las unidades se definen a partir de constantes



Secondary representations of the second



Listado de frecuencias ópticas



El **metro**, cuyo símbolo es m, es la unidad de longitud del SI. Se lo define tomando el valor numérico fijado de la velocidad de la luz en el vacío,  $c$ , igual a 299 792 458 cuando es expresada en unidades de  $\text{m s}^{-1}$ , donde el segundo es definido en términos de la frecuencia del cesio  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ .



$$1 \text{ m} = (c/299\,792\,458) \text{ s} = 30.663\,318.. c/\Delta\nu_{\text{Cs}}$$



$\Delta x = v\Delta t$   
*distancia*      *tiempo*

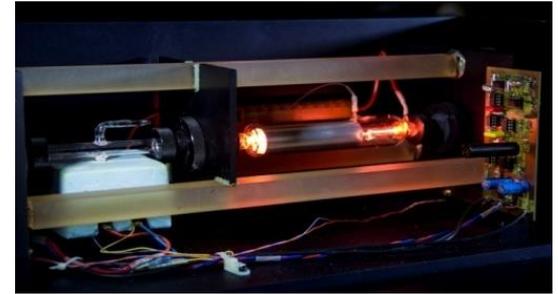
El **segundo**, cuyo símbolo es s, es la unidad de tiempo del SI. Se lo define tomando el valor numérico fijado de la frecuencia de cesio,  $\Delta\nu_{\text{Cs}}$ , la frecuencia de la transición entre niveles hiperfinos del estado fundamental no perturbado del átomo de cesio 133, igual a 9 192 631 770 cuando es expresada en unidades de Hz, que es igual a  $\text{s}^{-1}$ .

$$1 \text{ s} = 9\,192\,631\,770 / \Delta\nu_{\text{Cs}}$$

El desafío, vincular frecuencias en el espacio de las microondas con las frecuencias ópticas



$10^7$  Hz a  $10^{14}$  Hz



El segundo es la unidad  
cuya realización es la más  
exacta

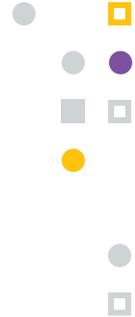
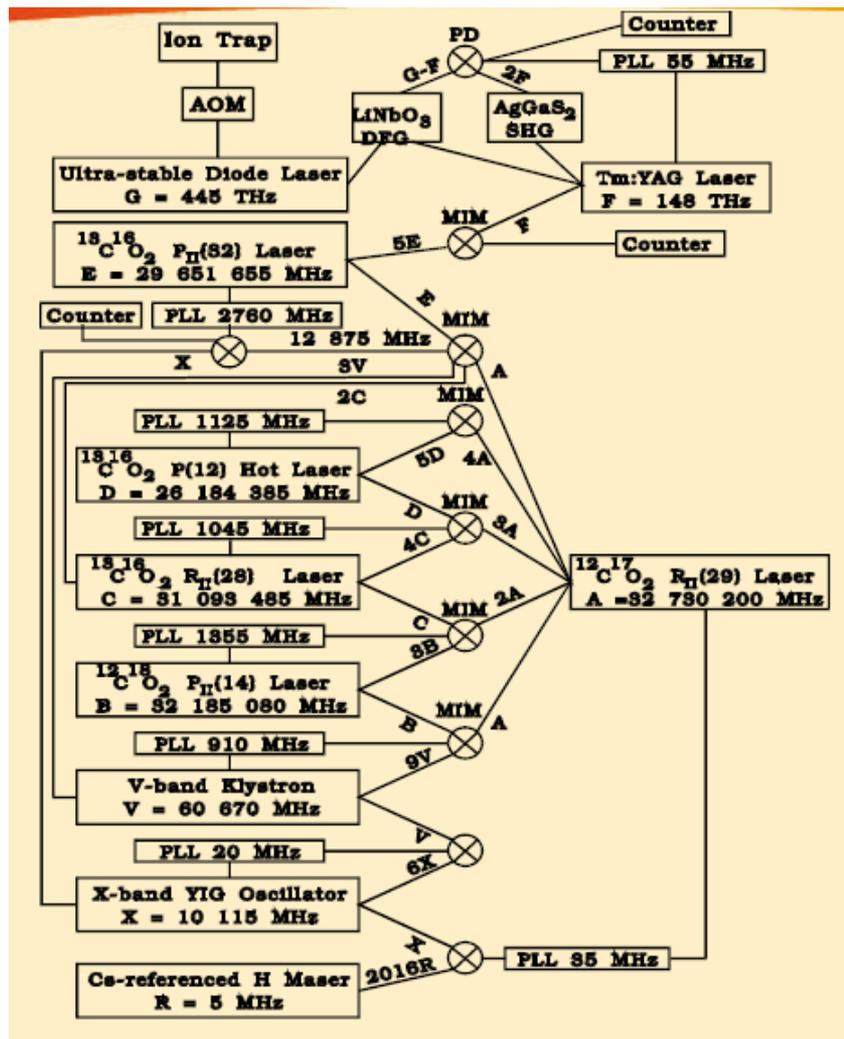
Las *realizaciones practicas* se sugirieren en  
documentos publicados en la pág. Del BIPM

<https://www.bipm.org/en/publications/mises-en-pratique/>



El desarrollo de una cadena de frecuencia para la calibración de un color en el visible típicamente toma el esfuerzo de 5 personas durante 5 años y el equipo ocupa típicamente 5 laboratorios 20 m<sup>2</sup> cada uno

Desarrollados por  
John Hall y Theodor  
Hansch - 2005



# Peine de frecuencias ópticas



El peine de frecuencias es el dispositivo que nos permitirá escalar desde las frecuencias ópticas a las frecuencias patrón a partir de la cual se define el segundo.

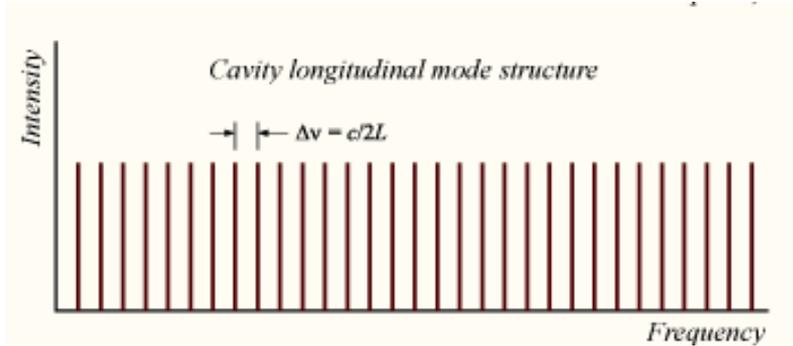
Hoy en día realizar mediciones precisas en el espectro de las frecuencias ópticas (cientos de THz) tiene un montón de dificultades debido a que el ancho de banda de los fotodetectores alcanza tan solo unos GHz.

El avènement de los láseres de pulsos ultra cortos abrió una nueva era a la metrología óptica de alta precisión.

La tecnología de mode locking que es la teoría a partir de la cual se desarrollan este tipo de láseres, se conoce desde hace mucho tiempo, sin embargo desde no hace tanto tiempo fue posible cubrir una octava de frecuencias.

Esto fue posible gracias a las fibras de cristal fotónico, que permiten incorporar altos efectos no lineales

# Un láser de pulsos ultra cortos



Un láser tiene según el largo  $L$  de su cavidad varios modos longitudinales posibles

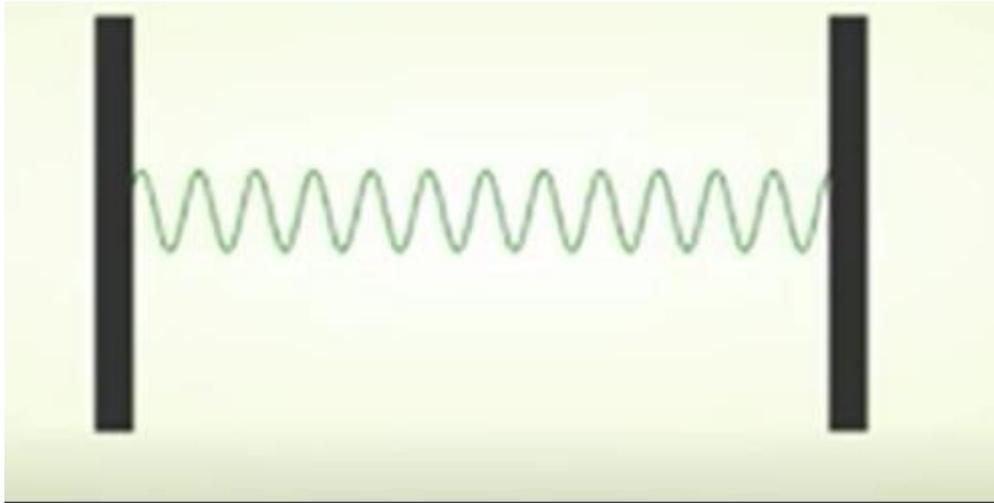
Un láser monocromático está diseñado para emitir en una sola frecuencia, lo que se obtiene acortando la cantidad de modos permitidos.

Un láser de Ti:safiro, (un láser de pulso ultra corto) en cambio tiene un amplio ancho de banda de emisión, que va desde los 600 nm a los 1100 nm, y de absorción que va desde los 400 nm a los 600 nm.

Con una frecuencia entre modos de 80MHz, y un ancho de banda de 50 nm, puede alcanzar del orden de 105 modos.

# Peine de frecuencias ópticas

En una cavidad de Fabri Perot se tienen múltiples modos longitudinales



Si la diferencia de fase entre estos modos es aleatoria, la intensidad a la salida va a exhibir variaciones en Intensidad que se repetirán pero que formaran una onda parecida a ruido.

En cambio si la diferencia de fase es cte, estos intervienen en forma constructiva. Y el resultado es un tren de pulsos cuya repetición es proporcional al tiempo de ida y vuelta dentro de la cavidad.

Se tiene un tren periódico de pulsos ultra cortos emitidos por una onda continua mode lockeada con cierta frecuencia de repetición (frep), que cumple que a mayor cantidad de modos más corto el pulso.

## Técnica de mode Locking

La idea es que todos los modos del láser que contribuyan tengan **bien definida y constante la relación de fase**. A mayor cantidad de mode locked, más corto será el pulso

### Mode locking, pasivo y activo

**Mode locking activo**, En general se realiza mediante una señal eléctrica externa generada por un modulador optoelectrónico que permite mediante una señal eléctrica, producir una modulación de amplitud o de fase de la onda.

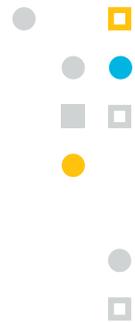
Dada una frecuencia óptica  $\nu$ , que se modula por ejemplo en amplitud a una frecuencia  $f$ , la señal resultante tiene bandas laterales en las frecuencias ópticas  $\nu - f$  y  $\nu + f$ .

Si el modulador se acciona a la misma frecuencia que el espaciado del modo de cavidad  $\Delta\nu$ , entonces estas bandas laterales corresponden a los dos modos de cavidad adyacentes al modo original.

**Mode locking pasivo:** En la misma cavidad se coloca un dispositivo óptico que exhibe una transmisión dependiente de la intensidad. Se suelen denominar **absorbente saturable**.

Este elemento es opaco a bajas intensidad, y transparente a alta intensidad. Mientras esta no lockeado y debido a fluctuaciones de intensidad cualquier pico intenso aleatorio será transmitido lo que conlleva a una amplificación selectiva de los picos de alta intensidad y a la absorción de la luz de baja intensidad.

Después de muchos viajes de ida y vuelta, esto conduce a un tren de pulsos y al mode locking de la cavidad.



**Mode locking por efecto Kerr:** El efecto Kerr, es similar a modo locking pasivo.

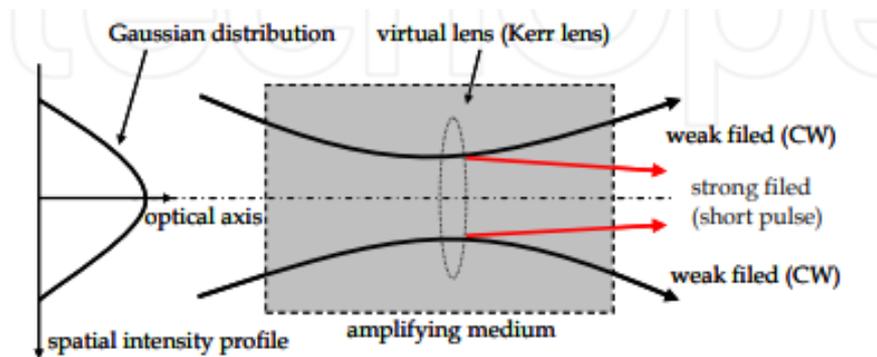
En este caso el elemento tiene una respuesta no lineal a la polarización incidentem que varía con la Intensidad de la onda.

La variación del índice de refracción  $n$  en función de la intensidad

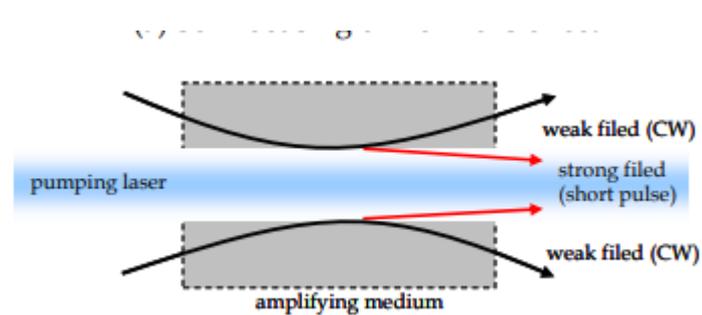
$$n = n_0 + n_2 I \begin{array}{l} \rightarrow \text{Intensidad} \\ \hookrightarrow \text{segundo orden (la no linealidad)} \end{array}$$

En el caso de un láser de TI:safiro el cristal es el elemento no lineal (efecto Kerr) y el medio del laser. Se tienen efecto Kerr trasversal: Que en el dominio espacial y para un perfil de haz gaussiano hace la veces de una lente de autoenfoque.

El efecto Kerr longitudinal, una auto modulación de fase lo que es análogo a una dispersión lineal de la velocidad de grupo, (chirp) que para optimizar los pulsos deberá ser compensada. Si la velocidad de grupo del cristales positiva, (el pico de la envolvente se reatrassa), debe ser compensada con una fuente de velocidad de grupo negativa



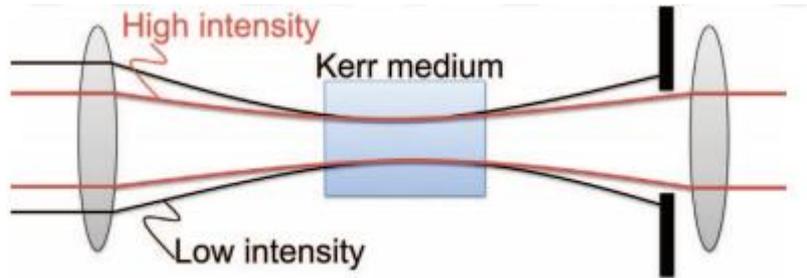
Ajustar el tamaño del haz de bombeo tal que tenga mayor ganancia en las áreas de mayor intensidad



Acoplar el haz de bombeo del forma tal remueva la componente de continua.

El peine que tenemos en el balotario está conformado por una cavidad de Ti:safiro. Tiene un ancho de ganancia que va desde los 680 nm a 1050 nm.

El principio de funcionamiento es efectivamente en lo que se conoce como efecto Kerr.



Los pulsos más cortos posibles se darán cuando el balance entre la dispersión y las no linealidades sea el óptimo



Como la Velocidad de Grupo en el Ti:safiros es positiva. Se debe incluir en la cavidad una fuente de velocidad de grupo negativa

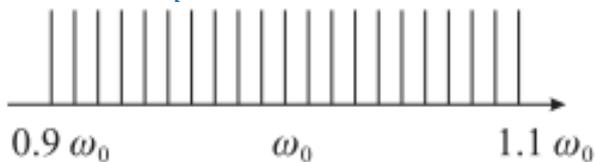
# Peine de frecuencias ópticas

El espectro óptico de un tren de pulsos que se genera en un láser de modulado, no es uniforme como si se tratase de un pulso único, sino que consiste en una serie de líneas discretas espaciado en lo que es su frecuencia de repetición de pulsos .

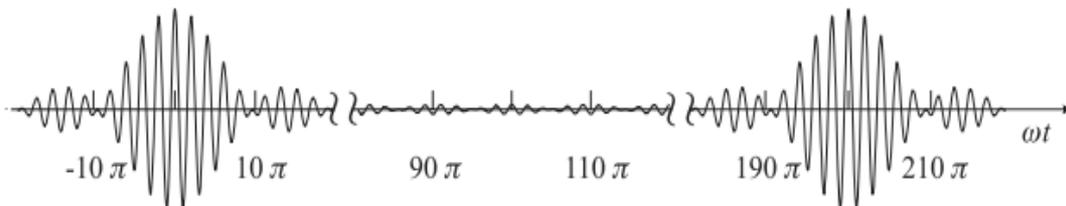
En realidad no suelen ser exactamente equidistantes debido al efecto de la dispersión cromática.

En el dominio del tiempo, esta condición puede entenderse a través del ensanchamiento temporal de pulsos provocado por la dispersión

$$\Delta\omega = 2\pi f_{Rep}$$

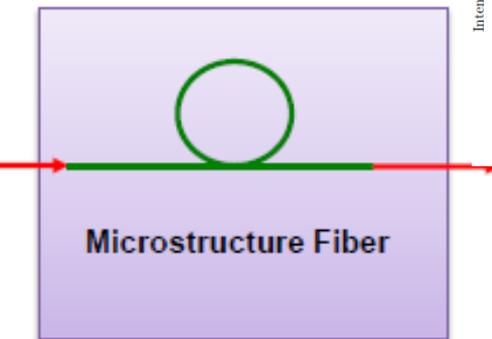
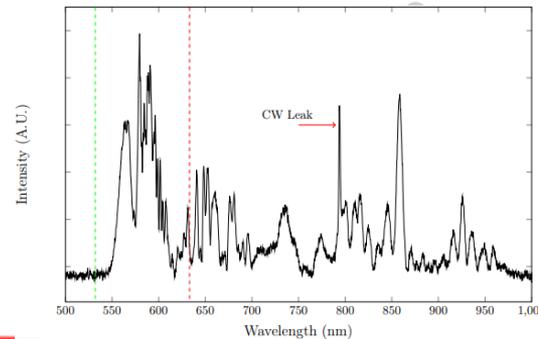
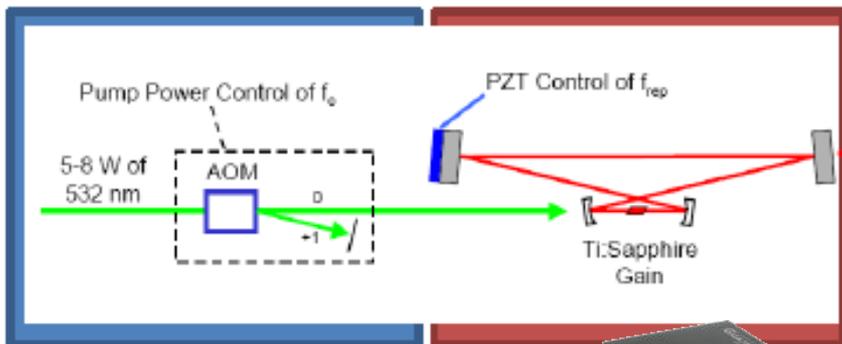
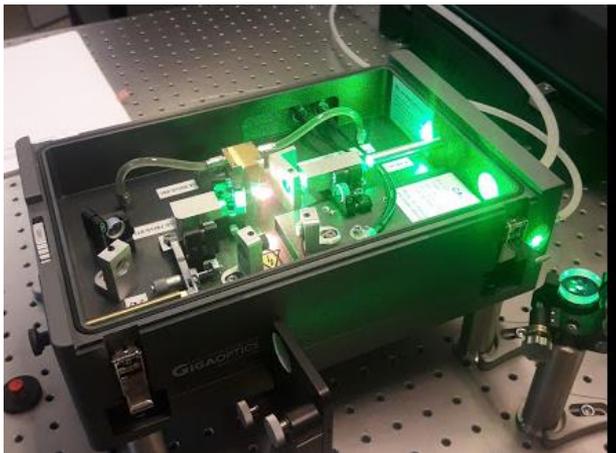


$$E(t) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{i(\omega_0 + n\Delta\omega)t} = e^{i\omega_0 t} \sum_{n=0}^{N-1} e^{in\Delta\omega t} = \left( \frac{1 - e^{iN\Delta\omega t}}{1 - e^{i\Delta\omega t}} \right) e^{-i\omega_0 t}$$



$$I(t) = |E(t)|^2 = \frac{s \sin^2(N\Delta\omega t/2)}{\sin^2(\Delta\omega t/2)}$$

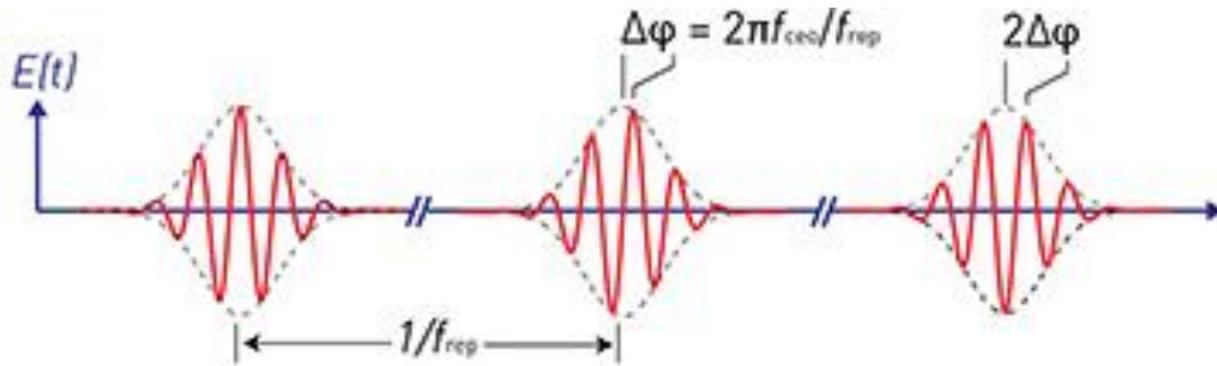
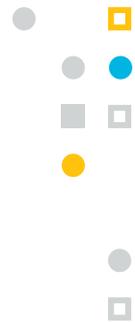
$$T_p \approx \frac{2\pi}{\Delta\omega N}$$



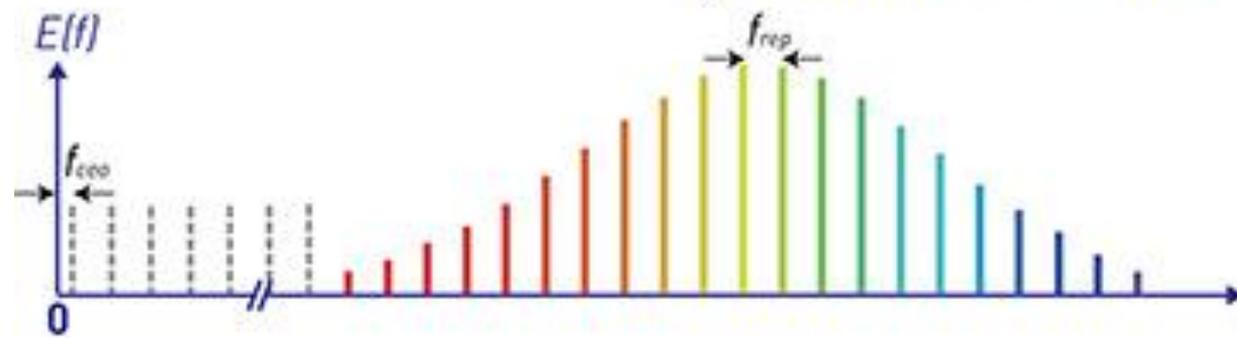
Generación de súper continuo



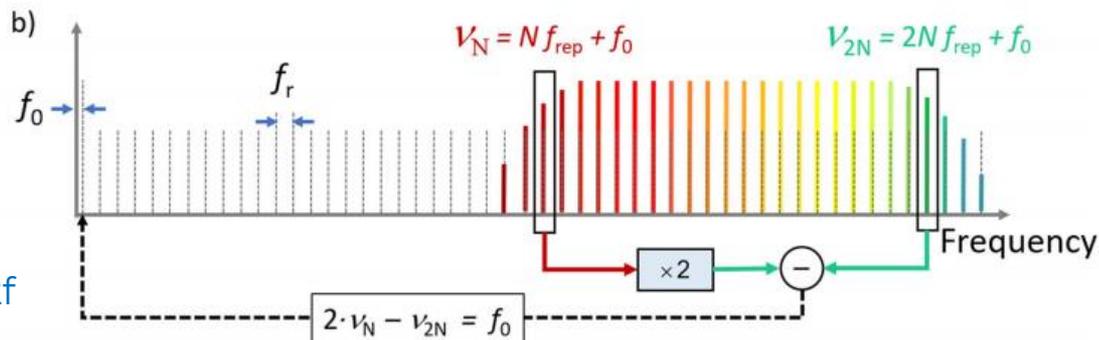
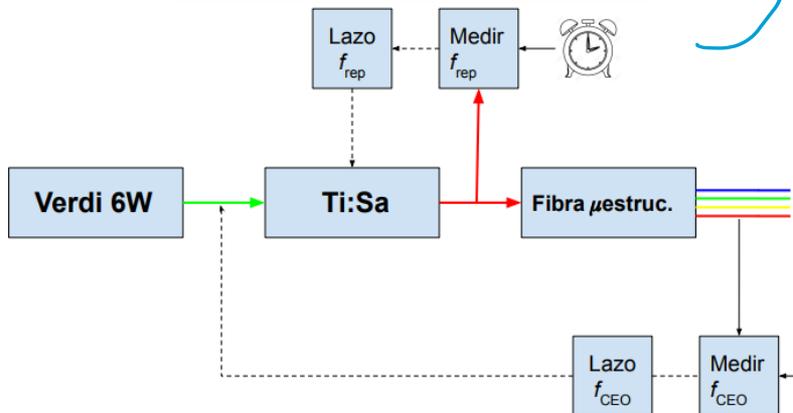
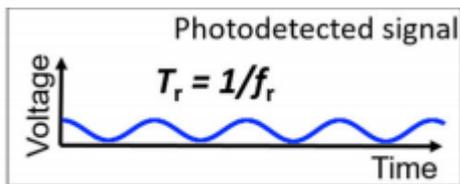
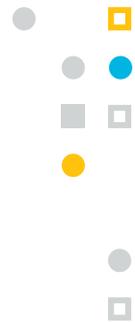
# Generación del super continuo



Fourier transformation

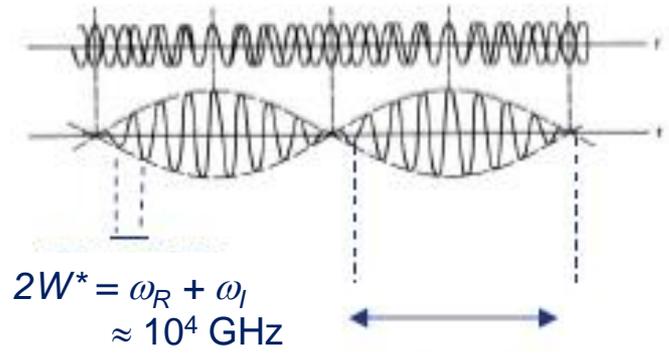
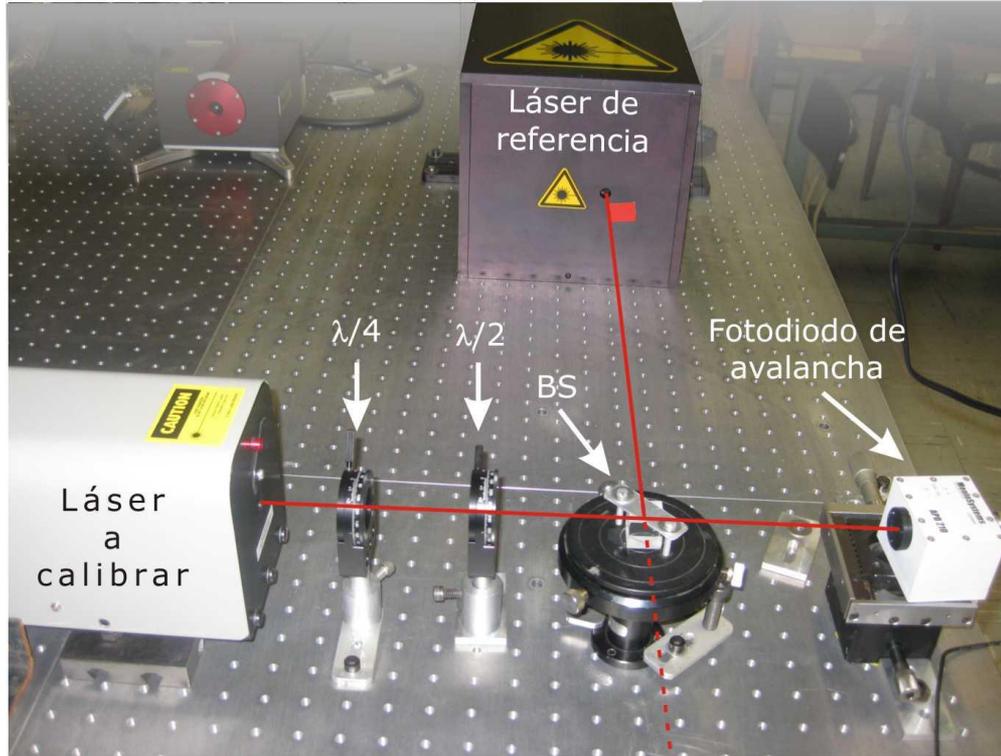


$$f_n = n f_{rep} + f_{Ceo}$$



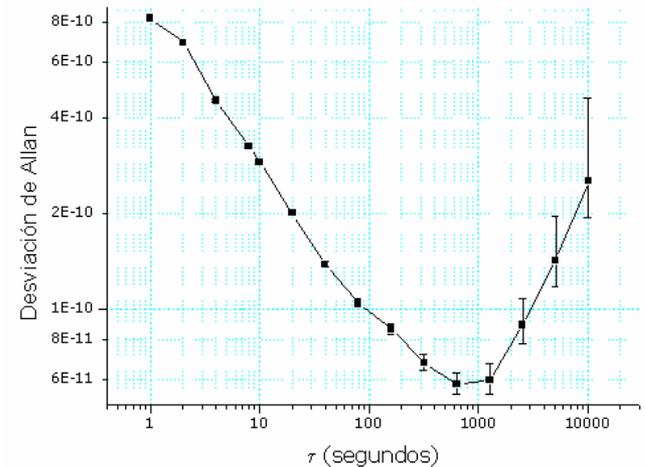
Interferómetro 2-2f

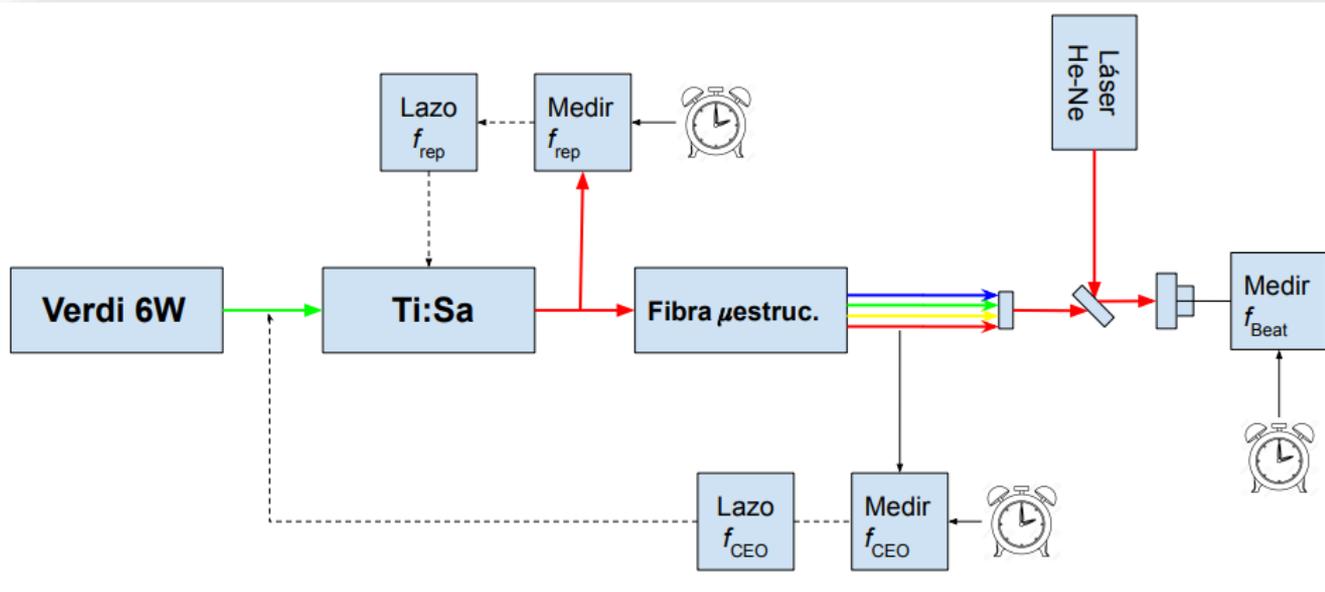
# Calibración en frecuencia



$$2W^* = \omega_R + \omega_I \approx 10^4 \text{ GHz}$$

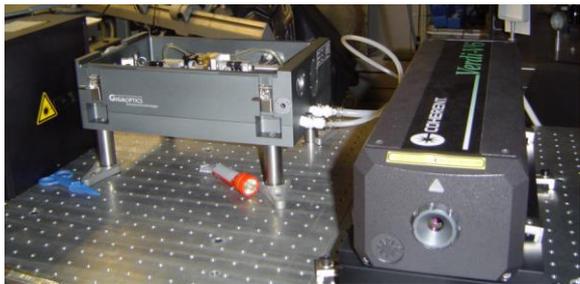
$$2W = \omega_R - \omega_I \approx 300 \text{ MHz}$$





El conocimiento sobre el La frecuencia absoluta de un modo se puede utilizar para determinar la frecuencia absoluta de cualquier otro modo.

# Calibración en frecuencia y diseminación de la frecuencia



Láser de referencia

Reloj de Cesio

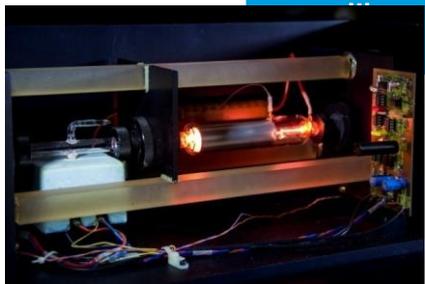
Contador

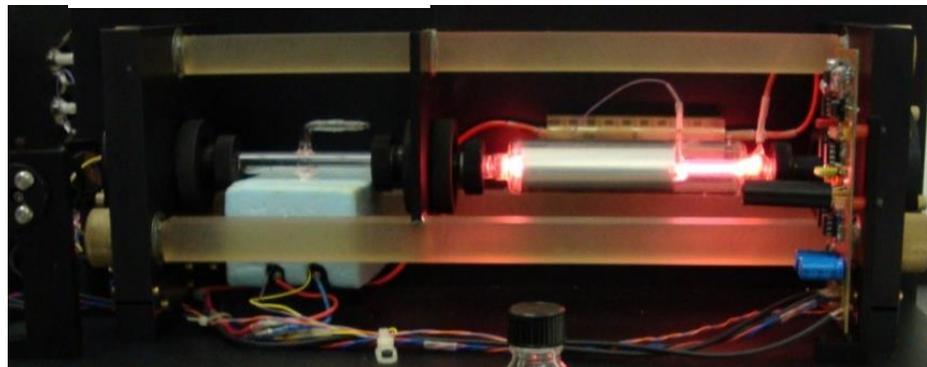
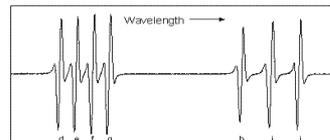
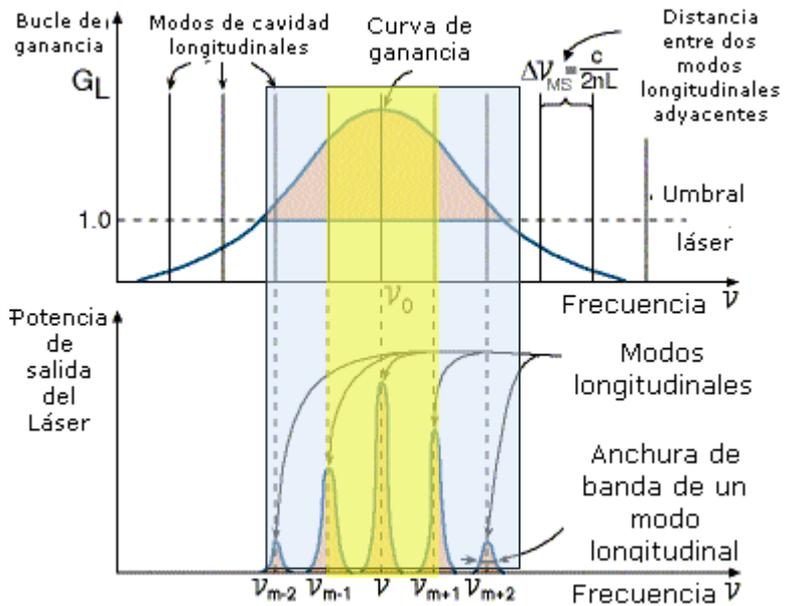
Adquisición de datos

Láser a

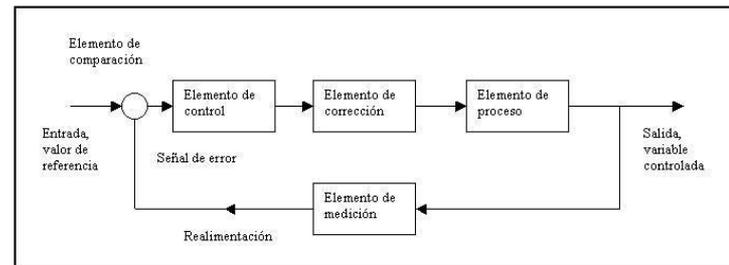


Detector de avalancha





Cuando sintonizo la frecuencia del láser, (variando el largo de la cavidad) en el centro de una transición del  $I_2$ , la absorción es “menor”. Esta señal se utiliza de feedback para “enclavar” aun mas la frecuencia



## MEP 2003

### IODINE ( $\lambda \approx 633 \text{ nm}$ )

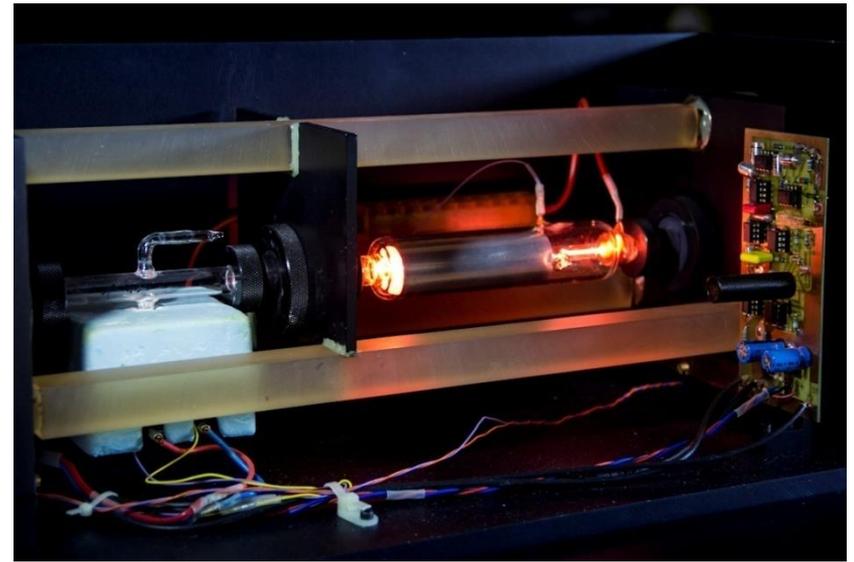
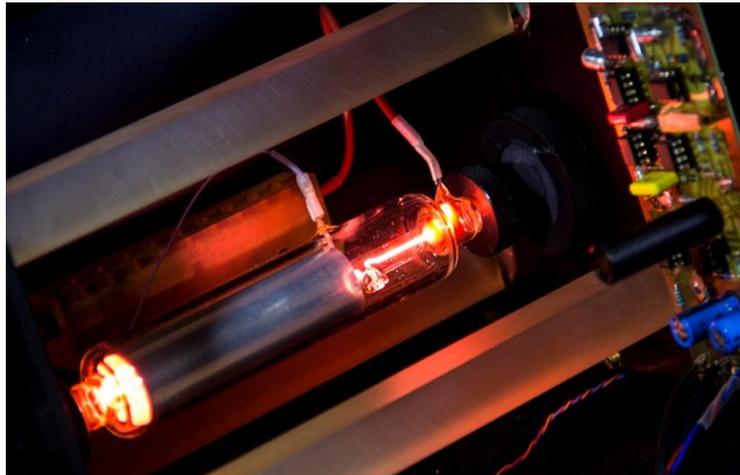
Absorbing molecule  $^{127}\text{I}_2$ , a<sub>16</sub> or f component, R(127) 11-5 transition <sup>(1)</sup>

#### 1. CIPM recommended values

The values  $f = 473\,612\,353\,604 \text{ kHz}$   
 $\lambda = 632\,991\,212.58 \text{ fm}$

with a relative standard uncertainty of  $2.1 \times 10^{-11}$  apply to the radiation of a He-Ne laser with an internal iodine cell, stabilized using the third harmonic detection technique, subject to the conditions:

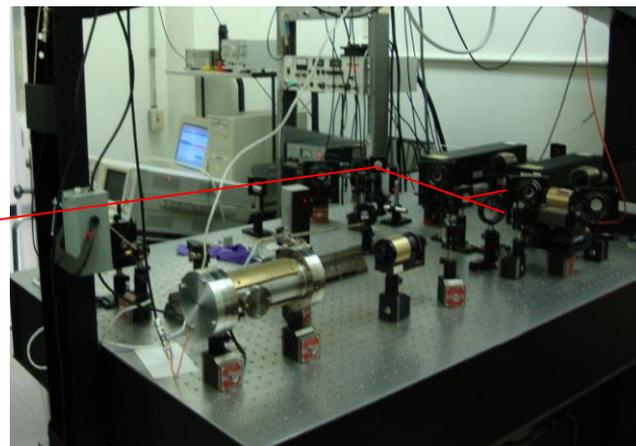
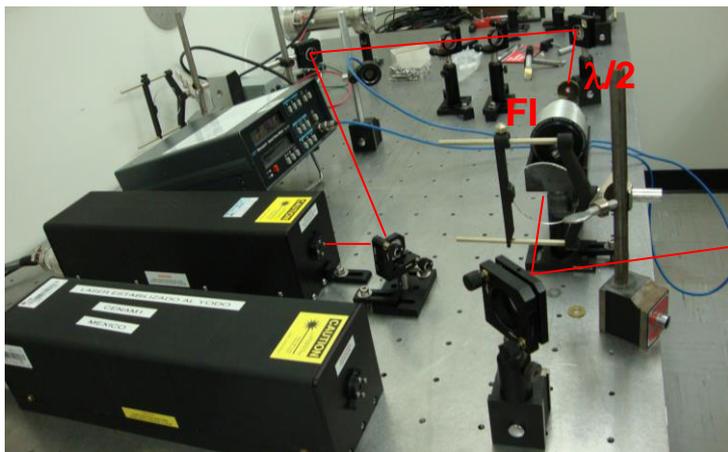
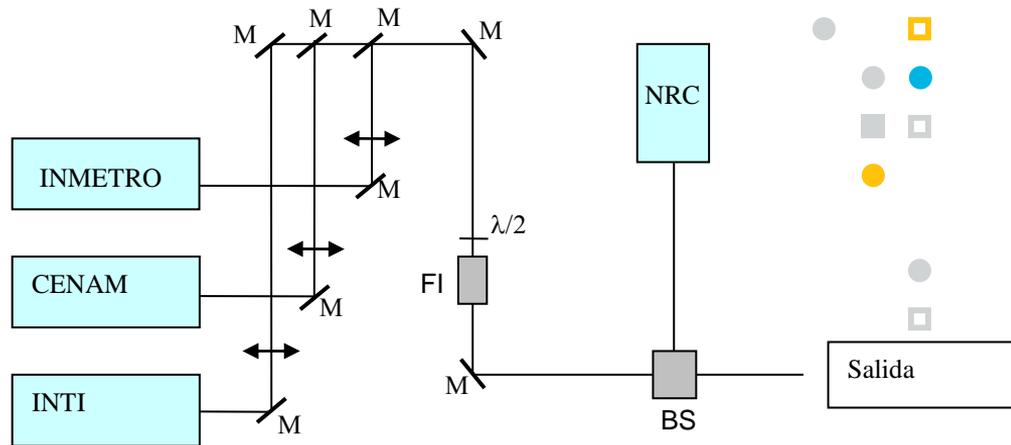
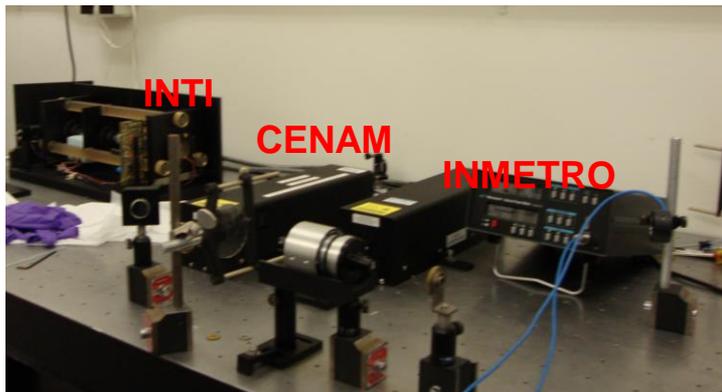
- cell-wall temperature ( $25 \pm 5$ ) °C <sup>(2)</sup>;
- cold-finger temperature ( $15.0 \pm 0.2$ ) °C;
- frequency modulation width, peak-to-peak, ( $6.0 \pm 0.3$ ) MHz;
- one-way intracavity beam power (i.e. the output power divided by the transmittance of the output mirror) ( $10 \pm 5$ ) mW for an absolute value of the power shift coefficient  $\leq 1.0 \text{ kHz/mW}$ .



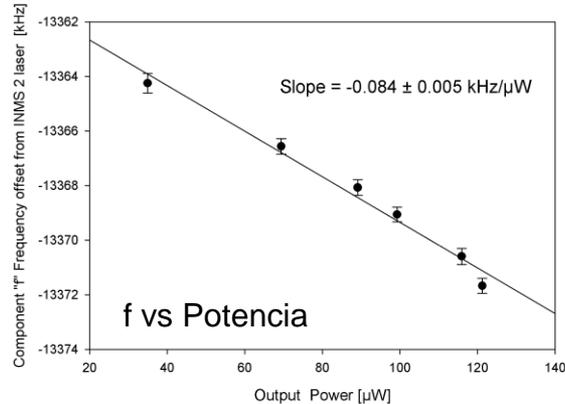
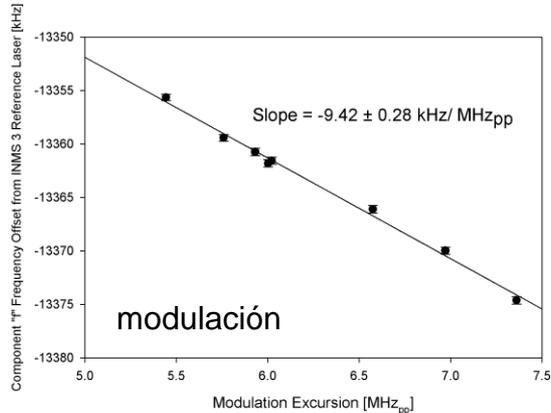
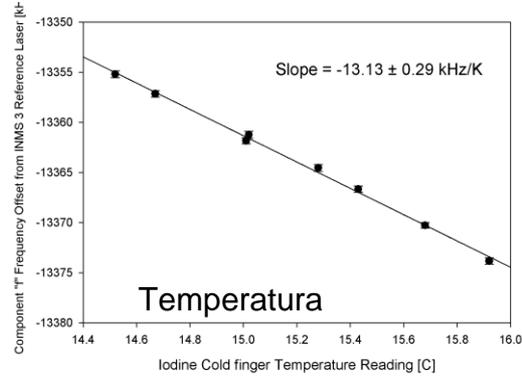
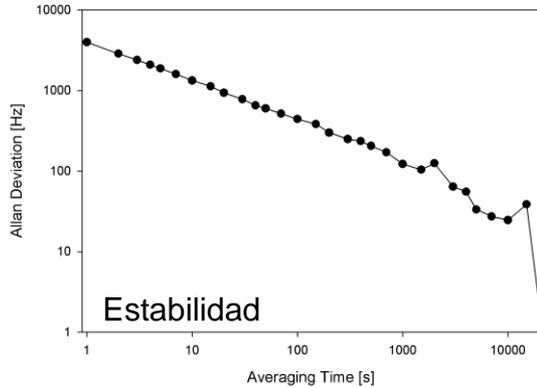
$$\frac{u_{Vieja}}{f_{Vieja}} = 2.10^{-11}, \quad \frac{u_{Nueva}}{f_{Nueva}} = 8.10^{-13}$$

$$\frac{\Delta f}{f} = 8.10^{-12}$$

Intercomparación CCL-K11, 2009 , NRC.



# Metro SI Argentino: Resultados



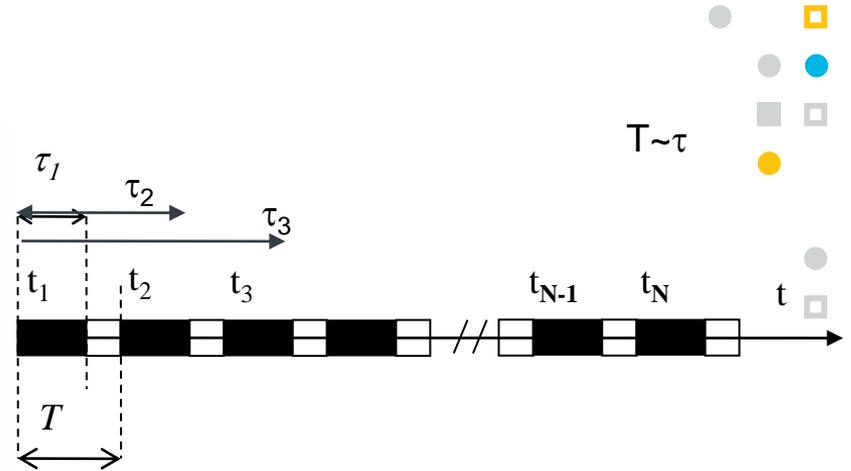
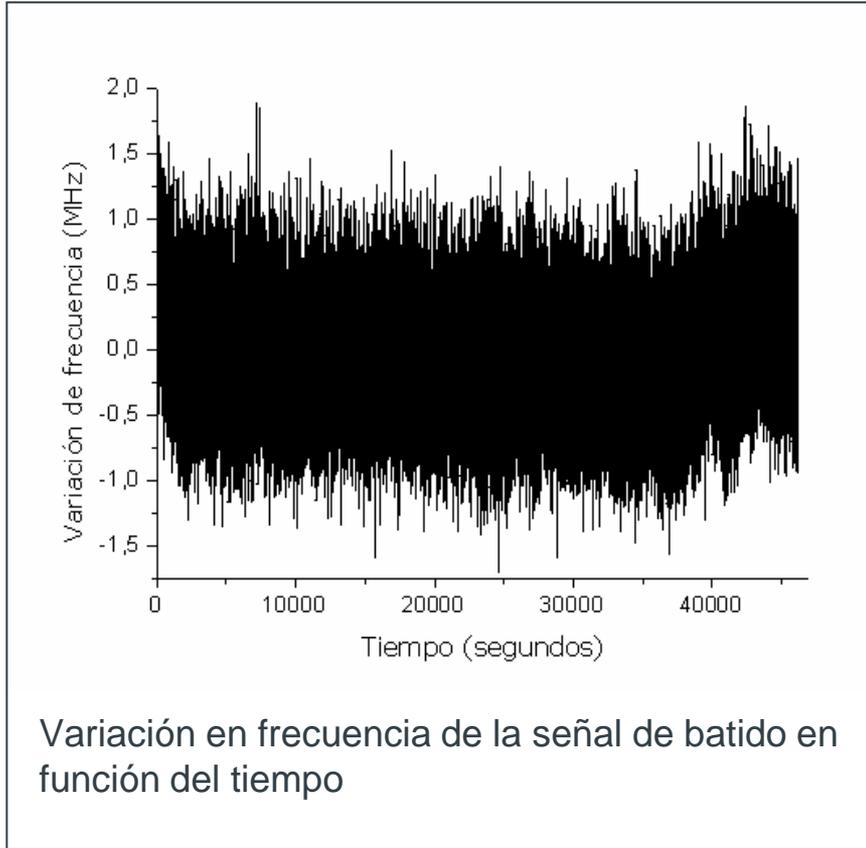
- parámetros de sensibilidad
- Estabilidad del láser
- Frecuencia

$$\frac{u_{Vieja}}{f_{Vieja}} = 2.10^{-11}$$

$$\frac{u_{Nueva}}{f_{Nueva}} = 8.10^{-13}$$

$$\frac{\Delta f}{f} = 8.10^{-12}$$

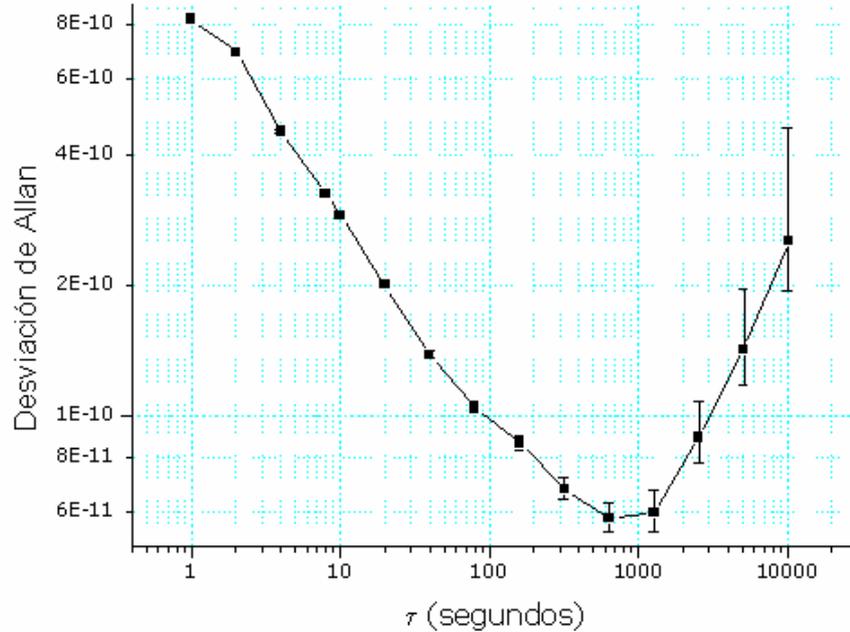
# Varianza de Allan, Varianza Standard



$$\sigma_y^2(\tau) = \frac{1}{2(N-1)} \sum_{i=1}^{N-1} (y_{i+1} - y_i)^2$$

$y_i$  es la  $i$ -ésima frecuencia promediada en el intervalo  $\tau$ , con  $\tau = m\tau_0$  el intervalo de observación, y  $m = 2^N$  el máximo número de cálculos posibles

# Medición de la estabilidad de un láser



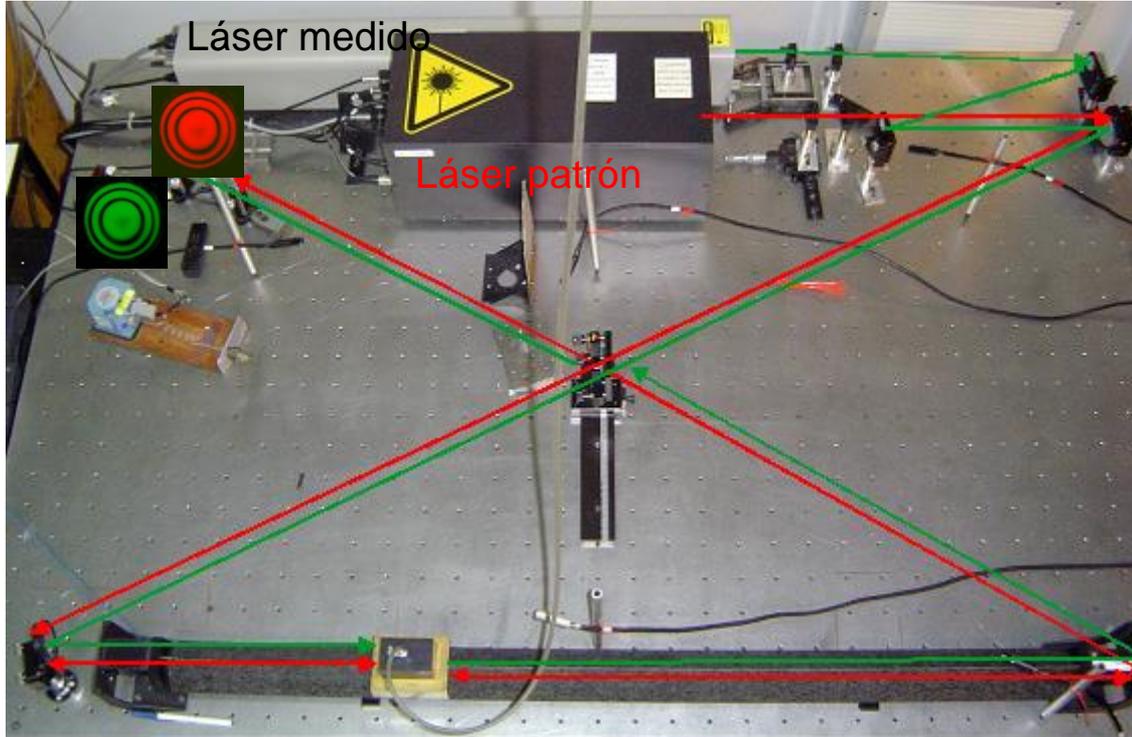
## Varianza de Allan

$\sigma_y(\tau)$	$\sigma_y(\tau_{Cs})$	$\sigma_y(\tau_{Ref})$	$\tau$ (s)
$8.3 \cdot 10^{-10}$	$\leq 1.210^{-11}$	$9.3 \cdot 10^{-13}$	1
$2.9 \cdot 10^{-10}$	$\leq 8.510^{-12}$	$3.510^{-13}$	10
-	-	$1.4 \cdot 10^{-13}$	100
$8.6 \cdot 10^{-11}$	$\leq 2.710^{-12}$	-	160

$$\sigma_y(\tau) > \sigma_y(\tau_{Cs}) \quad \text{y} \quad \sigma_y(\tau) > \sigma_y(\tau_{Ref}) \quad \forall \tau$$

Desviación de Allan  $\sigma_y(t)$  relativa en función del tiempo de muestreo.

## Calibración en longitud de onda



$$L = N_R \lambda_R = N_V \lambda_V$$

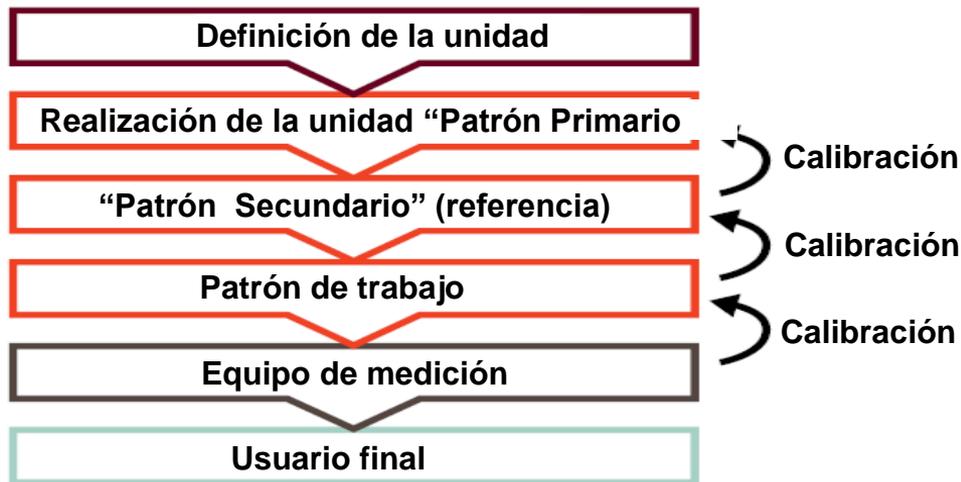
$$\lambda_{0V} = \frac{N_R}{N_V} \frac{n_V}{n_R} \lambda_{0R}$$

$\lambda_0$  la longitud de onda en el vacío,  $n$  el índice de refracción en el aire y  $N$  el número de franjas.

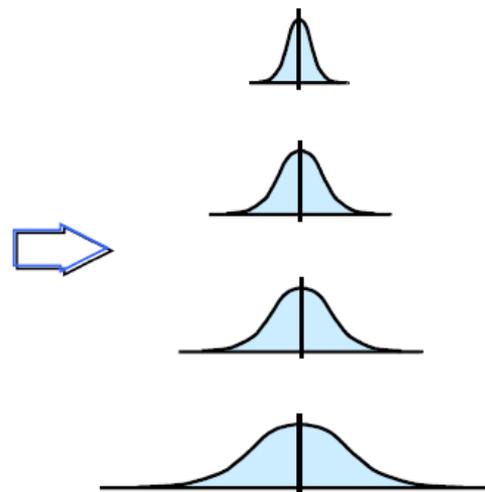


# Trazabilidad

**Calibración:** Un conjunto de acciones que tiene como objetivo determinar el valor verdadero de una dada magnitud.



Cadena de trazabilidad

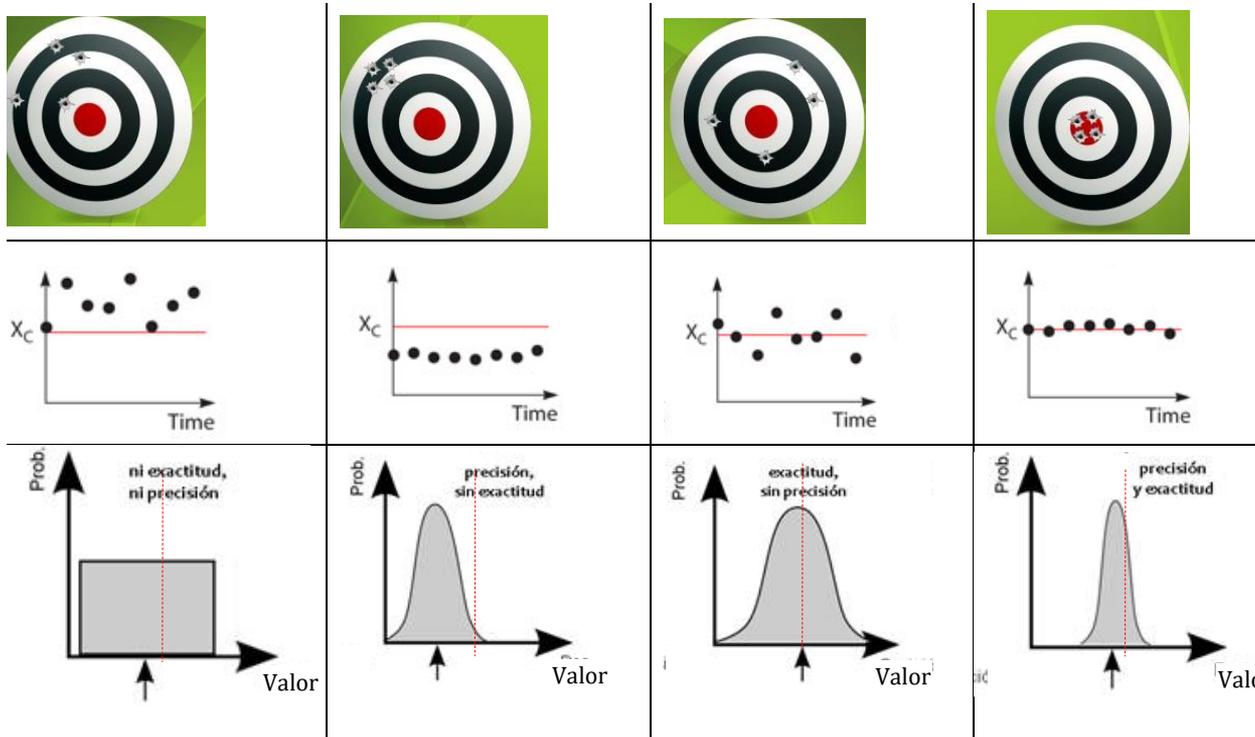


incertidumbre

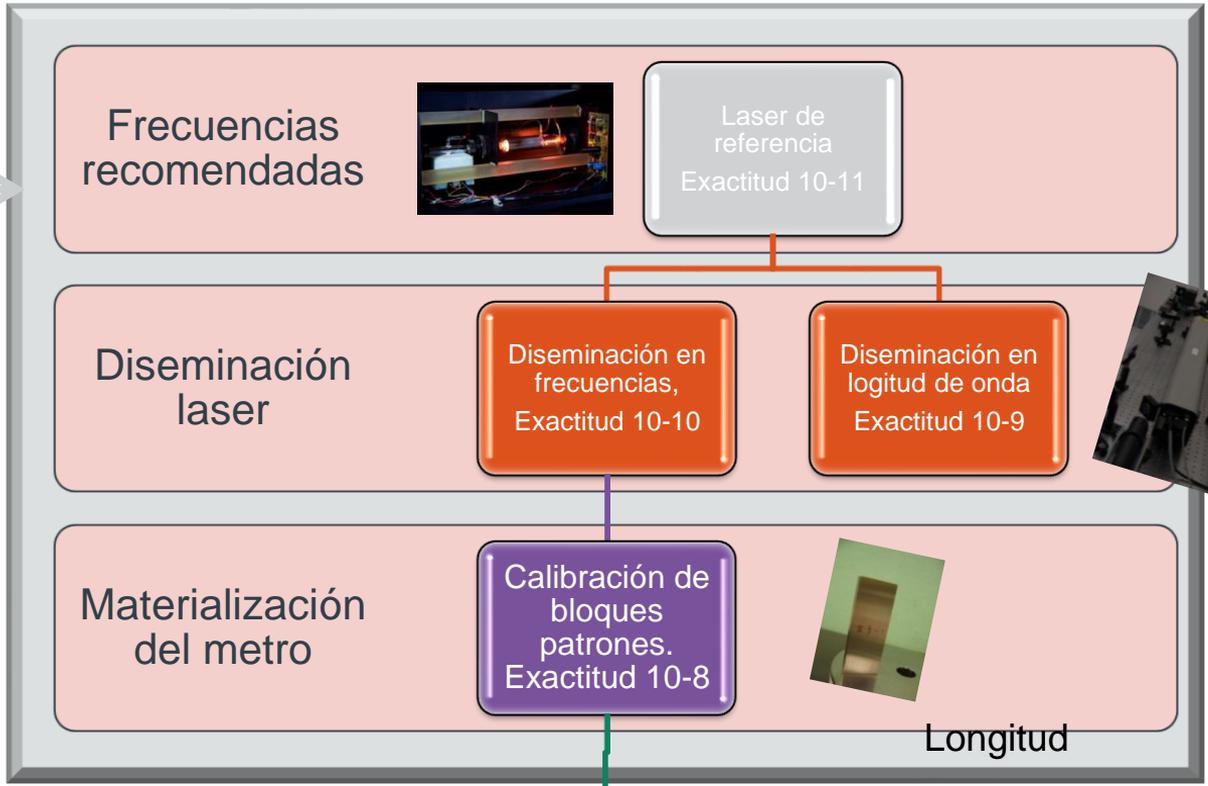
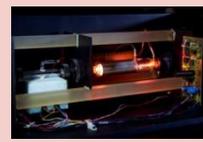
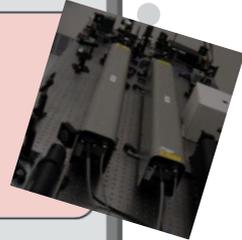
## Trazabilidad metrológica:

propiedad de un resultado de medición a partir del cual el resultado puede relacionarse con una referencia mediante una cadena ininterrumpida y documentada de calibraciones, cada una de las cuales contribuye a la incertidumbre

**PRECISIÓN:** Medida de cuán bien se puede reproducir un resultado (dispersión) es una medida de las dimensiones de las incertidumbres aleatorias (tipo A). Condiciones especificadas.



**EXACTITUD:** Proximidad entre un valor medido y un valor verdadero de un mesurando. Las incertidumbres sistemáticas afectan directamente a la exactitud.



Frecuencias recomendadas

Laser de referencia  
Exactitud 10-11

Diseminación laser

Diseminación en frecuencias,  
Exactitud 10-10

Diseminación en logitud de onda  
Exactitud 10-9

Materialización del metro

Calibración de bloques patrones.  
Exactitud 10-8

Longitud

Índice de refracción

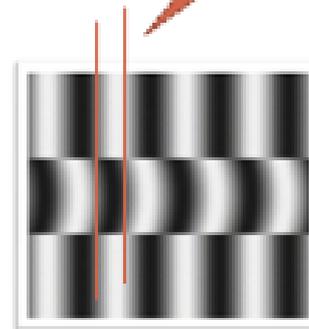
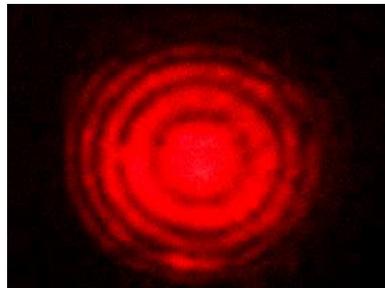
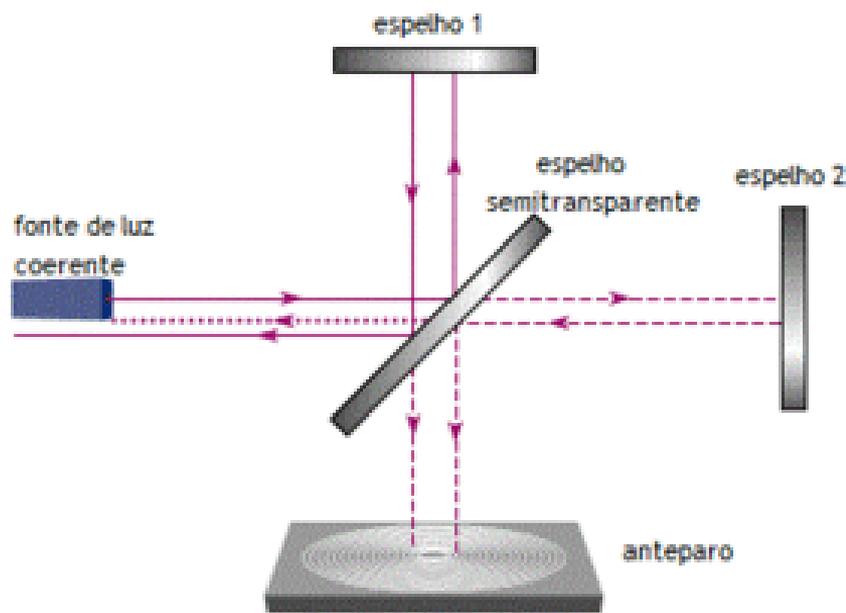
Temperatura

Medición en forma absoluta de la frecuencias de un laser, (luz visible), a la frecuencia de un reloj, (microondas)



Tiempo y Frecuencia

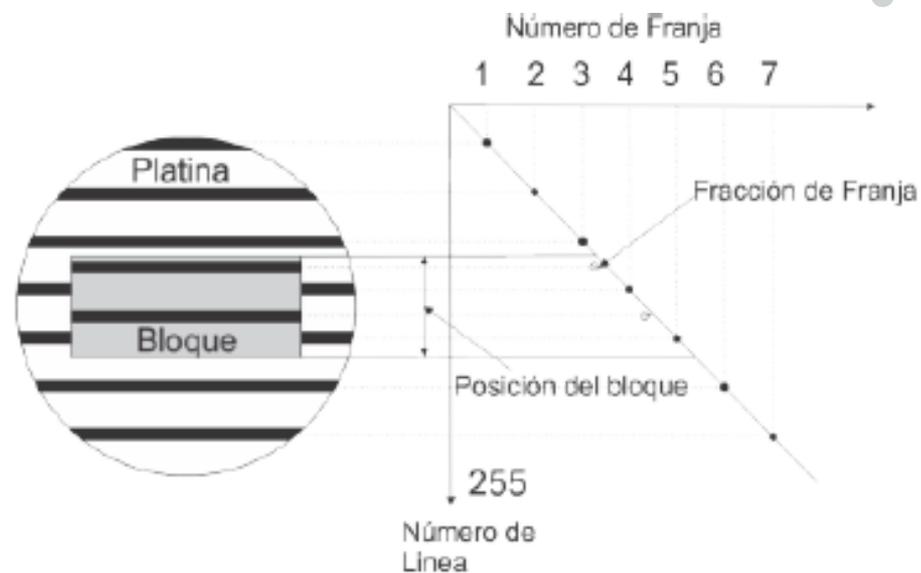
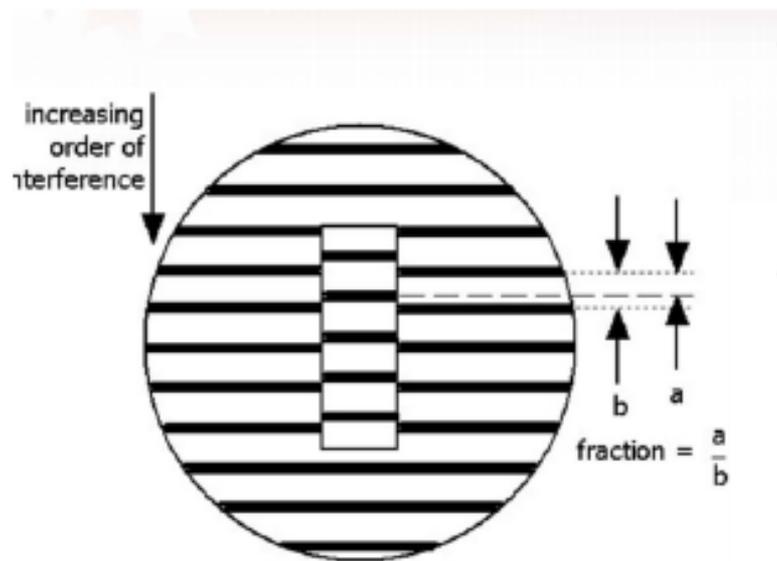
Cadena de trazabilidad

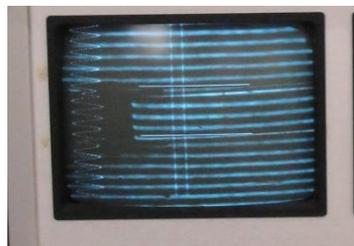


En rigor, no se mide la longitud del bloques. Se mide el desvío respecto de la longitud nominal. Para ello se mide la fracción,  $F$ , de desplazamiento entre franjas.

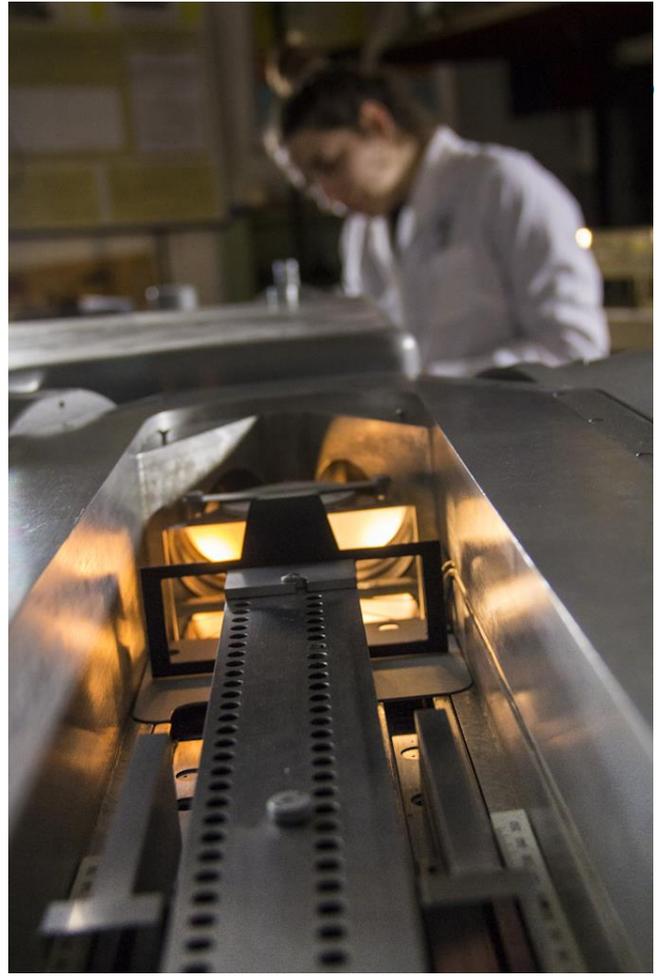
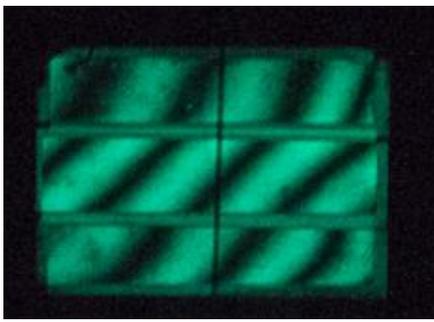
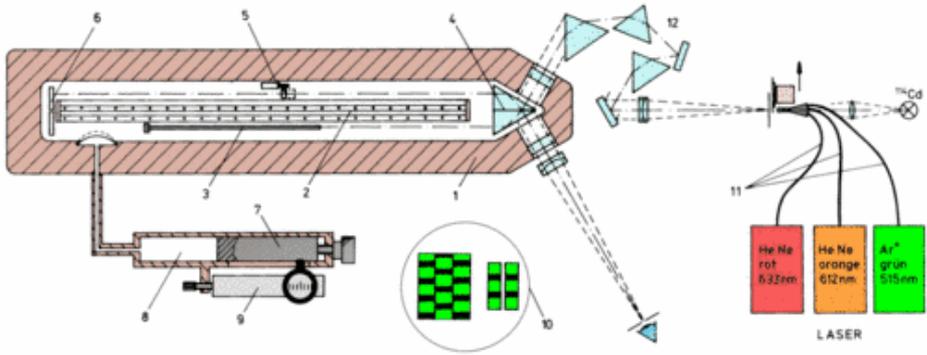
Para poder determinar el desvío es necesario entonces conocer a priori, la longitud nominal del bloque, y medir con al menos dos longitudes de onda distintas

La exactitud se mejora aumentando la cantidad de láseres estabilizados con los que se realiza la medición



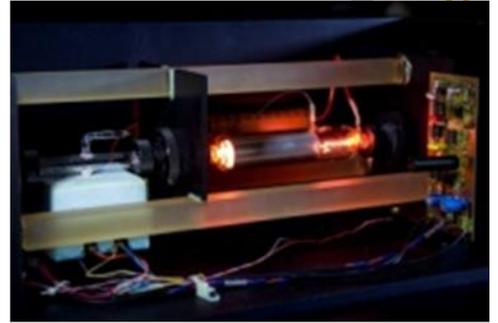
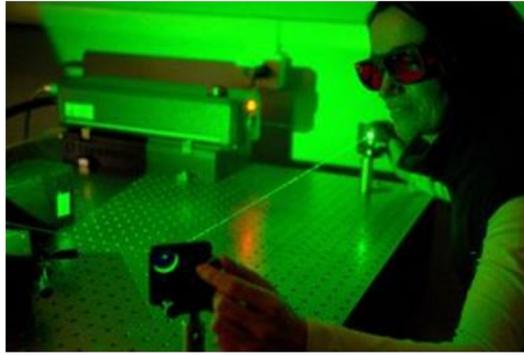


**Excedentes fraccionarios**





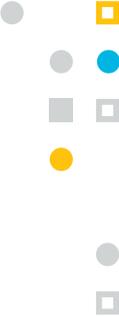
$10^{15}$



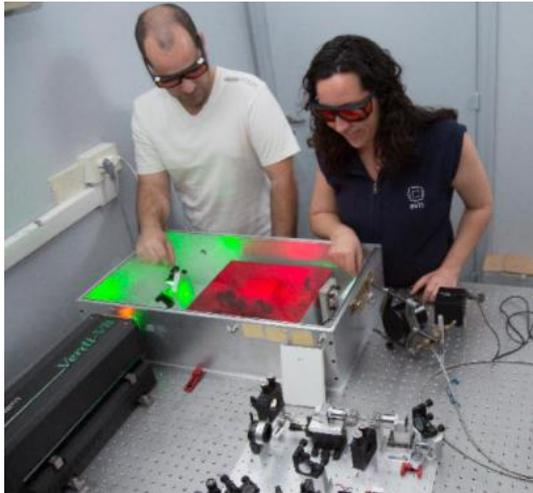
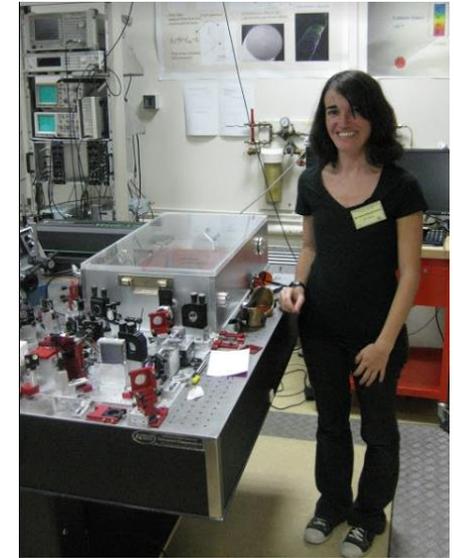
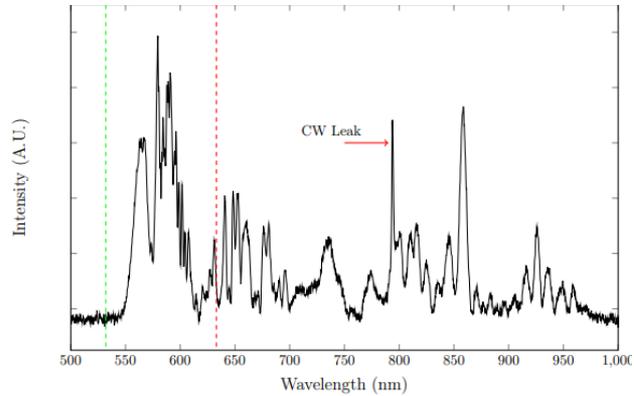
$10^{13} - 10^{11}$



# Departamento de Óptica y Dimensional



# Peine de frecuencias ópticas

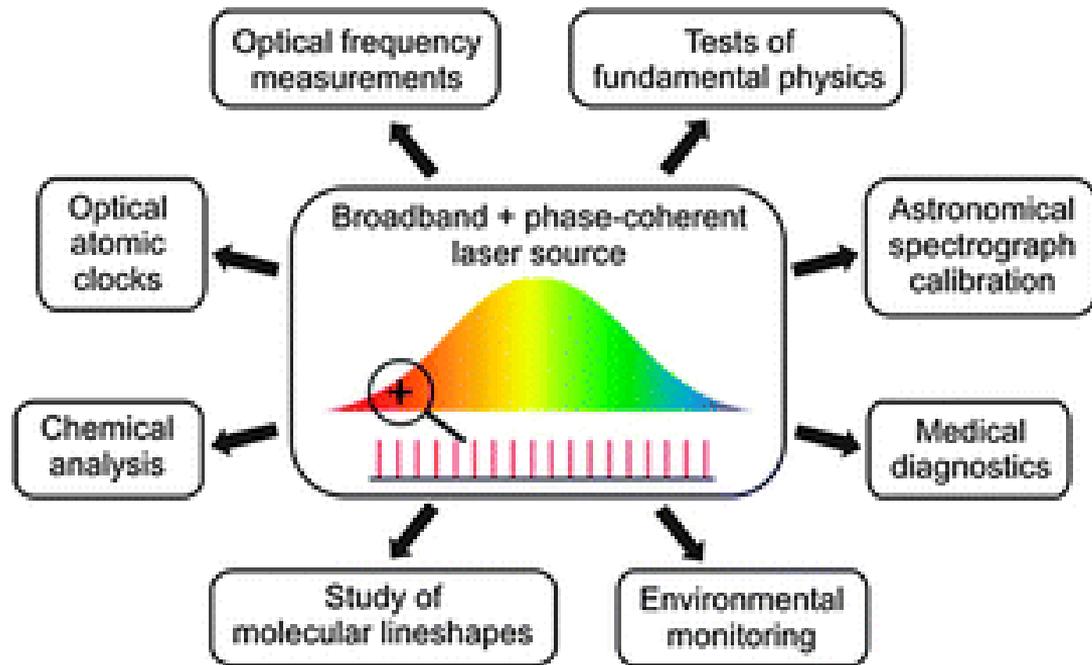


Diego Luna  
Fernando Yapur  
Criselda Mingolla,

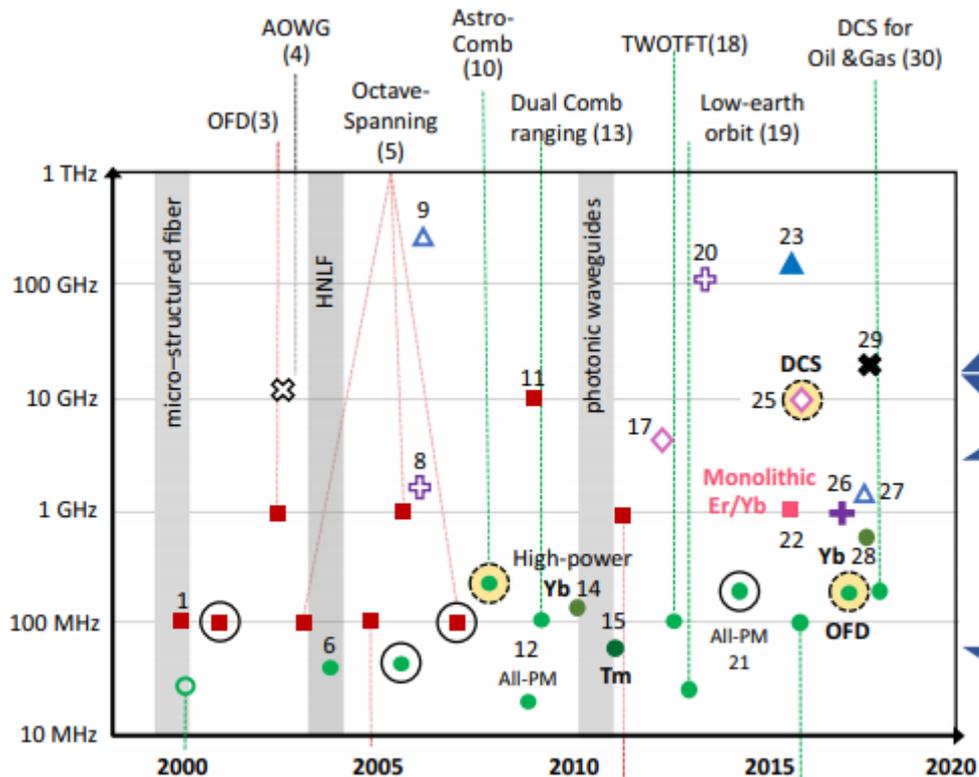




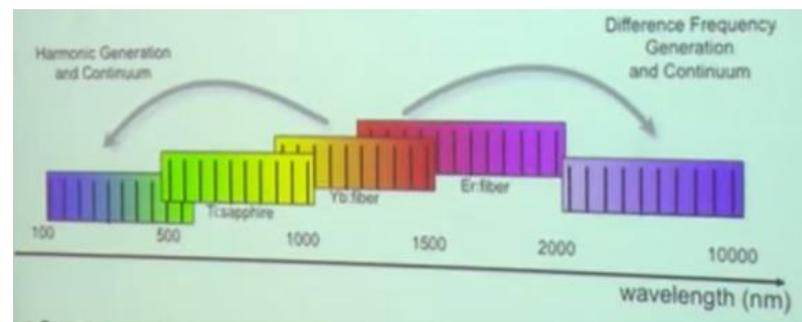
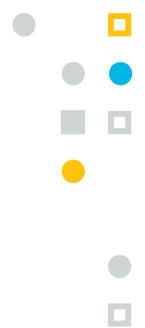
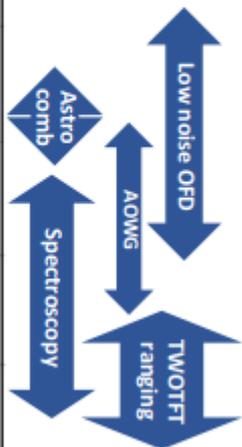
¿Qué sigue?



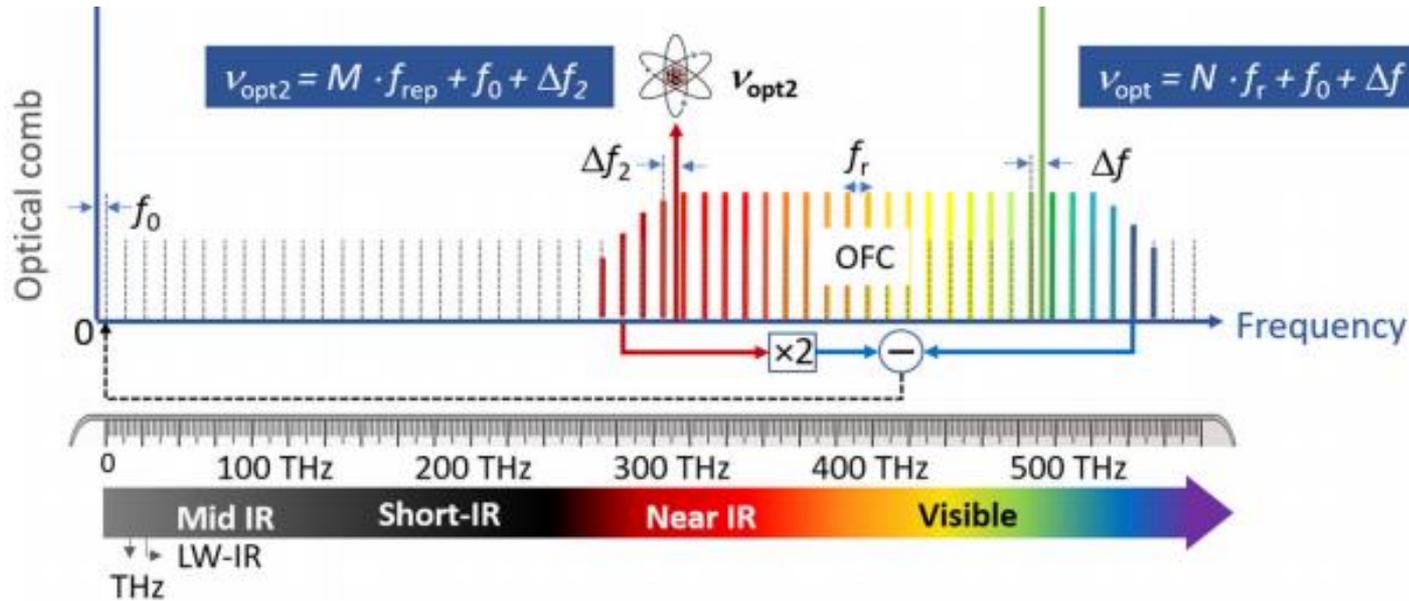
Mode Spacing



- ◆ QCL-comb
- ▲ Micro-comb
- ✚ MIXSEL
- ✕ EO-comb
- Fiber-comb
- Solid-state comb



## Comparación de relojes ópticos



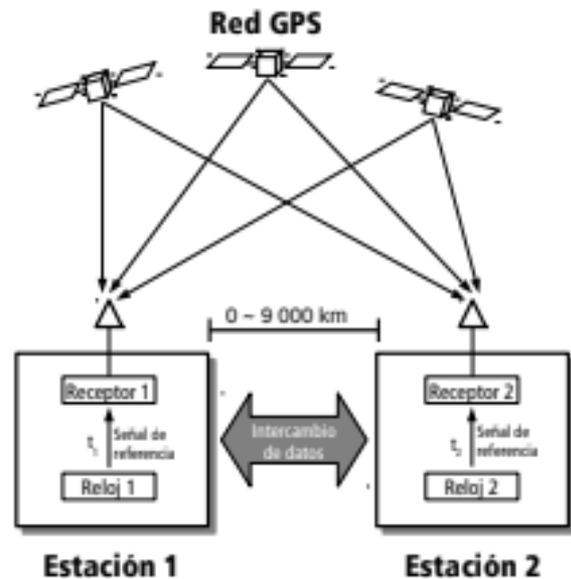
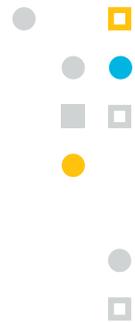
Las comparaciones ópticas producen increíbles precisión porque los errores de referencia de microondas en  $\Delta f$  y  $\Delta f_2$  son aditivos a la frecuencia óptica. Un error fraccional de  $10^{-12}$  en  $\Delta f = 100$  MHz, solo produce un error de frecuencia de 100  $\mu\text{Hz}$ .

Este error en un portador óptico de 500 THz solo contribuye de manera fraccional a 2 partes en  $10^{19}$ .

$$\left. \begin{array}{l} \Delta f = 10^{-12} \Rightarrow \Delta f = 100 \mu\text{Hz} \\ \frac{\Delta f}{f} \end{array} \right\}$$

$$\frac{100 \mu\text{Hz}}{500 \text{THz}} \sim 2 \cdot 10^{-19}$$

## Comparación de relojes en es el espectro de microondas

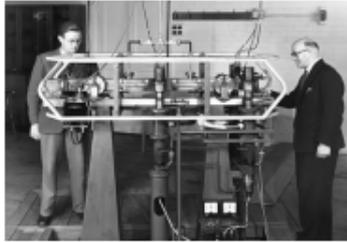


(a) Comparación por Vista Común



(b) Comparación de radiofrecuencias por fibra óptica

# Atomic clocks relative accuracy

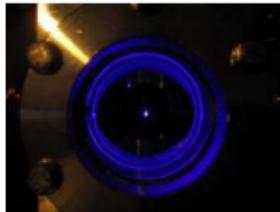


**First Cs beam clock  
(1955)**



**First Cs fountain  
(1996)**

**Cs fountain clocks  
(today)**

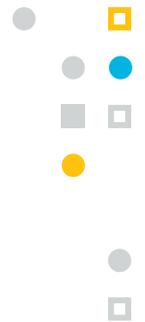


**Best optical clocks  
(today)**



**Satellite  
techniques  
(1 day averaging)**

**Optical links  
(1 day averaging)**

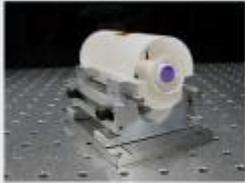


# Critical technologies for Optical Clocks



**Laser cooling & trapping** of neutral atoms and single ions

- ▶ Long interaction time
- ▶ Suppression of Doppler shifts



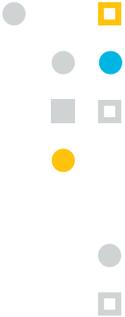
Stabilization of laser frequency on high-finesse Fabry-Pérot cavities and **hertz-wide lasers**, needed for high-resolution spectroscopy.



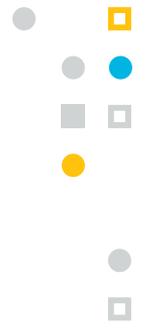
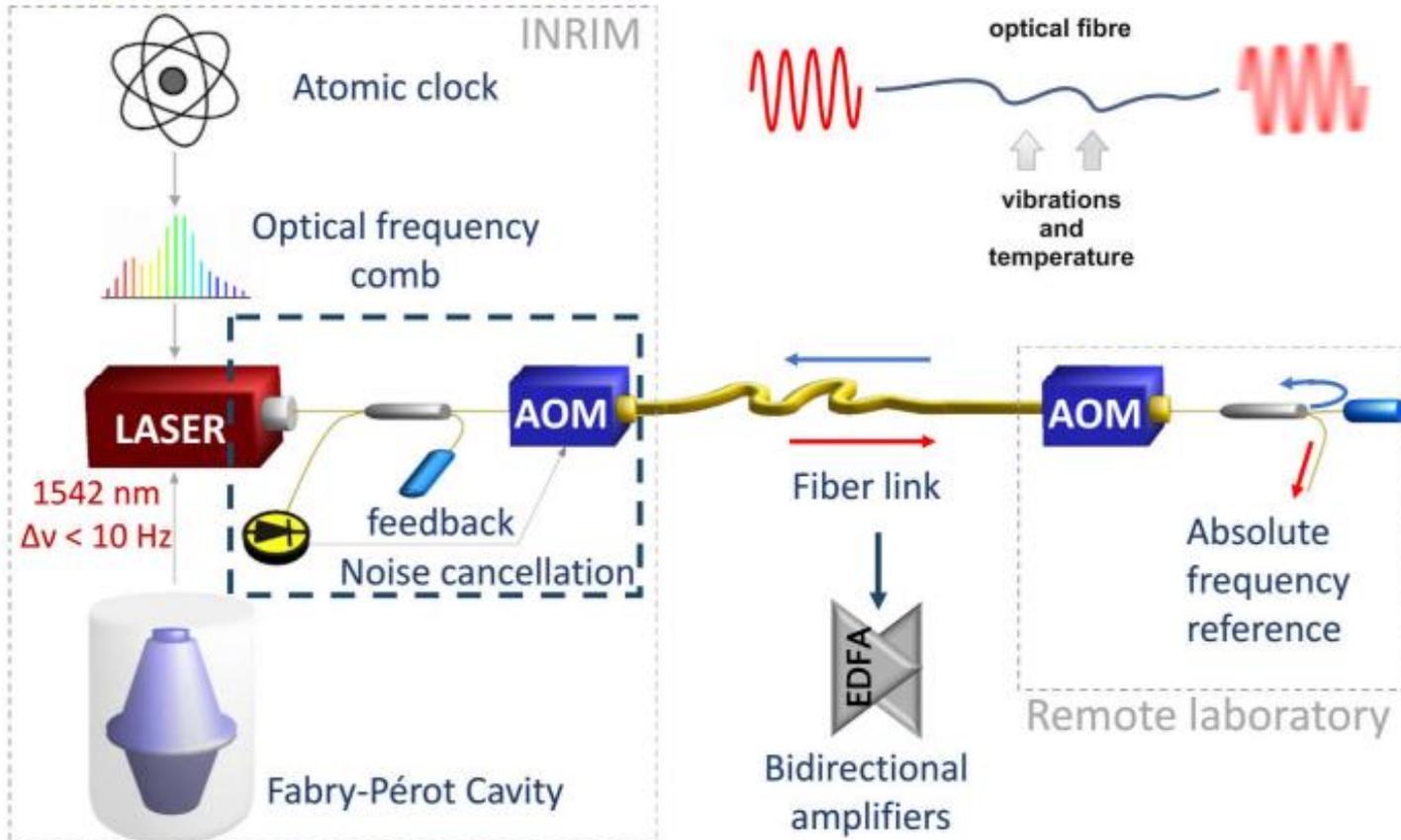
**Non-linear optics** exploited to generate the laser wavelengths for cooling and probing.

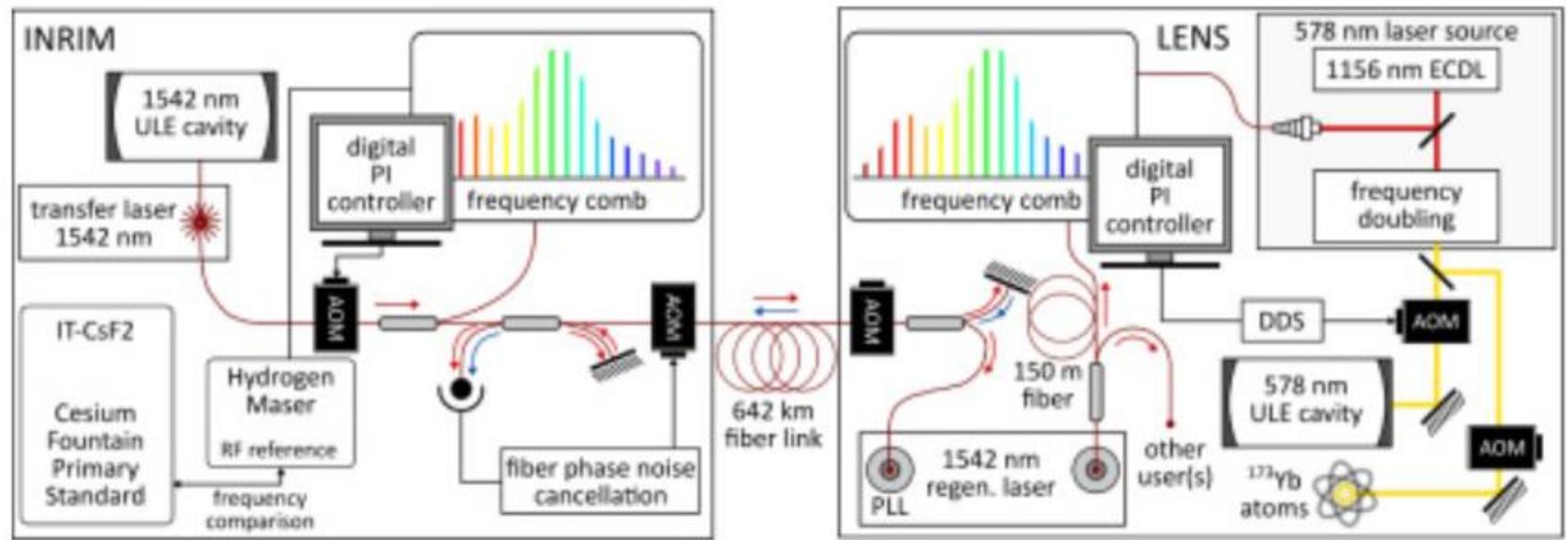


The introduction of the **optical frequency comb** made possible to directly and reliably scale a frequency measurement from the optical to the microwave domain.

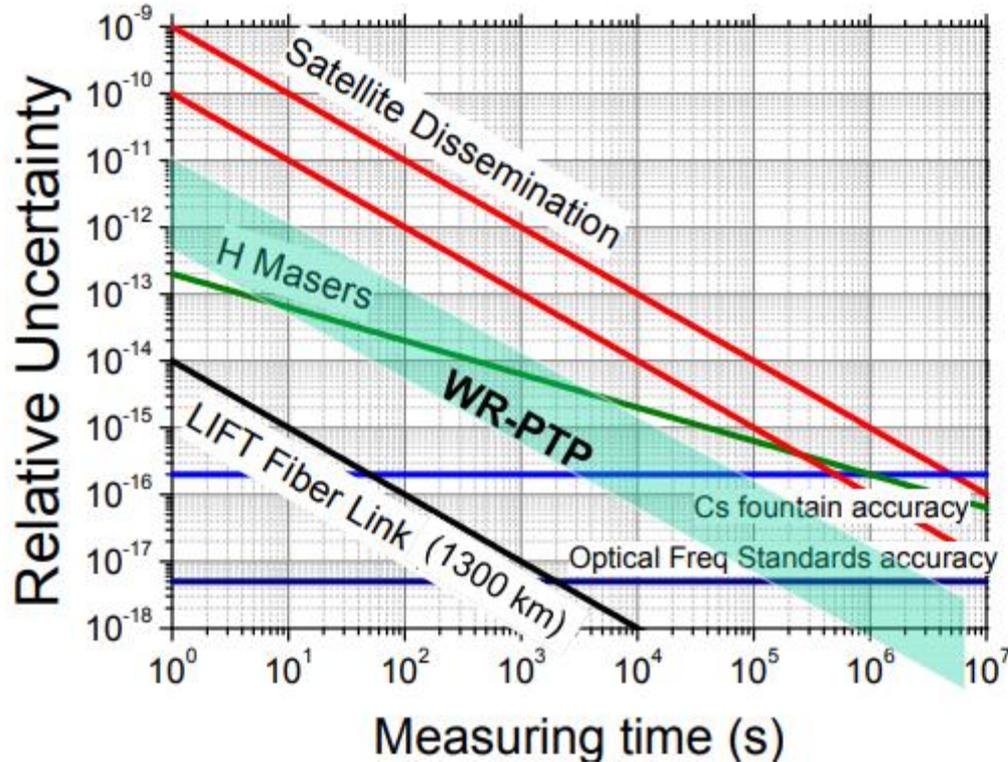


# Optical fiber links

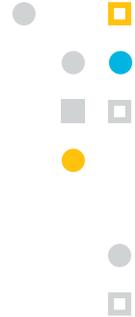




# Atomic clocks: comparison and dissemination



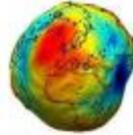
When the redefinition of the second?



# Optical Fibre Links: a broad range of applications



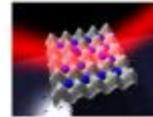
Remote clocks comparisons



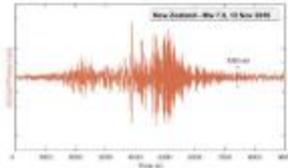
Relativistic Geodesy



VLBI radioastronomy and geodesy



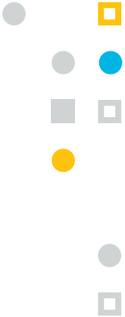
High-precision spectroscopy



Seismology



Quantum  
Key Distribution





# MUCHAS GRACIAS

Si querés saber más del **INTI**  
te esperamos en

 INTIArg

 @INTIArgentina

 INTI

 @intiargentina

 canlainti

[www.inti.gov.ar](http://www.inti.gov.ar)

[consulta@inti.gov.ar](mailto:consulta@inti.gov.ar)

0800 444 4004



**INTI**

Instituto  
Nacional  
de Tecnología  
Industrial



Ministerio de  
Desarrollo Productivo  
Argentina