

OROLOGI OTTICI, LASER ULTRASTABILI, RIDEFINIZIONE DEL SECONDO E TEST DI FISICA FONDAMENTALE

Davide Calonico d.calonico@inrim.it

Divisione di OTTICA

ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA (INRiM)

Sommario

- La metrologia (di tempo e frequenza)
- Campioni atomici di frequenza
- Raffreddamento laser di sistemi atomici
- Orologi ottici
- Test di Fisica fondamentale
- Link Ottici

Metrologia: *cui prodest* ?

“When you can measure what you are speaking about, and express it in numbers, you know something about it; but when you cannot express it in numbers, your knowledge is of a meagre and unsatisfactory kind. It may be the beginning of knowledge, but you have scarcely, in your thoughts, advanced to the stage of science.”

Lord Kelvin

Metrologia: *cui prodest* ?

“Accurate measurement is at the heart of physics, and in my experience new physics begins at the next decimal place.”

Steve Chu, Nobel Laureate, 1997

... next decimal place:

riducendo l'incertezza!

La metrologia è (anche) la disciplina che studia le tecniche teoriche sperimentali e statistiche per quantificare e ridurre l'incertezza di misura

Ma c'è dell'altro...

La metrologia primaria

Per misurare occorre avere un' UNITA' CAMPIONE

questo comporta un processo scientifico (e tecnologico) che
chiameremo METROLOGIA PRIMARIA e che sintetizziamo nei
seguenti passi:

DEFINIZIONE

REALIZZAZIONE

MANTENIMENTO

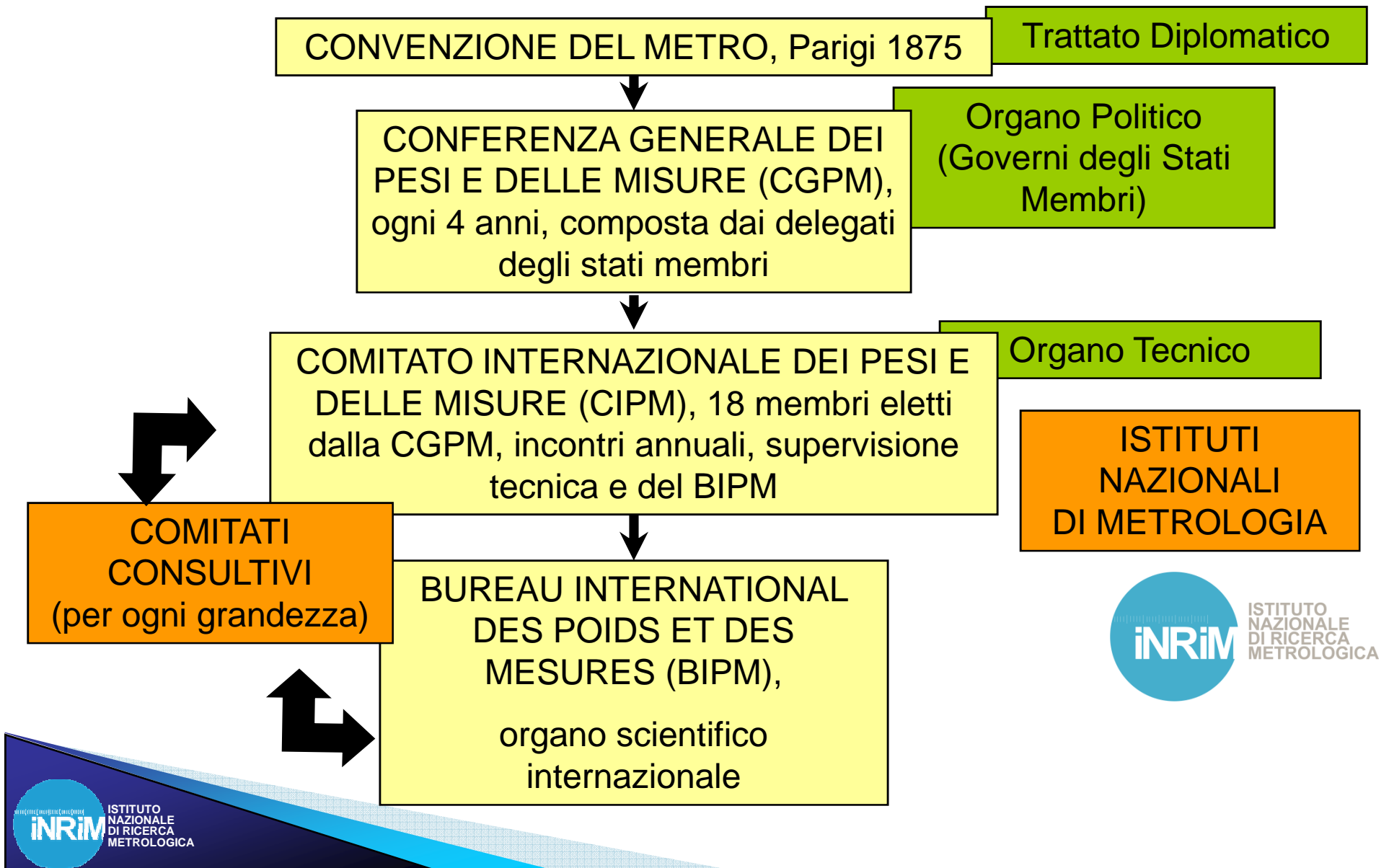
DISSEMINAZIONE

ogni fase porta con sé una propria specifica incertezza, ovviamente
da quantificare!

La tracciabilità metrologica

Per misurare, occorre dotarsi di uno strumento di misura o di un campione secondario che sia **RIFERIBILE** all'unità campione, cioè sia ad essa legato da una catena ininterrotta di confronti (ognuno con la sua incertezza, da valutare) che quantifichi l'incertezza totale dello strumento/campione secondario rispetto all'unità

La convenzione del metro



Il Sistema Internazionale delle unità di misura - SI

Lunghezza: metro [m]

Massa: kilogrammo [kg]

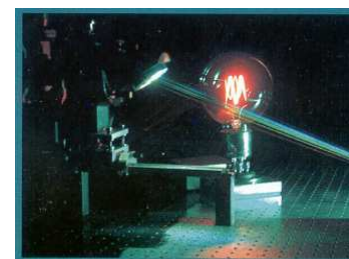
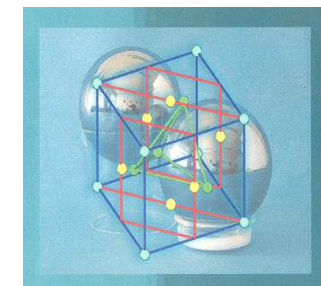
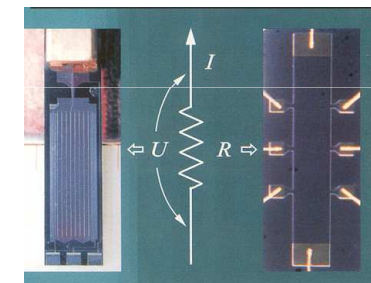
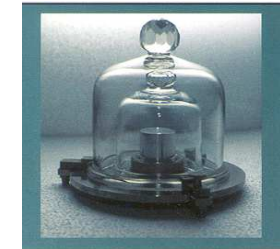
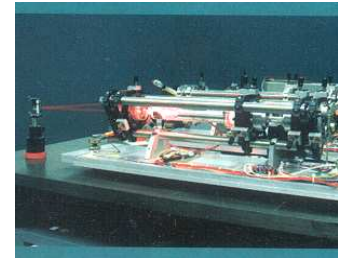
Tempo: secondo [s]

Corrente elettrica ampère [A]

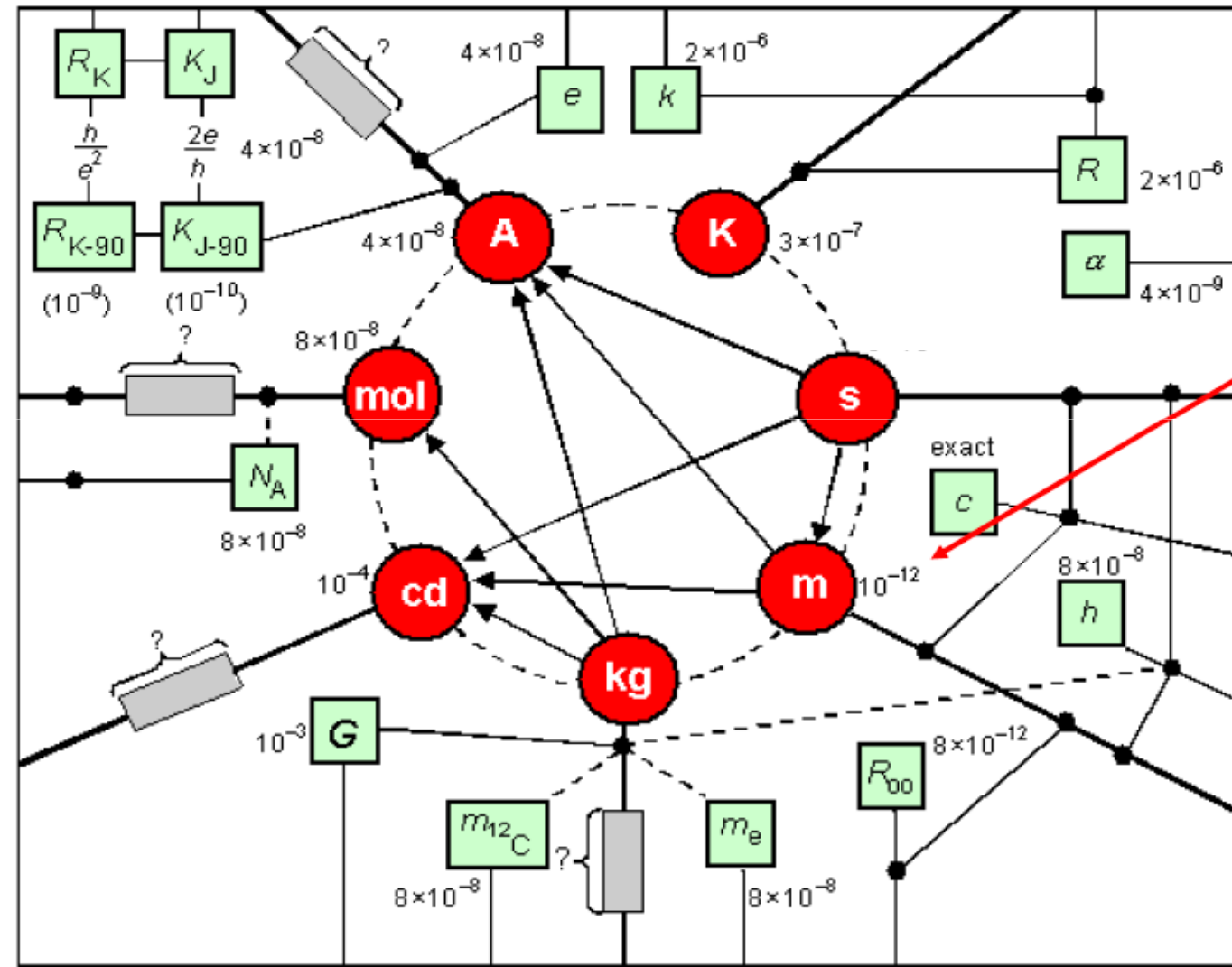
Temperatura kelvin [K]

Quantità di sostanza mole [mol]

Intensità luminosa candela [cd]



Unità SI



Definizione del secondo (la metrologia non è una scienza statica)



- **Tempo solare medio (fino al 1960)**

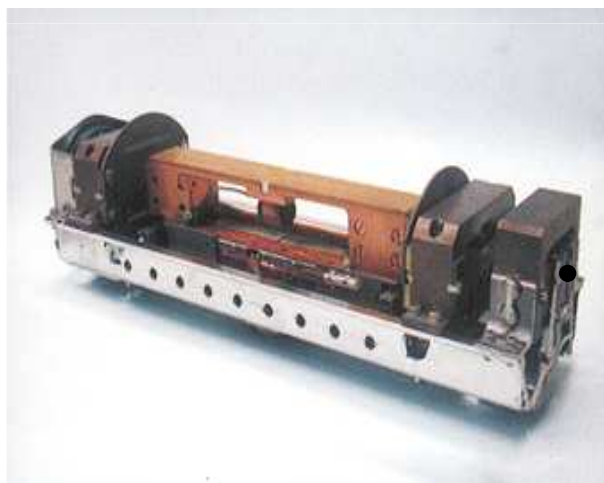
Il secondo è la frazione $1 / 86\,400$ del giorno solare medio

- **Tempo delle Effemeridi (dal 1960 al 1967)**

Il secondo è la frazione $1 / 31\,556\,925,9747$ dell'anno tropico relativo al giorno 1 gennaio 1900 alle ore 12 UT

- **Tempo atomico (dal 1967)**

Il secondo è la durata di $9\,192\,631\,770$ periodi della radiazione corrispondente alla transizione tra i due livelli iperfini dello stato fondamentale dell'atomo di cesio 133.



Evoluzione dell'accuratezza degli orologi



$\sim 10^{-9}$
1 s in 30 anni



$\sim 10^{-8}$
1 s in 3 anni



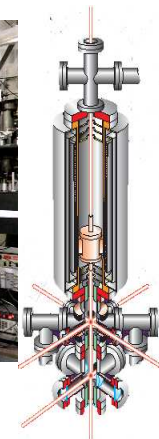
$\sim 10^{-5}$
10 s in 1
giorno



$\sim 10^{-13}$
1 s in 300.000
anni



$\sim 5 \cdot 10^{-16}$
1 s in 60
milioni di anni



Utilizzatori del tempo e della frequenza



Utilizzatori del tempo e della frequenza

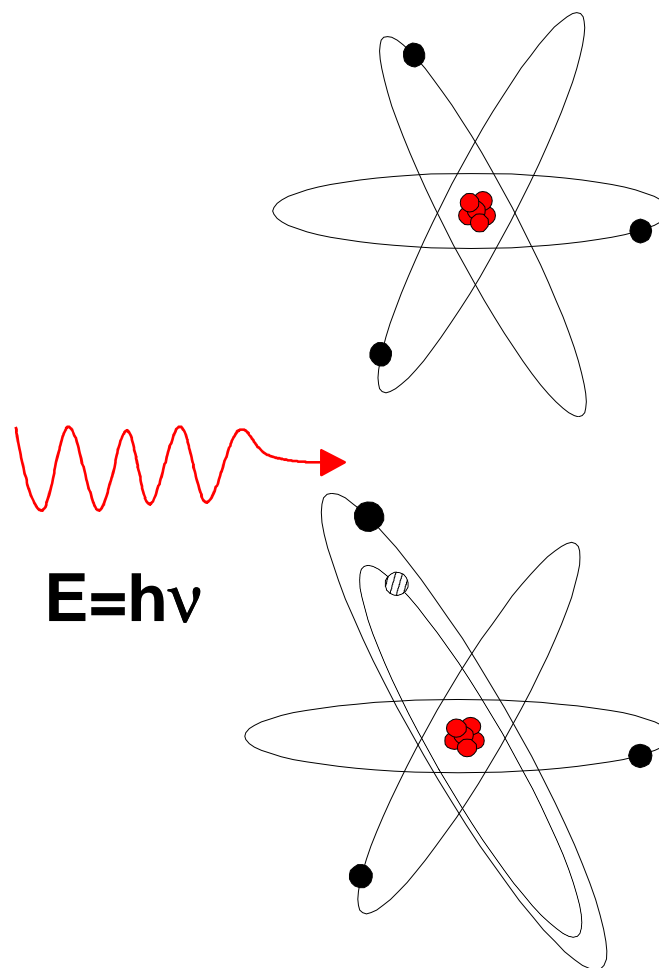


Cosa è un campione atomico primario di frequenza?

- Un campione atomico di frequenza è una macchina capace di riferire la frequenza di un oscillatore macroscopico (un quarzo in genere) a quella di un sistema quantistico semplice (atomo, ione o molecola).
 - Gli atomi sono tutti identici tra loro
 - La frequenza di risonanza non muta nel tempo
- Il campione si dice primario quando la frequenza di risonanza dell'atomo si può ricondurre alla sua frequenza imperturbata.

Come funziona un campione: un principio fondamentale di MQ

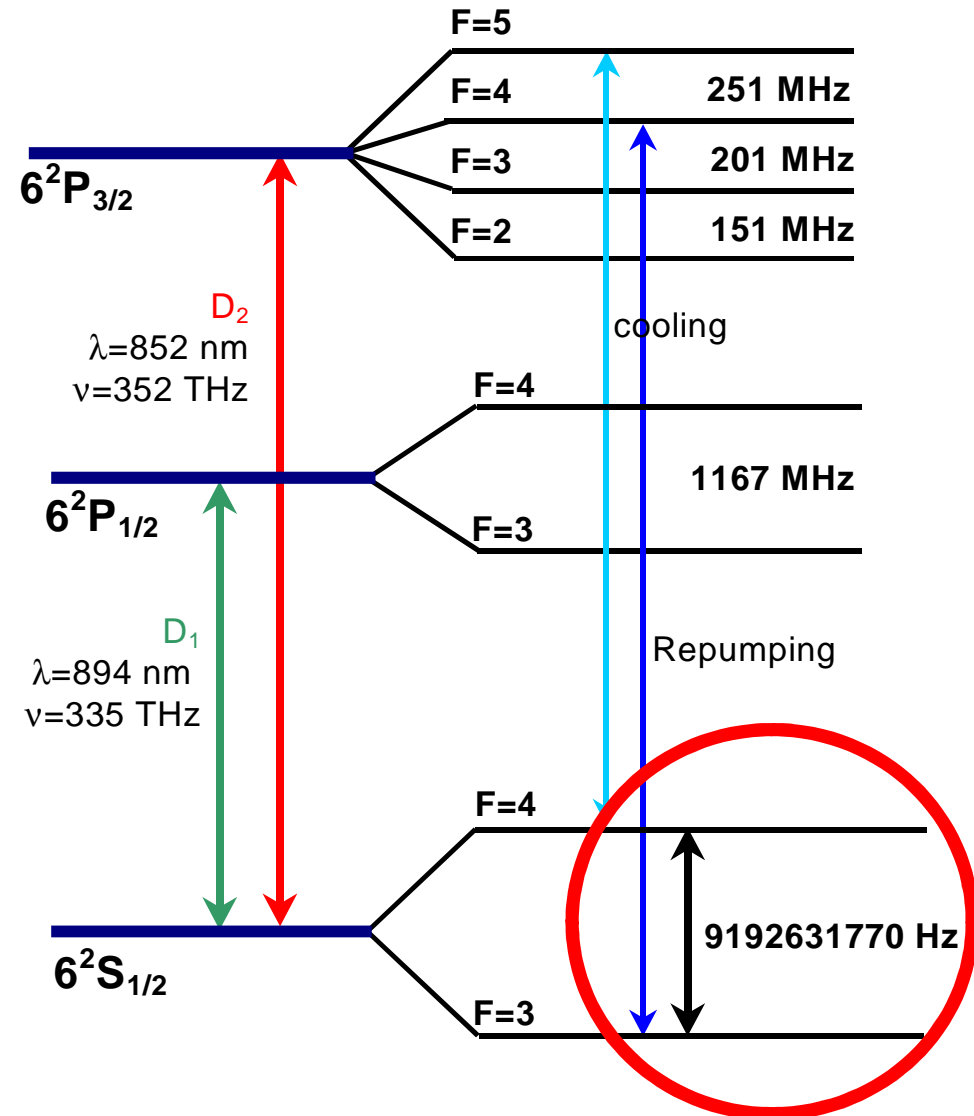
Un atomo assorbe un fotone con la probabilità massima quando l'energia di questo è pari a quella necessaria per far transire l'atomo da un autostato a un altro

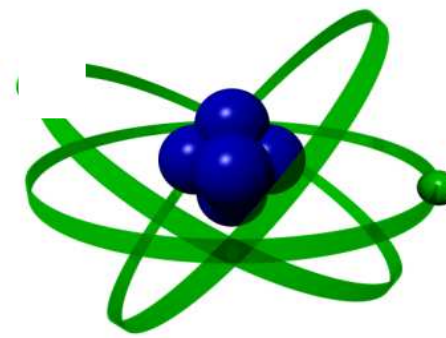
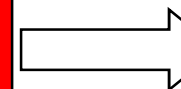
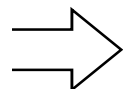
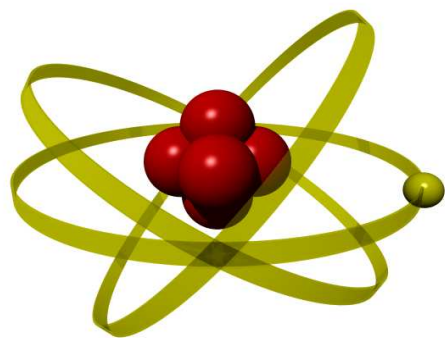


Il secondo SI

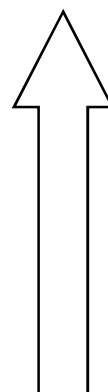
Tra tutte le possibili transizioni il secondo è definito come:

Il secondo è l'intervallo di tempo corrispondente a 9192631770 periodi di radiazione della transizione tra i due stati fondamentali dell'atomo di ^{133}Cs imperturbato.

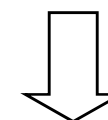




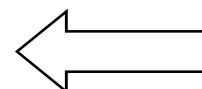
PREPARAZIONE
degli atomi nello
stato iniziale della
transizione



MISURA del numero
di atomi transiti allo
stato finale della
transizione.



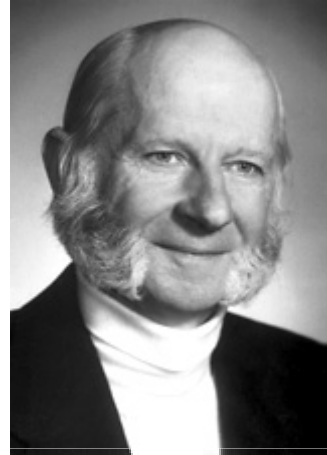
Oscillatore Locale



Correzione della
frequenza dell'oscillatore
fino a raggiungere il
massimo numero di atomi
transiti.

A Nobel Gallery

1989



Norman F. Ramsey

"for the invention of the separated oscillatory fields method
and its use in the hydrogen maser and other atomic clocks"

Hans G. Dehmelt Wolfgang Paul

"for the development of the ion trap technique"

Accuratezza di un campione atomico

Quanto siamo sicuri che il nostro sistema sia accurato, cioè sia un sistema imperturbato e riproduca la definizione?

⇒ Misure e Test per conoscere al meglio il sistema atomico in esame

Per un fisico, la bellezza della metrologia di frequenza è la capacità di descrivere in modo quantitativo il comportamento di un sistema atomico, e di portare all'estrema accuratezza questa capacità

Accuratezza e stabilità di un campione di frequenza

Accuratezza è la capacità di un campione di realizzare una transizione atomica **imperturbata** (o di ricondurvisi per via teorica o sperimentale).

Stabilità è la capacità di realizzare una frequenza **costante** nel tempo

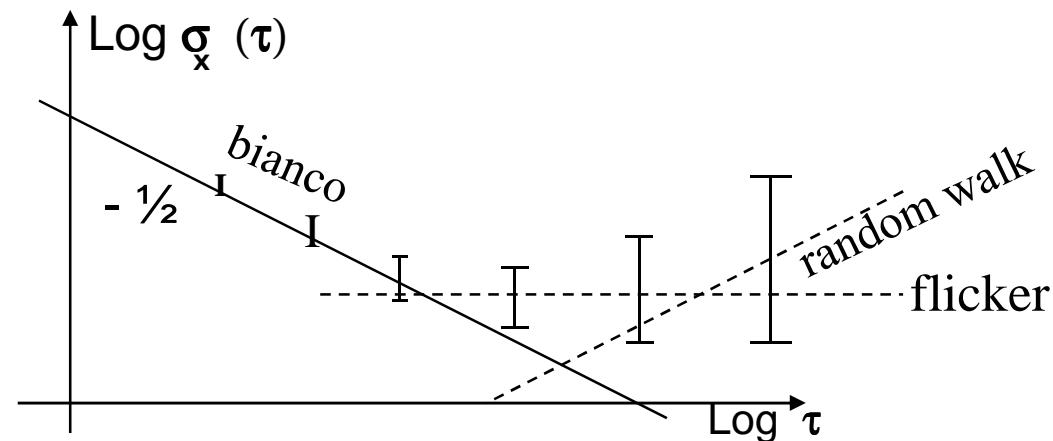
La stabilità dipende dal tipo di rumore e dal **tempo di misura** (e non sempre più misure = minore incertezza...)

Varianza di Allan $\sigma(\tau)$

I principali processi di rumore per la frequenza di un oscillatore/orologio sono di tipo "bianco", "flicker" e di "random walk". Solo il primo tipo è un processo a distribuzione gaussiana per il quale la varianza classica è definita.

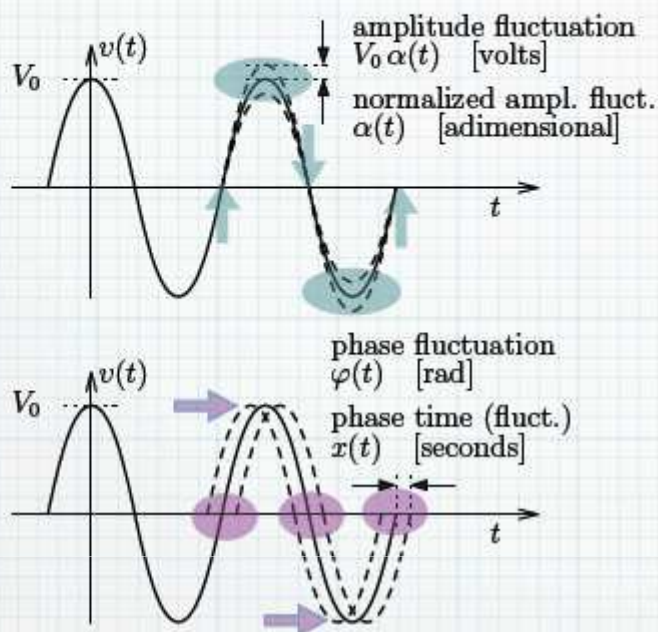
Per caratterizzare la stabilità nella generalità dei casi si ricorre alla Varianza di Allan, definita per tutti i tipi di rumore in gioco.

Se il rumore non è bianco, cade l'equivalenza più misure = minor incertezza!

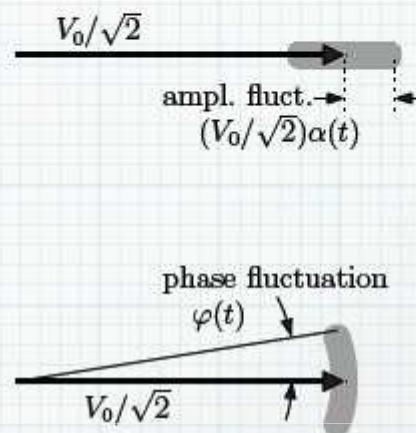


Clock signal affected by noise

Time Domain



Phasor Representation



polar coordinates

$$v(t) = V_0 [1 + \alpha(t)] \cos [\omega_0 t + \varphi(t)]$$

Cartesian coordinates

$$v(t) = V_0 \cos \omega_0 t + n_c(t) \cos \omega_0 t - n_s(t) \sin \omega_0 t$$

under low noise approximation

$$|n_c(t)| \ll V_0 \quad \text{and} \quad |n_s(t)| \ll V_0$$

It holds that

$$\alpha(t) = \frac{n_c(t)}{V_0} \quad \text{and} \quad \varphi(t) = \frac{n_s(t)}{V_0}$$

Phase noise & friends

$$v(t) = V_p [1 + \alpha(t)] \cos [1 + \varphi(t)]$$

random phase fluctuation

$$S_\varphi(f) = \text{PSD of } \varphi(t)$$

power spectral density

it is measured as

$$S_\varphi(f) = \mathbb{E} \{ \Phi(f) \Phi^*(f) \} \quad (\text{expectation})$$

$$S_\varphi(f) \approx \langle \Phi(f) \Phi^*(f) \rangle_m \quad (\text{average})$$

$$\mathcal{L}(f) = \frac{1}{2} S_\varphi(f) \text{ dBc}$$

random fractional-frequency fluctuation

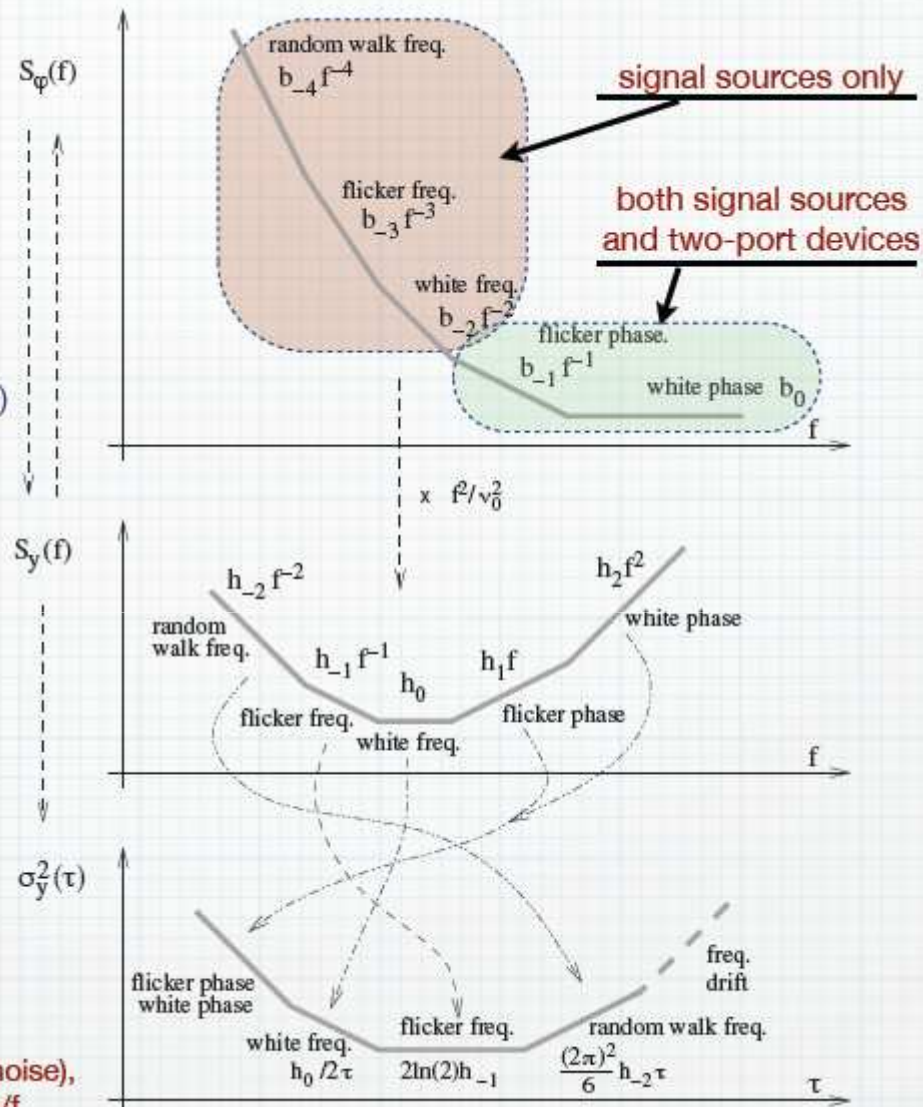
$$y(t) = \frac{\dot{\varphi}(t)}{2\pi\nu_0} \Rightarrow S_y = \frac{f^2}{\nu_0^2} S_\varphi(f)$$

Allan variance

(two-sample wavelet-like variance)

$$\sigma_y^2(\tau) = \mathbb{E} \left\{ \frac{1}{2} [\bar{y}_{k+1} - \bar{y}_k]^2 \right\}$$

approaches a half-octave bandpass filter (for white noise), hence it converges for processes steeper than 1/f



Varianza di Allan $\sigma(\tau)$

$$\sigma^2(\tau) = \frac{1}{M} \sum_{m=0}^M [y_m(t+\tau) - y_m(t)]^2$$

- **Converge per tutti i tipi di rumore** considerati ed
- **È in corrispondenza** “quasi” biunivoca **al tipo di rumore**

i Tipo di rumore

$$\sigma^2(\tau) = \sum_{i=-2}^1 A_i \tau^i \left\{ \begin{array}{l} 1 \text{ Random walk di frequenza} \\ 0 \text{ Flicker di frequenza} \\ -1 \text{ Bianco di frequenza} \\ -2 \text{ Flicker di fase} \\ -2 \text{ Bianco di fase} \end{array} \right.$$

$$\delta\nu = kt \Rightarrow \sigma^2(\tau) = \frac{1}{2} k^2 \tau^2$$

$$\delta\nu = a \cos(2\pi f_m t + \varphi) \Rightarrow \sigma^2(\tau) = a^2 \frac{\sin^4(\pi f_m \tau)}{(\pi f_m \tau)^2}$$

Per migliorare la stabilità:

1. Aumentare il segnale o l'efficienza di rivelazione (rapporto segnale/rumore)
2. Aumentare il tempo di osservazione della transizione atomica (fattore di qualità)

Per migliorare l'accuratezza

3. Perturbare il meno possibile l'atomo
4. Disporre di misure ad alta risoluzione

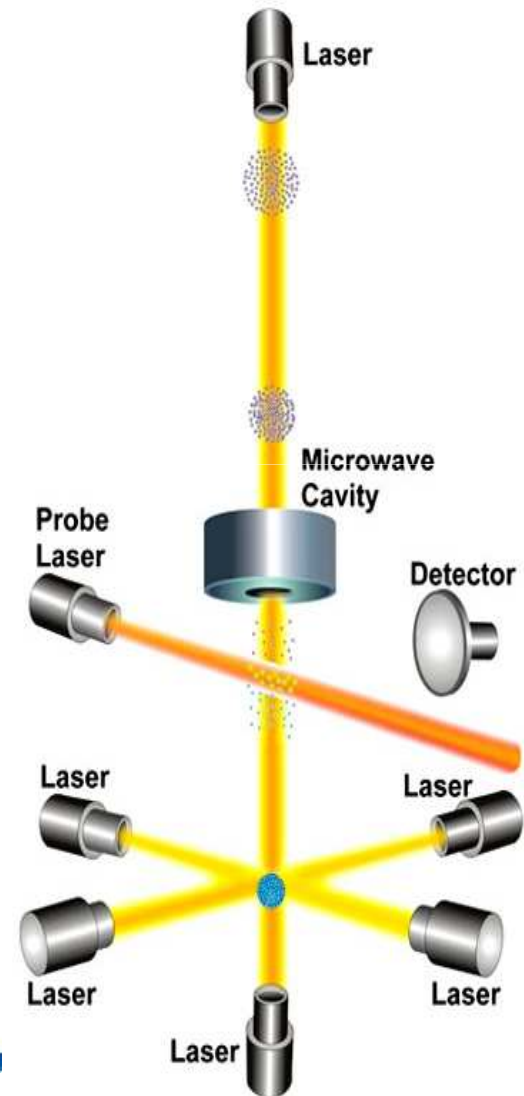
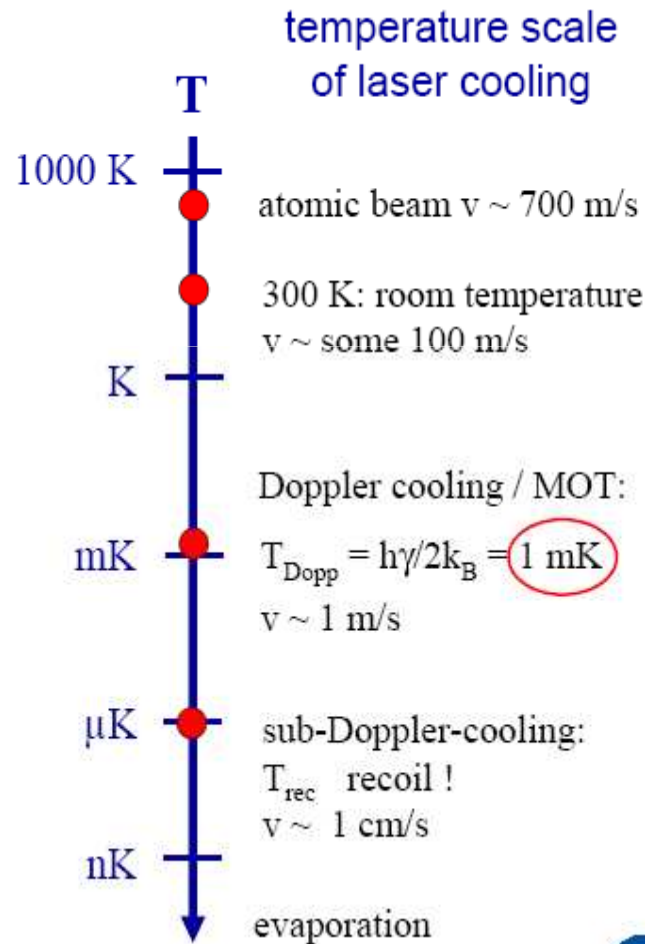
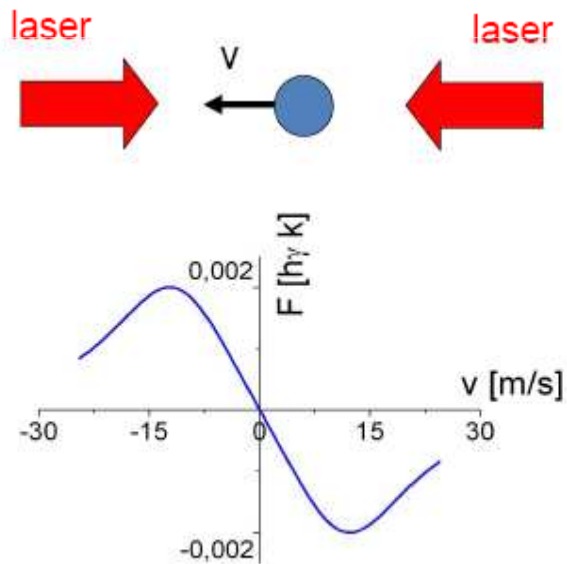
Per migliorare in generale gli orologi

- 1) Aumentare il Tempo di interazione $\Delta v \Delta T > 1$
- 2) Ridurre l'effetto Doppler (riducendo l'energia cinetica degli atomi)
- 3) Scegliere Transizioni Atomiche migliori (frequenza maggiore, larghezza naturale minore, minore sensibilità ambiente esterno)

Meno Doppler & Più Interazione /1

L'era del raffreddamento laser

Doppler cooling:
red detuned laser beams
on strong transition $\gamma \sim 1 - 80$ MHz



A Nobel Gallery

1997

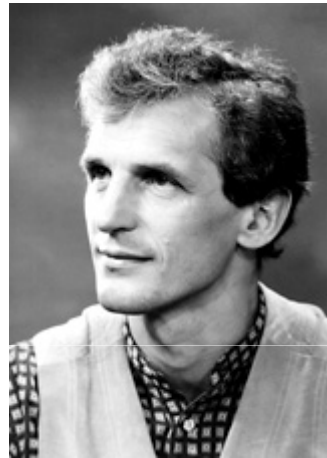


Stephen Chu, William Phillips, Claude Cohen-Tannoudj

"for development of methods to cool and trap atoms
with laser light"

A Nobel Gallery

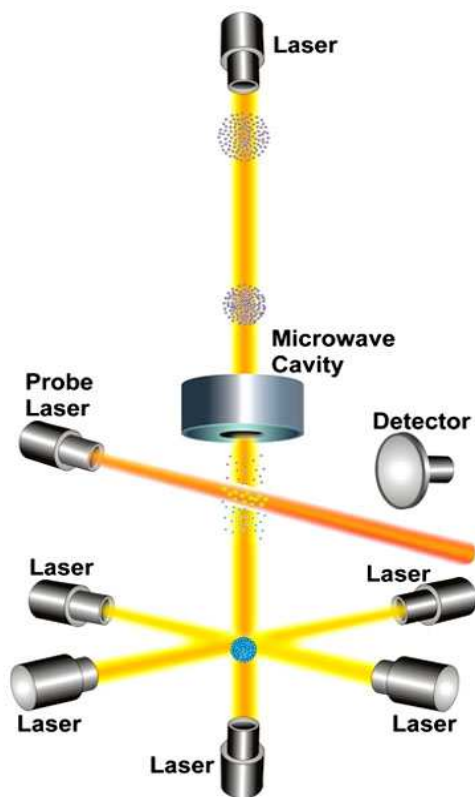
2001



Wolfgang Ketterle, Carl Wieman, Eric Cornell

"for the achievement of Bose-Einstein condensation in dilute gases of alkali atoms, and for early fundamental studies of the properties of the condensates"

Fontana al Cesio (ITCsF1 e ITCsF2)



- Le fontane al Cesium raffreddato con laser sono oggi i campioni atomici più accurati. (parti in $1e-16$)

Principi di una fontana atomica

Fontana criogenica al Cesio INRIM ITCsF2



**Raffreddamento laser del Cs a 1 μ K;
Struttura Criogenica a 89 K;**

**Realizza in Italia la
definizione del
secondo**

**Contribuisce alla
realizzazione del
Tempo Atomico
Internazionale**

INRIM, Fontane di Cesio ITCsF1 e ITCsF2: Accuratezza

ITCsF1

$$\sigma_y(\tau) = 1.5 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$$

Accuratezza: $5 \cdot 10^{-16}$

ITCsF2

$$\sigma_y(\tau) = 1.5 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$$

Accuratezza: $2 \cdot 10^{-16}$

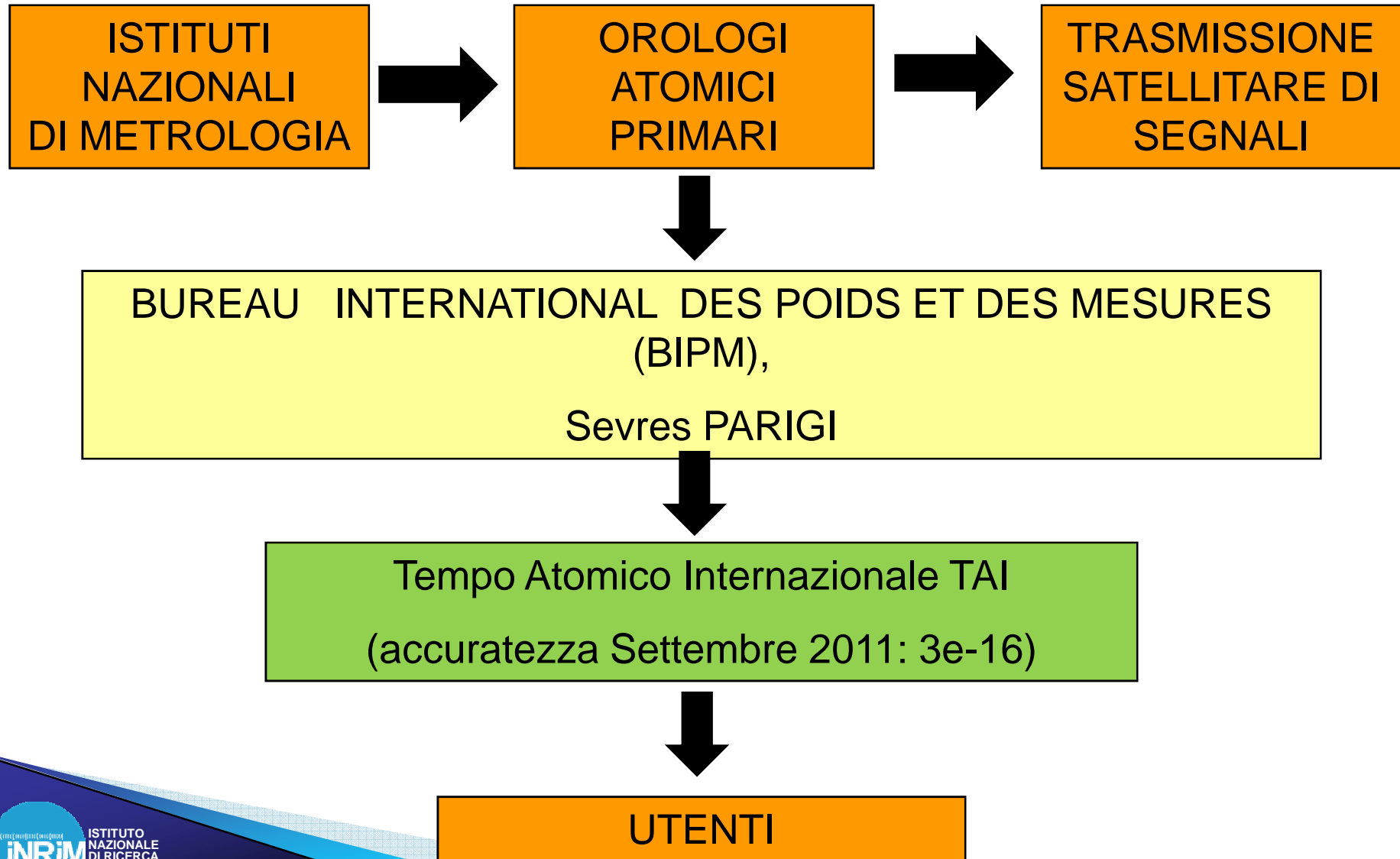
	u ITCsF1	u ITCsF2
Zeeman	2E-16	8E-17
Collisioni	3E-16	1E-16
Corpo Nero	3E-16	1E-17
Microonda	2E-16	1E-16
Redshift	1E-17	1E-17
Totale	5E-16	2E-16

Fontane atomiche attive nel mondo

Sei laboratori hanno finora contribuito regolarmente alla generazione del Tempo Atomico Internazionale con fontane al Cesio: USA (2 fontane); Francia (3); **Italia (2)**; Germania (2); UK (2); Giappone (2)



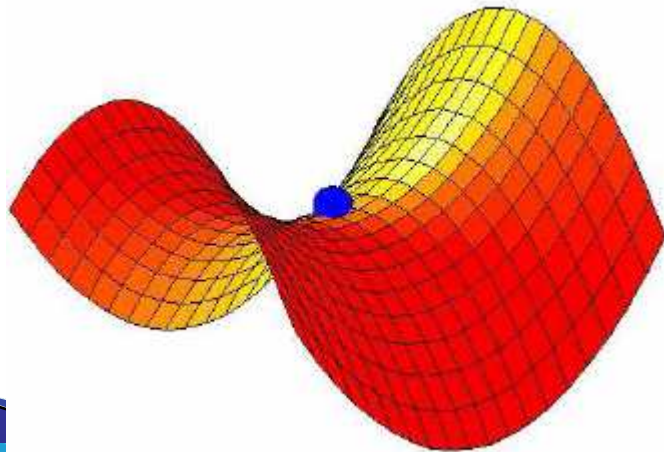
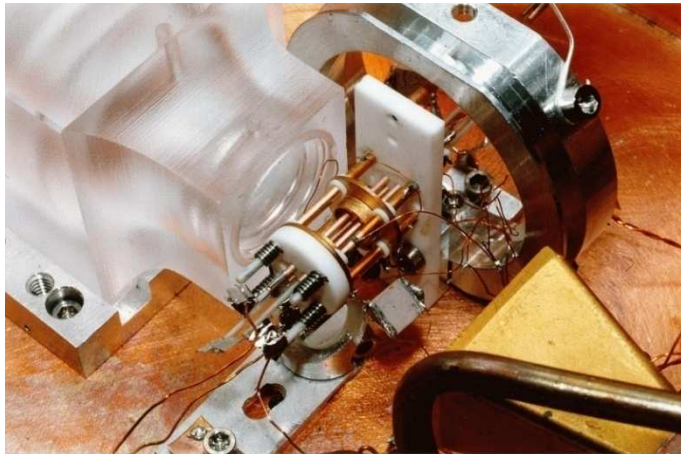
Generazione del Tempo Atomico Internazionale TAI



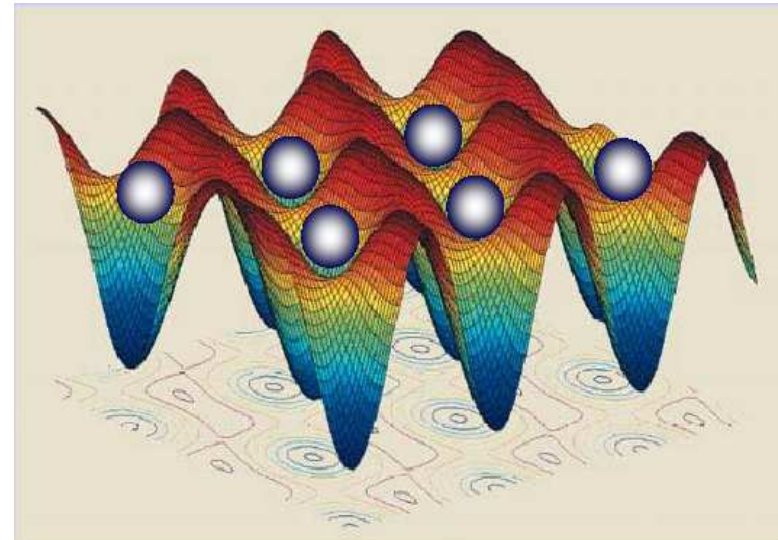
Meno Doppler & Più Interazione / 2

Trappole a ioni e reticoli ottici

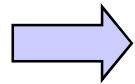
Trappole RF a singolo Ione



Reticoli Ottici con Atomi Neutri
(Lunghezza d'onda "magica" senza Light shift)



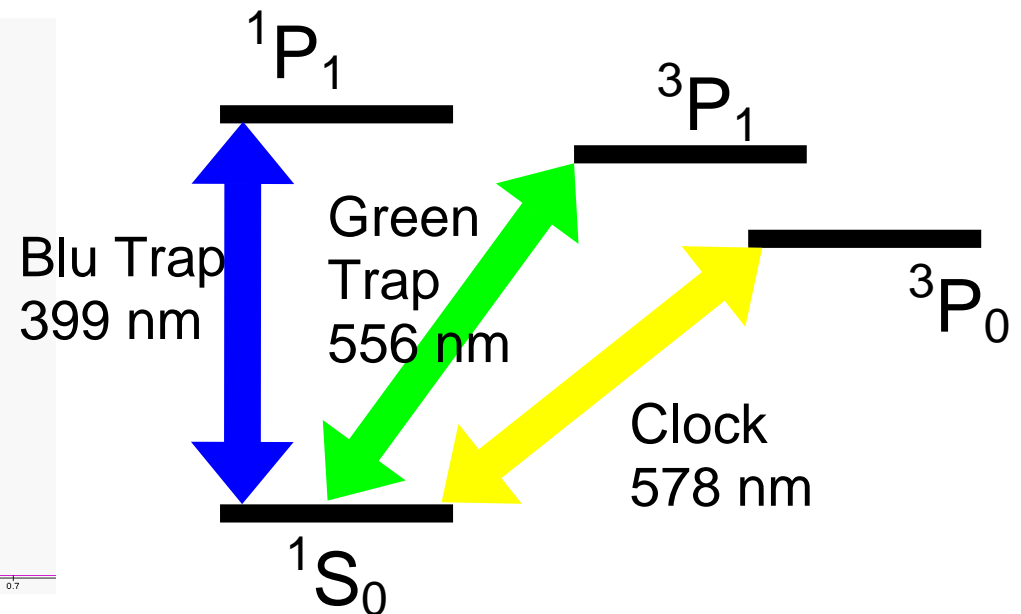
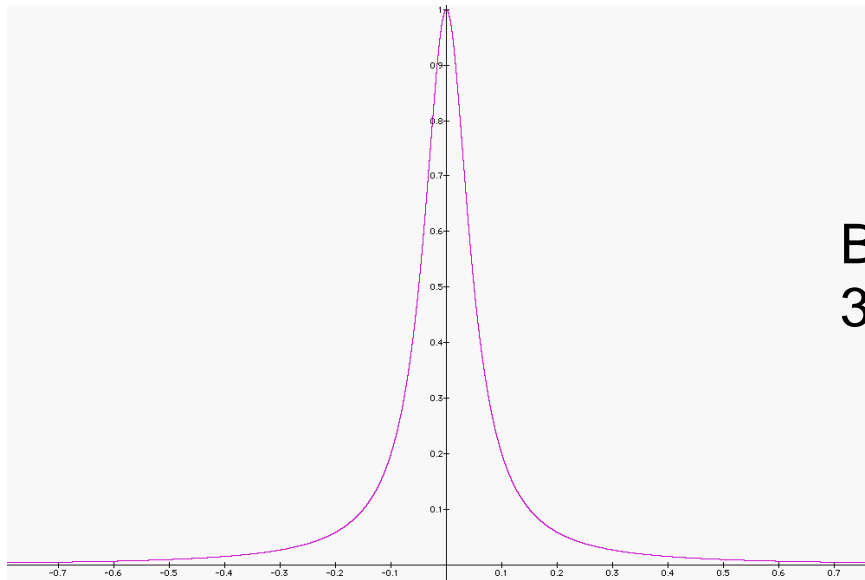
3) Scegliere Transizioni Atomiche migliori (frequenza maggiore, larghezza naturale minore, minore sensibilità ambiente esterno)



Aumentare fattore di qualità della riga $Q = \nu/\Delta\nu$

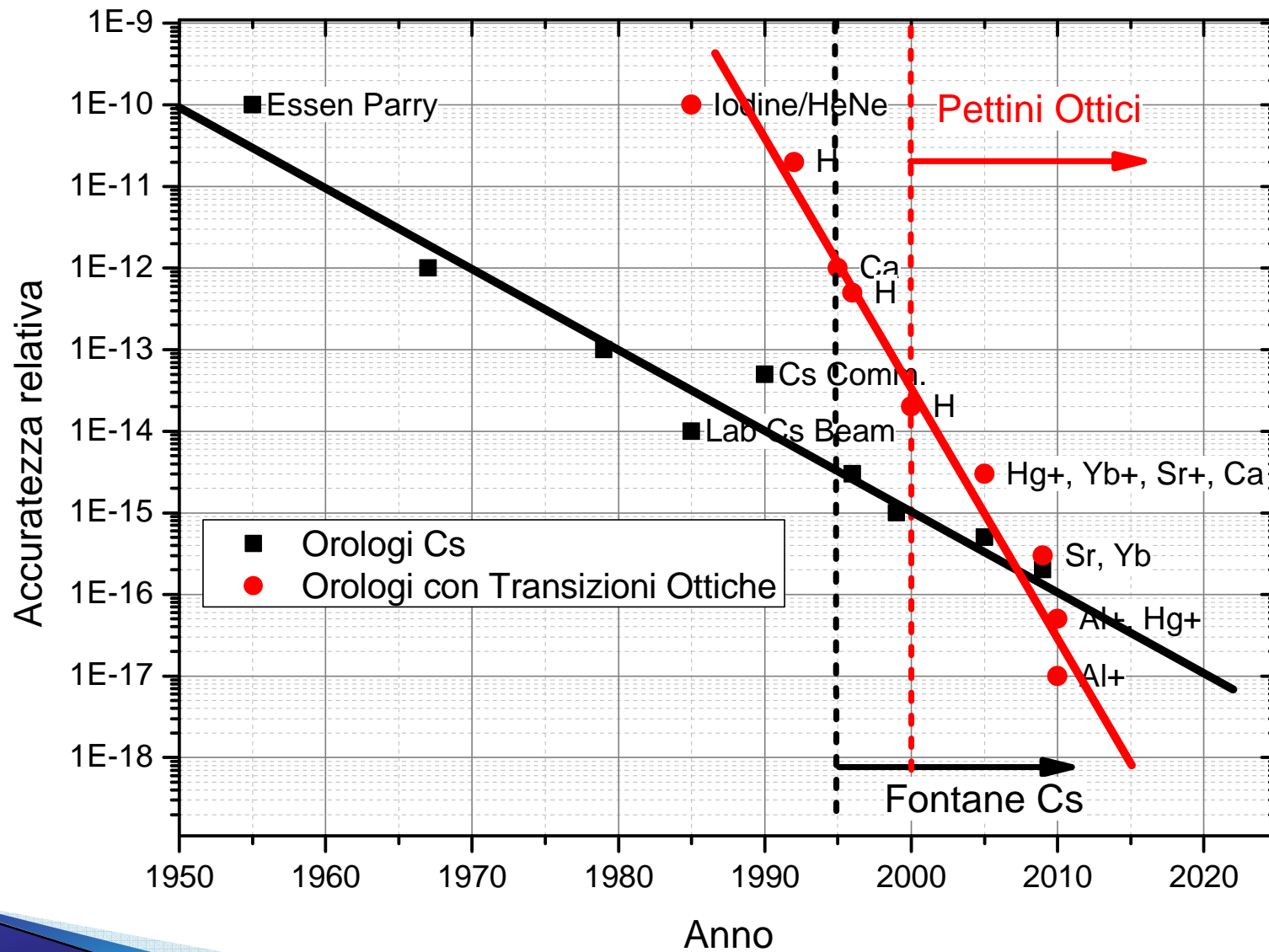
Q transizioni microonda (fontane) $\cong 10^{10}$

Q ottiche(microonda) $> 10^{15}$



Da transizioni a microonda (Cs, Rb) a transizioni ottiche nel visibile:
OROLOGI OTTICI

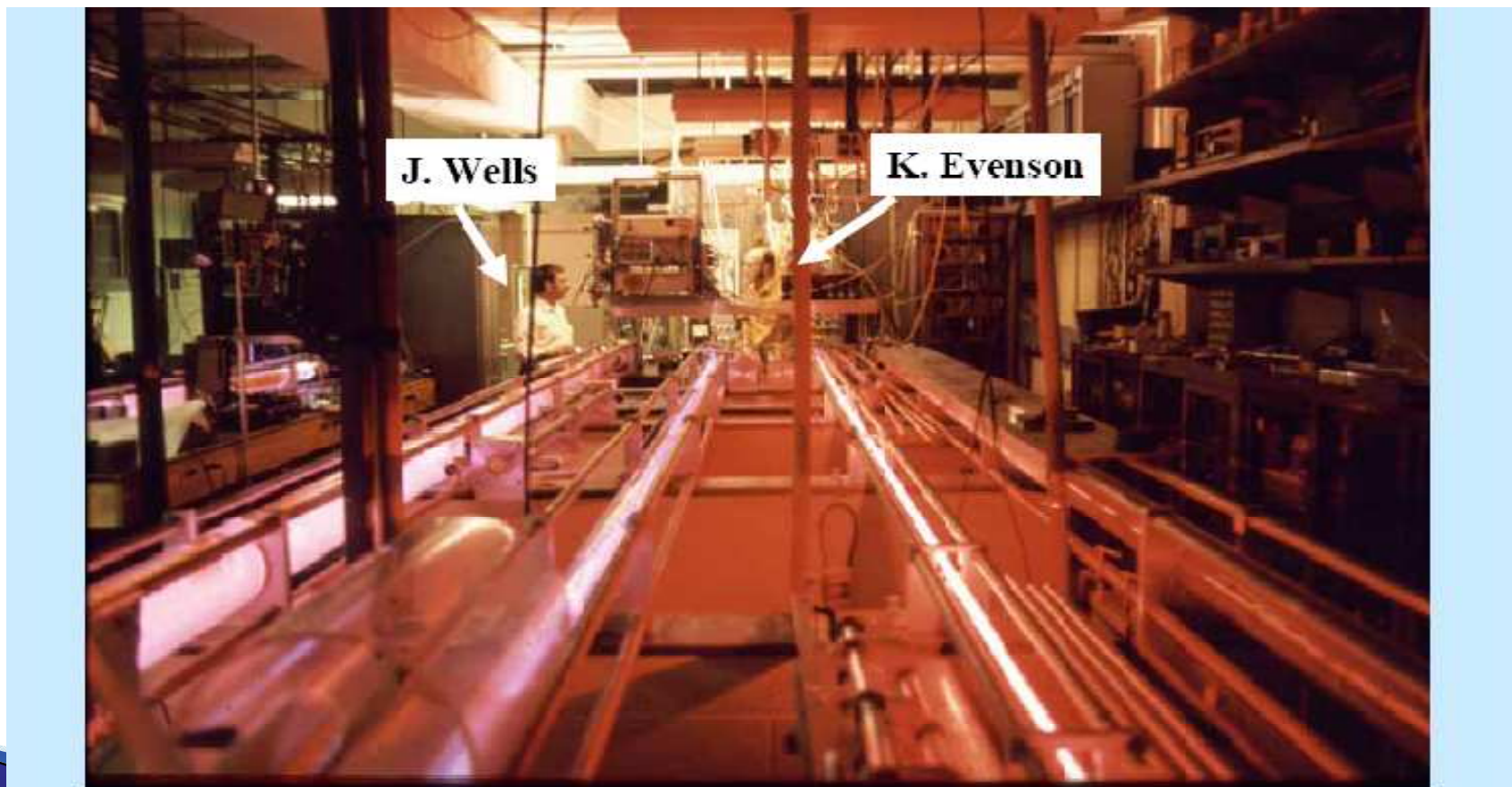
Dal Cesio agli orologi Ottici: Verso la ridefinizione del secondo



Anche i laser diventano orologi

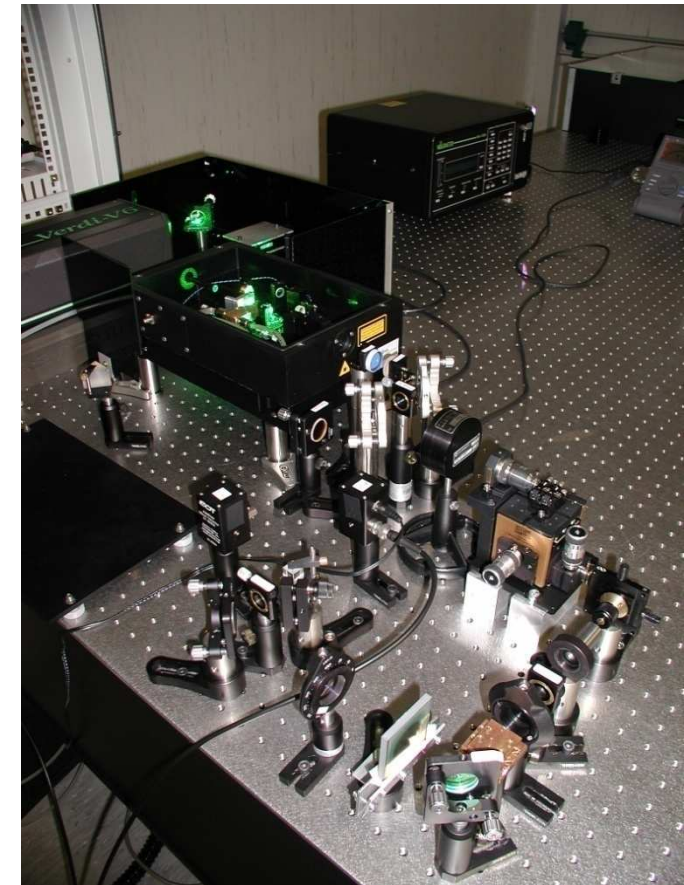
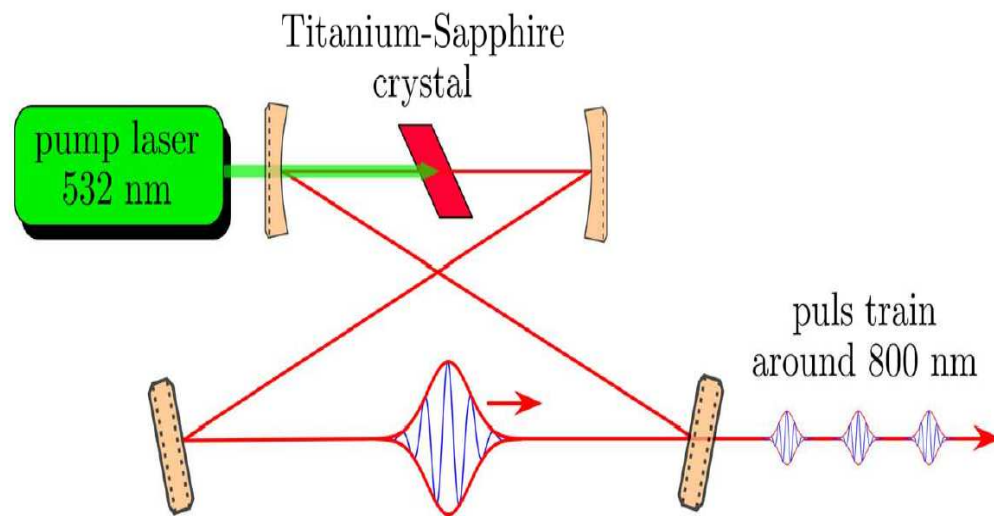
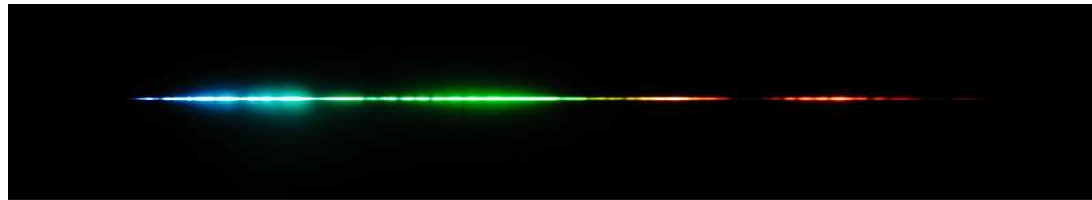
Fino alla fine del secolo scorso, lunghe catene di sintesi, che coinvolgevano svariati laser, erano l'unico metodo di misura accurato per frequenze ottiche

L'incertezza restava limitata a parti in 10^{-13} (al meglio)



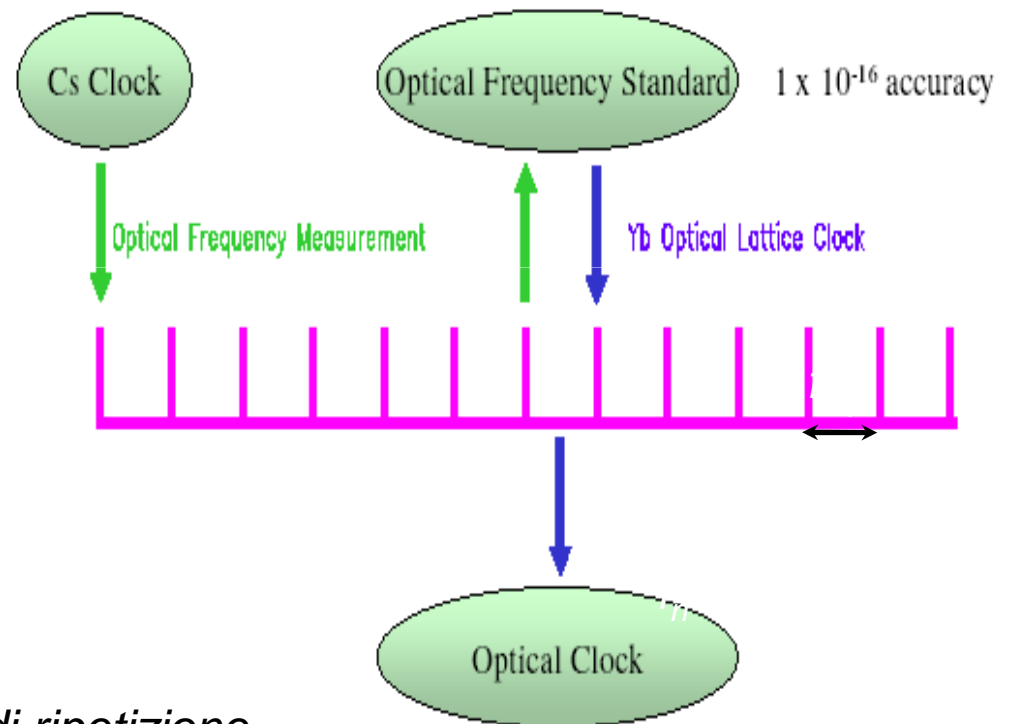
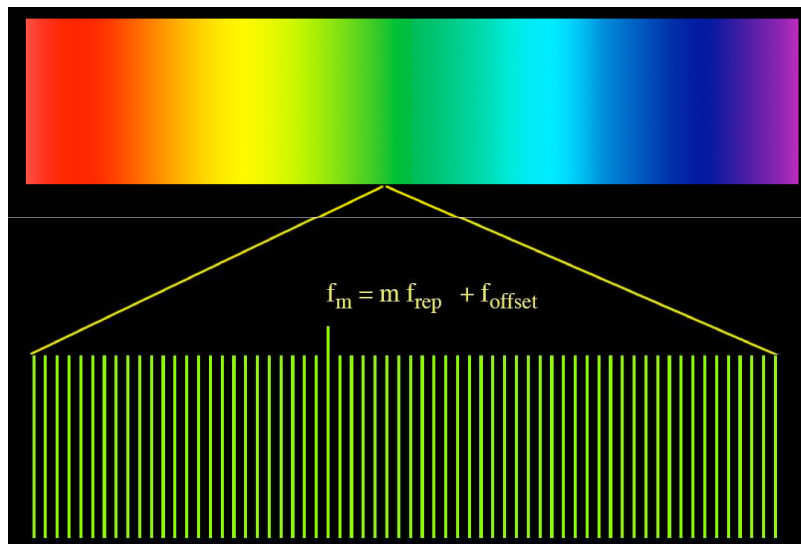
Anche i laser diventano orologi/2

La soluzione del problema della misura accurata delle frequenze ottiche con un Pettine di Frequenza generato da un Laser impulsato al femtosecondo



Anche i laser diventano orologi/3

Confronta una frequenza ottica (10^{14} Hz) direttamente con una microonda (10^{10} Hz) con incertezze $\ll 1$ mHz (incertezza relativa 10^{-18})



f_{rep} frequenza di ripetizione

f_{ceo} frequenza di offset (il pettine non parte da zero)

Si misurano direttamente vs riferimento assoluto

A Nobel Gallery

2005



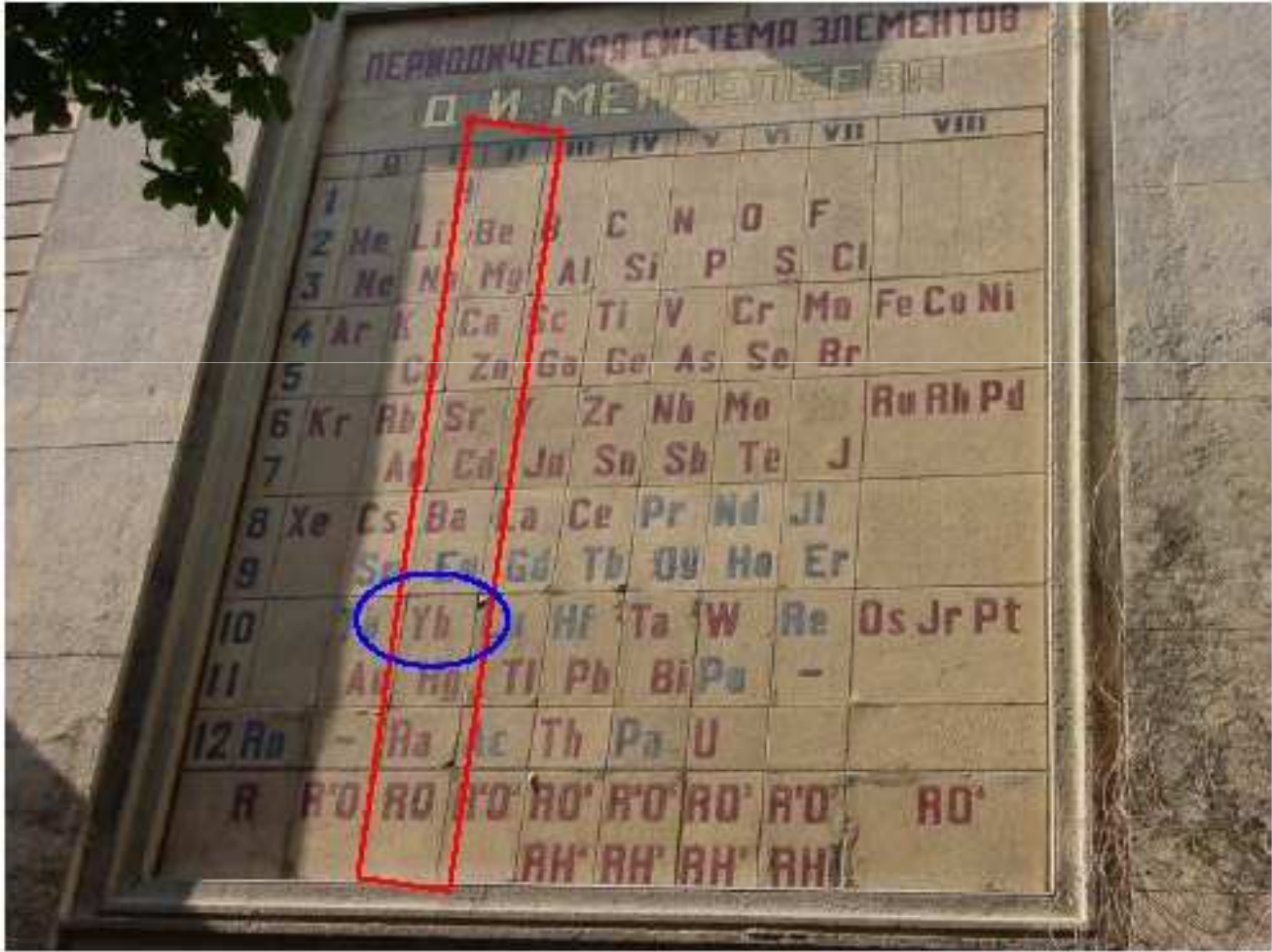
Roy J. Glauber

"for his contribution to the quantum theory of optical coherence"

John L. Hall Theodor W. Hänsch

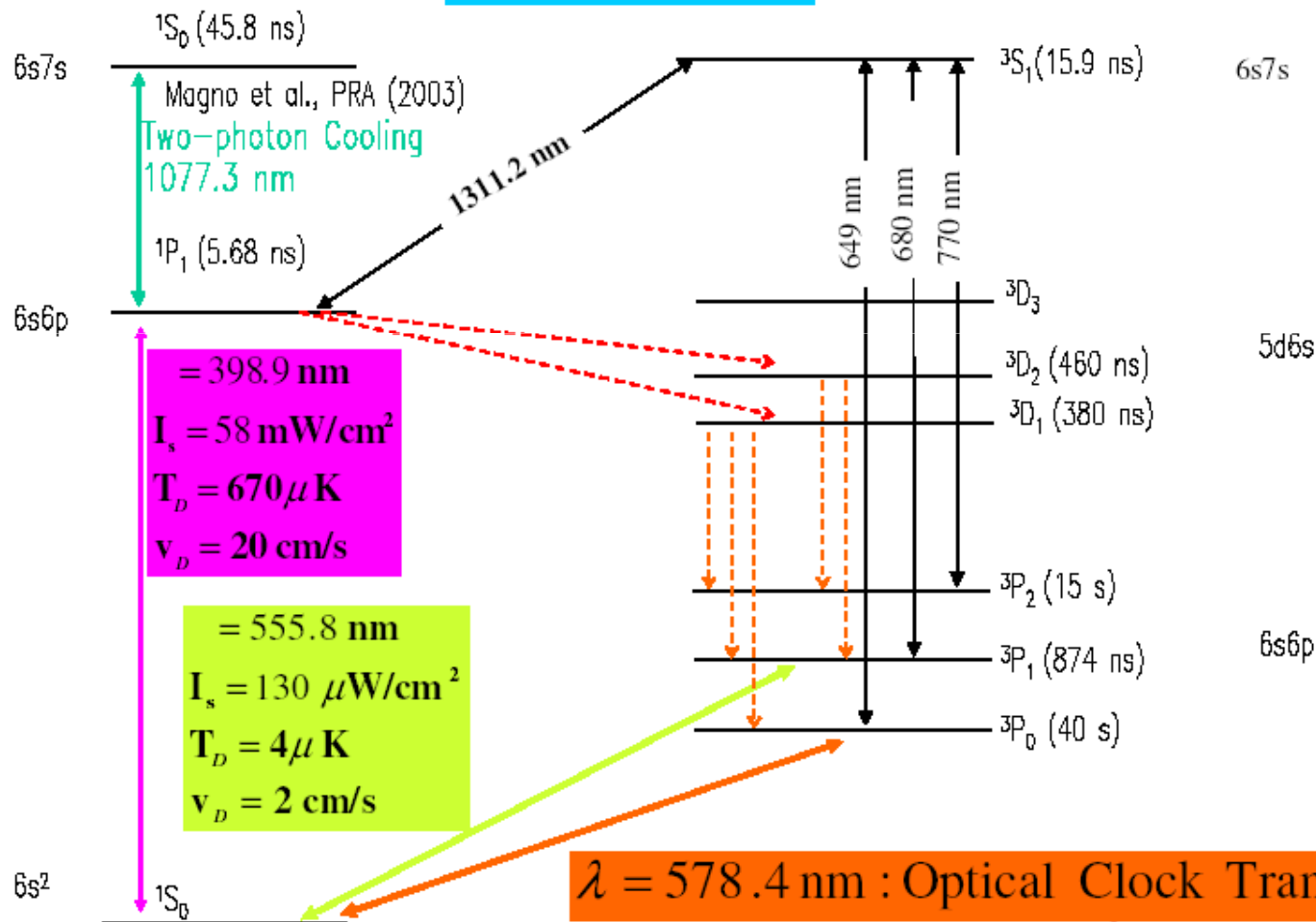
"for their contributions to the development of laser-based precision spectroscopy, including the optical frequency comb technique"

Orologio Ottico a Yb

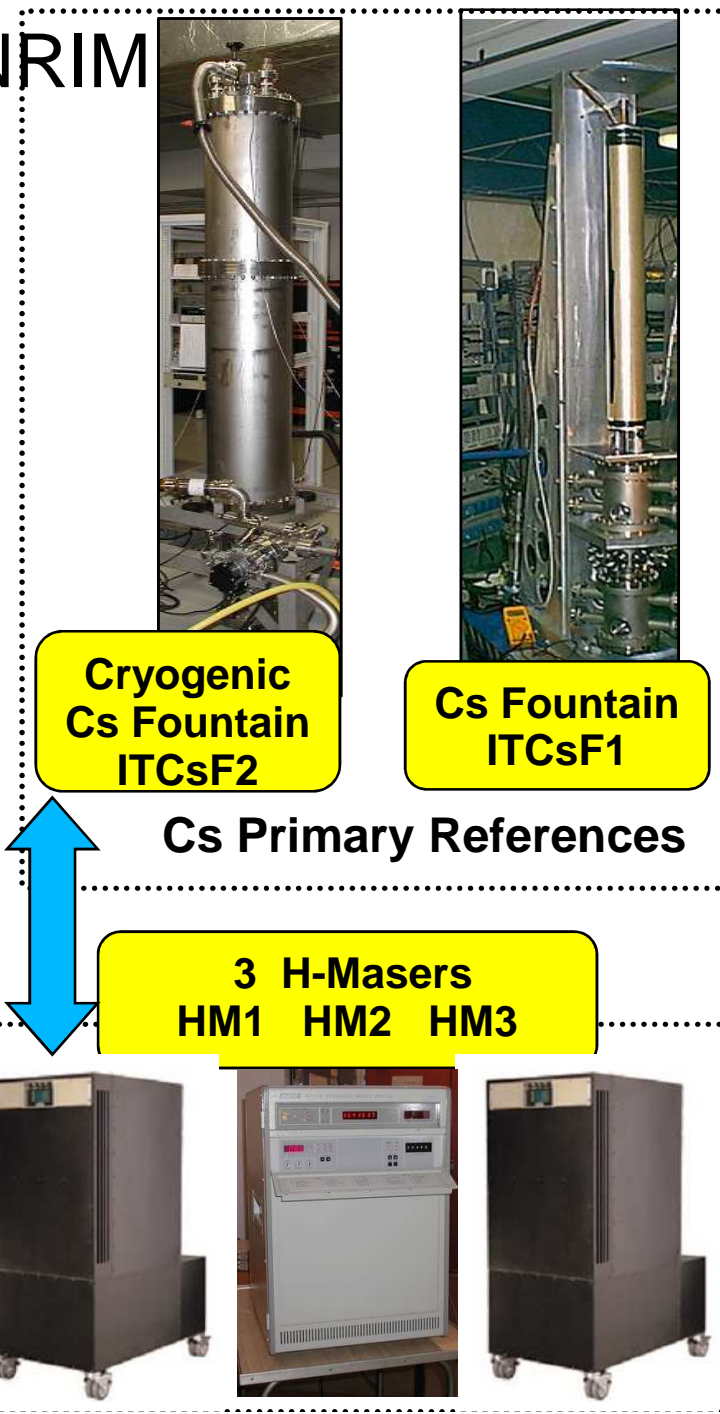
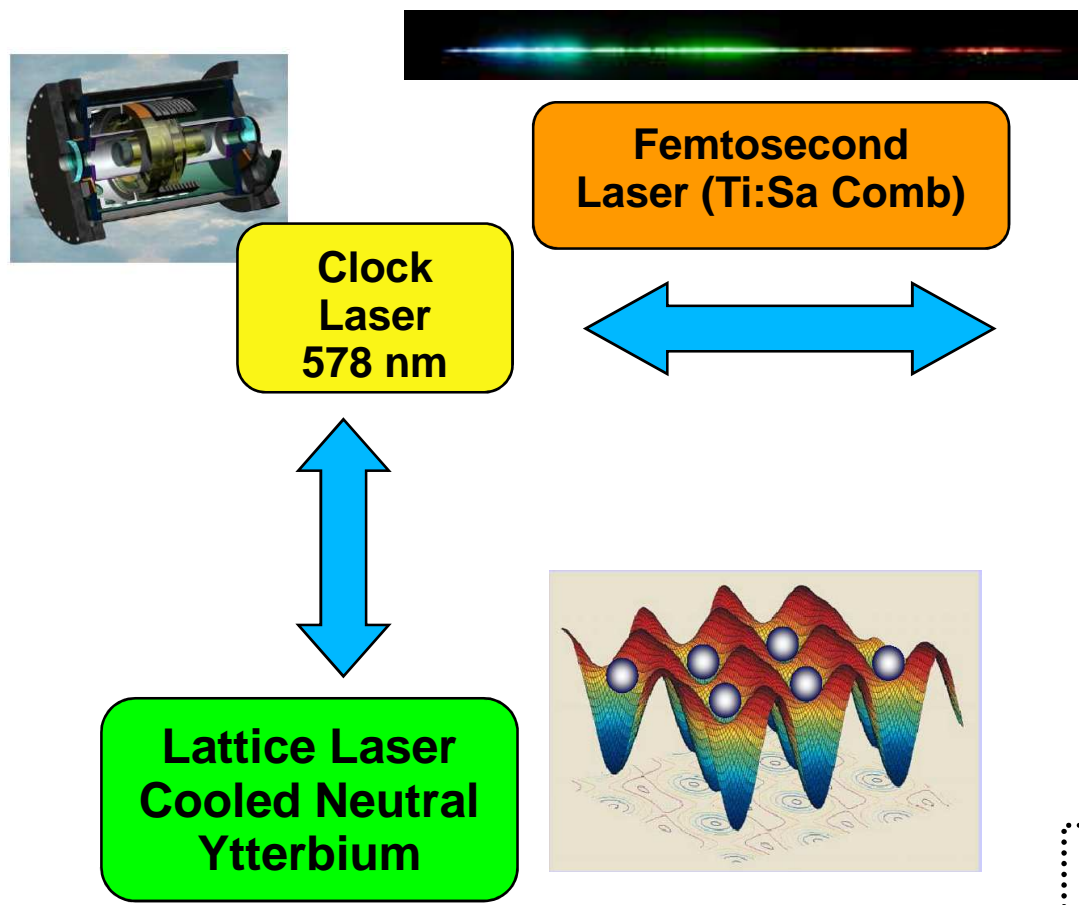


Orologio Ottico a Yb

Yb Energy Levels



Laser cooled clocks at INRIM



Yb clock Main features

1. Level structure for laser cooling and trapping

First stage cooling $1S_0 - 1P_1$ @ 398.9 nm (28 MHz linewidth)

Second stage cooling $1S_0 - 3P_1$ @ 555.8 nm (180 kHz linewidth)

NO REPUMPING REQUIRED

2. Clock $1S_0 - 3P_0$ transition @ 578 nm, 10 mHz linewidth

Lattice Magic Wavelength @ 759 nm

3. Accuracy $<10^{-16}$

Stability $<10^{-15}$ at 1s

Large abundance of stable bosonic and fermionic isotopes:

Different clock schemes

**Yb Lattice clock in the world:
NIST, UniDusseldorf, Japan AIST, INRIM...**

Blu Trap
399 nm

Yb @ 1 mK
(20 cm/s)



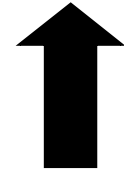
Green Trap
556 nm

Yb @ 20 μ K
(2 cm/s)

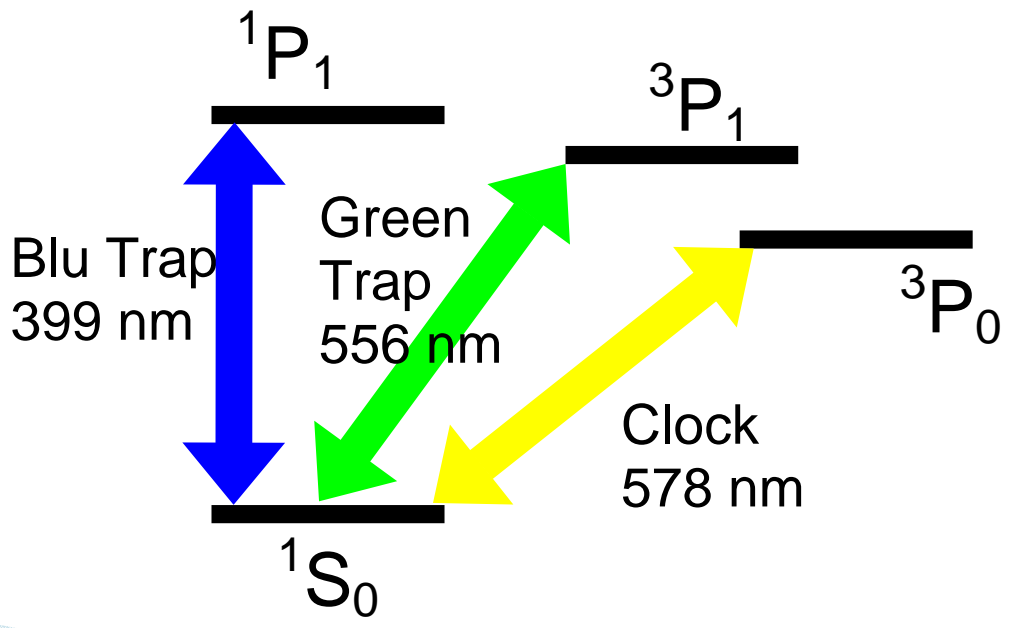


Lattice Trap
759 nm

Yb localized

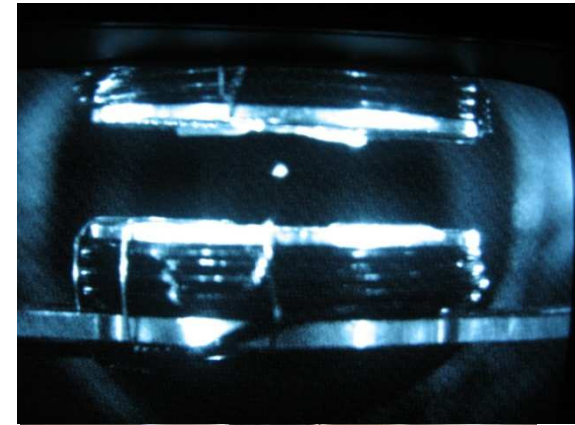
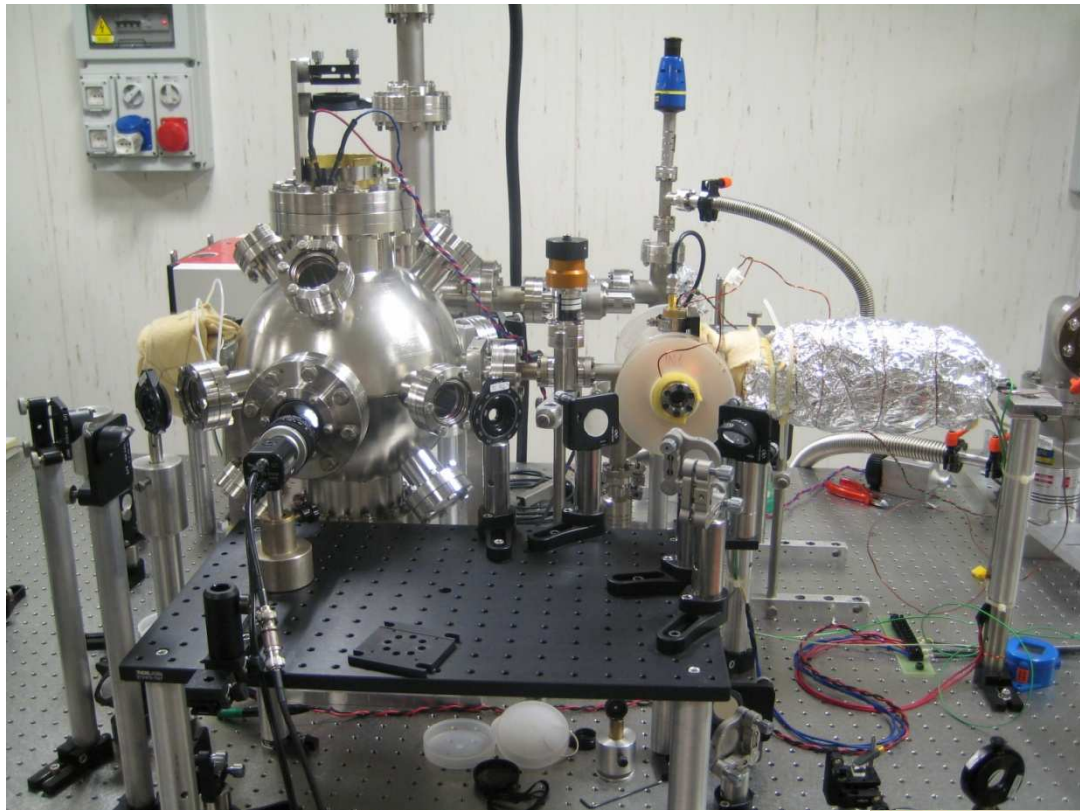


Clock
578 nm

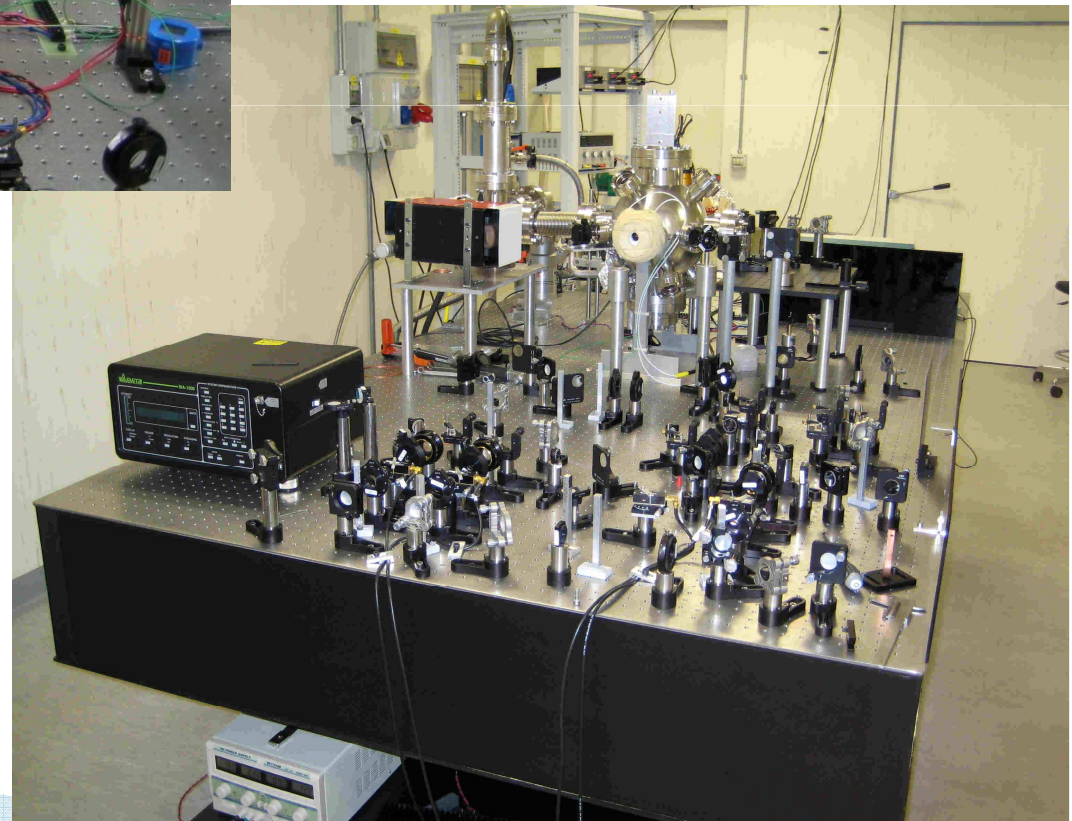


Yb Isotopes

	Abudancy	Atomic Weight	Spin	Lifetime
^{168}Yb	0.135%	167.9339	0	-
^{169}Yb	0%	169	7/2	32.03 giorni
^{170}Yb	3.03%	169.9349	0	-
^{171}Yb	14.31%	170.9365	1/2	-
^{172}Yb	21.82%	171.9366	0	-
^{173}Yb	16.13%	172.9383	5/2	-
^{174}Yb	31.84%	173.9389	0	-
^{175}Yb	0%	175	7/2	4.19 giorni
^{176}Yb	12.73%	175.9426	0	-

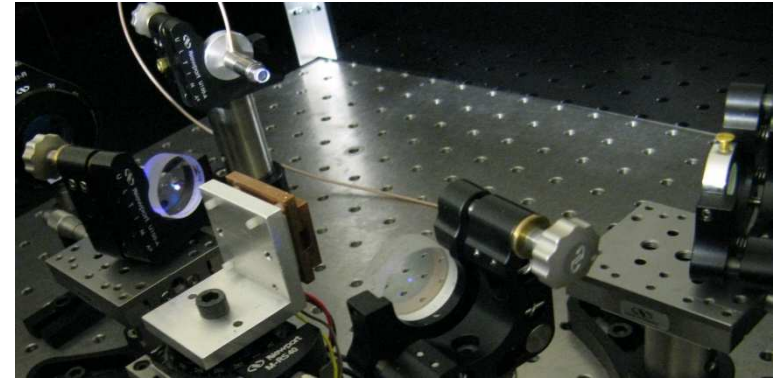
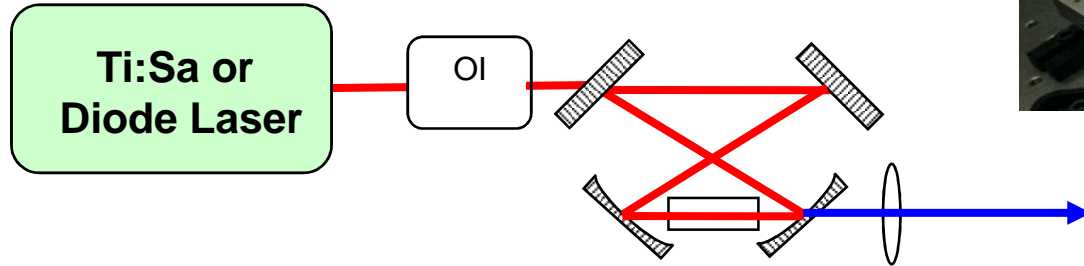


- Multichannel Oven (700 K)
- **NO ZEEMAN SLOWER**
- Precooling laser beam
- **Next:** Compact Vacuum Chamber; BBR control (oven shutter)



Cooling Radiations

399 nm Laser Generation

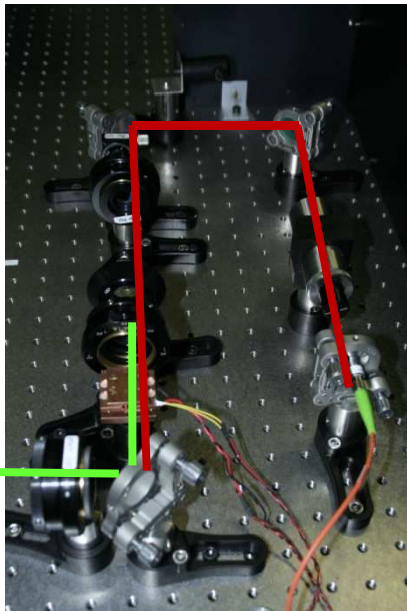


10 mm PPKTP enhancement cavity

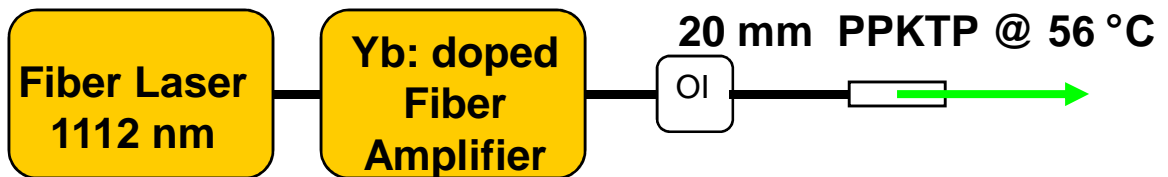
70 mW @ 399 nm from 600 mW @ 797.2 nm (Ti:Sa)

30 mW @ 399 nm from 400 mW @ 797.2 nm (Diode Laser)

Next: waveguide crystal, no enhancement cavity

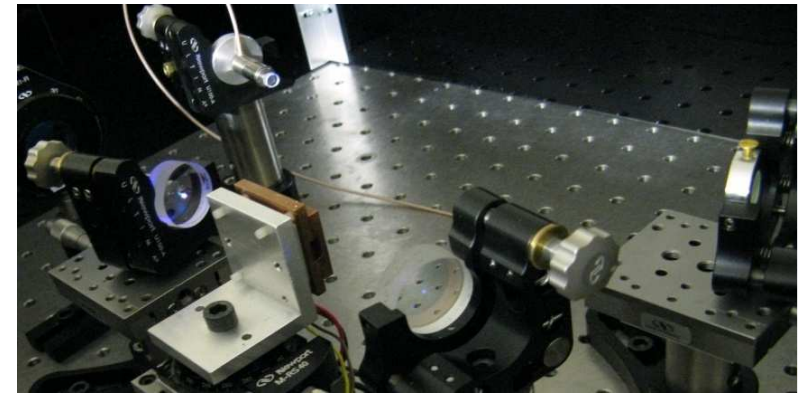
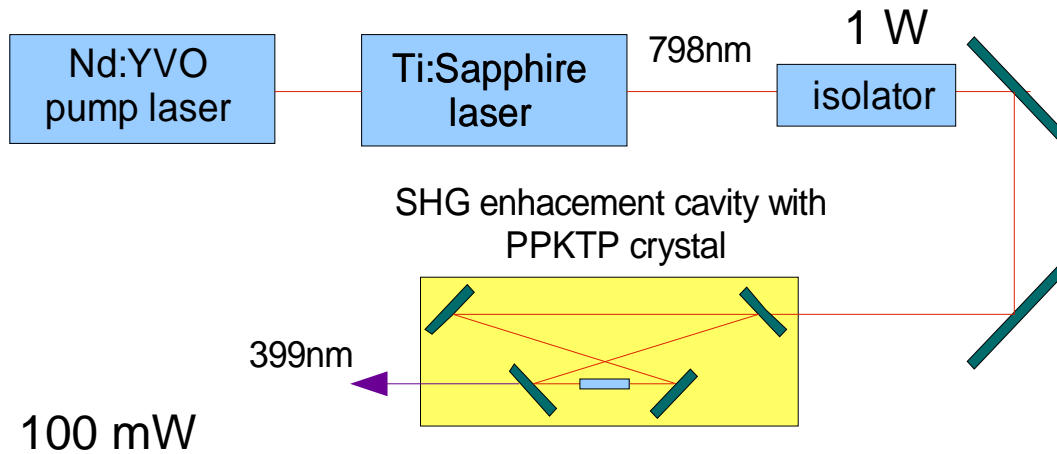


556 nm Laser Generation

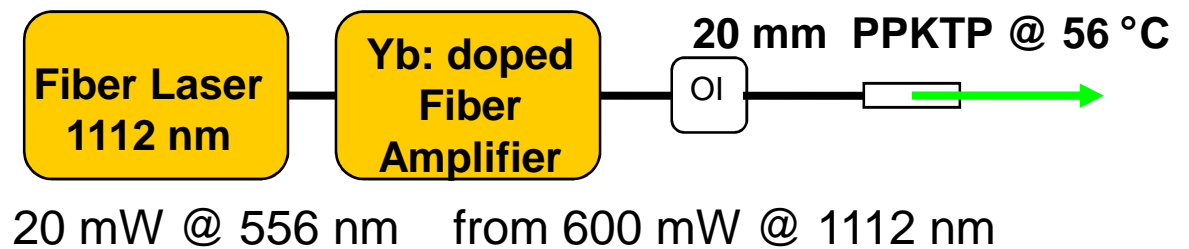
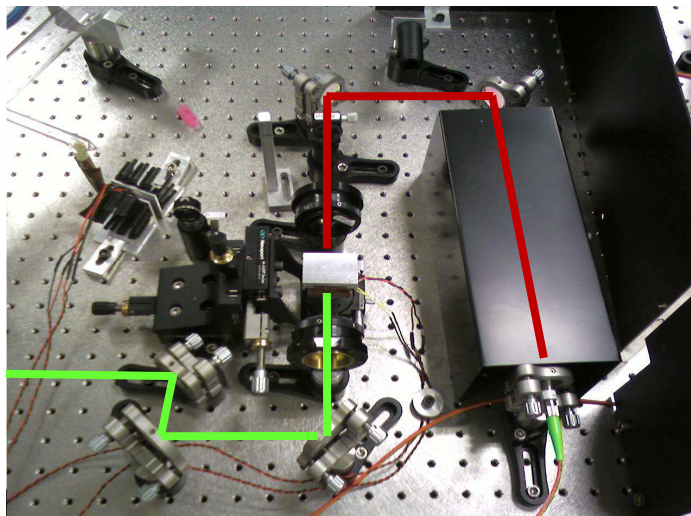


20 mW @ 556 nm from 600 mW @ 1112 nm

Cooling Lasers Generation



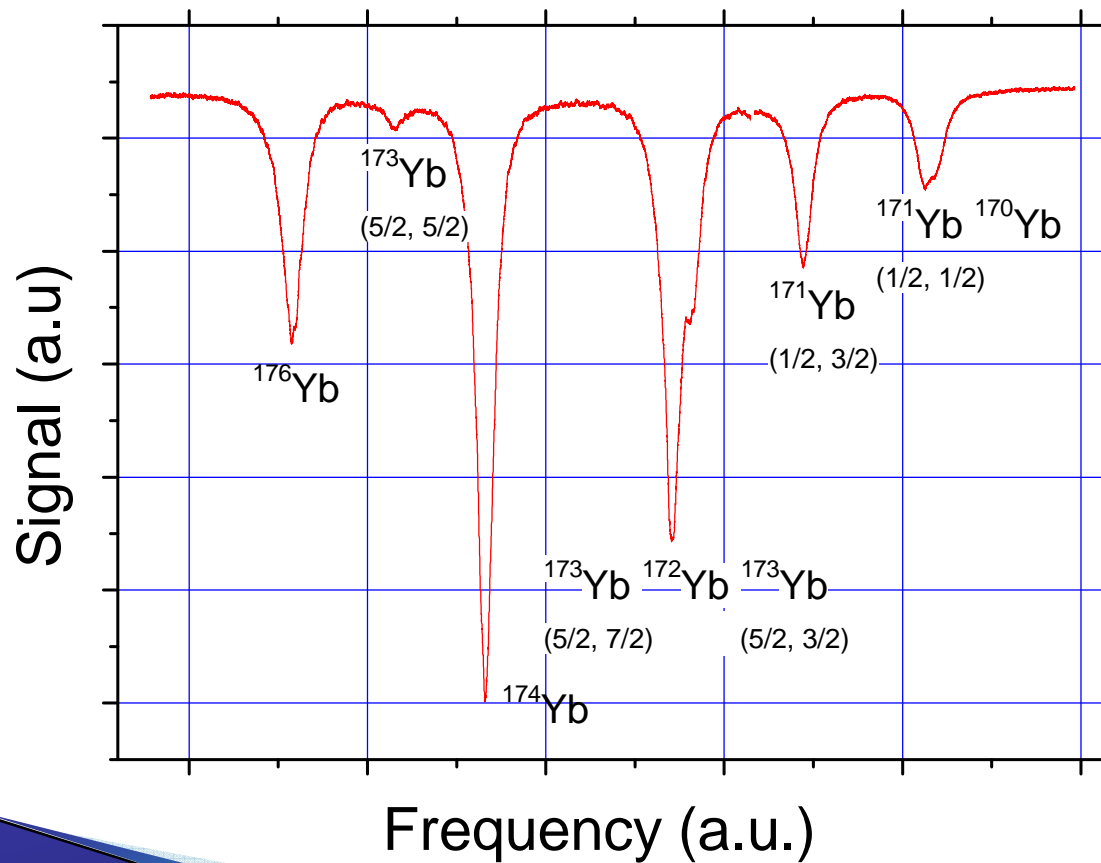
Enhancement Cavity locked by Hansch-Couillaud technique



Yb beam spectroscopy

Table 4.2: Yb isotope, hyperfine levels, relative strength, isotope shifts and hyperfine splittings of the $^1S_0-^1P_1$ transition at 399 nm [Dei93].

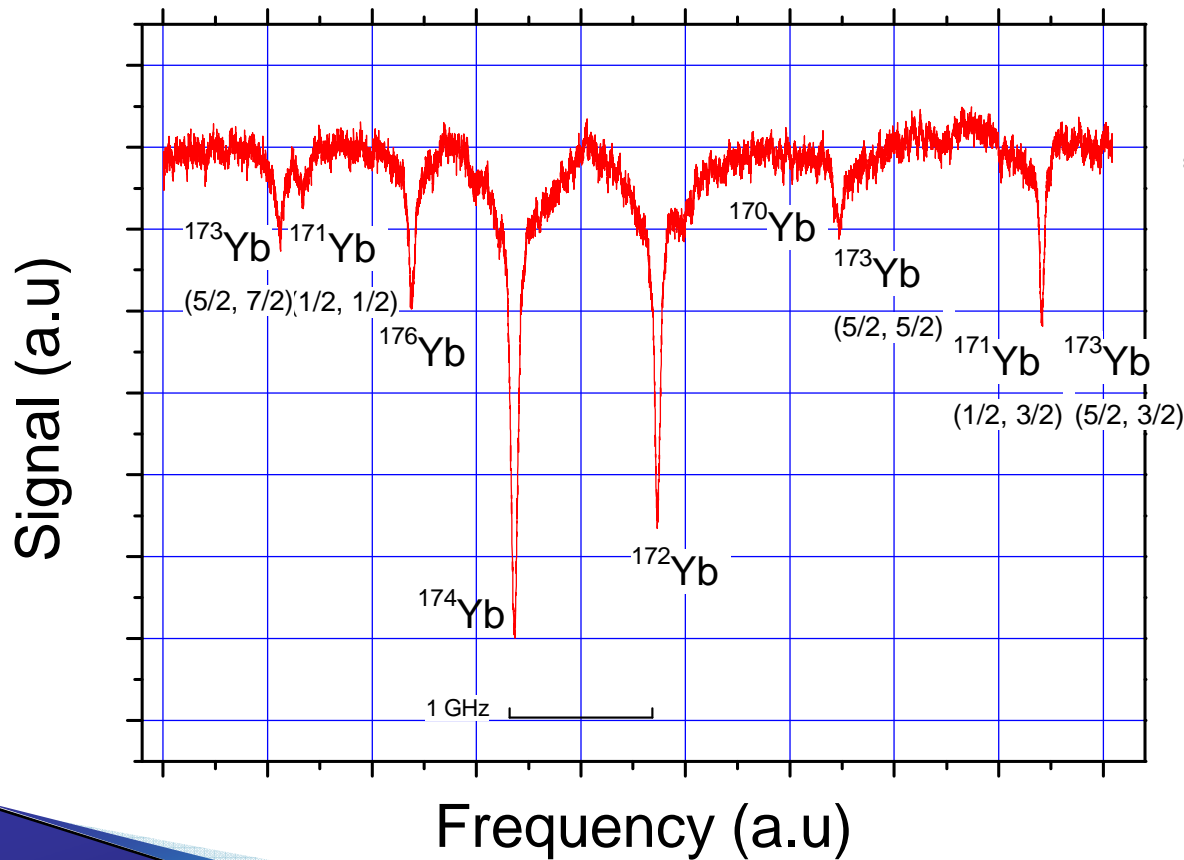
Isotope/h.f.	Relative Strengths	Shift (MHz)
176	0.1273	0
173 (5/2 - 5/2)	0.0498	272.1
171	0.3184	500.4
173 (5/2 - 3/2)	0.0225	1008.86
172	0.2182	1039.3
173 (5/2 - 7/2)	0.0884	1092.8
171 (1/2 - 3/2)	0.1140	1352.7
171 (1/2 - 1/2)	0.0285	1654.5
170	0.0303	1690.8
168	0.00135	2388.5



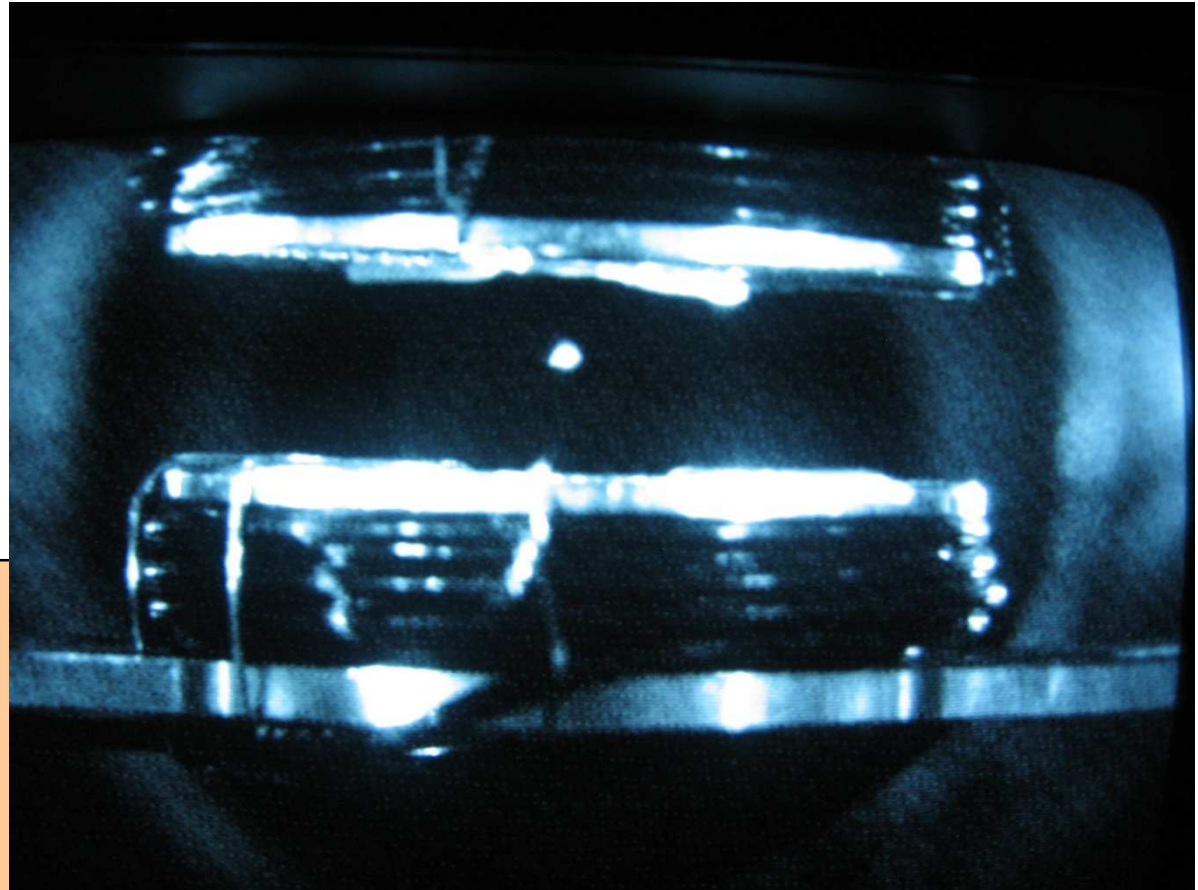
Yb beam spectroscopy

Table 4.3: Yb isotope, hyperfine levels, relative strengths, isotope shifts and hyperfine splittings of the $^1S_0 \rightarrow ^3P_1$ transition at 556 nm [vW94].

Isotope/h.f.	Relative Strength	Shift (MHz)
^{173}Yb (5/2 - 7/2)	0.0715	0
^{171}Yb (1/2 - 1/2)	0.0476	255
^{176}Yb	0.1274	1432
^{174}Yb	0.3187	2386
^{172}Yb	0.2184	3387
^{170}Yb	0.0303	4673
^{173}Yb (5/2 - 5/2)	0.0537	4698
^{168}Yb	0.0014	6044
^{171}Yb (1/2 - 3/2)	0.0952	6192
^{173}Yb (5/2 - 3/2)	0.0358	6193



Yb MOT parameters



$$T_{\text{oven}} = 350^{\circ} \text{ C}$$

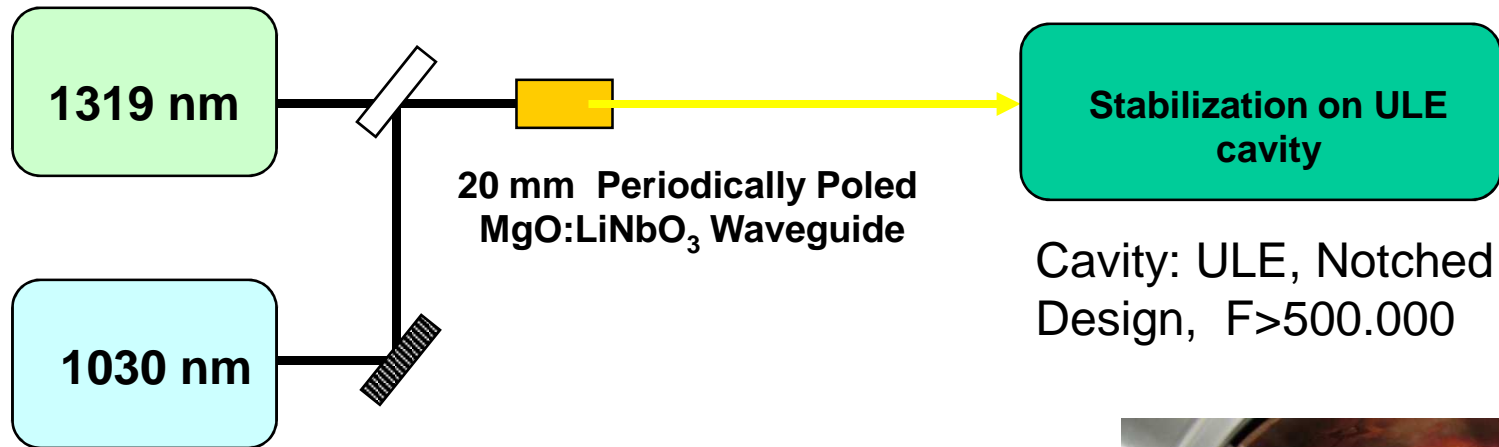
$$I_L \sim 6 \text{ mW/cm}^2$$

$$B \sim 48 \text{ G/cm}$$

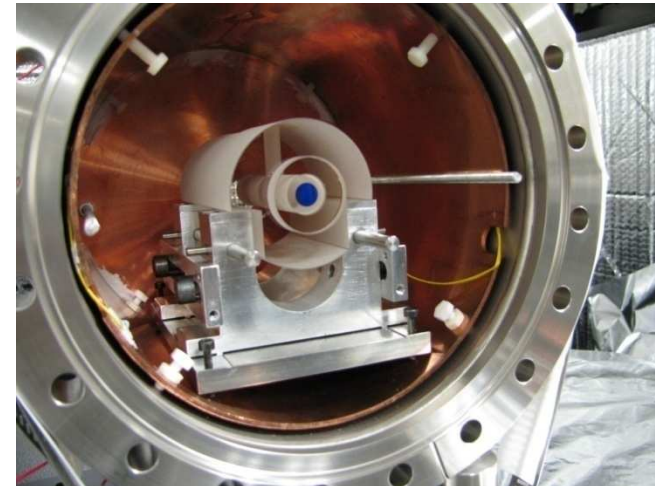
$$\Delta \sim 22 \text{ MHz}$$

$$\text{Estimated Atoms } N \sim 10^4\text{-}10^5$$

Clock Laser Radiation



- ✓ up to 12 mW @ 578nm SFG
- ✓ Stabilized on notched ULE cavity
- ✓ Two independent cavities implemented

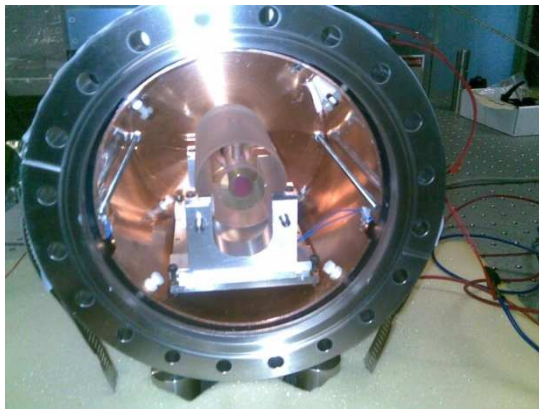


Stabilizzazione della cavità^{1,2,3}

Frequenza di risonanza della cavità:
$$\nu = n \frac{c}{2L}$$

La cavità è isolata dall'ambiente

- **Termicamente:**



- **Specchi e distanziale in ULE[®] Corning:** attorno a T_C :

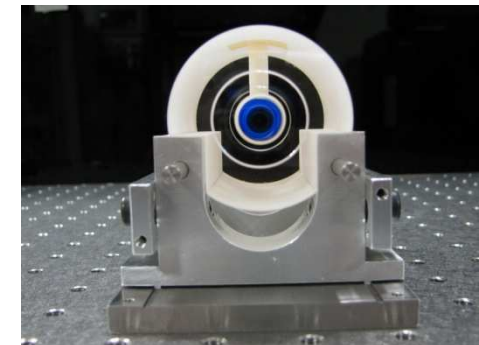
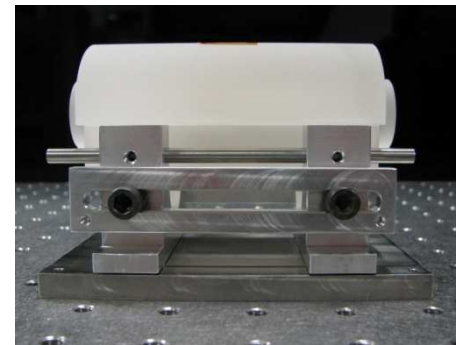
$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta L}{L} \approx 10^{-9}(T - T_C)^2 \Rightarrow \frac{d}{dT} \frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-9}(T - T_C)$$

- **Camera sotto vuoto:** $P = 6 \times 10^{-8}$ mbar
- **Rivestimento in Acciaio**
- **Schermo in Rame** separato dal rivestimento mediante viti in ceramica
- **Circuito di controllo** attivo della temperatura

- **Meccanicamente:**

- Il **banco ottico** garantisce uno smorzamento delle vibrazioni a frequenze spettrali > 10 Hz

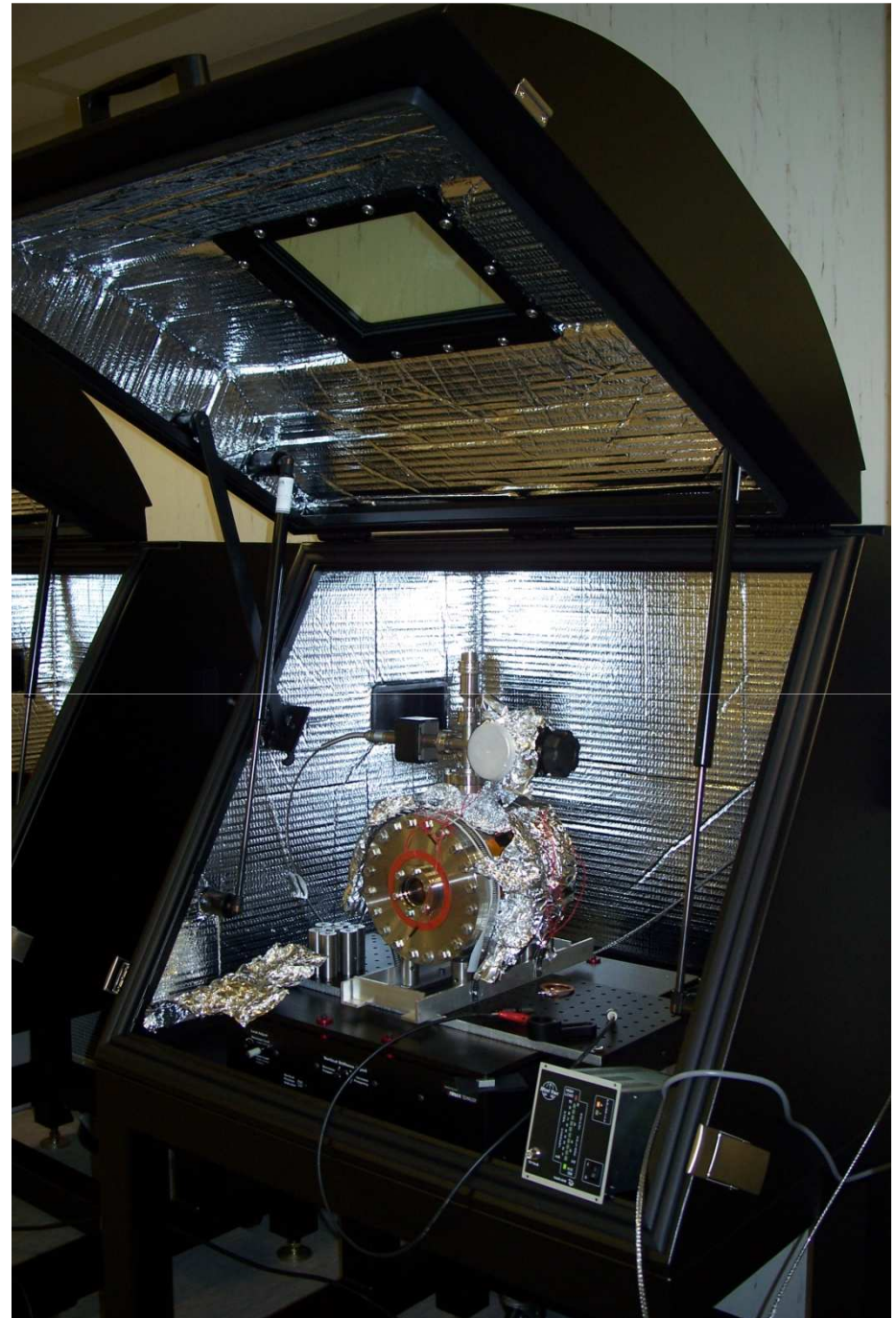
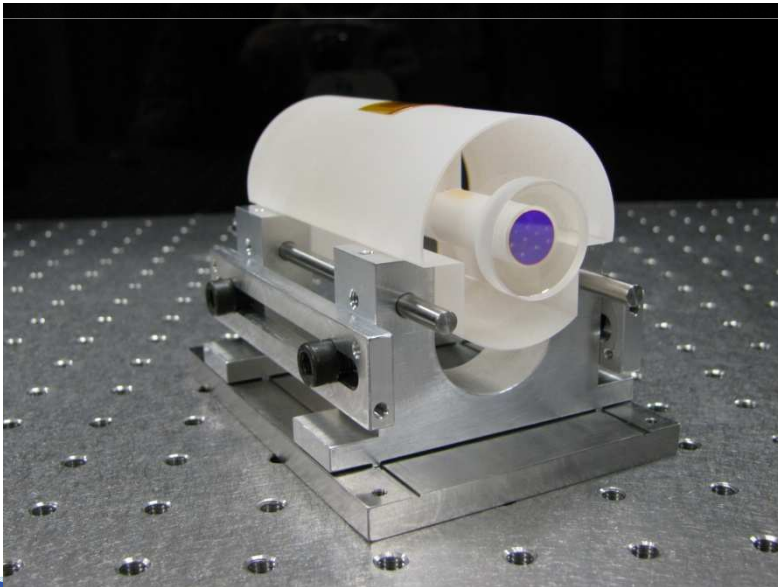
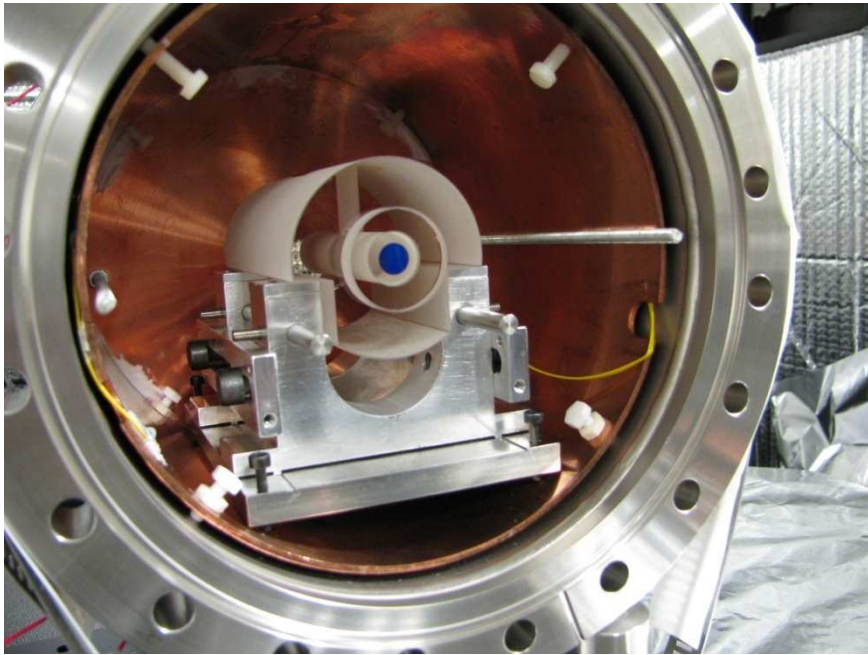
- **Appoggio sui punti di Airy** perché la cavità subisca la minima deformazione di L dovuta alle accelerazioni del sistema.

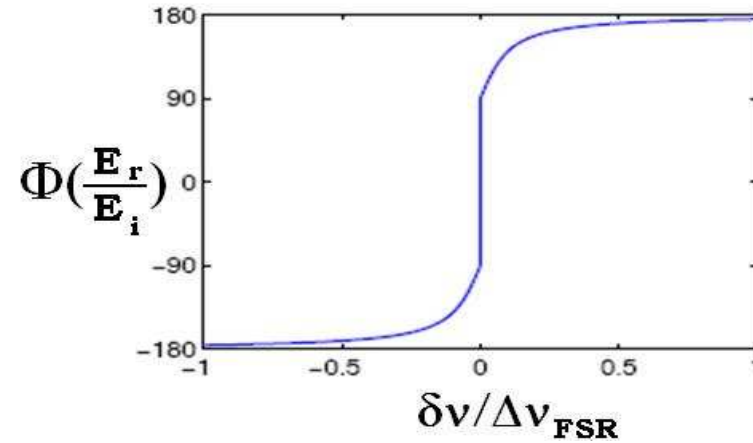
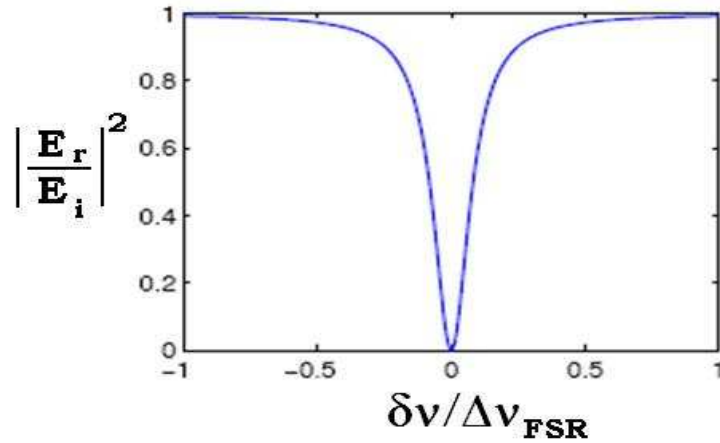


1: Ludlow et al., "Compact, thermal-noise-limited optical cavity for diode laser stabilization at 10^{-15} ", Opt. Lett., 32,6,2007.

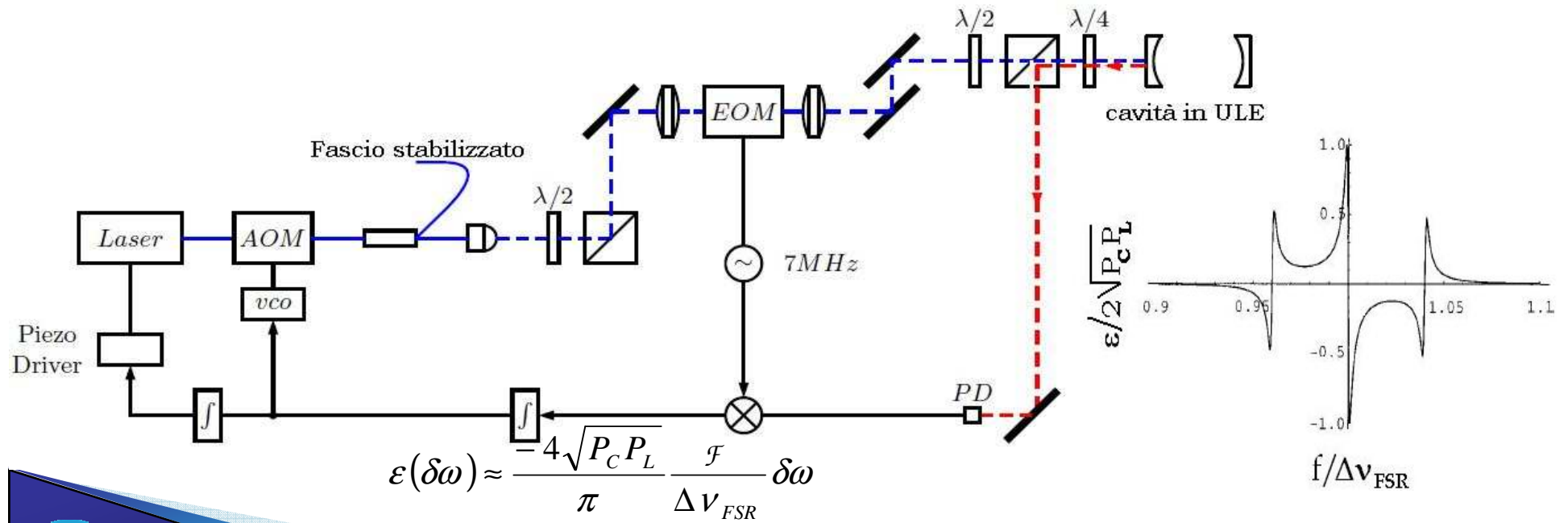
2: Webster et al., "Vibration insensitive optical cavity", Phys. Rev. A, 75, 2007.

3: Millo et al., "Ultrastable laser based on vibration insensitive cavities", Phys. Rev. A 79, 2009





$$E_i = E_{0,i} e^{i(\omega t + \beta \sin \Omega t)} \approx E_0 [J_0(\beta) e^{i\omega t} + J_1(\beta) e^{i(\omega + \Omega)t} - J_1(\beta) e^{i(\omega - \Omega)t}]$$



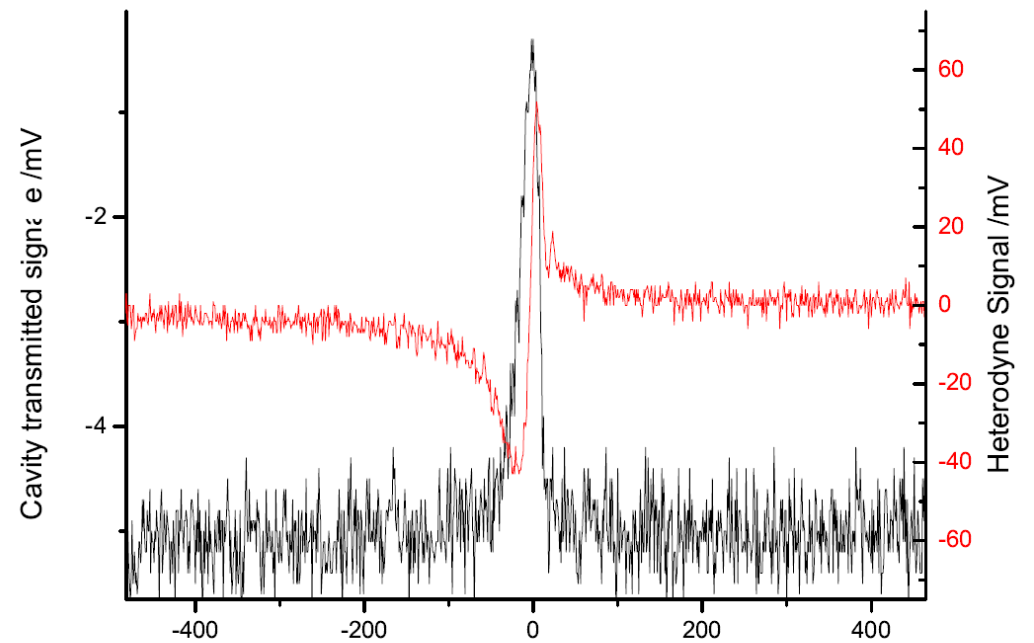
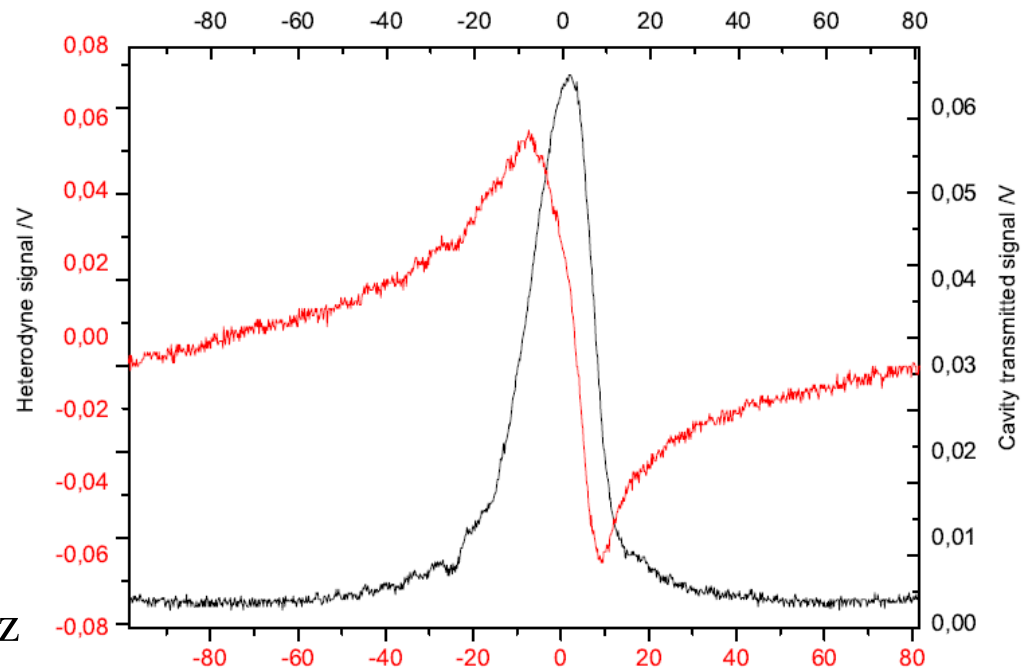
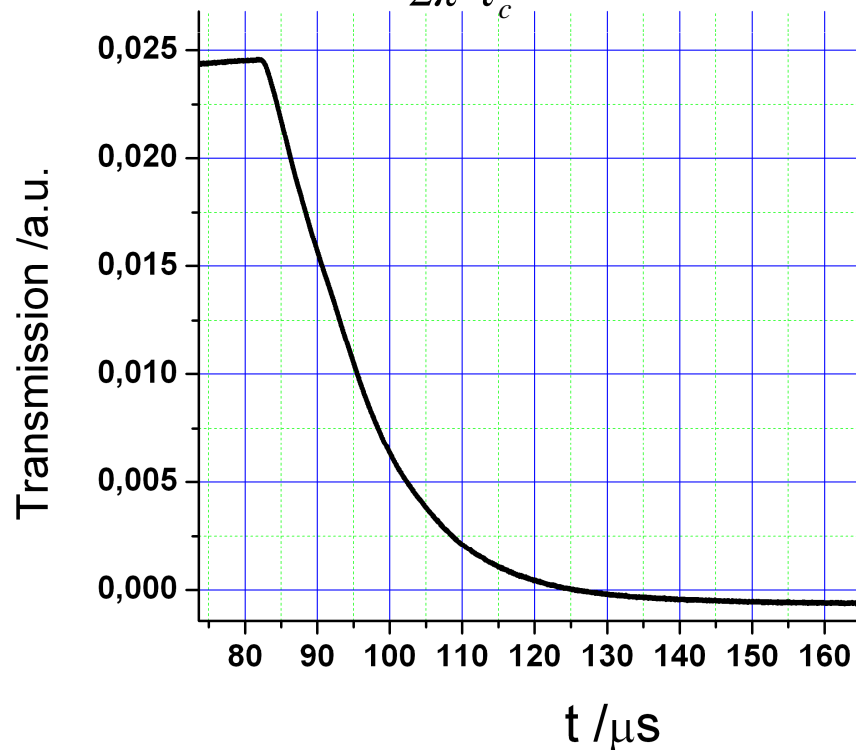
$$Q = 2\pi \frac{E_0}{dE/dt} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \omega_0 \tau_c$$

$$\mathcal{F} = \frac{\Delta\nu_{FSR}}{\Delta\nu} = \pi \frac{\sqrt{R}}{1-R} \approx 10^5$$

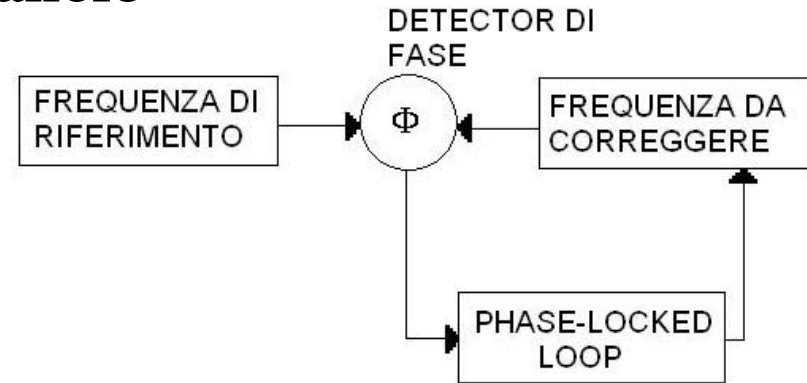
$$Q = (1,59 \pm 0,01) \times 10^{10}$$

$$\mathcal{F} = (1,2 \pm 0,2) \times 10^5$$

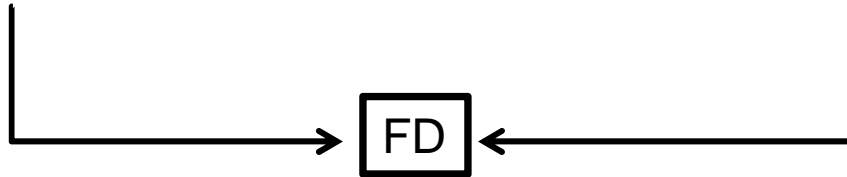
$$\Delta\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\tau_c} = (12,3 \pm 0,1) \text{ kHz}$$



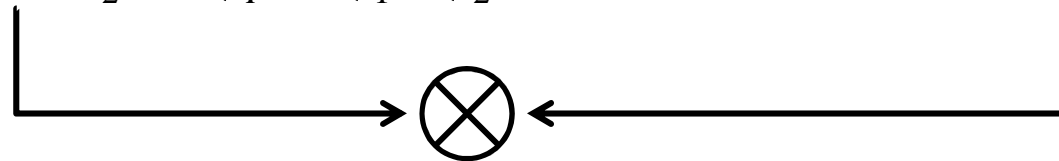
Il Phase Locked Loop (PLL) per l'aggancio



$$\vec{E}_1 = \vec{E}_{1,0} \sin[\omega_L t + \phi_1] \quad \vec{E}_2 = \vec{E}_{2,0} \sin[(\omega_L + 2\Omega_1 + \Omega_2)t + \phi_2 + \phi_F]$$



$$V_F = 2\sqrt{P_1 P_2} \Re R \sin[(2\Omega_1 + \Omega_2)t + \phi_F + (\phi_1 - \phi_2)] \quad V_R = V_{R,0} \sin[(2\Omega_1 + \Omega_2)t + \phi_R]$$



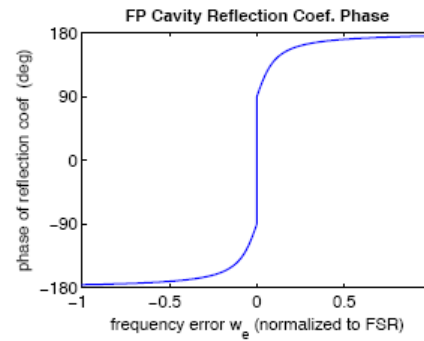
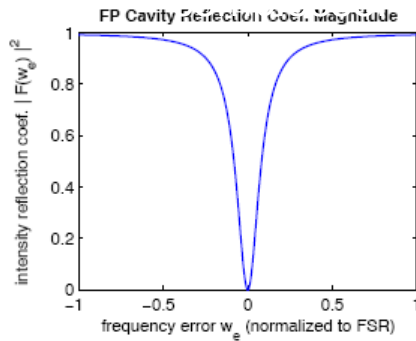
$$V_M = V_{F,0} V_{R,0} \sin[(2\Omega_1 + \Omega_2)t + \phi_F] \sin[(2\Omega_1 + \Omega_2)t + \phi_R] \propto \cos[\phi_F - \phi_R]$$

Perché $V_M \propto [\phi_F - \phi_R]$, occorre che¹ $\phi_F - \phi_R \approx \frac{\pi}{2}$

$$E_i = E_{0,i} e^{i\omega t}$$

$$E_r = E_{0,r} e^{i\omega t}$$

$$\frac{E_{0,r}}{E_{0,i}} = r$$



$$\frac{E_r}{E_i} = F(\omega) = \frac{r(e^{i\frac{\omega}{\Delta\nu_{FSR}}} - 1)}{1 - r^2 e^{i\frac{\omega}{\Delta\nu_{FSR}}}}$$

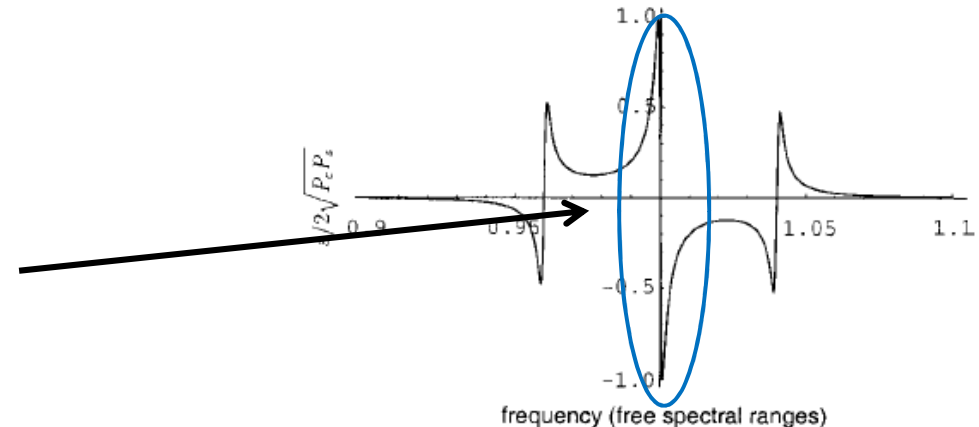
$$E_i = E_{0,i} e^{i(\omega t + \beta \sin \Omega t)} \approx E_0 [J_0(\beta) e^{i\omega t} + J_1(\beta) e^{i(\omega + \Omega)t} - J_1(\beta) e^{i(\omega - \Omega)t}]$$

$$\Omega \gg \delta\nu \Leftrightarrow F(\omega \pm \Omega) = \pm 1$$

$$P_r = 2P_L - 4\sqrt{P_C P_L} \Im\{F(\omega)\} \sin \Omega t + (\text{termini} \propto 2\Omega)$$

$$\omega = 2\pi N \Delta\nu_{FSR} + \delta\omega$$

$$\varepsilon(\delta\omega) \approx \frac{-4\sqrt{P_C P_L}}{\pi} \frac{F}{\Delta\nu_{FSR}} \delta\omega$$

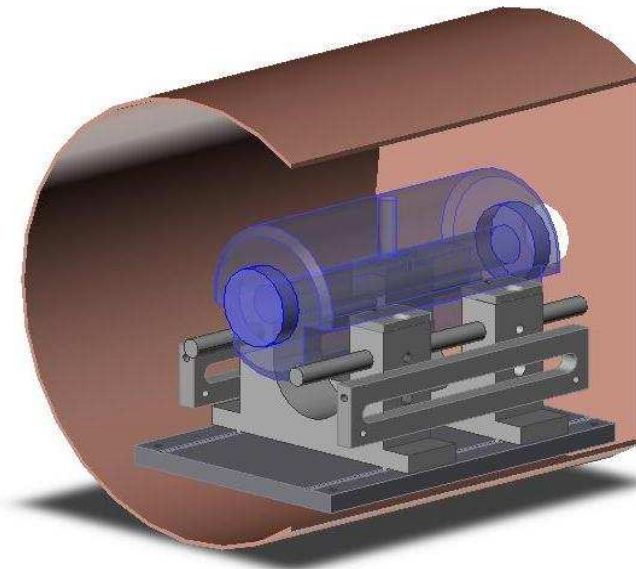
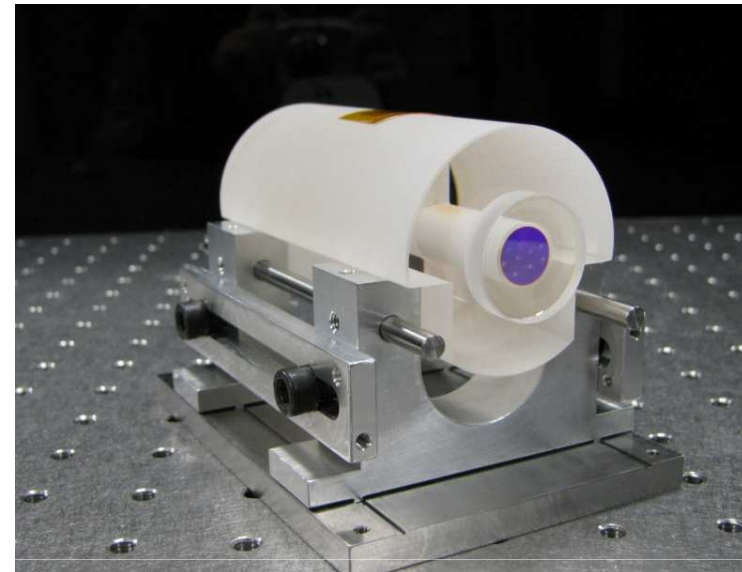


Reference Cavity Physical Package at INRIM

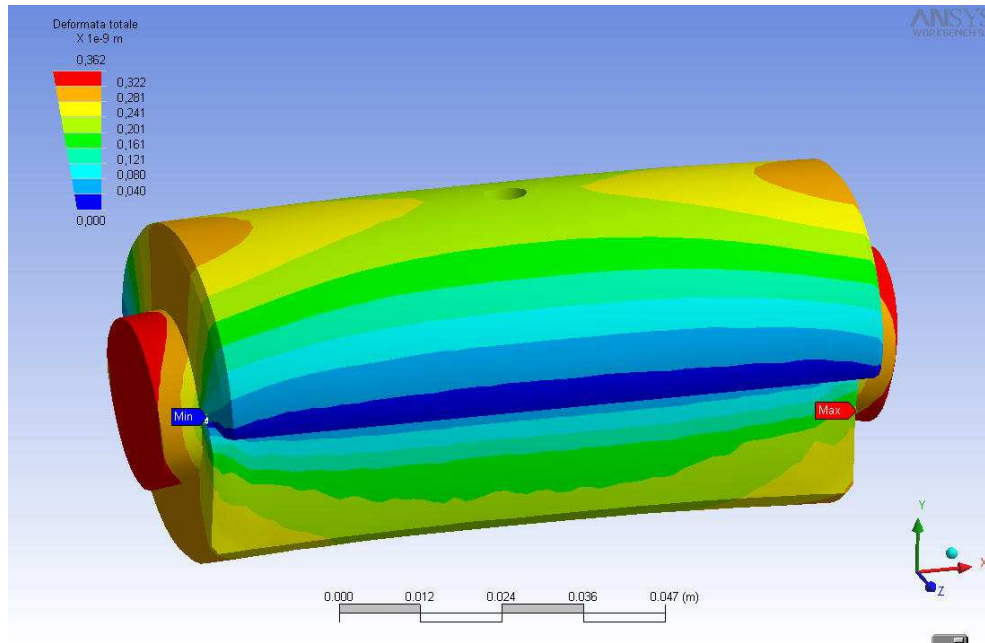
- Frequency stabilized with the Pound-Drever-Hall method against a stable Fabry-Pérot cavity
- The spacer is made in Corning Ultra Low Expansion Glass (ULE)
- $\text{FSR } \Delta\nu_{\text{FSR}} = 1.5 \text{ GHz}$
 $\text{finesse } \mathcal{F} = 151\,000 \pm 1000$
 $\text{linewidth } \Delta\nu = (9.93 \pm 0.06) \text{ kHz}$

Length 100 mm
Measured Zero CTE 21.5°C

Second Cavity $F = 250000$
 $\Delta\nu = 6 \text{ kHz}$



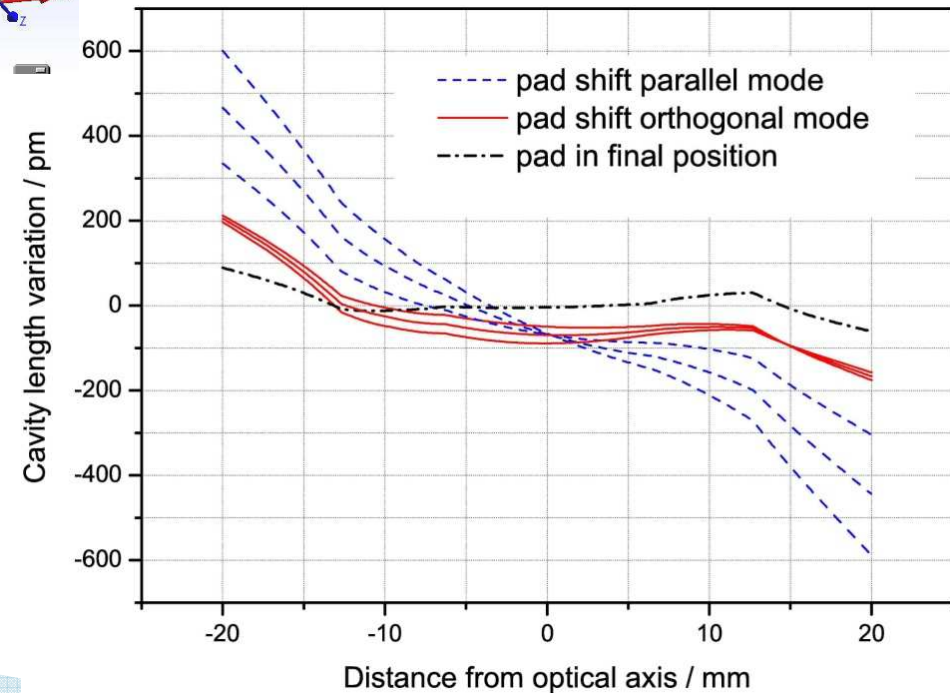
FEM Modelling

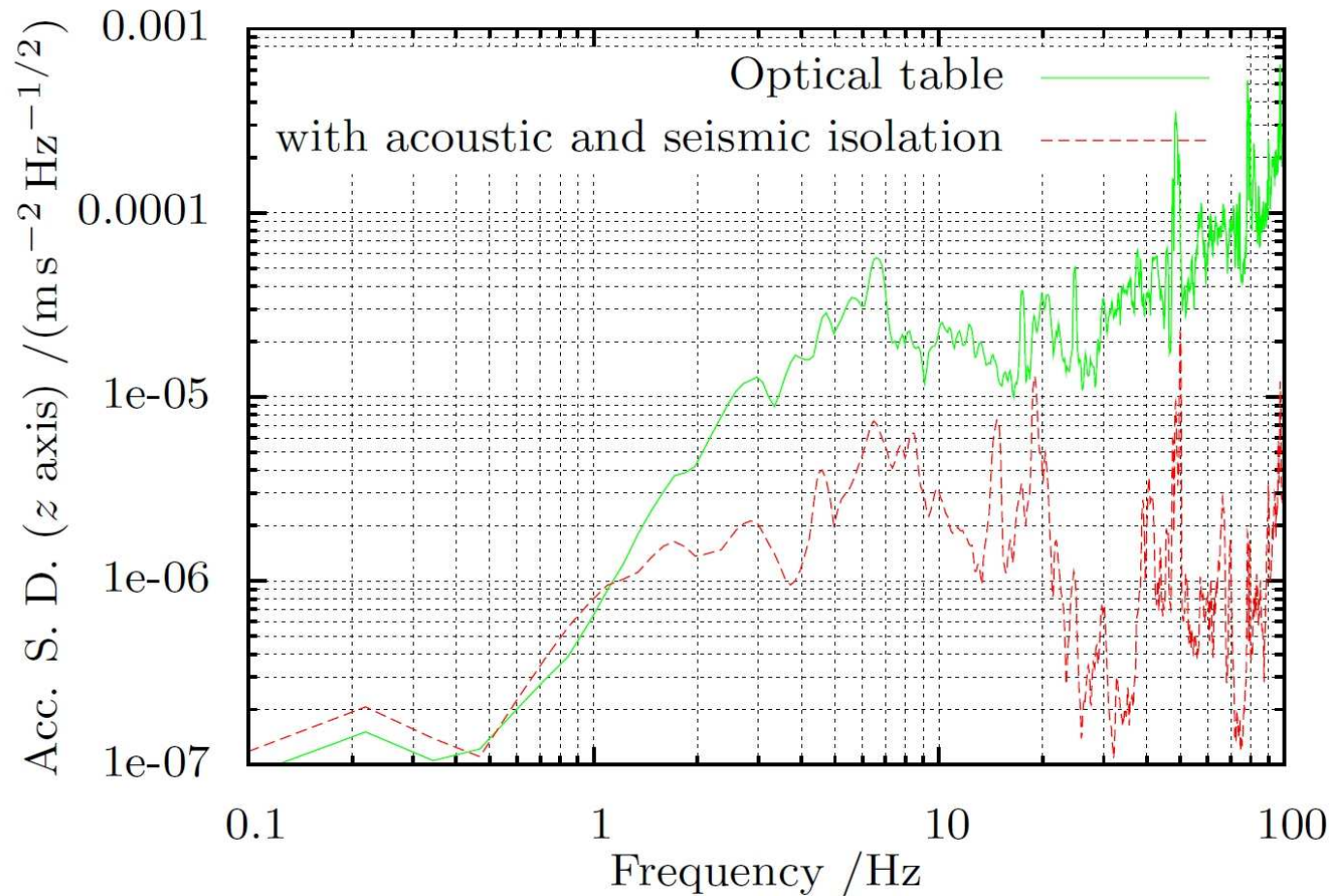


Cylindrical Notched Cavity,
 $L = 100$ mm
 $D = 50$ mm

Sensitivity $5 \times 10^{-11} \text{ s}^2 \text{ m}^{-1}$

The analysis shows that the gravitational force moves the mirrors less than 2 pm if the cavity is supported by four pads of 2×2 mm² placed at 1,9 cm from the internal face of the mirror and 2 mm from the internal surface of the ULE spacer.

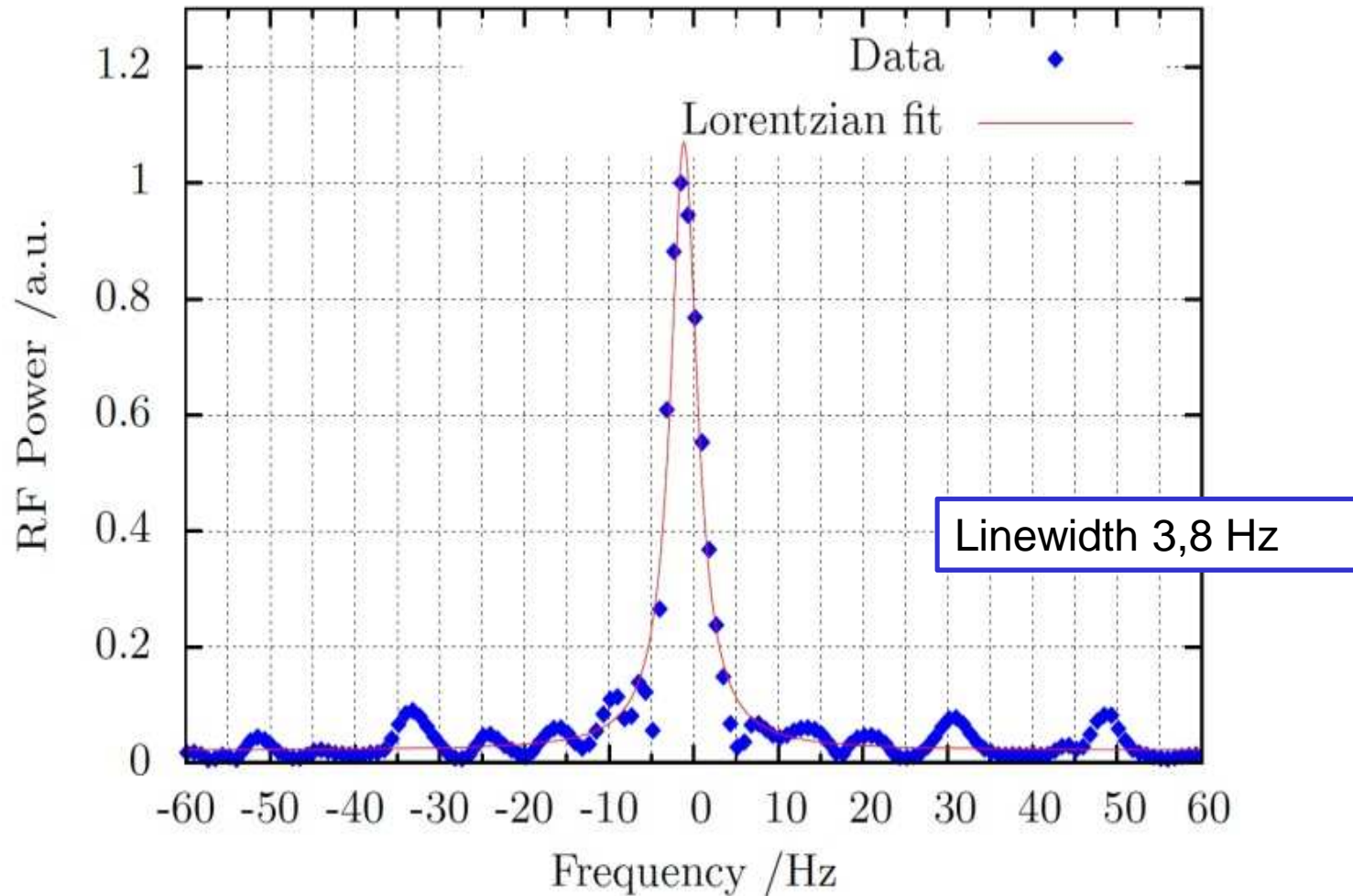




The measurement by seismometer and the acceleration sensitivity from FEM analysis predict a 2×10^{-16} contribution to relative frequency instability

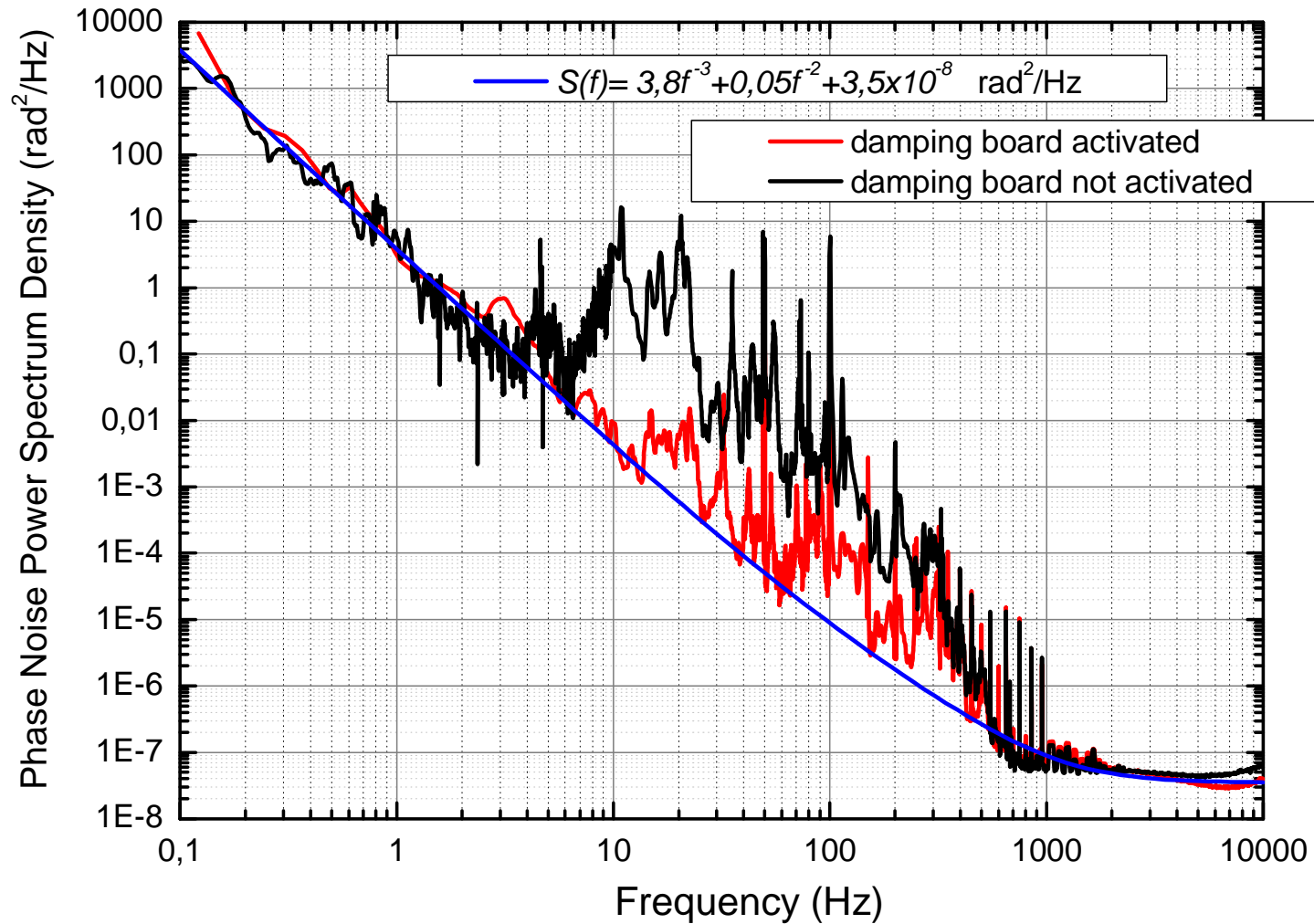
Main contribution: thermal limit @ 2×10^{-15}

Beat Note – Two Independent locked 578 nm Laser

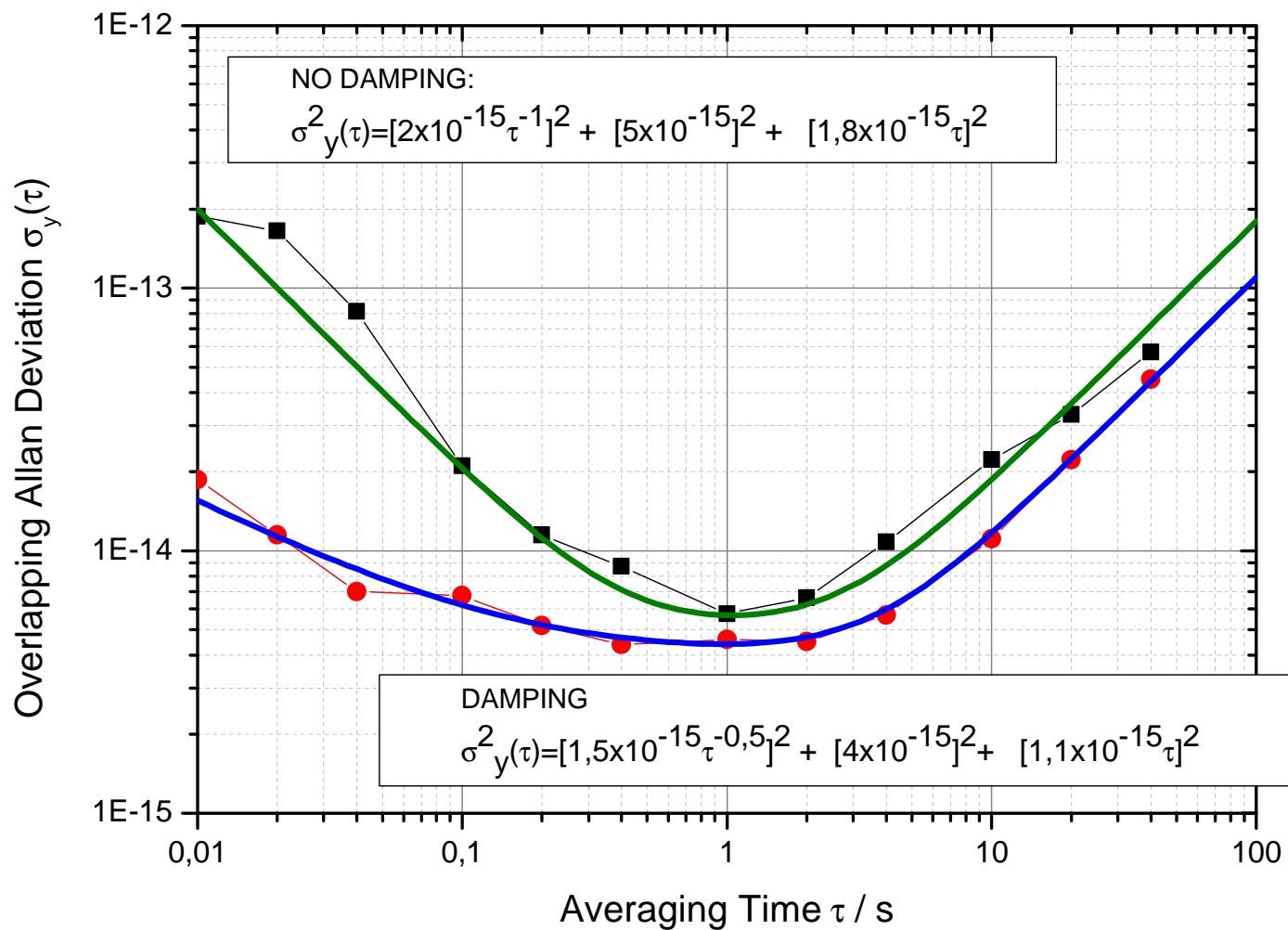


M.Pizzoccaro et al. Tbp on IEEE-UFFC

Two Independent locked 578 nm Laser



Two Independent locked 578 nm Laser



Upgrading the Reference Cavity

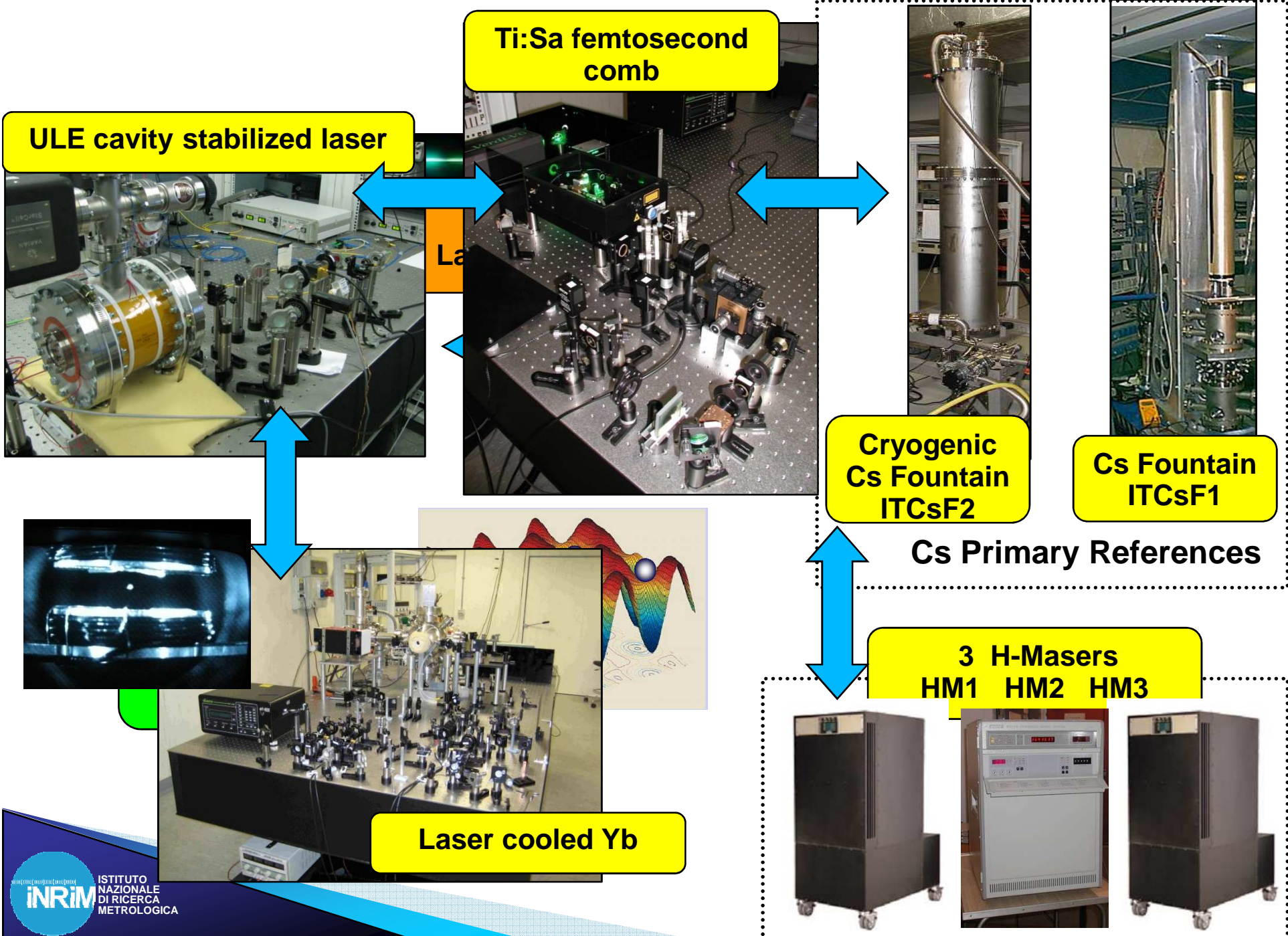
Targets:

Frequency Instability: $\sigma_y(\tau)=5 \cdot 10^{-16}$ $\tau < 10$ s

Portability: lower weight and power consumption

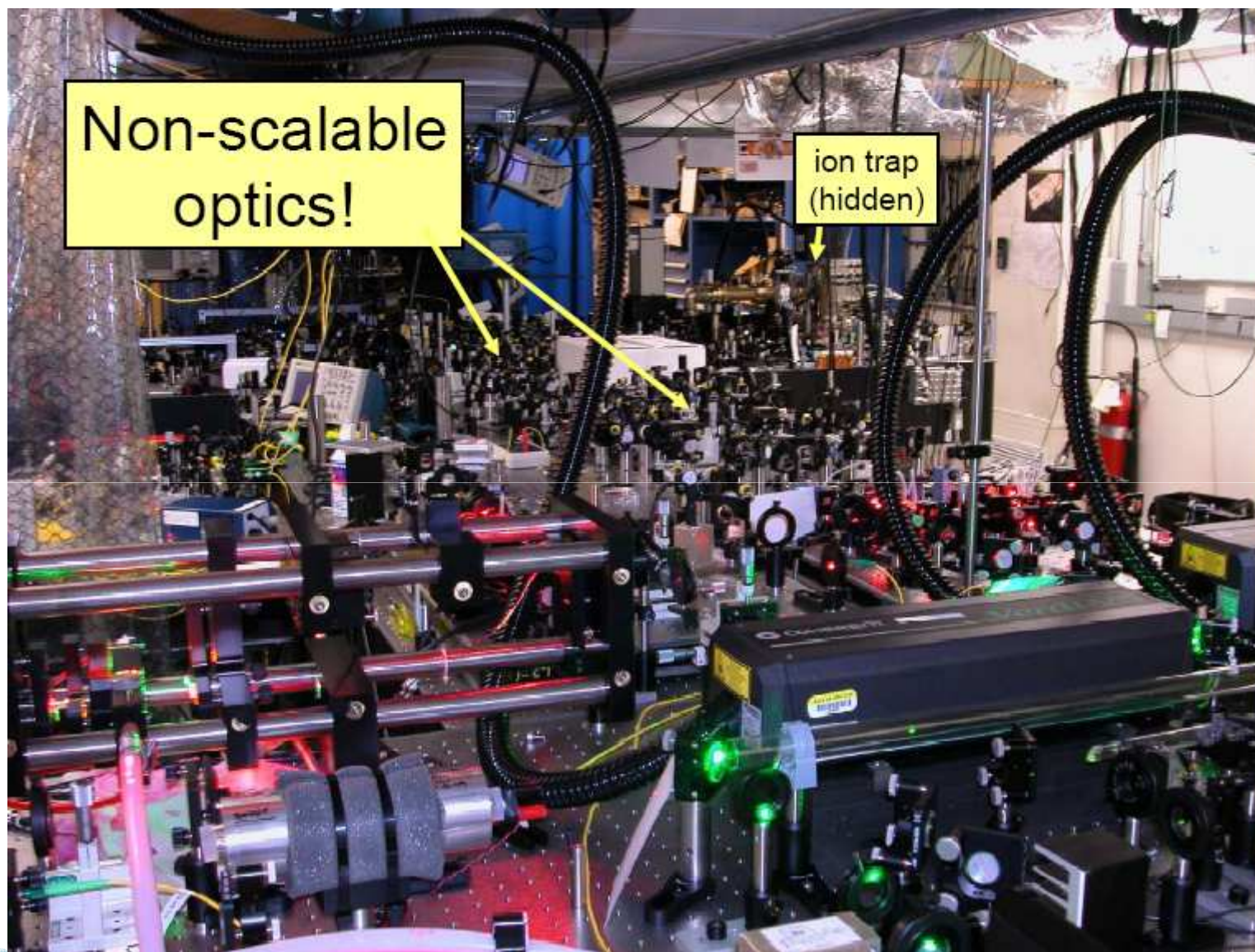
Actions:

- Fused Silica Mirrors; L=30 cm (Lower Thermal Limit)
- Experimental techniques for Thermal Noise Limit
- Vibrations Low sensitivity+Rigid Mount (Portability)
- Improving Insulation (Lower Power Consumption)

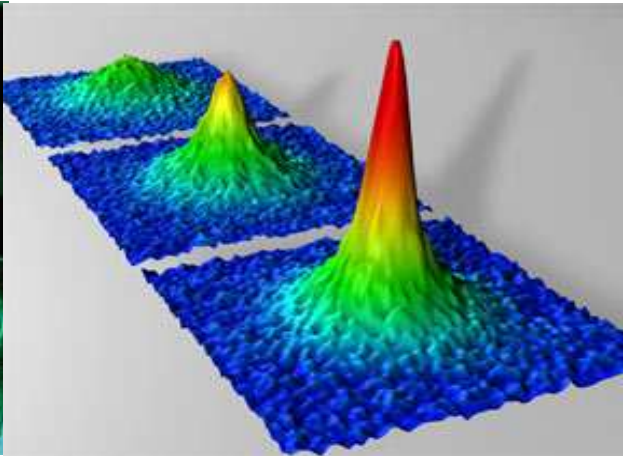
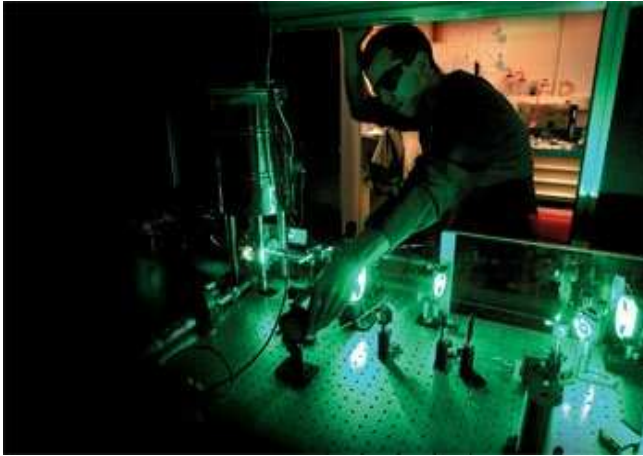


Bias	NIST Yb Clock shift x10-16	incertezza x10-16
Blackbody	-25	2.5
Polarizzabilità del Reticolo	0.4	2
Iperpolarizzabilità	3.3	0.7
Densità	-16.1	0.1
Zeeman 1st	0.4	0.4
Zeeman 2nd	-1.67	0.1
Altro	-	0.2
Totale	-38.7	3.4

Il miglior orologio (e il più complesso): Logic ion clock Al+



Bias	Al+ Clock shift x10-18	incertezza x10-18
Moto residuo	-9	6
Moto Secolare	-16	5
Blackbody radiation	-9	3
Cooling laser Stark	-3.6	1.5
Quad. Zeeman	-1079.9	0.7
Totale	-1118x10-18	9x10-18



OROLOGI ATOMICI E TEST DI FISICA FONDAMENTALE

“Qualche” questione è ancora aperta....

The Mass Puzzle: qual è l'origine della massa? Perché particelle con masse tanto diverse?

The Matter Puzzle: perchè c'è molta più materia che antimateria?

The Dark Matter Puzzle: cos'è la dark matter?

The Dark Energy Puzzle: cos'è la dark energy? Perché l'accelerazione anomala nell'universo?

The Just-So Puzzle: cosa determina i parametri del Modello Standard?

The Force Puzzle: Perché la scala delle interazioni è così disomogenea

(strong: em: weak: gravity = 1: 10^{-2} : 10^{-6} : 10^{-39})? E la Gravità così debole?

Esiste una teoria unificata?

Orologi atomici per la fisica fondamentale perché?

Motivi intrinseci:

- **misurano il tempo**, che in Relatività è la quarta dimensione dello spazio
- **si fondano sulla meccanica quantistica** delle interazioni atomiche fondamentali

Ma c'è dell'altro:

gli orologi di oggi sono indispensabili per misurare fenomeni “piccoli” (ad esempio quelli relativistici),

perché sono gli strumenti più *stabili* ed *accurati* che esistano.

Paradigma moderno della New Physics:
ALTA ENERGIA oppure ALTA ACCURATEZZA

La scelta dell'atomo

Criteri di scelta

- Larghezza naturale di riga e frequenza della transizione (fattore di qualità Q)
- Sensibilità ambiente esterno
- Fattibilità tecnica (Contenimento, preparazione, intrappolamento, raffreddamento, eccitazione della transizione, oscillatore locale, rivelazione, sintesi di frequenza, affidabilità...)

Gli atomi più popolari sono

- Gli alcalini - in particolare H, Rb, Cs
- Gli alcalino-terrosi (e simili) - in part. Mg, Ca, Sr, Yb, Hg
- Gli ioni di alcalino-terrosi (e simili) - Ca⁺, Sr⁺, Ba⁺, Hg⁺, Al⁺, Yb⁺

La scelta dell'atomo/2

PERIODIC TABLE OF THE ELEMENTS

1 — atomic number
 H — symbol
 Hydrogen
 1.00794 — atomic weight (or mass number of most stable isotope if in parentheses)

The periodic table arranges the chemical elements in two ways. The first is by **atomic number**, starting with hydrogen (atomic number = 1) in the upper left-hand corner and continuing in ascending order from left to right. The second is by the number of electrons in the outermost **shell**. Elements having the same number of electrons in the outermost shell are placed in the same column. Since the number of electrons in the outermost shell in large part determines the chemical nature of an element, elements in the same column have similar chemical properties.

This arrangement of the elements was devised by **Dmitri Mendeleev** in 1869, before many of the elements now known were discovered. To maintain the overall logic of the table, Mendeleev allowed space for undiscovered elements, whose existence he predicted. This space has since been partly filled in most months by the addition of elements 104–112 (elements 110–112 have been isolated experimentally but not yet officially named).

The **lanthanide** series (elements 57–71) and the **actinide** series (elements 89–103) are composed of elements with Group 3b chemical properties. They are placed below the main body of the table to make it easier to read.

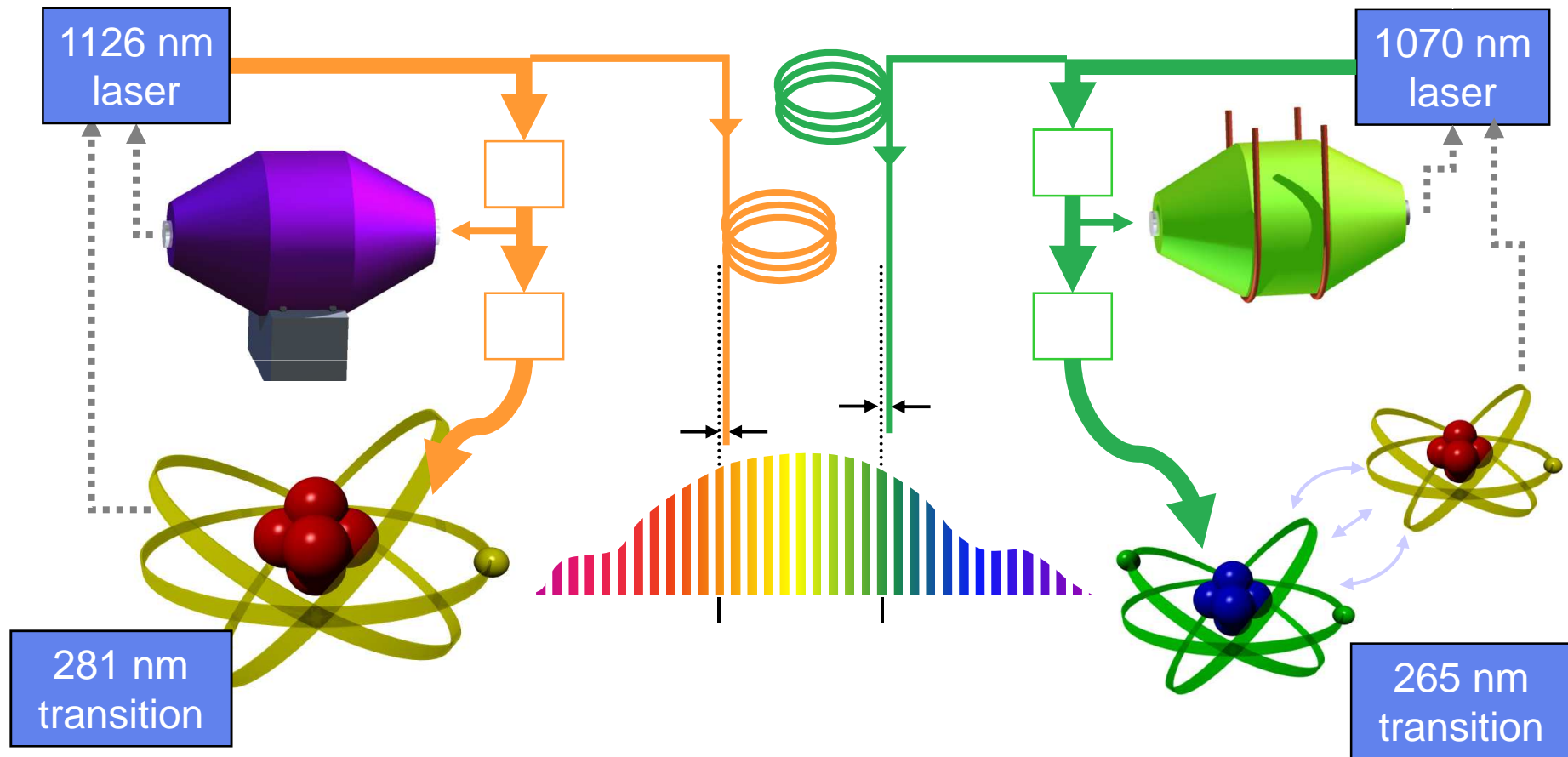


Period	Group 1a	Group 2a	Group 3b	Group 4b	Group 5b	Group 6b	Group 7b	Group 8	Group 8	Group 8	Group 1b	Group 2b	Group 3a	Group 4a	Group 5a	Group 6a	Group 7a	Group 0
Period 1	1 H Hydrogen 1.00794																	2 He Helium 4.0026
Period 2	3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.012											5 B Boron 10.811	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.007	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.998	10 Ne Neon 20.18
Period 3	11 Na Sodium 22.9897	12 Mg Magnesium 24.305										13 Al Aluminum 26.9815	14 Si Silicon 28.086	15 P Phosphorus 30.9738	16 S Sulfur 32.06	17 Cl Chlorine 35.453	18 Ar Argon 39.948	
Period 4	19 K Potassium 39.098	20 Ca Calcium 40.08	21 Sc Scandium 44.956	22 Ti Titanium 47.87	23 V Vanadium 50.942	24 Cr Chromium 51.996	25 Mn Manganese 54.938	26 Fe Iron 55.845	27 Co Cobalt 58.9332	28 Ni Nickel 58.69	29 Cu Copper 63.546	30 Zn Zinc 65.39	31 Ga Gallium 69.72	32 Ge Germanium 72.61	33 As Arsenic 74.9216	34 Se Selenium 78.96	35 Br Bromine 79.904	36 Kr Krypton 83.80
Period 5	37 Rb Rubidium 85.47	38 Sr Strontium 87.62	39 Y Yttrium 88.906	40 Zr Zirconium 91.22	41 Nb Niobium 92.906	42 Mo Molybdenum 95.94	43 Tc Technetium (98)	44 Ru Ruthenium 101.07	45 Rh Rhodium 102.905	46 Pd Palladium 106.4	47 Ag Silver 107.868	48 Cd Cadmium 112.411	49 In Indium 114.82	50 Sn Tin 118.71	51 Sb Antimony 121.75	52 Te Tellurium 127.6	53 I Iodine 126.9045	54 Xe Xenon 131.29
Period 6	55 Cs Cesium 132.905	56 Ba Barium 137.33	57-71* Lanthanides	72 Hf Hafnium 178.49	73 Ta Tantalum 180.948	74 W Tungsten 183.84	75 Re Rhenium 186.2	76 Os Osmium 192.22	77 Ir Iridium 192.22	78 Pt Platinum 195.08	79 Au Gold 196.967	80 Hg Mercury 200.59	81 Tl Thallium 204.38	82 Pb Lead 207.2	83 Bi Bismuth 208.98	84 Po Polonium (209)	85 At Astatine (210)	86 Rn Radon (222)
Period 7	87 Fr Francium (223)	88 Ra Radium (226)	89-103** Actinides	104 Rf Rutherfordium (261)	105 Db Dubnium (262)	106 Sg Seaborgium (266)	107 Bh Bohrium (264)	108 Hs Hassium (265)	109 Mt Meitnerium (268)	110 (269)	111 (272)	112 (277)						

* Used official names are given to new elements, names based on a Latin translation of the atom's number are used; eg. ununbium (Latin unum '1' + unum '1' + bi '2') for element 112.

* LANTHANIDES	57 La Lanthanum 138.91	58 Ce Cerium 140.12	59 Pr Praseodymium 140.908	60 Nd Neodymium 144.24	61 Pm Promethium (145)	62 Sm Samarium 150.36	63 Eu Europium 151.96	64 Gd Gadolinium 157.25	65 Tb Terbium 158.925	66 Dy Dysprosium 162.50	67 Ho Holmium 164.930	68 Er Erbium 167.26	69 Tm Thulium 168.934	70 Yb Ytterbium 173.04	71 Lu Lutetium 174.967
* ACTINIDES	89 Ac Actinium (227)	90 Th Thorium 232.038	91 Pa Protactinium 231.036	92 U Uranium 238.03	93 Np Neptunium (237)	94 Pu Plutonium (244)	95 Am Americium (243)	96 Cm Curium (247)	97 Bk Berkelium (247)	98 Cf Californium (251)	99 Es Einsteinium (252)	100 Fm Fermium (257)	101 Md Mendelevium (258)	102 No Nobelium (259)	103 Lr Lawrencium (262)

Campioni OTTICI di frequenza: confronto diretto tra due campioni



<p>Cs 9.2 GHz Q=10¹⁰ u<5X10⁻¹⁶</p>	<p>Rb 6.8 GHz Q=10¹⁰ u<5X10⁻¹⁶</p>	<p>H 1.5 GHz Q=10⁷ u<5X10⁻¹³</p>
<p>Sr 698 nm Q=10¹⁷ u<5X10⁻¹⁶</p>	<p>Yb 578 nm Q=10¹⁶ u<5X10⁻¹⁶</p>	<p>Hg 266 nm Q=10¹⁵</p>
<p>Hg+ 282 nm Q=10¹⁷ u<5X10⁻¹⁷</p>	<p>Al+ 267 nm Q=10¹⁷ u<5X10⁻¹⁷</p>	<p>Yb+ 436 nm Q=10¹⁴ u<1X10⁻¹⁵</p>

Test di fisica fondamentale con gli orologi atomici:

- Relatività Generale
- Oltre il Modello Standard/1
(Corde – Teorie Extradimensionali)
- Oltre il Modello Standard/2
(Teorie Supersimmetriche)

La Relatività Generale è corretta?

Red-shift Gravitationale



Relatività Generale :

Un potenziale gravitazionale W deforma la metrica spaziotemporale e sposta la frequenza di un orologio ν rispetto a ν_0 su un potenziale di riferimento W_0

Nel limite di campo debole $W/c^2 \ll 1$, c velocità della luce, W_0 riferimento di potenziale):

$$\frac{\nu_0 - \nu(\bar{r})}{\nu_0} = \frac{W(\bar{r}) - W_0}{c^2}$$

$$\frac{\nu_0 - \nu(\bar{r})}{\nu_0} \approx \frac{g_0}{c^2} m^{-1} = 1.09 \times 10^{-16} m^{-1}$$

Principio di Equivalenza

Il Principio di Equivalenza di Einstein (EEP) è uno dei postulati della Relatività Generale.

Un suo enunciato (PE debole), seguendo la formulazione di C. Will¹:

Per un corpo elettricamente neutro posto in un punto iniziale dello spazio-tempo con velocità iniziale data, la sua traiettoria conseguente è indipendente dalla sua struttura interna e composizione.

Da qui si congettura anche (PE forte):

Considerato valido il Principio di Equivalenza Debole, il risultato di qualsiasi esperienza locale (non gravitazionale) è indipendente dalla velocità dell'apparato in caduta libera e da dove e quando essa si svolge nell'universo.

¹C.M. Will, *Theory and Experiment in gravitational Physics, revised edition*, Cambridge University Press, Cambridge, England, 1993

Local Position Invariance

In campi gravitazionali deboli, il principio di equivalenza di Einstein (EEP) porta l'invarianza locale di posizione (LOCAL POSITION INVARIANCE, LPI):

SPECIE ATOMICHE DIVERSE RISENTONO DELLO STESSO RED SHIFT GRAVITAZIONALE

$$\frac{\nu_A}{\nu_B} = \frac{\nu_{A0}}{\nu_{B0}} \left[1 + (\beta_A - \beta_B) \frac{W}{c^2} \right]$$

**RELATIVITA'
GENERALE**

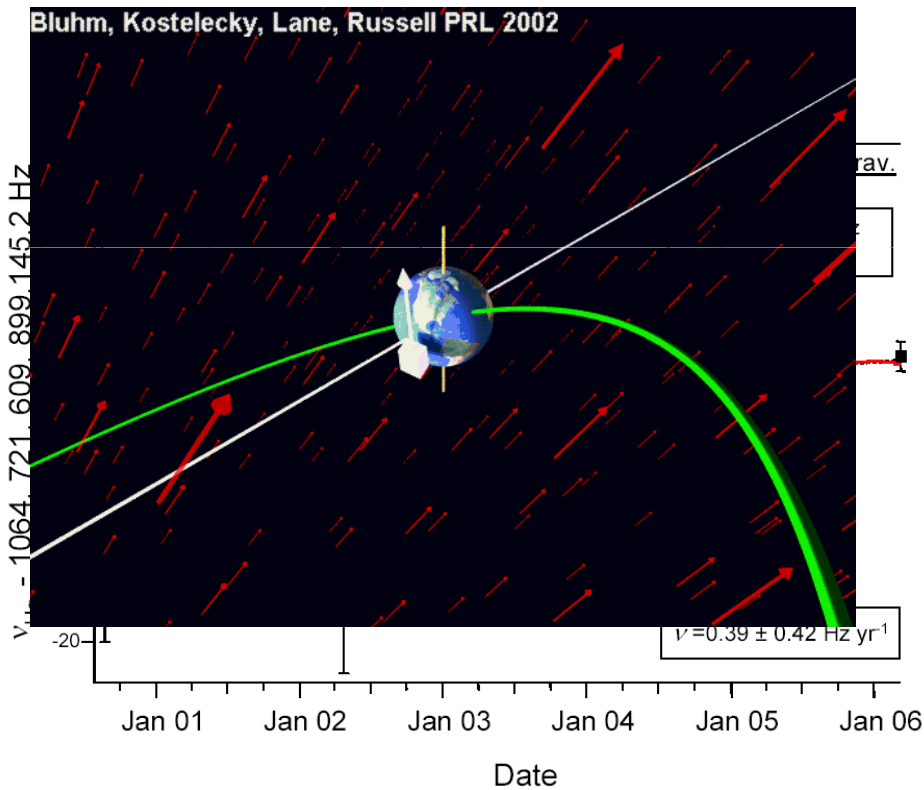


$$\beta_A = \beta_B$$

Test LPI

$$\frac{\nu_A}{\nu_B} = \frac{\nu_{A0}}{\nu_{B0}} \left[1 + (\beta_A - \beta_B) \frac{W}{c^2} \right]$$

$$\beta_A - \beta_B = 0 \quad ?$$



Mg-Cs (IEN-1992)

$$|\beta_{Mg} - \beta_{Cs}| \leq 7 \cdot 10^{-4}$$

Cs-H (PTB-2002)

$$|\beta_{Cs} - \beta_H| \leq 7 \cdot 10^{-5}$$

Cs-Hg⁺ (NIST-2007)

$$|\beta_{Cs} - \beta_{Hg^+}| \leq 3.5 \cdot 10^{-6}$$

Cs-H (NIST-2007)

$$|\beta_{Cs} - \beta_H| \leq 1.4 \cdot 10^{-6}$$

Esiste una teoria che unifichi
modello standard e relatività
generale?

Le Costanti Fondamentali

Modello Standard + Relatività Generale contengono circa 27 parametri indipendenti:

- I cui valori non sono predetti dalla teoria
- Sono indipendenti da altre quantità misurabili

Tutte insieme rappresentano le **Costanti Fondamentali**, ad esempio

- La costante di struttura fine, α_{EM} , le costanti di struttura fine debole e forte, α_W e α_S (dipende da Λ_{QCD}).
 - Determinano l'intensità delle forze non gravitazionali.
- I parametri λ_i di Yukawa, che determinano le masse delle particelle rispetto al VEV del bosone di Higgs; i parametri della matrice CKM.
- Higgs VEV.
- La costante Gravitazionale G
- La velocità della luce c

Le Costanti sono costanti?

Molte teorie oltre il modello standard “vivono” in N dimensioni con $N > 4$

Esempio: Teorie di Kaluza-Klein (KK) e quindi teorie di corda; teorie di membrana

IN TUTTI QUESTI MODELLI, le costanti extra-dimensionali sono fissate, ma le costanti dell'universo 4-dimensionale variano nello spaziotempo.

La ricerca di una variazione delle costanti fondamentali è un test diretto per una teoria oltre il modello standard.

Anche molte teorie proposte per spiegare Dark Energy/ Dark Matter, presuppongono l'esistenza di campi scalari che causano variazioni delle costanti

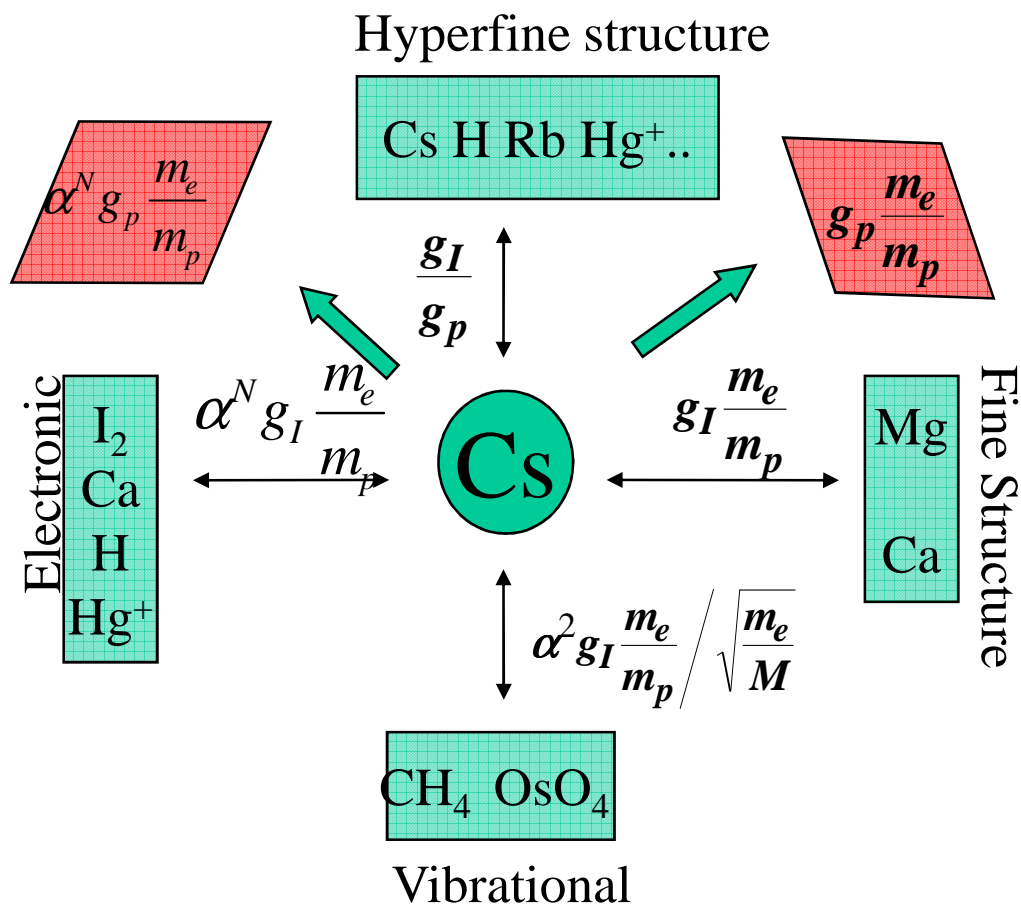
Quali costanti? Adimensionali vs Dimensionate

In genere, un test che sia efficace considera solo Costanti Adimensionali.

Ad esempio: costante di struttura fine $\alpha = e^2/4\epsilon hc$

Per una scelta differente, un'eventuale variazione osservata della costante dimensionata in esame puo' essere spiegata sia con le teorie di unificazione, sia con variazioni delle unità di misura, generando un'ambiguità irrisolvibile

Confronto tra frequenze atomiche e costanti fondamentali



Nel confronto tra le frequenze di due transizioni atomiche, il rapporto è proporzionale alla combinazione di alcune costanti fondamentali

Primo Test Sperimentale:
Mg vs Cs allo IEN

$$\frac{d}{dt} \left(g_p \frac{m_e}{m_p} \right) \leq 5.4 \times 10^{-13} / yr$$

Godone et al. PRL 71, 2364 (1993)

m_p , $g_{(i)}$ non sono parametri fondamentali nel Modello Standard,
 ma si dimostra che sono legati al parametro fondamentale m_q/Λ_{QCD} , $m_q=(m_u+m_d)/2$ (m_u , m_d massa del quark up e down)

Si dimostra che qualsiasi transizione atomica di frequenza ν_{at} dipende da una combinazione di solo 3 costanti fondamentali

α , m_q/Λ_{QCD} , m_e/Λ_{QCD} , Λ_{QCD} costante di scala di QCD.

I coefficienti di sensibilità per varie transizioni atomiche sono stati calcolati

V. V. Flambaum et al., PR D69, 115006 (2004)

V. V. Flambaum and A. F. Tedesco, PR C73, 055501 (2006)

$$\delta \ln \left(\frac{\nu_{\text{at}}}{R_{\infty} c} \right) \cong K_{\alpha}^{\text{at}} \frac{\delta \alpha}{\alpha} + K_e^{\text{at}} \frac{\delta(m_e / \Lambda_{\text{QCD}})}{m_e / \Lambda_{\text{QCD}}} + K_q^{\text{at}} \frac{\delta(m_q / \Lambda_{\text{QCD}})}{m_q / \Lambda_{\text{QCD}}}$$

$$\delta \ln \left(\frac{\nu_{at}}{R_{\infty} c} \right) \cong K_{\alpha}^{at} \frac{\delta \alpha}{\alpha} + K_e^{at} \frac{\delta(m_e / \Lambda_{QCD})}{m_e / \Lambda_{QCD}} + K_q^{at} \frac{\delta(m_q / \Lambda_{QCD})}{m_q / \Lambda_{QCD}}$$

	K_{α}	K_q	K_e
Rb hfs	2.34	-0.064	1
Cs hfs	2.83	-0.039	1
H opt	0	0	0
Yb⁺ opt	0.88	0	0
Hg⁺ opt	-3.2	0	0
Dy comb.	$1.5 \cdot 10^7$	0	0

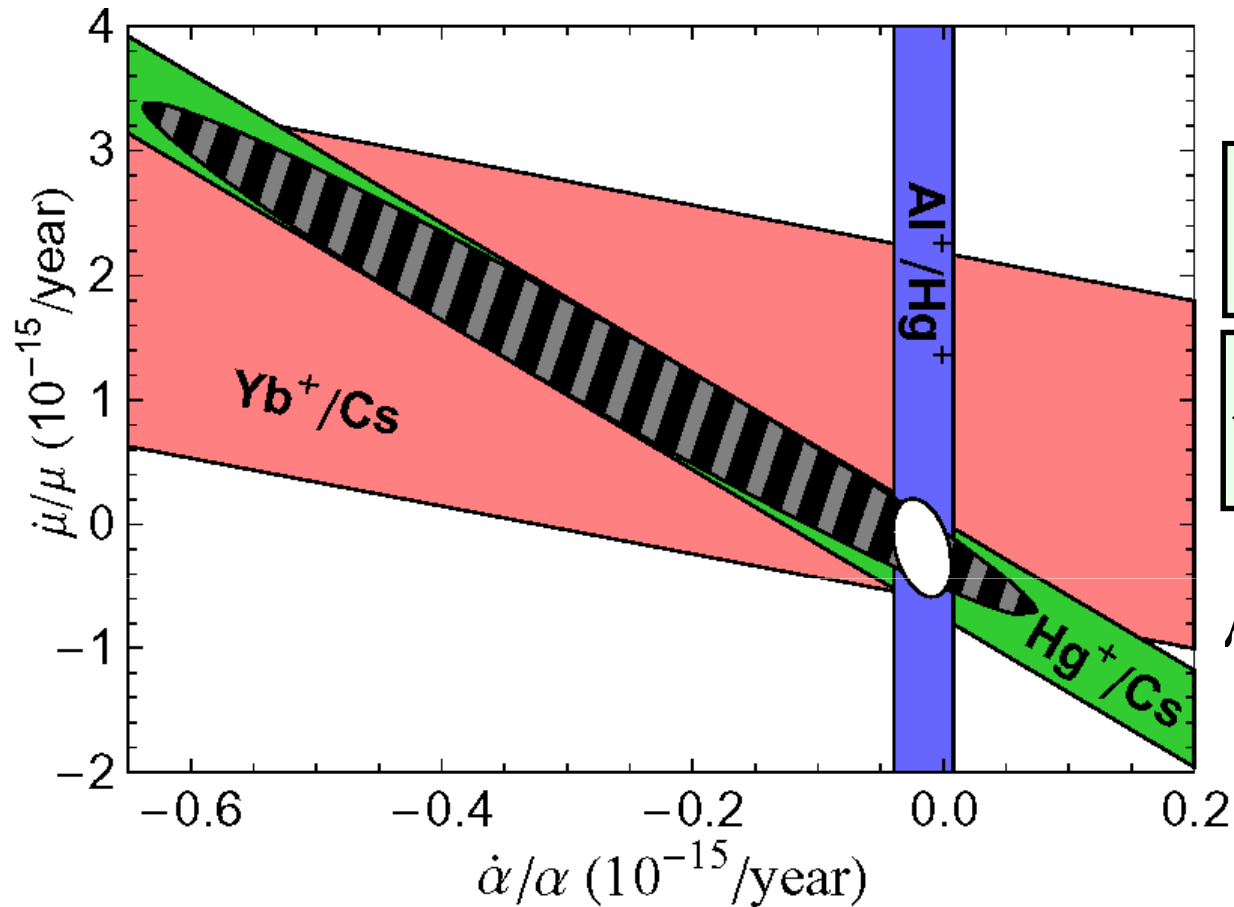
Confronto	Lab	Anno
Rb/Cs	LNE-SYRTE	2003 PRL
H/Cs	MPQ/SYRTE	2004 PRL
Sr/Cs	Tokyo/JILA/SYRTE	2008 PRL
Hg+/Cs	NIST	2007 PRL
Dy/Cs	Berkeley Uni	2007 PRL
Yb+/Cs	PTB	2004-6 PRL
Hg+/Al+	NIST	2007 PRL

$$2 \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = (2 \pm 2) \times 10^{-17} / \text{anno}$$

$$\frac{1}{m_q / \Lambda_{QCD}} \frac{d}{dt} (m_q / \Lambda_{QCD}) = (9 \pm 6) \times 10^{-15} / \text{anno}$$

$$\frac{1}{m_e / \Lambda_{QCD}} \frac{d}{dt} (m_e / \Lambda_{QCD}) = (2 \pm 5) \times 10^{-16} / \text{anno}$$

Confronto Hg⁺/Cs & Yb⁺/Cs & Hg⁺/Al⁺



$$\frac{\dot{\alpha}}{\alpha} = (2 \pm 2) \times 10^{-17} / \text{anno}$$

$$\frac{\dot{\mu}}{\mu} = (-2 \pm 4) \times 10^{-16} / \text{anno}$$

$$\mu = \mu_{\text{Cs}} / \mu_{\text{B}} = g_p m_e / m_p$$

Yb⁺ vs Cs E. Peik et al. PRL **93**, 170801 (2004)

Hg⁺ vs. Cs T. Fortier et al. PRL **98**, 070801 (2007)

Al⁺ vs Hg⁺ T. Rosenband et al. , Science **319**, 1808 (2008)

Al⁺ vs Hg⁺ L. Lorini et al. Eur. Phys. J. ST **163**, 19–35 (2008)

Orologi Atomici vs Spettri Quasar?

Constant	Limit (yr ⁻¹)	Z	Method
α	$<0.4 \times 10^{-16}$	0	Clock comparisons
	$<0.5 \times 10^{-16}$	0.15	Oklo reactor
	$<3.4 \times 10^{-16}$	0.45	¹⁸⁷ Re decay
	$(6.4 \pm 1.4) \times 10^{-16}$	3.7	Quasar spectra
α_w	$<1 \times 10^{-11}$	0.15	Oklo reactor
m_e/m_p	$<3 \times 10^{-15}$	2-3	Quasar spectra

Dai Lab a uno Spazio Europeo di Ricerca Metrologica

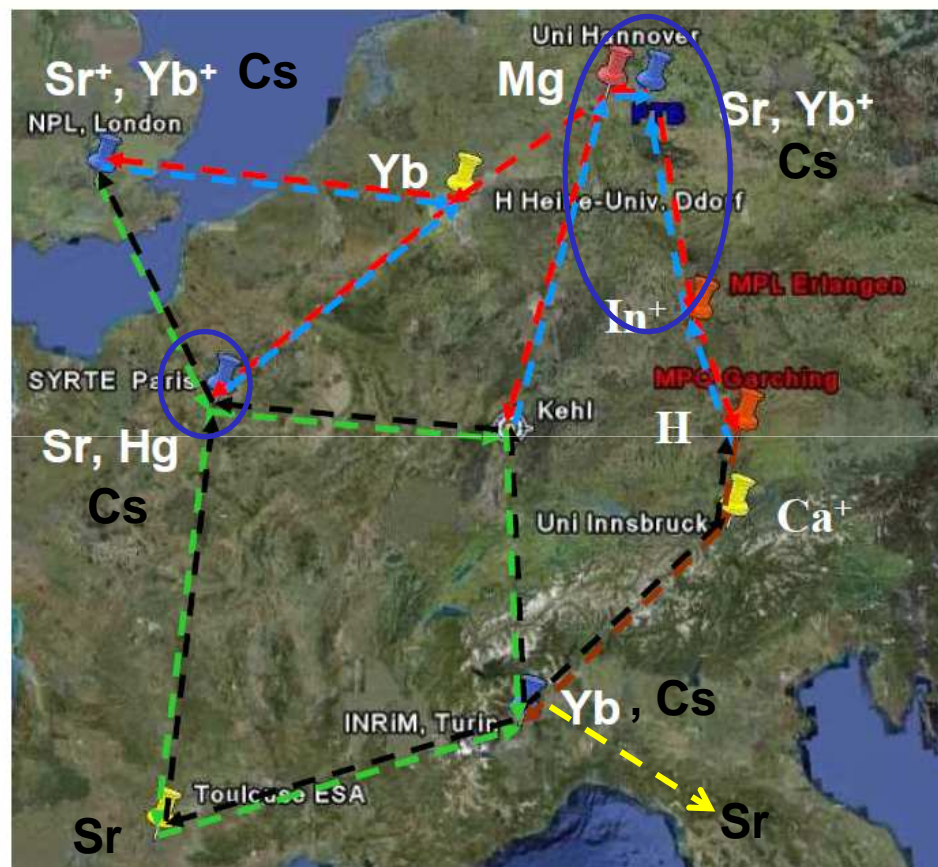
European Fiber Network

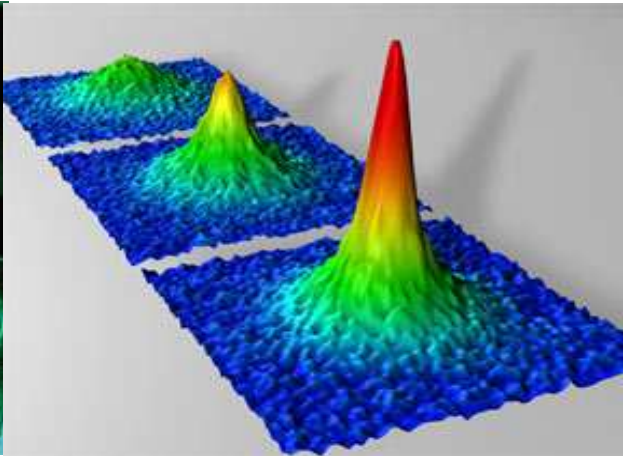
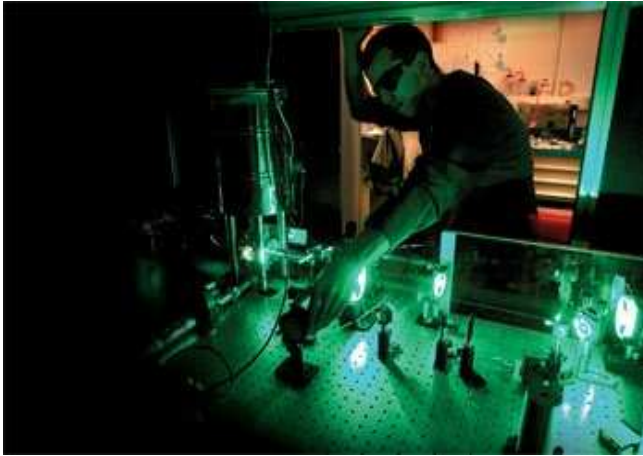
Le tecniche attuali di confronto remoto tra orologi NON CONSENTONO di raggiungere adeguata accuratezza

servono Confronti di orologi con la tecnica del LINK OTTICO in Fibra (progetto in sviluppo)

Una NUOVA INFRASTRUTTURA per lo Spazio Europeo di Ricerca:

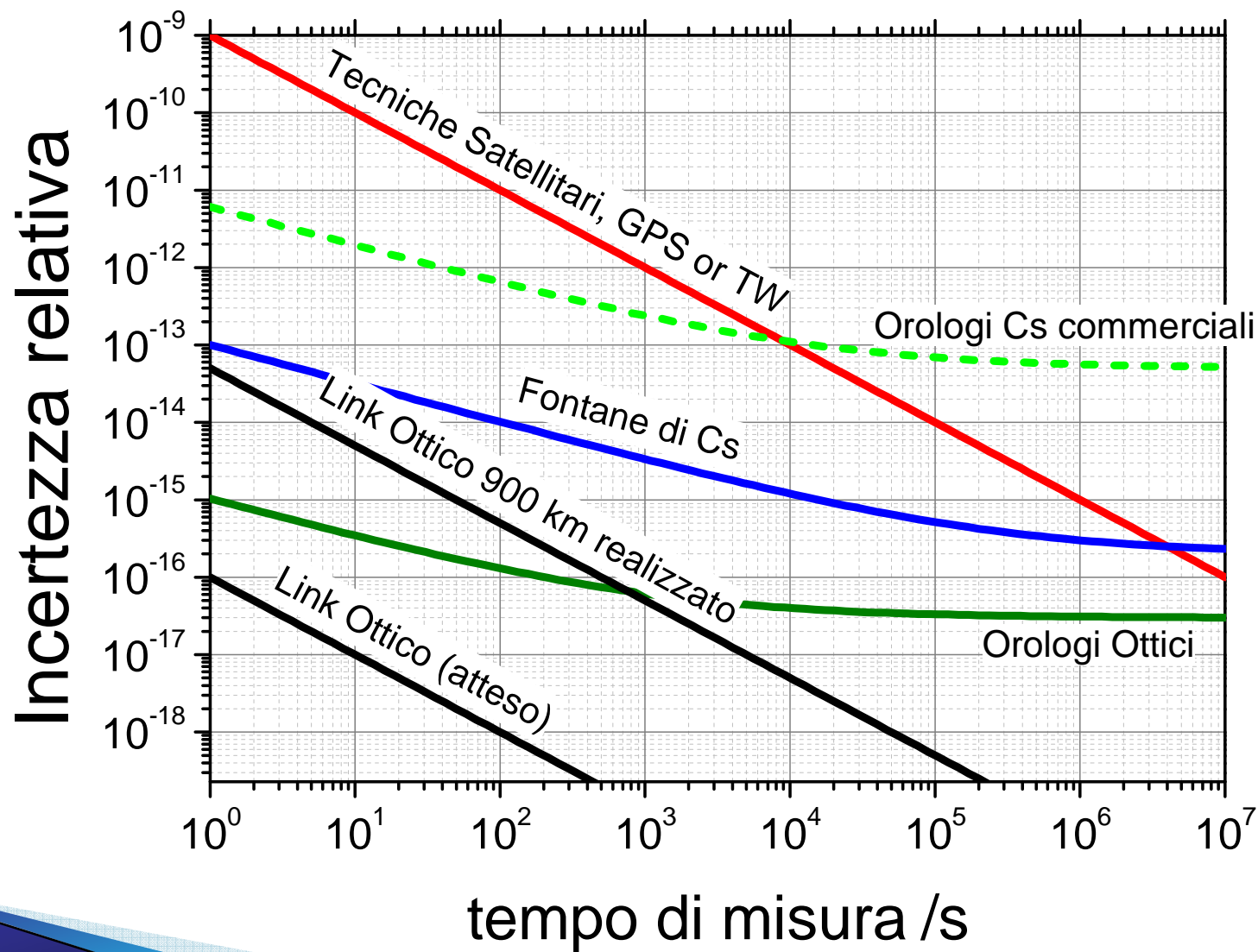
- Rete Europea di Labs collegati in Fibra Ottica dedicata per trasferimento accurato di Frequenza
- **Migliori test** di gravità e Costanti Fondamentali
- **Nuovi scenari** ora impossibili (es. Test Onde Gravitazionali)
- **Nuove Scale di Tempo!**

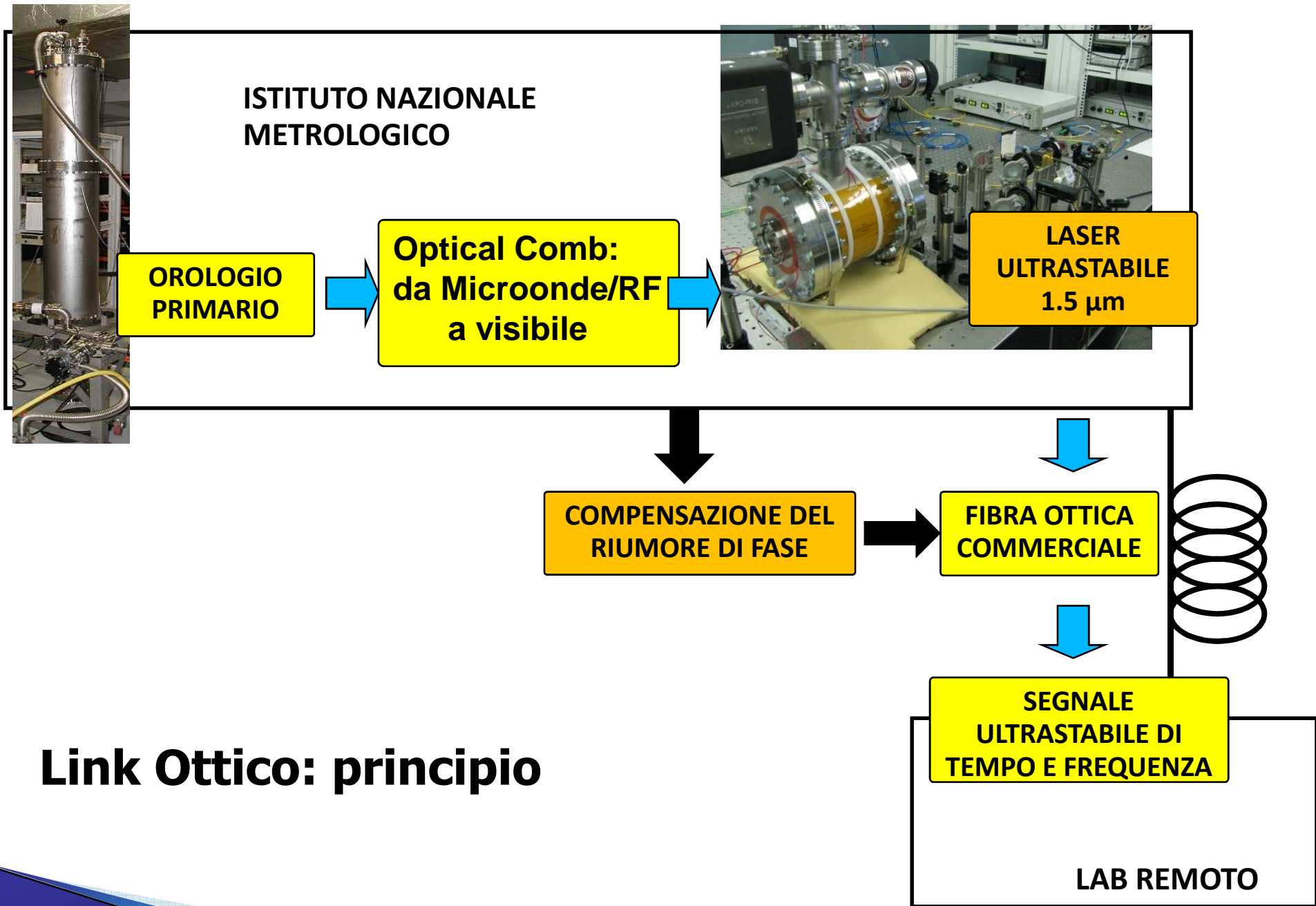




LINK E CONFRONTI IN FIBRA OTTICA

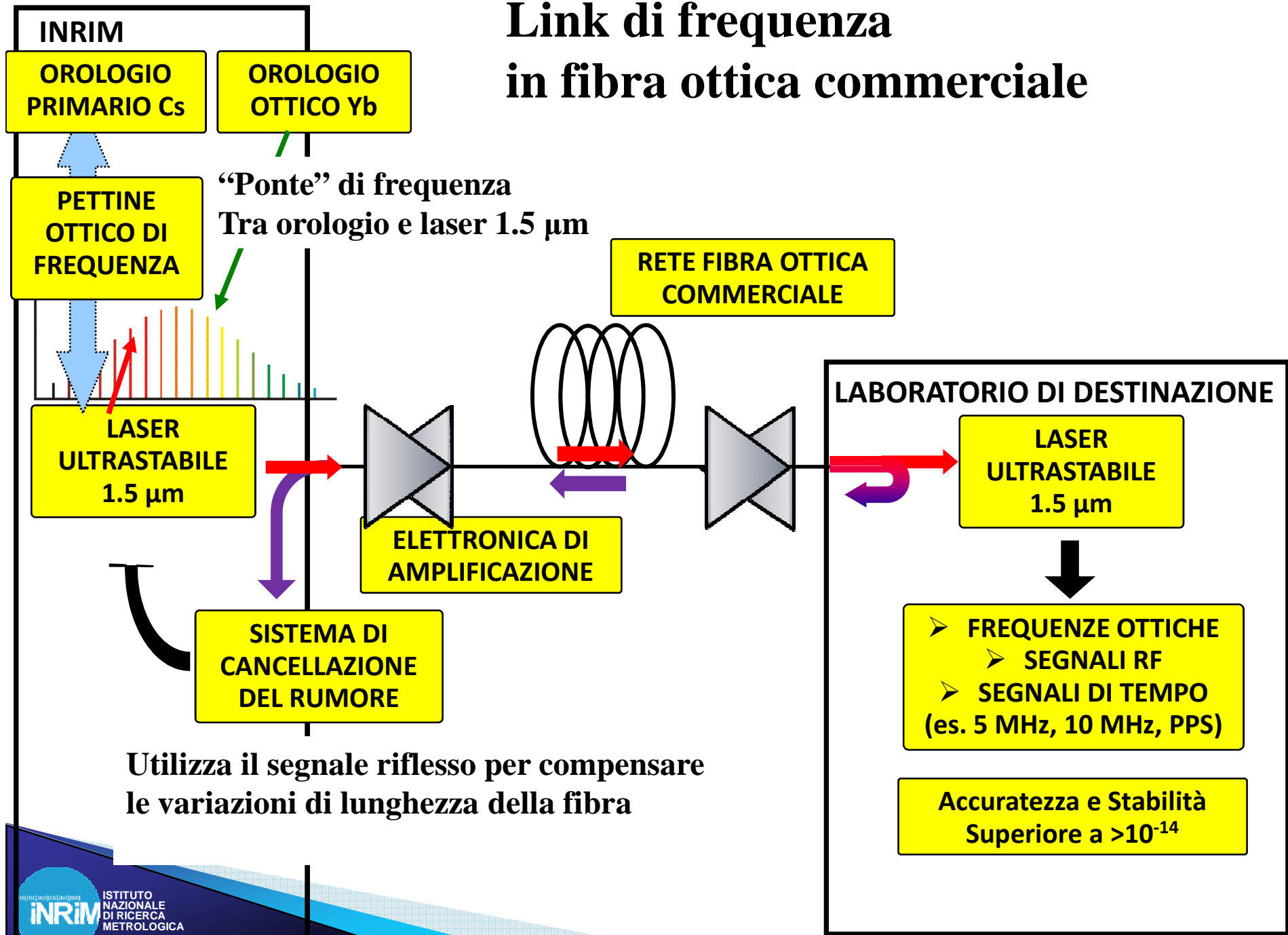
Prestazioni del Link Ottico



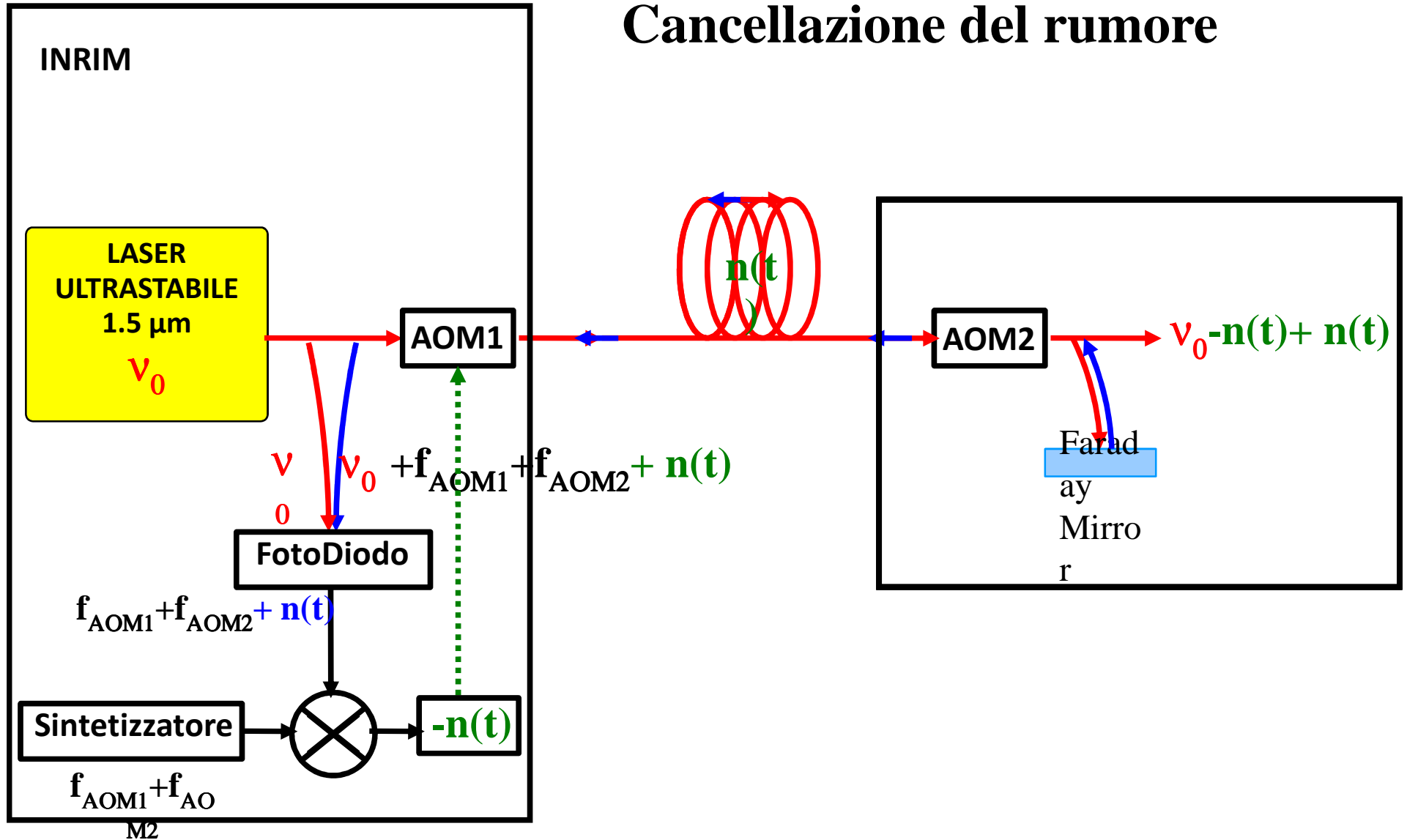


Link Ottico: principio

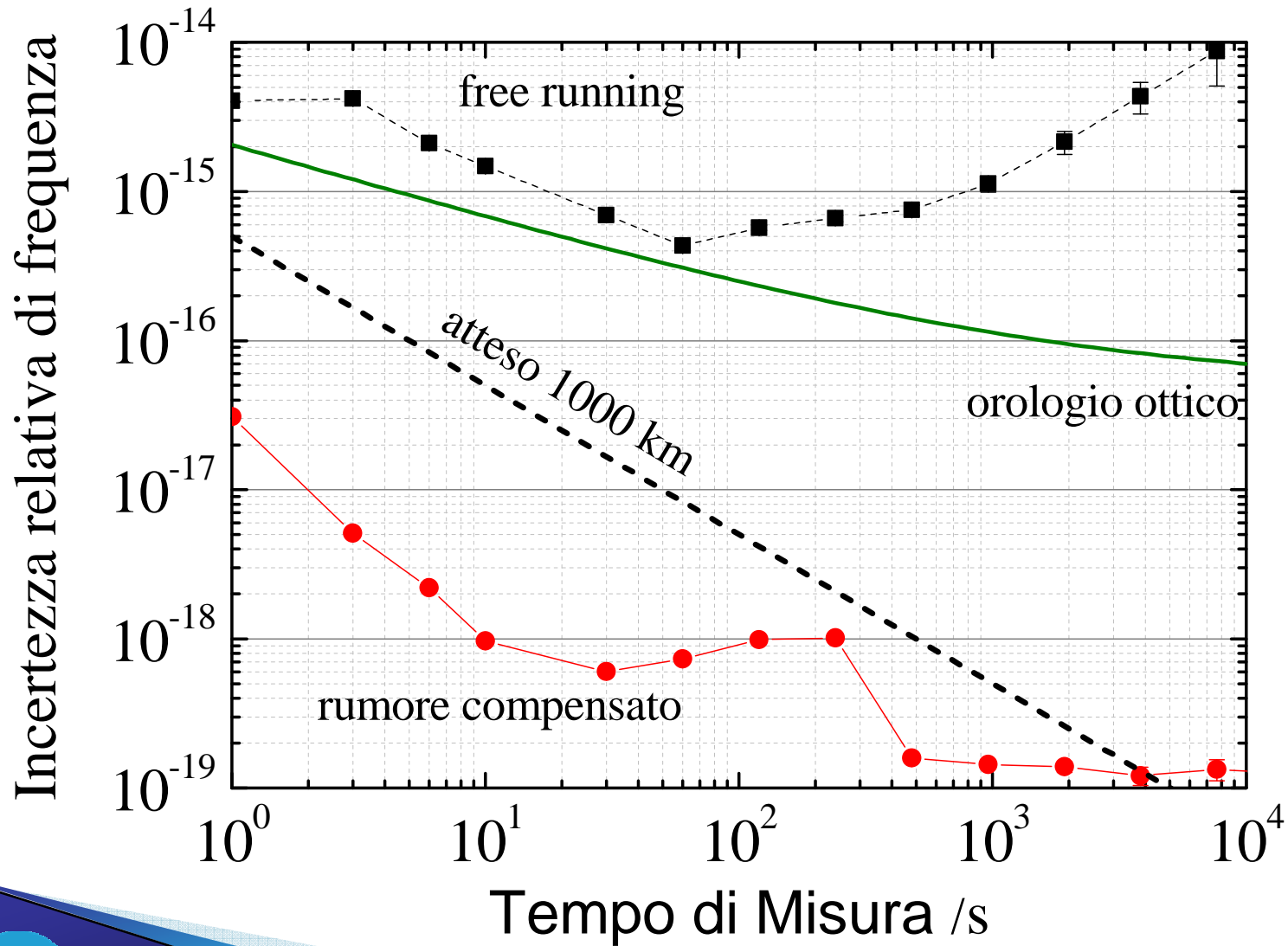
Link di frequenza in fibra ottica commerciale



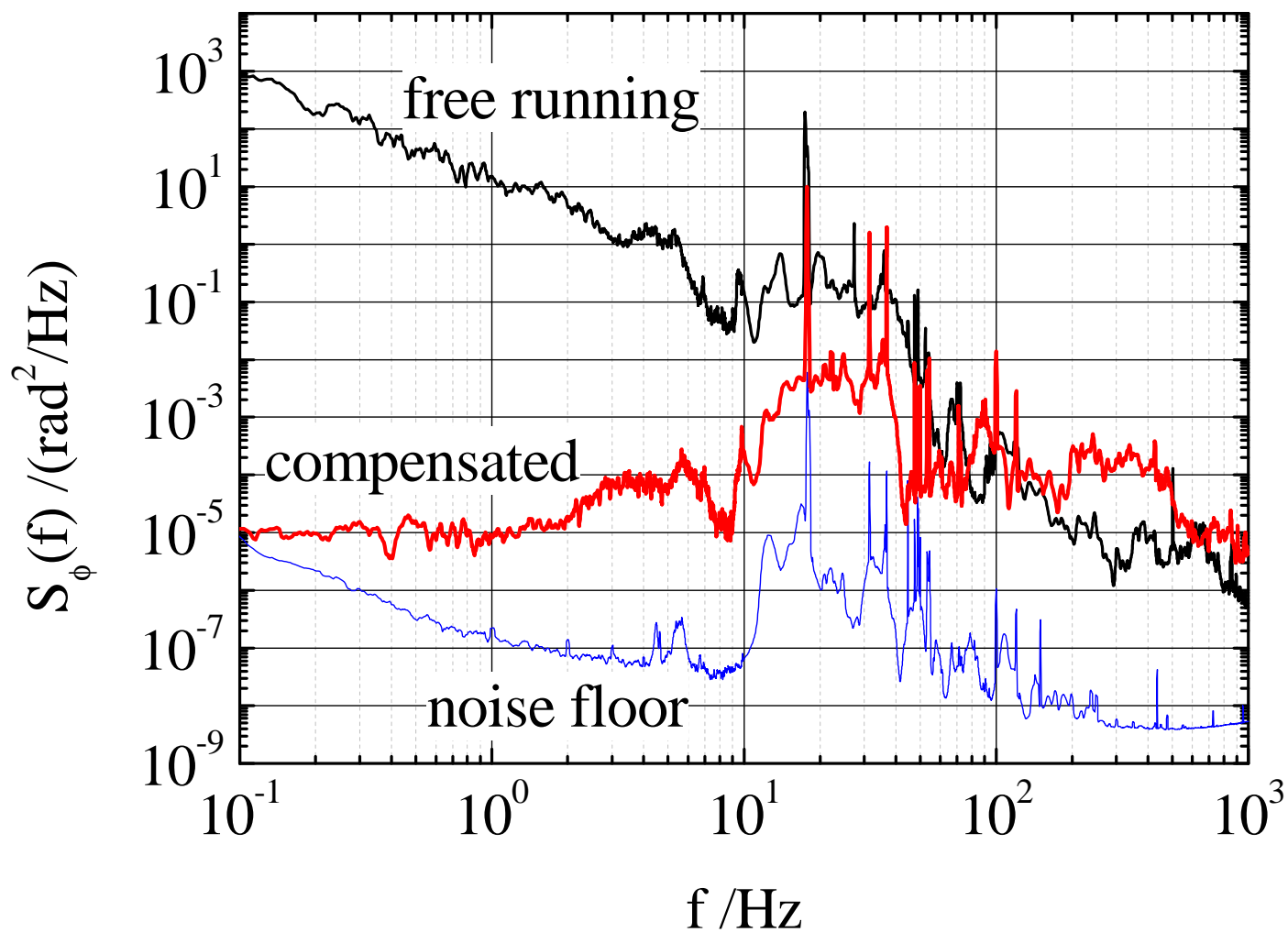
Cancellazione del rumore



Dimostrazione di fattibilità: Link Ottico all'INRIM (100 km in lab)

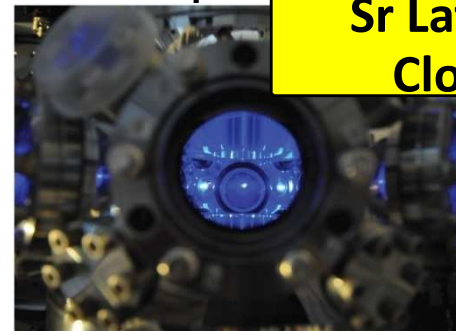
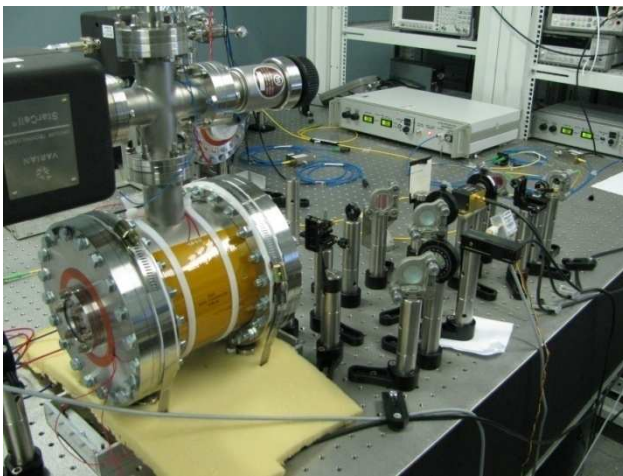
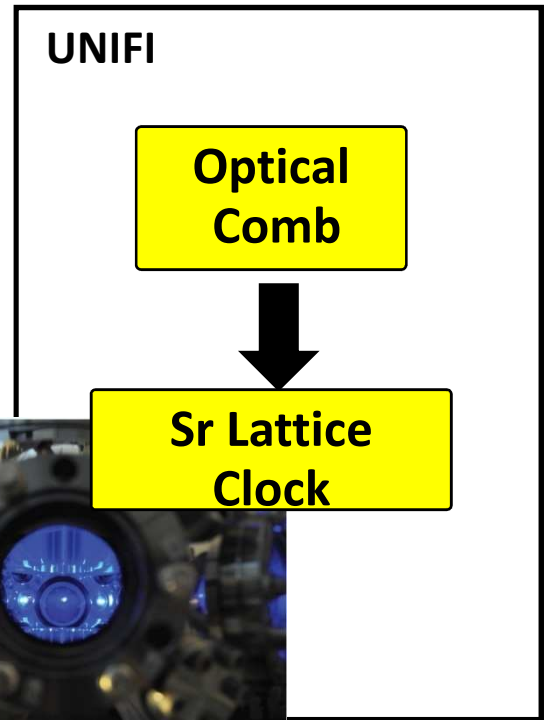
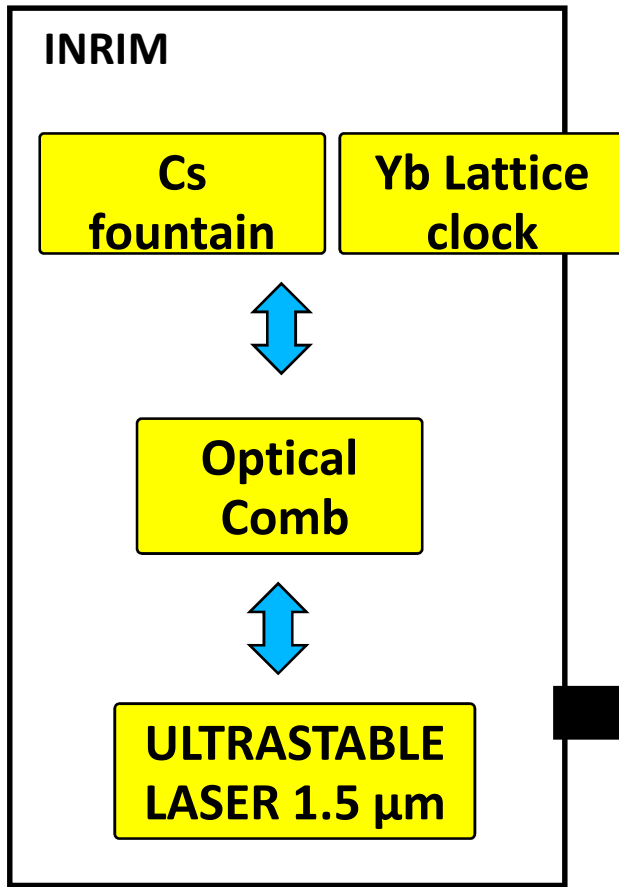
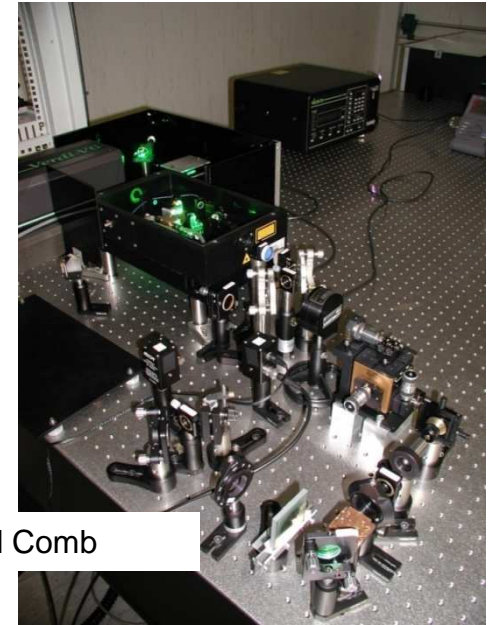


Phase Noise of the Optical Link (100 km indoor)



C. Clivati et al. To be published on IEEE UFFC

PRIN: Optical Link Comparison

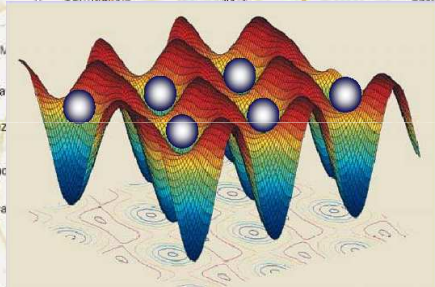




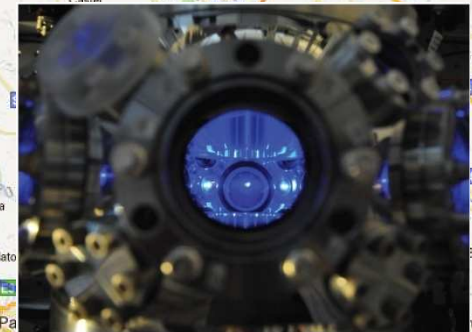
Ministero dell'Istruzione
dell'Università e Ricerca

NATIONAL RESEARCH FUNDED PROJECT (PRIN) 2012-2013: Optical Frequency Standards High Accuracy Measurements by optical fiber link (UNIFI-INRIM-POLITO)

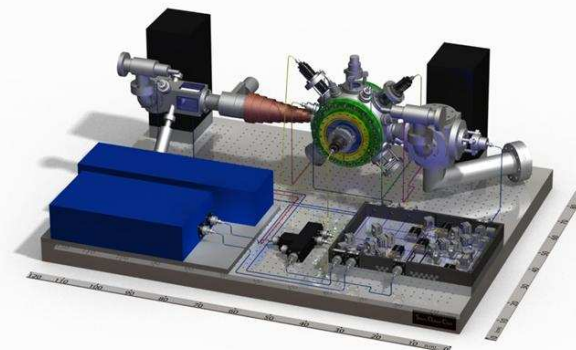
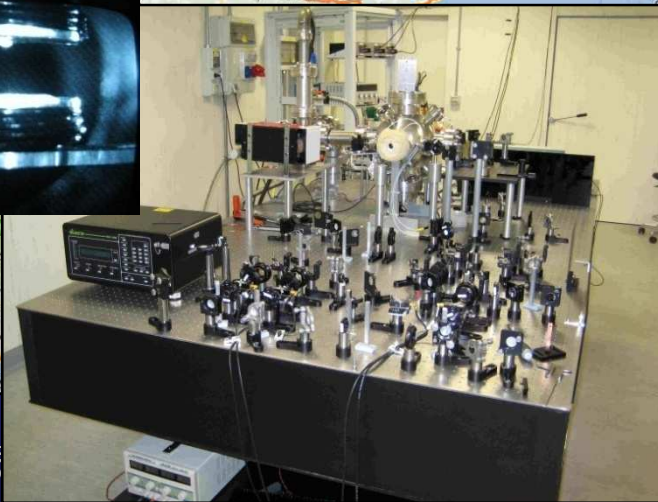
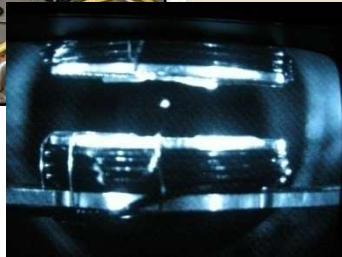
**TORINO, INRIM
2 Cs Fountains
Yb clock**



Optical Fiber link



**FIRENZE, UNIFI-LENS
Sr Clock**



INRIM target connections

Torino–Sesto Fiorentino: 405 km link to **Laboratorio di Spettroscopia NonLineare (LENS)** (Dark Fiber, two possible path)
2-3 reamplification station needed



Link Ottici in preparazione: INRIM- UNIFI (prin 2012-2013) INRIM-MODANE



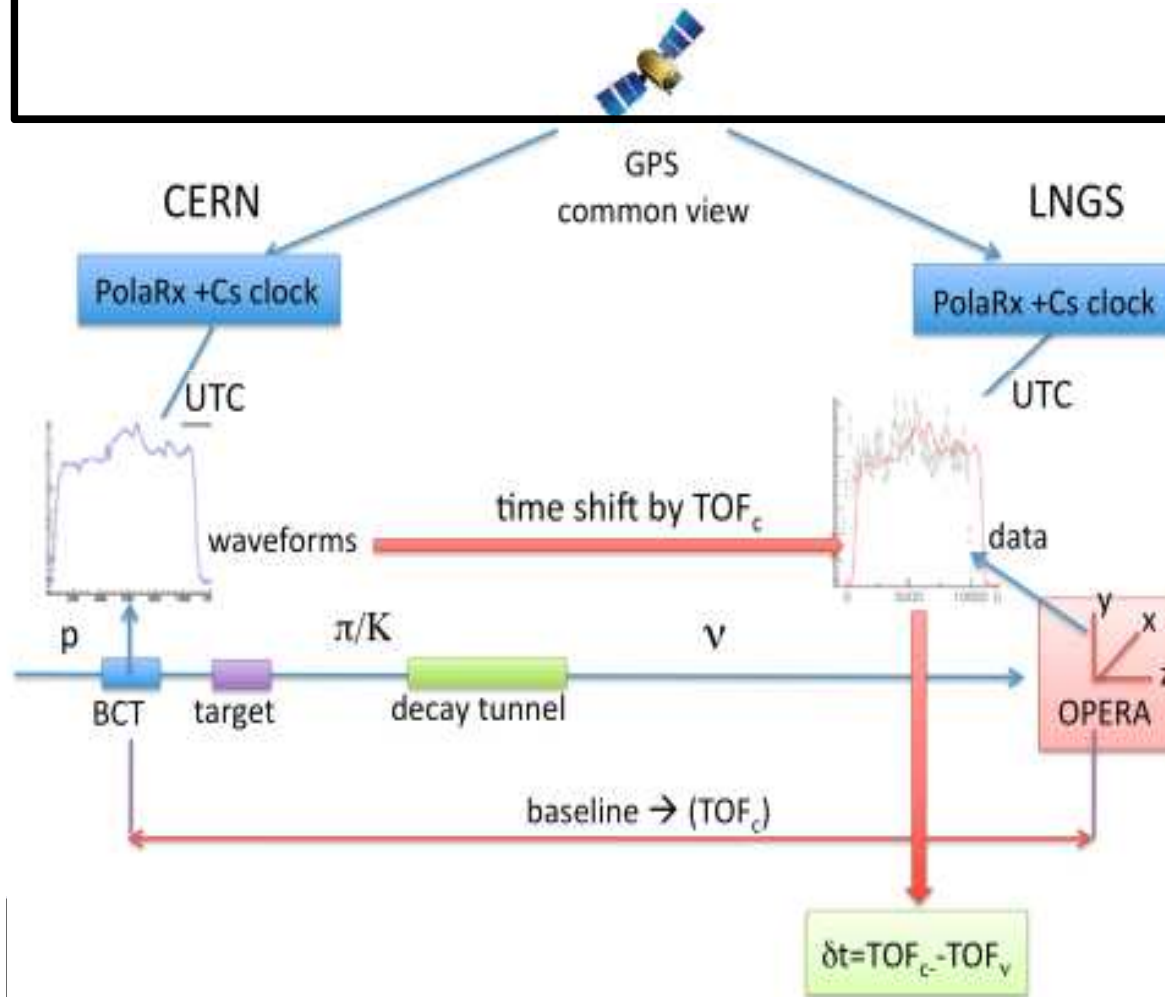
TORINO- FIRENZE 450 km
TORINO MODANE 100 km

MODANE – GINEVRA 190 km
FIRENZE-L'AQUILA 400 km

**Totale CERN-TORINO-GRAN SASSO :
1100 km**

Link Ottico per l'esperimento Opera al Laboratorio Nazionale Gran Sasso

Sincronizzazione CERN-LNGS via satellite (GPS common view)

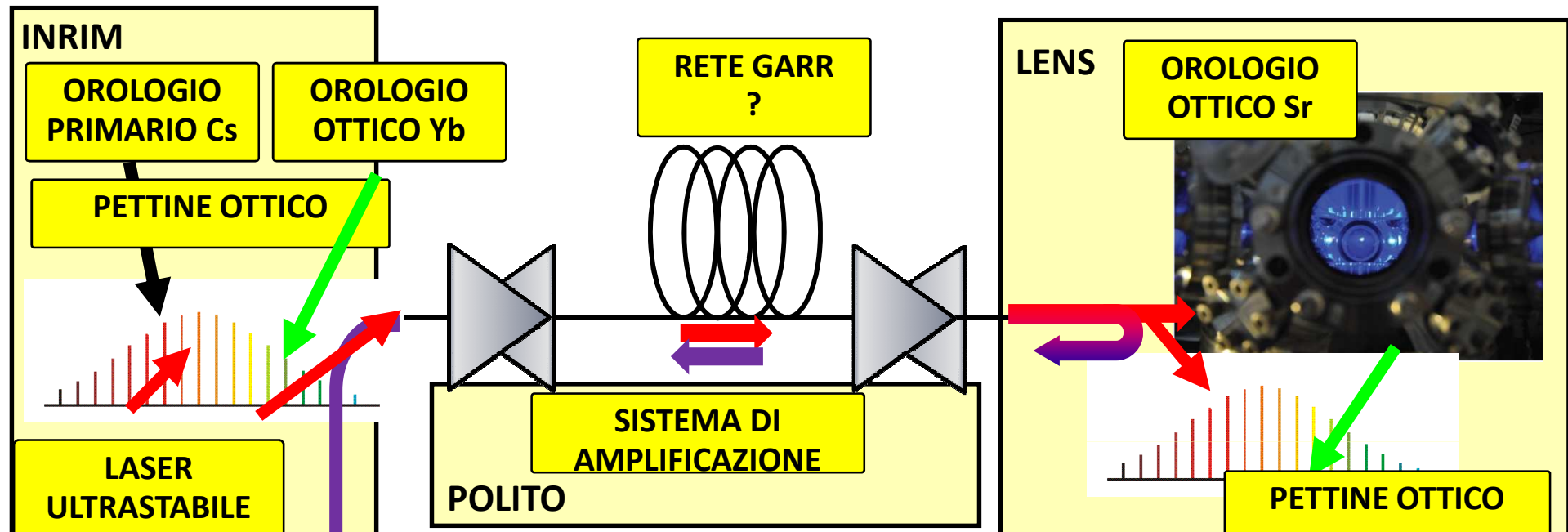


Il link ottico potrebbe offrire Timing migliore:

- Riduzione delle incertezze
- Valutazione più accurata dei ritardi

Fig. 5: Schematic of the time of flight measurement.

PRIN: “Misure Assolute di Campioni Ottici di Frequenza ad Alta Accuratezza con Link in Fibra Ottica”



Obiettivi primari:

- Confronti remoti fra gli orologi di INRIM e LENS-UNIFI
- Misure spettroscopiche assolute
- Test di fisica atomica fondamentale

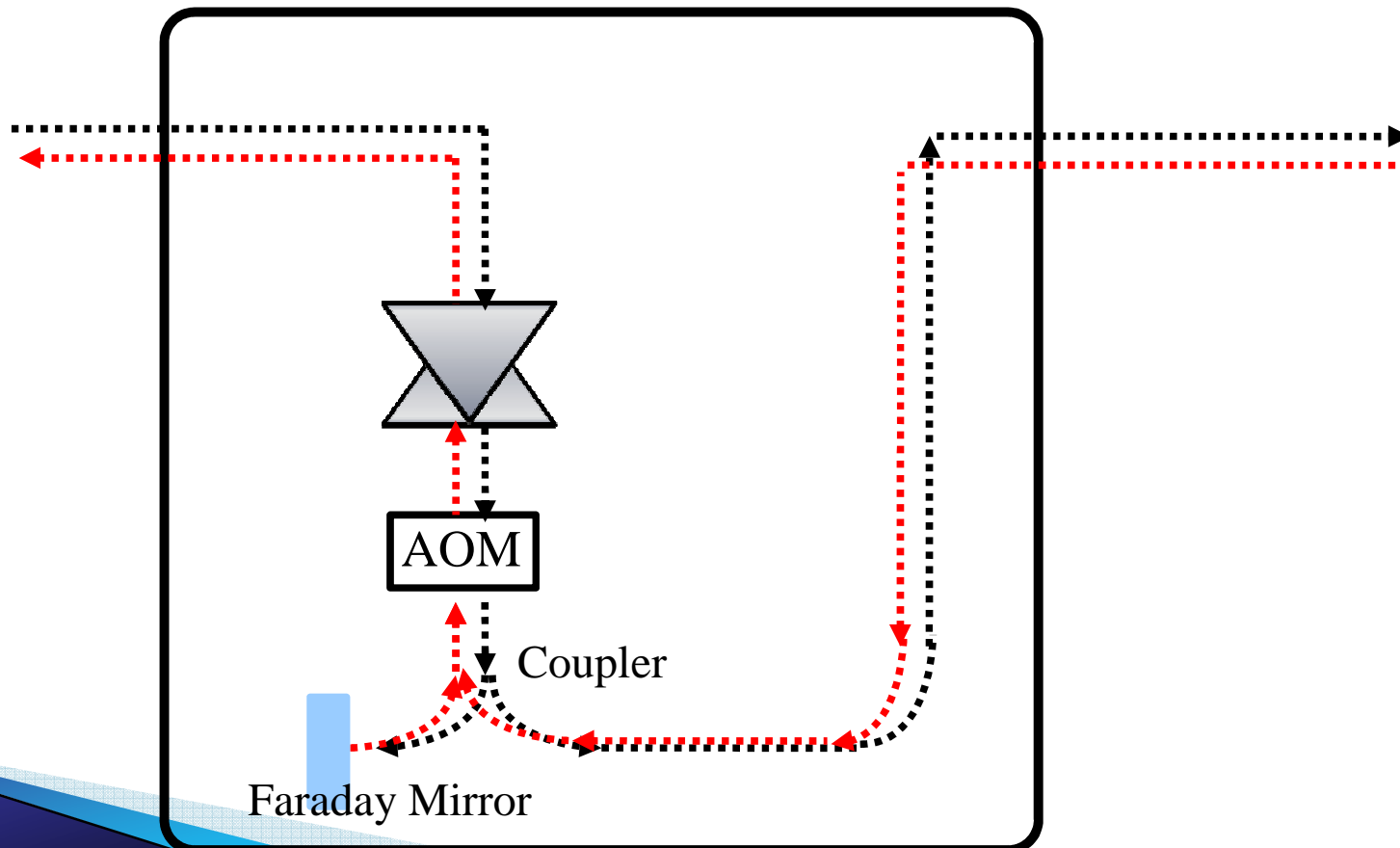
Ricadute/Applicazioni:

- Sviluppo della tecnologia necessaria alla disseminazione via fibra
 - Test e applicazioni di prodotti commerciali
 - Possibile estensione/Disseminazione verso altri tipi di laboratori
- Sviluppo nuove tecniche di disseminazione di segnali di tempo

Stazioni di ripetizione:

1) RETE OTTICA con **Fibra Dedicata** (Dark Fiber)

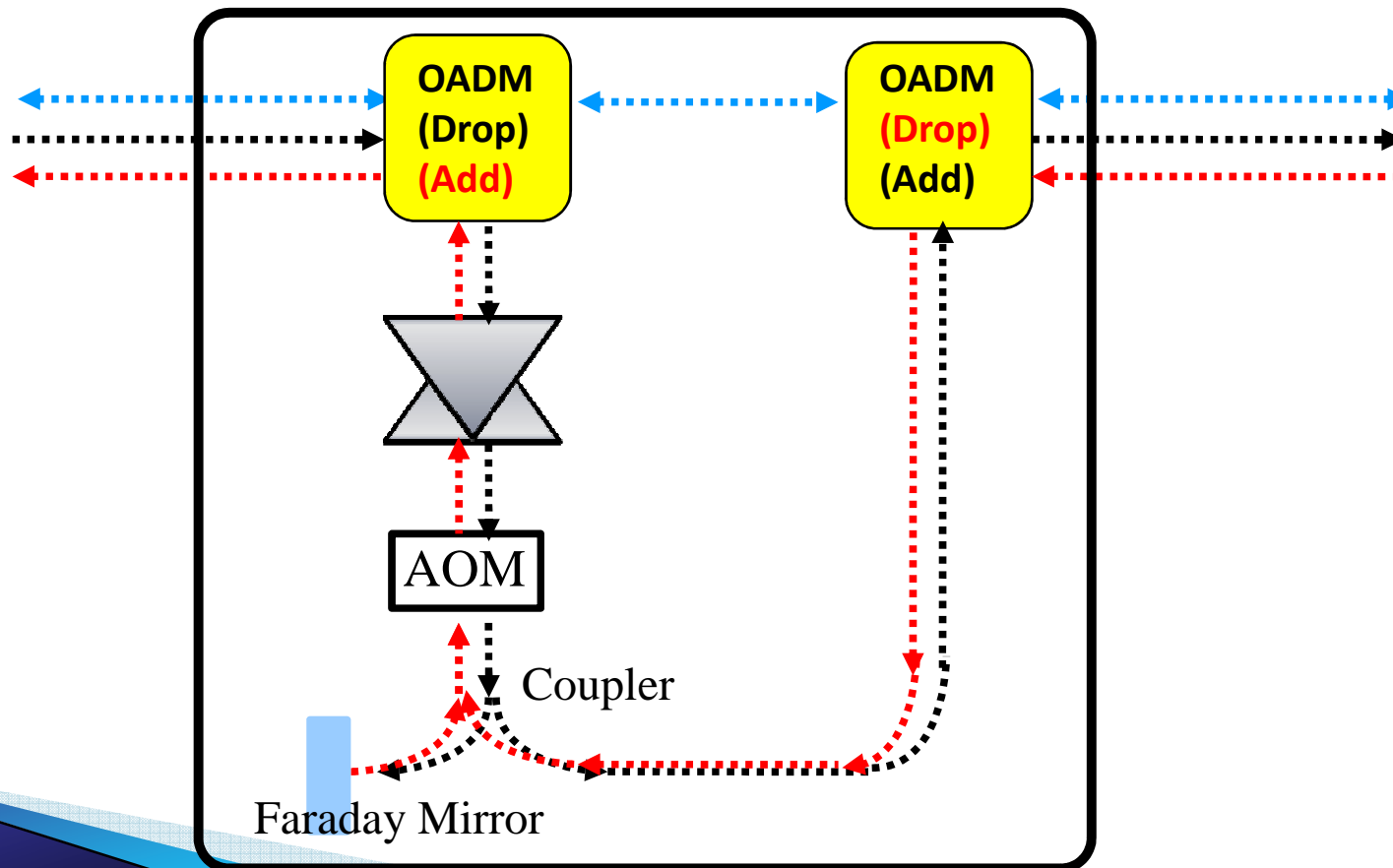
- DA INRIM
- VERSO INRIM
- TRAFFICO INTERNET



Stazioni di ripetizione:

1) RETE OTTICA con **Canale Dedicato** (Dark Channel)

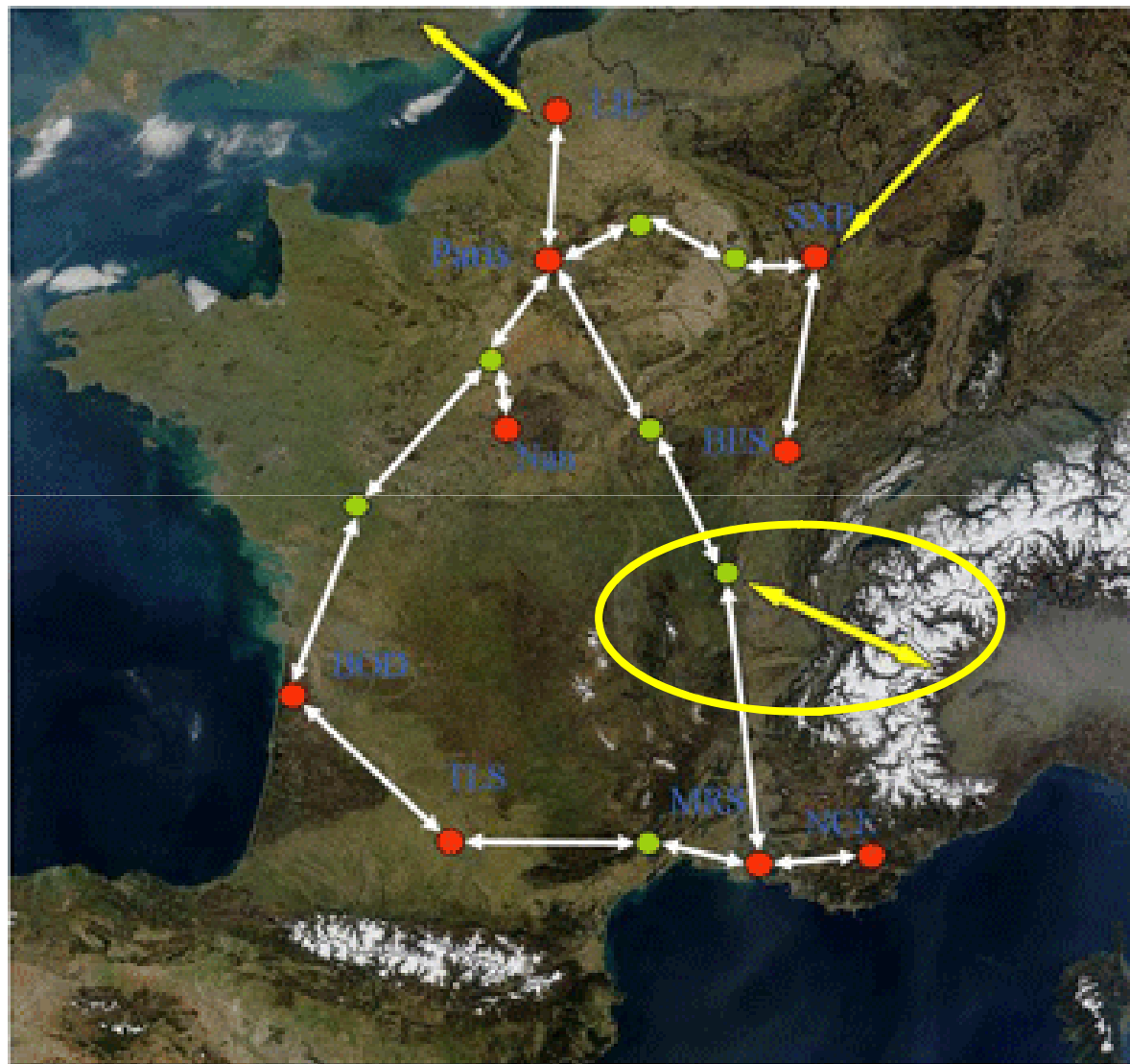
- DA INRIM
- VERSO INRIM
- TRAFFICO INTERNET



Verso un Network in Fibra di Istituzioni Scientifiche Italiane?



INRIM to REFIMEVE+ project



Towards EU Network: NEAT-TF Project

Accurate time/frequency comparison and dissemination through optical telecommunication networks

Proposal for European Metrology Research Programme (EMRP) – Call 2011
PTB-INRIM-SYRTE-NPL-BEV-IPE-VSL-MIKES-SP (coordinator H. Schnatz PTB)

- Clock Comparison
- Fundamental Physics Tests
- New Scenarios (eg. Gravitational Waves Test)
- New Time Scales, also ground segment for space missions



Conclusioni/1

- La metrologia di frequenza, con gli orologi atomici, è una disciplina di viva e proficua interazione con la fisica atomica e fondamentale (spettroscopia ad alta risoluzione, raffreddamento laser, interazioni fondamentali)
- L'accuratezza dei campioni atomici di frequenza offre la possibilità di eseguire test e misure a supporto della fisica fondamentale
- Prospettive:
Più orologi, più accuratezza, Link Ottici, Orologi nello Spazio: Test migliori e nuovi Test

Conclusioni/2

- All'INRIM sono state sviluppate tecniche di raffreddamento laser degli atomi per la spettroscopia ad alta risoluzione
- E' operativo un campione primario di frequenza a fontana con accuratezza relativa di 5×10^{-16} .
- Una seconda fontana è in sviluppo (accuratezza attesa $< 10^{-16}$).
- Orologio ottico a Yb in sviluppo.
- Test accurati di fisica fondamentale

Sono disponibili Tesi di Laurea/Dottorato

TESI DISPONIBILI

Sperimentali;

Propedeutici: Meccanica Quantistica; Applicazioni di Elettromagnetismo

- 1) "Confronto remoto di Orologi atomici ad alta accuratezza con link in fibra ottica"

- 2) "Caratterizzazione di amplificatori ottici a basso rumore"

- 3) "Time Trasfer ad alta accuratezza con link in fibra ottica"

TESI DISPONIBILI

Sperimentali;

Propedeutici: Meccanica Quantistica; Applicazioni di Elettromagnetismo

4) “Raffreddamento laser subDoppler di atomi di Ytterbio in trappola magnetoottica a due colori”

5) “Spettroscopia della transizione proibita $1S_0-3P_0$ in Itterbio bosonico e fermionico”

6) “Aggancio in frequenza di una sorgente a 1112 nm con tecnica di Pound-Drever-Hall su cavità Fabri-Perot e sua caratterizzazione”