

LASERS, ATOMI ULTRAFREDDI E TEMPO ATOMICO

Davide Calonico d.calonico@inrim.it

Divisione di OTTICA

ISTITUTO NAZIONALE DI RICERCA METROLOGICA (INRiM)

Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

Sommario

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

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

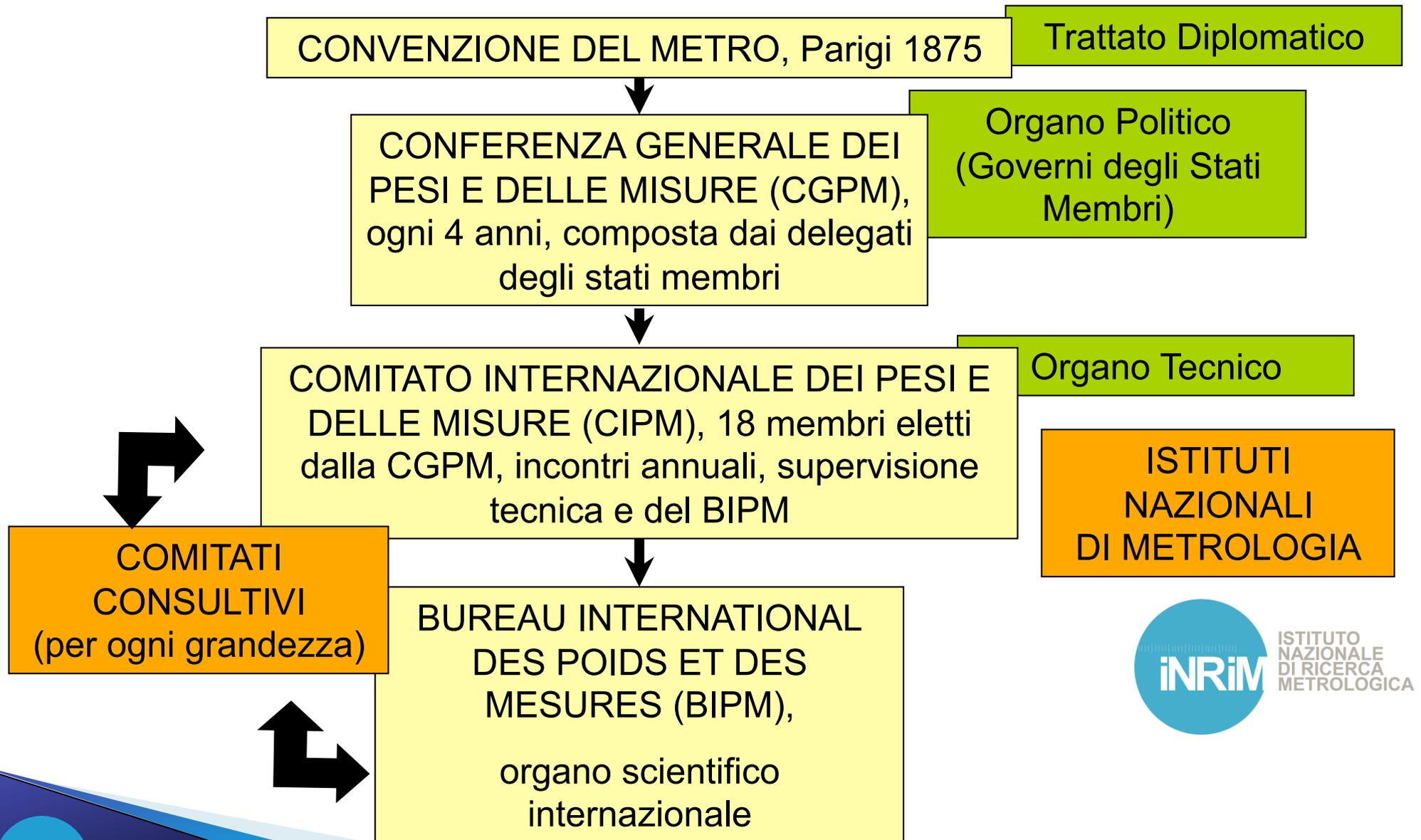
DISSEMINAZIONE

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]

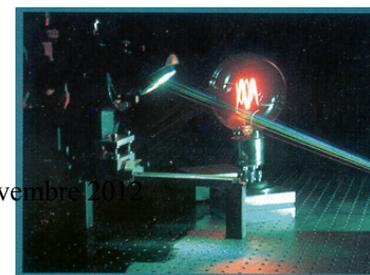
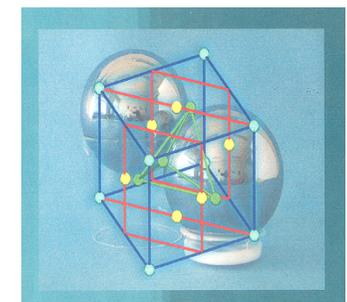
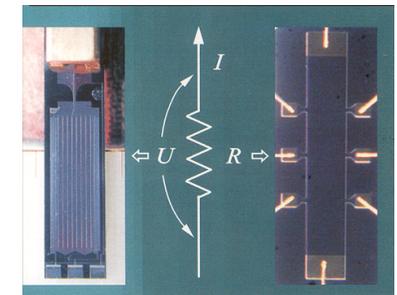
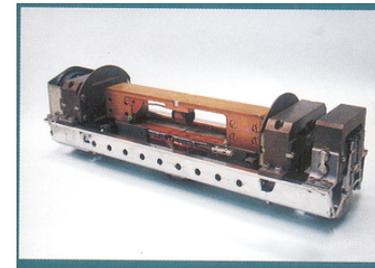
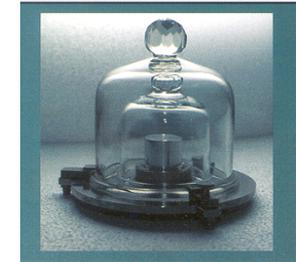
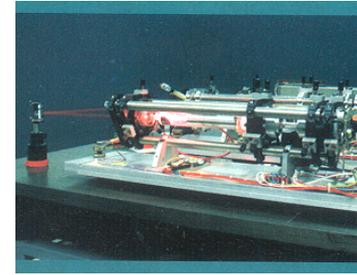
Tempo: secondo [s]

Corrente elettrica ampère [A]

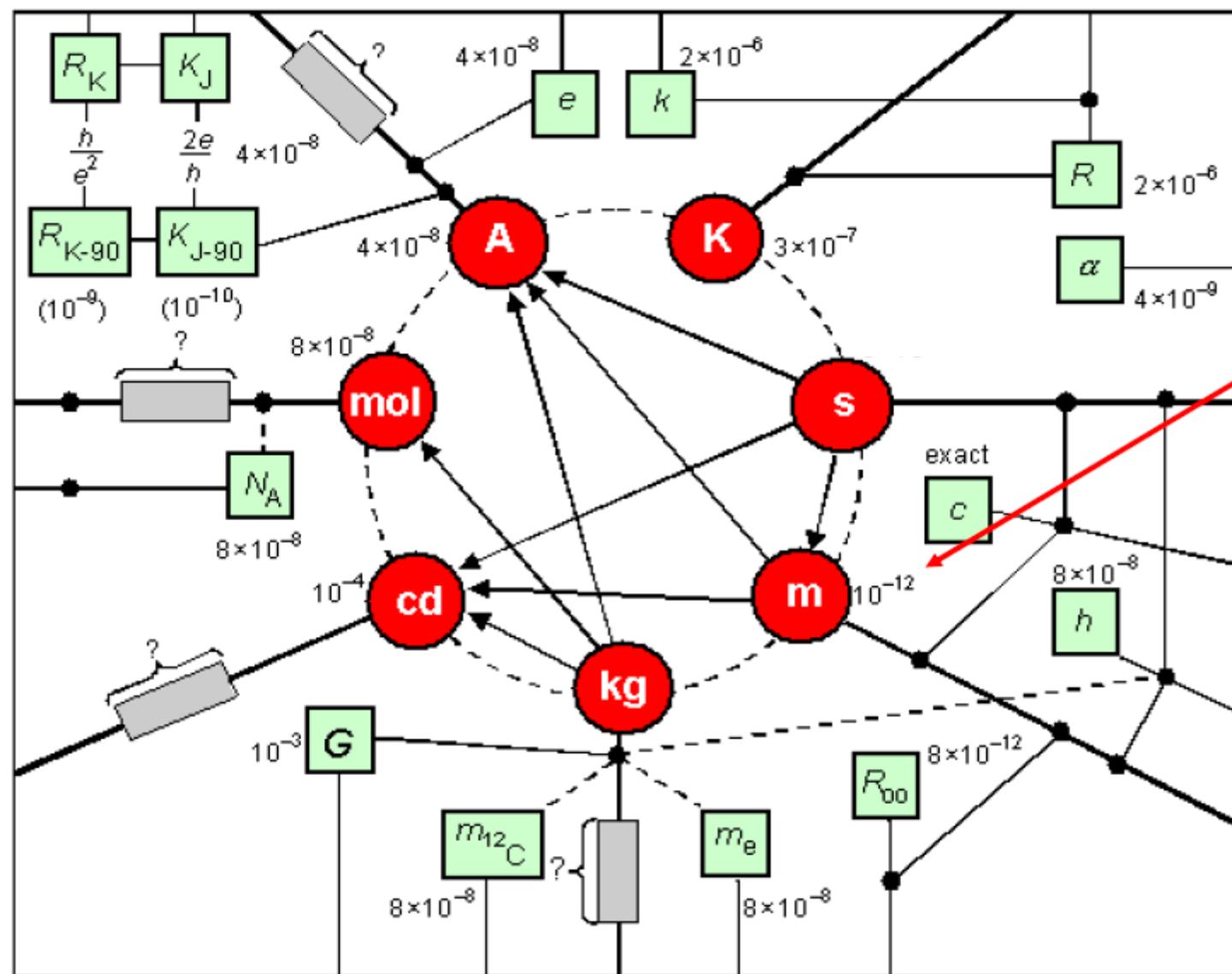
Temperatura kelvin [K]

Quantità di sostanza mole [mol]

Intensità luminosa candela [cd]



Unità SI



Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

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

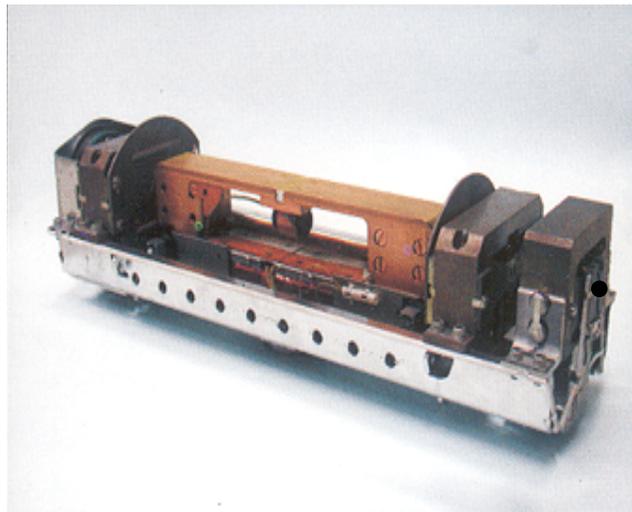


- **Tempo solare medio (fino al 1960)**

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.

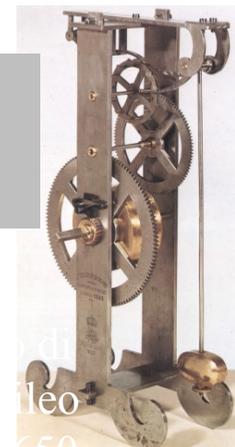
Fisica, 28 Novembre 2012

Evoluzione dell'accuratezza degli orologi

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



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



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



$\sim 10^{-13}$
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



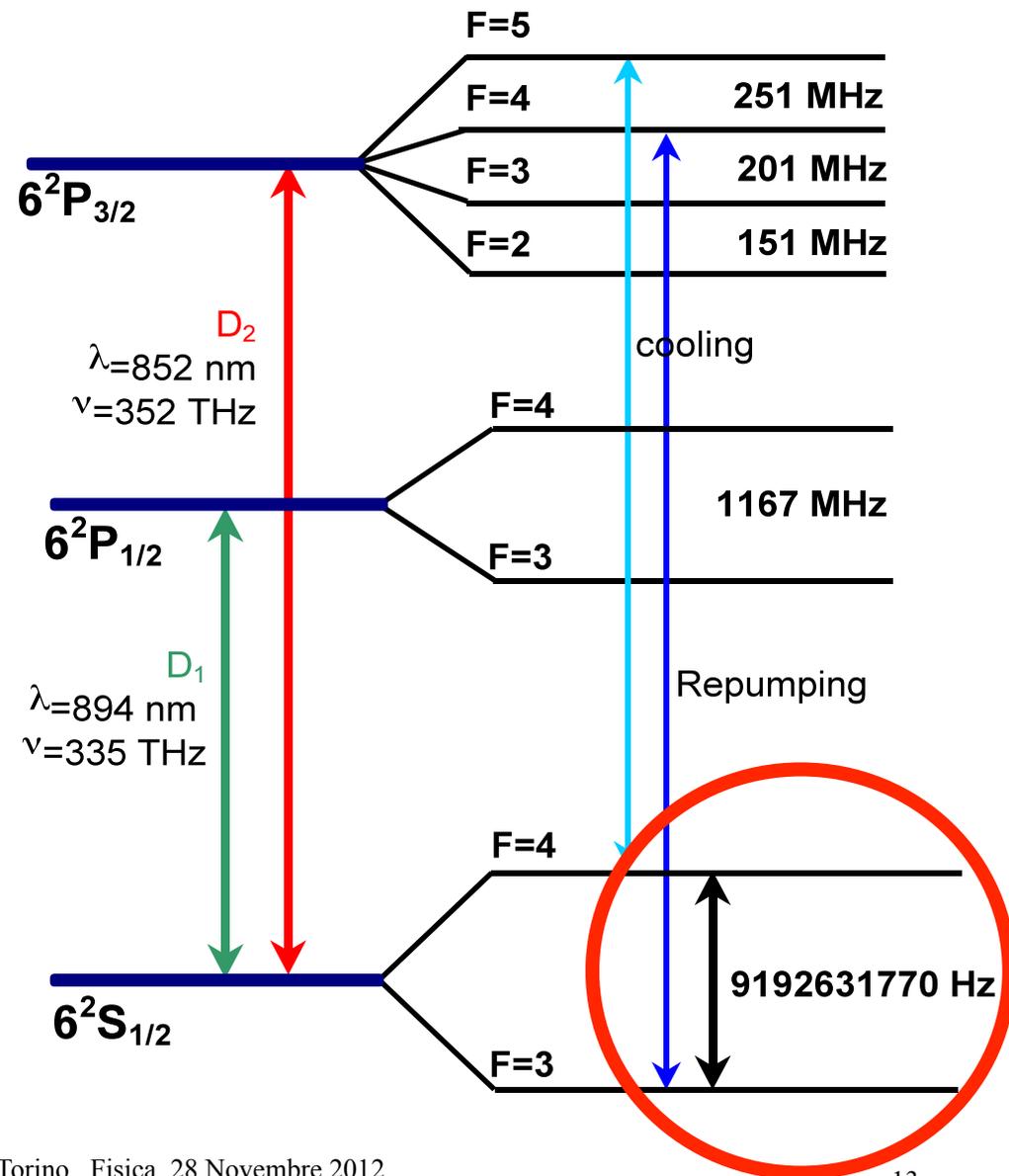
Cosa è un campione atomico primario di frequenza?

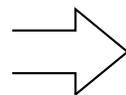
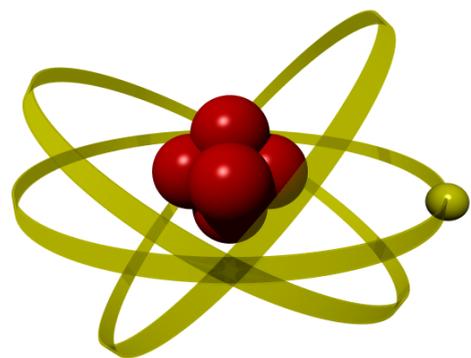
- Un campione atomico di frequenza è un dispositivo capace di riferire la frequenza di un oscillatore macroscopico (un quarzo, un laser) a quella di un sistema quantistico semplice (atomo, ione o molecola).
 - Gli atomi sono tutti identici tra loro
 - La frequenza di risonanza non muta nel tempo
- Il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

Il secondo SI

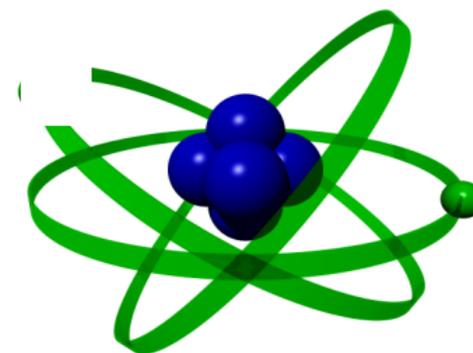
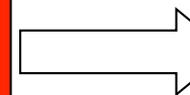
Tra tutte le possibili transizioni il secondo è definito come:

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.

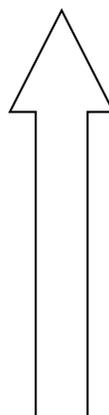




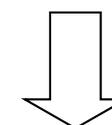
**INTERAZIONE
ATOMI-RADIAZIONE**



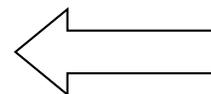
PREPARAZIONE
degli atomi nello
stato iniziale della
transizione



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



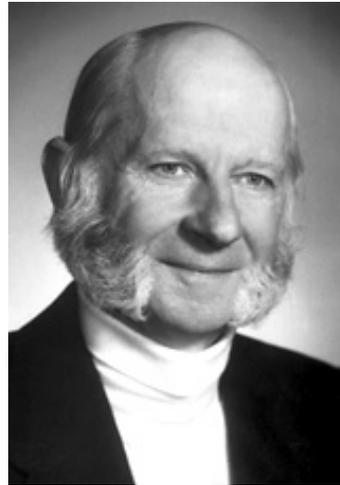
Oscillatore Locale



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

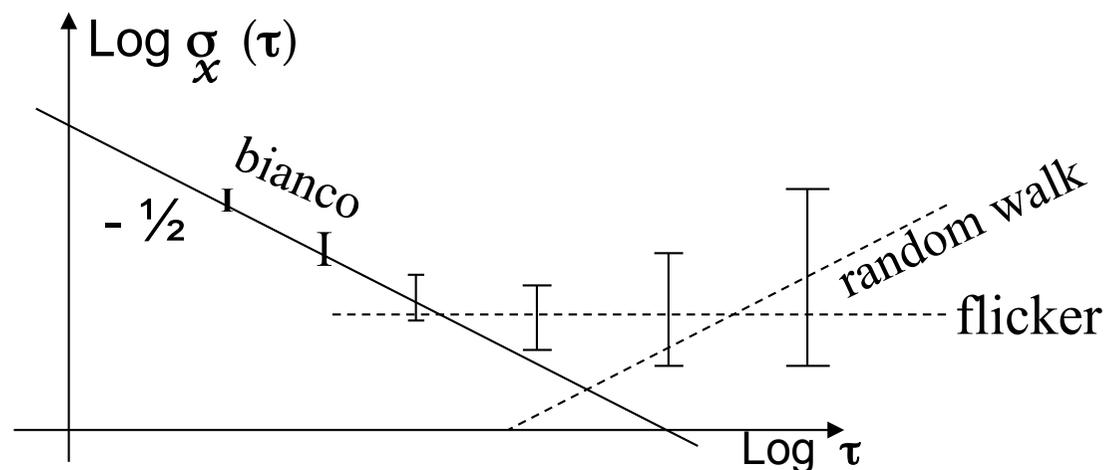
La stabilità dipende dal tipo di rumore e dal **tempo di misura** (e non sempre più misure = minore incertezza...)

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.

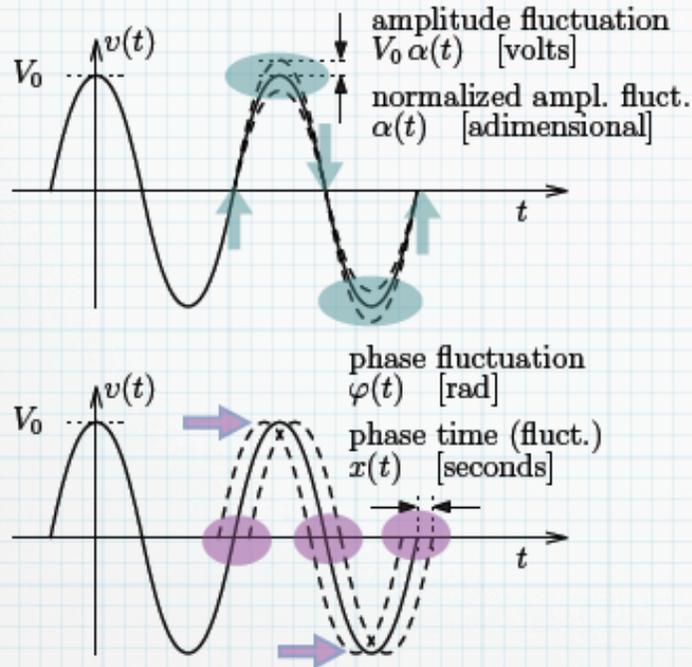
Per caratterizzare la stabilità nella generalità dei casi si ricorre alla Varianza di Allan, definita per tutti i tipi di rumore in gioco.

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

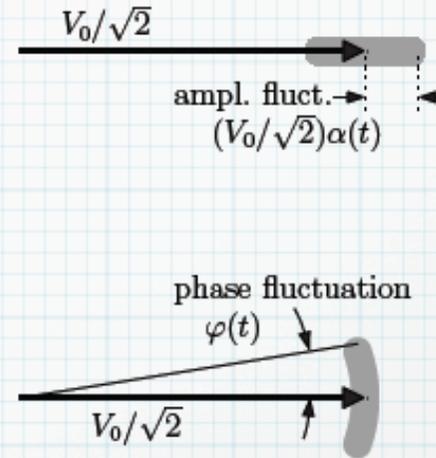


Clock signal affected by noise

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

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

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

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

random fractional-frequency fluctuation

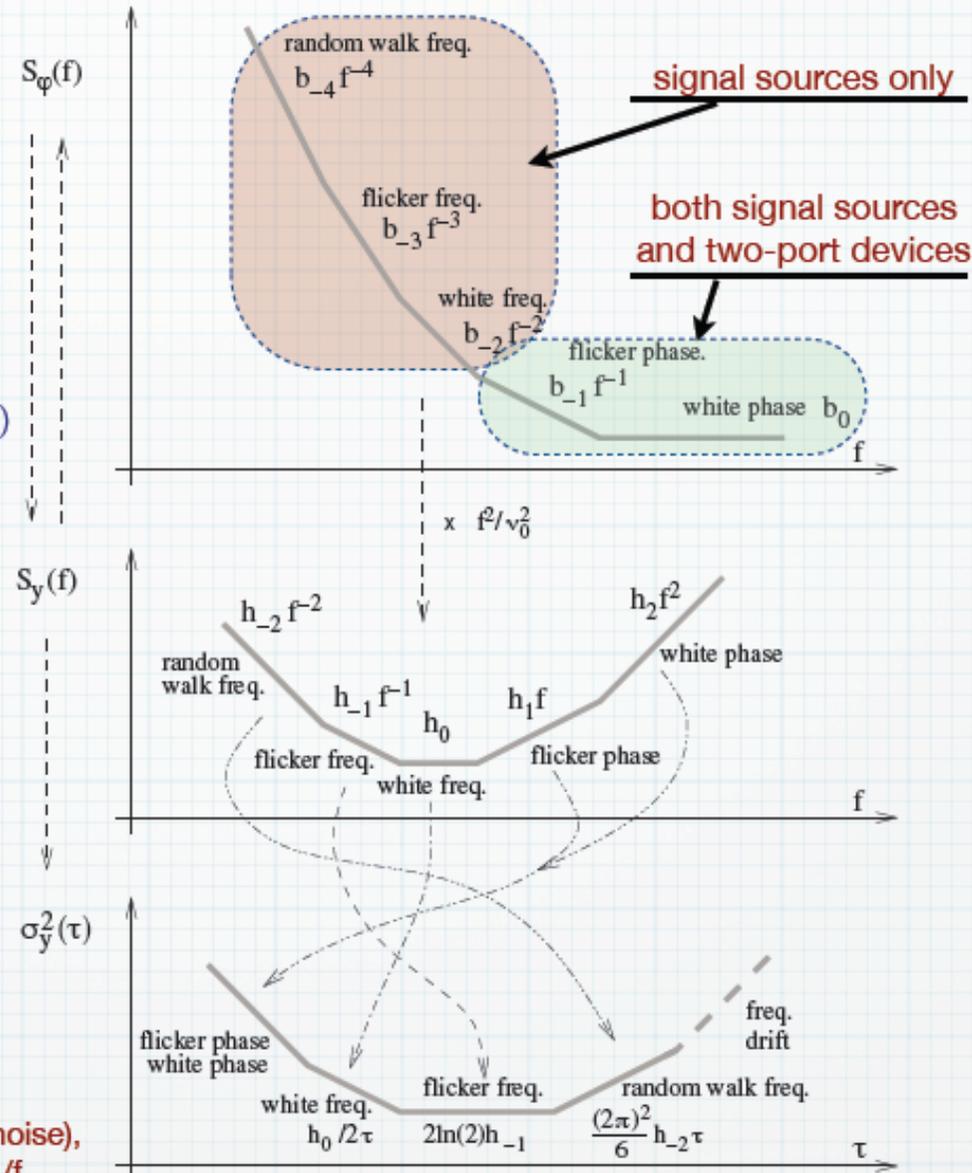
$$y(t) = \frac{\dot{\varphi}(t)}{2\pi\nu_0} \Rightarrow S_y = \frac{f^2}{\nu_0^2} S_\varphi(f)$$

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

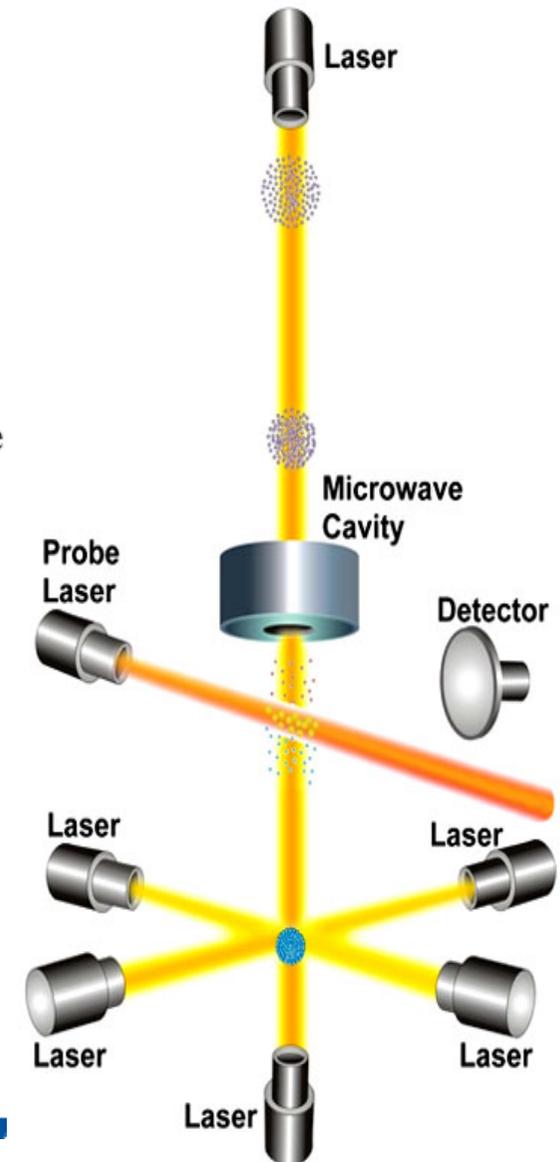
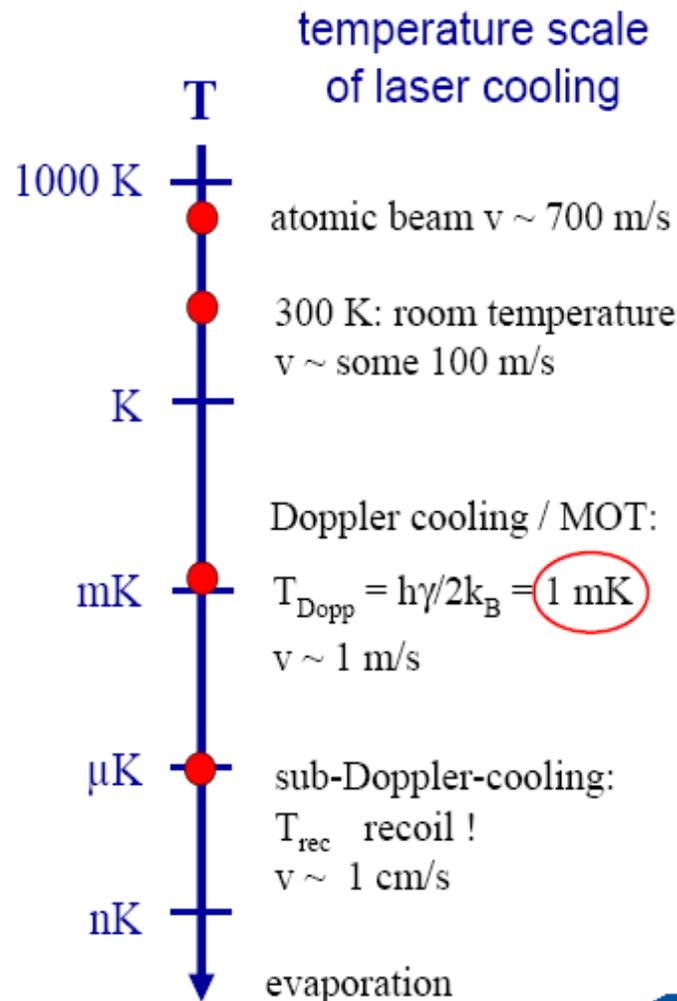
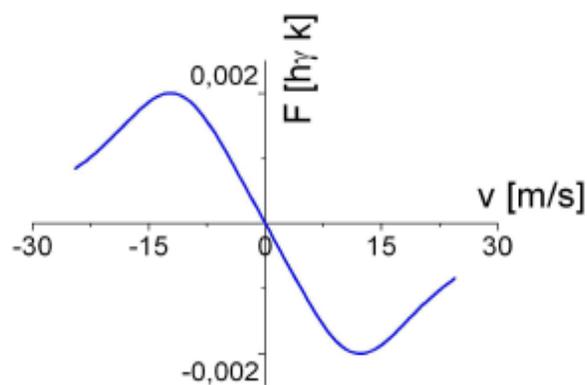
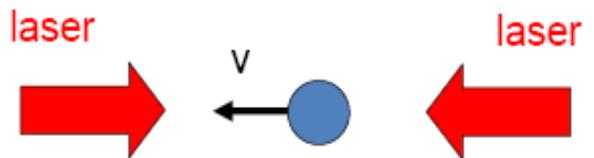
Per migliorare in generale gli orologi

- 1) Aumentare il Tempo di interazione $\Delta\nu\Delta T > 1$
- 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



Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

A Nobel Gallery

1997

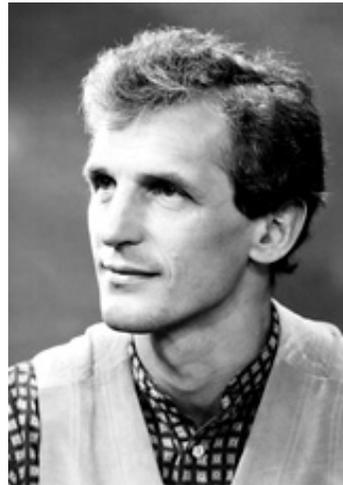


Stephen Chu, William Phillips, Claude Cohen-Tannoudj

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

A Nobel Gallery

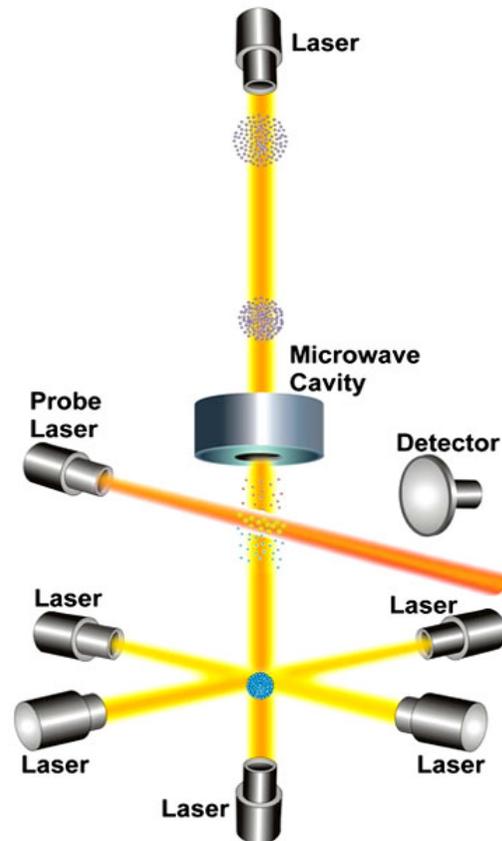
2001



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 Cesio 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 28**

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

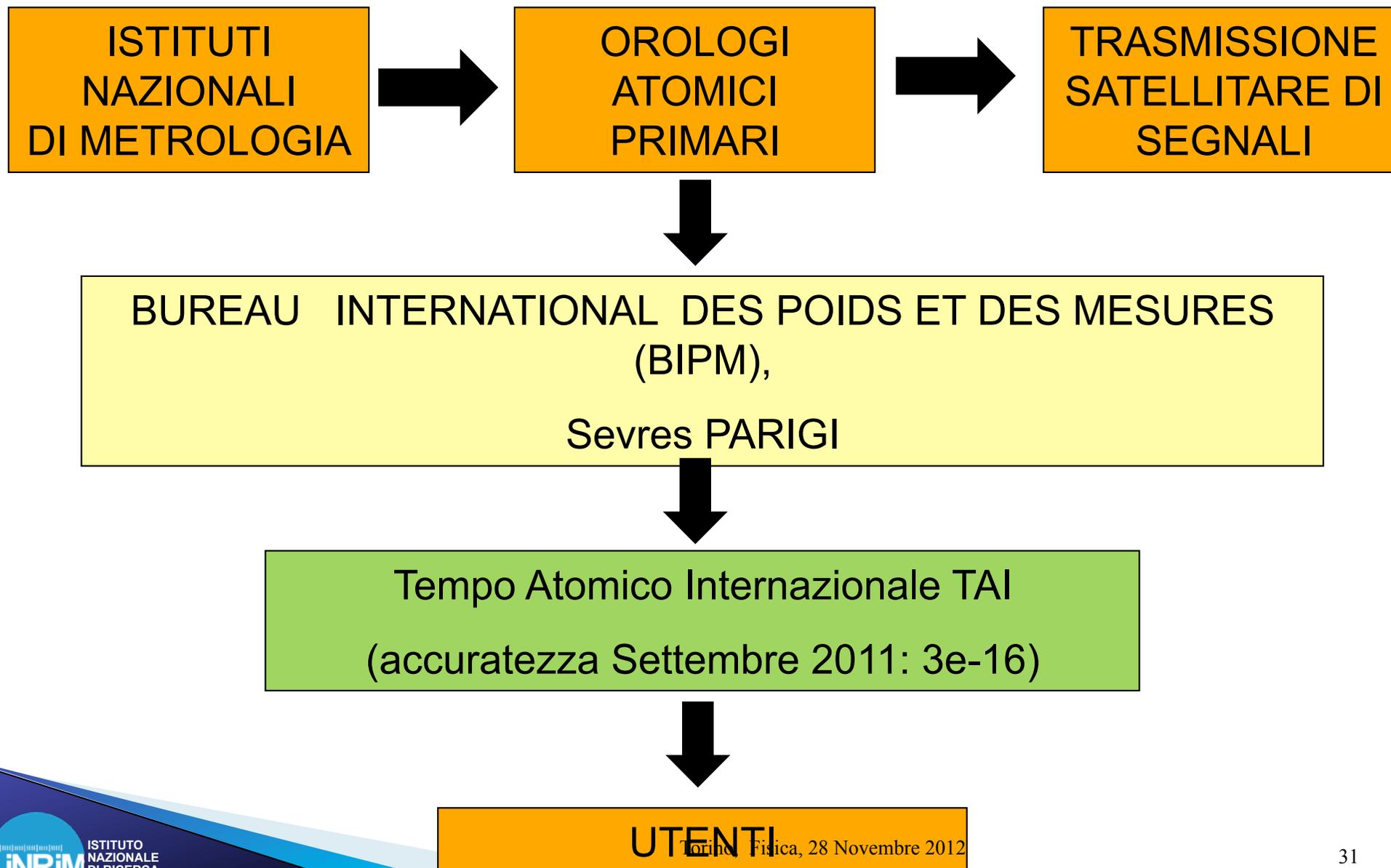
	u ITCsF1	u ITCsF2
Zeeman	2E-16	8E-17
Collisioni	3E-16	1E-16
Corpo Nero	3E-16	1E-17
Microonda	2E-16	1E-16
Redshift	1E-17	1E-17
Totale	5E-16	2E-16

Fontane atomiche attive nel mondo

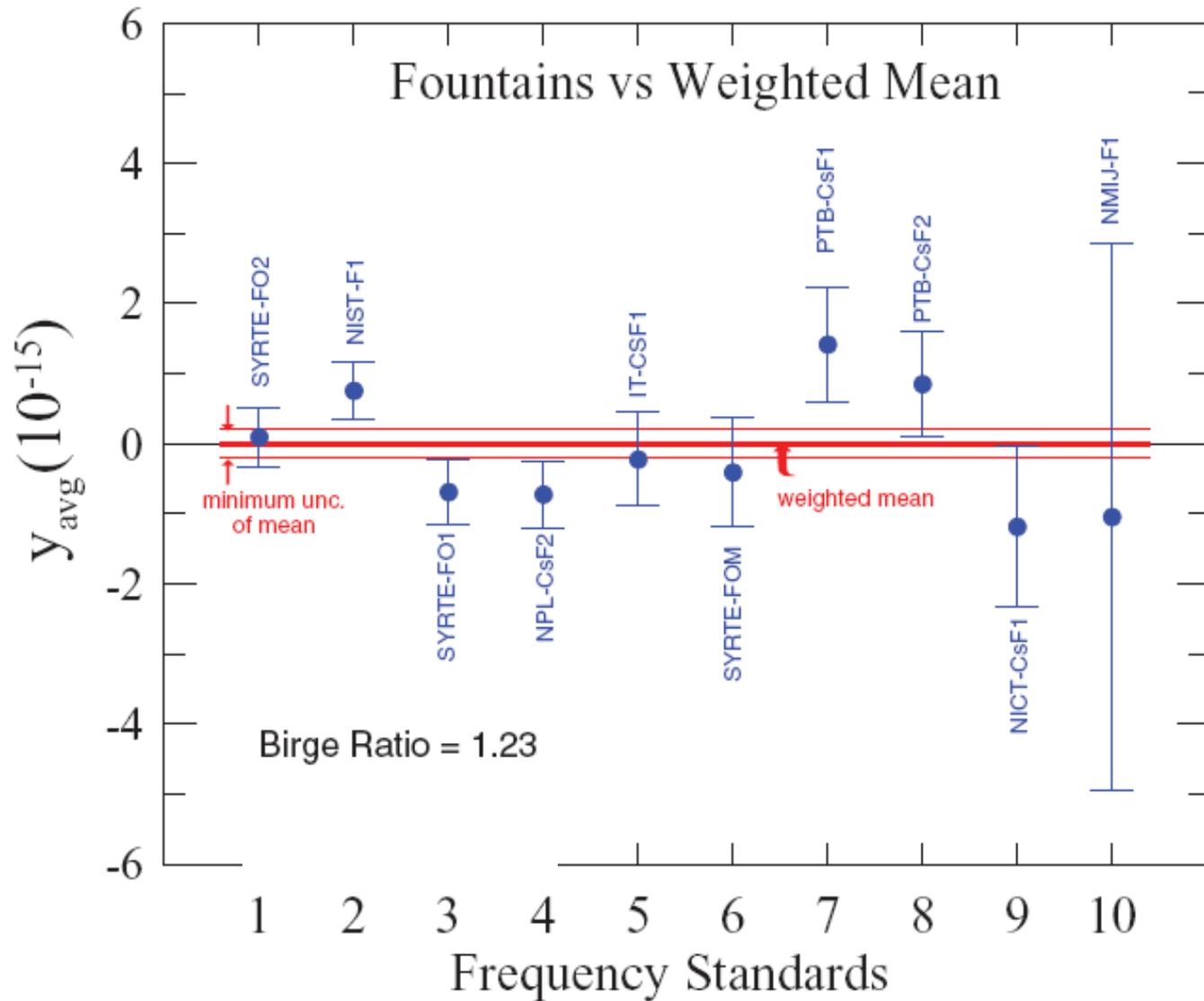
Sei laboratori hanno finora contribuito regolarmente alla generazione del Tempo Atomico Internazionale con fontane al Cesio: USA (2 fontane); Francia (3); **Italia (2)**; Germania (2); UK (2); Giappone (2)



Generazione del Tempo Atomico Internazionale TAI



Comparison of Cs fountains



Compiled from all data published in Circular T during the period March 2008 – May 2011

T. E. Parker, Rev. Sci. Instrum. 83, 021102 (2012)

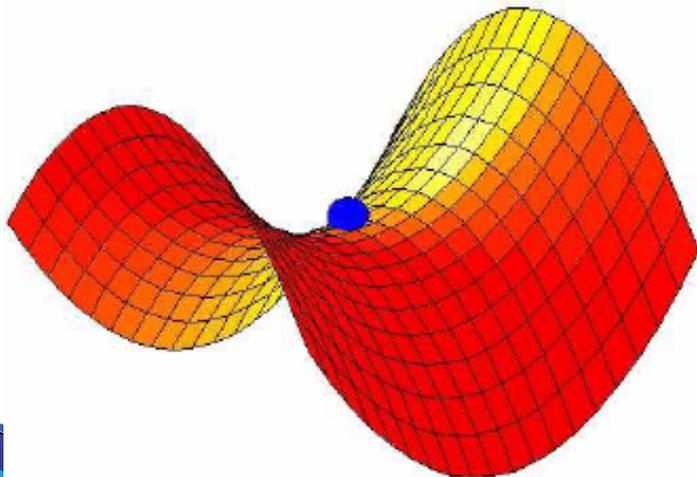
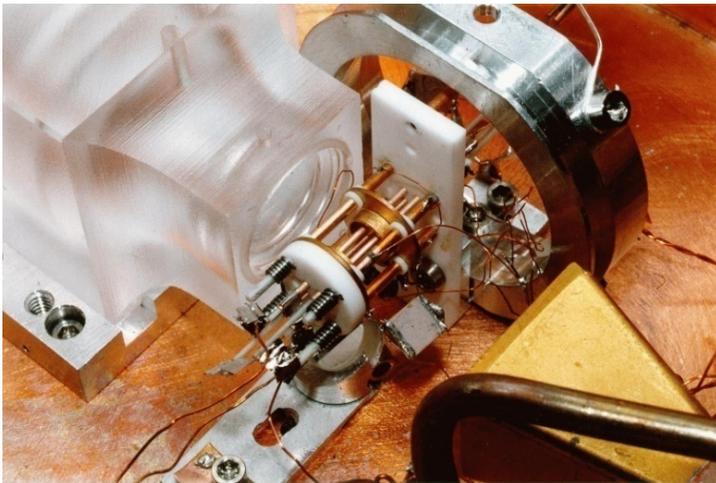
Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

32

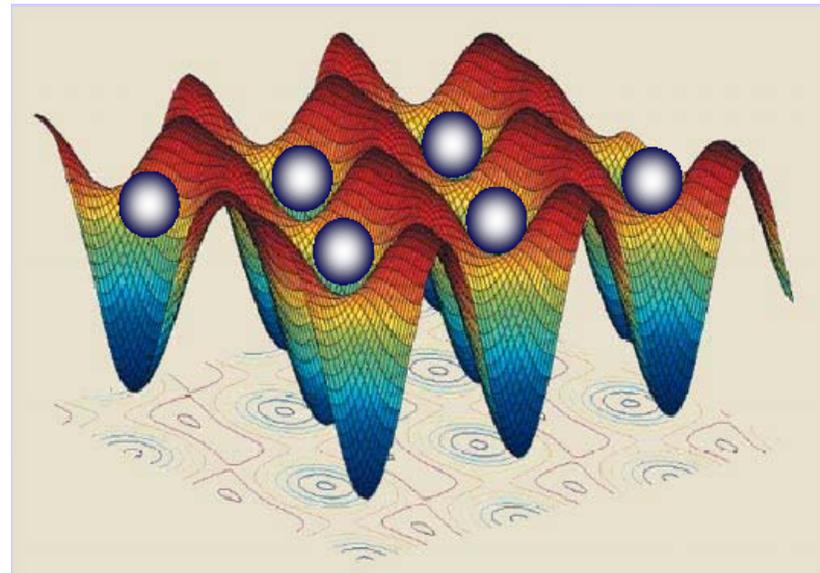
Meno Doppler & Più Interazione / 2

Trappole a ioni e reticoli ottici

Trappole RF a singolo Ione

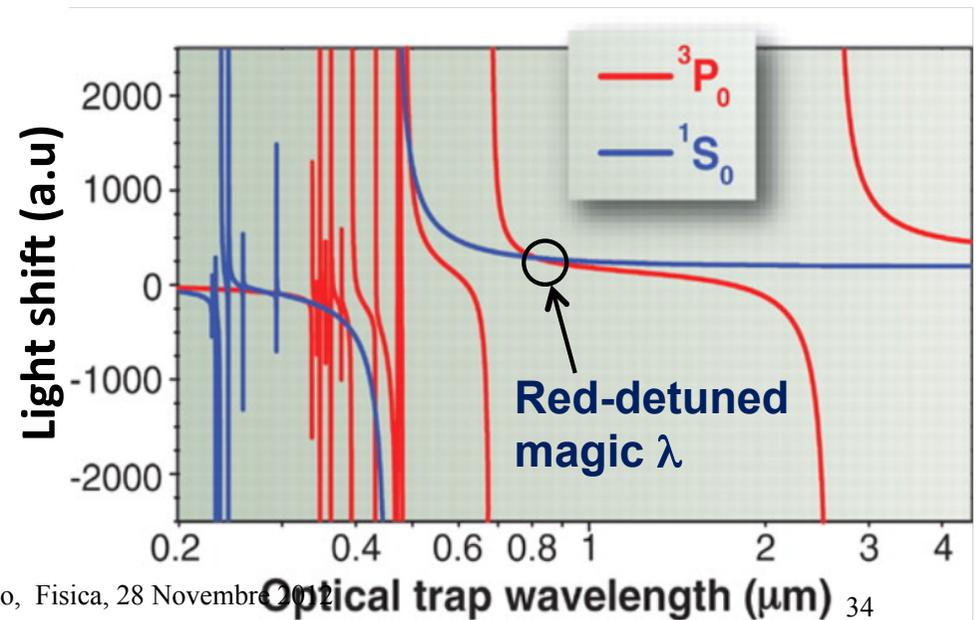
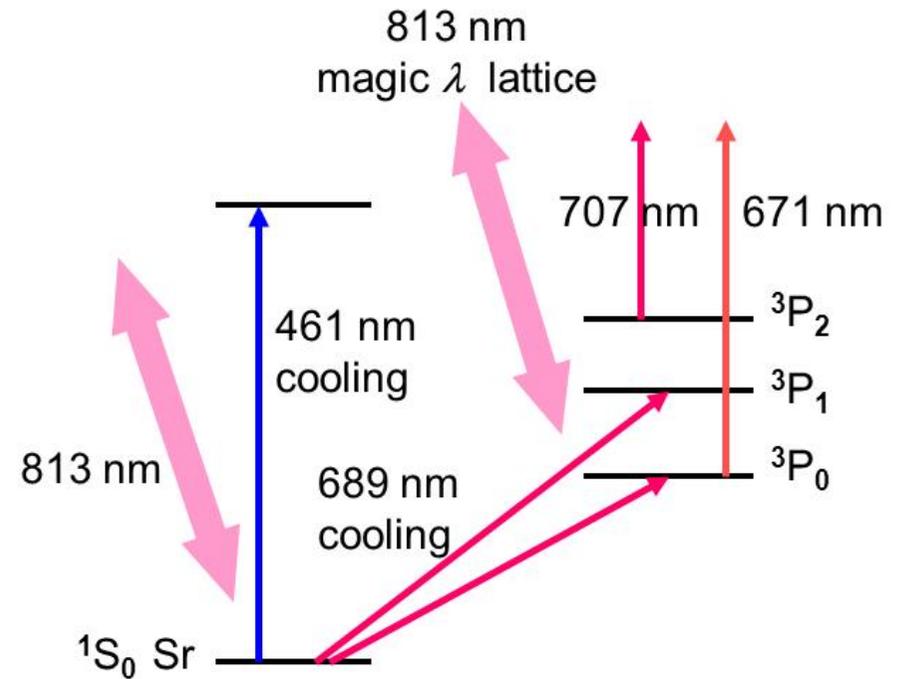


Reticoli Ottici con Atomi Neutri
(Lunghezza d'onda "magica" senza
Light shift)

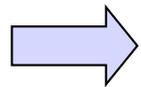


Optical lattice confinement without light shifts

- Sr 1S_0 - 3P_0 clock has ~ 1 MHz natural linewidth but have to avoid broadening and shifts
- Light shift magnitude results from the difference in AC Stark shift caused by off-resonant lattice trapping beam on 1S_0 and 3P_0 levels
- Minimise overall light shift by tuning to “magic λ ” where 1S_0 and 3P_0 contributions cancel out
 - N atoms with stability $\propto N^{1/2}$ and controllable systematics
 - But need better LO performance & more data on frequency shifts



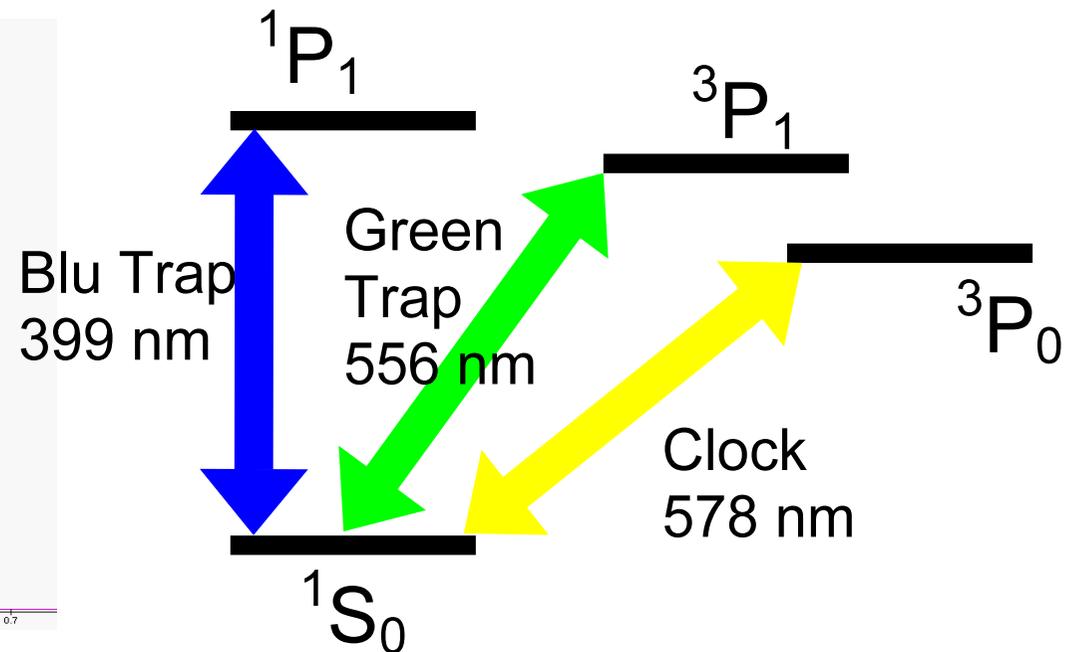
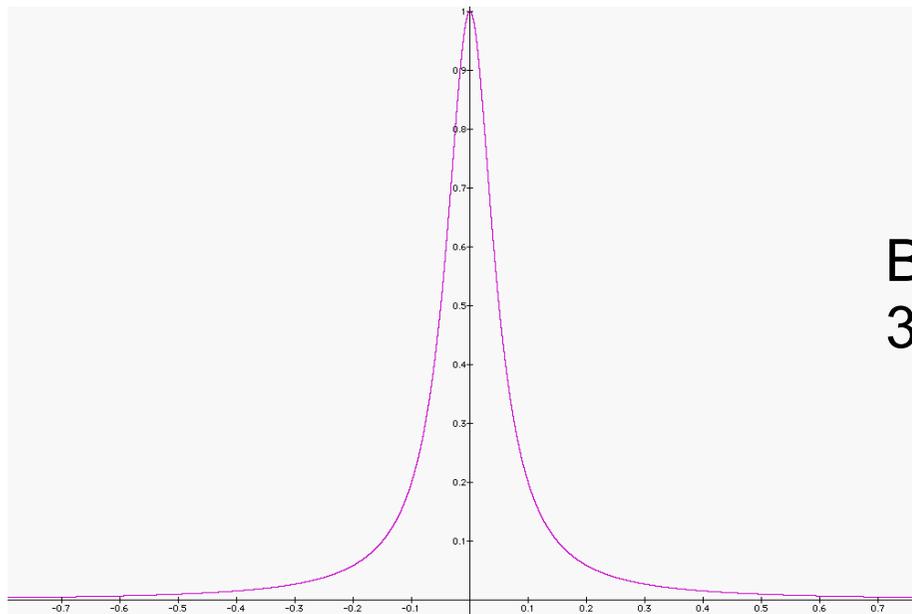
3) Scegliere Transizioni Atomiche migliori (frequenza maggiore, larghezza naturale minore, minore sensibilità ambiente esterno)



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

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

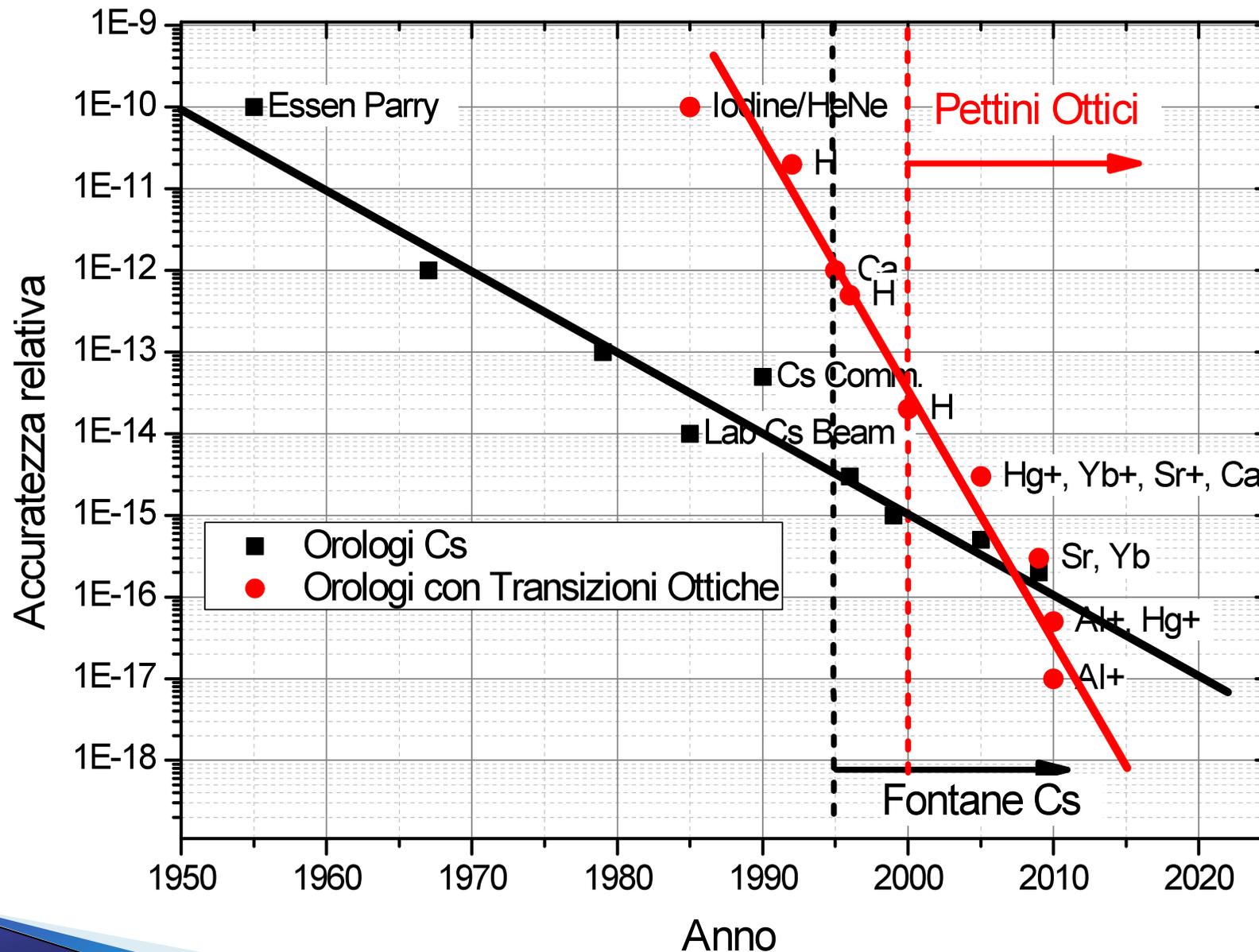
Q ottiche(microonda) $> 10^{15}$



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

Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

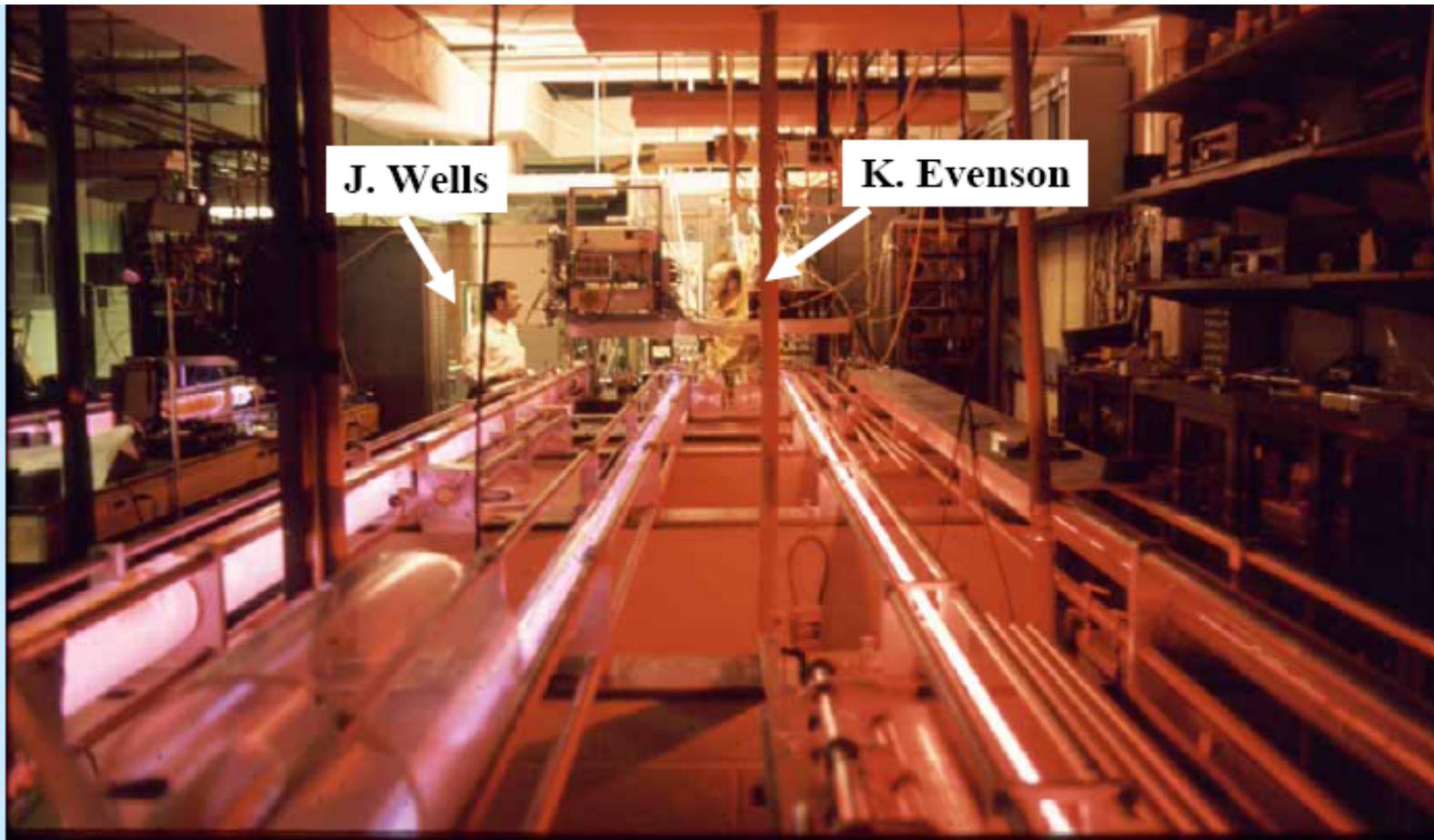
Dal Cesio agli orologi Ottici: Verso la ridefinizione del secondo



Anche i laser diventano orologi

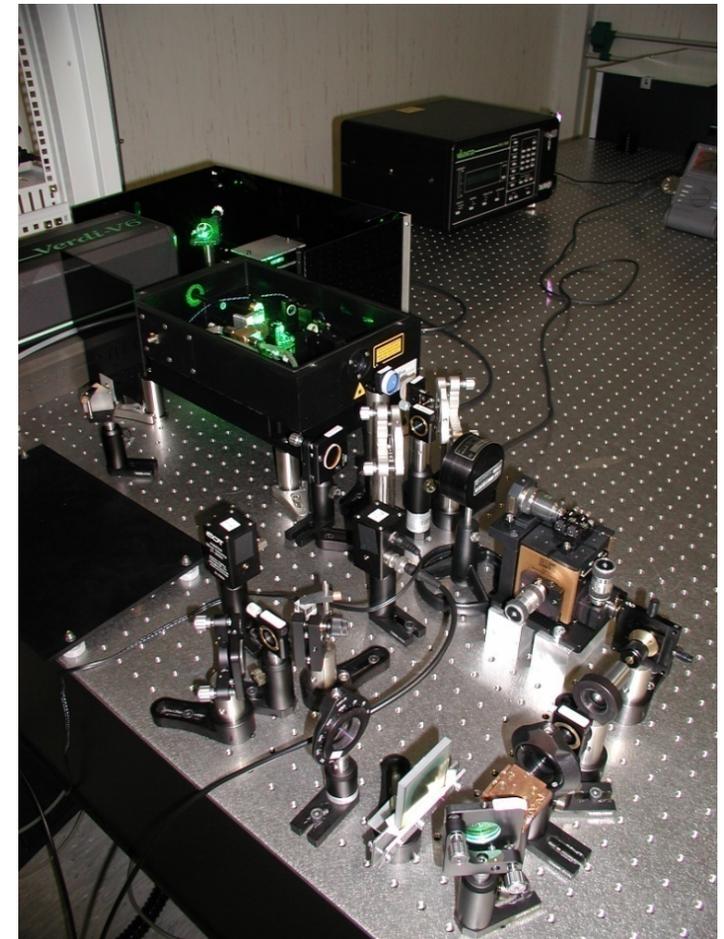
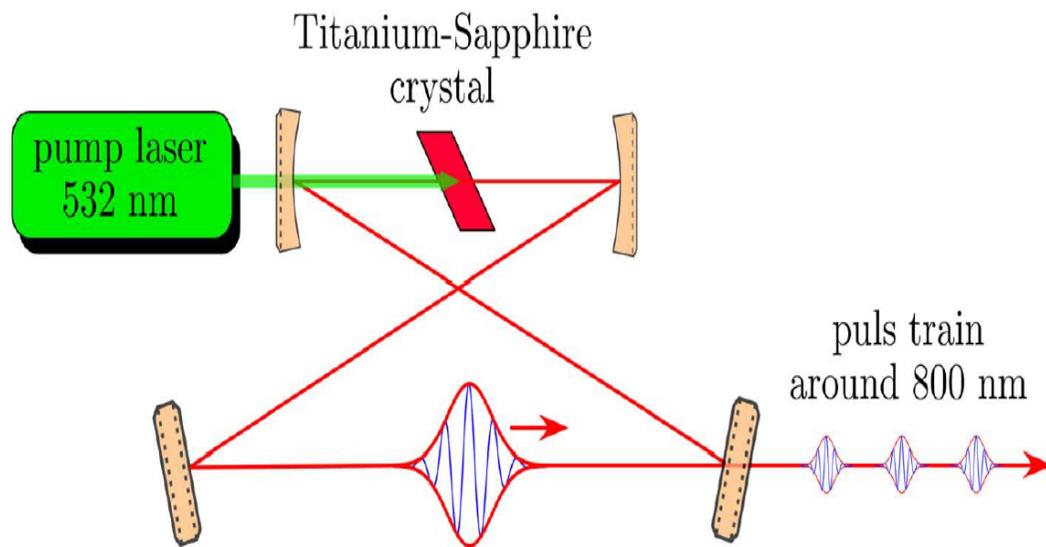
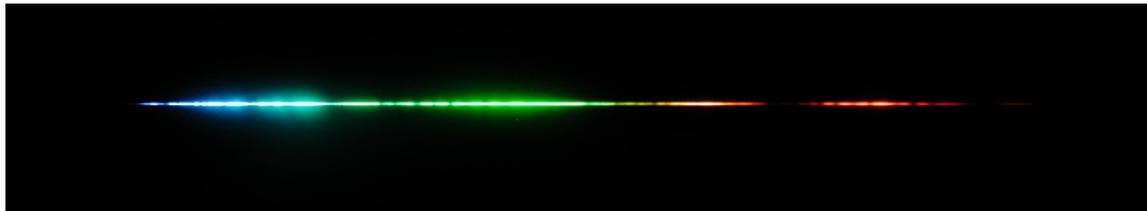
Fino alla fine del secolo scorso, lunghe catene di sintesi, che coinvolgevano svariati laser, erano l'unico metodo di misura accurato per frequenze ottiche

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



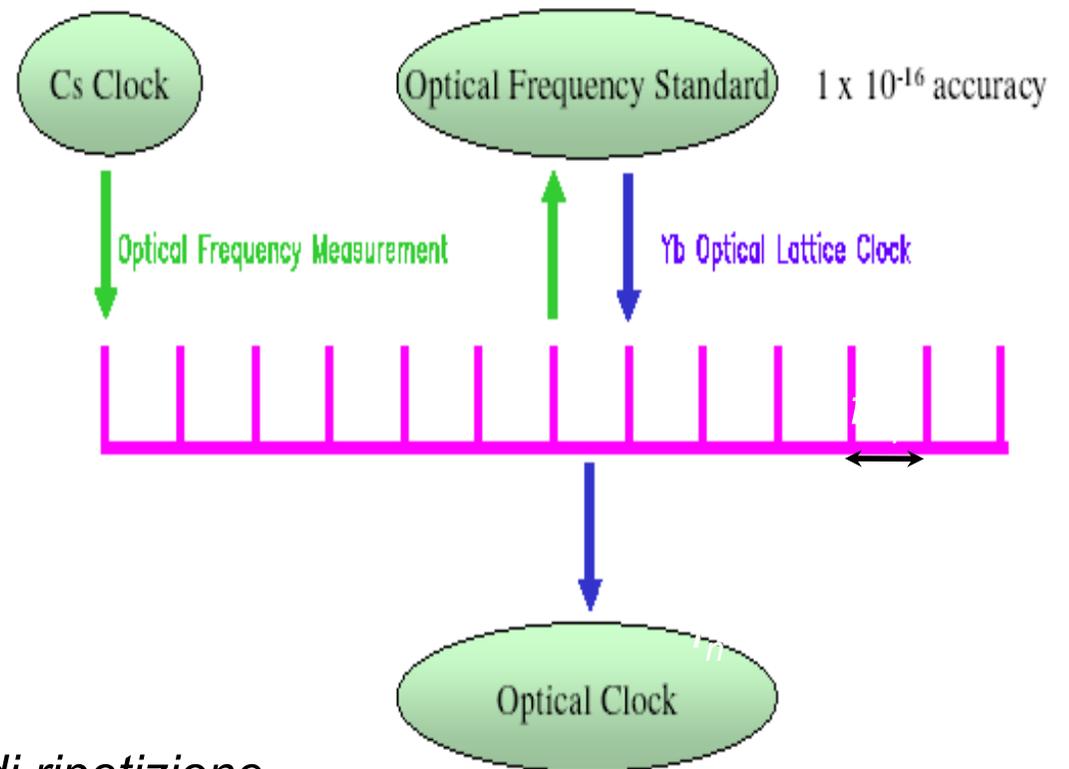
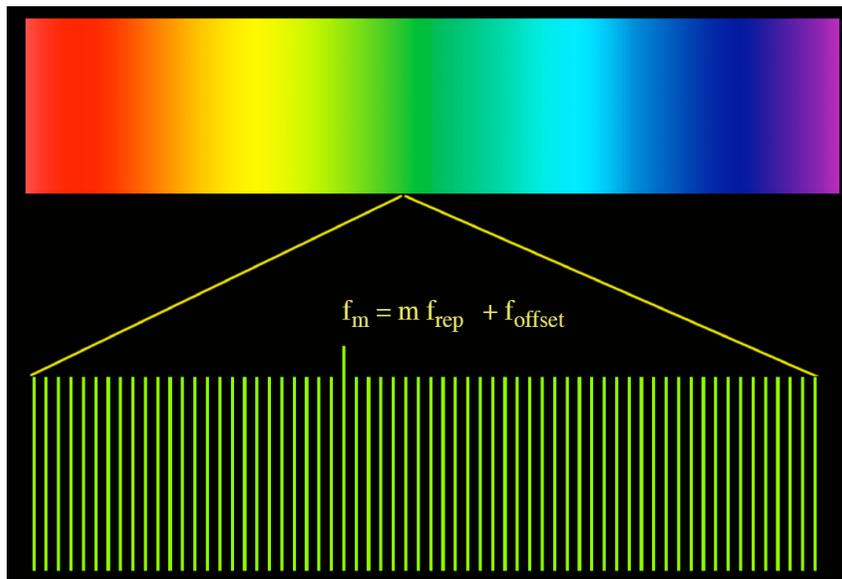
Anche i laser diventano orologi/2

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})



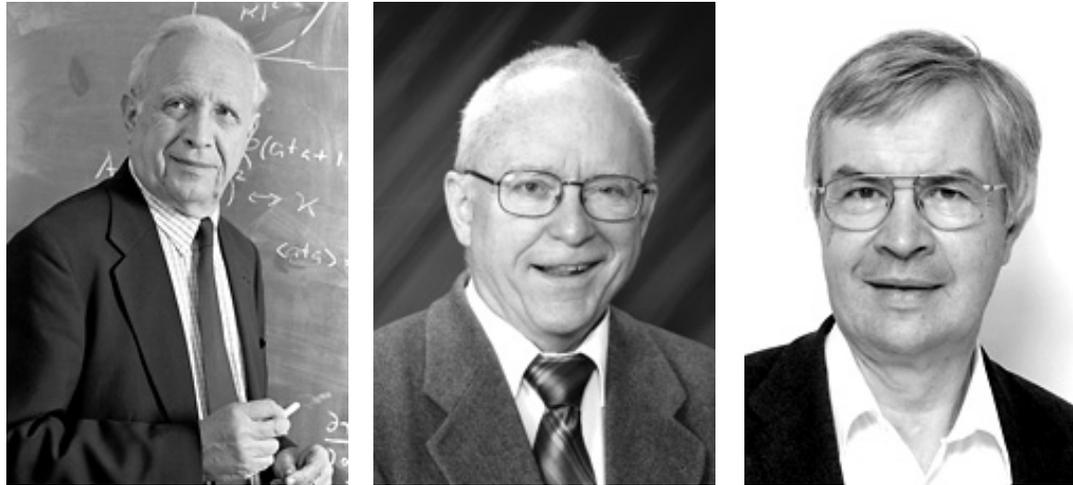
f_{rep} frequenza di ripetizione

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"

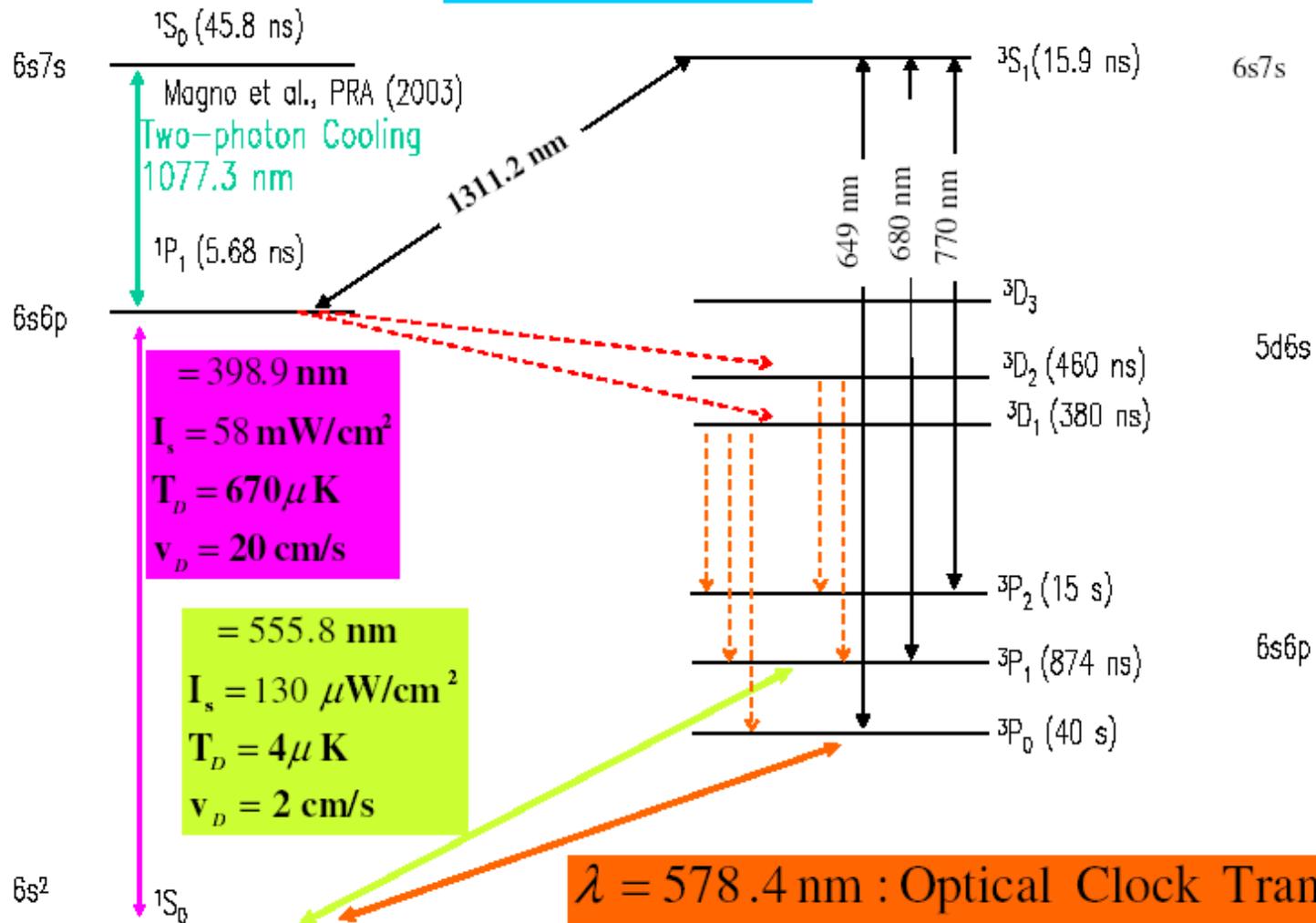
John L. Hall Theodor W. Hänsch

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

Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

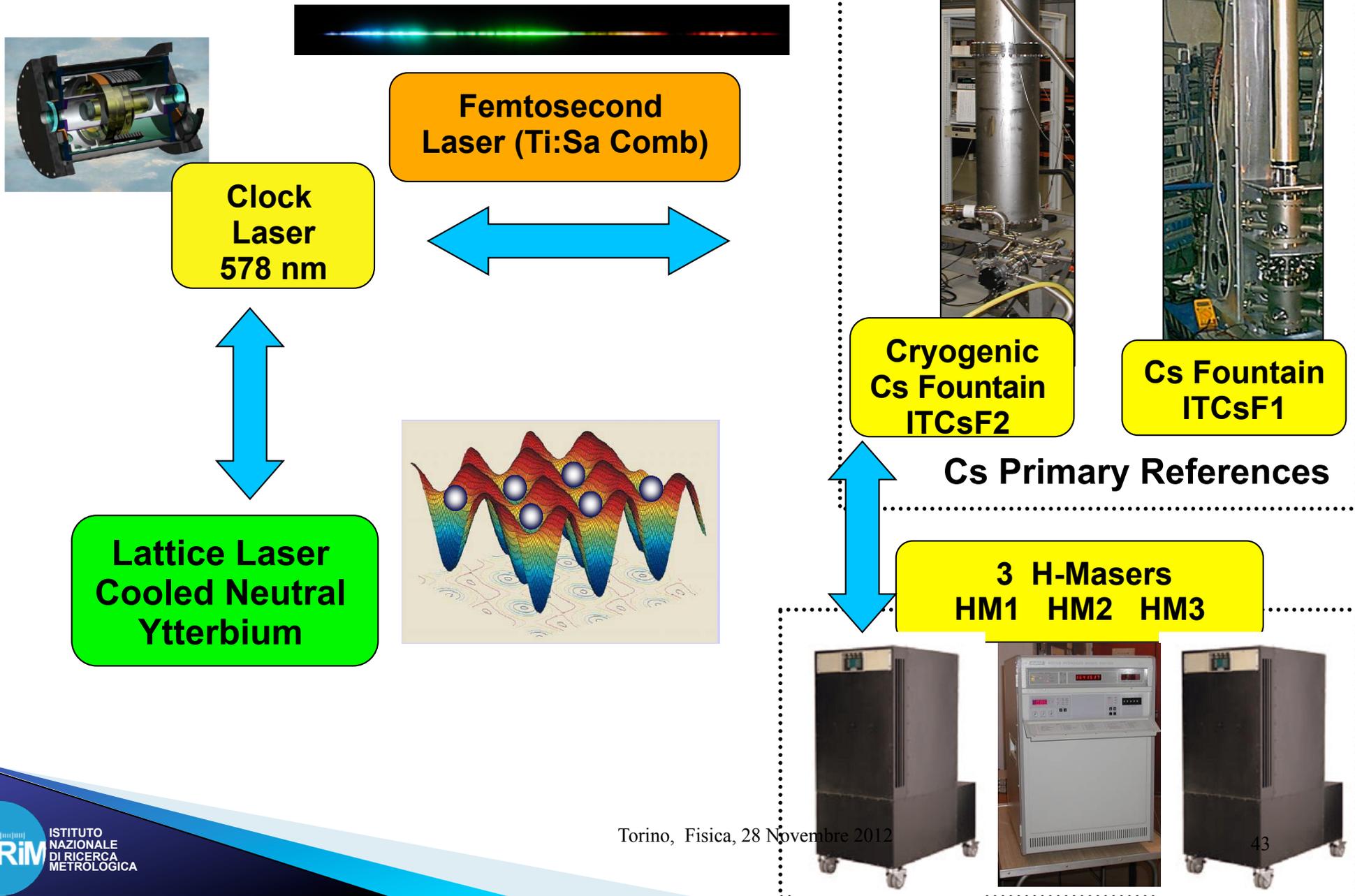
Orologio Ottico a Yb

Yb Energy Levels



$\lambda = 578.4 \text{ nm}$: Optical Clock Transition

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

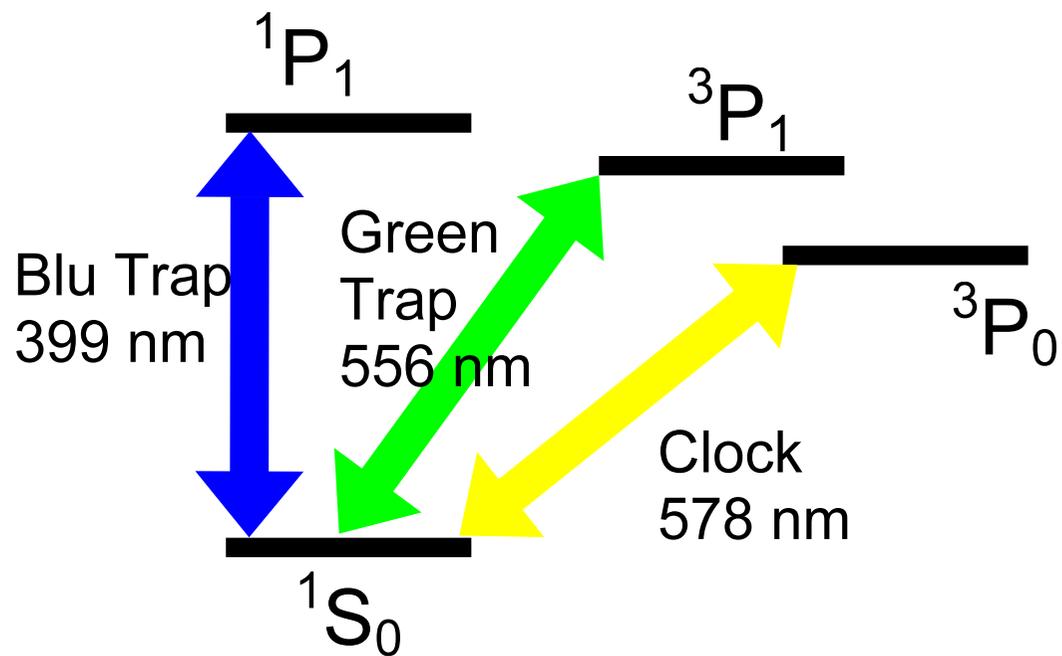
Yb Lattice clock in the world:

NIST, UniDusseldorf, Japan AIST, INRIM...

Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

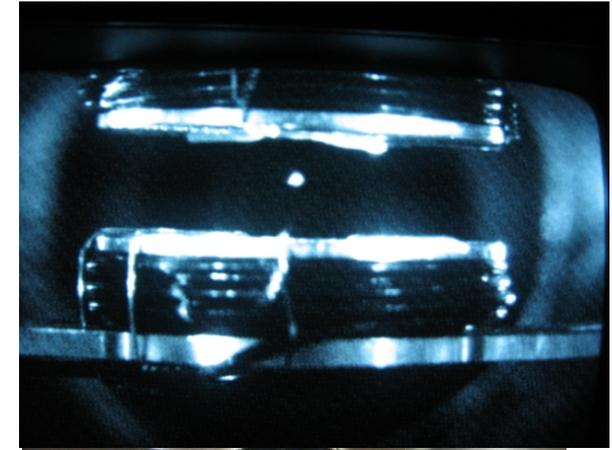
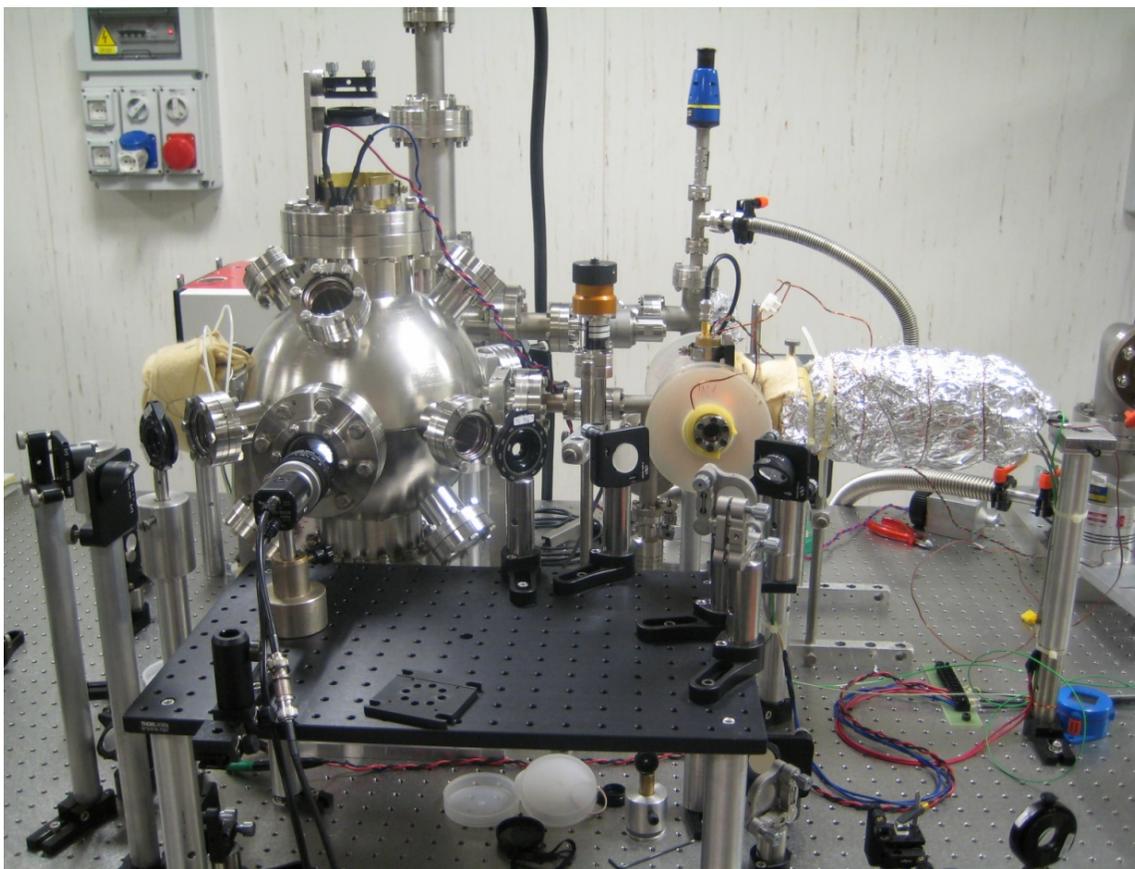


1)

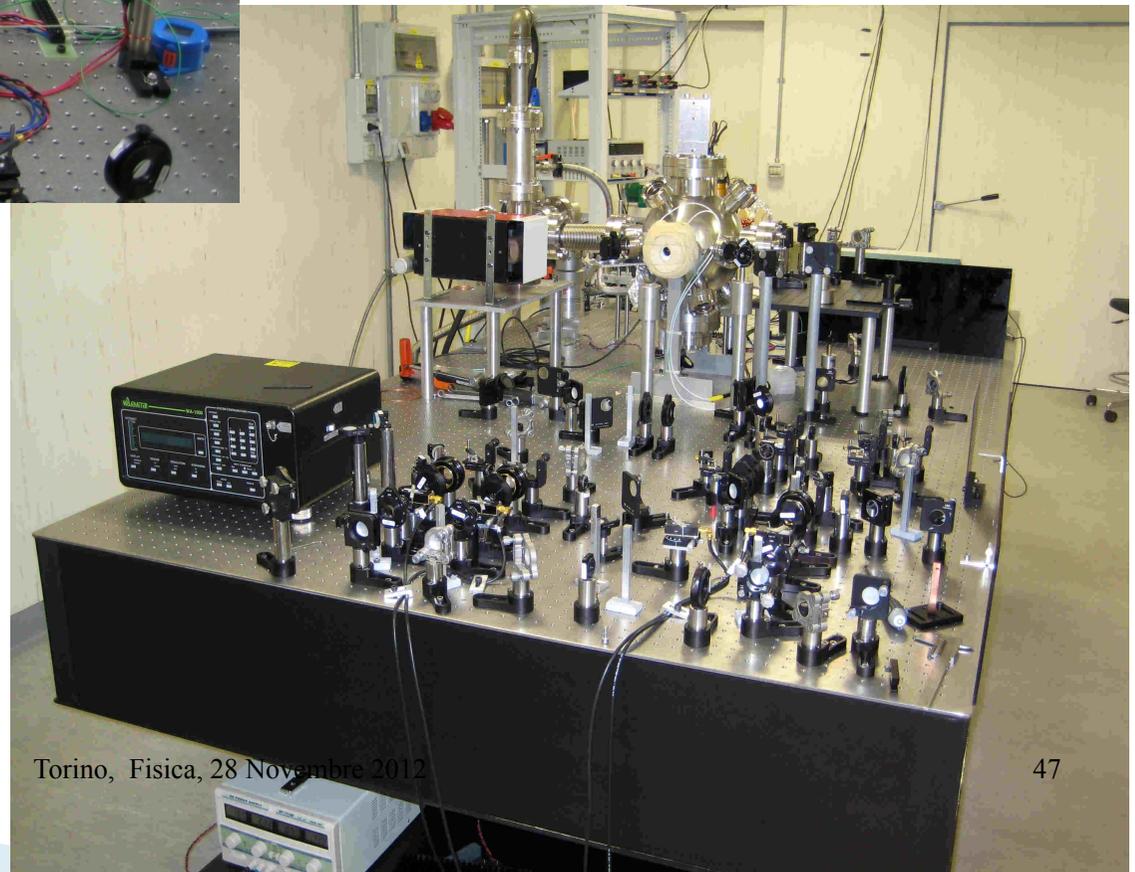


Yb Isotopes

	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	-



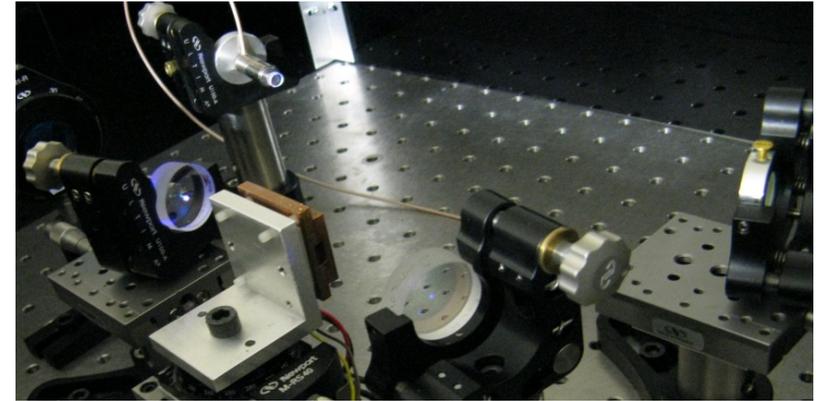
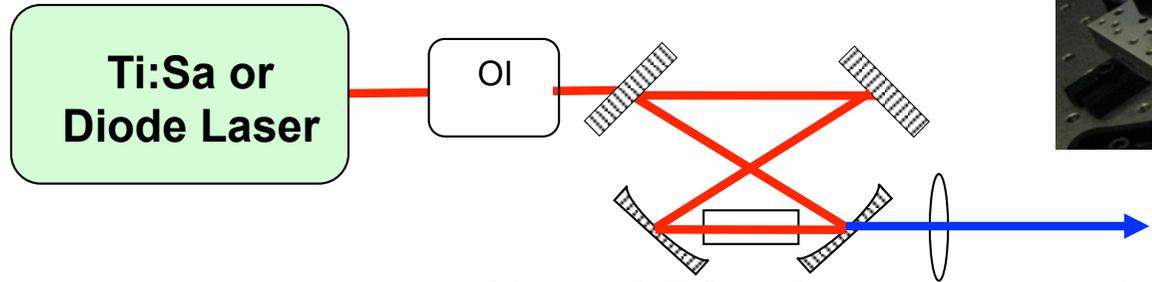
- Multichannel Oven (700 K)
- **NO ZEEMAN SLOWER**
- Precooling laser beam
- **Next:** Compact Vacuum Chamber;
BBR control (oven shutter)



Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

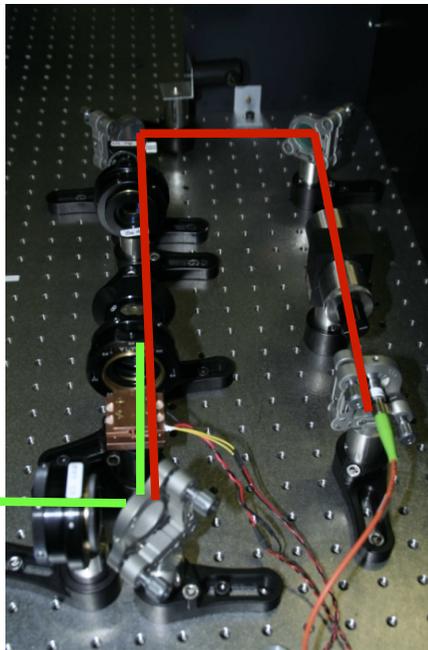
Cooling Radiations

399 nm Laser Generation

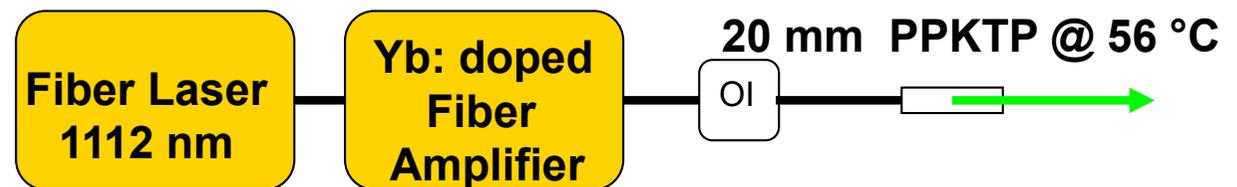


10 mm LBO enhancement cavity

600 mW @ 399 nm from 1 W @ 797.2 nm (Ti:Sa)



556 nm Laser Generation

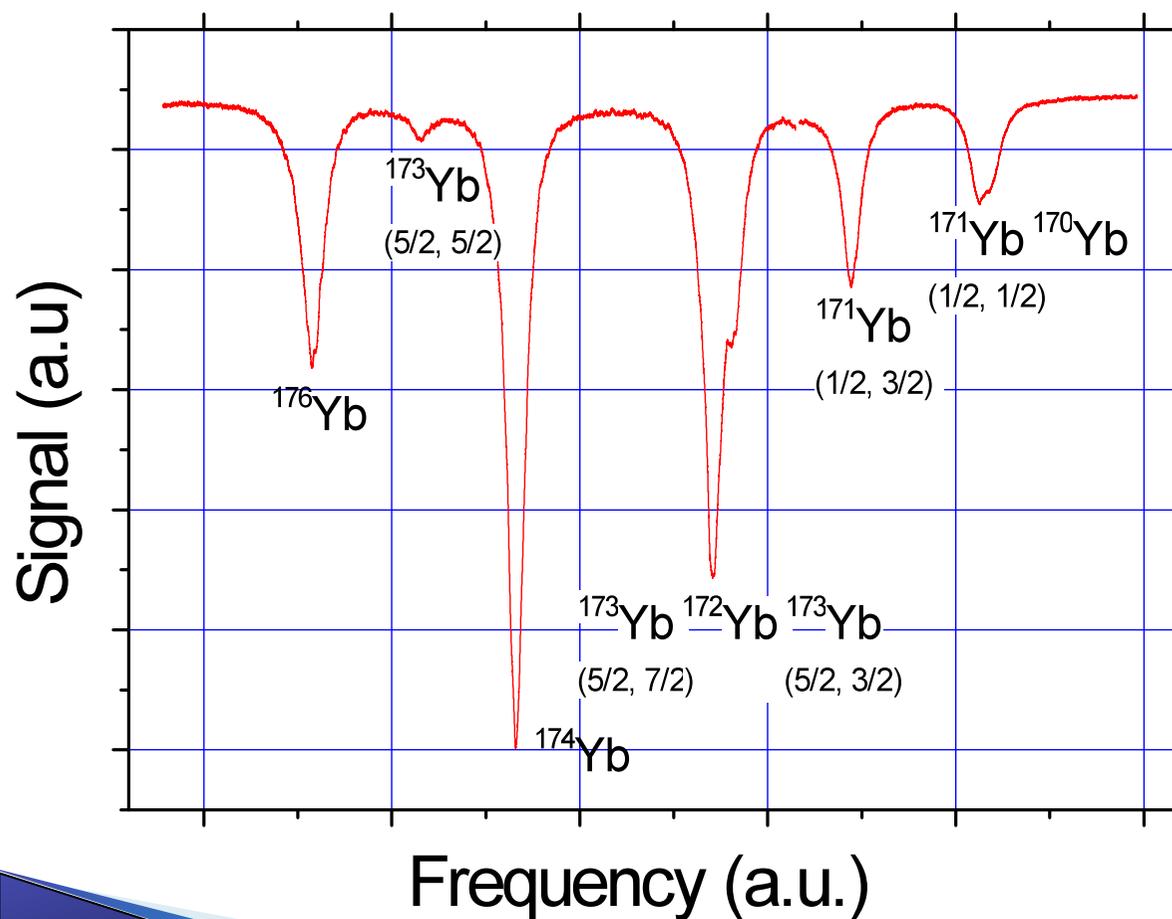


15 mW @ 556 nm from 600 mW @ 1112 nm

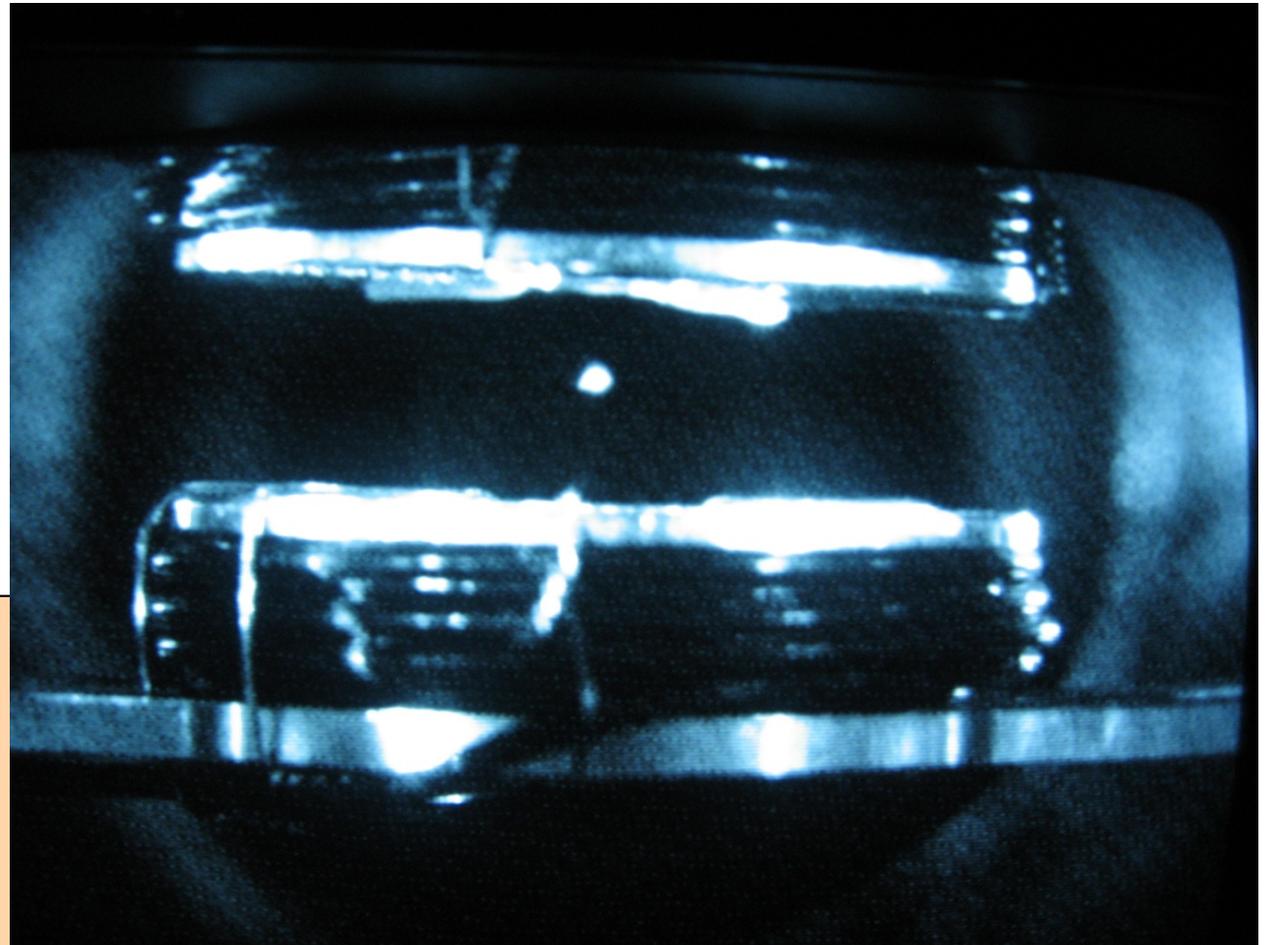
Yb beam spectroscopy

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
174	0.3184	509.4
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 MOT parameters



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

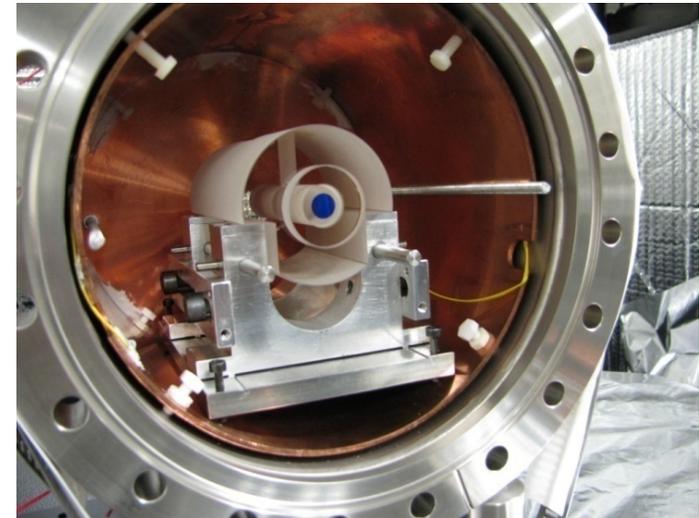
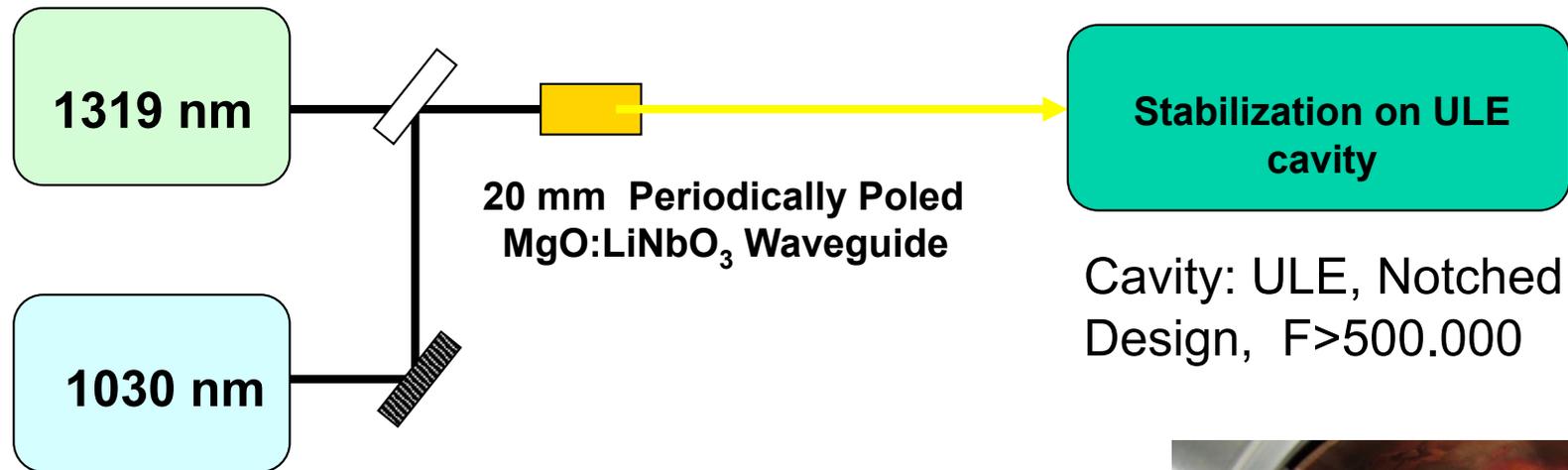
$$I_L \sim 6 \text{ mW/cm}^2$$

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

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

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

Clock Laser Radiation



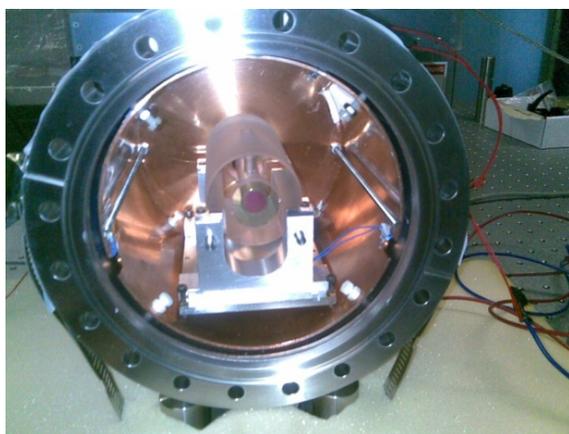
- ✓ up to 12 mW @ 578nm SFG
- ✓ Stabilized on notched ULE cavity
- ✓ Two independent cavities implemented

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 :

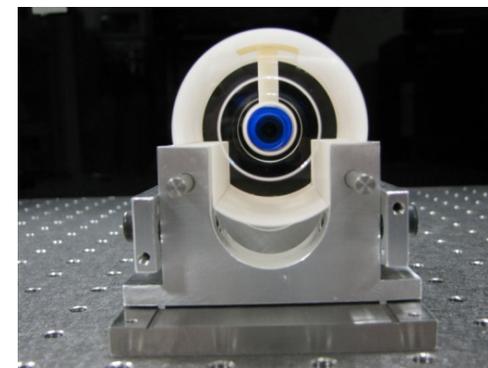
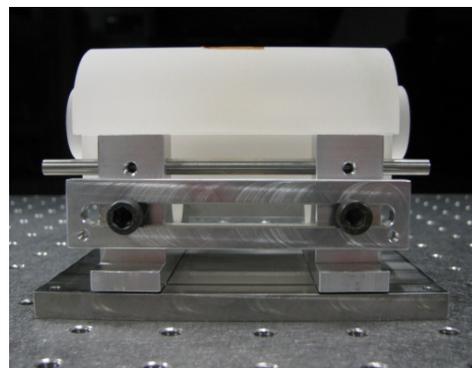
$$\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{\Delta L}{L} \approx 10^{-9} (T - T_C)^2 \Rightarrow \frac{d}{dT} \frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-9} (T - T_C)$$

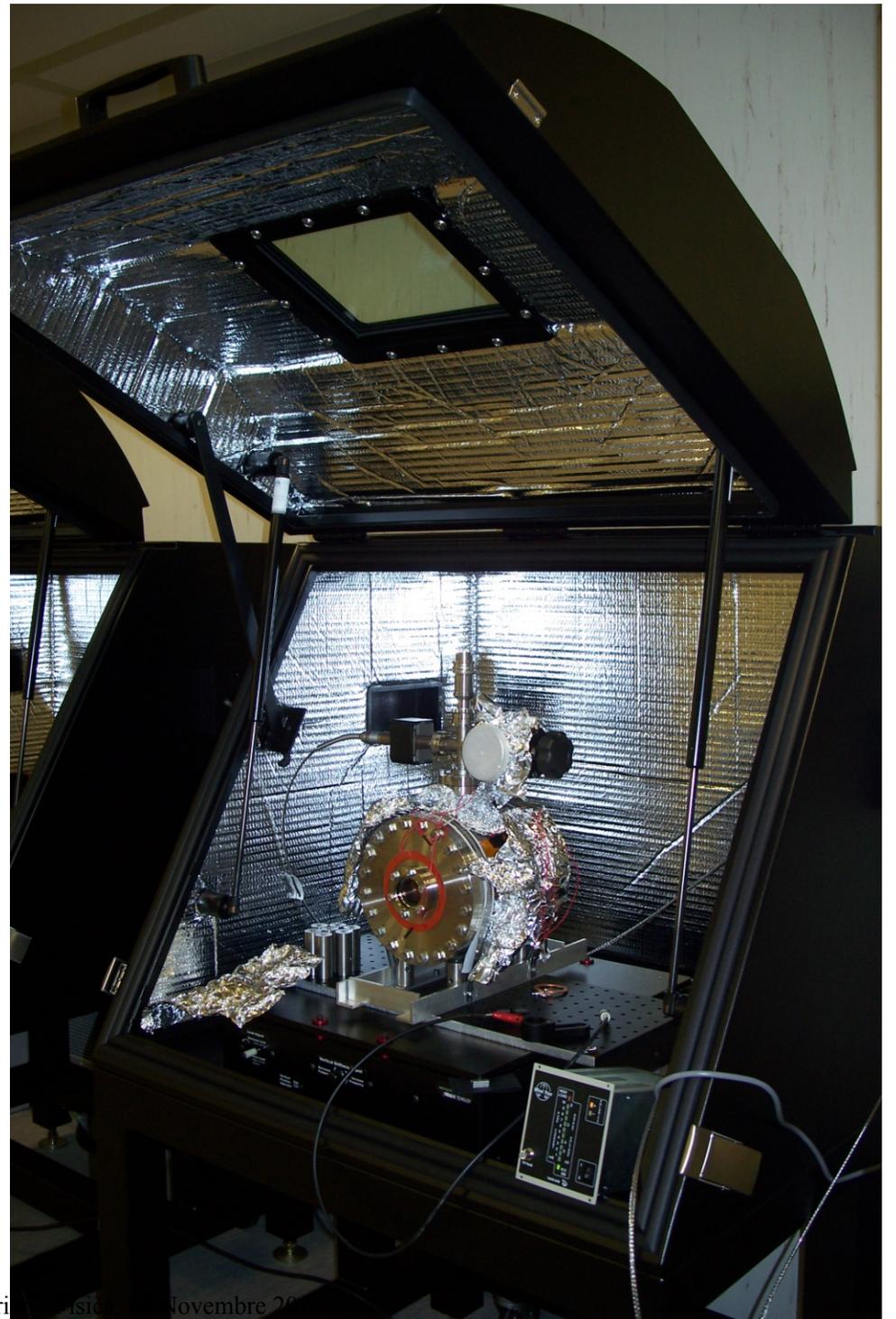
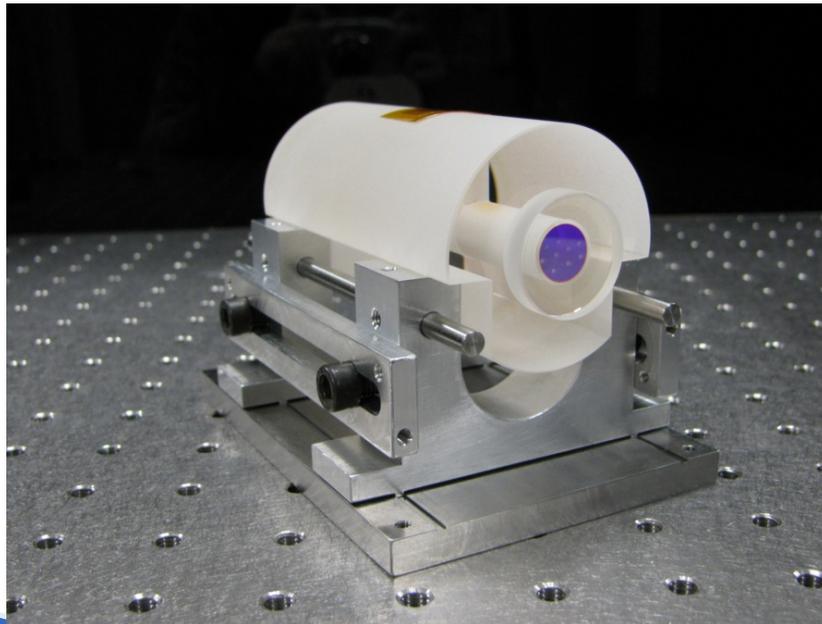
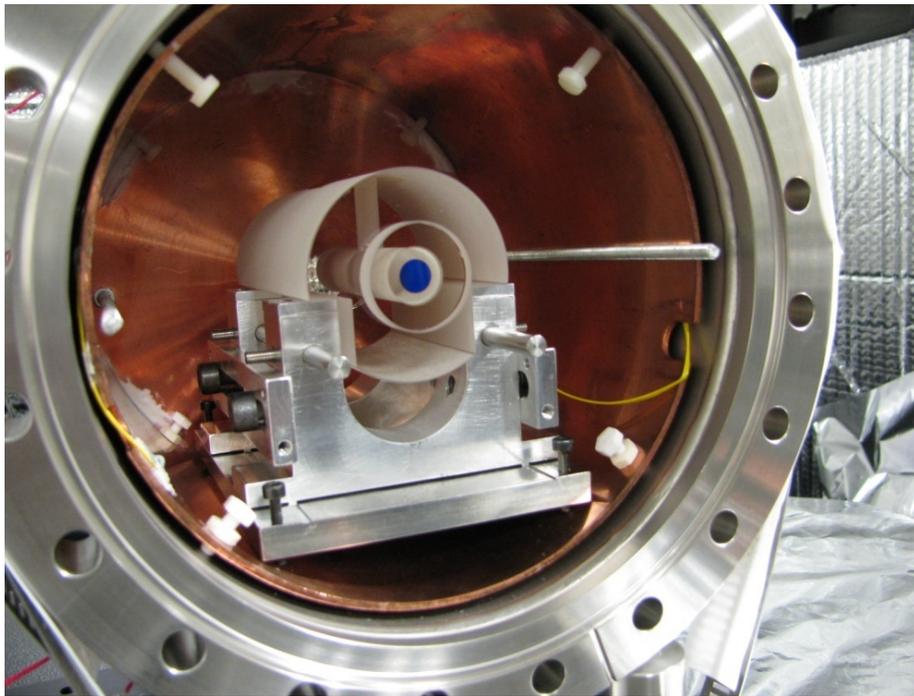
- **Camera sotto vuoto:** $P = 6 \times 10^{-8}$ mbar
- **Rivestimento in Acciaio**
- **Schermo in Rame** separato dal rivestimento mediante viti in ceramica
- **Circuito di controllo** attivo della temperatura

• **Meccanicamente:**

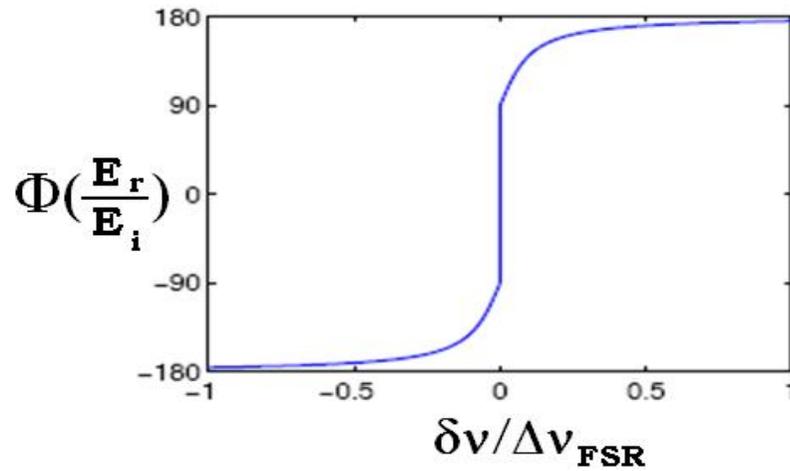
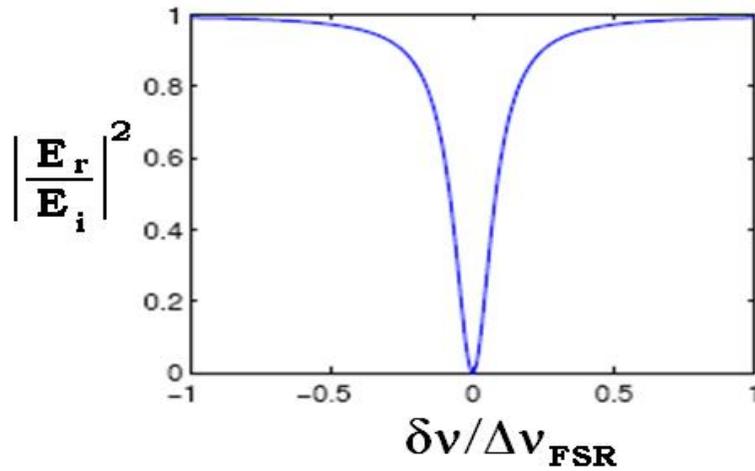
- Il **banco ottico** garantisce uno smorzamento delle vibrazioni a frequenze spettrali > 10 Hz

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

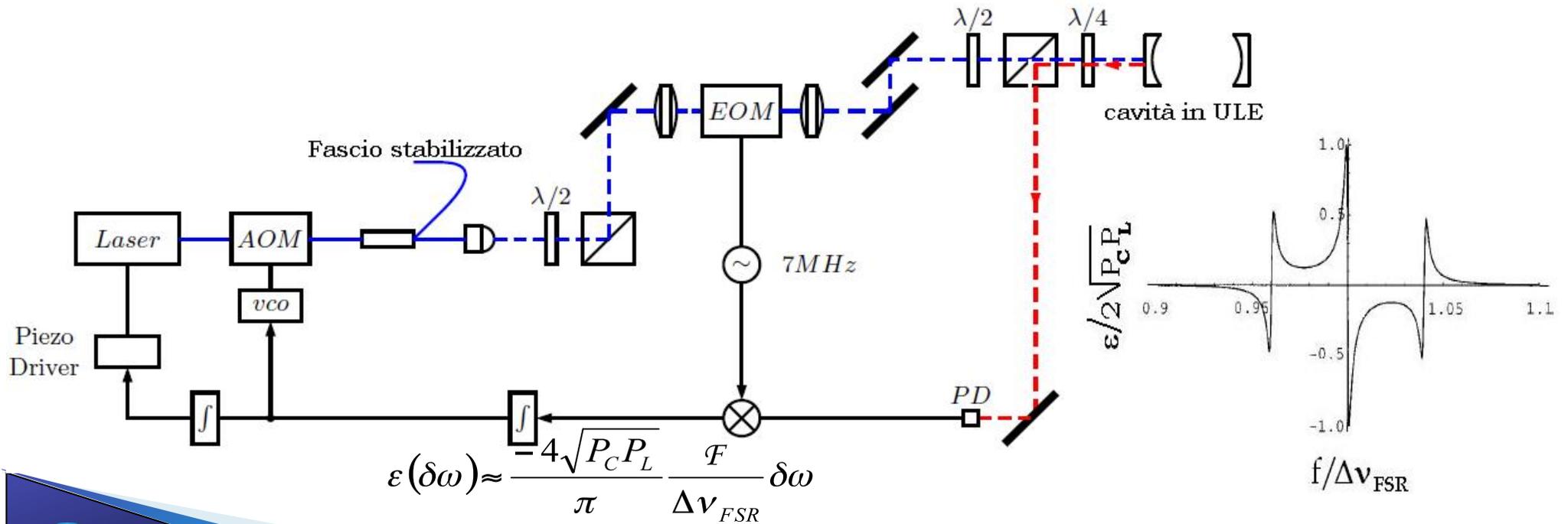




Torino, 15 novembre 2011



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



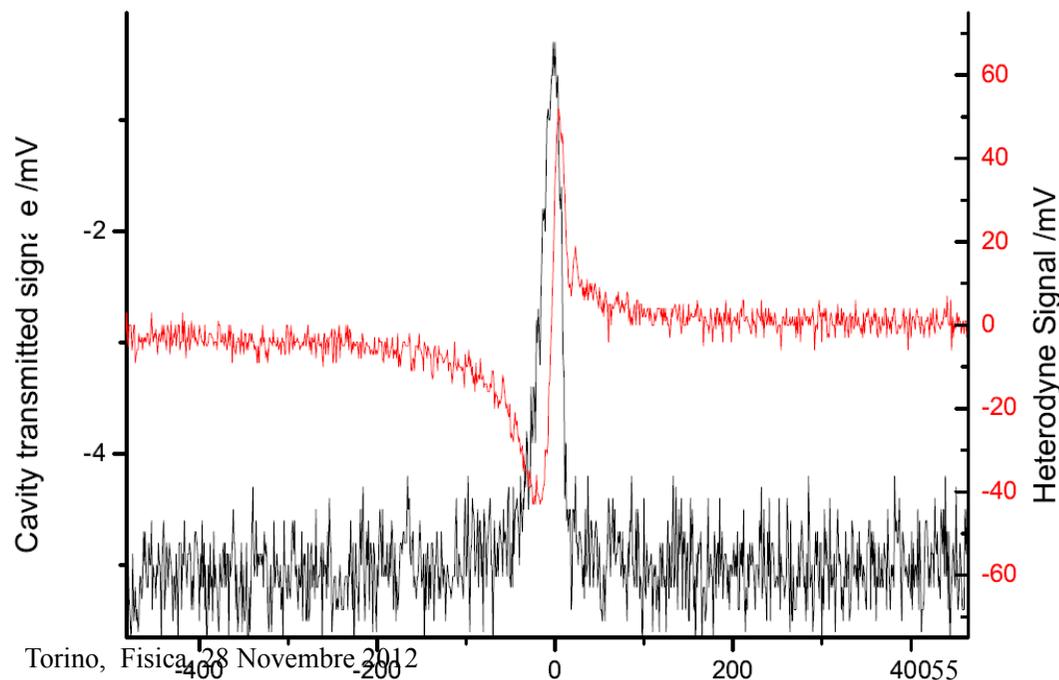
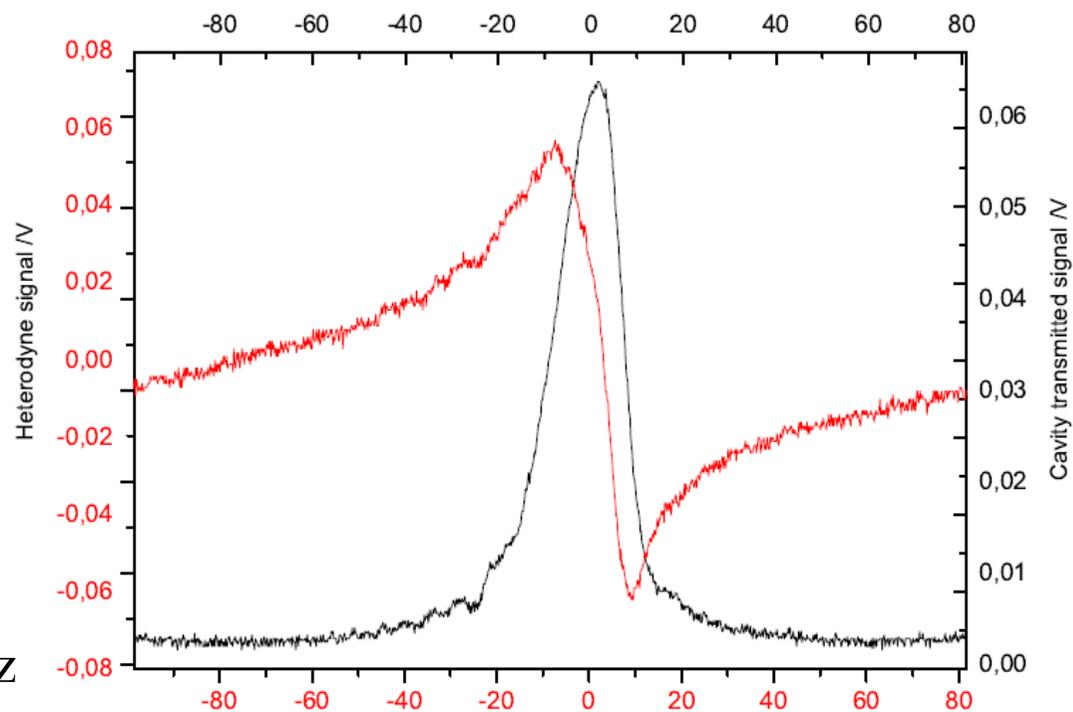
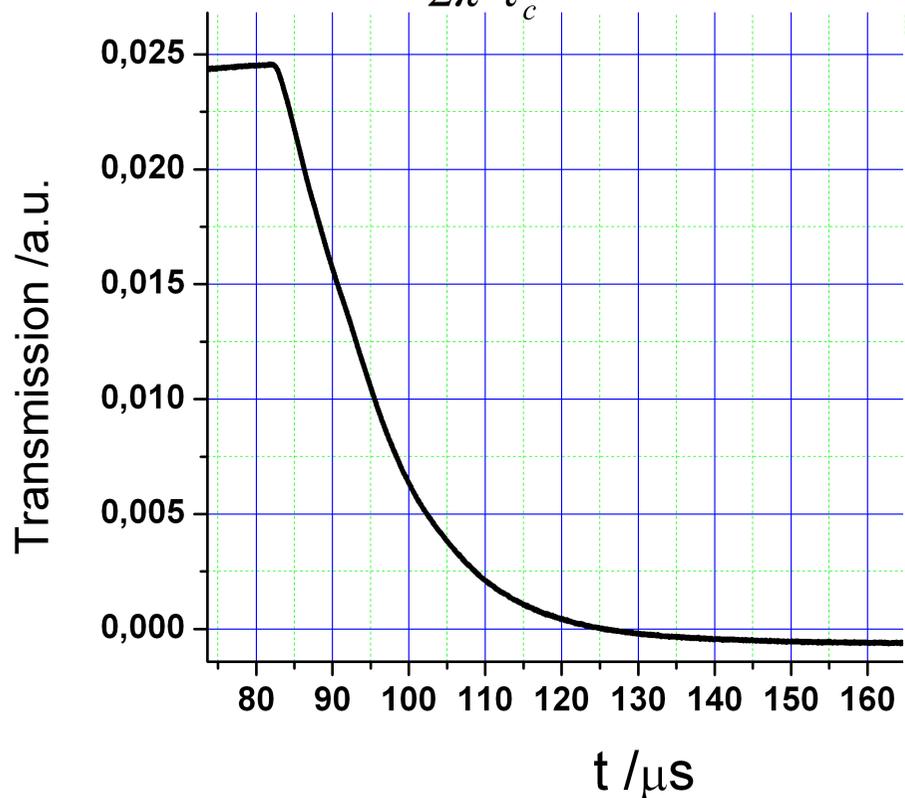
$$Q = 2\pi \frac{E_0}{dE/dt} = \frac{\omega_0}{\Delta\omega} = \omega_0 \tau_c$$

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

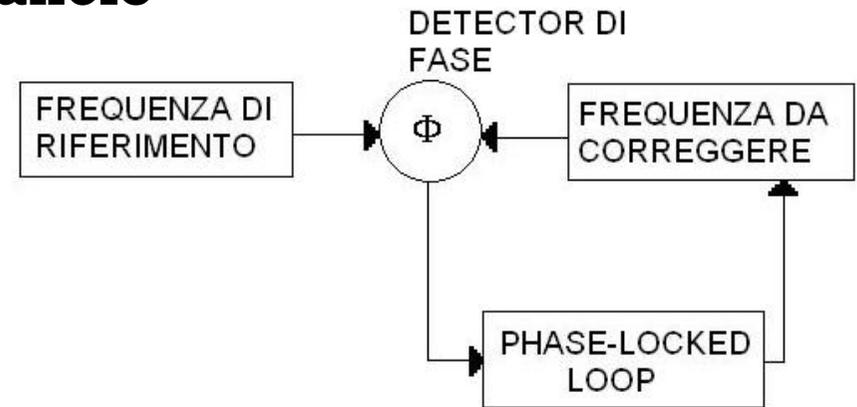
$$Q = (1,59 \pm 0,01) \times 10^{10}$$

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

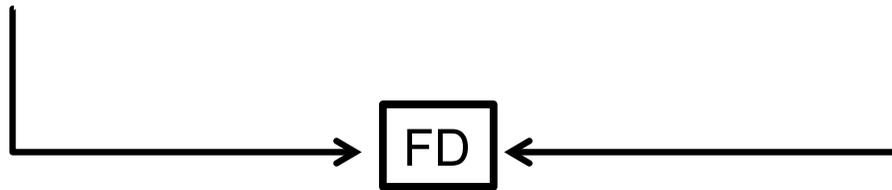
$$\Delta\nu = \frac{1}{2\pi} \frac{1}{\tau_c} = (12,3 \pm 0,1) \text{ kHz}$$



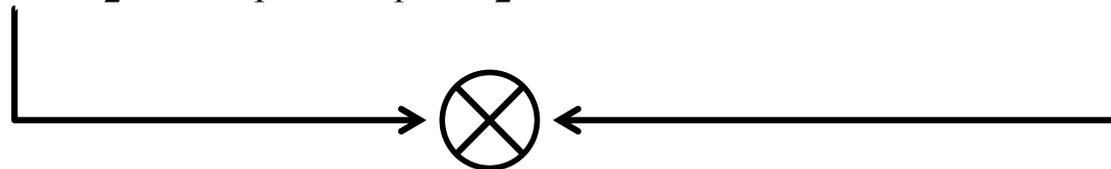
Il Phase Locked Loop (PLL) per l'aggancio



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



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



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

Perché

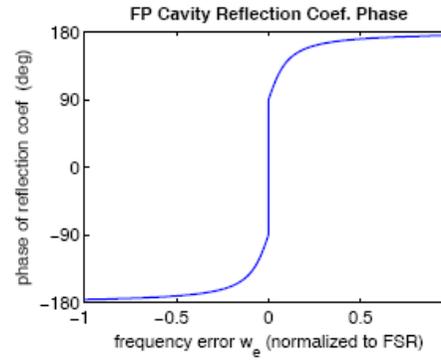
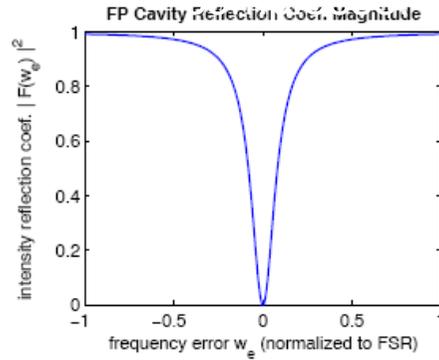
$V_M \propto [\phi_F - \phi_R]$, occorre che¹

$$\phi_F - \phi_R \approx \frac{\pi}{2}$$

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

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

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



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

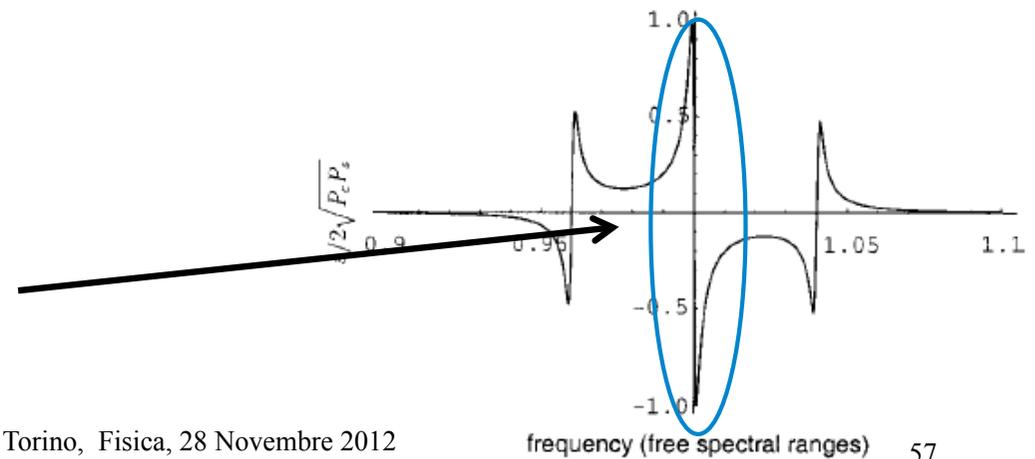
$$E_i = E_{0,i} e^{i(\omega t + \beta \sin \Omega t)} \approx E_0 [J_0(\beta) e^{i\omega t} + J_1(\beta) e^{i(\omega + \Omega)t} - J_1(\beta) e^{i(\omega - \Omega)t}]$$

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

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

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

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

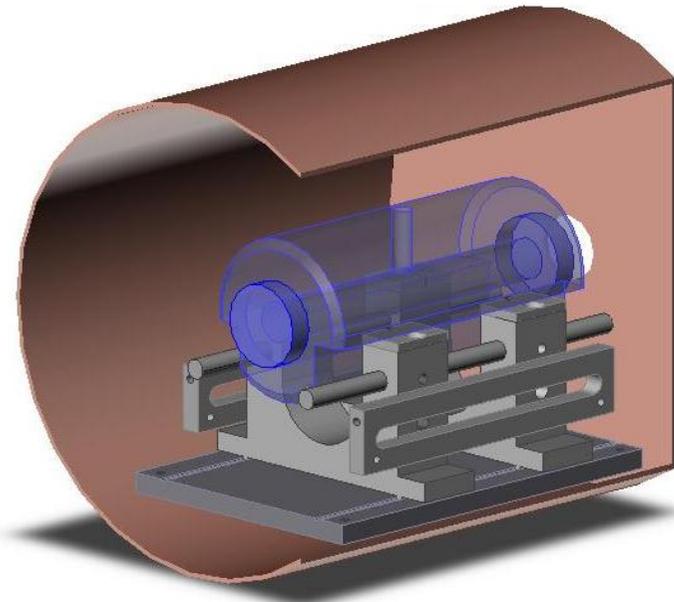
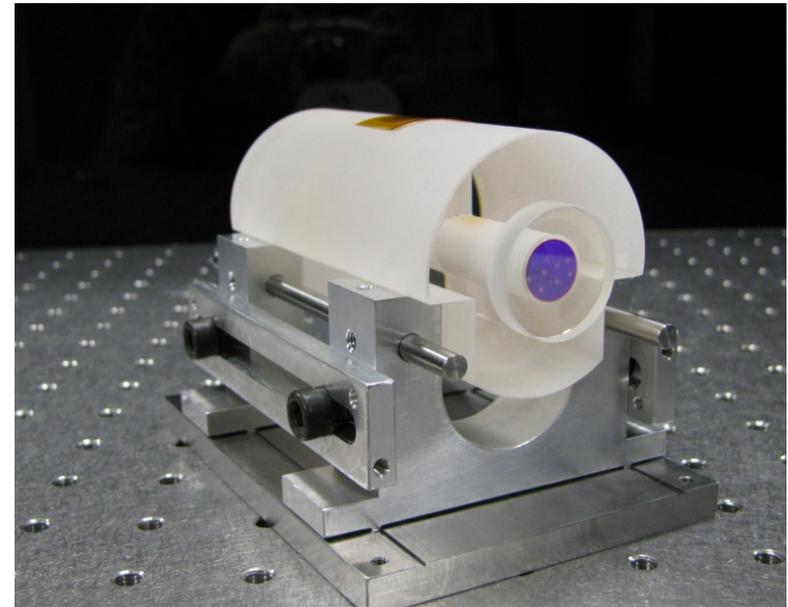


Reference Cavity Physical Package at INRIM

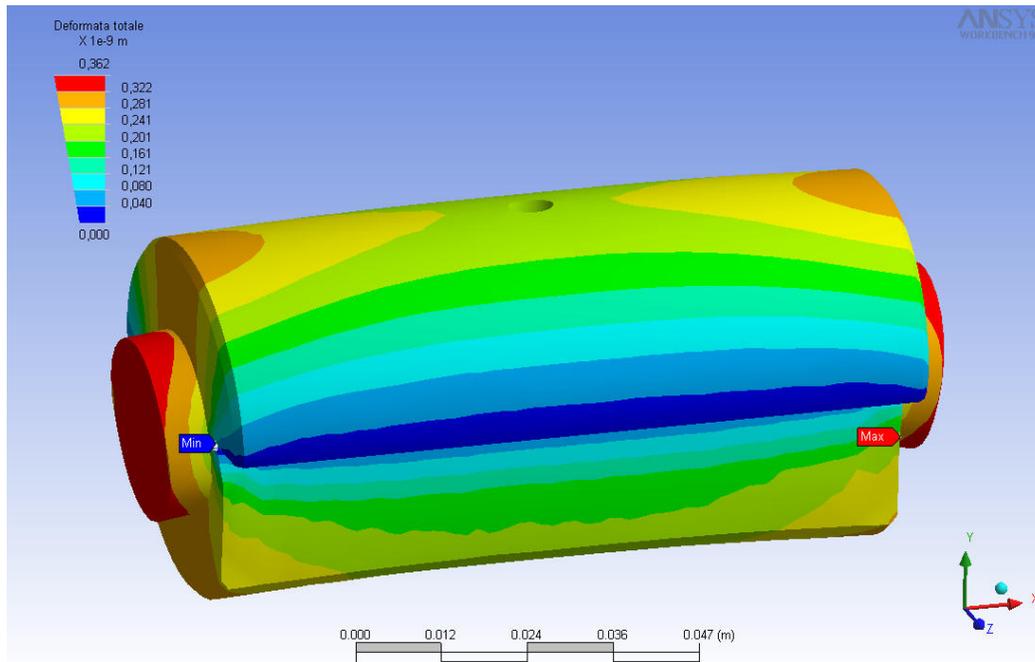
- Frequency stabilized with the Pound-Drever-Hall method against a stable Fabry-Pérot cavity
- The spacer is made in Corning Ultra Low Expansion Glass (ULE)
- FSR $\Delta\nu_{\text{FSR}} = 1.5 \text{ GHz}$
finesse $\mathcal{F} = 151\,000 \pm 1000$
linewidth $\Delta\nu = (9.93 \pm 0.06) \text{ kHz}$

Length 100 mm
Measured Zero CTE 21.5°C

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



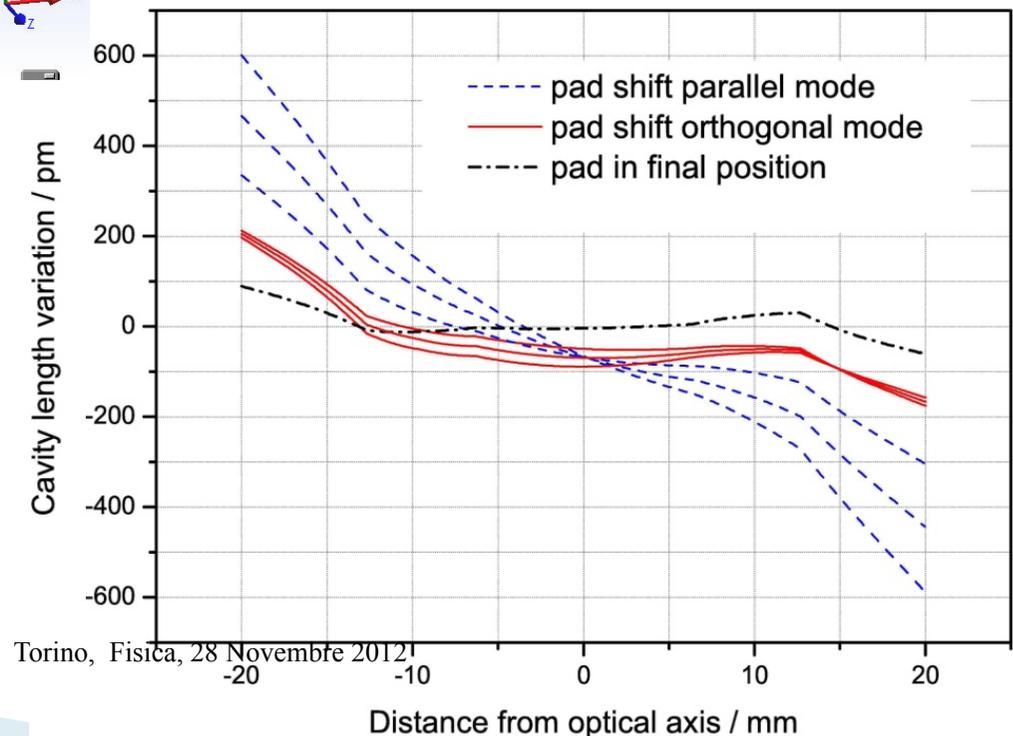
FEM Modelling



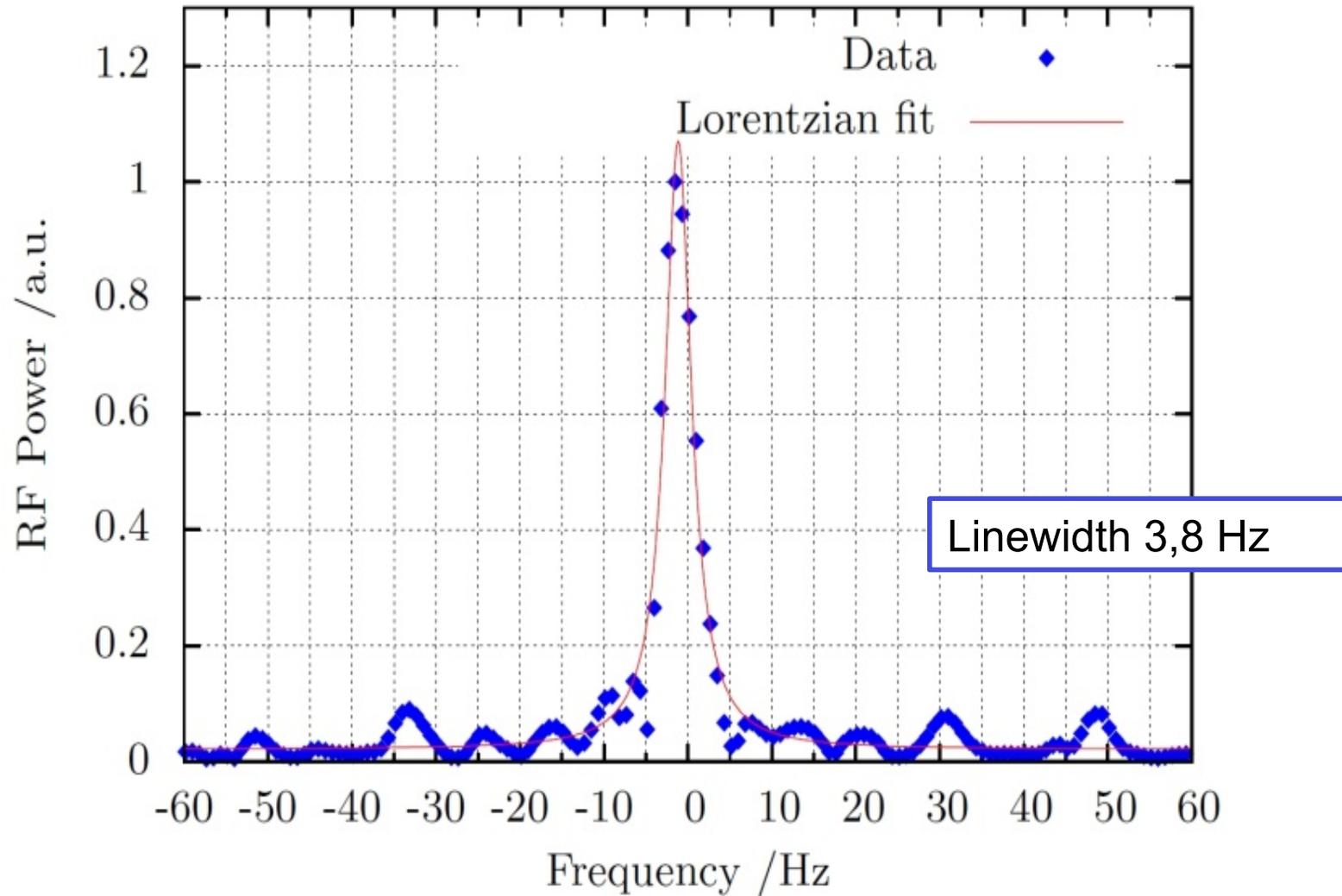
Cylindrical Notched Cavity,
 $L = 100 \text{ mm}$
 $D = 50 \text{ mm}$

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 $2 \times 2 \text{ mm}^2$ placed at 1,9 cm from the internal face of the mirror and 2 mm from the internal surface of the ULE spacer.



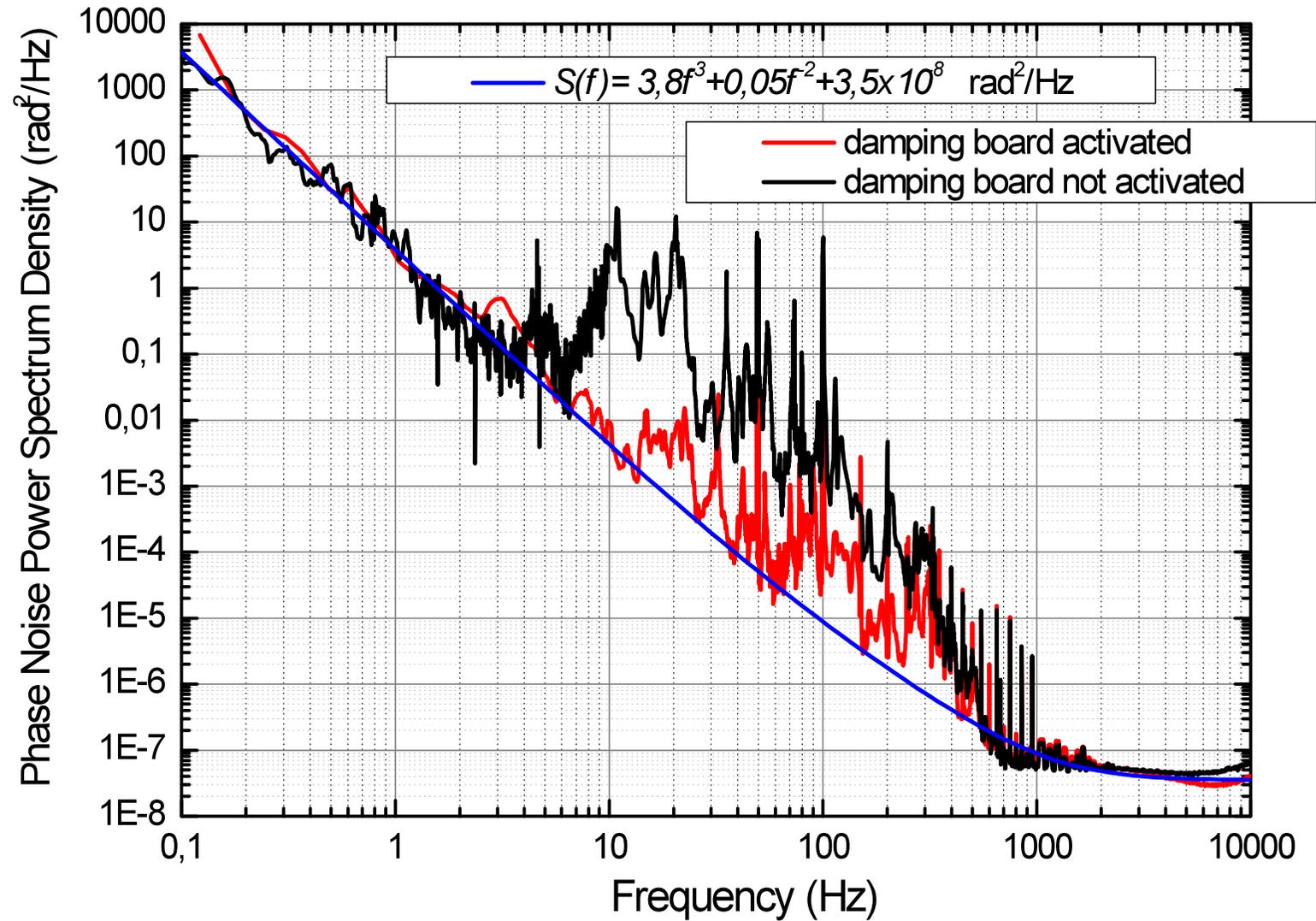
Beat Note – Two Independent locked 578 nm Laser



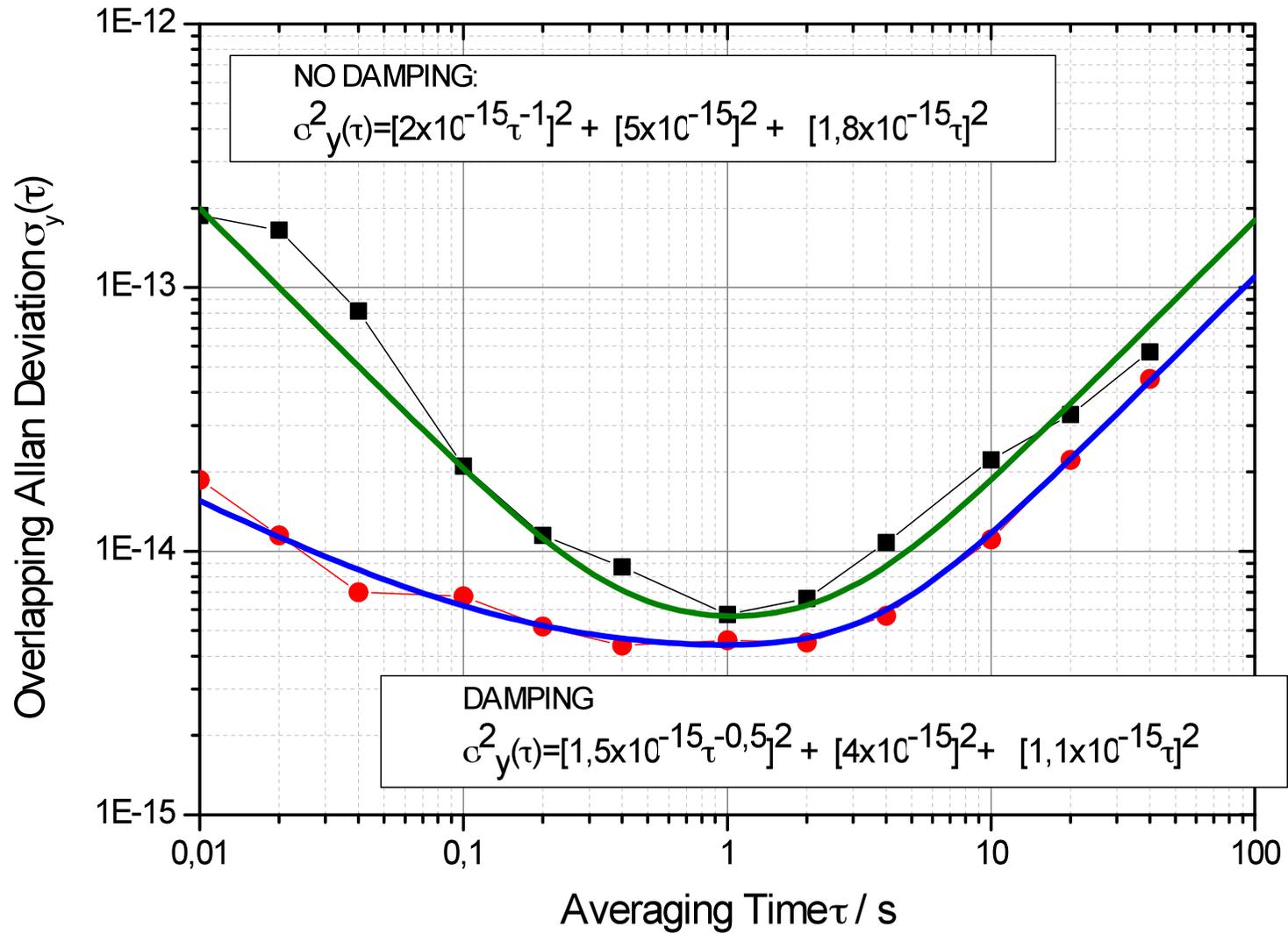
M.Pizzoccaro et al. Tbp on IEEE-UFFC

Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

Two Independent locked 578 nm Laser



Two Independent locked 578 nm Laser



Upgrading the Reference Cavity

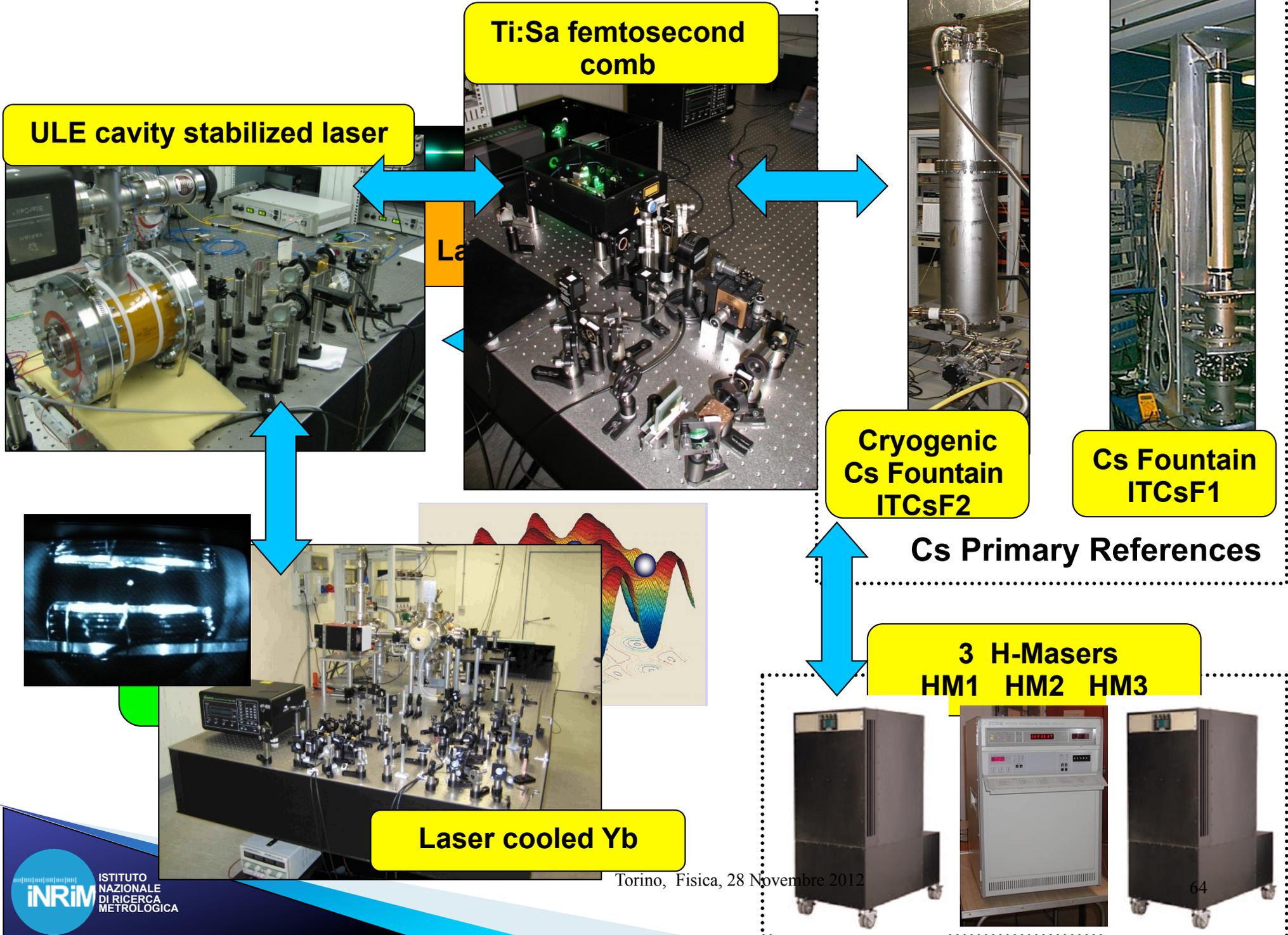
Targets:

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

Portability: lower weight and power consumption

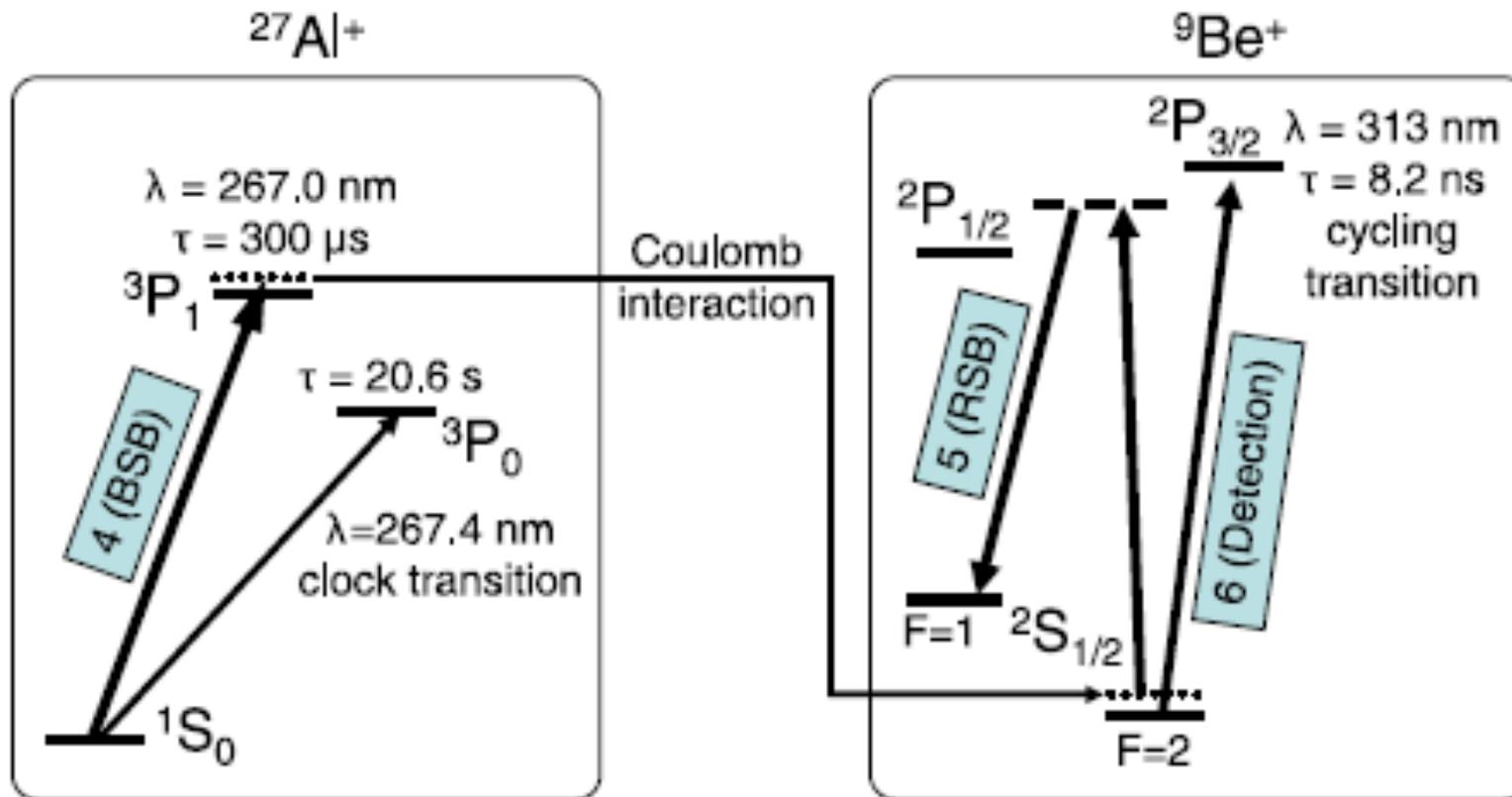
Actions:

- 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	0.3
Polarizzabilità del Reticolo	0.4	0.3-1
Iperpolarizzabilità	3.3	0.5
Densità	-16.1	0.1
Zeeman 1st	0.4	0.4
Zeeman 2nd	-1.67	0.1
Altro	-	0.2
Totale	-38.7	0.8-1.5

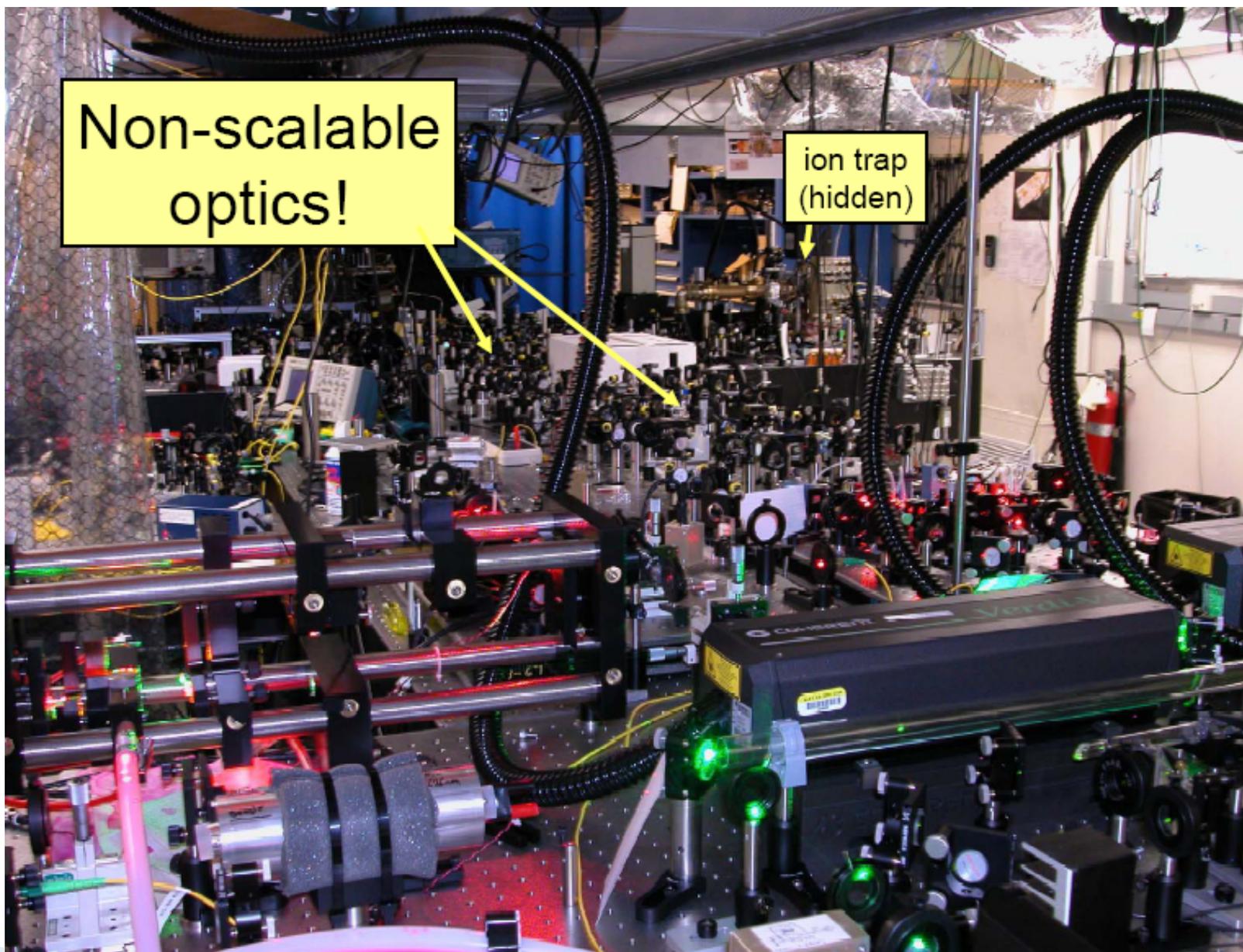
Driving the actual $\text{Al}^+ \ ^1\text{S}_0 - ^3\text{P}_0$ clock transition with quantum logic



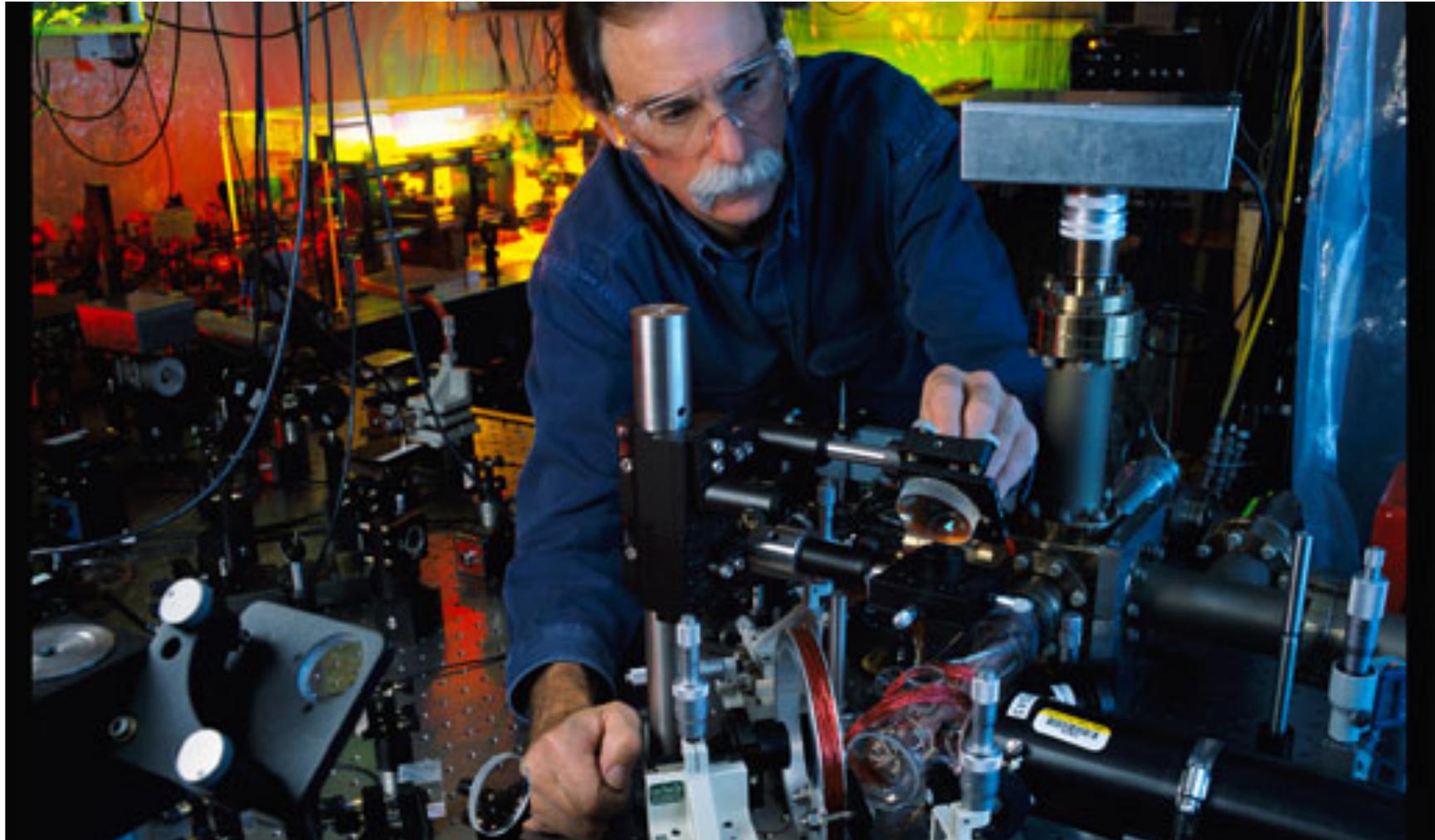
Read-out of the Al^+ clock state by mapping back onto Be^+ ion via entanglement

Rosenband et al. Phys Rev Lett **98** 220801 (2007)

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

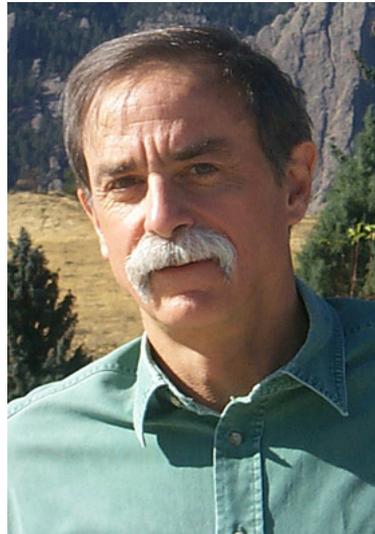


D. J. Wineland:
Laser cooling, Quantum computing, Logic Ion Al⁺ optical clock



A Nobel Gallery/5

2012



David J. Wineland and Serge Haroche

"for ground-breaking experimental methods that enable measuring and manipulation of individual quantum systems"

Bias	Al+ Clock shift $\times 10^{-18}$	incertezza $\times 10^{-18}$
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	-1118×10^{-18}	9×10^{-18}

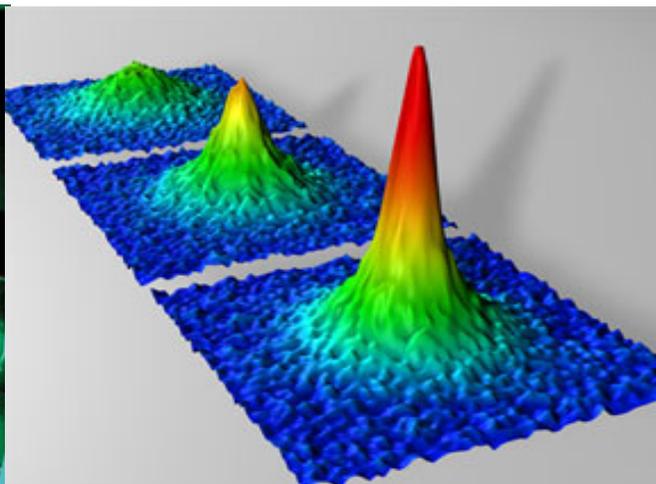
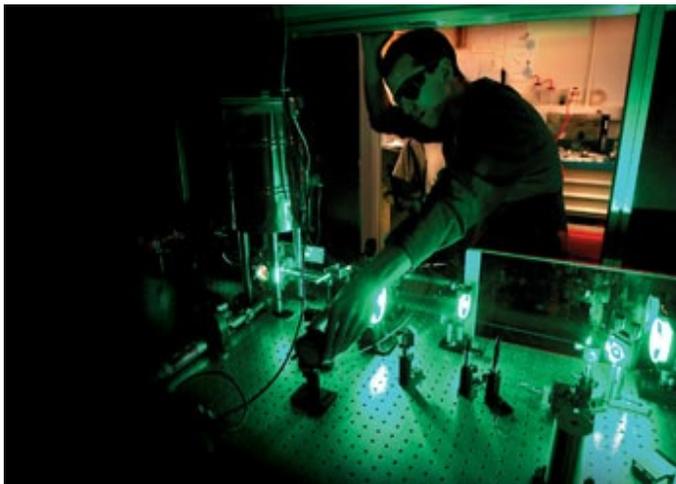
So how good are optical clocks right now?

Reported uncertainty

Al ⁺ ion quantum logic clock:	9×10^{-18}
Hg ⁺ ion cryogenic ion clock:	2×10^{-17}
Sr ⁺ ion quadrupole clock:	2.1×10^{-17}
Yb ⁺ ion octupole clock:	7×10^{-17}
Sr neutral lattice clock:	1.5×10^{-16}
Yb neutral lattice clock:	1.5×10^{-16}

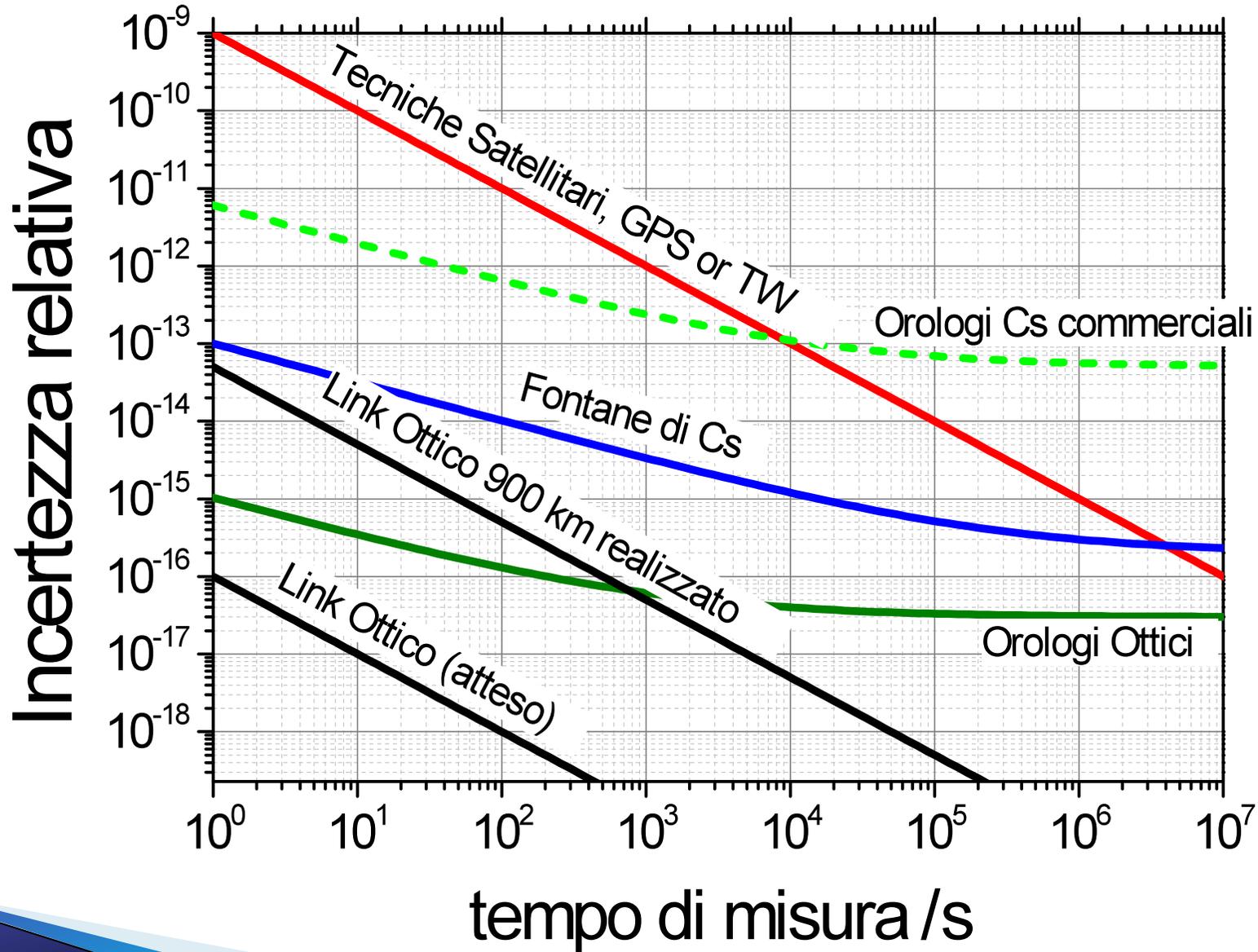
Cs fountain clock systematic unc: 2×10^{-16} (best)

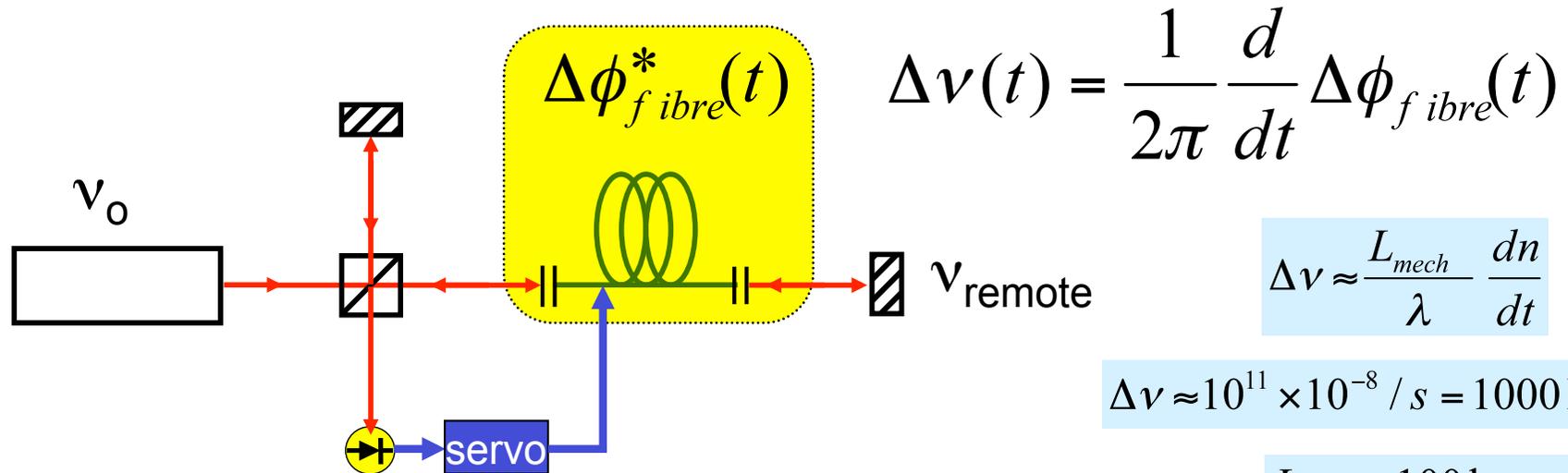
But its work in progress & other systems under evaluation.....



LINK E CONFRONTI IN FIBRA OTTICA

Prestazioni del Link Ottico





$$\Delta \nu \approx \frac{L_{mech}}{\lambda} \frac{dn}{dt}$$

$$\Delta \nu \approx 10^{11} \times 10^{-8} / s = 1000 \text{ Hz}$$

$$L_{mech} = 100 \text{ km}$$

$$\lambda = 1.5 \mu\text{m}$$

$$n = 1.47$$

$$\frac{1}{n} \frac{dn}{dT} \approx 10^{-5} / \text{K}$$

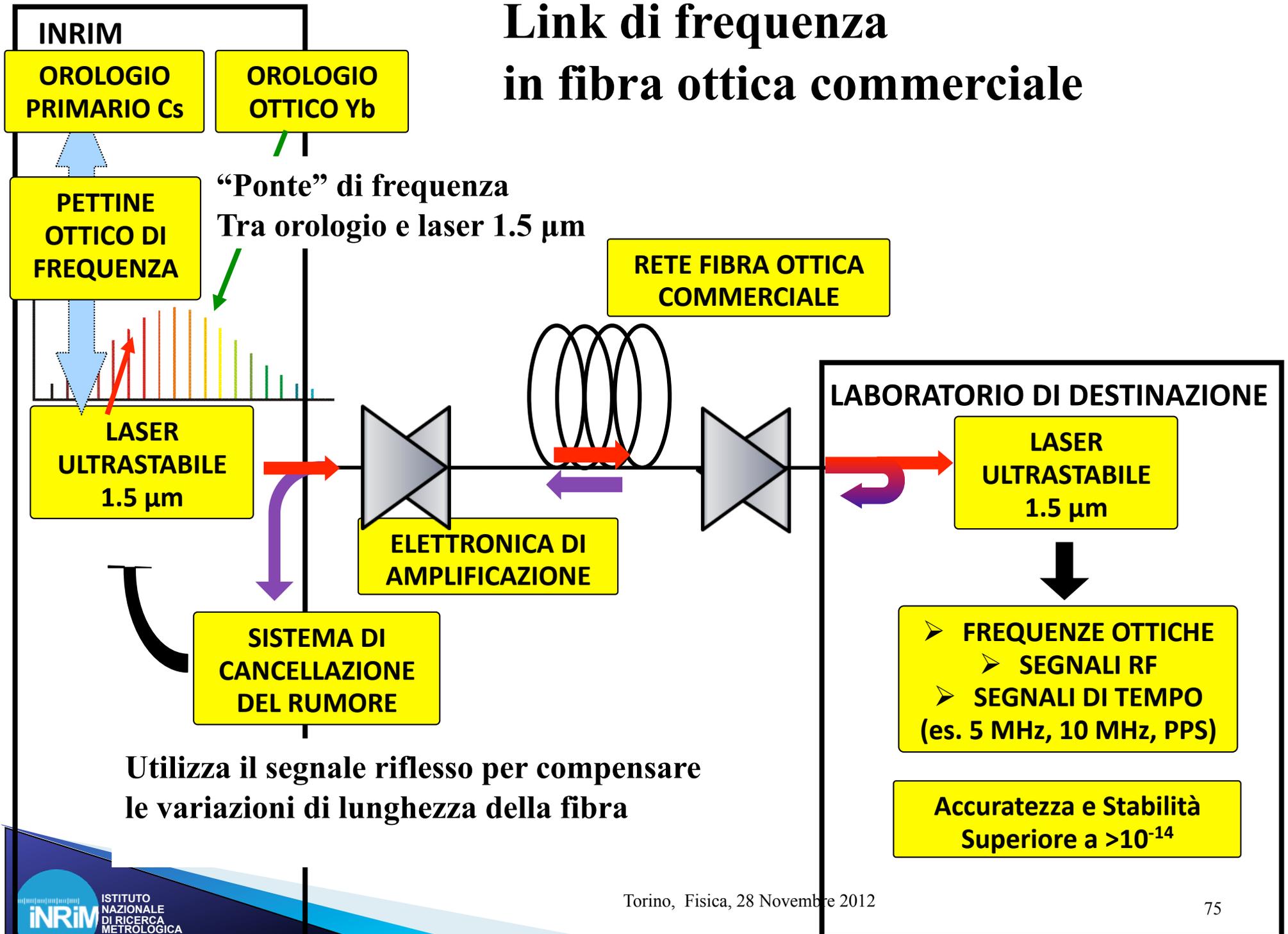
$$dT / dt \approx 1 \text{ mK} / \text{s}$$

$$\Delta \nu(t) = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \Delta \phi_{fibre}^*(t) = 0$$

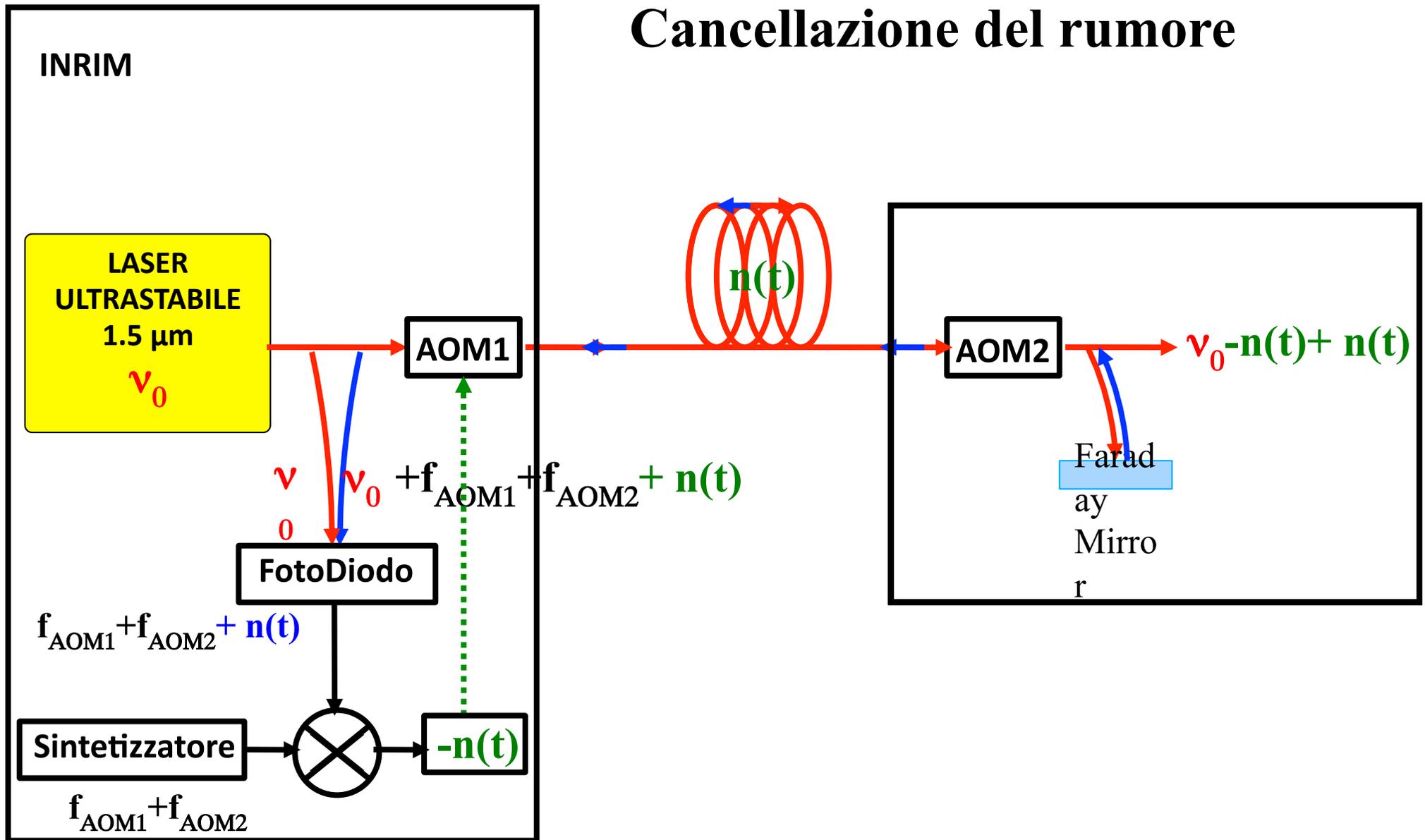
- acousto-optic modulator (AOM) at input
- short (2m... to a few km) fibre links based on optical carrier are routinely used in many metrology labs with $\ll 10^{-16}$ resolution

Similar idea:
LS Ma, et al. Opt.Lett. 1777 (1994);

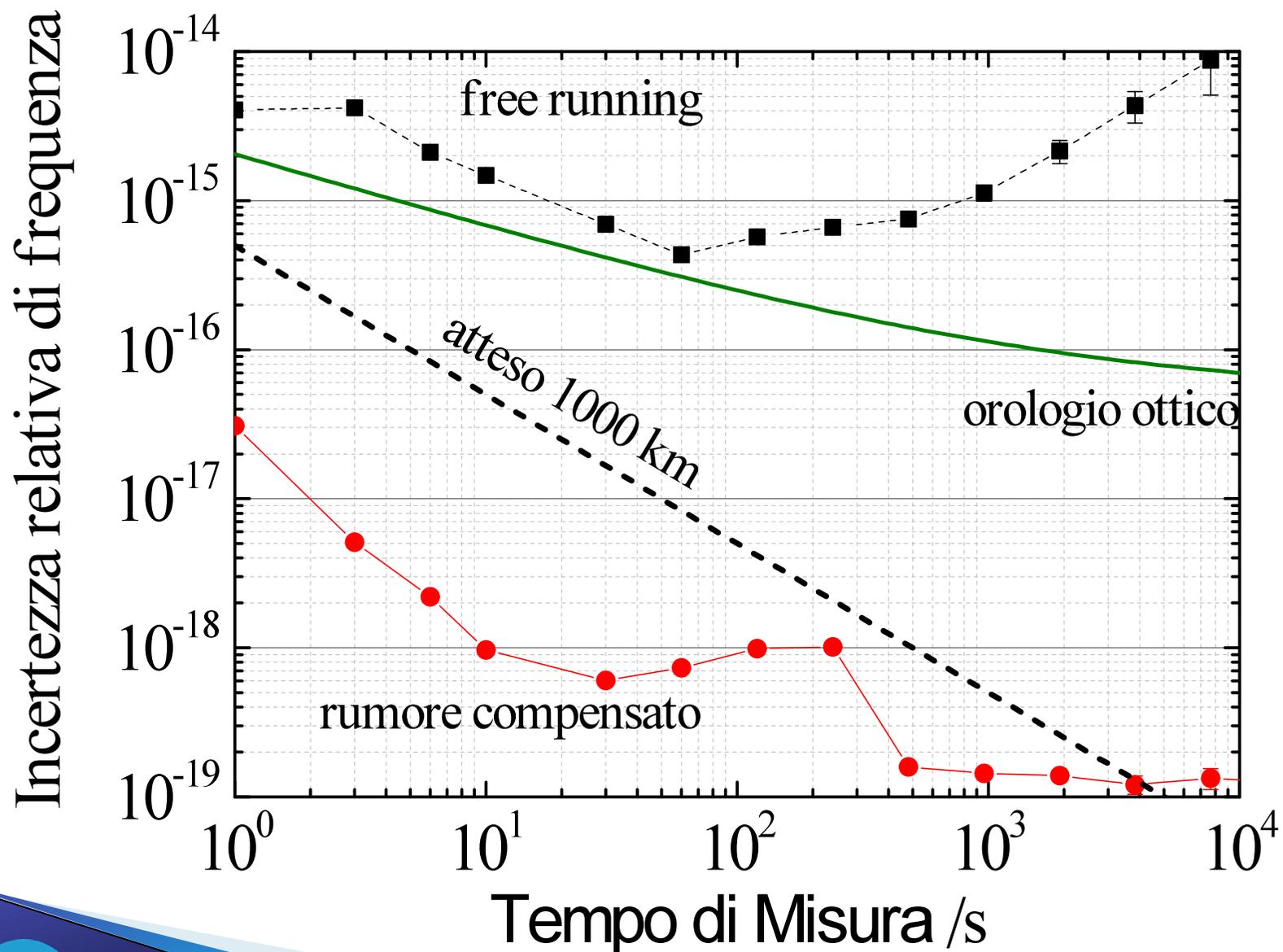
Link di frequenza in fibra ottica commerciale



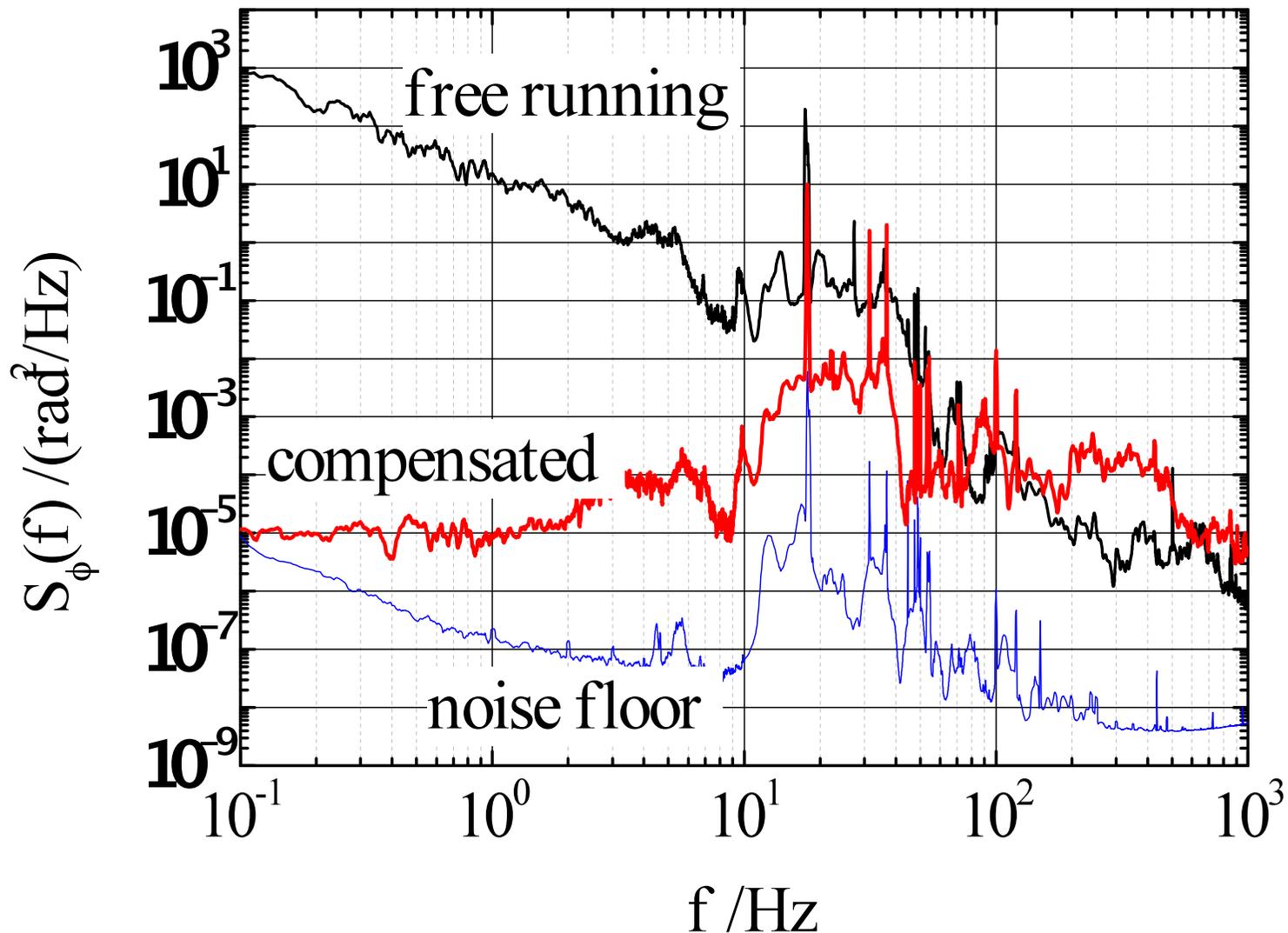
Cancellazione del rumore



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



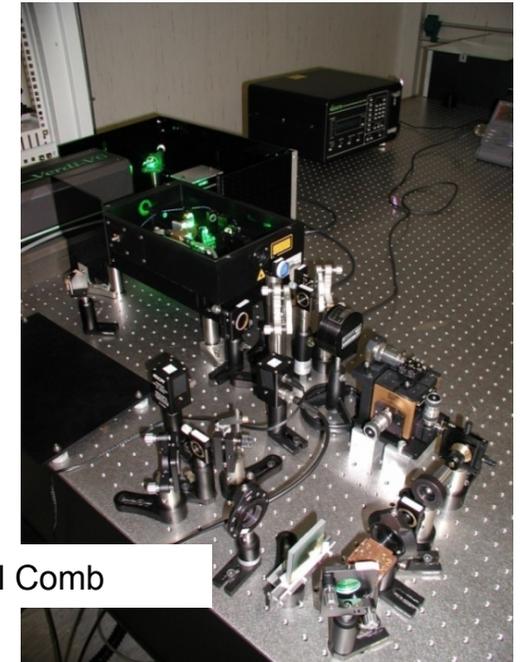
Phase Noise of the Optical Link (100 km indoor)



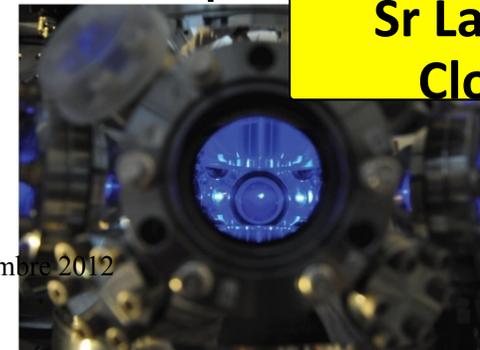
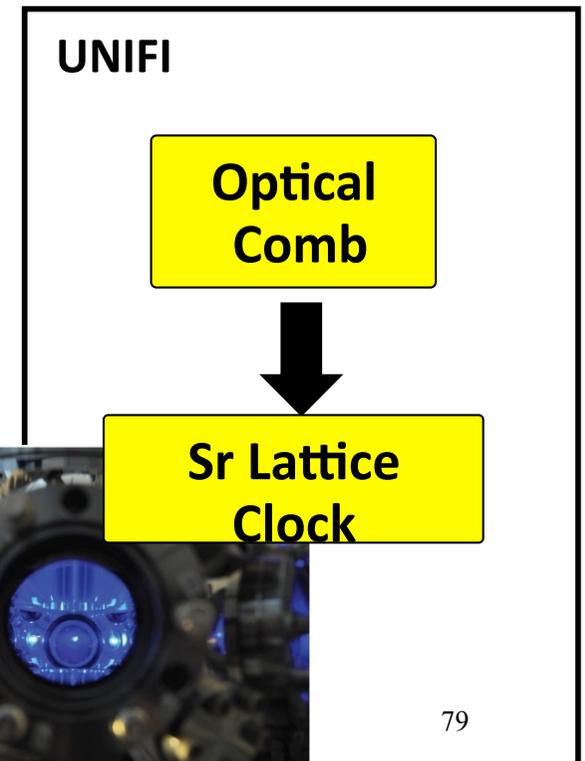
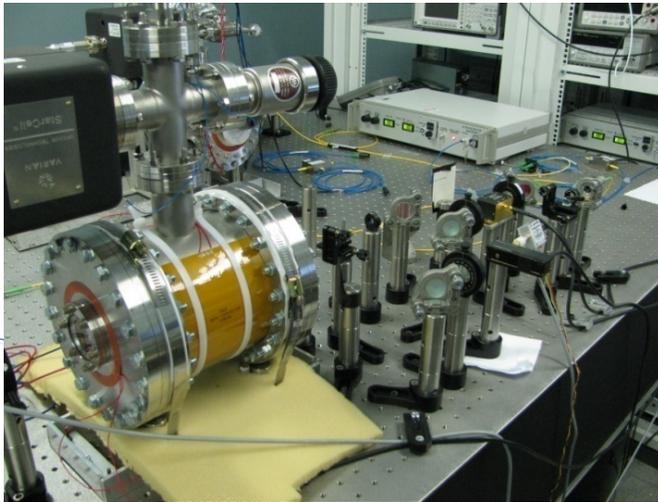
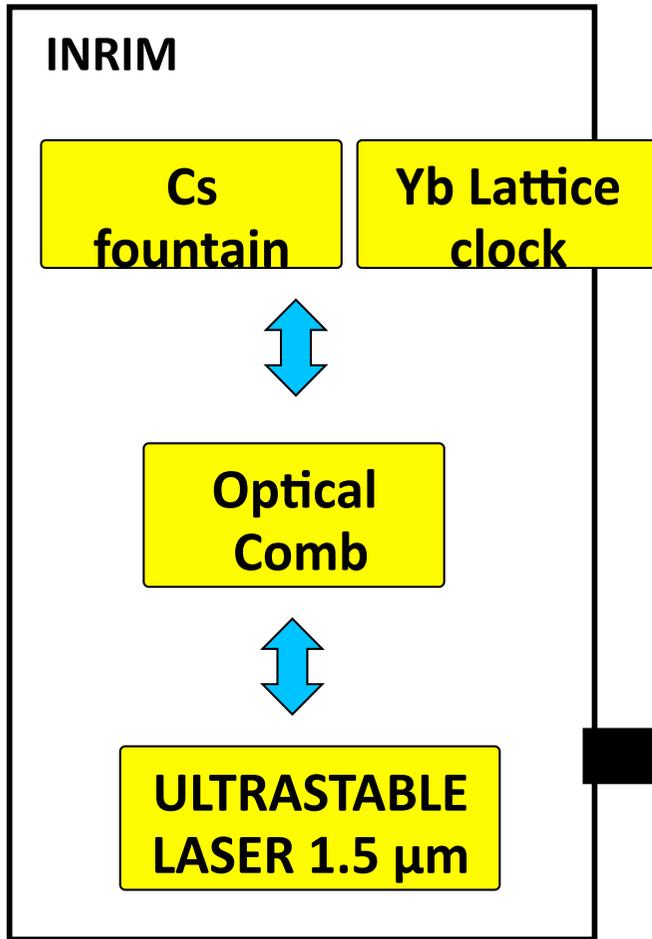
C. Clivati et al. To be published on IEEE UFFC

Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

PRIN: Optical Link Comparison Torino-Firenze



Optical Comb

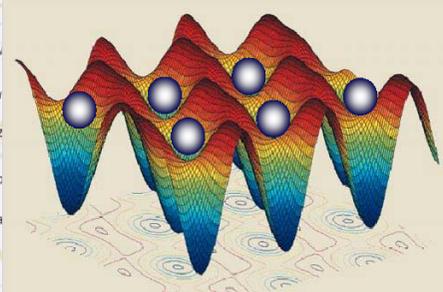




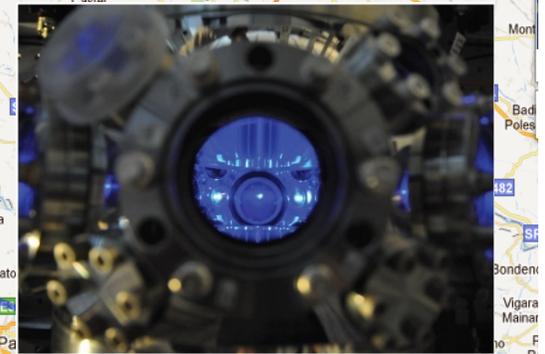
Ministero dell'Istruzione
dell'Università e Ricerca

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

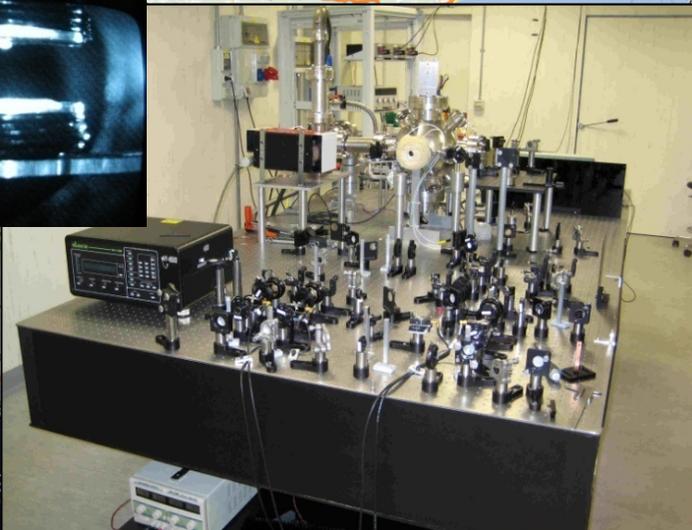
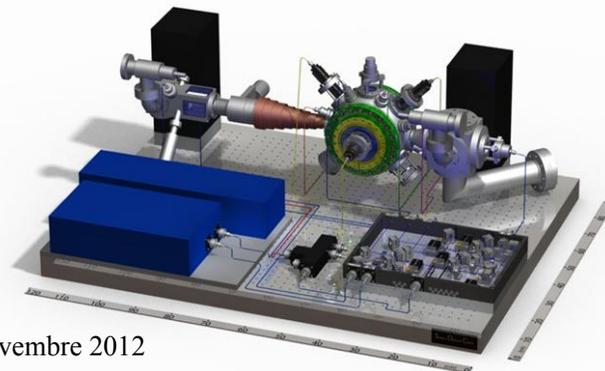
**TORINO, INRIM
2 Cs Fountains
Yb clock**



Optical Fiber link



**FIRENZE, UNIFI-LENS
Sr Clock**



Torino, Fisica, 28 Novembre 2012



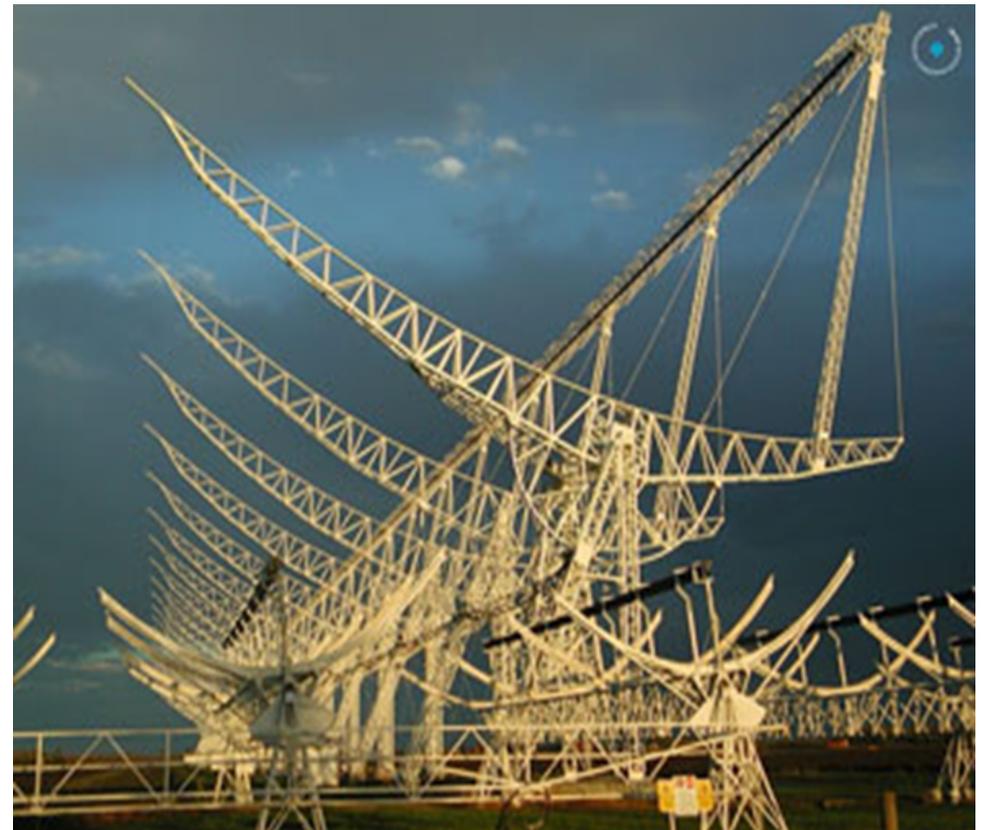
LIFT: Link Italiano per la Frequenza e il Tempo (dal 2013-2014)

LIFT



The Medicina Observatory hosts both a 32 meter dish for Very Long_Baseline Interferometry (VLBI) and a 20'000 m² collecting area for Pulsar research:

- needs accurate timing for VLBI, now also in real time VLBI, by 1Gb/s fiber.
- needs Frequency dissemination at 10⁻¹⁵ level for Pulsar monitoring_on long and very long time scales.
- offers T&F cross checks by direct comparisons with Pulsar and_Quasar, now defining the best possible inertial frame of reference



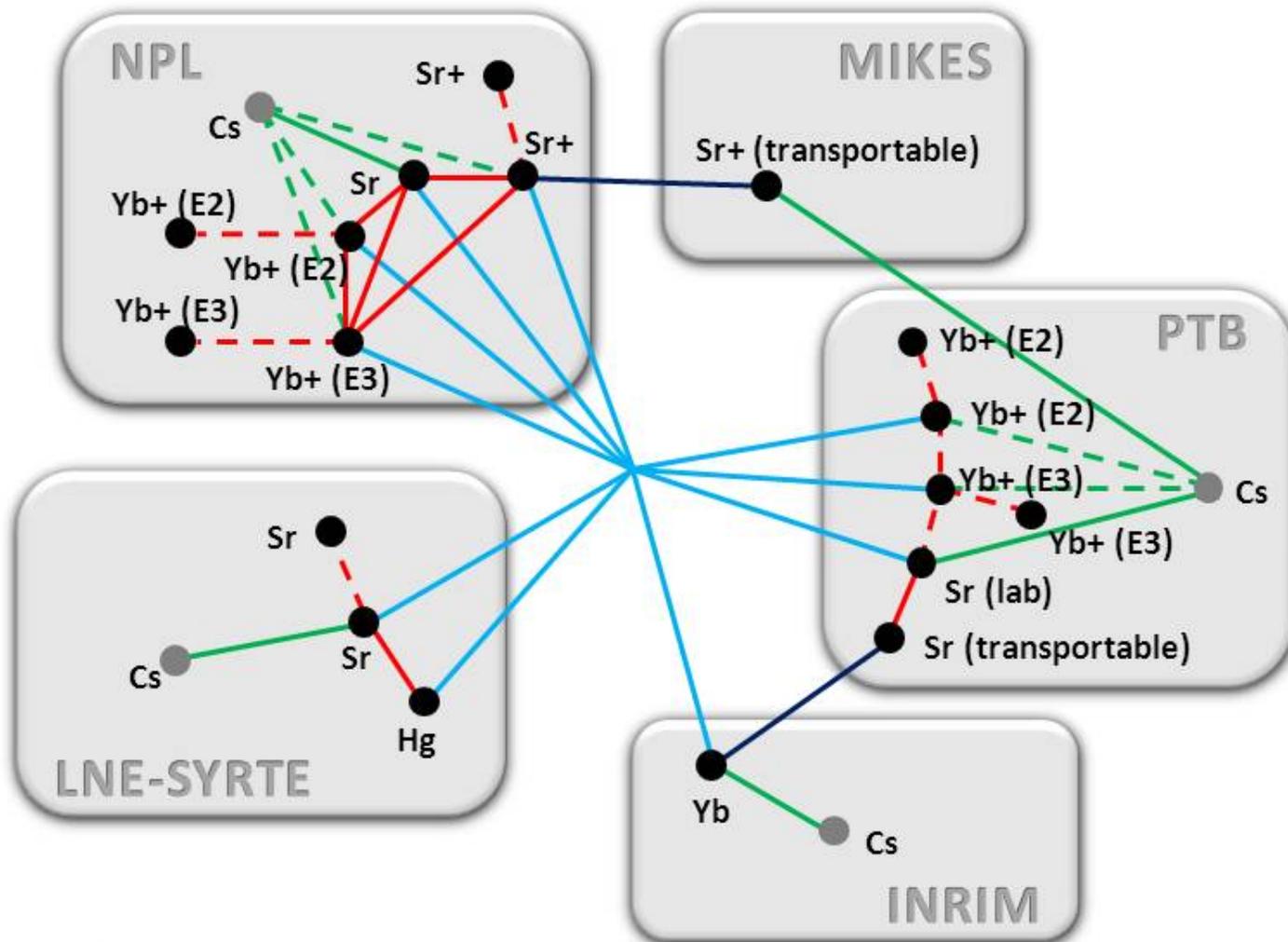
Euro-Fibre network evolving for high-accuracy frequency transfer



900 km dark fibre link between PTB and MPQ



- A pair of 900 km dark fibers
- Attenuation $> -200\text{dB}$
- 8 Container stations for
 1. Amplification
 2. Fiber Stabilization
- An optical communication channel allows for remote access to the EDFAs



- Local optical frequency comparisons
- Frequency comparisons using transportable optical clocks
- Optical frequency comparisons using broad bandwidth TWSTFT
- Absolute frequency measurements

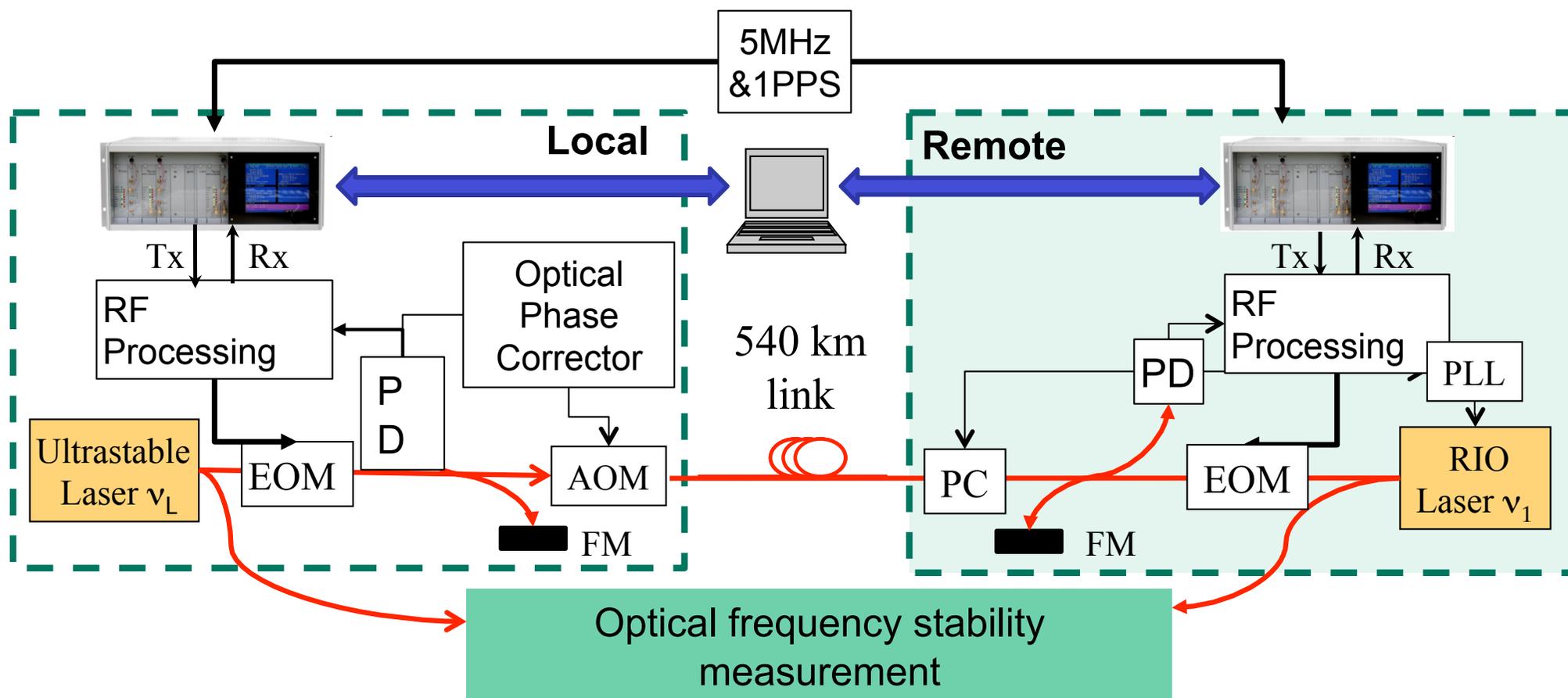
EMRP European Metrology Research Programme proposal





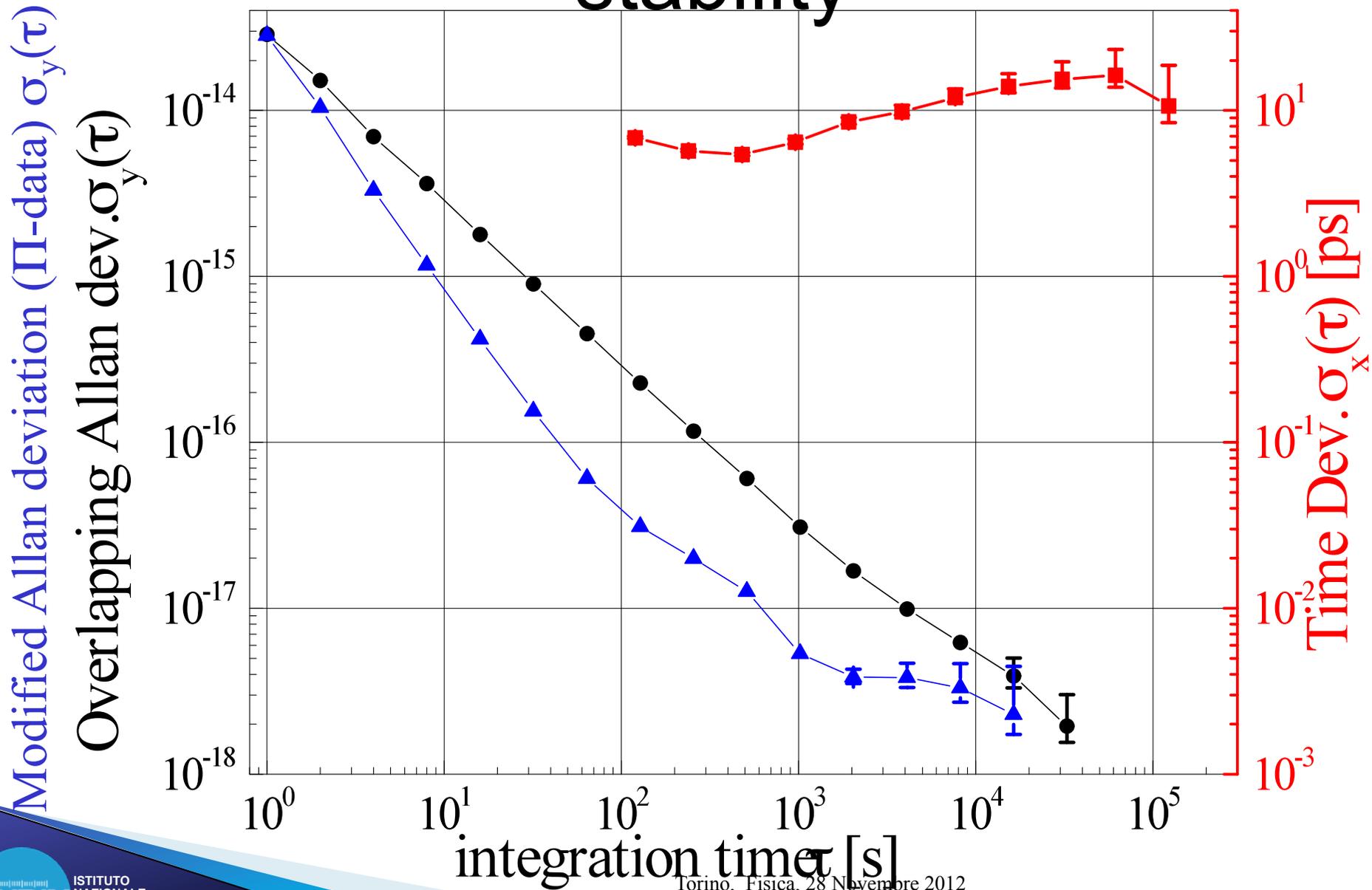
GÉANT DF footprint 2006-2012

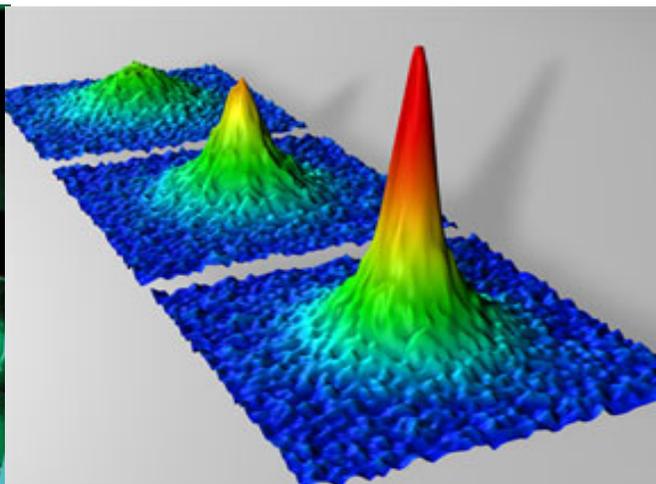
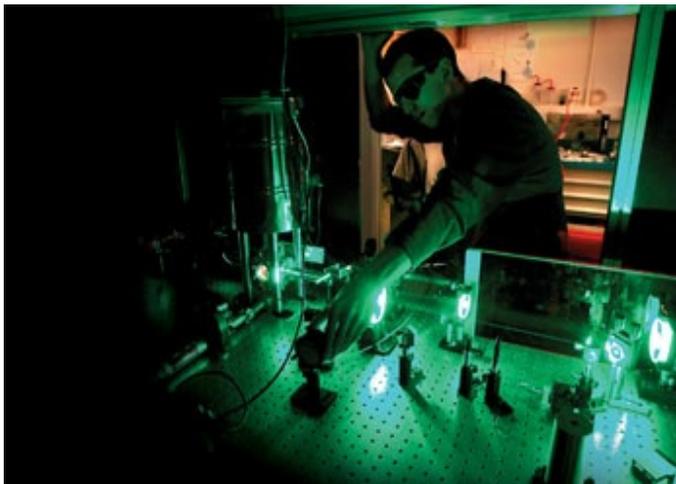
Experimental set-up



- Frequency transfer with « round-trip » method for fiber noise compensation
- Two-way time transfer using Satre modems

Time and frequency transfer stability





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?

Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

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
H
Hydrogen
1.00794

atomic number
symbol
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 recently 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.

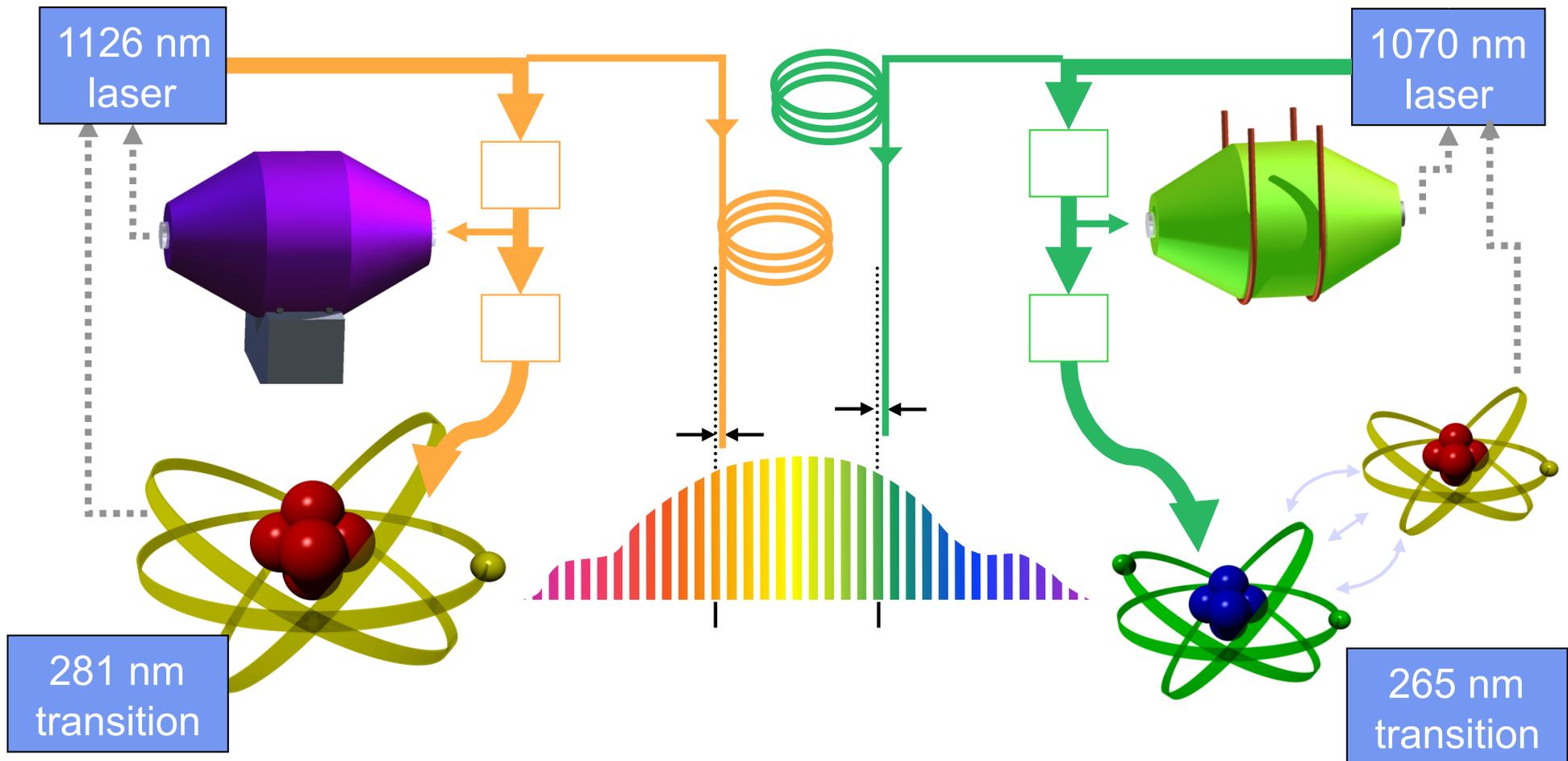


Group	1a	2a	Transition metals										3a	4a	5a	6a	7a	0
Period 1	1 H Hydrogen 1.00794																	2 He Helium 4.0026
Period 2	3 Li Lithium 6.941	4 Be Beryllium 9.0122											5 B Boron 10.81	6 C Carbon 12.011	7 N Nitrogen 14.0067	8 O Oxygen 15.9994	9 F Fluorine 18.9984	10 Ne Neon 20.180
Period 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 32.066	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 121.76	52 Te Tellurium 127.60	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 190.2	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 (210)	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†	111†	112†						

[†] Until official names are given to new elements, names based on a Latin translation of the atomic number are used; e.g. 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 174.97
* 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



So how good are optical clocks right now?

Reported uncertainty

Al ⁺ ion quantum logic clock:	9×10^{-18}
Hg ⁺ ion cryogenic ion clock:	2×10^{-17}
Sr ⁺ ion quadrupole clock:	2.1×10^{-17}
Yb ⁺ ion octupole clock:	7×10^{-17}
Sr neutral lattice clock:	1.5×10^{-16}
Yb neutral lattice clock:	3.4×10^{-16}
Cs fountain clock systematic unc:	2×10^{-16} (best)

But its work in progress & other systems under evaluation.....

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**

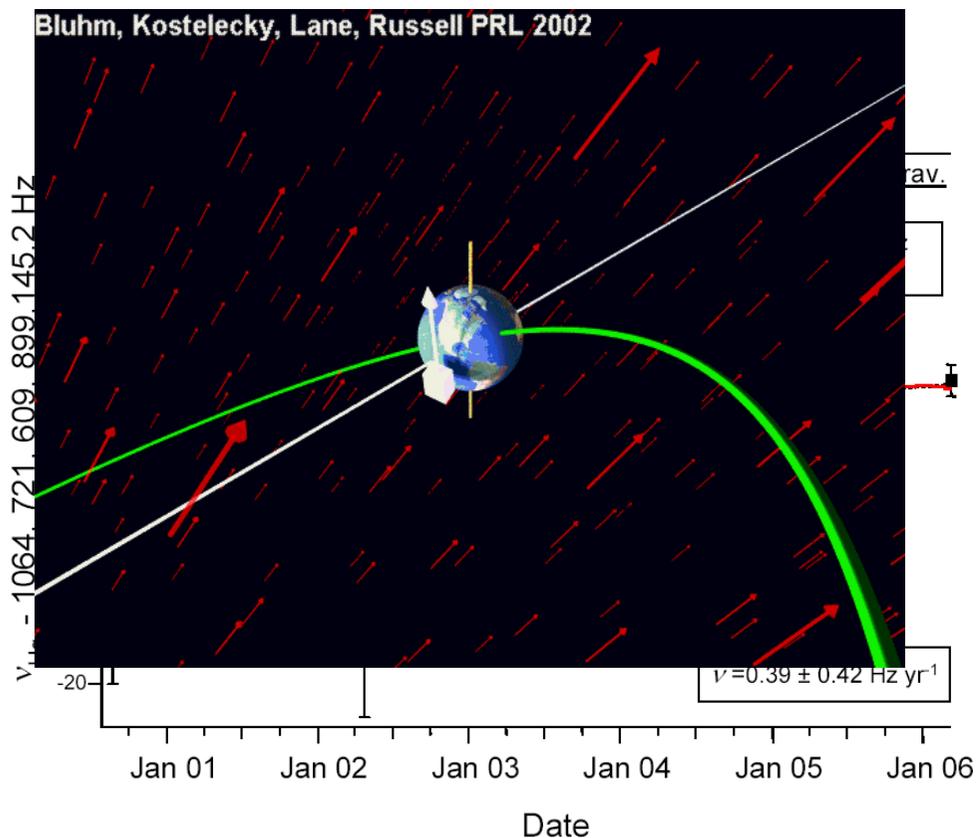


$$\beta_A = \beta_B$$

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

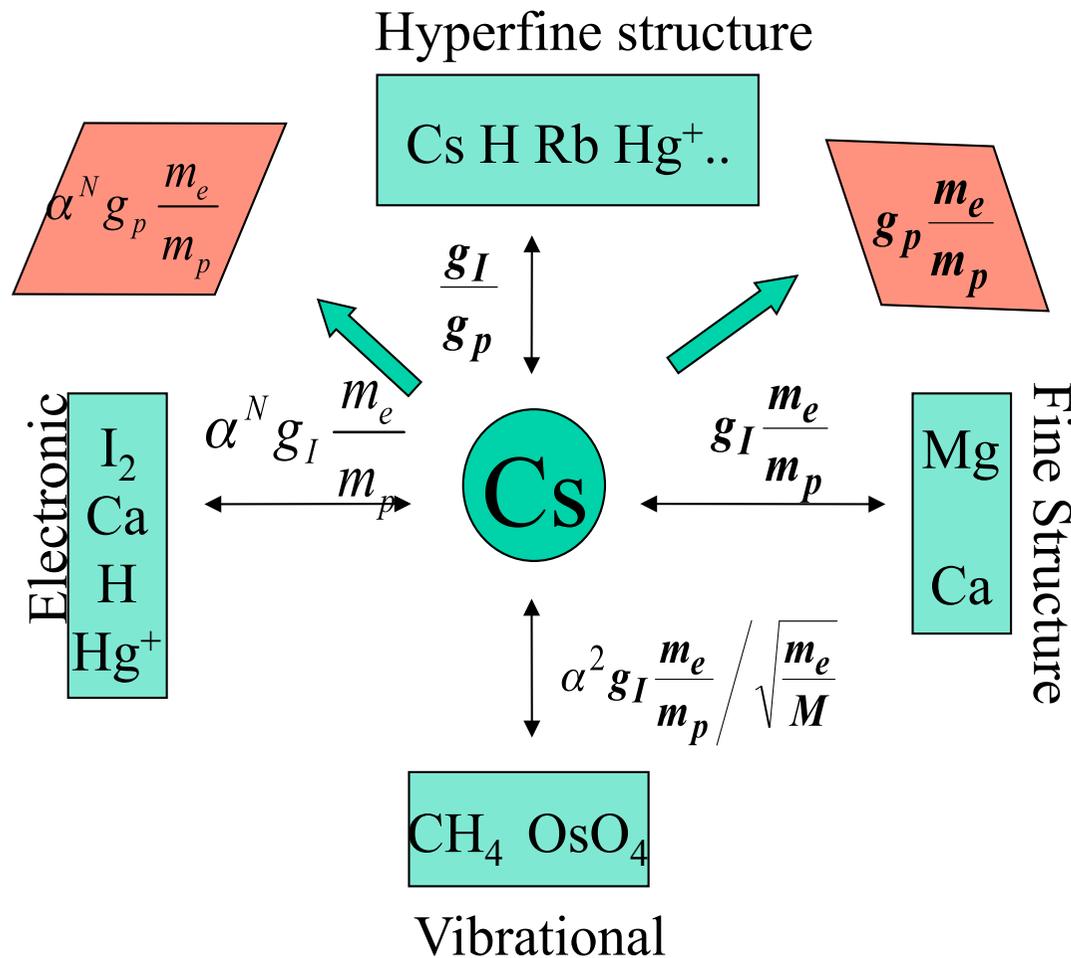
Quali costanti? Adimensionali vs Dimensionate

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

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

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)

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

Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

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

	κ_{α}	κ_q	κ_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 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	2004-6 PRL

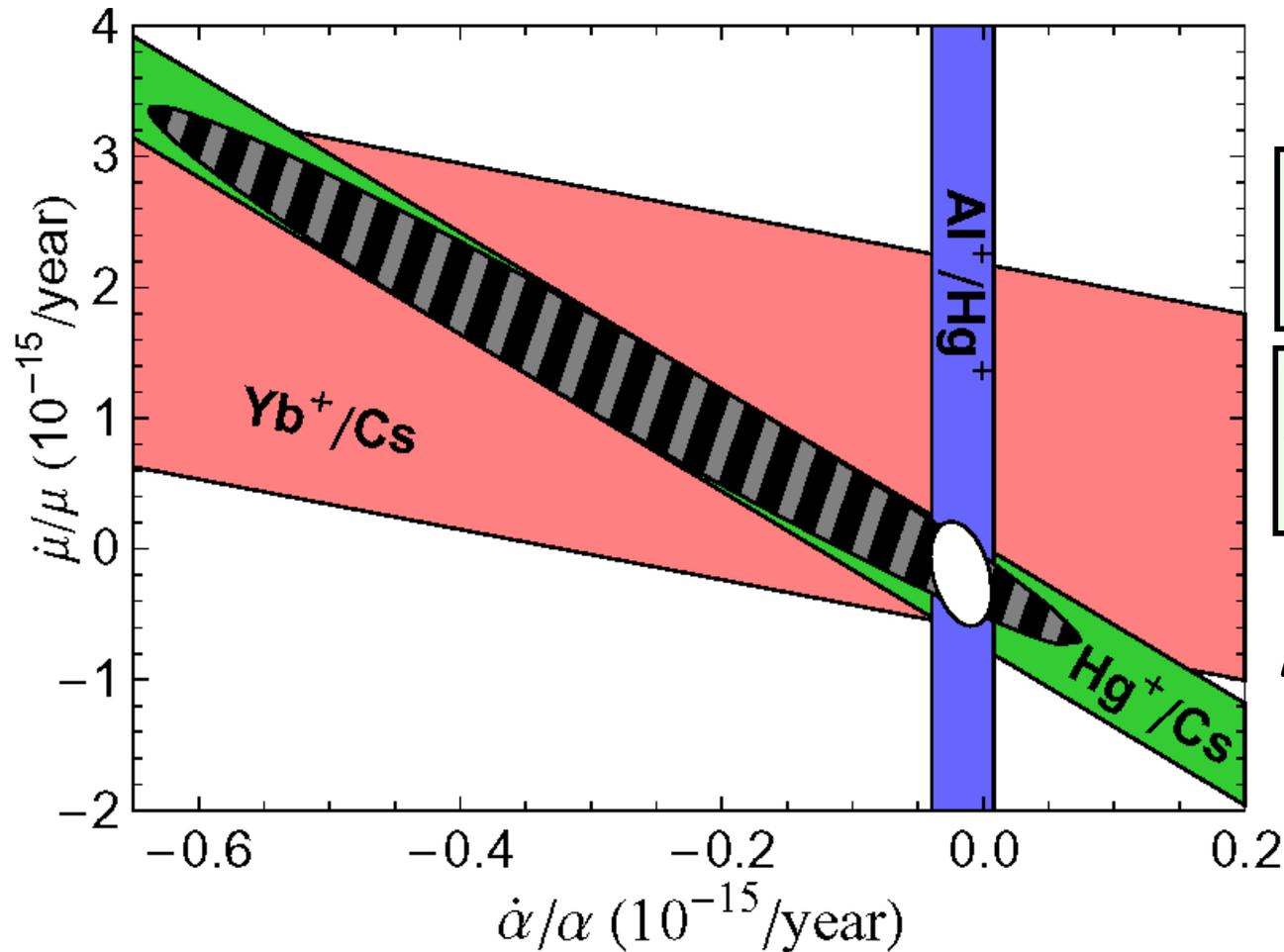
$$2 \frac{1}{\alpha} \frac{d\alpha}{dt} = (2 \pm 2) \times 10^{-17} / \text{anno}$$

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

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

Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

Confronto Hg⁺/Cs & Yb⁺/Cs & Hg⁺/Al⁺



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

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

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

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
	$<1.2 \times 10^{-16}$	2.3	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

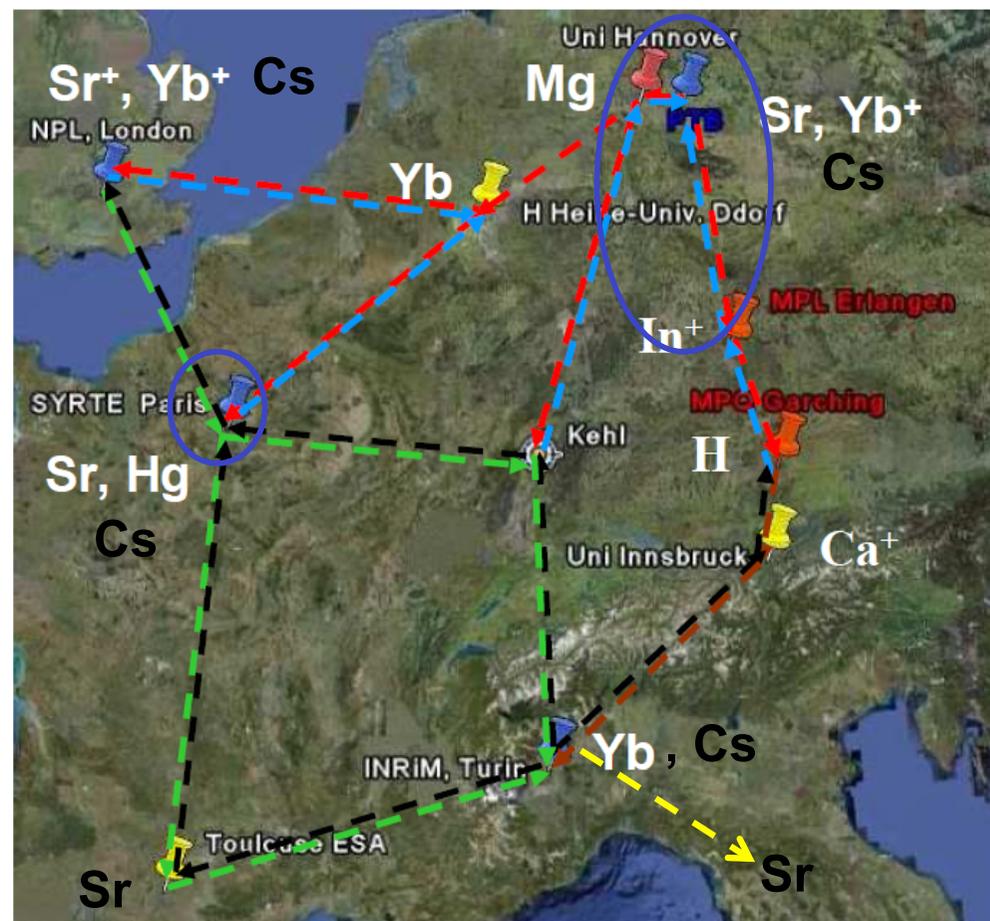
Le tecniche attuali di confronto remoto tra orologi NON CONSENTONO di raggiungere adeguata accuratezza

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!**



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 2×10^{-16} .
- Orologio ottico a Yb in sviluppo.
- Link ottici in Italia e in Europa
- Test accurati di fisica fondamentale

Sono disponibili Tesi di Laurea/Dottorato

Torino, Fisica, 28 Novembre 2012

TESI DISPONIBILI (anche PhD e post-doc)

Sperimentali;

Propedeutici: Meccanica Quantistica; Applicazioni di Elettromagnetismo

1) “Spettroscopia della transizione di orologio $1S_0-3P_0$ in Ytterbio bosonico e fermionico in reticolo ottico alla lunghezza d’onda magica”

Il sistema atomico a Ytterbio è pronto nella doppia trappola a 399 nm e 556 nm, ora occorre spostare gli atomi in una trappola di reticolo alla lunghezza d’onda magica di 759 nm.

Il laser per eccitare la transizione di orologio è pronto, quindi una volta intrappolati gli atomi in reticolo si procederà con la spettroscopia e la misura di orologio.

La tesi offre la possibilità di imparare una larga gamma di tecniche proprie della fisica atomica: generalizzazione di radiazioni laser, ottica, raffreddamento atomico, spettroscopia ad alta risoluzione, fisica atomica di un atomo complesso.

Le tecniche laser in particolare sono di interesse sia accademico che applicativo in ambiti di ricerca fuori dal mondo della ricerca pubblica

TESI DISPONIBILI (anche PhD e post-doc)

2) "Confronto remoto di orologi atomici ad alta accuratezza con link in fibra ottica"

Nell'ambito del link in fibra tra Torino e Firenze, la tesi offre la possibilità di partecipare alla realizzazione finale dell'infrastruttura su il territorio, con l'installazione di amplificatori bidirezionali all'Erbio, l'optoelettronica di cancellazione del rumore e la sua caratterizzazione in termini di rumore di fase e frequenza.

Infine, la tesi permette di partecipare al primo (o uno dei primi) confronto remoto tra orologi atomi su distanze superiori a 500 km, aprendo lo scenario di nuovi test di fisica fondamentale.

LA tesi offre la possibilità di acquisire molte tecniche proprie della fisica dei laser in particolare in sovrapposizione con gli interessi dell'industria ICT, creando la possibilità di sbocchi professionali sia accademici che nel settore delle telecomunicazioni ottiche.

TESI DISPONIBILI (anche PhD e post-doc)

3) “Amplificatori ottici bidirezionali a effetto Brillouin e Raman a basso rumore per link ottici di frequenza ed effetti ottici nonlineari”

I link ottici di frequenza necessitano di amplificatori ottici particolari, non disponibili commercialmente. In quest’ambito, la ricerca su fenomeni ottici nonlineari ben noti come lo scattering Brillouin e Raman, è volta a usare gli amplificatori oggi esistenti per l’applicazione del link.

La tesi indagherà questi fenomeni nonlineari focalizzandosi su come intervengano nel trasferimento di frequenza, al fine di ottenere misure più precise tra orologi remoti.

La tesi offre l’approfondimento dell’ottica nonlineare sia da un punto di vista teorico che ottico, e l’uso di laser in banda telecom.

Lo sbocco professionale è accademico e nel settore telecomunicazioni ottiche.

Prevista una collaborazione di tipo Nazionale (CNR Bologna) che internazionale (PTB, Germania; NPL, Gran Bretagna)

4) “Geodesia relativistica con orologi atomici”

Nell’ambito di un esperimento di confronto tra orologi atomici remoti posti ad altezze diverse, si esploreranno gli effetti relativistici a un livello di precisione che non ha precedenti per gli orologi atomici.

L’esperimento sarà allestito tra INRIM Torino e il laboratorio francese LSM nel tunnel del Frejus, un ambiente geodetico molto particolare.

La tesi offre possibilità sia teoriche che sperimentali ed è condotta in una collaborazione internazionale con Germania, Francia e Gran Bretagna.

Possono essere previsti soggiorni all’estero.

TESI DISPONIBILI (anche PhD e post-doc)

5) “Interferometri in fibra ottica ed effetto Sagnac relativistico”

Nell’ambito del trasferimento in fibra ottica di segnali ottici ultrastabili, INRIM sta esplorando nuove prospettive che si basano sull’uso dell’effetto relativistico di Sagnac per la ricerca fondamentale e per la geodesia fisica, usando un giroscopio in fibra ottica su un anello di una decina di chilometri quadrati.

La tesi è sperimentale/teorica. La parte sperimentale riguarda il corretto uso di tecniche laser in fibra ottica; lo studio dei rumori di fase indotti dalla rotazione terrestre, dagli eventi sismici e da effetti spuri di ottica nonlineare; il miglioramento della sensibilità dell’interferometro.

La parte teorica investigherà al massimo livello possibile le osservabili di questo sistema, sia per la fisica fondamentale che per la geodesia applicata; in particolare si valuteranno le possibilità di una rete coordinata di interferometri Sagnac sul territorio nazionale ed Europeo.