



# Research (1/2)

## Atoms — Oscillators

The First-TF founding team

A. Amy-Klein, N. Dimarcq, **E. Rubiola**, E. Samain, P. Tuckey F. Vernotte

### Outline (let pictures speak)

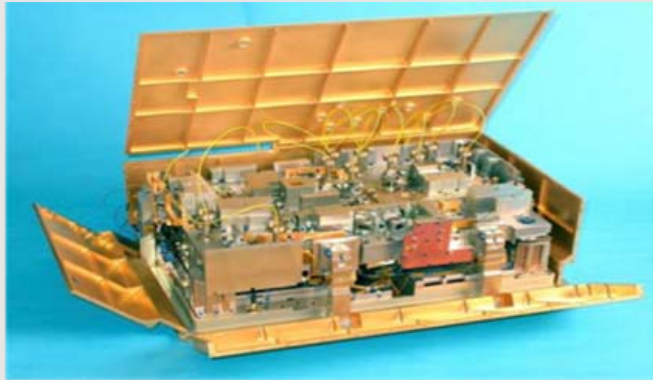
- Atomic standards
  - Laboratory, and small size
  - microwaves vs. optics
- Oscillators
  - Laboratory, and small size
  - A few technology in competition
- More recent ideas

E. Samain takes over with “Research 2/2”

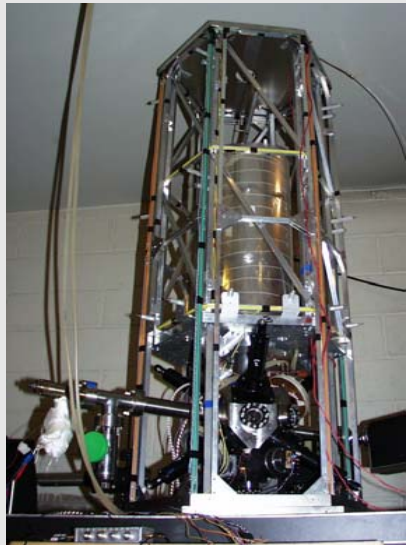
# Atomic frequency standards

microwave standards  
(fountain, beam)

white  $\sigma_y(\tau) \approx 2 \times 10^{-14}/\tau$   
accuracy  $\sigma_y(\tau) \approx 10^{-15} \dots 10^{-16}$



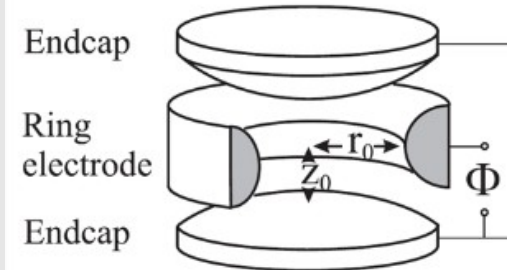
Lab,  
Pharao,  
Aces...



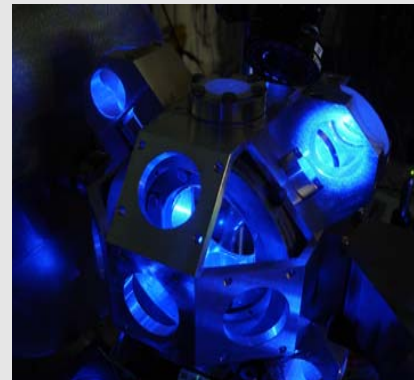
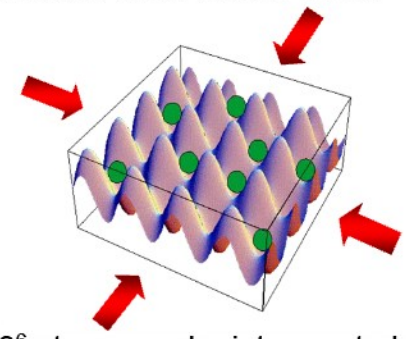
optical standards (ions and neutral  
atoms in lattices)

estimated uncertainty  
 $\sigma_y(\tau) \approx 10^{-13} \dots 10^{-17}$

Single ion clock

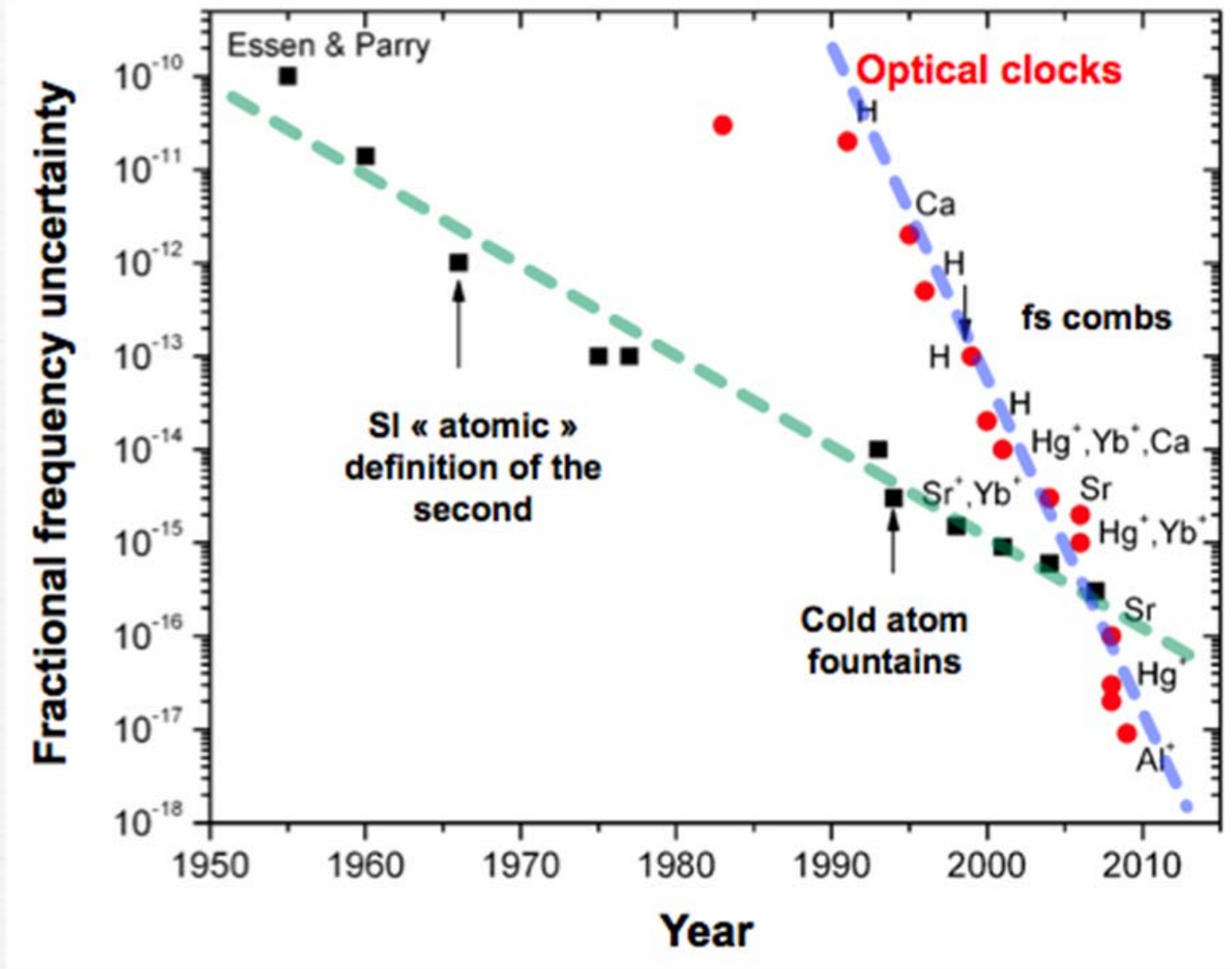


Neutral atom lattice clock



Al, Ca,  
Hg, In,  
Sr, Yb

# Is optics going to strike the commercial standards and oscillators? And When?



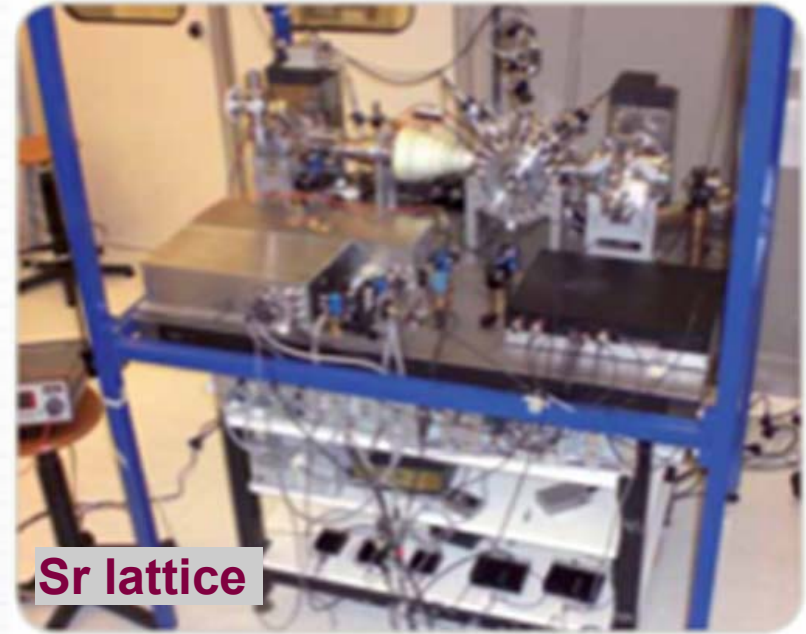


# Small clocks

JPL Hg<sup>+</sup>



Are small (space)  
clock going to  
optics?



Sr lattice



Sr<sup>+</sup>

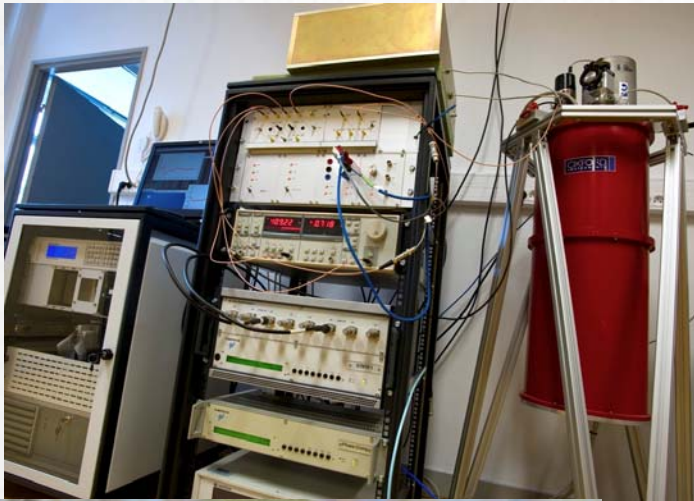
INRIM Rb



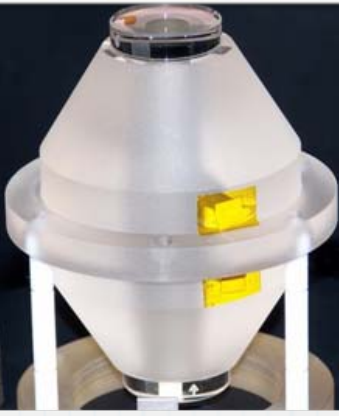
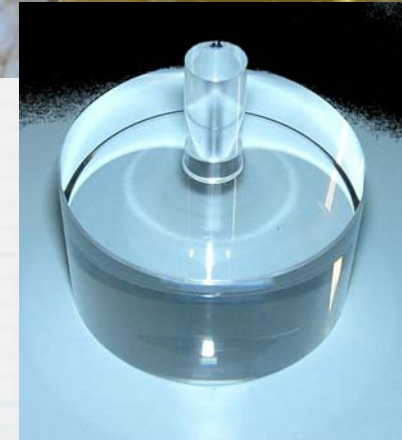
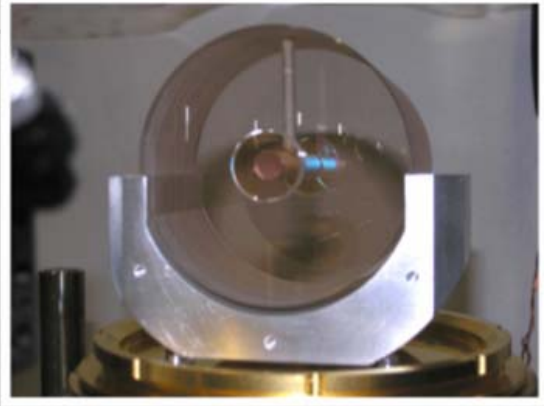
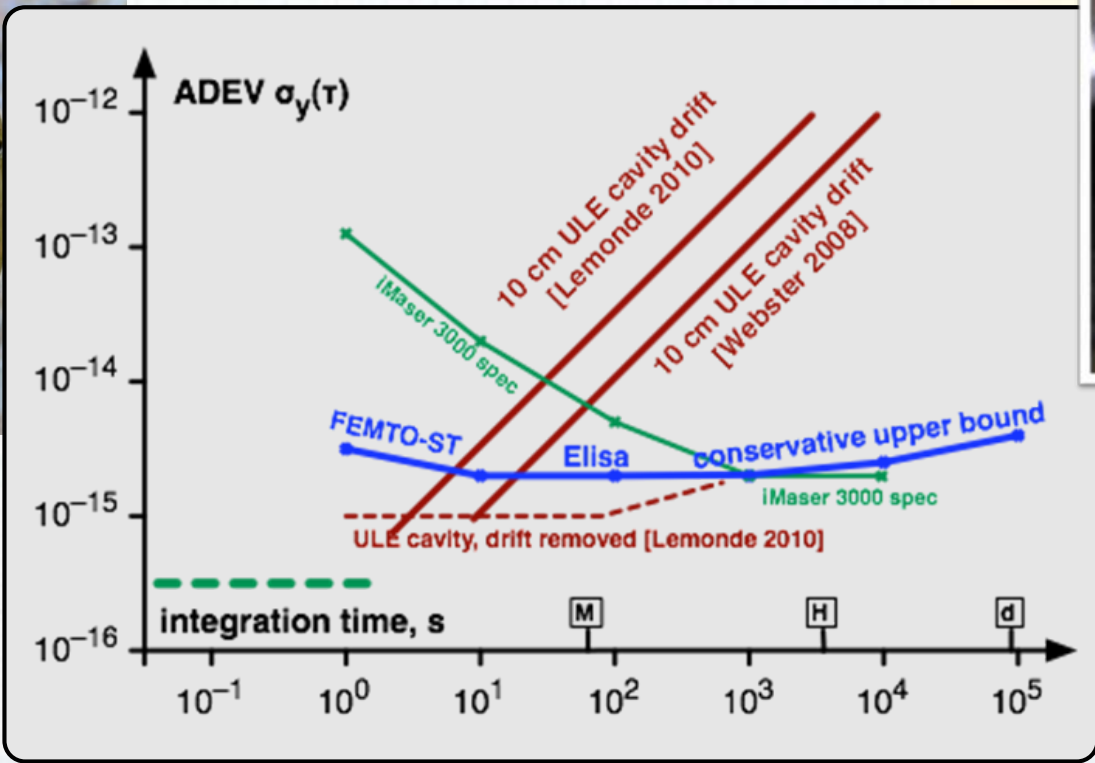
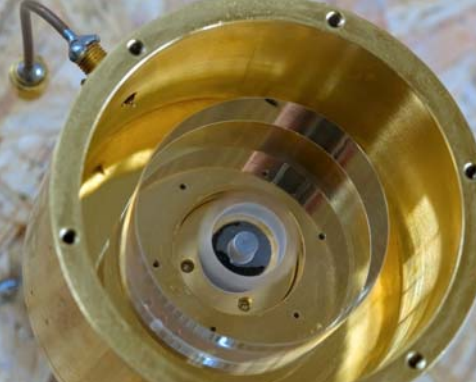
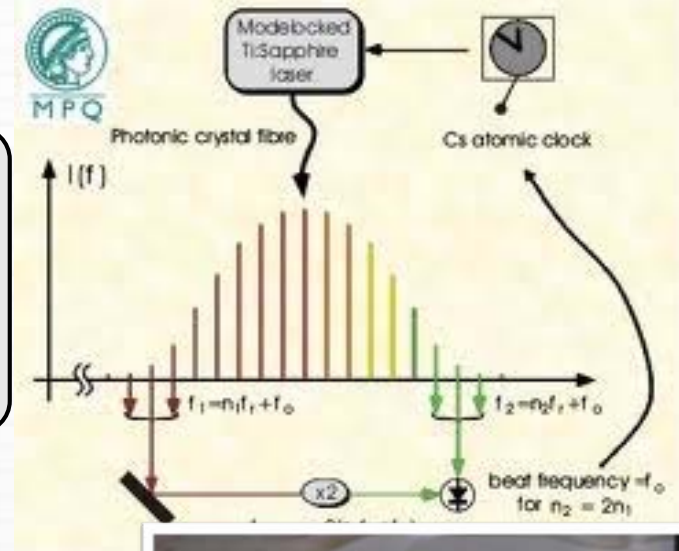
SpectraTime H Maser



# Low-noise XXL oscillators



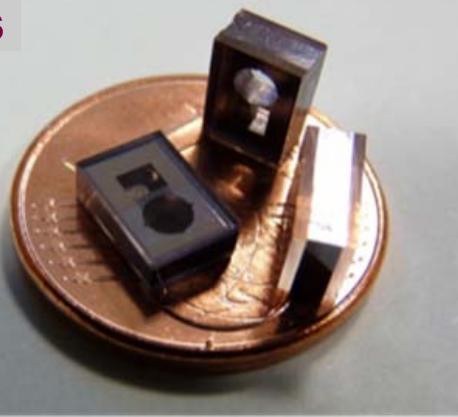
Does larger volume and crystalline structure win?





# Small oscillators

Cs



Is the traditional quartz resonator still in a good shape?

$\mu$ wave circuits & systems

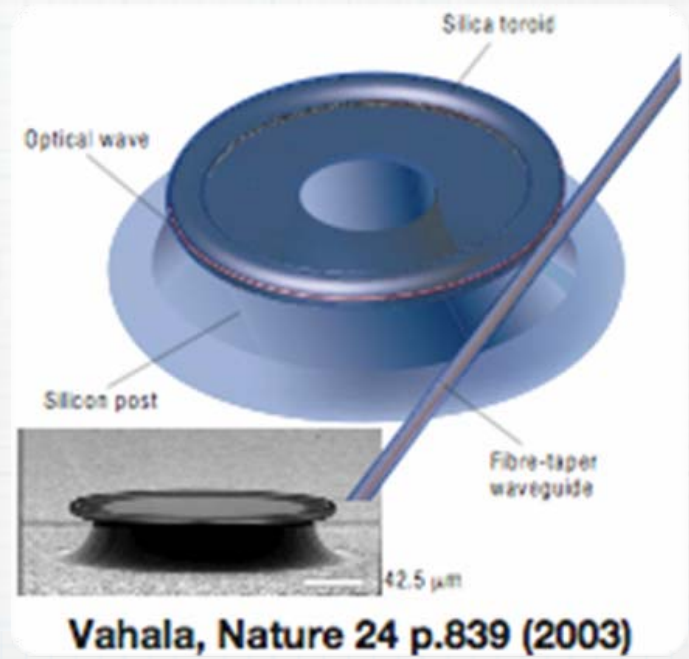
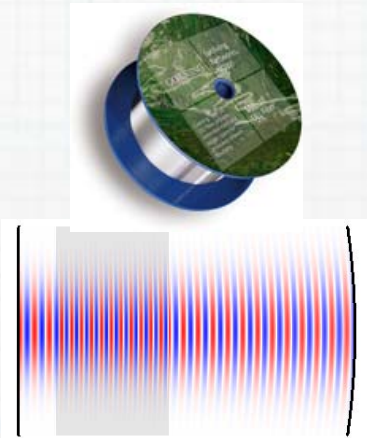
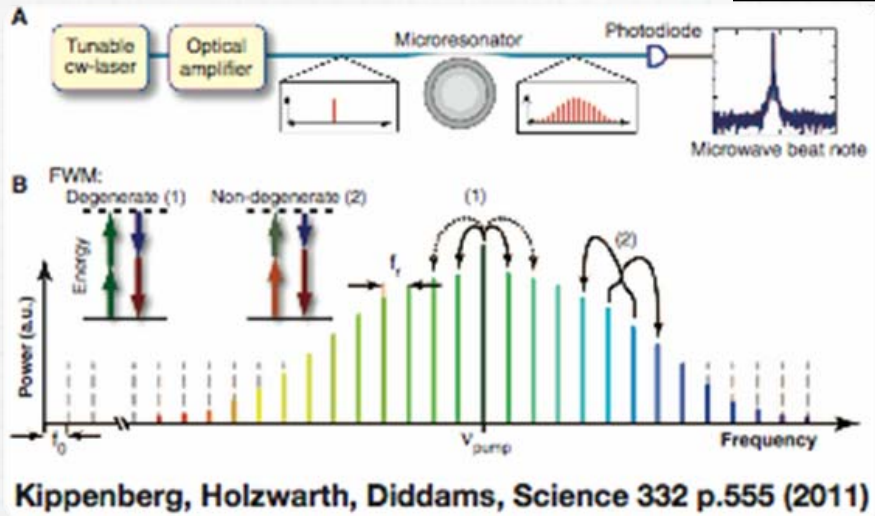


FBAR & HBAR

Sophisticated simulation

MEMS

SAW



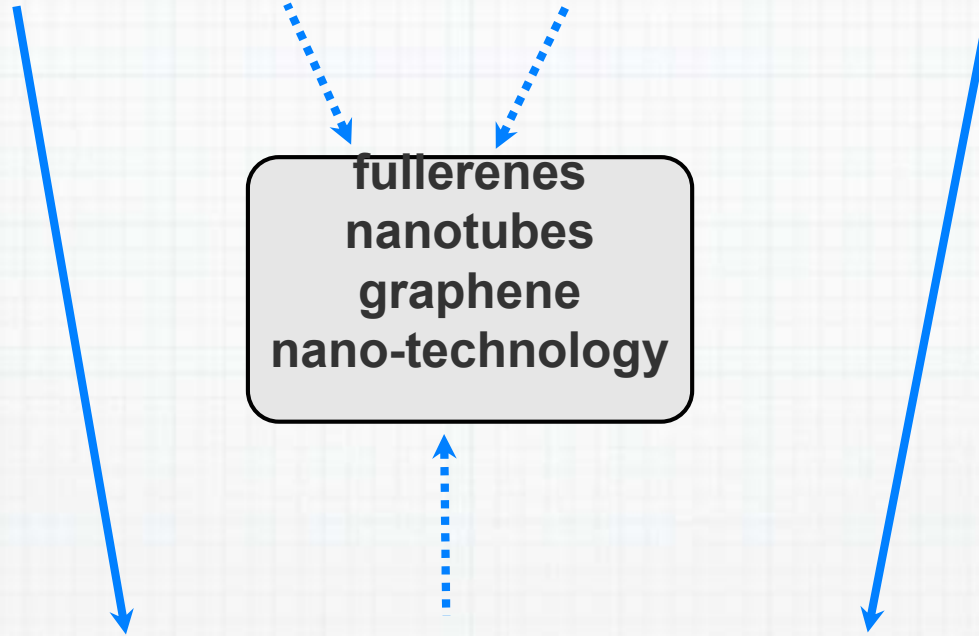
# Flicker noise

**Quantum physics**  
**No evidence of flicker**  
**at  $10^{-17}$ ... $10^{-18}$**

**Macroscopic resonators**  
**Large volume helps in**  
**reducing flicker**

**fullerenes**  
**nanotubes**  
**graphene**  
**nano-technology**

**Does “going small” do well?**



# Breakthrough innovations

nature  
photonics

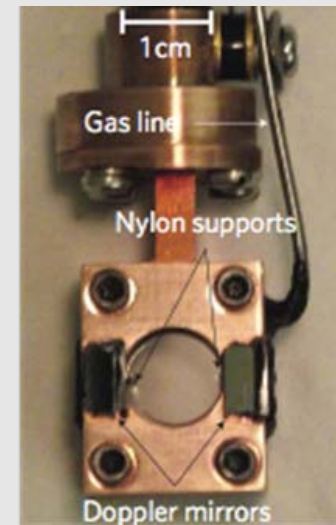
ARTICLES

PUBLISHED ONLINE: 11 SEPTEMBER 2011 | DOI: 10.1038/NPHOTON.2011.215

## Frequency stabilization to $6 \times 10^{-16}$ via spectral-hole burning

Michael J. Thorpe<sup>1\*</sup>, Lars Rippe<sup>2</sup>, Tara M. Fortier<sup>1</sup>, Matthew S. Kirchner<sup>1</sup> and Till Rosenband<sup>1</sup>

We demonstrate two-stage laser stabilization based on a combination of Fabry-Pérot and spectral-hole burning techniques. The laser is first pre-stabilized by the Fabry-Pérot cavity to a fractional-frequency stability of  $\sigma_y(\tau) < 1 \times 10^{-13}$ . A pattern of multiple spectral holes written in the absorption spectrum of  $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  serves to further stabilize the laser to  $\sigma_y(\tau) \leq 6 \times 10^{-16}$  for  $2 \text{ s} \leq \tau \leq 8 \text{ s}$ . We also measure the frequency sensitivity of  $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$  spectral holes to environmental perturbations including temperature ( $16 \text{ kHz K}^{-2}$ ), pressure ( $211.4 \text{ Hz Pa}^{-1}$ ) and acceleration ( $7 \times 10^{-12} \text{ g}^{-1}$ ). Each spectral hole sensitivity parameter is lower than the corresponding parameter for Fabry-Pérot cavities, suggesting that spectral holes can be more frequency-stable.



## Prospects for a Nuclear Optical Frequency Standard based on Thorium-229

E. PEIK, K. ZIMMERMANN, M. OKHAPKIN, CHR. TAMM

*Physikalisch-Technische Bundesanstalt,  
Bundesallee 100, 38116 Braunschweig, Germany*

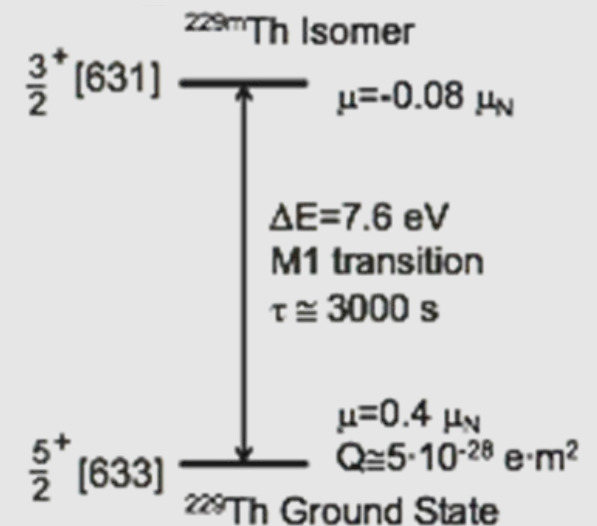
arXiv:0812.3548v2 [physics.optics] 3 Feb 2009

Also UCLA / Yale / LANL / U-Keele

arXiv:1011.0769v1 [physics.atom-ph] 2 Nov 2010

And U-Mainz / U-Jyväskylä / CERN

arXiv:1105.4646v1 [physics.atom-ph] 23 May 2011



little or no band  
broadening in solid?





***Journée de lancement du  
Labex First-TF  
Réseau thématique Temps-Fréquence  
8 février 2012***

## **Axes de Recherche (2/2)**

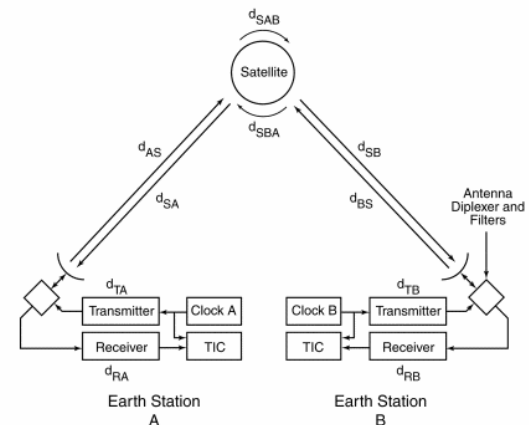
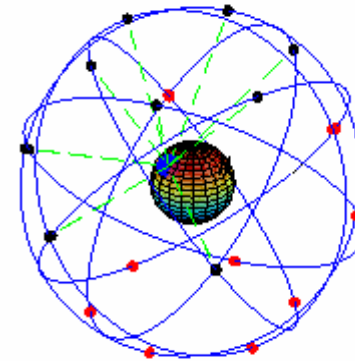
**Transfert de Temps – Fréquence  
Applications**

**Présentation et discussion**

**Animateurs : Enrico Rubiola, Etienne Samain**

# Type de Lien

- Transfert de fréquence
- Transfert de temps
- Lien 1 voie
- Lien 2 voies
- Continu/Pulsé
- Porteuse optique
- Porteuse Micro onde



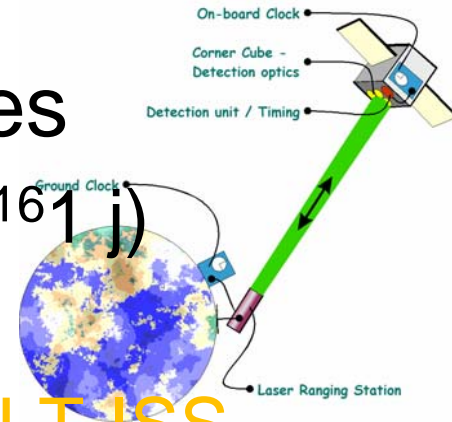
# Transferts micro-onde

Technique		Performance	Commentaires
<b>GNSS</b>	1 voie Multi-fréq. <b>1 GHz</b> <b>1 MChip/s</b>	Bruit en temps < 100 ps Comparaison de fréq. < $10^{-15}$ @ 1 j « Exactitude » en temps : qq ns	Massivement utilisé aujourd'hui GPS, Glonass, <b>Galileo, Compass</b>
<b>TWSTFT</b>	2 voies Mono-fréq. <b>10 GHz</b> <b>10 MChip/s</b>	Bruit en temps < 100 ps <b>Bruit en temps &lt; 1 ps (phase)</b> Comparaison de fréq. < $10^{-15}$ @ 1 j « Exactitude » en temps : 1 ns	Uniquement pour les comparaisons d'horloges sol en vue commune
<b>ACES MWL</b>	2 voies Multi-fréq. <b>10 GHz</b> <b>100 MChip/s</b>	Bruit en temps < 1 ps Compar. de fréq. ~ qq $10^{-17}$ @ 1 j « Exactitude » en temps ~ 100 ps	Comparaisons d'horloges sol en vues communes et non- communes (vol sur ISS à partir de 2015)

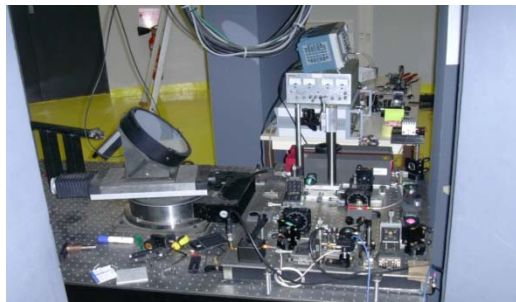


# Transfert Optique Propagation libre

- Lien laser optique pulsé 2 voies
  - Stabilité  $100 \cdot 10^{-15}$  @ 100 s, ( $10^{-16}$  1j)
  - Exactitude < 100 ps
  - T2L2-Jason 2, LTT-Compass, **ELT-ISS**

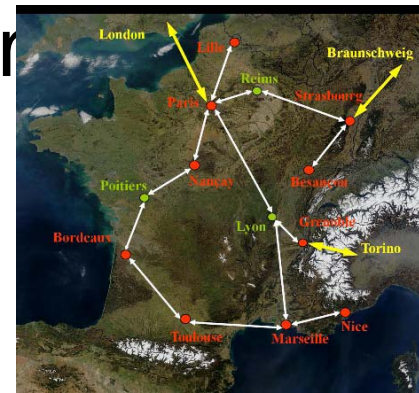


- Lien laser continu Cohérent
  - Stabilité  $3 \cdot 10^{-15}$  @ 100 s, ( $10^{-18}$  1j)
  - MiniDoll sur MeO (sol)



# Transfert Optique Propagation guidée

- Utilisation d'une fibre ou d'un canal dédié dédiée d'un réseau internet existant
- Lien Laser optique continu 2 voies
- Stabilité  $10^{-18}$  @ 10000 s,  $10^{-19}$  j
- ~10 liens expérimentaux en développement dans le r
- Equipex : REFIMEVE+



# Systeme International d'unité SI

- 3 constantes indépendantes
- Seconde, Kilogramme, Kelvin

## Réalisation des Echelles de temps

- TAI, UTC, UT
- Nationale : UTC(OP) – Base du temps  
légal

## Instrumentation

- Instrument de mesure
- Capteur



# Navigation par Satellite : GNSS

- Basé sur la diffusion de signaux temporels d'une constellation de satellites
- 2 constellations opérationnelles
  - GPS (USA), Glonass (Russe)
- 2 constellations en cours de déploiement
  - Galileo (EU), Compass (Chine)



## Navigation Inertielle

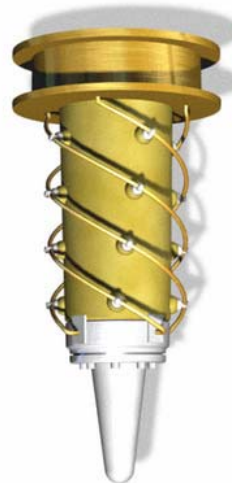
- Gyroscope Laser
- Gyroscope à quartz

# Télécommunication

- Transfert de données très haut débit (SDH – Ethernet)
- Transfert de données très longue distance
  - Lien cohérent en orbite terrestre
  - Lien cohérent en orbite solaire : Deep Space Network

# Télémétrie – Mesure de vitesse

- Basé sur la mesure du temps de vol (position) et ou le décalage en fréquence (vitesse)
- LIDAR (Light Detection and Ranging)
  - Télémétrie laser satellite – Lune
  - Télémétrie laser interplanétaire
  - Scanner laser : image 3D
- Radar (Radio Detection and Ranging)
  - Aviation, militaire
  - Navigation satellite (DORIS)
  - Sonde interplanétaire



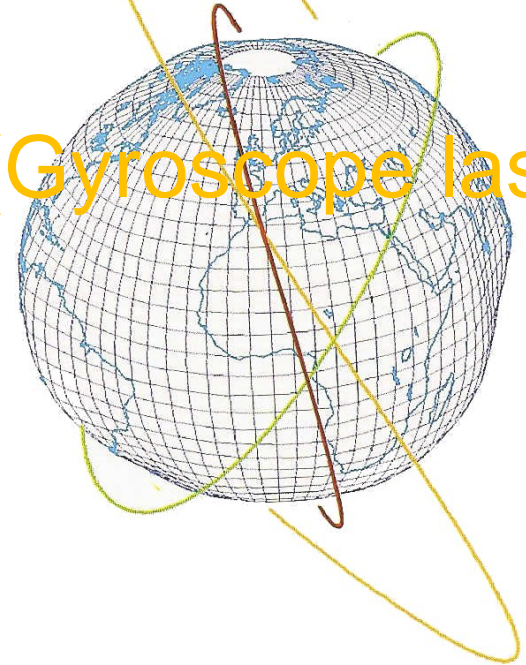


# Physique

- Mesure de la constante de structure fine  $\alpha$ , constante de Rydberg
- Test de conservation de la parité dans les molécule Chirale
- Mesure de biréfringence induite par des champs externe
- Mesure de fréquence de transition atomique et moléculaire

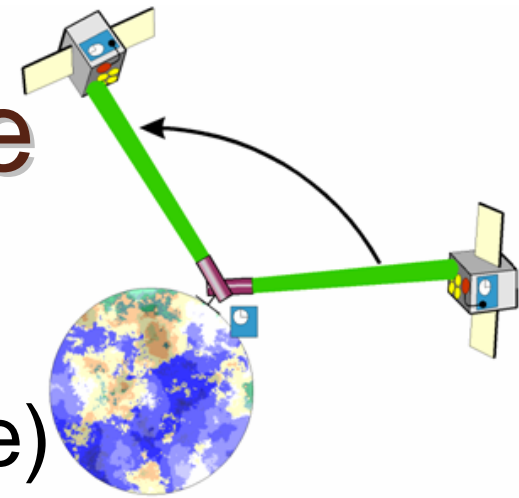
# Géodésie

- Champ de gravité terrestre (Télém. laser)
- Géodésie relativiste (horloge spatiale)
- Rotation de la terre (Télémétrie laser, VLBI, Gyroscope laser)
- Tremblements de terre (Gyroscope laser fibré)



# Physique fondamentale

- Mesure de l'effet Einstein
- Principe d'équivalence (Lune)
- Dérive de la constante de structure fine  $\alpha$
- Variation de la constante de gravitation
- Paramètre de la relativité  $\gamma$  (effet Shapiro)
- Anisotropie de la vitesse de la lumière
- Gravitation à grande et petite échelle (Anomalie Pioneer)



# Astronomie

- Sélénophysique
- Modélisation des pulsars
- Référence extra galactique, Observation en haute résolution : VLBI
- Rotation de la galaxie (Gyroscope laser fibré)
- Onde gravitationnelle (lien cohérent spatial)

