

Current research in Time & Frequency and next generation atomic clocks



Gaetano Mileti

Laboratoire Temps - Fréquence (LTF)

Institut de Physique, Faculté des Sciences

Université de Neuchâtel, Suisse

OUTLINE OF THE PRESENTATION

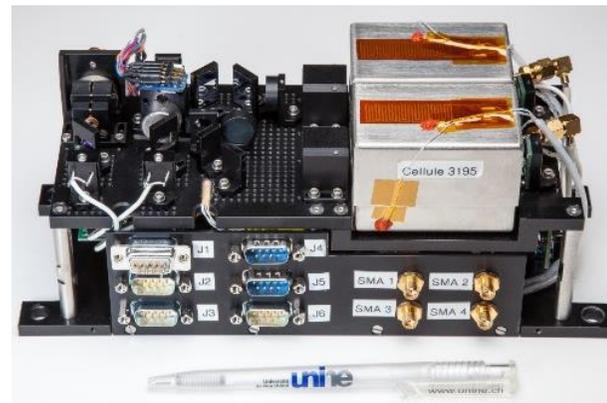
1) Local and historical background



2) Atomic clocks principle and applications



3) Examples of present research



1) HISTORICAL AND SCIENTIFIC HERITAGE



1750
-
1850

A. L. Breguet



F. Berthoud



1858

A. Hirsch

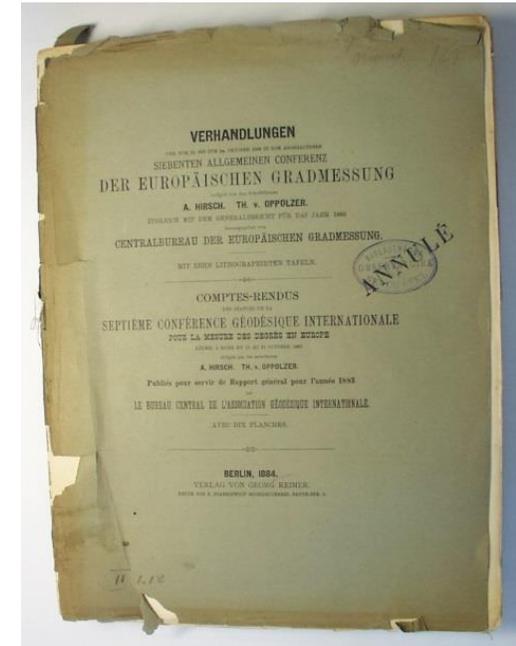


1883



1920

C. E. Guillaume



FIRST ATOMIC CLOCKS IN NEUCHÂTEL

L'Express | vendredi, août 06, 1954 | 1

1954

UN JOURNALISTE FRANÇAIS DANS NOTRE VILLE

L'horloge atomique va naître à Neuchâtel

Grâce à nos savants, les hommes mesureront le temps avec encore plus d'exactitude

Le « Figaro littéraire » du 17 juillet a publié un fort intéressant article de M. Pierre de Latil, écrivain scientifique connu par son ouvrage sur « La cybernétique ». M. de Latil a fait le voyage de Neuchâtel, d'une part, pour admirer les automates Jaquet-Droz — que chacun connaît — et d'autre part, pour se renseigner sur la construction, au Laboratoire suisse de recherches horlogères, d'une horloge atomique — ce qui sera une révolution pour le profane de notre ville.

Fonds. Adopte de la cybernétique, nous n'étions pas sans quelque doute pour de tels jouets qui, réglés une fois pour toutes, n'ont aucun degré de liberté. Mais si le « dessinateur » et l'« écrivain » n'ont de souplesse que dans la main, la joueuse de clavecin est, elle, d'une grâce absolument étonnante. Certaines de ses réverences sont véritablement féminines. Non, la came poussant un ergot relié à un levier ne pourra jamais rien donner de moins méca-

elles plus ni balanciers ni roues dentées. Elles sont électroniques. — Celle-ci, nous dit M. Quellet, ingénieur électronicien du laboratoire horloger, ne varie que d'un cent millièmes de seconde par jour. Et, comme le jour compte près de cent mille secondes, cela signifie que, sur la seconde, la précision est de l'ordre du dix milliardième. Une puissance moins dix, pour parler plus mathématiquement. Nous étions dans les sous-sols du laboratoire. L'horloge n'avait rien

L'Express | mardi, mars 18, 1958 | 6

1958

Instrument d'une extrême précision

L'horloge moléculaire est née à Neuchâtel

Après son exposition au pavillon suisse de Bruxelles, elle fonctionnera dans notre observatoire

Depuis les temps les plus anciens, l'homme a mesuré le temps d'après la rotation de la terre sur son axe. De la durée du jour, il a déduit la seconde. A cette unité se rapportent encore toutes les mesures du temps de la science et de la technique. Or, il y a vingt ans environ, on a constaté que la terre ne constitue pas une horloge absolument exacte. En effet, elle subit des variations de marche de l'ordre du millième de seconde par jour.

cylindre des oscillations accompagnées d'une émission d'ondes radio. La fréquence de ces ondes est la même que la fréquence des oscillations des molécules, environ 24 milliards à la seconde. Ce dispositif, produisant des ondes radio à l'aide

L'Express | mercredi, juillet 15, 1959 | 20

1959

Au Laboratoire suisse de recherches horlogères : d'intéressantes recherches

A l'occasion de son assemblée annuelle, tenue sous la présidence de M. Sydney de Coulon et en présence des représentants des organisations horlogères, le Laboratoire suisse de recherches horlogères (L.S.R.H.) de Neuchâtel, a rendu compte de ses activités.

Des crédits spéciaux ont permis notamment l'acquisition d'un microscope électronique, qui pourra également se transformer en une microsonde électronique d'une conception nouvelle, et la mise en chantier d'une horloge atomique.

Le L.S.R.H. sera ainsi le seul laboratoire au monde à posséder ces deux types d'étalon de fréquence assurant une précision du cent-millième de seconde par jour.

L'OBSERVATOIRE CANTONAL À LA POINTE DU PROGRÈS

La première horloge atomique au thallium jamais construite fonctionne au Mail

Autre innovation : la mise en service d'une chambre sous pression constante pour l'observation des chronomètres

L'Observatoire de Neuchâtel doit sa réputation à son heure. Cette heure est actuellement parmi les meilleures du monde. Aujourd'hui, il « produit » une heure d'une précision — tenez-vous bien et réglez votre montre — de quelques dix-millièmes de seconde par jour. Et cela grâce à sa nouvelle horloge atomique au thallium, qui est la première de ce genre à avoir jamais été construite et à fonctionner.

C'est il y a un peu plus de cent ans, notre Observatoire était conçu, à l'origine, comme un service public et son comme un institut de recherche. Maintenant, il remplit cette double fonction, car la détermination de l'heure et sa conservation mobilisent les plus récentes applications de la physique moderne. Naguère, les horloges à quartz avaient remplacé les horloges mécaniques à pendule. Ces dernières régissent leur marche sur celles des étoiles. Aujourd'hui, c'est la marche des étoiles qui est contrôlée par les horloges. Et à l'horloge à quartz a succédé l'horloge atomique.

Record mondial de précision

Les horloges atomiques, qui existent depuis environ six ans, utilisent les propriétés de certains atomes d'osciller à des fréquences très élevées et constantes. Ces vibrations peuvent être comparées aux oscillations de l'échappement de la montre, le balancier-spiral. Mais ici, on est dans le domaine de la physique poussée et de l'électronique. Les horloges atomiques existantes sont pilotées généralement par les atomes de césium, de rubidium ou encore les molécules du gaz ammoniac. Leur précision se situe autour de 2 millièmes de seconde par jour. Le nouvel élément utilisé dans l'horloge atomique de l'Observatoire, a savoir le

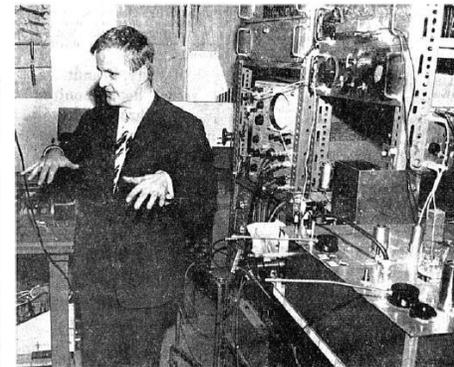
thallium, est à l'origine de la précision. Ce sont ses vibrations enregistrées électroniquement. L'Observatoire, qui a travaillé en collaboration avec le Laboratoire des recherches horlogères, démontre que, dans le champ de la recherche, il est à l'avant-garde.

La pression atmosphérique jugulée

Nous avons eu hier également la primeur d'une autre nouvelle installation, celle-ci destinée au contrôle des chronomètres. Comme on le sait, une activité importante de l'Observatoire cantonal consiste dans l'observation des meilleurs chronomètres de l'industrie horlogère. L'observation de chaque chronomètre s'étend sur deux mois environ et comprend des mesures faites à plusieurs températures et dans plusieurs positions.

Jusqu'ici, un facteur non négligeable d'influence sur le marche des chronomètres restait inconnu, soit l'influence des variations de la pression atmosphérique. En effet, une variation de la hauteur de la colonne de mercure de 1 mm peut produire une différence de marche de 1/100 de seconde par jour environ. Or, chez nous, entre la Haute-Jura et la région des lacs, des variations de pression de plusieurs dizaines de mm de mercure sont fréquentes. Il en résulte des variations dans le marche des chronomètres, qui peuvent en avantage certains et en désavantager d'autres. Afin d'éviter

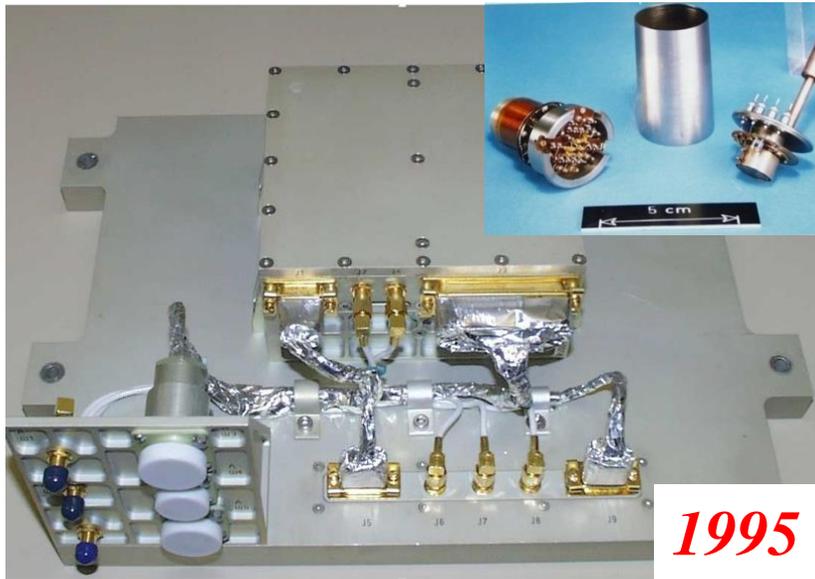
1963



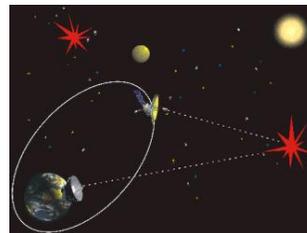
M. Jacques Bonanomi présente la nouvelle horloge atomique de l'Observatoire de Neuchâtel.

(Photo Avipress - J.-P. Baillois.)

SPACE ATOMIC CLOCKS IN NEUCHÂTEL



1995



L'Impartial | mercredi, mars 09, 1988 | 19

1988

Nouveau directeur de l'Observatoire Giovanni Busca remplacera Jacques Bonanomi

M. Giovanni Busca remplacera M. Jacques Bonanomi à la tête de l'Observatoire cantonal de Neuchâtel. M. Busca est l'homme de la situation. Docteur en sciences physiques, spécialisé dans le domaine temps et fréquences, il sera précisément chargé de développer cette discipline, une nouvelle orientation qui bénéficiera de l'appui et de la collaboration de la Confédération.

M. Busca, neuchâtois d'adoption, de nationalité canadienne, est âgé de 49 ans, marié et père de deux filles. Il prendra ses fonctions le 1er juillet pour succéder à M. Bonanomi, atteint par la limite d'âge, auquel M. Pierre Dubois, chef du Département de l'économie publique, a rendu un vibrant hommage.

M. Bonanomi a passé 29 ans de sa vie à l'Observatoire et a joué un rôle important dans des dévelop-

pements industriels tirés de recherches fondamentales et qui se sont traduits par la création il y a moins d'une année de la société Précitel S.A.

SON DOMAINE

Présentant les orientations futures de l'Observatoire, M. Busca a

entend participer à des recherches appliquées en aidant des entreprises. L'Observatoire sera en quelque sorte un atout supplémentaire à la promotion de l'économie neuchâtoise. Car selon M. Busca, «vendre le temps» est possible et repré-

sente un marché important. L'Observatoire travaillera en étroite collaboration avec l'Office fédéral de métrologie (construction d'un étalon économique), office qui assurera une partie du financement des activités de l'Observatoire.

P. Ve



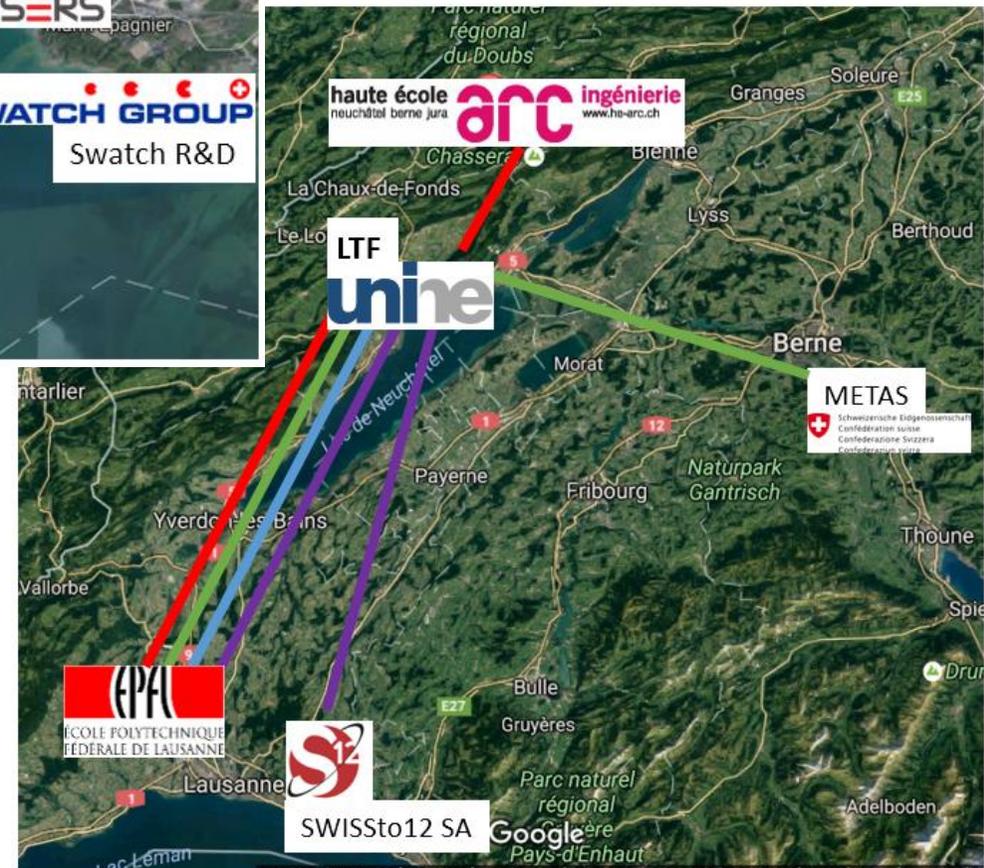
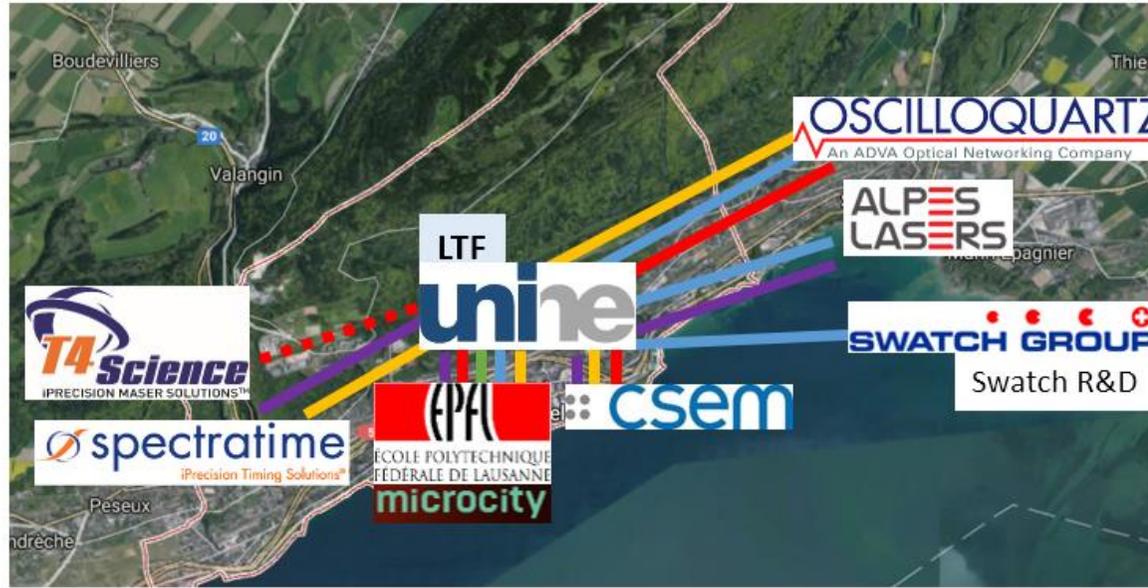
2011... see talk of P. Rochat

LABORATOIRE TEMPS – FRÉQUENCE (LTF)

2007

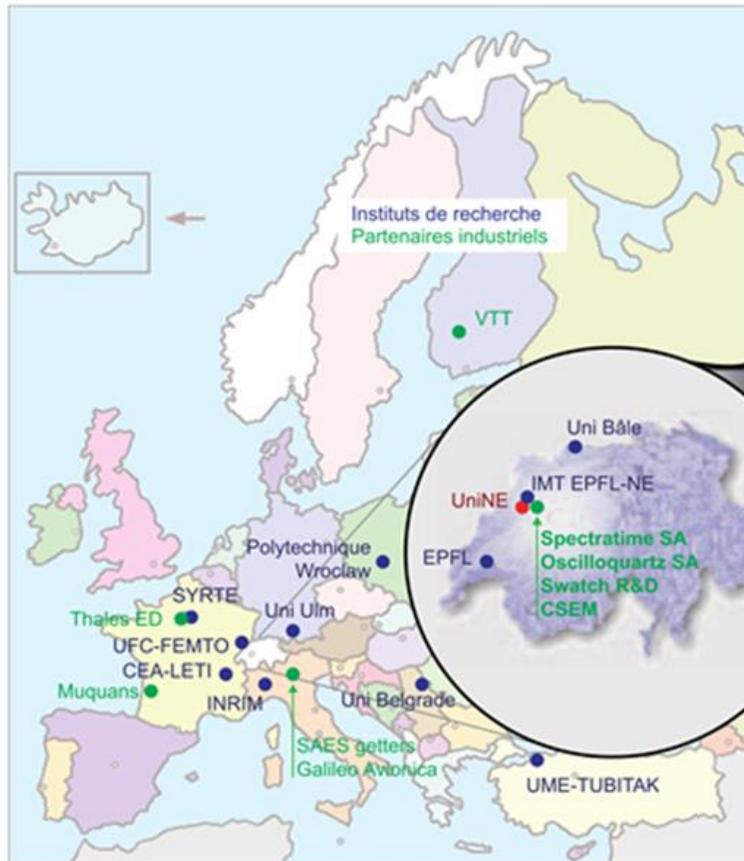


UNIQUE LOCAL NETWORK

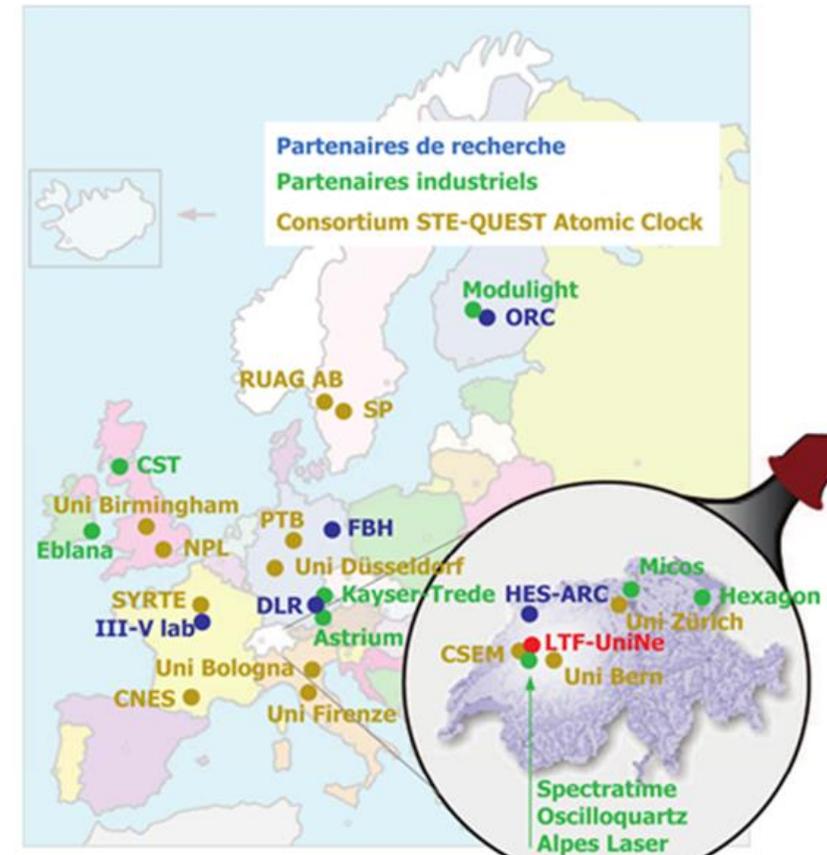


INTERNATIONAL COLLABORATIONS

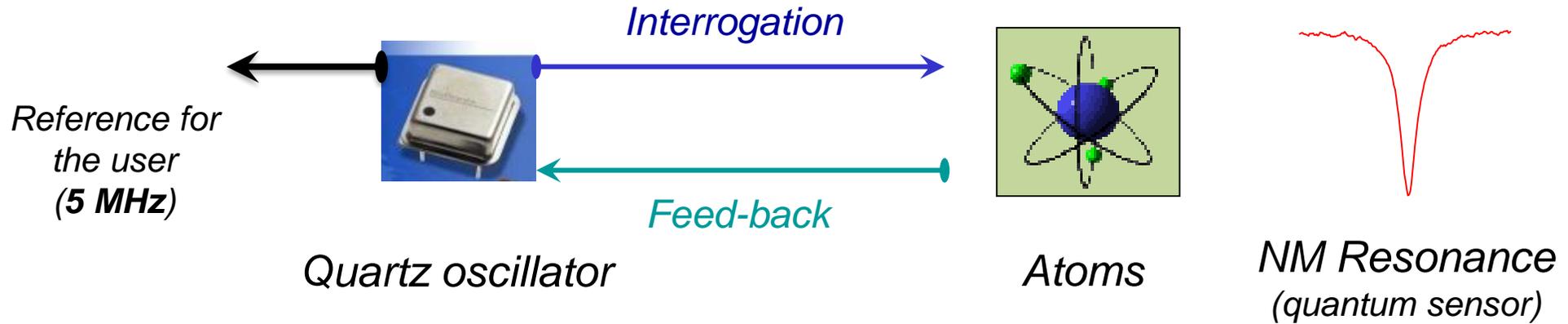
Domaine des horloges compactes (haute-performance et miniature)



Domaine des lasers stabilisés



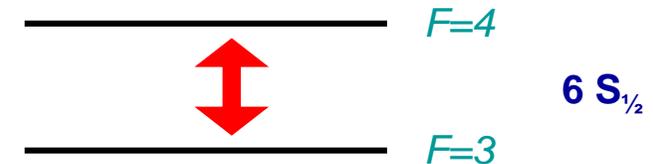
2) ATOMIC CLOCKS PRINCIPLE



Note: first quartz wrist watch invented in NE in 1967

Definition in SI system

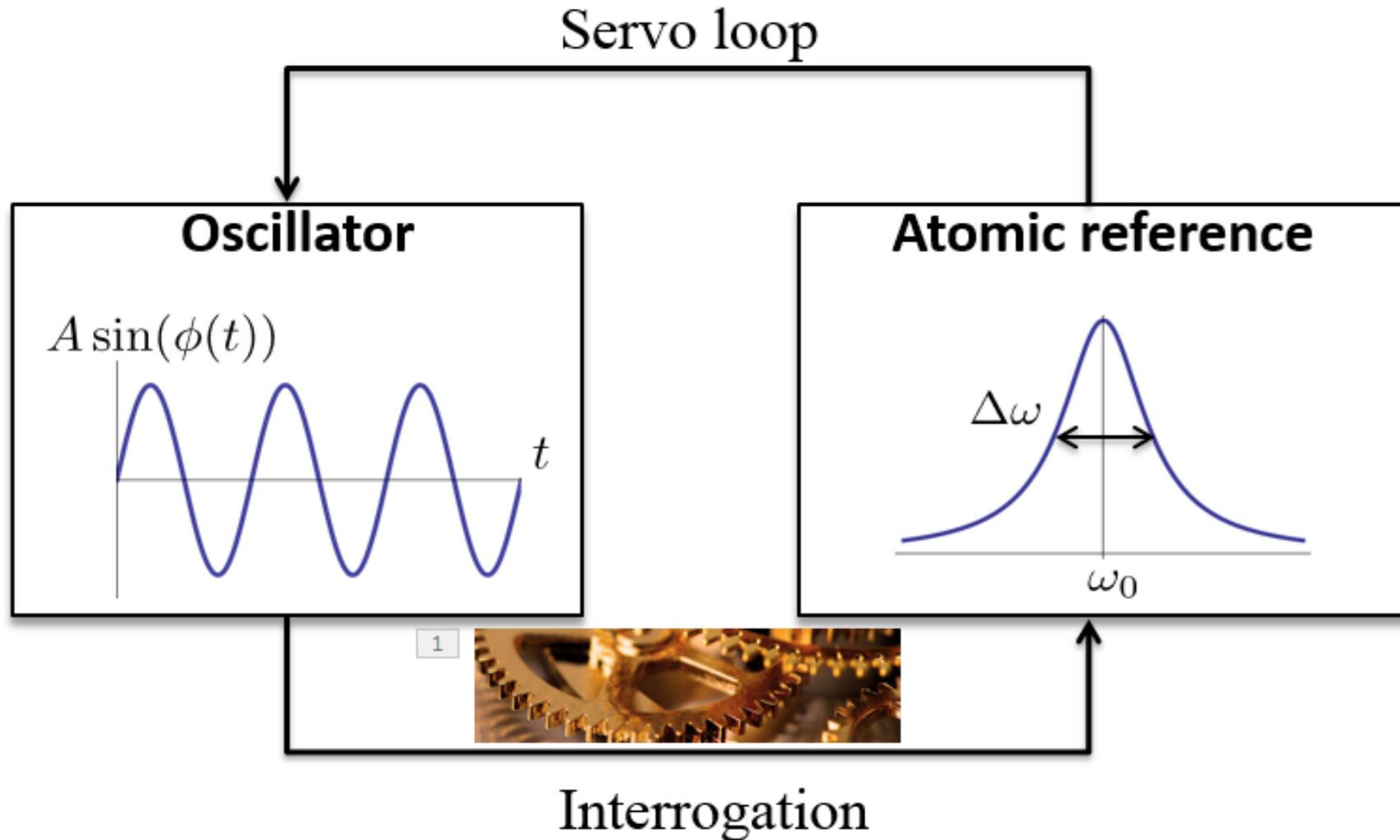
The second is the duration of 9 192 631 770 periods of the radiation corresponding to the transition between the two hyperfine levels of the ground state of cesium 133 (1967)



$$\text{Frequency } \nu_0 = \frac{E_2 - E_1}{h} = 9192631770 \text{ Hz}$$

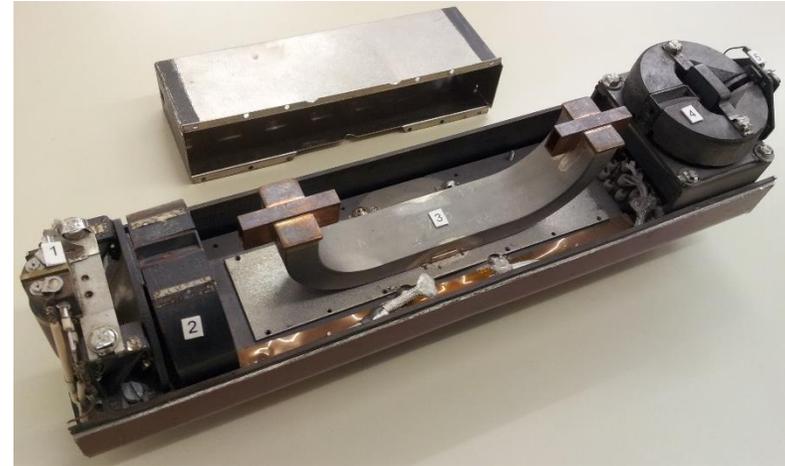
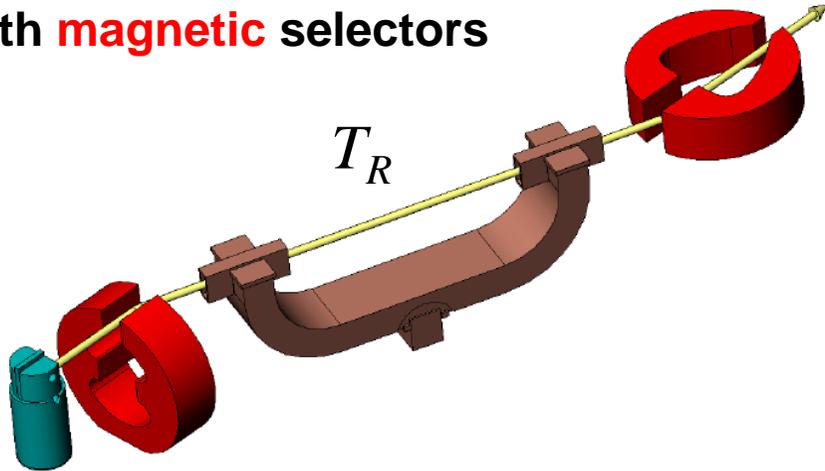
This would be the frequency of an atomic clock in which the atomic transition is not perturbed and the stabilization "perfect"

ATOMIC CLOCKS PRINCIPLE

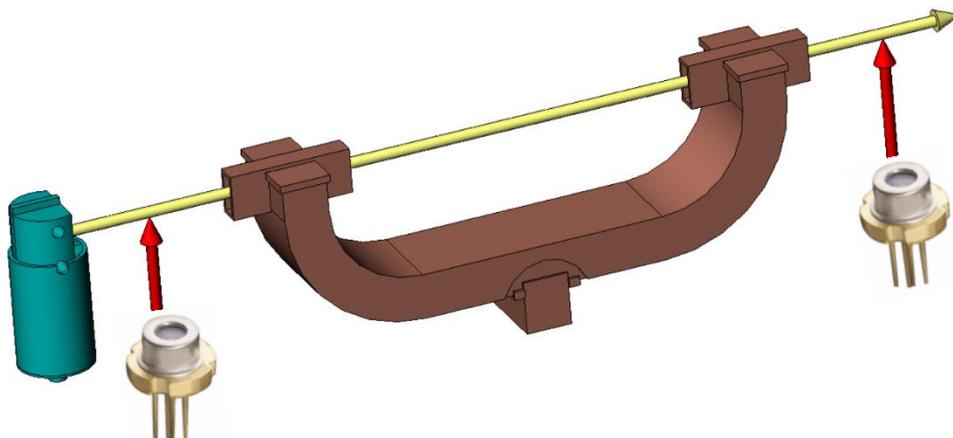


EXAMPLE OF ATOMIC CLOCKS: CESIUM BEAM

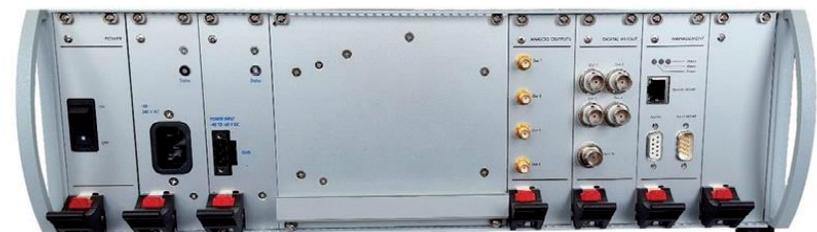
With **magnetic** selectors



With **laser diode** optical pumping and detection

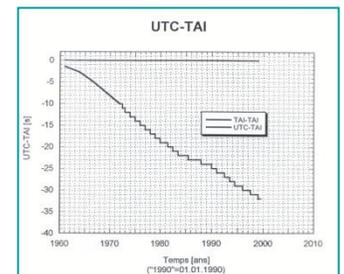
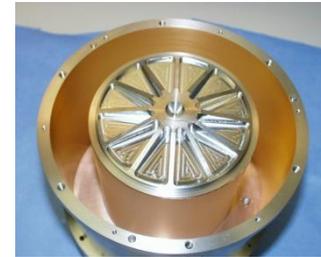
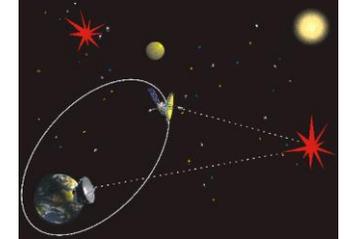


OSCILLOQUARTZ
An ADVA Optical Networking Company



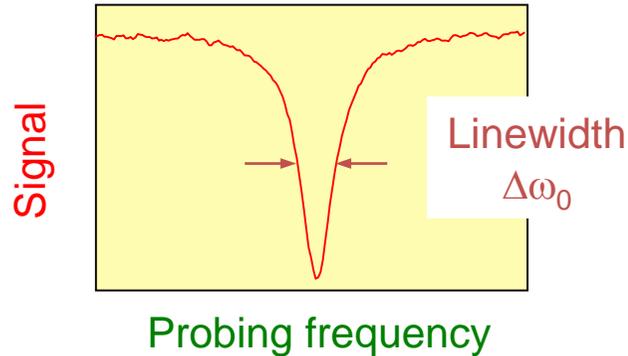
MAIN APPLICATIONS OF ATOMIC CLOCKS

- ▶ *Radioastronomy, Geodesy*
(VLBI, Radioastron, etc.)
- ▶ *Scientific Research, Instrumentation*
(Microgravity, ACES, HYPER, etc.)
- ▶ *Navigation & Positioning*
(Galileo, GPS, GLONASS, etc.)
- ▶ *Telecommunications*
(Networks synchronisation, etc.)
- ▶ *Power distribution networks*
(Smart power grids.)
- ▶ *Metrology, Time scales*
(Primary and secondary standards, H-Masers)



3) CURRENT RESEARCH: MAIN TRENDS

Resonance frequency ω_0



Quality factor: Q

$$Q = \frac{\omega_0}{\Delta\omega_0} = \omega_0 \cdot T_R$$

Instability $\sim 1/Q$

Novelties: use of lasers



and microfabrication techniques



Cold (slow) atoms

Increase T_R :

From ms to seconds

Optical standards

Increase ω_0 :

From 10^9 Hz to 10^{14} Hz

Miniaturisation

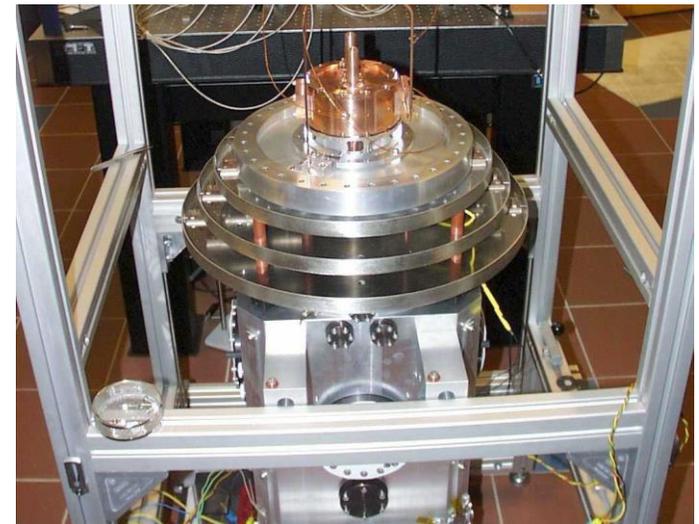
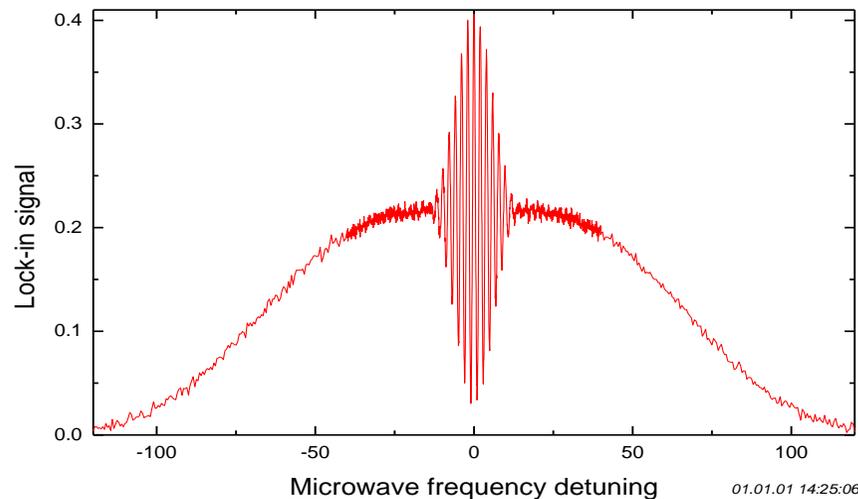
Reduce the «**SWAP**»

Size, Weight And Power

COLD CESIUM BEAM CLOCKS (FOUNTAINS)

$$\text{Linewidth } \Delta\omega_0 \propto \frac{1}{T_R}$$

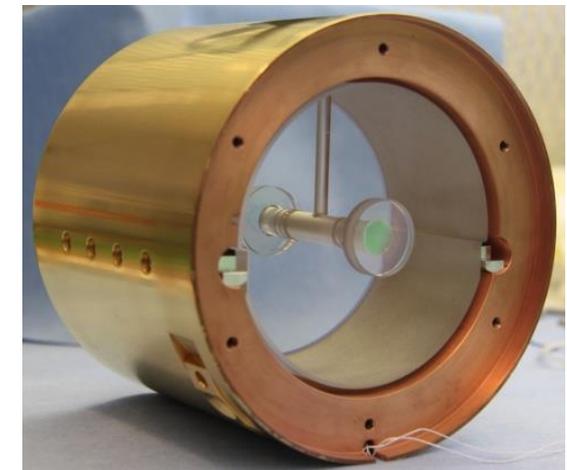
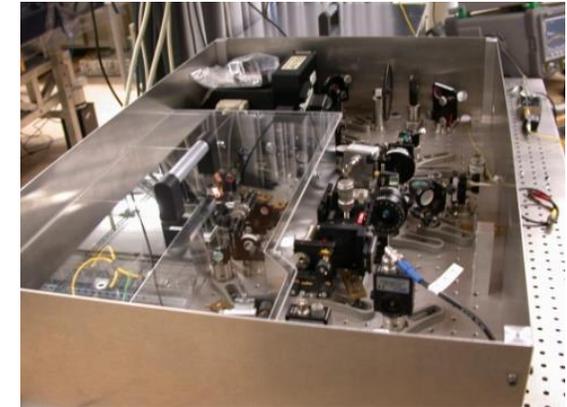
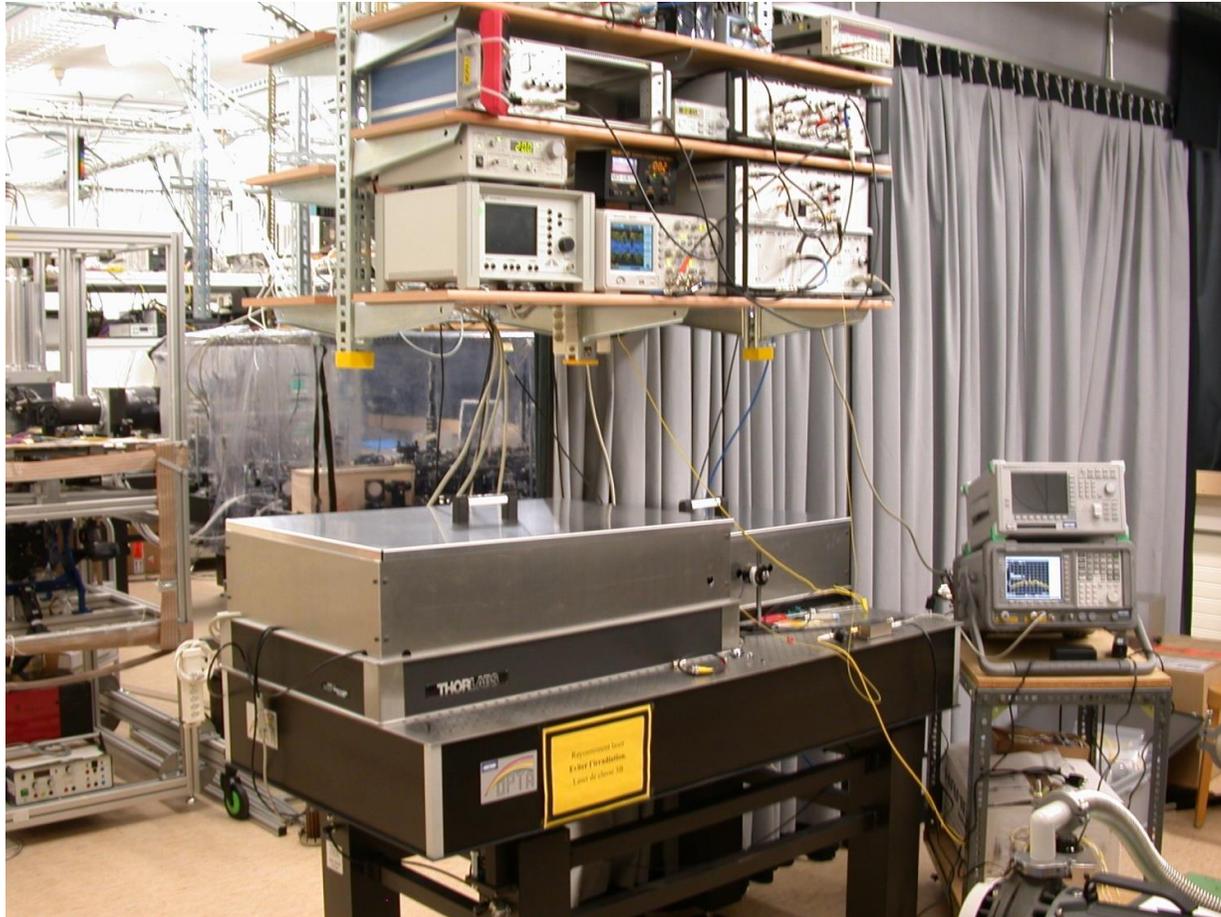
- Thermal beam: $v = 100 \text{ m/s}$, $T_R = 5 \text{ ms}$
 $\Delta\omega_0 = \mathbf{100 \text{ Hz}}$
- Cold fountain: $v = 4 \text{ m/s}$, $T_R = 0.5 \text{ s}$
 $\Delta\omega_0 = \mathbf{1 \text{ Hz}}$



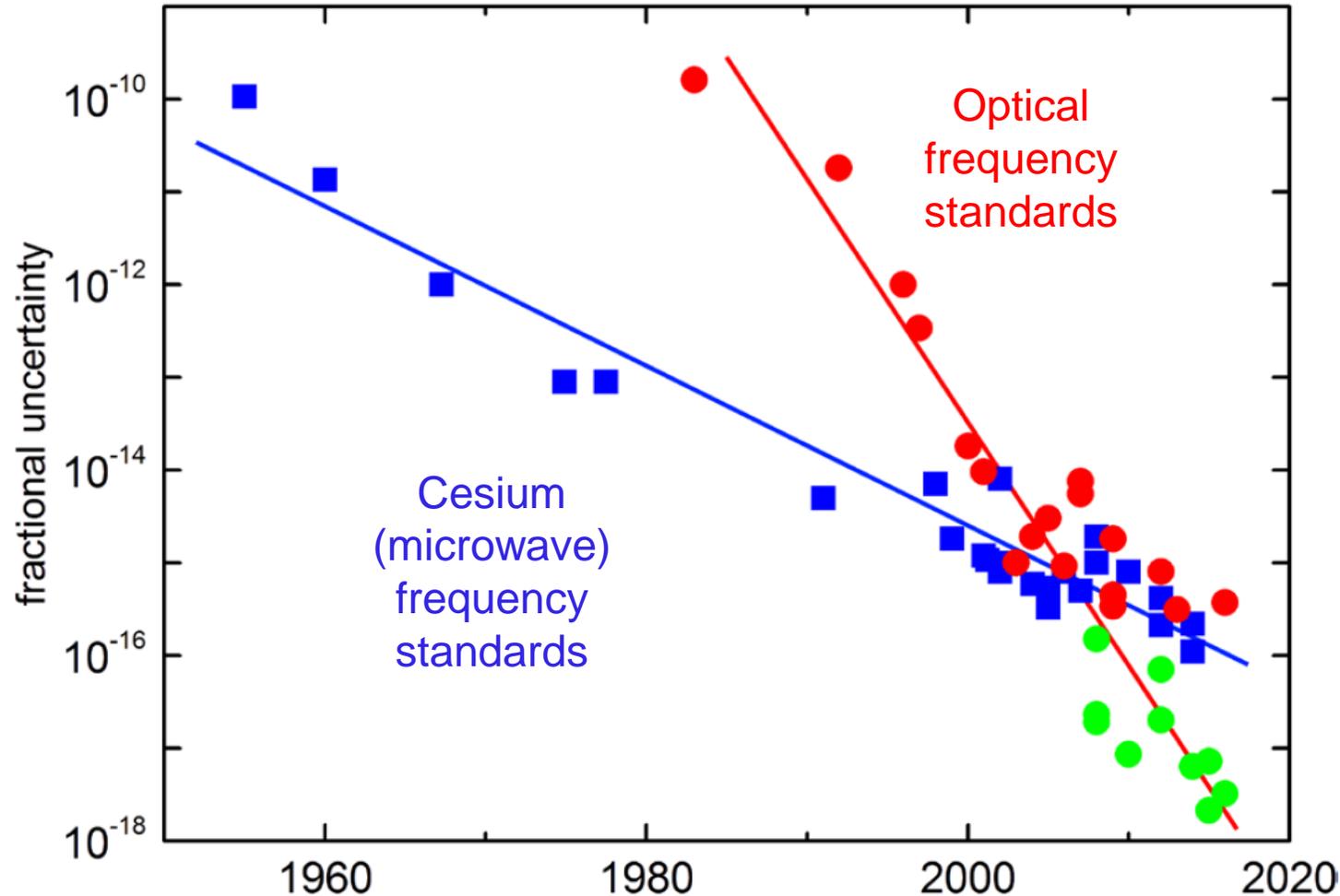
Next step: microgravity (ACES mission on ISS)

OPTICAL FREQUENCY STANDARDS (& COMBS)

Increase the resonance frequency $Q \propto \omega_0 \cdot \tau \rightarrow 10^{-18}$

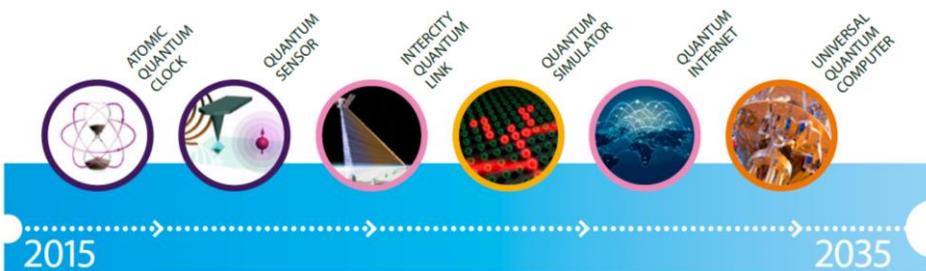
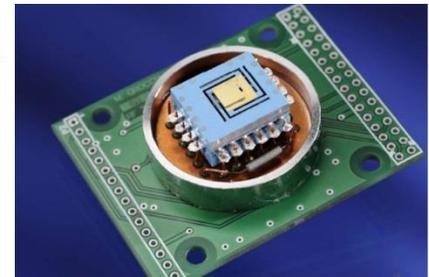
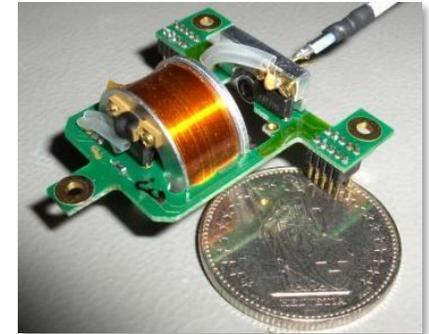


TOWARDS A REDEFINITION OF THE SECOND?



Fritz Riehle *et al*
2018 *Metrologia*
55 188

MINIATURISATION & QUANTUM TECHNOLOGIES



THANK YOU FOR YOUR ATTENTION

Prof. **Gaetano Mileti**

Gaetano.Mileti@unine.ch

Laboratoire Temps – Fréquence (LTF)

<http://www.unine.ch/ltf/fr/home.html>

www.unine.ch

