

## ► Quand les constantes n'en sont plus

### Sources

#### Design of the Cold Atom PHARAO Space Clock and Initial Test Results

Laurent Ph., Abgrall M., Jentsch Ch., Lemonde P., Santarelli G., Clairon A., Bize S., Salomon Ch., Blonde D., Vega J.F., Grosjean O., Picard F., Saccoccio M., Chaubet M., Ladiette N., Guillet L., Zenone I., Delaroche Ch., Sirmain Ch.

*Applied physics. B : Lasers and Optics*, vol. 84, pp 683-690, september 2006

### Notes

#### Période :

Les ondes électromagnétiques, du rayonnement gamma aux ondes radio en passant par la lumière visible sont caractérisées par leur longueur d'onde (exprimée en mètre). La période (exprimée en seconde) ou la fréquence (exprimée en Hertz) sont calculées simplement à partir de cette valeur.

#### Transition :

Dans un atome, les électrons ne peuvent se trouver que dans certaines zones de l'espace (orbitales) parfaitement déterminées dite quantifiée. Sous l'action d'un photon absorbé un électron peut passer d'un niveau d'énergie à un niveau d'énergie supérieur. Mais cette situation est instable et l'électron revient à son niveau d'énergie d'origine en émettant un photon dont la longueur d'onde est parfaitement déterminée et stable.

#### Le domaine micro-onde :

(comme les fours de cuisine) correspond à des longueurs d'onde du rayonnement électromagnétique ayant une longueur d'onde de 1 à 300 millimètre.

Depuis 1967, le temps vit au rythme des oscillations des atomes : son étalon, la seconde, est défini comme la durée de 9 192 631 770 [périodes](#) (ni plus ni moins !) de la radiation correspondant à une certaine [transition entre deux niveaux d'énergie](#) de l'atome de césium 133. Rassurez-vous, ces horloges atomiques (comme celle qui vous donne le 4ème top) ne produisent pas de déchets nucléaires et ne sont pas radioactives. Le césium 133 est un élément stable. Les électrons des atomes de césium changent de niveau d'énergie lorsqu'ils sont soumis à une radiation [micro onde](#) en subissant une transition dite de structure hyperfine. Il se trouve que le phénomène quantique utilisé, l'absorption ou l'émission de photons correspondant à ce changement d'énergie, fournit une fréquence plus précise et plus stable que tous les autres phénomènes connus. L'utilisation des horloges atomiques repose sur un postulat que l'observation n'a encore jamais mis en défaut : les propriétés des atomes sont universelles et invariantes dans le temps. La fréquence de l'horloge est ainsi la même pour tous les atomes de césium 133, aux corrections relativistes près.

En effet depuis la théorie de la relativité d'Einstein, il y a un siècle, le temps est devenu élastique. Le temps n'est plus ce cadre immuable et uniforme qu'avait décrit Newton. Le temps et l'espace s'entremêlent dans l'espace-temps ; la gravitation est aussi de la partie en déformant l'espace-temps. La vitesse des observateurs mais aussi l'intensité du [potentiel gravitationnel](#) influent sur la vitesse d'écoulement du temps. Les durées mesurées entre deux événements par des observateurs situés dans des référentiels différents ne donnent pas le même résultat. Les horloges en mouvement prennent du retard par rapport aux horloges fixes. C'est ainsi que le temps est soumis à des effets relativistes comme la dilatation du temps ou le décalage gravitationnel (red-shift). Autant d'effets prévus par la relativité qui sont vérifiables par l'expérience en comparant des signaux d'horloges situées à des endroits éloignés les uns des autres.

Le temps est au croisement de diverses branches de la physique moderne : relativité générale, physique quantique, cosmologie. Plus déroutant encore, les physiciens nous prédisent que la relativité générale pourrait ne pas être pas la théorie ultime des lois de la nature. Ses principes semblent être incompatibles avec ceux de la mécanique quantique. C'est un vrai casse-tête ! Lorsque ces deux disciplines interviennent en même temps comme en cosmologie, d'importants problèmes conceptuels surgissent. Pour décrire l'univers entier, sa naissance et son évolution, les deux théories sont en effet nécessaires : la relativité générale définit la structure géométrique de l'univers alors que le modèle standard de physique des particules (modèle quantique) décrit son contenu en matière. Il est possible que la résolution de leur incompatibilité passe par une théorie unifiée des phénomènes gravitationnels et non gravitationnels.

► Et le signal sortit de la mélasse

Notes

**Potentiel gravitationnel :**

Le temps s'écoule plus lentement dans les champs de gravitation très intenses, tels ceux qui règnent à la surface des corps célestes massifs comme le Soleil. Même sur notre Terre, cet effet pourrait être mesuré si les horloges avaient des performances suffisantes : théoriquement, en bas d'une montagne les horloges battent moins vite qu'en altitude.

**Constante de structure fine « alpha » :**

Historiquement la constante de structure fine a été introduite par Arnold Sommerfeld en 1916 quand il a étudié la structure de l'atome d'hydrogène. En introduisant des orbites électroniques elliptiques plutôt que circulaires, il apparaissait un doublement des raies spectrales de l'hydrogène appelé structure fine. Aujourd'hui alpha est considéré comme la constante de couplage de la force électromagnétique.

**Ultravide :**

Les mesures se font sur un nuage d'environ 10 millions d'atomes de césium 133 se propageant dans un vide tel que toutes les autres traces de gaz sont éliminées.

**Kelvin :**

Unité de mesure de la température « thermodynamique » ou température absolue. Une température de 0 kelvin correspond à une température de  $-273,15^{\circ}\text{C}$ . Une température d'un microkelvin (un millionième de kelvin) correspond donc à une température très très proche du 0 absolu.

De minuscules effets violant la relativité générale devraient alors être observables, notamment une dérive avec le temps des constantes fondamentales des lois de la physique. Les constantes ne seraient plus constantes ! C'est là que les horloges interviennent à nouveau car les nouvelles générations d'horloges atomiques, d'une exactitude et d'une stabilité diaboliques, pourraient détecter leur variation dans le temps. En particulier, la variation relative de la constante de structure fine pourrait être suivie avec une précision égale à  $10^{-17}$  par an. Le sujet est étudié aujourd'hui par un nombre de laboratoires grandissant, parce qu'il constitue une des voies d'accès à la « physique au delà du modèle standard ». L'idée n'est plus seulement de tester une éventuelle dérive de la seule constante de structure fine (une paire d'horloges fonctionnant avec des atomes différents est alors suffisante), mais de comparer des horloges fonctionnant sur des principes aussi différents que possible afin de suivre les dérives éventuelles des diverses constantes fondamentales impliquées.

Pour gagner en précision, les chercheurs se sont ingéniés à minimiser toutes les sources potentielles d'erreur et à éviter que les atomes ne soient perturbés par leur environnement. Cela impose de multiples contraintes techniques comme d'abaisser la pression jusqu'à l'ultra-vide ou d'abriter les atomes derrière un blindage magnétique. Ils ont réussi à les ralentir en les piégeant par une technique optique de refroidissement par laser, créant une « mélasse optique ». Des températures de l'ordre du microkelvin, proches du zéro absolu, ont ainsi été atteintes. Le pic de résonance, représentant le nombre d'atomes détectés ayant subi la transition en fonction de la fréquence, est alors plus fin ; d'où un gain de performances de l'horloge car c'est ce pic qui sert de signal d'asservissement sur un oscillateur externe, tel qu'un quartz ultra stable. Des améliorations ont été mises au point en utilisant une géométrie en fontaine atomique, pour allonger le temps de vol des atomes. Ces atomes refroidis reçoivent une impulsion verticale infinitésimale par laser et passent alors deux fois dans la cavité micro-onde, lors de la montée et lors de la descente sous l'action de la pesanteur. Une dizaine de fontaines atomiques fonctionnent ainsi dans le monde, avec des performances record.

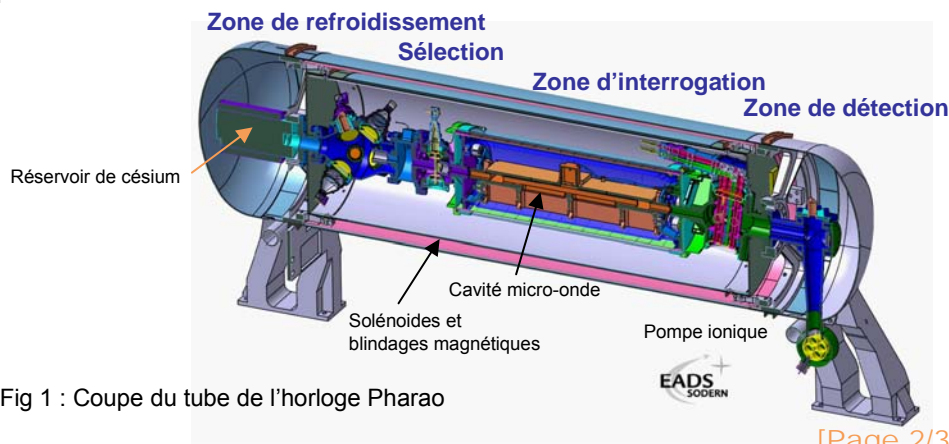


Fig 1 : Coupe du tube de l'horloge Pharaon

## ► A la recherche du temps perdu

### Notes

#### Airbus OG :

Airbus A300 de présérie, affrété par le CNES et la société Novespace. L'avion a été modifié et équipé pour recevoir des expériences activées au cours de vols paraboliques créant des périodes de micropesanteur de 20 à 25 secondes.

### Contacts chercheurs

Philippe Laurent  
SYRTE (SYstèmes de  
Référence Temps Espace)  
Paris  
[philippe.laurent@obsprm.fr](mailto:philippe.laurent@obsprm.fr)

### + sur le web

[SYRTE](#)

[Observatoire de Paris](#)

[Laboratoire Kastler Brossel](#)

### + sur le CNES

[CNES](#)

[Missions scientifiques du  
CNES](#)

L'idée de placer une horloge à atomes de césium refroidis par laser dans l'espace, est apparue dans les années 1990, en Europe puis aux Etats-Unis. Le projet d'horloge spatiale Pharaon proposé par le laboratoire Kastler-Brossel de l'Ecole Normale Supérieure de Paris et le laboratoire Syrte (SYstèmes de Références Temps-Espace) de l'Observatoire de Paris a été sélectionné en 1997 par l'ESA. L'exactitude visée est de  $10^{-16}$  et la stabilité de fréquence de  $3 \times 10^{-16}$  à 1 jour. Pharaon fait partie du projet Aces (Atomic Clock Ensemble in Space), prévu à l'extérieur du module européen Columbus de la station spatiale internationale. Outre Pharaon fourni par la France, le projet Aces comprend notamment un maser à hydrogène fourni par l'Observatoire de Neuchâtel en Suisse et un lien micro-onde de nouvelle génération développé en Allemagne. Les fréquences de ces deux horloges Pharaon et Maser seront comparées entre elles, ainsi qu'à celles d'horloges de différents types, situées au sol et réparties en différents points du globe grâce au lien micro-onde et à un récepteur GPS/Galileo installé à bord. Cet ensemble fournira la meilleure technique de comparaison d'horloges avec une exactitude et une stabilité de l'ordre de  $10^{-17}$ . Il testera ainsi les bases de la relativité générale jusqu'aux limites extrêmes et recherchera les dérives éventuelles des constantes fondamentales.

Revenons sur Terre ! Il aura fallu presque dix ans d'innovation entre la réalisation du prototype de laboratoire testé en micropesanteur dans [l'Airbus Og](#) et la réalisation du modèle d'ingénierie Pharaon de qualité spatiale, qui est un concentré des technologies les plus avancées. Le CNES a reçu les derniers éléments de ce modèle au cours de l'année 2006. Les essais sont en cours avec les scientifiques à Toulouse. L'article en référence rend compte de ces travaux. L'horloge a donné ses premiers signaux : les atomes ont été capturés, refroidis et lancés dans la cavité d'interrogation micro-onde. Le signal obtenu atteste du succès des technologies utilisées. Les performances du modèle d'ingénierie de l'horloge Pharaon seront ensuite testées avec le maser à hydrogène dans la configuration du projet Aces de l'ESA.

#### Signal d'asservissement :

Une horloge atomique se fonde sur la comparaison du signal fourni par un oscillateur comme un cristal de quartz et de la valeur de la fréquence de résonance atomique. Si un écart entre ces deux mesures est constaté, un signal est envoyé pour corriger la fréquence de l'oscillateur. Ce système constitue un asservissement.

E-Space&Science vous informe des résultats des expériences scientifiques soutenues par le CNES

Directeur de la publication : **Yannick d'Escatha** ■ Directeur de la rédaction : **Pierre Tréfouret** ■ Rédacteur en chef : **Michel Viso** ■ Secrétaire de rédaction : **Martine Degrave** ■ Rédactrice : **Sylvie Léon-Hirtz** ■ Diffusion du magazine : **INIST diffusion** ■

#### Abonnement

Envoyez un mail sans objet ni contenu à :

[Abonnement version Française](#)

ou à :

[Abonnement version Anglaise](#)

#### Désabonnement

Envoyez un mail sans objet ni contenu à :

[Désabonnement version Française](#)

ou à :

[Désabonnement version Anglaise](#)