

HORLOGES ATOMIQUES

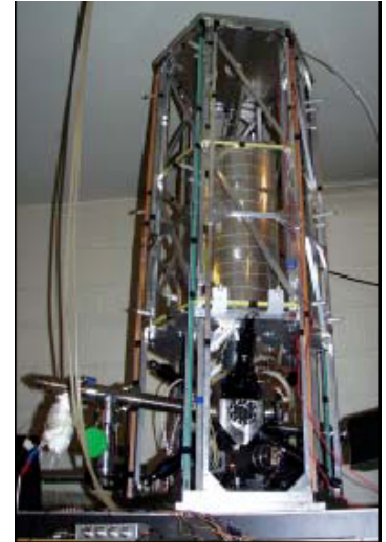
Pierre Lemonde
SYRTE (UMR CNRS 8630)
Observatoire de Paris, France

Ce séminaire a eu pour but de nous présenter les horloges atomiques, leur utilité, leur fonctionnement et leurs améliorations. La majeure partie de l'exposé fut consacrée à leur principe.

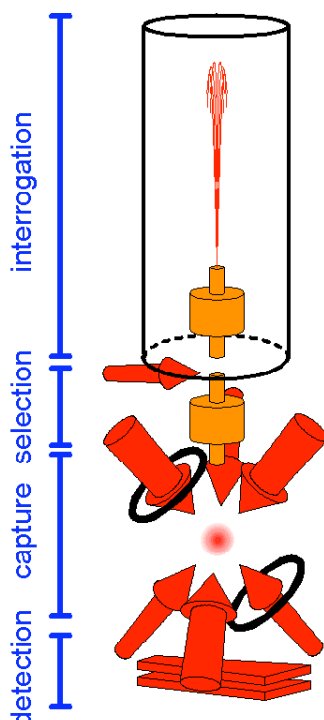
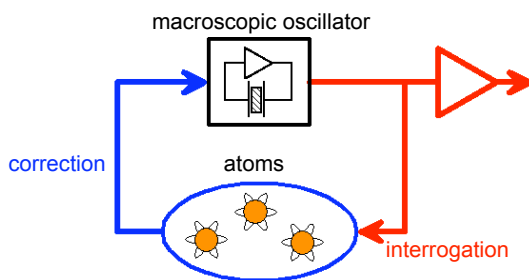
Utilité

Les horloges atomiques servent bien entendu à fixer et étalonner le temps international. Elles trouvent aussi de nombreuses applications dans des mesures de grande précision, comme la mesure des constantes fondamentales, ou dans la technologie de pointe.

Principe de fonctionnement



Fontaine à Césium



Comme on peut le voir sur le schéma ci-contre, le principe théorique d'une horloge atomique est simple. On dispose d'un oscillateur macroscopique, l'horloge proprement dite, qui nous renseigne sur le temps. Cet oscillateur est couplé à un système d'atomes dont une fréquence de transition est bien connue (la transition hyperfine du césium fixe la seconde par convention), et en interrogeant régulièrement ce système atomique, on peut corriger les variations de l'oscillateur. Ainsi, l'oscillateur est calé sur une oscillation très précise d'une transition atomique.

Dans le cas présent, le système d'atome est un jet d'atomes de césium. On appelle le dispositif (voir ci-contre) une fontaine d'atomes. Dans un premier temps, les atomes sont confinés par un piègeage laser, puis un léger décalage doppler leur donne une impulsion verticale. Ils partent vers le haut, puis retombent sous leur propre poids, d'où l'appellation fontaine. Lors de l'envol, les atomes sont sélectionnés afin de ne retenir les atomes dans les bonnes conditions, puis ils sont « interrogés » lors de la redescende, afin de déterminer le taux de transition, et ainsi obtenir la fréquence de transition de manière toujours plus fine avec des mesures successives.

Mesures

La formule suivante nous donne la stabilité en fréquence de l'oscillateur en fonction de la pulsation choisie, connaissant la pulsation caractéristique de la transition, et en fonction du temps de mesure.

$$\sigma_y(\tau) \sim \frac{1}{\omega_0} \sigma_\omega(T_c) \sqrt{\frac{T_c}{\tau}} \sim \frac{\Delta}{\omega_0} \sigma_{P_e}(T_c) \sqrt{\frac{T_c}{\tau}}$$

Avec cette formule, on arrive à des précisions théoriques qui frôlent $7 \cdot 10^{-16}$, la variation relative de la fréquence. Mais nous allons voir que de nombreux problèmes rendent cette valeur difficilement atteignable.

Perturbations

Plusieurs effets notoires sont à prendre en compte afin d'affiner la précision des horloges atomiques, en particuliers le bruit de projection quantique, qui contribue ainsi à l'instabilité de fréquence :

$$\sigma_y(\tau) = \frac{1}{\pi Q_{at}} \times \frac{1}{\sqrt{n_{ph} N_{det}}} \times \sqrt{\frac{T_c}{\tau}}$$

Les autres effets à prendre en compte sont les effets Zeeman du second ordre, l'effet Doppler résiduel, le rayonnement du corps noir, les collisions entre atomes, etc... pour ne citer que les plus gênants. Heureusement, chacun à sa solution, qu'elle soit technique ou informatique.

Projets en cours

Il est prévu d'envoyer une horloge atomique sur la prochaine station spatiale internationale. Ceci permettrait de l'affranchir de plusieurs problèmes liés à la localisation sur terre, ainsi que rendre enfin une horloge atomique accessible à tout le monde par le biais d'une simple connexion par micro-ondes.

Le prochain défi des horloges atomiques sera quant à lui de vérifier le principe d'équivalence d'Einstein, à savoir la stabilité des constantes fondamentales dans le temps et l'espace. Rien que ça !

