

Les horloges atomiques perfectionnées grâce aux cartes AWG au format PXIe

Dans le monde entier, des centaines d'horloges atomiques sont comparées en permanence afin d'établir le Temps atomique international (TAI). En Allemagne, le Physikalisch-Technische Bundesanstalt (PTB) contribue avec deux des horloges à fontaine de césium les plus performantes au monde. Leur fonctionnement continu repose toutefois sur une technologie sophistiquée permettant de refroidir par laser des nuages d'atomes à quelques microkelvins et d'effectuer une spectroscopie de Ramsey. Les cartes AWG de Spectrum Instrumentation jouent un rôle clé dans la dernière configuration des horloges atomiques. Les horloges à fontaine de césium CSF1 et CSF2 pilotent l'échelle de temps de référence nationale UTC (PTB) et constituent la base des services de temps du PTB et de l'heure légale pour toute l'Allemagne, en synchronisant tout, des horloges et des trains au trafic aérien, aux communications, à la radiodiffusion, aux systèmes informatiques et bien plus encore.



Les deux horloges à fontaine de césium du PTB fournissent l'heure légale pour l'ensemble de la République fédérale d'Allemagne.

Les horloges à fontaine de césium, telles que celles exploitées au PTB, reposent sur le comportement quantique des atomes de césium. Une seconde est définie comme la durée de exactement 9 192 631 770 périodes du rayonnement correspondant à la transition entre les deux niveaux d'énergie de l'état fondamental de l'atome de césium-133. Dans une chambre à vide, un nuage ultrafroid de ces atomes traverse deux fois une cavité micro-onde de Ramsey avant que son état final ne soit mesuré par spectroscopie de fluorescence induite par laser.

Comment refroidir les atomes de césium

Le Dr Johannes Rahm, membre du département Temps et Fréquence du PTB, explique : "Avant de pouvoir effectuer la mesure, il faut charger un nuage d'atomes ultrafroids. Cela est réalisé au moyen d'un piège magnéto-optique (CSF1) ou d'une mélasse optique (CSF2). Dans les deux cas, des lasers disposés selon une géométrie spécifique sont légèrement désaccordés en dessous d'une transition optique du césium-133. En raison du mouvement thermique résiduel, cette lumière laser est décalée par effet Doppler vers la fréquence de transition et, grâce à l'absorption des photons du laser et à la conservation de la quantité de mouvement, les atomes du nuage sont ralentis et donc refroidis."

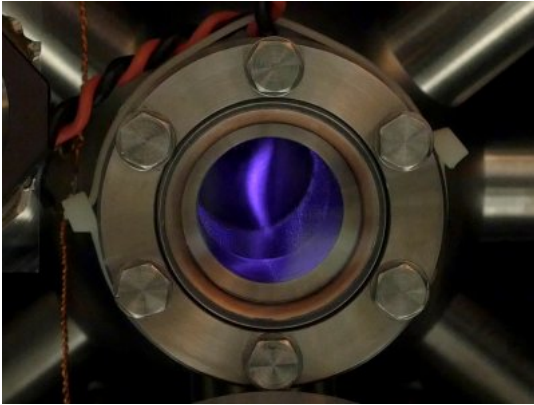


Photo infrarouge de la chambre à vide montrant le nuage d'atomes de césium fluorescent. (Photo avec l'aimable autorisation de Mareike Bernien)

Un cycle de fonctionnement de l'horloge à fontaine de césium

Une petite différence de fréquence entre les lasers pousse ensuite le nuage vers le haut, comme lorsqu'on lance une balle en l'air. Cela crée l'effet « fontaine » : les atomes traversent la cavité de Ramsey une première fois en montant, puis une seconde fois en redescendant sous l'effet de la gravité. Après le deuxième passage dans la cavité de Ramsey, la probabilité de transition est déterminée par spectroscopie de fluorescence. Lors de chaque passage dans la cavité de Ramsey, une impulsion micro-onde est appliquée. La fréquence de cette impulsion est réglée de manière à ce que la probabilité de transition résultante soit d'environ 50 %. À chaque cycle de la fontaine, qui comprend la phase de chargement, la phase de lancement, l'interrogation de Ramsey, la détection et les trajectoires balistiques entre les différentes phases, le signe du désaccord de fréquence micro-onde est inversé, de sorte que les côtés gauche et droit de la structure symétrique de probabilité de transition soient échantillonnés. La véritable fréquence de transition est alors donnée par la moyenne des deux fréquences asservies réglées pour une probabilité de transition de 50 %. Une fois la mesure terminée, après environ 1,2 seconde, le cycle recommence et se poursuit 24 heures sur 24.

Évolution des horloges

L'horloge à fontaine de césium nécessite un contrôle précis des lasers. À l'origine, celui-ci était assuré par des circuits analogiques personnalisés développés par une génération précédente d'ingénieurs et de scientifiques du PTB. La maintenance à long terme d'un système aussi complexe devient de plus en plus difficile. Ainsi, à l'image de l'expérience elle-même, l'électronique de support doit également évoluer, ce qui a conduit le Dr Rahm à étudier comment remplacer le système analogique par une alternative numérique. Ses recherches l'ont amené à intégrer des cartes AWG (Arbitrary Waveform Generator) au format PXIe de Spectrum Instrumentation. Ces cartes génèrent les fréquences RF nécessaires pour moduler les fréquences laser lors du refroidissement, du lancement et de la détection des atomes à l'aide de modulateurs acousto-optiques.



Le Dr Johannes Rahm inspecte les horloges à fontaine de césium, qui fonctionnent en continu 24 heures sur 24. (Photo avec l'aimable autorisation du PTB)

La réactivité du support Spectrum

Cependant, un défi est apparu lors de la mise en œuvre. Bien que les cartes AWG M4x.6622-x4 répondent très largement aux exigences de précision, aucun des modes de génération de signaux disponibles ne correspondait aux exigences particulières du PTB. Pour une conception efficace du cycle de l'horloge à fontaine de césium, chaque laser nécessite un ensemble spécifique de formes d'onde à un moment précis du cycle. Le Dr Rahm a contacté le support de Spectrum Instrumentation, assuré directement par les ingénieurs de conception. En seulement deux jours, les ingénieurs logiciels ont développé une nouvelle fonction appelée "Sequence Restart Mode". Les tests du Dr Rahm ont été concluants et le nouveau mode fonctionne exactement comme prévu.



Carte générateur de formes d'ondes arbitraires Spectrum M4x.6622 au format PXIe. (Photo : Spectrum)

Entre-temps, Spectrum Instrumentation a publié le Sequence Restart Mode sous la forme d'une mise à niveau gratuite pour tous les AWG des séries 65xx et 66xx. Le nouveau mode peut être activé facilement en installant les derniers pilotes.

À propos de Spectrum Instrumentation

Spectrum Instrumentation, fondée en 1989, s'appuie sur un concept modulaire spécifique pour concevoir et produire une vaste gamme de produits qui compte plus de 200 numériseurs et générateurs au format PCIe et PXIe ainsi qu'intégrés dans des boîtiers autonomes connectés à Ethernet (LXI). En plus de 35 ans, Spectrum a gagné la confiance de clients du monde entier, y compris de nombreux leaders industriels et de pratiquement toutes les plus prestigieuses universités. L'entreprise, dont le siège est situé près de Hambourg, en Allemagne, est réputée pour offrir une garantie de 5 ans et une assistance exceptionnelle délivrée directement par ses ingénieurs concepteurs. De plus amples informations sur Spectrum sont disponibles à l'adresse Internet suivante: www.spectrum-instrumentation.com

Spectrum Instrumentation GmbH

Ahrensfelder Weg 13-17

22927 Grosshansdorf

Germany

Sven Harnisch

Téléphone: +49-4102-6956-0

sven.harnisch@spec.de

<https://spectrum-instrumentation.com/>