

PROJET PHARE

LA SECONDE OPTIQUE EN VOIE DE STABILISATION

Incontournable pour l'étalonnage du Temps Atomique International (TAI) au niveau mondial, le LNE-SYRTE l'est tout autant pour préparer la redéfinition en cours de la seconde du SI. Les résultats obtenus en 2024 sur la stabilisation des lasers d'interrogation des horloges optiques à partir de matériaux dopés en terres rares en témoignent.

À l'horizon 2030, l'unité de temps sera redéfinie. Depuis 1967, la seconde est définie à partir d'une fréquence micro-onde de radiation correspondant à une transition de l'atome de césium 133. Et, sous l'égide du CIPM, les laboratoires nationaux de métrologie temps-fréquence travaillent déjà depuis quelques années pour proposer une nouvelle définition et prouver son opérabilité pratique. À terme, la définition sera fondée sur une ou plusieurs transitions atomiques dont les fréquences seront dans le domaine optique, avec à la clé la possibilité de réaliser la seconde avec une exactitude 100 fois meilleure.

Pour permettre cette bascule, il convient de mettre au point une nouvelle génération d'horloges et également toute l'infrastructure périphérique permettant leur mise en œuvre avec des performances ultimes. En particulier, la stabilité et l'incertitude cibles ne seront atteintes qu'à la condition de disposer de lasers suffisamment stables en fréquence pour « interroger » les atomes de ces horloges. Dans ce but, le LNE-SYRTE développe un principe original de stabilisation de ces lasers, fondé sur un laser annexe lui-même stabilisé par spectroscopie d'ions de terres rares. Développer ce laser était l'objet du projet LUSTROM du laboratoire et du projet européen EMPIR/NextLasers. En 2024, les chercheurs français ont ainsi obtenu une stabilité relative de leur laser de 4×10^{-16} sur 1 s, se rapprochant ainsi du niveau de 10^{-17} exigé par les horloges à la limite quantique.

Cette stabilité est essentielle. Une horloge atomique, c'est la mesure d'une fréquence d'émission de ses atomes après les avoir excités avec une radiation laser précise. Or si la fréquence de cette dernière fluctue, la mesure de la fréquence atomique recherchée est bruitée et la résolution de l'horloge est moindre.

Pour stabiliser la fréquence d'un laser, la méthode usuelle est de l'asservir sur une cavité Fabry-Perot de haute finesse. Or, fabriquer une cavité avec la finesse nécessaire pour améliorer les horloges actuelles est techniquement très difficile.

C'est pourquoi, en parallèle de tels travaux menés à l'échelle mondiale, les scientifiques du LNE-SYRTE explorent une méthode spectroscopique prometteuse, où la fréquence du laser d'interrogation pourra être recalée en permanence sur celle d'une transition atomique annexe. Précisément l'étude porte sur une transition d'ions europium enchâssés dans une matrice cristalline de silicate d'yttrium maintenue à une température proche du zéro absolu. « Ces systèmes offrent un temps de cohérence de l'ordre de 1 ms



Trois questions à...

BESS FANG, CHERCHEUSE PHYSICIENNE AU LNE-SYRTE

Comment est née l'activité du LNE-SYRTE sur les ions de terres rares enchâssés dans une matrice cristalline cryogénique pour la stabilisation de lasers d'interrogation d'horloges optiques ?

B.F. : L'activité a démarré en 2012 sous l'impulsion de Yann Le Coq qui a vu tout le potentiel de ces systèmes. Au-delà, notre laboratoire bénéficie d'un avantage géographique pour cette thématique, puisque très proche d'un laboratoire de l'École de Chimie-ParisTech qui est l'un des quelques pôles mondiaux spécialistes de la croissance de cristaux dopés en terres rares. De même, nous travaillons en étroite collaboration avec l'équipe CEDRIC du Cnam à Paris qui nous aide à développer notre système de détection multi-hétérodyne.

D'autres laboratoires dans le monde s'intéressent-ils à ces systèmes ?

B.F. : Historiquement, le potentiel des matériaux dopés de terres rares pour la métrologie du temps a été identifié par une équipe du NIST. Aujourd'hui, deux autres groupes, à l'Université de Lund et à l'Université de Düsseldorf, s'y intéressent, mais sur des aspects non directement reliés à la réalisation de la seconde optique. Sur ce créneau de recherche, nous sommes donc les seuls.

Les matériaux dopés en terres rares vont-ils s'imposer comme solution pour stabiliser les lasers d'interrogation des horloges optiques ?

B.F. : C'est difficile à dire. D'un côté, nos collègues allemands de la PTB et états-uniens du NIST ont obtenu de très bonnes stabilités avec des systèmes plus classiques comme une cavité Fabry-Perot cryogénique ou une cavité longue. D'un autre côté, nous avons clairement identifié des chemins possibles d'amélioration des performances de notre système. Pour l'heure, toutes les solutions prometteuses doivent encore être étudiées et évaluées.

PROJET PHARE

d'où il résulte une largeur de raie très étroite, détaille Bess Fang, chercheuse physicienne au LNE-SYRTE. De plus, une matrice solide est synonyme de forte densité atomique donc d'un rapport signal à bruit favorable. Enfin, il s'agit de systèmes de quelques millimètres de côté, les rendant moins sensibles aux gradients thermiques que les cavités Fabry-Perot dont la longueur est plutôt de 10 cm. »

Fort de résultats préliminaires obtenus par le NIST en 2011, montrant que des systèmes à base de terres rares devaient être très peu sensibles au bruit thermique, les chercheurs du LNE-SYRTE ont débuté leurs recherches sur ce thème dès 2012. Et, partant de zéro, ils ont démontré en 2020 l'atteinte d'une stabilité de $1,7 \times 10^{-15}$, comparable à celle obtenue avec les cavités FP, et l'existence d'un important potentiel d'amélioration.

Pour l'exploiter, ils se sont engagés dans le projet NextLasers, piloté par la PTB (Allemane), en parallèle de leur propre projet LUSTROM. Dans le cadre du premier, une analyse théorique couplée à une série de mesures ont permis de prouver pour la première fois l'extrême faiblesse du bruit thermodynamique au sein de systèmes à ions europium à l'état solide.

Dans le cadre de LUSTROM, les scientifiques ont modifié drastiquement leur expérience : ajout d'un étage à dilution à leur système cryogénique pour atteindre une température de 300 mK dans le cristal, contre 4 K précédemment. De cette manière, non seulement la largeur de la résonance a été réduite, mais sa forme de raie est désormais plus pointue. Par ailleurs, un meilleur contrôle des fluctuations de température s'est traduit par une diminution importante du bruit en fréquence. Puis, une modification profonde du dispositif de mesure et de pilotage de la fréquence du laser, ainsi que sa numérisation, a permis une détection à ultra-bas bruit selon une technique d'inter-férométrie multi-hétérodyne. Comme l'explique la physicienne, « dans un tel schéma de détection, plusieurs fréquences permettent de mesurer le décalage du laser et une autre de mesurer le bruit sur ce décalage, et alors d'y remédier. » À la clé, une stabilité du laser divisée par 4 par rapport à la valeur précédemment publiée.



ÉTAGE DE DILUTION DU LASER ULTRASTABLE
À CRISTAL EU:YSO DU LNE-SYRTE
AVEC L'AUTORISATION DE MYCRYOFIRM-PASQAL

Pour faire encore mieux, l'équipe a commencé il y a quelques mois le projet MISTERFREES. « Il vise d'une part à réduire encore les vibrations induites par le système cryogénique, d'autre part à étudier et circonscrire une émission lumineuse parasite inattendue », détaille Bess Fang. De quoi définitivement faire des cristaux dopés en ions europium un élément essentiel de la boîte à outils de la redéfinition « optique » de la seconde !

CHIFFRES CLÉS

Afin de tirer tout le parti de l'exactitude des horloges optiques, il est nécessaire d'accroître la stabilité en fréquence des lasers d'interrogation.

En 2017, le LNE-SYRTE a montré que des matériaux dopés en terres rares permettaient d'atteindre une stabilité de 2×10^{-14} . En 2020, cette valeur a été portée à $1,7 \times 10^{-15}$ et enfin à 4×10^{-16} en 2024, s'approchant de la valeur cible de 10^{-17} .