

Thèse à Paris (LNE-SYRTE/Observatoire de Paris) sur

Trous brûlés spectraux sub-K pour la métrologie quantique : des lasers ultra-stables aux corrélations quantiques

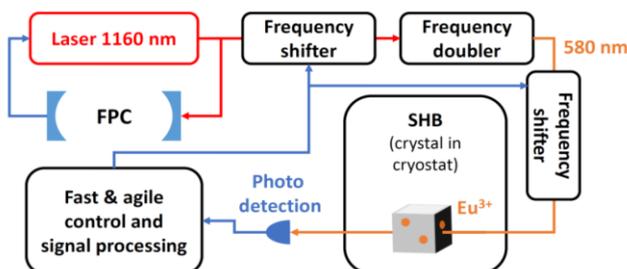
Contexte

La métrologie du temps et des fréquences est aujourd'hui l'un des domaines les plus fructueux de la mesure de haute précision. Les étalons de fréquence micro-ondes atteignent désormais des exactitudes en fréquence relative de l'ordre de 10^{-16} , assurant une grande variété d'applications allant de **la pratique quotidienne de la mesure du temps** (réalisation de la seconde SI, du temps international atomique, navigation par satellites, etc...) aux **expériences de recherche fondamentale les plus exigeantes (mesure de la dérive des constantes fondamentales, tests de relativité, détection des ondes gravitationnelles, ...)**. L'avenir de la métrologie du temps et des fréquences se situe dans le domaine optique : la seconde, l'unité de temps, sera bientôt (~2030) définie via une transition optique dans des atomes ; les horloges optiques ont rapporté des performances sans précédent tant en stabilité qu'en exactitude ; et les réseaux de fibres optiques fournissent des moyens de comparer des horloges distantes et de diffuser la fréquence et le temps.

Pourtant, à ce jour, l'absence de lasers ultra-stables suffisamment performants pour sonder les transitions atomiques sans dégradation entrave la recherche de performances ultimes. En bref, les dispositifs d'horloge à réseau optique pourraient présenter une stabilité limitée par leur bruit de projection quantique si les lasers d'interrogation devaient être nettement meilleurs que cette limite. Les lasers actuellement utilisés sont basés sur la stabilisation d'une cavité Fabry-Perot (FPC) ultra-stable dans un environnement extrêmement bien contrôlé. Malheureusement, ces systèmes atteignent leurs limites fondamentales (dues au bruit thermodynamique à 300 K) à quelques 10^{-16} de stabilité, dégradant les horloges du réseau optique par échantillonnage du bruit. Bien qu'il soit possible de lutter contre le bruit thermodynamique dans les cavités Fabry-Perot, les défis technologiques sont considérables, et nous pensons qu'un changement de paradigme technologique est plus prometteur.

Projet

Les trous brûlés spectraux dans des cristaux dopés aux ions de terres rares sont un système polyvalent en métrologie quantique. Les transitions optiques étroites des ions dopants peuvent servir de référence de fréquence pour la stabilisation du laser. La présence d'un grand nombre d'ions dopants assure non seulement un excellent rapport signal sur bruit, mais fournit également un moyen probable de réduire davantage le bruit de phase en exploitant les corrélations classiques et quantiques entre eux. La stabilité de fréquence fractionnelle attendue est donc supérieure de plusieurs ordres de grandeur à celle des lasers à cavité verrouillée dans l'état actuel de la technique.



Au laboratoire SYRTE, un dispositif expérimental utilisant un cristal $\text{Eu}^{3+}:\text{Y}_2\text{SiO}_5$ a été construit et la première démonstration de stabilisation du laser donne une stabilité de fréquence relative de quelques 10^{-15} à 1 s, limitée par les fluctuations résiduelles de température du cristal [1]. Cette performance est compatible avec celle publiée par le NIST [2], alors que le bruit de détection est inférieur d'un ordre de grandeur. Les sensibilités aux facteurs

environnementaux tels que la contrainte mécanique [3] et le champ électrique [4] ont également été caractérisées métrologiquement.

Premièrement, notre cryostat est maintenant équipé d'un étage de dilution, permettant des expériences à des températures inférieures à 1 K, où les sensibilités aux fluctuations de température sont largement réduites. Nous effectuerons des caractérisations détaillées du SHB dans Eu:YSO à des températures de dilution, en particulier en termes de largeur du trou spectral, de pente maximale de déphasage (liée au gain de verrouillage) possible, ainsi que de durée de vie des caractéristiques du trou spectral dans des conditions expérimentales typiques. Deuxièmement, nous améliorerons également notre système de détection multihétérodyne afin de réduire le bruit de détection à un niveau compatible avec la stabilité du laser cible. Troisièmement, nous essayerons de trouver des schémas qui utilisent ces corrélations pour rendre une structure spectrale complexe insensible à certaines sources de bruit, améliorant ainsi encore la stabilité de fréquence des lasers ultra-stables basés sur la SHB. La validation finale des performances du laser SHB impliquera probablement des comparaisons de fréquence via le réseau fibré REFIMEVE+ avec d'autres oscillateurs présentant un niveau de performance comparable, tels que la cavité longue du SYRTE ou la cavité Si cryogénique de FEMTO-ST. L'application de la stabilité du laser SHB aux horloges à réseau optique Sr et Hg par transfert de pureté spectrale sera tentée afin de démontrer un fonctionnement des horloges limité par le bruit de projection quantique.

Sur le long terme, ces nouveaux lasers permettraient non seulement aux horloges optiques d'atteindre leurs performances ultimes, mais aussi de faciliter les avancées en physique et en ingénierie quantique : comprendre l'interaction matière-lumière en présence d'une matrice cristalline, réaliser des capteurs quantiques en tirant parti de la sensibilité du système aux facteurs environnementaux perturbateurs, ...

Travaux attendus

Le candidat retenu participera à tous les aspects du projet, y compris, mais sans s'y limiter, le travail sur le montage expérimental, l'acquisition et l'analyse des données, et la coordination avec d'autres expériences du groupe Fréquences optiques (par exemple, les peignes de fréquence et les horloges optiques) pour des mesures plus complexes, etc. Divers services techniques (électronique, conception et ingénierie optique, mécanique et vide) au sein du laboratoire SYRTE sont disponibles si nécessaire.

Le candidat

Sérieux, motivé et professionnel. Doit avoir terminé son cursus de M2 (outre le stage). Une certaine expérience en physique expérimentale (par exemple en optique, en électronique, en traitement du signal et en programmation), ainsi que des connaissances de base en physique quantique (mécanique quantique et physique atomique) sont utiles mais pas strictement nécessaires. Étant donné la nature collaborative et le contexte international du projet de recherche, la communication en anglais doit être pratiquée.

Candidature

Les candidats intéressés doivent envoyer un CV et une lettre de motivation à :

Dr. Bess Fang-Sortais : bess.fang@obspm.fr , et Dr. Yann Le Coq : yann.lecoq@obspm.fr .

Des entretiens seront organisés une fois que les documents auront été examinés.

Bibliographie

- [1] N. Galland *et al*, *Optics Letters* **45** 1930 (2020).
- [2] S. Cook *et al*, *Phys. Rev. Lett.* **114** 253902 (2015).
- [3] N. Galland *et al*, *Phys. Rev. Applied* **13** 044022 (2020); S. Zhang *et al*, *Phys. Rev. Research* **2** 013306 (2020).
- [4] S. Zhang *et al*, *Appl. Phys. Lett.* **117** 221102 (2020).