

Sujet de thèse de doctorat

FEMTO-ST

Département Temps-Fréquence - Equipe OHMS
26 rue de l'épître 25030 Besançon cedex, France

Sujet: Référence de fréquence optique à microcellule de vapeur alcaline de haute stabilité

L'interrogation d'un ensemble d'atomes en phase vapeur au sein d'une cellule de dimensions millimétriques a permis au cours de la dernière décennie la démonstration et le développement d'une grande variété d'instruments quantiques miniatures de haute sensibilité et de grande précision [1], incluant en particulier des références de fréquence ultra-stables faible consommation dites micro-horloges atomiques [2]. Ces horloges atomiques microondes miniatures, devenues aujourd'hui commerciales [3,4], sont très attractives pour une multitude d'applications industrielles et stratégiques par leur aptitude à combiner un volume total de l'ordre de 15 cm^3 , une puissance de consommation de 150 mW et une stabilité relative de fréquence de l'ordre de $2 \cdot 10^{-11}$ à 1 s et $1\text{-}2 \cdot 10^{-11}$ à 1 journée d'intégration.

Simultanément, dans le domaine de la métrologie temps-fréquence de pointe, les horloges atomiques microondes à césium (fontaines atomiques) [5-6] ont vu leurs performances de stabilité et d'exactitude supplantées par des horloges atomiques de nouvelle génération exploitant en leur cœur une transition atomique optique. Ces horloges optiques constituent aujourd'hui des instruments de mesure d'une précision exceptionnelle et de loin inégalée, avec des performances de stabilité et d'exactitude relatives à 18 chiffres significatifs [7-8]. Ces caractéristiques remarquables font de ces horloges des dispositifs de pointe pressentis pour la détection d'ondes gravitationnelles [9], la recherche de matière noire [10] ou la réalisation de mesures géodésiques avec une résolution de l'ordre du centimètre.

Inspirés par les progrès significatifs démontrés dans ces deux domaines, une voie de recherche stimulante et prometteuse concerne le développement de références de fréquence optiques miniatures de nouvelle génération à microcellule de vapeur alcaline. Dans ce domaine, différentes voies d'exploration ont déjà été reportées dans quelques groupes mondiaux. Ces études concernent la stabilisation en fréquence de diodes laser VCSEL sur des résonances élargies par effet Doppler [11], la stabilisation d'un laser Brillouin sur une cellule Rb micro-fabriquée [12], l'implémentation de stabilisation de fréquence laser par spectroscopie sub-Doppler sur une microcellule Rb [13], voire plus récemment l'intégration photonique d'un laser stabilisé sur une microcellule Rb exploitant une méthode de spectroscopie 2-photon à 778-778 nm [14]. Cette dernière présente des performances de stabilité de fréquence tout à fait remarquables, de l'ordre de $4 \cdot 10^{-12} \tau^{-1/2}$ jusque 1000 s, soit des performances de stabilité 50-100 fois supérieures aux micro-horloges atomiques CPT actuelles.

Dans une étude récente, nous avons démontré à l'Institut FEMTO-ST la détection de résonances à très fort contraste en cellule à vapeur de césium par le biais d'une technique de spectroscopie sub-Doppler bi-fréquence originale [15]. Des efforts théoriques importants [15,16], en collaboration avec l'Institute of Laser Physics (Novossibirsk, Russie) et le SYRTE de l'Observatoire de Paris, ont été menés afin d'expliquer les différents mécanismes physiques à l'origine de ces résonances à fort facteur de qualité. Ces travaux ont par ailleurs démontré l'intérêt de mener ce type de spectroscopie dans des cellules de petites dimensions. Ainsi, des tests préliminaires récents ont démontré la stabilisation en fréquence d'un laser sur une microcellule Cs à l'aide de cette méthode à un niveau de l'ordre de $2 \cdot 10^{-12}$ à 1 s et de $3 \cdot 10^{-12}$ à 1000 s [17]. Ces performances, sans nul doute améliorables, s'avèrent très

encourageantes puisque déjà 50-100 fois meilleures sur le court terme à celles des micro-horloges atomiques microondes CPT actuelles commerciales.

Ce travail de thèse vise à poursuivre cette voie de recherche et entreprendre au laboratoire FEMTO-ST le développement de références de fréquence optiques miniatures de nouvelle génération, exploitant en leur cœur une microcellule à vapeur alcaline (Cs ou Rb), et dont les performances de stabilité viseront à terme à être 100 fois supérieures à celles des micro-horloges atomiques microondes CPT, tout en gardant une extrême simplicité d'architecture, compatible avec une miniaturisation poussée et une faible consommation. Ce travail de thèse contribuera au lancement d'une nouvelle activité de recherche au sein de notre groupe et a pour but de poser au sein de ce dernier les fondements du développement futur de références de fréquence miniatures optiques de très haute-performance.

Le (la) candidat(e) tâchera en premier lieu d'explorer le potentiel de la spectroscopie sub-Doppler bi-fréquence pour le développement d'une référence optique à microcellule de haute stabilité de fréquence. Un dispositif expérimental dédié, associant laser à cavité étendue, modulateur électro-optique fibré pour la génération du champ optique bi-fréquence, microcellule à vapeur alcaline et son module physique et une électronique/instrumentation de contrôle de l'expérience sera mis en place. Un effort important d'intégration sera mené dès les premières étapes de ce projet. Une étude métrologique rigoureuse sera alors menée pour explorer le potentiel de stabilité de fréquence de cette référence optique. La sensibilité de la fréquence de la référence aux paramètres expérimentaux essentiels (puissance laser, puissance et fréquence microonde, température de cellule, etc.) seront évalués et des solutions seront mises en œuvre pour minimiser ces contributions et améliorer ainsi la stabilité moyen-long terme de la référence. La mesure de cette dernière pourra être réalisée par battement de fréquence avec un signal optique de référence [18].

La référence optique exploitera en son cœur une technologie de microcellule (Cs ou Rb) similaire à celle développée à FEMTO-ST. Cette dernière consiste en un substrat silicium gravé de part et d'autre duquel sont fixés par soudure anodique un substrat de verre et dont le remplissage alcalin est fait avant le scellement final par activation laser d'une pastille dispenser [19-20]. Des tests seront possiblement menés pour évaluer l'impact de la qualité de l'atmosphère interne de la microcellule sur les performances de la référence optique. En ce sens, des tests seront menés avec différents types de microcellules, incluant ou non des getters non-évaporables passifs [21] dont la présence vise à réduire la concentration d'impuretés au sein de la cellule. Une contribution aux travaux en cours concernant la technologie de microcellule de FEMTO-ST sera ainsi envisagée.

En fonction de l'avancement et des résultats obtenus avec la technique de spectroscopie sub-Doppler bi-fréquence, le (la) candidat(e) pourra envisager dans la dernière année de son travail de thèse l'investigation préliminaire d'un nouveau type de référence optique à microcellule reposant possiblement sur l'exploitation d'une transition à 2 photons d'un atome alcalin [22-25].

Le (la) candidat(e) de thèse intégrera le groupe OHMS (<http://teams.femto-st.fr/equipe-ohms/>) du département Temps-Fréquence de FEMTO-ST (www.femto-st.fr). Le (la) candidate doit avoir pour diplôme un Master 2 ou équivalent ou un diplôme d'une Ecole d'Ingénieurs. Le (la) candidat(e) doit porter un intérêt majeur pour les disciplines de la physique appliquée en général, pour les mesures de haute-précision et bas bruit, présenter du savoir-faire en optique, électronique et instrumentation (programmation pour le pilotage d'expérience). Des connaissances dans les domaines de la physique atomique et en conception mécanique sont un atout.

Le (la) candidat(e) évoluera au sein d'une équipe composée de chercheurs, ingénieurs et techniciens, et disposera du soutien des services électronique, mécanique et informatique de l'Institut FEMTO-ST et d'une infrastructure de choix dédiée à la métrologie temps-fréquence (<http://oscillator-imp.com/dokuwiki/doku.php>). Le (la) candidat(e) sera amenée à présenter ses travaux dans des conférences internationales et visera à la publication de ces travaux dans des revues internationales à comité de lecture.

Conditions du contrat et comment candidater ?

Diplôme requis : Master 2 ou Diplôme d'Ingénieur

Date de début de la thèse : 01 Décembre 2019 au plus tard.

Salaire contrat doctoral : environ 1.5 k€ net par mois.

Possibilité de réaliser des vacances (enseignements) au cours de la thèse à l'Université, Ecole d'Ingénieurs ENSMM.

Démarche : transmettre CV, lettre de motivation et si disponible lettres de recommandations.

Contact:

Dr. Rodolphe Boudot

FEMTO-ST

Département Temps-Fréquence / Site ENSMM

26, rue de l'épitahe 25030 Besançon, France.

Email: rodolphe.boudot@femto-st.fr

Tel : +33 (0)3 81 40 28 56

Références

- [1] J. Kitching, Appl. Phys. Rev. 5, 031302 (2018)
- [2] S. Knappe, MEMS atomic clocks, Comprehensive microsystems, 3, 571-612 (2007).
- [3] <https://www.microsemi.com/product-directory/clocks-frequency-references/3824-chip-scale-atomic-clock-csac>
- [4] <http://www.accubeat.com/product-item/nano-atomic-clock-nac1/>
- [5] G. Santarelli et al., Phys. Rev. Lett. 82, 4619 (1999).
- [6] J. Guéna et al., IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr. 59, 3, 391 (2012).
- [7] M. Schioppo et al., Nature Photon. 11, 48 (2017).
- [8] J. Grotti et al., Nat. Phys. 14, 437 (2018).
- [9] S. Kolkowitz et al., Phys. Rev. D 94, 1519 (2016).
- [10] A. Derevianko and M. Pospelov, Nat. Phys. 10, 933 (2014).
- [11] F. Gruet et al., Opt. Lasers Eng. 51, 8, 1023-1027 (2013).
- [12] W. Loh et al., Opt. Express 24, 13, 14516 (2016).
- [13] M. T. Hummon et al., Optica 5, 4, 443449 (2018).
- [14] Z. L. Newmann et al., ArXiv 1811.00616 (2018).
- [15] M. Abdel Hafiz et al., Opt. Lett. 41, 2982 (2016).
- [16] M. Abdel Hafiz et al., New Journ. Phys. 19, 073028 (2017).
- [17] D. Brazhnikov et al., submitted to Phys. Rev. A (2018).
- [18] A. Didier et al., Applied Optics 54, 12, 3682 (2015).
- [19] M. Hasegawa et al., Sensors Actuators: Phys. A 167, 594-601 (2011).
- [20] R. Vicarini et al., Sensors Actuators: Phys. A 167, 594-601 (2011).
- [21] M. Hasegawa et al., J. Micromech. Microeng. 23, 055022 (2013).
- [22] P. Fendel et al., Opt. Lett. 32, 6, 701 (2007).
- [23] N. P. Georgiades et al., Opt. Lett. 19, 18, 1474 (1994).
- [24] C. Y. Cheng et al., Opt. Lett. 32, 5, 563 (2007).
- [25] F. Nez et al., Opt. Comm. 102, 432 (1993).
- [25] V. Gerginov et al., Phys. Rev. Applied 10, 014031 (2018).