

Franges de Ramsey à deux photons à 10 μm : vers une nouvelle génération d'étalons de fréquence dans le domaine infrarouge

L.F. Constantin, R.J. Butcher¹, A. Amy-Klein, Ch.J. Bordé et Ch. Chardonnet

Laboratoire de Physique des Lasers, UMR 7538 du CNRS, Université Paris 13,
avenue J.B. Clément, 93430 Villetaneuse, France

Résumé. En utilisant un jet supersonique et une cavité Fabry-Perot de haute finesse repliée en U nous avons observé des franges de Ramsey à 10 μm sur une transition à deux photons de SF_6 . Avec une séparation de 8 cm entre les zones d'interaction, l'interfrange est de 2,3 kHz. Le montage expérimental peut être adapté pour augmenter la résolution d'un ordre de grandeur. Ce travail ouvre la voie à une nouvelle génération d'étalons de fréquence dans le domaine spectral des 30 THz.

Le laser à CO_2 stabilisé sur une résonance d'absorption saturée de la molécule OsO_4 constitue un étalon secondaire de fréquence dans le domaine de 10 μm , qui atteint une exactitude relative d'environ 10^{-13} [1]. Pour améliorer cette performance, la stratégie consiste à détecter des signaux les plus étroits possible car la plupart des erreurs systématiques sont proportionnelles à la largeur spectrale du signal détecté. Il faut donc augmenter le temps d'interaction cohérente avec le laser. Comme les méthodes classiques de refroidissement ne sont pas applicables aux molécules, une alternative est d'utiliser la méthode des champs séparés de Ramsey sur un jet moléculaire. Afin que les franges ne soient pas brouillées par la dispersion en vitesses des molécules, cette méthode doit être associée à une technique sous-Doppler. Nous avons choisi de détecter les franges de Ramsey sur une résonance à deux photons [2]: les molécules interagissent successivement avec deux zones d'ondes laser stationnaires accordées sur la transition envisagée. L'avantage essentiel par rapport à l'absorption saturée, pour laquelle trois ou quatre zones de champ sont nécessaires, est d'éviter les contraintes de parallélisme et d'équidistance des zones de champs ce qui permet de réaliser très aisément un grand interzone.

Les franges de Ramsey dans le domaine optique peuvent être expliquées rigoureusement dans le cadre d'un formalisme où le mouvement des molécules est complètement quantifié [3]. En effet, l'absorption de deux photons hors résonance dans une zone se traduit par une impulsion de recul dans la direction du jet proportionnelle à l'écart à la résonance. La loi de conservation de l'énergie-impulsion sélectionne cette impulsion dans le spectre de Fourier du profil spatial d'une zone laser. La probabilité de détecter la population dans l'état excité après passage dans les deux zones de champ présente des oscillations en fonction du désaccord laser. Elles correspondent au retard ou l'avance induits par l'impulsion de recul entre les deux chemins d'excitation dans la première ou la seconde zone. On en déduit une interprétation mécanique des franges de Ramsey [3-4] en termes d'interférences entre les deux chemins suivis par l'onde de matière dans l'espace de états de mouvement externe.

La mise en pratique a nécessité la réalisation de trois dispositifs qui sont présentés sur la figure 1: un spectromètre ultra-stable, un jet supersonique de SF_6 et une cavité Fabry-Perot sphérique (CFP).

Le spectromètre utilise comme référence de fréquence une raie d'absorption saturée de la molécule OsO_4 détectée en transmission d'une cavité Fabry-Perot. Cela permet d'obtenir une stabilité record de $3 \cdot 10^{-15}$ en valeur relative [5]. Un second laser est décalé en fréquence par une radio-fréquence et asservi en phase sur le premier, ce qui le rend accordable. Grâce à des modulateurs acousto-optiques, la fréquence de ce second laser est mise en résonance avec la transition à deux photons envisagée: $P(4)E^0$ de la bande $2\nu_3$ de SF_6 .

Nous avons construit un jet moléculaire supersonique de SF_6 pur. En effet, la vitesse moyenne est nettement plus faible que pour un jetensemencé d'Hélium et le refroidissement rotationnel de l'expansion isentropique permet l'augmentation de la population du niveau $J=4$.

La CFP comporte quatre miroirs et est repliée en U. Elle permet de générer deux ondes stationnaires obéissent à une relation stricte de phase [6] ce qui garantit que la frange centrale sera à résonance.

¹ Adresse permanente : The Cavendish Laboratory, Madingley Road, Cambridge CB3 0HE, U.K.

Le signal peut être détecté en transmission de la cavité et alors on bénéficie d'une augmentation du contraste proportionnelle à sa finesse. Le signal des franges de Ramsey peut être également détecté à l'aide d'un faisceau laser auxiliaire qui sonde la population dans le niveau supérieur de la transition à deux photons en effectuant un passage adiabatique rapide des molécules vers le niveau intermédiaire. Enfin,

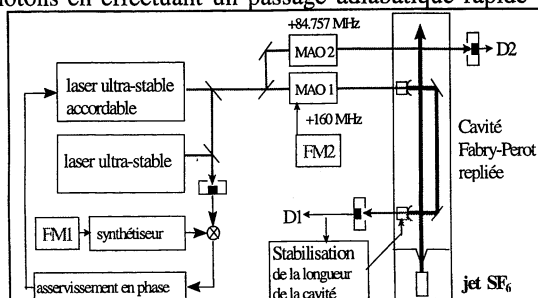


Figure 1: MAO: modulateur acousto-optique, FM: modulation de fréquence.

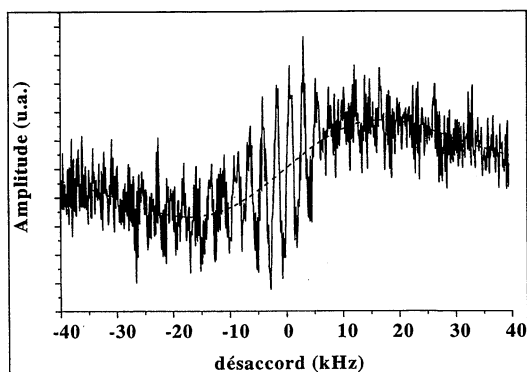


Figure 2: Franges de Ramsey à deux photons.

une technique de modulation de fréquence du laser ou du modulateur acousto-optique est utilisée.

La figure 2 montre un spectre expérimental détecté en transmission de la cavité, pour un interzone de 8 cm. La partie centrale du spectre présente des franges correspondant à la composante hyperfine la plus intense, superposées au signal d'absorption à deux photons dans une zone de champ. L'interfrange est de 2,3 kHz. Les franges latérales sont atténuées du fait de la dispersion des vitesses longitudinales des molécules. Le rapport signal sur bruit obtenu avec une constante de temps de 4 s limite la précision sur la position de la frange centrale à 10 Hz ce qui est d'ores et déjà comparable à celle obtenue avec l'étalon CO_2/OsO_4 . Nous avons aussi observé des franges avec une séparation de 20 cm entre les zones laser en utilisant un jet d'Hélium ensemencé avec SF_6 . L'interfrange varie entre 1,5 et 2,3 kHz, selon la composition du jet ensemencé. Pour cette plus grande séparation entre les zones le jet de SF_6 pur est fortement perturbé par les collisions avec le gaz résiduel de notre enceinte à vide et donne un signal de franges très diminué.

Ces résultats améliorent d'un facteur dix la résolution obtenue avec une résonance d'absorption saturée [7] sur un jet de SF_6 et démontrent les potentialités métrologiques d'une raie à deux photons. La résolution obtenue est comparable aux autres étalons de fréquence utilisant les franges de Ramsey dans le domaine optique [8-10]. Une première estimation des effets systématiques a montré qu'ils étaient relativement faibles, et facilement calculables ou mesurables [11]. De cette manière, notre système est un excellent candidat pour une nouvelle génération d'étalons de fréquence dans le domaine infrarouge avec une exactitude potentielle dans le domaine de 10^{-15} .

Remerciements

On remercie pour leur soutien financier le BNM, l'ETCA-DRET, la CEE et Gonville & Caius College.

Références

- [1] O. Acef, IEEE Trans. Instrum. Meas. **46**, 162 (1997).
- [2] Y. V. Baklanov, V. P. Chebotayev et B. Y. Dubetsky, App. Phys. **11**, 201 (1976).
- [3] Ch. J. Bordé, dans *Atom interferometry*, édité par P. R. Berman (Academic Press, San Diego, 1997), p. 257.
- [4] U. Sterr, K. Sengstock, J. H. Müller, *et al.*, Appl. Phys. B **54**, 341 (1992).
- [5] V. Bernard, C. Daussy, G. Nogues, *et al.*, IEEE Journal of Quantum Electronics **QE-33**, 1282 (1997).
- [6] Ch. J. Bordé, C. R. Acad. Sc. Paris **284B**, 101 (1977).
- [7] Ch. J. Bordé, C. Salomon, S. Avrillier, *et al.*, Phys. Rev. A **30**, 1836 (1984).
- [8] R. L. Barger, J. C. Bergquist, T. C. English, *et al.*, Appl. Phys. Lett. **34**, 850 (1979).
- [9] F. Riehle, V. Kersten, H. Schnatz, *et al.*, Laser Physics **8**, 664 (1998).
- [10] A. Huber, B. Gross, M. Weitz, *et al.*, Phys. Rev. A **58**, R2631 (1998).
- [11] A. Amy-Klein, L. F. Constantin, R. J. Butcher, *et al.*, Optics Express **4**, 67 (1999).