

Premiers résultats de mesure optique de la constante de Boltzmann par métrologie des fréquences

M. Guinet¹, C. Daussy¹, S. Briaudeau², A. Amy-Klein¹, Y. Hermier²,
Ch.J. Bordé¹ et C. Chardonnet¹

¹ *LPL, Laboratoire de Physique des Lasers, UMR 7538 CNRS, Université Paris 13, 99 Av. J.-B. Clément, 93430 Villetaneuse, France*

² *Institut National de Métrologie, CNAM-INM, 292 rue St. Martin, 75141 Paris, France*

Résumé. Nous présentons une nouvelle méthode de mesure directe de la constante de Boltzmann. L'expérience consiste à mesurer le plus précisément possible le profil Doppler d'une raie de vibration-rotation d'une vapeur d'ammoniac à l'équilibre thermodynamique. Dans le cas où la forme de raie est dominée par l'effet Doppler la forme de raie est une Gaussienne dont la largeur fait intervenir la constante de Boltzmann et la température du gaz. La cellule d'absorption est placée dans un thermostat qui permet de contrôler la température à quelques dizaines de mK autour de 273,15 K. L'analyse de la forme de raie permet ainsi d'accéder à une mesure directe de la constante de Boltzmann.

1. INTRODUCTION ET PRINCIPE

L'unité de température, le kelvin K, est définie à partir du point triple de l'eau, fixé à 273,16 K mais pourrait l'être de façon plus universelle à partir de la constante fondamentale associée qui est la constante de Boltzmann, k_B . La valeur de la constante k_B est aujourd'hui connue par une mesure directe à quelques 10^{-4} près non prise en compte par le CODATA, la valeur acceptée est celle issue d'une détermination indirecte à $1.8 \cdot 10^{-6}$ près à partir de la relation $k_B = R/N_A$ [1], où R est la constante des gaz parfaits et N_A , la constante d'Avogadro. Le principe de notre détermination est d'enregistrer le profil d'absorption linéaire d'une vapeur moléculaire à température fixée. Dans la limite d'un élargissement Doppler pur, le facteur $k_B T$ peut être déduit de la mesure de la largeur totale à mi-hauteur Δ par la relation $k_B T = m/8 \ln(2) (\Delta c/\nu_0)^2$ où c est la vitesse de la lumière, m est la masse de la molécule et ν_0 est la fréquence de la résonance. En mesurant simultanément cette largeur Doppler et la température de l'enceinte, on remonte ainsi à la valeur de k_B . Les mesures de fréquences actuelles de très haute exactitude permettent d'envisager une détermination de k_B au niveau de 10^6 ouvrant la voie à une redéfinition du kelvin [2].

2. MONTAGE EXPÉRIMENTAL ET RÉSULTATS PRÉLIMINAIRES

Pour cette expérience nous utilisons un laser à CO₂ stabilisé en fréquence sur une transition de la molécule OsO₄ détectée à 10 μ m en absorption saturée. La stabilité en fréquence du laser asservi est de l'ordre de 0,1 Hz pour des temps typiques d'enregistrement d'un spectre de 100 s [3]. Le profil Doppler de la molécule NH₃ est enregistré en balayant la fréquence laser à l'aide d'un modulateur électro-optique (MEO) générant deux bandes latérales de fréquences respectives $\nu + \nu_0$ et $\nu - \nu_0$. Le signal issu du MEO est ensuite filtré en fréquence à travers une cavité Fabry-Perot (CFP) accordée sur la bande latérale $\nu + \nu_0$ afin d'éliminer le résidu de porteuse à la fréquence ν et la bande latérale à la fréquence $\nu - \nu_0$. Le faisceau à la fréquence $\nu + \nu_0$ est scindé en deux grâce à une lame séparatrice 50/50 : un des deux faisceaux traverse une enceinte remplie d'ammoniac pour la spectroscopie et l'autre sert de faisceau de référence. Le spectre est obtenu en balayant la fréquence ν_0 pilotée par un synthétiseur. La cellule est placée dans un thermostat (eau+glace) qui permet de contrôler la température

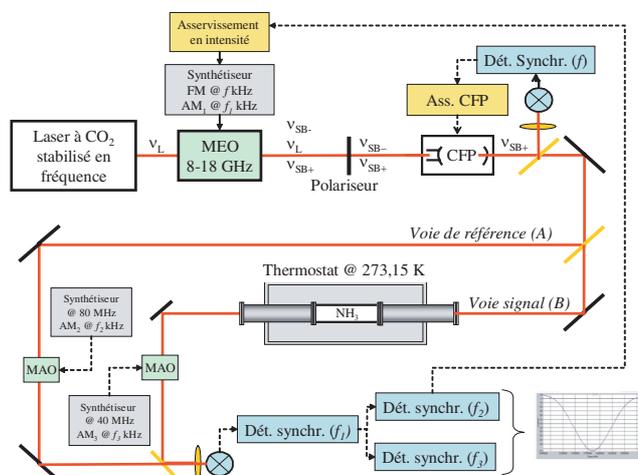


Figure 1. Montage expérimental.

à quelques dizaines de mK près autour de 273,15 K. Les deux faisceaux sont ensuite modulés par 2 modulateurs acousto-optiques (MAO) à 2 fréquences différentes, puis recombinaés et focalisés sur un même photodétecteur. Afin d'améliorer la réjection de la porteuse, la bande latérale est modulée par le MEO, puis le signal final est détecté à cette fréquence (f_1) grâce à un amplificateur à détection synchrone, deux autres détections synchrones permettent ensuite d'obtenir les signaux de chacune des 2 voies, qui sont donc enregistrés simultanément. Par ailleurs l'intensité laser dans la cellule d'absorption doit être maintenue constante au cours du balayage. Pour cela nous avons mis en place un asservissement en intensité de la puissance laser. En utilisant un modèle de raie Gaussienne avec une décroissance exponentielle de l'intensité le long de la cellule, nous avons obtenu une incertitude statistique typique sur la largeur à mi-hauteur extrapolée à pression nulle de 4 kHz après environ 1300 enregistrements, soit une incertitude relative pour k_B de 10^{-4} . La valeur de k_B ainsi obtenue est compatible avec la valeur recommandée par le CODATA. Une étude approfondie des effets systématiques est en cours mais à ce stade, il semble que nous soyons limités par la statistique. Il s'agit de la première mesure directe de la constante de Boltzmann.

Références

- [1] Peter J. Mohr and Barry N. Taylor "CODATA recommended values of the fundamental physical constants: 1998", Rev. Mod. Phys., Vol 72, No. 2, April 2000.
- [2] C. J. Bordé, Phil. Trans. Roy. Soc. A, **363**, 2177-2201 (2005).
- [3] V. Bernard et al., IEEE J. of Quant. Electron. QE-33, 1282 (1997).