

Mesure à faible distance de l'interaction atome-surface de type van der Waals dans une cellule nanométrique de vapeur de Césium

I. Maurin¹, P. Todorov¹, I. Hamdi¹, A. Yarovitski¹, G. Dutier¹, S. Saltiel¹, M.-P. Gorza¹, M. Fichet¹, D. Bloch¹ et M. Ducloy¹

¹ *Laboratoire de Physique des Lasers, 99 avenue J.-B. Clément, 93430 Villetaneuse, France*

Résumé. Les cellules nanométriques de vapeur de Césium permettent d'étudier des vapeurs confinées à des distances (20 nm-1 μ m) auparavant inaccessibles. Ceci ouvre de nouvelles possibilités de tests de la loi de van der Waals (vdW) en $1/z^3$. Nous étudions la forte interaction de vdW induite sur les états excités $6D_{3/2}$ et $6D_{5/2}$ du Césium, par une cellule aux parois en YAG. De tels états présentent à courtes distances des déplacements spectraux vdW dominants par rapport à la largeur due à l'effet Doppler et à la largeur naturelle de transition. Les fortes différences entre les états $6D_{3/2}$ et $6D_{5/2}$ sont interprétées comme les signatures du couplage, respectivement résonnant et non-résonnant, entre l'excitation atomique et les modes de surface.

L'interaction de van der Waals (vdW) de surface peut être décrite comme une interaction de type dipôle-dipôle en $1/z^3$ (z : distance atome-surface). Elle est liée au couplage entre les fluctuations quantiques instantanées du dipôle atomique et les fluctuations corrélativement induites dans la surface. Cette loi en $1/z^3$ a été vérifiée expérimentalement pour des distances comprises entre 500 et 3000 nm en détectant mécaniquement la déviation d'un jet d'atomes de Rydberg à l'approche d'une surface [1]. Récemment, des cellules de vapeur de Césium d'épaisseur nanométrique ont été fabriquées en Arménie [2]. Ceci ouvre de nouvelles possibilités de test de la loi de vdW en $1/z^3$ [3] et d'étude des effets de l'interaction atome-surface à des distances auparavant inaccessibles. Nos cellules nanométriques sont formées de deux fenêtres circulaires (diamètre \sim 20 mm) en YAG, avec une excellente qualité de polissage et de planéité [4]. Collées après la mise en place d'un espaceur de très faible épaisseur, les fenêtres soumises à l'extérieur à la pression atmosphérique, se rapprochent sous l'effet de l'évacuation de l'air dans la cellule. La distance entre fenêtres varie entre 20 nm au centre de la cellule et 1 μ m sur les bords. Le parallélisme intrinsèque des surfaces fait que les cellules remplies de vapeur de Césium sont naturellement des cavités Fabry-Perot. Ceci est un avantage pour évaluer l'épaisseur locale de la cellule [4], mais couple les signaux transmis et réfléchi avec des facteurs de phase différents qui donnent donc des informations complémentaires. Rappelons que dans le cas élémentaire de réponses indépendantes, la transmission serait associée à la réponse absorptive du milieu atomique et la réflexion à sa réponse dispersive.

Afin d'étudier l'interaction de vdW atome-surface à de faibles distances dans les meilleures conditions, nous nous sommes intéressés aux fortes interactions de vdW sur des états excités, tels que les états excités $6D_{3/2}$ et $6D_{5/2}$ du Cs, accessibles depuis le niveau $6P_{3/2}$ par des transitions à 921 nm et 917 nm. De tels états présentent des déplacements spectraux vdW qui peuvent excéder 10 GHz [3]. Ce déplacement est dominant par rapport à la largeur due à l'effet Doppler (\sim 250 MHz) et à la largeur naturelle de transition (\sim 5 MHz). Nous nous sommes intéressés aux modifications induites sur les spectres de transmission et de réflexion de la sonde selon (i) la transition hyperfine de pompage, (ii) la pression, (iii) l'épaisseur locale de la cellule (40-315 nm) et (iiii) la transition excitée.

Dans nos conditions, le pompage est considéré comme thermique sur le niveau $6P_{3/2}$ et le déplacement en fréquence dû aux effets de pression est négligeable en comparaison de celui dû à l'interaction de vdW à faible épaisseur. Les spectres de transmission et de réflexion, bien qu'ayant des formes très différentes, ont un déplacement spectral apparent (décalage par rapport à la fréquence

de résonance atomique en volume) de la même valeur et ceci quelle que soit l'épaisseur de la cellule, le choix de la transition excitée et de la pression. Le déplacement spectral apparent pour la transition excitée 917 nm et 921 nm évolue selon une dépendance en $1/L^3$ avec l'épaisseur de la cellule (L).

Nous avons trouvé une parfaite reproductibilité de nos spectres pour des épaisseurs au-dessus de 50 nm, en différentes positions de la cellule ayant la même épaisseur. Les variations dans la forme des spectres de réflexion et de transmission pour des épaisseurs inférieures à 50 nm sont probablement dues aux fluctuations locales de l'épaisseur. L'épaisseur mesurée ne représente en effet qu'un moyennage d'épaisseurs nanométriques sur la surface du faisceau optique. Ainsi, pour des épaisseurs inférieures à 50 nm, les irrégularités locales ont beaucoup d'effets sur le spectre, la loi de vdW variant en $1/z^3$. Nous avons développé un modèle spectroscopique intégrant la réponse spatiale des atomes et la distribution de leurs vitesses. Il prend en compte l'interaction de vdW, l'élargissement en pression, le pompage thermique du niveau $6P_{3/2}$ et l'effet Fabry-Perot de la cellule. Ce modèle est suffisant pour reproduire nos résultats expérimentaux pour une excitation à 917 nm et des épaisseurs entre 50 et 130 nm. Notre modèle est extrapolable sans modification d'un régime où l'interaction de vdW est prépondérante (50 nm) au régime où elle devient comparable ou plus faible que les effets associés à la structure hyperfine ou aux collisions (130 nm). Les paramètres déduits du seul spectre de réflexion fournissent un très bon accord pour l'ajustement du spectre de transmission [3].

Des études précédentes dans notre groupe ont montré [5] que l'on pouvait transformer l'attraction de l'interaction de vdW en répulsion, lorsque l'une des émissions atomiques virtuelles (ici la transition $6D_{3/2} \rightarrow 7P_{3/2}$ du Cs) est en résonance avec un mode de surface (polariton de surface) de la fenêtre (ici en YAG). Il existe alors un couplage résonnant entre l'émission virtuelle de l'atome et son absorption par la surface. Les fluctuations dans le milieu diélectrique sont alors exaltées (résonance), mais non plus instantanées, et susceptibles de transformer l'attraction entre dipôles corrélés en une répulsion. Pour des épaisseurs allant de 50 à 130 nm, les spectres que nous avons obtenus [3] pour une transition excitée à 921 nm, où il y a couplage résonnant entre une transition atomique du $6D_{3/2}$ du Cs et une résonance de la surface en YAG, sont très différents de ceux pour une transition excitée à 917 nm, où ce couplage n'est pas résonnant. En particulier, les formes de raies théoriques évoquées ci-dessus, qui imposent le rapport entre « largeur » de résonance et déplacement apparent, ne paraissent plus capables de modéliser les spectres obtenus pour le 921 nm. Cette différence est la signature du couplage, résonnant ou non, avec la surface [3].

Remerciements

Ce travail a partiellement été effectué dans le cadre du contrat (HPRN-CT-2002-00304) européen FASTNET.

Références

- [1] V. Sandoghdar et al, *PRL* **68** (1992) 3432-3435, *Phys. Rev. A* **53** (1996) 1919-1922.
- [2] D. Sarkisyan et al, *Opt. Comm.* **200** (2001) 201- 207.
- [3] I. Hamdi et al, *Laser Phys* **15** (2005) 987-996.
- [4] G. Dutier et al, *JOSAB* **20** (2003) 793- 800.
- [5] H. Failache et al, *PRL* **83** (1999) 5467-5470, *Eur. Phys. J. D* **23** (2003) 237-255.