

RAPPORT DE STAGE L3

Techniques de spectroscopie avancées appliquées à la raie d'intercombinaison de l'Ytterbium

AUTEUR

TUTEUR

DOCTORANT ENCADRANT

LABORATOIRE D'ACCUEIL

GRENIER Noé

LEPOUTRE Steven

PHAM Ky-Luc

LABORATOIRE AIMÉ COTTON

Résumé :

Les expériences d'atomes froids nécessitent des dispositifs de spectroscopie pour asservir la fréquence des lasers qui excitent les transitions atomiques. Après le refroidissement des alcalins (monovalents) obtenu dans les années 1980, le refroidissement des alcalino-terreux (bivalents) apparaît fin des années 90. Ces derniers ont, en plus des transitions autorisées par les règles de sélection, des raies d'intercombinaison de largeur naturelle nettement plus faible. On peut tirer parti de la finesse de ces raies au prix d'une spectroscopie plus complexe avec des systèmes lasers plus précis. Mon stage m'a amené à participer à la modification du dispositif spectroscopique de l'Ytterbium (alcalino-terreux). Nous avons actuellement obtenu un asservissement sur la première transition autorisée et les travaux sur le laser associé à la transition d'intercombinaison sont en cours.

Remerciement :

Je remercie le LAC de m'avoir accueilli pendant ces six semaines. Merci tout particulièrement à Steven pour l'apprentissage qu'il m'a offert et la pédagogie qu'il a su mettre en place durant ce stage. Merci aussi à Ky-Luc qui a su m'introduire simplement le domaine des atomes froids.

1 Présentation

1.1 Travaux de l'équipe

Les gaz atomiques froids et ultrafroids sont un domaine de recherche particulièrement actif de la physique expérimentale. L'équipe "Atomes de Rydberg froids" est composée de Steven Lepoutre (Maître de conférence), Ky-Luc Pham (Doctorant), Pierre Pillet (Directeur de recherche CNRS émérite) et Patrick Cheinet (Chargé de recherche CNRS). Elle étudie les excitations de Rydberg appliquées sur des atomes froids dans un piège magnéto-optique (MOT). Les excitations de Rydberg dans un MOT génèrent des états à N corps en interaction forte qui sont difficiles à étudier théoriquement. Nous effectuons ces manipulations sur des atomes d'Ytterbium. Suite à un déménagement du laboratoire, la redémarrage du dispositif a été retardé et l'occasion de modifier le dispositif de spectroscopie s'est présentée.

1.2 Refroidissement laser de l'Ytterbium

La fig.1 montre le principe du montage expérimental. À l'aide d'un dispenser, on produit un jet d'atomes d'Ytterbium qui sont émis à une vitesse proche de 300 m.s^{-1} . Afin de pouvoir piéger les atomes, il faut les ralentir à une vitesse de 10 m.s^{-1} . A cette fin, ils traversent un ralentisseur Zeeman.

Le ralentisseur Zeeman possède un faisceau laser se propageant dans le sens opposé aux atomes. Ainsi, dans le ralentisseur, les atomes vont absorber des photons de quantité de mouvement $\vec{p} = \hbar\vec{k}$ provenant du laser bleu ; ils vont ensuite émettre spontanément des photons, pour revenir à l'état fondamental, mais cette fois de manière isotrope. Donc, après de nombreux cycles absorption-émission spontanée, les atomes vont avoir tendance à être ralentis. Un champ magnétique variable spatialement est imposé afin que, grâce à l'effet Zeeman, la lumière soit toujours résonante avec les atomes malgré l'évolution de la vitesse qui les désaccorde du fait de l'effet Doppler.

Ensuite, on utilise un MOT 2D afin de collimater les atomes et un MOT 3D afin de les capturer. Les MOTs se basent aussi sur l'absorption et l'émission spontanée des atomes et sur l'effet Zeeman. Cependant, on va utiliser 6 (respectivement 4 pour un MOT 2D) faisceaux lasers 2 à 2 opposés afin que les atomes soient ralentis dans toutes les directions. On parle de mélasse optique. À cela on ajoute une polarisation circulaire aux faisceaux et un champs magnétique afin que, grâce à l'effet Zeeman, les atomes reviennent vers la position de piégeage [1,2]. Ces techniques ont été développées par les prix Nobel de 1997 : Steven Chu, William D. Phillips et Claude Cohen-Tannoudji.

1.3 Transitions de l'atome d'Ytterbium

Parmi les isotopes naturels présents dans l'expérience, l'équipe a choisi d'utiliser le ^{174}Yb qui est le plus abondant. L'Ytterbium possède 2 électrons sur sa couche de valence 6s. L'état fondamental du ^{174}Yb est 1S_0 avec ses spins dans l'état singulet. Nous allons manipuler deux transitions optiques pour le refroidissement.

D'après les règles de sélections [3], le spin électronique total doit être constant, donc la première transition optique autorisée est $^1S_0 \leftrightarrow ^1P_1$ à une longueur d'onde 399 nm avec une largeur $\Gamma_{bleu}/2\pi = 28 \text{ MHz}$. Cependant, le spin électronique total n'est pas un bon nombre quantique. En effet, la transition $^1S_0 \leftrightarrow ^3P_1$, qui est en théorie interdite, est possible du fait d'un mélange d'orbitale dans l'état 3P_1 . C'est pourquoi la largeur de la transition d'intercombinaison $^1S_0 \leftrightarrow ^3P_1$ à 556 nm n'est que de $\Gamma_{vert}/2\pi = 182 \text{ kHz} \ll \Gamma_{bleu}/2\pi$ [4].

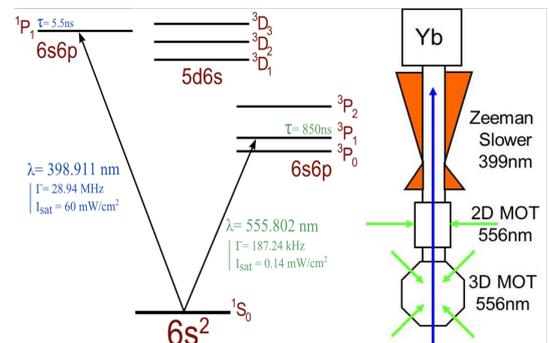


FIGURE 1 – Diagramme d'énergie des transitions de l'Ytterbium et schéma de principe de l'expérience de l'équipe "Atomes de Rydberg froids".

1.4 Principe de la spectroscopie d'absorption saturée

Pour effectuer la spectroscopie de l'atome d'Yb, le dispositif expérimental est muni d'une chambre à vide dédiée où un jet atomique similaire à celui de l'expérience finale (fig.1) est créé. Pour un faisceau approximativement perpendiculaire à l'axe du jet, à cause de l'effet Doppler, la fréquence perçue par les atomes n'est pas la même en fonction de leur classe de vitesse transverse. On a donc un élargissement de la courbe d'absorption en fonction de la fréquence (fig.2). Or le but est d'adresser précisément la fréquence de résonance. Pour ce faire, on effectue une spectroscopie saturée avec un aller-retour du laser dans les atomes. Au premier passage, la lumière va exciter les atomes. Ces atomes excités ne pourront donc pas absorber de nouveau de la lumière au second passage. Ainsi, pour une vitesse transverse nulle, les atomes absorberont la lumière uniquement sur l'aller. Tandis que si l'on est légèrement décalé en fréquence, avec l'effet Doppler, les atomes d'une classe de vitesse transverse v pourront absorber à l'aller et ceux d'une classe de vitesse $-v$ pourront absorber au retour (cf fig.2). On aura alors un creux d'absorption à la fréquence de résonance de largeur comparable à la largeur naturelle du niveau.

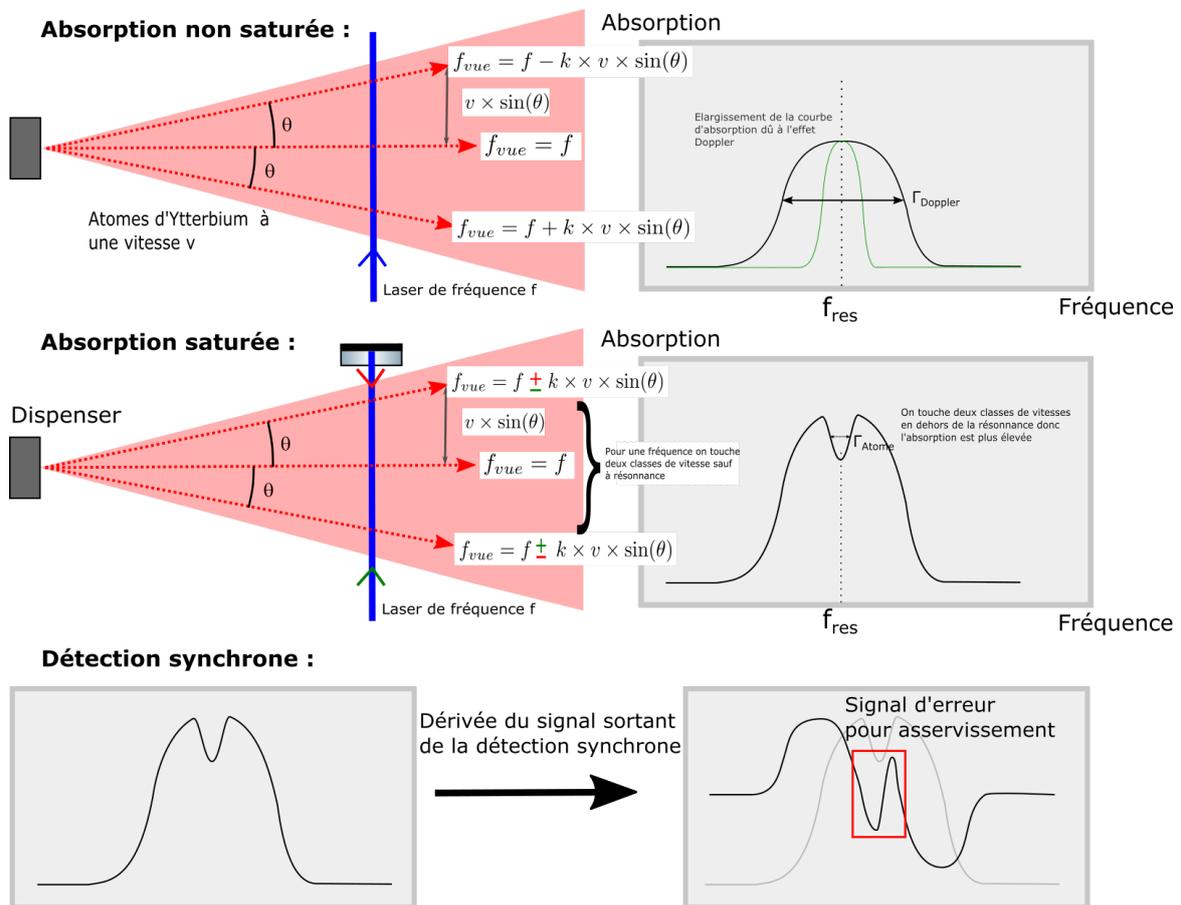


FIGURE 2 – Schéma d'absorption Doppler non saturée et saturée avec signal théorique sortant de la détection synchrone. f_{res} est la fréquence de résonance. Γ_{bleu} est la largeur de la transition associée au laser 399 nm. $\Gamma_{Doppler}$ est la largeur cette même transition élargie par l'effet Doppler du jet d'atome. f_{vue} est la fréquence que perçoit l'atome avec l'effet Doppler

1.5 Détection synchrone

Les fluctuations en fréquence rendent nécessaire un asservissement en fréquence du laser afin d'être en permanence proche de la résonance des atomes. Un asservissement nécessite un signal d'erreur qui sera la dérivée du signal d'absorption (fig.2). Pour l'obtenir, on effectue une détection synchrone sur notre signal :

2.3 Principe général de la nouvelle spectroscopie

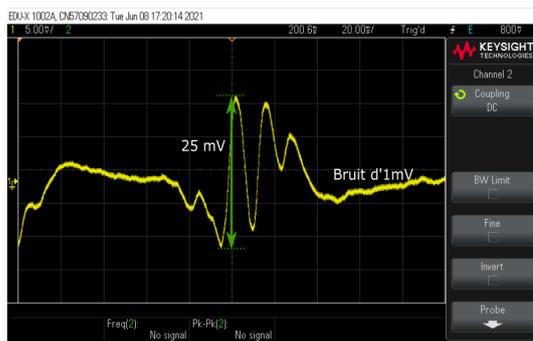
La nouvelle spectroscopie se base sur une publication récente concernant le Strontium (un autre alcalino-terreux) qui permet d'améliorer le rapport signal/bruit pour la spectroscopie de la raie d'intercombinaison [5]. Elle consiste à saturer le jet avec la raie d'intercombinaison, mais sonder les excitations atomiques avec la première transition optique (laser bleu) et un faisceau de faible intensité. On gagne ainsi un facteur $\Gamma_{bleu}/\Gamma_{vert}$ par rapport à la spectroscopie conventionnelle qui détecte l'absorption de la raie d'intercombinaison.

2.4 Résultats expérimentaux

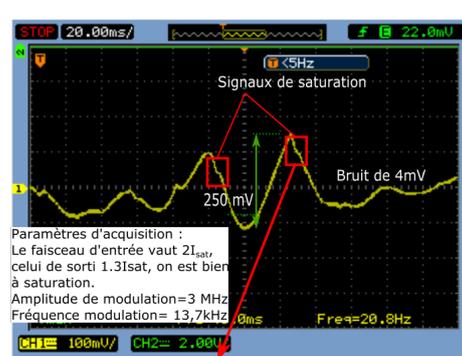
La figure 5 illustre les signaux obtenus, les résultats concernant l'asservissement du système laser et l'évolution du rapport signal/bruit. On espère réussir à avoir des résultats concluant sur le rapport signal/bruit de la spectroscopie du laser vert.

Grâce au nouveau montage, avec les signaux d'absorption, nous avons pu vérifier que nous excitions bien l'isotope ^{174}Yb . Nous avons obtenu un meilleur rapport signal sur bruit et nous avons même réussi à faire un asservissement en fréquence de 4 minutes. Avec un peu de travail l'asservissement devrait pouvoir durer plus de 10 minutes. Le travail sur le laser vert est en cours.

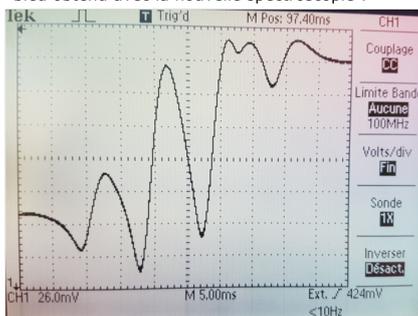
Signal de transmission (sans saturation visible) du faisceau bleu obtenu avec la spectroscopie initiale (cf. 2.1) :



Signal de transmission (avec saturation visible) du faisceau bleu obtenu avec la nouvelle spectroscopie (cf. 2.2):

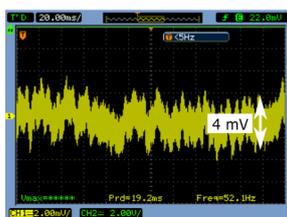


Signal de transmission (non saturé) du faisceau bleu obtenu avec la nouvelle spectroscopie :



On obtient un signal d'erreur de 100mV assez stable ce qui n'était pas possible avec l'ancien montage.

Bruit des signaux de la nouvelle spectroscopie :



On observe une nette amélioration du rapport signal/bruit sur le spectre d'absorption : On passe de 25 à 62,5.

On arrive, avec le signal d'erreur ci-dessus, à obtenir l'asservissement en fréquence ci-dessous :

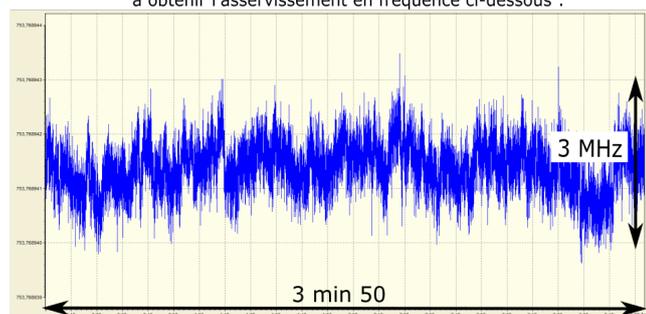


FIGURE 5 – Signaux issues de la spectroscopie et signal de sortie du lambdamètre durant un asservissement.

Conclusion

Le changement de spectroscopie a été fructueux puisqu'il nous a permis d'obtenir le signal nécessaire à l'asservissement du faisceau bleu. De plus, avant de pratiquer la modification de spectroscopie, nous avons pu nous rendre compte des erreurs commises dans le dispositif initial. Nous avons affiné notre connaissance de l'électronique de commande du laser et finalement, nous avons réussi à asservir le laser bleu à résonance. Cependant, suite au temps que nous avons passé sur l'ancien montage à essayer d'obtenir des signaux convenables, nous n'avons pas eut le temps de finir la spectroscopie du faisceau vert et de tester un asservissement sur le laser à 556 nm sur le laser vert.

Durant ce stage, j'ai eu l'occasion de construire une partie de dispositif consistant en un circuit optique complet. En me confrontant à de nombreux problèmes, j'ai appris à rechercher et analyser toutes les erreurs possibles dans un montage, tout en gardant en tête le lien théorie/manipulation expérimentale afin d'élaborer une interprétation plausible de ce qui a été observé. J'ai pu découvrir la physique des atomes froids, et je me suis initié à la manipulation précautionneuse des lasers. J'ai aussi pu me rendre compte de l'exigence des manipulations, notamment avec des précisions en fréquence qui font intervenir pas moins de neuf chiffres significatifs.

J'ai pu m'initier à la physique expérimentale, au métier de chercheur et j'ai pu me rendre compte de l'importance des bases théoriques dans ce domaine. J'ai aussi appris à utiliser des logiciels tels que L^AT_EX et Inkscape afin de communiquer mon travail.

Bibliographie

- [1] J. Dalibard, *Une brève histoire des atomes froids*, Cours du collège de France, 2014.
- [2] A. Aspect & J. Dalibard, *Le refroidissement des atomes par laser*, La recherche, Janvier 1994, numéro 261, p30-37.
- [3] *Transitions radiatives. Intensités et règles de sélection*, Cours de l'université de Grenoble, .
- [4] U.D. Rapol, A. Krishna, A. Wasan & V. Natarajana. *Laser cooling and trapping of Yb from a thermal source*, Eur. Phys. J.D **29**, 409 (2004)
- [5] I. Manai ,A. Molineri , C. Fréjaville , C. Duval , P. Bataille , R. Journet , F. Wiotte , B. Laburthe-Tolra , E. Maréchal , M. Cheneau & M. Robert-de-Saint-Vincent, *Shelving spectroscopy of the strontium intercombination line*, J. Phys. B **53**, 085005 (2020).