

MP11 Émission et absorption de la lumière.

Correcteurs : Antoine Bérut¹ et Étienne Thibierge²

Montage présenté le vendredi 28 novembre

Le présent compte-rendu a pour but de résumer et compléter la discussion qui a suivi la présentation du montage en classe. Bien entendu, il est partiel et partial, et n'est qu'un point de vue qui n'engage que ses auteurs. Rappelons que c'est vous qui présenterez les montages en fin d'année, et que c'est donc à vous de décider de ce que vous voulez en faire.

Extrait des rapports du jury

Je vous rappelle que le préambule du rapport de l'épreuve de montage s'attache à présenter en détails les attentes et exigences du jury. Vous êtes plus qu'encouragés à le lire.

2014 : Ce montage ne devrait pas être confondu avec le montage « Spectrométrie optique ». Des expériences quantitatives sur l'absorption sont attendues. En outre, les propriétés d'émission du laser ne sont pas hors sujet.

Jusqu'en 2013, le titre était « Émission et absorption dans le domaine optique. »

2013 : Il est regrettable que les expériences d'absorption restent qualitatives.

2012 : Les deux aspects de l'intitulé doivent être abordés. Rappelons que la qualité des mesures dans ce montage est souvent liée à une bonne connaissance des spectromètres utilisés.

2010 : Les remarques des années précédentes s'appliquent toujours. Ce montage est à différencier du montage n° 9 : *Spectrométrie optique*. Cela ne dispense pas de l'étalonnage des spectromètres, dont on doit connaître en particulier la résolution.

2009 : L'émission du corps noir n'est pas stricto sensu une émission spontanée. Les ordres de grandeurs des largeurs de raies et leur origine devraient être connus des candidats.

2008 : L'utilisation des récents spectromètres à fibre optique interfacés USB nécessite la connaissance de son mode de fonctionnement et doit s'accompagner d'une analyse critique des résultats, notamment en termes de résolution et de justesse.

Commentaires généraux

Les expériences présentées ont toutes leur place dans ce montage, mais l'ordre dans lequel elles ont été présentées ne faisait pas vraiment ressortir de fil conducteur clair. Bien que le cœur des montages soit la présentation d'expériences quantitatives correctement réalisées et expliquées, nous pensons qu'avoir un enchaînement cohérent des expériences ne peut qu'améliorer la qualité de vos présentations. Il peut également être avantageux d'aller des expériences « simples » comme la loi de Beer-Lambert et la mesure de la constante de Rydberg, aux applications « compliquées » comme la fluorescence.

Par ailleurs, il n'est pas nécessaire de prendre plusieurs points de mesures pour une même expérience (sauf cas particulier³) car cela est redondant et ne démontre pas votre aptitude à réaliser des mesures variées. Il aurait mieux valu dégager du temps pour réaliser une expérience supplémentaire, ce qui serait bien plus valorisé. Pour gagner du temps, il faudrait aussi devenir plus efficace dans le discours en expliquant les points importants de façon concise et précise.

Voici quelques exemples d'expériences qui pourraient être rajoutées dans ce montage :

- ▷ La mesure d'une largeur de raie d'une lampe spectrale (par exemple une lampe au mercure) à l'aide d'un interféromètre de Michelson.
- ▷ La présentation du laser transparent, permettant de comparer les spectres de la lumière émise latéralement par la cavité laser et de la lumière émise en sortie par la cavité (le faisceau laser à proprement parler). Cette expérience a l'inconvénient de n'être que qualitative.
- ▷ La présentation des modes d'un laser à l'aide de la cavité Fabry-Pérot MELLES GRIOT de la collection. Attention alors à ne pas tomber dans le piège de discuter plus de la physique de la cavité de mesure que de la physique de l'émission stimulée.

Le tableau était un peu chargé et pas très soigné, pensez à bien aérer la présentation et autant que possible à utiliser des couleurs pour mettre en évidence les titres et les résultats importants. Pour que la présentation puisse être suivie par tous, il faut connecter l'ordinateur au vidéoprojecteur, c'est indispensable. Quelques lapsus ont été faits à l'oral. Essayez d'y faire attention, car même si l'on comprend en général ce que vous voulez dire, cela peut attirer des questions (par exemple, parler d'émission « stimulée » au lieu de « spontanée » vous amènera à devoir expliciter clairement la différence entre les deux).

Pour les réponses aux questions, essayez d'être le plus

1. antoine.berut@ens-lyon.fr et <http://perso.ens-lyon.fr/antoine.berut>

2. etienne.thibierge@ens-lyon.fr et <http://perso.ens-lyon.fr/etienne.thibierge>

3. Par exemple si le point pris lors de la présentation n'est pas du tout en accord avec la droite tracée en préparation, et que l'on veut convaincre le jury que le modèle que l'on cherche à vérifier fonctionne bien à un offset ou une dérive près.

efficace possible. Tourner autour du pot ne vous fera que perdre du temps qui vous manquera ensuite pour répondre à davantage de questions. Il vaut mieux ne pas savoir répondre à une question difficile posée après plusieurs questions faciles que de donner l'impression de peiner à répondre aux questions faciles !

Retour sur le montage présenté

Introduction

Ouvrir sur la caractérisation des différentes sources de lumière n'est pas une mauvaise idée et a l'avantage de permettre d'introduire plus facilement des manipulations liées au laser (ce qui n'a pas été fait ici, mais aurait a priori sa place dans ce montage). Attention toutefois à ne pas affirmer que le spectre caractérise entièrement une source lumineuse (il ne faut pas oublier la directivité et la cohérence spatiale, qui ont justement leur importance quand on parle des lasers!).

Projeter un spectre avec un PVD est une expérience introductive intéressante si elle mise en lien directement avec le titre du montage (qui s'appelle « émission et absorption » et non pas « spectre »). Il faut alors former l'image de la fente source avec un achromat, et non pas un condenseur qui est une lentille pleine d'aberrations.

I) Emission

I.1) Mesure de la constante de Rydberg

La présentation de cette expérience n'a pas posé de problème particulier. Pensez à mentionner que la constante de Rydberg correspond à l'énergie d'ionisation de l'atome, exprimée dans des unités (casse-pieds) de spectroscopie. Faites attention à ne pas laisser le jury dans le noir trop longtemps. Étant donné qu'une seule mesure de spectre suffit, il vaut mieux rallumer la lumière après l'avoir mesuré et poursuivre l'analyse des résultats dans une pièce éclairée !

Il n'est pas nécessaire de présenter le fonctionnement du spectromètre en détail, mais il faut avoir les idées claires dessus car il est possible qu'on vous demande de l'expliquer pendant les questions. En particulier, il vaut mieux savoir ce qu'est un réseau blazé si l'on en parle à l'oral : c'est un réseau dissymétrique construit de telle sorte que le maximum d'intensité soit envoyé non pas dans l'ordre 0 mais dans un ordre non nul.

Pensez à bien justifier les incertitudes que vous prenez, en particulier lorsque l'incertitude que vous gardez est bien plus grande que la précision du capteur que vous avez annoncée.

Au niveau de l'utilisation de Regressi, il vaut mieux ne pas indiquer d'unité aux grandeurs que vous utilisez, afin d'éviter de vous retrouver avec des aberrations lorsque vous prenez le carré ou le log d'une grandeur. En particulier ici, il était frappant de voir que Regressi indiquait un coefficient directeur en « $-m^{a3}$ »⁴, qui s'est mystérieusement transformé en « 10^7 m^{-1} » au tableau.

4. Ou quelque chose d'avoisinant.

Une fois une expérience terminée, il est nécessaire de prendre le temps de conclure autrement que par « on a fait la mesure avec précision ». Rappeler quel aspect du titre du montage l'expérience a permis d'illustrer est en général une bonne idée.

I.2) Fluorescence

L'introduction de cette expérience n'était pas très claire et aurait mérité un peu plus d'attention. De plus, elle n'était pas assez exploitée : il y a bien plus à en dire que simplement $\lambda_{\text{flu}} > \lambda_{\text{abs}}$.

Parler du « spectre d'absorption de l'éthanol » alors qu'il s'agissait en fait simplement d'une mesure de référence afin d'éliminer les éventuels effets dues au solvant pouvait porter à confusion.

De façon générale la fluorescence risque d'amener des questions (en particulier sur la différence entre fluorescence et phosphorescence), mais si vous êtes prêts à y répondre, cette expérience a tout à fait sa place dans ce montage.

Malgré tout, elle semble mal placée au regard de la progression du montage. Il serait préférable de traiter d'abord les aspects type « atomes à deux niveaux » avec l'absorption, avant d'introduire l'importance des niveaux supplémentaires et des transitions non radiatives via la fluorescence.

II) Absorption, loi de Beer-Lambert

Vraisemblablement il y avait eu un problème de stabilité de la mesure en préparation qui ne s'est pas reproduit pendant la présentation, car les mesures prises en direct étaient bien plus propres et reproductibles que ce que les barres d'erreurs indiquaient sur les mesures faites en préparation. Ce genre de mésaventure peut se produire à l'oral (dans un sens comme dans l'autre), et il est important de bien réagir. Ici la taille des barres d'erreur a bien été justifiées par les conditions de mesure précédentes, il n'y avait donc a priori pas de problème (si ce n'est que c'est toujours un peu dommage de déprécier une mesure qui a l'air correcte en lui mettant des barres d'erreur exagérément grandes).

Il n'était pas nécessaire de faire toutes les mesures devant le jury, et du temps aurait clairement pu être gagné ici.

Le lien entre les spectres d'émission et d'absorption (complémentaires l'un de l'autre) doit être explicité au cours du montage, et peut même être vérifié expérimentalement. Cela se comprend avec le modèle canonique à deux niveaux, en remarquant que l'absorption se fait pour un faisceau directif : les photons absorbés, ôtés du faisceau, sont ceux qui correspondent aux transitions atomiques, et d'autres sont ensuite réémis par émission spontanée pour les mêmes longueurs d'onde. Comme l'émission spontanée est isotrope, ils ne rejoignent pas le faisceau, mais quittent la cuve dans toutes les directions. Le spectre d'absorption s'obtient en plaçant le spectromètre dans l'axe du faisceau, alors que le spectre d'émission s'obtient en le plaçant sur le côté de la cuve.

III) Corps Noir, loi de Stefan

Cette expérience est toujours difficile car elle nécessite de faire des hypothèses qui doivent être présentées clairement. Ici il a bien été dit que le modèle reliant la température du filament à sa résistance était phénoménologique (même si le premier ordre $\rho \propto T$ se justifie dans le modèle de Drude) et qu'un point de calibration « théorique » avait été pris. Il est dommage en revanche de ne pas avoir vérifié si le filament de la lampe utilisée était vraiment en tungstène.

Vous pouvez éventuellement utiliser un pyromètre optique pour mesurer (approximativement) la température du filament, mais dans ce cas vous devez avoir conscience que ces appareils reposent soit sur la loi de Wien, auquel cas on suppose déjà la loi du corps noir, soit sur une référence étalonnée (un filament qui change de couleur en fonction de la température), auquel cas il faut supposer que le matériau que l'on regarde est bien le même que celui qui a été étalonné.

Il est important de noter que comme seule une faible gamme de température est explorée (moins d'une décade), espérer tester une loi de puissance est de toute façon très optimiste.

Enfin, la loi de Stefan s'écrit $P = \sigma T^4$, où σ est une constante universelle. L'introduction de l'émissivité ε se fait pour décrire ce qu'on appelle un corps « gris », en correction à la loi de Stefan.

Questions

Une partie des questions qui ont été posées portaient sur les expériences qui ont été présentées, et la plupart des remarques qui y sont liées ont déjà été faites dans la partie « Retour sur le montage présenté ». Voici une liste non-exhaustive de questions qui peuvent être posée lors de ce montage.

Quelle est la différence entre fluorescence et phosphorescence ? La première est immédiate, alors que la seconde a lieu sur des durées plus longues. La fluorescence fait intervenir des transitions atomiques *permises*, qui ont donc lieu très rapidement. Au contraire, la phosphorescence implique des transitions *interdites* (c'est-à-dire qui ne respectent pas les règles de conservation des nombres quantiques) mais qui peuvent avoir lieu perturbativement sur des temps beaucoup plus long. Dans les deux cas, des transitions non radiatives entrent en jeu, sans quoi la longueur d'onde des photons ne changerait pas. Attention, le modèle de fluorescence donné ici avec un atome aux niveaux bien définis n'explique que la fluorescence en solution, et pas du tout la fluorescence en phase solide, dont le mécanisme fait intervenir des pièges liés aux défauts cristallins.

Que sont les désexcitations non-radiatives ? Donner un exemple. (Il faut que l'énergie soit libérée autrement que

par l'émission d'un photon, on peut citer par exemple : couplage spin-orbite (transfert de quantité de mouvement), vibration/rotation (augmentation de l'agitation), etc.)

Pourquoi est-il nécessaire de faire un blanc avec la cuve remplie de solvant lorsque l'on fait des mesures d'absorbance ? (On ne peut pas faire le blanc avec une cuve vide à cause des problèmes de réflexion/réfraction aux interfaces, qui ne sont pas les mêmes selon que la cuve est remplie ou non.)

Quelle est la différence entre absorption et diffusion ? Pour cette question, une première réponse porte juste sur le modèle utilisé pour décrire les phénomènes : pour l'absorption il faut un modèle quantique et le rayonnement est détruit puis réémis, alors que pour la diffusion on peut se contenter d'un modèle classique ondulatoire où l'onde est simplement défléchie sans être détruite. Le modèle de la diffusion Rayleigh repose sur le modèle de l'électron élastiquement lié, qui reste valide tant que les fréquences mises en jeu sont éloignées des fréquences de transition des atomes ou molécules mis en jeu. Pour les curieux (les fous ?), il est bien sûr possible de décrire la diffusion et l'absorption dans un cadre quantique, impliquant des atomes aux niveaux discrets et des photons. Le régime de diffusion s'obtient lorsque la fréquence des photons est faible devant la fréquence des transitions atomiques. Les résultats prédits par le modèle de l'électron élastiquement lié se retrouvent⁵ par une théorie de perturbation au premier ordre du hamiltonien atomique par le couplage atome-champ

Le spectromètre moyenne plusieurs acquisitions, pourquoi ? L'objectif est d'améliorer le rapport signal sur bruit. Augmenter le temps d'acquisition ne serait pas équivalent car le capteur finirait par saturer si on attend trop longtemps.

Pourquoi n'est-il « pas surprenant » qu'un corps noir présente un spectre continu ? Une première idée à amener est qu'un corps noir est un solide, dont les niveaux d'énergie s'organisent sous forme de bandes continues. C'est donc avoir un spectre avec des raies discrètes comme dans une vapeur qui serait surprenant !

Conclusion

En dehors du corps noir qui est toujours délicat, les expériences présentées classiquement dans ce montage sont plutôt faciles à mettre en œuvre mais nécessitent d'avoir les idées claires sur les phénomènes physiques qui ont lieu (et qui eux, ne sont pas forcément faciles).

Les expériences qui ont été présentées peuvent toutes être reprises, mais il serait bienvenu d'ajouter une expérience supplémentaire et de trouver un fil conducteur plus clair pour le montage.

5. Voir par exemple http://quantummechanics.ucsd.edu/ph130a/130_notes/node469.html