

MP 11 : Emission et absorption de lumière

Florent Hild, préparée avec Maud Thiriet

Introduction

Les phénomènes d'absorption et d'émission sont importants à la fois en physique fondamentale (que ce soit pour caractériser la matière à l'échelle atomique ou macroscopique) ou dans l'industrie (amélioration de l'éclairage, caractérisation de la coloration d'un pigment). La quasi totalité de ces phénomènes peuvent être décrits par les trois processus introduits par Einstein, qui sont : l'absorption, l'émission spontanée et l'émission stimulée. Dans ce montage, on va s'intéresser à quelques propriétés de ces processus.

1. Emission spontanée

On introduit l'émission spontanée.

1.1 Spectre de raies

Expérience 1 : mesure de la constante de Rydberg (entièrement décrite dans [1])

Introduction de la manip : un atome, préparé dans un niveau excité, se désexcite de manière spontanée avec émission d'un photon dont la fréquence correspond à l'énergie de la transition correspondante. Le spectre d'émission d'une espèce atomique donnée s'observe notamment dans les lampes à vapeurs atomiques. Leur principe d'exciter les atomes du gaz (Hg, Na par exemple) par une forte différence de potentiel. La relaxation de cet état excité entraîne l'émission spontanée. Le spectre d'une telle lampe est donc composé de raies, correspondant aux différentes transitions permises pour l'atome.

Conclusion : les mesures réalisées sur la lampe à hydrogène permettent de déterminer avec une précision relativement importante la constante de Rydberg. Ce type de mesure est notamment utilisé en astronomie pour déterminer la composition des étoiles en hydrogène, ou alors leur vitesse par rapport à la terre grâce au décalage dû à l'effet Doppler.

Transition : On vient de voir un spectre de raies. Mais il existe d'autres moyen d'émission de lumière. On va s'intéresser au spectre d'émission d'une diode électroluminescente dont le spectre est constitué de bandes d'émission. Les bandes ont la caractéristique d'être plus larges que les raies.

Remarques personnelles :

- J'ai bien décrit et expliqué le principe du fonctionnement du spectromètre à fibre, que j'utilise dans tout le montage. Pour cela j'ai utilisé un spectromètre de la collection qui s'ouvre simplement et permet donc de décrire plus aisément le principe de fonctionnement d'un spectro. On peut insister sur le fait que la CCD est en fait un matériau semi-conducteur qui absorbe le rayonnement (généralement du Si).
- J'ai bien expliqué qu'il fallait focaliser le faisceau sur l'entrée de la fibre. J'aurait peut-être dû insister un peu plus sur les conditions de propagation dans la fibre.

- Attention à ce que le spectro utilisé soit bien calibré en longueur d'onde. Une demie journée de mesure est si vite perdue...
- Les spectro de la collection ne sont ont une réponse très faible dans l'UV. Le signal est donc très faible pour les bandes d'émission de l'hydrogène dans cette gamme d'énergie (soit deux sur 4).

Questions du correcteur :

- Principe de fonctionnement d'une lampe à hydrogène ?
Haute tension qui excite de la vapeur H_2O . On peut observer des raies de l'oxygène.
- Qu'est-ce qui limite la largeur des pics que l'on mesure ?
Il y a une largeur due à l'émetteur : largeur intrinsèque due à Heisenberg (savoir que le Δt associé à une transition radiative est de l'ordre de 10 ns), élargissement Doppler due au mouvement des atomes, élargissement collisionnel (majoritaire dans les lampes spectrales). Mais la largeur est aussi due au détecteur
- Quelle est la résolution spectrale du détecteur ?
Voir notice
- Quelle est la réponse spectrale du détecteur ?
Les CCD sont généralement faites à base de Si. Il n'y a pas d'absorption de photon pour une énergie en dessous de 1,1 eV (bande interdite du Si), et les photons de hautes énergie sont absorbés mais mal convertis (perte dues à de la thermalisation je crois).
- Pourquoi on ne voit pas la raie de l'hydrogène à 410 nm ?
Cf réponse précédente.

Remarques du correcteur :

- C'est une expérience adaptée au sujet et qui présente un beau résultat. Néanmoins elle permet seulement de faire une droite avec 2 points (compte tenu de la réponse spectrale du détecteur). Elle est adaptée pour le jour J, mais il faut être conscient des limites.
- On peut envisager de la remplacer par une mesure des raies d'émission d'une lampe spectrale à vapeur de Hg, dont le spectre est tabulé. On peut enchaîner avec une expérience qualitative en pointant vers les lampes néons de la salle : on retrouve les mêmes raies.

1.2 Spectre de bandes

Expérience 2 : détermination de la bande interdite du semi-conducteur d'une DEL rouge

Introduction de la manip : on explique le principe de l'émission de lumière par les semi-conducteurs. Les niveaux d'énergie sont regroupés sous forme de bandes d'énergie : la bande de valence et la bande de conduction. Ils sont séparés par la bande interdite. L'émission de lumière est due aux recombinaisons électron-trou dans le semi-conducteur. La longueur d'onde du maximum d'émission du semi-conducteur correspond à l'énergie de la bande interdite.

Protocole : Simple. On place la DEL que l'on branche à l'aide des plaquettes prévues à cet effet. On prend une lentille de courte focale et focalise le rayonnement sur la fibre. Attention à ne pas saturer le détecteur.

Pour la DEL rouge j'ai mesuré $\lambda_{\max} = (629 \pm 0,7)\text{nm}$, soit $E_g = (1,97 \pm 0,01)\text{eV}$

Je n'ai pas trouvé de notice pour avoir une valeur à comparer. Il faut savoir que la plupart des DEL rouges sont constituées de $\text{GaAs}_{(1-x)}\text{P}_x$ où x correspond à la quantité de As et de P. La bande interdite du $\text{GaAs}_{(1-x)}\text{P}_x$ dépend de x et est comprise entre 1,4 eV (GaAs) et 2,3 eV (GaP). [2]

Conclusion : On peut conclure sur cette expérience en présentant qualitativement le spectre d'une DEL blanche. C'est une DEL bleue combinée à un matériau luminophore à base de phosphore. L'invention de cette diode bleue a été récompensée par le prix Nobel de physique 2014, grâce à la révolution qu'elle a induite dans le domaine de l'éclairage (économie d'énergie).

Transition : les rayonnements lumineux issus du processus d'émission spontanée possèdent une faible directivité (direction d'émission aléatoire), et une faible cohérence. L'exploitation de l'émission stimulée permet l'élaboration de sources lasers, dont les propriétés sont à la base de nombreuses applications : forte luminance, d'intérêt pour la découpe industrielle ou la physique des plasmas ; grande cohérence spatiale et temporelle du faisceau, qui en fait la source reine pour des applications interférométriques et métrologiques.

Remarques personnelles :

- J'ai oublié de montrer le spectre de la DEL blanche à l'oral. Je comptais utiliser mon téléphone mais ce n'est, ça peut être cool devant des élèves mais pas le jour J. Je ne sais pas s'il y a une DEL blanche dans la collection.

Questions du correcteur :

- A quoi est due la largeur du pic d'émission de la DEL ?
Temps de vie de l'exciton (paire électron-trou), défauts cristallin (qui introduisent des niveaux dans la bande interdite).
- Comment fonctionne une diode blanche ?
DEL bleue + luminophore. La DEL excite le luminophore qui luminesce dans le jaune. La somme des deux spectres fait du blanc. C'est bien de connaître la gueule du spectre à mon avis si vous choisissez de ne pas le présenter dans le montage.
- Pourquoi y a-t-il eu un développement récent des lunettes avec un traitement pour le bleu ?
Le développement des DEL blanches pour l'éclairage (aussi bien éclairage que les écrans LCD), font que l'on est exposé quotidiennement à type de rayonnement. Il n'est pas équivalent au rayonnement du Soleil, centré à 530 nm environ. Le rayonnement bleu (plus énergétique) pénètre dans l'œil jusqu'au cristallin et le détériore. Cela favorise l'apparition de la cataracte de manière précoce
- Incertitude pour le λ_{\max} mesuré ?
C'est l'un des points noirs de mon montage. Il faut être précis et clair sur la question, autrement dit, lire la doc' du spectro.

Remarques du correcteur :

- Il faut zoomer sur le pic pour faire la mesure du λ_{\max} (c'est un truc évident mais on a rapidement tendance à l'oublier dans le stress de l'oral).
- Ne pas oublier de faire le lien de cette mesure avec les diodes blanches.

2. Emission stimulée

Introduction de l'expérience : principe du fonctionnement d'une cavité laser (gain saturé du milieu amplificateur, modes longitudinaux permis par la cavité, pertes de la cavité). Selon le facteur de qualité de la cavité du laser, le laser émettra un seul, ou plusieurs modes. Cette manipulation propose de mesurer l'intervalle spectral libre d'un laser He-Ne. Celui utilisé pour l'expérience est un laser bi-mode.

Expérience 3 : mesure de l'intervalle spectral libre d'une cavité laser (entièrement décrite dans [1])

Conclusion : bien que ce laser soit bi-mode, ce résultat atteste de l'extrême finesse spectrale du rayonnement en sortie de la cavité laser. Un $\Delta\nu_{\text{ISL}}$ de l'ordre de 700 MHz permet de remonter à un écart de l'ordre de la dizaine de pm entre les deux modes.

Transition : Le rayonnement laser peut notamment servir d'excitateur pour des expériences de fluorescence, comme nous allons le voir dans la partie suivante.

Remarques personnelles :

- Manipulation assez simple à mettre en œuvre, il suffit d'aligner un laser avec la cavité Fabry-Pérot. Celle-ci demande quand même un peu de pratique. Je conseille de la travailler avant le jour J (surtout qu'on peut la recaser dans le MP spectrométrie).
- La grosse difficulté de cette manip est de l'expliquer correctement.
- Le laser He-Ne que j'ai utilisé (celui entouré de bois, avec un ISL à 685 MHz), fait des choses chelou avec la cavité. Il apparaît parfois trois modes, des fois deux. Il existe un autre laser He-Ne (tout noir avec un boîtier d'alimentation) avec un ISL dans les 1 GHz. A voir s'il est plus adapté à la mesure.

Questions du correcteur :

- Qu'est-ce qu'un mode transverse de la cavité ?

Oscillation du champ \vec{E} perpendiculaire à la direction de propagation dans la cavité. Ils donnent la géométrie du faisceau. C'est la distribution spatiale de l'intensité dans le plan transverse. Exemple du mode TEM_{00} : faisceau gaussien. Les modes longitudinaux donnent la fréquence du rayonnement.

- Pourquoi l'alignement avec la cavité confocale est-il crucial ?

Il faut exciter une orbite stable de la cavité. Cette cavité est en fait un filtre passe-bande qui résonne avec la fréquence d'entrée. On change la fréquence d'analyse en changeant la longueur de la cavité.

- Pourquoi on a répétition du motif sur une même rampe ? Comment varie la fréquence d'analyse de la cavité avec la longueur de cavité ?

$\Delta\nu_{\text{ISL}} = c/L_{\text{cavité}}$ où $L_{\text{cavité}}$ est la longueur du faisceau dans la cavité ($L_{\text{cavité}} = 2L$ pour une cavité constituées de deux miroirs plans séparés de L . C'est plus compliqué pour une cavité confocale). On a répétition du motif car $L_{\text{cavité}} = n\lambda$.

- Pourquoi deux modes lasent pour le laser He-Ne ?
Le gain du milieu amplificateur est inhomogène. Si le gain est homogène, il y a un seul mode qui lase.

Remarques du correcteur :

- Bonne manip à présenter le jour J mais il faut bien l'expliquer. Etre conscient que la cavité Fabry-Pérot est un peu une boîte noire dans le montage.
- La formule qui permet de remonter au Δv_{ISL} du laser (qui vient de [1]) ne semblent pas être vraie tout le temps, mais être un développement dans le cas où $L_{\text{cavité}}$ ne varie pas beaucoup devant la longueur de cavité du laser (?).

3. Absorption et fluorescence

Introduction de l'expérience : L'absorption est le processus inverse de l'émission stimulée. Pour la fluorescence, tout est dans [1].

Expérience 4 : absorption de la rhodamine (entièrement décrite dans [1])

Conclusion : On a mesuré le spectre d'absorption de la molécule. Afin de mesurer sa fluorescence, on va envoyer un rayonnement très proche de sa longueur d'onde maximale d'absorption. On prend un laser Nd-YAG qui lase à 632 nm alors que le maximum d'absorption est à environ 630 nm.

Questions du correcteur :

- Grandeur utilisée pour quantifier l'absorption ?
J'ai suivi le protocole du bouquin où le spectre de la rhodamine est soustrait au spectre de référence (cuve avec seulement de l'éthanol). Il faudrait plutôt calculer le logarithme de la transmittance ($-\log \frac{I}{I_0}$) pour avoir une mesure quantitative de l'absorbance.
- De quoi dépend l'absorbance ?
Longueur d'onde du rayonnement, concentration en molécule fluorescente : loi de Beer-Lambert.

Expérience 5 : fluorescence de la rhodamine (entièrement décrite dans [1])

Conclusion : La mesure de fluorescence permet de superposer les deux spectres (absorption et fluorescence). On observe bien le décalage caractéristique de la fluorescence.

Remarque du correcteur :

- Expérience que l'on peut éventuellement remplacer par une expérience centrée sur la loi de Beer-Lambert : calculer expérimentalement le coefficient d'extinction molaire de sulfate de cuivre par exemple.

Conclusion

On a vu à travers ce montage différentes propriétés des processus d'émission et d'absorption. Notamment, le dernier montage a introduit les bases de la spectroscopie de photoluminescence, qui est utilisée en laboratoire pour caractériser les semi-conducteurs (propriétés électroniques), par exemple.

Bibliographie

[1] Physique expérimentale Michel Fruchart, Etienne Thieberge, Maxime Champion, Pierre Lidon, Arnaud Le Diffon, Optique, mécanique des fluides, ondes et thermodynamique

[2] Sapoval, Physique des semi-conducteurs (pour les valeurs de bande interdite des semi-conducteurs)

Remarques personnelles sur l'ensemble du montage

- L'idée de mon montage a été de présenter des expériences simples mais qui ont toutes été réalisées en direct lors de l'oral.
- Voici les conseils que j'ai obtenu d'un tuteur qui est passé sur ce montage le jour J, et qui peuvent être utiles à tous : il a présenté la mesure de la constante de Rybderg, la cavité confocale, et Beer-Lambert pour finir (il n'a pas eu le temps de présenter la fluorescence de la rhodamine). Il a utilisé le même spectromètre qu'en chimie et pris celui de la collection qui est ouvert pour présenter son fonctionnement. Comme les manipulations sont plutôt simples, il a tout présenté en direct devant le jury et s'est concentré sur la pédagogie.