

MP11 : Emission et absorption de la lumière

Louis LEVEQUE, Paul RICHARD

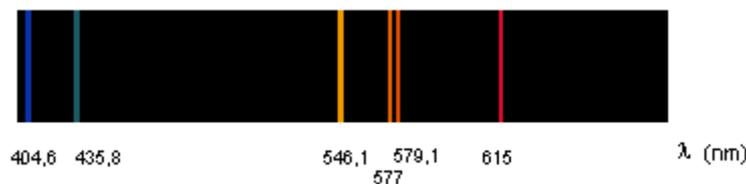
Les phénomènes d'absorption/émission de la lumière sont importants à la fois en physique fondamentale (la spectroscopie, sous ses formes multiples, est le moyen privilégié pour sonder la matière à l'échelle quantique) ainsi que dans l'industrie (amélioration des sources lumineuses, développement de sources laser pour des applications d'usinage ou de métrologie). La quasi-totalité de ces phénomènes peuvent être décrits au niveau quantique par les trois processus d'Einstein : absorption, émission spontanée et émission stimulée. Dans ce montage, on va s'intéresser aux propriétés essentielles de ces processus. On laissera de côté l'émission thermique.

I) Emission de la lumière

1) Emission spontanée

Un atome, préparé dans un niveau excité, se désexcite de manière spontanée avec émission d'un photon résonant, de fréquence donnée par la relation de Broglie. Le spectre d'émission d'une espèce atomique donnée s'observe naturellement dans les lampes à vapeurs atomiques (où lampes à décharge). Leur principe est simple : une forte différence de potentiel appliquée à une ampoule de gaz vient ioniser les atomes, qui relaxe ensuite par émission spontanée. Le spectre d'une telle lampe est donc composé de raies, correspondant aux différentes transitions permises pour l'atome. On réalise le montage suivant pour observer le spectre d'une lampe à vapeur de mercure :

Une première lentille collecte le flux lumineux émis par la lampe et le concentre sur une fente fine verticale. Un système de deux lentilles fonctionnant selon une conjugaison foyer-infini/infini-foyer forme l'image de cette fente sur un écran. Un réseau de diffraction placé entre ces deux lentilles joue le rôle d'élément dispersif et permet d'observer le spectre de la lampe du mercure.



Le spectre visible du mercure est présenté ci-dessus . En plus de ces raies, on peut observer au moins une raie UV en plus à l'aide de la fluorescence d'un bout de papier. On met ici en évidence le caractère discret des spectres atomiques. En appliquant la formule des réseaux, on peut relier la position sur l'écran à la longueur d'onde de la raie spectrale :

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a}$$

L'angle θ est également relié à la position y de la raie sur l'écran par :

$$\tan(\theta) = \frac{y}{f}$$

Où f est la focale de la dernière lentille. Pour référence, on obtient les mesures suivantes :

Longueur d'onde tabulée (nm)	Longueur d'onde mesurée (nm)
435,8	441
546,1	550
578	582

L'incertitude est de l'ordre de 5nm.

On peut à ce stade montrer le spectre d'une lampe néon, et mettre en évidence la présence de mercure.

2) Emission stimulée

L'émission stimulée est la transition d'un niveau excité vers le fondamental via interaction avec un photon résonant. Le photon émis se situe alors dans le même mode que le photon incident (même fréquence, même vecteur d'onde, même polarisation). L'émission stimulée permet ainsi 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, grande directivité, pour les pointeurs lasers ou les mesures par télémétrie...

Un système laser consiste en un milieu à gain présentant une inversion de population, et une cavité résonante qui permet à l'émission stimulée de prendre le pas sur l'émission spontanée. On étudie ici le laser hélium-néon grâce au laser en kit. Celui-ci consiste en une ampoule contenant un mélange de gaz hélium et néon, excité par décharge électrique, d'un miroir déjà installé au fond de l'ampoule, et d'un miroir à placer et aligner sur le banc optique pour fermer la cavité. On peut visualiser à l'aide du spectromètre à fibre, le spectre d'émission spontanée du gaz. On observe un spectre de fluorescence très large.

On ferme la cavité à l'aide du miroir sur rail, qu'on aligne ensuite. On observe alors un faisceau laser en sortie, signe de l'émission stimulée. En l'observant à l'aide du spectromètre à fibre, on n'observe plus qu'une raie à 632,8 nm, ce qui illustre le caractère sélectif en fréquence de l'émission stimulée.

En observant cette raie, on est en fait limité par la résolution du spectro à fibre, en réalité, cette raie est composée de plusieurs raies, qui correspondent aux modes de la cavité vérifiant la condition de seuil. Pour mettre en évidence ceux-ci, on peut observer leur battement à l'aide d'une photodiode rapide. En effet, ces modes sont cohérents entre eux, et décalés en fréquence d'un multiple de l'intervalle spectral libre de la cavité laser, si l'on observe leur superposition, on observe donc des composantes spectrales à des multiples de l'ISL. La plus petite fréquence de battement doit donc valoir :

$$f = \frac{c}{2L}$$

Avec L , longueur de la cavité. On peut vérifier la pertinence de la mesure en comparant à la valeur mesurée à la règle. Une autre alternative est d'utiliser une cavité Fabry-Pérot pour analyser le spectre de sortie, ce qui présente l'avantage de pouvoir visualiser tous les modes de la cavité, mais est un peu plus touchy expérimentalement.

II) Absorption

1) Loi de Beer-Lambert

L'absorption est le phénomène inverse de l'émission stimulée. Une vapeur atomique absorbera le rayonnement incident aux mêmes longueurs d'ondes que ses raies d'émission. Dans une phase condensée, les couplages présents entre les différents atomes conduisent à un split des niveaux énergétiques, et donc à un spectre de bande. Loin de la saturation, on peut écrire la loi de Beer-Lambert pour une solution, qui relie l'absorbance à la concentration :

$$A = \varepsilon(\lambda) c l$$

On mesure l'absorbance de solutions de KMNO_4 de différentes concentrations pour remonter à la valeur de l'absorptivité molaire de ce composé. Pour cela, on utilise un laser vert Nd-Yag X2 à 532 nm, et un puissance-mètre à photodiode. On "fait le blanc" en mesurant la puissance transmise par une cuve d'eau distillée, et on calcule l'absorbance par rapport à cette référence (se placer dans le noir pour éviter toute lumière parasite). Nous avons obtenu les résultats suivants :

Concentration (mol*L-1)	Absorbance
$6 \cdot 10^{-4}$	1,12
$3 \cdot 10^{-4}$	0,55
$2 \cdot 10^{-4}$	0,38
$1,2 \cdot 10^{-4}$	0,23

Ce qui donne une valeur de l'absorptivité de $\varepsilon(532\text{nm}) = 1,9 \cdot 10^5 \text{ L} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{cm}^{-1}$.

2) Fluorescence de la rhodamine

La fluorescence est une propriété de certaines molécules en phase condensée : celles-ci absorbent un photon à une fréquence résonante d'absorption, puis, par des désexcitations non radiatives, redescendent à un niveau d'énergie plus bas. Le composé absorbe alors à une longueur d'onde plus basse qu'il ne réémet : c'est le phénomène de fluorescence.

On peut illustrer cela avec une cuve de rhodamine, une lampe QI et le spectromètre à fibre. On montre que la couleur transmise par la rhodamine est un pourpre, alors que la lumière émise par les cotés de la cuve est orange.

Conclusion

On a ici illustré expérimentalement les différents processus d'absorption et d'émission de la lumière. Ces problématiques font toujours l'objet de recherches, on peut par exemple mentionner le prix nobel de physique 2014, décerné aux inventeurs de la diode bleue, qui s'est révélé instrumentale pour l'élaboration de LED blanches à large spectre, et pour les technologies Bluray.

Questions

- Pourquoi l'hélium-néon lase à 632 nm ?

Pour qu'une transition puisse faire l'objet d'une transition laser, elle doit être métastable, c'est-à-dire que son coefficient A d'émission spontanée doit être faible pour permettre à l'émission stimulée de l'emporter. Le néon présente des transitions métastables dans le vert, dans le rouge et dans l'infrarouge. En pratique, on choisit la longueur d'onde laser en sélectionnant la longueur d'onde à laquelle les miroirs de cavité ont une réflexion maximale.

- Pourquoi n'observe-t-on pas d'extinction de la fluorescence quand l'émission laser est démarrée ?

Le spectre d'émission spontanée du néon est trop large, on n'éteint qu'une proportion minime de la fluorescence.

Commentaires

- On ne dit pas que deux photons sont cohérents, ne pas mélanger les vocabulaires corpusculaires et ondulatoires.
- Eviter de parler d'intervalle spectral libre pour un laser, c'est plus un terme de spectroscopie.
- Même si l'on ne fait pas de mesures dessus, ça peut valoir le coup de montrer le spectre d'une source thermique (lampe QI avec prisme à vision directe par exemple), n'espérez pas pouvoir retrouver la loi de Planck par contre (ce n'est certainement pas un corps noir).
- Ca vaut le coup d'être au point sur les grandeurs photométriques visuelles (c'est très bien fait dans le Sextant), et sur la notion d'efficacité lumineuse (en lumen/W) qui caractérise l'utilité d'une source pour l'œil humain.
- Une lampe à incandescence a une efficacité de l'ordre de 10 lumen/W, une LED blanche nouvelle génération de 50 lm/W. Le soleil est la meilleure source pour l'œil humain, avec une efficacité de 100lm/W.

Bibliographie

- SEXTANT, pour la manip du spectre du mercure, et les grandeurs photométriques
- CAGNAC, *Lasers*, pour... la partie laser, et les processus quantiques d'émission/absorption