

Absorption et émission de la lumière

Théo Sépulcre. Correcteurs : Mickaël Melzani et Hervé Gayvallet.

Commentaires généraux

La leçon présentée est d'un bon niveau, et il apparaît clairement que le travail fourni a été important et que les différentes notions sont maîtrisées.

Quelques commentaires et remarques :

- Le tableau est clair et bien tenu, l'utilisation des couleurs bienvenue.
Attention toutefois à écrire suffisamment de choses au tableau. L'oral est évidemment indispensable et permet d'ajouter beaucoup plus d'information par rapport à ce qui est écrit, mais il faut veiller à ce que les points clés du raisonnement, le vocabulaire introduit, les hypothèses importantes, les conclusions importantes, soient notées et pas seulement dites.
- Il manquait quelques ordres de grandeur. Certains doivent venir naturellement : on parle de la finesse de la cavité, il faut en donner un OG ; on parle de différents processus d'élargissement des raies, il faut donner des OG ou au moins dire lequel domine. On peut aussi donner un ordre de grandeur de l'angle d'ouverture d'un faisceau laser, puisque c'est une caractéristique essentielle du laser.

Rappelons que Théo avait bien donné des OG de la puissance du laser et de la longueur de cohérence temporelle.

Il serait aussi bienvenu de comparer l'importance relative de l'émission stimulée et de l'émission spontanée :

$$\frac{dN_{2 \rightarrow 1}^{\text{stimulée}}}{dN_{2 \rightarrow 1}^{\text{spontanée}}} = \frac{B_{21} N_2 u(\omega_{12})}{A_{21} N_2} = \frac{\pi^2 c^3 u(\omega_{12})}{\hbar \omega_{12}^3} = u(\omega_{12}) \frac{\lambda_{12}^3}{8\pi \hbar}.$$

Dans un laser on veut justement que ce soit l'émission stimulée qui domine. On comprend alors pourquoi il est plus simple de réaliser un maser à ammoniac de longueur d'onde ~ 1 cm plutôt qu'un laser avec $\lambda \sim 0.5 \mu\text{m}$.

- Dans l'explication du fonctionnement du laser, il manquait une discussion de la condition pour que l'onde de pulsation ω soit amplifiée ou non : il faut que le gain correspondant compense les pertes. Cette notion de seuil est un point important.
- L'expérience était très bien présentée. Superposer le spectre en sortie du laser et le spectre latéral afin d'identifier que la raie amplifiée est présente dans l'émission latérale est une bonne idée.

Attention toutefois à l'amplitude de cette raie sur le côté : comme l'a fait remarquer l'un de vous, il est probable que son amplitude soit faible justement parce qu'elle participe à l'émission stimulée dans la direction longitudinale, les atomes étant alors en majorité occupés à réaliser la transition $2 \rightarrow 1$ de façon stimulée et pas spontanée.

- Au niveau de la bibliographie, on peut ajouter que le Diu de physique statistique contient un "complément" court et très clair sur la démonstration du lien entre les coefficients d'Einstein.

À propos du plan

Le choix du plan est toujours une affaire délicate, et c'est particulièrement le cas pour cette leçon.

Il semble qu'il est attendu que les coefficients d'Einstein soient traités. Après tout, ils font le lien entre les trois modes d'émission/absorption. Ensuite, on peut penser à :

- Le laser. Si on en parle, il faut le faire de façon détaillée, ce qui mobilise quasiment tout le temps de la leçon. En parler à moitié est probablement une mauvaise idée.
- La fluorescence / phosphorescence. On peut faire la manipulation avec la lampe à mercure (les raies UV deviennent visible à l'oeil si on place une feuille de papier sur l'écran, grâce à la phosphorescence de la cellulose).

L'inconvénient est qu'il faut bien maîtriser la physique en jeu dans une leçon qui est déjà par ailleurs assez complexe. On pourra consulter le livre de Rouessac (Analyse chimique) pour une introduction. On peut trouver un traitement (trop ?) détaillé dans le Bruhat d'optique.

- La complémentarité des raies d'émission et d'absorption des spectres des gaz excités. C'est d'ailleurs quelque chose qui ne devrait pas prendre trop de temps et qui peut se faire en plus du laser.
On peut alors en profiter pour montrer des images couleurs de spectres d'émission et d'absorption. Ce point précis est au programme de seconde, et on trouve dans les livres de jolies illustrations.
- Parler du rayonnement d'équilibre thermodynamique en évoquant une démonstration de la loi de Planck comme fait ici. Mais attention, cela devient très vite chronophage. Vous vous rendrez également compte en préparant la leçon correspondante que cela nécessite d'être rigoureux.

Retour sur la leçon

Introduction

Bien.

I - Processus d'absorption entre lumière et matière

1. L'importance de la quantification : loi de Rayleigh Jeans puis la loi de Planck

Bien également. C'est une partie peu habituelle dans cette leçon, mais pourquoi pas.

2. Coefficients d'Einstein

La démarche est la bonne. Voir plus haut pour des commentaires.

3. Lien entre les coefficients d'Einstein

Il faut plus insister sur les étapes clés du raisonnement d'Einstein, et les noter au tableau : notamment le fait qu'on se place d'abord dans le cadre d'un système matière+rayonnement à l'équilibre thermodynamique pour déterminer les liens entre les coefficients, puis que ces liens sont ensuite valables quelle que soit la situation dans laquelle sont les atomes car il s'agit de propriétés intrinsèques.

II - Application : le LASER

1. Principe de fonctionnement

2. Le système à trois niveaux

Cette partie pourrait aussi s'appeler "le milieu amplificateur". La démonstration est bien menée, et le passage du cas trois niveaux au cas deux niveaux est astucieux et rapide (pour mémoire : faire $W_p = 0$ et remplacer B_{12} par $B_{12} + W_p$ et B_{21} par $B_{21} + W_p$).

3. Caractéristiques de l'émission : analogie électrique

La partie précédente décrivait le milieu amplificateur, celle-ci décrit les autres composants.

L'analogie électrique peut être pertinente, à condition de faire comme si l'auditoire connaissait très bien les oscillateurs électriques, et en la poussant un peu plus loin : milieu amplificateur = circuit électrique amplificateur, pompage = alimentation de l'amplificateur électrique, cavité = filtre, passage du seuil = condition d'oscillation.

On peut aussi ne pas la faire et s'appuyer simplement sur un schéma bloc qui situe le rôle de chacun des composants du laser.

III - Largeur de raies

Bien également.

On peut se passer de la démonstration de la forme d'une raie élargie par désexcitation naturelle, car le profil temporel en $\exp(-t/\tau) \cos \omega t$ est donné arbitrairement. On peut très bien se contenter des arguments avec l'inégalité d'Heisenberg.

Il est bon, après avoir énuméré plusieurs causes possibles d'élargissement, de dire laquelle domine dans le cas d'un laser He-Ne de TP et de donner son ordre de grandeur.

Conclusion

Bien.

Retour sur les questions

Les questions posées par le jury (et ici par les correcteurs) ont pour but de revenir sur les points peu clairs de la leçon, et ensuite de tester plus largement vos connaissances.

On reprend ci-dessous quelques-unes des questions abordées.

★ Le pompage est-il toujours symétrique ? *A priori* non. Il l'est dans des cas particuliers, par exemple dans le cas d'un pompage optique par un autre laser.

S'il ne l'est pas, on ne peut plus démontrer que le laser à deux niveaux n'existe pas.

★ L'angle d'ouverture d'un faisceau laser est de l'ordre du milliradian. Il est fixé par la longueur de la cavité (plus elle est longue, plus cet angle est faible), et par la forme des miroirs. Ceux-ci fixent aussi le type de mode transverse autorisé.

★ La cavité permet seulement à certains modes de se propager. Il y a une sélection longitudinale (indice q dans la suite, espacement en $\Delta\nu = \frac{c}{2L}$ avec L longueur de la cavité), et une sélection des modes transverses (indices m et n dans la suite). Les modes possibles sont donc indicés trois fois : $\nu_{q,m,n}$. La formule générale n'est pas très agréable et dépend de la base choisie pour les modes transverses et de la géométrie des miroirs. La conclusion générale à retenir est que les modes transverses sont moins espacés que les modes longitudinaux¹.

On peut filtrer les modes transverses pour ne garder que le mode 0,0 en plaçant un diaphragme dans la cavité. Comme les modes transverses élevés sont plus étendus spatialement, ils sont plus atténués par le diaphragme que le mode 0,0 et peuvent ainsi ne pas dépasser le seuil autorisant l'amplification.

De même, on peut placer un réseau dans la cavité pour écarter certains modes longitudinaux.

Cela dit, on peut ne pas évoquer tout ceci dans la leçon !

★ Pour finir et pour faire suite à certaines questions, voici quelques généralités à propos des processus fondamentaux.

L'émission spontanée, dont l'existence expérimentale ne fait pas de doute car un atome se désexcite sans champ extérieur, ne se décrit correctement que dans le cadre de l'électrodynamique quantique avec quantification du champ électromagnétique.

Selon Aslangul, tome II page 941, son existence technique provient de la non commutation des opérateurs de champ. Et plus physiquement, il s'agit en quelque sorte d'une émission stimulée déclenchée par les fluctuations quantique de l'état fondamental de l'atome (le champ dans lequel baigne l'atome est le champ au niveau fondamental, qui n'est pas strictement d'énergie nulle). Pour les curieux qui auront du temps après l'agrégation, elle est décrite en détail dans son paragraphe 25.2.

L'émission stimulée se décrit conjointement avec l'absorption dans le cadre de la mécanique quantique sans champ quantifié (du moins pour certains de ses aspects). Un traitement possible est dans le cadre de la théorie des perturbations dépendantes du temps (voir par exemple le Basdevant de Mécanique Quantique, chapitre 17), la perturbation étant en $\exp(i\omega t)$ (l'onde incidente). Il n'y a absorption, ou rayonnement induit, que si cette perturbation est résonante avec l'atome : donc si $\omega \simeq \omega_0$ où $\hbar\omega_0$ est la différence d'énergie entre les deux niveaux atomiques. C'est une façon de "comprendre" pourquoi le photon induit est de même fréquence que le photon incident. Cela n'explique toutefois pas pourquoi il est aussi de même polarisation et en phase...

1. voir Dangoisse, ou également la jolie figure p.56 de ce poly de cours : http://mon.univ-montp2.fr/claroline/backends/download.php?url=LyFGTUVFMTQyX0xhc2Vyc192MTJfYy5wZGY%3D&cidReset=true&cidReq=FMEE142_001