

LP40

Absorption, émission spontanée ou induite du rayonnement. Caractéristiques et applications.

Correcteurs : Bernard Castaing¹ et Etienne Thibierge²

Leçon présentée le vendredi 19 avril 2013

Extraits des rapports du jury

Je vous rappelle que le préambule des rapports de l'épreuve de leçon présente les attentes et exigences du jury. Je vous encourage vivement à le lire.

2012 : Trop souvent, il y a confusion entre les processus élémentaires pour un atome et un ensemble d'atomes. De même le candidat doit préciser au cours de sa leçon le caractère monochromatique ou non du champ de rayonnement qu'il considère.

2010 : Le Laser n'est pas la seule application de cette leçon. Le Laser He-Ne n'est pas l'illustration la plus simple. Il est maladroit d'introduire les coefficients d'Einstein dans une situation de rayonnement parfaitement monochromatique. À propos du nouveau titre : Il s'agit de mettre en évidence les caractéristiques des émissions et absorptions et de présenter en détail une ou plusieurs applications.

2004 : Les coefficients d'Einstein ne doivent pas être évoqués dans le seul cas du rayonnement thermique.

2002 : Le laser ne doit pas être présenté de façon trop superficielle.

Commentaires généraux

La leçon présentée était trop ambitieuse pour être présentée correctement dans le temps imparti. La présentation a été interrompue suite au paragraphe sur le laser à trois niveaux, qui a été fortement abrégé.

Le tableau est propre et bien présenté. Le choix de ne pas écrire le plan sur la colonne de gauche ne pose pas de problème, cependant dans ce cas il vaut sans doute mieux écrire le plan sur un transparent qu'on pourra projeter lors de la discussion avec le jury s'il veut s'y référer.

Présenter des calculs sur transparent est vraiment déconseillé : ou bien le calcul est important et il faut le détailler au tableau, ou bien il ne l'est pas et on peut se permettre de le sauter. L'écrire sur un transparent le rendra difficilement compréhensible à l'auditoire. Dans le corps de la leçon, les transparents sont à réserver aux schémas ou aux tableaux de valeur.

Il est nécessaire de faire un choix uniforme sur l'ensemble de la leçon entre $h\nu$ et $\hbar\omega$, pour éviter l'irruption malencontreuse de facteurs 2π dans les expressions.

Retour sur la leçon présentée

1) Interaction rayonnement-matière

1) Description du milieu matériel

Il n'est pas forcément nécessaire de prendre en compte la dégénérescence des niveaux d'énergie : comme un niveau n'est pas caractérisé que par son énergie, mais aussi par sa parité et ses moments cinétiques orbital et de spin, ce n'est de toutes façons pas le même photon qui pourra permettre les deux transitions.

Au vu du temps manquant, je ne suis pas sûr que la projection du spectre d'une lampe au mercure par un PVD apporte grand chose à la leçon.

2) Processus d'interaction

Il faut fixer la notation du coefficient d'Einstein d'émission spontanée A_{12} ou A_{21} et ne pas en changer. Par ailleurs, il ne s'interprète pas comme une *vitesse* de désexcitation, mais comme un *taux*, c'est à dire comme une variation relative plutôt qu'une variation absolue.

$1/A_{21}$ ne correspond pas directement au temps de vie du niveau. D'autres processus de désexcitation non radiatifs existent, comme par exemple pour un solide l'émission de phonons dans le réseau cristallin. Le temps de vie est alors l'inverse du taux de désexcitation γ_{12} , ce dernier étant la somme des taux associés aux différents processus.

La notion de section efficace n'apporte pas beaucoup à la leçon, prend beaucoup de temps à introduire, et a conduit à des confusions (une section efficace est homogène à une surface). De plus, dans le cadre du modèle adopté avec des niveaux parfaitement définis on a $\sigma_{12}(\omega) \propto \delta(\omega - \omega_{12})$, ce qui rend la notion complètement superflue. Enfin sa position vis à vis des prérequis pose question, car la section efficace n'est pas une notion élémentaire que ça. En conséquence, c'est probablement ces développements qu'il faut enlever de la leçon.

3) Relation entre les coefficients

Ce calcul est important dans la leçon, et ne peut pas être relégué sur un transparent.

Il faut bien insister sur les messages du calcul :

▷ Pour avoir compatibilité entre Planck et Maxwell, *il faut* l'émission stimulée. C'est d'ailleurs comme ça qu'Einstein l'a introduite.

1. bernard.castaing@ens-lyon.fr

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

- ▷ On obtient des relations dans le cas d'un équilibre thermique, mais elles sont propres à l'atome et pas à l'équilibre thermodynamique : les coefficients d'Einstein sont intrinsèques, indépendants des conditions expérimentales.
- ▷ Connaître un seul des coefficients d'Einstein et la fréquence de la transition suffit pour connaître les trois.

4) Interprétation

Il est important de donner des ordres de grandeur et de comparer entre eux les processus. Comparer l'importance de l'émission stimulée pour deux raies est intéressant, d'autant plus avec le rebond sur MASER et LASER qui permet la transition vers la suite. On pourrait aussi comparer entre elles les deux types d'émission pour une raie donnée.

II) Application aux lasers

1) Condition d'amplification

Il est important de mettre en avant la nécessité d'une inversion de population pour obtenir une amplification du faisceau.

Plutôt que d'utiliser les sections efficaces, on peut faire le bilan de façon plus qualitative. Lors de la traversée du milieu, la variation du nombre de photons du faisceau s'écrit (bilan sur l'ensemble du milieu pendant dt) :

$$\begin{aligned} dN_{\text{photons}} &= -dN_2^{\text{stim}} - dN_2^{\text{abs}} \\ &= B_{12}u(\nu_{12})(N_2 - N_1)dt \end{aligned}$$

On voit alors que l'inversion de population est indispensable pour que le nombre de photons du faisceau augmente.

L'émission spontanée n'est pas prise en compte dans ce bilan car le caractère aléatoire de la direction d'émission fait que la majorité des photons d'émission spontanée n'appartiennent pas au faisceau (directionnel) auquel on s'intéresse.

2) Laser à deux niveaux

Être clair sur le fait qu'état d'équilibre du laser veut dire ici état stationnaire, et pas état d'équilibre thermique.

3) Laser à trois niveaux

Il faut présenter le calcul de la différence de population dans le cas du deux ou du trois niveaux. On peut choisir de faire le calcul à deux niveaux, de montrer qu'on ne peut pas atteindre l'inversion, et d'expliquer qualitativement comment un laser à trois niveaux résout le problème. On peut aussi faire le calcul à trois niveaux, montrer pourquoi ça marche, et expliquer pourquoi un deux niveaux n'aurait jamais permis d'atteindre l'inversion. Je ne pense pas qu'un choix soit foncièrement meilleur que l'autre, c'est selon votre sensibilité.

Dans le schéma des trois niveaux, il est maladroit de noter A_{32} le taux de désexcitation si la transition est non radiative. Mieux vaut privilégier γ_{32} , notation plus générale pour un taux de transition.

Suite de la présentation

Le laser, suite

La présentation du laser n'a pas pu être menée à bien dans les temps. Voilà quelques points sur lesquels je vous recommande d'insister dans la présentation.

Un laser est directif, monochromatique et cohérent spatialement. En revanche, il n'est pas *a priori* plus puissant qu'une source classique mais plus intense (la puissance est concentrée sur une plus petite surface). Un laser est la combinaison d'un milieu amplificateur, permettant d'amplifier le faisceau par émission stimulée, et d'une cavité optique qui permet de sélectionner parmi tous les photons potentiellement amplifiables ceux qui le seront effectivement³.

Un laser démarre toujours par un photon d'émission spontanée. Pour que celui-ci puisse être amplifié de façon significative, il faut

- ▷ qu'il puisse engendrer d'autres photons par émission stimulée avant d'être absorbé, ce qui revient à dire que sa fréquence doit correspondre à une transition dont les populations sont inversées,
- ▷ qu'il fasse beaucoup d'aller-retours dans la cavité, *i.e.* que son vecteur d'onde corresponde à un vecteur d'onde de mode propre de la cavité (condition sur la direction et sur la fréquence du photon).

Ainsi le milieu amplificateur et la cavité sont tous les deux indispensables au fonctionnement du laser, c'est un point très important à ne pas oublier. On a trop souvent tendance à réduire le laser à l'émission stimulée. L'énergie nécessaire à l'inversion de population est elle apportée par un dispositif de pompage.

Dans la pratique, la raie atomique a une largeur non-nulle (1,5 GHz pour un laser He-Ne de montage), pour beaucoup due à des effets thermiques. Elle est *a priori* plus grande que la largeur de la résonance de la cavité (40 MHz pour le même laser). La cavité va donc permettre d'augmenter la cohérence temporelle du faisceau. Néanmoins, la présence de plusieurs modes résonants de la cavité dans la largeur de la raie d'émission limite souvent cet affinement du profil spectral.

Enfin la cohérence spatiale du faisceau s'explique par le fait que la direction de propagation des photons n'est en général pas exactement l'axe de la cavité. Après un tour, c'est un point différent du miroir qui est atteint, mais avec une relation de phase bien déterminée, simplement due à la propagation dans la cavité.

Un deuxième exemple

Même si le rapport 2010 laisse la possibilité de présenter une seule application, il semble un peu risqué de ne pas en présenter deux. La deuxième application sera beaucoup plus brève que la présentation du laser, qui semble elle assez incontournable puisque c'est l'utilisation la plus connue de l'émission stimulée.

3. C'est une explication "au premier ordre", où on ne tient pas vraiment compte du comportement quantique des photons, en particulier de leur caractère bosonique.

Il est assez classique de présenter la formation de mélasses optiques par refroidissement laser, qui utilise l'absorption et l'émission spontanée. Néanmoins on peut arguer que cet exemple illustre surtout la quantité de mouvement du photon, et est par conséquent un peu en dehors du cadre de la leçon.

Une autre possibilité est de traiter l'exemple de la fluorescence, qui utilise aussi l'absorption et l'émission spontanée. Si vous faites ce choix, veillez à ne pas être trop superficiel dans la discussion (en particulier il faut savoir distinguer fluorescence et phosphorescence, la première concerne les transitions permises et l'autre les transitions interdites).

Si vous présentez la fluorescence, une expérience illustrative peut être la bienvenue. Je pense par exemple à l'observation des raies UV du mercure. Dans la partie violette du spectre, si on ajoute une feuille de papier devant l'écran, on voit apparaître de nouvelles raies peu lumineuses sur le papier, inobservables sur l'écran, à cause d'un phénomène de fluorescence de la cellulose.

Questions

Les questions servent *d'abord* à éclaircir les points peu clairs de la leçon, puis *ensuite* à tester vos connaissances plus largement. Voilà quelques notions sur des points qui pourraient être discutés lors des questions.

La variété d'ordres de grandeurs de A_{21} s'explique par les règles de sélection de la physique atomique. La relaxation d'un atome par émission d'un photon n'obéit pas qu'à une conservation de l'énergie, mais aussi à une conservation de la parité et des moments cinétiques orbital et de spin. Les transitions vérifiant ces lois de conservation sont

dites permises et se font très rapidement, alors que celles qui ne les vérifient pas sont dites interdites et se font à des taux beaucoup plus faibles.

La longueur de la cavité laser joue sur la séparation entre ses différents modes. Plus la cavité est grande, plus ses modes sont rapprochés, et donc plus la raie laser contiendra de modes. Il existe des solutions technologiques pour diminuer le nombre de modes du laser autrement qu'en jouant sur la taille de la cavité. Notons en particulier l'ajout d'un réseau de diffraction à l'intérieur de la cavité d'une diode laser qui permet de sélectionner certains modes seulement.

Un peu de culture technologique sur les lasers pourrait vous être demandée, au même titre que dans le montage associé. N'hésitez pas à aller faire un tour sur Wikipédia pour avoir quelques idées.

Conclusion

La leçon a sans doute voulu viser trop haut pour être vraiment efficace dans le cadre strict d'une leçon d'agrégation. Il est nécessaire de se recentrer sur les points essentiels à faire passer, à savoir :

- ▷ une description précise des différents processus d'émission et d'absorption, mais sans entrer dans le formalisme des sections efficaces,
- ▷ une présentation du laser qui semble difficilement contournable dans cette leçon, où on n'oubliera pas l'importance de la cavité,
- ▷ un deuxième exemple, sur lequel vous avez plus de latitude.

Si vous avez d'autres questions, nous restons à votre disposition.