

# LP n° 37 : Absorption et émission de la lumière.

**NIVEAU :** CPGE

On cantonne cette leçon à l'adhérence du programme de PC.

**PRÉREQUIS :**

- Optique géométrique et ondulatoire
- Notion de photon
- Rayonnement du corps noir
- Mécanique quantique de première année
- Distribution de Maxwell Boltzmann

**PLAN :**

1. Absorption et émission spontanée

2. De l'importance de l'émission stimulée
3. Application au laser

**BIBLIOGRAPHIE :**

- [20] Physique atomique, Cagnac (tome 1)
- [35] Tout-en-un PC/PC\*, Dunod (2014)
- [74] R. Taillet, Optique physique.
- BUP n°679 sur *Du pompage optique à la spectroscopie laser*

**IDÉES À FAIRE PASSER :**

**Introduction :** Historique, avec la quantification et les travaux d'Einstein et Planck, voir [71], p. 1061. L'interaction est quantifiée et on va s'intéresser à décrire les processus d'interaction et aux manières de jouer sur les uns ou les autres.

## 1 Absorption et émission spontanées

### 1.1 Description du milieu matériel

[71], p. 1064 - Échange d'énergie entre le rayonnement (pour le moment monochromatique, fréquence  $\nu$ ) et un atome, une molécule, un ion... On s'intéresse ici aux résonances optiques, c'est-à-dire aux transitions entre deux niveaux d'énergie, cf. [20], p. 81.

### 1.2 Probabilité d'absorption et d'émission

La seule prévision possible est de nature statistique ([20], p. 81). Décrire d'abord l'absorption, sans section efficace et pour un rayonnement monochromatique depuis [20], p. 88 en définissant  $B_{12}$ . Expliquer ensuite pourquoi il peut y avoir émission spontanée (c'est pas trivial du point de vue de la méca Q l'état excité est un état stationnaire et on a pas de raison d'en sortir!), voir [20], p. 93 pour la description et définir à son tour  $A_{21}$ , donner la loi exponentielle décroissante et l'ordre de grandeur ( $A_{21} \approx 800 \text{ s}^{-1}$ ). Voir aussi [71], p. 1067. Donner au passage les dimension des taux d'émission et d'absorption.

Passer alors à une description polychromatique en suivant [20], p. 89.

### 1.3 Largeur de raie

Discuter la largeur de raie liée à Heisenberg (cf. [35], p. 1068) et celle liée à l'élargissement par effet Doppler (cf. [20], p. 24). On peut évoquer les méthode de mesure de ces profil par interférométrie à division d'amplitude. Voir aussi [71], p. 1068.

**Transition :**

## 2 De l'importance de l'émission induite

### 2.1 Émission stimulée et bilan de population

[20], p. 100 et [71], p. 1066 - Hypothèse d'Einstein, expression de  $B_{21}$  et surtout **propriétés du photon émis**. Bilan de population et lien entre les trois coefficient  $A_{21}$ ,  $B_{21}$  et  $B_{12}$ .

## 2.2 Équilibre avec le rayonnement

Si les atomes sont en équilibre avec le rayonnement il faut que la densité spectrale d'énergie coïncide avec celle de Planck (cf. [71], p. 1071). On trouve les relations entre les trois coefficients qui valide l'hypothèse d'émission induite.

---

**Transition :**

---

## 3 Application au laser

Sur cette partie, si on pas le temps le jour de bien la préparer, on peut suivre sur le Dunod et garder ce qu'on a sous le pied pour les questions.

### 3.1 Principe du Laser

[42], Comparaison à une lampe spectrale : le laser est monochromatique, directif, cohérent. [42] et [74], Expliquer le principe d'un laser, en dégagant le rôle de la cavité. Nécessité de l'inversion de population et du pompage. Voir aussi (peut-être plus clair pour commencer) [71], pp. 1073 et 1088.

Remarque : 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  $dt$ ) :

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

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.

### 3.2 Laser à trois niveaux

[42], p. 19 ou plutôt [20], p. 116 - Mener le calcul pour montrer la possibilité d'une inversion de population. Mentionner les cas deux niveaux et quatre niveaux.

### 3.3 Largeur spectrale

[74], La cavité Fabry-Pérot affine le spectre en sélectionnant seulement certaines fréquences. Voir à partir de la page 298.

---

**Conclusion :**

**BONUS :**

---

- Il y a toute une partie sur le Laser dans le Taillet qui peut permettre de répondre à pas mal de question.
- Remarque sur quelques points important pour le traitement du Laser :
  - 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 effectivement.
  - 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) et 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.
- 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 s'avérer utile, ne pas hésiter aller faire un tour sur Wikipédia pour avoir quelques idées.



# LP n° 38 : Aspects corpusculaires du rayonnement. Notion de photon.

## NIVEAU : LICENCE

Cette leçon présente la difficulté qu'on ne peut pas vraiment faire de démonstration rigoureuse (puisque cela nécessiterait l'électrodynamique quantique) des résultats qu'on avance. Ainsi, plus encore que dans les autres leçons, on doit savoir à tout moment d'où on part et où on souhaite aller. Les choix et les partis pris doivent donc être explicités avec un soin particulier, notamment lors des raisonnements utilisant l'électromagnétisme classique.

## PRÉREQUIS :

- Rayonnement thermique du corps noir
- Notions élémentaires de relativité restreinte
- Électromagnétisme classique

## PLAN :

1. Caractère corpusculaire du rayonnement
2. Caractéristiques du photon
3. Expériences modernes du corpuscule

## BIBLIOGRAPHIE :

- BUP n°679, pp. 327 et suivantes sur l'introduction de la constante d'action  $h$  par Planck.
- [3] Aslangul, volume I
- [20] Cagnac, volume I (édition récente)
- [45] C. Kittel, *Physique de l'état solide*
- Polycopié de cours de J. Hare

## IDÉES À FAIRE PASSER :

Il faut déjà correctement traiter l'aspect historique : quels sont les résultats qui posent problème à la fin du XIXe, comment les physiciens de l'époque y répondent, en quoi cela nécessite-t-il d'introduire un quanta d'énergie ? Ensuite on s'intéresse au photon en tant que particule en présentant ses caractéristiques. Enfin on présente une expérience plus moderne apportant preuve expérimentale de son existence.

**Introduction :** L'aspect corpusculaire du rayonnement et la notion de photon sont aujourd'hui bien connus du grand public, de sorte que si on demande à un non-initié : « qu'est-ce que la lumière ? » Il répondra probablement « photon ». Pourtant, cette vision n'a pas toujours été aussi tranchée et a donné moult fil à retordre aux physiciens du XXe siècle. L'objet de cette leçon sera...

## 1 Caractère corpusculaire du rayonnement

### 1.1 Le rayonnement du corps noir

Les lois empiriques de Wien (aux courtes longueurs d'onde) et de Rayleigh-Jeans (aux grandes longueurs d'onde) sont corrigées par Planck en 1900. A ce sujet, on peut lire le BUP n°679, pp. 327 et suivantes. On se moque tout à fait de la partie sur le rayonnement en tant que tel, et des calculs. Ce qu'il est intéressant de signaler c'est l'interprétation en quanta de l'hypothèse de calcul, et le fait que Planck travaillait en fait sur l'interaction rayonnement-matière. On peut aussi lire avantageusement les pages 3 à 5 du cagnac 1 [20].

### 1.2 Introduction à l'effet photoélectrique

Voir [20], pp. 5-7. Voir aussi (surtout ?) [3], pp. 117-120. Dans cette partie on ne fait que l'expérience. L'interprétation est dans la partie d'après.

Expérience : Faire l'expérience de l'effet photoélectrique avec une quartz-iode, les filtres interférentiels sur rouge, la cellule photoélectrique et un électromètre (très grande impédance d'entrée = courant quasi nul!). Relevé  $V_0$  en fonction de la fréquence  $\nu$ . Montrer que la tension croît en fonction de la fréquence, et qu'elle ne dépend pas de la puissance du flux lumineux (avec des polariseurs?).

### 1.3 Interprétation de l'effet en terme de quanta

Présenter la position des électrons dans le métal (sans entrer dans les détails de la mer de Fermi etc...) - Voir [3], p. 120 pour le résumer, et le Kittel [45] pour les détails en préparation aux questions. Introduction du travail de sortie,