

LP37 ABSORPTION ET EMISSION DE LA LUMIÈRE

12 juin 2020

MONNET Benjamin &

Niveau : L2

Commentaires du jury

Bibliographie

- ↗ *Physique statistique*, **DGLR**
- ↗ *tout en un Physique*, **Dunod**

- Coeff
- Le cours

Prérequis

- Notion de photon
- Électromagnétisme

Expériences



Table des matières

1	Interaction entre lumière et matière	2
1.1	Les hypothèses du modèle	2
1.2	Les différents processus de transition	2
1.3	Lien entre les coefficients d'Einstein	3
2	Introduction au laser	4
2.1	Nécessité d'une inversion de population	4
2.2	Laser à 2 niveaux	4
2.3	Laser à 3 niveaux	5
3	Fluorescence et phosphorescence	5

Introduction

On a pu voir dans une leçon précédente la loi de Planck sur l'émission d'ondes électromagnétiques. On sait que la longueur d'onde principalement émise est directement liée à la température du corps que l'on considère (loi de Wien). Pour trouver ce modèle, nous avons quantifié les interactions lumière-matière, mais nous ne nous sommes pas intéressé au fonctionnement même de ces interactions. Nous allons donc nous pencher dans cette leçon sur la description de l'interaction lumière-matière, c'est à dire sur l'émission et l'absorption de lumière. Nous en verrons ensuite une application connue du grand public qu'est le LASER.

1 Interaction entre lumière et matière

1.1 Les hypothèses du modèle

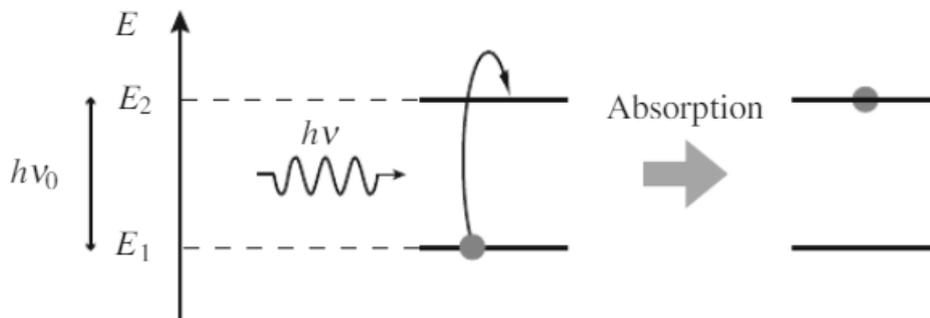
Nous allons suivre l'approche d'Einstein, proposée en 1916 pour décrire l'interaction lumière-matière. Les deux hypothèses majeures sont :

- On réduira l'étude des atomes à seulement 2 niveaux d'énergie. Cette hypothèse n'est pas restrictive car les processus que nous allons décrire sont aisément généralisable. De plus, pour ce qui est d'un atome au repos, on peut supposer que les transitions se font majoritairement vers le niveau d'énergie le plus proche.
- On suppose que la lumière contient assez de photons pour être décrit par un champ électromagnétique de densité d'énergie $u(\nu)$

1.2 Les différents processus de transition

On distingue trois types de transitions :

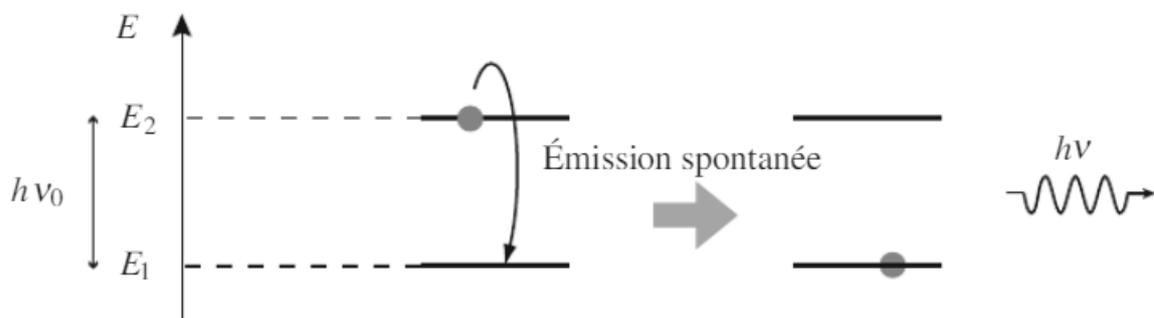
- **L'absorption :**



Un atome dans une état 1 absorbe un photon d'énergie $h\nu = E_2 - E_1$, ce qui le fait passer dans l'état 2. Le nombre de transition est proportionnelle au nombre de photons (donc à l'intensité lumineuse) et au nombre d'atomes présents dans l'état 1. Donc :

$$\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_{\text{abs}} = -p_{\text{abs}}N_1 = -u(\omega_0)B_{12}N_1$$

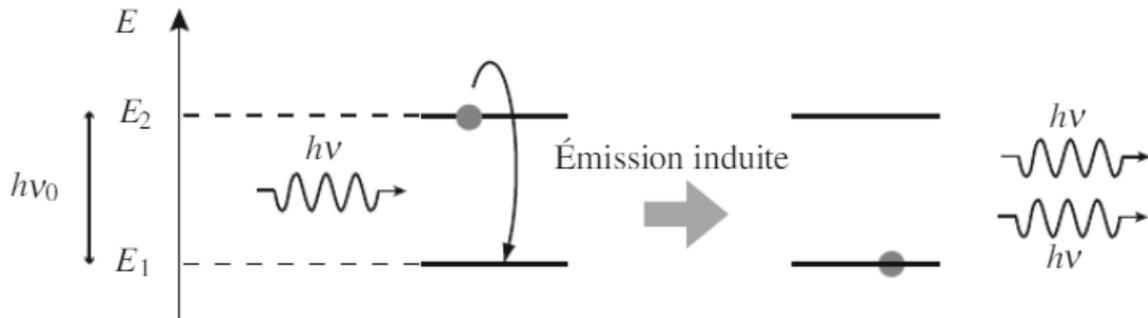
- **L'émission spontanée :**



Il s'agit ici du cas où un atome dans le niveau d'excitation revient spontanément dans un état de niveau 1 car c'est un état de plus basse énergie, donc plus stable pour lui. Ce processus est donc indépendant de la présence d'un champ électromagnétique. On a alors :

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\text{es}} = -p_{\text{es}}N_2 = -A_{21}N_2$$

• **L'émission stimulée (ou induite) :**



On rajoute maintenant une transition qui peut paraître moins intuitive. Un atome dans l'état d'énergie 2 va se désexciter vers le niveau 1 avec le passage d'un photon d'énergie $h\nu$, créant ainsi 2 photons de même pulsation, même direction, même polarisation et même phase.

$$\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{\text{ei}} = -p_{\text{ei}}N_2 = -w(\omega_0)B_{21}N_2$$

1.3 Lien entre les coefficients d'Einstein

Les coefficients d'Einstein ne sont pas tous indépendants. Pour le montrer, nous allons voir que le modèle développé précédemment permet de retrouver la loi de rayonnement de Planck. Nous supposons que les atomes n'interagissent qu'avec le rayonnement électromagnétique et qu'ils sont à l'équilibre thermodynamique, donc que les populations n'évoluent plus. Un bilan sur le deuxième niveau donne :

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21} \cdot N_2 + B_{12} \cdot u(\nu) \cdot N_1 - B_{21} \cdot u(\nu) \cdot N_2 = 0$$

De plus, à l'équilibre thermodynamique, le rapport de population est donné par la statistique de Maxwell-Boltzmann :

$$\frac{N_1}{N_2} = \frac{e^{-\frac{E_1}{k_B T}}}{e^{-\frac{E_2}{k_B T}}} = e^{\frac{E_2 - E_1}{k_B T}}$$

On peut donc réécrire la densité d'énergie émise :

$$u(\nu) = \frac{A_{21}}{B_{12} \frac{N_1}{N_2} - B_{21}} = \frac{\frac{A_{21}}{B_{12}}}{e^{\frac{E_2 - E_1}{k_B T}} - \frac{B_{21}}{B_{12}}}$$

Or, la loi de Planck donne :

$$u(\nu) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1}$$

Donc en identifiant, on a $B_{21} = B_{12}$ et $\frac{A_{21}}{B_{12}} = \frac{2h\nu^3}{c^2}$.

Remarque : si on prend en compte la dégénérescence, on a simplement $g_1 B_{12} = g_2 B_{21}$

Ce modèle permet donc de retrouver la loi du rayonnement proposé par Planck.

▮ *Ce modèle permet aussi de modéliser le fonctionnement d'un appareil moderne : la LASER.*



2 Introduction au laser

2.1 Nécessité d'une inversion de population

On reprend le cas précédent où une onde électromagnétique se propage dans un milieu composé d'atomes à 2 niveaux. Le but d'un LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) est d'amplifier la lumière à l'aide de l'émission stimulée. En effet, on a pu voir que l'émission stimulée permet de générer des photons de même polarisation, même quantité de mouvement et même phase! On peut donc générer une lumière très "propre" avec ça. Etablissons un bilan de photons dans le milieu. On a :

- Une puissance volumique émise par les atome :

$$\pi_{\text{emis}} = - \left(\left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{\text{es}} + \left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{\text{ei}} \right) \hbar\omega$$

- Une puissance volumique absorbée :

$$\pi_{\text{abs}} = - \left(\frac{dN_1}{dt} \right)_{\text{abs}} \hbar\omega$$

On effectue un bilan d'énergie sur une tranche de longueur dz :

$$\begin{aligned} \frac{\partial w(z,t)}{\partial t} S dz dt = & \mathcal{P}(z,t) S dt - \mathcal{P}(z+dz,t) S dt \\ & + \pi_{\text{emis}}(z,t) S dz dt - \pi_{\text{abs}}(z,t) S dz dt \end{aligned}$$

On supposera que l'émission spontanée, s'effectuant de manière isotrope, ne contribue pas (ou alors très peu) au bilan d'énergie et que l'on gardera dans la puissance émise que l'émission induite. On a donc :

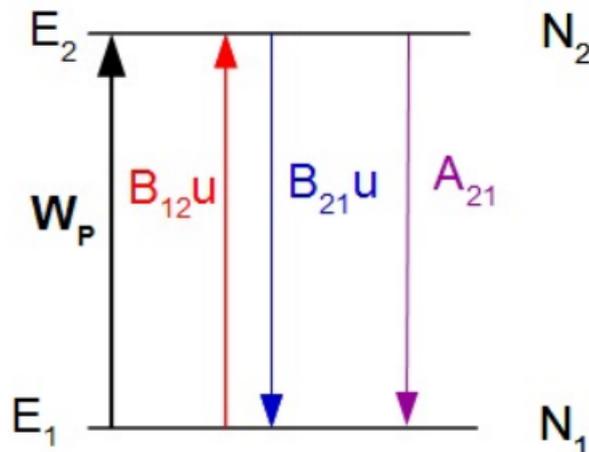
$$\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial z} = ((N_2 - N_1) B_{21}) u \hbar\omega$$

Ensuite, on peut relier la puissance à la densité d'énergie par $\mathcal{P} = cu$, ce qui donne :

$$\frac{\partial \mathcal{P}}{\partial z} = \left((N_2 - N_1) B_{21} \frac{\hbar\omega}{c} \right) \mathcal{P}$$

Donc, si on veut que la lumière soit amplifiée, il faut réussir à inverser la population dans le milieu! ($N_2 > N_1$). Sauf que naturellement, on a $N_1 > N_2$... Comment faire?

2.2 Laser à 2 niveaux



Un bilan sur le niveau 2 donne :

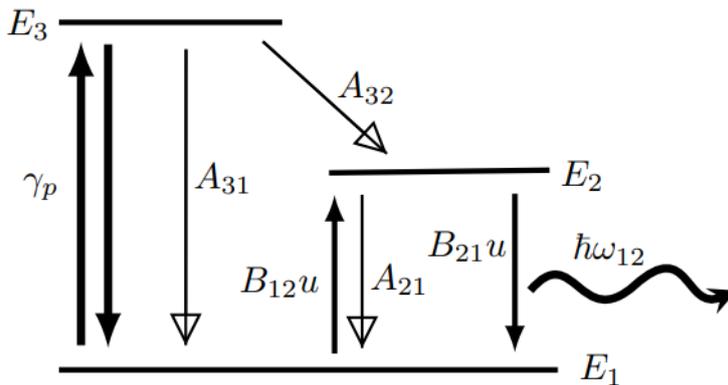
$$\frac{dN_2}{dt} = (W_P + B_{12}u(\nu_{12})) N_1 - (B_{21}u(\nu_{12}) - A_{21}) N_2$$

En posant $\Delta N = N_2 - N_1$ et $N = N_1 + N_2 = cste$, on trouve en stationnaire :

$$\begin{aligned} (W_P + Bu)(N - \Delta N) &= (Bu + A_{21})(\Delta N + N) \\ \Leftrightarrow \Delta N &= \frac{-A_{21}}{W_P + A_{21} + 2Bu} N \end{aligned}$$

Donc $\Delta N < 0$: on a pas d'amplification, et ce peut importe combien le pompage est fort ! Il va donc falloir considérer un système à 3 niveaux d'énergie pour espérer réaliser une inversion de population.

2.3 Laser à 3 niveaux



Refaire schéma sans la flèche vers le bas

On pose toujours $\Delta N = N_2 - N_1$ la grandeur qui nous intéresse et cette fois $N = N_1 + N_2 + N_3$. On suppose que $A_{32} \gg \gamma_p, A_{31}, A_{21}$. Cela signifie que le temps caractéristique de désexcitation de 3 vers 2 est rapide devant les autres temps caractéristiques du problème. Cela permet de nous assurer que les atomes dans l'état 3 vont rapidement se désexciter pour aller dans l'état 2 et on voit alors qu'il semble possible d'inverser la population.

$$\frac{dN_3}{dt} = \gamma_p N_1 - A_{31} N_3 - A_{32} N_3 \simeq \gamma_p N_1 - A_{32} N_3$$

En stationnaire, on a donc $N_3 = \frac{\gamma_p}{A_{32}} N_1 \ll N_1$ et donc $N \approx N_1 + N_2$. Avec un bilan sur le niveau 2 :

$$\begin{aligned} \frac{dN_2}{dt} = 0 &= A_{32} N_3 - Bu(\omega) N_2 + Bu(\omega) N_1 - A_{21} N_2 \\ \Leftrightarrow (Bu(\omega) + \gamma_p)(N - \Delta N) &= (Bu(\omega) + A_{21})(N + \Delta N) \end{aligned}$$

Ce qui donne finalement :

$$\Delta N = \frac{\gamma_p - A_{21}}{A_{21} + \gamma_p + 2Bu(\omega)} N \geq 0 \quad \text{si} \quad \gamma_p \geq A_{21}$$

3 Fluorescence et phosphorescence

Questions

- Émission spontanée = échange avec fluctuations du vide
- Absorption à deux photons ? *Probabilité bien plus faible. Une particule dans un état fondamentale peut absorber dans certaines conditions 2 photons. Le premier photon lui fait atteindre un état virtuel et le deuxième l'état que l'on veut. Une particule se désexcitant peut donner 2 photons cohérents.*
- D'autres applications que l'interaction lumière/matière ? *Fluorescence : absorbe un photon qui le mène à un certain niveau d'énergie puis désexcitation en 2 temps.*
- Autre application ? *Refroidissement d'atomes. Grâce à Doppler, seules les particules dans le sens contraire à la particule se font absorbées. Dans l'autre sens, le décalage dû à Doppler n'est pas le bon.*

- Pourquoi avec 2 niveaux, le pompage optique ne permet pas d'inverser ? *Le pompage se faisant dans les 2 sens ça nique tout.*
- Laser à 4 niveaux ? *Pour 3 niveaux, on a un seuil pour inversion de population. Pour 4 niveaux, on peut avoir inversion de population pour tout pompage.*
- Comment il démarre le LASER ? *Par émission spontanée.*
- Autre pompage que pompage optique ? *Diode LASER*
- Origine physique du non monochromatisme ? *Décalage Doppler *mt* brownien (gaussien, seulement LASER à gaz), Heisenberg. Et si on a un solide ? Longueur de la cavité qui fluctue à cause des fluctuations thermiques.*

Quel est le rôle des miroirs sous incidence Brewster dans les lasers He-Ne ? Quelle sont les conséquences d'avoir un miroir partiellement réfléchissant ? A quoi correspondent les dégénérescences dans les niveaux d'énergie ? Comment les lever ?

Comment décrire classiquement aux élèves de CPGE les 3 phénomènes d'interaction rayonnement-matière ? Comment le modéliser de manière quantique ? De quoi dépend la finesse de la cavité laser ?

Pourquoi le photon émis par émission stimulée a même direction, même fréquence et même état de polarisation ? Lien entre largeur énergétique du niveau et temps de relaxation ? Au niveau spectral la largeur est-elle due seulement à la largeur énergétique non nulle du niveau ? Comment mesure-t-on des longueurs d'onde avec un appareil de lycée ? Vous avez parlé de refroidissement d'atomes et n'avez pas eu le temps de le traiter, vous pouvez détailler ? De même le rôle de la cavité pour un laser ? Vous avez conclu sur les condensats de Bose-Einstein, vous pouvez définir ce que c'est ?

pourquoi avoir fait le spectre de la lampe au Hg ? Quelles conditions pour appliquer la statistique de Maxwell- Boltzmann ? Détailler les caractéristiques identiques du photon incident et du photon induit. Détailler les différentes probabilités du laser à 3 niveaux. À quoi est due la largeur de la raie d'émission induite ? Peut-on faire léviter un trombone avec des faisceaux laser ? Un trombone je sais pas mais des petites billes oui (voir taille) avec une pince optique.

Quels sont les ingrédients nécessaire à la dérivation de la loi de Planck sur le rayonnement du corps noir ? La dérivation repose sur l'hypothèse d'échanges discret d'énergie entre le corps noir et le rayonnement (constante pour hypothèse, Planck est sceptique à l'époque). La densité d'énergie doit être vue comme le produit d'une densité de mode et d'une énergie moyenne par mode.

Quelles sont les conditions d'application de la loi de Maxwell-Boltzman ? Système à l'équilibre thermique avec un thermostat.

Comment change l'expression des lois de transition si les raies ne sont pas infiniment fines ? Il faut prendre en compte le profil de raie dans les probabilités de transition (voir par exemple l'annexe du Houard traitant des coefficients d'Einstein).

Quelles peuvent être les sources d'élargissement des raies ? Quels sont les profils associés ? Largeur intrinsèque (lorentzien), élargissement collisionnel (lorentzien), élargissement Doppler (gaussien). Voir le livre "Optique quantique" de Fox pour plus de détails.

Dans une lampe spectrale, quelle est la source majoritaire d'élargissement ? Ça dépend de la pression. Basse pression : Doppler, haute pression : collisionnel.

Ordres de grandeur des largeurs obtenues ? Voir l'annexe du Fruchart, Lidon, Thibierge, Champion, Le Diffon sur les largeurs de raies (après l'expérience sur la mesure de la constante de Rydberg).

D'où viennent les dégénérescences du spectre des atomes ? Comment les lever ? Structure quantique du spectre de l'énergie, notamment la dépendance en la projection du spin selon la direction de quantification (souvent notée m). Ces dégénérescences peuvent être levées par couplage spin-orbite ou par couplage à un champ magnétique extérieur (effet Zeeman).

Pourquoi a-t-il était plus simple de réaliser un maser avant un laser ? Il est plus simple de réaliser l'inversion de population dans les micro-ondes que dans le visible (dépendance du rapport émissions spontanée/stimulée en T , voir la partie du DGLR de Physique statistique sur les coefficients d'Einstein).

Quel est le mécanisme de pompage dans le laser hélium/néon ? Autres mécanismes possibles ? He/Ne : décharge électrique entraînant l'excitation des niveaux laser par collisions (voir le Fruchart, Lidon, Thibierge, Champion, Le Diffon ou le Fox pour des détails). Flash lumineux pour le laser à rubis.

Intérêts de la cavité Fabry-Pérot ? Ordres de grandeur ? Rétroaction, filtrage, directivité. Pour les ordres de grandeur, voir Houard par exemple. Les différents modes d'une cavité optique (modes transverses et longitudinaux) sont repérés par 3 indices TEM_{qmn} (1 longitudinal, 2 transverses). 2 modes longitudinaux sont séparés en fréquence par un intervalle spectral libre...

Applications des lasers ? Médecine, gravure, découpe, soudure, lecture de code barre, de musique, mesure de position ...

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.

Angle d'ouverture d'un laser ? 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.

Description émission spontanée 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.

Description émission stimulée 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...

Remarques

-