

LP 36 : Absorption et émission de lumière

Creux Amélie, Guichardant Clarisse

16/12/13

Pré-requis :

- Notion de photon
- Notion de spectres
- Corps Noir
- Physique statistique
- Fabry Perot

Biblio :

- [*Dangoisse*] : Les lasers
[*Diu*] : Physique statistique (pour les coefficients d'Einstein)
([*Cagnac*] : Lasers, Interaction lumière-atome)
[*Houard*] : Optique
[*Albani*] : Absorption et fluorescence
[*Valeur*] : Invitation à la fluorescence moléculaire
[*BUP*] : Hors série 2013 Fluorescence et TiO₂

Table des matières

1	Introduction	2
2	Les processus d'interaction lumière-matière	2
2.1	Lumière et matière	2
2.1.1	Lumière	2
2.1.2	Matière	2
2.2	Différents processus d'interaction	3
2.2.1	Emission spontanée	3
2.2.2	Absorption	3
2.2.3	Emission stimulée	3
2.3	Coefficients d'Einstein	4
2.3.1	Condition d'équilibre	4
2.3.2	T tend vers l'infini	4
2.4	Importance des trois processus	5
2.4.1	Emission spontanée et émission stimulée	5
2.4.2	Absorption et émission stimulée	5

3	Emission stimulée : le Laser	5
3.1	Lasers à 3 niveaux	6
3.2	Rôle de la cavité	7
3.2.1	Forte amplification	7
3.2.2	Directivité	7
3.2.3	Sélection en longueur d'onde	7
3.3	Intérêt pour la médecine	7
4	Absorption : Fluorescence	8
4.1	Principe de la fluorescence	8
4.2	Diagnostic en médecine	9
5	Conclusion	10

1 Introduction

Dans les cours précédents nous avons vu que les niveaux d'énergies des atomes ou des molécules sont quantifiés et non continus. Nous avons déjà observé des spectres d'émission et d'absorption. Un rayonnement peut donc être absorbé ou émis par un atome.

Dans cette leçon nous allons nous intéresser à ces phénomènes qui traduisent l'interaction de la lumière et de la matière. Nous allons aussi voir comment certains de ces processus d'interaction peuvent être utilisés dans un domaine comme la médecine.

2 Les processus d'interaction lumière-matière

Dans un premier temps les différents processus d'interaction vont être présentés.

2.1 Lumière et matière

2.1.1 Lumière

La lumière va être modélisé par un faisceau gaussien. On s'intéressera à une onde quasi-monochromatique.

2.1.2 Matière

Un milieu matériel put être constitué d'atomes, de molécules ou d'ions. On se limitera par la suite a des milieux atomiques mais cela s'applique aussi aux autres types de milieux.

La présentation des différents processus sera faite avec un système simple à deux niveaux. Chaque niveau sera représenté par :

- son énergie : E_i
- sa dégénérescence : g_i
- le nombre d'atome ayant l'énergie E_i : N_i (densité de population, par unité de volume)
- sa durée de vie : τ_i

2.2 Différents processus d'interaction

2.2.1 Emission spontanée

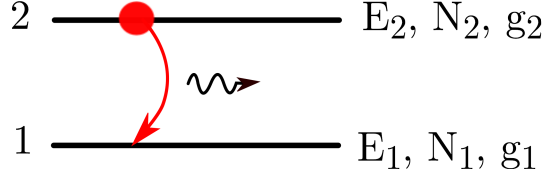


FIGURE 1 – Schéma de l'émission spontanée

Un atome va du niveau 2 au niveau 1 en émettant un photon d'énergie : $h(E_2 - E_1)$. Il y a dépeuplement du niveau 2.

L'émission spontanée se fait dans des directions isotropes de l'espace.

On note A_{21} , le coefficient d'Einstein pour l'émission spontanée. C'est la probabilité ou le taux d'émission spontanée par atome et par unité de temps. A_{21} est en s^{-1} .

Le nombre de photon émis par émission spontanée par unité de temps et de volume est :

$$dN_{2es} = -A_{21}N_2dt \quad (1)$$

$$dN_{1es} = A_{21}N_2dt \quad (2)$$

2.2.2 Absorption

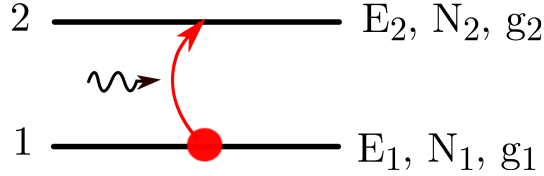


FIGURE 2 – Schéma de l'absorption

Un atome atteint le niveau 2 en absorbant un photon d'énergie : $h(E_2 - E_1)$. Il y a dépeuplement du niveau 1.

Le processus d'absorption est un processus induit. Il est donc proportionnel au plus de photon et donc à la densité d'énergie noté $u(\nu)$. $u(\nu)$ est en $J.m^{-3}.Hz^{-1}$. On note W_{12} la probabilité d'absorption par atome et par unité de temps et B_{12} le coefficient d'Einstein pour l'absorption.

Le nombre de photon absorbé par unité de temps et de volume est :

$$dN_{2a} = W_{12}N_1dt = B_{12}u(\nu_{12})N_1dt \quad (3)$$

2.2.3 Emission stimulée

Un photon d'énergie : $h(E_2 - E_1)$ induit une désexcitation de l'atome du niveau 2 vers le niveau 1 qui s'accompagne de l'émission d'un photon identique

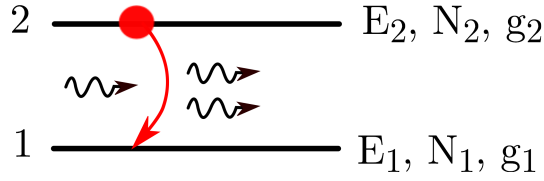


FIGURE 3 – Schéma de l'émission stimulée

au photon incident (même fréquence, même direction...).

Il y a enrichissement en photon : amplification.

On note W_{21} la probabilité d'émission stimulée par atome et par unité de temps et B_{21} le coefficient d'Einstein pour l'émission stimulée.

Le nombre de photon émis par émission stimulée par unité de temps et de volume est :

$$dN_{2ei} = -W_{21}N_2dt = -B_{21}u(\nu_{12})N_2dt \quad (4)$$

2.3 Coefficients d'Einstein

Les coefficients d'Einstein sont des constantes caractéristiques de l'atome. Pour trouver les relations entre ces coefficients on peut donc se placer dans une situation particulière.

Situation : beaucoup d'atomes dans une enceinte fermée à une température T (thermostat) et l'équilibre macroscopique est atteint. Dans ce cas les population des niveaux d'énergie suivent la distribution de Maxwell-Boltzmann :

$$N_i = g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \quad (5)$$

2.3.1 Condition d'équilibre

absorption = émission : $dN_a = dN_{es} + dN_{ei}$

$$B_{12}u(\nu_{12})N_1 = (A_{21} + B_{21}u(\nu_{12}))N_2 \quad (6)$$

$$g_1 \exp\left(-\frac{E_1}{k_B T}\right) B_{12}u(\nu_{12}) = g_2 \exp\left(-\frac{E_2}{k_B T}\right) (A_{21} + B_{21}u(\nu_{12})) \quad (7)$$

Cette équation est valable pour tout T .

2.3.2 T tend vers l'infini

Pour un corps noir (les photons), la densité d'énergie u s'écrit selon la loi de Planck :

$$u(\nu) = 8\pi \frac{h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{\frac{h\nu}{k_B T}} - 1} h\nu = E_2 - E_1 \quad (8)$$

Quand T tend vers l'infini alors u tend vers l'infini et A_{21} est négligeable. On a alors :

$$g_1 B_{12} = g_2 B_{21} \quad (9)$$

Et enfin après quelques lignes de calcul, on a :

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{8\pi h \nu^3}{c^3} \quad (10)$$

2.4 Importance des trois processus

2.4.1 Emission spontanée et émission stimulée

$$\frac{dn_{ei}}{dn_{es}} = \frac{B_{21}u}{A_{21}} = u \frac{c^3}{8\pi h \nu^3} \quad (11)$$

Si la fréquence est fixée : l'émission stimulée augmente quand la densité spectrale d'énergie augmente, donc quand le nombre de photon incident augmente. Si la densité spectrale est fixée : l'émission stimulée augmente quand la fréquence diminue. A basse fréquence l'émission stimulée domine.

2.4.2 Absorption et émission stimulée

$$\frac{dn_{ei}}{dn_a} = \frac{B_{21}uN_2}{B_{12}uN_1} = \frac{g_1N_2}{g_2N_1} \quad (12)$$

La proportion d'émission stimulée par rapport à l'absorption ne dépend pas de l'onde incidente. Elle est déterminée par le nombre d'atomes sur chaque niveau.

Nous venons de présenter les différents processus d'interaction. Nous pouvons donc voir leurs utilisations de façon plus précise.

3 Emission stimulée : le Laser

Nous venons de voir que l'émission stimulée permettait d'obtenir une amplification d'un signal incident. C'est ce processus qui est utilisé dans les lasers : Light Amplified by Stimulated Emission of Radiation.

Principe du laser :

- milieu amplificateur avec des atomes dans un état excité susceptible de se désexciter au passage d'une onde lumineuse par émission stimulée.
- cavité : pour amplifier par plusieurs passages et augmenter la sélectivité spectrale

Nous avons vu à la fin de la partie précédente :

$$\frac{dn_{ei}}{dn_a} = \frac{g_1N_2}{g_2N_1} = \frac{N_2}{N_1} \geq 1 \quad (13)$$

Si il n'y a pas de dégénérescence, pour qu'il y ait amplification, il faut qu'il y ait inversion de population.

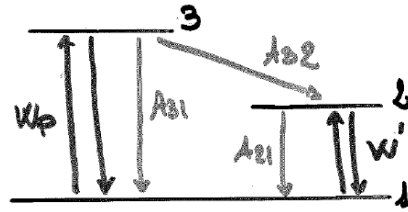


FIGURE 4 – Laser à trois niveaux

3.1 Lasers à 3 niveaux

- $W_p = BI$: Pompage pour mettre des atomes sur le niveau 2
- A_{21} : désexcitation spontanée du niveau 2 vers le niveau 1
- A_{32} : désexcitation spontanée du niveau 3 vers le niveau 2 : rapide
- A_{31} : désexcitation spontanée du niveau 3 vers le niveau 1
- $W' = BI_{laser}$ onde laser

On a donc $A_{32} \geq W_p$ et $A_{32} \geq A_{31}$

$$\begin{aligned}
 \bullet \quad \frac{dN_3}{dt} &= W_p N_1 - W_p N_3 - A_{31} N_3 - A_{32} N_3 \\
 \hookrightarrow \frac{dN_3}{dt} &= W_p N_1 - A_{32} N_3 = 0 \quad (\text{station}) \quad \Rightarrow \quad W_p N_1 = A_{32} N_3 \\
 \bullet \quad \frac{dN_2}{dt} &= A_{32} N_3 - A_{21} N_2 - W' N_2 + W' N_1 = 0 \\
 W_p N_1 + W' (N_1 - N_2) - A_{21} N_2 &= 0 \\
 \text{on obtient: } \Delta N &= \frac{W_p - A_{21}}{W_p + A_{21} + 2W'} N
 \end{aligned}$$

$N = N_1 + N_2 + N_3 \rightarrow 0$
 $\approx N_1 + N_2$
 $\Delta N = N_2 - N_1$

On a alors, après le calcul : $\Delta N \geq 0$ pour avoir inversion de population et donc $W_p \geq A_{12}$. Le pompage doit donc être plus important que l'émission stimulée, il y a un seuil de pompage.

Remarque : laser à deux niveaux : pas d'inversion de population et laser à quatre niveaux : pas de seuil de pompage.

Exemple de laser à 3 niveaux : laser à rubis, laser à erbium. Exemple de laser à 4 niveaux : laser He-He.

3.2 Rôle de la cavité

3.2.1 Forte amplification

On a une plus forte amplification quand on passe plusieurs fois dans le milieu amplificateur. On fait donc un bouclage avec deux miroirs (Fabry-Perot). on obtient alors un oscillateur optique.

3.2.2 Directivité

A priori les photons sont émis dans toutes les directions mais ceux qui sont émis en dehors de l'axe de la cavité ne repassent par le milieu amplificateur. Ils ne sont donc pas amplifiés. Donc sur l'axe il y a plus d'amplification et elle devient majoritaire. Donc le faisceau est directive selon l'axe de la cavité.

3.2.3 Sélection en longueur d'onde

On a un Fabry-Perot donc seules les fréquences qui interfèrent constructivement résonnent dans la cavité. C'est à dire :

$$L = \frac{\lambda_k k}{2} = \frac{ck}{2\nu_k} \quad (14)$$

$$\nu_k = k \frac{c}{2L} \quad (15)$$

Avec L la longueur de la cavité.

On peut définir l'intervalle spectral libre entre deux modes longitudinaux de la cavité : $\Delta\nu = \frac{c}{2L}$.

La transition atomique à une certaine largeur $\Delta\nu_{12}$ autour de sa fréquence d'émission ν_{12} (effet Doppler).

Il est possible de diminuer le nombre de mode en jouant sur la longueur de la cavité mais dans ce cas on diminue l'amplification. Ou encore avec des filtres interférentiels.

Manip : spectre du laser transparent ; direct et sur le côté.

3.3 Intérêt pour la médecine

Les lasers sont très utilisés en médecine : ophtalmologie, dermatologie, chirurgie... Ces principalement ces propriétés de directivité et de monochromaticité qui sont exploitées dans ce domaine.

Ophtalmo Les lasers sont par exemple utilisés dans le traitement des amétropies : myopie, hypermétropie..

Un laser femtoseconde est tout d'abord utilisé pour découper de façon très fine le volet de la cornée (90 à 18 μm).

Puis un laser excimère est utilisé pour corriger les défaut en remodelant en profondeur par photoablation. (pour la myopie on aplatit la cornée au centre et pour l'hypermétropie on bombe les côtés). Puis on repose le volet de la cornée.

Laser He-Ne

- longueur transition atomique: $\Delta\nu_{12} = 1,5 \text{ GHz}$
- Intervalle spectral libre: $\Delta\nu = 500 \text{ THz}$
pour $L = 30 \text{ cm}$

Nombre de mode: $\frac{\Delta\nu_{\text{at}}}{\Delta\nu} = 3$

$\lambda_0 = \frac{c}{\nu_0} = 633,8 \text{ nm}$

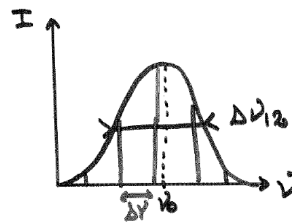


FIGURE 5 – Sélection en longueur d'onde de la cavité

Traitement des cancer On peut supprimer les petits cancers de la peau avec un laser CO₂.

L'émission stimulée n'est pas le seul processus d'interaction qui peut être utilisé pour des applications en médecine.

4 Absorption : Fluorescence

4.1 Principe de la fluorescence

La photoluminescence résulte de l'absorption de lumière. Il y a deux types de photoluminescence : la fluorescence et la phosphorescence. Au départ on pensait que la différence entre les deux était que la fluorescence disparaissait quand la lumière incidente disparaît alors que la phosphorescence persistait un temps après l'excitation. En fait ce n'est pas toujours le cas et la différence provient du fait que la phosphorescence passe par un état intermédiaire avant d'émettre un photon.

On fluorescence n'est pas observé au même longueur d'onde car il y a des pertes d'énergie par relaxation intra-système. Elle est observé à des longueurs d'onde plus grandes.

L'écart entre le maximum de la première bande absorption et le maximum de la fluorescence est appelé déplacement de Stokes :

$$\Delta\nu = \nu_a - \nu_f \quad (16)$$

Une partie disparaît par choc moléculaire ou désexcitation sous forme non radiative.

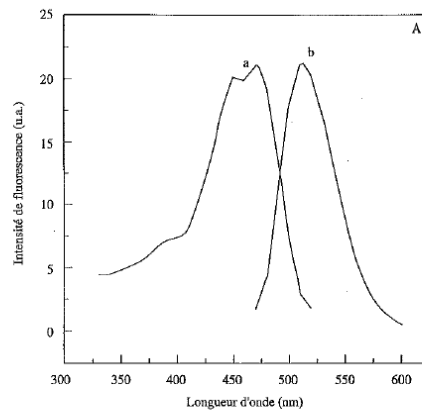


Figure 3.8a ■ Spectres d'excitation (a) et d'émission (b) de fluorescence de la fluorescéine à pH 4.

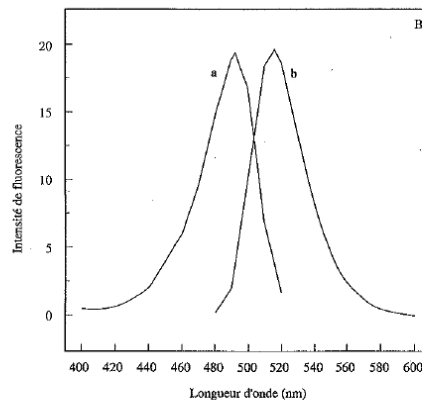


Figure 3.8b ■ Spectres d'excitation (a) et d'émission (b) de fluorescence de la fluorescéine à pH 9.

FIGURE 6 – Spectre d'absorption et d'émission de la fluoréscéine

manip : Lumière blanche et fluorescéine : voir que le bleu est absorbé et émet une fluorescence verte et que le rouge non par exemple.

4.2 Diagnostique en médecine

La fluorescence est utilisée pour le diagnostic en médecine. On marque certaines cellules avec un fluorophore ayant une affinité avec elles. En envoyant une lumière excitatrice à la bonne longueur d'onde on observe la lumière de fluorescence et ainsi on peut situer ces cellules dans le corps.

Cela peut être utilisé pour détecter des cellules cancéreuses de très petite taille et ainsi faire un diagnostic très tôt au début du développement du cancer. Cela permet aussi de détecter des amas de nanoparticules qui se fixent sur les cellules comme TiO_2 qui est présent dans les pigments alimentaires ou les antibactériens. (Fluorescence de TiO_2 avec une lumière d'excitation dans l'UV lointain.)

5 Conclusion

Utilisation des lasers et de la fluorescence en médecine et même souvent les deux en même temps.