

LP 15 – Interactions lumière-matière

Manon LECONTE - ENS de Lyon

Dernière mise à jour : 10 mai 2020

Merci à Lucile Bridou, Bénédicte Grebille, Guillaume Laibe, Samuel Boury, Joachim Galiana pour leur précieuse aide.

Mots-clé : émission stimulée, transitions électroniques, transitions vibratoires, laser.

Niveau : TS

Pré-requis :

- Niveaux d'énergie de l'atome [1S]
- Spectroscopie UV-visible [1S]
- Interaction-lumière matière (émission spontanée, absorption, spectres) [1S]
- Sources de lumière (source spectrale) [1S]
- Notion de puissance [1S]
- Spectroscopie IR [TS]
- Interférences [TS]
- Relation entre célérité, longueur d'onde et fréquence [TS]
- Dualité onde-corpuscule (longueur d'onde de de Broglie) [TS]
- Incertitudes et chiffres significatifs [TS]

Biblio :

- Taillet, *Dictionnaire de physique* [Niveau : **]
- *TS Physique-Chimie - Enseignement spécifique*, coll. Dulaurans Durupthy, Hachette éducation [Niveau : *]
- *Physique-Chimie TS - Enseignement spécifique*, coll. Micromega, Hatier [Niveau : *]
- Site web "Tout est quantique" [Niveau : **]
- TP Détermination du pas du sillon d'un CD/DVD par interférence à ondes multiples, ac. Paris [Niveau : **]

Plan proposé

I - Transferts quantiques d'énergie	3
II - LASER	5

Liste de matériel

Mesure de la distance entre deux sillons d'un CD ou d'un DVD

- statif muni d'une pince ;
- laser ;
- écran percé ;
- règle d'un mètre ou banc optique ;
- CD ;
- DVD.

Introduction pédagogique

L'interaction lumière-matière est introduite en 1S, à l'aide du modèle corpusculaire de la lumière. En TS, on introduit la dualité onde-corpuscule pour pouvoir discuter de l'émission stimulée et ainsi expliquer le fonctionnement du laser.

Transferts quantiques d'énergie

Émission et absorption quantiques.
Émission stimulée et amplification d'une onde lumineuse.
Oscillateur optique : principe du laser.

Connaître le principe de l'émission stimulée et les principales propriétés du laser (directivité, monochromaticité, concentration spatiale et temporelle de l'énergie).
Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un laser comme outil d'investigation ou pour transmettre de l'information.

Associer un domaine spectral à la nature de la transition mise en jeu.

Transitions d'énergie : électroniques, vibratoires.

Figure 1 – Extrait du Bulletin officiel spécial n° 8 du 13 octobre 2011 établissant le programme de Physique-Chimie de TS.

La leçon s'intègre dans une séquence pédagogique sur la mécanique quantique. Le premier cours serait consacré à la dualité onde-corpuscule et présenterait la longueur d'onde de de Broglie, les expériences d'interférences avec des électrons, ... La présente leçon constituerait le second cours de la séquence.

La manipulation choisie permet de présenter une application du laser en tant qu'outil d'investigation. Elle permet de faire un rappel sur les interférences qui ont déjà été introduites en TS et d'ouvrir sur le chapitre "Stockage optique" qui pourra être traité par la suite.

Difficulté : présentation du nouveau concept : l'émission stimulée → comment un atome peut se désexciter sous l'effet d'un photon incident ?

Exemples de TD :

- activité documentaire sur des effets quantiques (effet photoélectrique, ...);
- exercices sur une application du laser (télémétrie, ...).

Exemples de TP :

- mesurer un angle ou une distance à l'aide d'un laser (*cf.* Micromega (p. 408));
- transmettre de l'information à l'aide d'un laser (*cf.* Hachette TS (p. 379)).

Introduction

La vision classique de la lumière, décrite en 1S, est insuffisante pour décrire certains phénomènes (physique du laser, spectroscopies, ...). On va utiliser la mécanique quantique pour pouvoir décrire plus précisément l'interaction lumière-matière.

Remarque – On prend comme définition de la lumière une onde électromagnétique appartenant aux domaines du visible, du proche infrarouge ou du proche ultraviolet.

Objectifs – Connaître les trois types d'interactions entre lumière et matière.
Savoir placer sur un spectre électromagnétique les énergies des transitions électroniques et celles des transitions vibratoires.
Comprendre le fonctionnement du laser.

I - Transferts quantiques d'énergie

A/ Introduction à la mécanique quantique

En 1900, Planck postule le caractère corpusculaire et **quantifié** de la lumière : les niveaux d'énergie accessibles sont **discrets** et appelés **quanta d'énergie**. Einstein postule en 1905 que la lumière est transportée par des "grains de lumière", correspondant à des quanta d'énergie. Ce n'est qu'en 1926 que Lewis les nomma **photons**.

Définition – Photon : particule non chargée, de masse nulle, associée à une onde électromagnétique.

L'énergie E associée au photon est : $E = h\nu$, avec :

— $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J s ;

— ν la fréquence du photon [Hz].

En 1913, Bohr postule la quantification d'énergie des atomes. Ils sont décrits par une vision quantique, pareillement à la lumière.

B/ Transferts quantiques d'énergie

Les atomes, et donc les molécules, possèdent différents niveaux électroniques : un état fondamental et des états excités. Ils peuvent passer d'un état à l'autre à l'aide de **transferts quantiques d'énergie**, que l'on détaille ci-dessous :

Définition – Absorption : un photon fournit une énergie $\Delta E = h\nu = E_2 - E_1$ au système (atome, molécule...) pour passer d'un niveau 1 à un niveau 2 plus haut en énergie. On dit également qu'on **excite** le système du niveau 1 au niveau 2.

Définition – Emission spontanée : le système libère spontanément un photon d'énergie ΔE , mais de direction et de phase aléatoires, pour passer d'un niveau 2 à un niveau 1 plus bas en énergie. On dit qu'il se **désexcite**.

L'émission spontanée est le phénomène inverse de l'absorption.

Il existe un autre type d'émission, décrit par Einstein en 1917 :

Définition – Emission stimulée : désexcitation radiative d'un système d'un niveau 2 à un niveau 1 sous l'action d'un photon d'énergie ΔE . Le système, en se désexcitant, émet un photon de même énergie, de même quantité de mouvement (donc direction et sens) et de même phase que le photon incident.

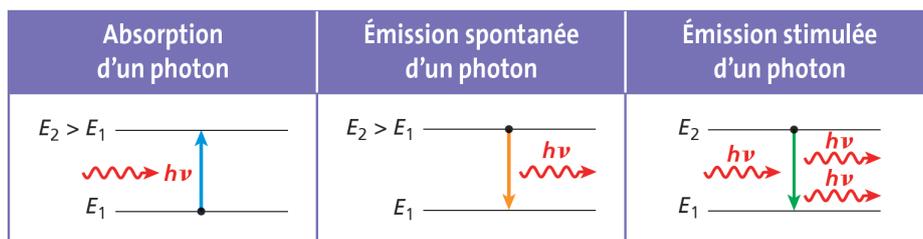


Figure 2 – Transferts quantiques d'énergie (Source : Micromega TS (p. 414)).

C/ Lien avec la spectroscopie

En 1S, on a vu que les atomes possédaient des niveaux d'énergie quantifiés appelés **niveaux électroniques**. Les transitions entre ces niveaux, appelées **transitions électroniques** sont permises par les transferts quantiques d'énergie décrits dans la sous-partie précédente. Elles expliquent les spectres d'absorption et d'émission, et en particulier la localisation des raies. Ce sont également elles qui interviennent en spectroscopie UV-visible puisque l'écart énergétique entre les niveaux électroniques correspond aux domaines du **visible** et du **proche ultraviolet**.

En plus des niveaux électroniques, une molécule possède des niveaux vibratoires. En effet, du fait de l'agitation thermique, elle est constamment en train de vibrer.

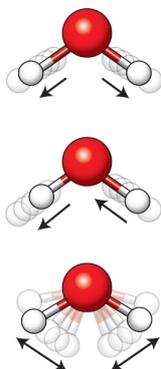


Figure 3 – Les trois modes de vibration de la molécule d'eau : deux élongations et une déformation (Source : Hachette TS (p. 385)).

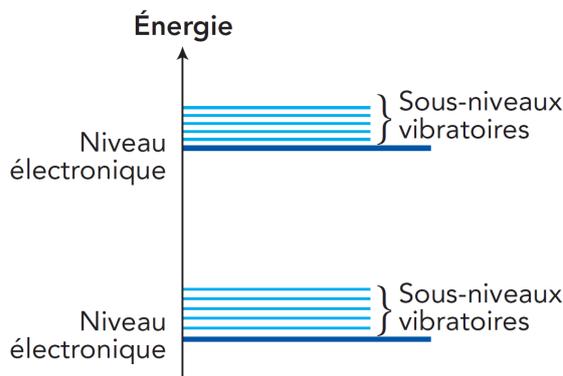
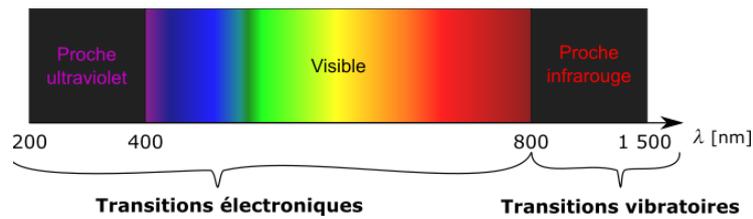


Figure 4 – Niveaux d'énergie électroniques et sous-niveaux vibratoires d'une molécule ou d'un atome (Source : Hachette TS (p. 385)).

Les transitions vibratoires se font par les mêmes transferts quantiques d'énergie que ceux décrits précédemment. Elles requièrent moins d'énergie que les transitions électroniques. On parle donc de **sous-niveaux vibratoires**. Elles correspondent au domaine infrarouge et interviennent donc dans la spectroscopie IR.



II - LASER

Définition – LASER : Dispositif émettant de la lumière très cohérente grâce au processus d'émission stimulée. Acronyme de *light amplification by stimulated emission of radiation* (amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement).

A/ Fonctionnement du laser

Comme son nom l'indique, le laser repose sur le phénomène d'émission stimulée. Plusieurs atomes ou ions sont placés dans la cavité fermée par deux miroirs. Afin de favoriser l'émission stimulée, ils sont premièrement excités à un niveau d'énergie élevé (\mathcal{E}_3) de sorte à ce qu'il y ait plus d'atomes dans un état excité qu'à l'état fondamental. En pratique, les atomes sont excités du niveau 1 vers le niveau 3 par absorption de photons. On parle de **pompage optique**. Ils se désexcitent et s'accumulent au niveau 2 par émission spontanée. C'est ce que l'on appelle l'**inversion de population**. Puis, ils se désexcitent encore vers le niveau 1 ou vers le niveau 2 par émission stimulée ou spontanée.

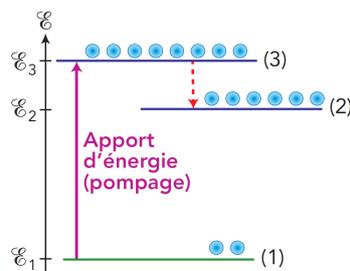


Figure 5 – Pompage optique et inversion de population des atomes dans le laser (Source : Hachette TS (p. 384)).

Les boules bleues représentent les atomes.

| **Vidéo** – Fonctionnement du laser (regarder entre 30" et 52").

Les photons produits par **émission stimulée** sont tous de même énergie et direction, et s'accumulent dans la cavité. C'est ce qu'on appelle l'**amplification**. Ils font des aller-retour entre les deux miroirs, c'est pourquoi on parle également d'**oscillateur optique**. Mais, pour ne pas interférer, il est indispensable qu'ils soient tous en phase. Pour cela, la cavité doit avoir une longueur qui est un **multiple entier de la longueur d'onde** des photons.

L'un des deux miroirs est en fait partiellement transparent. Les photons peuvent ainsi sortir de la cavité. On observe alors un rayon lumineux.

Le premier laser a avoir été mis au point est le laser à rubis en 1960 par Maiman. L'émission est due à des ions chrome (III) Cr^{3+} , ce qui explique leur couleur rouge.

B/ Propriétés du rayonnement laser

Le laser est une **source spectrale monochromatique**. Dans l'exemple du laser à rubis, sa longueur d'onde vaut $\lambda = 694,3 \text{ nm}$, correspondant à la transition énergétique entre les niveaux 1 et 2.

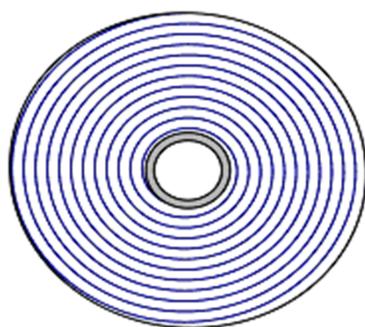
Tous les photons sont en phase donc le rayon lumineux est dit **cohérent**. Ils ont également tous la même quantité de mouvement (même direction et même sens) donc la lumière du laser est **directive**.

Enfin, la lumière du laser est très intense. Elle est 10 millions de fois (10^7) plus puissante que celle d'une lampe à incandescence. On dit que le laser possède une **grande concentration spatiale**. C'est pourquoi il est indispensable de **ne pas regarder le laser directement** au risque de se brûler la rétine ! En outre, certains lasers peuvent émettre des impulsions lumineuses. Ils **concentrent** ainsi **temporellement** l'énergie qu'ils émettent.

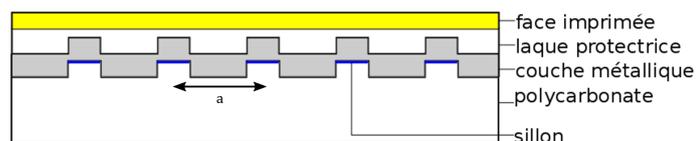
	Éclairement ($W \cdot cm^{-2}$)	Nature de l'émission
Laser à impulsion	10^9	Impulsions ultra-courtes
Lampe à incandes- cence	10^2	Continue

Figure 6 – Comparaison des puissances surfaciques d'un laser et d'une lampe à incandescence (Source : Hachette TS (p. 384)).

C/ Utilisation d'un laser comme outil d'investigation



(a) Piste d'un CD (en bleu).



(b) Coupe d'un CD selon son rayon.

Figure 7 – Schématisation des sillons d'un CD (Source : ac. Paris).

Un CD est composé d'une piste creuse formant une spirale, aussi appelée sillon. On souhaite déterminer l'espace entre deux sillons consécutifs.

Expérience – Mesure de la distance entre deux sillons d'un CD (Source : Hachette TS (p. 378) et https://www.ac-paris.fr/portail/jcms/p1_568259/determination-du-pas-du-sillon-d-un-cd/dvd-par-interference-a-ondes-multiples).

Les multiples sillons du CD peuvent être assimilés à de multiples fentes d'Young. On peut donc considérer que le CD joue le rôle d'un réseau et d'un miroir dans l'expérience.

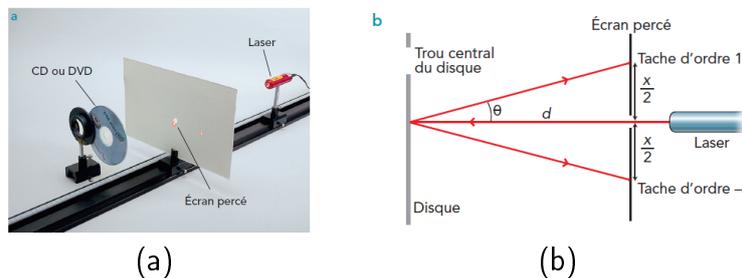


Figure 8 – Dispositif expérimental (Source : Hachette TS (p. 378)).

On utilise la **formule des réseaux** pour la première frange d'interférence (hors-programme de TS), afin de déterminer l'espace intersillon (noté a) :

$$\sin(\theta) = \frac{\lambda}{a} \quad (1)$$

Or, les formules de trigonométrie permettent d'exprimer le sinus de l'angle θ :

$$\sin(\theta) = \frac{x}{2} \times \frac{1}{\sqrt{d^2 + \left(\frac{x}{2}\right)^2}} \quad (2)$$

On en déduit l'expression de l'espace intersillon :

$$a = \lambda \sqrt{1 + \frac{4d^2}{x^2}} \quad (3)$$

Remarque – En TP, on pourrait également évaluer les incertitudes sur la mesure en utilisant des incertitudes de type B et la formule de propagation (qui serait donnée aux élèves).

On pourrait ainsi mesurer $a = 1,6 \mu\text{m}$ pour un CD. Si l'on comparait cette valeur à celle d'un DVD, on verrait que les sillons d'un DVD sont plus rapprochés : ils peuvent contenir plus d'informations. En effet, le DVD doit stocker une information de son mais aussi d'image, contrairement au CD.

Conclusion

La mécanique quantique permet d'expliquer les interactions lumière-matière. La matière peut recevoir de l'énergie de la part d'une lumière incidente, par absorption. Elle peut également en céder au milieu par émission spontanée ou stimulée d'un photon. Ces transferts quantiques d'énergie se font entre des niveaux discrets d'énergie. Il peut s'agir de niveaux électroniques, dans ce cas l'énergie associée à la transition se situe dans les domaines du visible ou du proche ultraviolet. Il peut aussi s'agir de sous-niveaux vibratoires, associés à des rayonnements dans l'infrarouge.

Enfin, ces transferts quantiques d'énergie permettent de décrire le fonctionnement d'un laser et pourquoi sa lumière est monochromatique, directive, cohérente et intense.

Par la suite, on pourra comprendre comment les CD ou DVD étudiés dans la dernière sous-partie permettent de stocker de l'information.