

LPS21 : Absorption et émission de la lumière

R. de Guiran - A.Pricoupenko

Niveau : L2

Commentaires du jury

- **2017** : Cette leçon ne peut se résumer à une présentation des relations d'Einstein.
- **2015** : Cette leçon peut être traitée de façons très variées, mais il est bon que les candidats aient réfléchi aux propriétés des diverses formes de rayonnements émis, aux dispositifs exploitant ces propriétés et au cadre théorique permettant de les comprendre.
- **2011, 2012, 2013, 2014** : 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 et plus généralement les caractéristiques du rayonnement stimulé

Prérequis

- Électromagnétique
- Spectre d'un corps noir
- Notion de photon
- Équipartition de l'énergie ?

Expériences

- ☞ **Mesure de la constante de Rydberg**
avec lampe H2, spectro Ocean view et
ordi+logiciel, tableur type regressi

Bibliographie

Tout en un PC/PC, 5e édition 2019, —> Chap oscillateur optique*

Sanz,Salamito...

Optique physique, Taillet

Jolidon bleu, FLTCLD p 352

—> chap interaction molécule lumière

—> Mesure de la constante de Rydberg

Remarque

On est à l'arrache, on fait au mieux pour boucler les leçons. Donc ça sera pas original. Y a moyen de faire un truc totalement différent en restant uniquement sur le modèle de l'électron élastiquement lié, mais ça sera pour une prpochaine fois. **Leçon inspirée de C.Cabart et H.Rousille.**

Introduction

La première expérience qu'on se fait de la lumière se fait par notre vision. En admettant que la lumière arrive à notre oeil, ça suppose de fait qu'elle interagit avec celui ci pour qu'on puisse la "voir". C'est donc notre premier contact avec un phénomène d'absorption de la lumière par la matière.

Concernant l'émission, pour continuer sur votre expérience quotidienne d'étudiant, en TP vous utilisez deux types de sources :

- les sources à incandescence(ex : QI) qui ont un spectre continu qui se rapproche du spectre d'un corps noir.
- les sources à luminescence (lampes spectrales et lasers) dont le spectre correspond au spectre d'émission des atomes qui les composent et est discret

But

Décrire l'émission mais également d'absorption de la lumière qui mettent donc en jeu la lumière et la matière et mettre à profit cette description avec l'exemple du laser

1 Niveaux d'énergie d'un atome

1.1 Bref historique

• Trouver dans les points historiques ci-dessous de quoi faire un petit point histoire des sciences :

- Aspect corpusculaire de la lumière par Newton (1643-1727)
- la théorie ondulatoire fait son chemin avec notamment Huygens (traité de la lumière 1690), Young (expérience des fentes 1801), Fresnel (mémoire sur la diffraction 1818). Puis écrasante confirmation avec la théorie de Maxwell.
- Problème avec notamment le spectre de rayonnement du corps noirs qu'on ne parvenait pas à décrire, et en 1900 Planck propose un modèle faisant intervenir des quantas d'énergie. La lumière ne peut échanger l'énergie avec la matière que par paquets d'énergie quantifiée
- Depuis Thomas Melvill (1726-1753) en 1750, on comprend que les spectres des éléments chimiques sont discrets et formés de raies spectrales. La spectroscopie théorique naît avec la loi du rayonnement de Gustav Kirchhoff (1824-1887), publiée en 1859, qui explique l'équivalence entre le spectre d'émission et le spectre d'absorption des substances chimiques
- En parallèle, un lien entre rayonnement électromagnétique et électricité est constaté, étudié, affiné pendant le XIXe siècle : c'est l'effet photoélectrique. Même si Maxwell a brillamment unifié l'électricité et le magnétique avec sa théorie, le constat est fait que sa théorie ne peut expliquer cet effet. Finalement, Einstein propose une interprétation de cet effet en reprenant les idées de Planck mais en allant plus loin : **ça n'est pas seulement les échanges d'énergie lumineuse qui sont quantifiée mais la lumière elle même. Elle est composée de "grains de lumière" d'énergie $h\nu$.** Le photon est né.
- 1911 : Rutherford décrit le modèle planétaire de l'atome : le noyau positif contient l'essentiel de la masse et les électrons négatifs orbitent autour de lui.
- 1913 : Bohr développe son modèle de l'atome d'hydrogène permettant d'expliquer ses raies d'émission par des mécanismes d'absorption émission de lumière, puis la mécanique quantique est développée dans les 2 décennies qui suivent.

1.2 Etude de la série de Balmer de l'hydrogène

- On va s'intéresser pour commencer à l'étude d'une lampe spectrale à hydrogène.
- Comme vous l'avez vu en mécanique quantique, les niveaux d'énergie électronique sont quantifiés pour l'atome d'hydrogène, et donnés par la formule

$$E_n = \frac{-hcR_H}{n^2}$$

avec h la cte de Planck, c la célérité de la lumière (dans le vide) et R_H la constante de Rhydberg de l'hydrogène, dont la valeur théorique est de $1.097 \times 10^7 m^{-1}$.

• Du point de vue des échanges d'énergie, la quantification de ces niveaux restreint de manière très stricte l'énergie que peut donner ou recevoir l'électron. Si on s'intéresse aux photons :

- En absorbant un photon, l'électron peut passer sur un niveau d'énergie supérieure, il est dit excité.
- Et en passant d'un niveau d'énergie à un autre niveau plus bas, il émet un photon dont l'énergie est fixée par le "gap" d'énergie entre les 2 niveaux.

A l'aide de la formule de Planck qui relie la longueur d'onde du photon à son énergie, la longueur d'onde du photon vérifie **en absorption et en émission** :

$$\frac{1}{\lambda_{nm}} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

avec $m > n$.

• Spectre d'absorption/émission de l'hydrogène :

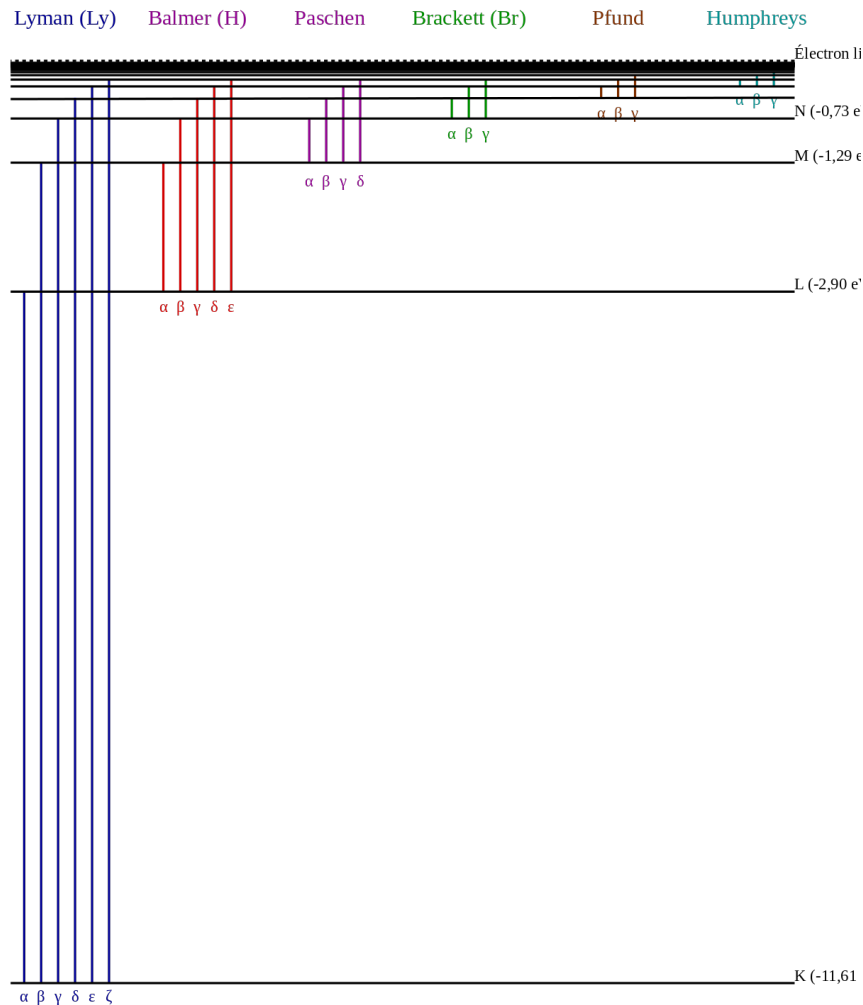


FIGURE 1 – Crédit : Wiki

Elles sont répertoriées selon un niveau de référence et on va s'intéresser à la raie de Balmer qui correspond en émission à la désexcitation d'un électron vers le niveau d'énergie $n = 2$. Pourquoi ? Parce que les longueurs d'ondes de cette raie sont dans le visible tout simplement.

Expérience

Référence : Jolidon bleu (ftcltd) p 352

Matériel, description :

Mesure de la constante de Rydberg.

Matériel :

- Lampe H2
- Spectro Ocean view + ordi avec logiciel
- Tableur type regressi

Remarque importante : dans le jolidon il est conseillé de condenser la lumière sur la fibre. Ce qui a marché pour nous c'est de presque "coller" la fibre optique sur l'ampoule. Après il faut jouer avec le logiciel sur le temps d'intégration et moyenner sur différentes acquisitions. Pour le reste lire le jolidon.

Remarque

Parmi les raies observées ici, celle à 656.3nm est nommée raie H_α . Celle-ci a une importance toute particulière en astronomie → page wiki :

La raie H-alpha se trouve à une longueur d'onde de 656,3 nanomètres, et se trouve donc dans la partie rouge du spectre visible. L'étude de cette raie est le moyen le plus simple pour les astronomes de tracer le contenu d'hydrogène ionisé des nuages de gaz.

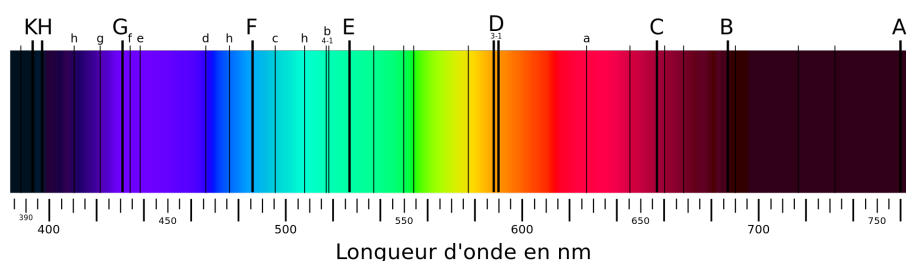
L'énergie nécessaire pour ioniser l'hydrogène étant quasiment la même que celle nécessaire pour faire passer un électron du niveau $n = 1$ au niveau $n = 3$, la probabilité qu'un électron ne soit pas éjecté de l'atome mais passe vers ce niveau $n = 3$ est très faible. Par contre, après avoir été ionisé, l'électron et le proton vont se recombiner pour former un nouvel atome d'hydrogène. Dans ce nouvel atome, l'électron peut se trouver sur n'importe lequel des niveaux d'énergie, et ensuite, va cascader vers le niveau fondamental ($n = 1$), en émettant un photon lors de chaque transition. On a calculé qu'environ une fois sur deux, cette cascade comprend la transition $n = 3$ vers $n = 2$, et l'atome va alors émettre la raie H-alpha. Cette raie est donc émise juste après que l'atome ionisé a récupéré un électron et cesse d'être ionisé.

Cette raie H-alpha est très vite saturée à cause du fait que l'hydrogène est le composant majoritaire des nébuleuses. Ce qui fait que cette raie peut être facilement utilisée pour déterminer la forme et la taille des nuages, mais elle ne permet pas de connaître la quantité d'hydrogène contenue dans le nuage. Par contre, les molécules, telles le dioxyde de carbone, le monoxyde de carbone, le formaldéhyde, l'ammoniac, etc. permettent elles de déterminer la masse d'un nuage de gaz.

1.3 Remarque sur l'absorption

On a clairement mis en évidence l'émission avec l'expérience précédente. Pour l'absorption c'est donc l'inverse → 2 exemples :

- Raie d'absorption du soleil/raies de Fraunhofer (image wiki) :



ces raies sont des marqueurs des éléments présents dans les couches externes de l'atmosphère du soleil.

- Expérience pas du tout safe mais très parlante : <https://www.youtube.com/watch?v=7u3rRy97m9Y&t=19s> Ce qui se passe c'est que la flamme ionise le bicarbonate de sodium. L'ion sodium (qui n'a pas qu'un électron) absorbe très clairement aux longueurs d'onde du doublet du sodium.

Transition

On a donc prouvé expérimentalement que le spectre énergétique de l'atome et le spectre de la lumière émise sont reliés. Maintenant, on va s'intéresser plus précisément à ce qui se passe.

2 Phénomènes d'absorption et d'émission

2.1 Notations

- On considère :
 - un rayonnement de densité spectrale d'énergie volumique $u(\nu)$
 - un milieu matériel dont les atomes n'ont que 2 niveaux E_1 et E_2 tel que $E_1 < E_2$, de populations **volumiques** respectives N_1 et N_2 .
 - ν_0 la fréquence lumineuse associée à une transition $E_1 \leftrightarrow E_2$
- Si $p_{processus}$ est la proba par unité de temps d'un processus : $dp_{processus} = p_{processus}(t)dt$ est la proba d'occurrence de ce processus entre t et $t + dt$ **pour 1 atome**. → Si par exemple on s'intéresse aux processus de transition $1 \rightarrow 2$. **Pour un grand nombre d'atomes N_1** : pendant dt , la variation de la population 1 due au processus en question s'écrit :

$$(dN_1)_{processus} = \pm N_1 dp_{processus}$$

où le signe dépend évidemment du sens du processus considéré (1 vers 2 ou 2 vers 1).

2.2 Emission spontanée

- Un atome dans un état excité se désexcitera spontanément pour revenir à son fondamental.
- On a $dp_{spont} = A_{21}dt$ donc $\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{spont} = -A_{21}N_2$ où
 - A_{21} en s^{-1} , la proba temporelle d'émission spontanée. **Taillet p252** → Vous avez déjà vu ce type de relation en radioactivité par exemple. $1/A_{21}$ **est lié au temps de demi-vie d'un atome dans le niveau 2 qui n'a pas d'autre processus possible que la désexcitation via** $\tau_{1/2} = \ln(2)/A_{12}$. **ODG** $A_{ij} \sim 10^8 s^{-1}$
 - Caractéristique du photon émis : énergie $h\nu$ aléatoire mais proche de $h\nu_0$, direction aléatoire, polarisation aléatoire, phase aléatoire (**Sanz-Salamito**).

Remarque

Pour info (crédit **H.Roussille**) : en réalité, l'émission spontanée a lieu car il y a couplage avec le champ électromagnétique : si on quantifie celui-ci, on voit que son état fondamental se couple avec les états excités E_i des atomes. Cela permet une transition $E_i \rightarrow E_0$ pour l'atome, simultanée avec une transition vers un état excité pour le champ : celui-ci contient désormais un photon.

2.3 Largeur de raie (crédit H.Roussille)

• On a écrit que seuls des photons de fréquence fixée $\nu_0 = \Delta E/h$ pouvaient interagir avec l'atome. D'une part c'est incroyablement restrictif comme on l'a dit (et un peu dérangeant, la nature est-elle si peu permissive ?), mais cela implique quelque chose dont on a pas parlé jusque là $\rightarrow$ **Sanz-Salamito p1122** il faudrait que l'électron passe un temps infini dans l'état 2! **Il y a donc un élargissement naturel de la raie**, ce qui est déjà un peu rassurant.

• **Autres cause d'élargissement** $\rightarrow$ *Cagnac phys atomique tome 1 p23, Sanz-Salamito*

- Effet Doppler (élargissement relatif en $\sqrt{T}$)
- chocs
- Ça parle aussi d'un effet stark (ne pas en parler mais l'avoir en tête)

• **Profil de raie** $g(\nu)$ (*Sanz-Salamito*) :

$$\int_0^\infty g(\nu) d\nu = 1$$

avec g très piquée autour de ν_0

2.4 Absorption (*Sanz-Salamito, Cagnac (phys atomique)*)

- Un atome dans l'état 1 peut absorber un photon pour passer dans l'état 2.
- Il faut tenir compte **du rayonnement et du profil de raie** pour évaluer la cinétique d'absorption.
- On introduit un 2e coeff d'Einstein B_{12} qui vérifie :

$$p_{abs} = B_{12} \int_0^\infty g(\nu) u(\nu) d\nu$$

où p_{abs} est la proba temporelle d'absorption. Si $g(\nu)$ très piquée autour de ν_0 relativement à $u(\nu)$ on peut écrire

$$p_{abs} = B_{12} u(\nu_0)$$

- La cinétique de N_1 vérifie donc

$$\frac{dN_1}{dt} = -B_{12} u(\nu_0) N_1$$

2.5 Troisième mécanisme

- Considérer qu'il n'y a que les 2 mécanismes décrits. En déduire qu'à l'équilibre on a nécessairement $N_1 u(\nu_0) B_{12} = N_2 A_{21}$ et donc

3 Application au laser

3.1 Nécessité d'une inversion de population

- Ici on peut faire comme

Attention

Le bilan de puissance dans **Sanz-Salamito** est fait pour un intervalle $[\nu, \nu + d\nu]$, il y a moment où je n'arrive plus trop à voir s'il y a une double erreur qui se compense ou si c'est voulu...

Notes Taillet sur le modèle électron élastiquement lié

- Dans certains milieux matériels, la lumière peut se propager, elle met en mvmt les électrons des atomes qui émettent un rayonnement dipolaire.
- Ça peut conduire à l'absorption : une partie de l'onde incidente est absorbée par la mise en mouvement des charges.
- la superposition de l'onde incidente avec les ondes secondaires modifie, les caractéristiques de propagation, la vitesse effective des ondes est différente de dans le vide.
- Après le modèle planétaire, en 1910 Bohr propose son modèle permettant d'éviter l'instabilité de la matière → : l'énergie (entre autres) des électrons est quantifiée. Puis mécanique quantique, Schrodinger etc.
- Si l'électron se trouve dans une superposition de modes → **oscillations de fréquence** $\nu_{ij} = \frac{\Delta E_{ij}}{h}$
- La notion de **nuage électronique** est un bon compromis entre la vision classique et la vision quantique. On peut montrer que si le barycentre du nuage électronique est non confondu avec le proton → oscillations.
- Si un électron est dans une superposition d'états d'énergies différentes, Schrodinger → ψ oscille de façon harmonique : **"Justifie" l'utilisation du modèle classique.**
- **Modèle de l'électron élastiquement lié** : $\ddot{\vec{r}} + \omega_x^2 x \vec{u}_x + \omega_y^2 x \vec{u}_y + \omega_z^2 z \vec{u}_z = \vec{S}(t)$
- **Terme d'amortissement** : $\ddot{\vec{r}} + \frac{1}{\tau} \dot{\vec{r}} + \omega_0^2 \vec{r} = \vec{S}(t)$
- **Interaction avec une onde lumineuse** : $\ddot{\vec{r}} + \frac{1}{\tau} \dot{\vec{r}} + \omega_0^2 \vec{r} = \frac{fq_e}{m} \vec{E}_0 e^{-i\omega t}$
- **Oscillation forcée, polarisabilité** : $\vec{p}_{max} = \alpha \epsilon_0 \vec{E}_0$ avec $\alpha = \frac{fq_e^2}{m\epsilon_0} \times \frac{1}{\omega_0^2 - \omega^2 - i\omega/\tau} \rightarrow \alpha$ polarisabilité atomique.
- **Onde réémise : propriété loin des sources**
 - fréquence = à celle de l'oscillateur
 - localement : structure d'une onde plane
 - répartition angulaire dipolaire (angle de brewster)
- Après indice de réfraction, biréfringence et conséquences macro.

Notes "Moi"

- Aspect corpusculaire de la lumière par Newton. Victoire de la théorie ondulatoire, confirmée par Maxwell. Problème, rayonnement du corps noir, et en 1900 Planck propose un modèle faisant intervenir des quantas d'énergie. La lumière ne peut échanger l'énergie avec la matière que par paquets d'énergie quantifiée. En parallèle, un lien entre rayonnement électromagnétique et électricité est constaté, étudié, affiné pendant le XIXe siècle. Le constat est fait que la théorie classique ne peut expliquer cet effet. Finalement, Einstein propose une interprétation de cet effet en reprenant les idées de Planck mais en allant plus loin : **ça n'est pas seulement les échanges d'énergie lumineuse qui sont quantifiée mais la lumière elle même. Elle est composée de "grains de lumière" d'énergie $h\nu$.** Le photon est né.

- **effet photoélectrique (page wiki)** : Au cours de ses expériences sur les oscillations et les ondes électriques, Hertz cherchait à détecter les étincelles électriques comme indices d'oscillations électriques en résonance. C'est ainsi qu'il remarqua que les étincelles étaient amplifiées chaque fois que la bobine se trouvait éclairée par les étincelles d'un autre circuit, et même lorsqu'un tube à ultraviolets était allumé à proximité. Il observa en outre (1887) que le phénomène était particulièrement marqué chaque fois que c'était l'électrode négative (anode) qu'on éclairait ainsi¹⁵. Ce furent là les premières manifestations, fort modestes, de la photoélectricité.

Il fallait désormais reproduire l'amplification photoélectrique par un appareil plus simple, ce que fit l'année suivante un professeur de l'université de Dresde, Wilhelm Hallwachs (1859—1922), et caractériser quantitativement l'effet : Ph. Lenard y parvint 11 ans plus tard en utilisant un tube cathodique. Il montra qu'en faisant le vide, l'anode reçoit un rayonnement ultraviolet presque pur, et que ces rayons libèrent plus efficacement les électrons du métal. Cette

purification des conditions expérimentales, non seulement constitua la base des recherches sur l'effet photoélectrique dans l'air et les autres gaz, mais elle permit de nouvelles découvertes¹⁵.

Il faut d'abord rappeler que le phénomène de phosphorescence, connu depuis un siècle, commençait alors à être compris grâce aux travaux de G. Stokes (1853), qui avait établi que, comme dans le cas de la fluorescence, la matière des corps modifie la longueur d'onde du rayonnement incident jusqu'à le restituer sous forme de lumière visible. On avait découvert ensuite en fabriquant du phosphore que la lumière émise par un métal chauffé électrise les corps phosphorescents et modifie la couleur de sa phosphorescence d'une manière spécifique à chaque métal. Cela suggérait déjà que la lumière émise par incandescence d'un métal est liée en quelque façon à une émission électrique, ce qui, avec les modèles planétaires de l'atome et la quantification des énergies, a stimulé les recherches sur la théorie de l'émission lumineuse, et joué un rôle central dans l'hypothèse des quantas de lumière formulée par Albert Einstein en 1905.

En 1886, la découverte de l'effet photoélectrique fit sensation ; car si l'on savait depuis trois-quarts de siècle comment électriser des solides ou les éclairer aux ultraviolets, personne ne soupçonnait qu'il y eût dans la conjonction de ces deux phénomènes quelque chose de nouveau à observer. Hertz lui-même n'avait fait cette découverte qu'en reprenant les recherches de Faraday.

• Constatations effet photoélectrique (page wiki) :

- Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée et dépasse une fréquence limite appelée fréquence de seuil.
- Cette fréquence seuil dépend du matériau et est directement liée à l'énergie de liaison des électrons qui peuvent être émis.
- Le nombre d'électrons émis par unité de temps lors de l'exposition à la lumière, qui détermine l'intensité du courant électrique, est proportionnel à l'intensité de la source lumineuse.
- La vitesse des électrons émis ne dépend pas de l'intensité de la source lumineuse.
- L'énergie cinétique des électrons émis dépend linéairement de la fréquence de la lumière incidente.
- Le phénomène d'émission photoélectrique se produit dans un délai extrêmement petit inférieur à 10^{-9} s après l'éclairage, ce qui rend le phénomène quasi instantané.

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 mvt 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...