

LP n°37 Titre : Absorption et émission de la lumière

Présentée par : Vivien Scottez

Rapport écrit par : Vincent Lusset

Correcteur : Jean Hare

Date : 18/02/2019

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Tout-en-un PC/PC*	M-N. Sanz	Dunod	2015

Plan détaillé

Niveau choisi pour la leçon : CPGE

Pré-requis : - Électromagnétisme (bilan d'énergie, vecteur de Poynting)

- Thermodynamique (facteur de Boltzman, loi de Planck)

- Mécanique quantique (quantification de l'énergie)

Introduction :

Jusqu'à présent, on a toujours négligé les interactions lumière-matière ; on a considéré que c'était des processus instantanés. On va maintenant expliciter ces processus : modèle des transitions d'Einstein

I - Interaction matière-rayonnement

1) Émission spontanée

Processus qui se produit quand un atome se trouve sur un niveau d'énergie excité ; il peut alors se désexciter en émettant un photon d'énergie égale à la différence d'énergie entre les deux niveaux

→ schéma niveaux d'énergie, désexcitation avec $E_\gamma = h\nu_0 \sim E_2 - E_1$

Pour une population d'atomes excités, on va avoir : $dN_1/dt = -A_{21}N_2$ avec A_{21} le coefficient d'Einstein pour l'émission spontanée

$[A_{21}] = T^{-1}$: temps de désexcitation/durée de vie de l'état excité/probabilité par unité de temps de désexcitation

AN : $1/A_{21} \sim 10^{-9}$ s pour les lampes spectrales à Na ou Hg classiques

Propriétés : ♦ fréquence aléatoire proche de ν_0

♦ direction aléatoire

♦ polarisation aléatoire

♦ phase aléatoire

Transparent : spectre de raies de l'hydrogène et spectre continu du fond diffus cosmologique (spectre de corps noir)

2) Absorption

On peut le voir comme le phénomène inverse de l'émission spontanée

→ schéma niveaux d'énergie, absorption d'un photon avec $E_\gamma = h\nu_0 \sim E_2 - E_1$

Pour une population d'atomes, on va avoir : $dN_1/dt = -B_{12}w(\nu_0)N_2$ où $w(\nu_0)$ est la loi de Planck, la densité d'énergie électromagnétique pour la fréquence ν_0

Transparent : spectre du Soleil, avec des raies d'absorption et spectre d'une galaxie, avec des raies d'absorption, d'émission et le fond continu

+ fluorescence (l'atome renvoie la lumière reçue, s'arrête quand la lumière incidente s'arrête) et phosphorescence (l'atome passe dans un état excité intermédiaire et émet de la lumière même lorsque la lumière incidente s'arrête)

3) Émission induite

Pourquoi a-t-on « besoin » de ce 3^{ème} phénomène ?

Raisonnement par symétrie : absorption symétrique de l'émission spontanée avec 1 photon

Maintenant si on a deux photons incidents : un seul absorbé, l'autre continue → dernier

phénomène, 1 photon incident sur un état excité, 2 photons continuent

Plus formellement : bilan de population

$$dN_1 = -B_{12}w(v)N_2 + A_{21}N_1$$

A l'équilibre, $dN_1 = 0$ et $N_1/N_2 = \exp(hv/k_B T) \rightarrow$ on obtient $w(v) = A_{21}/B_{12} * N_1/N_2$: on ne retrouve pas du tout la loi de Planck

On rajoute un terme d'émission induite : $dN_1 = B_{21}w(v)N_2$

\rightarrow on trouve : $w(v) = A_{21}N_1/(B_{12}N_2 - B_{21}N_1) = (A_{21}/B_{21}) / (B_{12}N_2/B_{21}N_1 - 1)$: on retrouve une forme similaire à la loi de Planck : $w = 8\pi h\nu^3/c^3 * 1/(\exp(hv/k_B T)-1)$: l'émission induite est donc nécessaire pour expliquer la loi de Planck

On a alors par identification : $B_{12} = B_{21}$ et $A_{21} = 8\pi h\nu^3/c^3 B_{21}$: relation entre les coefficients d'Einstein (on voit que si on a un des coefficients, on a les autres)

Propriétés de l'émission induite : les photons émis ont même fréquence, même direction, même polarisation et même phase \rightarrow photons jumeaux

Application : le laser

II - Application au laser

1) Compétition entre les deux processus d'émission

On veut fabriquer un faisceau de lumière cohérent et directionnel \rightarrow émission induite et pas d'émission spontanée ; or si on calcule les probabilités des deux phénomènes on a :

$$P_{ei}/P_{es} = B_{21}w/A_{21} = 1/(\exp(hv/k_B T)-1)$$

OdG : pour $T = 300$ K, dans le visible, on trouve : $P_{ei} \ll P_{es}$: l'émission spontanée domine

Par ailleurs on a : $P_{ei} = P_{es}$ pour $\lambda = 70 \mu m$: 1^{ère} amplification de lumière réalisée dans le domaine des micro-ondes (maser)

2) Amplification d'une onde lumineuse

Schéma d'une cavité avec deux parois réfléchissantes et entre un milieu amplificateur

On définit un élément infinitésimal de volume de section S et de longueur dz ; bilan d'énergie dans ce volume : $dw/dt * Sdzdt = \Pi(z,t)S - \Pi(z+dz,t)S + \pi_{\text{émission}} - \pi_{\text{absorption}}$ (on néglige les pertes)

Hypothèse : les photons émis par émission spontanée le sont de manière isotrope \rightarrow négligeables dans le bilan

$$\text{On a donc : } dw/dt + d\Pi/dz = (N_2 - N_1)B_{12}h\nu w$$

Or (cf. cours d'électromagnétisme) : $\Pi = wc$ (on considère que le milieu est suffisamment dilué pour avoir $v = c$)

$$\text{D'où : } d\Pi/dz + 1/c * dw/dt = (N_2 - N_1)B_{12}h\nu/c * \Pi = \gamma\Pi \text{ avec } \gamma : \text{gain par unité de longueur}$$

On résout l'équation : $\Pi(z) = \Pi(0) * \exp(\gamma z)$; pour avoir une amplification de l'onde, il faut $\gamma > 0$ i.e. $N_2 > N_1$: inversion de population

Problème : d'après la statistique de Boltzmann, à l'équilibre on a le contraire : à l'équilibre, le milieu est atténuateur \rightarrow techniques expérimentales d'inversion de population

3) Réalisation de l'inversion de population

♦ 1^{ère} fois : 1953, maser, technique du tri moléculaire avec de l'ammoniac

L'ammoniac a 2 niveaux très proches et peuplés à température ambiante ; avec un champ électrique on sépare ces deux niveaux (schéma du dispositif) \rightarrow amplification d'une onde micrométrique

♦ pompage optique (Kastler, prix Nobel) : utilisation d'atomes à 3 niveaux d'énergie et de lumière polarisée circulairement

Autres processus : ♦ pompage électrique : décharges électriques dans les milieux

Enfin pour sélectionner les longueurs d'onde, on utilise la longueur de la cavité

[Petite animation illustrant le principe du laser](#)

Conclusion :

[Transparent reprenant les principales propriétés des émissions spontanées et induites, ainsi que les propriétés de la lumière laser](#)

Questions posées par l'enseignant

♦ A-t-on vraiment étudié ici les *mécanismes* d'interaction lumière-matière ?

♦ dans ce qui a été présenté, qu'est-ce qui s'applique à un atome, et qu'est-ce qui s'applique à une population d'atomes ?

- ◆ densité spectrale d'énergie w : dimension ?
- ◆ qu'est-ce qui explique le fait que l'énergie d'un photon est « proche » de v_0 ? On peut évoquer effet Doppler dû aux mouvements thermiques, chocs, effet Stark, largeur intrinsèque due à Heisenberg sur le temps et l'énergie)
- ◆ Est-ce que cette dernière largeur apparaît dans ce que vous avez fait ?
- ◆ qu'est-ce qui est le plus quantique dans ces 3 phénomènes ?
- ◆ D'où vient l'ordre de grandeur $1/A_{21} \sim 10^{-9}$ s ?
- ◆ hypothèse utilisée dans la présentation : w est le rayonnement thermique ; or pour le laser ce n'est pas le cas : quand est-ce qu'on utilise vraiment cette hypothèse ?
- ◆ dans le transparent spectre d'hydrogène/CMB, qu'est ce qui est émission spontanée ? Dans une lampe à incandescence, est-ce qu'on voit les raies de l'élément qui émet (exemple : tungstène)
- ◆ dans le spectre du Soleil, à quoi sont dues les raies d'absorption ?
- ◆ que peut-on dire sur la phosphorescence ? Les aiguilles d'une montre ? Les algues ?
- ◆ préciser la notion de photon jumeaux → pas de lien avec l'émission induite
- ◆ comment marche le tri moléculaire ? Comment fonctionne le gradient de champ électrique ?
- ◆ dans le pompage optique, où intervient la polarisation circulaire de l'onde utilisée ?
- ◆ les miroirs de la cavité sont-ils parfaitement réfléchissants ?
- ◆ si on imagine un atome comme un dipôle rayonnant, est-ce que la direction d'émission et la polarisation sont aléatoires ? (pas pour un atome unique ; éventuellement vrai pour une assemblée d'atomes, selon les circonstances)

Commentaires donnés par l'enseignant

- ◆ le fait que le rayonnement soit à l'équilibre thermique ne joue aucun rôle dans l'existence ni la valeur des coefficients d'Einstein (qui dépendent uniquement des propriétés atomiques !);
- ◆ on n'utilise cette situation/hypothèse uniquement pour montrer que dans ce cas particulier, les populations des atomes à l'équilibre (à la Boltzmann) conduisent d'une part à la loi de Bose du corps noir et d'autre part à des relations entre les coefficients
- ◆ important : cette théorie n'est correcte que si on a un rayonnement incohérent, i.e. de largeur spectrale grande devant la largeur naturelle des raies (sinon on observe l'oscillation de Rabi, c'est notamment le cas avec un laser)
- ◆ le passage de l'état excité à l'état fondamental se fait par un saut quantique, qui met un certain temps à se produire mais est instantané lorsqu'il se produit pour atome unique ; sur une population d'atomes excités on obtient une décroissance exponentielle
- ◆ en LP ou MP, on doit bien distinguer l'émission thermique (QI) et l'émission de raies (Hg ou Na). Et le CMB est un cas d'émission thermique(+ refroidissement adiabatique)
- ◆ qu'est ce qui est strictement quantique tout ça : uniquement l'émission spontanée. Les autres peuvent être décrites de façon classique par une interaction matière - onde classique
- ◆ fluorescence : pour un atome = émission spontanée ; pour une molécule, plein de niveaux denses (électroniques, vibrations,...) de durée de vie plus courte → transfert non-radiatif vers un niveau d'énergie plus faible, de durée de vie plus longue
- ◆ phosphorescence : le temps d'émission peut-être beaucoup plus long (> 1 s)
- ◆ photons jumeaux : photons intriqués présentant des corrélations quantiques. → les photons de l'émission induite ont les mêmes propriétés mais ne sont pas « jumeaux »(Noter en particulier, des photons jumeaux ont souvent des polarisations perpendiculaires)
- ◆ on peut faire un paragraphe de 5 minutes sur le corps noir
- ◆ le démarrage de l'effet laser est dû à un photon spontané ; on a ensuite un effet d'avalanche → augmentation exponentielle de l'énergie dans la cavité jusqu'à saturation du gain
- ◆ pour réaliser l'inversion de population, il est pratique et facile d'utiliser un système comptant un état excité métastable et un état beaucoup moins excité fortement instable → système à 4 niveaux

Partie réservée au correcteur

Avis sur le plan présenté

Ce plan est un plan très classique, qui à mon avis accorde trop de place aux coefficients d'Einstein, et pas assez aux autres aspects, dont ici une introduction très minimale à l'effet laser. On peut en dire plus sur ce dernier (avec des exemples moins vieilles) et/ou on peut parler davantage de l'émission spontanée, et/ou discuter de l'effet Doppler et de l'effet de recul, voire de refroidissement laser des atomes. Ou de spectroscopie, etc. Et pourquoi pas de semi-conducteurs ?

Concepts clés de la leçon

Distinction entre rayonnement thermique et atomique
Les trois processus classiques.
Leur validité seulement pour un rayonnement à bande large.
Le caractère aléatoire de l'émission spontanée.
Existence d'une image classique des deux processus stimulés

Si on parle de laser expliquer l'existence d'un seuil, décrire au moins qualitativement le rôle de la cavité, la loi de Shallow-Tones sur la largeur, des processus de pompage « modernes ».

Concepts secondaires mais intéressants

Voir commentaires sur le plan

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Qualitatives : * fluo de la Rhodamine * spectre de raies du mercure * Résonance du sodium
Quantitatives (pas au programme agrég docteur) : * Raies de Balmer et détermination de R_H
* Fluorescence de résonance du Rb et mesure de l'écart des niveaux hyperfins du niveau fondamental $5P_{1/2}$ (délicat)

Points délicats dans la leçon

Distinction/discussion atome unique/assemblée d'atomes.
Distinction champ large bande ou champ cohérent
Ne pas passer plus de 50% du temps sur les coeff d'Einstein qui ne sont qu'un aspect très partiel du problème
Sinon, voir les *concepts clés*

Bibliographie conseillée

Il y a semble-t-il des erreurs (ou au moins, des rapprochements hasardeux) dans le livre recommandé.
Une plus grande familiarité avec l'électromagnétisme classique serait utile (Perez). Les exemples empruntés à la physique atomique sont décrits dans le livre de Cagnac.