

Titre : Lasers

Présentée par : Damien Moulin

Rapport écrit par : Damien Moulin

Correcteur : Pierre-François Cohadon

Date : 08/04/2020

Bibliographie de la leçon :

Titre	Auteurs	Éditeur	Année
Tout-en-un Physique PC-PC*	MN Sanz	Dunod	2016

Plan détaillé

I) Interaction lumière-matière

A) Différents processus d'émission

Présentation des 3 processus classiques et de leurs caractéristiques.

B) Modèle des probabilités de transitions

Présentation des modèles de probabilité et des coefficients d'Einstein

C) Lien entre les coefficients d'Einstein

Utilisation de la formule de Planck pour montrer les relations entre les coefficients d'Einstein

D) profil de raie

Discussion sur l'élargissement de la gamme de fréquences autour de ω_0

II) Le LASER : un oscillateur optique

A) Schéma et principe du LASER

Schéma de principe du laser avec une cavité Fabry Perrot, un miroir semi réfléchissant et un milieu amplificateur

B) Condition d'amplification

Calcul réalisé dans le Dunod

C) Condition d'amplification

Via le calcul précédent, on montre la nécessité d'une inversion de population et la nécessité d'avoir un gain supérieur aux pertes

III) Caractéristiques du faisceau LASER

A) Expression analytique du mode gaussien

Présentation de l'expression analytique du mode gaussien et première discussion : pourquoi le mode est appelé gaussien ? discussion sur son caractère propagatif

B) Variation du rayon du faisceau

C) Variation de la courbure du faisceau

D) Synthèse : le modèle du cône cylindre

Niveau choisi pour la leçon : CPGE

Pré-requis :

- *Optique ondulatoire
- *Cavité Fabry-Perot ?
- *Quantification des niveaux d'énergie en physique quantique
- *Profil spectral d'une raie
 - corps noir
 - Loi de Stéphane Boltzman

I

1.1) processus d'émission :

HYP :

- on considère un matériau avec un seul type d'atomes
- atomes ont **SEULEMENT** deux niveaux d'énergies 1 et 2 avec leurs énergies E_1 et E_2 tq $E_1 < E_2$ (ceci implique la non dégénérescence).
- Système fermé de N atomes, N_1 dans l'état 1 et $N_2 = N - N_1$ dans l'état 2.

Comment le matériau interagit avec le rayonnement EM ?

3 processus :

- absorption, émission stimulée ou induite, émission spontanée
- absorption et émission vous en avez déjà étudiée en Lycée avec l'étude des spectres atomiques, l'émission stimulée qui est à la base du laser est quelque chose de nouveau.

Slide : 3 phénomènes : absorption, émission, émission spontanée

Expliquer les phénomènes d'absorption et émission (CF. Dunod PC/PC* chapitre 30 oscillateur optique)

Absorption un photon qui possède l'énergie $h\nu$ égale à la différence d'énergie des 2 niveaux peut être absorbée par l'atome..

- Absorption : un atome dans l'état N_1 absorbe un photon d'énergie égale à $E_2 - E_1$ et passe dans un l'état excité N_2 .

- Émission spontanée : un atome dans le niveau 2 se désexcite, indépendamment du champ EM extérieur, vers le niveau 1 en émettant un photon d'énergie environ égale à la différence des 2 niveaux. (rq on emporte aussi la dif. de moment cinétique). Le photon émis peut avoir n'importe quelle direction.

- Émission stimulée : Un atome dans l'état N_2 se désexcite par interaction avec le champ EM. Plus précisément. L'atome en question interagit avec un premier photon d'énergie égale à la différence entre les niveaux E_1 et E_2 et se désexcite en émettant un deuxième photon identique au premier photon. Par identique : même énergie, polarisation, direction et phase.

Le but du laser est d'avoir beaucoup de photons. Le phénomène de cascade qui peut se créer par émission stimulée est fondamental.

[5 :30]

1.2) Modèle des probabilités de transition

A Einstein a introduit en 1917 de manière phénoménologique la notion de probabilité de transition par unité de temps entre deux niveau énergétiques. Il associe à chaque'un des processus d'interaction entre la lumière et l'atome une probabilité de transition.

SLIDE

Pour l'absorption :

- $p_{abs} = B_{12} \cdot \rho(\omega_0)$ ou $\rho(\omega_0)$ est la densité spectrale d'énergie volumique du champ EM à la pulsation ω_0 . C'est la même densité spectrale qui a été vu dans le cours sur le corps noir. (cf dunod) . B_{12} est le coefficient d'Einstein associée à l'absorption

(rq la densité spectrale est la densité de photons n ayant une fréquence comprise entre ν et $\nu + d\nu$ multiplié par leur énergie, cf wikipedia corps noir)

- pour l'émission stimulée :

- $p_{ei} = B_{21} \cdot \rho(\omega_0)$. B_{21} est le coefficient d'Einstein associée à l'émission stimulée

Pour l'émission spontanée:

- $P_{es} = A_{21}$. Ou A_{21} est le coefficient d'Einstein associée à l'émission spontanée. On insiste, l'émission spontanée ne dépend pas du rayonnement EM.

Le principe du laser repose sur une oscillation des atomes entre les états 2 et 1. Notamment, on se doute que c'est la cascade de photons qui provoquent des émissions stimulées qui sont à l'origine de l'amplification lumineuse et qui donne naissance au laser.

Or les photons qui provoquent l'émission stimulée peuvent être absorbés par des atomes dans l'état 1. Avec les mains, on peut se douter qu'il sera nécessaire que on ait plus d'atomes dans le niveau 2 que dans le niveau 1 pour produire plus de photons par émission stimulée que des photons absorbés par émission spontanée.

Nous allons donc nous intéresser à l'évolution de la population des atomes dans les états N_1 et N_2 .

(tout sur slide)

Si on fait un bilan sur N_2 , on trouve que $\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 - B_{21}\rho(\omega_0)N_2 + B_{12}\rho(\omega_0)N_1$

C'est une équation qui fait apparaître N_1 et N_2 et qui dépend des coefficients d'Einstein.

1.3) [12 :00]

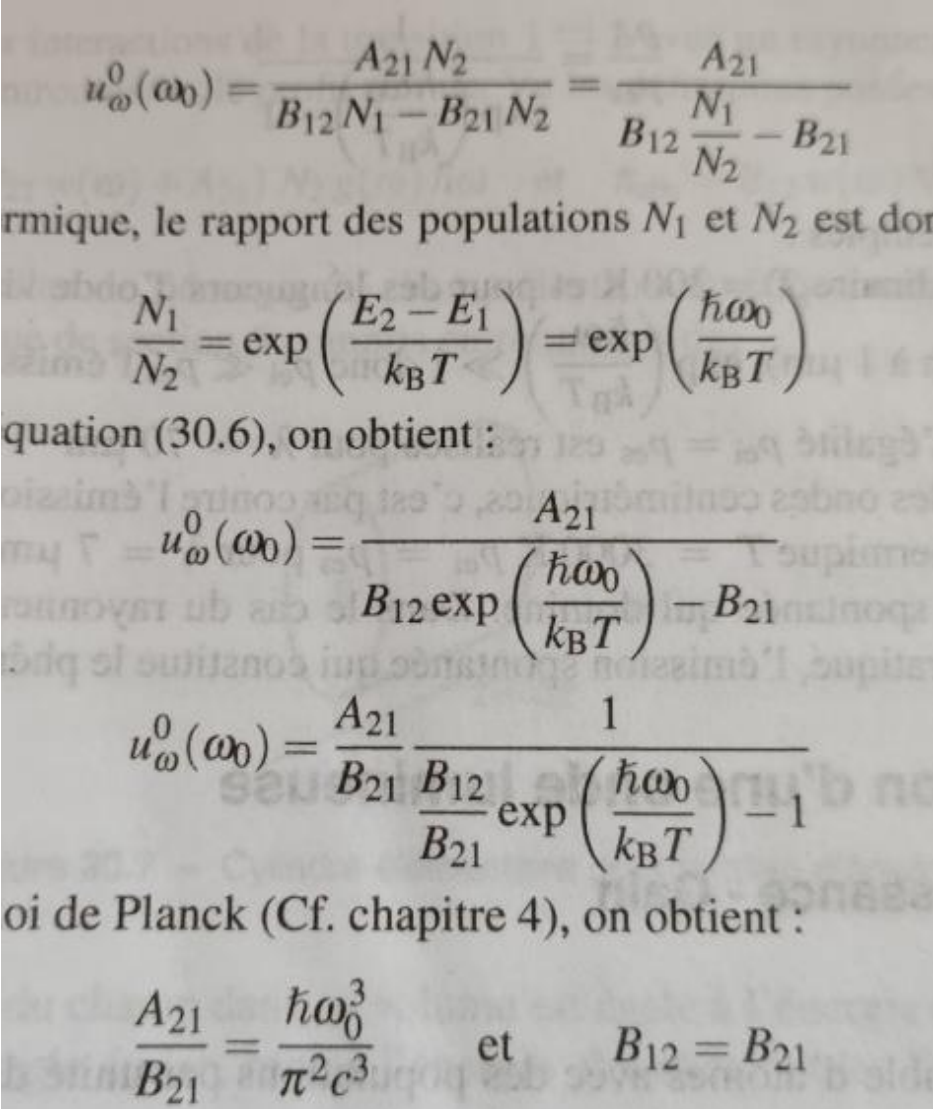
On se place en régime permanent. On suppose en plus que la seule contribution à la densité d'énergie volumique spectrale est le rayonnement thermique. Dans ce cas nous sommes à l'équilibre thermique. Dans ce cas la densité d'énergie spectrale doit avoir la même forme que celle établie pour la loi de Planck pour le corps noir.

Alors :

$$0 = -A_{21}N_2 - B_{21}w(\omega_0)N_2 + B_{12}w(\omega_0)N_1$$

$$w(\omega_0) = \frac{A_{21}N_2}{-B_{21}N_2 + B_{12}N_1}$$

Comme nous sommes à l'équilibre thermique, nous pouvons donc utiliser la loi de Boltzmann pour connaître le rapport entre les deux populations N_1 et N_2 .



Thermique, le rapport des populations N_1 et N_2 est donné par :

$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right) = \exp\left(\frac{\hbar\omega_0}{k_B T}\right)$$

En utilisant l'équation (30.6), on obtient :

$$u_{\omega}^0(\omega_0) = \frac{A_{21}}{B_{12} \exp\left(\frac{\hbar\omega_0}{k_B T}\right) - B_{21}}$$

$$u_{\omega}^0(\omega_0) = \frac{A_{21}}{B_{21}} \frac{1}{\frac{B_{12}}{B_{21}} \exp\left(\frac{\hbar\omega_0}{k_B T}\right) - 1}$$

En utilisant la loi de Planck (Cf. chapitre 4), on obtient :

$$\frac{A_{21}}{B_{21}} = \frac{\hbar\omega_0^3}{\pi^2 c^3} \quad \text{et} \quad B_{12} = B_{21}$$

Faire ce calcul jusqu'au bout pour faire un calcul au tableau.

SLIDE comparaison

Important $B_{12}=B_{21}$! les phénomènes sont symétriques.

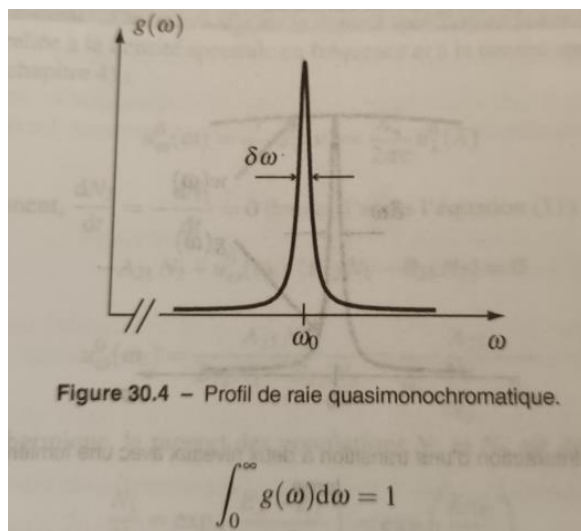
D) Profil de raie

Jusqu'ici nous avons considérée que seulement des photons ayant une énergie égale à E_2-E_1 peuvent être absorbés dans notre milieu. Or ceci n'est pas tout à fait juste m en réalité u photon ave une pulsation proche de ω_0 peut être absorbée. (raison effet doppler, durée de vie $1/A_{21}$ pour emission spontanée et relation incertitude temps/énergie).

De même un photon peut être émis par émission spontanée ou provoquer de l'émission induite dans une gamme d'énergie autour de E_2-E_1 (et donc a une fréquence différente de ω_0).

Pour prendre en compte ce phénomène on pondère les probabilités élémentaires des 3 processus par une fonction appelé le profil de raie $g(\omega)$ qui est normalisé.

Dessiner au tableau :



Quand le profil de raie est beaucoup plus fin que $\omega(\omega)$ alors on retrouve les résultats précédents qui ne prennent en compte que la valeur à ω_0 . Si c'est pas le cas, il faut faire l'intégrale.

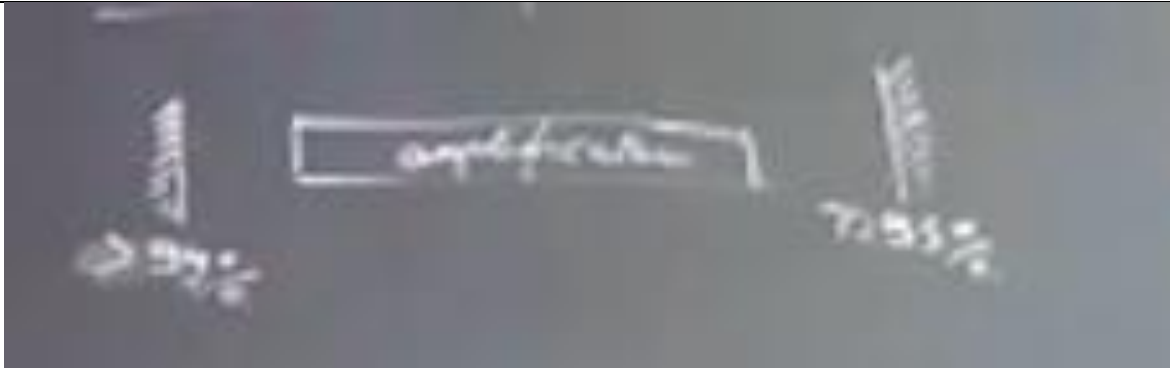
II) [15 :00]

1)

L'amplification ce fait quand les photons traversent le milieu amplificateur. Or les pointeurs laser sont petits. Pour augmenter le nombre d'interactions entre les photons et le milieu nous augmentons le parcours en enfermant les photons dans une cavité aux bous de laquelle il y a un miroir très réfléchissant et un autre miroir qui laisse s'échapper quelques photons mais réfléchit la majorité (typiquement réflexion $\sim 95\%$).

Les photons font alors un grand nombre d'aller-retour dans la cavité avant de s'échapper.

Prenons l'exemple d'une cavité Fabry-pérot avec un miroir où $r > 99\%$ et l'autre 95% : On a une slide avec ce schéma.



Or les photons issus de l'émission induite sont en phase, la lumière dans la cavité subit alors des interférences constructives et destructives. Ceci impose des conditions sur les longueurs d'onde qui peuvent exister dans la cavité et donc la fréquence du laser.

II.2 Amplification d'une onde lumineuse

Pour créer un laser, il faut qu'il y ait amplification. C.A.D que le nombre de photons émis soit plus grand que le nombre de photons absorbés.

La question qu'on peut se poser c'est quelle est la condition pour que notre milieu (l'ensemble d'atomes étudiés) puisse amplifier la lumière ?

On fait un bilan, sur slide.

Or :

$$\begin{aligned} \pi_{\text{émis}} &= - \left(\left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{\text{es}} + \left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{\text{ei}} \right) \hbar \omega \\ \pi_{\text{abs}} &= - \left(\frac{dN_1}{dt} \right)_{\text{abs}} \hbar \omega ; \end{aligned}$$

ATTENTION ! L'émission spontanée ne conduit pas à de l'amplification (phénomène aléatoire). on considère alors que les photons émis spontanément sont perdus dans le bilan de puissance.

Si on introduit dans l'équation bilan les expressions des variations des populations on trouve :

$$\frac{\partial I}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} = ((N_2 - N_1) B_{21} w + A_{21} N_2) g(\omega) \hbar \omega - \pi_{\text{perte}}$$

ou bien avec les expressions de B_{21} et A_{21} : $\frac{\partial I}{\partial z} + \frac{\partial w}{\partial t} = (N_2 - N_1) \frac{c}{\omega} \frac{\partial w}{\partial t} + A_{21} N_2 \frac{c}{\omega} \frac{\partial w}{\partial t} - \pi_{\text{perte}}$

la vitesse de l'énergie v_e , $I = v_e w$ (Cf. chapitre 27). Nous supposons $v_e = c$.

Par ailleurs, par définition la vitesse de l'énergie est : $v \cdot w = I$. On suppose le milieu suffisamment dilué pour que $v = c$.

On définit le gain par unité de longueur $\gamma(\omega)$ par :

$$\gamma(\omega) = (N_2 - N_1) B_{21} \frac{\hbar \omega}{c} g(\omega)$$

Le bilan devient :

$$\frac{\partial I}{\partial z} + \frac{1}{c} \frac{\partial I}{\partial t} = \gamma(\omega) I - \pi_{\text{perte}}$$

II.C) Conditions d'amplification

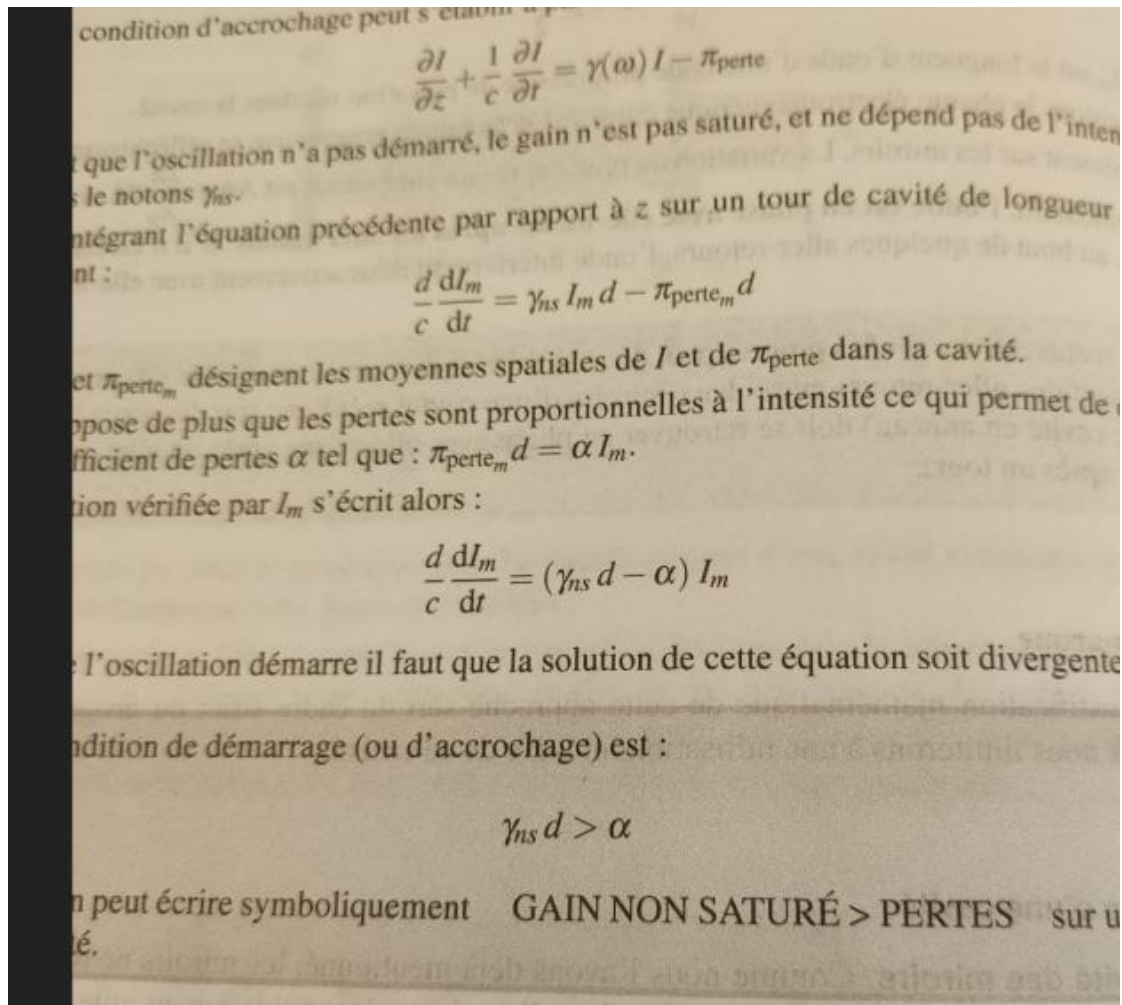
), on obtient :

$$I(z) = I_0 \exp(\gamma(\omega)z)$$

Par ailleurs il faut aussi que le gain soit supérieur aux pertes. Si on répond au critère d'inversion de population, le nombre de photons dans la cavité augmentera de manière exponentielle. Sauf que certains de ces photons seront perdus par transmission au niveau des miroirs. Notamment une partie des photons vont constituer le rayonnement laser. Alors on ne pourra pas créer une onde stationnaire dans la cavité.

On suppose dans un premier temps que le gain au début de l'amplification est constant et independant de l'intensité lumineuse.

Alors :



On intègre par rapport à z avec d la longueur de la cavité. On modélise les pertes par un coefficient proportionnel à l'intensité lumineuse dans la cavité.

On trouve la deuxième condition du laser qui est la condition de démarrage.

En outre, plus il y a des photons provenant de l'émission induite, plus difficile il sera de maintenir le critère d'inversion de population.

Un équilibre entre photons créés et photons perdus s'établit une fois que le nombre de photons dans la cavité est suffisamment élevée. On parle alors de saturation. La valeur du gain saturée est inférieure à celle du gain non saturée et égale aux pertes.

IIc) Fréquence émise par le laser :

Pour avoir amplification il faut un grand nombre d'aller-retour dans la cavité. Ceci équivaut à ce qu'une onde stationnaire s'établisse dans la cavité entre les 2 miroirs. Or l'onde lumineuse est cohérente à cause des propriétés de l'émission stimulée, elle peut donc interférer avec elle-même.

Pour ne pas avoir d'interférences destructives après un grand nombre d'allers-retours dans la cavité, il faut que l'onde lumineuse soit en phase avec elle-même après un aller-retour. Cette condition fixe les fréquences des ondes qui peuvent exister dans la cavité

En effet nous avons vu en optique que : $\Delta \varphi = \frac{2\pi}{\lambda_p} 2L = 2p\pi$ Donc $\nu_c = p \frac{c}{2L}$

Ces fréquences correspondent aux modes propres de la cavité.
(rq, on diviserait par n si v onde différent de c !).

Pour qu'un faisceau laser sorte de la cavité il faut que le gain non saturé soit supérieure aux pertes de la cavité. Nous pouvons comparer la courbe de gain non saturé à la valeur seuil donnée par les pertes pour chaque fréquence qui peut exister dans la cavité.

Montrer slide

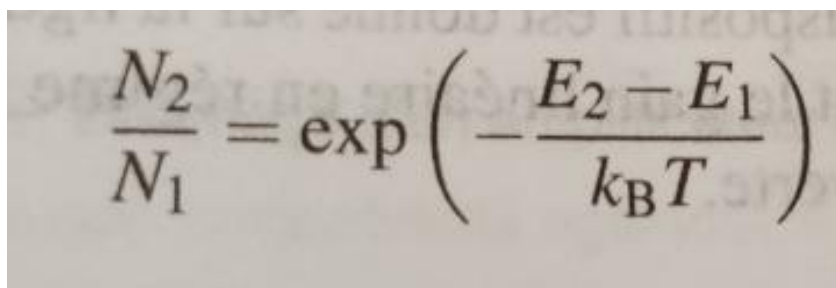
Rq : la forme de la courbe de gain depend du profil de raie !

On constate que seulement 3 fréquences de la cavité ont un gain non saturé supérieur au niveau des pertes. Donc le laser sera composé de 3 fréquences différentes. Cependant, la fréquence centrale sera maximale.

Limites du modèle :

Nous avons étudiée ici un système à deux niveau d'énergie pour comprendre les phénomènes qui donnent naissance au laser. Cependant le système à 2 niveau ne peut pas remplir la condition d'amplification.

En effet, nous avons fait notre étude à l'équilibre thermodynamique, or la loi de Boltzmann impose que :


$$\frac{N_2}{N_1} = \exp \left(- \frac{E_2 - E_1}{k_B T} \right)$$

Il est impossible d'avoir alors inversion de population. Ce qui est fait en pratique est un pompage par décharge électrique ou avec un autre laser pour exciter les atomes à des niveaux d'énergie supérieur à E_2 . On se place alors dans une situation où on a 3 ou plus niveaux d'énergie. Il est alors possible de faire l'inversion de population.

Par ailleurs, l'utilisation de 2 miroirs plans est délicate car une faible erreur d'angle peut empêcher la création d'une onde stationnaire entre les miroirs. On utilise plutôt des miroirs sphériques (concaves) pour gagner en stabilité.

L'utilisation de miroirs sphériques a des conséquences sur la forme du faisceau laser. On peut traiter les caractéristiques du faisceau gaussien en conclusion ou en ouverture.

Caracteristiques du faisceai laser :

Il faut commencer par rappeler les 2 familles d'ondes que les élèves ont vu, ondes sphériques et planes. Or on a discuté que ces ondes sont non physiques.

Il vaut mieux prendre la cavité et mettre un ou deux miroirs sphériques à leur bords. Les dessiner puis expliquer que on s'attend à que la lumière épouse les bords de la cavité, ce qui nous permet d'introduire le faisceau gaussien avec les mains et dessiner sa forme.

- Faisceau gaussien, symétrie de révolution autour d'un axe.
- premier terme qui correspond à la normalisation, un deuxième terme qui est l'amplitude et un troisième terme qui est la phase.
- L'amplitude a une forme gaussienne dans les plans orthogonales à la direction de propagation z .
- La phase a 3 termes :
 - propagation
 - courbure de la surface d'onde
 - phase de guy qu'on ne traitera pas.

w_0 est le waist, le montrer sur le schéma.

Expliquer avec le calcul du module en $z = 0$ de l'onde, on montre que pour $z = 0$, $w(z) = w_0$ et entre $-w_0$ et $+w_0$ nous avons 86,5% de l'intensité du faisceau.

Si on regarde $w(z)$, pour z bcp + petit que Z_r , nous pouvons approcher $w(z)$ par w_0 , par contre pour $z \gg Z_r$, alors $w(z) \sim z/Z_r$, l'étalement du faisceau augmente linéairement. Ce sont deux conditions limites mais nous permettent de dessiner l'allure du faisceau Gaussien. À noter que Z_r dépend de la longueur d'onde du faisceau !

Faire le dessin 31.4 du dunod pour dessiner la forme du faisceau gaussien.

Discuter brièvement de la courbure pour $z \ll Z_r$. Ce terme fait que les surfaces d'onde sont alors sphériques.

Finir en discutant sur des ODG (voir dunod) ou sur les différentes formes du faisceau en jouant sur la cavité.

Questions posées par l'enseignant

Q1: ça change quoi si les atomes ont plus de 2 nv ?

Dans ce cas le laser peut fonctionner sur plusieurs fréquences, du moment qu'il y a inversion de population. Par exemple, He-Ne : 633nm et aussi raie verte et une orange.

On peut s'en débarrasser en mettant de coef de réflexion du miroir qui dépend de la longueur d'onde.

Q2: tu parle d'inversion de population, pourquoi il faut forcément plus de 2 nv ?

A l'ex therm il a plus d'atome dans le niveau 1 que dans le 2. Il faut pomper pour en mettre dans le nv 2 mais avec les 3 processus, à l'état stationnaire, on aura toujours moins d'atomes dans le niveau 1. Il faut au minimum 3 nv pour que le 3^{ème} puisse pomper des tomes dans le niveau du haut de la transition atomique.

Q3: Tu connais un exemple de laser à 3 nv ?

Laser à rubis (Maiman, 1960)

Q4: Les Laser usuels sont plus à 3, 4 , 5 nv ?

4 niveaux : un en dessous du nv 1 (pour le désexciter rapidement, ce qui facilite l'inversion de population), et un au-dessus du nv 2, pour le pomper.

Q5: Le coef d'émission spontanée, comment il dépend de la fréq de transition ?
A21 peut se calculer en quantifiant le champ, et il dépend de la fréq en ω^3
→ dans le domaine microonde, l'émission spontanée joue un rôle plus faible, donc plus facile à faire une inversion : d'où le maser en premier (1954)

Q6: A21 décroît avec la fréq ?
Il augmente

Q7: historiquement ça date de quand le premier Laser ?
1960 Laser à rubis

Q8 avant le laser, il y avait un dispositif très proche c'est quoi ?
Maser, le même mais dans le domaine microondes.

Q9: Comment s'appelle le laser des TP ? Pq Hélium- Néon ?
La transition est celles du Néon.
Il y a de l'He pour exciter les atomes de Ne.
Atomes d'He excités en collisionnant les e- et percutent les atomes de Ne : l'énergie transmise est pile celle qu'il faut pour exciter les atomes de Ne.

Q10 c'est quoi la transition qui intervient ?
Transition du Néon à 633 nm, et d'autres (moins souvent)

Q11: Puissance de sortie d'un laser Helium néon ? taille du faisceau typique ?
1mWatt, taille de l'autre du millimètre donc puissance surfacique faible.

Q12: et le Zr?
 $= \pi \cdot w_0^2 / \lambda$ donc 1 m, typiquement

Q13: Idée de puissance d'un Laser pour découper une tôle et le type de laser utilisé ?
10 Watt focalisés sur une dizaine de microns. Laser CO2 (à vérifier)

Q14 Dans Virgo c'est un laser continu (P= 28 Watt), Comment ça se fait qu'il ne découpe pas les miroirs dans les expériences ?
Puissance surfacique faible et les miroirs absorbent bcp moins que la tôle

Q15 : Autre exp : le laser Lune. C'est quoi le principe de l'expérience ?
impulsion laser (longueur d'onde ~micron) (laser pulsé) vers les miroirs en coins de cube sur la lune (aller-retour ~2 s)
Mesure de la distance Terre-Lune avec précision de l'ordre du mm à cause de l'incertitude sur la vitesse de propagation dans l'atmosphère

Q16: Waist de quelle taille ? $w_0 = 1\text{m}$ (limité par taille des miroirs du télescope utilisé)
 10^{19} photons par impulsion ; expérimentalement, 1 coup sur 10 en moyenne, 1 photon revient et permet de mesurer la durée d'A/R

Q17: C'est quoi qui donne le spectre d'émission du Laser ?
La courbe de gain non saturé est calculée avant que l'oscillation démarre.
Quand le Laser démarre il y a des transitions supplémentaires qui fait que le gain diminue et atteint en régime stationnaire le niveau des pertes de la cavité.

Q19 : La largeur spectral du Laser He-Ne c'est quoi ? c'est intrinsèque au Néon ?
La largeur spectrale est liée à l'élargissement de la raie par effet Doppler.
Raie finale est une gaussienne de largeur $\Delta f = f_0 \Delta v/c \approx 1.5 \text{ GHz}$
Donc pas directement relié au Neon. T de l'ordre de 600 K dans la décharge.

Q20 : Tu as besoins pour ce calcul de la température, de la raie centrale et de ..?
La masse de l'atome de néon. La largeur de la cavité n'intervient pas.

Q20bis: Largeur de la bande de gain dépend de l'effet Doppler qui dépend de ?
[la vitesse des molécules, qui dépend de la masse](#)

Q21 : Pour le laser He-Ne la largeur est 1,5GHz, combien de modes peuvent osciller ?
Intervalle spectral libre d'environ 700 MHz pour 20 cm de tube laser, donc 2 ou 3 modes

Q22 : Connaissant l'expression des modes du FP, C'est quoi l'ecart en fréquence ?
 $ISL = c/2L$
pour He-Ne ?
750 MHz pour 20 cm

Q24: Pourquoi on ne prend pas un tube de 10 cm pour avoir un seul mode plutôt que 20 cm qui donne 3 modes ?
Le gain est proportionnel à la longueur du tube et il faut au moins 20 cm pour avoir un gain suffisant (densité faible).

Q25 : Tous les laser font 20 cm de long ?
Non. Dans les lasers solides (YAG ou lasers à semi-conducteurs), le milieu est beaucoup plus dense et qq mm suffisent à avoir suffisamment de gain.

Q26 : (expression du mode gaussien) Pourquoi on voit que l'amplitude est en $W_0/w(z)$?
Conservation de la puissance

Commentaires donnés par l'enseignant

Ça manque d'applications, tu passes trop de temps sur des calculs que tu ne maîtrises pas parfaitement.

Il aurait fallu voir plus que juste la forme gaussienne du faisceau comme caractéristiques du laser/

Plan : un des plans possibles ... mais idéalement il faudrait plus de caractéristique du faisceau et plus d'ex d'applications.

Remarques sur le déroulé de la leçon

I.

Il aurait fallu faire un schéma pour les différents processus d'émission

classique , le parallèle avec la chimie : bof ...

il manquait : pour avoir du gain, il faut inversion de population !

Standard

II-

Ce n'était pas super clair, la manière dont tu as amené les choses : dire que la largeur de la courbe dépend bcp du type de laser (largeur dépend de l'effet Doppler)

On comprend pas pq les modes de la cavité jouent un rôle :

(avec le calcul du champ dans la cavité tu peux arriver à montrer en sommant les ondes que amplitude dans la cavité/amplitude d'entrée $= 1/(1-r \cdot \exp(i\phi))$ et ça converge.

S'il y a du gain, l'amplitude est multipliée par le gain et on a le rapport qui devient $\alpha/(1-r_g \cdot \exp(i\phi))$ et ça peut diverger si $rg > 1$.

Ça se produit pour les phases qui congruent à 2π et ça fait apparaître les modes de la cavité.

Les fréquences émises par les lasers sont donc bien les modes de la cavité FP tels que le gain > pertes.

Le calcul avec les puissances et la dérivé de w n'est pas nécessaire.

III-

Comprendre le fonctionnement d'un laser ne nécessite pas de passer par le faisceau gaussien ...

Le mode gaussien n'est pas SI important pour comprendre le laser.

L'expression du faisceau gaussien est totalement débarquée... Il aurait fallu commencer par dessiner le faisceau gaussien en $z=0$ et ensuite comprendre d'où vient $w(z)$:

si au niveau du miroir plan c'est w_0 , plus loin la diffraction (angle $= \lambda/w_0$) fait que la largeur du faisceau $w(z)$ a cette forme.

C'est bien le mode gaussien mais il faut expliquer avec les main d'où ça sort ...

Vous auriez pu faire en plus :

-propriétés des lasers :

la directivité (élargissement contrôlé par la diffraction qui peut être contrôlée)

la puissance (à quel point elle peut être concentrée spatialement, angulairement, en fréquence),

l'accordabilité : quand on a un seul mode (qui dépend de la longueur de la cavité), en changeant la longueur de la cavité, on change la longueur d'onde du laser)

- Applications :

Scientifiques : Laser Terre-Lune, Virgo (Michelson, déplacement des miroirs mesuré avec des lasers), spectroscopie, refroidissement laser des atomes...

Techniques : diodes laser, transport information par fibres optiques, internet, lecteurs CD/DVD...

Médicales : laser en ophtalmologie

Partie réservée au correcteur

Avis général sur la leçon (plan, contenu, etc.)

Le plan proposé n'était pas très original, mais tout à fait justifié pour autant.

Il faut par contre transformer la dernière partie en caractéristiques du faisceau, en lien avec applications :

- Faisceau concentré spatialement → laser Terre-Lune, découpage laser, ophtalmologie
- Fréquence parfaitement définie → spectroscopie, expériences de physique atomique
- Fonctionnement en impulsions très courtes → Terre-Lune, voire peigne de fréquences si vous vous y connaissez un peu
- Possibilité de faire différentes modulations et fréquence très élevée → transfert d'informations
- Possibilité de mettre en forme le faisceau
-

Notions fondamentales à aborder, secondaires, délicates

Fondamentales :

Amplification, coefficients d'Einstein, rétroaction, modes de cavité, inversion de population

Secondaires :

Faisceau gaussien (la notion de forme transverse des modes est importante, mais des lasers peuvent fonctionner avec d'autres formes !)

Lasers à élargissement homogène ou inhomogène

Délicates :

Effets de saturation qui diminuent le gain

Expériences possibles (en particulier pour l'agrégation docteur)

Eviter la modulation d'un faisceau laser par un radiocassette, car c'est vraiment très basique

Interférométrie Michelson avec un bras très très long (avec Michelson de poche) pour illustrer la longueur de cohérence ?

Attention à prendre un HeNe monomode (polarisé), sinon vous allez vers des problèmes liés à la superposition des différentes raies

Bibliographie conseillée

Notes de cours d'Agnès Maître (il y a tt ce qu'il faut)

Les lasers, Dunod, Hennequin, Zehnlé et Dangoisse

Le laser : 50 ans de découvertes, EDP Sciences

Edité par Fabien Bretenaker et Nicolas Treps,

Pour plein d'idées sur les applications

