

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

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) Calcul du gain d'énergie

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

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 facilité 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 freq 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 del' 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?

$=\pi \cdot \omega^2 / \lambda$ 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 \sim 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 ? $w_0 = 1$ 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 $\Delta f = f_0 \cdot \Delta v / c \simeq 1.5$ 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 ?

$\Delta f = c/2L$

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 $\alpha/(1-r \cdot \exp(i\phi))$ 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 dérivée 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 mains 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 Treppe,

Pour plein d'idées sur les applications

