**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 f’requences autour de w0  **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’emmision :**  HYP :  - on considère un materiau avec un seul type d’atomes  - atomes ont **SEULEMENT** deux niveau d’énergies 1 et 2 avec leurs énergies E1 et E2 tq E1<E2 (ceci implique la non dégénérescence).  - Sysètem fermé de N atomes, N1 dans l’état 1 et N2 = N-N1 dans l’état 2.  Comment le materiaux interagis avec le rayonnement EM ?  3 processus :  - absorption, emission stimulée ou induite, emission spontanée  - absorption et emission vous en avez déjà étudiée en Lycée avec l’étude des spectres atomiques, l’emission stimulée qui est à la base du laser est quelquechose de nouveau.  Slide : 3 phénomènes : absorption, emission, emission spontanée  Expliquer les phénomènes d’absorption et emission (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 niveau peut être absorbée par l’atome..  -Absorption : un atome dans l’état N1 absorbe un photon d’énergie égale à E2-E1 et passe dans un l’état excité N2.  - Emission spontanée : un atome dans le niveau 2 se desxcite, independament du champ EM exterieur, vers le niveau 1 en emmetant 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 diréction.  - Emission stimulée : Un atome dans l’état N2 se desexcite par intéraction avec le champ EM. Plus precisement. L’atome en question intéragis avec un premier photon d’énergie égale à la différence entre les niveau E1 et E2 et se desexcite en emmetant un deuxième photon identique au premier photon. Par identique : même énergie, polarisation, diréction et phase.  Le but du laser est d’avoir beaucoup de photons. Le phénomène de cascade qui peut se créer par emission 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 énergetiques. Il aossocie à chaque’un des processus d’interaction entre la lumière et l’atome une probabilité de transition.  **SLIDE**  Pour l’absorption :  - pabs = B12\*vv(w0) ou vv(w0) est la densité spectrale d’énergie volumique du champ EM à la pulsation w0. C’est la même densité spectrale qui a été vu dans le cours sur le corps noir. (cf dunod) . B12 est le coefficient d’einsetin associée à l’absorption  *(rq la densite spectrale est la densité de photons n ayant une fréquence cmprise entre nu+dnu multiplié par leur énergie, cf wikipedia corps noir)*  - pour l’émission stimulée :  - pei = B21\*vv(w0). B21 est le coefficient d’Einstein associée à l’émission stimulée  Pour l’emission spontanée:  - Pes = A21. Ou A21 est le coefficient d’einstein associée à l On insiste, l’emission spontanée ne depend pas du rayonnement EM.  Le principe du laser repose sur une oscillation des atomes entre les états 2 et 1. Nottament, on se doute que c’est la cascade de photons qui provoquent des emission stimulées qui sont à l’origine de l’aplification lumineuse et qui donne naissance au laser.  Or les photons qui provoquent l’emission stiumlée peuvent être abosrbées par des atomes dans l’état 1. Avec les mains, on peut se douter qu’il sera necessaire que on aie plus d’atomes dans le niveau 2 que dans le niveau 1 pour produire plus de photons par emission stimulée que des photons absorbées par émission spontanée.  Nous allons donc nous interesser à l’évolution de la population des atomes dans les états N1 et N2.  **(tout sur slide)**  Si on fait un bilan sur N2, on trouve que  C’est une équation qui fait apparaitre N1 et N2 et qui depend des coefficients d’einstein.  1.3) [**12 :00**]  On se place en regime 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 éablie pour la loi de Planck pour le corps noir.  Alors :  Comme nous sommes à l’équilibre thermique, nous pouvons donc utiliser la loi de Boltzman pour connaitre le rapport entre les deux populations N1 et N2.    Faire ce calcul jusqu’au bout pour faire un calcul au tableau.  **SLIDE comparaison**  Important B12=B21 ! les phénomènes sont symétriques.  **D) Profil de raie**  Jusqu’ici nous avons considérée que seulement des photons ayant une énergie égale à E2-E1 peuvent être absorbées dans notre milieu. Or ceci n’est pas tout à fait juste m en réalité u photon ave une pulsation proche de w0 peut être absorbée. (raison effet doppler, durée de vie 1/A21 pour emission spontanée et relation incertitude temps/énergie).  De même un photon peut être émis par émission spontanée ou provoquer de l’emission induite dans une gamme d’énergie autour de E2-E1 (et donc a une fréquence différente de nu0).  Pour prendre en compte ce phénomène on pondère les probabilités élémentaires des 3 processus par une fonction appelé le profil de raie g(w) qui est normalisé.  Dessiner au tableau :    Quand le profil de raie est beuacoup plus fin que w() alors on retrouve les résultats précédents qui ne prennent en compte que la valeur à w0. 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 reflechissant et un autre miroir qui laisse s’échapper quelques photons mais réflechie la majorité (typiquement reflexion ~ 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 ou 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 interferences 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 absorbées.  La question qu’on peut se poser c’est quelle est la condition pour que notre milieu (l’ensemble d’atomes étudiées) puisse amplifier la lumière ?  On fait un bilan, sur slide.  Or :    **ATTENTION ! L’émission spontanée ne conduit pas à de l’aplification (phénomène aléatoire). on considère alors que les photons émis spontannement sont perdus dans le bilan de puissance.**  Si on introduit dans l’équation bilan les expression des variation des populations on trouve :    Par ailleurs, par définition la vitesse de l’énergie est : v\*w = I. On suppose le milieu suffisament diluée pour que v = c.  Alors :    On définit le gain !  **II.C) Conditions d’amplification**  Ce gain doit être positif pour qu’on aie amplification. En effet, en régime permanent sans pertes:    On trouve alors la condition d’amplification N2 > N1, c’est ce qu’on appelle l’inversion de population.  Par ailleurs il faut aussi que le gain soit superieur 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. Nottamment 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 permier temps que le gain au début de l’amplification est constant et independant de l’intensité lumineuse.  Alors :    On integre par rapport à z avec d la longueur de la cavité. On modelise 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 demarrage.  En outre, plus il y a des photons povennant de l’émission induite, plus difficile il sera de maintenit le critère d’inversion de population.  Un équilibre entre photons crées et photons perdues s’établis une fois que le nombre de photons dans la cavité est suffisament élevée. On parle alors de saturation. La valeur du gain saturée est inferieure 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’alle-retour dans la cavité. Ceci équivaut à que une onde stationnaire s’établisse dans la cavité entre les 2 miroirs. Or l’onde lumineuse est cohérente à cause des propriétées de l’emission stimulée, elle peut donc interferer avec elle-même.  Pour ne pas avoir d’interferences destructives après un grand nombre d’aller-retours dans la cavité, il faut que l’onde lumineuse soit en phase avec elle-même après un allé retour. Cette condition fixe les fréquences des ondes qui peuvent exister dans la cavité  En effet nous avons vu e optique que : Donc  Ces fréquences correspondent aux modes propres de la cavité.  (rq, on diviserait par n si v onde different de c !).  Pour qu’un faisceau laser sorte de la cavité il faut que le gain non saturée soit supérieure aux pertes de la cavité. Nous pouvons comparer la courbe de gain non saturée 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 progil 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 compoé de 3 fréquences différentes. Cependant, la fréquence centrale sera maxilmale.  **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 a 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 Boltzman impose que :    Il est impossible d’avoir alors inversion de population. Ce qui est fait en pratique est un pompage par décharge éléctrique ou avec un autre laser pour exciter les atomes à des niveaux d’énergie superieur à E2. 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 empecher la création d’une onde stationnaure 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 caracteristiques 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 puir 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 therme qui correspond à la normalisation, un deuxièm terme qui ets l’amplitude et un troisième terme qui est la phase.  - L’amplitude a une forme gausienne dans les plans orthogonales à la diréction de propagation z.  - La phase a 3 thermes :  -- propagation  -- courbure de la surface d’onde  -- phase de guy qu’on ne traitera pas.  W0 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) = w0 et entre –w0 et + w0 nous avons 86,5% de l’intensité du faisceau.  Si on regarde w(z), pour z bcp + pett que Zr, nous pouvons approcher w(z) par w0, par contre pour z >> Zr, alors w(z) ~ z/Zr, l’étallement du faisceau augmente lineairement. Ce sont deux conditions limites mais nous permettent de dessiner l’allure du faisceau Gaussien. À noter que Zr depend de la longueur d’onde du faisceau !  Faire le dessin 31.4 du dunod pour dessiner la forme du faisceau gaussien.  Discuter birevement de la courbure pour z << Zr. Ce therme fait que les surfaces d’onde son alors sphériques.  Finir en discutant ssur des ODG (voir dunod) ou sur les differentes 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 3ème 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 omega^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 décroit 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\*w0²/lambda donc 1 m, typiquement  Q13: Idée de puisance 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 ? w0 = 1m (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 Deltaf=f0\*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 ? 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 Wo/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 maitrises 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 role :  (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\*exp(iphi) et ça converge.  S’il y a du gain, l’amplitude est multipliée pas le gain et on a le rapport qui devient alpha/(1-rg\*exp(iphi) ) et ça peut diverger si rg>1.  Ça se produit pour les phases qui congruent à 2pi et ça fait apparaitre 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 w0, plus loin la diffraction (angle = lambda/w0) 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 far 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 |