

LP-30-Laser-ok

Julie Limonet et Louis Usala

12 juin 2022

Bibliographie

- 📖 Cours d'Alain Lerille
- 📖 Figures
- 📖 Leçon sur les faisceaux gaussiens de Yohann Faure
- 📖 Optique, Perez
- 📖 Optique, Houard
- 📖 Les Lasers, Dangoisse
- 📖 Physique quantique Le Bellac

Prérequis

- Leçon de MPSI
- 📖 Fabry Pérot
- 📖 Optique géométrique
- 📖 Cohérence

Niveau

Leçon sur le LASER de niveau L_3 . Explications sur le fonctionnement du LASER puis propagation

Expérience

- * Mesure du profil gaussien en intensité d'un laser et de $w(z)$ par interpolation. On utilise un capteur CCD de type Caliens.
- * largeur spectrale du laser avec un spectro ? mettre des polariseurs
- * augmenter le waist du laser ?

Table des matières

1	Interaction lumière-matière	3
1.1	Coefficients d'Einstein	3
1.2	Bilan de population	4
1.3	Amplification	4
2	Faisceau gaussien	5
2.1	Forme du faisceau	5
2.2	Rayon de courbure complexe	6
2.3	Partie manipulation dont j'ai oublié le nom	7
2.4	Augmentation du Waist	7

3 Révisions	8
4 Questions	9
5 Commentaires	10

Introduction

LASER source très utilisée dans le monde de la recherche, de l'industrie comme dans la vie quotidienne pour sa grande pureté spectrale et sa longueur de cohérence.

1 Interaction lumière-matière

On considère un système à deux niveaux E_1 et E_2 qui peut interagir avec la lumière. Les N atomes du milieu sont répartis entre les deux niveaux en proportion N_1 et N_2 .

1.1 Coefficients d'Einstein

Ces coefficients permettent de caractériser les interactions entre la lumière et la matière. Ces interactions se font suivant différents processus.

Emission spontanée

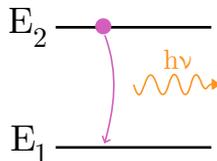


FIGURE 1 – Emission spontanée.

Un atome dans le niveau d'énergie haut peut se désexciter en émettant un photon pour retomber dans le niveau bas. Ceci fait varier la quantité d'atomes excités au cours du temps selon :

$$\left. \frac{dN_2}{dt} \right|_{sp} = -A_{21} N_2 \quad (1)$$

Absorption

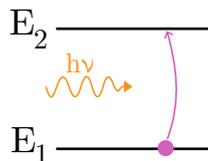


FIGURE 2 – (b) absorption

Un atome dans le niveau bas peut absorber un photon à proximité pour monter dans le niveau haut. Ceci impacte la quantité d'atomes excités comme :

$$\left. \frac{dN_2}{dt} \right|_{abs} = B_{12} u(\nu) N_1 \quad (2)$$

Emission stimulée

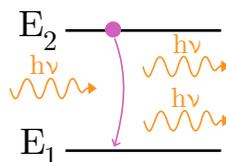


FIGURE 3 – Emission stimulée.

Ce phénomène est purement quantique. Au passage d'un photon, un atome excité peut émettre un photon parfaitement identique au photon existant et retomber dans le niveau bas. Ce phénomène est utile car il permet de créer

des photons cohérents de même direction, ce qui est la base d'une source directionnelle et résolue spectralement. La variation de population associée est :

$$\left. \frac{dN_2}{dt} \right|_{st} = -B_{21} u(\nu) N_2 \quad (3)$$

Lorsque tous ces phénomènes se déroulent en même temps, on peut déduire des propriétés du milieu.

1.2 Bilan de population

On a finalement

$$\frac{dN_2}{dt} = -A_{21}N_2 - B_{21}u_\nu N_2 + B_{12}u_\nu N_1 \quad (4)$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \frac{dN_1}{dt} \quad (5)$$

Avec la conservation du nombre total d'atomes

$$N_1(t) + N_2(t) \hat{=} N \quad (6)$$

On suppose que le milieu est à l'équilibre thermodynamique, ce qui impose

$$\frac{dN_1}{dt} = \frac{dN_2}{dt} = 0 \quad (7)$$

ainsi que la répartition en population entre les deux niveaux :

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{\exp \frac{-E_2}{kT}}{\exp \frac{-E_1}{kT}} = \exp \left(\frac{-h\nu}{kT} \right). \quad (8)$$

La répartition spectrale des photons est donnée par la loi de Planck :

$$u(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{\exp \left(\frac{h\nu}{kT} \right) - 1}. \quad (9)$$

$$\begin{aligned} u_\nu(T) &= \frac{8\pi h\nu^3}{c^3} \frac{1}{e^{h\nu/k_B T} - 1} \\ &= \underbrace{\frac{8\pi\nu^2}{c^3}}_{\text{densité de mode de vibration}} \underbrace{\frac{h\nu}{e^{h\nu/k_B T} - 1}}_{\text{nombre de photons dans ce mode}} \underbrace{h\nu}_{\text{énergie d'un photon}} \end{aligned} \quad (10)$$

En notant le préfacteur $F(\nu)$ et en injectant tout ça dans l'équation on trouve :

$$B_{1,2} = B_{2,1} \hat{=} B \quad (11)$$

$$A_{2,1} = B F(\nu) \quad (12)$$

Ainsi la probabilité de l'émission spontanée est la même que celle de l'absorption, et on a trouvé un facteur les liants à l'émission spontanée.

1.3 Amplification

La variation de photons d'intérêt dans le milieu est finalement donnée par

$$\delta N_{\text{photon}} = B N_2 u(\nu) dt - B N_1 u(\nu) dt = B (N_2 - N_1) u(\nu) dt. \quad (13)$$

Il est nécessaire d'avoir plus d'atomes dans le niveau haut, d'où la nécessité de contrer les pertes par une inversion de population. **Exemple du laser Helium/Néon** : [?] p.236 [?] p.242

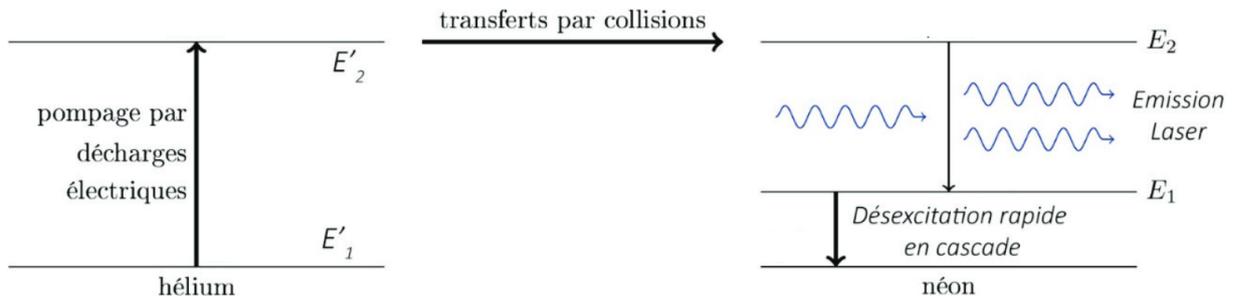


FIGURE 4 – Inversion de population He/Ne

Cette méthode permet d'amplifier le faisceau mais il n'est pas suffisant pour avoir de grandes puissances. Pour ce faire, il faut utiliser une cavité Fabry-Perot.

Rôle de la cavité

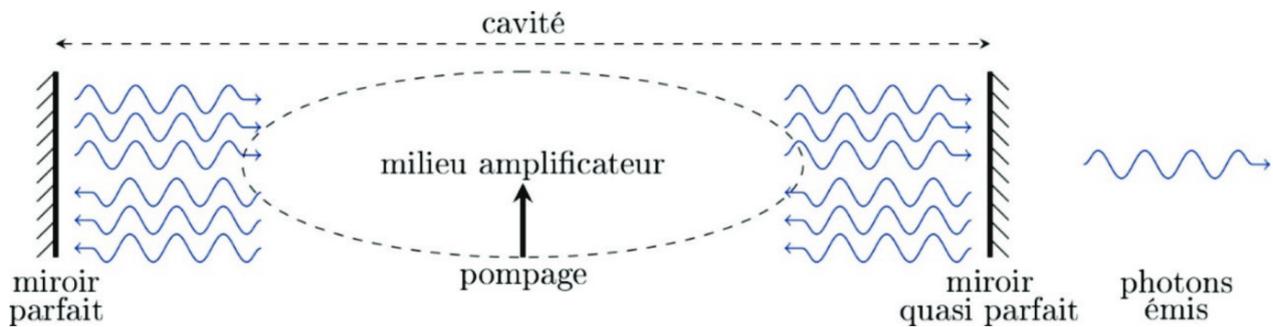


FIGURE 5 – Cavité Laser

Faire un schéma. On amplifie les ondes de fréquence

$$\nu_n = \frac{nc}{2L}. \quad (14)$$

Ainsi la cavité a le rôle de sélectionner et d'amplifier la fréquence du laser. On a déterminé comment le LASER émet de la lumière cohérente dans une direction donnée. Quid de la lumière une fois sortie de la cavité ?

2 Faisceau gaussien

[?] p.33



FIGURE 6 – schéma naïf

On s'attend, comme observé, à avoir un faisceau à peu près linéaire. Mais de manière précise, quelle forme prend ce faisceau ?

2.1 Forme du faisceau

[?] p.37 Hypothèses

- approximation paraxiale : $\frac{dr}{dz} = \tan\theta \approx \theta$

Remarque

On va rentrer dans une partie très calculatoire... On peut peut-être faire des calculs plus simples à suivre car classiques (équation de propagation avec les équations de Maxwell) et ne pas faire la résolution. On obtient l'équation parabolique paraxiale (elle fait penser à schrodinger).

Le faisceau satisfait l'équation de Helmholtz (en cylindrique)

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (rE(r, z)) - 2ik \frac{\partial E}{\partial z}(r, z) = 0 \quad (15)$$

D'où on tire (après quelques hypothèses) une expression du champ électrique :

$$E(r, z) = A(z) \underbrace{\exp\left\{\frac{ikr^2}{2R(z)}\right\}}_{\text{front d'onde}} \underbrace{\exp\left\{\frac{-r^2}{\omega^2(z)}\right\}}_{\text{variation gaussienne}} \quad (16)$$

L'intensité correspondante est

$$I(r, z) = I_0 \exp\left[-\frac{2r^2}{W^2(z)}\right]. \quad (17)$$

On a fait apparaître ici les grandeurs $R(z)$ et $W(z)$ qui correspondent respectivement au rayon des fronts d'onde et à l'extension radiale du faisceau.

2.2 Rayon de courbure complexe

On définit le rayon de courbure complexe comme :

$$\frac{1}{Q(z)} \hat{=} \frac{1}{R(z)} - \frac{2i}{k\omega^2(z)} \quad (18)$$

Et on peut ainsi écrire le champ comme :

$$E(r, z) = A(z) \exp\left[-i \frac{kr^2}{2Q(z)}\right] \quad (19)$$

En l'injectant dans l'équation de Helmholtz on trouve la condition sur Q :

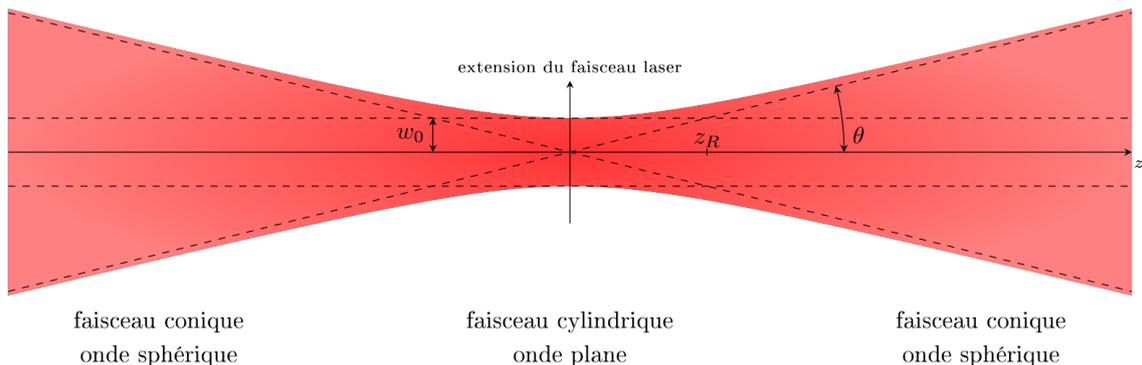
$$\frac{dQ}{dz} = 1 \quad (20)$$

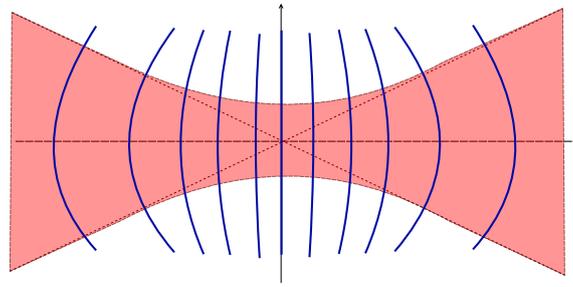
Ce qui donne donc

$$Q(z) = z + iz_R \quad W_0 = \sqrt{\frac{z_R \lambda}{\pi}} \quad (21)$$

$$W(z) = W_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2} \quad (22)$$

$$R(z) = z \left[1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2\right] \quad (23)$$





2.3 Partie manipulation dont j'ai oublié le nom

Expérience

pour avoir un faisceau gaussien

On place un laser He-Ne et un épurateur à sa suite. Ils pointent sur une lentille et un capteur CCD à la suite (un polariseur et un analyseur sont intercalés à la suite pour diminuer l'intensité et ainsi évite que le capteur ne sature). En déplaçant ce dernier dans la direction de propagation pour tracer l'intensité de l'onde dans chaque coupe à z fixé. L'invariance par rotation (coordonnées cylindriques) fait que l'utilisation du capteur qui prend juste une "ligne" est pertinente. On extrait le fichier text de cadiens, on traite les données à l'aide d'un programme python sur *Jupiter Note book* (c'est stylé) On peut faire une interpolation de la courbe avec le profil prévu pour les différentes coupes. On trouve ainsi une fonction $w(z)$ chaque point correspondant à un fit. On peut ensuite faire un dernier ajustement pour remonter au waist w_0 . On trouve un waist de quelques micro-mètres.

On observe d'une part la forme gaussienne de l'intensité à z fixé. En récupérant les données pour différents z et on fit par l'expression de l'intensité afin d'obtenir l'extension spatiale en fonction de z et ainsi le waist du laser (voir programme).

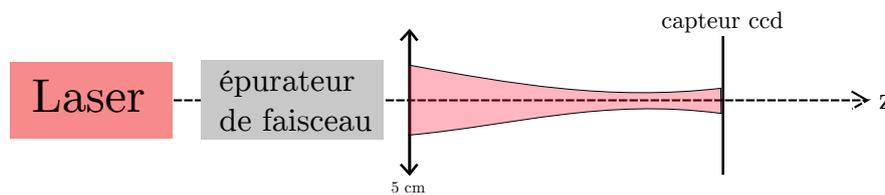


FIGURE 7 – Inversion de population He/Ne

2.4 Augmentation du Waist

Le LASER est un dispositif très utile de par sa directionnalité, sa cohérence et sa puissance. Cela permet d'envoyer des faisceaux à grande distance. Cela dit, si l'énergie se répartit au fur et à mesure sur de grands angles à cause de la divergence du faisceau, on perd cet intérêt. Comment remédier à ce problème ?

Remarquons que l'angle que fait le faisceau à grande distance est d'autant plus grand que le Waist est petit. En effet on diverge en :

$$y = z \frac{w_0}{z_r} = z \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (24)$$

$$\tan \theta \approx \theta = \frac{w_0}{z_R} = \frac{\lambda}{\pi w_0} \quad (25)$$

Ainsi si on augmente le waist, on réduit la divergence. On peut faire ça grâce à un montage afocal. On peut faire des approximations pour avoir l'expression suivant.

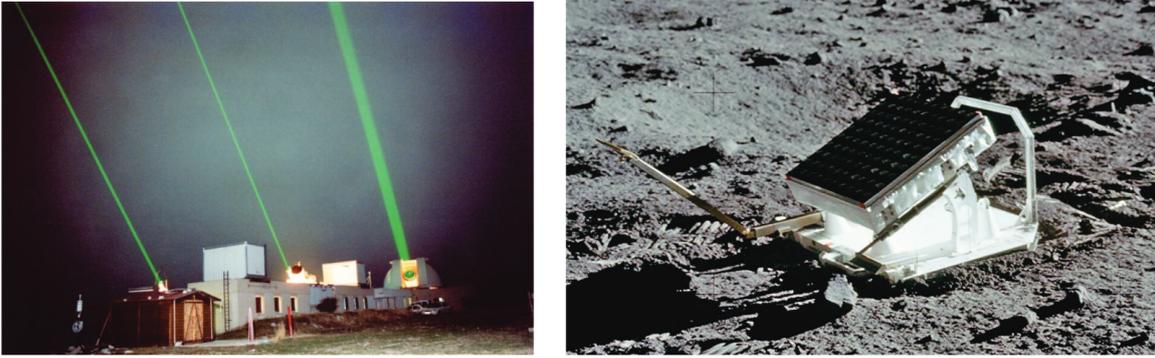


FIGURE 8 – Laser et capteur sur la lune

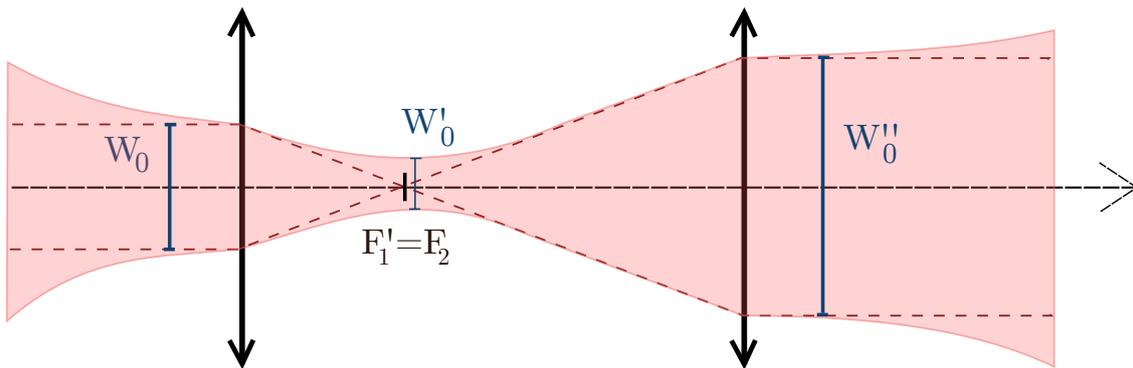


FIGURE 9 – Montage afocal pour l'augmentation du waist

On peut montrer que $W''_0 = W_0 \frac{f_2}{f_1}$

C'est intéressant par exemple si on cherche à mesurer une distance terre-lune. On envoie un faisceau aller-retour (avec un miroir placé sur la lune (si c'est très divergent, l'intensité en sortie est très faible) (cf. [pour aller plus loin](#)).

3 Révisions

Le laser de nos jours Les lasers s'est peu à peu imposé dans notre vie sans que nous en soyons forcément conscients ? Incontournable dans la fabrication d'objets aussi divers que les smartphones, les écran LCD, les cellules photovoltaïques ; il est tout aussi indispensable pour le fonctionnement d'internet et jour un role crucial dans la médecine, on les trouve aussi dans les laboratoires de la polices scientifiques, dans les usines agroalimentaire, sur Mars. Il existe diffénrets types de laser :

- laser à gaz
- laser à fibre
- laser à état solide
- laser à semi-conducteur
- laser à plasma

Malgré la production massive de laser, ce dernier fait l'objet de recherches intenses pour atteindre des puissances plus élevées, des impulsions plus courtes, ou tout simplement de nouvelles longueurs d'onde.

Historique

- 1917 : Einstein, article dans lequel il évoque l'interaction lumière-matière par l'émission spontanée et l'absorption ET PAR L'EMISSION STIMULEE parce que les deux premier ne suffisent pas
- 1954-1955 : une équipe américaine et une russe **MASER** : microwaves amplification by stimulated Emission of Radiation ; pourquoi des micro-ondes ? pour les radars pour la guerre donc on réutilise le matériel ; le premier maser fut celui avec de l'ammoniac.
- 1954 : faire des lasers de longueurs d'onde plus courtes mais il faut des cavité plus courtes... compliqué

- 1958 : Gordon Gould article dans PHYSICAL REVIEW : c'est l'idée de la cavité Fabry Péro
- 1960 : premier faisceau laser par l'américain Theodore Maiman

La largeur spectrale de la lumière du soleil est de 10^{15} Hz de 350nm à 2400nm. Pour les LED on a $\Delta\nu = 10^{13}$ Hz ; même les raies spectrales du mercure par exemple ont une largeur spectrale de largeur $\Delta\nu = 10^{10}$ Hz. Pourquoi cette élargissement spectral ? Principalement due à la non-cohérence de la source lumineuse. La largeur spectrale d'un laser est au contraire très étroite puisqu'elle est très cohérente : $\Delta\nu = 1 - 100$ Hz !! Il s'agit d'une source que l'on peut considérer comme quasi-monochromatique par rapport aux autres sources de lumière. La largeur spectrale des lasers peut être diminué du aux vibrations mécanique, à la dérives thermiques, la réinjection incontrôlée ou accidentelle d'une partie de l'onde émise ... mais elle est surtout limitée par le **BRUIT QUANTIQUE** qui vient de l'émission spontanée. Il s'agit d'un processus aléatoire qui provoque des fluctuations d'amplitudes et de phase de l'onde. On peut descendre à une largeur de $\Delta\nu = 10^{-3}$ Hz si on s'affranchit de toutes les contraintes techniques sauf la fluctuation de phase (c'est pour un laser He-Ne).

L'éclairement du soleil sur la Terre est de l'ordre de 1000W/m^2 . Mais ce n'est rien vis à vis de ce qu'un laser peut fournir : un pointeur laser de 1mW à une section de 1mm^2 donc une puissance de 1000W/m^2 donc du même ordre de grandeur que le soleil pour un laser de puissance moyenne. On peut dépasser la puissance pour certains laser impulsif qui s'élève à 10^{26} W/m²!!!!!!

Il existe la spectroscopie laser ?? On peut avoir des sources cohérentes **NATURELLES**. En astronomie, au alentour des étoiles très jeunes ou dans l'enveloppe circumstellaire d'étoile en fin de vie, on peut identifier des masers astronomiques. Dans l'atmosphère de Vénus et Maser, on a détecté des lasers de CO₂. On les définit vis à vis de leur puissance et de leur largeur spectrale caractéristique. Par contre cette fois ci, il s'agit bien d'amplificateur et non d'oscillateur comme c'est dans les laser que l'on connaît. ODG différents types de laser : [?] p.254 On trouve bcp d'applications au laser dans le [?] p.259

4 Questions

- l'intérêt du laser : cohérence, peut-tu aborder la notion de cohérence ? *Modèle des trains d'onde : photon émis avec une longueur particulière L_c de 1m pour un laser*
- Préciser les différents types de cohérence. Cohérence spatiale ? *les points qui émettent sont chacun incohérents entre eux. Donc les figures d'interférences se superposent entre elles. Ça brouille vite pour une grande différence de marche*
- quelle est la dynamique dans la cavité au niveau des population au démarrage du laser ? avant le régime établi. *dynamique du premier ordre ? Quand on allume un laser, il faut attendre quatre secondes avant qu'il s'allume, pourquoi ? on a différents processus qui ont chacun un temps caractéristique qui limite la mise en place d'un régime permanent*
- pourquoi on a besoin du Néon pour ce laser ? *c'est lié à l'inversion de population, si l'émission spontanée est plus rapide que celle stimulée donc on prend un système à 4 niveaux pour avoir un processus cyclique. c'est le problème des lasers de haute énergie.*
- connais-tu d'autres moyens de pompage ? *laser rubis ? on attendait pompage optique*
- laser solide (laser rubis) , différence fondamentale avec les laser gazeux (He/Ne) ? *c'est pas cool comme question Dans un solide il y aura des phonons*
- photon émis selon z c'est forcément ceux émis par émission stimulée ? *cavité les sélectionne donc oui, attention émission spontanée n'est pas toujours négligeable il y a des laser où c'est pas un problème ? faire des lasers dans le bleu c'est compliqué. On prend un laser rouge et on ajoute un élément pour diviser la longueur d'onde par deux*
- les coefficients d'einstein dépend de la longueur d'onde. A grandit en ν^3
- Sans cavité pas de puissance ? Juste l'inversion de population c'est pas suffisant d'où la cavité Fabry Péro. Est-ce que tu peux définir la finesse de la cavité Fabry Péro ? Écart entre deux pics défini comme "l'intervalle spectral libre". quelle est l'ordre de grandeur de la largeur entre deux pics ? $\frac{c}{2L} = 10^{10}$ voir schéma
- la hauteur et la largeur sont elles fait au hasard sur ton dessin ? quelle est l'origine de la largeur de pic ? *effet doppler, phonons, collisions* Dans le schéma pour les transitions entre E_1 et E_2 , est-ce que la fréquence de transition doit être parfaitement réglée pour que l'on puisse avoir une transition ? *Il a des processus quantiques (Heisenberg ?) qui donnent une largeur naturelle à l'émission.*

- Il y a plusieurs pics dans la fonction de transfert de la cavité F.-P., quelle est l'implication pour la distribution spectrale de la source? *On peut avoir d'autres modes que le faisceau gaussien.* Comment sélectionne-t-on alors un unique mode? *C*
- a quoi sert l'épurateur? *pour s'affranchir des speckles, on fait de la strioscopie, on sélectionne le centre du plan de fourier, on sélectionne la composante de fréquence nulle. l'origine des speckles = impuretés* sur le murs on en aura plein alors que la porte il y en aura peu, pourquoi? *milieu granulaire plus de diffusion*
- quelle est la puissance du laser? quelle puissance peut on atteindre avec la laser?
- est ce la lumière est polarisée à la sortie du laser? *oui c'est souvent le cas*
- quelle est le rôle de la lentille? *Cela nous permet d'avoir un autre waist plus grand. C'est d'ailleurs ce waist qu'on a déterminé et pas le waist du laser en lui-même.*
- est ce que tu es sûr que c'est un faisceau gaussien et pas une fonction de Bessel (figure de diffraction? lié aux éléments optiques)? comment reconnaître le faisceau Gaussien? *le tracé en \ln , on a une parabole de manière évidente*
- Raison pour un tel écart sur la figure de diffraction? *On a peut-être pas le même laser. Alignement différent*
- quelle sont les capteurs sur la lune? *miroir des miroirs plans? non, le réflecteur lunaire est un système catadioptrique*

5 Commentaires

- Quelques confusion dans les notations. Oubli de l'intensité
- Manip bien choisie. La forme est bonne.
- prendre une manip qualitative plus que quantitative (plus pour les montage), montrer la cavité d'un laser en introduction par exemple
- Jolidon bleu - aller voir sur la caractérisation d'un laser. Vidéo qui fait bouger la largeur d'une cavité, on voit les modes qui bougent.
- Tout le calcul de la cinétique des niveaux + tous les calculs du faisceau gaussien. Ça fait beaucoup. Ça se discute pour parl
- la conclusion c'est pas ouf. Il faut essayer de faire quelque chose de peu plat. Apporter une synthèse qui soit nouvelle : bilan des
- Intro : avantage des lasers : directifs monochromatique et cohérent : prisme d'expliquer pourquoi? monochr parce qu'on a des phénomènes quantiques. Puis cohérent ... Et directif parce que faisceau gaussien. CCL : super propriétés et on a expliquer pourquoi, finir par parler d'applications peut-être.
- Coefficients d'Einstein = passage obligé. Notions dans le Danguas bien utiles. Parler de flux de photons qui crée une déplétion et donc s'oppose à l'inversion de population. Parler de deux phénomènes qui s'opposent.
- Faisceau Gaussien : vraiment pas passionnant. Difficile à présenter sans calculs longs et, il faut le dire, un peu chiant. Il faut prendre un peu de recul : montrer le phénomène en projetant un laser contre un mur : but = expliquer pourquoi on a ça.
- Quand on a fait toute la liste des processus quantiques, question du démarrage du laser. Comment faire le lien avec le Laser : aller voir sur tout est quantique pour comprendre comment le laser démarre. On a une émission spontanée dans la bonne direction qui permet le déclenchement vers une émission stimulée (quelque chose de très visuel). [vidéo démarrage laser](#)
- Autres possibilités : Passer plus de temps sur la cavité. Le jury attend une petite application. S'il y a des choses que l'on veut éviter de développer
- On peut traiter avec des niveaux dégénérés - peut-être un continuum??
- Rendre ça plus visuel
- Lien avec les applications à faire le long de la leçon c'est bien. Une sorte de fil conducteur pour comprendre en quoi ces propriétés sont intéressantes.

- Notion de cohérence - attention spatiale et temporelle
- importance de trois niveaux. Un processus pour une inversion : c'est le troisième niveau. Il faut être tranché : l'émission spontanée c'est la plaie du laser que l'on veut éviter à **tout prix**
- Loi de Planck - leçon du corps noir. On a juste besoin d'un équilibre thermique local pour que ça marche
- On part d'un équilibre thermo local dans plac pour trouver une relation sur les coefficients d'einstein. Est-ce que hors équilibre c'est vrai? *oui par ce que ce sont des propriétés intrinsèques aux atomes!*
- attention aux sélections des modes du laser : la cavité sélectionne la fréquence. P 363 du fruchard lidon : annexe sur les
- Speckle : on a des problèmes de source mais aussi de grains sur la surface : chaque grain est cohérent et interfère à distance (=diffraction)
- chaque mode a une polarisation aléatoire mais fixe après que le mode ait été choisi.
- Il y a des lasers avec des angles de Brewster pour donner une polarisation fixe
- Houard d'optique est très complet sur les lasers. Tableau récapitulatif de tout ce qu'il se fait aujourd'hui, notamment des ordres de grandeur.
- Largeur spectrale intrinsèque : est-elle reliée à heisenberg (aller voir le fruchard) : durée de vie finie de l'état. Les collisions diminuent ce temps de vie (cf largeur de shallow townes, processus lorentzien)
- On peut sélectionner un diaphragme dans le plan de fourier pour couper court aux hautes fréquences et garder le mode gaussien uniquement