Physique du LASER

Exercices

1. LASER Ar

Une cellule de volume $V = 50$ cm^3 est remplie d'argon à une pression de 20,3 Pa et une température de 0^{o}C. On considère que tous les atomes sont dans leur état fondamental. Une lampe flash entourant l'échantillon excite 1% des atomes dans un même état excité de durée de vie $\tau = 1,4.10^{-8}$ s. Quel est le débit maximum de photons émis par le gaz (ce débit diminuant dans le temps). On ne considérera que l'émission spontanée et que le gaz est parfait.

Données : $R = 8,31$ J.K^{-1}.mol^{-1} ; $\mathcal{N}_A = 6,02.10^{23}$ mol^{-1}.

2. Coefficients d'Einstein

On considère une population d'atomes à deux niveaux $E_1 < E_2$. Cette population est à l'équilibre thermique avec un rayonnement de densité volumique et spectrale d'énergie $u(\nu)$.

1. Écrire les équations vérifiées par $\dfrac{\mathrm{dN}_1}{\mathrm{dt}}$ et $\dfrac{\mathrm{dN}_2}{\mathrm{dt}}$ en fonction des coefficients d'Einstein.
2. En déduire une relation entre N_1 et N_2 en régime permanent.
3. Les atomes étant à l'équilibre thermique à la température T, un résultat de la physique statistique qu'on admet, implique que :
$$\frac{N_1}{N_2} = \exp\left(\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right)$$
où k_B est la constante de Boltzmann et T la température. On donne aussi la loi de Planck du corps noir adaptée aux notations de l'exercice :
$$u(\nu) = \frac{8\pi h\nu^3}{c^3}\frac{1}{\exp\left(\dfrac{h\nu}{k_B T}\right) - 1}$$
En déduire que $B_{12} = B_{21}$ et $A_{21} = \dfrac{8\pi h\nu_{12}^3}{c^3}B_{12}$.
4. On souhaite comparer les deux phénomènes d'émission (spontanée et stimulée) en calculant le rapport $\mathrm{dN}^{\mathrm{stim}}/\mathrm{dN}^{\mathrm{spont}}$.
   (a) Rappeler l'expression du nombre de photons $\mathrm{dN}^{\mathrm{stim}}$ produits par émission stimulée pendant dt, ainsi que le nombre de photons $\mathrm{dN}^{\mathrm{spont}}$ produits par émission spontanée.
   (b) On considère une expérience dans laquelle le rayonnement est à l'équilibre thermique. Il vérifie alors la loi de Planck. Pour un matériau à température ordinaire $T = 290$ K, calculer la longueur d'onde minimale à partir de laquelle il y a prédominance de l'émission stimulée.

   On donne $k_B = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J.K^{-1} et $h = 6,62 \cdot 10^{-34}$ J.s.

3. Inversion de population d'un laser à trois niveaux

Dans un laser à trois niveaux, une famille d'atomes possède trois niveaux d'énergie $E_1 < E_2 < E_3$. Une pompe excite les atomes du niveau 1 au niveau 3 avec un taux W exprimé en nombre d'excitations par atome excitable et par unité de temps. Les atomes au niveau E_3 se désexcitent spontanément vers le niveau E_2, avec un taux M exprimé en nombre de désexcitations par atome excité et par unité de temps. Cette désexcitation se fait par un processus non radiatif.

La population de photons d'énergie $h\nu_{23} = E_3 - E_2$ et $h\nu_{13} = E_3 - E_1$ est trop faible et trop instable pour envisager des absorptions ou des émissions stimulées entre le niveau E_3 et les autres.

Entre les niveaux E_1 et E_2, les coefficients d'Einstein sont les mêmes que pour un système à deux niveaux.

1. Établir le système d'équations différentielles entre $N_1(t)$, $N_2(t)$ et $N_3(t)$.
2. Écrire ces équations en régime permanent.
3. En déduire l'expression de $N_2 - N_1$ en fonction de N_3. On utilisera que $B_{21} = B_{12}$.
4. Obtenir alors le taux de pompage minimal W_{min} permettant de réaliser la condition d'inversion de population, en fonction des coefficients d'Einstein.

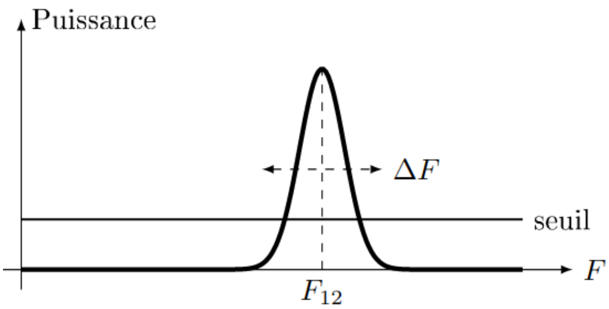
4. Sélection de modes laser

La cavité optique d'un laser sélectionne les fréquences $f_n = nf_1$. Ce laser est fabriqué à partir d'un système atomique à deux niveaux E_1 et $E_2 > E_1$.

1. Dans un cas idéal, donner l'expression de l'unique fréquence F_{12} que le laser parfaitement monochromatique peut émettre.
2. On peut déterminer les fréquences sélectionnées par la cavité optique de longueur a en considérant que ce sont les mêmes que celles des modes propres de la vibration d'une corde de longueur a fixée à ses deux extrémités.

   En déduire f_1. On pose maintenant $\Delta f = f_{n+1} - f_n = f_1$, appelé intervalle spectral libre.
3. À quelle condition le laser parfaitement monochromatique ainsi créé peut-il fonctionner ?
4. On abandonne ce modèle idéal en prenant en compte les données suivantes :
   — les fluctuations (thermiques donnant lieu à de l'effet Doppler, mais aussi quantiques) provoquent un élargissement spectral de largeur ΔF de la fréquence émise par émission stimulée ;
   — les pertes (prise en compte de l'émission spontanée, fuite optique, présence d'atomes parasites...) définissent un seuil énergétique au dessous duquel le bilan énergétique absorption-émission conduit à une atténuation du signal.

   On donne le graphique ci-dessous représentant le profil spectral de la puissance émise par émission stimulée.

   Montrer graphiquement que la sélection fréquentielle opérée par la cavité peut conduire à un laser polyfréquentiel (on dit multimode), monofréquentiel (monomode) ou éventuellement non émissif. Donner la relation entre ΔF et Δf dans chaque cas.
5. Pour un laser hélium-néon, la fréquence centrale d'émission a pour longueur d'onde dans le vide $\lambda_{12} = 632,8$ nm. On assimile la raie élargie à un profil rectangulaire de largeur $\Delta F = 2,0$ GHz.
   La cavité laser a une longueur $a = 20$ cm. Donner le nombre de modes de ce laser.

5. LIDAR

Le LIDAR est un instrument de sondage atmosphérique utilisant un rayonnement LASER. Cette technique permet de sonder l'atmosphère sur quelques kilomètres d'altitude.

1. On envisage d'utiliser un laser YAG de longueur d'onde $\lambda_0 = 1,06$ μm et de waist $0,40$ mm. Situer ce rayonnement dans le spectre électromagnétique.
2. On rappelle quelques grandeurs caractéristiques du faisceau laser :
   — $w(z) = w_0\sqrt{1+\left(\dfrac{z}{z_R}\right)^2}$ qui est appelé le rayon du faisceau.
   — $z_R = \dfrac{\pi\omega_0^2}{\lambda}$ est appelée longueur de Rayleigh.
   — $\theta = \dfrac{\lambda}{\pi\omega_0}$ est appelée divergence angulaire.

   Déterminer la divergence angulaire et la longueur de Rayleigh de ce faisceau. Déterminer la largeur du faisceau à 1500 m d'altitude en négligeant tout phénomène d'absorption et de diffusion atmosphérique. Expliquer pourquoi il est nécessaire de collimater le faisceau si l'on souhaite l'utiliser pour des sondages atmosphériques.
3. Ce faisceau arrive sur un système afocal constitué d'une lentille divergente de focale -20 mm, placée à 150 mm du waist du faisceau incident, et d'une lentille convergente de focale 200 mm.
   (a) Faire un schéma du dispositif optique en faisant apparaître les foyers objet et image de chaque lentille. Quelle distance sépare les deux lentilles ? Pourquoi la première lentille est-elle choisie divergente ?
   (b) Caractériser le faisceau gaussien émergent (waist, longueur de Rayleigh et divergence angulaire).
   (c) Calculer la largeur du faisceau à 1500 m d'altitude. Commenter.