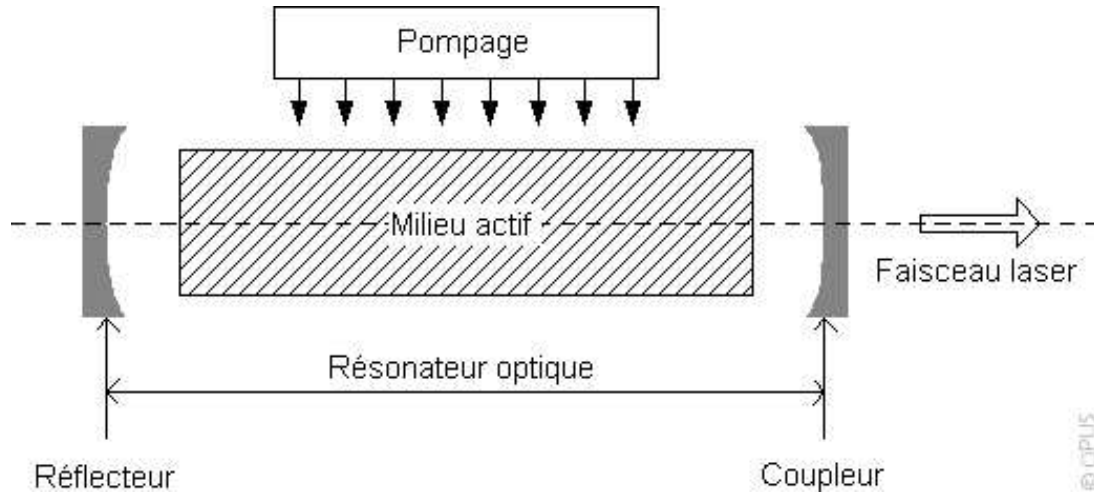


# PRINCIPE DE FONCTIONNEMENT D'UN LASER



**Figure 1** – Principe de fonctionnement d'un Laser.

Il s'agit ici d'étudier l'interaction entre un système à deux niveaux d'énergie et un rayonnement électromagnétique. Pour fixer les idées, on considère qu'il s'agit d'un gaz d'atomes ou de molécules ayant deux niveaux d'énergie  $E_1$  et  $E_2$  tels que  $E_2 \geq E_1$ .

Si l'atome se trouve dans le niveau supérieur  $E_2$ , il peut redescendre spontanément dans le niveau inférieur  $E_1$  en émettant un photon de fréquence  $\omega_{21}$  :  $\hbar\omega_{21} = E_2 - E_1$ . Cette *émission spontanée* se produit avec une probabilité indépendante du temps. En d'autres termes, le nombre  $dN_{2 \rightarrow 1}$  d'atomes qui descendent de  $E_2$  à  $E_1$  par émission spontanée pendant  $dt$  s'écrit  $dN_{2 \rightarrow 1} = A_{21}N_2(t)dt$  où  $N_2(t)$  est le nombre d'atomes dans le niveau  $E_2$  à  $t$  et  $A_{21}$  est le coefficient d'émission spontanée. Ce dernier est indépendant du temps : c'est une caractéristique de l'atome considéré et de ses niveaux  $E_1$  et  $E_2$ .

Supposons maintenant que le gaz soit soumis à un rayonnement électromagnétique monochromatique de fréquence  $\omega_{21}$  et de densité d'énergie  $W$ . Un atome se trouvant dans le niveau  $E_1$  peut être excité et passer dans l'état  $E_2$  en absorbant un photon de fréquence  $\omega_{21}$ . On peut à nouveau montrer que le *coefficient d'absorption*  $B_{12}$  défini par  $dN_{1 \rightarrow 2} = B_{12}N_1(t)Wdt$  est une caractéristique de l'atome considéré et des niveaux  $E_1$  et  $E_2$ .

L'expérience montre par ailleurs que la présence du rayonnement monochromatique produit un phénomène inverse du précédent, l'*émission induite*. En d'autres termes, le champ électromagnétique stimule les atomes du niveau  $E_2$  qui retombent dans le niveau  $E_1$  en émettant un photon de fréquence  $\omega_{21}$ . Le *coefficient d'émission induite*  $B_{21}$  défini par  $dN_{2 \rightarrow 1} = B_{21}N_2(t)Wdt$  est une caractéristique de l'atome considéré et des niveaux  $E_1$  et  $E_2$ .

Les trois coefficients  $A_{21}$ ,  $B_{21}$  et  $B_{12}$  sont appelés *coefficients d'Einstein*. Si les niveaux  $E_1$  et  $E_2$  sont non dégénérés, on peut montrer que  $B_{12} = B_{21}$ , et  $A_{21}/B_{21} = \hbar\omega^3/\pi^2c^3$ . Dans la suite, on renomme  $A = A_{21}$  et  $B = B_{21} = B_{12}$ .

## Equilibre radiatif du système à 2 niveaux en présence d'un faisceau électromagnétique

On éclaire un gaz de  $N$  molécules par un faisceau monochromatique à la fréquence  $\omega = (E_2 - E_1)/\hbar$  de densité d'énergie  $W$ . Ecrire l'équation d'évolution du nombre de molécules  $N_1$  et  $N_2$  dans l'état fondamental  $E_1$  et l'état excité  $E_2$  respectivement. Calculer  $N_1$  et  $N_2$  en régime stationnaire en fonction de  $N$ ,  $W$  et  $W_S = A/B = \hbar\omega^3/\pi^2c^3$ . Discuter les cas  $W \ll W_S$  et  $W \gg W_S$ . Y-a-t-il absorption à forte intensité ?

## Atténuation du faisceau électromagnétique

On cherche maintenant à évaluer l'atténuation d'un faisceau de faible intensité se propageant suivant  $x$  dans un gaz. On note  $I(x)$  l'intensité locale du faisceau <sup>1</sup>. Faire un bilan d'énergie sur un volume élémentaire  $V$  de section  $S$  et de longueur  $dx$ . En déduire l'équation d'évolution de  $I(x)$  en fonction de la puissance absorbée  $P_{abs}$ . On se place en régime stationnaire. Expliciter en particulier le terme de puissance absorbée en fonction de  $\hbar$ ,  $\omega$ ,  $N_1$ ,  $N_2$ ,  $B$ ,  $W$ ,  $V$ . On pourra négliger l'émission spontanée qui ne contribue pas à renforcer le faisceau. Comment rendre cette puissance absorbée négative ? Montrer que, à l'équilibre thermodynamique, le gaz est absorbant. Montrer finalement que pour  $I \ll cW_S$ ,  $I(x) = I(0) \exp(-\alpha x)$  et donner l'expression de  $\alpha$ .

## Amplification du faisceau électromagnétique

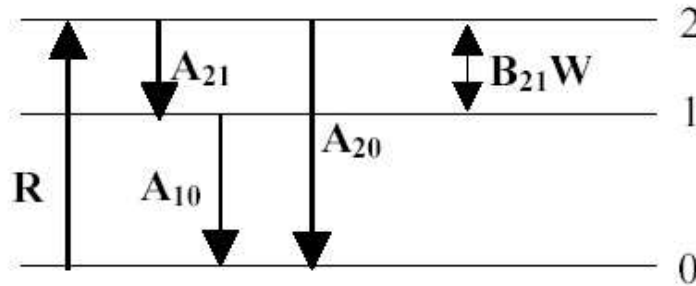


Figure 2 – Système à trois niveaux d'énergie.

On a vu précédemment que, pour amplifier un faisceau,  $N_2$  devait être supérieur à  $N_1$ . On parle d'inversion de population. On a vu aussi qu'un système à deux niveaux ne permet pas de réaliser une telle inversion, ni à l'équilibre thermodynamique, ni en présence d'un champ extérieur accordé sur  $\omega$ . Un système à trois niveaux permet en revanche de réaliser ces conditions : Par pompage optique <sup>2</sup>, on peuple le niveau 2 à un taux  $R$  et on dépeuple le fondamental, noté niveau 0, aux mêmes taux. L'onde électromagnétique est accordée sur  $\omega$  et n'induit donc des transitions que entre les niveaux 1 et 2. Les trois niveaux sont non dégénérés. Ecrire les

<sup>1</sup>On rappelle que  $I$  et  $W$  sont reliés par  $I = Wc$  où  $c$  est la vitesse de la lumière

<sup>2</sup>L'inversion de population peut par exemple être obtenue en chauffant le gaz de manière à ce que les atomes passent majoritairement dans l'état excité

équations d'évolution des populations  $N_0$ ,  $N_1$  et  $N_2$ . En déduire  $N_2/N_1$  en régime stationnaire. Discuter. Montrer finalement que :

$$N_2 - N_1 = \frac{KN}{1 + 2W/W'_S} \quad K = \frac{R(A_{21} - A_{10})}{A_{10}(A_{20} + A_{21})} \quad W'_S = \frac{A_{10}(A_{20} + A_{21})}{2B(A_{10} + A_{20})} \quad (1)$$

Exprimer alors  $I(z)$  en fonction de  $G = K\alpha$  et  $I'_S = cW'_S$ . On se placera dans l'approximation  $I(z) \ll I'_S$  histoire de ne pas alourdir les calculs.

## Cavité optique

La section précédente nous a permis d'étudier la possibilité d'amplifier un faisceau de lumière de fréquence  $\omega$  donnée. Pour obtenir une source LASER, il reste maintenant à introduire une bouche de rétroaction optique. Il suffit pour cela de placer le milieu amplificateur dans une cavité entre deux miroirs. Le faisceau quittant le milieu amplificateur se réfléchit alors sur un miroir et est réinjecté dans le milieu pour être à nouveau amplifié. Il faut rendre l'un des miroirs partiellement transparent pour laisser traverser une partie du rayonnement induit et pouvoir ainsi l'utiliser.

On considère une cavité optique de longueur  $L$ , constituée de deux miroirs parallèles de coefficient de réflexion  $r$  et de coefficient de transmission  $t$ . Dans la cavité vide, le champ incident  $E_i$  est donc relié au champ sortant  $E_s$  par :

$$E_s = E_i \frac{t^2 e^{ikL}}{1 - r^2 e^{2ikL}} \quad (2)$$

où  $k = \omega/c$  représente le vecteur d'onde du faisceau. Calculer la relation entre  $E_s$  et  $E_i$  en présence du milieu amplificateur (toujours dans l'approximation  $I(z) \ll I'_S$ ). En déduire la condition d'oscillation spontanée du système. Discuter.

## Références

D.A. Mc Quarrie  
*Statistical Mechanics*, (Chap X)  
 Harper & Row, 1976

B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, B. Roulet  
*Éléments de Physique Statistique*, (Chap VI et complément VI.E)  
 Hermann, 1989

B.A. Lengyel  
*Introduction à la physique des Lasers*,  
 Eyrolles, 1968

A. Orszag & G. Herner

*Les Lasers et leurs applications,*  
Eyrolles, 1968