

Le LASER, un oscillateur optique

I. Interaction matière rayonnement

LASER : "Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation"

1) Niveau d'énergie

Imaginons une enceinte pleine d'un gaz à l'équilibre thermique. L'énergie du système se répartit par niveaux. Si T est assez basse, la plupart des atomes sont dans leur état fondamental mais quelques-uns peuvent se trouver dans un état excité.

Distribution de Maxwell-Boltzmann

$$N_i = N_0 e^{-\frac{E_i}{k_B T}}$$

2) Méthode des probabilités de transition

En 1905 Einstein affirme que l'énergie électromagnétique est quantifiée. \rightarrow photon.

La probabilité de transition par unité de temps : pour un processus donné, le nombre d'atomes subissant une transition entre les deux niveaux pendant une durée infinitésimale est :

$$dN_{\text{processus}} = \pm N (dp)_{\text{processus}}$$

\uparrow probabilité que le processus ait lieu entre t et $t+dt$.

La probabilité par unité de temps $p_{\text{processus}}$ est $(dp)_{\text{processus}} = p_{\text{processus}} dt$.

3) Absorption d'un photon

Relation d'Einstein pour l'absorption d'un niveau 1 vers un niveau 2

$$dN_{2, \text{abs}} = B_{12} \cdot u(\nu_0) N_1 dt = -dN_{1, \text{abs}} = p_{\text{abs}} N_1 dt$$

coeff. const. d'Einstein \uparrow densité de rayonnement à la freq.

4) Emission spontanée d'un photon et stimulée

Cette émission est aléatoire : le photon est émis à n'importe quel moment avec une :

- fréquence ν_0
- direction aléatoire
- polarisation aléatoire
- phase aléatoire

Relation d'Einstein pour l'émission spontanée

$$\underline{dN_{i,es} = -A_{21}(\nu) N_i dt = -\frac{1}{\tau} N_i dt}$$

avec τ la durée de vie de l'état excité

Emission stimulée : en présence d'un champ électromagnétique ambiant de fréquence accordée sur celle de la transition atomique un photon incident entraîne la désexcitation de l'atome avec émission d'un photon exactement de même caractéristique que lui :

- même fréquence ν_0
- même direction
- même polarisation
- même phase

d'émission stimulée est un processus dirigé.

Remarque : cette propriété de même état quantique des photons émis est caractéristique des bosons, un tel phénomène ne pourrait se produire avec des fermions.

Conséquence : à partir d'un photon incident on obtient 2 photons émis qui peuvent eux-mêmes déclencher de l'émission stimulée. C'est une réaction en chaîne, d'amplification cohérente.

Relation d'Einstein :

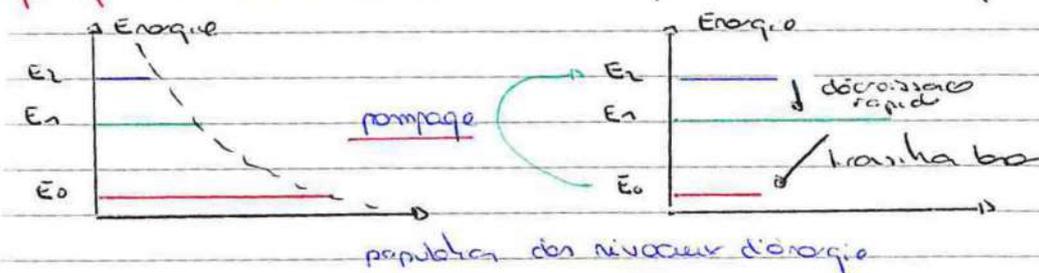
$$\underline{dN_{i,e} = -B_{21} U(\nu_0) N_i dt = -\rho_{ei} N_i dt}$$

II Amplification de lumière - pompage

pour obtenir l'effet LASER d'amplification de champ électromagnétique, il faut $N_2 > N_1$ c'est l'inversion de population

1 Pompage optique

il faut un mécanisme permettant de forcer $N_2 > N_1$. Il s'agit d'apporter de l'énergie au système pour réaliser l'inversion de population incompatible à l'équilibre thermique. L'inversion de population n'est possible que grâce au procédé de **pompage optique** nécessairement hors équilibre thermique.



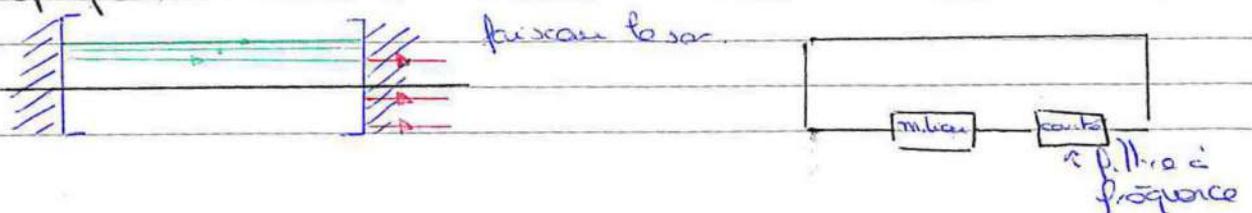
III Rôle de la cavité

Pour qu'un oscillateur démarre, il faut que le gain linéaire dépasse un seuil, en général fixé par les **pertes** de **saturation du gain** permet un fonctionnement de l'oscillateur à régime stable.

On couple deux systèmes optiques en rétroaction l'un avec l'autre :

- le milieu actif **amplificateur en chaîne directe**
- une cavité constituée de deux miroirs en regard, qui joue aussi le rôle de filtre de chaîne de retour.

→ la rétroaction réalisée transforme le **bois** en oscillateur optique.



On peut énoncer une double condition d'oscillation :

- l'amplification de la lumière est supérieure ou égale, aux pertes sur un tour
- les ondes successives émergeant de la cavité sont en phase après un tour

l'espace de la cavité est rempli par un milieu amplificateur

de laser est un oscillateur auto-entretenu des oscillations sont possibles grâce à la présence de mécanismes de :

- réaction positive
- amplification
- saturation de l'amplification

Modes dans la cavité

Comme vu en optique, la condition d'interférences constructives de ces modes est celle des ondes en phase :

$$\delta = 2nL = p\lambda = p \frac{c}{\nu_p}$$

Cette condition devient : $L \approx p \frac{\lambda_0}{2n} = p \frac{\lambda}{2}$

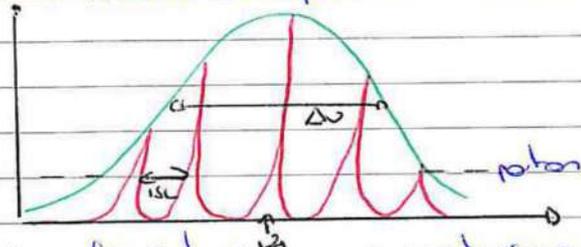
ou bien écrit en fréquence $\nu_p \approx p \frac{c}{2nL} = p \frac{c'}{2L}$

Il apparaît une condition de modes de cavité sélectionne les ondes qui peuvent entrer en résonance et osciller un grand nombre de fois entre les miroirs : ce sont les modes longitudinaux

des ν_p sont les fréquences propres du laser d'onde résultante à l'intérieur de la cavité est donc stationnaire avec des nœuds et des ventres
→ longueurs de la cavité,

d'écart en fréquence $\Delta\nu = c/2L$ rappelle intervalle spectral libre.

de spectre d'émission et un laser est constitué de raies très fines, régulièrement espacées de $\Delta\nu$, comprises à l'intérieur d'une enveloppe beaucoup plus large, centrée sur ν_0 appelée raie de gain, qui correspond au spectre naturel de la transition par émission spontanée.



Plusieurs modes longitudinaux vont donc coexister dans l'émission laser : on parle de laser multimode.

facteurs de qualité de la cavité, largeur spectrale des modes : cohérence temporelle.

Conclusion

des lasers sont des sources lumineuses très puissantes et très directives. De plus, le faisceau laser est cohérent.