

21 Absorption et émission de la lumière

Notre première expérience d'absorption de la lumière est notre œil. Concernant l'émission on identifie 2 familles de sources

- 1) incandescence : spectre continu d'un corps noir
- 2) luminescence : spectre d'émission discret

⇒ Planck 1900 propose de quantifier l'énergie pour résoudre la catastrophe de l'UV (solide)

⇒ Einstein en 1905 propose de quantifier la lumière et pas seulement son échange $\Rightarrow E = h\nu$

⇒ Bohr en 1913 décrit l'atome d'hydrogène avec la mécanique quantique et explique les raies d'émission et d'absorption.

Les niveaux d'énergie électroniques sont quantifiés

Atome H

$$E_n = - \frac{hc}{n^2} R_H$$

R_H : est de Rydberg

n : nbre quantique principale

$$\psi_{n,l,m}(r, \theta, \varphi) = R_{n,l}(r) Y_{l,m}(\theta, \varphi)$$

- ⇒ i) absorption d'un niveau à un autre
ii) émission lors de la descente de niveaux

⇒ spectre de l'H (solide)

⇒ La série de Balmer est dans le visible.

⇒ Expérience : mesure de R_H

Spectre d'absorption des étoiles

2

Un slide

On identifie les éléments dans la photosphère par leur absorption.

⚠ S'intensité d'une raie n'est pas proportionnelle à la densité concentration de l'élément

On a longtemps pensé que la composition ~~et~~ du Soleil était identique à celle de la Terre.

→ Si H est ionisé en H^+ car l'étoile est chaude $\Rightarrow$ pas d' e^- ; pas d'absorption

$\Rightarrow$ la raie H^{α} ($n=3 \rightarrow n=2$) manque

$\Rightarrow$ Thèse de Cecilia Payne (1915) ; l'hydrogène est 70% plus abondant que les autres éléments dans le Soleil. (occupée ~~pendant 20 ans~~ et rétablie)

Phénomène d'absorption et d'émission

Soit un milieu d'atomes à 2 niveaux d'énergie E_1 et E_2 de population N_1, N_2

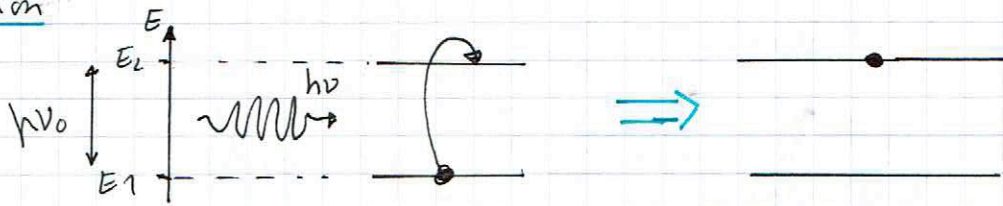
On définit la probabilité d'un processus par unité de temps $P_{\text{processus}}$

$\Rightarrow$ la probabilité d'occurrence de ce processus entre t et $t+dt$ par 1 atome est $dP_{\text{processus}} = P_{\text{processus}}(t) dt$

Ex: transition de 1 vers 2, $(dN_1)_{\text{processus}} = \pm N_1 dP_{\text{processus}}$
est la variation de la population 1

Einstein propose 3 processus phénoménologique élémentaires. Soit $w(\omega)$ densité spectrale d'énergie

1) Absorption



Probabilité du processus par unité de temps

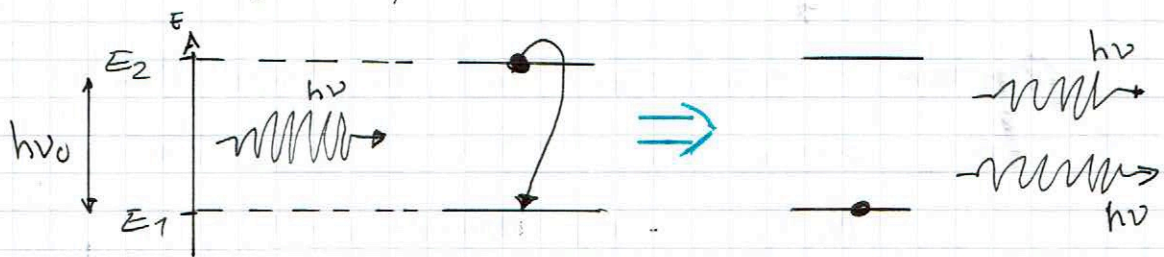
$$P_{abs} = B_{12} w(\omega_0)$$

Son taux de variation est $\left(\frac{dN_1}{dt}\right)_{abs} = -P_{abs} \cdot N_1$

$$= -w(\omega_0) B_{12} N_1$$

2) Emission induite (stimulée)

Processus symétrique à l'absorption

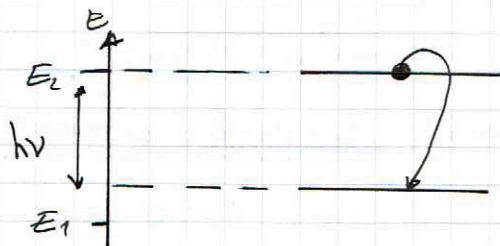


- $\vec{m}$ énergie
- $\vec{m}$ impulsion ; direction
- $\vec{m}$ polarisation
- $\vec{m}$ phase

Donc sa probabilité par unité de temps est: $P_{ei} = B_{21} w(\omega_0)$

Donc son taux de variation: $\left(\frac{dN_2}{dt}\right)_{ei} = -P_{ei} N_2 = -w(\omega_0) B_{21} N_2$

3) Emission spontanée



avec $P_{es} = A_{21}$ indépendant de $\nu(\omega)$

$$\Rightarrow \left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{es} = -P_{es} N_2 = -A_{21} N_2$$

ν , direction, polarisation, phase aléatoires

C'est équivalent à une diffusion: émission dans toutes les directions aléatoirement

Largeur de raie

$\Delta \nu \neq \frac{E_2 - E_1}{h}$ à cause d'Heisenberg

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \frac{\hbar}{2}$$

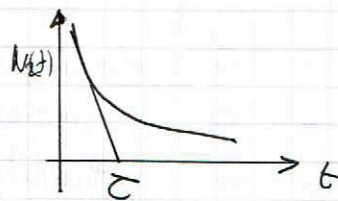
Si E_1 et E_2 fixés,

$\Rightarrow$ l'émission spontanée a un temps limité

Si on intègre la relation précédente

$$N_2(t) = N_{20} \exp(-A_{21} t)$$

$\Rightarrow$ durée de vie : $\tau = \frac{1}{A_{21}}$



$$\Rightarrow \Delta E \approx \frac{\hbar}{\tau}$$

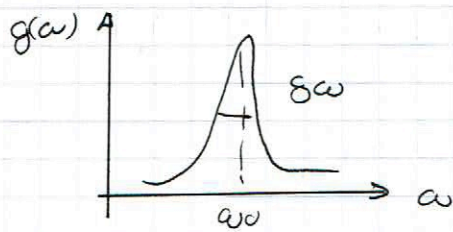
$\Rightarrow$ indétermination sur la fréquence $\Delta \nu = \frac{\Delta E}{h} = \frac{1}{\tau}$

autres sources d'élargissement

$\Rightarrow$ Effet Doppler

$\Rightarrow$ Chocs (train d'onde)

$\Rightarrow$ On introduit $g(\omega)$: profil de raie
fact de pondération des probabilités de transition



$$\delta\omega \ll \omega_0$$

$$\int_0^{\infty} g(\omega) d\omega = 1 \quad : \text{normalisée}$$

On a donc $\int_0^{\infty} g(\omega) \omega(\omega) d\omega \approx \omega(\omega_0) \int_0^{\infty} g(\omega) d\omega = \omega(\omega_0)$
 $\Rightarrow$ hypothèse d'Einstein du début

Rate equation (2 niveaux)

Soit $N = N_1 + N_2$ donc $\frac{dN_2}{dt} = - \frac{dN_1}{dt}$

$$\Rightarrow \frac{dN_2}{dt} = - \frac{dN_1}{dt} = - A_{21} N_2 - \omega(\omega_0) B_{21} N_2 + \omega(\omega_0) B_{12} N_1$$

Ses coef A_{21} , B_{21} et B_{12} indépendant de $\omega(\omega)$
 sont phénoménologique et caractéristique de la
 transition $1 \rightleftharpoons 2$

Bilan de Puissance

• Sans le cours aller directement à la conclusion (Tout en CN P. 174)

Soit un rayonnement ω qui traverse le milieu à 2 états

Puissance volumique émise	$\Pi_{\text{émis}} = - \left(\left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{\text{es}} + \left(\frac{dN_2}{dt} \right)_{\text{ei}} \right) \hbar \omega$
" " absorbée	$\Pi_{\text{abs}} = \left(\frac{dN_1}{dt} \right)_{\text{ab}} \hbar \omega$
" " perdue	Π_{perte}

$$\frac{\partial P}{\partial z} = \Pi_{\text{émis}} - \Pi_{\text{abs}} - \Pi_{\text{perte}} = \gamma(\omega) I - \Pi_{\text{perte}}$$

$$\Rightarrow \text{gain } \gamma = (N_2 - N_1) B_{21} \frac{\hbar \omega}{c} g_{\omega}(\omega)$$

$$\Rightarrow \gamma > 1 \Rightarrow \underline{N_2 > N_1} \quad \text{à l'inverse de l'émission!}$$

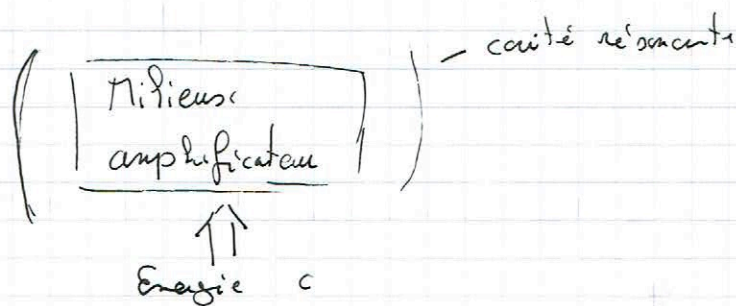
A l'équilibre thermique, en utilisant Boltzmann

$$\frac{N_2}{N_1} = \exp\left(-\frac{E_2 - E_1}{k_B T}\right)$$

$\Rightarrow E_2 > E_1 \Rightarrow N_2 < N_1$ à l'équilibre thermique

Si on veut amplifier l'émission il faut une inversion de population !!

Le LASER



$\rightarrow$ On fait un pompage de population dans le milieu amplificateur.

$\rightarrow$ On filtre les modes dans la cavité

Objectif : amplifier le photons stimulés pour avoir un flux cohérents temporellement et cohérent spatialement avec la cavité (type Fabry-Pérot)

Pour un système à 2 états on a l'équation

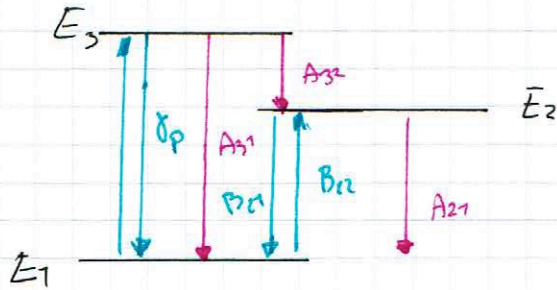
$$\frac{dN_2}{dt} = -\omega(\omega_0) (B_{21} N_2 - B_{12} N_1) - A_{21} N_2$$

comme $B_{21} = B_{12}$ (principe de réciprocité)

$$= -\omega(\omega_0) B_{21} (N_2 - N_1) - A_{21} N_2$$

La population de N_2 croît jusqu'à $\dot{N}_2 = 0$
 ceci est atteint pour $N_1 > N_2$
 $\Rightarrow$ il faut un système à plus de niveaux
 pour avoir accumulation d'atomes excités.

Laser à 3 niveaux



i) Il faut que $3 \rightarrow 2$
 soit meilleure que $3 \rightarrow 1$ et $2 \rightarrow 1$

ii) Il faut $N_1 \gg N_3$ pour
 négliger $3 \rightarrow 1$

Comme les photons émis sont piégés dans
 la cavité, ils s'amplifient.

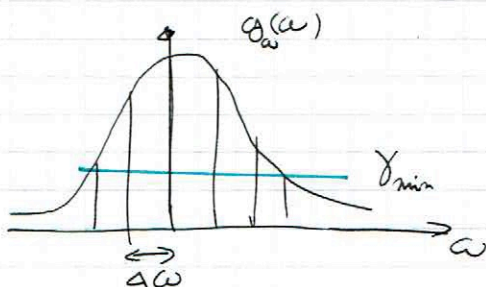
Cavité

Les modes résonants dans une cavité sont
 donnés par

$$\omega_p = p \frac{\pi c}{nL} \quad \begin{array}{l} n: \text{indice optique} \\ p: \text{ordre} \end{array}$$

$$\Rightarrow \Delta\omega = \frac{\pi c}{nL}$$

Pour connaître les modes ^{piégés} produits par la laser
 on superpose le profil de raie $g_a(\omega)$
 avec les modes filtrés



seul les modes p tq
 $g_a(\omega_p) > \gamma_{\min}$ seront
 émis.