

# Transferts quantiques d'énergie

## 1 Le interactions lumière-matière

### 1.1 Quantification des niveaux d'énergie

Les niveaux d'énergie de l'atome sont *quantifiés* : ils ne peuvent prendre que des valeurs bien déterminées, caractéristiques de l'atome. À chaque répartition des électrons sur les couches électroniques correspond un niveau d'énergie de l'atome. Le niveau de plus basse énergie est appelé *état fondamental*. C'est l'état stable de l'atome. Les états de plus haute énergie s'appellent des *états excités*.

Si l'on fournit une énergie à l'atome au delà d'un certain seuil, il perd un électron, on dit qu'il *s'ionise*. Les niveaux d'énergie de l'électron ne sont alors plus quantifiés car il n'est plus lié à l'atome.

On appelle *transition énergétique* le passage de l'atome d'un état à l'autre.

REMARQUE : Les valeurs des énergies des atomes étant extrêmement faibles, on utilise souvent l'*électron-volt* (eV) comme unité d'énergie. L'électron-volt, c'est l'énergie acquise par un électron dans un potentiel électrique de 1 V :

$$1\text{eV} = 1.67 \cdot 10^{-19}\text{J}$$

### 1.2 Absorption et émission spontanées

Les échanges d'énergie entre les atomes et la lumière sont *quantifiés* : ils s'effectuent par paquets d'énergie appelés photons, et notés  $\gamma$ .

- Un atome, initialement dans le niveau d'énergie  $E_0$ , peut passer à un

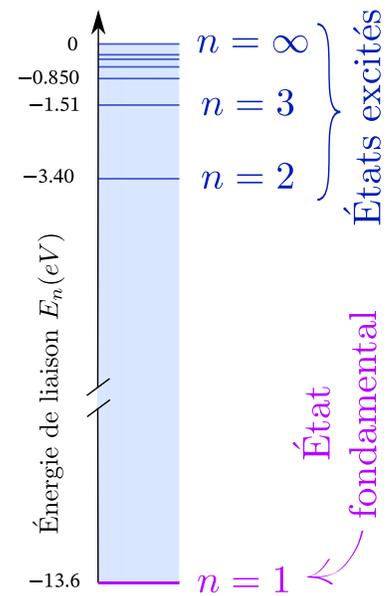


FIGURE 16.1: Niveaux d'énergie de l'atome d'hydrogène. Ces niveaux sont quantifiés jusqu'à ionisation, puis se transforment en continuum.

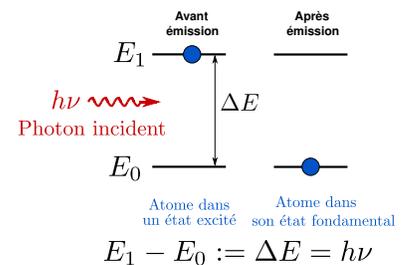


FIGURE 16.2: Absorption d'un photon par un atome

niveau d'énergie  $E_1 > E_0$  en absorbant un photon d'énergie :

$$\Delta E = E_1 - E_0 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

Où

- $\nu$  est la fréquence de la radiation monochromatique associée à ce photon.
- $\lambda$  est sa longueur d'onde dans le vide.
- $c$  est la célérité de la lumière dans le vide.
- $h$  est la constante de Planck  $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$
- Spontanément, un atome dans un niveau d'énergie  $E_1$  peut retourner dans un niveau d'énergie  $E_0 < E_1$  en émettant un photon d'énergie

$$\Delta E = E_1 - E_0 = h\nu$$

c'est le phénomène d'*émission spontanée*. Le photon est émis dans une direction quelconque avec une phase à l'origine aléatoire.

### 1.3 Émission stimulée

En 1917, Albert Einstein prévoit un autre mode d'émission : l'*émission stimulée*.

Lors d'une *émission stimulée*, un photon incident d'énergie  $h\nu$  force un atome, initialement dans un état excité d'énergie  $E_1$  à passer dans un niveau d'énergie  $E_0 < E_1$ . Le photon incident n'est pas absorbé, il permet juste de stimuler la désexcitation de l'atome.

Deux photons sont alors obtenus après émission stimulée : le photon incident et le photon émis. Ces deux photons ont les **mêmes énergie, fréquence, direction sens de propagation et phase!**

### 1.4 Types de transition d'énergie et domaines spectraux

Au sein de la matière, il n'y a pas que les niveaux d'énergie des atomes à être quantifiés :

- Les noyaux des atomes possèdent également des niveaux d'énergie quantifiés et peuvent donner lieu à des *transitions nucléaires* de fusion et fission nucléaire.
- Les noyaux des atomes interagissent avec un champ magnétique via leur *spin*. Il en résulte une quantification des niveaux d'énergie exploitée en spectroscopie RMN. (Ici, la quantification se fait sur des états de spin).

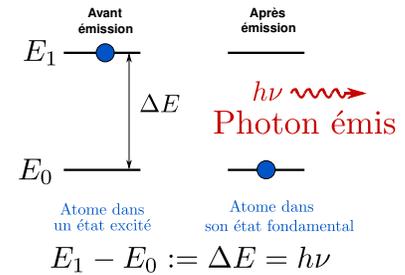


FIGURE 16.3: Émission spontanée d'un photon par un atome

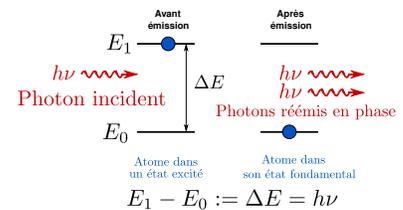


FIGURE 16.4: Émission stimulée d'un photon par un atome

- Les molécules peuvent vibrer et leurs différents modes de vibration ont des énergies quantifiées, on peut alors observer des *transitions vibrationnelles* exploitées en spectrométrie infrarouge.

Chaque type de transition met en jeu des énergies très différentes et les photons absorbés ou émis lors de ces transitions appartiennent à des *domaines spectraux différents*.

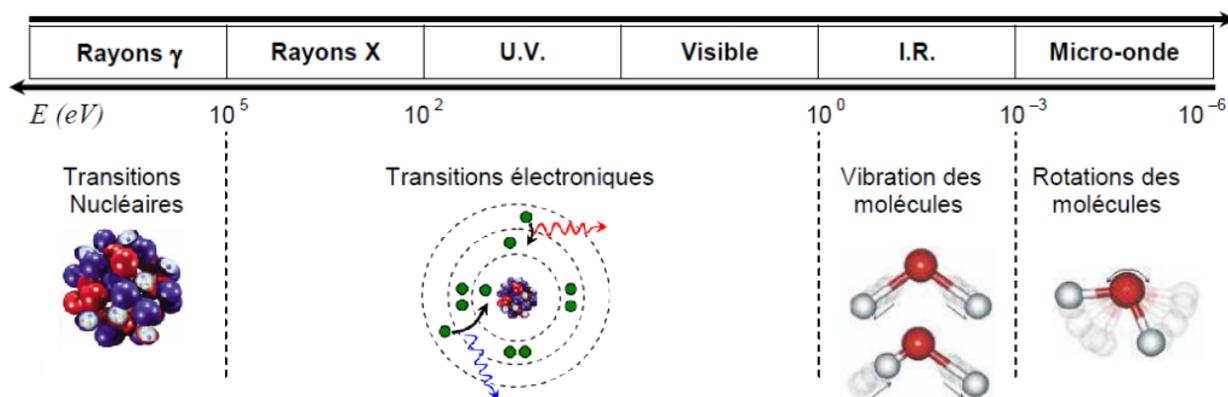


FIGURE 16.5: Les noyaux, les atomes et les molécules absorbent dans des domaines spectraux différents.

## 2 Le LASER

Le mot LASER est l'acronyme de Light Amplification by Stimulated emission of Radiation, qui signifie Amplification de lumière par émission stimulée de radiation.

Contrairement aux autres sources de lumière qui utilisent l'émission spontanée, la lumière laser est produite, comme son nom l'indique, par émission stimulée. Réaliser un laser consiste donc à favoriser l'émission stimulée au détriment de l'émission spontanée. Comment cela est-il possible?

### 2.1 Principe de fonctionnement

*L'inversion de population* : Dans une population d'atomes en équilibre thermique, les atomes se distribuent selon une loi statistique qui favorise les états de plus basse énergie. Il y a donc beaucoup plus d'atomes dans l'état fondamental que dans les états excités. Or, pour provoquer des émissions stimulées, il faut que des atomes se trouvent dans un état excité. Il faut alors réaliser une inversion de population pour que la majorité des atomes soient dans un état excité plutôt que dans l'état fondamental.

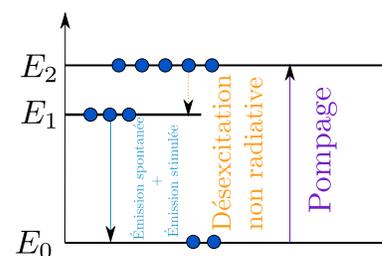


FIGURE 16.6: Le pompage (apport d'énergie) permet l'inversion de population dans le laser, c'est-à-dire qu'il régénère le réservoir d'atomes excités à mesure que les atomes se déséxcitent.

Cette opération est réalisée en rompant l'équilibre thermique par un apport d'énergie : un excitateur, une décharge électrique ou un faisceau lumineux (on parle de pompage optique) excite les atomes qui passent du niveau fondamental  $E_0$  à un niveau excité d'énergie  $E_2$ , légèrement supérieure à  $E_1$ . Les atomes du niveau 2 peuplent le niveau 1 en se désexcitant très rapidement ce qui permet l'inversion de population. La lumière du laser provient alors de l'émission stimulée entre les niveaux  $E_1$  et  $E_0$ .

*L'amplification* : On appelle milieu actif l'ensemble des atomes qui sont capables d'émettre des photons par émission stimulée. Sa composition chimique et son état physique varient selon le modèle de laser.

Le milieu actif est placé au sein d'un ensemble de miroirs qui forment une cavité résonante. Ces miroirs imposent aux photons un très grand nombre d'aller-retours avant de pouvoir s'échapper, avec une très faible probabilité. Ceci permet d'augmenter le nombre d'interactions photon-atome et donc le nombre de photons identiques produits par émission stimulée.

Par ailleurs, lors de leurs aller-retours, les ondes associées aux photons vont interférer entre elles. La cavité résonante va permettre d'amplifier les ondes en phase qui interfèrent de manière constructive, c'est-à-dire celles dont la longueur d'onde vérifie la relation :

$$\mathcal{L} = k\lambda$$

où  $\mathcal{L}$  est la longueur du chemin optique parcouru par le faisceau à l'intérieur de la cavité,  $\lambda$  la longueur d'onde des ondes émises en phase, et  $k$  est un entier qui désigne le nombre de périodes de déphasage de l'onde après un tour de cavité. (Attention aux déphasages sur les miroirs!)

Il faut donc accorder la cavité à la transition que l'on désire amplifier!

Une simulation d'un laser est disponible dans l'application PhEt que vous trouverez [ici](#). Vous pouvez accorder la cavité, et adapter les durées de vie des atomes dans les différents niveaux

## 2.2 Propriétés de la lumière émise par un laser

Un laser émet un faisceau lumineux :

- **Monochromatique** : les photons émis par le laser ont tous la même fréquence et donc la même longueur d'onde.
- **Très directif** : ces photons ont la même direction.
- **Cohérent** : ces photons sont en phase.
- **Très intense** : L'énergie lumineuse est concentrée dans un faisceau très étroit. L'énergie rayonnée peut également être concentrée dans le temps : les lasers à impulsions (lasers pulsés) émettent des radiations d'une puissance considérable pendant une durée très brève.

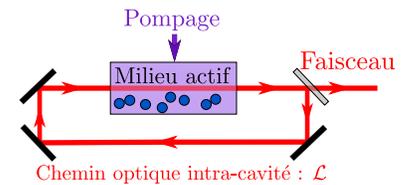


FIGURE 16.7: La cavité Laser permet au faisceau de traverser de nombreuses fois le milieu amplificateur et permet l'inversion de population. Cela est permis grâce à des miroirs quasi-parfaits (en noir), et un miroir faiblement transparent (environ 1%) en gris. On peut résumer l'émission laser ainsi : un premier photon est émis *spontanément* dans la direction du futur faisceau (bien d'autres sont émis dans la mauvaise direction!) il effectue alors un tour de cavité. Il traverse de nouveau le milieu actif, régénéré en atomes excités pendant la durée du parcours, grâce au *pompage*. Ces atomes peuvent alors émettre dans la même direction, grâce à l'*émission stimulée*. À leur tour, ces atomes parcourent la cavité, ils restent en phase après chaque tour car cette cavité est *accordée* à la transition  $1 \rightarrow 0$ . De temps en temps, les atomes traversent le miroir de sortie pour former le faisceau laser. Ceci est d'autant moins fréquent que la transparence de ce miroir est faible.

Type de laser	Puissance	Utilisation
Laser He-Ne de lycée	0.5 à 1 mW	Expériences simples d'optique
Diode laser As-Ga (arséniure de gallium)	1 à 3 mW	Lecteurs de code-barre, de CD, télécommunication (fibres optiques)
Laser de type YAG (cristal d'yttrium et d'aluminium)	de l'ordre de 500 W sous forme d'impulsions de fréquence 1 kHz	Micro-usinage
Laser à gaz $CO_2$ en continu (pompage continu)	100 W à plusieurs kW	Découpe d'étoffes, micro-usinage, chirurgie (couper et cautériser des tissus organiques).
Lasers impulsionnels (azote, $CO_2$ ) (pompage pas flashage)	Puissances crêtes pouvant atteindre 1 MW pendant des durées de l'ordre de 10 ns, ou des puissances bien plus grandes encore lors d'impulsions très brèves de durée voisine de $10 \times 10^{-15}$ s	Recherche, laboratoires (étude des mécanismes de réactions chimiques ...)

**À la fin de ce chapitre, je sais faire (extrait du B.O.) :**

- Connaître le principe de l'émission stimulée et les principales propriétés du LASER (directivité, monochromaticité, concentration spatiale et temporelle de l'énergie)
- Associer un domaine spectral à la nature de la transition mise en jeu.
- (En TP) Mettre en œuvre un protocole expérimental utilisant un laser comme outil d'investigation ou pour transmettre de l'information.