

PAES Tutorat 2012/2013  
**EMISSION DE LA LUMIERE  
PAR LA MATIERE**



**PARTIE I :**  
***Incandescence et luminescence***

**I. Distinction entre incandescence et luminescence**

Il existe deux grands modes d'émission de la lumière par la matière :

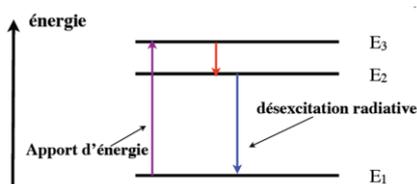
✎ **Incandescence** : La lumière est émise par des corps chauffés à haute température : elle est d'origine **thermique**. C'est le **rayonnement de corps noir** décrit en physique quantique. L'émission se fait selon un spectre **continu**.

On peut la décrire comme un phénomène d'**équilibre** entre absorption et émission.

Rappel : La longueur d'onde pour laquelle l'intensité lumineuse est maximale vérifie la **loi de Wien** :

$$\lambda_{max}T = 0,3 \text{ cm. K}$$

✎ **Luminescence** : Il s'agit d'une émission de lumière « **froide** ». Elle résulte d'un apport d'énergie qui amène atomes et molécules dans des **états excités**. Le retour à l'état fondamental s'accompagne de l'émission de photons.



Le retour au fondamental peut se faire directement ou par l'intermédiaire d'un ou plusieurs niveaux.

→ On n'a une émission que si l'une des transitions impliquées dans la désexcitation au moins est **radiative** (=s'accompagnant d'une émission de photons)  
Le photon émis vérifie alors la relation :

$$E_2 - E_1 = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

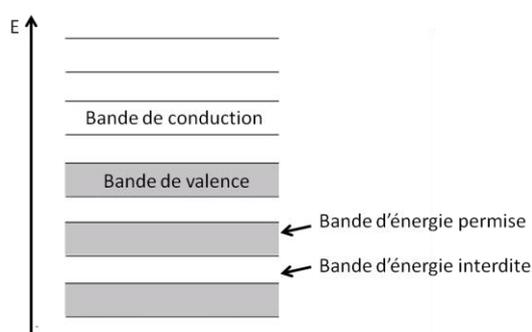
Il existe différents types de luminescence en fonction de la source de l'excitation initiale :

Modes d'excitation	Types de luminescence
champ <b>électrique</b>	<b>électroluminescence</b>
Lumière ( <b>photons</b> )	<b>photoluminescence</b>
rayons X, rayonnements $\alpha, \beta, \gamma$ ( <b>radioactivité</b> )	<b>radioluminescence</b>
électrons accélérés ( <b>cathode</b> → anode)	<b>cathodoluminescence</b>
réaction <b>chimique</b>	<b>chimiluminescence</b>
réaction <b>biologique</b>	<b>bioluminescence</b>

## II. Electroluminescence

### 1) Notions de base sur les matériaux semi-conducteurs

- ✓ Un électron dans un atome isolé est lié complètement à celui-ci. Son énergie ne peut prendre que certaines valeurs discrètes et bien définies. Au contraire, un électron complètement libre peut voir son énergie prendre n'importe quelle valeur positive.
- ✓ Dans un **solide**, la situation est **intermédiaire** : les électrons peuvent prendre **n'importe quelle énergie**, mais dans des **intervalles bien définis**. C'est comme si les électrons pouvaient se trouver dans des "**bandes**" **d'énergies permises**, séparées entre elles par des "bandes" d'énergies interdites.
- ✓ Deux bandes sont particulièrement importantes :

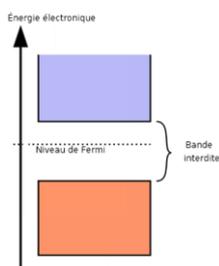
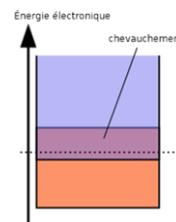


✎ **Bande de valence** : C'est la **dernière bande complètement remplie à 0 K**. Elle caractérise des électrons qui sont **liés au coeur des atomes**, qui ne seront donc que **peu disponibles pour la conduction électrique**.

✎ **Bande de conduction** : Elle représente la **première bande permise qui suit la bande de valence**, qui peut être vide ou partiellement remplie. Elle caractérise des électrons qui **peuvent se déplacer dans le solide** et ainsi **servir pour la conduction**.

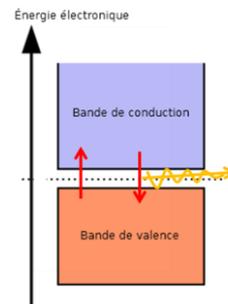
Ceci permet de comprendre les propriétés de conduction électrique des différents solides :

- ✎ **Matériaux conducteurs (ex : métaux)** : La bande de conduction et la bande de valence **se chevauchent**. Les électrons peuvent donc **passer directement de la bande de valence à la bande de conduction** et circuler librement dans le solide et participer à la conduction.



- ✎ **Matériaux isolants** : La bande de conduction et la bande de valence sont **séparées par une bande interdite dont la largeur est importante** (plus de quelques eV) : les électrons ne **peuvent pas passer de la bande de valence à la bande de conduction**, les électrons ne circulent pas dans le solide.

- ✎ **Matériaux semi-conducteurs** : La bande de conduction et la bande de valence sont **séparées par une bande interdite dont la largeur est faible** (quelques eV) : **si on apporte de l'énergie** au matériau (chauffage, champ électromagnétique, illumination, etc.), les électrons **peuvent passer de la bande de valence à la bande de conduction** et les électrons peuvent circuler dans le solide. Lors de la désexcitation, on peut observer l'émission de **rayonnements lumineux**. C'est le principe de fonctionnement des **diodes électroluminescentes**.



## 2) Spectres de raies des atomes (luminescence atomique)

En soumettant un gaz à des **décharges électriques**, on obtient par électroluminescence des **spectres de raies**.  
*Applications : tubes au néon, mais aussi les ampoules fluocompactes (vapeur de mercure)*

Après absorption d'énergie, le retour de l'atome au fondamental peut se faire selon plusieurs mécanismes. On en décrit de deux types :

- ✓ Soit il y a une **émission directe** d'un photon entre deux niveaux d'énergie.
- ✓ Soit on a des **transitions non radiatives** : à la suite de **collisions** avec d'autres atomes (improbables lorsque le gaz est raréfié), l'atome perd de l'énergie et arrive dans un **état métastable**.

Ces deux mécanismes peuvent se combiner pour réaliser des transitions complexes avec de nombreuses longueurs d'onde différentes.

*Exemple d'application : La lampe à vapeur de sodium.*

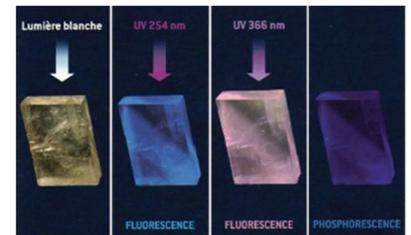
- ✓ Si la lampe contient du sodium à basse pression, il n'y aura pas de transitions non radiatives, et donc émission de quelques longueurs d'onde correspondant aux différences entre les différents niveaux d'excitation.
- ✓ En revanche, si le gaz est soumis à une haute pression, il y aura des transitions non radiatives par collisions, passage par des niveaux métastables d'énergie intermédiaire et donc émission de longueurs d'onde plus diverses
- ✓ C'est pourquoi les spectres de raies des lampes de sodium à haute et basse pressions sont très différents !

## III. Photoluminescence

Principe : On a **absorption** puis **réémission de lumière** soit directement soit par l'intermédiaire de plusieurs niveaux.

### 1) Fluorescence et phosphorescence

- ✓ Certains matériaux (*crystal de calcite par exemple*) émettent de la lumière lorsqu'ils sont exposés à certaines longueurs d'onde : c'est la **fluorescence**.
- ✓ Mais l'émission de lumière peut persister **après** l'interruption de l'illumination : c'est la **phosphorescence**.

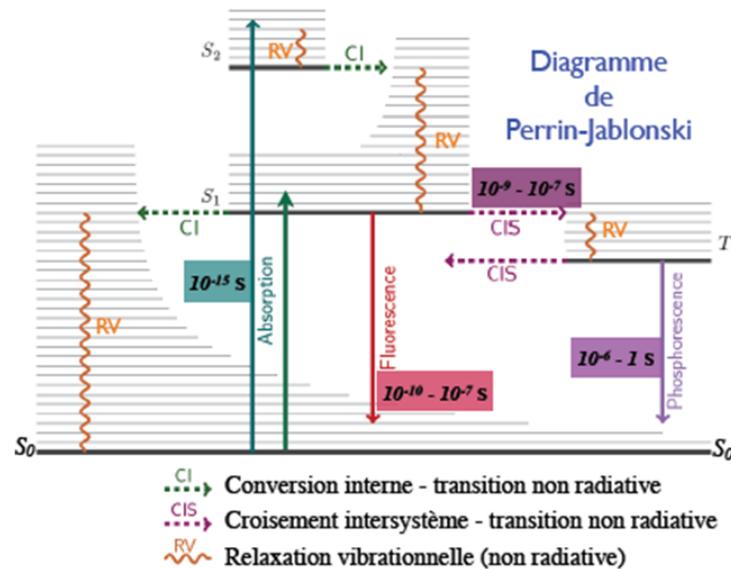


- ✓ La différence entre la fluorescence et la phosphorescence s'explique en étudiant les niveaux d'énergie concernés : dans le cas de la **phosphorescence**, les éléments excités passent par un **état intermédiaire de plus grande stabilité** avant d'émettre de la lumière. Ceci implique que le **déclin de la fluorescence est plus rapide** (en général) que celui de la phosphorescence.

### 2) Luminescence moléculaire

- ✓ Jusqu'à présent on parlait de luminescence au niveau des atomes... On peut aussi définir une **luminescence pour les molécules** !
- ✓ Les électrons d'une molécule peuvent comme pour un atome **transiter vers des niveaux d'énergie supérieure** si la elle absorbe de l'énergie.
- ✓ Mais dans une molécule les niveaux électroniques présentent des **sous-niveaux vibrationnels et rotationnels** (*plus resserrés*) : c'est ce que l'on représente sur le **diagramme de Perrin-Jablonski**.

Emission de la lumière par la matière



Comment bien comprendre ce diagramme ?

- ✓ Tout commence par l'**absorption** d'un photon (en environ 10<sup>-15</sup> s).
- ✓ Très vite, les molécules vont vibrer et rejoindre le **premier niveau vibrationnel** (le plus bas en énergie) du **premier état excité S<sub>1</sub>**, en un temps 100 à 10000 fois plus long que le temps d'excitation. Ceci se fait via des **transitions non radiatives** :
  - ➔ **Relaxation vibrationnelle** (RV) : entre les niveaux vibrationnels d'un même état excité
  - ➔ **Conversion interne** (CI) : entre le premier sous-niveau d'un état excité et le niveau vibrationnel de même énergie de l'état excité du dessous
- ✓ Après un certain temps (appelé durée de vie de l'état excité τ, dépendant du milieu et du type de molécule), les **molécules se dés excitent** suivant plusieurs mécanismes :

Emission de <b>fluorescence</b>	Retour au fondamental via divers niveaux vibrationnels de l'état fondamental S <sub>0</sub>
<b>Conversion interne</b> (CI)	Retour au fondamental sans aucune émission de photon (non radiatif)
<b>Croisement intersystème</b> (CIS)	Transition vers un état excité intermédiaire appelé état triplet T <sub>1</sub> par inversion de spin d'un électron. La durée de vie de T <sub>1</sub> est normalement <b>beaucoup plus longue</b> que celle de S <sub>1</sub> (jusqu'à plusieurs heures !)
<b>Phosphorescence</b>	Dés excitation de l'état triplet T <sub>1</sub> (premier niveau vibrationnel), non observée dans les solutions à température ambiante (trop de collisions) mais peut l'être dans des <b>milieux rigides</b> (d'où les décorations phosphorescentes pour Halloween ☺)

- ☼ **La relaxation vibrationnelle est plus courte que la fluorescence, elle-même plus courte que la phosphorescence...**
- ☼ **La phosphorescence se fait à des longueurs d'onde plus grandes que celles des rayonnements de fluorescence !** (le plus bas niveau vibrationnel de T<sub>1</sub> est en-dessous de celui de S<sub>1</sub>)
- ☼ On a donc :  $\lambda_{\text{phosphorescence}} > \lambda_{\text{fluorescence}} > \lambda_{\text{absorbée}}$
- ✓ Notion de **rendement quantique Φ<sub>f</sub>** : il mesure l'**efficacité de fluorescence**. C'est le rapport entre le nombre de photons émis de photons émis par fluorescence et le nombre de photons absorbés.

☛ **Le rendement quantique varie en fonction de l'environnement des molécules** (=fluorophores) : concentration, pH, etc.

- ✓ La décroissance du nombre de molécules excitées suit en général une loi exponentielle  $N = N_0 \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right)$  avec  $\tau$  la durée de vie de l'état excité. C'est le temps moyen que passent les molécules dans l'état excité, et **varie en fonction de l'environnement des fluorophores**.
- ✓ **Temps de déclin de fluorescence** :  $\tau_f = \Phi_f \tau_r$  avec  $\tau_r$  la durée de vie du plus bas sous-niveau de l'état excité.

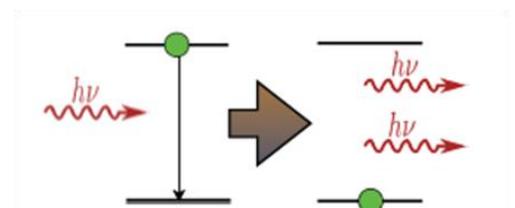
Pourquoi étudier la fluorescence ? Parce que beaucoup de techniques l'utilisent dans de nombreux domaines ☺

## PARTIE II : *Lasers*

### I. A la découverte des lasers

#### 1) Notion d'émission stimulée

- ✓ Jusqu'à présent, on a considéré des phénomènes d'**émission spontanée** : en se désexcitant, des atomes ou des molécules émettaient des photons de façon **aléatoire** et **dans toutes les directions de l'espace**.
- ✓ Mais un autre type d'émission va beaucoup nous intéresser : l'**émission induite** ou **stimulée**.
  - ➔ Un photon incident sur un atome peut **forcer celui-ci à se désexciter** en émettant un photon qui a **exactement les mêmes caractéristiques que le photon incident** : énergie, quantité de mouvement, polarisation !
  - ➔ Les deux photons identiques, en phase vont pouvoir à leur tour provoquer l'émission induite d'un photon chacun...
  - ➔ On aboutit à une **amplification de la lumière** par avalanche de photons ! C'est le principe du **LASER** (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation, pour les anglophobes : amplification de la lumière par émission stimulée de photons*)



#### 2) Que faut-il pour fabriquer un laser ?

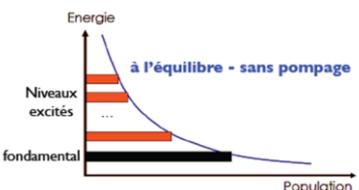
- **Un milieu amplificateur** : pour placer les atomes dans l'état excité
- **Une source externe d'énergie : le POMPAGE** : pour faire passer les atomes dans l'état excité (*en effet, à l'équilibre beaucoup plus d'atomes sont à l'état fondamental mais très peu dans l'état excité. Or pour produire beaucoup de lumière cohérente par émission stimulée, il faut beaucoup d'atomes à l'état excité : il faut réaliser une inversion de population*)
- **Une cavité résonante** : si on laisse la lumière filer après avoir traversé le milieu, le phénomène d'émission stimulée va très vite s'arrêter... Il faut donc **enfermer la lumière entre deux miroirs** (*dont l'un laisse partiellement passer la lumière de temps en temps*) pour à la fois amplifier encore plus le faisceau et sélectionner les longueurs d'onde d'émission laser

- A partir de ces trois éléments de base, on peut obtenir un rayonnement laser avec des propriétés spectrales, spatiales et temporelles extrêmement spécifiques ! Le faisceau laser est extrêmement **cohérent**.

Bon, il faut un brin de jugeote aussi ^^

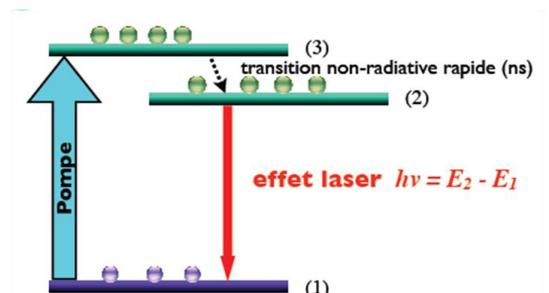
## II. Obtention de l'inversion de population

### 1) Inversion de population et pompage

- ✓ A l'équilibre thermodynamique, les atomes se répartissent dans les différents niveaux d'énergie suivant la **statistique de Boltzmann** :  $N_i \propto \exp(-E_i/k_B T)$ . **Lorsque l'énergie des niveaux augmente, le nombre d'atomes décroît de façon exponentielle.**
- 
- ✓ A l'équilibre (*sans pompage*) on a donc une majorité d'atomes dans l'état fondamental, le nombre d'atomes dans les états excités est négligeable.
  - ✓ Or pour fabriquer un laser il faut plus d'atomes à l'état excité qu'à l'état fondamental : c'est le principe de **l'inversion de population**. Il faut la forcer en réalisant un **apport d'énergie** (*décharges électriques, photons...*) : c'est le **pompage**.
  - ✓ Pour une transition donnée, **la probabilité d'émission stimulée est égale à la probabilité d'absorption...**
  - ✓ Et le problème c'est que du coup, **toute absorption est compensée par une émission stimulée et toute émission stimulée va être compensée par une absorption**. On n'arrive pas à créer de nouveaux photons, et il y a un phénomène d'équilibre qui fait que **la population du niveau fondamental  $N_1$  est égale à la population du niveau excité  $N_2$  !**
  - ✓ Au maximum, en pompant fortement on a  $N_1 = N_2$ , c'est le **phénomène de transparence** (*on « injecte » de la lumière, qui va provoquer une émission stimulée aussitôt contrecarrée par une absorption, et ce sur tout la largeur de la cavité : la lumière du début est la même que la lumière de la fin, on dit que le milieu est transparent*)
  - ✓ Il est donc impossible **en pompant une seule transition atomique d'obtenir une inversion de population : il n'existe pas de laser à 2 niveaux.**

### 2) Système à 3 niveaux

- ✓ On considère trois niveaux d'énergie :
  - Un état fondamental (1) d'énergie  $E_1$
  - Un état excité (3) d'énergie  $E_3$
  - Un état excité (2) d'énergie  $E_2$ , légèrement inférieure à  $E_3$  et dont la durée de vie est assez longue (état **métastable**)
- ✓ On commence par **exciter les atomes depuis le fondamental jusqu'à l'état excité d'énergie  $E_3$** .
- ✓ Puis ils se **désexcitent** en retombant les états d'énergie  $E_2$  (*par transitions non radiatives*) et  $E_1$ . Or, le niveau d'énergie  $E_2$  a une **durée de vie longue**, donc **on peut le peupler au détriment du fondamental** (*les atomes vont « stagner » dans le niveau  $E_2$* )
- ✓ La désexcitation du niveau d'énergie  $E_2$  vers le niveau d'énergie  $E_1$  représente l'énergie des photons émis par effet laser.



- ✓ On veut que l'écart de population entre le niveau  $E_1$  et le niveau  $E_2$ , noté  $\Delta N = N_2 - N_1$  soit le plus grand possible. Pour cela il faut **peupler le niveau (2)** (assez facile grâce aux transitions non radiatives très rapides entre (3) et (2)) et **vider le niveau (1)** (beaucoup plus complexe car le niveau (1) se remplit à nouveau à chaque désexcitation de (2) vers (1), donc à chaque émission de photons)
- ✓ Ceci n'est pas immédiat : **il faut donc pomper suffisamment fort pour atteindre  $\Delta N = 0$**  : on dit qu'il y a un **seuil de transparence**. Une fois ce seuil dépassé, on a bien l'inversion de population.

Exemple de laser à 3 niveaux : le laser à rubis. Le pompage se fait par flashes lumineux à partir d'une diode flash vers une bande continue de niveaux excités  $E_3$ . On n'observe pas d'émission spontanée à partir de ces niveaux, mais des transitions non radiatives rapides permettent d'atteindre un niveau métastable, l'énergie excédentaire est rendue sous forme d'agitation thermique. On obtient ainsi un laser de couleur rouge.

### 3) Système à 4 niveaux

- ✓ On considère quatre niveaux d'énergie :
    - Un état fondamental (0) d'énergie  $E_0$
    - Un état excité (1) d'énergie  $E_1$ , légèrement supérieure à  $E_0$ , mais suffisamment pour que le niveau (1) soit quasiment vide à l'équilibre thermodynamique ( $E_1 - E_0 > k_B T$ ).
    - Un état excité (3) d'énergie  $E_3$
    - Un état excité (2) d'énergie  $E_2$ , légèrement inférieure à  $E_3$  et dont la durée de vie est assez longue (état **métastable**)
  - ✓ On commence par **exciter les atomes depuis le fondamental jusqu'à l'état excité d'énergie  $E_3$** .
  - ✓ Puis ils se **désexcitent** en retombant l'état d'énergie  $E_2$ .
  - ✓ La désexcitation du niveau d'énergie  $E_2$  vers le niveau d'énergie  $E_1$  représente l'énergie des photons émis par effet laser. Les atomes vont « stagner » un petit moment dans le niveau (2).
  - ✓ **Le niveau d'énergie  $E_1$  se vide très rapidement** par transitions non radiatives de (1) vers (0).
- 
- ✓ Au début du pompage, les atomes vont rester un moment dans le niveau (2) alors que le niveau (1) est vide. **On a donc  $\Delta N = N_2 - N_1 > 0$  dès le début de pompage, on a d'emblée l'inversion de population ! Il n'y a pas de seuil de transparence.**
  - ✓ Ce procédé est le plus répandu actuellement et concerne la plupart des lasers en milieu condensé.
  - ✓ On peut avoir un niveau (1) situé dans une bande large analogue à la bande (3). On peut alors choisir le niveau  $E_1$  à l'intérieur de la bande, et **sélectionner la fréquence amplifiée** qui nous intéresse dans un certain intervalle ! On parle alors de **laser accordable en fréquence**.

Exemple de laser à 4 niveaux : le laser à néodyme (émission dans l'IR)

### III. Le rôle de la cavité

#### 1) Notion de gain

- ✓ On enferme le milieu actif entre **deux miroirs séparés par une distance  $L$**  (*largeur de la cavité*). Le but est d'amplifier la lumière émise en faisant passer plusieurs fois la lumière par le milieu actif.
- ✓ A chaque traversée de la cavité de largeur  $L$ , l'intensité lumineuse est augmentée : **elle est multipliée par un certain facteur positif, le gain  $G$** .
- ✓  $G$  est une fonction exponentielle qui dépend de  $L$  (*en effet, on a un phénomène de cascade : les gains s'additionnent à chaque passage*).

☛ En réalité, les niveaux d'énergie ne sont pas clairement définis, les photons émis ont donc leurs fréquences comprises dans un intervalle. **Le gain va donc osciller autour d'une valeur de fréquence.**

Si on regarde l'évolution de  $G$  en fonction de  $\nu$ , on s'aperçoit que **le gain est maximal pour une fréquence donnée** mais est **non nul pour un intervalle de fréquences  $\Delta\nu$**  correspondant à l'épaisseur de la bande d'énergie.

(On peut établir une analogie avec les oscillateurs mécanique amortis entretenus: l'amplitude est maximale lorsque la fréquence est égale à la fréquence propre, mais elle reste non négligeable pour des valeurs qui restent proches de cette fréquence)

#### 2) Condition de résonance

- ✓ Pour que l'onde lumineuse créée dans la cavité continue d'exister, il faut qu'il y ait adéquation **entre la largeur de la cavité et la longueur d'onde**. On doit avoir un **rebouclage « en phase »**, de telle sorte que l'onde ne s'annihile pas elle-même par interférences destructives.
- ✓ Pour cela, il faut qu'après un aller-retour, l'onde se retrouve au même point qu'au départ : cela signifie que **la distance correspondant à l'aller-retour est un multiple de la longueur d'onde**. La **condition de résonance** s'écrit alors :

$$2L = n\lambda \Leftrightarrow 2L = n \frac{c}{\nu} \Leftrightarrow \nu = n \frac{c}{2L} = n\nu_r$$

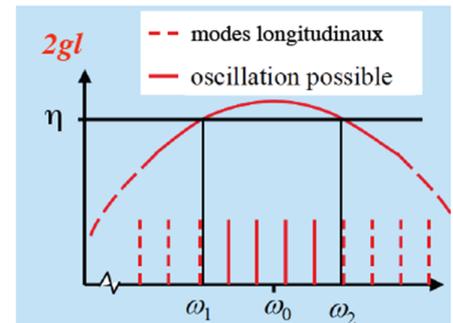
- ✓ On définit la **fréquence de résonance de la cavité  $\nu_r = \frac{c}{2L}$** . C'est la différence entre les fréquences de deux résonances voisines.
- ✓ Les résonances de la cavité sont appelées **modes longitudinaux** (*dans la direction de propagation de l'onde*).

#### 3) Condition d'oscillation laser

- ✓ En réalité, il existe aussi des **pertes  $\eta$  dues à la cavité** (*absorption, transmission partielle par un des miroirs, etc.*) qui vont limiter le gain obtenu.
- ✓ On veut que **la fraction du gain qui reste (gain global) soit strictement supérieure à 1** (*en effet, le but est d'extraire de l'énergie du laser créé pour faire autre chose, il faut donc qu'en extrayant une partie de la lumière à chaque aller-retour, on en garde assez pour ne pas avoir de pertes par rapport à l'état initial*)
- ✓ Cette condition d'oscillation laser s'écrit :

$$G(1 - \eta) > 1$$

- ✓ Le gain est défini comme la fonction :  $G = e^{2gL} \approx 1 + 2gL$  avec  $L$  la largeur de la cavité et  $g$  une fonction de la pulsation de la lumière (et donc de sa fréquence).
- ✓ On réécrit la condition d'oscillation laser :  $2gL > \eta$
- ✓ En traçant la courbe de  $2gL$  en fonction de la pulsation  $\omega = 2\pi\nu$ , on s'aperçoit que **la condition d'oscillation laser n'est vérifiée que pour un certain intervalle de pulsations**  $[\omega_1; \omega_2]$ . Ceci correspond à un intervalle de fréquences  $[\nu_1; \nu_2]$
- ✓ **Les multiples de la fréquence de résonance  $n\nu_r$  compris dans cet intervalle sont les eules fréquences pouvant être amplifiées dans la cavité.**
- ✓ Le nombre de modes longitudinaux pouvant être actifs dans la cavité se détermine de la manière suivante :
  - On détermine la largeur de l'intervalle de fréquences vérifiant la condition d'oscillation laser :
 
$$\nu_2 - \nu_1 = \frac{\omega_2 - \omega_1}{2\pi}$$
  - On détermine la valeur de la fréquence de résonance  $\nu_r = \frac{c}{2L}$
  - On calcule le rapport  $\frac{\nu_2 - \nu_1}{\nu_r} = x$
  - On arrondit par défaut  $x$  ou on garde la valeur exacte éventuelle
  - On en déduit qu'il existe entre  $x$  et  $x + 1$  modes longitudinaux actifs (rappel : si on a trois lampadaires=modes actifs, on n'a que deux espaces inter-lampadaires= $\nu_r$ )
- ✓ En général,  $\nu_r < \nu_2 - \nu_1$ , donc on a **plusieurs modes longitudinaux actifs**. Ceci permet d'avoir plusieurs fréquences amplifiables, mais **fait perdre au laser sa cohérence temporelle** (on aura plusieurs longueurs d'onde différentes dans le même faisceau).



#### 4) Modes transverses

- ✓ Quand on prend des lasers avec des cavités assez grandes, le problème des **pertes par diffraction** se pose. On les considère négligeables lorsque  $\lambda L \ll a^2$  avec  $a$  la taille du miroir (souvent un disque).
- ✓ Pour contrecarrer l'effet de la diffraction, on peut utiliser un **miroir sphérique** : les rayons ayant changé de trajectoire suite à la diffraction sont ainsi réfléchis dans la même direction.
- ✓ La déviation du faisceau  $w(z)$  suit une **loi de Rayleigh** :  $w(z) = w_0 \sqrt{1 + \left(\frac{z}{z_R}\right)^2}$  avec  $w_0$  la taille du col sur lequel on focalise le laser avec le miroir sphérique.
- ✓  $z_R$  est appelée **longueur de Rayleigh**, c'est une **mesure de la variance du faisceau**. En effet, pour  $z = z_R$ , la déviation du faisceau vaut  $w(z_R) = w_0 \sqrt{2}$ . Cela signifie que lorsqu'on se place à la distance  $z_R$  du premier miroir, le faisceau est environ 1,5 fois plus large qu'au départ. **Une longueur de Rayleigh grande reflète une diffraction peu importante** (en effet, le faisceau va s'élargir lentement) et vice-versa.
- ✓ On calcule la longueur de Rayleigh par la relation :
 
$$z_R = \frac{\pi w_0^2}{\lambda}$$
- ✓ En réalité, l'effet de la diffraction est plus complexe en raison de la réflexion du faisceau sur le bord de la cavité (le plus souvent cylindrique). De la même manière qu'on avait défini des modes longitudinaux, on parle de **modes transverses** représentant certaines **figures remarquables obtenues dans la section transverse du laser**. Chacun correspond à une longueur d'onde légèrement différente.

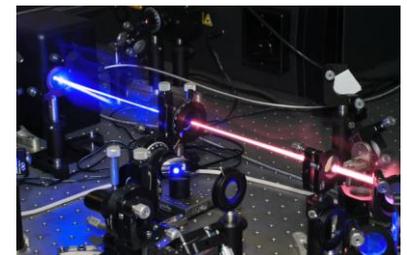
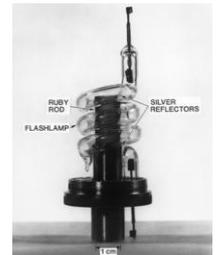
- ✓ Les modes transverses traduisent la **cohérence spatiale** (=directivité) du faisceau laser.
- ✓ La diffraction est minimisée dans le **mode transverse dit 00**, qui est **tout à fait symétrique avec un maximum d'intensité au centre du faisceau**.
- 🕒 Si on arrive à amplifier **UN SEUL mode longitudinal** dans **LE PREMIER mode transverse**, on va avoir un faisceau avec une **très grande cohérence** à la fois **temporelle** et **spatiale**.

## IV. Divers types de lasers

On peut faire des lasers avec tout, il en existe à solide, à liquide et à gaz. Actuellement, on n'a pas trouvé de laser naturel, mais peut-être qu'il en existe dans les étoiles...

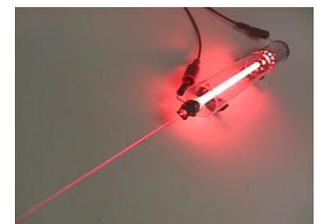
### 1) Lasers à solide

- ✂ **Laser à rubis** : le premier laser (réalisé par Maiman). Le pompage se fait par un **tube flash** créant des flashes lumineux. Le faisceau émis est de couleur **rouge**.
- ✂ **Laser à néodyme** : même principe que le laser à rubis, le milieu actif est du verre dopé avec des ions  $Nd^{3+}$ . L'émission se fait dans le proche **infrarouge**.
- ✂ **Laser titane-saphir** : il comporte un barreau de saphir dopé au titane et est pompé par un **laser vert** à base de néodyme. Il peut délivrer un **train d'impulsions** de très courte durée ( $10^{-14}$  s) avec un certain taux de répétition (80 MHz). Son spectre d'émission s'étend du **rouge** à l'**infrarouge**, mais à l'aide de certains cristaux **doubleurs de fréquence**, on peut l'accorder à une **large gamme de longueurs d'onde**, depuis l'**ultraviolet** jusqu'à l'**infrarouge**.



### 2) Lasers à gaz

- ✓ Le milieu amplificateur est un **gaz** ou un **mélange de gaz** contenu dans un **tube en verre** ou en quartz. On excite le gaz par une décharge électrique, soit directement soit via les collisions des atomes entre eux.
- ✓ Le gain optique est faible, donc les pertes doivent être minimales : les miroirs utilisés sont particulièrement réfléchissants (*plus de 99,9% !*)
- ✂ **Laser hélium-néon** : l'hélium est utilisé comme **gaz tampon**. Une **alimentation électrique cède de l'énergie aux atomes d'hélium**, qui **par collision transfèrent cette énergie aux atomes de néon**. On a alors émission de raies laser dont la plus intense est dans le **rouge**.



### 3) Lasers à semi-conducteurs ou diodes laser

- ✓ Ce sont aujourd'hui **les lasers les plus vendus** dans le monde. Le milieu amplificateur est un **matériau semi-conducteur** ( $InP$ ,  $GaAs$ , etc.) qui se présentent sous la forme de **jonctions p-n** ou d'**hétérostructures**.
- ✓ L'émission provient de transitions optiques entre des niveaux de la **bande de conduction** et de la **bande de valence**. Pour réaliser une émission laser, **il faut amener suffisamment d'atomes dans la bande de conduction** pour obtenir une **inversion de population**.

- ✓ Ces lasers ont plusieurs avantages : ils sont **compacts** et **efficaces** (environ 50%).
- ✓ Toutefois, ils sont **peu puissants** (1 à 10 mW), et le faisceau obtenu est **assez peu directionnel** (divergence de 5 à 30°).



Ce sont les lasers «de la vie de tous les jours», utilisés dans les lecteurs de CD, les imprimantes lasers, les télécommunications, etc.

#### 4) Lasers à colorants

- ✓ Le milieu amplificateur est souvent **liquide**. Il est composé d'une **solution enfermée dans une cuve de verre** contenant des **molécules organiques de colorant**.
- ✓ Les molécules diluées dans l'alcool ne peuvent pas conduire correctement le courant électrique, donc **le pompage est optique**.
- ✓ Ces lasers ont l'avantage d'être **accordables** sur une large partie du spectre de fluorescence du colorant.
- ✓ Toutefois, le colorant est altéré par **photodégradation**, et doit donc être **régulièrement renouvelé**.

