

Activité documentaire : Dualité Onde-Corpuscule et Transferts quantiques d'énergie.

I. La nature de la lumière

Document 1 : Vidéo « yin-et-le-yang-dualite-onde-particule.mp4 » avec VLC (s'arrêter à 2 minutes)
http://www.dailymotion.com/video/xt1456_le-yin-et-le-yang-la-dualite-onde-particule_tech#UYEAe6lqx90

**La nature ondulatoire ou particulaire de la lumière est une préoccupation centrale de la physique du début du xx^e siècle.
 Comment décrire la lumière ?**

Document 2 :

Du particulaire à l'ondulatoire

Après de nombreuses théories au sujet de la lumière, le Britannique Isaac NEWTON (1642-1727) impose son modèle de la lumière au xvii^e siècle. Pour lui, il s'agit d'un jet de particules qui diffèrent suivant la couleur de la lumière. On parle de « modèle particulaire ». Cependant, ce modèle ne permet pas d'expliquer les phénomènes d'interférences. Pour les interpréter, le modèle ondulatoire est élaboré au xix^e siècle à la suite des travaux du Britannique Thomas YOUNG (1773-1829) et du Français Augustin FRESNEL (1788-1827). Très vite, ce modèle prédomine pour atteindre son apogée en 1864 avec les travaux de l'Écossais James MAXWELL (1831-1879). Pourtant, à la fin du xix^e siècle, la découverte de l'effet photoélectrique, par l'Allemand Heinrich HERTZ (1857-1894), ne peut s'expliquer par le caractère ondulatoire de la lumière.

L'effet photoélectrique

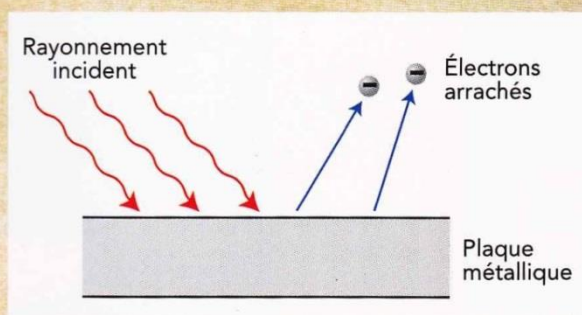
Lorsqu'un métal est éclairé par un rayonnement ultraviolet (**doc. 1**), des électrons sont arrachés de sa surface.

En revanche, si on utilise *un rayonnement de plus grande longueur d'onde, donc de moins grande énergie*, les électrons ne sont pas arrachés, même avec une durée d'exposition plus longue.

De l'ondulatoire au particulaire

Cette dernière observation va avoir de grandes conséquences sur la modélisation de la lumière. D'après le modèle ondulatoire, l'énergie transférée par rayonnement au système dépend de la durée d'exposition. Ainsi, une exposition prolongée du métal à un rayonnement devrait permettre d'accumuler suffisamment d'énergie pour arracher un électron quelle que soit la longueur d'onde du rayonnement. Le modèle ondulatoire ne permet donc pas d'expliquer l'effet photoélectrique.

En 1905, pour expliquer cet effet, Albert EINSTEIN (1879-1955) postule qu'un rayonnement est constitué de particules transportant des quanta d'énergie. En 1926, l'Américain Gilbert LEWIS (1875-1946) les nomme « photons ». Lors de l'effet photoélectrique, pour qu'un électron soit arraché, il faut que l'énergie du photon incident soit suffisante. Si ce n'est pas le cas, l'électron n'est pas arraché, quel que soit le nombre de photons incidents.



Doc. 1 Schématisation de l'effet photoélectrique.

La dualité onde-particule

Actuellement, suite aux travaux du Français Louis DE BROGLIE (1892-1987) en 1923, la lumière, et plus généralement les ondes électromagnétiques, sont décrites comme des flux de photons. Un photon se comporte soit comme une onde, soit comme une particule, suivant le contexte expérimental considéré. On parle de dualité onde-particule. Un photon n'est ni une onde ni une particule. C'est un objet quantique.

En 1921, A. EINSTEIN reçoit le prix Nobel de Physique pour ses travaux sur l'effet photoélectrique. En 1929, L. DE BROGLIE le reçoit pour sa découverte de la nature ondulatoire des électrons.

Document 3 :

L'énergie transportée par un photon s'écrit $E = h\nu$
 avec E l'énergie en Joule, h constante de Planck en Joule-seconde, ν fréquence de l'onde en Hertz
 La valeur de la quantité de mouvement du photon est donnée par l'expression $p = h/\lambda$
 avec p quantité de mouvement en $J.s.m^{-1}$ et λ longueur d'onde de l'onde

A partir des documents proposés, répondre de façon argumentée, à la question suivante « quelle est la vraie nature de la lumière : onde ou particule » ?

II. Transferts quantiques d'énergie

Suite de la vidéo (de 2 min à 2 min 50, et laisser le diagramme énergétique affiché)

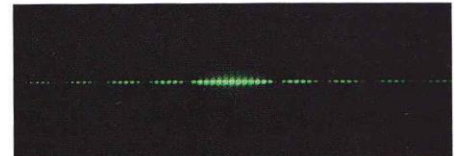
Animation effet photoélectrique/Compton photo-compton.swf avec VLC ou à glisser sur Firefox ou Chrome (http://caeinfo.in2p3.fr/IMG/Flash/animations/phynucl/attenuation/micro_macro.swf)

Pourquoi parle-t-on de transferts quantiques d'énergie lors de l'interaction lumière/matière ? Expliquer alors l'effet photoélectrique.

III. Aspects probabilistes de la mécanique quantique.

Suite de la vidéo (de 2min50 à 5 min 20)

Le phénomène d'interférences est expliqué par le caractère ondulatoire de la lumière. L'expérience des fentes d'Young en est une illustration. On observe sur le **document 2** des interférences constructives représentées par des franges brillantes et des interférences destructives repérées par des franges sombres. **Que se passe-t-il si on réalise l'expérience d'Young en envoyant un seul photon à la fois ou une seule particule de matière à la fois ?**



Doc. 2 Figure d'interférences obtenue avec des fentes d'Young éclairées par une lumière monochromatique.

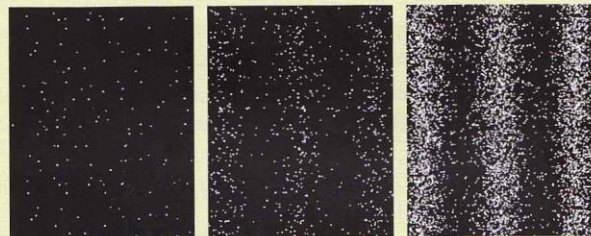
L'expérience des fentes d'Young consiste à envoyer sur une plaque percée de deux fentes parallèles une onde électromagnétique, de longueur d'onde dans le vide λ , issue d'une source lumineuse. En diminuant suffisamment l'intensité lumineuse de la source, on peut considérer que les photons sont émis un par un. On enregistre au cours du temps la position de l'impact de chacun des photons sur un capteur, après la traversée des fentes d'Young. Pour une durée d'expérience très longue, le nombre de photons détectés est grand. Le résultat est représenté sur le **document 3**. Chaque point blanc représente l'impact d'un photon.



Doc. 3 Figure d'interférences obtenue avec des fentes d'Young bombardées photon par photon.

On distingue des zones brillantes (là où beaucoup d'impacts se produisent) qui alternent avec des zones sombres (là où peu d'impacts se produisent même après une longue durée d'expérience). Cette figure est comparable à celle obtenue avec une source lumineuse monochromatique (**doc. 2**).

Si on procède de manière similaire, mais en envoyant des particules de matière, de masse non nulle, telles que des électrons, on observe une distribution identique à celle obtenue avec les photons (**doc. 4**). Les premiers impacts semblent être désordonnés, puis, lorsque leur nombre augmente, ils se répartissent de manière plus organisée. Tous les électrons sont émis dans les mêmes conditions, mais sont détectés en des points différents.



Doc. 4 Figure d'interférences électronique par électron. La durée de l'expérience et donc le nombre d'électrons sont croissants de gauche à droite. Les impacts électroniques sur l'écran apparaissent en blanc.

Dans ce type d'expériences, on est incapable de reconstituer la trajectoire de la particule (photon ou électron) puisqu'on ne sait pas par quelle fente elle est passée.

Si on réalise l'expérience en fermant alternativement, l'une ou l'autre des fentes, on n'observe plus de figure d'interférences, mais une distribution d'impacts centrée sur l'une ou l'autre des fentes. Cela a permis de mettre en évidence *l'aspect probabiliste* des phénomènes quantiques.

1. Les coordonnées du point d'impact d'un photon ou d'un électron sur l'écran peuvent-elles être prévues ?
2. Le comportement macroscopique des photons ou électrons peut-il être prévu ?
3. Pourquoi les électrons sont aussi des objets quantiques ?
4. Qu'est-ce qui différencie le photon de l'électron ?

Conclure en expliquant que la dualité onde-corpuscule s'étend à la matière et que les prévisions sur le comportement d'un objet quantique ne peuvent être que du type probabiliste.

Une application : le microscope électronique (fin de la vidéo)

Pour mieux comprendre le monde, les scientifiques doivent pouvoir l'observer à différentes échelles. L'invention au **xx^e** siècle d'un nouveau type de microscope a permis de repousser les limites de l'observation de l'infiniment petit. **Sur quels principes repose la microscopie électronique ?**

On situe l'apparition du microscope optique au **xvii^e** siècle. Le Néerlandais **Antonie VAN LEEUWENHOEK** (1632-1723) en fabrique plusieurs centaines et réalise des observations détaillées d'insectes et même de bactéries. Un de ses microscopes encore en état de nos jours aurait permis de distinguer des détails d'un micromètre de longueur. Au milieu du **xix^e** siècle, les physiciens sont confrontés à la limite du microscope optique : son pouvoir de résolution.

Pouvoir de résolution

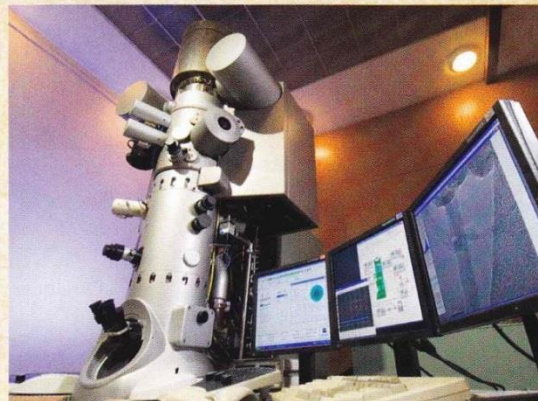
C'est la capacité d'un instrument d'optique à obtenir deux images séparées de deux points distincts de l'objet observé. Ce pouvoir de résolution est limité par le phénomène de diffraction de la lumière par l'ouverture circulaire du dispositif optique. Théoriquement, deux points séparés d'une distance inférieure à la longueur d'onde de la lumière qui les éclaire ne peuvent pas être distingués.

En 1931, deux ingénieurs allemands, **Max KNOLL** (1897-1969) et **Ernst RUSKA** (1906-1988), construisent le premier microscope électronique. La lumière est remplacée par un faisceau d'électrons et les lentilles par des bobines qui, traversées par un courant électrique, créent un champ magnétique. Cinq ans auparavant, le physicien français **Louis DE BROGLIE** a attribué à des particules de matière une longueur d'onde λ telle que $\lambda = \frac{h}{p}$ avec p la valeur

de la quantité de mouvement de la particule et h la constante de Planck. Pour des vitesses de valeurs très inférieures à celle de la lumière dans le vide, la valeur de la quantité de mouvement s'exprime par $p = m \cdot v$.

La longueur d'onde associée aux électrons utilisés dans les microscopes électroniques est inférieure au nanomètre. Le pouvoir de résolution est donc nettement meilleur que celui d'un microscope optique. En accélérant les électrons, on améliore le pouvoir de résolution.

Dans un microscope électronique en transmission (MET), le faisceau d'électrons traverse l'objet étudié. Cela a pour contrainte de n'étudier qu'une fine coupe de cet objet. Le pouvoir de résolution est de 0,2 nm pour les meilleurs modèles.



Microscope électronique à transmission.



La dualité

Lors d'une de ses conférences, **C. COHEN-TANNOUJJI**, physicien français, prix Nobel de physique en 1997 à la suite de ses travaux sur « le développement de méthodes pour refroidir et piéger des atomes avec des faisceaux laser », a présenté les éléments de la diapositive ci-contre.

Claude COHEN-TANNOUJJI.

Ordre de grandeur pour un électron

À un électron accéléré par un potentiel de 10 keV*, on associe une onde de matière de longueur d'onde $\lambda = 1,2 \times 10^{-11}$ m.

Pour un atome

La masse M d'un atome est beaucoup plus élevée.

Pour que $\lambda = \frac{h}{M \cdot v}$ reste appréciable,

il faut que l'atome ait une vitesse v très faible.

Le comportement ondulatoire des atomes n'est donc visible qu'à très basse température.

* Cet électron possède alors une énergie cinétique égale à 10 keV.

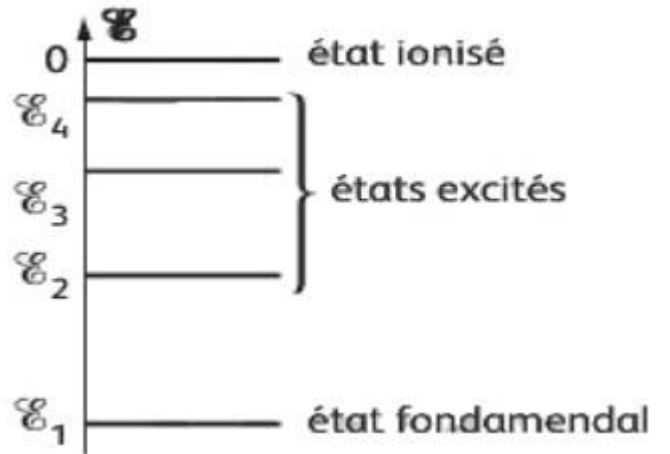
1. Quel phénomène limite la résolution des microscopes optique et électronique ? Pourquoi ce dernier a-t-il une meilleure résolution ?
2. Retrouver par un calcul la longueur d'onde évoquée par Claude Cohen-Tannoudji. ($1\text{eV} = 1,6 \cdot 10^{-19}\text{J}$, $m_e = 9,11 \cdot 10^{-31}\text{ kg}$)
3. Quelle est l'influence de la vitesse des électrons sur la résolution du microscope électronique ?
4. Pourquoi le caractère ondulatoire de la matière à l'échelle macroscopique n'est-il pas perceptible ?

Transferts quantiques d'énergie...

La matière peut absorber de l'énergie lumineuse par absorption d'un

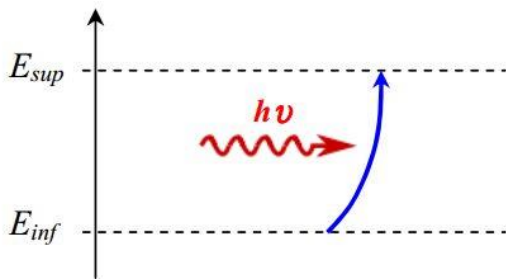
Lorsqu'un atome au repos absorbe un photon, il passe du niveau d'énergie le plus (.....) vers un niveau d'énergie

Si l'énergie absorbée est suffisante, l'atome peut être, c'est-à-dire perdre un électron dont l'énergie sera égale au sur plus d'énergie restant.



ABSORPTION D'UN PHOTON

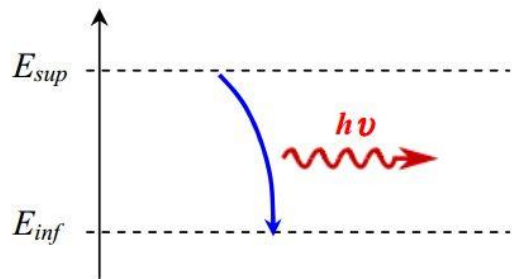
$$E_{sup} - E_{inf} =$$



↑ Figure : Spectre de raies d'absorption

EMISSION D'UN PHOTON PAR DESEXCITATION SPONTANEE DE L'ATOME

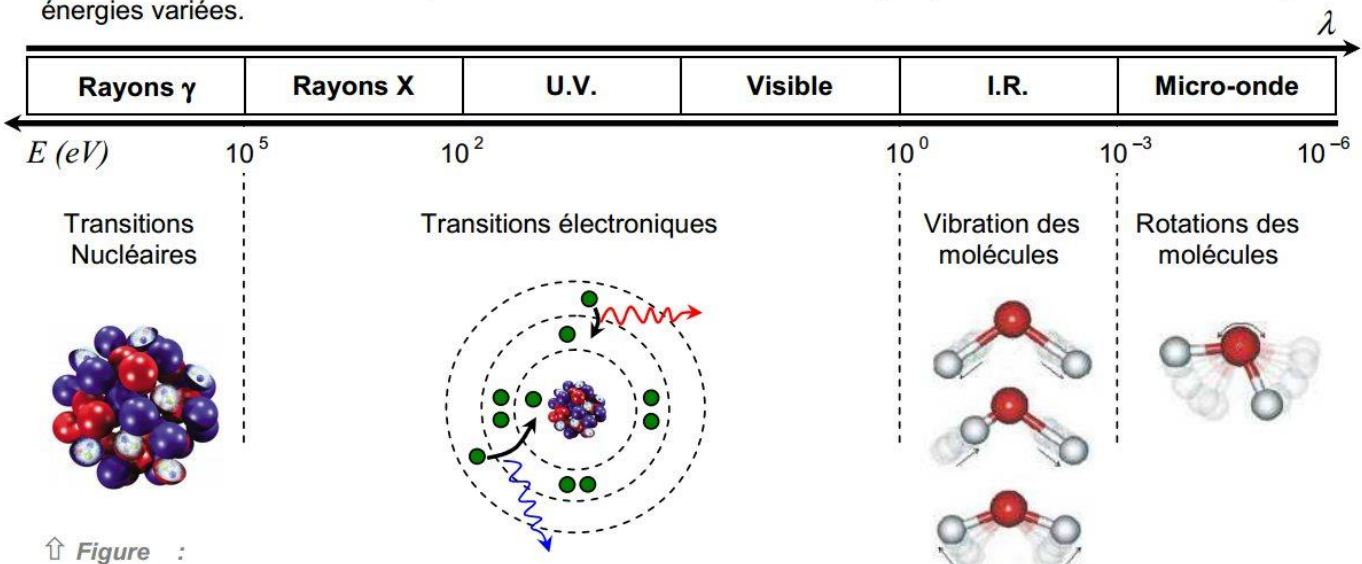
$$E_{sup} - E_{inf} =$$



↑ Figure : Spectre de raies d'émission

Il existe plusieurs types de niveaux énergétiques au niveau microscopique :

L'interaction lumière-matière se produit donc dans des domaines énergétiques variés, et donc à des fréquences et énergies variées.



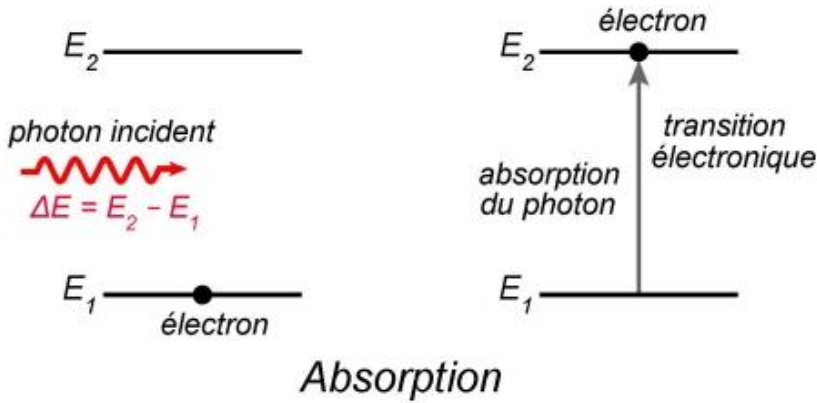
↑ Figure :

Transferts quantiques d'énergie

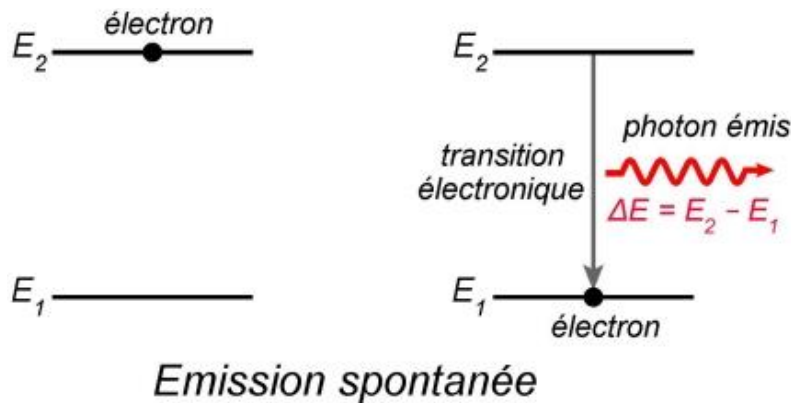
1. Transferts quantiques d'énergie : l'émission stimulée

Rappels :

Un atome peut **absorber un photon**, si celui-ci fait passer un de ses électrons sur un niveau d'énergie existant, en lui apportant exactement le quantum d'énergie ΔE requis pour effectuer la transition.



De la même manière, un électron sur dans état excité n'y demeure pas longtemps (10^{-8} s environ en moyenne). Il peut revenir à un état d'énergie plus basse en **émettant un photon**, par **émission spontanée**. Celle-ci est un **phénomène aléatoire**, car on ne peut pas prévoir quand et comment la transition se fera, et le photon est émis selon une direction aléatoire.



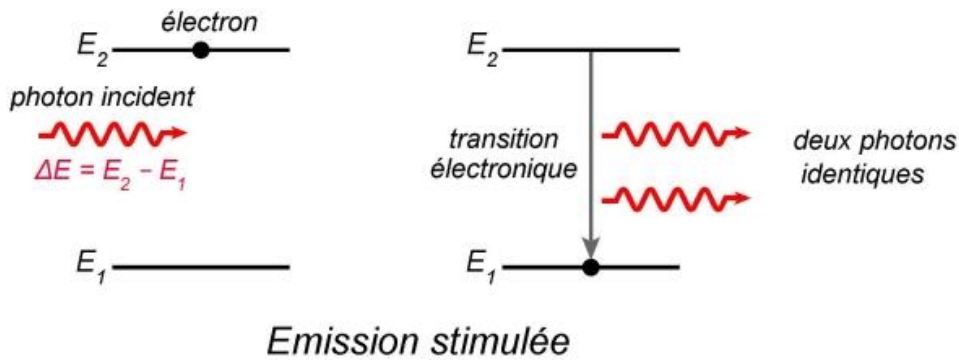
Pour rappel, ΔE est en Joule. Il est relié à la fréquence ν (en Hz) du photon et à sa longueur d'onde λ (en m), par la relation :

$$\Delta E = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

où $h \approx 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ est la constante de Planck, $c \approx 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$ est la célérité de la lumière dans le vide.

Emission stimulée :

Il existe une troisième possibilité de transition, prédite en 1917 par **Albert Einstein** (1879-1955). Quand un photon ayant exactement la différence d'énergie $\Delta E = E_2 - E_1$ entre deux états E_1 et E_2 passe à proximité d'un électron dans l'état E_2 , il peut **faciliter la transition de l'électron vers l'état E_1** . Il y a alors **émission d'un nouveau photon d'énergie ΔE** . Ce photon est **en tout point identique au photon incident**. Comme ils ont même énergie, ils ont même fréquence et même longueur d'onde. De plus, ils ont aussi **même phase (pas de décalage temporel)**.



Ce phénomène porte le nom d'**émission stimulée**. Pour résumer, l'idée maîtresse est d'obtenir **deux photons identiques** à partir d'un seul photon incident.

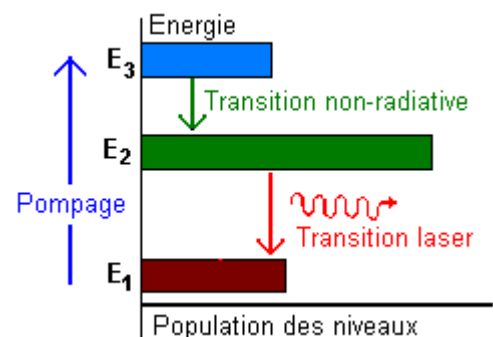
2. Le LASER

L'**émission stimulée** est à la base du fonctionnement du **LASER**, acronyme anglais de *Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* (= amplification de lumière par émission stimulée de rayonnement). Toutefois, pour fonctionner, le LASER doit respecter certaines contraintes.

a. L'inversion de population

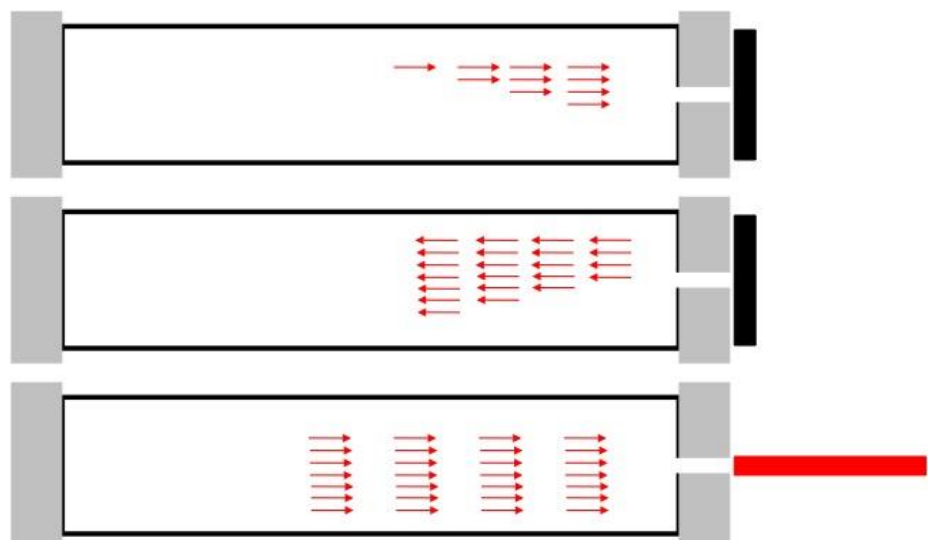
Pour que l'émission stimulée se produise, il faut que l'électron se trouve dans l'état excité voulu (nommé E_2 dans notre description) au moment où le photon incident arrive.

L'inversion de population peut être obtenue par un dispositif dit « de pompage »: Une excitation du milieu par décharge électrique, réaction chimique, courant électrique, lampe flash etc., fait passer les atomes du niveau E_1 à un niveau supérieur E_3 . Les atomes du niveau E_3 qui a une durée de vie très courte se désexcitent vers le niveau E_2 sans émission de photons (transition "non-radiative"), ce qui le surpeuple par rapport à E_1 qui a été dépeuplé: c'est le principe du **pompage à trois niveaux**.



b. L'amplification.

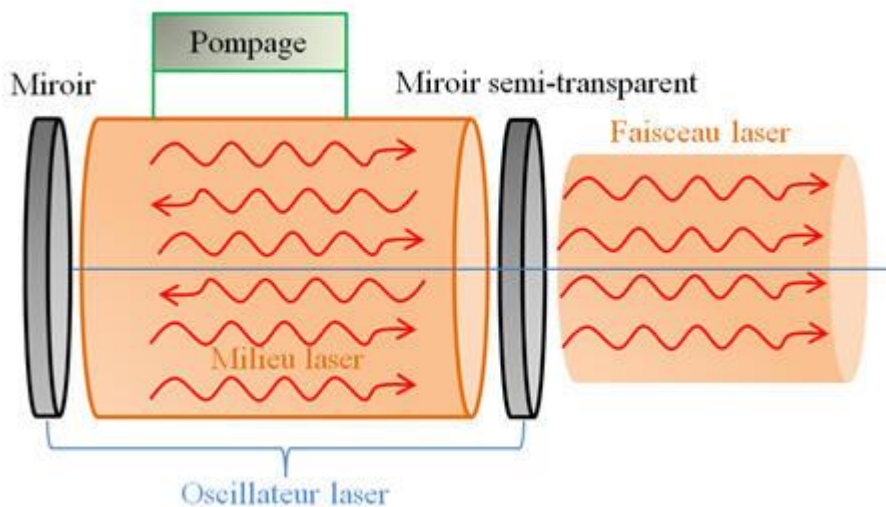
- Le milieu laser est constitué par des atomes capables d'émettre des photons par émission stimulée.
- Ce milieu est placé entre deux miroirs disposés parallèlement face à face (cavité Fabry-Pérot).
- Les miroirs imposent des allers-retours aux photons.



- Ce dispositif permet d'augmenter le nombre d'interactions photon-atome et donc le nombre de photons produits par émission stimulée.
- L'ensemble constitue un oscillateur laser.
- Une source d'énergie crée et maintient l'inversion de population dans le milieu laser.

Remarques :

- Lors des allers-retours, les ondes associées aux photons vont interférer entre elles car elles sont cohérentes.
- Pour qu'il n'y ait pas de perte d'intensité lumineuse, les interférences doivent être constructives.
- Pour cela, dans le cas d'un milieu laser d'indice $n = 1$, la distance aller-retour entre les miroirs doit être un multiple entier de la longueur d'onde.
- L'un des deux miroirs est partiellement transparent pour permettre de récupérer une partie du rayonnement produit par l'oscillateur.



c. Constitution d'un laser :

Un laser comprend :

- Une cavité qui contient le milieu actif dans lequel a lieu l'émission de lumière.
- Une source d'énergie extérieure pour entretenir l'émission.
- Un ensemble de deux miroirs rigoureusement parallèles dont l'un est partiellement réfléchissant pour permettre l'émergence du faisceau laser.

Exemples de lasers :

| Type de laser | Milieu laser | Couleur du faisceau | Longueur d'onde λ |
|------------------|---|----------------------|---------------------------|
| Hélium-néon | Gaz hélium-néon | Rouge | 632,8 nm |
| Diode Laser | Solide semi-conducteur : Arséniure de gallium | Rouge, infrarouge | |
| Laser à colorant | Colorant dans un solvant | Différentes couleurs | |
| Laser Nd-YAG | Solide grenat d'aluminium et d'yttrium Dopé au néodyme | infrarouge | 1,06 μm |

d. Principales propriétés du laser.

- Un laser produit un faisceau lumineux monochromatique dont tous les photons sont en phase. (cohérence chromatique)
- Un laser produit un faisceau lumineux cohérent. (cohérence temporelle, les photons émis sont en phase)

COMPRENDRE

- Comme tous les photons se propagent dans la même et dans le même sens, le faisceau produit par un laser est très directif.

- Un faisceau laser est :

Très directif, intense, monochromatique et cohérent.

Le diamètre de la tache sur l'écran augmente très légèrement lorsque l'on éloigne celui-ci. Il est peu divergent.

e. Utilisation des laser :

| Utilisation | Puissance | Mode de fonctionnement | Remarques |
|---|---|---|---|
| Lecture de disques compacts Lecture de codes-barres | ≈ 2 mW | Continu | Petites diodes laser (composant électronique) |
| Lasers d'alignement pour les travaux publics | ≈ 10 mW | Continu | Petits lasers (exemple : laser hélium-néon) |
| Lasers de transport de télécommunications | Quelques dizaines de mW | Continu ou impulsionnel | Petites diodes lasers |
| Discothèques, spectacles lasers | Quelques watts | Continu | Laser à argon ou hélium-néon |
| Applications médicales. Chirurgie interne : Opération par les voies naturelles Chirurgie externe : Soins de l'œil, (Décollement de la rétine, cataracte) Soins des dents (caries) | La puissance est fonction de l'application | Continu ou impulsionnel | Lasers YAG ou lasers CO2. Les lasers utilisés pour les applications médicales sont assez puissants. Ils peuvent brûler une partie du corps, souder la rétine de l'œil,... Ils sont d'une grande précision. |
| Nettoyage et préparation des surfaces Décapage au laser des monuments historique | Les puissances sont de l'ordre de 107 W à 108 W | Impulsionnel (quelques dizaines à quelques centaines de nanosecondes) | Laser YAG. Ce procédé permet d'éliminer totalement ou de façon sélective des couches superficielles recouvrant différents matériaux. Grâce au faisceau laser ceci peut être réalisé sans altérer le matériau. |
| Soudage des métaux | 100 W à 50 kW | Continu ou impulsionnel | Lasers YAG (100 W à 2 kW) Lasers CO2 (100 W à 50 kW) Puissance selon l'épaisseur |
| Découpage des matériaux | 1 W à 3 kW | Continu ou impulsionnel | Lasers YAG (100 W à 2 kW) |

Les LASER produisent de la lumière issue de phénomènes quantiques au cœur des atomes : l'excitation des électrons ("pompage optique"), peut être obtenu par excitation, puis désexcitation de ces électrons, qui en retournant à leur niveau d'énergie habituel, émettent des photons en phase et de même longueur d'onde.