

Transferts quantiques d'énergie et dualité onde-particule

Comment la matière se comporte-t-elle à l'échelle microscopique ?

1) Ondes ou particules ?

1) La lumière

Les phénomènes de diffraction et interférences de la lumière s'expliquent par ses propriétés ondulatoires.

En 1905, Einstein postule que l'énergie de la lumière est transportée par des grains d'énergie. Il explique ainsi théoriquement l'effet photoélectrique. Actuellement, la lumière et plus généralement les ondes électromagnétiques sont décrites comme des flux de photons. Un photon est une particule non chargée, de masse nulle, il se déplace à la vitesse de la lumière.

L'énergie de la lumière est transportée par des photons qui présentent un aspect particulaire et ondulatoire.

L'énergie d'un photon est :

$$E = h \cdot \nu$$

Avec E exprimée en J, h la constante de Planck en J · s et ν la fréquence de l'onde en Hz.

L'énergie E représente l'aspect particulaire du photon et la fréquence ν son aspect ondulatoire. Dans le vide, l'onde associée au photon à une longueur d'onde λ , exprimée en mètres, et on a :

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda$$

2) La matière

A toute particule matérielle de masse m et animée d'une vitesse de valeur v très inférieure à la célérité c de la lumière, on associe une grandeur appelée quantité de mouvement, dont la valeur, p, est définie par :

$$p = mv \quad \text{avec } p \text{ en kg/m/s, } m \text{ en kg et } v \text{ en m/s}$$

En 1923, le physicien français Louis de Broglie propose que la dualité onde-particule la lumière s'applique aussi à toute particule matérielle.

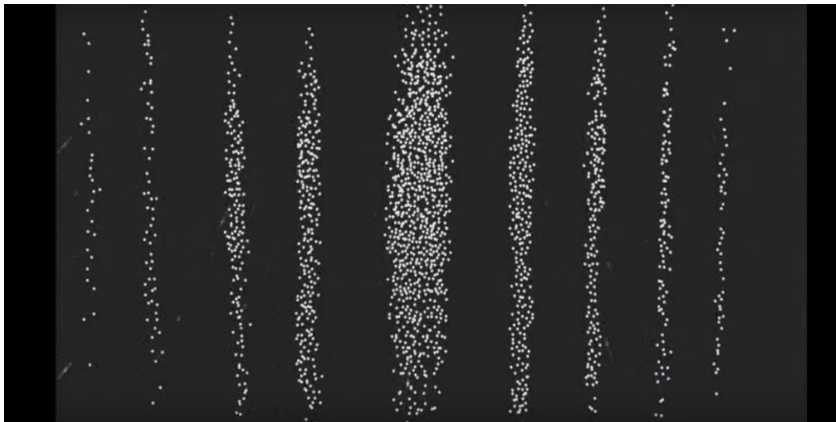
La dualité onde-particule conduit à associer une onde de longueur d'onde λ à tout particule, matériel ou non, de quantité de mouvement de valeur p telle que : $p = h / \lambda$ avec p en kg/m/s, h en J · s et λ en m. Cette relation est appelée relation de de Broglie.

Pour que l'aspect ondulatoire de la matière se manifestent, la masse de la particule doit être relativement peu élevée. C'est le cas pour des particules microscopiques comme l'électron, le proton ou le neutron.

Dans le cas contraire, la longueur d'onde de l'onde associée est tellement faible qu'il n'existe aucun obstacle ou ouverture suffisamment petit pour pouvoir diffracter l'onde. L'aspect ondulatoire de cette particule de matière ne peut donc pas se manifester.

3) Interférences particule par particule

Petite expérience : On envoie des photons un par un sur des fentes d'Young, c'est un phénomène quantique. On ne peut pas prévoir le lieu d'impact des photons avec l'écran placé derrière les fentes. Mais on peut établir la probabilité de les observer à un endroit précis, cette probabilité est maximale à certains endroits et minimale pour d'autres pour un très grand nombre d'impacts.



<https://www.youtube.com/watch?v=DfPeprQ7oGc>

Les phénomènes quantiques présentent un aspect probabiliste : on peut au mieux établir la probabilité de présence d'une particule à un endroit donné.

2) Comment fonctionne un laser ?

Le terme laser est l'acronyme de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation signifiant « amplification lumineuse par émission stimulée de rayonnement ».

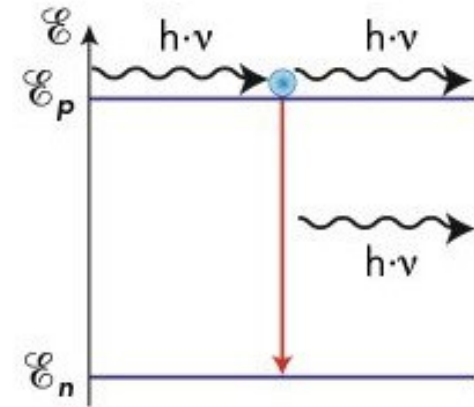
1) Émission spontanée de photons

Un atome peut émettre spontanément un photon quand il passe d'un niveau d'énergie E_p à un niveau d'énergie inférieure E_n . L'énergie quantifiée de ce photon est telle que $E = |E_p - E_n| = h \cdot \nu$
Cette émission a lieu de manière aléatoire et dans n'importe quelle direction de l'espace.

2) Émission stimulée de photons

Prévu par Einstein en 1917, un photon incident d'énergie $E = h \cdot \nu$ peut forcer un atome, initialement dans un état excité d'énergie E_p , à passer au niveau d'énergie inférieur E_n . Ce passage s'accompagne de l'émission d'un second photon de même énergie.

Lors d'une émission stimulée, un photon incident interagit avec un atome initialement excité et provoque l'émission d'un second photon par cet atome. L'énergie du photon incident doit être égale à la différence d'énergie entre deux niveaux d'énergie de cet atome. Deux photons sont obtenus après émission stimulée : le photon émis et le photon incident. Ces 2 photons ont même fréquence, mêmes direction et sens de propagation et sont en phase. Ces photons peuvent à leur tour stimuler d'autres émissions.



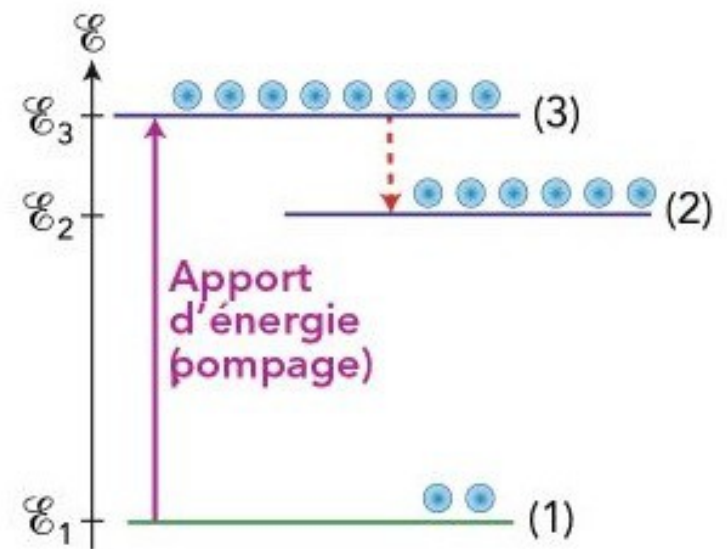
Transition énergétique d'un atome (représenté symboliquement par une sphère) avec émission stimulée d'un photon d'énergie:

$$E = E_p - E_n = h \cdot \nu$$

3) L'inversion de population

Pour augmenter le nombre d'émissions stimulées, il faut qu'il y ait plus d'atomes excités que d'atomes dans l'état fondamental (état stable). Dans la matière, une majorité d'atome étant dans l'état stable, on leur transfère de l'énergie pour créer une inversion de population.

L'apport d'énergie permet aux atomes de passer du niveau fondamental à un niveau excité. Les atomes ne restent pas sur ce niveau, mais redescendent spontanément et très rapidement au niveau 2 où ils s'accumulent. La transition du niveau 2 au niveau 1 pourra alors se produire lors d'une émission spontanée ou simulée.



Conclusion: l'émission stimulée est favorisée par l'inversion de population qui consiste à maintenir plus d'atomes dans un état excité que dans l'état fondamental. Cette situation est obtenue grâce à un apport d'énergie.

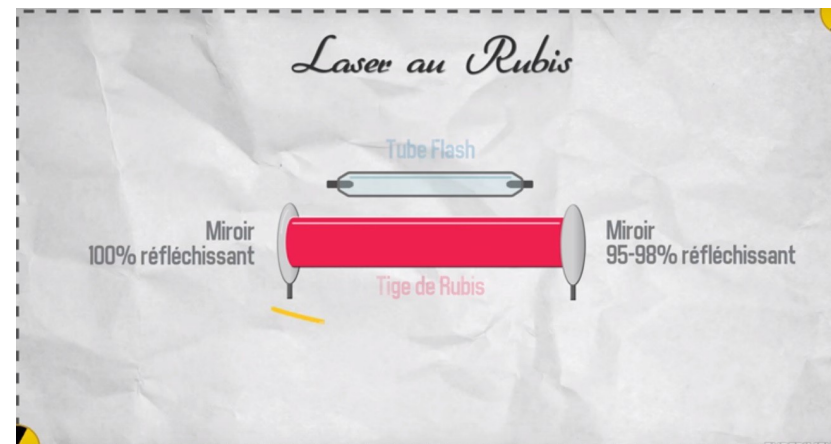
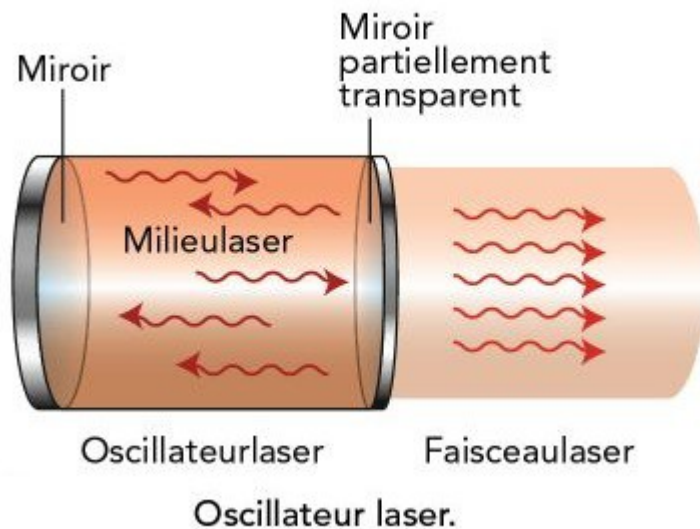
4) L'amplification

Les atomes capables d'émettre des photons par émission stimulée constituent le milieu laser. Ce milieu est placé entre deux miroirs disposés face-à-face qui imposent des allers-retours aux photons. Cela permet d'augmenter le nombre d'interactions photon-atome et donc le nombre de photons produits par émission stimulée. L'ensemble constitue l'oscillateur laser. Une source d'énergie crée et entretient l'inversion de population dans le milieu laser.

Pour éviter les interférences destructives entre les ondes associées aux photons, il est nécessaire que la distance aller-retour entre les miroirs soit un multiple entier de la longueur d'onde pour un milieu laser d'indice $n \approx 1$.

Ce phénomène est l'amplification par effet laser.

L'un des deux miroirs est partiellement transparent, ce qui permet de faire sortir une partie du rayonnement et donc d'obtenir un faisceau laser qui, selon les modèles, est émis en continu ou par impulsions.



<https://www.youtube.com/watch?v=-YtbkpQPbek>

4) Les principales propriétés du laser

Un laser émet un faisceau lumineux monochromatique et cohérent car les photons émis sont en phase. Il est très directif, ce qui permet une concentration spatiale de l'énergie. Les lasers à impulsion permettent de plus une concentration temporelle de l'énergie.

Avec des puissances allant du milliwatt au térawatt, on utilise les lasers pour la lecture des codes-barres, des DVD, le transfert d'informations par fibre optiques, la détermination de distances, le nettoyage de surfaces, la chirurgie ...

3) Quel domaine spectral pour quelle transition d'énergie ?

1) Énergie dans une molécule

Une molécule est constituée d'atomes qui vibrent les uns par rapport aux autres. Elle possède donc de l'énergie vibratoire en plus de l'énergie électronique liée à la répartition des électrons.

Ces deux énergies sont quantifiées, elles ne peuvent prendre que certaines valeurs particulières ; on parle de valeurs discrètes.

Comme pour les atomes, on définit des niveaux d'énergie électronique pour les molécules. A chaque niveau d'énergie électronique correspondent des sous-niveaux d'énergie vibratoire.

2) Transitions énergétiques

La nature de la transition est différente suivant l'ordre de grandeur du quantum d'énergie absorbé ou émis. L'énergie mise en jeu lors d'une transition d'énergie électronique est plus grande que celle mise en jeu lors d'une transition vibratoire.

Une transition d'énergie électronique est associée à une radiation ultraviolette ou visible.

Une transition d'énergie vibratoire est associée à une radiation infrarouge.

Énergie du photon absorbé	Domaine spectral	Nature de la transition mise en jeu	Analyse spectrale correspondante
1,5 eV - 10 eV	Visible, ultraviolet	Transition entre niveaux d'énergie électronique	Spectroscopie UV-visible
0,003 eV - 1,5 eV	Infrarouge	Transition entre niveaux d'énergie vibratoire	Spectroscopie IR

Ordres de grandeur caractéristiques et application en spectroscopie des transitions énergétiques.