

I Dualité onde-particule

1. Onde électromagnétique et photon

La lumière est une onde puisqu'elle subit le phénomène de diffraction.

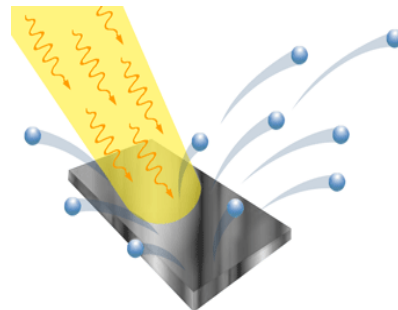
Cependant, certaines expériences démontrent l'insuffisance du modèle ondulatoire de la lumière, comme, l'effet photoélectrique.

L'effet photoélectrique (découvert par Rudolf Hertz en 1890) est l'émission d'électrons par un matériau lorsque celui-ci est exposé à la lumière ou un rayonnement électromagnétique.

voir simulation ENT

Les électrons ne sont émis que si la fréquence de la lumière est suffisamment élevée et dépasse une fréquence limite appelée fréquence seuil. Cette fréquence seuil dépend du matériau.

L'intensité électrique (quantité d'électrons émis) est proportionnelle à l'intensité lumineuse de la lumière incidente.



La théorie ondulatoire de la lumière ne permet pas d'expliquer ce phénomène, en effet dans cette théorie l'énergie de l'onde est liée à son intensité et à la durée d'exposition (puissance (intensité de l'onde) x temps d'exposition = énergie de l'onde). On constate que augmenter l'intensité de l'onde lumineuse incidente ou augmenter le temps d'exposition ne permet pas d'arracher les électrons mais seulement d'augmenter leur nombre.

D'autre part l'effet photoélectrique permet de montrer que l'énergie des atomes est quantifiée car la fréquence seuil pour arracher les électrons dépend des atomes constituant la matière.

Pour expliquer ce phénomène, et en s'appuyant sur les travaux de Hertz et sur la théorie des quantas de Planck selon laquelle l'énergie n'est pas émise de manière continue, mais par paquets, Einstein inventa le concept de photon en 1905, qui lui valut son prix Nobel de physique en 1921.

L'absorption d'un photon, permettait d'expliquer parfaitement toutes les caractéristiques de ce phénomène. Les photons de la source lumineuse possèdent une énergie caractéristique déterminée par la fréquence de la lumière. Lorsqu'un électron du matériau absorbe un photon et que l'énergie de celui-ci est suffisante, l'électron est éjecté ; sinon l'électron ne peut s'échapper du matériau.

Cette conclusion l'amènera alors à la dualité onde-particule de la lumière car cette dernière présente simultanément les propriétés physiques d'une onde (propagation) et celles d'une particule (au contact de la matière).

Ainsi, l'énergie de la lumière est transportée par des **photons** qui présentent un **aspect particulaire et ondulatoire**.

Le photon est un quantum d'énergie ayant :

- une masse nulle
- une charge nulle
- une vitesse égale à c dans le vide

L'énergie E d'un photon est donnée par la relation :

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

$$h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

E en J
 h (Cste de Planck) en $J\cdot s$
 c en $m\cdot s^{-1}$
 λ (longueur d'onde) en m
 ν (fréquence) en Hz

2. Particule matérielle et onde de matière : relation de De Broglie

Comme pour les photons, les objets microscopiques de la matière (électrons, neutrons, positrons...) sont à la fois une onde et une particule. En 1923, Louis de Broglie émet l'hypothèse que l'on peut associer une onde à une particule de matière.

La relation de Louis de Broglie date de 1923.

À une particule matérielle de quantité de mouvement $\vec{p}$ on peut associer une

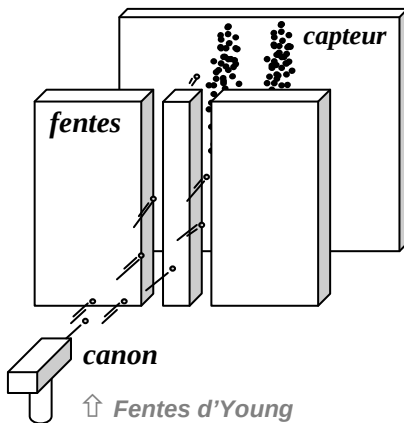
onde de longueur d'onde λ telle que $\lambda = \frac{h}{p}$ **ou** $p = \frac{h}{\lambda}$

h en $J\cdot s$
 p en $kg\cdot m\cdot s^{-1}$
 λ en m

3. Dualité onde-particule

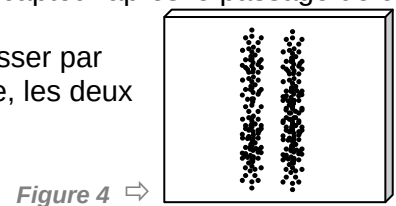
Vérification expérimentale : expérience de Davisson et Germer (diffraction d'électrons par un cristal)
Expérience : voir ENT ou <http://toutestquantique.fr/dualite/>

- On envoie des particules sur deux fentes : impact imprévisible.
- On envoie une onde sur deux fentes : franges d'interférences à l'écran.
- On envoie un objet quantique sur deux fentes : il interfère comme une onde mais lorsqu'il touche l'écran, il se réduit à une particule, plutôt là où l'onde est intense. A la fin, les impacts « s'arrangent » pour former une figure d'interférences.
- Si un observateur mesure par quelle fente passe, l'onde ne passe plus par les deux fentes à la fois. Il n'y a plus d'interférences. L'observateur a modifié l'expérience par sa présence.



Considérons un électron comme une petite bille très dense de masse m . On tire à l'aide d'un dispositif adéquat ces électrons, un par un, sur des fentes d'Young. On enregistre alors au cours du temps la position de l'impact de chaque électron sur un capteur après le passage de ces fentes.

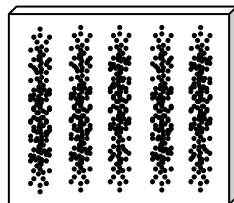
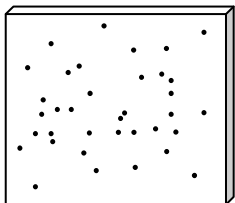
Mathématiquement, l'électron peut passer par la fente de gauche, la fente de droite, les deux ou même par aucune.



Si les électrons se comportaient comme de réelles petites billes microscopiques, on devrait alors observer après le passage d'un grand nombre d'électrons, la figure ci-contre (fig. 4) sur le capteur.

En réalité, les premiers impacts semblent désordonnés (fig. 5).

Puis, lorsque leur nombre augmente, on voit se dessiner une figure d'interférence, comme celle que l'on observe pour une onde telle un laser (fig. 6).



Des électrons, petits bouts de matière, donnent un patron identique à celui d'une onde : une figure d'interférence.

Chaque électron **part du canon comme une particule**, mais **devient une « onde de possibilité »** et passe par les deux fentes en interférant avec lui même, puis tape le détecteur derrière les fentes **comme une particule**.

Le fait de regarder modifie le comportement de l'électron et ce dernier se comporte alors comme une petite bille.

Conclusion :

- Un photon, un électron sont des objets quantiques, ils ne sont en réalité ni des ondes, ni des particules, mais quelque chose qui **se comporte soit comme l'un, soit comme l'autre**. Leurs attributs classiques (trajectoire, vitesse, localisation) n'apparaissent qu'en fonction du dispositif expérimental.
- En physique quantique, les prévisions sur le comportement d'un objet quantique ne peuvent être que du type probabiliste. On peut définir des **probabilités de présence** des particules en un endroit donné, plus grande à certains endroits qu'à d'autres, d'où les franges observées sur les figures.

II Absorption et émission quantique

1. Quantification des niveaux d'énergie d'un atome

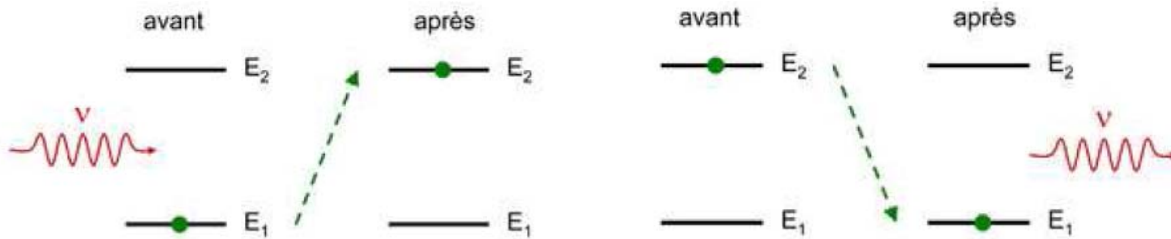
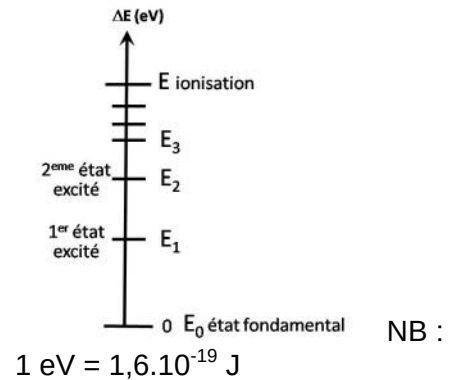
Les niveaux d'énergie d'un atome sont quantifiés.

2. Absorption et émission spontanée

Les échanges d'énergie entre un atome et la lumière sont quantifiés : ils se font par paquets d'énergie appelés photons.

L'énergie E d'un photon ne dépend que de la fréquence ν de la radiation associée : $E = h\nu$
avec $h = 6,63 \cdot 10^{-34} \text{ J.s}$ constante de Planck, E en J, ν en Hz

Diagramme d'énergie de l'atome



Absorption d'un photon si
 $E_{\text{photon}} = E_2 - E_1$



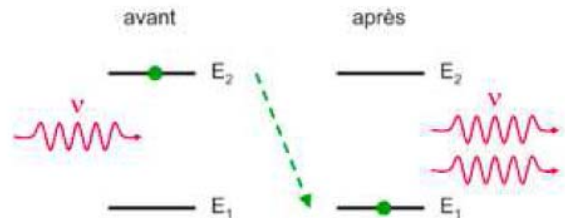
Emission d'un photon de même énergie :
elle a lieu dans une direction aléatoire



3. Emission stimulée

Elle a été prévue par Einstein en 1917 et observée seulement en 1928.

Un photon peut interagir avec un atome même si cet atome est dans un état excité. Le photon incident n'est pas absorbé mais il induit la désexcitation de l'atome qui revient dans son état fondamental en émettant un photon identique au photon incident.



Le photon émis a la même fréquence, **même direction, même sens** et déphasage nul par rapport au photon incident : il y a donc un phénomène d'amplification de la lumière.

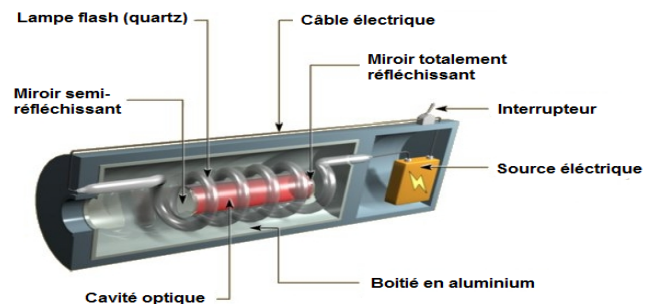
Les photons produits par émission stimulée augmentent l'énergie de l'onde incidente.

Application au LASER (voir AE) :

Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation

- Inversion de population :**

Les atomes sont placés dans une **cavité optique** : ils sont coincés entre deux miroirs. Pour amplifier la lumière il faut augmenter le nombre d'émissions stimulées, **il faut qu'il y ait plus d'atomes excités que d'atomes dans l'état fondamental**. Il faut donc en exciter le plus possible : c'est l'**inversion de population**. Pour cela, on excite les atomes par le dessus en les éclairant très fort (**lampe flash**) de manière à en exciter le plus possible. Cet éclairage se nomme « **pompage** ».



↑ Coupe d'un laser

- *Amplification de la lumière :*

Un laser est fondamentalement un amplificateur de lumière fonctionnant grâce à l'émission stimulée. A un moment, un atome se désexcite. Son photon émis provoque la désexcitation d'un atome voisin. Les deux photons (l'incident et le stimulé) stimulent à leur tour des atomes voisins et ainsi de suite. On assiste à une sorte de réaction en chaîne. **Puis cette lumière émise est réfléchiée par un miroir réfléchissant et revient sur ses pas en repassant dans la cavité optique et en stimulant à nouveau de nouvelles émissions de photons.** De fait, la lumière s'amplifie encore. Elle arrive alors à l'autre miroir, et ainsi de suite.

Un des miroirs étant **semi-réfléchissant**, il laisse passer une partie de la lumière : c'est le faisceau laser.

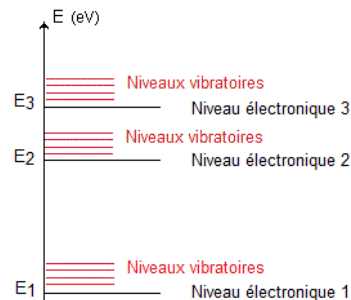
Propriétés du laser

- La couleur d'un laser est celle qui correspond à la fréquence des photons émis lors de la désexcitation stimulée des atomes de la cavité optique. Cette fréquence étant unique : **un faisceau laser est donc monochromatique.**
- Du fait de l'émission stimulée, ces photons sont aussi en phase, donc : **un laser produit un faisceau lumineux cohérent.**
- Dans la cavité optique, toute la lumière va dans une seule direction, bien perpendiculaire aux miroirs.
A l'inverse d'une ampoule, qui éclaire un peu partout (faisceau divergeant), **le laser produit un faisceau très directif.**
- La lumière étant très amplifiée, **la puissance lumineuse d'un laser est concentrée sur une petite surface, même à grande distance de la source.**

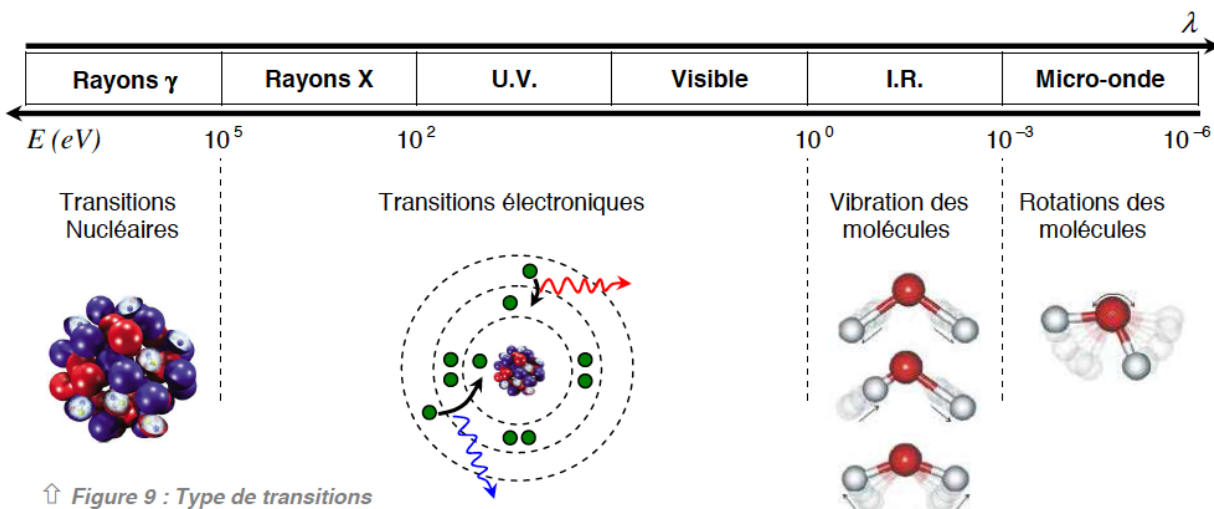
III Transitions quantiques et domaine spectral

Comme les atomes, toutes les entités (molécules, ions, noyaux) possèdent des niveaux d'énergie quantifiés.

Exemple : niveau d'énergie d'une molécule



Les radiations associées aux photons échangés lors des différentes transitions d'énergie appartiennent à des domaines spectraux très différents :



↑ Figure 9 : Type de transitions