

# INTRODUCTION A LA PHYSIQUE QUANTIQUE

## 1/ LA DUALITÉ ONDE-PARTICULE :

### a – Dualité onde-particule de la lumière :

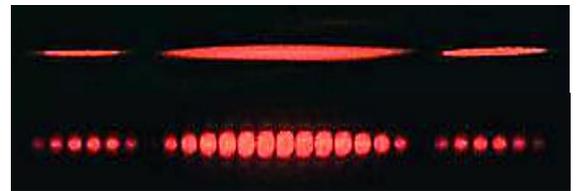
Les phénomènes de diffraction et d'interférences s'expliquent par une conception ondulatoire de la lumière (doc.1).

Par ailleurs, sous l'effet de la lumière certains métaux émettent des électrons, comme si un choc avait lieu entre les électrons du métal et des particules de lumière : c'est l'effet photo-électrique (doc.2). En 1905, Einstein interprète ce phénomène en postulant que la lumière est constituée de grains d'énergie appelés **photons**.

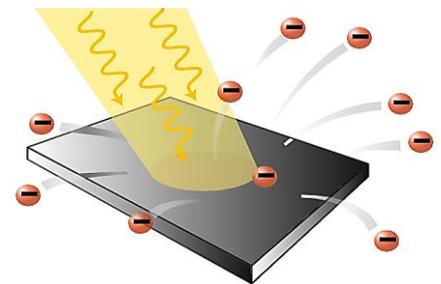
**Les photons** sont des particules élémentaires neutres, de masse nulle et se déplaçant à la vitesse de  $3.10^8 \text{ m.s}^{-1}$  dans le vide.

Ils présentent un aspect particulaire et ondulatoire et transportent une énergie :  $E = h.v$

( E en J ; cste de Planck  $h = 6,62.10^{-34} \text{ J.s}$  ; fréquence  $v$  de l'onde en Hz )



Doc.1 Figures de diffraction (a) et d'interférences (b)



Doc.2 Effet photoélectrique

La lumière (plus généralement les ondes électromagnétiques) présente donc à la fois des aspects ondulatoires et des aspects particuliers selon le contexte expérimental. Pour rendre compte de ce double comportement, on utilise l'expression « dualité onde-particule ».

### b – Dualité onde-particule de la matière :

#### Activité 15.1

Les faisceaux de particules matérielles en mouvement (électron, proton, neutron . . .) peuvent comme la lumière être diffractées et interférer. Les particules de matière ont donc elles aussi un double aspect particulaire et ondulatoire.

Ainsi, à toute particule de quantité de mouvement  $p$  est associée une « onde de matière » de longueur d'onde  $\lambda$  telle que :

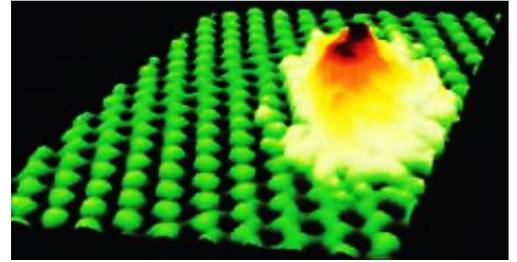
$$\lambda = \frac{h}{p}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} p = m.v \text{ s'exprime en } \text{kg.m.s}^{-1} \\ \lambda \text{ s'exprime en mètre} \\ h = 6,62.10^{-34} \text{ J.s (cste de Planck)} \end{array} \right.$$

Cependant, pour que l'aspect ondulatoire de la matière se manifeste, la masse de la particule doit être relativement peu élevée (sinon  $\lambda$  est trop petite et il n'existe pas d'obstacle de dimensions comparables pour provoquer la diffraction ou les interférences).

### Applications :

- un faisceau d'électrons subit un phénomène de diffraction d'autant plus marqué que sa longueur d'onde associée est proche de la taille de l'objet diffractant. Cette technique permet de connaître la structure des cristaux.
- les microscopes électroniques ont des pouvoirs de résolution beaucoup plus grands que les microscopes optiques puisque les longueurs d'onde associées à des électrons en mouvement sont beaucoup plus petites que celles de la lumière.



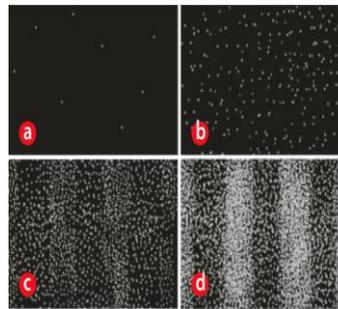
Atomes d'or déposés sur des atomes de carbone (image de microscope électronique)

## c – Aspect probabiliste des phénomènes quantiques :

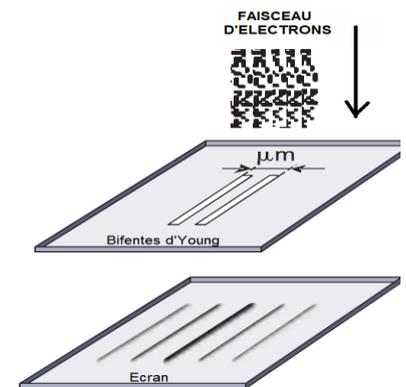
Les phénomènes quantiques sont des manifestations de la matière qui font intervenir des objets microscopiques (électron, neutron . . . ) et qui ne peuvent pas s'expliquer par les lois classiques de la physique.

### Exemple : figure d'interférences d'un faisceau d'électrons

Sur l'écran, la distribution spatiale des impacts d'électrons semble chaotique pour un petit nombre d'électrons (fig. a et b) mais ordonnée avec un grand nombre d'électrons (fig. c et d). Pour un nombre d'électrons suffisant, on retrouve le motif caractéristique des franges d'interférence avec une alternance régulière de zones contenant de nombreux impacts avec des zones contenant très peu d'impacts (fig. d).



Figures d'interférences

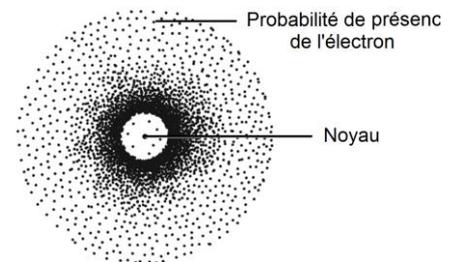


Dispositif interférentiel

L'interprétation de la figure d'interférences obtenue avec un faisceau d'électrons passant à travers deux fentes très étroites et rapprochées (ci-dessus) ne peut pas se faire avec les lois classiques de la physique : les positions aléatoires des impacts sur l'écran ne permettent pas de déterminer la trajectoire des électrons. **En effet, on ne peut pas déterminer la trajectoire d'une particule présentant un comportement ondulatoire : seules les lois probabilistes sur un grand nombre de particules permettent d'établir leur comportement.**

### Conséquence :

On ne peut pas déterminer avec précision la position à un instant donné d'un électron dans un atome. Seule sa probabilité de présence peut être déterminée. On ne peut donc pas déterminer l'orbite d'un électron autour du noyau, mais sa probabilité d'orbite (appelée orbitale).



Atome d'hydrogène

## 2/ TRANSFERT QUANTIQUE D'ÉNERGIE :

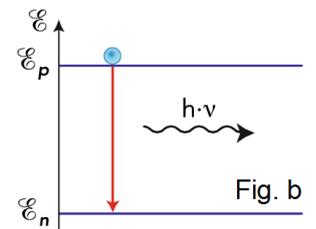
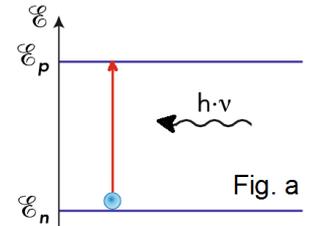
### Activité 15.2

#### a – Les différents modes de transferts :

La matière peut absorber ou émettre des rayonnements électromagnétiques. Au niveau microscopique, cela correspond à l'absorption ou à l'émission de photons par les atomes qui sont alors le siège de transitions énergétiques :

- l'atome peut absorber un photon (fig.a) et passer d'un niveau d'énergie  $E_n$  vers un niveau d'énergie supérieur  $E_p$  si l'énergie du photon telle que  $E_{\text{photon}} = |E_p - E_n| = h \cdot \nu$  .

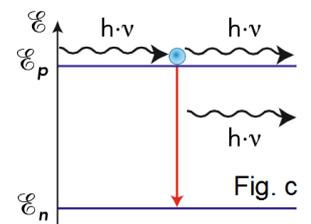
- l'atome peut émettre spontanément un photon (fig.b) quand il passe d'un niveau d'énergie  $E_p$  à un niveau d'énergie inférieur  $E_n$  . L'énergie quantifiée du photon est telle que  $E_{\text{photon}} = |E_p - E_n| = h \cdot \nu$  . Cette émission a lieu de manière aléatoire, dans une direction quelconque.



#### La désexcitation de l'atome peut également se faire par émission stimulée :

Un photon incident d'énergie  $E_{\text{photon}} = |E_p - E_n|$  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, de même direction et de même phase que le photon incident (fig. c) .

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. Deux photons sont alors obtenus : le photon émis et le photon incident. Ces deux photons ont même fréquence, même direction et sont en phase.



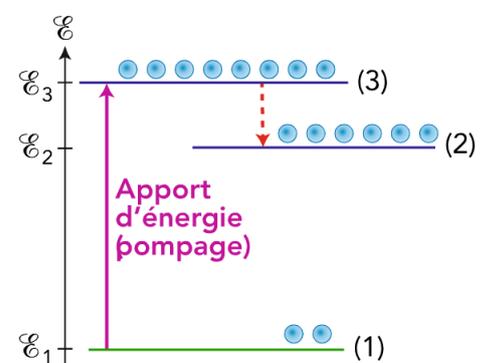
#### b – Application au laser :

Le mot laser est un acronyme créé à partir des initiales de Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation. Ce nom explique le mode de production d'une telle lumière : amplification de lumière par émission stimulée. Son principe de fonctionnement repose sur deux étapes importantes :

##### 📐 Inversion de population :

Pour augmenter le nombre d'émissions stimulées, il faut qu'il y ait plus d'atomes dans un état excité que dans l'état fondamental. Dans la matière, une majorité d'atomes étant dans un état stable, on leur transfère de l'énergie pour créer une inversion de population (si l'énergie est apportée par une source lumineuse, on parle de pompage optique).

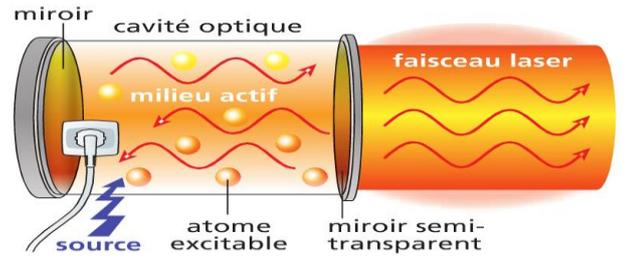
Le schéma ci-contre représente la répartition d'une population d'atomes lors de cette inversion. L'apport d'énergie permet aux atomes de passer du niveau fondamental (1) à un niveau excité (3). Les atomes ne restent pas sur ce niveau, mais redescendent spontanément au niveau (2) où ils s'accumulent. La transition du niveau (2) au niveau (1) pourra alors se produire lors d'une émission spontanée ou stimulée.



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.

### Amplification :

Les atomes capables d'émettre des photons par émission stimulée constituent le milieu laser actif. 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. Une source d'énergie crée et entretient l'inversion de population dans le milieu laser.



Lors de leurs allers retours, les ondes associées aux photons vont interférées entre elles. Afin qu'il n'y ait pas perte d'intensité lumineuse, les interférences doivent être constructives. Pour cela, la distance aller-retour entre les miroirs doit être un multiple entier de la longueur d'onde. L'un des deux miroirs étant partiellement transparent, une partie du rayonnement sort de l'oscillateur ; on obtient alors un faisceau laser.

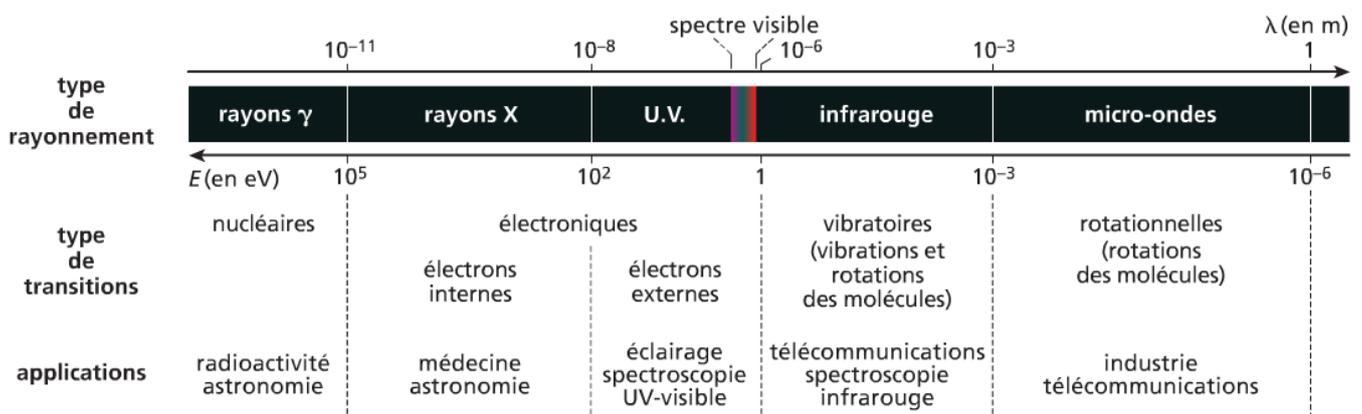
Dans un oscillateur laser limité par deux miroirs, les émissions stimulées successives font augmenter le nombre de photons qui ont même fréquence, même direction et sont en phase. C'est l'**amplification par effet laser**.

### Propriétés du laser :

- tous les photons émis ont la même fréquence donc le laser produit un faisceau **monochromatique**
- tous les photons émis ont la même direction donc le laser produit un faisceau **directif**
- le faisceau étant très directif son **énergie est concentrée dans l'espace**

### c – Domaines spectraux associés aux transitions :

L'interaction de la lumière avec la matière est à l'origine de nombreux phénomènes électriques, magnétiques, optiques et chimiques. Au niveau de l'atome, c'est l'interaction électrique entre les électrons et le noyau qui est à l'origine des transitions électroniques. Au sein des molécules, c'est l'interaction électrique entre les atomes qui agit. Au niveau du noyau, c'est l'interaction nucléaire qui prévaut. L'interaction lumière-matière se produit donc dans des domaines énergétiques variés, donc à des fréquences variées :



### Cas des transitions d'énergie électronique :

Dans les atomes, les niveaux d'énergie correspondent aux états électroniques. Un atome gagne ou cède de l'énergie par transit d'un électron d'un niveau d'énergie vers un autre : c'est une transition d'énergie électronique. Les niveaux d'énergie électronique étant de l'ordre de l'électronvolt ( $1\text{eV} = 10^{-19}\text{ J}$ ), les photons absorbés ou émis par les atomes font partie du domaine du visible ou de l'UV.

Exemple : la lumière rouge des lasers He-Ne est produite par les transitions électroniques des atomes de néon.

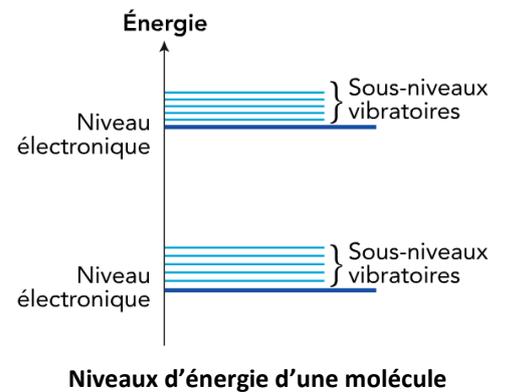
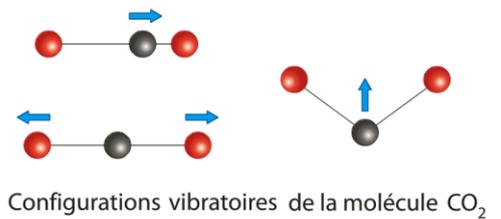
### ☐ Cas des transitions d'énergie vibratoires :

Dans les molécules, les atomes vibrent les uns par rapport aux autres. Elles possèdent donc de l'énergie vibratoire en plus de l'énergie électronique.

Comme pour l'atome, on définit des niveaux d'énergie électronique de molécule. A chaque niveau d'énergie électronique correspondent des sous-niveaux d'énergie vibratoire.

Les niveaux d'énergie vibratoire étant moins énergétiques que les niveaux d'énergie électronique, Lors d'une transition d'énergie vibratoire, les photons absorbés ou émis par les molécules font partie du domaine des IR.

Exemple : les ondes IR des lasers à  $\text{CO}_2$  sont produites par les transitions vibrationnelles des molécules de  $\text{CO}_2$ .



**EXERCICES :** Lire « préparer le bac » p417 puis n°16,18,20,21,23,26 p414/416 et n°5,6,7,8 p436/437