

**I. Aspect ondulatoire et particulaire de la lumière**

- **Supports Vidéo** : Le Yin et le Yang : <https://www.youtube.com/watch?v=N968DgSVLkg> (Soleil Synchrotron) ;  
(*Eventuellement* Dr Kwantum - Fentes de Young : <https://www.youtube.com/watch?v=7f14cVCpvDc>)

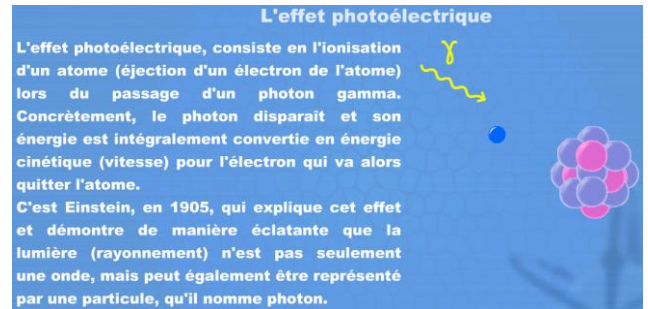
**1. La lumière est une onde**

1.1. Citer deux phénomènes qui prouvent que la lumière est une onde.

- Christian Huygens (1643- 1695) interprète la lumière comme la propagation d'une onde. Maxwell (1831-1879) élabore la théorie de la propagation des ondes électromagnétiques (OEM). La lumière devient alors un cas particulier d'ondes électromagnétiques de longueurs d'onde comprises **environ entre 400 et 800 nm**.

**2. L'effet photoélectrique : la lumière est formée de particules**

- En 1887, Heinrich Hertz découvre l'effet photoélectrique : des électrons sont arrachés à une surface métallique lorsqu'elle est frappée par un rayonnement électromagnétique. Mais l'existence pour chaque métal d'une fréquence seuil au-dessous de laquelle aucun électron n'est émis, ne s'explique pas avec le modèle ondulatoire de la lumière.
- En 1905, Albert Einstein donne une interprétation satisfaisante de l'effet photoélectrique : il postule l'existence des quanta d'énergie, sorte de grains d'énergie lumineuse qui seront ultérieurement appelés photons.



- **Le photon est une particule de masse nulle.**

- **L'expression des quanta d'énergie**  $E = h \times \nu$  avec

**h la constante de Planck  $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s ; la fréquence  $\nu$  (lire « nu ») (Hz) ; E en joules (J)**

**Remarque : E est exprimée très souvent en électrons-volt (eV) :  $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19}$  J**

Exercice : Photons de différents domaines

2.1. Donner l'expression de l'énergie E en fonction de h, c et  $\lambda$ .

2.2. Calculer les énergies, en J, puis en eV, des photons aux ondes électromagnétiques suivantes.

Ondes	Onde radio 1500 m	Domaine du visible 645 nm	Rayons X 0,55nm	Infrarouge 8,0 $\mu\text{m}$	Ultraviolet $260 \times 10^{-9}$ m	Rayonnement $\gamma$ 18 pm
E (J)						
E (eV)						

2.3. Comment évolue l'énergie quand la longueur d'onde  $\lambda$  augmente ?

**3. Relation de Louis De Broglie**

- En 1924 De Broglie généralise la dualité onde particule admise pour la lumière à **tous objets microscopiques** (électrons, protons, neutrons...).
- Cette dualité a été mise en évidence en 1927 par l'observation du phénomène de diffraction puis, plus tard, d'interférence pour les électrons. De Broglie introduit la notion **d'onde de matière**.

**Relation de De Broglie** : à chaque particule en mouvement, on associe une onde de matière de longueur d'onde  $\lambda$  liée à la quantité de mouvement p de la particule par la relation suivante :

$$p = \frac{h}{\lambda} \text{ avec } p \text{ en } \text{kg.m.s}^{-1}, h \text{ la constante de Planck } h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J.s et } \lambda \text{ en m.}$$

- **Remarque:**  $\lambda = \frac{h}{p}$ , si la masse est importante,  $p = m \times v$  est grand donc  $\lambda$  est très faible. Pour observer le phénomène de diffraction il faut que l'ouverture soit de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde ce qui devient impossible pour des valeurs de  $\lambda$  trop faibles. Le caractère ondulatoire de l'électron ne peut pas être mis en évidence.
- Le comportement ondulatoire des objets microscopiques est significatif lorsque la **dimension a** de l'obstacle ou de l'ouverture est du **même ordre de grandeur** que leur **longueur d'onde de matière  $\lambda$** .

Exercice : longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde de matière associée à un électron

- 3.1. Déterminer la longueur d'onde  $\lambda$  de l'onde de matière associée à un électron de masse  $m = 9,11 \times 10^{-31}$  kg et de vitesse  $v = 400$  m.s<sup>-1</sup>. ( $h = 6,63 \times 10^{-34}$  J.s)
- 3.2. Quelle est la taille  $a$  de l'ouverture permettant d'observer la diffraction d'un faisceau d'électrons possédant ces caractéristiques ?

#### 4. Vérification expérimentales de la relation de Louis De Broglie

- La première vérification expérimentale du comportement ondulatoire des électrons a été réalisée en 1927 par Clinton Davisson et Lester Germer : un faisceau d'électrons est envoyé à la surface d'un cristal de nickel. On obtient une figure de diffraction analogue à celle obtenue avec un faisceau de rayons X. Cette figure est bien celle que l'on attend pour une longueur d'onde calculée avec la relation de De Broglie pour l'onde associée aux électrons.
- Des expériences ont ensuite été réalisées avec d'autres particules matérielles : la diffraction des neutrons est couramment utilisée dans la recherche industrielle pour étudier la structure et les défauts des surfaces.
- Le microscope électronique est une application des ondes de matière. Il utilise un faisceau d'électrons dont la longueur d'onde associée est beaucoup plus petite que celle d'un photon de lumière visible. Or, la résolution d'un microscope, qui évalue sa capacité à séparer des détails très voisins, est limitée par la longueur d'onde de l'onde utilisée. Ainsi, la résolution d'un microscope électronique est bien supérieure à celle d'un microscope optique.

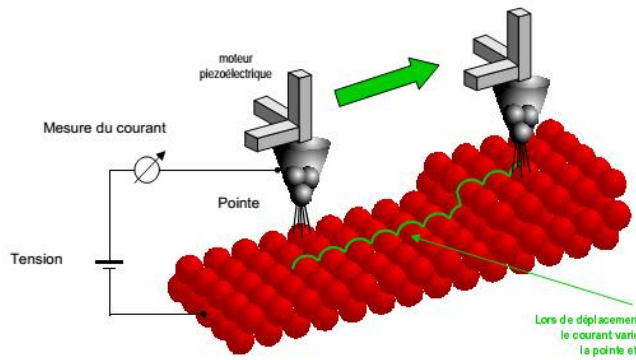
**Comment fonctionne l'instrument ?**

On approche une pointe très fine au dessus d'une surface en appliquant une tension entre les deux. Un courant peut s'établir lorsque la pointe est à quelques nanomètre de la surface, même si elle ne la touche pas : c'est l'EFFET TUNNEL. L'intensité de ce courant dépend avec une grande sensibilité de la distance entre la pointe et la surface.

Lorsqu'on déplace la pointe au dessus de la surface, il suffit d'enregistrer les variations du courant en fonction de la position de la pointe pour tracer une représentation de la topographie de surface.

Le positionnement de la pointe peut se faire de façon très précise avec un moteur qui peut la déplacer de façon contrôlée avec une précision sub-nanométrique ! C'est le moteur piezoélectrique.

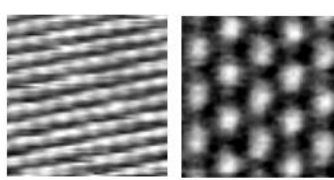
Cet instrument a été inventé par des chercheurs de IBM à Rùschlikon près de Zürich et ils ont été récompensés par le prix Nobel de physique en 1986.



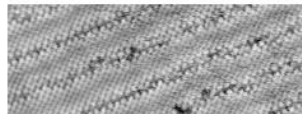
Lors de déplacement de la pointe au dessus de la surface, le courant varie en fonction de la distance entre la pointe et les structures sur la surface

**La topographie des matériaux**

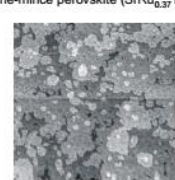
Atomes de carbone (surface du graphite)



Atomes sur un supraconducteur à haute température (Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>Ca<sub>2</sub>CuO<sub>3</sub>)



Couche-mince pérovskite (SrRu<sub>0,37</sub>Ti<sub>0,63</sub>O<sub>3</sub>)

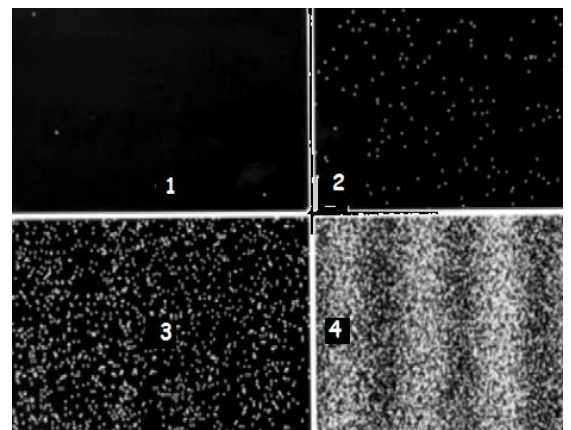


En plus de la topographie le microscope à effet tunnel peut reconnaître le type de matériaux sur lequel il travaille. Il peut en effet faire la différence entre un semi-conducteur, un métal ordinaire, un supraconducteur, etc.

Ainsi le microscope à effet tunnel est sensible aux propriétés électroniques des matériaux. Ce n'est pas seulement un « œil », mais aussi un « nez » à l'échelle du nanomètre !

#### 5. Aspect probabiliste des phénomènes quantiques

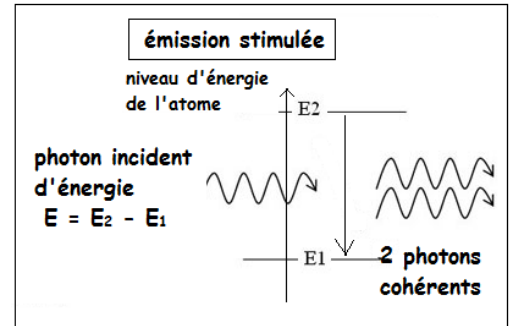
- En mécanique quantique, les objets microscopiques ou les OEM ont des niveaux d'énergie quantifiés et non continus comme en mécanique classique.
- La figure d'interférence est obtenue avec un faisceau d'électrons et deux fentes étroites. Les photos 1, 2, 3, 4 sont prises aux instants  $t_1 < t_2 < t_3 < t_4$ . La position de l'impact des électrons ne permet pas de déterminer la trajectoire des électrons. Cependant Ils ont une probabilité d'impact en un lieu donné. Une zone sombre correspond à une faible probabilité d'impact, une zone claire à une forte probabilité d'impact.
- **Les particules du monde microscopique** sont soumises à des **lois probabilistes**. Seule l'étude d'un grand nombre de particules permet d'établir un comportement.



## II. Le laser

### Principe du laser (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)

- Un laser est constitué d'une ampoule dans laquelle on enferme un gaz par exemple du néon et de l'hélium.
- On introduit dans l'ampoule 2 électrodes reliées à une source de tension électrique. Cette source produit un courant d'électrons qui entre en collision avec les atomes d'hélium qui passe à un niveau d'énergie excité.
- L'atome d'hélium entre à son tour en contact avec l'atome de néon qui lui aussi s'excite. En se désexcitant l'atome de néon produit un photon. Ce photon en passant à proximité d'un autre atome de Néon excité génère **une émission stimulée** de photon.
- **Attention** une partie des photons émis peut servir à exciter les atomes de Néon. Pour qu'il y ait amplification de l'onde lumineuse, il faut qu'il y ait plus d'atome de Néon excité que dans leur état fondamental. Cet état correspond à **l'inversion de population**, elle est réalisée à partir d'une opération appelée **pompage optique**.
- L'émission stimulée n'est possible que si le **photon incident** possède une **énergie E égale à la différence d'énergie entre 2 niveaux de l'atome excité**.



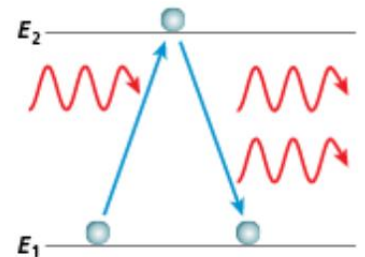
- **Le photon incident ainsi que celui produit par stimulation ont exactement la même fréquence, la même direction de propagation et vibrent en phase. Des photons possédant la même fréquence et vibrant en phase sont appelés photons synchronisés ou cohérents. Une partie des photons traversent le miroir semi réfléchissant et produisent un faisceau unidirectionnel et très énergétique. L'autre partie est réfléchi et stimule la production d'autres photons.**

### Propriétés du laser

- Un laser émet un faisceau de lumière cohérente :
  - Monochromatique
  - Unidirectionnel ce qui permet une concentration spatiale de l'énergie.
- **Le laser à impulsions** permet de concentrer dans le temps l'énergie grâce à des émissions de courte durée.

#### 1. Emission stimulée

- 1.1. Le schéma ci-contre est censé illustrer l'émission stimulée de la lumière. Quelle(s) erreur(s) comporte-t-il ?



#### 2. Comment évaluer l'intensité lumineuse d'un laser ?

- Un laser hélium-néon délivre un faisceau cylindrique de puissance  $P = 2,0 \text{ mW}$  et de rayon  $r = 0,40 \text{ mm}$ .
- 2.1. Déterminer la puissance lumineuse surfacique  $I$  (ou intensité lumineuse)
- 2.2. Comparer cette puissance lumineuse surfacique à celle du Soleil, environ  $1 \text{ kW/m}^2$ .

#### 3. Classe d'un laser

- Les lasers appartiennent à différentes classes, selon leur puissance. Le tableau suivant concerne les lasers visibles.

Classe	1	2	3	4
Puissance	$< 0,39 \mu\text{W}$	de $0,39 \mu\text{W}$ à $1 \text{ mW}$	de $1 \text{ mW}$ à $0,5 \text{ W}$	$< 0,5 \text{ W}$

- 3.1. Quelle conséquence peut avoir l'entrée dans l'œil d'un faisceau laser ?
- 3.2. Justifier qu'une mise en garde figure sur les pointeurs laser (classe 2).
- 3.3. Pourquoi un laser ultraviolet est-il plus dangereux qu'un laser visible ?

## III. Énergie d'édifices microscopiques

- La notion de niveau d'énergie s'applique à tout système microscopique : noyau, atome molécules etc.
- Il existe trois grands types de niveau d'énergie microscopique :
  - **Les niveaux d'énergie électroniques** (ces niveaux d'énergie sont déterminés dans le cas d'un atome seul, non liée avec d'autre atome)
  - **Les niveaux d'énergie nucléaire** correspondant aux différents niveaux d'énergie du noyau (de l'ordre de la centaine de kilos électronvolt)
  - **Les niveaux d'énergie au sein d'une molécule.**

## 1. Niveau d'énergie électronique d'un atome

- Un atome gagne ou cède de l'énergie en faisant transiter un électron d'un niveau d'énergie quantifiée  $E_n$  à  $E_p$ . C'est une transition d'énergie électronique. Lors d'une transition électronique, les atomes émettent ou absorbent des photons dans le domaine UV ( $10^{-10} \text{ m} < \lambda < 0,4 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ ) ou visible ( $400 \text{ nm} < \lambda < 800 \text{ nm}$ ).

➤ **Rappel** :  $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$

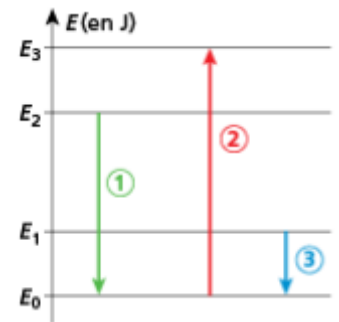
### Raie jaune du doublet du sodium

1.1. On considère la raie jaune du doublet du sodium de longueur d'onde  $\lambda = 589,0 \text{ nm}$ .

Calculer l'énergie  $\Delta E$  (en eV) qui correspond à l'émission de cette radiation.

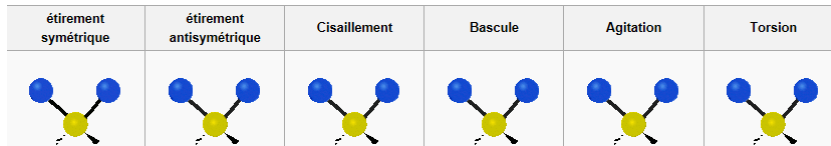
### Absorption et émission d'un photon

- La figure ci-contre présente différents niveaux d'énergie d'un atome.
- 1.2. Comment sont notées l'énergie de l'état fondamental et celles des états excités ?
- 1.3. Attribuer aux flèches le mécanisme d'émission ou d'absorption d'un photon. Exprimer les fréquences correspondantes.



## 2. Niveaux d'énergie au sein d'une molécule

- On distingue quatre types d'énergie au sein d'une molécule :
  - **L'énergie électronique des électrons**. Comme pour les rayonnements électroniques des atomes, les rayonnements émis se trouvent dans le domaine du **visible et des UV**.
  - **L'énergie de translation de la molécule**
  - **L'énergie de vibration** due aux oscillations des noyaux autour de leur position d'équilibre.



- La transition entre deux niveaux d'énergie de vibrations correspond à  $1/10$  d'électronvolt environ. Les longueurs d'onde correspondant à ce type de transition sont dans le domaine de **l'infrarouge**.
  - **L'énergie de rotation** de la molécule autour de son centre d'inertie. La transition entre deux niveaux d'énergie de rotation et de l'ordre du milli électronvolt. Les longueurs d'onde correspondantes font partie de **l'infrarouge lointain**.
- Application : Détermination de la structure moléculaire d'une substance par **spectroscopie infrarouge**.

### Energie vibratoire

- Les atomes liés par une liaison covalente au sein d'une molécule peuvent vibrer autour d'une position d'équilibre. Les énergies vibratoires que peut prendre la molécule sont quantifiées et associées à des transitions quantiques. Le premier niveau vibratoire d'une molécule diatomique est situé  $0,31 \text{ eV}$  au-dessus de son niveau fondamental.
- 2.1. Déterminer la longueur d'onde  $\lambda$  de la radiation associée à la transition entre le niveau fondamental et le premier niveau vibratoire.
- 2.2. Décrire ce qui se passe si une solution aqueuse contenant cette molécule est éclairée par une lumière contenant une radiation de cette longueur d'onde.

## IV. Exercices

- Exercice 21-22 p.421-422 du livre