

Compétences

Voici les concepts que vous devez acquérir à l'issue de ce chapitre :

- Connaître la dualité onde-particule ;
- Connaître et utiliser la relation de de Broglie $p = \frac{h}{\lambda}$;
- Mettre en évidence l'aspect probabiliste des phénomènes quantiques.

Correction des exercices du chapitre 19

19.1 N° 4 p. 392 – Fonctionnement

- a. La transition réalisée par le pompage est $1 \rightarrow 3$. Il s'agit d'une transition vers un état instable ou métastable, de durée de vie faible.

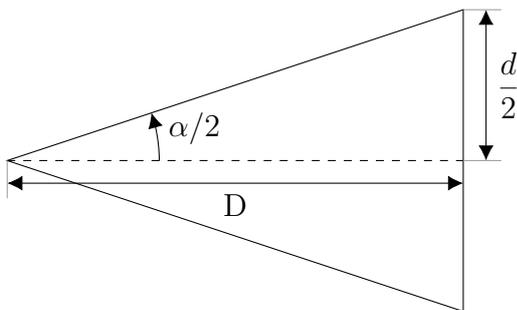
La transition correspondant à l'émission stimulée est $2 \rightarrow 1$. Afin que l'inversion de population soit possible, il faut que l'absorption $1 \rightarrow 3$ et l'émission spontanée $3 \rightarrow 2$ soient plus probables que l'émission spontanée $2 \rightarrow 1$. Autrement dit, il faut que la durée de vie de l'état 2 soit plus grande que celle de l'état 3.

- b. Il peut tout-à-fait y avoir émission spontanée $3 \rightarrow 1$ ou $2 \rightarrow 1$. Ces émissions spontanées doivent être peu probables, afin de permettre l'inversion de population.

19.2 N° 5 p. 393 – Directivité

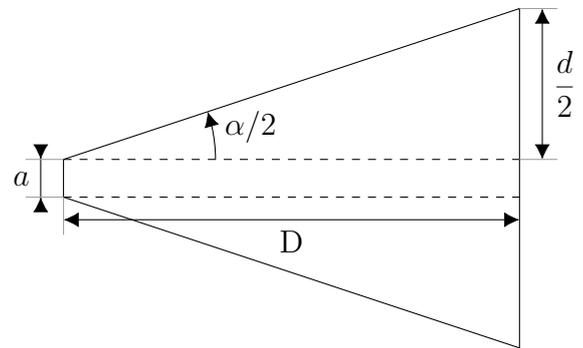
- a. Si l'on néglige le diamètre du faisceau à la sortie du laser, le diamètre d de la tache est donné par la tangente de l'angle $\frac{\alpha}{2}$ dans le triangle rectangle :

$$\tan \frac{\alpha}{2} = \frac{\frac{d}{2}}{D} \Leftrightarrow d = 2D \tan \frac{\alpha}{2}$$



$$d = 2 \times 200 \tan \frac{2,0 \times 10^{-3}}{2} = 0,40 \text{ m}$$

- b. Si l'on doit tenir compte du diamètre a du faisceau à la sortie du laser, il faut le rajouter au diamètre d précédent :



Or

$$\frac{a}{d} = \frac{1,0 \times 10^{-3}}{0,40} \sim 10^{-3}$$

donc $a \ll d$: le diamètre du faisceau à la sortie du laser est négligeable devant la taille de la tache.

Remarque

Quel est l'effet de la diffraction ? L'angle de la première extinction de la tache de diffraction pour une ouverture circulaire de diamètre a à une longueur d'onde λ est :

$$\theta = \frac{1,22\lambda}{a}$$

Pour $\lambda = 632 \text{ nm}$ (laser rouge) :

$$\theta = \frac{1,22 \times 632 \times 10^{-9}}{1,0 \times 10^{-3}} = 7,7 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

19.3 N° 6 p. 393 – Propriétés

- a. La puissance \mathcal{P} est égale à l'énergie $E = 3,0 \mu\text{J}$ divisée par la durée $\Delta t = 100 \text{ fs}$:

$$\mathcal{P} = \frac{E}{\Delta t} = \frac{3,0 \times 10^{-6}}{100 \times 10^{-15}} = 3,0 \times 10^7 \text{ W}$$

soit 30 MW. La puissance moyenne se calcule sur toute la durée de fonctionnement :

$$\mathcal{P} = \frac{E}{100\,001\Delta t}$$

$$\mathcal{P} = \frac{3,0 \times 10^{-6}}{100\,001 \times 100 \times 10^{-15}}$$

$$\mathcal{P} = 3,0 \times 10^2 \text{ W}$$

soit 0,30 kW.

- b. La puissance délivrée par le faisceau lors d'une impulsion est très grande. Le faisceau est aussi très directif, donc à la concentration temporelle s'ajoute la concentration spatiale. Cette énergie étant très concentrée, elle n'a pas le temps de se propager dans tout le métal, qui est instantanément sublimé (passage de l'état solide à l'état gazeux).

19.4 N° 10 p. 393 – Nombre de photons

L'énergie d'un photon est donnée par :

$$\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\mathcal{E} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{632 \times 10^{-9}}$$

$$\mathcal{E} = 3,15 \times 10^{-19} \text{ J}$$

Chaque seconde, le laser émet une énergie E telle que :

$$E = \mathcal{P} \times \Delta t = 2,0 \times 10^{-3} \times 1 = 2,0 \times 10^{-3} \text{ J}$$

Le nombre de photons émis est donc :

$$\frac{E}{\mathcal{E}} = \frac{2,0 \times 10^{-3}}{3,15 \times 10^{-19}} = 6,3 \times 10^{15}$$

soit de l'ordre de 10^{16} photons par seconde.

19.5 N° 16 p. 396 – Divergence du faisceau

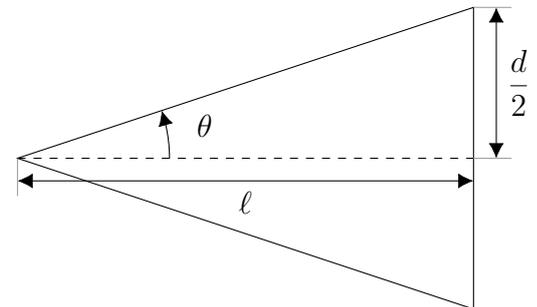
a. La diffraction.

b. Angle de la première extinction :

$$\theta = \frac{1,22 \times 632,8 \times 10^{-9}}{0,90 \times 10^{-3}} = 8,6 \times 10^{-4} \text{ rad}$$

- c. L'angle de divergence α vaut deux fois l'angle de la première extinction θ , en négligeant le diamètre du faisceau à la sortie du laser (hypothèse qui sera vérifiée) :

$$\alpha = 2\theta = 1,7 \times 10^{-3} \text{ rad} = 1,7 \text{ mrad}$$



À une distance $\ell = 50 \text{ m}$, le diamètre d du faisceau est donné par :

$$d = 2\ell \tan \theta$$

$$d = 2 \times 50 \times \tan 8,6 \times 10^{-4}$$

$$d = 0,086 \text{ m} = 8,6 \text{ cm}$$

Vérifions l'hypothèse formulée :

$$\frac{d}{D} = \frac{0,086}{0,90 \times 10^{-3}} = 96 \sim 10^2$$

L'hypothèse est vérifiée : la tache est environ cent fois plus grosse que le diamètre du faisceau, que l'on peut donc négliger.

19.6 N° 17 p. 396 – Laser médical

a. Infrarouges.

b. Rouge.

c. Le laser visible permet au chirurgien de viser, car il ne voit pas la tâche formée par le laser infrarouge.

d. Énergie d'un photon :

$$\mathcal{E} = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

$$\mathcal{E} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{10,6 \times 10^{-6}}$$

$$\mathcal{E} = 1,88 \times 10^{-20} \text{ J}$$

Puissance du faisceau :

$$\mathcal{P} = E \times \Delta t = N\mathcal{E}\Delta t$$

$$\mathcal{P} = 2,7 \times 10^{21} \times 1,88 \times 10^{-20} \times 1$$

$$\mathcal{P} = 51 \text{ W}$$

Activité n° 2 p. 401 – Le comportement ondulatoire des électrons

1. Analyser les documents

- a. Le phénomène physique sur lequel sont basées les expériences est le phénomène de diffraction. L'expérience de Davisson et Germer étudie les électrons réfléchis par un cristal alors que l'expérience de Thomson étudie les électrons transmis.
- b. Le phénomène de diffraction est caractéristique des ondes ; en donnant lieu au phénomène de diffraction, les électrons montrent un aspect ondulatoire. Ceci valide la relation de DE BROGLIE :

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

qui est donc valable non seulement pour la lumière, mais aussi pour toutes les particules : rayons X, électrons, *et cetera*.

2. Exploiter les informations et conclure

- a. Les rayons X ont des longueurs d'onde qui sont de l'ordre de 10^{-10} m. Ils peuvent donc être diffractés par les plans d'atomes des cristaux. La figure de diffraction obtenue permet de remonter à la distance séparant ces plans d'atomes et même à leur géométrie (les quatorze mailles cristallines de BRAVAIS, théorisées des années auparavant, et qui sont ainsi prouvées expérimentalement).
- b. On note $T = 100$ eV l'énergie cinétique des électrons. Le faisceau d'électrons est monocinétique, ils ont tous la même vitesse v .
On peut exprimer l'énergie cinétique T en fonction de la quantité de mouvement $p = mv$ selon :

$$T = \frac{1}{2}mv^2 = \frac{p^2}{2m}$$

Activité n° 4 p. 403 – Microscopes optique et électronique

1. a. La résolution d'un microscope est limitée par la diffraction. Plus la longueur d'onde est petite, plus la limite de résolution est petite, et donc plus le microscope permet d'observer des objets petits.
- b. On met à profil le comportement ondulatoire des électrons.
- c. Un faisceau d'électrons peut présenter une longueur d'onde beaucoup plus petite que la limite

On calcule la quantité de mouvement p :

$$\begin{aligned} p &= \sqrt{2mT} \\ p &= \sqrt{2 \times 9,109 \times 10^{-31} \times 100 \times 1,602 \times 10^{-19}} \\ p &= 5,41 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

On en déduit la longueur d'onde associée aux électrons :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{5,41 \times 10^{-24}} = 1,23 \times 10^{-10} \text{ m}$$

La longueur d'onde associée à ces électrons est de l'ordre de 10^{-10} m, ils peuvent donc donner lieu au phénomène de diffraction par un cristal.

- c. On note $T = 0,05$ eV l'énergie cinétique des neutrons, $m = 1,67 \times 10^{-27}$ kg leur masse, p leur quantité de mouvement :

$$\begin{aligned} p &= \sqrt{2mT} \\ p &= \sqrt{2 \times 1,67 \times 10^{-27} \times 0,05 \times 1,602 \times 10^{-19}} \\ p &= 5,17 \times 10^{-24} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1} \end{aligned}$$

et λ leur longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{5,17 \times 10^{-24}} = 1,28 \times 10^{-10} \text{ m}$$

d'ordre de grandeur 10^{-10} m : les neutrons conviennent aussi.

inférieure (400 nm) du domaine visible.

Un inconvénient (non mentionné dans le document) est que les objets doivent être conducteurs, ou rendus conducteurs en les recouvrant d'un métal.

2. a. Le canon à électron produit et accélère les électrons, et joue le rôle de source ;

Les lentilles électromagnétiques sont des bobines qui dévient et focalisent le faisceau d'élec-

trons ;

Le vide évite les chocs des électrons avec des atomes ou des molécules, ce qui pourrait perturber leur trajectoire, absorber les électrons ou créer une avalanche électronique.

b. Les microscopes à sonde locale utilisent une

pointe très fine qui, à l'approche d'une surface, permet le passage d'un courant (microscope à effet tunnel) ou l'apparition d'une force (microscope à force atomique). Le principe est totalement différent, et se rapproche plus du sens du toucher que l'on peut utiliser dans une partie de colin-maillard.

3 Quel domaine spectral pour quelle transition d'énergie ?

3.1 Énergie dans une molécule

Une molécule est constituée d'atomes qui vibrent les uns par rapport aux autres.

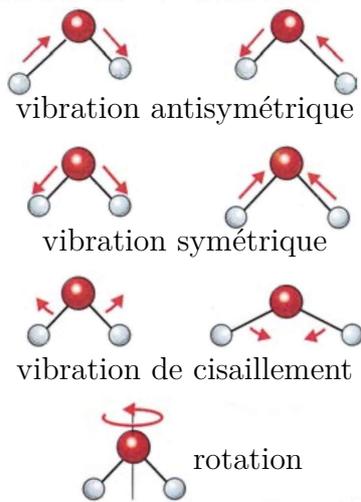


FIG. 1 – Différents modes de vibration.

L'énergie de vibration est quantifiée, tout comme l'énergie électronique (l'énergie liée aux couches électroniques dans lesquelles se placent les électrons). C'est-à-dire que ces énergies ne peuvent prendre que certaines valeurs particulières. On parle de valeurs discrètes.

Comme pour l'atome, la molécule comporte des niveaux d'énergie électroniques. À chaque niveau d'énergie électronique correspondent des sous-niveaux d'énergie vibratoire.

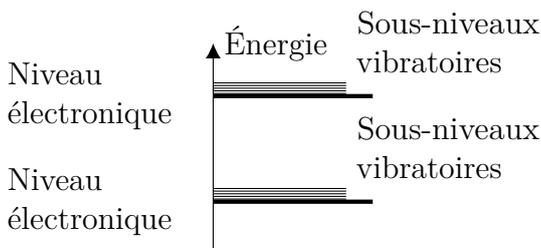


FIG. 2 – Deux niveaux d'énergie électroniques et leurs sous-niveaux vibratoires.

3.2 Transitions énergétiques

Par absorption d'un quantum d'énergie, une molécule peut passer d'un niveau d'énergie inférieur à un niveau d'énergie supérieur. Elle peut revenir à un niveau d'énergie inférieur en émettant un photon. Ces transitions énergétiques sont des transferts quantiques d'énergie.

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. Et elle est encore plus grande lors d'une transition nucléaire. Un domaine spectral est associé à chacune de ces transitions.

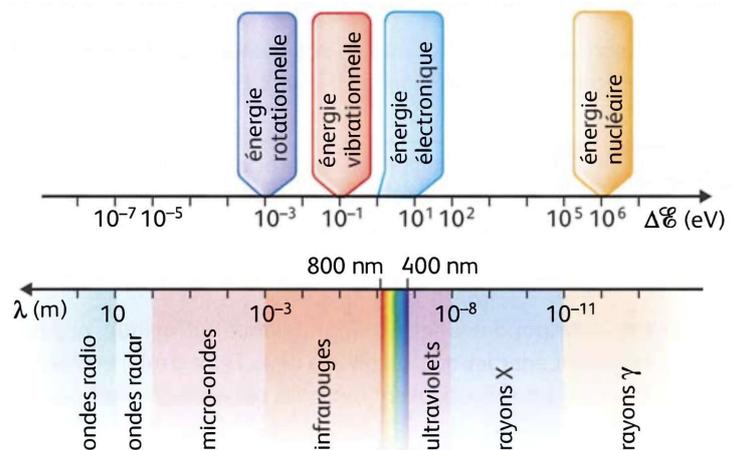


FIG. 3 – Domaines spectraux des transitions vibratoires, électroniques et nucléaires.

Définition

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

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

Une transition d'énergie *nucléaire* est associée à une radiation X ou gamma.