

Transferts quantiques d'énergie

Dualité onde / particule

Activités

1 Ondes ou particules ? Les physiciens n'y voient pas clair au début du xx^e siècle (p. 376)

1

xvii ^e siècle	NEWTON	Modèle particulaire
xviii ^e et xix ^e siècles	YOUNG, FRESNEL, MAXWELL	Modèle ondulatoire
xx ^e siècle	EINSTEIN, suite à l'expérience de HERTZ (notamment), LEWIS	Modèle particulaire quantifié
xxi ^e siècle	DE BROGLIE	Dualité onde-particule

2 a. L'effet photoélectrique s'explique par l'aspect particulaire de la lumière.

b. Les interférences s'expliquent par l'aspect ondulatoire de la lumière.

3 L'observation des résultats expérimentaux conduit à l'élaboration d'un modèle permettant de comprendre un phénomène.

De nouveaux résultats peuvent conduire, après leur validation à la modification ou à l'abandon de ce modèle. La nouvelle théorie proposée doit être compatible avec toutes les observations expérimentales faites à ce jour (et doit pouvoir les expliquer).

4 La lumière présente un aspect ondulatoire et un aspect particulaire.

5 a. L'énergie d'un photon est donnée par :

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

Dans cette expression, on parle d'énergie quantifiée d'un photon (aspect particulaire de la lumière) et λ est la longueur d'onde (aspect ondulatoire de la lumière).

b. Plus λ est grande, plus \mathcal{E} est petite; la formule confirme l'expression écrite en italique dans le texte.

2 De la dualité onde-particule à l'aspect probabiliste de la mécanique quantique (p. 377)

1 Dans chacune des expériences, on utilise des fentes d'Young parallèles. La première figure d'interférences est obtenue en éclairant les fentes de façon continue avec un laser. Dans les deux autres, les fentes sont bombardées photon par photon (doc. 3) ou électron par électron (doc. 4). Les figures du document 4 sont obtenues lors de trois expériences de durées plus ou moins grandes.

2 La détection des photons, à des endroits précis, semble montrer l'aspect particulaire. L'obtention de figures d'interférences fait penser à un aspect ondulatoire.

3 L'obtention de points d'impact met en évidence l'aspect particulaire. Cependant, les électrons donnent aussi des figures d'interférences. Les électrons ont également un aspect ondulatoire.

4 a. Les électrons et les photons n'ont pas la même vitesse de propagation. Les électrons, contrairement

aux photons, possèdent une masse; c'est pour cela qu'on les nomme particules de matière.

b. Puisque le photon, contrairement à l'électron, est une particule sans masse, on ne peut pas le qualifier de « particule de matière ».

5 Les particules sont émises dans les mêmes conditions initiales mais n'atteignent pas toutes le même point. Or, des particules classiques émises dans les mêmes conditions ont la même trajectoire. Les points d'impact étant distribués sur l'écran de manière aléatoire, il n'est pas possible de prévoir le lieu d'impact d'une particule. Cependant, sur un nombre très grand, il semble possible de déterminer la probabilité d'observer l'impact d'une particule à un endroit donné de l'écran. L'aspect probabiliste des phénomènes quantiques signifie donc qu'on ne peut pas prévoir la position précise d'une particule, mais seulement sa probabilité de présence en un lieu donné.

3 Laser, outil d'investigation et transmetteur d'information (p. 378-379)

A Mesure de la distance entre deux sillons d'un CD ou d'un DVD

1 a. L'interférence observée a lieu entre les rayons issus de sillons consécutifs jouant le rôle de sources secondaires.

b. Des interférences constructives permettent d'observer une tache brillante sur l'écran.

2 a. λ , d et x sont des distances que l'on exprime avec la même unité (mètre ou sous-unités du mètre).

Le rapport $\frac{d^2}{x^2}$ et par suite $\sqrt{1 + \frac{4 \cdot d^2}{x^2}}$ sont des grandeurs sans dimension.

La grandeur $\lambda \sqrt{1 + \frac{4 \cdot d^2}{x^2}}$ s'exprime donc en mètre, tout comme la distance a ; la relation est homogène.

b. Sur la notice, on peut lire $\lambda = 532$ nm (laser vert) ou $\lambda = 650$ nm (diode laser).

Exemples de mesures obtenues :

► Pour un CD 625 traits/mm (1,60 μm):

– Mesure avec un laser vert $\lambda = 532$ nm, $d = 36$ cm et $x = 27$ cm.

On obtient $a = 1,5151 \mu\text{m}$.

– Mesure avec une diode laser $\lambda = 650$ nm, $d = 25,2$ cm et $x = 23,5$ cm.

On obtient $a = 1,5381 \mu\text{m}$.

► Pour un DVD 1350 traits/mm (0,74 μm):

– Mesure diode laser $\lambda = 650$ nm, $d = 6,9$ cm et $x = 24,5$ cm.

On obtient $a = 0,74602 \mu\text{m}$.

3 a. Il existe une incertitude de mesure sur la longueur d'onde du laser (de l'ordre de 1,5 pm), sur la distance d entre le disque et l'écran et sur la distance x entre les deux taches lumineuses d'ordre ± 1 .

b. $U(\lambda)$ est lue sur la notice du laser.

$$U(d) = U(x) = U_{\text{double lect}} = \sqrt{2} \cdot U_{\text{lect}} = \frac{2 \text{ graduations}}{\sqrt{6}} = 8,165 \times 10^{-4} \text{ m}$$

soit environ 1 mm (en prenant 1 graduation = 1 mm pour le banc optique et pour le réglage) et un niveau de confiance de 95 %.

c. Compte tenu des ordres de grandeur, il est raisonnable de négliger l'incertitude sur la longueur d'onde devant les autres incertitudes.

Pour le CD et le laser vert, $U(a) \approx 0,01 \mu\text{m}$.

Pour le CD et le laser rouge, $U(a) \approx 0,01 \mu\text{m}$.

Pour le DVD et le laser rouge, $U(a) \approx 0,003 \mu\text{m} = 3 \text{ nm}$.

d. Compte tenu de ce qui précède :

Pour le CD et le laser vert, $a = (1,52 \pm 0,01) \mu\text{m}$.

Pour le CD et le laser rouge, $a = (1,54 \pm 0,01) \mu\text{m}$.

On note que les deux résultats de mesure de la distance a entre deux sillons consécutifs sont compatibles.

Pour le DVD et le laser rouge, $a = (746 \pm 3) \text{ nm}$.

e. Pour améliorer la mesure, on peut la répéter plusieurs fois (ou regrouper les mesures des différents binômes du groupe, voire des classes) ou allonger autant que possible la distance disque-écran (ce qui augmente aussi x) dans le but de diminuer l'incertitude relative sur ces deux longueurs.

4 La distance entre deux sillons consécutifs dans un DVD est environ deux fois plus petite que celle dans un CD (ceci permet une augmentation de la capacité de stockage, voir chapitre 21).

B Utilisation d'un laser pour transmettre une information à distance

5 a. Lorsque le phototransistor est éclairé, la tension aux bornes du conducteur ohmique n'est pas nulle.

b. Lorsque le phototransistor est dans l'obscurité, la tension aux bornes du conducteur ohmique est nulle.

6 D'après le document 8, pour le signal émis, $6T = 8,70$ ms, soit $T = 1,45$ ms et $f \approx 690$ Hz.

Pour le signal reçu, $6T' = 8,80$ ms, soit $T' = 1,47$ ms et $f' \approx 682$ Hz.

La transmission-réception n'affecte que très peu la période et la fréquence du signal.

7 Le phototransistor doit être placé dans l'axe du laser pour être éclairé par celui-ci. Cette observation illustre le caractère directif du faisceau laser.

8 L'information a été transmise, entre les montages émetteur et récepteur, sous forme d'ondes électromagnétiques. Puisque de telles ondes peuvent se propager dans l'air et dans le vide, la transmission ne nécessite pas de support matériel (câbles).

4 Le microscope électronique (p. 380-381)

1 La diffraction est le phénomène limitant la résolution d'un instrument d'optique.

2 La longueur d'onde de l'onde de matière associée à un électron dans un microscope électronique est plus faible que les longueurs d'onde des radiations

appartenant au domaine du visible. Or, le pouvoir de résolution est de l'ordre de grandeur de la longueur d'onde de l'onde utilisée dans un microscope. Celui du microscope électronique sera donc meilleur que celui d'un microscope optique.

3 D'après la relation de de Broglie appliquée à un électron non relativiste, on a $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e \cdot v}$.

De plus, l'énergie cinétique de cet électron est $m_0 \cdot v$

$$\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} \cdot m_e \cdot v^2$$

On en déduit :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{m_e \sqrt{\frac{2 \cdot \mathcal{E}_c}{m_e}}} = h \sqrt{\frac{1}{2 \cdot m_e \cdot \mathcal{E}_c}}$$

L'application numérique donne :

$$\lambda = 6,63 \times 10^{-34}$$

$$\times \sqrt{\frac{1}{2 \times 9,11 \times 10^{-31} \times 10 \times 10^3 \times 1,60 \times 10^{-19}}}$$

$$\lambda = 6,63 \times 10^{-34} \times \sqrt{\frac{1}{2 \times 9,11 \times 1,60 \times 10^{-46}}}$$

$$\lambda = 6,63 \times 10^{-11} \times \sqrt{\frac{1}{2 \times 9,11 \times 1,60}} = 1,23 \times 10^{-11} \text{ m.}$$

4 Le MET possède un meilleur pouvoir de résolution que le MEB, mais ne permet d'observer qu'une coupe de l'échantillon.

Le MEB permet d'observer des surfaces, même avec un relief prononcé, contrairement au MET.

5 a. Dans ce schéma, les électrons sont représentés par de petites sphères. Cela fait penser à leur aspect particulaire. En revanche, les rayons X sont représentés sous forme de petites ondulations, ce qui met l'accent sur leur aspect ondulatoire.

b. Le terme « orbite », synonyme de trajectoire, n'est pas approprié, car, à l'échelle microscopique, on ne peut que prévoir la probabilité de présence d'un électron (les phénomènes quantiques ont un caractère probabiliste) en un lieu donné.

6 Un comportement ondulatoire, celui des atomes par exemple, peut être mis en évidence grâce à l'observation de figures d'interférences ou de diffraction. Pour observer le phénomène de diffraction, il faut qu'il existe une ouverture ou un obstacle dont les dimensions sont de l'ordre de celle de la longueur d'onde de l'onde étudiée.

D'après la relation de de Broglie, pour un atome de quantité de mouvement de valeur $M \cdot v$:

$$\lambda = \frac{h}{M \cdot v}$$

λ ne doit pas être trop petite, donc v ne doit pas être trop élevée.

7 À l'échelle macroscopique, un échantillon de matière possède une masse beaucoup trop grande pour que le caractère ondulatoire de la matière soit perceptible.

Exercices (p. 387-398)

QCM

1 1. A; 2. A et B; 3. B; 4. C; 5. A et B et C;

2 1. C; 2. A; 3. A et C; **3** 1. A; 2. C.

Application immédiate

4 Interpréter l'expérience de Davisson et Germer

La valeur de la quantité de mouvement de cet électron (non relativiste, $v \ll c$) s'exprime par :

$$p = m_e \cdot v$$

La relation de de Broglie permet de calculer la longueur d'onde de l'onde de matière associée :

$$\lambda = \frac{h}{m_e \cdot v}$$

$$\text{soit } \lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 2,4 \times 10^6} = 3,0 \times 10^{-10} \text{ m.}$$

5 Schématiser l'effet laser

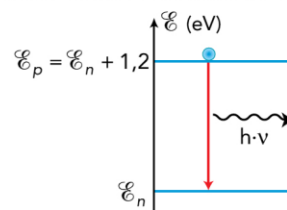
1. Ce laser émet dans le domaine des infrarouges (caractérisés dans l'air par une longueur d'onde supérieure à 800 nm).

2. L'écart énergétique se calcule par :

$$\mathcal{E}_p = \mathcal{E}_n = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,0 \times 10^8}{1,06 \times 10^{-6}} = 1,9 \times 10^{-19} \text{ J,}$$

soit environ 1,2 eV.

On en déduit le diagramme énergétique et la schématisation de l'émission stimulée :



Pour commencer

6 Connaître les aspects de la lumière

La lumière a les aspects d'onde et de particule.

7 Mettre en évidence une onde de matière

1. La diffraction caractérise l'aspect ondulatoire d'un phénomène physique.

2. L'expérience de Davisson et Germer prouve l'aspect ondulatoire d'un faisceau d'électrons.

8 Créer une onde de matière avec un électron

1. La quantité de mouvement d'une particule de masse m , non relativiste, animée d'une vitesse de valeur v a pour valeur :

$$p = m \cdot v$$

avec p en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, m en kg et v en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. La relation de de Broglie s'écrit :

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

avec p en $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, h en $\text{J} \cdot \text{s}$ et λ en m .

9 Calculer la longueur d'onde d'une onde de matière

1. Pour cet électron non relativiste, la valeur de la quantité de mouvement est :

$$p = m \cdot v = 9,11 \times 10^{-31} \times 3,00 \times 10^4 \approx 9,00 \times 3,00 \times 10^{-27},$$

soit environ $2,7 \times 10^{-26} \text{ kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

2. D'après la relation de de Broglie, on a :

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{2,7 \times 10^{-26}} \approx \frac{6,6}{3} \times 10^{-8} = 2,2 \times 10^{-8} \text{ m}.$$

10 Connaître l'aspect probabiliste

1. D'après la figure 1, il est impossible de prévoir le lieu de l'impact du photon sur la cellule photosensible ; les impacts sont répartis aléatoirement sur l'écran.

2. L'impact d'un photon a plus de chance de se produire sur des bandes verticales parallèles aux fentes.

3. Cette expérience illustre l'aspect probabiliste des phénomènes quantiques.

11 Utiliser un diagramme énergétique

1. \mathcal{E}_n et \mathcal{E}_p représentent les énergies de deux niveaux d'énergie d'une entité (atome, ion ou molécule).

2. La flèche rouge indique que l'entité passe d'un niveau d'énergie à un autre niveau d'énergie. Elle représente une transition énergétique. Dans le cas du document, l'entité passe d'un niveau supérieur vers un niveau d'énergie plus faible.

3. Lors de cette transition du niveau d'énergie \mathcal{E}_p vers le niveau d'énergie \mathcal{E}_n , un photon, représenté par la flèche noire, est émis (émission spontanée).

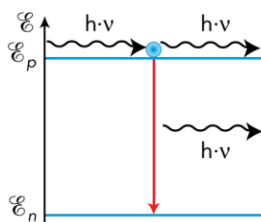
4. a. $h \cdot \nu$ représente l'énergie quantifiée du photon émis.

b. La relation est $\mathcal{E}_p - \mathcal{E}_n = h \cdot \nu$.

12 Décrire une émission stimulée

1. On parle d'émission stimulée lorsqu'une entité, dans un état excité, émet un photon d'énergie \mathcal{E} sous l'action d'un photon incident de même énergie \mathcal{E} (les deux photons ont mêmes énergie, direction, sens de propagation et ils sont en phase).

2.



13 Connaître quelques propriétés d'un laser

Un laser est une source *monochromatique, cohérente* dont l'énergie est concentrée dans l'espace et dans le temps. Ce type de source émet un faisceau peu divergent.

14 Associer transition et radiation

1. On peut citer les transitions entre niveaux d'énergie électronique et les transitions entre niveaux d'énergie de vibration.

2. Si la radiation se situe dans l'infrarouge, une transition entre niveaux d'énergie de vibration lui est associée.

15 Étudier une transition

1. a. L'énergie du photon a pour expression :

$$\mathcal{E} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$$

$$\text{soit } \lambda = \frac{h \cdot c}{\mathcal{E}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{10,0 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 1,24 \times 10^{-7} \text{ m} = 1,24 \times 10^2 \text{ nm}.$$

b. Cette radiation appartient au domaine des ultraviolets (caractérisé dans l'air par une longueur d'onde inférieure à 400 nm).

2. Il s'agit d'une transition entre niveaux d'énergie électronique.

Pour s'entraîner

16 Dualité ou non dualité

1. On utilise la relation donnant la valeur de la quantité de mouvement $p = m \cdot v$ (les valeurs de vitesse sont négligeables devant c , on se place dans le cadre de la mécanique classique) et la relation de de Broglie :

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

	p ($\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)	λ (m)
Boule de bowling	51	$1,3 \times 10^{-35}$
Moustique	$1,3 \times 10^{-6}$	$5,0 \times 10^{-28}$
Électron	$5,6 \times 10^{-28}$	$1,2 \times 10^{-6}$

$$1 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1} = \frac{1}{3,6} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$$

2. a. D'après les longueurs d'onde calculées, l'aspect ondulatoire sera observable seulement dans le cas de l'électron. Pour les deux autres systèmes (macroscopiques), λ est trop faible : il n'existe pas d'ouvertures ou d'obstacles suffisamment petits pour diffracter ces deux systèmes.

b. La masse d'une particule ne doit pas être trop élevée pour que son caractère ondulatoire soit observable.

17 De la mécanique classique à la mécanique quantique

1. a. Dans le premier schéma, on ne représente pas de trajectoire électronique, mais la probabilité de présence de l'électron. Elle est la même dans toutes les directions

de l'espace comme le montre la géométrie sphérique, ce que confirme le texte. Cette représentation est associée au modèle quantique (aspect probabiliste d'un phénomène quantique).

b. Dans le second schéma, on représente la trajectoire de l'électron autour du noyau, comme en mécanique classique.

2. On retrouve l'aspect probabiliste dans le phénomène d'interférences, particule de matière-particule de matière, ou photon-photon.

18 Absorption ou émission

- a. Le schéma A représente une absorption.
b. Le schéma C représente une émission stimulée.
c. Le schéma B représente une émission spontanée.
- Le photon incident qui peut provoquer une émission stimulée doit avoir la même énergie que le photon émis, c'est-à-dire 2,34 eV.

Sa longueur d'onde se calcule à partir de :

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{\mathcal{E}} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{2,34 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 5,31 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

3. Le photon émis par émission stimulée a la même énergie, la même direction, le même sens de propagation et il est en phase avec le photon incident.

19 Laser hélium-néon

1. L'énergie du photon a pour expression :

$$\mathcal{E} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{632,8 \times 10^{-9}} \approx \frac{10^{-34} \times 3 \times 10^8}{10^{-7}} = 3 \times 10^{-19} \text{ J}$$

soit environ 2 eV (puisque $\frac{3}{1,6} \approx 2$).

2. Le photon incident doit avoir la même énergie que le photon émis, c'est-à-dire environ 2 eV.

20 Fonctionnement du laser hélium-néon

1. a. L'excitation des atomes d'hélium se fait par apport d'énergie électrique (« décharge électrique »).

b. L'excitation des atomes de néon se fait par apport d'énergie lors des collisions entre les atomes de néon et les atomes d'hélium excités.

Ces derniers se désexcitent en cédant une partie de leur énergie aux atomes de néon.

2. L'émission stimulée est amorcée par des photons émis spontanément par des atomes de néon excités (transition (4) → (3)).

3. a. D'après le diagramme énergétique, des photons de longueur d'onde égale à 632,8 nm sont émis lors de transitions du niveau d'énergie (4) vers le niveau d'énergie (3) de l'atome de néon.

b. L'énergie du photon émis a pour expression :

$$\mathcal{E} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{632,8 \times 10^{-9}} = 3,14 \times 10^{-19} \text{ J} = 1,96 \text{ eV.}$$

c. L'écart d'énergie $\mathcal{E}_4 - \mathcal{E}_3$ est égal au quantum d'énergie du photon émis : 1,96 eV, d'où :

$$\mathcal{E}_3 = \mathcal{E}_4 - 1,96 = 20,66 - 1,96 = 18,70 \text{ eV.}$$

21 Milieu laser solide ou gazeux

1. Lors d'une émission stimulée, un photon de fréquence appropriée stimule l'émission d'un photon (de mêmes fréquence, phase, direction et sens de propagation) par un atome préalablement excité. Il faut que l'énergie du photon incident corresponde à l'écart entre deux niveaux d'énergie de l'atome.

2. Afin d'augmenter le nombre d'émissions stimulées, il faut que la proportion d'atomes dans un état excité soit plus grande que celle des atomes dans l'état fondamental.

Remarque : il faut noter que la probabilité d'absorption des photons utiles à la stimulation des atomes excités par des atomes non excités est alors faible. C'est ce que permet de réaliser l'inversion de population.

	Laser à rubis	Laser He-Ne
Milieu laser	Le barreau de rubis contenant les ions chrome (III) Cr ³⁺	Le mélange gazeux contenant les atomes de néon
Excitation	Excitation par l'éclair lumineux (pompage optique)	Excitation des atomes de néon par collision avec des atomes d'hélium (eux-mêmes excités par décharge électrique)

4. Le rôle des feuilles d'aluminium et des miroirs est le même : amplifier le rayonnement grâce aux réflexions successives des photons.

5. D'après la relation $\mathcal{E} = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ les photons émis par le laser hélium-néon transportent plus d'énergie que ceux émis par le laser à rubis.

22 Applications des lasers

1. Un laser émet un faisceau lumineux cohérent, monochromatique, très directif, concentrant l'énergie lumineuse dans le temps et l'espace.

2. a. La *directivité* : il ne faut pas que les rayons lumineux divergent si on veut cibler précisément une zone à opérer.

b. La *monochromaticité* : un isotope est ionisé sélectivement ; pour cela, il faut utiliser un rayonnement de fréquence et de longueur d'onde uniques et bien précises.

c. La *concentration de l'énergie* : le laser permet de transférer rapidement une grande quantité d'énergie sur une surface de faibles dimensions.

d. La *directivité* : il ne faut pas que les rayons lumineux divergent si on veut qu'ils atteignent la cible (de faibles dimensions et éloignée), puis le détecteur après réflexion.

e. La *cohérence* : une figure d'interférences stable s'obtient avec des ondes émises par des sources cohérentes.

23 La télémétrie laser et la Lune

1. L'énergie d'un photon a pour expression :

$$\mathcal{E} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 299\,792\,458}{532 \times 10^{-9}} = 3,74 \times 10^{-19} \text{ J.}$$

Une impulsion laser de 200 mJ contient donc :

$$\frac{200 \times 10^{-3}}{3,74 \times 10^{-19}} = 5,35 \times 10^{17} \text{ photons.}$$

2. Soit \mathcal{E}_e l'énergie émise par 6000 impulsions laser et \mathcal{E}_r l'énergie reçue.

$$\frac{\mathcal{E}_e}{\mathcal{E}_r} = \frac{6000 \times 200 \times 10^{-3}}{100 \times 3,74 \times 10^{-19}} = 3,21 \times 10^{19}.$$

L'énergie émise est de l'ordre de 10^{19} fois plus importante que l'énergie reçue !

3. On calcule la durée Δt mise par la lumière pour parcourir 1 mm, à vitesse constante de valeur c :

$$\Delta t = \frac{d}{c} = \frac{1 \times 10^{-3}}{299\,792\,458} = 3 \times 10^{-12} \text{ s.}$$

La précision du chronométrage doit être de l'ordre de 10^{-12} s, c'est-à-dire de l'ordre d'une picoseconde.

24 Leptons' family...

Traduction du texte et des questions :

« Les électrons et les muons sont des particules élémentaires de la famille des leptons (particules capables d'établir des interactions faibles, mais pas des interactions fortes). Ils sont tous deux chargés négativement, mais les muons sont environ 200 fois plus lourds que les électrons et se désintègrent spontanément avec une durée de vie moyenne de 2,2 μ s.

On donne $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ et $m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$.

- Rappeler ce qu'est la dualité onde-particule.
- Par quelle relation littérale peut-elle être formulée ?
- Quel est le rapport des longueurs d'onde des ondes de matière associées à un électron et à un muon se déplaçant avec la même valeur de vitesse ? »

1. Selon le principe de la dualité onde-particule, on peut associer une onde de longueur d'onde λ à toute particule, matérielle ou non, possédant une quantité de mouvement de valeur p .

2. Ceci se traduit par la relation de de Broglie $p = \frac{h}{\lambda}$ avec h la constante de Planck.

3. On utilise les indices e et μ respectivement pour l'électron et le muon, particules supposées non relativistes.

$$\frac{p_e}{p_\mu} = \frac{m_e \cdot v_e}{m_\mu \cdot v_\mu} = \frac{m_e}{m_\mu}$$

puisque, ici, $v_e = v_\mu$. D'autre part :

$$\frac{p_e}{p_\mu} = \frac{h}{\lambda_e} = \frac{h}{\lambda_\mu} = \frac{\lambda_\mu}{\lambda_e}$$

En identifiant, il vient :

$$\frac{\lambda_\mu}{\lambda_e} = \frac{m_e}{m_\mu} \approx \frac{1}{200}$$

et donc $\lambda_e \approx 200 \cdot \lambda_\mu$.

25 À chacun son rythme

1. De la relation de de Broglie, on obtient $\lambda = \frac{h}{p}$.

2. Pour des particules non relativistes, $\lambda = \frac{h}{m \cdot v}$
soit $v = \frac{h}{m \cdot \lambda}$

$$v(\beta^-) = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,1 \times 10^{-31} \times 2,43 \times 10^{-11}} = 3,0 \times 10^7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1};$$

$$v(\alpha) = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{7300 \times 9,1 \times 10^{-31} \times 1,04 \times 10^{-14}}$$

$$v(\alpha) = 9,6 \times 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}.$$

3. a. Par définition, $\mathcal{E}_c = \frac{1}{2} m v^2$.

$$\mathcal{E}_c(\beta^-) = 0,5 \times 9,1 \times 10^{-31} \times (3,00 \times 10^7)^2 = 4,1 \times 10^{-16} \text{ J};$$

$$\mathcal{E}_c(\alpha) = 0,5 \times 7300 \times 9,1 \times 10^{-31} \times (9,60 \times 10^6)^2$$

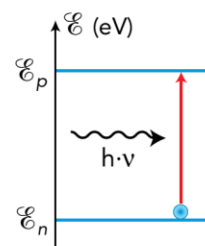
$$\mathcal{E}_c(\alpha) = 3,1 \times 10^{-13} \text{ J.}$$

On en conclut que l'énergie cinétique de la particule α est plus grande que celle de la particule β^- ; on dit qu'elle transporte plus d'énergie.

26 Les alcools en spectroscopie

1. a. Le groupe hydroxyle est le groupe O-H.

b. Lors d'une absorption, il y a gain d'énergie pour la molécule (représentée symboliquement par une sphère) :



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

d. La longueur d'onde associée au photon absorbé vérifie la relation $|\Delta \mathcal{E}| = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$, ainsi :

$$\lambda = \frac{h \cdot c}{|\Delta \mathcal{E}|} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{7,02 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 1,77 \times 10^{-7} \text{ m}$$

Cette longueur d'onde de 177 nm appartient effectivement au domaine des ultraviolets ($\lambda < 400 \text{ nm}$).

2. a. Pour la liaison O-H, on lit $\sigma = 3450 \text{ cm}^{-1}$, ce qui correspond à $\lambda = 2,89 \times 10^{-4} \text{ cm} = 2,89 \text{ } \mu\text{m}$.

Pour la liaison C-O, on lit $\sigma = 1\,030 \text{ cm}^{-1}$, ce qui correspond à $\lambda = 9,71 \times 10^{-4} \text{ cm} = 9,71 \text{ } \mu\text{m}$.

b. Lorsqu'un photon infrarouge est absorbé par une molécule, il y a transition entre niveaux d'énergie vibrationnelle.

c. D'après la relation $|\Delta \mathcal{E}| = h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda}$, l'écart énergétique est inversement proportionnel à λ . Il est donc plus important dans le cas de la liaison O-H que dans celui de la liaison C-O.

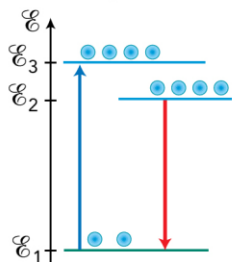
Pour aller plus loin

27 Valse laser à trois ou quatre temps

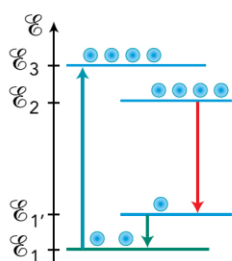
1. L'état fondamental (de plus basse énergie) est l'état (1), les états excités sont les états (2) et (3).

2. a. Le pompage optique permet de réaliser la transition (1) → (3); l'émission stimulée correspond à la transition (2) → (1).

b. On représente la transition (1) → (3) en bleu et la transition (2) → (1) en rouge :



3. et 4. Le niveau (1') est intermédiaire des niveaux (1) et (2). Il est peu peuplé. La transition laser, (2) → (1'), est représentée à nouveau en rouge. Celle maintenant l'inversion de population autrement que par pompage, (1') → (1), est représentée en vert.



5. L'excitation permettant le pompage, (1) → (3), peut se faire de manière intermittente (par impulsions), ce qui laisse du temps au système de se refroidir en cas de surchauffe.

28 Effet photoélectrique

1. À la fréquence ν , on associe l'aspect ondulatoire de la lumière.

À une valeur précise et quantifiée de l'énergie \mathcal{E} , on associe l'aspect particulaire de la lumière.

2. Avec les notations précisées, la phrase peut être traduite par la relation $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1 + \mathcal{E}_c$.
 \mathcal{E}_c désigne l'énergie cinétique de l'électron.

3. Si la fréquence de la lumière incidente, c'est-à-dire la fréquence associée aux photons qui la constituent, augmente, alors l'énergie de chaque photon $\mathcal{E} = h \cdot \nu$ augmente.

L'énergie \mathcal{E}_1 nécessaire pour arracher un électron d'un atome étant constante (d'après l'énoncé), l'énergie cinétique des électrons arrachés des atomes augmente.

4. Dans le cas du cuivre, $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1(\text{Cu}) + \mathcal{E}_c$.

Pour une vitesse de l'électron de valeur nulle, $\mathcal{E}_c = 0$.

donc $\mathcal{E} = \mathcal{E}_1(\text{Cu})$, soit $\frac{h \cdot c}{\lambda} = \mathcal{E}_1(\text{Cu})$

Il vient :

$$\lambda = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{4,70 \times 1,60 \times 10^{-19}} = 2,65 \times 10^{-7} \text{ m.}$$

Un tel résultat confirme qu'un rayonnement ultraviolet (la longueur d'onde dans l'air est $\lambda < 400 \text{ nm}$) permet d'observer l'effet photoélectrique.

5. La théorie ondulatoire prévoit que des rayonnements, en augmentant leur intensité et/ou la durée d'exposition, vont apporter l'énergie nécessaire pour

arracher un électron, même si un rayonnement visible est moins énergétique qu'un rayonnement UV. Le résultat expérimental ne le confirme pas.

29 Le laser brûleur devient refroidisseur

1. Le quantum d'énergie d'un photon s'exprime par :

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

Il est inversement proportionnel à la longueur d'onde de l'onde associée au photon.

Plus \mathcal{E} est élevée, plus la longueur d'onde est faible. En partant d'une radiation IR ou visible, la couleur tend vers le violet, voire l'ultraviolet.

2. a. Pour que le photon soit « au goût » de l'atome, sa longueur d'onde doit vérifier :

$h \cdot \nu = \frac{h \cdot c}{\lambda} = |\mathcal{E}_p - \mathcal{E}_n|$ avec \mathcal{E}_p et \mathcal{E}_n les énergies des niveaux d'énergie de l'atome.

b. Il s'agit de la propriété de monochromaticité.

c. Les six lasers doivent atteindre l'atome cible. Cela est possible grâce à la directivité d'un faisceau laser.

3. L'aspect ondulatoire de la lumière est mis en évidence par l'observation de figures d'interférences ou de diffraction.

L'aspect particulaire de la lumière est mis en évidence par la quantification de l'énergie ou par l'observation de l'effet photoélectrique.

4. a. D'après la question 1, l'énergie de ces photons est :

$$\mathcal{E} = \frac{h \cdot c}{\lambda} = \frac{6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{589 \times 10^{-9}} = 3,38 \times 10^{-19} \text{ J,}$$

soit 2,11 eV.

Cette énergie correspond à l'écart énergétique entre l'état fondamental de l'atome de sodium et le premier état excité. Un tel photon peut être absorbé par cet atome. Ces photons sont donc « au goût de l'atome ».

Après absorption, l'énergie de l'atome est :

$$\mathcal{E}_2 = -3,03 \text{ eV.}$$

b. h s'exprime en $\text{J} \cdot \text{s}$, c'est-à-dire en $\text{kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ (d'après la relation de de Broglie $p = m \cdot v = \frac{h}{\lambda}$), λ en m et m en kg .

Ainsi, $\frac{h}{\lambda \cdot m}$ s'exprime en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$, cette expression a la dimension d'une vitesse.

c. Le nombre N de chocs identiques que doit subir l'atome se calcule en divisant la valeur de la vitesse initiale par la quantité $\frac{h}{\lambda \cdot m}$:

$$N = \frac{v \cdot \lambda \cdot m}{h} = \frac{3,0 \times 10^3 \times 589 \times 10^{-9} \times 3,82 \times 10^{-26}}{6,63 \times 10^{-34}}$$

$$N \approx 1,0 \times 10^5.$$

L'atome devra subir environ 100 000 collisions pour être stoppé.

d. Un photon émis par un laser bleu (488 nm) transporte un quantum d'énergie :

$$\mathcal{E}' = \frac{h \cdot c}{\lambda'} = 2,55 \text{ eV.}$$

Cette valeur ne correspond à aucun écart énergétique pouvant être lu sur le diagramme énergétique de l'atome de sodium. Un tel photon ne pourra pas être absorbé par l'atome de sodium, il n'est pas « au goût de l'atome ».

Retour sur l'ouverture du chapitre

30 Un scalpel hors normes

1. Le faisceau laser doit être directif et concentrer beaucoup d'énergie.

2. Ce laser émet des ondes électromagnétiques dans le domaine des infrarouges, car sa longueur d'onde de 1060 nm dans l'air est supérieure à 800 nm, ce qui correspond à la limite supérieure du domaine du visible (rouge).

3. L'énergie libérée lors d'une impulsion est faible, elle a pour valeur $\mathcal{E} = 1,0 \mu\text{J} = 1,0 \times 10^{-6} \text{ J}$.

Cette énergie est libérée pendant une courte durée $\Delta t = 500 \text{ fs}$, soit $500 \times 10^{-15} \text{ s}$.

La puissance est reliée à l'énergie par l'expression :

$$P = \frac{\mathcal{E}}{\Delta t} = \frac{1,0 \times 10^{-6}}{500 \times 10^{-15}} = 2,0 \times 10^6 \text{ W.}$$

La puissance d'une impulsion est très importante alors que son énergie est faible.

4. a. L'énergie \mathcal{E} d'un photon a pour expression $\mathcal{E}_{\text{photon}} = h \cdot \nu$.

h est la constante de Planck, ν est la fréquence de l'onde électromagnétique associée au photon.

b. Le nombre de photons émis par impulsion est donc :

$$\frac{\mathcal{E}}{\mathcal{E}_{\text{photon}}} = \frac{\mathcal{E}}{h \cdot \nu} = \frac{1,0 \times 10^{-6}}{6,63 \times 10^{-34} \times 1,060 \times 10^{-6}} = 1,4 \times 10^{33}.$$

Comprendre un énoncé

31 Le microscope électronique

1. Le phénomène de diffraction est associé à l'aspect ondulatoire de la lumière.

2. Il faut utiliser des radiations électromagnétiques visibles ayant la plus petite longueur d'onde possible, soit des radiations violettes de 400 nm de longueur d'onde dans l'air.

3. a. La relation de de Broglie s'écrit : $p = \frac{h}{\lambda}$.

b. Lorsque $v \ll c$, la valeur de la quantité de mouvement d'une particule matérielle s'exprime par $p = m \cdot v$.

c. D'après ce qui précède :

$$\lambda = \frac{h}{m \cdot v} = \frac{6,63 \times 10^{-34}}{9,11 \times 10^{-31} \times 1,0 \times 10^7} = 7,3 \times 10^{-11} \text{ m,}$$

soit $7,3 \times 10^{-2} \text{ nm}$.

Les radiations visibles ont des longueurs d'onde comprises entre 400 nm et 800 nm dans l'air. Les longueurs d'onde des ondes de matière associées à ces électrons sont bien inférieures à celles de la lumière visible.

4. La taille d'un atome est de l'ordre de 10^{-10} nm .

Les ordres de grandeur de la taille de l'atome et de la longueur d'onde de l'onde associée aux électrons sont comparables. Il sera donc possible d'observer des atomes avec ce type de microscope comme le montre la photographie.