

Mécanique quantique (TS)

CE QU'IL FAUT SAVOIR

Émission stimulée

La mécanique quantique étudie les phénomènes physiques à l'échelle microscopique et s'appuie pour cela sur le principe du laser (*Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation*), oscillateur optique. Le laser est une source de lumière quasi monochromatique. La largeur de raie (intervalle de fréquence) caractérise l'étalement en fréquence de la source lumineuse.

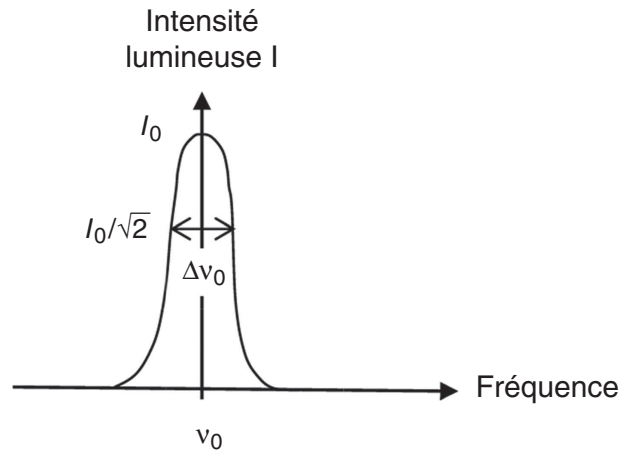


FIGURE 38.1

Pour le laser Hélium-Néon : $\Delta \nu_0 = 1 \text{ GHz}$.

Pour la lampe à sodium : $\Delta \nu_0 = 10^4 \text{ GHz}$.

La lumière est produite par émission stimulée amplifiée, et les photons incidents et produits sont cohérents, c'est-à-dire en phase, de même énergie, de même direction.

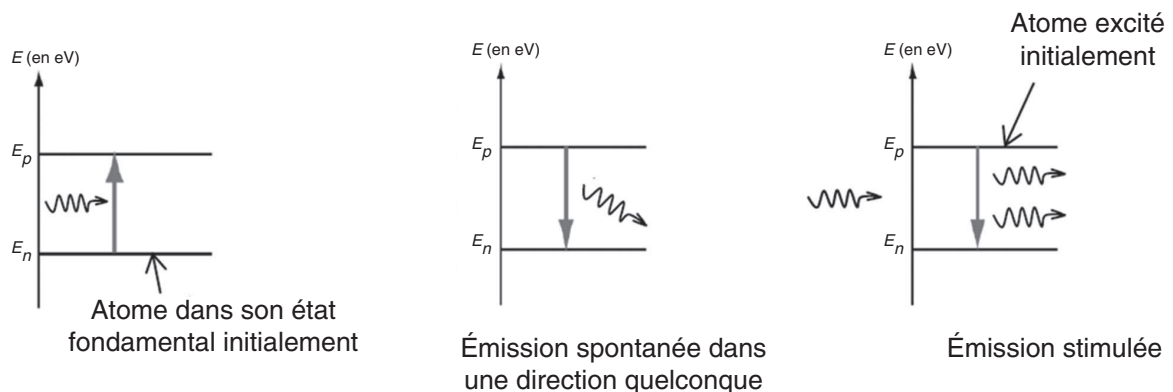


FIGURE 38.2

RAPPEL

Absorption = sous l'action du photon incident, passage de l'atome à un niveau d'énergie supérieur.
Émission spontanée = éjection du photon avec retour de l'atome sur un niveau inférieur.

Si un atome est déjà dans un état excité, et qu'il absorbe un photon incident, il y a alors éjection de ce dernier plus un autre. Cela suppose de créer au préalable une inversion de population : un système de pompage optique ou électrique permet d'exciter de E_1 à E_3 par absorption un maximum d'atomes qui subissent ensuite une désexcitation rapide par émission spontanée de E_3 à E_2 (inversion de population créée à ce stade-là). Le photon incident d'énergie exacte $E = E_2 - E_1$ peut ensuite provoquer l'émission stimulée et amplifiée (deux photons).

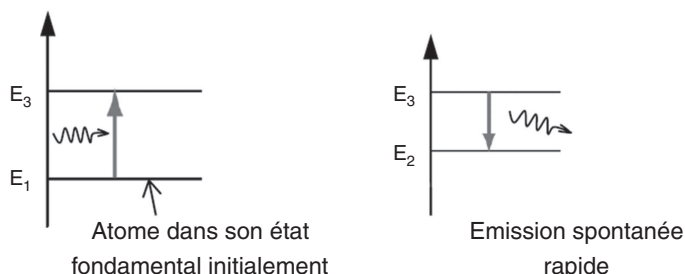


FIGURE 38.3

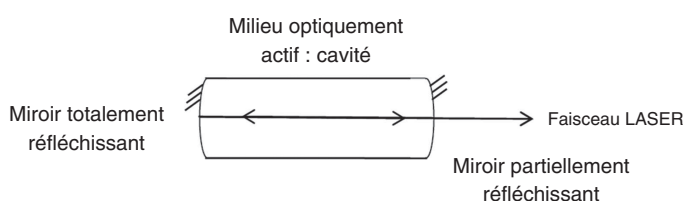


FIGURE 38.4

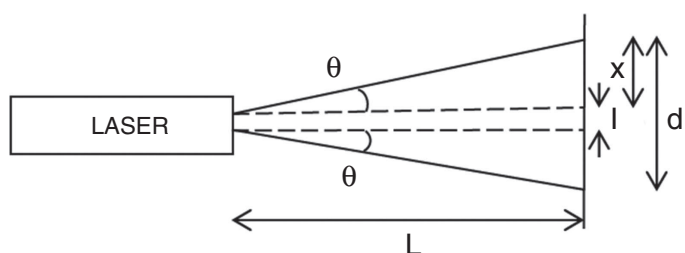


FIGURE 38.5

Le faisceau laser est directif : le laser envoie un faisceau très fin dans une direction bien déterminée, très légèrement conique, de divergence (ou demi-angle au sommet) φ ou θ ou α .

$$d = l + 2x \text{ avec } \tan \theta = \frac{x}{l} \Rightarrow d = l + 2L \tan \theta \text{ et finalement } d \approx l + 2L\theta \text{ (}\theta \text{ en rad)}$$

APPLICATION

Si $2\theta = 2 \text{ mrad}$, $l = 0,5 \text{ mm}$ et $L = 10 \text{ m}$ alors $d \approx 1 \text{ cm}$.

REMARQUE

On visualise le faisceau en saupoudrant de poussière de craie. L'onde laser transporte une énergie très concentrée dans le temps et dans l'espace. Sa puissance surfacique ou intensité lumineuse, ou encore éclairement $I = \frac{P}{S}$ (en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$) est très élevée (avec $P = \frac{E}{\Delta t}$).

REMARQUES

- Un laser de 1 mW est plus brillant que le Soleil. Un laser de 0,5 mW éclaire 80 fois plus intensément qu'une lampe à incandescence de 100 W.
- Le maximum d'exposition pour la cornée (MEP) est de $2,5 \text{ mW}\cdot\text{cm}^{-2}$.

- Le laser peut émettre soit continûment soit périodiquement : τ est la durée d'une impulsion, et T est la période des impulsions. P_c est la puissance de crête supérieure à P , la puissance moyenne.

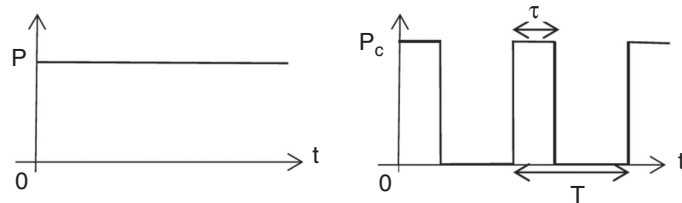


FIGURE 38.6

Dualité onde corpuscule

Tous les objets présentent simultanément des propriétés ondulatoires (caractérisées par la fréquence et la longueur d'onde) et corpusculaires (caractérisées par l'énergie et la quantité de mouvement ou impulsion). Les correspondances se retrouvent à travers les relations de :

$$\text{Planck-Einstein : } E = h\nu \text{ (1905) et De Broglie : } p = \frac{h}{\lambda} = mc \text{ (1924).}$$

De Broglie a généralisé la dualité de la lumière à la matière : les particules peuvent donc présenter des caractéristiques ondulatoires (réflexion, diffraction, interférences), difficiles toutefois à mettre en évidence dans le domaine macroscopique : $p = \frac{h}{\lambda} = mv$.

EXEMPLE

Comportement corpusculaire ou particulaire de la lumière dans l'effet photoélectrique. L'effet photoélectrique consiste en l'émission d'électron par un métal sous l'action de la lumière.

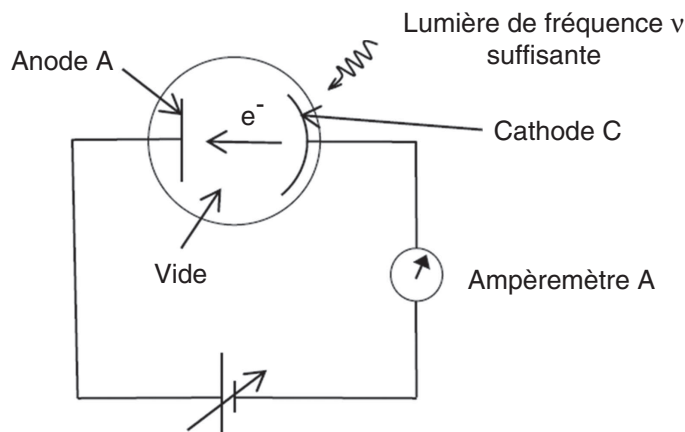


FIGURE 38.7

Il y a transfert d'énergie entre photon et électron tel que :

$$E_{\text{photon}} = h\nu = W_o + E_{\text{électron}} = W_o + \frac{1}{2}mv^2$$

($\geq W_o$) avec W_o : énergie ou travail d'extraction pour un métal donné.

S'ENTRAÎNER

QUESTION 1

Une source laser est supposée ponctuelle. Le faisceau émis est légèrement divergent, assimilable à un cône de demi-angle au sommet $\theta = 0,5 \cdot 10^{-4}$ rad. Calculer la surface S de la tache lumineuse produite par le laser sur la façade d'un immeuble situé à la distance $d = 3$ km (en m^2).

- A) 0,071 B) 0,092 C) 0,14
D) 0,18 E) 0,23 F) 0,27

QUESTION 2

Le figure 38.8 donne le principe du laser à rubis : le rubis est un cristal d'alumine dans lequel sont insérés des ions chrome.

Données : $E_3 - E_1 = 2,26$ eV ; $E_3 - E_2 = 0,55$ eV ; $2,26 \times 1,6 = 3,6$; $6,63 \times 3 \approx 20$; $1,71 \times 1,6 = 2,8$.

- A) Le laser émet des photons par absorption stimulée.
B) Le pompage optique fait passer les électrons du niveau d'énergie E_1 au niveau d'énergie E_3 .
C) Un photon d'énergie $E_3 - E_2$ peut induire un rayonnement Laser.
D) Le photon excitateur et le photon émis par la stimulation ont une longueur d'onde λ entre 700 nm et 730 nm.

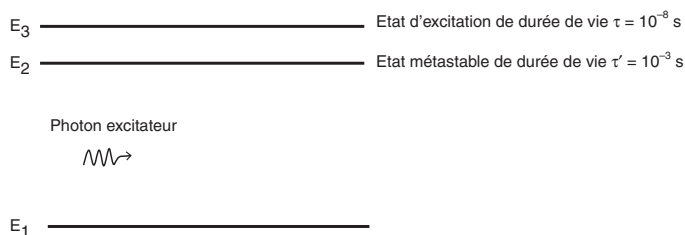


FIGURE 38.8

QUESTION 3

Données :

- vitesse de la lumière dans le vide : $c = 3,00 \cdot 10^8$ m.s⁻¹ ; constante de Planck : $h = 6,63 \cdot 10^{-34}$ J.s ;
- 1eV = $1,60 \cdot 10^{-19}$ J ; masse de l'électron : $m_e = 9,1 \cdot 10^{-31}$ kg ; masse du proton : $m_p = 1,67 \cdot 10^{-27}$ kg.

Quelles sont les propositions exactes ?

- A) Un proton d'énergie cinétique $E_c = 1$ MeV est adapté à l'étude de la structure du noyau atomique.
B) La longueur d'onde associée à une balle de tennis de masse $m = 55$ g et de vitesse $v = 220$ km.h⁻¹ vaut $\lambda = 5,5 \cdot 10^{-35}$ m.
C) Un électron et un proton non relativistes ont même énergie cinétique. L'électron permet de sonder la matière à une échelle plus petite.
D) Un électron et un photon ont une énergie de 5 eV. L'électron est ici mieux adapté pour sonder la matière à l'échelle atomique.
E) Pour posséder une longueur d'onde de 0,10 nm, les électrons doivent être accélérés sous une tension de 151 V.

QUESTION 4

On envoie, sur la cathode d'une cellule photoélectrique, un rayonnement de longueur d'onde $\lambda = 150$ nm. La cathode est recouverte de zinc. L'énergie permettant d'arracher un électron d'un atome de zinc vaut $E_{\text{extraction}}(\text{Zn}) = 3,30$ eV.

Quelle est la valeur de la longueur d'onde de Broglie associée aux électrons éjectés (en nm) ?

CORRIGÉS

QUESTION 1

Réponse A.

$$\tan\theta = \frac{r}{d} \text{ d'où, } S = \pi r^2 \Leftrightarrow S = \pi d^2 (\tan\theta)^2 \Leftrightarrow S = 0,071 \text{ m}^2$$

QUESTION 2

Réponses B et D.

A) Faux : le laser émet des photons par émission stimulée.

B) Vrai : le pompage optique fait passer les électrons du niveau d'énergie E_1 au niveau d'énergie E_3 et les atomes passent ensuite spontanément du niveau 3 au niveau 2 pour peupler le niveau 2.C) Faux : un photon incident d'énergie $E_2 - E_1$ peut provoquer une émission stimulée amplifiée constituant un rayonnement Laser.

$$D) \text{ Vrai : } \lambda = \frac{hc}{E} = \frac{6,63 \cdot 10^{-34} \cdot 3,00 \cdot 10^8}{(2,26 - 0,55) \cdot 1,60 \cdot 10^{-19}} \approx \frac{20 \cdot 10^{-26}}{1,71 \cdot 1,60 \cdot 10^{-19}} \approx \frac{20}{2,8} \cdot 10^{-7} \approx \frac{5}{0,7} \cdot 10^{-7} \approx 7,1 \cdot 10^{-7} \text{ m} \approx 710 \text{ nm.}$$

QUESTION 3

Réponses A, D et E.

A) Vrai : $E_c = \frac{1}{2} m_p v^2 = \frac{p^2}{2m_p} = \frac{h^2}{2m_p \lambda^2} \Leftrightarrow \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_p E_c}} \approx 2,9 \cdot 10^{-14} \text{ m}$. C'est une longueur d'onde adaptée à l'étude du noyau (de taille $\sim 10^{-15} \text{ m}$).

B) Faux : $\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \approx 2,0 \cdot 10^{-34} \text{ m}$.

C) Faux : $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e E_c}}$. Plus la masse est grande, plus la longueur d'onde est petite. Le proton permet donc de sonder la matière à une échelle plus petite.

D) Vrai : Pour le photon : $\lambda = \frac{hc}{E} \approx 2,5 \cdot 10^{-7} \text{ m}$. Pour l'électron : $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e E_c}} \approx 5,5 \cdot 10^{-10} \text{ m}$. L'électron convient mieux pour sonder l'atome (de taille $\sim 10^{-10} \text{ m}$).

E) Vrai : $\lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e E_c}} = \frac{h}{\sqrt{2m_e eU}} \Leftrightarrow U = \frac{h^2}{2m_e e \lambda^2} \simeq 151 \text{ V}$ (remarque : l'énergie est le produit de la charge par la tension, pour preuve l'unité d'énergie eV couramment utilisée).

QUESTION 4

$$E_{\text{extraction}}(\text{Zn}) = \frac{hc}{\lambda} - E_c \Leftrightarrow E_c = \frac{p^2}{2m_e} = \frac{hc}{\lambda} - E_{\text{extraction}}(\text{Zn}) \text{ d'où la quantité de mouvement des}$$

électrons éjectés : $p = \sqrt{2m_e \cdot \left[\frac{hc}{\lambda} - E_{\text{extraction}}(\text{Zn}) \right]}$ et finalement, la longueur d'onde associée

aux électrons éjectés :

$$\lambda = \frac{h}{p} \Leftrightarrow \lambda = \frac{h}{\sqrt{2m_e \cdot \left[\frac{hc}{\lambda} - E_{\text{extraction}}(\text{Zn}) \right]}} \Leftrightarrow \lambda \approx 5,50 \cdot 10^{-10} \text{ m} \Leftrightarrow \lambda \approx 0,550 \text{ nm.}$$