Physique Générale A

Série d'exercices 18: Photons et atomes corrigé - corrigé - 24 Mars 2026

1.) **QCM A: Effet photoéléctrique**

B. Un seul photon peut intéragir avec un seul électron. Doubler la fréquence de la lumière revient à augmenter l'énergie des photons par deux suivant la relation $E = hf$. Lors des interactions photon-électron, le surplus d'énergie du photon sera transmis à l'électron sous forme d'énergie cinétique. Cette énergie cinétique sera égale à l'énergie du photon moins le travail d'extraction nécessaire pour extraire l'électron. En revanche, doubler l'intensité de la lumière correspond à doubler le flux de photons. Comme chaque photon interagit avec un seul électron, doubler le nombre de photons revient à doubler le nombre d'électrons émis. L'énergie cinétique des électrons émis dépend du surplus d'énergie transmis à un électron par un photon. Réduire l'intensité de la lumière ne change pas l'énergie des photons et donc n'a pas d'influence sur l'énergie cinétique des électrons émis. (En revanche, le nombre d'électrons émis diminuera). Si on utilisait un autre metal on ne saurait pas en principe, si l'énergie des photons est encore suffisante pour extraire les électrons. Si cela n'était pas le cas, le métal n'émettrait aucun électron. Comme on ne connait pas la valeur du travail d'extraction, on ne sait pas si l'énergie des photons de fréquence plus faible serait encore suffisante pour extraire des électrons. Le travail d'extraction nécessaire pour arracher un électron dépend du matériau. Suivant le métal utilisé, l'énergie cinétique sera plus au moins grande, et si le travail d'extraction est trop grand, aucun électron ne sera émis.

2.) **QCM K' : Photons**

A. Faux. Les photons ont une masse nulle.

B. Vrai. Les photons sont les particules élémentaires de la lumière. La vitesse de la lumière est donc bien la vitesse de déplacement des photons.

C. Vrai. Selon le phénomène étudié, la nature corpusculaire ou ondulatoire peut dominer le comportement (voir slide 9 du cours).

D. Faux. On peut détecter des photons individuels sur un détecteur. En effet, le photon est le quantum d'énergie associé au champ électromagnétique (la plus petite quantité d'énergie transmise par la lumière). Cette quantité d'énergie est fixe pour une certaine fréquence et est donnée par la relation $E = hf$. Un détecteur suffisamment sensible peut donc compter combien de quanta d'énergies (i.e. de photons) sont absorbés par son capteur.

3.) **QCM K': Mécanique Quantique**

A. Faux. La mécanique quantique est une théorie probabiliste et non déterministe dans laquelle le concept de la trajectoire est abandonné et est remplacé par le concept de probabilité de trouver une particule à un certain endroit (voir slide 21 du cours).

B. Vrai. L'énergie du photon émis est égale à la diminution de l'énergie quantifiée de l'atome.

En utilisant la formule $E_n = -\frac{Z^2 e^4 m_e}{8\varepsilon_0^2 h^2} \cdot \frac{1}{n^2}$ avec $Z = 1$ on a $\triangle E = E_2 - E_1 = 10.2$ eV.

C. Vrai, La lumière peut être absorbée lors de l'excitation d'un atome, et émise lors de sa désexcitation spontanée. Einstein, en 1917 émit l'idée qu'une photon arrivant sur un atome déjà excité pouvait stimuler sa désexcitation. C'est l'émission stimulée, au cœur de l'émission des LASERS:.

D. Vrai. Aux particules de matière, la mécanique quantique associe une fonction d'onde, qui décrit l'évolution de la particule en fonction du temps et de la position.

4.) **QCM K' : Electrons**

A. Faux. Les électrons ont une masse $m_e = 9.11 \cdot 10^{-31}$ kg.

B. Faux. Aucune particule ne peut se déplacer plus vite que la lumière dans le vide.

C. Vrai (mécanique quantique).

D. Faux. En effet, la relation de de Broglie $\lambda = \frac{h}{mv}$ (avec h la constante de Planck) montre qu'il y a un lien direct entre la longueur d'onde λ et la vitesse v d'une particule de masse m (comme les électrons).

5.) **QCM A : Fréquence d'une particule**

D. Par la dualité onde-particule, un électron peut se comporter à la fois comme une particule massive avec une certaine quantité de mouvement, ou une onde avec une fréquence et une longueur d'onde.

L'électron a une masse $m_e = 9.1 \cdot 10^{-31}$ kg et une vitesse $v = 0.9c = 2.7 \cdot 10^8$ m/s. On sait que $f = v/\lambda$. On peut trouver la longueur d'onde grâce aux relations de De Broglie : $\lambda = \dfrac{h}{m_e v}$. On trouve donc :

$$f = \frac{v}{\lambda} = \frac{v}{h/m_e v} = \frac{v^2 m_e}{h} = \frac{\left(2.7 \cdot 10^8\right)^2 \cdot \left(9.1 \cdot 10^{-31}\right)}{6.6 \cdot 10^{-34}} = 1 \cdot 10^{20} \text{ Hz}$$

Pour l'anecdote (pas à savoir), il est impossible d'observer un objet dont les dimensions sont plus petites que la longueur d'onde utilisée pour l'observation. Les microscopes optiques ne permettent donc pas d'observer des objets en dessous de quelques centaines de nanomètres. La longueur d'onde d'un électron accéléré est en revanche plus petite que la taille d'un atome (dans notre cas, on trouve $\lambda = 2.6$ picomètres). Ce qui explique l'intérêt des microscopes électroniques, dont certains sont capables d'observer des atomes individuels.

6.) **QCM A : Niveaux d'énergie**

A.Vrai. Commençons par calculer l'énergie des photons correspondant aux différentes longueurs d'onde données dans l'énoncé:

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

Ici E =ΔE = $E_{initiale} - E_{finale}$, donc on trouve que :

$$E_{violet} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{violet}} = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{410 \cdot 10^{-9}} = 4.84 \cdot 10^{-19} J$$

$$E_{bleu} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{bleu}} = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{434 \cdot 10^{-9}} = 4.58 \cdot 10^{-19} J$$

$$E_{vert} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{vert}} = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{486 \cdot 10^{-9}} = 4.09 \cdot 10^{-19} J$$

$$E_{rouge} = \frac{h \cdot c}{\lambda_{rouge}} = \frac{6.62 \cdot 10^{-34} \cdot 3 \cdot 10^8}{656 \cdot 10^{-9}} = 3.03 \cdot 10^{-19} J$$

On a donc que $E_{violet} > E_{bleu} > E_{vert} > E_{rouge}$, la flèche violette doit donc être plus grande que la flèche bleue qui doit être elle même plus grande que la flèche verte qui est elle-même plus grande que la flèche rouge. Seuls les graphiques A.) et E.) correspondent à cette configuration. Enfin dans le graphe E.) on voit que les flèches passent d'un niveau énergétique faible à des états énergétiques plus élevés ce qui correspond à une absorption d'énergie or ici on parle d'émission, les flèches doivent donc être dirigé vers le bas, le bon diagramme est donc le A.).

7.) **QCM A : Photocoagulation rétinienne**

B. L'énergie totale délivrée pendant l'impulsion vaut

$$E_{\text{tot}} = P\,\Delta t = 0.50 \times 0.10 = 5.0 \cdot 10^{-2} \text{ J}.$$

L'énergie d'un photon de longueur d'onde λ est

$$E = \frac{hc}{\lambda}.$$

Avec $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J · s, $c = 3.00 \cdot 10^8$ m/s et $\lambda = 532 \cdot 10^{-9}$ m :

$$E \approx \frac{(6.626 \cdot 10^{-34})(3.00 \cdot 10^8)}{532 \cdot 10^{-9}} \approx 3.74 \cdot 10^{-19} \text{ J}.$$

Le nombre de photons émis est alors

$$N = \frac{E_{\text{tot}}}{E} = \frac{5.0 \cdot 10^{-2}}{3.74 \cdot 10^{-19}} \approx 1.3 \cdot 10^{17}.$$

8.) **QCM K' : Fluorescence de l'hématoporphyrine**

A. Vrai. L'énergie d'un photon est donnée par

$$E = \frac{hc}{\lambda}$$

Pour le photon UV :

$$E_{\text{UV}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{UV}}}$$

Pour le photon fluorescent :

$$E_{\text{fluo}} = \frac{hc}{\lambda_{\text{fluo}}}$$

Or

$$\lambda_{\text{UV}} = 365 \text{ nm} \qquad \text{et} \qquad \lambda_{\text{fluo}} = 620 \text{ nm}$$

donc

$$\lambda_{\text{UV}} < \lambda_{\text{fluo}}$$

Comme l'énergie est inversement proportionnelle à la longueur d'onde,

$$E_{\text{UV}} > E_{\text{fluo}}.$$

B. Vrai. À l'instant initial $t = 0$,

$$\Phi(0) = A\,\phi_0 e^{-0/\tau} = A\,\phi_0$$

En remplaçant par les valeurs numériques :

$$\Phi(0) = 25 \times 4.0 \cdot 10^8$$

$$\Phi(0) = 1.0 \cdot 10^{10} \text{ photons/s}$$

Le détecteur mesure le signal si

$$\Phi \geq \Phi_{\text{min}}$$

Or

$$\Phi_{\text{min}} = 1.0 \cdot 10^9 \text{ photons}\,\text{s}^{-1}$$

Donc

$$\Phi(0) = 1.0 \cdot 10^{10} > 1.0 \cdot 10^9 = \Phi_{\text{min}}$$

Le détecteur peut donc mesurer la fluorescence à $t = 0$

C. Vrai. Le signal reste détectable tant que

$$\Phi(t) \geq \Phi_{\text{min}}$$

La limite de détection est atteinte lorsque

$$\Phi(t) = \Phi_{\min}$$

On résout donc

$$A\,\phi_0 e^{-t/\tau} = \Phi_{\min}$$

En divisant par $A\phi_0$, il vient

$$e^{-t/\tau} = \frac{\Phi_{\min}}{A\phi_0}$$

Or

$$A\phi_0 = 25 \times 4.0 \cdot 10^8 = 1.0 \cdot 10^{10}$$

donc

$$e^{-t/\tau} = \frac{1.0 \cdot 10^9}{1.0 \cdot 10^{10}} = 10^{-1}$$

On prend le logarithme:

$$-\frac{t}{\tau} = \ln(10^{-1})$$

on obtient donc:

$$t \approx 10 \times 2.30 = 23 \text{ ns}.$$

Le signal reste donc détectable pendant environ 23 ns.

D. Faux. La fraction de l'énergie de chaque photon incident qui n'est pas réémise sous forme de fluorescence vaut

$$\frac{E_{\text{UV}} - E_{\text{fluo}}}{E_{\text{UV}}} = \lambda_{\text{UV}}\left(\frac{1}{\lambda_{\text{UV}}} - \frac{1}{\lambda_{\text{fluo}}}\right) \tag{1}$$

$$= \frac{\lambda_{\text{fluo}} - \lambda_{\text{UV}}}{\lambda_{\text{fluo}}} = 1 - \frac{\lambda_{\text{UV}}}{\lambda_{\text{fluo}}} \approx 0.41 \tag{2}$$

soit environ 41 % et non 59 % comme suggéré dans l'énoncé.

La quantité donnée dans l'énoncé représente donc uniquement la fraction d'énergie, *par photon incident*, qui n'est pas réémise sous forme de fluorescence.

Nota bene: L'énergie totale reçue par la tumeur dépend de l'ensemble des photons incidents. Pour la déterminer, il faudrait connaître le nombre total de photons UV envoyés sur la tumeur. De plus, rien ne garantit que le nombre de photons incidents soit égal au nombre de photons réémis par fluorescence, ni que la fluorescence soit le seul mécanisme de réémission ou de dissipation de l'énergie.

On ne peut donc pas conclure, à partir de la seule formule donnée dans l'énoncé, à la valeur de l'énergie totale utilisée pour réchauffer la tumeur.

9.) **Exercice d'approfondissement : Electron accéléré**

A. Lorsqu'un électron est accéléré par une différence de potentiel de 1 V, il acquiert par définition une énergie de 1 électron-Volt (eV), soit $1.6 \cdot 10^{-19}$ J. On peut effectuer le calcul exact en utilisant les formules de l'électrostatique. Une particule de charge électrique q placée en un point de potentiel V possède une énergie potentielle $E_{pot} = q \cdot V$. Pour un électron dans une différence de potentiel de 1 V, on trouve donc :

$$E_c = |q\Delta V| = 1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 1 = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$$

Remarque: ce résultat est obtenu en utilisant la conservation de l'énergie totale (cinétique plus potentielle). L'énergie cinétique initiale est nulle (vitesse initiale nulle), donc l'énergie totale initiale est donnée par l'énergie potentielle initiale qV_{in}, où V_{in} est le potentiel électrique dans la position initiale de l'electron. L'énergie cinétique finale (l'inconnue) est appelée E_c et l'énergie potentielle finale est qV_{fin}, où V_{fin} est le potentiel électrique dans la position finale de l'electron. La conservation de l'énergie totale nous donne alors l'équation

$$qV_{\text{in}} = E_c + qV_{\text{fin}}\,,$$

dont la solution pour E_c est

$$E_c = q\left(V_{\text{in}} - V_{\text{fin}}\right) = -q\left(V_{\text{fin}} - V_{\text{in}}\right) = -q\Delta V\,,$$

parce-que $V_{\text{fin}} - V_{\text{in}}$ est égal à la différence de potentiel ΔV entre la position finale est la position initiale de l'electron:

$$\Delta V = V_{\text{fin}} - V_{\text{in}}\,.$$

B. Les relations de De Broglie nous permettent de trouver la longueur d'onde $\lambda = \frac{h}{mv}$. Il faut donc tout d'abord calculer la vitesse de l'électron à partir de l'énergie cinétique trouvée précédemment :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad\longrightarrow\quad v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}}$$

On peut donc trouver la longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m\sqrt{\frac{2E_c}{m}}} = \frac{6.6\cdot10^{-34}}{9.1\cdot10^{-31}\sqrt{\frac{2\cdot\left(1.6\cdot10^{-19}\right)}{9.1\cdot10^{-31}}}} \simeq 1.2\cdot10^{-9}\ \text{m} = 1.2\ \text{nm}$$

Note: la relation $\Delta E = hf$ n'est valable que pour un photon (particule sans masse), elle n'est pas applicable pour un électron.

C. On réutilise les relations précédentes pour trouver le potentiel en fonction de la longueur d'onde. La relation trouvée au point B nous permet de connaître l'énergie cinétique d'un électron de longueur d'onde $\lambda = 1$ pm. Ensuite, la relation trouvée au point A nous permet de trouver la différence de potentiel nécessaire pour obtenir cette énergie cinétique :

$$\lambda = \frac{h}{m\sqrt{\frac{2E_c}{m}}} \quad\longrightarrow\quad E_c = \frac{h^2}{2m\lambda^2}$$

$$E_c = |q\Delta V| \quad\longrightarrow\quad \Delta V = E_c/q$$

$$\Delta V = \frac{h^2}{2m\lambda^2\cdot q}$$

Pour $\lambda = 200\cdot10^{-12}$ m, on trouve :

$$\Delta V = \frac{(6.6\cdot10^{-34})^2}{2\cdot(9.1\cdot10^{-31})\cdot(200\cdot10^{-12})^2\cdot(1.6\cdot10^{-19})} = 37.4\ \text{V}$$

D. La vitesse de l'électron est directement liée à sa longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad\longrightarrow\quad v = \frac{h}{m\lambda}$$

Pour $\lambda = 200\cdot10^{-12}$ m, on trouve :

$$v = \frac{6.6\cdot10^{-34}}{(9.1\cdot10^{-31})(200\cdot10^{-12})} = 3.6\cdot10^{6}\ \text{m/s}$$

Ce qui correspond à environ 1.2% de la vitesse de la lumière.

E. Non. En effet, la vitesse d'un électron de longueur d'onde $\lambda = 1$ pm devrait être 200 fois plus grande que celle calculée pour un électron de longueur d'onde $\lambda = 200$ pm. Cette vitesse serait plus grande que la vitesse de la lumière, ce qui est impossible. Afin que cette limite apparaisse dans nos calculs, il faudrait tenir compte des phénomènes relativistes.

10.) **Exercice d'approfondissement : Proton accéléré**

A. Lorsqu'un proton est accéléré par une différence de potentiel de -1 V, il acquiert par définition une énergie de 1 électron-Volt (eV), soit $1.6 \cdot 10^{-19}$ J. On peut effectuer le calcul exact en utilisant les formules de l'électrostatique. Une particule de charge électrique q placée en un point de potentiel V possède une énergie potentielle $E_{pot} = q \cdot V$. Pour un proton (charge $q = +e = +1.6 \cdot 10^{-19}$ C) de vitesse initiale nulle dans une différence de potentiel de $\Delta V = -1$ V, on trouve donc pour l'énergie cinétique finale:

$$E_c = -q\Delta V = -\left(1.6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}\right) \cdot (-1\text{V}) = 1.6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}$$

Remarque: ce résultat est obtenu en utilisant la conservation de l'énergie totale (cinétique plus potentielle). L'énergie cinétique initiale est nulle (vitesse initiale nulle), donc l'énergie totale initiale est donnée par l'énergie potentielle initiale qV_{in}, où V_{in} est le potentiel électrique dans la position initiale du proton. L'énergie cinétique finale (l'inconnue) est appelée E_c et l'énergie potentielle finale est qV_{fin}, où V_{fin} est le potentiel électrique dans la position finale du proton. La conservation de l'énergie totale nous donne alors l'équation

$$qV_{\text{in}} = E_c + qV_{\text{fin}}\,,$$

dont la solution pour E_c est

$$E_c = q\left(V_{\text{in}} - V_{\text{fin}}\right) = -q\left(V_{\text{fin}} - V_{\text{in}}\right) = -q\Delta V\,,$$

parce-que $V_{\text{fin}} - V_{\text{in}}$ est égal à la différence de potentiel ΔV entre la position finale est la position initiale du proton:

$$\Delta V = V_{\text{fin}} - V_{\text{in}}\,.$$

B. La relation de de Broglie nous permet de trouver la longueur d'onde $\lambda = \dfrac{h}{mv}$. Il faut donc tout d'abord calculer la vitesse du proton à partir de l'énergie cinétique trouvée précédemment :

$$E_c = \frac{1}{2}mv^2 \quad \longrightarrow \quad v = \sqrt{\frac{2E_c}{m}}$$

On peut donc trouver la longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{h}{mv} = \frac{h}{m\sqrt{\dfrac{2E_c}{m}}} = \frac{h}{\sqrt{2mE_c}} = \frac{6.626 \cdot 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s}}{\sqrt{2 \cdot 1.67 \cdot 10^{-27}\ \text{kg} \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}\ \text{J}}} \simeq 2.9 \cdot 10^{-11}\ \text{m} = 29\ \text{pm}$$

C. On réutilise les relations précédentes pour trouver le potentiel en fonction de la longueur d'onde. La relation trouvée au point B nous permet de connaitre l'énergie cinétique d'un proton de longueur d'onde $\lambda = 6$ pm. Ensuite, la relation trouvée au point A nous permet de trouver la différence de potentiel nécessaire pour obtenir cette énergie cinétique :

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2mE_c}} \quad \longrightarrow \quad E_c = \frac{h^2}{2m\lambda^2}$$
$$E_c = -q\Delta V \quad \longrightarrow \quad \Delta V = -E_c/q$$
$$\Delta V = -\frac{h^2}{2m\lambda^2 q}$$

Pour $\lambda = 6 \cdot 10^{-12}$ m, on trouve :

$$\Delta V = -\frac{(6.626 \cdot 10^{-34}\ \text{J}\cdot\text{s})^2}{2 \cdot (1.67 \cdot 10^{-27}\ \text{kg}) \cdot (6 \cdot 10^{-12}\ \text{m})^2 \cdot 1.6 \cdot 10^{-19}\ \text{C}} = -22.8\ \text{V}$$

D. La vitesse du proton est directement liée à sa longueur d'onde :

$$\lambda = \frac{h}{mv} \quad \longrightarrow \quad v = \frac{h}{m\lambda}$$

Pour $\lambda = 6 \cdot 10^{-12}$ m, on trouve :

$$v = \frac{6.626 \cdot 10^{-34}\ \text{J} \cdot \text{s}}{(1.67 \cdot 10^{-27}\ \text{kg})(6 \cdot 10^{-12}\ \text{m})} = 6.6 \cdot 10^{4}\ \text{m/s}$$

Remarque: la vitesse au point D ainsi que la vitesse correspondante au point B sont beacoup plus petites que la vitesse de la lumière $c \simeq 3 \cdot 10^{8}$ m/s, donc le traitement non-relativiste utilisé dans cet exercice est justifié.