

Thème : Former des images
Cours 23 : La lumière : Un flux de photons
(version élèves)

B.O. Le photon : énergie, vitesse, masse. Effet photoélectrique. Travail d'extraction.

Décrire l'effet photoélectrique, ses caractéristiques et son importance historique. Interpréter qualitativement l'effet photoélectrique à l'aide du modèle particulaire de la lumière. Établir, par un bilan d'énergie, la relation entre l'énergie cinétique des électrons et la fréquence. Expliquer qualitativement le fonctionnement d'une cellule photoélectrique.

Absorption et émission de photons. Enjeux énergétiques : rendement d'une cellule photovoltaïque.

I. Énergie du photon. Rappels de première.

Chaque photon transporte une énergie $E = h \nu$ E s'exprime en Joule

ν est la fréquence (Hz)

h est une constante universelle appelée constante de Planck. $h = 6,626 \times 10^{-34}$ J.s

Autre expression de l'énergie transportée par un photon :

La fréquence est l'inverse de la période T or $T = \frac{\lambda}{c}$ donc $\nu = \frac{c}{\lambda}$ e alors $E = \frac{hc}{\lambda}$

λ s'exprime en mètre (m).

c est la célérité de la lumière dans le vide. $c = 3,00 \times 10^8$ m.s⁻¹

Exemple de calcul d'énergie transportée par un photon :

Un photon « rouge » a une longueur d'onde $\lambda = 700$ nm.

Il se déplace à la vitesse de la lumière $c = 3,00 \times 10^8$ m.s⁻¹

Question : Déterminer la valeur de l'énergie transportée par ce photon (en joule).

Réponse :

On constate que la valeur est très petite.

Les physiciens utilisent une autre unité pour les énergies transportées par des particules : l'électron-volt (eV).

Un électron-volt est l'énergie d'un électron soumis à une tension de 1,0 V.

1 eV = $1,60 \times 10^{-19}$ J

Question : Déterminer la valeur de l'énergie transportée par ce photon (en eV).

Réponse :

II. Echange d'énergie avec un photon. Rappels de première.

Niels Bohr en 1913 émis les hypothèses suivantes :

L'énergie de l'électron est fixée et ne prend que des valeurs précises (on dit qu'elle est quantifiée).

Les radiations ne sont émises ou absorbées que si un électron passe d'une orbite à l'autre. (**Transition électronique**).

Par convention, les énergies des électrons sur les différentes orbites sont négatives.

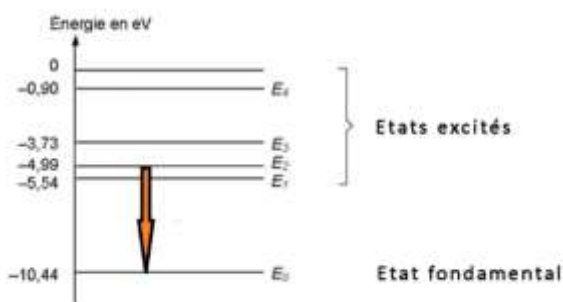
Par convention, L'énergie de l'électron situé sur la plus basse orbite a la valeur la plus négative. On appelle cet état, **l'état fondamental E_0** . Dans cet état, l'électron est particulièrement stable car très lié au noyau.

Quand les électrons sont sur des orbites plus éloignées du noyau, ils sont dans des **états excités**. Leurs niveaux énergies ont des valeurs comprises entre E_0 et 0.

Ces niveaux d'énergie sont **quantifiés**, c'est-à-dire qu'ils ont des valeurs discrètes (discontinues).

Un électron qui n'est plus rattaché au noyau a une énergie égale à 0.

Exemple de schéma représentant les niveaux énergies des électrons sur les différentes orbites de l'atome de mercure.



Question : Dans le cas du schéma ci-dessus, un photon est-il émis ou absorbé par l'atome ?

Réponse :

Question : Déterminer la valeur de l'énergie du photon (en eV) et de sa longueur d'onde ? Cette radiation est-elle visible ?

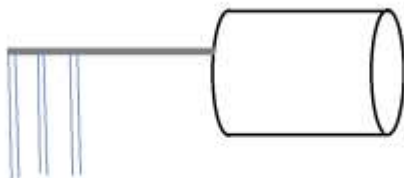
Réponse :

III. L'effet photoélectrique. Expérience de Hertz (1887).

1. Analyse d'une expérience reposant sur le principe de l'expérience de Hertz

Vidéo : <https://www.youtube.com/watch?v=WO38qVDGgqw>

Schéma du montage : Sur une canette en aluminium (métal conducteur) est fixée une tige métallique (conductrice). Sur cette tige des lamelles métalliques pendent.



Etape 1 : un bâton en plastique est frotté avec un papier. Il se charge négativement. Des électrons ont été déposés à sa surface. Le bâton est approché des lamelles métalliques.

Question : Observer et interpréter

Réponse :

Etape 2 : l'expérimentateur touche la canette.

Question : Observer et interpréter

Réponse :

Etape 3 : L'expérimentateur recharge les lamelles et approche une lampe émettant des U.V.

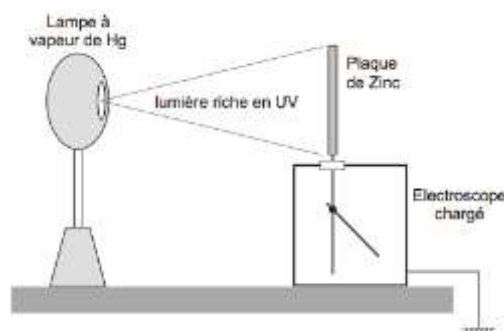
Question : Observer et interpréter

Réponse :

Conclusion :

2. Expérience historique de Hertz sur l'effet photoélectrique.

En 1886, Heinrich **Hertz** réalise l'expérience intitulée « effet photoélectrique » : une plaque de zinc, décapée, montée sur un électroscope est chargée, puis éclairée par la lumière émise par une lampe à vapeur de mercure (émettant un rayonnement riche en UV, visible et IR) ou par une lampe à UV.



Etude de deux étapes de cette expérience :

1^{ère} étape : Initialement la plaque de zinc et l'électroscope sont chargés négativement : l'aiguille de l'électroscope dévie. Puis la plaque de zinc est éclairée. L'aiguille revient alors dans sa position initiale.

Interprétation :

2^{ème} étape : La plaque de zinc est rechargée négativement, l'aiguille de l'électroscope dévie à nouveau. On éclaire à nouveau la plaque mais en interposant entre la source lumineuse et la plaque de zinc, une plaque de verre. On observe que l'aiguille reste dans sa position.

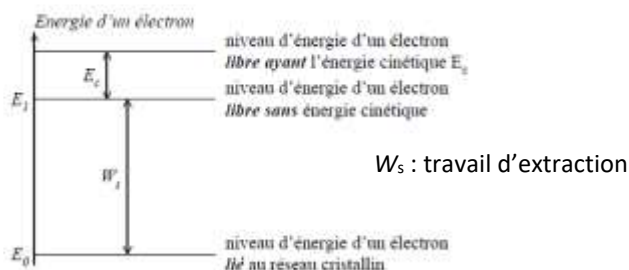
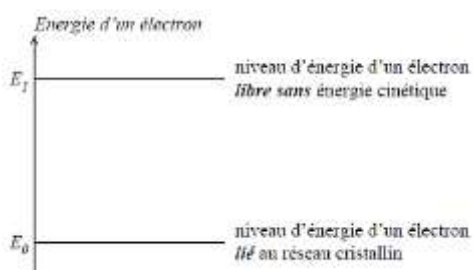
Interprétation :

1.2. Conclusion de l'expérience de Hertz.

Heinrich Hertz a alors découvert que la lumière ultraviolette provoque l'émission d'électrons à partir d'une surface métallique comme le zinc. On peut alors se demander comment on peut extraire un électron d'un métal :

Un métal est constitué par un réseau cristallin d'ions positifs entre lesquels circulent des électrons liés au réseau, mais libres de se déplacer à l'intérieur de ce réseau.

- A l'aide du diagramme énergétique d'un électron, proposer une explication à l'effet photoélectrique. Quelle énergie minimale doit recevoir un électron pour être libéré ?



Le diagramme énergétique illustre que :

- C'est à l'intérieur du métal que l'électron a le moins d'énergie, car il est lié au réseau ;
- Lorsque l'électron a capté l'énergie $E = W_s$, il est sorti du métal, mais il est au repos ($E_c = 0$) ;
- Lorsque l'électron a capté une énergie $E > W_s$, il est sorti du métal et a une énergie cinétique $E_c = E - W_s$.

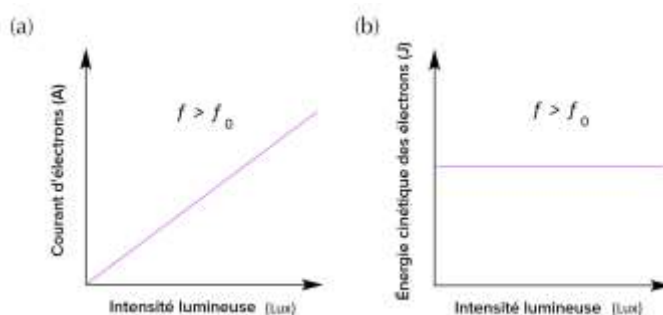
Le travail d'extraction W_s est l'énergie minimale que doit recevoir un électron pour être libéré.

Expérience A : On utilise maintenant le même faisceau lumineux, mais de plus forte intensité lumineuse, c'est-à-dire que le nombre de photons heurtant la plaque de zinc est plus élevé.

On mesure l'énergie cinétique des électrons émis et le courant électrique correspondant au nombre d'électrons émis.

Observation : Graphiques ci-contre.

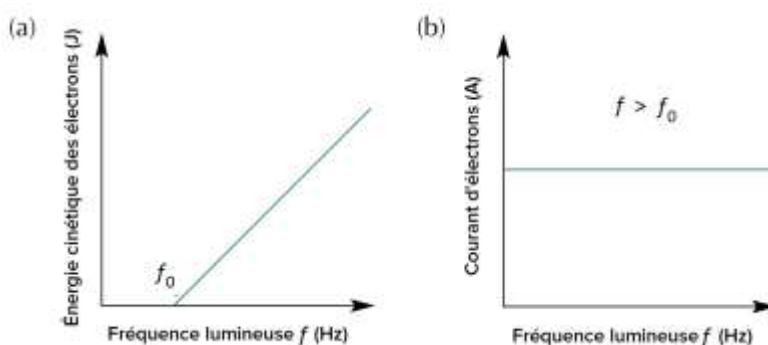
Interprétation :



Expérience B : On utilise maintenant un faisceau lumineux, de fréquence plus élevée, mais de même intensité lumineuse que le faisceau lumineux initial.

Observation : Graphique ci-contre.

Interprétation :



IV. Conditions pour lesquelles on pourra observer un effet photoélectrique avec le métal nickel Ni.

Le travail d'extraction (de sortie) du nickel Ni est égal à $W_s = 4,60 \text{ eV}$.

Si on éclaire ce métal avec une lumière de fréquence égale à $f = 4,50 \times 10^{16} \text{ Hz}$, pourra-t-on observer l'effet photoélectrique ?
Et si oui, quelle sera la valeur de la vitesse des électrons éjectés ?

Données :

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

$$\text{Masse d'un électron : } m_e = 9,11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$

$$\text{Constante de Planck : } h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$$

Méthode :

- Détermination de l'énergie du photon incident.
- Comparaison de l'énergie du photon avec la valeur du travail d'extraction du nickel. Conclusion.
Pour éjecter des électrons, il faut que l'énergie des photons soit plus grande que le travail d'extraction du Nickel.
- Détermination de l'énergie cinétique d'un électron éjecté.
- Détermination de la vitesse d'un électron éjecté.

V. Application de l'effet photoélectrique : les panneaux solaires photovoltaïques. (voir TP).

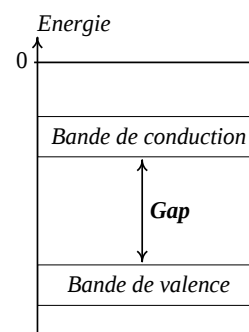
Le soleil est une source d'énergie inépuisable, l'exploitation de son rayonnement pour produire de l'électricité a été possible par la compréhension de l'effet photoélectrique : un panneau photovoltaïque convertit une partie de l'énergie lumineuse du soleil en énergie électrique.

Le silicium est actuellement le matériau le plus utilisé pour la fabrication de panneaux photovoltaïques. Il fait partie de la famille des matériaux semi-conducteurs dont le diagramme d'énergie des électrons est du type schématisé ci-contre.

En effet, en physique du solide, les bandes de valence et de conduction modélisent des valeurs d'énergie que peuvent prendre les électrons d'un semi-conducteur à l'intérieur de celui-ci. De façon générale, ces électrons n'ont la possibilité de prendre que des valeurs d'énergie comprises dans certains intervalles, lesquels sont séparés par des "bandes" d'énergie interdites. Cette modélisation conduit à parler de **bandes d'énergie**.

La *bande de valence* est la dernière bande de basse énergie contenant des électrons.

La *bande de conduction* est la première bande de haute énergie vide d'électrons.



Pour le silicium, l'énergie nécessaire (*Gap*) pour faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction est de $1,12 \text{ eV}$.

Questions :

1. Calculer la fréquence minimale du rayonnement permettant de faire passer un électron de la bande de valence à la bande de conduction.

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

Constante de Planck : $h = 6,626 \times 10^{-34} \text{ J.s}$

Réponse :

2. A quels rayonnements, les panneaux photovoltaïques en silicium sont-ils sensibles ?

Réponse :

Classe inversée : Expliquer en quelques lignes le principe de fonctionnement d'une application actuelle mettant en jeu l'interaction photon-matière parmi les applications suivantes : capteurs de lumière, cellules photovoltaïques, diodes électroluminescentes, spectroscopies UV-visible et IR.