

Chapitre F4. Modèle quantique de la lumière : le photon

Activité 1 : L'effet photoélectrique a-t-il révolutionné la physique ?

Le photon au secours de l'effet photoélectrique

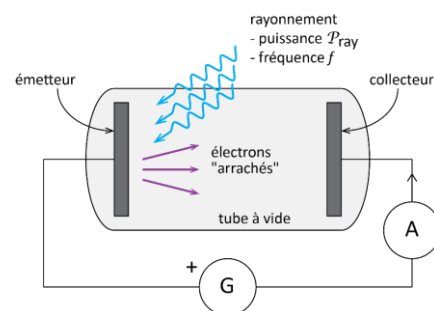
Contrairement à une idée répandue, l'effet dit *photoélectrique* n'a pas bouleversé la physique : Hertz savait que la lumière transportait de l'énergie (Maxwell l'ayant démontré dix ans plus tôt) et, sitôt l'électron découvert, la possibilité d'un échange d'énergie entre l'électron et la lumière était une conséquence logique des principes de la thermodynamique. C'est une propriété de l'effet photoélectrique qui a posé problème aux physiciens de l'époque (c'était surtout des hommes...) et qui a conduit Einstein à « inventer le photon ».

Dans cette activité, on va :

- étudier l'effet photoélectrique avec les outils de la physique classique ;
- confronter les prévisions faites avec la physique classique aux faits expérimentaux pour faire émerger la nécessité d'introduire le photon (et donc la physique quantique).

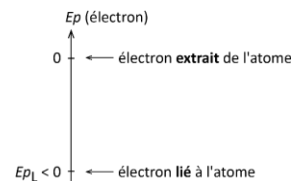
Pour mettre en évidence l'effet photoélectrique on utilise le dispositif schématisé ci-contre.

- Un métal dit « émetteur » est éclairé avec un rayonnement de puissance P_{ray} et de fréquence f ;
- Des électrons de ce métal sont arrachés à leurs atomes d'origine et rejoignent le collecteur : il se crée alors un courant d'intensité I , mesurée par l'ampèremètre. On l'appelle parfois « photocourant ».
- Initialement nulle, la tension délivrée par le générateur est augmentée jusqu'à ce que l'intensité du courant s'annule : cela donne une mesure de l'énergie cinétique des électrons émis : plus elle est élevée, plus la tension à imposer pour les stopper est élevée.



Partie A - Étude classique de l'effet photoélectrique

On étudie le système {électron} en le traitant comme un objet de mécanique classique. Il peut donc stocker de l'énergie cinétique, de l'énergie potentielle et échanger de l'énergie avec son environnement par travail ou transfert thermique. Lorsqu'il est lié à son atome d'origine, l'électron possède une énergie potentielle $E_{pL} < 0$ (appelée énergie de liaison). Lorsqu'il n'est plus lié à son atome, son énergie potentielle est nulle.



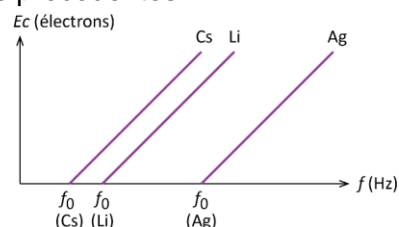
1. On considère un électron recevant par travail l'énergie juste nécessaire pour être extrait de son atome sans variation de son énergie cinétique. Ce travail sera noté W_{ex} et appelé « travail d'extraction ». En appliquant le théorème de l'énergie mécanique ou en faisant un bilan d'énergie, relier W_{ex} et E_{pL} .
2. On considère à présent que l'électron reçoit de l'énergie par rayonnement : l'énergie qu'il reçoit sera notée Q_{ray} . Initialement son énergie cinétique est nulle. Montrer, à l'aide du premier principe de la thermodynamique, que son énergie cinétique finale vaut : $E_c = Q_{ray} - W_{ex}$
3. On note P_{ray} la puissance du rayonnement incident. Exprimer E_c en fonction de P_{ray} , W_{ex} et de la durée Δt de l'exposition.
4. Montrer que, selon ce modèle, il suffit de produire un rayonnement, même de petite puissance, suffisamment longtemps pour permettre d'arracher un électron.
5. Selon ce modèle, comment évolue l'énergie cinétique acquise par un électron si on augmente la puissance du rayonnement incident ?

Partie B - Les observations

Les résultats expérimentaux réellement obtenus par les physiciens de l'époque sont les suivants. Ils sont simulés par le simulateur disponible sur www.prof-vince.fr (on cochera en particulier Energie electron vs frequence lumiere pour visualiser l'énergie cinétique de l'électron en fonction de la fréquence.

Ces résultats sont les suivants et sont en totale contradiction avec les prévisions précédentes :

- Pour une fréquence donnée, l'énergie cinétique des électrons est indépendante de la puissance du rayonnement incident.
- Pour une puissance donnée, il faut atteindre une fréquence seuil f_0 du rayonnement incident pour que des électrons soient émis.
- Cette fréquence seuil dépend uniquement de la nature du métal.
- Pour une fréquence supérieure à f_0 , l'énergie cinétique augmente comme une fonction affine de f , dont le coefficient directeur est le même quel que soit le métal (graphe ci-contre).





Pour un émetteur en cuivre, à l'aide du simulateur, estimer :

- La longueur d'onde maximale pour que des électrons soient émis
- La fréquence seuil correspondante
- L'énergie minimale nécessaire à l'émission d'électrons, en J puis en eV.
Cette énergie est appelée travail d'extraction.

d. D'après vous, l'utilisation de cette simulation permet de :

- Prouver que $Q_{ray} = W_{ex} + E_C$
 Vérifier que $Q_{ray} = W_{ex} + E_C$
 Ni l'un, ni l'autre

Formulaire
$c = 3,00 \times 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
$\lambda = \frac{c}{\nu}$
$E_{photon} = h\nu (= hf)$
$h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$
$1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$

Partie C – Les explication d'Albert Einstein

En 1905, dite « année miraculeuse de la physique », Albert Einstein publie simultanément 4 articles dont un a pour titre « point de vue heuristique concernant la production et la transformation de la lumière ». C'est l'acte de naissance du photon (même si ce n'est pas Einstein qui le nomme ainsi) qui, enfin, explique l'effet photoélectrique. C'est cet article qui vaudra à Einstein l'obtention du prix Nobel en 1921. Nous allons suivre une version simplifiée du raisonnement d'Einstein.

Einstein pose que le photon est un « objet » (en fait une certaine quantité d'énergie) quantique, il est par définition indivisible. De plus, un électron ne peut interagir qu'avec un photon à la fois.

- Exploiter cette information et la relation de Planck-Einstein pour adapter l'expression de la question A2. et exprimer l'énergie cinétique de l'électron en fonction de la fréquence du photon absorbé.
- Vérifier que l'expression de la question précédente est en accord avec l'allure des courbes donnant l'énergie cinétique en fonction de la puissance. Donner la valeur de la pente de ces droites.
- Exprimer la fréquence seuil f_0 et justifier qu'elle dépende du métal utilisé.

Pour aller plus loin : À l'échelle des photons, si la fréquence est constante, que signifie « augmenter la puissance du rayonnement » ? Pourquoi est-ce sans conséquence sur l'énergie cinétique des électrons extraits du métal.



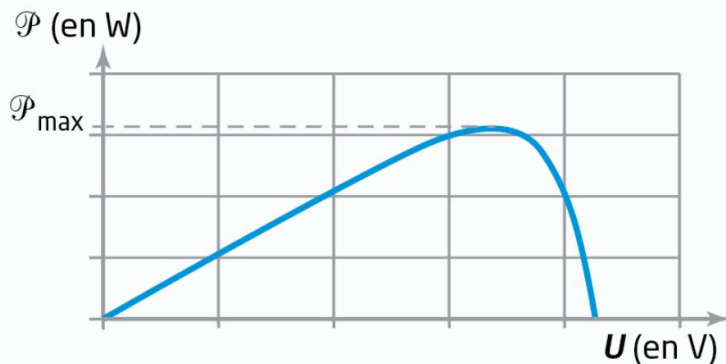
Activité 2 : Et l'effet photoélectrique, c'est efficace ?

Mesure du rendement d'une cellule photovoltaïque

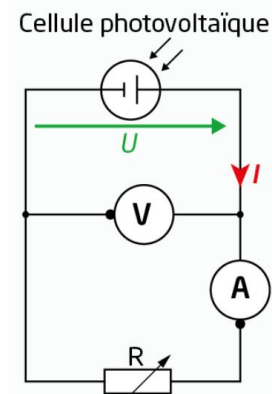
Une cellule photovoltaïque exploite l'effet photoélectrique pour produire de l'électricité. Son principe de fonctionnement est, en quelque sorte, réciproque de celui de la LED (diode électroluminescente).

L'objectif de cette activité est de déterminer le rendement énergétique d'une cellule photovoltaïque.

Document 1. Allure de la caractéristiques puissance – tension d'une cellule photovoltaïque sous un éclairage donné



Document 2. Schéma du montage expérimental



Document 3. Expression du rendement d'une cellule photovoltaïque

Si une cellule photovoltaïque de surface S est soumise à un éclairage E :

- La cellule reçoit une lumière de puissance $\mathcal{P}_{lum} = E \times S$ avec \mathcal{P}_{lum} en W, E en $W \cdot m^{-2}$ et S en m^2
- La puissance électrique qu'elle génère a pour expression $\mathcal{P} = U \times I$, avec \mathcal{P} en W, U en V et I en A ;
- Son rendement correspond au rapport entre la puissance électrique maximale et la puissance de la lumière reçue : $\eta = \frac{\mathcal{P}_{max}}{\mathcal{P}_{lum}}$ avec η sans unité, \mathcal{P}_{max} et \mathcal{P}_{lum} en W.

Matériel disponible

- Cellule photovoltaïque
- Ampèremètre
- Voltmètre
- Résistance variable
- Lampe de bureau
- Pyranomètre (pour mesurer un éclairage, en $W \cdot m^{-2}$)
- Fils de connexion

1. Avec un éclairage constant pendant toute l'expérience, mettre en œuvre un protocole qui permet de vérifier, à l'aide de Regressi, que la courbe expérimentale du document 1 correspond bien à la cellule utilisée. On utilisera le fait que la résistance est variable et on fera en sorte de balayer l'axe des abscisses
2. En déduire graphiquement la puissance maximale fournie par la cellule.
👉 Appeler le professeur pour vérification
3. Rédiger une stratégie expérimentale permettant de déterminer le rendement de la cellule photovoltaïque.
👉 Appeler le professeur pour validation
4. Mettre en œuvre la stratégie après validation et calculer le rendement.
5. Comparer votre résultat au rendement habituel d'une cellule photovoltaïque (recherche en ligne).

Pour aller plus loin : Lister les sources potentielles d'incertitudes.