

Effet photoélectrique

Si vous dirigez un faisceau lumineux d'une longueur d'onde suffisamment courte sur une surface métallique propre, la lumière expulsera des électrons de cette surface (la surface émettra des électrons). Cet effet photoélectrique est utilisé dans de nombreux appareils (caméras de télévision, caméscopes, viseurs de nuit, entre autres). Einstein a soutenu le bien-fondé de son concept de photon en l'utilisant pour expliquer cet effet, qu'on ne peut comprendre sans notions de physique quantique.

On analysera maintenant deux expériences photoélectriques de base, chacune utilisant l'appareil illustré dans la figure 1, où une lumière de fréquence f éclaire une cible P et en éjecte des électrons. Une différence de potentiel V est maintenue entre la cible P et le cylindre capteur C pour faire circuler ces électrons, appelés photoélectrons. Cette capture produit un courant photoélectrique i mesuré par l'ampèremètre A.

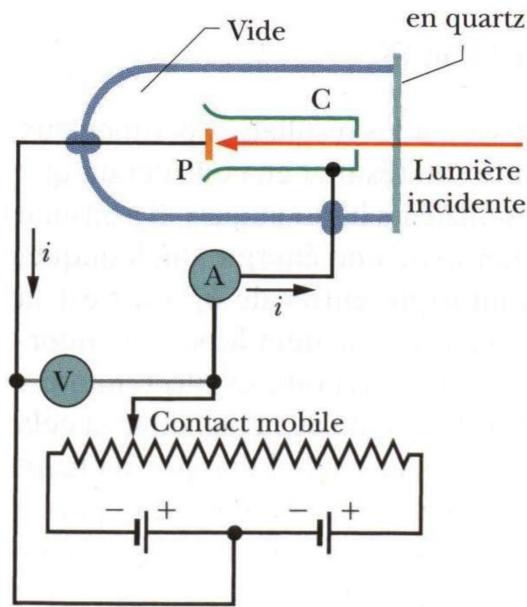


Figure 1

Annexe figure 1 : Un appareil utilisé pour étudier l'effet photoélectrique. La lumière incidente atteint une plaque P qu'on appellera la cible, éjectant des électrons, qui sont captés par le cylindre capteur C. Dans le circuit, les électrons se déplacent dans la direction opposée aux flèches, qui représentent le sens du courant électrique. Les piles et la résistance variable servent à produire et à régler la différence de potentiel.

Première expérience photoélectrique

On règle la différence de potentiel V en déplaçant le contact mobile de la figure 1 pour que le capteur C soit légèrement négatif par rapport à la cible P. Cette tension ralentit les électrons émis. On fait ensuite varier V jusqu'à une certaine valeur encore plus négative, appelée potentiel d'arrêt $V_{\text{arrêt}}$, à laquelle l'ampèremètre A indique une valeur nulle. Quand $V = V_{\text{arrêt}}$, les électrons émis les plus énergiques rebroussement chemin juste avant d'atteindre le capteur C. L'énergie cinétique de ces électrons les plus énergiques, K_{max} , est alors :

$$K_{\text{max}} = eV_{\text{arrêt}} , \quad (1)$$

où e est la charge élémentaire.

Les mesures révèlent que, pour une lumière de fréquence donnée, K_{max} ne dépend pas de l'intensité de la source lumineuse. Que la source soit éblouissante ou si faible qu'on a peine à la détecter (ou d'une

intensité intermédiaire), l'énergie cinétique maximale des électrons émis a toujours la même valeur.

Ce résultat expérimental constitue un casse-tête pour la physique classique. Du point de vue classique, la lumière incidente est une onde électromagnétique oscillant de manière sinusoïdale. Elle devrait donc faire osciller de façon sinusoïdale un électron de la cible en raison de la force électrique oscillante qu'exerce son champ électrique. Si l'amplitude de son oscillation est assez élevée, l'électron devrait se libérer de la surface de la cible - c'est-à-dire être émis de la cible. Donc, si on augmente l'amplitude de l'onde et son champ électrique oscillant, l'électron devrait subir une "poussée" plus énergique au moment de son émission. Cependant, ce n'est pas ce qui se produit. À une fréquence donnée, la lumière intense et la lumière faible donnent toutes deux exactement la même poussée maximale aux électrons émis.

L'explication de cette observation apparaît naturellement si on pense en fonction des photons. On constate alors que l'énergie pouvant être transférée de la lumière incidente à un électron de la cible est celle d'un photon unique. Si on augmente l'intensité lumineuse, on augmente le nombre de photons en jeu, mais l'énergie de chaque photon demeure inchangée parce que la fréquence ne varie pas. Par conséquent, l'énergie transformée en énergie cinétique d'un électron demeure également inchangée.

Seconde expérience photoélectrique

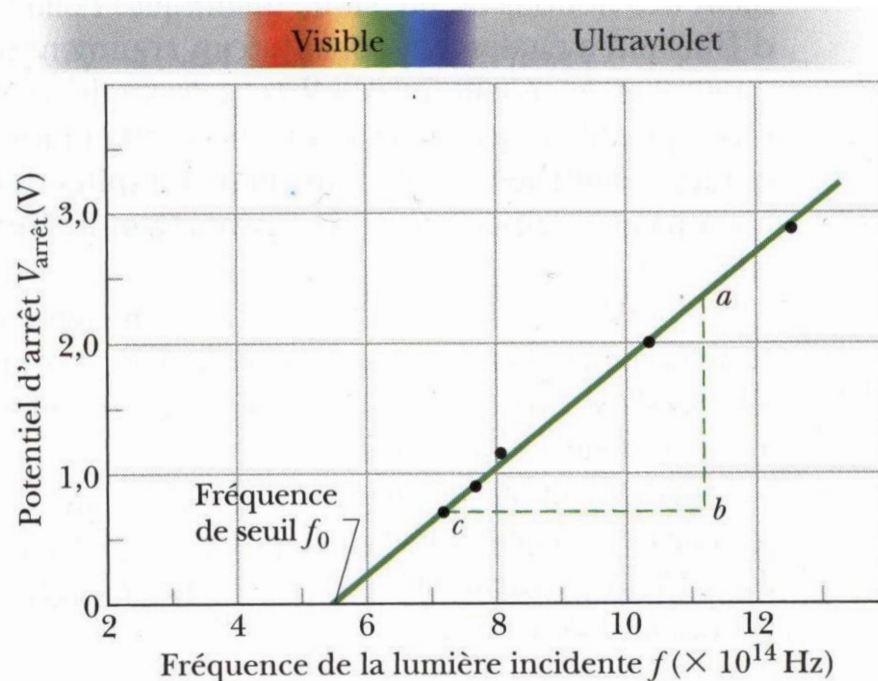


Figure 2

On fait maintenant varier la fréquence f de la lumière incidente et on mesure le potentiel d'arrêt $V_{\text{arrêt}}$. La figure 2 représente graphiquement $V_{\text{arrêt}}$ en fonction de f . Notez qu'il n'y a aucun effet photoélectrique si la fréquence est sous une certaine fréquence de seuil f_0 ou, ce qui est équivalent, si la longueur d'onde est supérieure à la longueur d'onde de seuil $\lambda_0 = c/f_0$. C'est ainsi, peu importe l'intensité de la lumière incidente.

Voici un autre casse-tête pour la physique classique. Si vous considérez la lumière comme une onde électromagnétique, vous devez vous attendre, même si sa fréquence est basse, à ce que la lumière puisse toujours éjecter des électrons si vous fournissez suffisamment d'énergie - c'est-à-dire si vous utilisez une source lumineuse assez brillante. Ce n'est pas ce qui se produit. Quand la lumière possède une fréquence inférieure à la fréquence de seuil f_0 , il n'y a aucun effet photoélectrique, peu importe l'intensité de la source lumineuse.

Toutefois, si l'énergie est transférée par les photons, on doit s'attendre à ce qu'il existe une fréquence

de seuil. Dans la cible, les électrons sont maintenus par des forces électriques. (S'ils ne l'étaient pas, la force de gravité les ferait tomber au sol.) Pour s'échapper de la cible, un électron doit acquérir une énergie minimale Φ , où Φ est une caractéristique du matériau de la cible appelée travail d'extraction. Si l'énergie transférée à un électron par un photon excède le travail d'extraction du matériau (si $hf > \Phi$), l'électron peut s'échapper de la cible. Par contre, si l'énergie transférée n'excède pas le travail d'extraction (c'est-à-dire si $hf < \Phi$), l'électron ne peut s'échapper. C'est ce que démontre la figure 2.

L'équation photoélectrique

Einstein a fait la somme des résultats de telles expériences photoélectriques dans l'équation :

$$hf = K_{\max} + \Phi \quad (\text{l'équation photoélectrique}). \quad (2)$$

Cette équation constitue un énoncé du principe de conservation de l'énergie dans le cas de l'absorption d'un photon unique par un matériau possédant un travail d'extraction Φ . L'énergie égale à celle du photon hf est transférée à un seul électron de la cible. Pour que l'électron s'échappe de celle-ci, il doit acquérir une énergie au moins égale à Φ . Toute énergie additionnelle ($hf - \Phi$) que l'électron acquiert du photon devient de l'énergie cinétique K . Dans les meilleures circonstances, l'électron peut traverser la surface sans perdre son énergie cinétique ; il quitte alors la cible avec le maximum d'énergie cinétique $K_{\max}$ possible.

On peut récrire l'équation 2 en remplaçant $K_{\max}$ par l'expression de l'équation 1. Après un peu de manipulation, on obtient

$$V_{\text{arrêt}} = \left(\frac{h}{e}\right) f - \frac{\Phi}{e}$$

Les rapports h/e et Φ/e étant constants, on devrait s'attendre à ce qu'un graphique des potentiels d'arrêt $V_{\text{arrêt}}$ mesurés en fonction de la fréquence de la lumière soit une droite, comme dans la figure 2. De plus, la pente de cette droite devrait-être h/e . Pour vérifier ce point, on mesure ab et bc dans la figure 2 et on écrit

$$\begin{aligned} \frac{h}{e} &= \frac{ab}{bc} = \frac{2,35 \text{ V} - 0,72 \text{ V}}{(11,2 \times 10^{14} - 7,2 \times 10^{14}) \text{ Hz}} \\ &= 4,1 \times 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{s}. \end{aligned}$$

Si on multiplie ce résultat par la charge élémentaire e , on obtient

$$h = (4,1 \times 10^{-15} \text{ V} \cdot \text{s}) (1,6 \times 10^{-19} \text{ C}) = 6,6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$$

ce qui est cohérent par rapport aux valeurs de h mesurées à l'aide de nombreuses méthodes.

Aparté : l'énoncé d'une explication de l'effet photoélectrique nécessite certainement des notions de physique quantique. Pendant de nombreuses années, l'explication d'Einstein a également constitué un argument irrésistible en faveur de l'existence des photons. Cependant, en 1969, on a formulé une autre explication qui faisait appel à la physique quantique, mais qui ne nécessitait plus la notion de photon. La lumière est bel et bien quantifiée en photons, mais l'explication d'Einstein de l'effet photoélectrique n'est pas le meilleur argument permettant de l'expliquer.