

2.2. L'effet photoélectrique : l'existence du photon

En 1905, Einstein introduit l'hypothèse selon laquelle un champ électromagnétique de fréquence ν est quantifié sous la forme de grains discrets qui portent chacun une énergie $h\nu$. Ces grains furent plus tard appelés photons par le chimiste Gilbert Lewis en 1926. Cette hypothèse va permettre d'expliquer très simplement l'effet photoélectrique observé par Hertz en 1887. Cet effet, décrit dans le dispositif de la figure 1, consiste en l'émission

d'électrons par des métaux convenablement éclairés par une irradiation lumineuse. La cellule photoélectrique est une ampoule où règne un vide poussé, à l'intérieur de laquelle il y a une cathode et une anode métalliques. On impose une

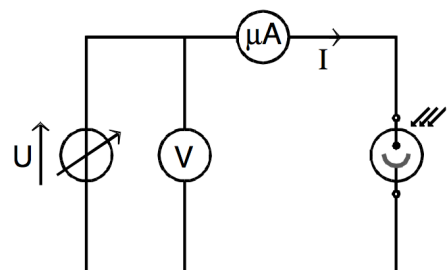


figure 1

différence de potentiel U et on mesure l'intensité I du courant traversant le circuit. La cathode éclairée par un faisceau lumineux monochromatique de fréquence ν , reçoit une puissance lumineuse incidente moyenne P .

La figure 2, donne l'allure de la caractéristique obtenue pour la puissance P . U_0 est appelé le potentiel d'arrêt.

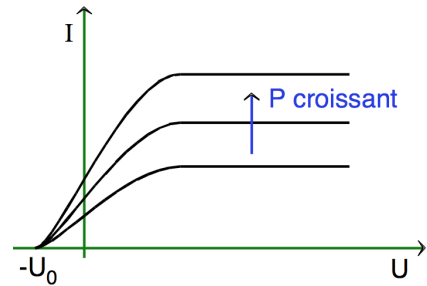


figure 2

2.2.1. Commenter l'allure de la caractéristique $I(U)$.

2.2.2. Expérimentalement, on constate que l'effet photoélectrique ne se produit que si la fréquence ν est supérieure à une fréquence minimale ν_0 du rayonnement incident. On appelle travail d'extraction du métal W_{ext} l'énergie minimale à fournir pour arracher un électron. Exprimer W_{ext} en fonction de ν_0 .

2.2.3. On suppose $\nu > \nu_0$. Donner l'expression de l'énergie cinétique d'un électron émis en fonction de ν et ν_0 .

2.2.4. Le métal formant la cathode de la cellule photoélectrique est caractérisé par un travail d'extraction $W_{ext} = 2,25 \text{ eV}$. On l'éclaire par deux radiations lumineuses monochromatiques différentes de longueurs d'ondes respectives $\lambda = 490 \text{ nm}$ et $\lambda = 660 \text{ nm}$. La puissance $P = 9,0 \cdot 10^{-7} \text{ W}$ de ces deux sources de rayonnement est la même.

2.2.4.1. Quelle est la fréquence minimale ν_0 pour que les photons envoyés sur la cathode puissent extraire des électrons par effet photoélectrique ? Les deux radiations permettent-elles l'émission d'électrons ?

2.2.4.2. Calculer l'énergie cinétique des électrons émis lorsqu'ils quittent la cathode.

2.2.4.3. Calculer le nombre N de photons arrivant sur la cathode par unité de temps pour la radiation permettant l'émission d'électrons.

2.2.4.4. On suppose qu'un photon donne toujours un électron et que tous les électrons émis par la cathode sont collectés grâce à l'anode chargée positivement. Sachant que le courant électrique est défini comme étant la charge électrique traversant la zone entre la cathode et l'anode par seconde, calculer l'intensité I (en valeur absolue) du courant électrique, appelé « courant de saturation » de la cellule. Exprimer ce courant I en fonction de P , λ et des constantes nécessaires.

2.2.4.5. Tracer l'allure du courant de saturation en fonction de la longueur d'onde du rayonnement incident, pour une même puissance.

2.2.4.6. Le courant de saturation mesuré est $I = 4,0 \cdot 10^{-8} \text{ A}$, lorsque la cathode reçoit la puissance lumineuse $P = 9,0 \cdot 10^{-7} \text{ W}$. On définit le rendement quantique R_q de la cellule photoélectrique comme le rapport entre le nombre d'électrons émis et le nombre de photons reçus. Calculer R_q .

2.2.5. Expliquer clairement quel aspect de l'effet photoélectrique est en contradiction avec une théorie purement ondulatoire de la lumière, et pourquoi l'introduction de la notion de photon résout le problème.

2.3. L'effet Compton : la confirmation du photon

En 1923, A.H. Compton met en évidence expérimentalement la nature

corpusculaire des rayonnements électromagnétiques, et en particulier l'existence d'un quantum d'énergie « photons » et d'une quantité de mouvement bien définis. Dans son expérience de diffusion schématisée ci-dessous (figure 3), Compton bombarde une mince feuille de graphite avec un faisceau de rayons X durs (longueur d'onde caractéristique $\lambda \approx 1\text{pm}$ à 1nm). Derrière cette cible, il place un détecteur de rayons X qu'il peut faire tourner d'un angle θ par rapport à la direction des rayons incidents. Compton constate alors que des électrons sont arrachés de la cible et que les rayons X incidents sont diffusés dans toutes les directions avec une longueur d'onde λ' , fonction de l'angle θ , différente de la longueur d'onde incidente λ . Avec une approche relativiste, Compton obtient la relation, conforme aux données expérimentales : $\lambda' = \lambda + \lambda_c(1 - \cos\theta)$, où λ_c est une constante que l'on déterminera par la suite.

2.3.1. Expliquer pourquoi la physique classique ne peut pas justifier de tels résultats expérimentaux.

2.3.2. Quel est l'intérêt de réaliser cette expérience avec des rayons X ?

2.3.3. Comment évolue l'énergie d'un photon dans cette expérience ? Que peut-on dire qualitativement du signe de $\Delta\lambda = \lambda - \lambda'$, appelé décalage Compton ?

Dans le cadre d'un modèle théorique de collision relativiste élastique, Compton adopte le modèle suivant : un photon incident constituant le faisceau incident de rayons X de longueur d'onde λ frappe un électron libre du bloc de graphite au repos dans le référentiel galiléen d'étude.

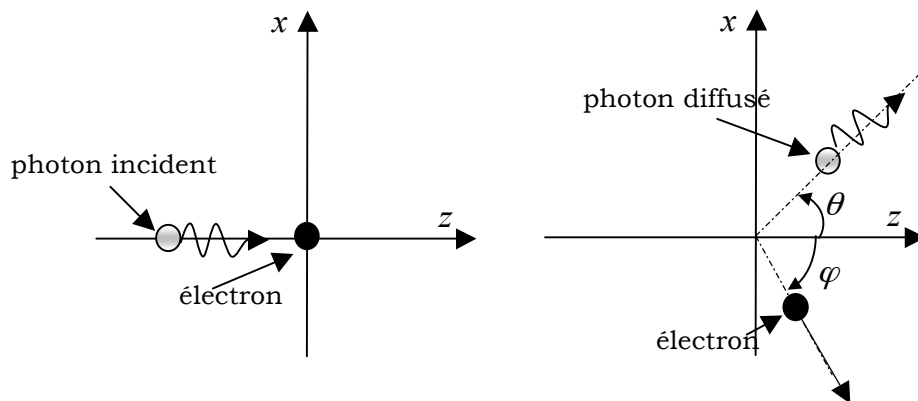


figure 3

On souhaite démontrer l'expression donnant le décalage Compton $\Delta\lambda = \lambda - \lambda'$.

Lors de la collision, le photon subit une diffusion d'un angle θ avec une longueur d'onde λ' , alors que l'électron de masse m_e initialement au repos dans le référentiel d'étude s'éloigne dans la direction φ avec une quantité de mouvement $\vec{p}_e$.

On note $\vec{p} = p\vec{e}_z$ et $\vec{p}' = p'\vec{u}$, avec $\vec{u} = \sin\theta\vec{e}_x + \cos\theta\vec{e}_z$, les quantités de mouvement, ε et ε' les énergies du photon respectivement avant et après la collision. De plus, l'électron étant considéré relativiste dans l'expérience, son énergie totale est donnée par $E_e = \sqrt{p_e^2 c^2 + m_e^2 c^4}$. Le système {photon + électron} est considéré isolé pendant la collision dans le référentiel d'étude.

2.3.4. Écrire la conservation de la quantité de mouvement du système {photon + électron} au cours du choc. Dédire une première équation entre λ , λ' , θ et $p_e = \|\vec{p}_e\|$.

- 2.3.5.** Exprimer la conservation de l'énergie totale du système {photon + électron} au cours du choc. Dédire une deuxième équation entre λ , λ' et $p_e = \|\vec{p}_e\|$.
- 2.3.6.** Retrouver l'expression du décalage Compton $\Delta\lambda$ donné ci-dessus. Exprimer la quantité λ_c et calculer sa valeur numérique. À quel domaine spectral appartient λ_c ? Commenter.
- 2.3.7.** Expliquer comment l'expérience de l'effet Compton a-t-elle conforté l'idée que le rayonnement est constitué de particules, les photons ?