

Notion de photon - Effet photoélectrique

Les documents ci-dessous rendent compte de la nécessité d'introduire la notion de photon, c'est-à-dire la quantification des échanges d'énergie par rayonnement électromagnétique. Ils constituent un prolongement ou un complément de l'étude de l'expérience de Lenard sur l'effet photo-électrique qui a été faite en cours à partir du logiciel de simulation du PHET¹.

Document 1 : Extrait de « On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light » (Einstein, 1905)

It seems to me that the observation associated with black body radiation, fluorescence, the photoelectric effect, and other related phenomena associated with the emission or transformation of light are more readily understood if one assumes that the energy of light is discontinuously distributed in space. In accordance with the assumption to be considered here, the energy of a light ray spreading out from a point is not continuously distributed over an increasing space, but consists of a finite number of energy quanta which are localized at points in space, which move without dividing, and which can only be produced and absorbed as complete units.

Document 2 : Extrait du discours de S. Arrhenius lors de la remise du prix Nobel de physique à Albert Einstein en 1921² (<http://www.nobelprize.org>)

Your Majesty, Your Royal Highnesses, Ladies and Gentlemen.

There is probably no physicist living today whose name has become so widely known as that of Albert Einstein (...)

The studies for which Einstein has received the Nobel Prize, falls within the domain of the quantum theory founded by Planck in 1900. This theory asserts that radiant energy consists of individual particles, termed "quanta", approximately in the same way as matter is made up of particles, i.e. atoms. This remarkable theory, for which Planck received the Nobel Prize for Physics in 1918, suffered from a variety of drawbacks and about the middle of the first decade of this century it reached a kind of impasse. Then Einstein came forward with his work on specific heat and the photoelectric effect.

This latter had been discovered by the famous physicist Hertz in 1887 (...)

A more exhaustive study of this interesting phenomenon was carried out by Hallwachs who showed that under certain conditions a negatively charged body, e.g. a metal plate, illuminated with light of a particular colour - ultraviolet has the strongest effect - loses its negative charge and ultimately assumes a positive charge.

In 1899 Lenard demonstrated the cause to be the emission of electrons at a certain velocity from the negatively charged body.

The most extraordinary aspect of this effect was that the electron emission velocity is independent of the intensity of the illuminating light, which is proportional only to the number of electrons, whereas the velocity increases with the frequency of the light. Lenard stressed that this phenomenon was not in good agreement with the then prevailing concepts.

(...) Similarly, when a quantum of light falls on a metal plate it can at most yield the whole of its energy to an electron there.

A part of this energy is consumed in carrying the electron out into the air, the remainder stays with the electron as kinetic energy. This applies to an electron in the surface layer of the metal. Only if the quantum contains sufficient energy for the electron to perform the work of detaching itself from the metal does the electron move out into the air. Consequently, only light having a frequency greater than a certain limit is capable of inducing a photoelectric effect, however high the intensity of the irradiating light.

If this limit is exceeded the effect is proportional to the light intensity at constant frequency.

1. Disponible ici : <https://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>

2. Prix Nobel décerné au titre de « his services to Theoretical Physics, and especially for his discovery of the law of the photoelectric effect » .

Einstein's law of the photo-electrical effect has been extremely rigorously tested by the American Millikan and his pupils and passed the test brilliantly. Owing to these studies by Einstein the quantum theory has been perfected to a high degree and an extensive literature grew up in this field whereby the extraordinary value of this theory was proved. Einstein's law has become the basis of quantitative photo-chemistry.

Document 3 : Expérience de Philipp Lenard sur l'effet photoélectrique

Bref historique

1839 : Alexandre Edmond Becquerel découvre l'effet photovoltaïque en étudiant des cellules électrolytiques soumises à de la lumière. Bien que ce ne soit pas rigoureusement la même chose que l'effet photoélectrique, ce travail a initié l'idée d'une relation entre la lumière et les propriétés électroniques des métaux.

1887 : Heinrich Hertz observe l'effet photoélectrique « accidentellement » alors qu'il s'intéressait à la production d'ondes électromagnétiques (l'existence de celles-ci venant d'être prouvée par l'écosais James Clark Maxwell). Peu après, d'autres physiciens (notamment Hallwachs) montrent, très clairement qu'une plaque de Zinc soumise à des rayons UV se charge positivement.

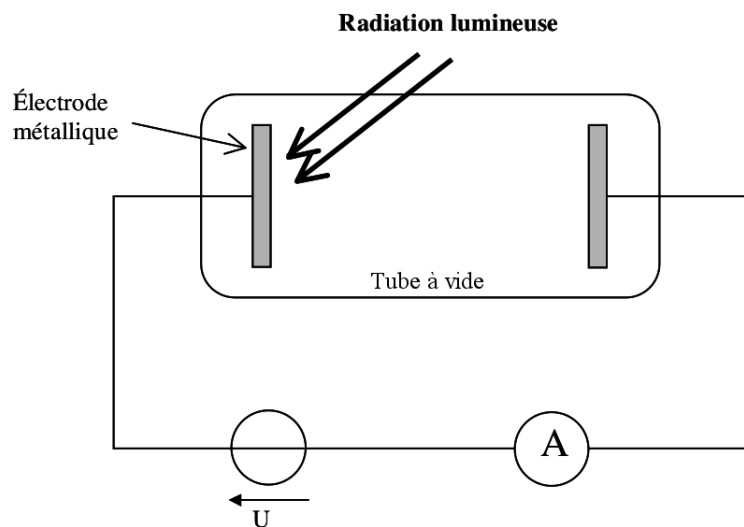
1902 : Lenard (grâce à l'expérience décrite ci-dessous) observe que l'énergie cinétique des électrons individuels émis par effet photoélectrique augmente avec la fréquence de la lumière utilisée, ce qui est en contradiction avec la théorie ondulatoire de la lumière (Maxwell) qui prédirait que l'énergie des électrons serait proportionnelle à l'intensité de la lumière.

Principe de l'expérience et grandeurs mesurées

On place deux plaques métalliques (électrodes) face à face dans un tube à vide. Sur une des deux électrodes, on envoie de la lumière, de fréquence et d'intensité réglable.

De plus, grâce à une source de tension, on peut aussi appliquer une tension réglable U entre les deux électrodes.

Enfin, un ampèremètre permet de mesurer le courant qui circule dans le circuit.



Intérêt du montage

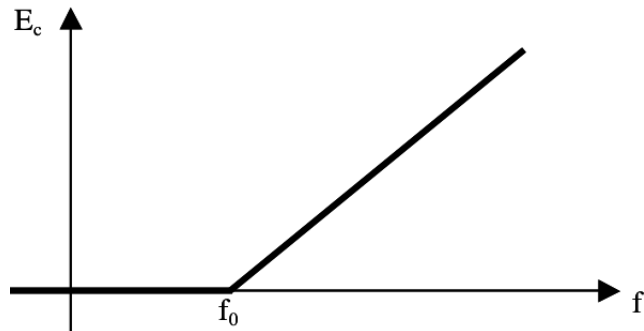
Si on observe un courant, c'est que des électrons se déplacent dans le vide de l'électrode de gauche vers celle de droite. Ces électrons auront nécessairement été arrachés par la lumière à l'électrode de gauche. De plus, quand on applique une tension U positive (dans le sens indiqué sur le schéma), ces électrons ont tendance à être attirés par l'électrode de gauche (car celle-ci est reliée au côté + de la source de tension). Donc, pour qu'ils arrivent à traverser le tube à vide (et que l'on observe un courant), il faudra qu'ils aient acquis initialement une énergie cinétique supérieure à l'énergie potentielle qui fait qu'ils sont attirés vers l'électrode de gauche. Cette énergie potentielle vaut $E_p = eU$ où U est la tension qui règne entre les plaques et e est la valeur absolue de la charge d'un électron : $e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ C}$.

Cet appareil permet donc non seulement de savoir si la lumière est capable d'arracher des électrons à la plaque métallique, mais aussi de savoir quelle est l'énergie cinétique (donc la vitesse) des électrons après avoir été arrachés.

Principales observations

1. Pour un métal donné, il existe une fréquence minimale (ou « fréquence seuil », notée f_0) de la lumière en dessous de laquelle aucun électron n'est émis par la plaque. En dessous de la fréquence seuil, quelle que soit l'intensité de la lumière utilisée, aucun électron ne sera arraché. Au dessus de la fréquence seuil, le nombre d'électrons arrachés sera proportionnel à l'intensité de la lumière. Ce comportement est très surprenant car on sait que l'énergie totale transportée par une onde ne dépend que de l'amplitude de celle-ci (donc, de son intensité, s'il s'agit d'une onde lumineuse).

2. Si on augmente la fréquence de la lumière au delà de la fréquence seuil, l'énergie cinétique des électrons arrachés augmente. Plus précisément on obtient une courbe expérimentale à l'allure ci-contre.

**Document 4 : Simulation de l'expérience de Lenard**

On trouvera une application java de simulation de l'expérience précédente à l'adresse suivante (téléchargeable ou utilisable en ligne) :

<http://phet.colorado.edu/en/simulation/photoelectric>

Faites varier l'intensité et la longueur d'onde de la lumière, ainsi que la tension appliquée entre les plaques, et regardez sur ce qui se passe au niveau de l'émission des électrons. Retrouver les observations précédentes. Mesurer le *potentiel d'arrêt* dans diverses situations, c'est-à-dire la tension nécessaire pour empêcher les électrons d'atteindre l'autre électrode.

Document 5 : Travaux d'extraction pour divers métaux

| Element | Aluminium | Cadmium | Calcium | Carbon | Cesium | Cobalt | Copper | Gold | Iron |
|-----------------------|-----------|---------|---------|-----------|----------|--------|--------|---------|------|
| W_{ext} (eV) | 4,08 | 4,07 | 2,9 | 4,81 | 2,1 | 5,0 | 4,7 | 5,1 | 4,5 |
| Lead | Magnesium | Mercury | Nickel | Potassium | Platinum | Silver | Sodium | Uranium | Zinc |
| 4,14 | 3,68 | 4,5 | 5,01 | 2,3 | 6,35 | 4,73 | 2,28 | 3,6 | 4,3 |

Questions

1. Expliquez précisément pour quelle(s) raison(s) l'effet photoélectrique est en contradiction avec une théorie purement ondulatoire de la lumière.
2. Exposer brièvement l'interprétation d'Einstein, en précisant comment elle rend compte des principales observations.
3. Quel physicien avait, avant Einstein, émis l'idée que l'énergie lumineuse pouvait être constituée de particules individuelles ou *quanta* (de la même façon que la matière est constituée d'atomes).
4. Calculez la fréquence seuil de la lumière permettant une émission photoélectrique pour du Zinc, pour du Platine et pour du césium. Dans chaque cas, donner la longueurs d'ondes correspondantes puis indiquer de quel type de radiation il s'agit.
5. Quelle est la valeur de la pente de la droite dans la courbe représentative de E_c en fonction de f (Doc. 3) dans l'expérience de Lenard.
6. On réalise l'expérience de Lenard avec une plaque de Zinc, en utilisant une lumière ultraviolette de longueur d'onde 200 nm.
Y aura-t-il des électrons arrachés ?
Si oui, quelle sera leur énergie cinétique juste après avoir été arrachés ?
Si on veut empêcher ces électrons d'atteindre l'autre électrode, quelle tension U faut-il appliquer entre les deux électrodes (*potentiel d'arrêt*) ?