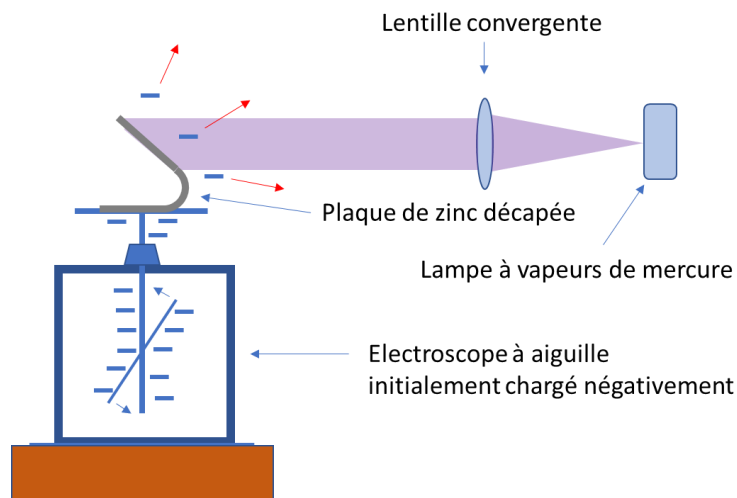


L'effet photoélectrique et les niveaux d'énergie de l'électron dans l'atome

I L'expérience de Hertz en 1887

Hertz est un physicien allemand qui fit l'expérience suivante en 1887

Une plaque de zinc est mise en contact avec le plateau d'un électroscope à aiguille et est chargée négativement à l'aide d'un bâton d'ébonite. La lumière d'une lampe à vapeur de mercure est ensuite focalisée à l'aide d'une lentille convergente vers la plaque.



Observations :

Hertz constate que la déviation de l'aiguille de l'électroscope tend à s'annuler, prouvant que ce dernier se décharge.

Hertz constate également qu'en intercalant une plaque de verre entre la lentille et la plaque de zinc, aucun phénomène ne se produit.

Interprétations :

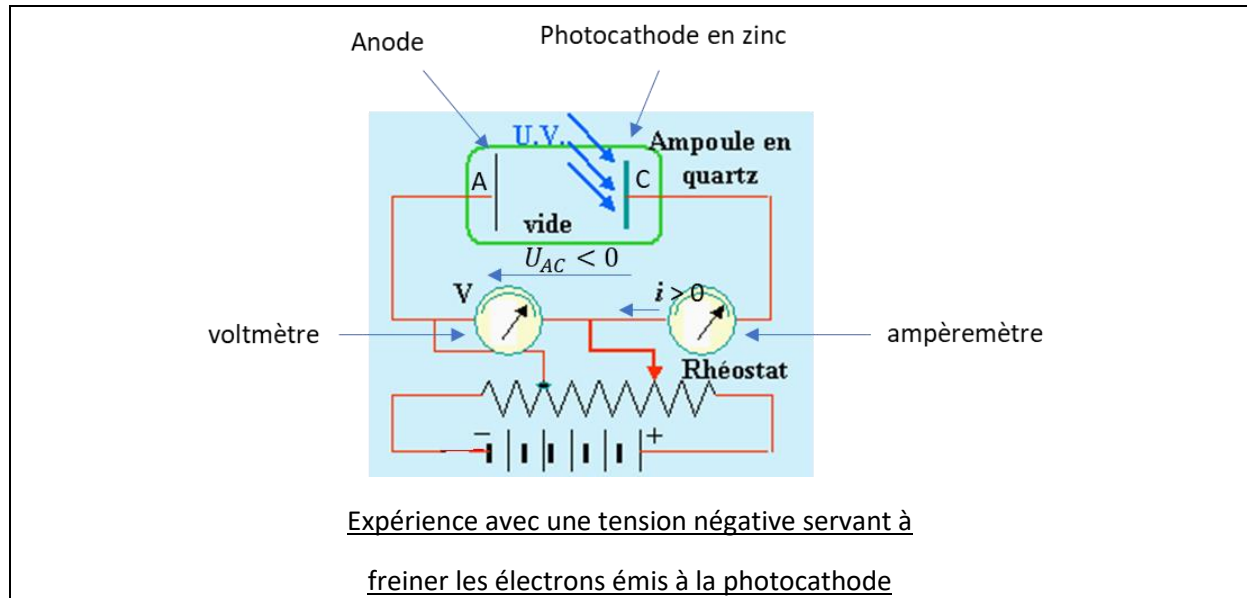
Une lampe à vapeur de mercure émet un spectre contenant des ultra-violets. Or une plaque de verre absorbe les ultra-violets. Ce sont donc ces derniers qui sont responsables du phénomène de la décharge de l'électroscope en l'absence de plaque de verre.

Si l'électroscope se décharge, c'est que des charges négatives en sont expulsées et cela, le plus probablement au niveau de la plaque de zinc.

La rencontre de la lumière ultra-violette arrache donc des charges négatives au zinc. Rappelons que l'électron n'est pas encore découvert en 1887. Il ne le sera que vers 1895 par Thomson.

II L'expérience de Lénard

Philipp Lenard est un physicien allemand, prix Nobel de physique en 1905. Il fit une expérience reprenant les observations de Hertz et établissant un certain nombre de lois concernant le phénomène appelé effet photo-électrique.



Expérience:

Dans une ampoule en quartz où règne un vide poussé, une plaque de zinc, nommée photocathode, reçoit un flux de lumière de fréquence donnée et dont on peut faire varier l'intensité. Une tension variable, pouvant être positive ou négative est appliquée dans un premier temps, entre l'anode et la cathode, et un galvanomètre à cadre mobile est mis en série pour mesurer l'intensité i du courant parvenant à l'anode.

Observations :

En dessous d'une fréquence qualifiée de fréquence seuil ν_s , aucun courant ne parvient à la cathode, l'aiguille du galvanomètre ne dévient pas et ce, quelque soit la valeur de la tension appliquée, qu'elle soit positive ou négative.

Pour une fréquence supérieure à la fréquence seuil, l'aiguille du galvanomètre dévie dans un sens indiquant un courant d'intensité i positive dans le sens allant de la cathode vers l'anode en passant par le galvanomètre, même pour des tensions négatives allant jusqu'à une tension seuil $U_{AC} = -U_s < 0$ appelée potentiel d'arrêt, qui est indépendante de la fréquence lumineuse employée et en dessous de laquelle l'intensité devient nulle.

En faisant varier la tension pour une fréquence donnée supérieure à la fréquence seuil, on constate que l'intensité croît vivement à partir de la tension seuil avant de se saturer à une valeur donnée. En faisant varier l'intensité du faisceau lumineux, toujours à une fréquence donnée, et pour une tension donnée supérieure à la tension de saturation, on constate que l'intensité i est proportionnelle à l'intensité du faisceau.

Ces observations sont résumées par les courbes suivantes.

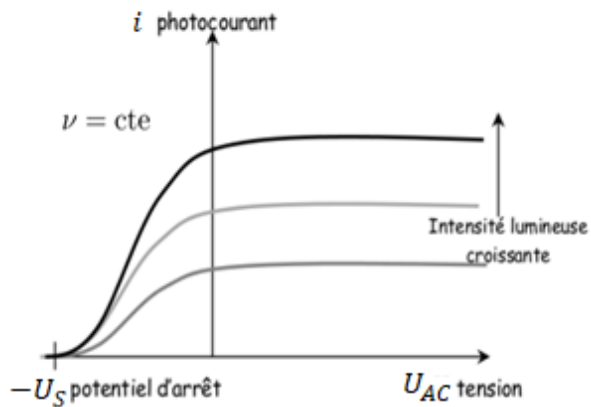


Figure 1

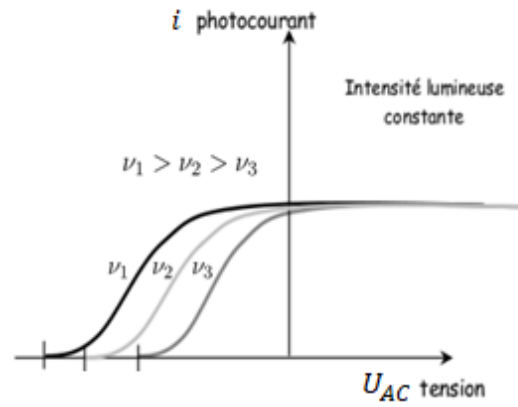


Figure 2

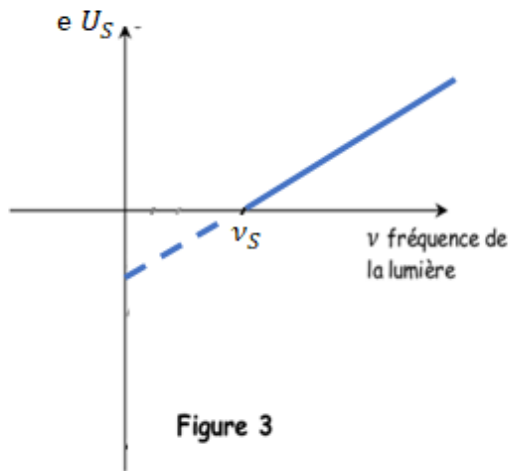


Figure 3

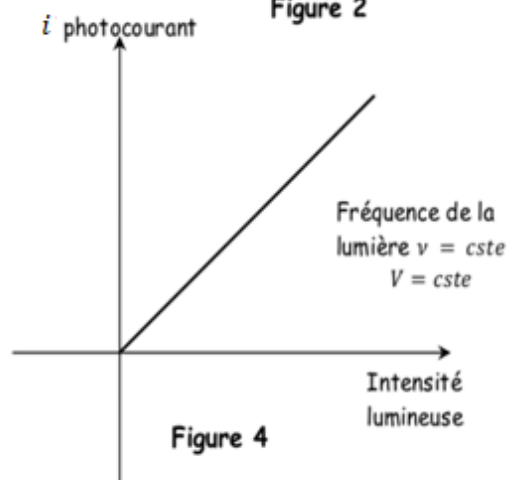


Figure 4

Interprétation :

En dessous de la fréquence seuil, l'ampoule en quartz se comporte comme un interrupteur ouvert. C'est donc qu'aucun électron ne circule dans le tube de la cathode vers l'anode.

Pour une fréquence supérieure à la fréquence seuil, le sens de déviation de l'aiguille du galvanomètre indique que des électrons ont pu être libérés de la plaque de zinc grâce au faisceau lumineux puis entraînés vers l'anode chargée positivement.

Rappelons que le travail W de la force électrostatique agissant sur un électron dans son mouvement depuis la cathode où il est émis jusqu'à l'anode est :

$$W = -e U_{CA} = e U_{AC}$$

Et le théorème de l'énergie cinétique, appliqué à un tel électron de masse m entre l'instant où il quitte la cathode avec une vitesse v_C pour parvenir à l'anode avec une vitesse v_A donne :

$$W = \frac{1}{2} m v_A^2 - \frac{1}{2} m v_C^2$$

Or, la tension d'arrêt étant la tension limite à appliquer pour obtenir un courant d'intensité nulle, les électrons parviennent à l'anode sans vitesse pour cette tension. Le théorème devient alors :

$$e (-U_s) = 0 - \frac{1}{2} m v_c^2$$

soit :

$$e U_s = \frac{1}{2} m v_c^2$$

La figure 3 du graphique montre qu'il existe une relation mathématique affine pour une fréquence supérieure à la fréquence seuil du type :

$$e U_s = h (v - v_s)$$

où h est une constante qui a la même valeur, à savoir $6,63 \times 10^{-34} \text{ J s}$ que celle introduite par le physicien Max Planck, sans que ce dernier en comprenne la signification, afin de faire coller ses mesures d'intensité lumineuse rayonnée par un corps noir (un four) avec les prédictions des modèles physiques ondulatoires de l'époque qui produisaient sans cette correction une prédiction de rayonnement infini dans l'ultraviolet qualifiée de catastrophe ultraviolette.

III L'interprétation d'Einstein

Albert Einstein apporte une interprétation aux expériences de Lénard et à l'énigme posée par Planck en introduisant sa fameuse constante.

Une lumière monochromatique de fréquence ν interagit avec les électrons d'un atome sous forme de quanta d'énergie qu'Einstein pensait portés par des particules qu'il nomma photons et dont l'énergie était :

$$E = h \nu$$

Pour pouvoir extraire un électron d'un atome, le photon doit avoir une fréquence minimale ν_s et la quantité $h \nu_s$ est le travail W_s opéré sur l'électron pour l'extraire. Si le photon a une fréquence ν strictement supérieure à ν_s , la différence entre son énergie et le travail d'extraction est convertie en énergie cinétique pour l'électron. Ainsi :

$$h \nu - h \nu_s = \frac{1}{2} m v_c^2$$

On retrouve bien la formule expérimentale précédente.

IV Les séries de raies d'émission de l'hydrogène

Rappelons qu'un gaz comme de l'hydrogène enfermé dans une ampoule de verre et soumis à des décharges électriques émet un spectre de raies. Certaines sont dans le visible d'autres dans l'infrarouge.

En 1888, un physicien suédois, Johannes Rydberg, propose une formule empirique pour décrire la série de raies observées par Balmer dans le spectre d'émission de l'hydrogène dans le domaine visible :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{4} - \frac{1}{m^2} \right)$$

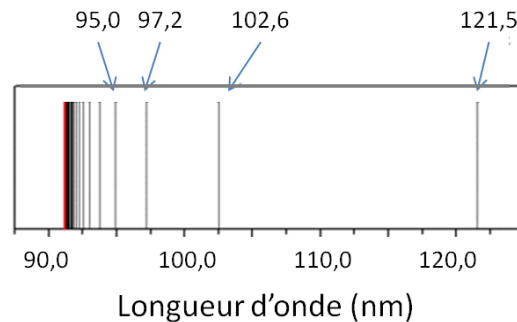
où m est un entier naturel tels que $m > 4$ et R_H la constante de Rydberg de valeur

$$R_H \approx 1,097 \times 10^7 \text{ m}^{-1}$$

Dans les années qui suivent, d'autres séries de raies sont identifiées, celle de Lyman en 1906, puis, dans l'infra-rouge, celle de Paschen en 1908 et celle de Brackett en 1922. La première formule proposée par Rydberg se voit alors généralisée sous la forme :

$$\frac{1}{\lambda} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

où n et m sont des entiers naturels non nuls avec $m > n$. $n = 2$ correspond à la série de Balmer, $n = 1$ à celle de Lyman, $n = 3$ à celle de Paschen et $n = 4$ à celle de Brackett. On donne ci-dessous la série de raies observée par Lyman.



Or pour une onde électromagnétique se propageant à la vitesse $c = 3,00 \times 10^8 \text{ m/s}$, la longueur d'onde est reliée à la vitesse et la fréquence par la relation :

$$\lambda = c T = \frac{c}{\nu}$$

Soit :

$$\frac{1}{\lambda} = \frac{\nu}{c}$$

Ainsi :

$$\frac{\nu}{c} = R_H \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

D'où :

$$h \nu = R_H h c \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right)$$

Or :

$$\frac{R_H h c}{e} = \frac{1,097 \times 10^7 \times 6,63 \times 10^{-34} \times 3,00 \times 10^8}{1,6 \times 10^{-19}} = 13,6 V$$

Donc, en exprimant l'énergie d'un photon dans une unité plus pratique, l'électron-volt (eV) :

$$h \nu = \left(\frac{-13,6}{n^2} \right) - \left(\frac{-13,6}{m^2} \right)$$

Interprétation :

La quantité $h \nu$ est l'énergie d'un photon émis par l'électron de l'atome d'hydrogène dont l'énergie totale passe d'un niveau à un autre. L'énergie d'un électron d'un atome d'hydrogène ne peut pas prendre n'importe quelle valeur, contrairement à l'énergie mécanique d'un satellite orbitant autour de la Terre. Cette énergie prend des valeurs discrètes dépendant d'un nombre entier, et qu'on qualifie de niveaux d'énergie quantifiés. Ces valeurs sont définies en électron-volt, pour n entier naturel non nul, par :

$$E_n = \frac{-13,6}{n^2}$$

La raison de la valeur négative de ces niveaux d'énergie est, qu'en mécanique classique, le calcul de l'énergie mécanique (énergie cinétique + énergie potentielle électrostatique) d'un électron orbitant autour d'un proton dans un mouvement circulaire est négative.

Les niveaux d'énergie de l'électron d'un atome d'hydrogène sont ainsi présentés sous forme d'un graphique formé de traits horizontaux correspondants aux différents niveaux. L'émission d'un photon est représenté par une flèche reliant un niveau vers un niveau plus bas, car l'électron perd de l'énergie en émettant un photon. Dans le cas de l'absorption d'un photon, la flèche est dirigée vers le haut.

