

1. Onde ou particule ?

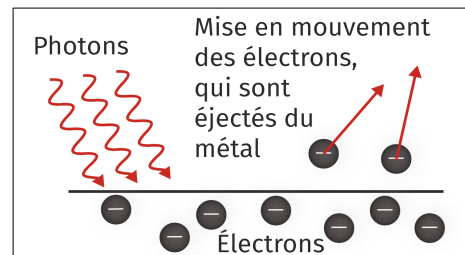
• Depuis toujours, les penseurs se sont interrogés sur la nature de la lumière, les deux hypothèses envisagées étant :

↳ la lumière serait de nature ondulatoire. Cette hypothèse est validée au XIX^e siècle par l'observation des phénomènes d'interférence, de diffraction ou encore de l'effet Doppler, sur des ondes lumineuses. Par ailleurs, les équations de Maxwell modélisent efficacement cet aspect ondulatoire.

↳ la lumière serait de nature corpusculaire, constituée d'un flux de particules. Cette dernière hypothèse manquant d'expériences pour la valider.

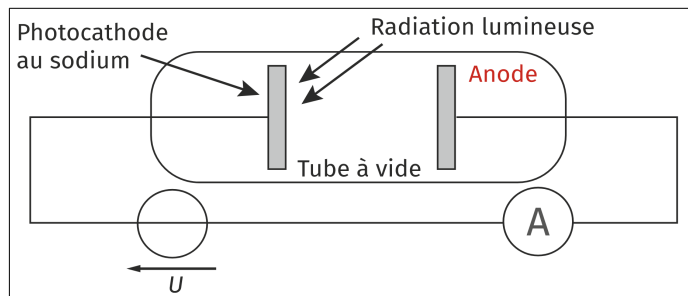
2.1. L'effet photoélectrique : description

• La découverte de l'effet photoélectrique est attribuée à Heinrich Hertz en 1887, quand découvre que des étincelles peuvent être produites par un rayonnement ultraviolet. En 1900, Philipp Lenard identifie les charges négatives éjectées lors de l'expérience comme étant des électrons



L'effet photoélectrique est l'émission d'électrons par un métal exposé à un rayonnement électromagnétique.

• Les électrons éjectés de la photocathode se trouvent alors dans un tube à vide. Certains atteignent l'anode et un courant électrique apparaît sur l'ampèremètre.



2.2. L'effet photoélectrique : observations

• Cette expérience présente des aspects inexplicables par la théorie ondulatoire :

↳ d'une part, aucun courant électrique n'est détecté si la fréquence de la lumière incidente ν (en Hz) est inférieure à une fréquence seuil ν_s , dépendant du métal.

↳ d'autre part, l'intensité de la lumière incidente reste sans effet sur l'émission d'électrons si la fréquence est trop faible.

• La conception ondulatoire qui prévalait à la fin du XIX^e siècle laissait au contraire présager un seuil d'intensité pour extraire les électrons, l'énergie lumineuse nécessaire pour les éjecter étant directement liée à l'intensité.

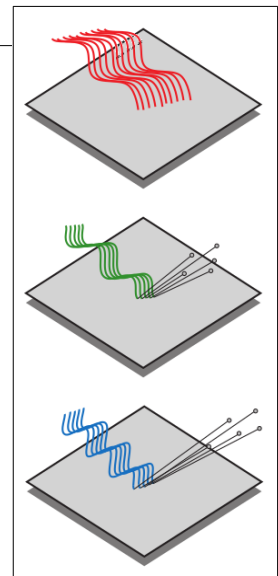
En conséquence, la théorie ondulatoire, pour laquelle l'énergie lumineuse est indépendante de la fréquence, restait impuissante à expliquer le seuil de fréquence.

2.3. Le modèle corpusculaire

• En 1905, Einstein explique cette observation à l'aide de l'hypothèse particulaire de la lumière : la lumière est un flux de particules et chaque particule (plus tard appelée photon) transporte un quanta d'énergie, dont la valeur est proportionnelle à la fréquence.

↳ Un unique photon, de fréquence suffisamment grande (bleu ou vert sur le schéma) possède donc assez d'énergie pour arracher un électron au métal. En revanche, multiplier les photons d'énergie trop faible (rouge) est inefficace pour arracher un électron.

• Albert Einstein obtiendra le prix Nobel de physique en 1921 pour cette découverte.



3.1. Énergie du photon

Le photon est la particule associée aux ondes électromagnétiques dont la lumière fait partie. C'est une particule sans masse qui se déplace à la célérité $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ dans le vide. La célérité « c » est une constante fondamentale de la physique.

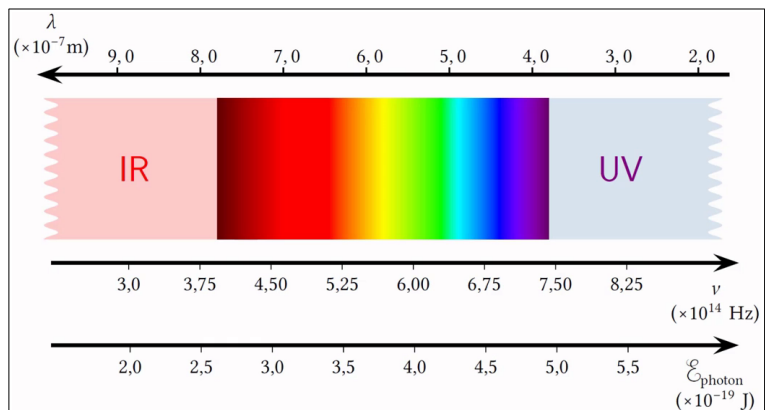
↳ Une lumière de fréquence ν est constituée de photons dont l'énergie vaut : $E_{\text{photon}} = h \cdot \nu$
Avec E en Joules (J) ν fréquence de la radiation en Hertz (Hz) et h constante de Planck $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$.

↳ Cette énergie peut aussi s'exprimer : $E_{\text{photon}} = \frac{h \cdot c}{\lambda}$ puisque $\nu = \frac{c}{\lambda}$.

Avec E en Joules (J) λ en mètres (m) et c vitesse de la lumière dans le vide en $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$.

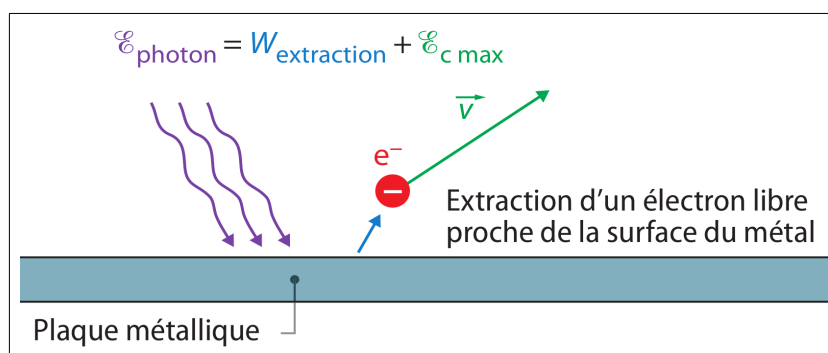
↳ Les énergies des particules s'expriment fréquemment en « électron-volt » Il s'agit d'un multiple du joule qui vaut : $1 \text{ e-V} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$.

• L'énergie d'un photon croît avec sa fréquence et diminue avec sa longueur d'onde dans le vide.



3.2. Conservation de l'énergie

• En absorbant un photon, l'électron gagne l'énergie E_{photon} qui lui permet de s'extraire du métal avec une énergie cinétique E_c .



↳ On appelle travail d'extraction $W_{\text{extraction}}$, l'énergie minimale à fournir au métal pour en extraire un électron proche de la surface.

La conservation de l'énergie lors de l'absorption d'un photon et de l'éjection d'un électron avec une énergie cinétique E_c est :

$$E_{\text{photon}} = W_{\text{extraction}} + E_c$$

↳ Ce bilan peut être réécrit : $h \cdot \nu = W_{\text{extraction}} + E_c$.

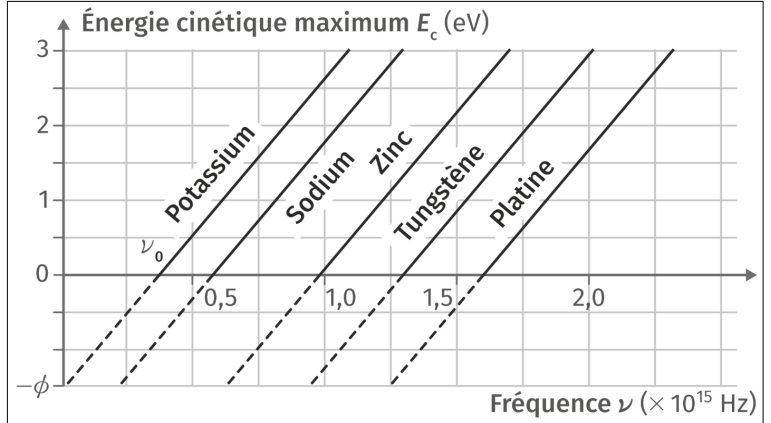
↳ On retrouve bien l'existence d'une fréquence seuil en-deça de laquelle le photon ne peut être

extrait : $E_c \geq 0$ si $\nu \geq \frac{W_{\text{extraction}}}{h} = \nu_s$.

L'énergie cinétique de l'électron éjecté vaut :

$$E_c = \frac{1}{2} m \times v^2 = h \times (\nu - \nu_s) \text{ avec } \nu \geq \nu_s$$

E_c en J, $m = 9,11 \cdot 10^{-31}$ kg, v en $m \cdot s^{-1}$, ν en Hz



4. Exemples d'interaction photon - matière

• Au-delà de l'effet photoélectrique, de nombreuses expériences mises en œuvre au XX^e siècle mettent elles aussi en évidence la nature particulière de la lumière :

↳ les spectres de raies des lampes spectrales

↳ les spectroscopies UV-Visible ou IR

↳ l'effet Compton : c'est la collision d'un photon et d'un électron. Contrairement à l'effet photoélectrique, le photon rebondit sur l'électron - qui est alors mis en mouvement au sein du métal - et perd de l'énergie.

De nombreuses expériences ne peuvent être expliquées que par une lumière constituée d'un flux de photons. La lumière ne peut pas être uniquement décrite comme une onde.

• Applications pratiques de l'effet photoélectrique : capteurs photos, panneaux photovoltaïques, etc. ...

5. Onde ou particule

• La lumière possède donc un double aspect ondulatoire et corpusculaire puisque elle interagit avec la matière comme une particule (effet photoélectrique, etc. ...) et se propage comme une onde (interférences, etc. ...) Le consensus scientifique aujourd'hui est que :

La lumière est un objet quantique à la fois onde et particule.

