

Chapitre 20

La lumière : un flux de photons

Paragraphe 1 – Caractéristiques du photon

Pour interpréter l'effet photoélectrique, Albert Einstein fait en 1905 l'hypothèse révolutionnaire que la lumière peut être vue comme un **flux de particules**, nommées photons par la suite.

Dans le **modèle particulaire**, un photon associé à un rayonnement monochromatique de fréquence notée nu minuscule (ν) ou de longueur d'onde dans le vide lambda minuscule (λ) :

- possède une masse nulle ;
- se déplace dans le vide à la vitesse c minuscule = deux cent quatre-vingt-dix-neuf millions sept cent quatre-vingt-douze mille quatre cent cinquante-huit mètres par seconde ($c = 299792458 \text{ m.s}^{-1}$) ;
- a une énergie $|\Delta E|$ donnée par la relation :

$$|\Delta E| = h \times \nu$$

Avec :

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

Unités SI :

L'énergie du photon, $|\Delta E|$, est en joule de symbole J majuscule.

h minuscule, la constante de Planck, $h = 6,63 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$

c minuscule en mètre par seconde de symbole $(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$

ν , la fréquence de l'onde associée, en hertz de symbole (Hz)

λ , la longueur d'onde dans le vide, en mètre de symbole (m).

Les échanges d'énergie entre lumière et matière se font de manière **discrète**, par « **paquets** » d'énergies minimales correspondant à la totalité de l'énergie d'un photon.

Paragraphe 2 - Effet photoélectrique

Paragraphe 2.1. - Description

L'**effet photoélectrique** est l'émission d'électrons par un matériau sous l'action de la lumière.

Ce phénomène ne se produit que si la fréquence du rayonnement, notée nu minuscule (ν), est supérieure à une **fréquence seuil**, notée nu minuscule indice zéro (ν_0), qui dépend de la nature du matériau, mais pas de la puissance du faisceau lumineux.

Observé par l'ingénieur et physicien allemand Heinrich Hertz en 1887, l'effet photoélectrique ne trouve pas d'interprétation avec la **conception ondulatoire** de la lumière, bien que celle-ci se soit imposée avec succès en expliquant notamment le phénomène d'interférences de la lumière.

L'effet photoélectrique présente une grande importance historique car son étude a été décisive pour remettre en cause la théorie des ondes électromagnétiques et proposer un nouveau modèle dit particulaire, qui conduira à la naissance de la **physique quantique**.

Remarque

L'effet photoélectrique désigne plus généralement la modification des propriétés électriques d'un matériau sous l'effet de la lumière. Il inclut la photoconductivité (faculté du matériau à conduire le courant selon l'éclairement) et l'émission photoélectrique (éjection d'électrons en dehors du matériau éclairé) parfois appelée effet photoélectrique « externe ».

Paragraphe 2.2. - Interprétation de l'effet photoélectrique

Un atome ne peut absorber qu'un seul photon à la fois. Si un photon possède une énergie suffisante, il peut être absorbé et il y a émission d'un électron.

Pour que l'effet photoélectrique se produise, l'énergie du photon incident, valeur absolue de l'énergie $|\Delta E| = h \times \nu$ du photon incident doit au moins être égale au travail d'extraction, énergie minimale à fournir au métal pour qu'un électron soit éjecté de sa surface.

En notant W_e , le travail d'extraction du métal :

si $\nu < \nu_0$, on a $|\Delta E| < W_e$, alors aucun électron n'est extrait du métal ;

si $\nu \geq \nu_0$, on a $|\Delta E| \geq W_e$, alors un électron peut être extrait.

Cela explique l'existence de la fréquence seuil ν_0 pour laquelle l'énergie $h_0 \times \nu_0$ du photon associé est égale au travail d'extraction W_e .

Lorsque l'énergie du photon incident est supérieure au travail d'extraction, l'excès d'énergie est transféré sous forme d'énergie cinétique à l'électron émis. La relation d'Einstein qui traduit ce bilan d'énergie est :

$$h \times \nu = W_e + E_{c,\max}$$

Unités SI :

h minuscule en joules secondes (J.s)

ν en hertz (Hz).

W_e et $E_{c,\max}$ en joules (J).

Paragraphe 2.3. Cellule photoélectrique

Une **cellule photoélectrique** est formée d'une photocathode susceptible de subir l'effet photoélectrique, séparée, dans une ampoule où règne le vide, d'une anode dont le rôle est de collecter les électrons émis sous l'action de la lumière.

La tension U imposée entre la photocathode et l'anode permet d'accélérer les électrons émis qui sont alors plus efficacement recueillis.

Paragraphe 3 - Interaction photon-matière

Paragraphe 3.1. Quantifications des énergies de la matière

Comme les atomes, toutes les entités (molécules, ions, noyaux) ainsi que leurs assemblées (métaux, semi-conducteurs...) possèdent des niveaux d'énergie quantifiés, formant parfois des bandes d'énergies constituées de nombreux niveaux très proches.

Paragraphe 3.2. Applications de l'interaction photon-matière

L'interaction photon-matière intervient pour les capteurs de lumière (photorésistance, photodiode...), les cellules photovoltaïques des panneaux solaires, les diodes électroluminescentes des écrans de smartphones, les spectroscopies UV-visible et IR, etc.

Une cellule photovoltaïque d'un panneau solaire convertit une partie de l'énergie lumineuse reçue en énergie électrique.

Le rendement de la conversion énergétique, noté η minuscule (lettre grecque η), s'exprime par la relation :

$$\eta = \frac{P_{\text{utile}}}{P_{\text{reçue}}} = \frac{P_{\text{max}}}{P_{\text{lum}}}$$

η est sans unité

P_{max} est la puissance électrique maximale associée au fonctionnement de la cellule, en watt de symbole W majuscule (W)

P_{lum} est la puissance de la lumière reçue par la cellule en watt de symbole W majuscule (W).

Les rendements des cellules photovoltaïques sont faibles, de l'ordre de 10 %.

L'un des enjeux énergétiques est d'améliorer ce rendement.