

PHYSIQUE 3

ASPECT CORPUSCULAIRE DE LA LUMIÈRE

Expériences

Table des matières

1	Dualité onde-particule	2
1.1	Historique	2
1.1.1	La catastrophe ultraviolette	2
1.1.2	L'effet photoélectrique	3
1.1.3	Dualité onde-particule	3
2	Conséquences pour la lumière	4
2.1	Energie d'un photon	4
2.2	Energie d'un flux de photons	4
2.3	Energie reçue par une cellule photovoltaïque	5

On a vu dans le chapitre précédent que la lumière n'était de nature ni ondulatoire ni corpusculaire mais que selon l'expérience considérée, une de ces deux descriptions était la plus utile pour décrire les phénomènes observés. Nous avons dans le chapitre précédent considéré la lumière comme une onde électromagnétique, ce qui nous a permis de comprendre la diffraction ou les interférences lumineuses entre autres. Nous allons dans ce chapitre considérer que la lumière est composée de particules.

1 Dualité onde-particule

1.1 Historique

A la fin du 19ème siècle, il semblait que la physique était une science bien établie. Par exemple, Lord Kelvin déclare que *"Il n'y a plus rien à découvrir en physique aujourd'hui, tout ce qui reste est d'améliorer la précision des mesures"*. Seulement, en seulement une dizaine d'années, cette idée allait être complètement chamboulée avec l'avènement de deux théories nouvelles : la relativité et la mécanique quantique.

L'avènement de ces deux théories a été possible parce qu'elle expliquait les phénomènes observés lors d'expériences de manière plus précise et plus convaincante que les théories établies jusque là et que Lord Kelvin pensait parfaites.

En ce qui concerne la nature de la lumière, il y avait plusieurs différences entre les prédictions théoriques et les données expérimentales.

1.1.1 La catastrophe ultraviolette

D'après la théorie classique, un corps chauffé émet de la lumière, et le maximum émis dépend de la température du corps (on a vu ça dans le cas des sources lumineuses thermiques). Le problème est que les lois utilisées au 19ème siècle pour décrire ce phénomène prédisent que la lumière émise par un corps qui a la température du Soleil par exemple a un spectre qui montre que l'émission de rayonnement ultraviolets devient infinie. On observe donc un écart entre le spectre attendu par la théorie, et ceux mesurés expérimentalement.

Le physicien qui a le premier proposé une explication convaincante fut Max Planck. Il a supposé que la lumière qui était émise à la fréquence ν était en fait émise par des particules oscillantes qui ne pouvaient donner qu'une énergie multiple

à $E = h\nu$ où h est une constante d'aide (*hilfskonstant* en allemand).

Par analyse dimensionnelle, on trouve que h doit s'exprimer en J.s.

Si on accepte l'explication de Planck, alors, la catastrophe ultraviolette disparaît, car il existe une longueur d'onde λ en dessous de laquelle les excitateurs ne peuvent pas émettre, ce qui empêche la catastrophe ultraviolette.

1.1.2 L'effet photoélectrique

L'explication de Planck en termes de multiples d'énergies fondamentales $h\nu$ était considérée, même par lui-même, comme un artifice de calcul sans réalité physique.

Le physicien qui va reprendre cette idée et lui donner une crédibilité physique est Einstein, lorsqu'en 1905 il a proposé une explication à l'effet photoélectrique en terme de "grains de lumière".

Dans l'effet photoélectrique, on observe que de la lumière peut arracher des électrons à un métal. Toutefois, il faut que la lumière présente des longueurs d'onde plus petite qu'une valeur seuil (qui dépend du métal), sinon il n'y a pas d'effet photoélectrique, quelle que soit la valeur de l'intensité lumineuse.

Einstein adapte alors l'idée de Planck et explique que la lumière à la fréquence ν est en fait constitué de "paquets d'énergie" $E = h\nu$.

Alors si la fréquence est assez élevée (donc la longueur d'onde assez petite), les paquets ont chacun assez d'énergie pour arracher un électron (l'énergie nécessaire étant fixe et dépendant du matériau), alors que ce n'est plus le cas pour des fréquences faibles, et donc aucun paquet ne peut arracher d'électrons, même s'il y en a beaucoup.

On appelle depuis ces grains de lumière des **photons**, et h la constante de Planck. $h \simeq 6,63 \times 10^{-34}$ J.s. Le prix Nobel qu'Einstein a reçu en 1921 est la conséquence de cette explication, introduisant le concept de "quanta" de lumière, et donc les débuts de la mécanique quantique.

1.1.3 Dualité onde-particule

Cette explication a pour la première fois montré que selon l'expérience considérée, il faut considérer la lumière tantôt comme une onde, et tantôt comme constituée de particules. La mécanique quantique est la conséquence à rebours de cette dualité : Louis De Broglie a lui montré que pour certaines expériences il était nécessaire de

considérer ce que l'on considérerait comme des particules (par exemple des électrons) comme des ondes (il est par exemple possible de faire des interférences d'électrons).

2 Conséquences pour la lumière

2.1 Energie d'un photon

Ainsi une onde lumineuse à la fréquence ν ou à la pulsation ω peut être considérée comme constituée de particules, toutes à l'énergie $E = h\nu = \hbar\omega$ où $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ est la constante de Planck réduite ($\hbar \simeq 10^{-34}$ J.s).

Exercice : trouver la longueur d'onde correspondant à un photon d'énergie E . Quel est l'énergie d'un photon émis par la raie jaune du sodium à 589 nm ?

On verra plus tard que les atomes ne peuvent prendre que certaines valeurs des énergies, on parle de valeurs discrètes. En effet, les électrons ne peuvent pas prendre n'importe quelle position autour du noyau, ils doivent se répartir sur des orbites bien précises appelées couches électronique, et l'énergie d'attraction coulombienne entre le noyau chargé positivement et l'électron est alors quantifiée. Par exemple, les énergies que peuvent prendre un atome d'hydrogène sont discrètes et prennent les valeurs $E_n = \frac{-13,6 \text{ eV}}{n^2}$ (l'électron-volt, symbole eV est une unité d'énergie adaptée à l'échelle atomique, $1 \text{ eV} = 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}$), où n est un entier numérotant la couche électronique dans laquelle est située l'électron (plus n est grand, plus l'électron est loin du noyau). Lorsqu'il passe d'un état m d'énergie E_m à un état n d'énergie $E_n < E_m$, l'électron se rapproche du noyau, donc perd de l'énergie et l'atome émet un photon qui emporte l'énergie manquante.

Exercice : Calculez la longueur d'onde correspondant au passage de l'état 4 à l'état 2 d'un atome d'hydrogène. Quel est le domaine ?

2.2 Energie d'un flux de photons

Pourquoi on ne voit pas habituellement l'aspect corpusculaire de la lumière ? Prenons une source laser He-Ne de puissance 1 mW et qui émet à 633 nm. L'énergie de chaque photon est donnée $E_{ph} = \frac{hc}{\lambda} = 3,1 \times 10^{-19} \text{ J}$. En une seconde, le laser

envoi donc n_{ph} photons avec :

$$n_{ph} = \frac{P \times 1 \text{ s}}{E_{ph}} = 3,2 \times 10^{15}$$

C'est considérable, mais bien plus petit que \mathcal{N}_A .

On pourrait imaginer réduire la puissance du laser d'un facteur 10^9 avec un laser de puissance 1 pW. On trouverait alors un nombre de photon par seconde de l'ordre de 3×10^6 et donc avec des photons qui vont à c , des photons séparés d'environ 100 m. Avec un détecteur avec une résolution temporelle du dixième de microseconde, on devrait alors voir des photons uniques. Ce n'est pourtant pas le cas, car les photons sont émis aléatoirement par le laser, on peut donc en recevoir plusieurs d'un coup. Toutefois, il existe des sources de photons uniques qui ont permis de montrer de manière convaincante le double aspect de la lumière, ondulatoire et corpusculaire.

2.3 Energie reçue par une cellule photovoltaïque

Une cellule photovoltaïque est un composant essentiel des panneaux solaires : c'est le composant qui transforme l'énergie lumineuse apportée par les photons en courant électrique transporté par des électrons.

On peut raisonner par analyse dimensionnelle afin de trouver les grandeurs pertinentes lors du calcul de l'énergie reçue par un panneau solaire :

- l'énergie reçue est proportionnelle à la surface du panneau solaire ;
- elle est proportionnelle au temps d'exposition.

On a donc $E_r = \mathcal{E}St$ avec \mathcal{E} qui doit s'exprimer en $\text{J.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ou encore en W.m^{-2} . On appelle \mathcal{E} l'éclairement énergétique et il correspond à la puissance rayonnée par la source lumineuse par unité de surface, perpendiculairement à cette surface. Si la surface est inclinée d'un angle θ par rapport à la perpendiculaire, il faut multiplier l'énergie reçue par $\cos \theta$.

Au niveau du sol, l'éclairement énergétique dû au soleil est de $\mathcal{E} \simeq 10^3 \text{ W.m}^{-2}$.
Exercice :

1. Quel est l'intérêt d'avoir des panneaux solaires orientables et inclinables ?
2. Calculer l'énergie maximale reçue par un panneau solaire de 1 m^2 pendant 1 heure ?

3. En supposant que le rendement des panneaux solaires les plus efficaces est de l'ordre de 30 %, quelle doit-être la surface de panneau solaire pour faire fonctionner une bouilloire électrique de 2 kW ?